

「分散型エネルギー一次世代電力網構築実証事業」
事後評価報告書

2020年5月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

2020年5月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
理事長 石塚 博昭 殿

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会 委員長 小林 直人

NEDO技術委員・技術委員会等規程第34条の規定に基づき、別添のとおり評価結果について報告します。

「分散型エネルギー一次世代電力網構築実証事業」
事後評価報告書

2020年5月

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

目次

はじめに	1
審議経過	2
分科会委員名簿	3
評価概要	4
研究評価委員会委員名簿	7
研究評価委員会コメント	8
第1章 評価	
1. 総合評価	1-1
2. 各論	1-5
2. 1 事業の位置付け・必要性について	
2. 2 研究開発マネジメントについて	
2. 3 研究開発成果について	
2. 4 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて	
3. 評点結果	1-19
第2章 評価対象事業に係る資料	
1. 事業原簿	2-1
2. 分科会公開資料	2-2
参考資料1 分科会議事録	参考資料 1-1
参考資料2 評価の実施方法	参考資料 2-1

はじめに

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構においては、被評価プロジェクトごとに当該技術の外部専門家、有識者等によって構成される研究評価分科会を研究評価委員会によって設置し、同分科会にて被評価対象プロジェクトの研究評価を行い、評価報告書案を策定の上、研究評価委員会において確定している。

本書は、「分散型エネルギー次世代電力網構築実証事業」の事後評価報告書であり、NEDO技術委員・技術委員会等規程第32条に基づき、研究評価委員会において設置された「分散型エネルギー次世代電力網構築実証事業」（事後評価）分科会において評価報告書案を策定し、第61回研究評価委員会（2020年5月15日）に諮り、確定されたものである。

2020年5月
国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

審議経過

● 分科会（2019年11月1日）

公開セッション

1. 開会、資料の確認
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法について
5. プロジェクトの概要説明

非公開セッション

6. プロジェクトの詳細説明
7. 全体を通しての質疑

公開セッション

8. まとめ・講評
9. 今後の予定、その他、閉会

● 第61回研究評価委員会（2020年5月15日）

「分散型エネルギー一次世代電力網構築実証事業」

事後評価分科会委員名簿

(2019年11月現在)

	氏名	所属、役職
分科会長	みたに やすのり 三谷 康範	九州工業大学 理事・副学長 (研究・産学連携担当)
分科会長 代理	ほうじょう まさひで 北條 昌秀	徳島大学 大学院社会産業理工学研究部 理工学域 電気電子系 教授
委員	あおき むつみ 青木 睦	名古屋工業大学 大学院工学研究科 准教授
	おおたに のぼる 大谷 昇	関西学院大学 理工学部 先進エネルギーナノ工学科 教授
	かき がの ひろあき 柿ヶ野 浩明	立命館大学 理工学部 電気電子工学科 教授
	きた ひろゆき 北 裕幸	北海道大学大学院 情報科学研究院/情報科学院 研究院長/学院長 教授
	さとう いくこ 佐藤 育子	東京電力ホールディングス株式会社 執行役員 安全推進室長

敬称略、五十音順

評価概要

1. 総合評価

本プロジェクトは、再生可能エネルギーの導入拡大を図るため、配電系統にパワーエレクトロニクス技術を用いた電圧制御機器を導入することを前提として、特に、コンパクト化、軽量化、低コスト化、メンテナンス性等の面において優れた、SiC パワー半導体を利用した次世代電圧制御機器の技術開発を行うことを目的として実施された。細かな試験項目まで明確にして計画的に試験が行われていること、シミュレーションやグリッドの各段階で膨大な試験が行われ、抽出された課題点をフィードバックして改善につなげてきていることは評価できる。さらに、その適用に向け、共通基盤技術となる項目を整理し、将来の配電系統のあり方を明確化し、運用面での特性を整理したことは、将来の技術開発などへ資するものである。

一方で、次世代 TVR (Thyristor type step Voltage Regulator : サイリスタ式自動電圧調整器) (CVC (Continuous Voltage Compensator : 連続電圧調整器)) は多くの機能を実現できる機器であるが、各送配電事業者が必要としている状況が不明である。既存の TVR では解決できない課題を明確にし、それを実系統に適用するための仕様を明らかにして開発目標を設定するべきである。また、その中で、何を守ってどの部分を攻めるかのメリハリの効いたシステム戦略を取り入れなければ、今後の世界市場では取り残されたシステムになってしまう恐れがある。

今後、共通基盤技術として確立させ実用化させるためには、研究開発において、電力会社とメーカーの共同体制の整備と知財の取扱いのコンセンサスが必要であると思われる。

2. 各論

2. 1 事業の位置付け・必要性について

再生可能エネルギーを今後大量導入していく上で必須となる技術を取り扱った、非常に重要且つタイムリーな事業である。再エネの導入拡大と電力設備の安定性確保をいかに両立させていくかは、公共性、社会性の高い課題であると共に、複数企業の連携、知財に関する配慮等から、本事業に NEDO が関与することの意義は十分に認められる。また、電力各社へのヒアリングや文献調査などから電力系統における問題点の整理がなされ、それに対して、将来の実用化を見据えた開発項目を適切に設定して事業が行われている。

一方で、投じた研究開発が社会メリットを持つために必要な戦略に関する議論を、2040-50 年の未来想定の中に位置付けるべきであると思われる。

2. 2 研究開発マネジメントについて

研究開発の実施体制および進捗管理については、機器・システム開発者と共通基盤技術開発者との連携において、検討作業会が有効に機能していることが確認された。その際、メー

カーのノウハウについて、知財を守る観点から体制を見直し、柔軟に対応されたことも評価できる。また、グリッド試験の各段階での試験の目的を明確にしている。さらに、SVC (Static Var Compensator : 無効電力補償装置) 開発において高調波問題が生じた時点での実施項目の修正は適正であった。

一方で、研究開発項目である機器・システムの開発と共通基盤技術の開発は、相互にフィードバックを行いながら開発が進められているが、フィージビリティスタディの立ち位置が明確ではなく、各項目間の連携という意味でプロジェクト全体の戦略の明確化に影響を与えているように思われる。

2. 3 研究開発成果について

一部試験に不具合があったものの、期間内に全開発項目を完了し、SiC モジュールを活用した次世代の電圧調整装置が開発できたことは高く評価できる。その不具合についても、実施者が自主的に開発を継続して問題を解決し、耐環境試験以外全て達成している。また、汎用電力機器への SiC 素子応用は他に例を見ないものであり、世界的に見ても注目される研究開発成果である。論文や学会発表など、成果の普及についても十分な活動を行っている。

一方で、太陽光発電が大量に配電系統に接続された場合の電圧制御に関して、本プロジェクトで開発した機器と競合技術との客観的な比較評価が十分には行われておらず、開発機器システムが中長期的に優位性を持って市場性を確保するかどうかの判断材料が不足している。

今後の装置開発については、一部検討項目が残されており、SiC 素子を活用した電圧調整装置の実適用に向け、さらに検討を進められることを期待したい。特に、従来機器の SiC モジュールを単に SiC モジュールに置き換えただけでは、SiC のポテンシャルを十分に発揮できるとは思えないので、SiC モジュールの性能を最大限に活かす機器設計をさらに進めて頂きたい。

2. 4 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

SiC 素子の価格が低下すれば、機器やシステムとしての市場性を持つところまで開発が行われたことは評価に値する。普及に向けて、メーカー主体で設計・開発を行って電力会社に提案していくスタイルも極めてリーズナブルであり、市場で機能していくものとする。また、フィージビリティスタディにおいては、多種多様な条件が整理されたうえで結果が導かれているため、例えば太陽光発電の導入限界量とその決定要因との因果関係の検討や、準最適解の考察などに資することが見込まれる成果が得られている。

一方で、製品化、量産化、実適用化に向けた、さらなる詳細な課題の整理とその課題の解決策の検討が必要である。具体的には、SiC としての能力を最大限に活かす機器構成を目指す必要がある中で、厳しいコスト環境にある配電系統への導入を目指しているためにスペックの決め方が定まっていない。市場性を語る上で、中期でどのような社会環境があるかを見定め、戦略的な機器開発目標が設定されていると、より事業化を目指す方向性が見えていたと思われる。

今後、SiC 素子のコスト競争力について、どのように取り組むのか、さらなる検討が必要である。また、共通基盤技術として確立させ実用化させるために、研究開発においては、電力会社とメーカーの共同体制の整備と知財の取扱いのコンセンサスが必要であると思われる。

研究評価委員会委員名簿

(2020年5月現在)

	氏 名	所属、役職
委員長	こばやし なおと 小林 直人	早稲田大学 参与・名誉教授
委員	あさの ひろし 浅野 浩志	一般財団法人電力中央研究所 エネルギーイノベーション 創発センター 研究参事
	あたか たつあき 安宅 龍明	先端素材高速開発技術研究組合 (ADMAT) 専務理事
	かめやま ひでお 亀山 秀雄	東京農工大学 名誉教授
	ごないかわひろし 五内川 拓史	株式会社ユニファイ・リサーチ 代表取締役社長
	さく まいちろう 佐久間 一郎	東京大学大学院 工学系研究科 教授
	たからだ たかゆき 宝田 恭之	群馬大学 大学院理工学府 環境創生部門 特任教授
	ひらお まきひこ 平尾 雅彦	東京大学大学院 工学系研究科 化学システム工学専攻 教授
	まつい としひろ 松井 俊浩	情報セキュリティ大学院大学 情報セキュリティ研究科 教授 ／国立研究開発法人産業技術総合研究所名誉リサーチャ
	まるやま まさあき 丸山 正明	技術ジャーナリスト／横浜市立大学大学院非常勤講師
	よしかわ のりひこ 吉川 典彦	名古屋大学 名誉教授
	よしもと ようこ 吉本 陽子	三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社 政策研究事業本部 経済政策部 主席研究員

敬称略、五十音順

研究評価委員会コメント

第61回研究評価委員会（2020年5月15日開催）に諮り、以下のコメントを評価報告書へ附記することで確定した。

- SiC パワー半導体を利用した次世代電圧制御器機開発は世界的にも我が国がリードしている分野であるので、技術の優位性を明確にしつつ、電圧制御素子の低コスト化をさらに推進し、早期の実用化を期待したい。また今後本技術に関する社会的プラットフォームの形成も必要である。

第1章 評価

この章では、分科会の総意である評価結果を枠内に掲載している。なお、枠の下の箇条書きは、評価委員の主な指摘事項を、参考として掲載したものである。

1. 総合評価

本プロジェクトは、再生可能エネルギーの導入拡大を図るため、配電系統にパワーエレクトロニクス技術を用いた電圧制御機器を導入することを前提として、特に、コンパクト化、軽量化、低コスト化、メンテナンス性等の面において優れた、SiC パワー半導体を利用した次世代電圧制御機器の技術開発を行うことを目的として実施された。細かな試験項目まで明確にして計画的に試験が行われていること、シミュレーションやグリッドの各段階で膨大な試験が行われ、抽出された課題点をフィードバックして改善につなげてきていることは評価できる。さらに、その適用に向け、共通基盤技術となる項目を整理し、将来の配電系統のあり方を明確化し、運用面での特性を整理したことは、将来の技術開発などへ資するものである。

一方で、次世代 TVR (Thyristor type step Voltage Regulator : サイリスタ式自動電圧調整器) (CVC (Continuous Voltage Compensator : 連続電圧調整器)) は多くの機能を実現できる機器であるが、各送配電事業者が必要としている状況が不明である。既存の TVR では解決できない課題を明確にし、それを実系統に適用するための仕様を明らかにして開発目標を設定するべきである。また、その中で、何を守ってどの部分を攻めるかのメリハリの効いたシステム戦略を取り入れなければ、今後の世界市場では取り残されたシステムになってしまう恐れがある。

今後、共通基盤技術として確立させ実用化させるためには、研究開発において、電力会社とメーカーの共同体制の整備と知財の取扱いのコンセンサスが必要であると思われる。

〈肯定的意見〉

- ・ 日本が得意とするデバイスや機器の性能を最大限に活用するための技術開発の観点では目標としていたシステムの開発が参加者の連携により行われたと考えられる。
- ・ 事業全体を通して、新パワーデバイスから機器開発、そして模擬系統から実系統試験にいたるまで、通常、縦割りとなりがちな研究者らが横串を通して事業を推進できた点は高く評価されるべき点と考えられる。また、近未来から将来を描き出すフュージビリティスタディにおいては、不確実性が高いなかでも見通し良く整理されており、その成果のなかから個々の事情に応じて選択し参考にすることができるようになっていく点も評価に値する。
- ・ 文献調査や海外調査を含め膨大な資料の調査や電力会社などのヒアリングをもとに、適切な課題設定がなされている。配電用機器はコストダウンが求められており、その制約の中で SiC パワー半導体の特長を活かした電圧制御機器の開発がなされている。そして、細かな試験項目まで明確にして計画的に試験が行われていることやシミュレーション、実験室グリッド、模擬グリッド、実グリッド試験の各段階で膨大な試験が行われ、各段階で抽出された課題点をフィードバックして改善につなげてきていることや装柱性まで評価されていることは評価できる。配電系統は様々な条件や構成が考えられるが、これに対して、各電圧制御機器や集中制御について膨大なシミュレーションや実証試験が行われており、最終目標として設定された機能の動作や協調制御が

できる状態にあることは評価できる。数多くのシミュレーションや実証試験から、送配電事業者が将来の配電システムを構築する上で試験方法やシミュレーション方法などの有用なノウハウが蓄積されたツールができたことは評価できる。

- 社会的に極めて意義のあるプロジェクトで、開発成果も多岐に亘って十分得られたものとする。研究開発マネジメントにおいても大きな問題は見られず、論文発表・特許出願件数も合格点を与えられるレベルとする。
- 本事業は、メーカー・送配電事業者・大学などの調整が必要であり、NEDO が関与し適切なマネジメントを行った結果、研究開発項目①～③の全てにおいて達成されており、評価できる。特に、研究開発項目②において、研究開発項目①で開発した機器を最終的に電力会社の実グリッドにて実証し、機器開発の共通基盤技術の構築に向けて多くの具体的な課題を挙げられたことは、大変価値のある成果である。
- 本プロジェクトは、再生可能エネルギーの導入拡大を図るため、配電システムにパワーエレクトロニクス技術を用いた電圧制御機器を導入することを前提として、特に、コンパクト化、軽量化、低コスト化、メンテナンス性等の面において優れた、SiC パワー半導体を利用した電圧制御機器（次世代電圧制御機器）の技術開発を行うことを目的として実施された。開発された SiC モジュールや電圧制御機器等は、実験室、模擬グリッド、実グリッドにおける詳細な実証評価等が行われており、得られた性能や特徴は研究開発目標を計画通りに十分に達成しているものと評価できる。また、これらの電圧制御機器を配電システムに導入する際に考慮しなければならない要件等を明確にし、共通基盤としてのパワエレ配電用機器の望ましい仕様・動作がまとめられた。以上の成果は、我が国が SiC パワー半導体を利用した電圧制御機器の製造や次世代配電システムの構築に際して、世界に先んじることにつながり、世界市場の中で我が国がリードできる重要分野になり得るものと期待できる。また、さらに長期的な視点（2050 年）に立った次々世代の配電システムの将来像についても詳細な検討が行われ、配電システムに様々な電圧制御機器や分散型の資源が接続されること、これらを全体としてマネジメントするための高度なシステムが必要であること等がまとめられた。この成果は将来の配電システムの開発・拡充計画を決定するうえで重要な指針になるものと期待できる。
- PV の大量導入に向けた系統安定化を目的とした次世代設備の開発は、極めて重要なテーマである。その設備をメーカー主導という従来にない体制で実施したことや、共通基盤技術を明確化したということは、研究開発の取組方法として大変意義あることである。また、SiC 素子を活用した次世代電圧調整装置の開発がほぼ完了したことも評価できる。さらに、その適用に向け、共通基盤技術となる項目の整理し、将来の配電システムのあり方を明確化し、運用面での特性を整理したことは、将来の技術開発などへ資するものである。

〈改善すべき点〉

- 現状での現場で不可欠な要件を取り入れてシステム仕様を決めること自体は間違っていないが、その中で、何を守ってどの部分を攻めるかのメリハリの効いたシステム戦

略を取り入れなければ今後の世界市場では取り残されたシステムになってしまう恐れがある。

- ・ 次世代 TVR(CVC)は、連続的な調整が可能であり直列機器としての電圧調整だけでなく並列機器としての機能も併せ持つことができ、多くの機能を実現できる機器であるが、各送配電事業者が必要としている状況が不明である。既存の TVR(サイリスタ型)では解決できない課題を明確にし、それを実システムに適用するための仕様を明らかにして開発目標を設定するべきであると考え。また、スマートインバータとの関係を含めて 2050 年の配電システムにおいて、どのような適用形態が考えられるのかを想定し、CVC の必要性について明確化する必要があると考え。将来の配電システムにおいて、特別高圧系統がどのように考慮されて、それによって、どのような機器や制御方法が必要なのかが不明である。とくに、配電用蓄電池やスマートインバータをどのように導入していくのがよいのか、そのときに CVC や AVR 付き柱上変圧器ユニットは、どのように有効に活用されているのか、それに対して、集中制御システムがどのように有効に機能するのか、そしてそれが将来のデマンドレスポンスなどを想定して DERMS にどのようにつながるのかを示すことができるとよいと考える。
- ・ SiC モジュールの性能を最大限に活かす機器設計については、改善の余地が残った。また、SiC モジュールの安定製造・供給は、今回の事業成果の実用化・事業化にとって不可欠なものとなるので、今後も継続した取り組みが必要になると考える。
- ・ 市場を広げるべく、国内だけでなく国外へ事業展開する際の課題についても、抽出・整理されることが望ましい。
- ・ 研究開発項目①、②、③の研究のさらなる連携をするために、全体の研究内容をトータル的に一層コーディネートするとよかったものと思われる。

〈今後に対する提言〉

- ・ 日本市場だけでなく世界市場も考え、かつ自動車や鉄道、民生機器の動向も考慮しつつ、今後の電力機器としての方向性を見極めながら標準化戦略を練る必要があると感じる。最も難しい部分であるが、どこかで見極めを行わなければせっかくの優れた機器・システムも世界市場では使われないものになってしまう懸念があるので、今後十分な議論を期待する。
- ・ 最新のデバイスを応用した機器の研究開発と実システムへの適用を実現した経験と、将来の電力網を描き出した経験が、それぞれの新進研究者の基礎体力として培われたと考えられるため、今後のさらなる事業展開と研究成果を期待するとともに、国内の他機関にも波及して新しい研究開発に繋がっていくことを期待したい。
- ・ 配電には様々なパターンがあるので答えが一つに決まるものではない。本事業で行われたシミュレーションモデルやシミュレーションツールが、将来の配電システムを研究するときの標準モデルや評価方法として、様々な研究者や技術者が活用することができるように成果の公表が望まれる。上位システムを含めた解析は、電圧問題だけでなく、高調波や不平衡などの電力品質の問題においても今後も重要になると考える。それら

の問題解決に向けて、CVCの適用可能性を示すことができるとよいと考える。

- SiCパワー素子・モジュールは、種々のNEDO事業（部署）において、肝となる技術課題であると考え。今後も、部署間の連携を密にして、社会実装に向けた努力を継続してほしい。
- メーカー主体で設計・開発を行う体制の確立には、引き続きメーカーや送配電事業者などとの調整が必要であるため、事業終了後も継続的にNEDOおよび電力中央研究所による成果の周知活動や調整などが進められることを期待する。
- 共通基盤技術として確立させ実用化させるためには、研究開発においては、電力会社とメーカーの共同体制の整備と知財の取扱いのコンセンサスが必要であると思われるので、今回の経験を是非、今後に生かしていただきたい。

2. 各論

2. 1 事業の位置付け・必要性について

再生可能エネルギーを今後大量導入していく上で必須となる技術を取り扱った、非常に重要且つタイムリーな事業である。再エネの導入拡大と電力設備の安定性確保をいかに両立させていくかは、公共性、社会性の高い課題であると共に、複数企業の連携、知財に関する配慮等から、本事業に NEDO が関与することの意義は十分に認められる。また、電力各社へのヒアリングや文献調査などから電力系統における問題点の整理がなされ、それに対して、将来の実用化を見据えた開発項目を適切に設定して事業が行われている。

一方で、投じた研究開発が社会メリットを持つために必要な戦略に関する議論を、2040-50 年の未来想定の中に位置付けるべきであると思われる。

〈肯定的意見〉

- ・ 太陽光発電が政府予想をはるかに超えて急増して、配電系統における電力輸送の様相が急変する中で、低炭素社会を目指す観点からは今後もさらなる急拡大を想定しなければならず、配電系統の電圧維持対策装置を考えることは重要である。特に多くのメリットを有する SiC 型の電力制御機器を世界に先駆けて開発する意義は大きい。送配電網の投資負担を誰が行うかの議論もある中で、民間だけでは投資が困難なこの分野を NEDO が主導する意義は大きい。
- ・ 分散型エネルギー源の多数台連系かつ柔軟な導入が社会から強く求められているなかで、配電系統を主たる対象とし、複数の事業者及び研究機関が横断的かつ密接な連携の下で実証事業を計画してこれを実施した点は、高く評価できる。このような事業実施体制は、民間事業者だけや、大学等研究機関のみによって自発的には成し得ないものであって、NEDO 事業として実施することは極めて妥当であったと考える。
- ・ 太陽光発電の連系量増加に対して、電力各社へのヒアリングや文献調査などから電力系統における問題点の整理がなされ、それに対して、将来の実用化を見据えた開発項目を適切に設定して事業が行われている。今後の電力分野への活用が期待される SiC モジュールについて、モジュールの実用化およびその特徴を活かした製品開発(小型化、軽量化)を目的としたことは評価できる。
- ・ 再生可能エネルギーを今後大量導入していく上で必須となる技術を取り扱った、非常に重要且つタイムリーな事業である。SiC モジュールを搭載した電力機器の実グリッド試験は世界でも類を見ない挑戦であり、次世代の電力網構築に向けて重要な一歩と考える。また、SiC モジュールを搭載した電力機器が存在せず、その実力・有用性を十分に把握できなかった段階においての公的資金投入 (NEDO 助成・委託) は妥当なものであったと考える。
- ・ 再生可能エネルギーの主力電源化に向けた施策が国内外で進められる中、配電系統においても太陽光発電の導入が今後も進むことが予想される。日本は他の国と比べて配電電圧が低いこともあり、配電系統の電圧上昇は喫緊の課題である。本事業の目的は、SiC MOSFET を用いた電圧補償機器による配電系統側からの課題解決であり、その成

果は将来の送配電システムのあり方の検討にも影響を与える重要なものである。また、電圧補償機器の開発・検証にはメーカー・送配電事業者・大学などの調整が必要であり、NEDO が関与し解決を主導すべき事業である。

- SiC パワー半導体の特長（設置場所制約の緩和、小型軽量化、メンテナンス性の向上）を活かした電圧調整機器の実用化や、配電システムにおけるその共通基盤技術の開発は、再エネの導入拡大や電力・機器システム産業における国際競争力の維持・向上に、大きく寄与するものと期待できます。また、特に配電系統に設置する電力機器を対象としているという点は、国内外の他の取り組み・事業と比較して、高い独自性・重要性が認められます。さらに、再エネが大量導入された将来のあるべき配電系統をも意識しながら事業を行っている点は、研究開発成果の将来性、発展性を明確にするうえで重要と考えます。再エネの導入拡大と電力設備の安定性確保をいかに両立させていくかは、公共性、社会性の高い課題であると共に、複数企業の連携、知財に関する配慮等から、本事業に NEDO が関与することの意義は十分に認められると考えます。
- 昨今、分散型エネルギーが系統へ大量連系されてきている状況に鑑み、系統安定に資する当研究は極めて意義ある。また、新しいパワエレの電圧調整機器の開発にあたり、NEDO が関与することで、電力会社やメーカー等関係者の総合調整機能が発揮された。さらに、SiC 素子の実用化に向けた研究として、今後期待される分野である。

〈改善すべき点〉

- 想定が 2020-30 年の状況に対応する機器開発と 2040-50 年の未来想定の見直しを行う内容になっており、機器開発にとって最も重要と考えられる開発機器のマーケット戦略となる中期の想定が十分には議論される体制になっておらず、その意味で、開発機器の将来ビジョンが薄められている印象がある。投じた研究開発が社会メリットを持つ十分な戦略を未来想定の中に位置付けるべきであると感じた。
- 次世代 TVR(CVC)は、連続的な調整が可能であり直列機器としての電圧調整だけでなく並列機器としての機能も併せ持つことができ、多くの機能を実現できる機器であるが、各送配電事業者が必要としている状況が不明である。既存の TVR(サイリスタ型)では解決できない課題を明確にし、CVC を実系統に適用するための仕様を明らかにして、開発目標を設定するべきであると考え。また、スマートインバータとの関係を含めて 2050 年の配電系統において、どのような適用形態が考えられるのかを想定し、CVC の必要性について明確化する必要があると考え。本事業の内容は複数のステークホルダーが関係しており、本事業で開発する共通基盤技術をどのように共有化し、将来の配電系統をどのようなプロセスで実現していくのかという見通しを明確にしておくべきであったと考える。バンク逆潮流に対する課題は、本事業の開始時でもある程度予見できたと考え。このため、上位系統を含めた解析の必要性とそれを見据えた電圧調整機器の開発仕様を想定しておく必要があったと考える。
- 特記すべきものはないが、先日の千葉での大規模停電などを考えると、電力機器を柱上に置くという従来方式に拘らず、SiC の特長を最大限に活かした新しい配電網の形

態も将来技術として（机上検討だけで構わないので）検討してもよかつたではないかと思う。

- プロジェクトの対象範囲に低圧 100V が含まれているが、この電圧レベルに対して SiC MOSFET を用いる意義が不明瞭であった。低圧 100V は、需要家側の対策範囲でもあるので、配電系統側からの課題解決であれば、高圧 6.6kV を対象とした機器開発に集中するという選択肢もあつたのではないか。

2. 2 研究開発マネジメントについて

研究開発の実施体制および進捗管理については、機器・システム開発者と共通基盤技術開発者との連携において、検討作業会が有効に機能していることが確認された。その際、メーカーのノウハウについて、知財を守る観点から体制を見直し、柔軟に対応されたことも評価できる。また、グリッド試験の各段階での試験の目的を明確にしている。さらに、SVC（Static Var Compensator：無効電力補償装置）開発において高調波問題が生じた時点での実施項目の修正は適正であった。

一方で、研究開発項目である機器・システムの開発と共通基盤技術の開発は、相互にフィードバックを行いながら開発が進められているが、フィージビリティスタディの立ち位置が明確ではなく、各項目間の連携という意味でプロジェクト全体の戦略の明確化に影響を与えているように思われる。

〈肯定的意見〉

- SiC モジュール製作、SVC, TVR, 柱上変圧器ユニット、制御システム、システム評価の一連の流れ研究開発を連携して実施する有効な実施体制が整えられて、適正に設定された計画期間中に効果的な開発がなされている。システム評価ではミニモデル、実証試験場、実フィールド、シミュレーションを組み合わせる総合的・効果的に評価が行われている。開発期間中に太陽光発電の設置容量が従来の想定以上に急伸し、配電系統での発電総量が実際に急増する中で、電圧制御に対する世の中の要求も現実的になってきており、その中で、本事業での開発システムによる制御の有効性を示せたことは意義深い。SVC 開発においてフィールド試験を行う際の高調波問題が生じた時点で、その先の実施項目の修正は適正であったと考えられる。
- 研究開発目標ならびに研究開発計画については、妥当であると考えられる。研究開発の実施体制および進捗管理については、機器・システム開発者らと共通基盤技術開発者らとの連携において、検討作業会が有効に機能していることが確認された。特に、中間評価以降、NEDO が積極的に関与し、マネジメントがなされた点については評価に値する。とりわけ、市場ニーズが明確でないうちは、ユーザーの真のニーズの発掘や、個別の実情にきめ細やかに応えることは、経験と実績に満ちた企業でなければ難しいが、NEDO が仲立ちして横串を通じた点は、高く評価できる点である。
- 最終目標の設定において、メンテナンス時期や寿命の考え方について、各電力会社のヒアリングなどをもとにして明確にしておき、その点については適切に設定されていると考える。研究開発スケジュールについて、実験室グリッド、模擬グリッド、実グリッド試験の各段階での試験の目的を明確にしている。また、各段階で抽出された課題点をフィードバックして改善につなげてきており、研究開発マネジメントは妥当であったと考える。メーカー主導で行われた事項について、細かな試験項目まで明確にして計画的に試験が行われている。途中で発見された高調波共振の問題について、それを適切に発見して対応することができる研究実施体制ができていたことは評価できる。
- 素子（モジュール）試作から、電力機器設計・組立、模擬グリッド・実グリッド試験、

そして将来的な電力網のフィージビリティスタディと、極めて広範囲の技術領域をカバーした非常に挑戦的な事業であった。さらにコストまでをも念頭においた目標設定は十分に実用化を意識したものであったと考える。実施体制においてもそれぞれの分野で実績のある組織が担当しており、全く問題はなかった。模擬グリッド試験の段階で高調波発生等の問題はあったものの、概ね計画通りに開発を遂行できたと考える。

- スケジュールは、研究開発項目①～③の全てにおいて概ね達成されている状況から妥当であると評価できる。研究開発項目①で開発した機器を、研究開発項目②において模擬系統や実系統で試験し、生じた問題を研究開発項目①にフィードバックすることで機器改修が適切に行われており、実施者間の連携が有効に機能している。研究開発の進捗管理については、メーカーの守秘事項などの観点から、NEDO を中心としたマネジメントに変更するなど、問題に対する柔軟な対応が評価できる。
- 研究開発の最終目標は、SiC パワー半導体の長所を十分に引き出し、一般送配電事業者のもつ共通のニーズにも叶うように定められており、妥当と考えられます。また、研究開発計画については、3つの研究開発項目を定め、それらを相互に有機的に関係付けながら、適切なスケジュールや実施体制の下で効率的に進めています。研究開発の進捗管理についても、NEDO が中心となって、立ち上げ期、実施期、終了期に分けて適切に進めております。また、国内の情勢変更や中間評価結果に適切に対応しながら進めています。
- 共通基盤的な技術を明確化する取組については、大変意義ある。また、その際、メーカーのノウハウについて、知財を守る観点から体制を見直しし、柔軟に対応されたことも評価できる。

〈改善すべき点〉

- 特許はプロジェクトとしての戦略が必ずしも明確に見えず、モジュール、機器を開発したメーカーの判断によって必要なものが出された印象である。これは、市場戦略・標準化戦略が明確化されていないことが原因ではないかと思われる。研究開発項目②の評価において「共通基盤を確立」とあるが、それらがどれだけの普遍性をもって他の事業において使えるものかは明確ではなく、今後の開発を加速する上で、それらがどれだけ有効に機能するのか見えにくいと思う。研究開発項目①と②は相互にフィードバックを行いながら開発が進められているが③の立ち位置がプロジェクト内での連携という意味で明確ではなく、プロジェクト全体の戦略の明確化に影響を与えているように思われる。(③から①②に対してフィードバックが与えられる体制ではなく、どこかに中期的な市場目標の明確化を行う機能があればよかった)
- 最終目標の設定において、将来の配電系統への適用形態から導き出された仕様が不明である。自励式 SVC(STATCOM)や次世代 TVR(CVC)のサイズや重量について、どのような根拠で設定したのかを明確にするべきであったと考える。本事業では、メーカーが主体的に仕様を提案するという目的を掲げているが、各メーカーが描く将来の電力システムのビジョンなども示して、必要な仕様が整理されていると良かった。バン

ク逆潮流の規制緩和によって、研究開発項目③の期間を2年延長しているが、上位系統(特別高圧系統)への影響は以前から文献等でも指摘されているので、事業開始時に考慮しておくべきであったと考える。研究開発項目③で示された2050年の配電系統において、DERMS、スマートインバータ、配電用蓄電池、IEDなどがどのような形態で適用されるのかを想定し、電圧制御機器や集中制御システムの実証にフィードバックできると良い。

- 当時の基礎素材(SiC ウェハ)の需給状況を考えると難しかったように思うが、SiCモジュールの開発を最初から2 in 1タイプで進めるべきであったように思う。そのことによって、高性能モジュールを使用した機器の設計・組立・試験時期が早まり、最終結果も違って来たのではと思う。また、PLが民間企業出身者であったために、組織間の連携が取りづらかった局面もあったのではないかと推察される。今後、このようなプロジェクト形態が増えてくることを考えると、何らかの工夫が必要である。
- 知的財産に関する戦略については、機器開発の共通的な技術仕様を標準化・規格化していくにあたり、特許が弊害とならないようにすることも考慮に入れる必要があると思われる。
- 電力会社の系統や設備に関するノウハウを早期に反映させるべく、メーカーと電力会社の連携をさらに密にし運営する方が手戻りも少なく効率的に進められたと思われる。

〈今後に対する提言〉

- ミニモデル、実証試験場、実フィールド、シミュレーションを組み合わせで行われたシステム評価の結果を体系的に取りまとめて、評価項目をどのように組み合わせれば効率的かつ機能的であるかを取りまとめて、今後の開発の短期間化に貢献できるようにアウトプットを整理いただくことが重要である。
- 実施者においてはノウハウの蓄積がなされたことと推察されるが、ノウハウの獲得と継承は、実施者自身が豊かな経験を積むことのできる環境と、これを引き継ぐことのできる円滑な業務体制に依っていると考えられる。研究開発マネジメントにおいては、実証事業の実施経験が一過性とならず、実施者全ての技術力のさらなる向上に繋がるよう、ノウハウの継承も意識しながら、例えば熟練者から新進技術者に亘る幅広い年齢層で実施体制が組織され、運営されることが望ましいと考える。
- 将来の配電システムを見据えて、上位系統との連系を含めて、短期・中期・長期のそれぞれの段階で適切な機器の適用と配電系統の構成について明確化する必要がある。現在、各電力会社で異なる設計思想で構築されている配電システムに対して、本事業の成果である共通基盤技術をどのように活用していくのか明確にできるとよいと考える。
- SiC 2 in 1 モジュールの改良をさらに進めると同時に、従来のSiモジュールでは到底達成できないような電力機器の小型化・軽量化に挑戦して頂きたいと思う。
- 研究開発項目③で検討された将来の配電系統の変化などが、機器開発の共通的な技術仕様にも変化を与えると考えられるため、メーカー主体で設計・開発を行う体制の確立には、継続的なNEDOによる複数の業界の調整が必要なのではないか。

- 「再エネ導入拡大」を具体的な研究開発目標とするために、NEDOが客観的な再エネ導入のシナリオをベンチマークとして設定することも有用かと思います。また、事業の海外展開を図るために、NEDOが適宜、海外の動向を調査、あるいは海外の送配電事業者等から情報収集し、関係者間で共有しながら進めていくことも有用かと思います。
- 共通基盤的な技術とするための、知財戦略を明確にする方がよい。
- 各社に公開する技術と、各社のノウハウとして守るべき技術を整理し、その技術の公開に向けたコンセンサスを醸成することも検討されるとよい。

2. 3 研究開発成果について

一部試験に不具合があったものの、期間内に全開発項目を完了し、SiC モジュールを活用した次世代の電圧調整装置が開発できたことは高く評価できる。その不具合についても、実施者が自主的に開発を継続して問題を解決し、耐環境試験以外全て達成している。また、汎用電力機器への SiC 素子応用は他に例を見ないものであり、世界的に見ても注目される研究開発成果である。論文や学会発表など、成果の普及についても十分な活動を行っている。

一方で、太陽光発電が大量に配電系統に接続された場合の電圧制御に関して、本プロジェクトで開発した機器と競合技術との客観的な比較評価が十分には行われておらず、開発機器システムが中長期的に優位性を持って市場性を確保するかどうかの判断材料が不足している。

今後の装置開発については、一部検討項目が残されており、SiC 素子を活用した電圧調整装置の実適用に向け、さらに検討を進められることを期待したい。特に、従来機器の SiC モジュールを単に SiC モジュールに置き換えただけでは、SiC のポテンシャルを十分に発揮できるとは思えないので、SiC モジュールの性能を最大限に活かす機器設計をさらに進めて頂きたい。

〈肯定的意見〉

- ・ モジュール・機器・システムの開発の観点では途中で発生した問題点を乗り越え、参加者全員で連携して目標としたシステムの開発が行われている。研究開発項目③は特に情報発信が重要であるが、学会等を通じて適切な発信が行われた。
- ・ 機器開発においては、新デバイスの活用を軸とした小型化・低騒音化・メンテナンスフリー化を目標に据えて、欧州に見られるようなメーカー主導体制で一貫して事業を推進し、モジュール開発と実用に供する機器を完成させた点が評価に値する。
- ・ SiC モジュールについて、電力用機器に求められる厳しい仕様に対して電気・熱的特性評価などが適切に行われている。配電系統は様々な条件や構成が考えられるが、これに対して、各電圧制御機器や集中制御について膨大なシミュレーションや実証試験が行われており、最終目標として設定された機能の動作や協調制御ができる状態にあることは評価できる。また、機器のメンテナンス頻度や寿命などの最終目標も概ね達成していると考ええる。さらに、実適用を見据えて装柱性の評価まで行われていることも評価できる。自励式 SVC の開発における高調波共振の問題点について、直ちに原因究明し、プロジェクトへの影響が無いように適切に対応されていると考ええる。
- ・ SiC モジュールを電力機器に適用し、実グリッド試験まで行ったことは十分に高く評価できる。幾つか課題は残したものの、当初目標を概ね達成できたことは、実用化へ一定の道筋を付けたと考ええる。汎用電力機器への SiC 素子応用は他に例を見ないものであり、世界的に見ても注目される研究開発成果である。論文や学会発表など、成果の普及についても十分な活動を行っている。また、国外電力網と仕様が異なることから海外への出願は少なかったものの、特許出願のレベルも十分であったと考ええる。

- 研究開発成果は、研究開発項目①～③の全てにおいて達成されている。研究開発項目①の SVC の開発で不具合が発生し NEDO からの助成が停止されているが、実施者が自主的に開発を継続して問題を解決し、耐環境試験以外全て達成しているため問題ない。研究開発項目②において、研究開発項目①で開発した機器を最終的に電力会社の実グリッドにて実証し、機器開発の共通基盤技術の構築に向けて多くの具体的な課題を挙げられたことは、特に評価できる。
- 3.3kV 1in1 All-SiC モジュール、3.3 k V 2in1All-SiC モジュール共に、電気・熱的特性、絶縁特性などが目標としていた性能を十分クリアできていると評価できます。また、発生損失やインバータ寸法も大幅に低減されています。次に、3.3kV 1in1 All-SiC モジュールを搭載した SVC は、柱上設置が可能でメンテナンス性も優れた機器であると評価できます。また、模擬グリッド試験における不具合については、具体的な原因や技術的課題が取りまとめられ、今後の開発に向け適切な対応が取られたものと評価できます。さらに、SiC モジュールを搭載した次世代 TVR についても、模擬グリッド試験、実グリッド試験の結果が制御ロジック開発に適切にフィードバックされています。SVC や次世代 TVR が複数混在した環境下でも適正電圧が維持できるような集中電圧制御システムと通信インターフェースが開発されており、特に亘長の長い系統で潮流が複雑に変化する場合に集中制御による効果が大きいことが示されています。また、開発した機器の実証評価を行うと共に、我が国の共通基盤技術になるような性能・信頼性評価法や機器故障時の対応方法、メンテナンス性評価方法を調査・検討し、具体的な「パワエレ配電用機器の望ましい仕様・動作」がとりまとめられています。これは本実証事業の新しい成果の形態として注目に値するものと言えます。次々世代の配電系統についても、研究開発項目①、②と関連させて FS を実施し、将来の電力供給のあり方や将来像の提示が行われています。以上のことから、3つの研究開発項目のいずれも最終目標を達成したものと評価できます。
- 一部試験に不具合があったものの、期間内に全開発項目を完了し、SiC モジュールを活用した次世代の電圧調整装置が開発できたことは高く評価できる。また、共通基盤技術とされる技術項目の整理ができたこと、さらに、次々世代の配電系統の将来像を示したことは、今後の配電系統技術の進展に資するものと評価できる。

〈改善すべき点〉

- 太陽光発電が大量に配電系統に接続された場合の電圧制御に関して、本プロジェクトで開発した機器と競合技術との客観的な比較評価が十分には行われていないので、開発機器システムが中長期的に優位性を持って市場性を持つかどうかの判断材料が不足している。特に研究開発項目③で取り上げた 2040-50 年では、電力貯蔵装置やスマートデバイスとの関係で、今回開発したシステムは必ずしも優位性を持たず、果たしてこのまま開発を進めて市場性を確保できるのか見えにくく成果の普及に対する情報が不足していると感じられる。
- 国内外の研究開発動向について緻密な調査がなされたうえで、日本独自の事情の下で

の開発が中心となったという背景については妥当性が認められるが、国際標準化に通じる研究開発の重要性が指摘される昨今としては、結果的に海外特許が少なく留まったように見られる。

- 本事業で開発した通信インターフェースが、各送配電事業者や他のメーカーへ展開できるものなのかが明示されているとよいと考える。
- 集中制御により PV 導入可能量の増加に対して大きな効果を得ることができるシステム開発ができるとよいと考える。CVC は線路の途中で設置されることが想定されるため、力率改善補償機能の効果は限定的であると思われる。このため、この機能の必要性が明確にできるとよい。既存の機器で最新の知見が反映された制御方法と、本事業で開発した電圧制御機器および集中制御システムと比較を行っていただき、有効性の検証を実施していただきたかった。また、複数フィードの系統構成においても開発システムの有効性を検証していただきたかった。将来の配電系統において、特別高圧系統がどのように考慮されて、それによって、どのような機器や制御方法が必要なのかが不明である。とくに、配電用蓄電池やスマートインバータをどのように導入していくのがよいのか、そのときに CVC や AVR 付き柱上変圧器ユニットは、どのように有効に活用されているのか、それに対して、集中制御システムがどのように有効に機能するのか、そしてそれが将来のデマンドレスポンスなどを想定して DERMS にどのようにつながるのかを示すことができるとよいと考える。バンク逆潮流の制約を考慮した場合に、将来の配電システムの在り方と日本版コネクタアンドマネージや慣性力、調整力確保の必要性との関係について明確にいただきたかった。
- 先にも述べたように、2 in 1 モジュールの開発が遅くなった分、機器の最適設計に十分な時間が取れなかったと思われる。プロジェクト内の素子開発と並行して、外部調達可能な SiC モジュールあるいは半導体チップを用いた機器設計・開発を行ってもよかつたのではないかと思う。
- 研究開発項目②および③について、成果の情報発信や普及させる取組について、事業期間内でももう少し積極的にされると良かったように思われる。
- 研究開発項目①の装置開発と、②や③との研究内容との連携をさらに強化する方がよかつた。

〈今後に対する提言〉

- SiC を用いたパワーエレクトロニクスは様々な利点を持つために電力市場でも普及が期待され、本プロジェクトでの成果も、将来何らかの形で市場に貢献することは十分に予想できるが、それが今回開発のシステムが牽引するものなのか、自動車や鉄道の分野が牽引すれば十分なのかが必ずしも明確でなく、その結果、本プロジェクトでの開発システムの意義が見えにくくなっている。海外を含めた中期の市場性の評価を進めて、戦略を明らかにすべきであると考ええる。
- メーカーの国際競争力が益々必要となるなかで、今後、本事業のような次世代電力網に資する技術開発を行おうとするメーカーが現れた場合に、そのメーカーが主体とな

って研究体制を整えることができるような、例えば試作品の評価機関の設立や、関連項目の研究依頼を行い易い体制作りが望ましいと考える。

- 新たな発想の機器構成で、将来の配電系統に求められる仕様を達成できる機器開発を目指してもよかったのではないかと思われる。「発熱が小さい」、「電力損失が少ない」というのが SiC パワー半導体の特長であったと思うので、既存の機器と比較して効率評価なども行っていただくとよい。電圧制御機器や集中制御システムについて、システム全体としては日本のシステムに最適化された仕様が必要であると考えているが、これらに盛り込まれている技術が応用されて、世界で使われることを期待したい。
- SiC モジュールの性能を最大限に活かす機器設計をさらに進めて頂きたい。従来機器の Si モジュールを単に SiC モジュールに置き換えただけでは、SiC のポテンシャルを十分に発揮できるとは思えないので、SiC モジュールの性能・特長を最大限に活かす回路・機器設計をゼロベースから行って頂くことを期待したい。
- 研究開発項目②の成果は、電力中央研究所が、メーカーおよび電力会社とうまく調整が行われたことで得られたと考えられる。得られた課題を解決するためには、引き続きメーカーや送配電事業者などとの調整が必要であるため、事業終了後も継続的に電力中央研究所による成果の周知活動や調整などが進められることを期待する。
- 装置開発については、一部検討項目が残されており、SiC 素子を活用した電圧調整装置の実適用に向け、さらに検討を進められることを期待したい。

2. 4 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて

SiC 素子の価格が低下すれば、機器やシステムとしての市場性を持つところまで開発が行われたことは評価に値する。普及に向けて、メーカー主体で設計・開発を行って電力会社に提案していくスタイルも極めてリーズナブルであり、市場で機能していくものと考えられる。また、フィージビリティスタディにおいては、多種多様な条件が整理されたうえで結果が導かれているため、例えば太陽光発電の導入限界量とその決定要因との因果関係の検討や、準最適解の考察などに資することが見込まれる成果が得られている。

一方で、製品化、量産化、実適用化に向けた、さらなる詳細な課題の整理とその課題の解決策の検討が必要である。具体的には、SiC としての能力を最大限に活かす機器構成を目指す必要がある中で、厳しいコスト環境にある配電システムへの導入を目指しているためにスペックの決め方が定まっていない。市場性を語る上で、中期でどのような社会環境があるかを見定め、戦略的な機器開発目標が設定されていると、より事業化を目指す方向性が見えていたと思われる。

今後、SiC 素子のコスト競争力について、どのように取り組むのか、さらなる検討が必要である。また、共通基盤技術として確立させ実用化させるために、研究開発においては、電力会社とメーカーの共同体制の整備と知財の取扱いのコンセンサスが必要であると思われる。

〈肯定的意見〉

- SiC 素子の価格が低下すれば機器やシステムとしての市場性を持つところまで開発が行われたことは評価に値する。
- 機器開発においては、まず 1in1 モジュールの開発を実施したうえで、その開発経験を活かした 2in1 モジュール開発を行っている。これにより、変換器の回路構成が異なる機器に対しても適用可能なモジュールを提供できる体制が整っている点が評価される。また、フィージビリティスタディにおいては多種多様な条件が考えられるのに対し、その条件が整理されたうえで結果が導かれているため、例えば太陽光発電の導入限界量とその決定要因との因果関係の検討や、準最適解の考察などに資することが見込まれる成果が得られている。
- 本事業において、膨大なシミュレーションや実証試験が行われており、送配電事業者が将来の配電システムを構築する上で試験方法やシミュレーション方法などの有用なノウハウが蓄積されたと考える。
- 地球温暖化抑制に向けて、太陽電池、風力発電等の再生可能エネルギーの導入は、我国のみならず世界的にも今後拡大していくものと予想される。従って、今回の事業のターゲットとなった電力網安定化機器の市場性は、今後益々高まっていくものと推察される。普及に向けて、メーカー主体で設計・開発を行って電力会社に提案していくスタイルも、今後の電力の在り方を考えれば極めてリーズナブルであり、市場で機能していくものとする。そのための標準化戦略も視野に入っており、実用化・事業化のストーリーは充分描けているものとする。

- ・ 研究開発項目①は、技術的には本事業における開発によって実用化のレベルに達していると評価できる。研究開発項目②では、機器開発の共通基盤技術の構築に向けた課題がどの関連する業界や企業に反映されるかを明らかにしており、成果が活用されることが期待できる。研究開発項目③については、将来の送配電システムの指針となる成果が得られており、次の NEDO 事業にて課題への対応が期待できる。
- ・ 研究開発項目①で開発された危機については、SiC の量産化、低コスト化によって、実用化の見通しがなされています。また、2020 年初頭までに事業化を行うことが、計画されており、期待できます。研究開発項目②は、今後、一般配電事業者の標準仕様として利用される可能性があり、また、研究開発項目③の成果も将来の配電システムを開発・拡充する際の指針として活用できると考えられます。
- ・ 新しい電圧調整装置をメーカー主導で開発し、実用化の目途が立ったことは評価できる。

〈改善すべき点〉

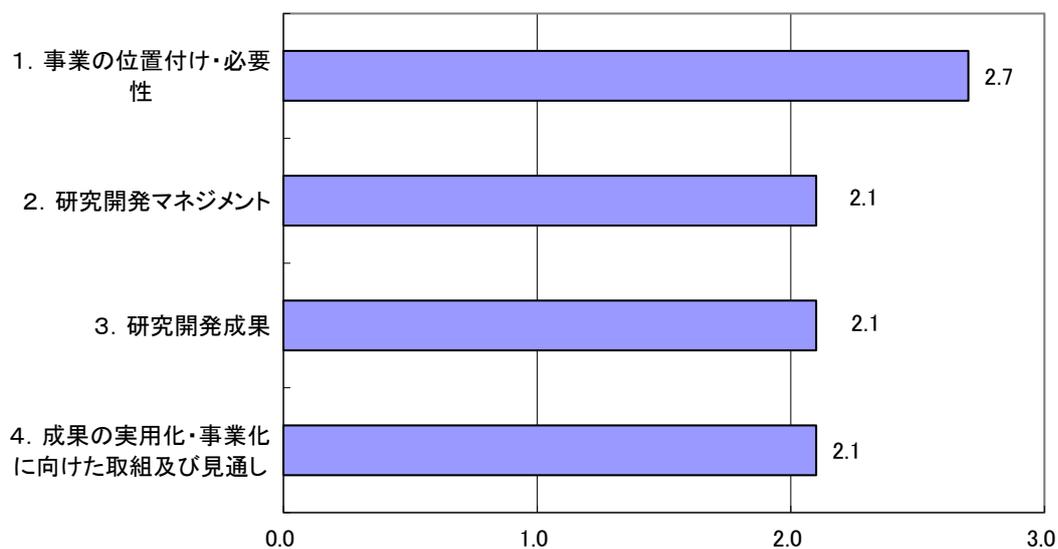
- ・ SiC としての能力を最大限に活かす機器構成を目指す必要がある中で、厳しいコスト環境にある配電システムへの導入を目指しているためにスペックの決め方が定まっておらず、市場性を語る上で、中期でどのような社会環境があるかを見定めて、そこに向けての戦略的な機器開発目標が定められているとより事業化を目指すべき方向性が見えていたと思われる。また、国のプロジェクトとしてもその部分が重要である。電力市場での活用としての特殊性を考える方が良いのか、SIP 事業として開発されている民生用の SiC 機器の思想を取り入れて開発目標を立てるべきかの議論がこのプロジェクトの中で、もう少し深めてもよかったのではないか。
- ・ CVC や自励式 SVC の事業化において、研究開発項目③の成果がフィードバックされて事業化目標が示されているとよい。
- ・ 本事業成果の今後の社会実装において、SiC モジュールの安定製造・供給が大きなカギとなることは明白である。SiC モジュールの安定製造・供給体制の早期確立を望む。
- ・ 海外進出時にはメーカー主導の売り込みが必要とのことであるが、その場合は配電電圧が日本と異なるためさらなる課題が生じる。海外進出に向けた実用化・事業化については、見通しが不十分であると考えられる。
- ・ 今後の製品化、量産化、実適用化に向けた、さらなる詳細な課題の整理とその課題の解決策の検討が必要である。

〈今後に対する提言〉

- ・ 実用化・事業化の観点からはやや物足りないものを感じる。研究開発項目③の議論で見られるように長期的には選択肢が大きく広がる中での本プロジェクトのシステム開発で有ったことが、その要因かと思われる。国のプロジェクトとしてはこうした議論が重要であるので、今後、今回の成果を活かす意味での中期・長期の展望をバランスよく見据えた戦略ビジョンの策定を期待する。

- フィージビリティスタディの成果が技術者間に広く伝わり、新たな研究開発が他機関でも盛んとなるよう、専門家らの集う機会での成果公表が期待される。また一方で、一般の方々に対しては、分散型エネルギー源の多数台導入に関わる課題の解決策や、逆に本質的に解決できない事項などがわかりやすく伝わるような活動の展開も期待される場所である。
- 本事業で行われたシミュレーションモデルやシミュレーションツールが、将来の配電システムを研究するときの標準モデルや評価方法として、様々な研究者や技術者が活用できるように成果の公表が望まれる。
- 開発した電力機器技術の標準化は、国内に留まるべきではなく、国際化も視野に入れるべきと考える。海外展開して行く上で国際標準化は必須の項目となると思うので、経産省国際電気標準課などと連携して、今後積極的に取り組んでほしい。新技術が出てくるタイミングは、標準化においてはチャンスであり、我国が国際標準化をリードできる貴重なタイミングと考える。
- 研究開発項目①において、3.3 kV SiC MOSFET モジュールの安定的な供給と低コスト化は、電圧補償機器の事業化にも影響を与えることから、なるべく早期に達成されることが望ましい。
- SiC 素子のコスト競争力について、どのように取り組むのか、さらなる検討が必要。また、共通基盤技術として確立させ実用させるためには、研究開発においては、電力会社とメーカーの共同体制の整備と知財の取扱いのコンセンサスが必要であると思われる。

3. 評点結果



評価項目	平均値	素点 (注)							
		A	A	B	A	A	A	B	
1. 事業の位置付け・必要性について	2.7	A	A	B	A	A	A	B	
2. 研究開発マネジメントについて	2.1	A	A	A	B	B	C	C	
3. 研究開発成果について	2.1	A	B	B	B	B	B	B	
4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて	2.1	B	A	A	B	B	B	C	

(注) 素点：各委員の評価。平均値は A=3、B=2、C=1、D=0 として事務局が数値に換算し算出。

〈判定基準〉

1. 事業の位置付け・必要性について	3. 研究開発成果について
・非常に重要 →A	・非常によい →A
・重要 →B	・よい →B
・概ね妥当 →C	・概ね妥当 →C
・妥当性がない、又は失われた →D	・妥当とはいえない →D
2. 研究開発マネジメントについて	4. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通しについて
・非常によい →A	・明確 →A
・よい →B	・妥当 →B
・概ね適切 →C	・概ね妥当 →C
・適切とはいえない →D	・見通しが不明 →D

第2章 評価対象事業に係る資料

1. 事業原簿

次ページより、当該事業の事業原簿を示す。

「分散型エネルギー一次世代電力網構築実証事業」

(事後評価) 分科会

資料 7-1

「分散型エネルギー一次世代電力網構築実証事業」

事業原簿【公開】

担当部	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 スマートコミュニティ部
-----	------------------------------------------

—目次—

概要	4 頁
プロジェクト用語集	13 頁
第 I 章. 事業の位置付け・必要性について	16 頁
1. 事業目的の妥当性	16 頁
1-1. 事業の背景・目的・位置づけ	16 頁
1-2. 関連する上位施策	20 頁
1-3. 再生可能エネルギーの導入状況	24 頁
1-4. 各国の再生可能エネルギーの政策動向	26 頁
1-5. 配電分野での再生可能エネルギーの導入に向けた取組動向	28 頁
2. NEDO事業としての妥当性	30 頁
2-1. NEDOの関与の必要性	30 頁
2-2. 実施の効果	30 頁
第 II 章. 研究開発マネジメントについて	32 頁
1. 事業の目標	32 頁
2. 事業の計画内容	34 頁
2-1. 研究開発の内容	34 頁
2-1-1. 研究開発項目①次世代電圧調整機器・システムの開発	34 頁
2-1-2. 研究開発項目②次世代配電システムの構築に係る共通版技術の開発	34 頁
2-1-3. 研究開発項目③未来のスマートグリッド構築に向けたフィージビリティスタディ	34 頁
2-2. プロジェクトの全体計画と予算	35 頁
2-3. 研究開発の実施体制	36 頁
2-3-1. 研究開発実施者	36 頁
2-3-2. プロジェクトリーダー(PL)	37 頁
2-4. 研究の運営管理	37 頁
2-5. 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性	39 頁
2-5-1. 実用化事業化戦略	39 頁
2-5-2. プロジェクト運営マネジメント	39 頁
2-5-3. 知的財産・標準化に係るマネジメント	40 頁
3. 情勢変化への対応	41 頁
第 III 章. 研究開発成果について	42 頁
1. 研究開発項目ごとの成果と達成度及び最終目標に向けた今後の課題、課題解決の見通し	42 頁
1) 研究開発項目①(富士電機、東芝エネルギーシステムズ、北芝電機)	43 頁
2) 研究開発項目②(電力中央研究所、横浜国立大学、エネルギー総合工学研究所) (電力中央研究所、横浜国立大学、エネルギー総合工学研究所_成果報告書抜粋)	90 頁
3) 研究開発項目②(産業総合技術研究所) (産業総合技術研究所_成果報告書抜粋)	748 頁

4) 研究開発項目③-1【第1編】平成26～28年度	864 頁
(エネルギー総合工学研究所、電力中央研究所、東京大学、東北大学、東京都市大学)	
(【第1編】平成26～28年度__成果報告書抜粋)	
5) 研究開発項目③-2【第2編】平成29～30年度	1196 頁
(エネルギー総合工学研究所、電力中央研究所、東京大学、東北大学、東京都市大学)	
(【第2編】平成29～30年度__成果報告書抜粋)	
2. 知的財産等の取得、成果の普及	1586 頁
 第IV章. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて	 1588 頁
1. 研究開発項目ごとの実用化・事業化に向けての見通し及び取組	1588 頁
1-1. 研究開発項目①次世代電圧調整機器・システムの開発	1588 頁
1-1-1. 成果の実用化可能性	1588 頁
1-1-2. 事業化までのシナリオ	1588 頁
1-2. 研究開発項目②次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術の開発	1589 頁
1-2-1. 成果の狙い	1589 頁
1-2-2. 成果の実用化可能性	1589 頁
1-2-3. 成果の展開に向けたシナリオ	1589 頁
1-3. 研究開発項目③未来のスマートグリッド構築に向けたフィージビリティスタディ	1590 頁
1-3-1. 成果の狙い	1590 頁
1-3-2. 成果の実用化可能性	1590 頁
1-3-3. 成果の展開に向けたシナリオ	1590 頁
 (添付資料)	
添付資料 1 プロジェクト基本計画	1591 頁
添付資料 2 事前評価関連資料(事前評価書、パブリックコメント募集の結果)	1600 頁
添付資料 3 学会・論文等発表リスト	1607 頁

概 要

最終更新日		2019年10月24日	
プロジェクト名	分散型エネルギー次世代電力網構築実証事業	プロジェクト番号	P14010
担当推進部/担当者	<p>スマートコミュニティ部（2019年3月現在） （プロジェクトマネージャー:PM） 中岩 勝（2014年10月～2016年3月） 吉川 信明（2016年4月～2017年6月） 諸住 哲（2017年7月～2019年3月） （担当者） 西島 栄伺（2014年4月～2015年6月） 臼田 浩幸（2014年4月～2018年3月） 相澤 彰治（2014年5月～2016年5月） 濱田 拓（2015年7月～2018年6月） 堂本 宗宏（2016年6月～2017年6月） 永田 充穂（2017年7月～2019年3月） 小沼 貴紀（2018年3月～2019年3月） 遠藤 寛明（2018年7月～2019年3月）</p>		
0. 事業の概要	<p>太陽光発電を中心とした再生可能エネルギーの導入拡大及び電力・機器システム産業における国際競争力の維持・向上に資することを目的として、シリコンカーバイド（SiC）パワー半導体を用いた次世代電圧調整機器及びその制御システムを開発する。また、開発した機器をフィールドに設置して運用検証を行いながら、これら新規の技術を配電系統に適用して再生可能エネルギーの大量導入を図るための共通基盤技術の開発を行う。さらに再生可能エネルギーの導入が進行した際の将来のあるべき配電系統を検討し、効率的な開発・拡充計画を決定する上での課題および重視すべき技術を提示する。</p>		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>本プロジェクトは、以下に示す通り、太陽光発電を中心とした我が国の再生可能エネルギー大量導入に向けて、電圧上昇問題を主とした配電系統の系統安定化に向けた課題解決に資することを目的とするものであり、NEDOが関与する必要性の高い事業である。</p> <p>我が国におけるエネルギー供給は化石燃料がその8割以上を占め、その殆どを海外に依存している。一方、近年、新興国の経済発展などを背景として、世界的にエネルギー需要が増大しており、また、化石燃料の市場価格が乱高下するなど、エネルギー市場が不安定化している。加えて、化石燃料の利用に伴って発生する温室効果ガスを削減することが重要な課題となっている。このような状況の中、エネルギーを安定的かつ適切に供給するためには、資源の枯渇のおそれが少なく、環境への負荷が少ない再生可能エネルギーの導入を一層進める必要がある。</p> <p>2008年7月に「低炭素社会づくり行動計画」が閣議決定され、太陽光発電の導入量を2020年に2005年度比で10倍（1,400万kW）、また2030年には40倍（5,300万kW）とする目標が掲げられた。その後、2009年8月にとりまとめられた「長期エネルギー需給見通し（再計算）」では、太陽光発電の導入を大幅に前倒して、2020年に2005年度比で20倍（2,800万kW）を導入するとの想定がなされ、目標が見直された。同年11月には、太陽光の余剰電力買取制度が開始された。さらに、東日本大震災後の2011年8月には「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」が成立し、電気事業者に太陽光、風力、地熱、バイオマス、中小水力を対象とした再生可能エネルギーによって発電された電力を全量、一定の期間、一定の価格で買い取ることが義務付けられ、翌年の2012年7月1日から再生可能エネルギーの固定価格買取制度が施行された。</p> <p>その後、東日本大震災以降では最初の計画となるエネルギー基本計画（第四次計画）が2014年4月に策定されるとともに、このエネルギー基本計画を踏まえ、経済産業省は、2015年7月に長期エネルギー需給見通しを決定している。この長期エネルギー見通しの決定に向けた議論の中で、再生可能エネルギーは、2030年頃に総発電電力量（10,650億kWh）のうち、22～24%程度の導入が想定されている。また、事業実施中の2018年7月にはエネルギー基本計画（第五次計画）が閣議決定され、再生可能エネルギーの主力電源化、エネルギーミックス（2030年度）における再生可能エネルギー比率22～24%を実現するための取組強化について明記されている。</p> <p>このような流れの中、再生可能エネルギーによる発電量は、新たな制度の開始に伴い、その伸び率が急速に拡大している。</p> <p>この再生可能エネルギーの中でも特に太陽光発電は、住宅用、非住宅用とも導入が著しい。</p> <p>一方、太陽光発電は天候によって出力が変動し、その多くは電力系統の末端に分散設置されるため、その導入量が大幅に増加した場合には電力系統の運用上、配電線の電圧上昇や周波数調整力の不足等、多くの技術課題が想定される。</p> <p>2010年4月に経済産業省が取りまとめた次世代送配電ネットワーク研究会報告「低炭素社会実現のための次世代送配電ネットワークの構築に向けて」においては、我が国の電力系統上、太陽光発電について1,000万kW程度までは集中設置等の場合を除いて特段の系統安定化対策を講ずる</p>		

ことなく電力系統で受入可能とされている。また、2020年に2,800万kWといった導入を目指す場合においては、現状において実用化された技術をベースにして系統安定化対策を行っていくことが想定されている。

しかしながら、2016年3月末時点の太陽光発電の導入量は、3,223万kW（住宅用865万kW、非住宅用2,358万kW）であり、当初、2020年に想定していた2,800万kWを既に超える状況となっている。また、2030年の太陽光発電の導入量は、先述した「長期エネルギー需給見通し」を基に概算すると、2030年度の総発電電力量（10,650億kWh）のうち、太陽光発電の割合は7%程度（749億kWh）と想定されており、現状の太陽光発電の設備利用率（12～14%）を勘案すると、6,500万kW程度の太陽光設備容量が見込まれる。

今後も太陽光発電を中心とした再生可能エネルギーを積極的に活用していくために極めて重要となるのは、系統の安定的な運用である。

太陽光発電の導入拡大に伴う電力系統において、特に課題となるのが配電系統における電圧上昇である。この電圧上昇は、太陽光発電の出力が設置箇所の消費電力を上回り、電力系統に逆潮流が発生した場合に生じるものであり、他国に比べて低圧配電線の電圧が低い我が国においては特に顕著に生じやすい。また、電圧上昇により、連系点の電圧が電気事業法第26条に基づく適正値（ $101 \pm 6V$ ）を逸脱すると、太陽光発電の直流／交流変換器（PCS:Power Conditioning System）の電圧上昇抑制機能が動作し、太陽光発電の出力が抑制され、結果として発電機会が失われるため、再生可能エネルギー導入時に適正電圧を如何に維持するかは重要な課題である。

系統を適正電圧に保つための対策は、需要家側と系統側の対策に分け、需要家側の対策としては、高圧需要家に対して力率一定制御のパワーコンディショナー（PCS）を導入する等の対策が実施されている。一方で、需要家側の対策だけでは効果はあるものの、再生可能エネルギーの導入に伴う電圧上昇問題を全て解決することは困難である。電力系統への再生可能エネルギーの導入をある一定以上進めていくためには、系統側の対策も含めて、双方で対応していく必要がある。そこで、本プロジェクトでは、対策が確立されていない系統側の対策に焦点をあてて実施した。

従来の系統側の対策としては、高圧自動電圧調整器（SVR:Step Voltage Regulator）や静止型無効電力補償装置（SVC:Static Var Compensator）等といった電圧調整機器による対策が行われている。さらに電圧調整機器を集中的に制御して電圧調整を一括管理する集中制御方式といった積極的な対策も提案されている。

電圧調整機器については、従来の機器と比較して、電圧調整幅やタップ動作回数制限等で優位性のあるパワーエレクトロニクス技術を活用した機器が配電用として一部実用化されているが、コンパクト化、軽量化、低コスト化等の課題があるため普及が進んでいない。

一方、我が国は先進的なパワー半導体としてSiC（シリコンカーバイド）の開発が他国に先駆け進展している。SiCパワー半導体は、Si（シリコン）パワー半導体と比較して、発熱が小さい、電力損失が少ない、高温で高速動作が可能等の特長を有している。これらの特長を活かした電圧調整機器の製作、その実用化が期待されている。

本プロジェクトにおいては、太陽光発電を中心とした再生可能エネルギーの導入拡大及び電力・機器システム産業における国際競争力の維持・向上に資することを目的として、3つの研究開発項目を一体的に推進している。

1つめの研究開発項目は、「次世代電圧調整機器・システムの開発」である。ここでは、先進的なパワー半導体であるSiCパワー半導体を用いた電圧調整器の開発を行っている。さらに機器による対策に加え、これら機器を集中的に制御するシステムの検討も行った。

2つめの研究開発項目は、「次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術の開発」である。ここでは、本プロジェクトで開発した機器のフィールドでの運用検証等を通して、パワーエレクトロニクス機器が系統に導入された場合の影響等について検討している。また、SiCパワー半導体の高耐圧化と低損失化が進めばトランスが不要となる等といった更なるコンパクト化が期待される一方、機器全体の発熱密度が高くなる結果、放熱や構成部品の耐熱性を考慮した配置が課題となる。このような課題に対して、機器を設計する上での留意事項について検討した。

共通基盤技術の開発は、ユーザー側としての運用面とメーカー側としての機器設計の両面から指針を作成し、系統側対策として、パワー半導体による新規技術の導入が加速されることを狙いとして取組んだ。

3つめの研究開発項目は、「未来のスマートグリッド構築に向けたフィージビリティスタディ」である。このフィージビリティスタディは、上記2つの研究開発項目による取組が2030年に向けた2020年代の対策であるのに対し、さらに長期的な2050年を想定した配電システムの形について、主として技術的な観点から検討した。本プロジェクトで取組んでいる先進的なパワーエレクトロニクス機器が、2020年代に導入されると想定すると、一般的に配電機器の機器寿命は20年程度であることから、2040年代にはリプレースも含めた検討が必要となる。その際に未来の配電システムとしては、機器のリプレースも含め、新たな機器を導入して取組むべきなのか、または他の方法による対策で系統安定化を図るべきなのか、将来の政策や情勢による影響もあるが、2050年の配電システムとしてどのような形態が考えられるかといった一つの方向性を示すことを狙いとして実施した。

これら研究開発の一体的な実施は、喫緊の課題を解決し、エネルギー基本計画やエネルギー需給見通し等の上位施策の実現に向けて寄与するだけでなく、我が国の再生可能エネルギーの導入を着実に拡大しつつ、長期安定的に配電システムを運用していく総合的な取組につながる。

II. 研究開発マネジメントについて

事業の目標

【最終目標】（2018年度末）

耐久性、信頼性、配電システムの制御アルゴリズムとの統合性を備え、かつコスト低減の見通しを有するSiCパワー半導体を用いた電圧調整機器及びその制御システムを開発する。また、開発した機器・システムをフィールドに設置しての運用検証を行う。さらに、これら新規の技術を配電網に適用して再生可能エネルギーの大量導入を図るための共通基盤技術を開発する。

なお、最終目標の達成に向けては、2018年度末時点において、最低限、以下の技術レベルに到達していることが求められる。

- ・全体もしくはSiCパワー半導体を適用する部分コストが従来機器以下であること。
- ・機器メンテナンス頻度は2年以上であること。
- ・機器全体寿命が減価償却年（18～22年）以上であること。
- ・通信遮断時にも適正電圧を維持可能であること。
- ・複数の次世代電圧調整機器が混在した環境下においても適正電圧が維持可能であること。

【中間目標】（2016年度末）

SiCパワー半導体を用いて軽量・コンパクト化を図った電圧調整機器（要素技術を含む）と制御システムを開発し、フィールドで使用可能な試作品の設計・製作を行って工場試験等で性能検証を行う。

なお、2016年度末時点においては、最低限、以下の技術レベルに到達していることが求められる。

- ・開発する機器全てが柱上設置可能であること。
- ・冷却は自然空冷であること。
- ・従来機器、従来システムと協調制御可能であること。
- ・次世代電圧調整機器・システムをフィールドに設置し、配電網としての運用検証を行う際の合理的な研究計画が策定されていること。

事業の計画内容

主な実施事項	H26fy	H27fy	H28fy	H29fy	H30fy	
研究開発項目① 次世代電圧調整機器・システムの開発（2/3助成）	←					→
研究開発項目② 次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術の開発（委託）	←					→
研究開発項目③ 未来のスマートグリッド構築に向けたフィージビリティスタディ（委託）	←					→

開発予算 （単位：百万円）

会計・勘定	H26fy	H27fy	H28fy	H29fy	H30fy	総額
一般会計						
特別会計（需給）	706	1,068	951	400	282	3,407
開発成果促進財源	—	—	—	—	—	—
総予算額	706	1,068	951	400	282	3,407
（委託）	88	246	357	127	136	954
（助成） ：助成率 2/3	618	822	594	273	146	2,453

契約種類：
委託（○）
助成（○）

開発体制	経産省担当原課	資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギー課
	プロジェクトリーダー	富士電機株式会社 技術開発本部 技師長 川村 逸生
	助成先、委託先	<p>(1) 研究開発項目① (2/3 助成) 富士電機株式会社 (代表機関)、東芝エネルギーシステムズ株式会社、北芝電機株式会社</p> <p>(2) 研究開発項目② (委託) 一般財団法人電力中央研究所 (代表機関)、一般財団法人エネルギー総合工学研究所、横浜国立大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所</p> <p>(3) 研究開発項目③ (委託) 一般財団法人エネルギー総合工学研究所 (代表機関)、一般財団法人電力中央研究所、東京大学、東北大学、東京都市大学</p>
情勢変化への対応	<p>再生可能エネルギー導入に係る状況は、プロジェクト開始から刻一刻と変化しているが、そのような状況を踏まえつつ、NEDOのマネジメントとして実施した例は下記の通り。</p> <p>2012年7月に固定価格買取制度が施行され、2013年5月に「電気設備の技術基準の解釈」及びこれに関連するガイドラインである「電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン」が改正された事に伴い、バンク逆潮流の規制が緩和された。この一連の流れは、プロジェクト実施前に行われた取り組みであったが、太陽光を中心とした再生可能エネルギーは、当時、想定していたよりも大幅に導入が進んでいる状況。</p> <p>このような状況の中で、研究開発項目①で開発している AVR 付柱上変圧器ユニットについては、前倒しで開発の目的を立て、企業独自で実用化・事業化に向けた開発を行い、予定よりも早期に事業化していく体制とした。また、研究開発項目③で取組んでいる未来のスマートグリッド構築に向けたフィージビリティスタディについては、もともと未来の配電系統について検討する事を目的としており、配電変電所からの逆潮流による特別高圧側の影響は特段考慮せず実施してきた。しかしながら、現状は、プロジェクト開始当初の想定を大きく超えて、再生可能エネルギーの導入が進んでおり、逆潮流による再生可能エネルギーが、特別高圧側に与える影響を加味せずには、未来の配電系統について、最終的な検討が困難な状況となっている。そこで、2017年度以降は、特別高圧側の影響を加味した検討や次々世代に期待される技術革新の整理や課題の洗い出し実施することにした。</p>	
評価に関する事項	事前評価	2014年度実施 担当部 スマートコミュニティ部
	中間評価	2016年度 中間評価
	事後評価	2019年度 事後評価

<p>Ⅲ. 研究開発成果について</p>	<p>研究開発項目①次世代電圧調整機器・システムの開発</p> <p>1. 小型化 SiC モジュールの開発 次の 3.3kV SiC モジュールの開発を行い、電気・熱的特性、絶縁性能が各規格を満足していることを確認した。 ○定格：3.3kV 200A (1in1 型) 寸法：98×65×19mm ○定格：3.3kV 200A (2in1 型) 寸法：140×100×38mm ○定格：3.3kV 400A (2in1 型) 寸法：140×100×38mm</p> <p>2. SVC の開発 (1) 制御アルゴリズムを開発し、IGBT を使ったミニモデル（容量（10kVA、200V）で性能確認を完了した。 (2) 同上ミニモデルを研究開発項目②の実験室グリッド（横浜国立大学）へ供給した。 (3) SVC の構造開発を次の点に留意して実施し、小型軽量、自然空冷化を実現した。 ・発熱、流入熱の放熱 ・絶縁距離の確保 ・高周波スイッチングを可能とする構造 実証機を製作し、社内検証（工場試験等）を完了し、製品化の目途を立てた。</p> <p>3. 次世代 TVR (CVC) の開発 制御アルゴリズムを開発し、従来の電圧調整分解のステップ幅がない連続電圧補償を可能とした。また、不平衡補償も合わせて行うようにし、IGBT 版試作機とミニモデルで基本動作の確認を完了した。その後、SiC 版試作機を作成し、研究開発項目②の模擬グリッド（電力中央研究所）と実グリッド（九州電力）へ供給、性能確認を完了し、製品化の目途を立てた。 なお、CVC とは北芝電機の商標である。</p> <p>4. AVR 柱上変圧器ユニットの開発 (1) 制御アルゴリズムを開発し、IGBT を使ったミニモデル（容量 3kVA、200V）で性能確認を完了した。 (2) 同上ミニモデルを研究開発項目②の実験室グリッド（横浜国立大学）へ供給した。 (3) AVR 柱上変圧器ユニットの構造開発を次の点に留意して実施し、小型軽量、自然空冷化を実現した。 ・電圧調整幅の最適化 ・発熱、流入熱の放熱 2016 年度中に社内検証を完了し、製品化の目処を立てた。</p> <p>5. 電圧制御システムの開発 (1) 集中電圧制御アルゴリズムおよび協調電圧制御アルゴリズム（SVC 用、次世代 TVR (CVC) 用）の開発を完了した。 今年度中に集中電圧制御アルゴリズムについてはシステム実装、協調電圧制御アルゴリズムについてはコントローラ実装を完了し、リアルタイムシミュレータと電圧制御システム、通信機器を接続し、動作検証を実施した。 (2) 通信インターフェースの開発については、通信機器（ハード）と通信プログラムについての開発を完了した。 リアルタイムシミュレータと電圧制御システム、通信機器を接続し、動作検証を実施した。</p> <p>研究開発項目②次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術の開発</p> <p>1. 性能・信頼性評価法の検討 (1) 性能評価法の検討について、「通常時」では、制御の安定性と追従性に関して、「配電システム事故時」では、各種事故状態に加えその後の単独運転状態や再開路時に関して、「ループ切替時」では、電圧や位相の急変時に関して、「電力システム擾乱時」では、瞬時電圧低下時や周波数変動時に関して、評価項目を抽出し、評価法・判定基準を作成した。2016 年度末までに、瞬時値解析モデルを基にシミュレーション評価を完了し、模擬グリッドでの試験方法に反映した。また、2018 年度には、九州電力薩摩川内試験場において実グリッド試験を実施した。</p>
----------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

(2) 信頼性評価法の検討（系統側の検討）では、JEC等の規格を調査し、現状求めている耐量を調査した。また、電力会社への聞き取りにより、求めたい耐量を確認した結果、どこまで求めるかはコストを考慮して判断していることが明らかになった。以上により、評価項目の抽出と判定基準を作成した。2016年度末までに、実験室グリッドにおいてミニモデルでの異常動作有無の確認を実施した。さらに研究開発項目①の開発機器の実力を把握し、最終の評価法・判定基準を決定した。

(3) 信頼性評価法の検討（機器側の検討）では、既存の信頼性試験方法等の調査結果より、機器への熱的影響を詳細に解析可能な数値解析が効率的であると判断し、トランスレス10kV級耐圧SiCデバイス構成SVC全体機器の簡易モデル機器設計を実施。

中間評価までの解析で、自然空冷下の運転では内部熱の放熱技術だけでなく、外部からの入熱防止技術が重要であること等がわかった。

2016年度末までに、ハード面での小型化や軽量化、機器寿命等の運用面での課題等について、解決策の提示も含めて、メーカー・ユーザー双方に有用な共通基盤的な設計指針の作成を完了した。

2. 配電システムの設計指針の検討

(1) 配電制御機器としての要求仕様の検討では、再委託先の関西電力と九州電力を通して、機器に対する要求仕様を抽出した。特に、「設置面」では、単柱設置の場合と、「EMC面」では、AVR付柱上変圧器ユニットの場合に、要求仕様が厳しく、機器設計に十分考慮する必要があることが明らかになった。

(2) 通信性能への要求では、北米における代表的電力会社の電力品質管理の特徴・配電系統電圧調整方法等について文献調査を実施後、同文献調査を基にした北米現地調査を行ない、研究開発項目①へ共有した。また、欧州の最新研究動向の調査のため、文献調査、及び現地学会調査を実施した。加えて、次世代機器へのニーズを明確化するため、国内電力会社および国内パワエレ機器開発メーカーに対し、ヒアリング調査を行ない、研究開発項目①へ共有した。

(3) 電圧制御方式の検討では、本プロジェクトの研究開発項目①で開発する機器、現状配電系統に用いられているSVR、TVRおよび他励式SVC、既開発のタップチェンジャ付柱上変圧器のモデルを構築した。

また、電気協同研究会配電線モデルを組み合わせた評価用バンクモデルを構築し、同モデルを基に、太陽光発電の導入量増加に合わせた電圧変動シミュレーションを多数のケースについて実施した。

さらに、国内にて過去に実施された「電力ネットワーク技術に関する実証事業」、「再エネ大量導入を視野に入れた研究」等について系統立てた調査を実施した。

加えて、解析モデル構築の参考のために、我が国における配電系統電圧の適正維持及び運用の代表事例調査を実施し、分散電源の各種導入シナリオに沿った電圧適正化効果の解析準備を行った。

3. 機器事故時の対応法・メンテナンス性評価法の検討

再委託先の関西電力と九州電力を通して、巡視による故障・劣化の確認方法、機器故障時の応急対応方法、設置・取り替えの施工方法に関して評価方法と判定基準を作成した。2016年度末までに、研究開発項目①で開発する機器への机上検討による評価を行い、2018年度に、実機による検証を行なった。

4. 模擬グリッドでの実証評価

(1) 模擬グリッドによる実証項目・方法の検討では、潮流計算については、改良した解析ツールを用い、電圧制御の事前解析を実施した。各機器の動作状況や制御効果を確認し、試験項目を抽出した。2016年度末までに、解析を進め、達成した。

瞬時値解析モデルの構築に関しては、実験室グリッドの構築を完了した。

また、電圧制御機器の瞬時値モデルのプロトタイプを構築し、別途用意した配電系統側の瞬時値解析モデルと接続して系統シミュレーションを実施した。また、電圧制御機器の制御応答を実験的に観測してデータも蓄積しつつある。上記プロトタイプモデルのパラメータを実験データと合わせこみ、瞬時値解析モデルとしての精度向上が実現できた。

瞬時値解析については、研究開発項目①のメーカーと秘密保持契約を締結し、各機器の制御ブロックや定数の提供を受けた。これをもとに瞬時値解析モデルを構築した。2016年度末までに、電圧制御特性や系統事故時、系統擾乱時の挙動の事前解析を行い、各機器の動作状況を確認し、試験項目を抽出した。

(2) 模擬グリッドの整備では、現状の実規模配電実験設備にて不十分である制御および計測用の配電線センサの拡充と、太陽光発電大量導入を模擬するための模擬電源の拡充に関する仕様の検討を行なった。

5. 実グリッドでの実証評価

再委託先の九州電力が所有する薩摩川内試験場において、第3章に後述する実グリッド実証を実施した。

6. 検討作業会の実施

本プロジェクトの円滑な実施を目的に、これまでに12回の作業会を開催。有識者から技術的な観点を中心に推進に向けた方向性等、助言を得た。

研究開発項目③未来のスマートグリッド構築に向けたフィージビリティスタディ

フィージビリティスタディは2編構成とした。

第1編(平成26～28年度)

配電システムの電圧変動問題に着目し、更なるPV導入が予想される次々世代の配電網のあるべき姿について検討を進めた。

1. 国内外の配電システムの状況調査

欧州でも中圧および低圧系統ではPV大量導入による電圧逸脱が課題となっており、米国でもカリフォルニア州やハワイ州においてPV大量導入に伴う電圧上昇が問題となっていることを確認した。

そこで欧州では変圧器タップ切替、系統接続変更、有効・無効電力制御、PV出力制御等が、米国では変圧器増設、電線太線化、電圧制御機器のタップ変更、PVスマートインバータ制御等が対策に用いられていた。

2. 新しい配電制御システムの提案

新しい配電制御システムについて、4つのキーワード(信頼性、経済性、拡張性、保守性)から、配電システムの幹線部分に沿って、22kV配電線を新設する「配電システムの部分昇圧(電圧階級22kVを含むケース)」と、SVCやPCS等により無効電力を制御する「配電システムの制御高度化(電圧階級6kVのケース)」の2つのケースに絞り込みを行った。直流配電システムの導入については、4つのキーワードをもとに検討したものの、いずれの観点からも優位性が低いと判断し、前述2つのユースケースに絞り込みをした。

3. 電気的特性の分析

系統シミュレーションモデルでは、住宅、農山村の地域特性を考慮した配電システムモデルを作成し、将来PV大量導入が見込まれるメガソーラーや住宅用太陽光発電に対応した検討が実施可能となった。また、電圧上昇問題にとって条件の厳しい末端集中配置と、配電線内に均一に分布した分散配置を考慮することで、様々な配置に対して包括的な検討が実施可能となった。

さらに6kV検討モデルでは太線化実施箇所や線種、SVC等による無効電力などを変化させ、22kV検討モデルでは部分昇圧するだけでなく、既設6kV配電線も併せて太線化するなど、様々なパターンに変化させた複数モデルにて静特性の潮流計算を行い、常時における各検討モデルのホスティングキャパシティの算出を行った。

静特性解析からは、22kV検討モデルでは太線化対策も実施することで6kV検討モデルよりも多くのPVを導入可能であることが判明した。

また動特性解析では、解析モデルを作成し、非常時の系統切替動作における潮流変動を解析した。なお動特性解析では通信技術やIT開閉器も考慮しながら、解析時間を検討した上で解析した。

4. 信頼性と経済性の評価

経済性評価では、各検討モデルの設備単価を積算し建設費の算定を行い、かつ設備耐用年数を加味し信頼性を考慮した経済性評価を行った。さらに経済性評価は配電線1回線単位のみでなく、配電用変圧器単位や配電用変電所単位などでも実施した。

5. 検討委員会、配電制御システム将来像の提示

検討委員会は 2014 年度は 3 回、2015 年度は 3 回、2016 年度は 3 回の合計 9 回開催した。

最適な配電制御システムは、22kV 検討モデルと 6kV 検討モデルの検討を行い、電気的特性分析で優れている 22kV 検討モデルについて、条件によっては経済性が成り立つことが判明した。今後はさらに配電線特性（地域特性、PV 配置）ごとに PV 導入量率と経済性の関係性を示し、最適な配電制御システムの将来像を提示した。

第 2 編(平成 29～30 年度)

第 1 編の成果ならびに中間評価や情勢変化から今後の課題を整理し、特別高圧側に与える影響等多面的な観点での検討と、次々世代に期待される配電技術開発動向に関する検討を実施した。

1. 国内外の配電システムの状況調査

次々世代に想定される PV 導入量や負荷量から PV 導入率の想定を実施した。その結果、本事業において検討対象となる次々世代では、供給エリアによって、PV 導入率が 5～15 倍程度となる可能性も十分想定されることが確認された。更に送電系統と配電系統の関係性に関しても国内外の動向を調査した。国内では電力システム改革や日本版コネクト&マネージ等の動向にも注目し、国外では欧州プロジェクトで提案される 4 つの TSO-DSO 連系モデルについても調査を実施した。

2. 電気的特性分析

PV 連系端や配電用変電所近傍に蓄電設置を導入することを想定し、蓄電設備の導入によるホスティングキャパシティの向上効果を定量的に明らかにした。また、必要となる蓄電設備の仕様として、蓄電設備の容量や年間充電電力量を算出した。その結果、配電系統構成によって、PV 導入を実現する設備容量に差異が出ることや、太線化や無効電力調整器を蓄電設備と併用すると PV の大量導入実現に有効であることを示した。

3. 経済性評価

電気的特性分析の結果を用い、経済性評価を実施した。その結果、バンク容量オーバーが制約となる条件下では、配電線に逆潮流させてないことが肝要であり、PV 端設置の蓄電池または出力抑制が対策となるが、現状の蓄電池価格を想定した場合は出力制御よりも費用が高くなる傾向があった。そこで、蓄電池の方が経済的に有利になるブレークイーブンコストを算出・分析した結果、PV 導入量が増加する程、費用対効果が上昇することが分かった。

4. 将来の電力供給のあり方

将来必要な配電技術開発動向を、「管理システム」と「配電網に接続される機器」の 2 つに分類し、必要な配電技術開発動向を調査した。「管理システム」では、分散型エネルギー資源管理システムと高度配電管理システムに着目し、必要な機能等を整理した。「配電網に接続される機器」では、送配電事業者が PV や EV の大量導入を可能とする屈強な配電系統を構成するために必要となる機器について調査を実施した。そして様々な配電系統に対応できる次々世代の配電網系統において、想定ケースを整理し各ケースにおける必要な配電技術開発動向の全体像を「配電技術開発動向マップ」として整理した。

5. 将来像の提示

検討委員会は 2017 年度は 3 回、2018 年度は 3 回の合計 6 回開催した。

配電システムの将来像については、「システム技術重視」なのか「ハードウェア技術重視」なのかによって大きく変わるため、この 2 つのシナリオに対する配電システムの将来像の様々な可能性を示した。

特許出願	「出願済」40 件
学会発表、論文	52 件
講演、その他	5

<p>IV. 実用化・事業化の見通しについて</p>	<p>研究開発項目①次世代電圧調整機器・システムの開発 各実施者ともに本プロジェクト終了後3年以内（2020年初頭）の事業化を計画している。各機器により、シナリオは異なるが、量産化に向けたコスト検討を行いつつ、概ねプロジェクト終了後に量産化に向けた設計検討や設備投資を行い、本格販売を開始する予定である。 また、本プロジェクトで開発されたSiCモジュールについては、電圧調整機器のみならず、様々なパワーエレクトロニクス機器への波及効果も期待できる。 なお、本プロジェクトの4年目以降に実施した模擬グリッドや実グリッドでの実証を通し、さらに機器の改良等を進めることで、実用化・事業化への移行を速やかに進めた。</p> <p>研究開発項目②次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術の開発 成果として取りまとめられた指針については、電事連や一般送配電事業者に対する個別の説明だけでなく、全体が集まる会合等を活用して導入の判断材料となるべく周知活動を実施し、一般送配電事業者の社内基準等への反映につなげる。反映の完了時期は、2030年までのPV導入量において対策が必要であると想定すると、2020年代の前半に完了しておく必要がある。 なお、「次世代」から「次々世代」へのスムーズな移行のため、成果の普及に向けては、研究開発項目③「未来のスマートグリッド構築に向けたフィージビリティスタディ」と相互連携して取組を実施する。</p> <p>研究開発項目③未来のスマートグリッド構築に向けたフィージビリティスタディ 本事業で得られた成果を利用することで、PV導入が拡大した次々世代（2050年頃までを視野）の配電網における対策方法を効率良く、検討・判断が可能となる見通しである。 この成果は、配電系統の開発・拡充計画の指針として一般送配電事業者に周知を行うとともに、中長期にわたって広く社会に周知していく必要がある。プロジェクト終了以降も、次々世代の新たな電力ネットワークに関するシンポジウム等の開催や学会等で研究成果の発表を行う等の活動を予定である。</p>	
<p>V. 基本計画に関する事項</p>	<p>作成時期</p>	<p>2014年3月 制定</p> <hr/> <p>2017年2月 中間評価の結果を踏まえた反映 1. 研究開発の目的・目標・内容のアウトカム目標を明確化 5. その他の重要事項に③成果の情報発信を追加</p> <p>2017年7月 プロジェクトマネージャーの変更</p>

プロジェクト用語集

用語	説明
アーク	2つの電極間で放電させること(アーク放電)によって形成されたプラズマの一種
インダクタ	流れる電流によって形成される磁場にエネルギーを蓄えることができる受動素子(コイル)
インバータ	直流電力から交流電力を電氣的に生成する(逆変換する)電源回路、またはその回路を持つ電力変換装置のこと
インピーダンス	交流に対する抵抗値(電圧と電流の比)
過渡現象	ある定常状態の回路において、電源電圧が変化して次のある定常状態に至るまでの間の現象のこと
逆潮流	商用電力系統に、太陽光・風力発電やコージェネレーションなどの様々な分散電源が連系運転中に、発電設備設置者の構内から電気事業者の電力系統へ向かう有効電力の流れ(潮流)のこと
系統擾乱	電力系統が安定に運転しているなかで、系統事故や負荷の変動等により電圧や潮流・周波数が乱れる現象
高圧	電圧のうち、直流にあつては 750 ボルトを、交流にあつては 600 ボルトを超え、7,000 ボルト以下のもの
高圧自動電圧調整器	高圧配電線路の途中に設置し、線路の電圧変動を調整する機器(SVR)
自然冷却	他から強制的に風を受けない無風状態での冷却
瞬時電圧低下	電力系統における瞬間的な電圧低下のこと
準せん頭値	無線機器等から放出される不要な電氣的ノイズの測定のうち、ノイズの持続時間が長い、あるいは頻度が高い時に 測定結果が高くなるように設計された測定指標
スイッチング周波数	パワーMOSFET やパワートランジスタといったスイッチング素子のオン/オフの切り替えを制御する信号の周波数
ステップ幅	段階的に電圧調整を行う電圧調整機器における、電圧調整段位間の幅
制御アルゴリズム	他の機器やシステムを管理し制御するための定式化した形での表現
静止型無効電力補償装置	静止型調相設備の一種。一般には降圧用変圧器、直列リアクトル、進相コンデンサ、高電圧大容量サイリスタ装置で構成され、サイリスタを用いた高速制御により、負荷状態において無効電力を連続的に変化させて、応答速度の速い無効電力補償が可能(SVC)
設備利用率	対象とする発電設備の実際の発電量が、仮に 100%運転を続けた場合に得られる電力量の、何%にあたるかを表す数値
零相回路	対象座標法(非対称な電圧・電流を対称な成分に分解して考える解析方法)における相回転のない成分に関する回路
単相	一つの電源と負荷との間を 2 本の線で結んで一つの回路を作るもの。電圧・電流の変化が一つの正弦波で表される交流
単相三線式	単相交流電力を 3 本の電線・ケーブルを用いて供給する低圧配電方式

短絡電流	電気回路の二点が相対的に低いインピーダンスで電氣的に接続された際に流れる電流
チップ	集積回路(IC)内の、主に半導体で構成された電子回路本体
低圧	電圧のうち、直流にあつては 750 ボルト以下、交流にあつては 600 ボルト以下のもの
電圧課電	停電している電力系統に電圧を印加すること
電圧歪	交流電圧の正弦波の形の変形
伝導性ノイズ	主に無線機器等から発せられ、配電線や通信線に侵入する電氣的雑音
特別高圧	電圧のうち、7,000 ボルトを超えるもの
トランス	変圧器
パワー半導体	電源(電力)の制御や供給を行う半導体
バンク	配電用変電所に設置された変圧器
バンク逆潮流	配電用変電所に設置された変圧器(バンク)において、配電系統から送電系統へ向かって有効電力が流れること
ハンチング	制御動作が原因で、頻繁に変数の変動を繰り返す振動状態のこと
部分昇圧	既設の配電系統の幹線部分に、一例として現行使用されている電圧階級の 22kV 配電線と配電塔を新設し、配電塔以降は、既設の 6.6kV 配電設備を利用して送電を行うこと
不平衡電圧補償	3 相電力系統において、相間負荷の違いなどに起因する各相電圧のアンバランスを補正すること
変圧器タップ	変圧器の巻数比を可変とするために、巻線に沿うように設けられた接続ポイント
放射性ノイズ	主に無線機器等から発せられる電氣的雑音のうち、空間を電磁波として伝搬するもの
ホスティングキャパシティ	既存の制御と配電系統の形状の下で、系統運用(信頼性や電力品質)に悪影響を及ぼさないで導入可能な最大の太陽光発電システムの限界量のこと
モールド	あらかじめ造られた鋳型などに、融けた金属や樹脂を流し込み一体成型した製品
力率一定制御	太陽光発電設備の出力(有効電力)に対し、運転、力率の値が一定となるよう無効電力を出力し、高圧太陽光からの出力によって生じる配電系統の電圧変動(電圧上昇)を抑制する PCS の制御運転
ループ切替	電力系統の一部が他の電力系統に接続可能な状況において、電力融通や電力潮流の関係上または送電線の作業や事故等の理由によって、現在接続中の電力系統から他の電力系統に無停電で切り替えること
連続電圧補償	電圧変動に対する補償を、無段階で行うもの
AVR	自動電圧調整器
BT	バッテリー
CALDG	電力中央研究所が開発した分散型電源を含む配電線電圧解析プログラムのこと。配電用変電所の変圧器による送り出し電圧制御、系統側電圧制御機器(SVR、SVC 等)による配電線電圧制御、分散型電源の出力制御(力率一定制

	御、電圧上昇抑制機能等)、需要家側の力率改善用コンデンサの制御等を同時に模擬可能であり、太陽光発電の大量連系による電圧管理への影響評価等に活用が可能
DC-DC コンバータ	直流で直流電圧を変換するための変換器
DG	分散型電源(Distributed Generator)
DR	ピーク時に電力使用抑制を促し、電力消費を抑えて電力の安定供給を図る仕組み(デマンドレスポンス)
DSO	配電系統運用者(Distribution System Operator)
EMC	動作中に他の機器や人体に悪影響を及ぼす電磁妨害を発生させず、かつ、他の機器が発する電磁波などの影響を受けない機能のこと
EV	電気自動車(Electric Vehicle)
FRT	系統擾乱時における運転継続性能(Fault Ride Through)
GB	半導体の動作を止めること(ゲートブロック)
IGBT	絶縁ゲートバイポーラトランジスタ。主に電力制御の用途で使用
IV	電流・電圧
JEC	電気規格調査会(及び同会で定める規格)
LRT	送電線あるいは配電線の電圧を調整するために、電圧の変動に応じて変圧器の負荷をかけた状態で、巻線のタップを切り換える装置(負荷時タップ切替装置)
MOS	半導体素子の構造の一種で、金属(metal)-半導体酸化物(oxide)-半導体(semiconductor)の三層構造になっているもの
PV	太陽光発電
RL	抵抗・リアクタンス
SBD	金属と半導体との接合によって生じるショットキー障壁を利用したダイオード(Schottky Barrier Diode)
SiC(シリコンカーバイド)	シリコン(Si)と炭素(C)で構成される化合物半導体材料。高耐圧パワーデバイスとしての特徴を有する素材
SVC	静止型無効電力補償装置(既出)
SVR	高圧配電線路の途中に設置し、線路の電圧変動を調整する機器(高圧自動電圧調整器)(既出)
TVR	サイリスタ式自動電圧調整器
XTAP	電力中央研究所が開発した電力系統瞬時値解析プログラム(eXpandable Transient Analysis Program)のこと。電力系統の瞬時値解析に標準的に用いられているプログラムよりも、インダクタ電流・キャパシタ電圧急変時の計算精度に優れる。
ZEH	断熱性・省エネ性能を上げること、そして太陽光発電などでエネルギーを創ることにより、年間の一次消費エネルギー量の収支をプラスマイナス「ゼロ」にする住宅(Net Zero Energy House)

第 I 章 事業の位置付け・必要性について

1. 事業目的の妥当性

1-1. 事業の背景・目的・位置づけ

我が国におけるエネルギー供給は化石燃料がその 8 割以上を占め、その殆どを海外に依存している。一方、近年、新興国の経済発展などを背景として、世界的にエネルギー需要が増大しており、また、化石燃料の市場価格が乱高下するなど、エネルギー市場が不安定化している。加えて、化石燃料の利用に伴って発生する温室効果ガスを削減することが重要な課題となっている。このような状況の中、エネルギーを安定的かつ適切に供給するためには、資源の枯渇のおそれが多く、環境への負荷が少ない再生可能エネルギーの導入を一層進める必要がある。

2008 年 7 月に「低炭素社会づくり行動計画」が閣議決定され、太陽光発電の導入量を 2020 年に 2005 年度比で 10 倍(1,400 万 kW)、また 2030 年には 40 倍(5,300 万 kW)とする目標が掲げられた。その後、2009 年 8 月にとりまとめられた「長期エネルギー需給見通し(再計算)」では、太陽光発電の導入を大幅に前倒して、2020 年に 2005 年度比で 20 倍(2,800 万 kW)を導入するとの想定がなされ、目標が見直された。同年 11 月には、太陽光の余剰電力買取制度が開始された。さらに、東日本大震災後の 2011 年 8 月には「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」が成立し、電気事業者に太陽光、風力、地熱、バイオマス、中小水力を対象とした再生可能エネルギーによって発電された電力を全量、一定の期間、一定の価格で買い取ることが義務付けられ、翌年の 2012 年 7 月 1 日から再生可能エネルギーの固定価格買取制度が施行された。

その後、東日本大震災以降では最初の計画となるエネルギー基本計画（第四次計画）が 2014 年 4 月に策定されるとともに、このエネルギー基本計画を踏まえ、経済産業省は、2015 年 7 月に長期エネルギー需給見通しを決定している。この長期エネルギー見通しの決定に向けた議論の中で、図 1-1 に示すように、再生可能エネルギーは、2030 年頃に総発電電力量（10,650 億 kWh）のうち、22～24%程度の導入が想定されている。

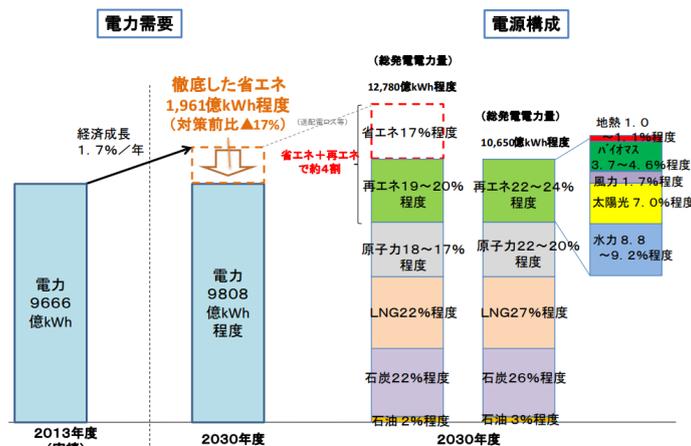


図 1-1 2030 年度の電力需給構造

出典：「長期エネルギー需給見通し」（2015 年 7 月 経済産業省）

このような流れの中、再生可能エネルギーによる発電量は、新たな制度の開始に伴い、その伸び率が急速に拡大している。2003 年から 2009 年までの年平均伸び率が約 5%であったのに

対し、余剰電力買取制度が開始された 2009 年から 2012 年までは約 9%、固定価格買取制度が開始された 2012 年から 2014 年までは約 33%であった(経済産業省総合エネルギー調査会基本政策分科会第 20 回会合資料)。

この再生可能エネルギーの中でも環境影響評価や地元調整のため導入に数年程度を要する風力発電や地熱発電に対し、1 年前後で導入可能な太陽光発電は、住宅用、非住宅用とも導入が著しい。

一方、太陽光発電は天候によって出力が変動し、その多くは電力システムの末端に分散設置されるため、その導入量が大幅に増加した場合には電力システムの運用上、配電線の電圧上昇や周波数調整力の不足等、多くの技術課題が想定される。

2010 年 4 月に経済産業省が取りまとめた次世代送配電ネットワーク研究会報告「低炭素社会実現のための次世代送配電ネットワークの構築に向けて」においては、我が国の電力系統上、太陽光発電について 1,000 万 kW 程度までは集中設置等の場合を除いて特段の系統安定化対策を講ずることなく電力系統で受入可能とされている。また、2020 年に 2,800 万 kW といった導入を目指す場合においては、現状において実用化された技術をベースにして系統安定化対策を行っていくことが想定されている。

しかしながら、現状の太陽光発電の導入量(2016 年 3 月末時点)は、3,223 万 kW(住宅用 865 万 kW、非住宅用 2,358 万 kW)であり、当初、2020 年に想定していた 2,800 万 kW を既に超える状況となっている。また、2030 年の太陽光発電の導入量は、先述した「長期エネルギー需給見通し」を基に概算すると、2030 年度の総発電電力量(10,650 億 kWh)のうち、太陽光発電の割合は 7%程度(749 億 kWh)と想定されており、現状の太陽光発電の設備利用率(12~14%)を勘案すると、6,500 万 kW 程度の太陽光設備容量が見込まれる。2030 年の太陽光設備容量について、さらに大きな試算では、環境省が実施した「2014 年度 2050 年再生可能エネルギー等分散型エネルギー普及可能性検証検討委託業務報告書」があり、ここでは、最も導入見込みの多い高位ケースにおいて、2030 年の太陽光発電設備容量を 10,874 万 kW と試算している。

今後も太陽光発電を中心とした再生可能エネルギーを積極的に活用していくために極めて重要となるのは、系統の安定的な運用である。

太陽光発電の導入拡大に伴う電力系統において、特に課題となるのが配電系統における電圧上昇である。この電圧上昇は、太陽光発電の出力が設置箇所の消費電力を上回り、電力系統に逆流が発生した場合に生じるものであり、低圧配電線電圧が多くの諸外国が 200V 以上であるのに対し、100V と他国に比べて低い我が国においては特に顕著に生じやすい。また、電圧上昇により、連系点の電圧が電気事業法第 26 条に基づく適正值(101±6V)を逸脱すると、太陽光発電の直流/交流変換器(PCS:Power Conditioning System)の電圧上昇抑制機能が動作し、太陽光発電の出力が抑制され、結果として発電機会が失われるため、再生可能エネルギー導入時に適正電圧を如何に維持するかは重要な課題である。

系統を適正電圧に保つための対策は、需要家側と系統側の対策に分けれ、需要家側の対策としては、高圧需要家に対して力率一定制御のパワーコンディショナー(PCS)を導入する等の対策が実施されている。一方で、需要家側の対策だけでは効果はあるものの、再生可能エネルギーの導入に伴う電圧上昇問題を全て解決することは困難である。電力系統への再生可能エネルギーの導入をある一定量以上進めていくためには、系統側の対策も含めて、双方で対応していく必要がある。そこで、本プロジェクトでは、対策が確立されていない系統側の対策に焦点をあて

て実施した。

従来の系統側の対策としては、高圧自動電圧調整器(SVR:Step Voltage Regulator)やサイリスタ式自動電圧調整器(TVR:Thyristor type step Voltage Regulator)、静止型無効電力補償装置(SVC:Static Var Compensator)といった電圧調整機器による対策が行われている。さらに電圧調整機器を集中的に制御して電圧調整を一括管理する集中制御方式といった積極的な対策も提案されている。

電圧調整機器については、従来の機器と比較して、電圧調整幅や動作回数制限等で優位性のあるパワーエレクトロニクス技術を活用した機器が配電用として一部実用化されているが、コンパクト化、軽量化、低コスト化等の課題があるため普及が進んでいない。

一方、我が国は先進的なパワー半導体としてSiC(シリコンカーバイド)の開発が他国に先駆け進展している。SiC パワー半導体は、Si(シリコン)パワー半導体と比較して、発熱が小さい、電力損失が少ない、高温で高速動作が可能等の特長を有している。これらの特長を活かすことで下記を同時達成する電圧調整機器の製作が可能となり、その実用化が期待されている。

- ① 電力損失が少ないこと及び高温動作することによって自然空冷化、低騒音化が図れ、設置場所制約を受けにくくなる。
- ② 高耐圧半導体故に回路電圧を高く、電流を小さくできる。それによってインバータ全体は低損失となり、小型軽量化、自然空冷化が図れ、メンテナンス性が向上する。
- ③ 高速スイッチングにより、フィルタ類を小さくできるため、小型軽量化可能である。

本プロジェクトにおいては、太陽光発電を中心とした再生可能エネルギーの導入拡大及び電力・機器システム産業における競争力の維持・向上に資することを目的として、3つの研究開発項目を一体的に推進した。3つの研究開発項目はそれぞれ「小型の次世代電圧調整機器」、「電圧調整機器普及のための基盤技術」、「今後のための将来的な配電システムのあり方」に焦点をあてる。また、本プロジェクトでは機器開発を工場試験に留めず、実システムでの導入までを一連して行うことで、系統側対策として、パワー半導体による新規技術の導入が加速されることを目指すとともに、全国的な実システムにて普及するための様々な条件を洗い出し課題を整理する。それぞれの研究開発項目は下記の通りとなる。

1つめの研究開発項目は、「次世代電圧調整機器・システムの開発」である。ここでは、先進的なパワー半導体であるSiCパワー半導体を用いて小型・軽量化を目指した電圧調整器の開発を実施した。さらに機器による対策に加え、これら機器を集中的に制御するシステムの検討も実施した。

なお、今までの電力機器開発は電力会社との共同開発が主体であり、今後海外展開時にはメーカーが主体的に仕様を検討・開発する必要があることも鑑み、本事業ではメーカーが主体的に仕様を検討・開発し、その機器を電力会社に持ち込むといった新たなスタイルを踏襲した。

2つめの研究開発項目は、「次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術の開発」である。ここでは、本プロジェクトで開発した機器のフィールドでの運用検証等を通して、パワーエレクトロニクス機器が系統に導入された場合の影響等について検討した。また、SiCパワー半導体の高耐圧化と低損失化が進めばトランスが不要となる等といった更なるコンパクト化が期待される

一方、機器全体の発熱密度が高くなる結果、放熱や構成部品の耐熱性を考慮した配置が課題となる。このようないくつもの課題に対して、機器を設計する上での留意事項について検討した。

次世代電圧調整機器の開発は新しいパワー半導体である SiC を用いて小型・軽量化を目指した挑戦的な機器開発を行う一方で、共通基盤技術の開発はユーザー側の視点で、実験室グリッド試験・模擬グリッド試験・実グリッド試験の段階な試験方法によって開発機器を評価し、メーカー側にフィードバックすることで、機器開発をスピードアップさせ、早期実用化を狙った取り組みを実施した。

3 つめの研究開発項目は、「未来のスマートグリッド構築に向けたフィージビリティスタディ」である。このフィージビリティスタディは、上記 2 つの研究開発項目による取組が 2030 年に向けた 2020 年代の対策であるのに対し、さらに長期的な 2050 年を想定した配電系統の形について、主として技術的な観点から検討した。本プロジェクトで取組んだ先進的なパワーエレクトロニクス機器が、2020 年代に導入されると想定すると、一般的に配電機器の機器寿命は 20 年程度であることから、2040 年代にはリプレースも含めた検討が必要となる。その際に未来の配電系統としては、機器のリプレースも含め、新たな機器を導入して取組むべきなのか、または他の方法による対策で系統安定化を図るべきなのか、将来の政策や情勢による影響もあるが、2050 年の配電系統としてどのような形態が考えられるかといった一つの方向性を示すことを狙いとして実施した。

これら研究開発の一体的な実施は、喫緊の課題を解決し、後述する上位施策へ寄与するだけでなく、我が国の再生可能エネルギーの導入を着実に拡大しつつ、長期安定的に配電系統を運用していく総合的な取組につながる。

1-2. 関連する上位施策

本プロジェクトが関連する下記①～④の上位施策について述べる。

- ①低炭素社会づくり行動計画(2008年7月、閣議決定)
- ②エネルギー基本計画(第4次計画:2014年4月、閣議決定)
エネルギー基本計画(第5次計画:2018年7月、閣議決定)
- ③長期エネルギー需給見通し(2015年7月、決定)
- ④科学技術イノベーション総合戦略 2015(2015年6月、閣議決定)

① 低炭素社会づくり行動計画

低炭素社会の実現に向けた具体的な施策として2008年に閣議決定された「低炭素社会づくり行動計画」の中でも、太陽光発電の導入目標が記載されるとともに、この計画の「Ⅱ 革新的技術開発と既存先進技術の普及」において、以下の通り記載されている。

Ⅱ 革新的技術開発と既存先進技術の普及

2 既存先進技術の普及

(1) 太陽光発電の導入量の大幅拡大

太陽光発電は、再生可能エネルギーの中でも特に潜在的な利用可能量が多く、エネルギー自給率の低い我が国の国産エネルギーとして重要な位置を占める可能性がある。そこで、太陽光発電世界の座を再び獲得することを目指し、太陽光発電の導入量を2020年に10倍、2030年には40倍にすることを目標として、導入量の大幅拡大を進める。このためには、技術革新と需要創出により価格を大幅に低減するとともに、大量導入の際に大きな課題となる電力系統への影響を緩和するための技術開発を進め、大量導入につなげることが必要である。価格については、3～5年後に太陽光発電システムの価格を現在の半額程度に低減することを目指す。ドイツを含めた諸外国の再生可能エネルギーについての政策を参考にしながら、大胆な導入支援策や新たな料金システム等を検討する。具体的には、住宅、産業、公共等の部門での思い切った導入支援、革新的太陽電池技術の技術開発、電気事業者によるメガソーラー建設計画への支援、地方公共団体との連携、ソーラーメーカーと住宅メーカーの連携の促進、グリーン電力証書や市民出資など更なる民間資金の活用等を行うとともに、電力系統への影響を緩和する系統安定化技術や、大容量・低コストの蓄電池の技術開発等を進める。

本プロジェクトは、「低炭素社会づくり行動計画」に記載されている、「大量導入の際に大きな課題となる電力系統への影響を緩和するための技術開発」そのものであり、「低炭素社会づくり行動計画」の目標達成に直接寄与するといえる。

② エネルギー基本計画(第4次計画)、エネルギー基本計画(第5次計画)

我が国は化石燃料に乏しく、その大半を輸入に頼るという脆弱性を抱え、エネルギーを巡る国内外の状況変化に大きな影響を受けやすい構造を有している。エネルギーの安定確保は国の安全保障には不可欠であり、我が国にとって常に大きな課題である。さらに、国際的な地政学的構造の大きな変化に直面する中で、我が国のエネルギー安全保障を巡る環境は厳しさを

増してきている。このような状況への対応には、長期的、総合的かつ計画的な視点に立ってエネルギー政策を遂行していく必要があり、その着実な遂行の確保を目的として、2002年に「エネルギー政策基本法」が制定された。

この基本法では、政府が総合資源エネルギー調査会の意見を聴き、エネルギー需給施策の長期的、総合的かつ計画的な推進を図るために「エネルギー基本計画」を策定することを定め、少なくとも3年には1度の頻度で内容を検討し、必要に応じて変更を行うとしている。こうした基本法に基づき、2003年に最初の計画が策定された。その後、第二次計画が2007年に、第三次計画が2010年に策定され、東日本大震災以降では最初の計画となる第四次計画が2014年4月に策定されている。

この第四次計画の「第3章 エネルギーの需給に関する長期的、総合的かつ計画的に講ずべき施策／第3節 再生可能エネルギーの導入加速～中長期的な自立化を目指して」において、本プロジェクトに直接関連する取組が、以下に通り記載されている。

2. 分散型エネルギーシステムにおける再生可能エネルギーの利用促進

住宅や公共施設の屋根に容易に設置できる太陽光や、地域の多様な主体が中心となって設置する風力発電、小河川や農業用水などを活用した小規模水力、温泉資源を活用した小規模地熱発電、地域に賦存する木質を始めとしたバイオマス、太陽熱・地中熱等の再生可能エネルギー熱等は、コスト低減に資する取組を進めることで、コスト面でもバランスのとれた分散型エネルギーとして重要な役割を果たす可能性がある。また、地域に密着したエネルギー源であることから、自治体を始め、地域が主体となって導入促進を図ることが重要であり、国民各層がエネルギー問題を自らのこととして捉える機会を創出するものである。

加えて、再生可能エネルギーを用いた分散型エネルギーシステムの構築は、地域に新しい産業を起し、地域活性化につながるものであるとともに、緊急時に大規模電源などからの供給に困難が生じた場合でも、地域において一定のエネルギー供給を確保することに貢献するものである。

このため、小規模な再生可能エネルギー源を組み合わせた分散型エネルギーシステムの構築を加速していくよう、個人や小規模事業者も参加しやすくするための支援を行っていく。また、2013年臨時国会において成立した農林漁業の健全な発展と調和のとれた再生可能エネルギー電気の発電の促進に関する法律（農山漁村再生可能エネルギー法）等の積極的な活用を図り、地域の活性化に資する再生可能エネルギーの導入を押し進める。

さらに、分散型エネルギーシステム内で余剰となった蓄電池の電力も含めた電力を系統に供給することを弾力的に認めるため、逆潮流に関わる運用を柔軟化し、このために必要な系統安定化のための技術革新を進める。

(1) 木質バイオマス等

大きな可能性を有する未利用材の安定的・効率的な供給による木質バイオマス発電及び木質バイオマス熱利用等について、循環型経済の実現にも資する森林資源の有効活用・林業の活性化のための森林・林業施策や農山漁村再生可能エネルギー法等を通じて積極的に推進し、農林漁業の健全な発展と調和のとれた再生可能エネルギーの導入

を推し進めていく。さらに、下水汚泥、食品廃棄物などによる都市型バイオマスや耕作放棄地を活用した燃料作物バイオマスの利用を進める。

(2) 中小水力

中小水力発電については、既に許可を受けた農業用水等を利用した発電について、河川法の改正による登録制の導入により水利権手続の簡素化・円滑化が図られたところであり、今後、積極的な導入の拡大を目指す。

(3) 太陽光

太陽光発電は、中小規模で分散して導入しやすく系統負担が少ないこと、非常用電源として利用可能であることなどの特徴があり、自家消費やエネルギーの地産地消を行う分散型電源に適している。遊休地や学校、工場の屋根の活用など、地域で中小規模の太陽光発電の普及が進んでおり、引き続き、こうした取組を支援していく。

～以下省略～

また、事業実施中の2018年7月にはエネルギー基本計画(第五次計画)が閣議決定され、再生可能エネルギーの主力電源化、エネルギーミックス(2030年度)における再生可能エネルギー比率22～24%を実現するための取組強化について明記されている。

本プロジェクトの取組は、再生可能エネルギーが系統連系する際に課題となる配電系統の電圧上昇問題の解決に寄与するものであり、分散型エネルギーの導入拡大に伴い必要となる系統安定化に向けた技術革新の一端として「エネルギー基本計画」の計画達成に直接寄与するといえる。

③ 長期エネルギー需給見通し

前記のエネルギー基本計画を踏まえ、経済産業省は、長期エネルギー需給見通し小委員会を設置し、中長期的な視点から2030年度のエネルギー需給構造の見通しの策定に向けた議論を行い、2015年7月に長期エネルギー需給見通しを決定した。この議論の中で、太陽光発電については、2030年頃に総発電電力量(10,650億kWh)のうち、7%程度(746億kWh)の導入が想定されている。太陽光発電の設備利用率(12～14%)を勘案すると、6,500万kW程度の太陽光設備容量が見込まれている。

今後も太陽光発電を中心とする再生可能エネルギーは、拡大していく方向にあり、本プロジェクトの成果は、これら再生可能エネルギーが系統連系する際の、特に電圧上昇問題の課題解決に繋がる。したがって、本プロジェクトの取組は、太陽光発電をはじめとする再生可能エネルギー導入拡大のシナリオを示した「長期エネルギー見通し」の実現に直接寄与するといえる。

④ 科学技術イノベーション総合戦略 2015

政府において、科学技術イノベーションは成長戦略の重要な柱と位置付けられ、総合科学技術・イノベーション会議が司令塔となり、「科学技術イノベーション総合戦略」を2013年6月に策定するとともに、その後も毎年策定し、施策の重点化等により着実に実行してきた。

科学技術イノベーション総合戦略2015は、2016年度から始まる第5期科学技術基本計画と連動させ、科学技術イノベーション政策の両輪としてより効果的・効率的なものとするために、議論を行い、まとめたものである。

この戦略にある「第2部 第2章 経済・社会的課題の解決に向けた重要な取組、I. クリーンで経済的なエネルギーシステムの実現、i) エネルギーバリューチェーンの最適化」の取組の中で、重点的取組の1つとして(2)クリーンなエネルギー供給の安定化と低コスト化が挙げられている。本プロジェクトは、これに資する施策の1つとして実施されている。

1-3. 再生可能エネルギーの導入状況

OECD (Organization for Economic Co-operation and Development: 経済協力開発機構) 加盟国の 2014 年における発電電力量全体に占める再生可能エネルギーの割合は図 1-2 に示すように 9% であり、その内訳としては風力、バイオマス、太陽光と続く。また、地域別で見ると、南北アメリカ、ヨーロッパが風力の割合が最も多いのに対して、アジア・オセアニアでは、太陽光、バイオマスの割合が多い。

他方、図 1-3 に示すように欧米主要国と我が国の発電電力量に占める再生可能エネルギーの割合を比較すると、我が国は、水力を除くと 3.2% に留まっているのが現状である。

我が国において再生可能エネルギーは、エネルギー自給率の向上、エネルギー源の多様化、エネルギー輸入依存度の低減を図る上で、非常に重要な位置付けであり、その導入拡大を図るための様々な政策や戦略が策定されている。経済産業省では、「エネルギー基本計画」(2014 年 4 月 11 日閣議決定) の方針に基づき、総合資源エネルギー調査会の長期エネルギー需給見通し小委員会における取りまとめを踏まえ、2015 年 7 月 16 日「長期エネルギー需給見通し(エネルギーミックス)」を決定した。この中で、2030 年度の再生可能エネルギーの導入量を 2,366~2,515 億 kWh(総発電電力量の最大 24%)、そのうち太陽光発電 749 億 kWh(出力 6,500 万 kW 程度)、風力発電 182 億 kWh と想定している。

固定価格買取制度以降、他の再生可能エネルギーと比較して、比較的容易に導入が可能な太陽光発電の導入量は、飛躍的に加速している。太陽光発電の導入量は、2016 年 3 月末の時点で 3,223 万 kW(住宅用 865 万 kW、非住宅用 2,358 万 kW) であり、特に非住宅用が著しい。

さらに認定容量については、2016 年 3 月末の時点で新規認定分が 7,993 万 kW あり、そのうち、住宅用が 464 万 kW、非住宅用が 7,529 万 kW となっている。この現状だけでも既に 2030 年の導入目標以上の容量となっている。

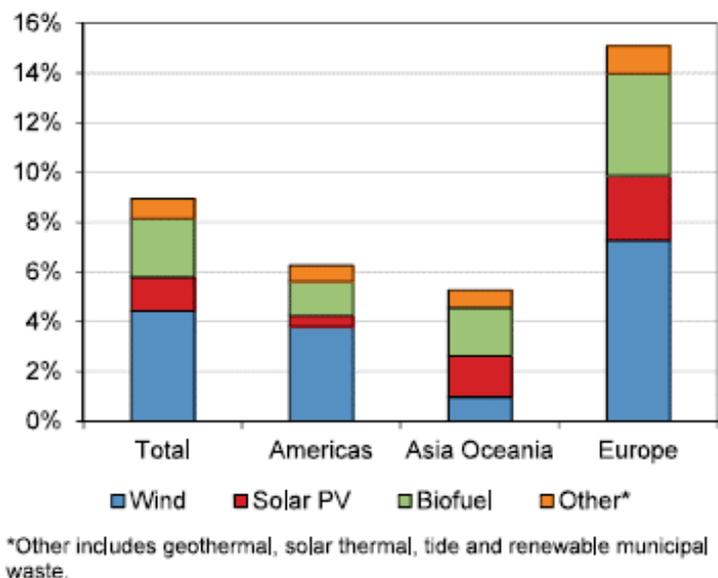


図 1-2 OECD 加盟国の発電電力量に占める再生可能エネルギー(水力を除く)の割合(2014 年)

出典: IEA Energy Balances of OECD Countries (2015 edition)

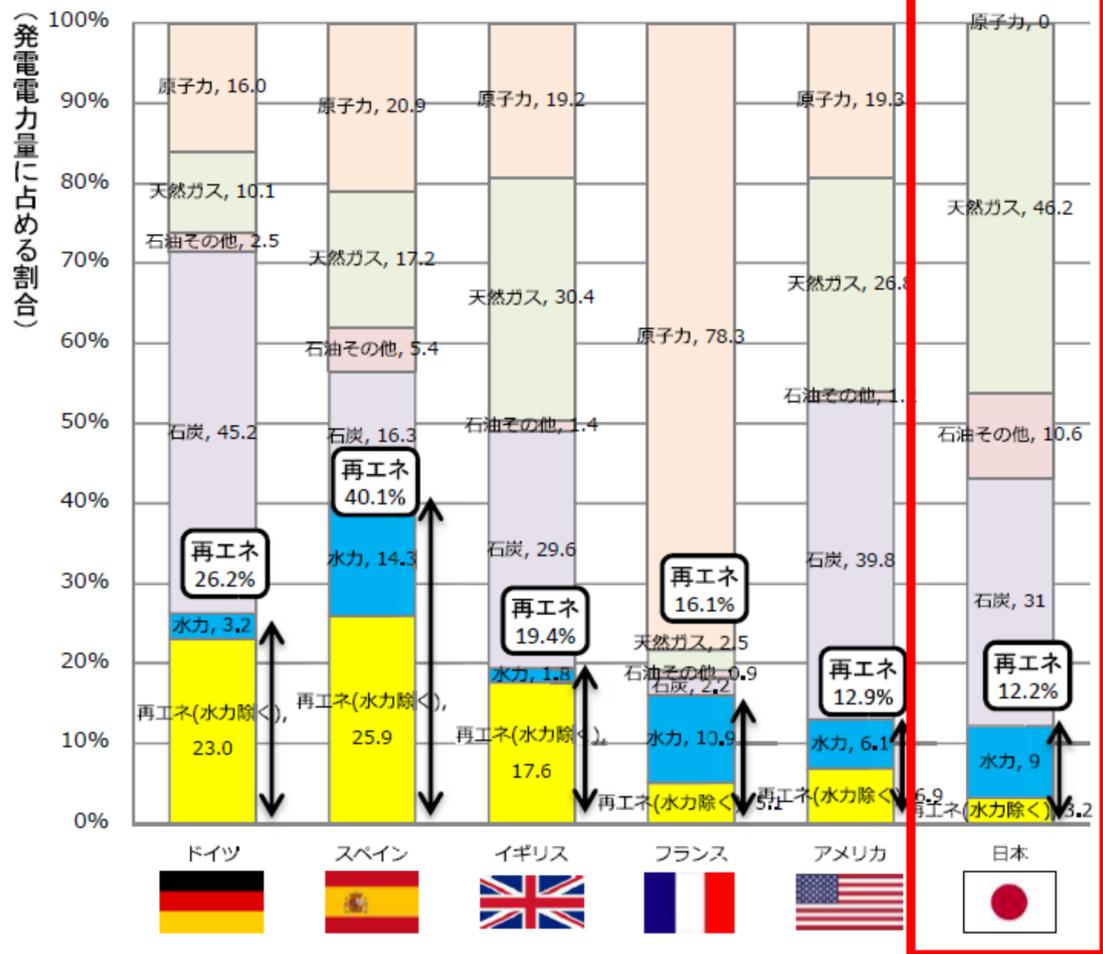


図 1-3 発電電力量に占める再生可能エネルギーの国際比較

出典：総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会新エネルギー小委員会(第 15 回)別紙 2

1-4. 各国の再生可能エネルギーの政策動向

我が国の再生可能エネルギーの政策的取組は、先述した通りであるが、主要各国も同様に積極的な再生可能エネルギーの導入を推進している。主な政策的取組については、以下の通り。

①米国

オバマ大統領が掲げる「New Energy for America」計画においては、電力消費量に占める再生可能エネルギー由来の電力量の割合を 2025 年に 25%とする目標を掲げており、2014 年末時点で、約 1800 万 kW⁽¹⁾まで太陽光発電の導入が進んでいる。

また、多くの州で電力部門における再生可能エネルギーの導入義務制度(Renewable Portfolio Standard :RPS)を策定している。2015 年 12 月時点では、29 州及びワシントン DC で導入され、2015 年にはこの RPS の設定目標を引き上げる動きがいくつかの州でみられた。ハワイ州は 2015 年 6 月 8 日、「2030 年までに 40%」のこれまでの目標を「2045 年までに 100%」とする目標に一気に引き上げた。カリフォルニア州はこれまで野心的といわれた「2020 年までに 33%」とする目標を 2015 年 10 月、「2030 年までに 50%」とする目標にさらに強化した⁽²⁾。

②欧州

EU は、2010 年 11 月に発表された、エネルギー新戦略「エネルギー2020」の中で、再生可能エネルギーの最終エネルギー消費に占める割合を 20%とする目標を掲げている。さらに 2014 年 10 月に開催された EU 首脳会議では、2030 年までに 27%とする目標が掲げられた。

③ドイツ

ドイツは、再生可能エネルギーの推進に向け、1991 年に「電力買取法」が制定された。その後、2000 年に「再エネ開発促進法」が制定され、「固定価格買取制度」が導入されることとなった。これら取組により、風力、太陽光発電の導入が促進され、2014 年末の太陽光設備容量は 3824 万 kW となっている。また、「再エネ開発促進法」は、2002 年、2009 年、2012 年、2014 年に改正され、2014 年の改正では、再エネ発電比率を 2025 年に 40~45%(2012 年 23%)、2035 年に 55~60%まで引き上げると規定されている。

一方、再エネ大量導入により、消費者の費用負担が急増する問題が生じており、消費者の負担増加を重く見た政府は、2012 年 4 月、太陽光発電の買取価格を一段と引き下げるとともに、設置規模が 5,200 万 kW を超えた後に設置される太陽光発電設備には「固定価格買取制度」を適用しないことを法律で決めた。これにより、太陽光の新規設備導入量は年々減少してきている側面もある⁽²⁾。

④フランス

フランスは、2009 年 6 月に公布された「EU 再生可能エネルギー促進指令」で 2020 年までに最終エネルギー消費量の 23%を再エネで賄うことが義務付けられている。これを受けて制定された 2009 年「環境グルネル実施計画法」でも、「2020 年には最終エネルギー消費量の最低 23%を再エネで賄うために、再エネ生産量を現行の 2,000 万トン(石油換算)から 2020 年に 3,700 万トン(石油換算)に引き上げる」との規定が盛り込まれた。また、発電では 2020 年まで

に再エネ比率を 27%まで引き上げることが計画されている。さらに、2015 年の「エネルギー移行法」では、2030 年にはエネルギーで 32%、発電で 40%に引き上げることが謳われている。

なお、2014 年現在、再エネ電源は風力 926 万 kW、太陽光 530 万 kW、その他 158 万 kW を含めて合計 1,614 万 kW に達している⁽²⁾。

⑤中国

中国は、2006 年「再生可能エネルギー法」、2007 年「再生可能エネルギー中長期発展計画」、2008 年には「再生可能エネルギー発展第十一次五カ年計画」を発表している。その後、2012 年に「再生可能エネルギー発展第十一次五カ年計画」を発表し、2020 年の太陽エネルギー利用(太陽光・太陽熱発電の合計)の発電設備容量を 5,000 万 kW とする目標を掲げ、2015 年末の太陽光発電の累積設置容量は 4,158 万 kW(速報値)で、世界第 1 位のドイツを抜いたとされる⁽²⁾。

1-5. 配電分野での再生可能エネルギーの導入に向けた取組動向

太陽光や風力を中心とした再生可能エネルギーは、世界各国でその導入拡大に向けた取組を行っている。我が国においては、先述の通り、太陽光を中心とした導入が進んでいる。太陽光発電は天候によって出力が変動し、その多くは電力システムの末端に分散設置されるため、その導入量が大幅に増加した場合には電力システムの運用上、余剰電力の発生、周波数調整力の不足、配電線の電圧上昇等、多くの技術課題が想定される。本プロジェクトでは、電力システムの課題のうち、特に配電系統における電圧上昇の解決を図ることを主たる目的としている。

一方、海外の配電系統においては、我が国と電圧階級や系統構成等が異なることから、課題や対策についても一概に比較できないが、ここでは配電系統に関連した海外での取組について述べる。

①米国

EPRI(米国電力中央研究所: Electric Power Research Institute)は、Sandia National Laboratories、Solar Electric Power Association と共同し 2009 年より Smart Inverter プロジェクトを進めてきた。そこでは、スマートインバータが提案され、電圧を制御するための力率制御機能、インテリジェント電圧/無効電力制御機能などの機能が提案されている。2014 年の EPRI の報告書の結論には、スマートインバータと配電マネージメントシステム(DMS)、地図情報システム(GIS)、メーターデータマネージメントシステム(MDMS)等のシステム系との統合による、更なる高機能化の必要性が指摘されている⁽³⁾。また、アメリカの最大手電機メーカー GE Energy が、LRT、SVR、調相設備、分散型電源の協調的な電圧制御を行う ADAM(Advanced Distribution Automation Management)を提案している⁽⁴⁾。

②欧州

欧州では、従来の配電機器に加え、太陽光発電、貯蔵装置等の配電機器を積極的に制御、活用する Active Distribution Network の検討が国際大電力システム会議 CIGRE⁽⁵⁾、国際配電会議 CIRED⁽⁶⁾等で行われている。

例えば、ベルギーの meta-PV プロジェクトでは、太陽光発電の大量導入に伴う、過電圧、無効電力バランス問題について検討しており、太陽光発電用インバータの力率制御、無効電力制御のみでは太陽光発電導入限界量に限界があり、系統側からの無効電力制御の必要性を指摘している⁽⁷⁾。また、オーストリアの DG DemoNet プロジェクトでは中央電圧制御装置から OLTC (On-Load Tap Changer)と分散型電源の無効電力制御により電圧制御を行っており、OLTC により、電圧プロファイル全体の制御を行い、局所的な電圧制御を分散型電源の無効電力制御により実施しており、系統側・需要家側の双方による対策を講じている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

また、低圧系統の取組としては、ドイツの Riesling プロジェクト、ポルトガルの Monitor BT プロジェクトがある。ドイツの Riesling プロジェクトでは低圧の±10%電圧可変、位相可変の AVR 変換器(スマートモジュール)による低圧電圧制御を実施すると共に、低圧計測値から中圧系統の P,Q を算出し、中圧系統の状態監視を行っている⁽¹⁰⁾。一方、ポルトガルの Monitor BT プロジェクトでは、分散センサを使用して低圧グリッド上の障害管理及び電圧制御を行っている⁽¹¹⁾。

この他、SVC 関連では、フィンランドの ADINE(EU Demonstration Project of Active Distribution Network)プロジェクトがあり、風力発電設備の近くに STATCOM を設置し電圧制御を行っている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

上記より、再生可能エネルギーの大量導入に対しさまざまな研究開発、実証試験等が進められていることがわかる。

③中国

中国では、第 12 次 5 年計画(2011-2015)に基づき、太陽光発電プラントの導入が進められている。電圧上昇問題に関する報告はないが、変電所における系統連系要件を満たすため、STATCOM 等、無効電力/電圧制御の必要性が指摘されている⁽¹⁴⁾

2. NEDO事業としての妥当性

2-1. NEDO の関与の必要性

NEDO は、日本最大級の公的研究開発マネジメント機関として、エネルギー・地球環境問題の解決と産業競争力の強化の 2 つのミッションに取組、経済産業行政の一翼を担っている。エネルギー使用合理化のための技術に関しては、民間の能力を活用して行うことにより、産業技術の向上及びその実用化の促進を図り、エネルギーの安定的・効率的な供給確保、経済・産業の発展に資することを目的として、様々なプロジェクトを推進している。

本プロジェクトは、「1-1.事業の背景・目的・位置づけ」および「1-2.関連する上位施策の目標達成への寄与」で述べた通り、太陽光発電を中心とした我が国の再生可能エネルギー大量導入に向けて、電圧上昇問題を主とした配電システムの系統安定化に向けた課題解決に資することを目的とするものであり、NEDO が関与する必要性の高い事業である。

2-2. 実施の効果

2015 年に公表された「長期エネルギー需給見通し」において、2030 年度の太陽光発電量は約 749 億 kWh とされており、2018 年 12 月 27 日に、環境省および経済産業省が公表した「電気事業者別排出係数(特定排出者の温暖効果ガス排出量算定用)-平成 29 年度実績-」に示されている温室効果ガス排出量の算定係数「0.000512t-CO₂/kWh」を用いて計算すると、2030 年度における CO₂ 削減効果は約 4 千万トン/年である。本プロジェクトによって、国内の太陽光発電導入を止めることなく拡大することが可能となり、CO₂ の削減に資するものとなった。

また、2009 年 7 月に経済産業省が取りまとめた低炭素電力供給システムに関する研究会報告「低炭素電力供給システムの構築に向けて」において、国内で太陽光発電 5,300 万 kW 導入するための配電対策費用は 4,400 億円と試算されている。また、2010 年 4 月に経済産業省がとりまとめた次世代送配電ネットワーク研究会報告「低炭素社会実現のための次世代送配電ネットワークの構築に向けて」において、2030 年に太陽光発電 5,300 万 kW の導入された場合の海外市場規模は、電圧変動対策機器が約 4,000 億円、配電自動化機器が約 2 兆円として試算されている。2015 年 7 月に策定された長期エネルギー需給見通しから試算すると、2030 年には 5,300 万 kW を超える 6,500 万 kW 程度の太陽光発電の導入が想定されており、さらなる市場規模の拡大が期待される。本プロジェクトの取組は、再生可能エネルギー導入に向けた配電系統側の対策として必要な手段であるとともに、経済効果への期待は大きい。

また、波及効果として、本プロジェクトは、配電機器側の技術者だけでなく、半導体、電力インフラといった様々な技術・研究者が集まって課題解決に向けて取組んでおり、将来のこれらの分野を担う若手技術・研究者の育成の促進にも貢献している。

参考文献

- (1) データで見る世界の風力発電・太陽光発電市場の動向, <http://www.energy-democracy.jp/831>
- (2) 海外電力調査会ホームページ, <https://www.jepic.or.jp/data/>
- (3) Common Functions for Smart Inverters, Version 3, 3002002233, 2014, EPRI
- (4) Z. Jiang, J. Fan, J. McDonald, “Advanced Distribution Automation Management for Active Distribution Systems”, C6-111, CIGRE 2012.
- (5) CIGRE ホームページ, <http://www.cigre.org/>
- (6) CIRED ホームページ, <http://www.cired.net/>
- (7) meta-PV ホームページ, <http://www.metapv.eu/>
- (8) M. Stifter, R. Schwalbe, W. Tremmel, S. Henein, H. Brunner, B. Bletterie, A. Abart, F. Herb, and R. Pointner, “DG DemoNet: Experiences from Volt/VAr Control Field Trials and Control Algorithm Advancements”, ISGT Europe 2012
- (9) R. Schwalbe, M. Stifter, B. Bletterie, A. Abart, R. Pointer, F. Herb, “DGDEMONET: Impact of Volt/Var Control on Increasing the Voltage Band Reserve – Results from Field Trial Validations”, CIRED 2013.
- (10) J. Backes, C. Koerner, V.Gruenewald, W. Kremer, S. Kaempfer, “The Riesling Project – Pilot Project for Innovative Hardware and Software Solutions for Smart Grid requirements”, CIRED 2015.
- (11) A. Bernardo, N. Silva, A. Carrapatoso, P. Rodrigues, F. Melo, C. Mota Pinto, M. Nunes, T. Silva, A. Casaca, “Monitor BT pilot project: Combined voltage regulation approach for LV grids with PV penetration”, CIRED 2015.
- (12) O. Samuelsson, S. Repo, R. Jessler, J. Aho, M. Karenlampi, A. Malmquist, “Active Distribution Network – Demonstration Project ADINE”, ISGT Europe 2010.
- (13) S. Repo, K. Maki, P. Jarventausta, O. Samuelsson, “ADINE – EU Demonstration Project of Active Distribution Network”, CIRED 2008.
- (14) X. Xu, C. Hao, M. Bishop, M. J.S. Edmonds, J. Sember, J.Zhang, “Development and Planning of Solar Power in China”, IEEE PES GM 2013.

第Ⅱ章 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

本プロジェクトは、再生可能エネルギーの導入拡大に伴う課題解決と我が国の電力産業、パワーエレクトロニクス産業の競争力強化をはかる事を目的として、以下の3つの研究開発項目を実施するものである。

1つ目としては、SiC パワー半導体を用いた機器開発等を行う『研究開発項目①配電用電圧調整機器・システムの開発』。2つ目としては、これら新たなパワーエレクトロニクス機器のフィールドでの運用検証や配電システムの設計指針の策定等を行う『研究開発項目②次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術の開発』。これら2つの開発が2020年代を想定しているのに対し、3つ目としては、その後、2020年代に導入した機器の寿命を迎える2040年代以降を想定した配電系統のあるべき姿を描く取組を行う『研究開発項目③未来のスマートグリッド構築に向けたフィージビリティスタディ』。

以上の取組を行うとともに、プロジェクトとしての目標を以下の通り、基本計画に定めた。基本計画のプロジェクトの目標としては、機器を導入して配電システムの対策を行うことが喫緊の課題であるため、機器開発を中心とした内容となっているが、さらに詳細な目標については、各研究開発項目の実施計画書に定めた。

【中間目標】(2016年度末)

SiC パワー半導体を用いて軽量・コンパクト化を図った電圧調整機器(要素技術を含む)と制御システムを開発し、フィールドで使用可能な試作品の設計・製作を行って工場試験等で性能検証を行う。なお、2016年度末時点においては、最低限、以下の技術レベルに到達していることが求められる。

- ・開発する機器全てが柱上設置可能であること。
- ・冷却は自然空冷であること。
- ・従来機器、従来システムと協調制御可能であること。
- ・次世代電圧調整機器・システムをフィールドに設置し、配電網としての運用検証を行う際の合理的な研究計画が策定されていること。

【最終目標】(2018年度末)

耐久性、信頼性、配電システムの制御アルゴリズムとの統合性を備え、かつコスト低減の見通しを有するSiC パワー半導体を用いた電圧調整機器及びその制御システムを開発する。また、開発した機器・システムをフィールドに設置しての運用検証を行う。さらに、これら新規の技術を配電網に適用して再生可能エネルギーの大量導入を図るための共通基盤技術を開発する。

なお、最終目標の達成に向けては、2018年度末時点において、最低限、以下の技術レベルに到達していることが求められる。

- ・全体もしくはSiC パワー半導体を適用する部分のコストが従来機器以下であること。
- ・機器メンテナンス頻度は2年以上であること。
- ・機器全体寿命が減価償却年(18~22年)以上であること。
- ・通信遮断時にも適正電圧を維持可能であること。
- ・複数の次世代電圧調整機器が混在した環境下においても適正電圧が維持可能であること。

本プロジェクトにおける開発目標は、プロジェクトが円滑に実施されるために最低限必要となるポイントを取り上げつつ、実際の配電システムでの設置や求められるコスト、寿命等について、ユーザーの1つとして想定される一般電気事業者等で最終的に成果が活用されることを念頭に設定した。

なお、個別の最終目標達成状況等については、後述する『第三章. 研究開発成果について』にて示すが、前頁に示したプロジェクト全体の間目標は2016年度末までに全て達成しており、最終目標は2018年度末までに全て達成した。

2. 事業の計画内容

2-1. 研究開発の内容

2-1-1. 研究開発項目① 次世代電圧調整機器・システムの開発

配電系統で問題となる電圧上昇問題について、系統側での対策として 6,600V 高圧では、SVC(静止型無効電力補償装置)、次世代 TVR(連続電圧補償装置:CVC)の開発、100V 低圧では、AVR 付柱上変圧器ユニットの開発をそれぞれ実施した。また、電圧制御システムの開発では、SVC、CVC が導入された際にこれら機器を集中的に一括管理することで、機器単体の導入と比較して、更なる再生可能エネルギーの導入拡大につながる有効性の検討等を実施した一方、事故等により集中的に管理出来なくなった場合の緊急時の自律分散電圧制御システム開発も並行して実施した。

これら開発機器については、各社は自らの事業化計画に基づいて開発対象を選択した。いずれも、プロジェクト終了後に販売を見込んだ計画としており、導入される可能性のある技術を取り上げている。

なお、本プロジェクトでは、これら機器開発に必要となる SiC モジュールの開発について、富士電機株式会社が担い、各社にモジュールを提供して次世代電圧調整機器の製作を実施した。

<p>SVC: Static Var Compensator、TVR: Thyristor type step Voltage Regulator、 CVC: Continuous Voltage Compensator、AVR: Auto Voltage Regulator</p>

2-1-2. 研究開発項目② 次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術の開発

先に述べた通り、再生可能エネルギーの導入拡大に向けた系統側での対策として、本プロジェクトでは SiC モジュールを活用した電圧調整機器等の開発を実施した。しかしながら、これら SiC も含めたパワーエレクトロニクス技術を活用した機器を配電系統に導入している事例は少ない。

そこで、本研究開発項目では、研究開発項目①で開発された機器のフィールドでの実証検証を行うだけでなく、パワーエレクトロニクス技術を活用した機器の性能、信頼性の評価方法の検討や配電システムの設計指針の検討等を通じて、配電系統へ複数導入された際の影響等について検討し、安定的に系統を運用するための指針を整理する取組を実施した。本成果を一般送配電事業者等のユーザーに向けて発信する事は、これら機器の導入を促進し、再生可能エネルギーの導入を加速させる事につながる。

2-1-3. 研究開発項目③ 未来のスマートグリッド構築に向けたフィージビリティスタディ

本プロジェクトで開発するパワーエレクトロニクス機器は、再生可能エネルギーの導入拡大に伴う 2030 年に向けた 2020 年代の対策としての活用を想定して実施した。

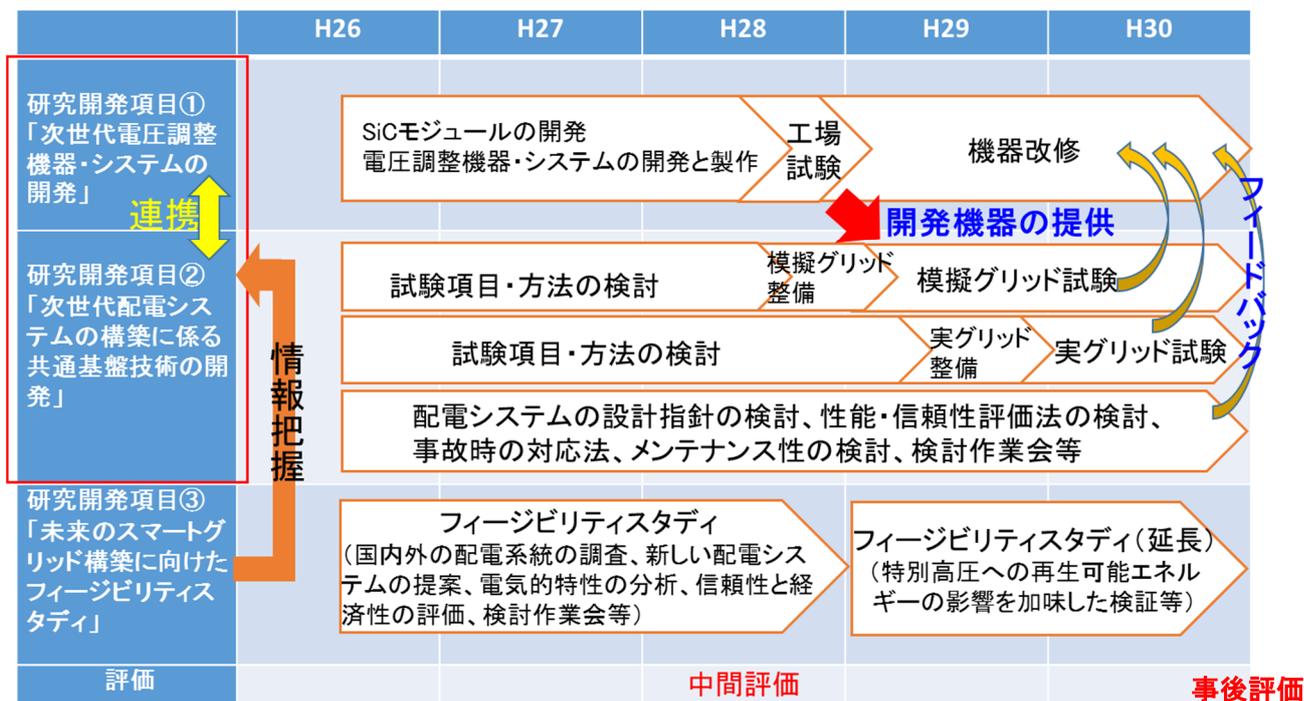
一方、本研究開発項目では、更なる再生可能エネルギーの導入に向け、これら機器についてリプレース検討を迎える 2040 年代以降の配電システムのあり方について、国内外の取組に関する情報収集を行うとともに、電気的特性や信頼性、経済性等の種々の観点から検討を実施し

た。ここでの成果は、将来の効率的な対策に向けた電力系統の長期計画への反映につなげることを目的としている。

2-2. プロジェクトの全体計画と予算

プロジェクト全体の主な研究開発スケジュール概要(年度)を表 2-1 に示す。本スケジュールの 2017 年度以降については、2016 年度の中間評価の結果を踏まえて、NEDOとして継続の可否を判断し、その後、2 年間の研究開発を実施した。

表 2-1 プロジェクト全体の主なスケジュール概要(年度)



本プロジェクトの研究開発項目毎の予算(NEDO 負担額)を表 2-2 に示す。前半 3 年間の予算総額は約 27 億円であり、これに後半 2 年間のプロジェクト予算総額を加えた 5 年間の総予算額は約 32.8 億円である。

表 2-2 研究開発項目毎の予算(NEDO 負担額)

(百万円)

年度	H26	H27	H28	H29	H30
研究開発項目① 「次世代電圧調整機器・システムの開発」	618	822	594	188	98
研究開発項目② 「次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術の開発」	43	179	302	81	83
研究開発項目③ 「未来のスマートグリッド構築に向けたフィージビリティスタディ」	45	67	55	46	53
合計	706	1,068	951	315	234

2-3. 研究開発の実施体制

本プロジェクトの実施体制を図 2-1 に示す。

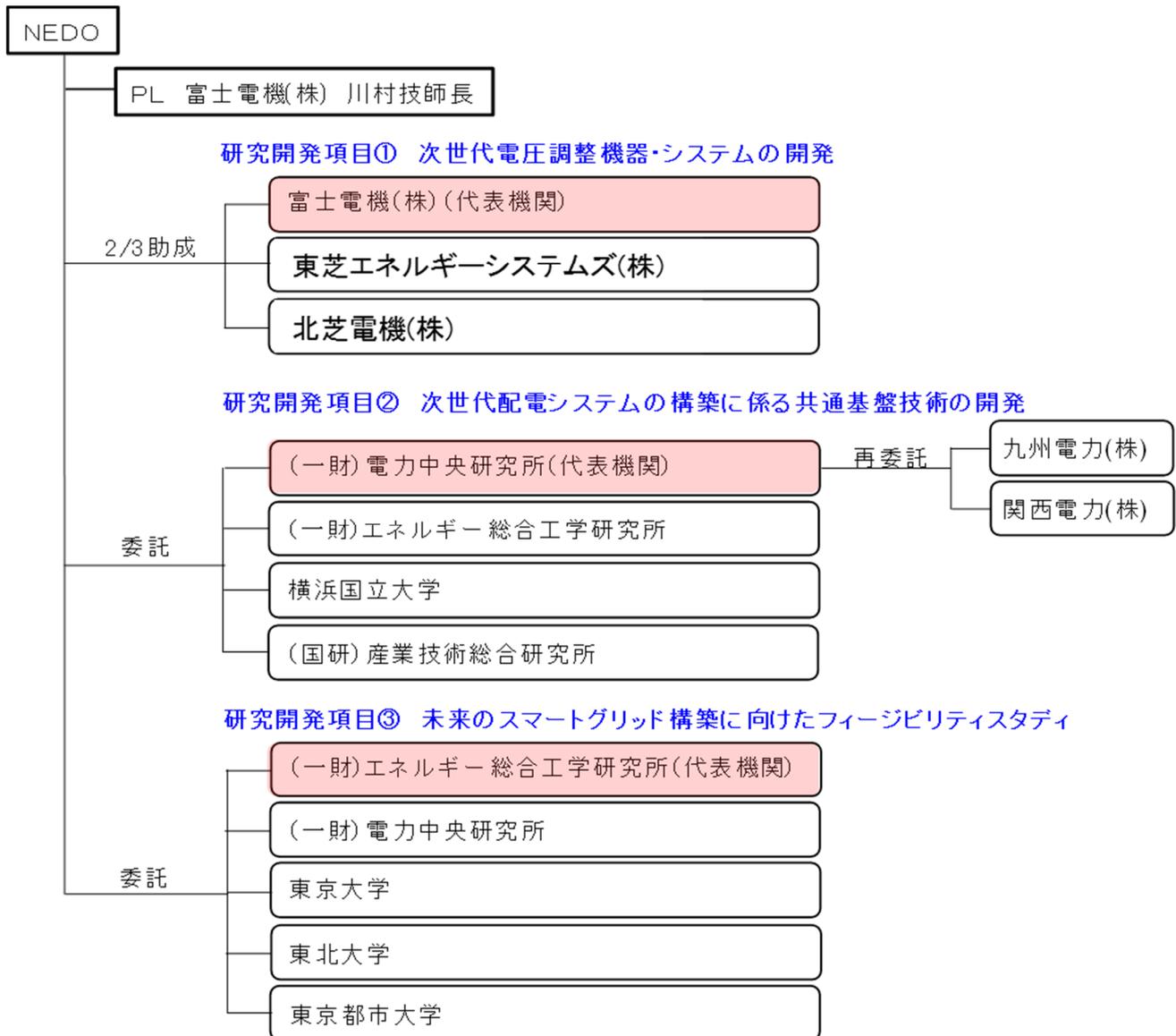


図 2-1 本プロジェクトの実施体制

2-3-1. 研究開発実施者

本プロジェクトは、2014 年度に公募を行い、研究開発の実施者を選定した。従来の配電用機器開発・製造では、メーカーと電力会社の共同開発が主であるが、本プロジェクトは、研究開発項目①においてメーカー主体となって機器開発を行ない、研究開発項目②において開発された機器の評価を行ない、共通基盤技術開発するという非常に高度なものであることから、実施者の選定には以下の特徴がある。

「研究開発項目①次世代電圧調整機器・システムの開発」の実施者には、パワーエレクトロニクスや一般送配電事業者向け配電用機器に関する実績が豊富な企業を選定している。「研究開発項目②次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術の開発」の実施者は、共通基

盤として研究開発項目①で開発される機器をフィールドで試験可能な体制とし、かつ、我が国における電力系統分野の研究開発実績が豊富な機関を選定した。「研究開発項目③未来のスマートグリッド構築に向けたフィージビリティスタディ」の実施者は、本研究開発に関連し、各種エネルギー技術に係る情報収集・評価、技術評価・分析手法等に優れており、また、中立的な立場から、各種研究機関及び関連メーカーとの連携が取りやすい機関を選定した。

2-3-2. プロジェクトリーダー(PL)

本プロジェクトでは、実施体制決定後に全実施者とNEDOでPLの選定に向けた協議を行い、全実施者の賛同を得て、富士電機株式会社 技術開発本部 技師長 川村逸生氏をPLに選定した。このようなプロセスでPLを選定したことにより、各研究開発項目間で情報共有が円滑となるだけでなく、研究項目間の垣根を越えた協議も活発に行われた。

また、PLは、2030年に向けた2020年代の対策に向けた喫緊の研究課題である研究開発項目①と②の研究開発を中心としつつ、NEDOとともにプロジェクトを推進した。

なお、PLが技術的な観点からの推進を中心としている一方、NEDOは、中立的な立場から、各研究開発項目を束ねたプロジェクト全体の方向性を考慮しつつ、進捗状況の確認だけでなく、実施者間の調整等も含め、プロジェクト全体の円滑な実施に向けた指導を実施した。

2-4. 研究の運営管理

NEDOは、PLを主体とするPL会議をプロジェクト全体の進捗報告や課題、解決策を協議するための場として、適宜開催し、円滑なプロジェクト推進に向けて取組んだ。PL会議は、NEDOとPLの他、各研究開発項目の代表機関である3機関の代表者からなる会議である。この会議は、研究開発項目①、②、③の進捗について、共有化を図ることで、プロジェクト全体の方向性やそれぞれの役割の再確認につながるだけでなく、少人数での協議のため、迅速に意思決定が行われ、速やかにプロジェクトへ展開されるといった効果もある。

例えば、研究開発項目①と②の連携に係る内容に関して、フィールド実証に向けた役割分担や実施者間の具体的な進め方の方針を協議することで、速やかに実施者間の調整が出来た等、プロジェクトの有効な手段として機能した。

一方、研究開発項目①、②が2030年に向けた対策であるのに比較して、研究開発項目③は、2050年に向けた対策と、目標とする年代が大きく異なる。研究開発項目③については、他の研究開発項目と研究開発としての直接的な連携は実施していないが、本PL会議や研究開発項目②で開催されている検討作業会を中心として進捗を確認するとともに、相互に定期的な意見交換を実施した。このような密な情報交換の連携を踏まえて、将来に向けた検討を行なった。

なお、PL会議の他、NEDOによる進捗管理の状況は次のとおりである。

- (i) NEDO担当者が各機関を訪問し、研究開発状況や導入設備を確認。また、実用化に向けた計画などについても確認、協議を実施。
- (ii) 年度当初に1年間の執行計画を求めるとともに、毎月、予算執行状況の報告を求め、研究設備の導入や消耗品の購入状況から研究開発に遅延が発生していないことを確認。
- (iii) 各研究開発項目間での連携をより円滑化するため、実施者間の打ち合わせや会議等にも必要に応じて出席し、全体調整を実施。

その他、「研究開発項目②次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術の開発」および「研究開発項目③未来のスマートグリッド構築に向けたフィージビリティスタディ」の中に外部有識者から構成される検討作業会をそれぞれ設けることで、外部有識者から効果的な推進に向けた技術的な助言等を頂きながら研究開発を進めた。事業後半には、研究開発が進むにつれて、メーカー毎のノウハウが出始めたことから、メーカー所属の PL では他メーカーの管理等が困難になってきた。そのため、この検討作業会を用いて各研究開発のマネジメントを PL に代わり NEDO が中心となり実施した。

研究開発項目②の検討作業会の外部有識者メンバーは表 2-3 の通り。

表 2-3 「研究開発項目②次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術の開発」
検討作業会

2019 年 2 月時点

	氏名	所属・役職
委員長	奈良 宏一	茨城大学 名誉教授
委員	吉永 淳	東京電力パワーグリッド株式会社 配電部 配電系統技術グループマネージャー
委員	清水 洋隆	職業能力開発総合大学校 教授
委員	田中 和幸	富山大学工学部 教授
委員	舟木 剛	大阪大学大学院 工学研究科 教授
委員	森 成人	電気事業連合会 工務部 副長

研究開発項目②の検討作業会では、技術だけでなく、電力系統側(ユーザー)の観点からの助言も貰いつつプロジェクトを推進させることは勿論、プロジェクトの後半に研究開発項目①で開発した機器のフィールドでの検証を実施したこともあり、研究開発項目②だけでなく、研究開発項目①の実施者である富士電機、東芝エネルギーシステムズ、北芝電機も参加して開発の進捗を報告し、情報の共有化を図るとともに、委員から助言を頂くなど、研究開発項目①の検討作業会としても機能するよう取組を行った。

また、研究開発項目③の検討作業会の外部有識者メンバーは、表 2-4 の通り。

表 2-4 「研究開発項目③未来のスマートグリッド構築に向けたフィージビリティスタディ」
検討作業会

2019 年 2 月時点

	氏名	所属・役職
委員長	横山 明彦	東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 教授
委員	蘆立 修一	東京電力ホールディングス株式会社 技術統括室長
委員	杉村 英市	電気事業連合会 技術開発部 部長
委員	荻本 和彦	東京大学 生産技術研究所 特任教授
委員	七原 俊也	東京工業大学 大学院 理工学研究科 教授

ここでは、2040年から2050年に向けた配電系統のあるべき姿について、電力会社だけでなく、大学を中心とした委員を配置し、将来像の検討を実施した。

なお、これら検討作業会は、研究開発項目②では2014年度に2回、2015年度に2回、2016年度に2回、2017年度に3回、2018年度に3回の計12回開催している。研究開発項目③では2014年度に3回、2015年度に3回、2016年度に3回、2017年度に3回、2018年度に3回の計15回開催した。

2-5. 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

2-5-1. 実用化事業化戦略

本プロジェクトで実用化が想定される研究開発項目は、「研究開発項目①次世代電圧調整機器・システムの開発」である。研究開発項目①の実施者は、成果の実用化、事業化戦略及びシナリオについて、NEDOに提出する「課題設定型産業技術開発費助成金交付申請書」に記載している。当該申請書には、本プロジェクト終了以降の製品設計～量産設備投資～販売までのスケジュール、製品市場における競合・価格競争力、売上見通し等が明記されており、NEDOは当該申請書を厳格に審査して助成金の交付を決定している。

【課題設定型産業技術開発費助成金交付申請書／企業化計画書の目次】

1. 研究開発を行う製品・サービス等の概要
 - (1) 内容
 - (2) 用途(販売予定先)
2. 研究開発への取組
 - (1) 研究開発を考えるに至った経緯(動機)
 - (2) 事業として成功すると考えた理由
 - (3) 事業化のスケジュール
3. 市場の動向・競争力
 - (1) 市場規模(現状と将来見通し)／産業創出効果
 - (2) 競合が想定される他社の開発動向とそれに対する優位性の根拠
 - (3) 価格競争力
4. 売上見通し
 - (1) 売上見通し
 - (2) 売上見通し設定の考え方

2-5-2. プロジェクト運営マネジメント

「2-3-2. プロジェクトリーダー(PL)」、「2-4. 研究の運営管理」等で述べたが、NEDOは、様々な進捗管理やPL会議を活用した迅速なマネジメントにつながる取組を実施した。また、研究開発項目②、③での外部有識者による検討作業会に参加し、作業会における質疑応答等を通して、有識者の見解やユーザーの観点からの意見を取り入れ、プロジェ

クトを推進するための課題を認識し、実施者への指導を行う等、積極なプロジェクト推進に努めた。

さらに、研究開発項目①と②の連携を深めるため、両社の協議の中に参加し、内容や予算の調整に努めることや、研究開発項目②と③の情報共有の場にも参加する等、それぞれの研究開発項目の中での協議にも積極的に参加し、適宜調整を行うことで、プロジェクト全体が円滑に推進するよう努めてきた。

2-5-3. 知的財産・標準化に係るマネジメント

知的財産は、特に本プロジェクトの助成事業として実施している「研究開発項目①次世代電圧調整機器・システムの開発」における実用化・事業化に向けた取組として重要である。これについては、市場でのシェア獲得に向けて、特許とすべきものは特許とし、特許化が得策ではないものは、ノウハウとする等、戦略的に出願するよう、各社の事業化に向けた戦略を尊重しつつ、指導を行った。

なお、委託事業として実施している「研究開発項目②次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術の開発」および「研究開発項目③未来のスマートグリッド構築に向けたフィージビリティスタディ」については、内容の性質上、特許が発生し難いが、パワーエレクトロニクス技術を活用した電圧調整機器が一般送配電事業者へ速やかに導入されていくことが最も優先度が高いとした上で、将来の標準化に向けた取組等が必要となるような状況となった場合は、規格化に向けた検討も視野に入れつつ取組むよう指導を行った。

3. 情勢変化への対応

再生可能エネルギー導入に係る状況は、プロジェクト開始から刻一刻と変化しているが、そのような状況を踏まえつつ、NEDOのマネジメントとして実施した例は下記の通り。

2012年7月に固定価格買取制度が施行され、2013年5月に「電気設備の技術基準の解釈」及びこれに関連するガイドラインである「電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン」が改正された事に伴い、バンク逆潮流の規制が緩和された。この一連の流れは、プロジェクト実施前に行われた取組であったが、太陽光を中心とした再生可能エネルギーは、当時、想定していたよりも大幅に導入が進み、2017年3月末時点での導入量は3,847万kW(住宅用946万kW、非住宅用2,901万kW)、2017年3月末の時点で新規認定分が8,454万kWという状況である。

このような状況の中で、研究開発項目①で開発しているAVR付柱上変圧器ユニットについては、前倒しで開発の目途を立て、企業独自で実用化・事業化に向けた開発を行い、予定よりも早期に事業化していく体制とした。

また、研究開発項目③で取組んでいる未来のスマートグリッド構築に向けたフィージビリティスタディについては、未来の配電系統について検討する事を目的としており、配電変電所からの逆潮流による特別高圧側の影響は特段考慮することなく、当初3年間で実施を計画していた。しかしながら、上記記載のバンク逆潮流の規制緩和や、それに伴う2014年度の系統連系規程の改定により、再生可能エネルギーによる配電変電所の逆潮流が、特別高圧側に与える影響を加味せずには、未来の配電系統について、最終的な検討が出来ない状況となった。そのため、2016年度末までの検討に加え、更に2年間の延長をNEDOのマネジメントの一環として行い、2017年度以降は、特別高圧側の影響を加味した検討や次々世代に期待される技術革新の整理や課題の洗い出しを実施することとした。

第三章 研究開発成果について

1. 研究開発項目ごとの成果と達成度

本事業の研究開発項目ごとの成果と達成度は以下の通りに説明する。

1) 研究開発項目①

(富士電機、東芝エネルギーシステムズ、北芝電機)

2) 研究開発項目②

(電力中央研究所、横浜国立大学、エネルギー総合工学研究所)

3) 研究開発項目②

(産業総合技術研究所)

4) 研究開発項目③-1 【第1編】平成26～28年度

(エネルギー総合工学研究所、電力中央研究所、東京大学、東北大学、東京都市大学)

5) 研究開発項目③-2 【第2編】平成29～30年度

(エネルギー総合工学研究所、電力中央研究所、東京大学、東北大学、東京都市大学)

1) 研究開発項目①

1. 研究開発項目①の成果と達成度

1.1 研究開発項目①次世代電圧調整機器・システムの開発

1.1.1 成果と達成状況

本研究開発では、6項目を開発した。

開発項目選定の理由を以下に記述する。

開発項目 1 SiC モジュールの開発（富士電機）

開発項目 2 SVC の開発（富士電機）

開発項目 3 次世代 TVR（以下：CVC）の開発（東芝、北芝電機）

開発項目 4 AVR 柱上変圧器ユニット（以下：AVR ユニット）の開発（富士電機）

開発項目 5 電圧制御システムの開発，集中電圧制御シミュレーション評価（富士電機）

開発項目 6 通信インターフェースの開発（富士電機）

(1) 開発項目選定の理由（機器およびシステム，通信インターフェース）

再生可能エネルギーにより配電系統末端から上位系統方向へ有効電力が逆潮流すると，配電系統末端側において配電線の抵抗分による電圧上昇が発生する。再生可能エネルギーが大量導入され逆潮流が増加すると電圧上昇が大きくなり，電気事業法で定められた許容電圧範囲を逸脱するという新しい問題が生じる。また，再生可能エネルギーは気象条件によって出力が変動する。従ってその変動様相は急峻で大きくかつ不規則・頻繁であり従来と異なる。

従来の電圧調整機器は，有効電力は上位系統から配電系統末端へ方向に流れそれに伴い電圧は上位系統から配電系統末端に向かって低下していくことを前提としているため電圧上昇に対する調整幅が狭い。また，電圧調整方式は機械式タップ切り換えによる方法で応答速度が遅く接点摩耗による動作回数制約が存在する。そのため，逆潮流増加に伴う電圧上昇を一旦抑えたとしても，再生可能エネルギーの出力が急減した場合は逆に電圧低下により許容電圧範囲を逸脱するという問題が生じる。更に，上記の様な再生可能エネルギーの急峻且つ頻繁な出力変動とそれに伴う電圧変動には対応し難い。

再生可能エネルギーに起因する電圧問題に対応できる電圧調整機器としてFACTS機器（Flexible AC Transmission Systems 以下FACTS機器）が挙げられる。FACTS機器は電圧上昇・低下双方に対応し応答速度が速く動作回数に制約の無いのが特長である。

配電系統の電圧変動問題への対策とその比較を表1.1に示す。

表1.1 配電系統の電圧変動問題への対策と機能の比較

	対策	電圧調整機能	動作時間	電圧調整幅	電圧変動対策への効果
1	配電線の強化 (配電線の負荷分割, 太線化, 22kVへの昇圧)	配電容量の増強。 信頼度は高いが設備利用率が低下	—	—	効果大(設計工事が発生し時間がかかる)
2	変電所の送り出し電圧の調整(変電所LRT)	機械式タップ変更で±7%程度調整可能。	数分	1.5%刻み程度	効果小
3	配電系統への電圧調整器設置SVR(LDC, またはローカル)	タップ変更で±7%程度調整可能。	数分	1.5%刻み程度	効果小
4	低圧柱上変圧器のタップ変更	機械式タップ変更で±7%程度調整可能。	季節毎	2.5%刻み程度	効果小
5	FACTS機器および電圧制御システムの導入	TVR: ±7%程度 SVC: ±1.5%程度	数十ミリ秒	ほぼ連続(不平衡補償も可能)	効果大

表1.1で効果の大きい5番のFACTS機器および電圧制御システムの導入に焦点をあてる。

電圧制御システムは、配電系統にFACTS機器が導入されると既に設置されている既存の電圧調整機器との協調動作が求められる。そのため配電系統全体を安定かつ最適に運用する制御アルゴリズム(制御システムと通信インフラ)が必要となる。この制御システムの候補として(1)集中電圧制御、(2)協調電圧制御(最低限の通信環境で機器同士の動作協調を図る制御)が挙げられる。

なお再生可能エネルギー側(発電側)の対策として、太陽光発電システムでは発電電力を減じることにより電圧上昇を抑制する機能が具備されているが、これは太陽光発電の発電機会を喪失させる。この機能はできる限り動作しないほうが望ましい。

次にFACTS機器の種類と機能を表1.2に示す。

表1.2 FACTS機器とその機能

FACTS機器の種類	機能
SVC : Static Var Compensator	無効電力を供給する装置。自励式と他励式がある。
UPFC : Unified Power Flow Controller	系統電圧に対して並列に接続するインバータでSVC動作を、直列に接続するインバータで潮流制御や電圧変動抑制を行う。
電圧調整機能(AVR)付柱上変圧器 (AVR: Automatic Voltage Regulator)	電圧調整機能を具備した柱上変圧器で低圧線の電圧を直接制御する。
LBC : Loop Balance Controller	フィーダ間で電力を融通する。SVC動作も可能である。
TVR : Thyristor Voltage Regulator	変圧器のタップ切り換えにて電圧変動抑制を行う。

これらのFACTS機器は都市地域、郊外地域の配電系統の特性の違いを考慮し適用することが肝要となる。

亘長が比較的短い繁華街地区の配電系統では、電圧変動問題は起こりにくい。

一方、比較的亘長が長く小規模な電源や負荷が分散する郊外や農山村の配電系統では、配電系統途中で直接電圧を制御する電圧調整方式（TVR）と無効電力補償（SVC）の併用が有効である。

また、低圧に接続される比較的大容量の太陽光発電では、専用の電柱と柱上変圧器を新しく設置することがある。このような場合はAVRユニットを既存の低圧線に設置して電圧を制御する方法で対応すると経済的に有利で、太陽光発電事業者の負担軽減にもつながる。

上記の考察を表1.3に示す。

表1.3に従い本実証では、配電系統の電圧変動問題はSVC、CVC、AVRユニットのFACTS機器3機種とそれを制御する電圧制御システムと通信インターフェースを開発することにより電圧変動問題の解決が可能であると考ええる。

表1.3 配電系統の特性とFACTS機器の適用

配電系統 種別	特徴	FACTS機器	
		高圧向け	低圧向け
工業地区	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高圧需要家の数が多い ・ 進相コンデンサ容量の合計が大きい ・ 低圧需要家の契約電力割合が小さい 	CVC：直列機器による電圧補償 SVC：無効電力補償による電圧制御 （進相C対策にも有効）	AVRユニ ット
繁華街地区	<ul style="list-style-type: none"> ・ 系統亘長が短い ・ 高圧産業用負荷の契約電力割合が小さい 	— （太陽光発電の導入量は少ないと想定される）	
住宅地区	<ul style="list-style-type: none"> ・ 系統亘長が短い ・ 低圧需要家の契約電力割合が大きい ・ 進相コンデンサ容量の合計が小さい 	CVC：系統中間に設置し電圧補償 SVC：設置制約が大きく次TVR設置が 困難な場合に効果を勘案して設 置	
農山村地区	<ul style="list-style-type: none"> ・ 系統亘長が長い 	CVC：系統中間に設置し電圧補償 （SVRの置換等） SVC：無効電力補償による電圧制御の 効果大	

(2) 開発項目選定の理由 (SiC パワー半導体)

FACTS 機器にはすでに提案され一部では実用化されていて主に Si パワー半導体を用いている。例えば送電系統では自励式 SVC や他励式 SVC として世界各地で使われており送電電圧の安定化に寄与している。

一方、配電用FACTS機器は過去に各社が様々な方式を提案し開発してきたが、FACTS機器が配電系統で使うには体格と質量が大きかったこと、Siパワー半導体の発熱が大きく強制風冷が必要なこと、高価なこと及び電圧変動問題がそれほど顕著に表れていないことから一部の地域を除いて本格的には導入されていない。これに比べSiCパワー半導体は、導通抵抗が低く、電力損失がSiパワー半導体の約2分の1に抑えられ、かつ高温動作が可能のため、従来のSiパワー半導体適用装置に比べ約5分の1の体積（富士電機20kVA 太陽光向けPCS試作実績より）で製作することが可能となる。SiCパワー半導体の価格は市場醸成、量産効果によりコストダウンを進めることによって、装置全体で従来のSiパワー半導体を用いた装置よりも低価格で供給ができると考える。

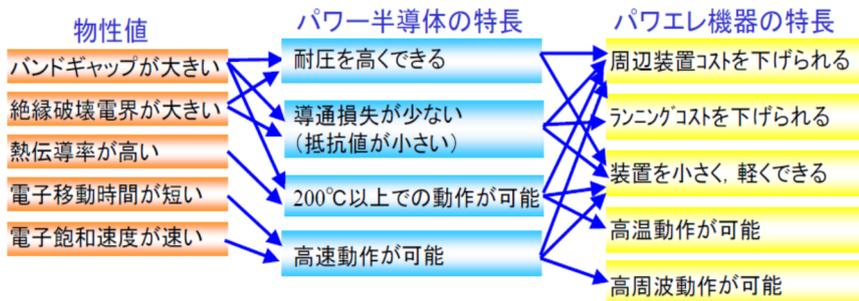
SiCパワー半導体は我が国の最先端技術の一つとして研究開発が行われてきており、高耐圧大容量チップ/モジュール開発のフェーズに入っており、高耐圧という特長を生かせる適用先である電力系統機器に相応しい3.3kVモジュールの供給も可能な段階となっている。SiCパワー半導体の特長を表1.4に示す。

表 1.4 SiC パワー半導体の特長

材料の物性値

	Si	SiC
バンドギャップ(eV)	1.1	3.3
熱伝導率(W/cmK)	1	10
絶縁破壊電界(MV/cm)	0.3	3.0
電子移動時間(1×10^{-9} V/cm·s)	22	3.3
電子飽和速度(1×10^7 cm/s)	1	2

物性値・パワー半導体・パワエレ機器の関係



SiCパワー半導体を適用した電圧調整機器の特長を表1.5に示す。SiCパワー半導体を適用した場合、Siパワー半導体を適用した場合と比較して、装置が大幅に小型・軽量化され装置効率も優れている。更にスイッチングに伴う騒音が少なくかつ冷却が自然空冷で、屋外電柱上に設置する配電系統用電圧調整装置に適していると考えられる。

表1.5 SiC適用電圧調整装置の特長（低圧SiCパワー半導体で比較）

項目	SiC適用電圧調整装置	Si適用電圧調整装置
装置効率	99%（損失約50%改善） 富士電機20kWPCS試作例	98%
体積	0.4cc/W（Si比1/5） 富士電機20kWPCS試作例	2.2cc/W
重量	1kg/kW 富士電機20kWPCS試作例	5kg/kW
スイッチング周波数	13kHz以上（可聴域外）	数kHz～10kHz（可聴域）
装置冷却方式	自然空冷	強制空冷（冷却ファン有り）

(3) 成果と達成度

研究開発項目の成果と達成度について、表1.6に示す。

なお、達成度は○、△、×の3段階で記載し、達成しているものは○、一部未達のは△、達成出来ないものは×とした。

表1.6 研究開発目標に対する成果、達成度

分類	目標	成果	達成度
最終目標（2018年度末） 耐久性、信頼性、配電システムの制御アルゴリズムとの統合を備え、かつコスト低減の見通しを有するSiCパワー半導体を用いた電圧制御機器及びその制御システムを開発する。また開発した機器・システムをフィールドに設置しての運用検証を行う。さらにこれらの新規の技術を配電網に適用して再生可能エネルギーの大量導入を図るための共通基盤技術を開発する。	全体もしくはSiCパワー半導体を適用する部分のコストが従来機器以下であること	SiCモジュールが今の富士電機製Siと同数の出荷量となった場合、SVCの価格は既存SVC以下となることが確認できた。	○
	機器メンテナンス頻度は2年以上であること	有寿命部品（交換周期10年以上）の他は、基本的にメンテナンスフリーを指向した設計としている。	○
	機器全体寿命が減価償却年（18～22年）以上であること	一部の有寿命品（制御電源関係）の交換の他は、20年以上の使用を前提とした設計としている。	○
	通信遮断時にも適正電圧を維持可能であること	通信遮断時は、機器単体で予め設定された整定値での運用に自動移行することにより、制御機能を喪失することのないものとしている。	○
	複数の次世代電圧調整機器が混在した環境下においても適正電圧が維持可能であること	複数の電圧調整機器（従来型、新型混在）が設置された配電システムのシミュレーションを実施し、協調制御が可能であることを確認した。	○

1.1.2 SiC モジュールの開発

(1) 成果と達成度

SiC モジュール開発の成果と達成度を、表 2.1(1)と表 2.1(2)に示す。

表 2.1(1) 開発成果と達成度

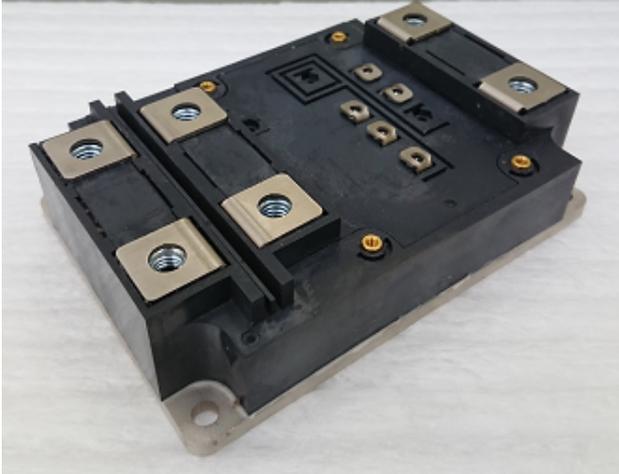
実施項目	開発成果	達成度
<p>3.3kV 耐圧の 1in1 SiC モジュールの開発と特性の確認 (2016 年度完了)</p>	<p>3.3kV 1in1 All-SiC モジュールの開発を行い、電気・熱的特性、絶縁性能が各規格を満足していることを確認し、自社 SVC および東芝・北芝電機（CVC）へサンプル供給を行った。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 定格：3.3kV 200A ・ 寸法：98×65×19mm 	<p>○</p>
<p>機器小型化に寄与する 3.3kV 耐圧の 2in1 SiC モジュールの開発と特性の確認 (2018 年度完了)</p>	<p>3.3kV 2in1 All-SiC モジュールの開発を行い、電気・熱的特性、絶縁性能が各規格を満足していることを確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 定格：3.3kV 200A/400A ・ 寸法：140×100×38mm 	<p>○</p>

表 2.1(2) 開発成果と達成度

実施項目	開発成果	達成度
機器小型化への検討	<p>2in1 モジュールを柱上 SVC に適用した場合のインバータ発生損失、冷却体サイズを試算し従来の All-SiC 1in1 モジュール適用時と比較した。</p> <p>【結論】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 2in1 モジュール適用時のインバータ 1 相分の発生損失は、従来の 1in1 モジュールに比べ約 38%低減（図 2.1 参照） ・ 冷却体（ヒートシンク）の体積は約 54%小型化可能と推定 	○

(2) 損失計算結果

損失について、先に開発の 1in1 との比較を行い、図 2.1 にまとめた。

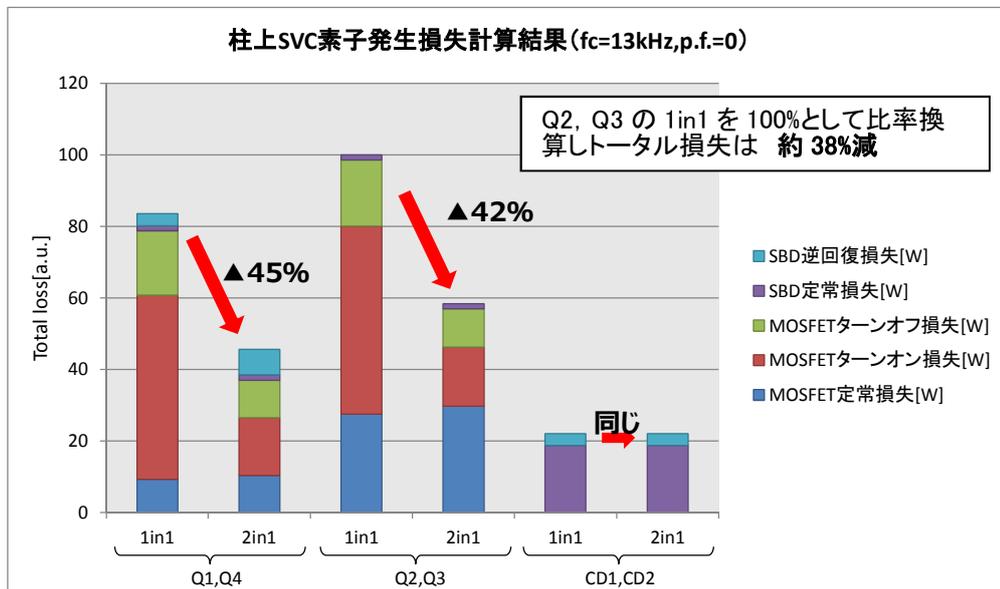


図 2.1 損失計算結果

(3) 機器寸法検討

2in1 モジュールでの熱解析を行い、ヒートシンク寸法を計算した。

1in1 H 460mm×W 350mm×D 140mm

2in1 H 460mm×W 250mm×D 90mm

体積比で約 54%減となる。

そのヒートシンクを用いたインバータ寸法を次頁に示す。

機器小型化への検討結果として、H28 年度完成の 1in1 モジュールとの比較を図 2.2(1)、図 2.2(2) に示す。インバータ体積比で約 25%減の見通しを得た。

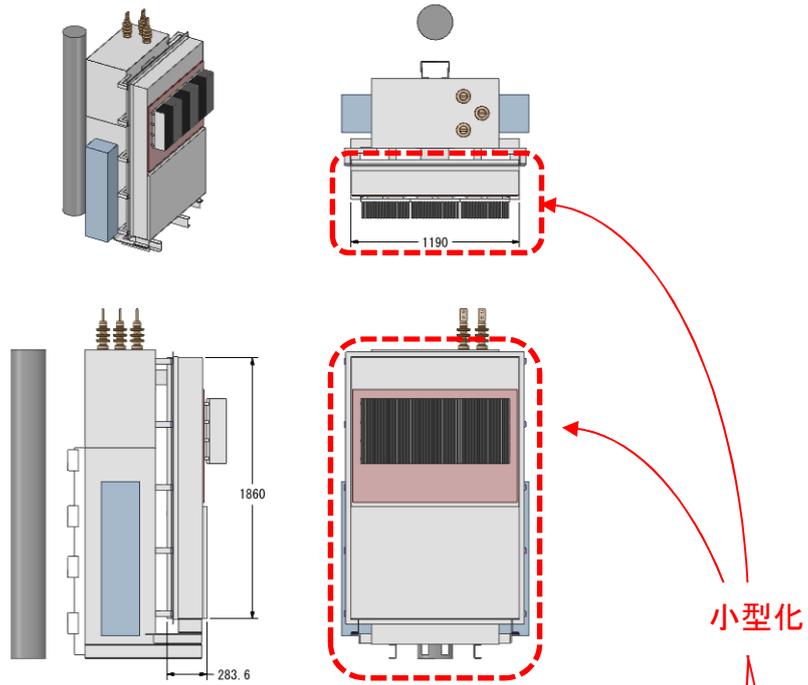


図 2.2(1) 1in1 モジュール適用 (従来) のインバータ寸法
W 1190mm×D 284mm×H 1860mm

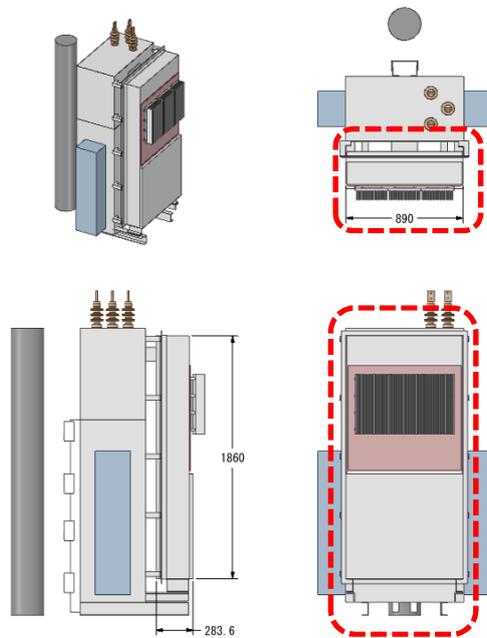


図 2.2(2) 2in1 モジュール適用のインバータ寸法
W 890mm×D 284mm×H 1860mm

1.1.3 SVC の開発

(1) 成果と達成度

開発した SVC は、当初設定した所定の工場試験を終え、電力中央研究所赤城試験センターにおいて模擬配電システムにおける試験を実施した。試験開始直後に系統連系中に基本波電圧に対して高調波成分が重畳する事象が発生した。

本事象に対する発生原因を調査したところ、配電システム用 SVC を設計する上で必要な技術要件に不備があり、事象発生に至ったことがわかった。

原因究明により発見された主な技術的課題は以下の通りである。

- a) 装置設計に考慮すべき配電機器としての要件が不足している
- b) 連系系統や周辺機器も含む総括的な性能評価が不十分
- c) 装置の小型化を達成するために一部製品設計指針から逸脱した設計がされている

一般的に産業用 SVC は納入場所が決まった時点で設置点周辺の負荷機器や連系系統のインピーダンス等を考慮して制御設計を行うことが可能である。また納入時にはパラメータの調整等が容易に可能である。一方配電システムは、設置点の系統インピーダンスや周辺の負荷機器の構成などは予見することが出来ないだけでなく、柱上設置のために納入前に予めパラメータの設定を行うこととなり、柱上での調整は不可能である。そのため設置点が明確な産業用 SVC とは設計要件が大きく異なる。

具体的には装置が適用される可能性のある、あらゆる配電システム（系統インピーダンスの範囲や特長等を定義した上で対象システムや負荷に対して適用される配電システムを定義する）において連系時の制御安定性を保証する必要がある（ロバスト制御設計）。

このような設計要件の違いを考慮して、要件の再設定を行った。さらに、シミュレーション環境の整備と精緻化を行った上でシミュレーションにより設計の妥当性を確認した。

要件の再設定に当たっては、最終的に以下の対策を行うことで課題の解決を果たした。

- ① 制御性能を向上させるために制御遅延の原因を徹底的に排除した
- ② 制御パラメータの設計に当たってはロバスト制御設計に合致する性能判定を実施した
- ③ 上記制御設計に基づく主回路定数の見直し（フィルタ設計）を実施した
- ④ FMEA に基づく保護体系の見直しを実施した
- ⑤ 高調波共振は制御系以外の要因で発生し得るため常時監視し高調波発生が認められた場合は装置を解列する対策を実施した

尚、設計不備によって遅延した開発工程は5年間の実証期間内ではリカバリーが不可能なことから5年目の助成を停止した上で、再設計を行い設計不備の是正と、是正された装置による工場試験を再実施した。

以降の報告内容は、再設計された装置によるものとする。

再設計による初期設定課題に対する課題解決の達成度を表 3.1(1)に、開発項目毎の開発成果と達成度を表 3.1(2)に示す。

表 3.1(1) 初期設定課題に対する課題解決の達成度

主な課題	内 容	成 果	達成度
SiC モジュール適用技術	SiC モジュールの駆動技術、高耐圧で高周波スイッチングを可能とする低インダクタンス配線技術の開発。	ゲートドライブユニットの開発及び低インダクタンスのラミネートブスバー適用により高周波スイッチング（13kHz）が可能な SiC インバータを開発した。	○
小型軽量化技術	柱上設置を実現するため機器小型化、軽量化技術の開発。	60Hz 用で寸法：W 1281mm×D 985mm×H 2318mm、質量：1,790kg となり目標を達成した。	○
冷却技術	高温動作可能な SiC モジュールの冷却技術と、小型で自然空冷を可能とする装置全体の冷却技術の開発。	高温動作可能な SiC の放熱効果向上（放熱器のアルマイト処理等）や内部輻射熱の最小化により、自然空冷の完全密閉構造を達成した。	○
構造技術	定期交換部品を最小にし、かつ交換を容易にするとともに、柱上へ搭載できる耐候性を持った構造技術の開発。	消耗品の大幅低減及び長寿命化、装置の完全密閉化により、柱上設置可能な構造を達成した。	○
部品・部材	高耐圧使用で期待寿命 18 年～22 年を実現する部品・部材の開発・選定。 機器メンテナンス周期は 2 年以上とする。	部品点数の削減や可動部のある機器の削減、長寿命品の選定等により主回路部品については期待寿命 18 年～22 年を達成した。また、機器メンテナンス周期についても 2 年以上を達成した。	○
制御技術	上位制御システムの指令に基づく連動運転、および機器単体による個別運転を可能とする制御アルゴリズム、および制御装置（ハードウェアとソフトウェア）の開発。	上位制御システムの指令に基づく連動運転、および機器単体による個別運転を可能とする制御アルゴリズムを開発し、リアルタイムシミュレータによって動作を検証した。	○
保護技術	系統事故時でも安全に運転継続、もしくは停止するための保護技術の開発。	FMEA による解析結果に基づく保護体系を検討し、適切な保護機能を具備することにより装置の安全性を確保した。	○
耐環境技術	① 周囲環境への影響を最小にするための低高調波、低振動、低騒音、低ノイズ技術の開発。 ② 周囲環境（気象、EMI）からの影響を受けずに安定運転を可能とする機器技術の開発。	低高調波、低振動、低騒音化は実現できたが EMC 測定は工程遅延により未実施。周囲環境からの影響については気象影響による影響は IP55 レベルの環境性を達成したが EMI による影響測定は工程遅延により未実施。	△

注 上記成果は、試作器の社内工場試験レベルでの成果となる。（模擬グリッド及び実グリッド試験、装柱性確認試験は未実施）

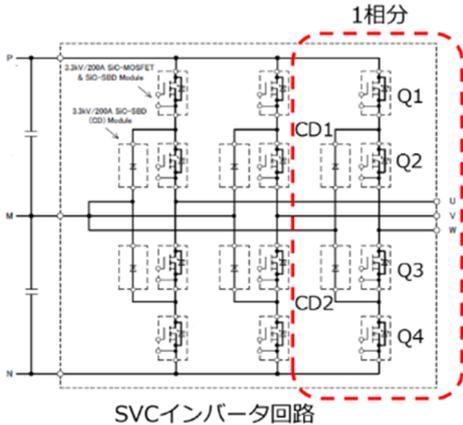
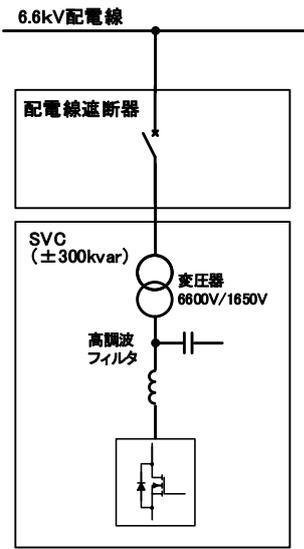
表 3.1(2) 開発項目毎の開発成果と達成度

開発項目	目 標	成 果	達成度
1. 装置仕様の検討と決定	仕様検討を行い次の機器仕様を決定する。 ・電気仕様 ・構造, 冷却仕様 ・試験仕様	各種要件を整理した上で仕様検討を行い以下の仕様を決定した。 ・電気仕様 ・構造, 冷却仕様 ・試験仕様	○
2. 装置の開発, 製作	検討した装置仕様に基づいて必要な開発やシミュレーションを行い装置の製作を行う。	以下の開発を完了した。 ・電気品の開発 ・構造の開発 ・制御アルゴリズム開発 ・制御装置開発 また, 装置の評価に必要な以下の環境を整備した上で必要な評価を行った。 ・基本機能シミュレーション環境 (デジタルシミュレーション) ・ミニモデル ・リアルタイムシミュレーション 上記成果に基づき装置の製作を実施した。	○
3. 工場試験	試験仕様に基づいた工場試験を実施する	試験仕様に基づいて工場試験要領書を作成し, 工場試験を実施した。 ただし, 開発工程遅延のため EMC, EMI 及び振動, IP 試験等耐環境試験の一部が未実施となった。	△

注 上記成果は, 試作器の社内工場試験レベルでの成果となる。(模擬グリッド及び実グリッド試験, 装柱性確認試験は未実施)

また, 開発した SVC の仕様概要を表 3.2 に示す。

表 3.2 : SVC の仕様概要

	SVC の仕様概要
定格容量	300kVA
定格電圧	6,600V
構成	SVC 用変圧器 + 3 レベルインバータ
素子	3.3kV SiC-MOS(1in1) 12 個 3.3kV SiC-SBD(1in1) 6 個  <p>1相分 SVCインバータ回路</p>
冷却	自然冷却
寸法と質量	50Hz 試作機 W 1281mm × D 1120mm × H 2490mm 質量 : 2,090kg 60Hz 試作機 W 1281mm × D 985mm × H 2318mm 質量 : 1,790kg ※外形については日射対策用のカバーを見直し改良を行った また 60Hz 機については図面レベルでの評価結果である
制御機能	<ul style="list-style-type: none"> ・ 電圧変動抑制 ・ 不平衡電圧補償 ・ FRT アシスト機能
付属機能	<ul style="list-style-type: none"> ・ 通信機器との接続 (制御定数の受信と設定)
システム概要	 <p>6.6kV配電線 配電線遮断器 SVC (±300kvar) 変圧器 6600V/1650V 高調波フィルタ</p>

写真

ミニモデル(200V 30kVA, IGBT 使用)



50Hz 試作機(300kVA, SiC 使用)
(日射対策カバー改良後)



(2) 機能の概要

本実証で開発した SVC には、従来の電圧制御や他機器との協調機能に付加して FRT アシスト機能を設けた。

本機能は、自励式変換装置の高速制御性能を活用し、系統故障等に起因する瞬時電圧低下時に、装置が発生し得る最大の無効電流（過負荷耐量も考慮）を発生することで電圧の維持を図り、周辺の太陽光 PCS 等の不要解列を防止することを目的とする機能である。

図 3.1 に工場試験設備を利用した試作器の FRT アシスト機能の動作例を示す。

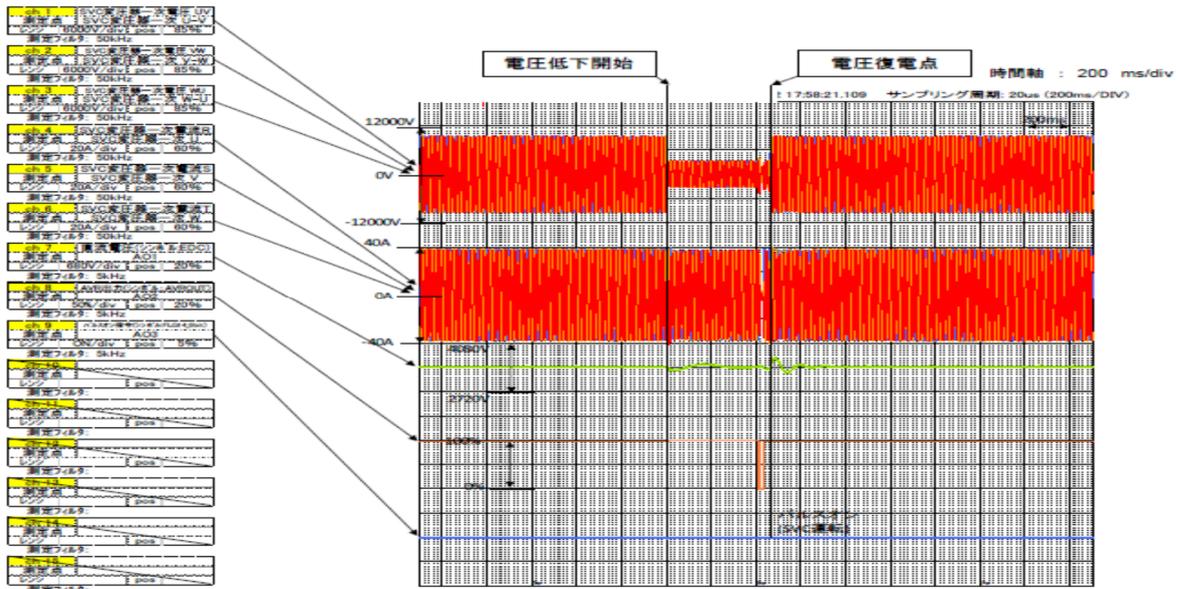


図 3.1 瞬低発生時の FRT アシスト機能の動作例

(3) 構造概要

SVC の構造は、当初の設計において変圧器とインバータの分離型を提案した（図 3.2，図 3.3 参照）。

その後、研究開発項目②でのレビューにより、変圧器とインバータ間の高圧ケーブル露出や、施工が 2 回となることなど施工性、保守性で課題があることが分かった。

これらの課題を解決するための形状としては、既設電柱での効率的な昇柱作業を考慮し、一体型が望ましいとの結論を得た。

また施工時にクレーンでの吊り上げを考慮し、特別な治具を用いずに行うことと、吊り上げ時の機器重心も水平となるよう要望を受け、構造見直しを行った（図 3.4 参照）。

構造検討における主な留意点を表 3.3 に示す。

表 3.3 構造検討における課題と主な留意点

部位	課題	留意点（改良項目）
変圧器 （フィルタ 含む）	重心位置（装置の重心位置が電柱より規定距離以内となること）	薄型設計により重心位置を最適化した
	軽量化	質量と騒音を勘案して最適な磁束密度を採用した。また巻線材料と油量、冷却構造（冷却フィン大きさ）の関係を評価し軽量化を達成した（軽量絶縁油の採用も検討したが将来普及時のコスト等も考慮して不採用とした）
	騒音	フィルタリアクトルを変圧器筐体内に収め油冷とすることで小型化を達成すると共に鉄心材料の見直しや遮音構造の採用により低騒音化を達成した
	低損失（小型軽量化）	高調波フィルタの小型化と損失低減のため －変圧器をフィルタの一部として利用 －フィルタ抵抗を使用しない構造の採用とした
インバータ	小型化	変圧器を含めた奥行を装柱限界以内に収めるために超薄型構造とした
	自冷密閉構造	自冷密閉構造を達成するために筐体内部への発熱を抑制するインバータスタックの冷却方法を開発した
	内部構成機器の温度耐量	筐体内の熱解析結果に基づき温度耐量の違う内部構成機器の配置を決定した
	放熱器の小型化	放熱器の小型軽量化を達成するために放熱器表面処理による放熱効果の向上とトンネル効果を利用した冷却方法を採用した

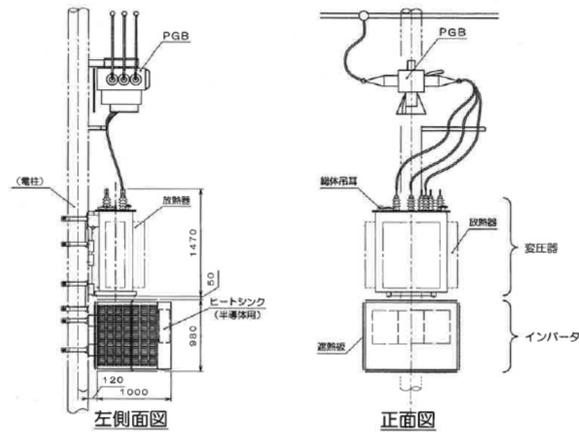


図 3.2 試作SVC（分離型）外形図



インバータ(フィルタ部含む)



変圧器

図 3.3 試作SVC（分離型）写真

一体型構造の検討に当たり、重量のある変圧器を電柱側とし、フィルタ部も変圧器上部に配置することで重量配分にも考慮を行った。インバータは内部構造を見直し薄型とし、変圧器背面に設置した。

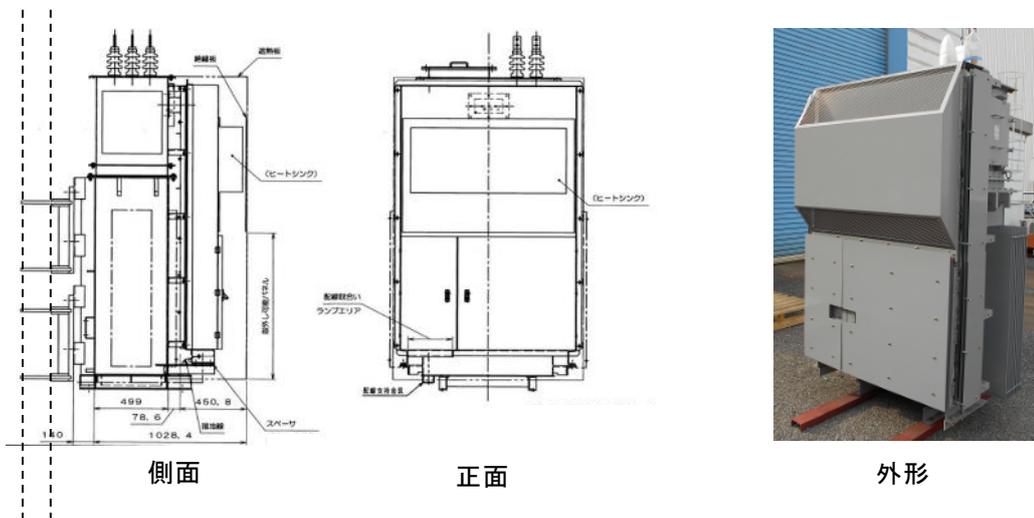


図 3.4 試作SVC（一体型）外形図と写真

(4) 成果のまとめと今後の普及について

本実証において、開発した SVC の模擬配電システムへの適用時に、一部の技術課題に起因する装置の不安定事象が発生した。そのため当初の目的である実システム試験も含めた装置の開発を完了するに至らなかったが、工場試験レベルでは一部未実施の試験はあるものの、ほぼ目標性能を確認できた。

配電システムは、配電線自体のインピーダンスやケーブル系統に代表される浮遊のコンデンサ成分、需要家構内における負荷機器のインピーダンス（抵抗負荷、リアクトル負荷、コンデンサ負荷等）等があり、それらの構成によっては、数百 Hz～数 kHz 程度の共振周波数を持つことがある。

図 3.5 は長距離配電システムにおける分岐ケーブルの浮遊コンデンサ分を考慮した場合のシステムの周波数特性を解析した例である。

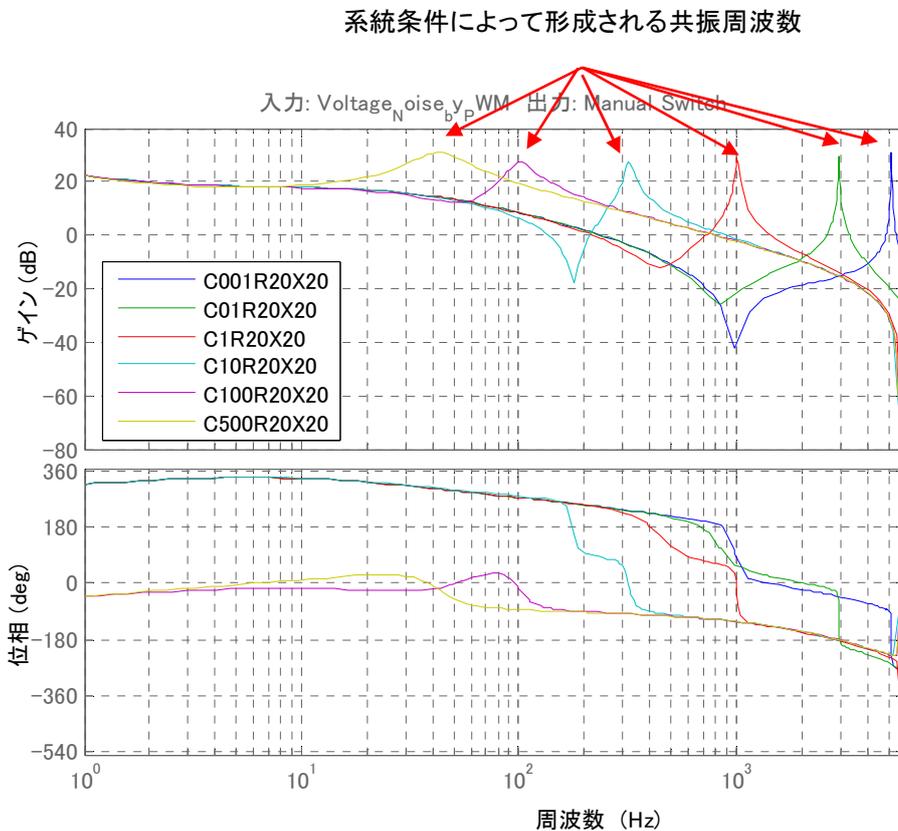


図 3.5 配電システムにおける共振周波数の解析結果例

上図より、配電システムの亘長や周辺のコデンサ分によって共振周波数は変化するものの、共振によるゲインのピークが確認できる。

太陽光 PCS や需要家 SVC に代表されるような地上設置の自励式変換装置であれば、予め設置場所におけるインピーダンスは想定が可能であり設置前にシミュレーション等で安定度の検討が可能である。また、設置場所において納入試験を行いパラメータ等の調整も容易である。

これに対して、柱上設置機器としての自励式変換装置は、設置場所が配電システムの任意の場所であり、柱上設置されるために納入時の試験実施は不可能である。すなわち、柱上設置機器はあら

はじめ設定したパラメータで、即時運用が可能な設計を行う必要がある（ピンポイントでの性能を保証するものではなく系統の任意の設置点において性能を保証する必要がある）。

以上のことから、配電機器として自励式変換装置を設計する場合、以下を考慮して機器開発を行う必要がある。

- ① 配電系統の定義（設置可能な配電線長や設置点におけるコンデンサ容量等）
- ② 上記①の範囲における制御設計と安定性の確認（シミュレーション等）

これらの設計手順によって開発を行うことで任意の配電系統における自励式変換装置の安定的な運転が可能となり、納入場所や将来の系統変更においても整定変更や設計変更せずに対応が可能となる。

また、SVCのフィルタコンデンサ投入による系統の不安定（SVCが制御を行わない状態でフィルタ等の受動機器のみが系統連系した場合に外部要因で不安定現象が発生する）についても可能性を否定できないことから、機器設置後の安定性のセルフチェック（不安定現象発生を捉えて自動停止する機能）等を考慮する必要がある。

以上の対応により、設備納入後の安定的な運用が保証され、SiC等の最新デバイスによる高効率化や小型・軽量化といった装置の特長を生かした普及が期待される。

1.1.4 次世代 TVR (CVC) の開発

(1) 次世代 TVR(CVC)の検討結果を下記表 4-1 に示す。

表 4-1 : 次世代 TVR (CVC) の検討結果

	次世代 TVR (CVC)	
定格容量	3000kVA	
定格電圧	6600V	
補償電圧	±300V	
素子	IGBT (2in1) 6 個	SiC (1in1) 24 個
冷却	自然冷却	
寸法	W1700 mm D1400 mm H2550 mm	W1595 mm D1468 mm H2250 mm
連続電圧補償	可能	
不平衡補償	可能	
力率改善補償	可能	
電源方向自動判別機能	有	
応答性 (補償速度)	即時 (100ms 以内)	
切換回数制限	連続補償により, 無し	
連続繰返切替間隔制限	連続補償により, 無し	
短絡電流	定格電流 25 倍 2 秒	
システム概要		
写真		

(2) 次世代 TVR(CVC)の各補償機能について, 下記に示す。

連続電圧補償, 不平衡電圧補償, 不平衡電流補償, 力率改善補償は, 事前に決められた機能の優先度と系統状況に応じて出力を決定しており, 一部の機能をロックすることも可能である。薩摩川内試験場では研究項目②の要望を受け, 力率改善補償と電源方向判別機能をロックした状態で検証を行い, 一部の機能をロックしても次世代 TVR(CVC)が正常に動作することを確認している。

a)連続電圧補償

次世代 TVR(CVC)は, 入力電圧に対し即時に電圧補償動作を行う。

また連続的に電圧補償を行うため, 急な電圧変動にも対応した電圧補償を可能とした。次世代 TVR(CVC)の一次側電圧(入力電圧)と二次側電圧(補償後の電圧)を図 4-1 に示す。次世代 TVR(CVC)は二次側電圧を 6600V に補償している。

b)不平衡電圧補償

次世代 TVR(CVC)は, 各相の補償出力を調整し電圧不平衡を解消するように補償することも可能である。

図 4-1 では次世代 TVR(CVC)の補償動作により, 電圧不平衡が解消されている。

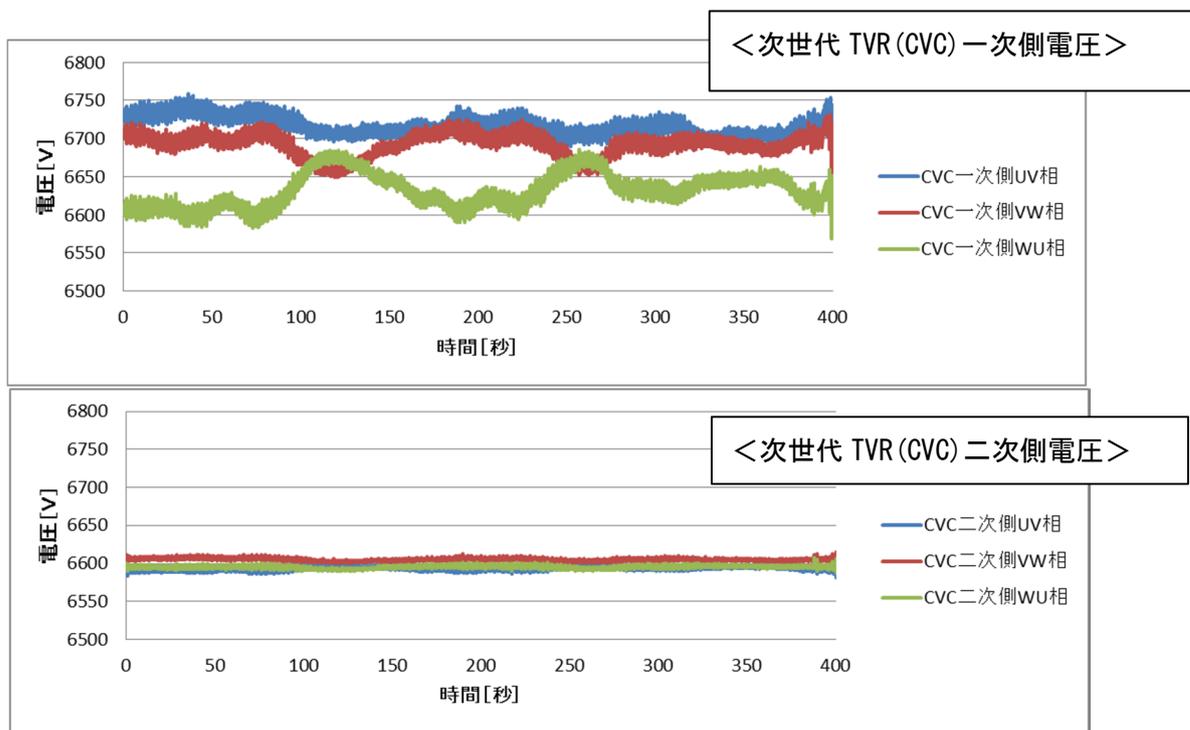


図 4-1: 電圧補償(連続電圧補償, 不平衡電圧補償)動作の波形
(薩摩川内試験場次世代 TVR(CVC)単体動作試験(軽負荷, PV 無し)のデータより抜粋)

c) 不平衡電流補償

次世代 TVR(CVC)は、無効電力を利用し二次側の不平衡電流を一次側に伝えないよう補償することが可能である。

次世代 TVR(CVC)二次側の負荷欠相(S相)で不平衡電流を発生させたときの波形を図 4-2 に示す。次世代 TVR(CVC)の不平衡電流補償により一次側電流は平衡を維持している。

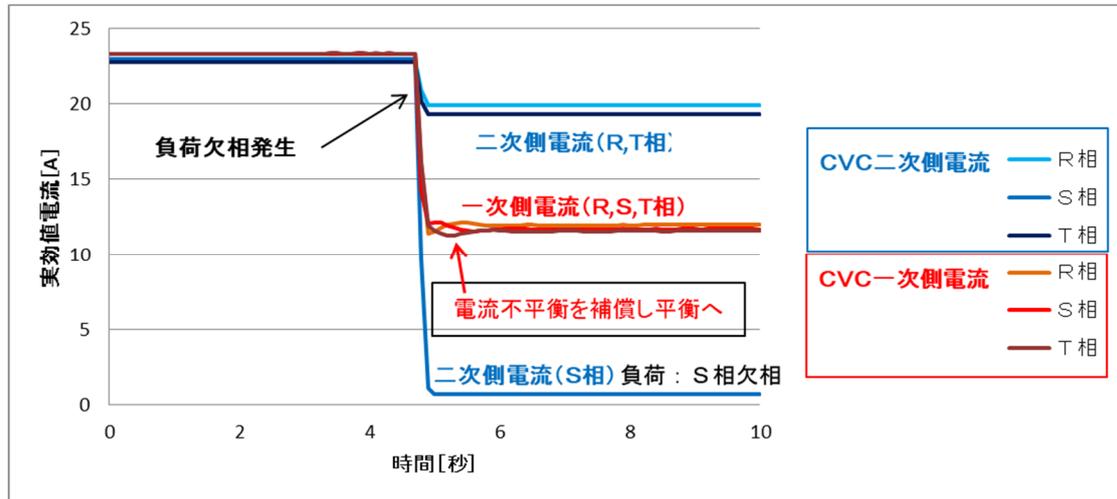


図 4-2: 電流不平衡補償動作の波形

(電力中央研究所赤城試験センター 負荷欠相試験のデータより抜粋)

d) 力率改善補償

下記条件で、負荷の無効電力を次世代 TVR(CVC)でキャンセルし、一次側の力率を改善することが可能である。

- ・系統電圧が 6600V より高い場合: 進み無効電力のみキャンセルする。
- ・系統電圧が 6600V より低い場合: 遅れ無効電力のみキャンセルする。

e) 電源方向自動判別機能

次世代 TVR(CVC)は、電源方向を自動で判別する機能を有し、外部から電源方向を指示する必要はなく、配電線の系統変更で電源方向が変わっても自動で判断し、次世代 TVR(CVC)の二次側を常に補償する。設定により電源方向を固定することも可能である。

(3)フリッカに対する検証

近年、太陽光発電システムの普及に伴い、配電システムのフリッカが注目されている。

そのため、次世代 TVR(CVC) の早い応答性が、フリッカに対して効果があることも赤城試験場で検証した。

電圧フリッカに対する次世代 TVR(CVC)の連続電圧補償効果を図 4-3 に示す。

また、6Hz の電圧フリッカに限定して効果を高めた制御も準備し、その効果も確認している。

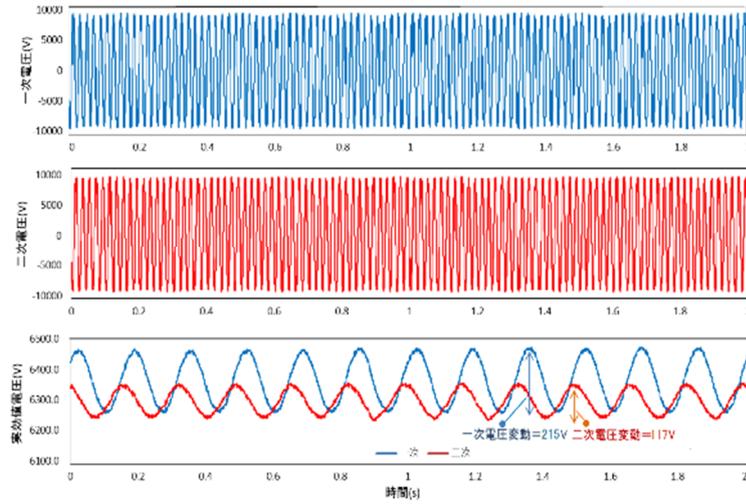


図 4-3: 電圧フリッカ補償に対する効果

(電力中央研究所赤城試験センター電圧フリッカ(6Hz,振幅 120V)試験のデータより抜粋)

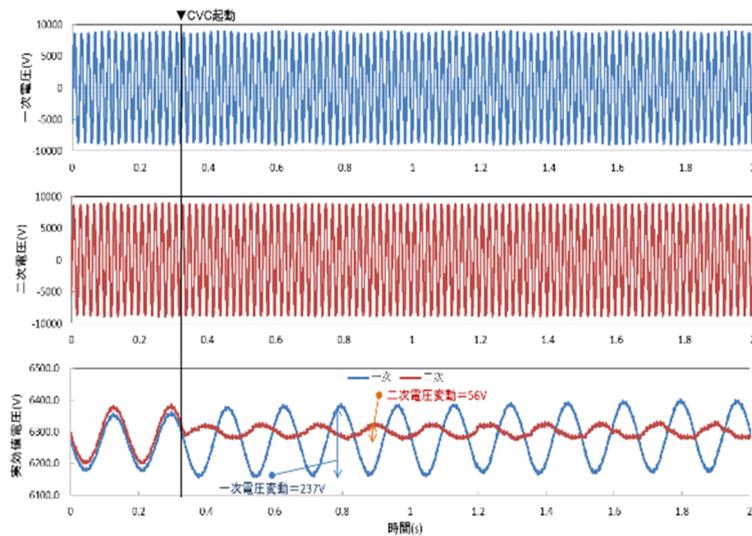


図 4-4: 6Hz 電圧フリッカに特化した制御による効果

(電力中央研究所赤城試験センター電圧フリッカ(6Hz,振幅 120V)試験のデータより抜粋)

1.1.5 AVRユニットの開発

(1) 成果と達成度

AVRユニットの開発成果と達成度を表 5.1 に、開発項目毎の開発成果と達成度を表 5.2 に示す。

表 5.1 開発成果と達成度

最終目標【2016年度】	成果	達成度
SiC モジュールを使った自然空冷で小型軽量の AVR ユニットの開発し社内検証を完了する。	<ol style="list-style-type: none"> 1. 制御アルゴリズム開発を目的としたミニモデル（容量 3kVA 200V）で性能確認を完了した。 2. 同上ミニモデルを研究開発項目②の実験室グリッド（横浜国立大学）へ供給した。 3. SiC を用いた AVR ユニットの試作した。自然空冷による小型軽量の装置を実現するために以下の点を留意した。 <ul style="list-style-type: none"> ・電圧調整幅の最適化 ・熱流体シミュレーションによる放熱構造の最適化 <p>2016 年度で社内検証を完了し、製品化の目処を立てた。</p>	○

表 5.2 開発項目毎の開発成果と達成度

開発項目	最終目標 (2016 年度)	成果	達成度
1. 仕様検討	以下の機器仕様を決定する。 ・電気仕様 ・構造, 冷却仕様 ・試験仕様	当社が作成した仕様書案を元に研究開発項目②と協議して仕様を決定し, それを製作仕様書としてまとめた。	○
2. 小型軽量化開発	実使用可能な小型軽量機器を開発する。目標値を次に示す。 30kVA, 自然空冷 重量: 100kg 以下 効率: 96.5%以上 (柱上変圧器+電圧調整装置)	実使用可能な小型軽量機器を開発した。各仕様を次に示す。 30kVA, 自然空冷 重量: 100kg 幅 400mm×奥行 400mm×高さ 600mm (固定座除く) 効率: 96.5%	○
3. 制御アルゴリズム開発と制御装置の開発とシミュレーション検証	単相 3 線の各 100V を個別に制御する制御装置を開発する。 基本機能 (主回路定数, 制御機能など) の妥当性をシミュレーションで確認する。	同左の機能を持つ高信頼性の制御装置の開発を完了した。 デジタルシミュレーションツールおよび実験室グリッドでの検証で, アルゴリズムの基本機能, 妥当性を確認した。	○
4. ミニモデル製作・評価試験と研究開発項目②への供給	制御アルゴリズム検証を行うためのミニモデル製作, および, ミニモデルによるアルゴリズム評価試験を実施する。 研究開発項目②へのミニモデルを供給する。	実証機の 10 分の 1 (3kVA) のミニモデルを製作し, 電圧変動抑制などの各機能が問題無く動作することを確認した。 研究開発項目②の実験室グリッド (横浜国立大学) へミニモデル 1 台を供給した。	○
5. 試作機の製作	製品化を視野に入れた評価用試作機の製作, および, 機能検証 (素子適用, 熱冷却, 絶縁, 耐環境等) を行う。	評価用試作機を製作して信頼性試験と機能検証を行い, 所定の機能が有効に働くことを確認した。 製品化に向けた課題を抽出しその対策案をまとめた。対策を施すことによって課題がすべて解決することを確認した。	○

AVRユニットの開発成果を表 5.3 に示す。

表 5.3 AVRユニットの開発成果

	AVRユニットの開発成果
定格容量	30kVA
適用電圧	2×105V
補償電圧	±5V
構成	単相インバータ 単相三線式インバータと直列変圧器
素子	1.2kV SiC-MOS(2in1) 5個
冷却	自然冷却
寸法と質量	W : 400 mm × D : 400 mm × H : 600 mm 質量 : 100kg
制御機能	連続電圧補償
AVR構成	
写真	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>容量 3kVA の自立型モデル (IGBT 使用)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>試作機 (SiC 使用)</p> </div> </div>

1.1.6 電圧制御システムの開発

(1) 成果と達成度

電圧制御システム開発の成果と達成度を表 6.1 に示す。

なお、達成度は○、△、×の3段階で記載し、達成しているものは○、一部未達の場合は△、達成出来ないものは×とした。

表 6.1 開発項目毎の開発成果と達成度

開発項目	目標	成果	達成度
1. 集中電圧制御アルゴリズム開発 (2016 年度完了)	リアルタイムデジタルシミュレータによる集中電圧制御アルゴリズムの動作検証完了。	集中電圧制御アルゴリズムの開発を完了した。電圧維持の他、配電損失最小化、タップ切戻回数低減、SVC の制御余力確保の機能を実現した。簡易配電モデルを用いたオフラインデジタルシミュレーションにより、集中電圧制御アルゴリズムの基本動作、及び電圧管理範囲 102.5～107V(低圧換算)に電圧を維持できることを確認した。仕様は次である。 ・制御周期:1 分 ・電圧管理範囲:102.5～107V(低圧換算) ・制御対象:LRT,SVR,SVC,CVC	○
2. 協調電圧制御アルゴリズム開発 (2016 年度完了)	リアルタイムデジタルシミュレータによる協調電圧制御アルゴリズムの動作検証完了。	協調電圧制御アルゴリズム(SVC 用, CVC 用)の開発を完了した。電圧調整機器間の協調による電圧維持、SVC の制御余力確保の機能を実現した。簡易配電モデルを用いたオフラインデジタルシミュレーションにより、協調電圧制御アルゴリズムの基本動作、及び電圧管理範囲 102.5～107V(低圧換算)に電圧を維持できることを確認した。仕様は次である。 ・制御周期:1 分 ・電圧管理範囲:102.5～107V(低圧換算) ・通信機器台数:送出側と末端側それぞれ電圧調整機器 1 台, センサ付開閉器 1 台。	○
3. 高速潮流計算プログラム開発 (2016 年度完了)	オフラインデジタルシミュレーションによる電圧制御システムの性能評価完了。	集中電圧制御のオフラインデジタルシミュレーションプログラムの開発を完了した。SVC, CVC のモデル化と、潮流計算プログラムへの実装し、1バンク 500 ノードにて計算時間 0.2 秒以下を達成した。	○
4. 電圧制御システム構築 (2016 年度完了)	リアルタイムデジタルシミュレータによる電圧制御システムの動作検証完了。	集中電圧制御アルゴリズムのシステム実装、及び工場試験を完了した。 協調電圧制御アルゴリズムのコントローラ実装、及び工場試験を完了した。	○
5. 集中電圧制御導入シミュレーション評価 (2018 年度完了)	オフラインデジタルシミュレーションによる集中電圧制御の導入効果検証完了。	集中電圧制御の導入効果検証、導入指針検討を完了した。以下の通り、集中電圧制御が有効となる系統条件を明らかにした。 ・複数台の電圧調整機器で構成される場合 ・一定の整定値に基づく自端制御では潮流変化に対応できない場合 ・自端制御で整定値見直しを行わない場合 ・複数台 SVR のタップ動作干渉が生じる場合 ・CVC の電圧制御効果の最大化を図る場合 ・SVC の電圧制御効果の最大化を図る場合	○

(2) 集中電圧制御手法の調査

集中電圧制御とは、配電系統各点から中央演算装置に情報を収集し、その情報を元に電圧調整機器に対し最適な指令値を配信するシステムである。これにより、再生可能エネルギーの導入などにより時間帯や季節、天候で電圧分布が大きく異なる場合や、系統切り換えなどにより配電系統の状態が大きく変化する場合にも、配電系統全体の電圧を適切に維持することが可能となる。図 6.1 に集中電圧制御システムの構成図を示す。

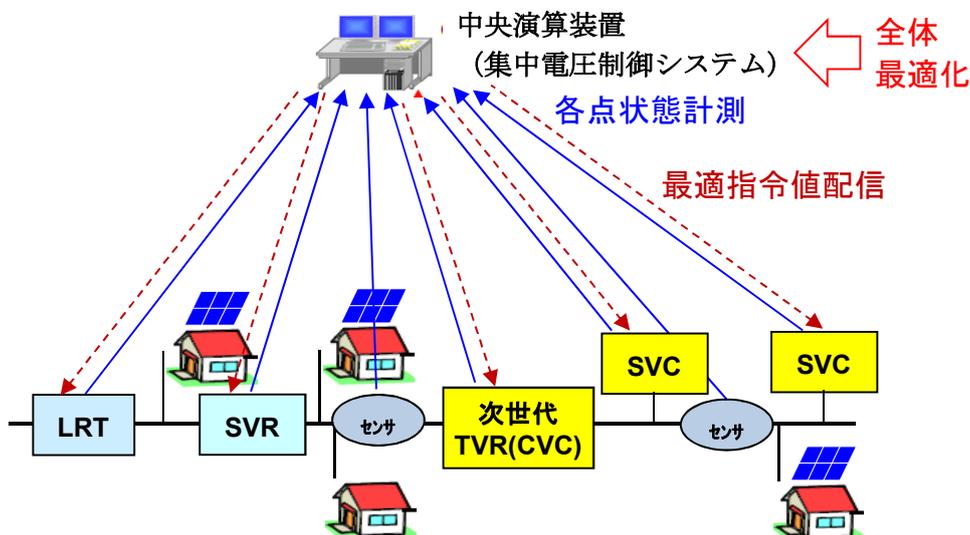


図 6.1 集中電圧制御システム構成図

集中電圧制御手法に関し、表 6.2 に示す文献を調査した。

表 6.2 集中電圧制御に関する文献リスト

No	文献名	著者	出典
1	GA・NN を適用した配電系統電圧・無効電力制御手法の開発	不動, 元治(関西電力), 湯川, 安部, 嶋本, 橋本(ダイヘン)	1998 年 電気学会論文誌B 118 巻 9 号 p.998-1005
2	配電系統における集中型電圧制御方式の開発	吉永, 平井, 本橋(東京電力), 高野, 渡辺(三菱電機), 小和田(TMT&D)	2004 年 電気学会 B部門大会論文集 30 p.25-1~6
3	階層的協調制御による配電系統の電圧調節	近藤, 安芸, 山口, 村田, 石井(産総研)	2006 年 電気学会論文誌B 126 巻 10 号 p.994-1002
4	最適潮流計算による分散型電源を活用した集中電圧分布制御方式	戸村, 辻, 大山(横浜国立大学), 藤浦, 合田(九州大学)	2007 年 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料 PE-07-123/PSE-07-138
5	配電系統のオンライン運用における電圧・無効電力制御に関する基礎研究	伊藤(九州電力), 田能村, 奥田, 吉田(東芝)	2007 年 電気学会 B 部門大会論文集 310 p.33-1~2
6	太陽光発電システムの集中制御による電圧上昇対策システムの実証開発	小池, 勝野, 大田, 鈴木(富士電機システムズ)	2007 年 電気学会 B 部門大会論文集 430 p.53-13~14
7	配電系統の協調的最適電圧制御	千住, 宮里, 與那(琉球大学), 舟橋(明電舎)	2007 年 電気学会B部門大会論文集 29 p.32-17~23
8	配電系統における電圧の最適協調制御	當間, 千住, 與那(琉球大学), 舟橋(明電舎)	2008 年 電気学会B部門大会論文集 30 p.23-29~34
9	電力ネットワーク技術実証研究	(独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構(委託先) 財団法人 電力中央研究所	2008 年 5 月 2004 年度~2007 年度 新電力ネットワークシステム実証研究 成果報告書
10	将来型配電系統の電圧分布制御方式による配電線低減効果の検討	坂本, 辻, 大山(横浜国立大学), 橋口, 合田(九州大学), 進士, 辻田(東京ガス)	2009 年 電気学会全国大会論文集 6-020 p.6-37~38
11	センサ開閉器からの計測情報を活用した配電系統の集中型(LRT・SVR)電圧制御手法の実験的検証	栗原, 花井, 松木(福井大学), 林(早稲田大学)	2009 年 電気学会 電力技術研究会資料 PE-09-92/PSE-09-100 p.55~60
12	太陽光発電システム群の力率制御手法の実験による検証	金本, 酒井, 川崎, 松木(福井大学), 林(早稲田大学)	2010 年 電気学会全国大会論文集 6-002 p.6-3~4

13	再生可能エネルギー電源が連系された配電システムのループ化と集中型電圧制御の適用効果の実験的検証	花井, 松木(福井大学), 林(早稲田大学)	2010年 電気学会論文誌B 130 巻 11号 p.932-940
14	樹枝状配電システムの集中方式電圧制御手法	小藤, 神通川, 金澤(富士電機)	2012年 電気学会B部門大会論文集 111 p.03-15~16
15	太陽光発電システム群の力率制御とLRTによる協調型電圧制御法	川崎, 金本, 田岡, 松木(福井大学), 林(早稲田大学)	2012年 電気学会論文誌B 132 巻 4号 p.309-316
16	配電線損失に着目した進相コンデンサによる配電システムの電力品質改善手法	上嶋, 成瀬, 青木, 鶴飼(名古屋工業大学), 小林(トーエネック)	2012年 電気学会論文誌B 132 巻 3号 p.226-234
17	センサ閉閉器情報の取得周期が配電システム電圧制御に与える影響の評価	宇田川, 林, 高橋(早稲田大学), 松浦, 森田, 南(関西電力)	2013年 電気学会論文誌B 133 巻 4号 p.324-332
18	バンク事故復旧対応型LRT-SVR協調電圧制御手法	芳澤, 林(早稲田大学), 辻, 神谷(東京電力)	2013年 電気学会論文誌B 133 巻 4号 p.333-342
19	電気自動車の充電調整と無効電力注入による夜間一斉充電時の配電システム電圧低下補償に関する研究	三栗, 原, 北(北海道大学), 神谷, 滝, 平岩, 小暮(東京電力)	2013年 電気学会論文誌B 133 巻 2号 p.157-166
20	太陽光発電大量導入時における小容量蓄電池群を用いた配電システム電圧制御手法	関崎, 青木, 鶴飼(名古屋工業大学), 重藤, 佐々木(中部電力)	2013年 電気学会論文誌B 133 巻 5号 p.439-448
21	PV連系配電システムにおける電圧感度推定を用いた動的集中制御手法の基礎検討	高橋, 高橋, 林(早稲田大学)	2014年 電気学会全国大会 Vol.6, p.406-407
22	長距離配電線に対応したメガソーラー発電システムの無効電力制御による電圧変動抑制	河野, 中西(四国総合研究所), 永野(四国電力), 北條(徳島大学)	2015年 電気学会論文誌B 135 巻 5号 p.276-289
23	多段設置された次世代SVRの最適整定値の動的更新手法	芳澤, 山本, 林(早稲田大学), 佐々木, 重藤, 野村(中部電力)	2015年 電気学会論文誌B 135 巻 9号 p.550-558
24	デマンドレスポンス発動時の配電システム電圧変動問題と蓄電池とSVRの協調電圧制御手法	吉永, 赤木, 伊藤, 林, 高橋(早稲田大学), 石橋(東京電力)	2016年 電気学会論文誌B 136 巻 4号 p.400-409
25	配電自動化技術の高度化	一般社団法人 電気協同研究会	2016年 電気協同研究 第72巻 第3号
VQC1	LP法を用いた基幹系統への予測先行型電圧無効電力制御方式	石田, 久保, 福井, 小海(日立製作所), 水谷, 山本, 高山(中部電力)	1997年 電気学会論文誌B 117 巻 8号 p.1115-1120
VQC2	電圧信頼度を考慮したParticleSwarmOptimizationによる電圧無効電力制御方式の検討	吉田, 河田(関西電力), 福山, 高山, 中西 要祐(富士電機総合研究所)	1999年 電気学会論文誌B 119 巻 12号 p.1462-1469
VQC3	制御手順を考慮したGAとTSの融合による電圧無効電力制御	山本, 青木, 直井, 水谷(東海大学)	2004年 電気学会論文誌B 124 巻 12号 p.1417-1424
VQC4	個別VQC装置への目標電圧指令による中央VQC方式	谷本, 黒川, 福井(三菱電機), 森田, 高橋, 坂本(東北電力)	2006年 電気学会論文誌B 126 巻 8号 p.783-788
VQC5	経済性とセキュリティを考慮したタブサーチによる電圧・無効電力制御の最適化	中地, 加藤, 鶴飼(名古屋工業大学)	2008年 電気学会論文誌B 128 巻 1号 p.305-311
VQC6	需要変動を考慮した電圧無効電力制御の開発	下根, 矢壺(関西電力), 石亀, 長谷川(大阪府立大学)	2011年 電気学会論文誌B 131 巻 10号 p.826-835
VQC7	電力系統上位系統における太陽光発電群の力率と調相設備・変圧器タップによる電圧上昇・電圧変動抑制手法	会田, 伊藤, 岩本(早稲田大学), 北田, 有吉(中部電力)	2014年 電気学会論文誌B 134 巻 12号 p.957-965
系統 1	配電システム損失最小化問題のタブ探索を用いた解法	三島, 奈良, 佐藤(茨城大学)伊藤, 金田(明電舎)	2003年 電気学会論文誌B 123 巻 10号 p.1149-1155

表 6.2 の文献調査より, 集中電圧制御手法を表 6.3 の通り整理した。

表 6.3 集中電圧制御手法の整理

調査項目	調査結果
(1)集中電圧制御の制御範囲	<ul style="list-style-type: none"> ・制御範囲をフィーダー単位、バンク単位としている文献が多い(文献 1~25)。バンク単位で制御する場合、LRT のタップ切換を集中電圧制御の制御対象としている(文献 1, 2, 3, 7, 8, 11, 13, 14, 17, 18, 21, 23, 24, 25)。 ・複数バンク・配電用変電所を対象に、区間開閉器の開閉を制御し、損失最小化(ロスミニ)、電圧最適化などを狙って系統構成を最適化する研究が報告されている(文献:系統切換 1)。
(2)集中電圧制御における電圧管理方法	<ul style="list-style-type: none"> ・高圧電圧計測値(或いは推定値)が電圧管理範囲内に維持されているか否かで逸脱有無を判定する文献が多い(文献 1~5, 7~14, 16~18, 21, 23~25)。柱上変圧器のタップ(変圧比)が設定されている場合は、高圧電圧計測値(或いは推定値)を地点ごとの柱上変圧器変圧比で換算する必要がある(文献 18)。 ・太陽光用 PCS(文献 15)、EV(文献 19)など、低圧需要家機器を活用する場合、低圧需要家機器の連系点電圧(低圧)で電圧逸脱を判断している。
(3)集中電圧制御の制御対象機器	<p>①SVR, LRT</p> <ul style="list-style-type: none"> ・既存の SVR, LRT を集中電圧制御の制御対象機器としている文献が多い(文献 1~3, 5, 7~9, 11, 13, 14, 17, 18, 21, 23~25)。一般的に組み合わせ最適化問題は効率的に解けないため、総当たり方式(文献 3, 5, 8 の一部, 9 の一部, 25 の一部)や、制御対象区間を限定し部分最適化を目指す手法(文献 3, 9 の一部, 11, 14, 17, 18, 21, 24, 25 の一部)が提案されている。 ・TVR についてはシミュレーション評価で考慮している例はあるものの(文献 25)、集中電圧制御の制御対象機器としている文献は無い。 <hr/> <p>②SVC</p> <ul style="list-style-type: none"> ・SVC および SVR, LRT を集中電圧制御の制御対象機器とした文献では、解法にメタヒューリスティクスの適用(文献 1, 7)、SVR と SVC の制御量を別々に解く2段階解法の適用(文献 9 の一部)など、計算時間の短縮を図る工夫をしている。 <hr/> <p>③分散電源(太陽光 PCS)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・分散電源のみを集中電圧制御の制御対象機器とした文献では、数理計画法(文献 4)、分散電源と SVR・LRT 等の他の機器を集中電圧制御の制御対象機器とした文献では、ヒューリスティクス手法(文献 6, 15)、メタヒューリスティクス手法(文献 10)などの解法が適用されている。 ・目的関数に分散型電源の無効電力低減項を設定(文献 3,4)、不感帯により不要な無効電力出力を防止(文献 8)、電圧逸脱発生時のみ無効電力を出力(文献 6, 15)など、いずれの手法も分散電源の無効電力出力を低減する工夫をしている。 <hr/> <p>④その他</p> <ul style="list-style-type: none"> ・文献 19 では EV, 文献 20 では需要家蓄電池, 文献 16 では需要家 SC を集中電圧制御の制御対象機器としている。
(4)制御対象機器に対する指令値配信方法	<p>①直列機器(LRT,SVR)</p> <ol style="list-style-type: none"> タップ指令, 変圧比指令配信 集中電圧制御からタップ指令値(タップ位置指令, タップ上げ下げ指令)を配信する(文献 2, 3, 7~9, 11, 13, 14, 17, 18, 21, 24, 25)。 電圧指令配信 機器の自端制御(LDC 制御)は活かし, 集中電圧制御から電圧指令値(文献 1), 或いは最適定数(電圧指令, 不感帯, 動作時限)(文献 23)を配信する。集中電圧制御の制御周期が遅い場合であっても, 自端制御によりある程度適切なタップ位置に制御される。 <hr/> <p>②並列機器(SVC, PV-PCS)</p> <ol style="list-style-type: none"> 無効電力指令配信 集中電圧制御から最適な電圧分布とするために必要な無効電力指令を配信する(文献 1, 3, 4, 6, 7, 9 の一部)。並列機器が複数台, 近接連系しても安定動作しやすい。 電圧指令配信 機器の自端制御(電圧制御)は活かし, 集中電圧制御から電圧指令を配信する(文献 8, 9 の一部)。集中電圧制御の制御周期が遅く, その間に配電系統の状態が変化しても, 自端制御により適切な電圧分布が維持される。 力率指令配信(PV-PCS のみ) 機器の自端制御(力率制御)は活かし, 集中電圧制御から力率指令を配信する(文献 12, 15, 22)。力率制御(機器の自端制御)は自身の有効電力出力に起因した電圧変動・電圧上昇の抑制に適しており, また複数台が近接連系しても安定動作しやすい。文献 15 では, 電圧逸脱発生箇所と同一相の単相 PV 群を, 一斉, かつ同一力率で操作する方法を提案している。
(5)集中電圧制御の制御目的	<p>①電圧維持</p> <ul style="list-style-type: none"> ・文献 4, 10, 12, 16 では, 電圧上下限を不等式制約条件とすることで, 電圧逸脱を防止する。 ・文献 7, 8 では, 電圧目標値に対する偏差最小化を目的関数とすることで, 電圧分布の最適化を図る。 ・文献 5 では, 目的関数にペナルティ項として電圧逸脱量の二乗和を設けることで電圧逸脱量の最小化を図る。 ・文献 13, 17 では, 電圧逸脱最悪値の最小化を狙ったヒューリスティックなタップ制御手法を提案。 <hr/> <p>②タップ切換回数の低減</p> <ul style="list-style-type: none"> ・文献 7, 8 では, 目的関数が「電圧目標値と各ノード電圧の偏差の最小化」となっており, タップ切換回数の低減が考慮されていない。そのため, 各ノード電圧を電圧目標値に近づけるべく, 制御周期毎にタップ切換を繰り返す可能性がある。 ・文献 VQC6 では, 目的関数にタップ切換に関するペナルティ項を設けることで, 電圧維持とタップ切換回数抑制を図る。 ・文献 14 では, 需要予測や再エネ出力予測を基に, 電圧の適正化とタップ切換回数の最小化を実現する1日間の計画値を最適化手法により算出し, 計画値に基づいて電圧を制御する。

	<p>③ロスマニ</p> <ul style="list-style-type: none"> ・文献 7, 9 では、配電損失の最小化を目的関数としている。 ・文献 4 では、並列機器の無効電力出力の総和の最小化を目的関数としている。 ・文献 3 では、ヒューリスティクスな手法で並列機器の無効電力出力低減を図っている。
(6)集中電圧制御の解法	<p>①数理計画法</p> <ul style="list-style-type: none"> ・配電システムの最適化問題を目的関数と制約条件で定式化し、解析的な手法により最適解を探索する。局所最適解を数式で保証する。 ・数理計画法は、送電システムの中央 VQC 向けに適用されている例がある(文献 VQC1, VQC4 の一部)。配電システム向けにも適用例がある(文献 2 の一部)が、多くは SVC や太陽光 PCS などの無効電力調整機器の集中電圧制御で適用されている(文献 4, 9 の一部)。
	<p>②メタヒューリスティクス方式</p> <ul style="list-style-type: none"> ・配電システムの最適化問題を目的関数と制約条件で定式化し、メタヒューリスティクス手法を用いて最適解を探索する。大域的最適解を数式で保証する。 ・メタヒューリスティクス方式は、タップ調整機器、及び並列機器(無効電力調整)を対象とした混合整数問題を解くことを狙った集中電圧制御で適用されている(文献 1, 7, 8, 9 の一部, 10, 16)。
	<p>③総当たり方式</p> <ul style="list-style-type: none"> ・配電システムの最適化問題を目的関数と制約条件で定式化し、離散変数の組み合わせを総当たりで解き、最適解を選択する。確実に解が求まる。 ・総当たり方式は、タップ調整機器を対象とした組合せ最適化問題を解くことを狙った集中電圧制御で適用されている(文献 3, 5, 25 の一部)。本来連続変数である無効電力調整機器についても、予め決めた刻み幅で離散化することで、総当たり方式で求解している例もある(文献 9 の一部)。
	<p>④ヒューリスティック方式</p> <ul style="list-style-type: none"> ・配電システムの最適化問題解くにあたり、経験に基づいて解法手順をあらかじめ定めておくことにより、ヒューリスティクスな手法で適切な解を探索する。同一条件であれば同一解が得られる。解の導出経緯が明確。 ・ヒューリスティクス方式は、既存の電圧調整機器(LRT, SVR)を対象とした集中電圧制御での適用事例が多い(文献 2 の一部, 3 の一部, 9 の一部, 11, 13, 14, 17, 18, 21, 24, 25 の一部)。用途を限定することにより、無効電力調整機器(文献 9 の一部)や分散電源を含む並列型機器(文献 6, 15, 19, 20)についてヒューリスティクス方式で求解している例もある。

表 6.3 の内容から、今回開発した集中電圧制御の狙いを以下の通り整理した。

① 配電システム電圧の維持

集中電圧制御システムにおいて電圧逸脱の防止は第一優先の制御目的である。しかし、系統条件によっては電圧調整機器をどう制御しても電圧逸脱が回避できない場合が想定される。その様な場合であってもシステムとしては解無しとならない対策が必要である。電圧逸脱が回避できない場合、過電圧・不足電圧のリスク低減の観点から電圧逸脱最悪値の最小化が望ましい。そこで電圧逸脱最悪値の最小化、及び電圧分布の全体最適化を目指す。

② 既存電圧調整機器のタップ切回数低減

既存電圧調整機器(LRT, SVR)については、タップ位置を配信する(タップ位置配信方式)ことでタップ不要動作を防止する。また、新型電圧調整機器を優先使用することでタップ切回数の低減を図る。また、微小な状態変化によって制御周期毎に解が遷移する(タップ切換えが頻発する)問題について、調査文献では対策がなされていないことから、この問題について対策を実施することとした。

なお、新型電圧調整機器(CVC, SVC)については、自端制御(電圧制御)に対して電圧指令値を配信する(電圧指令配信方式)。これにより新型電圧調整機器で早い電圧変動に対応しつつ、集中電圧制御で全体の電圧分布の適正化を図る。

③ 高速な求解、解の同一性、解の説明性の実現

数理計画法、メタヒューリスティクス方式、総当たり方式では、高速な求解、解の同一性、解の説明性の何れかに課題がある。また、従来のヒューリスティクス方式は電圧分布の

部分最適化にとどまっている。そこで、ヒューリスティクス方式により高速な求解，解の同一性，解の説明性を確保しつつ，電圧分布の全体最適化を目指すこととした。

④ 既存システム（通信インフラ）の協調

既存電圧調整機器（LRT, SVR）のLDC動作時限は60秒前後であることから，集中電圧制御の計測・制御周期は1分以下が望ましい。一方，対策コストの観点では既存通信インフラを活用することが望ましいが，現行の配電自動化システムで短縮可能な周期は30秒程度である。既存通信インフラにおいて計測から指令値配信までにかかる時間を考慮し，計測・制御周期は1分とする。

(3) 集中電圧制御のアルゴリズム開発

集中電圧制御システムの内，中央演算装置内部の集中電圧制御プログラムにおける演算フローを図6.2に示す。集中電圧制御プログラムは，系統・設備情報および計測情報を入力として，需要家の負荷やPV発電量を推定し，電圧調整機器の適切な操作量を演算し，指令値を出力する。

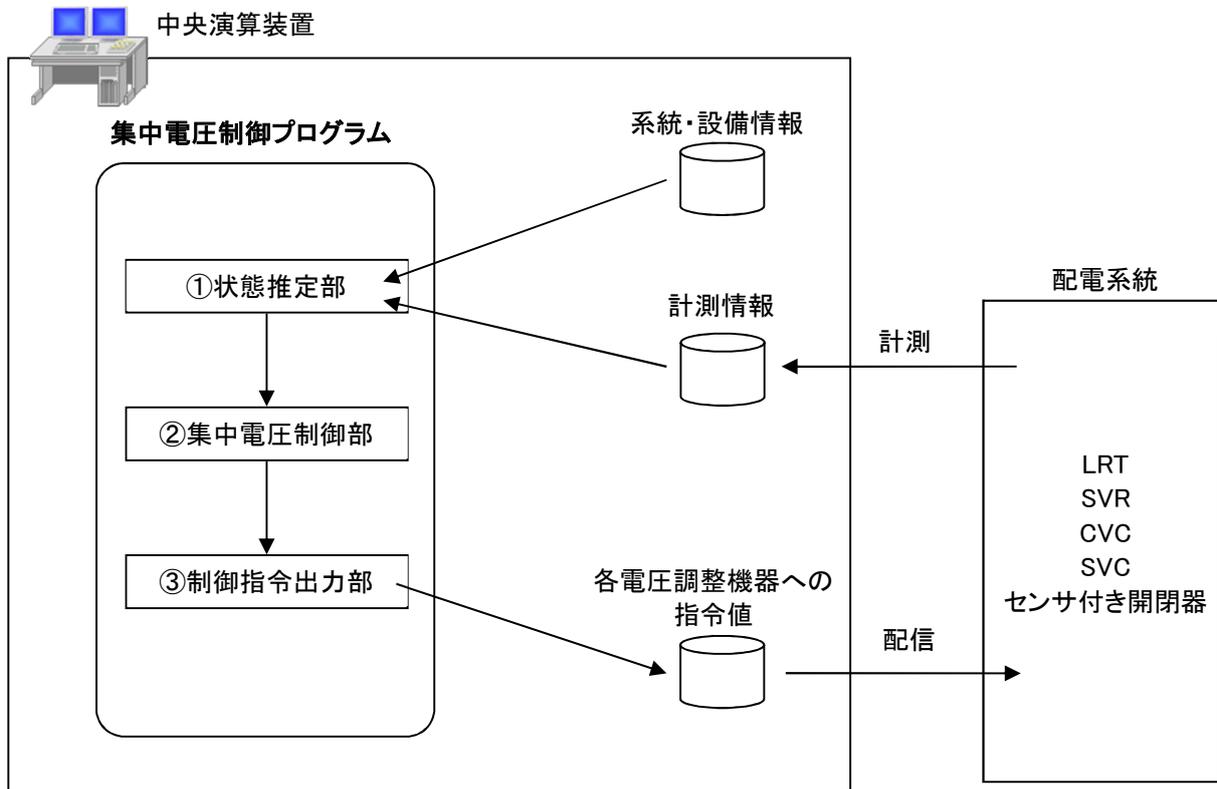


図 6.2 集中電圧制御プログラムにおける演算フロー

①状態推定部

状態推定部では，センサ付き開閉器や電圧制御機器の計測データから，計測されていない需要家ノードの状態値を推定する。状態推定においては，最適化計算を用いて測定データと推定データ（計算値）との間に生じる矛盾（偏差）を最小化する。状態推定により，電圧や潮流分布の把握，集中電圧制御での最適な指令値の決定が可能となる。状態推定の計算フローを図6.3に示す。

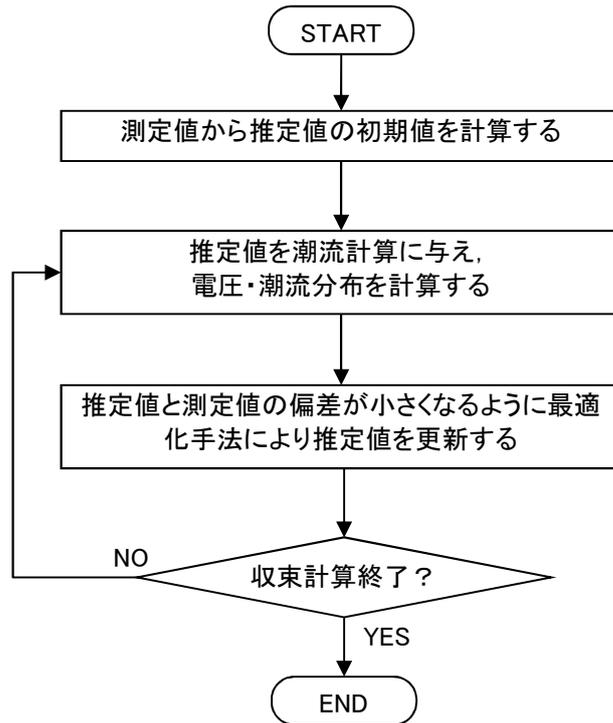


図 6.3 状態推定計算フロー

②集中電圧制御部

集中電圧制御部では以下の目的関数に関し、その値を最小化する最適な機器の操作量を演算する。

【目的関数】

$$\min F(m, n, r, i) = k_1 \sum_{i=1}^I f_1(i) + k_2(r) f_2(r) + k_3 f_3(n) + k_4 f_4(m, r)$$

<第1項> 電圧逸脱最悪値の最小化、及び平均化(電圧逸脱に対するペナルティ項)

$$f_1(i) = \Delta V_{MAXi} - \Delta V_{MINi} + |\Delta V_{MAXi} + \Delta V_{MINi}|$$

<第2項> タップ切換段数の合計値最小化

$$f_2(r) = \sum_{r=1}^R |TAP_{Or} - TAP_{Br}|$$

<第3項> SVC 無効電力出力(定格比)の合計値最小化

$$f_3(n) = \sum_{n=1}^N \left| \frac{Q_{On}}{Q_{Sn}} \right|$$

<第4項> 対象 CVC(番号 m)、及び対象 LRT,SVR(番号 r)の制御区間内の電圧上限閾値に対する裕度最小化(≒ロスミニ)

$$f_4(m, r) = \sum_{m=1}^M \Delta V_{TOLm} + \sum_{r=1}^R \Delta V_{TOLr}$$

<優先順位と重み係数>

基本的に以下の優先度で制御を行う

- [優先度 1] 電圧を管理範囲内に維持。系統条件により制御では逸脱を回避できない場合には、電圧逸脱最悪値の最小化、及び平均化を図る(第 4 項)⇒解無しの防止
- [優先度 2] タップ切換回数低減による機器長寿命化、電圧バタつき防止(第 3 項:タップ切換段数の合計値最小化)
- [優先度 3] 電圧変動に対する SVC の制御余裕確保と、無効電流による損失削減(第 2 項: SVC 無効電力出力(定格比)の合計値最小化)
- [優先度 4] ロスミニ(第 1 項:対象 CVC(番号 m), 及び対象 LRT,SVR(番号 r)の制御区間内の電圧上限閾値に対する裕度最小化)

従って、目的関数の重み係数は基本的に $k_1 \gg k_2 \gg k_3 \gg k_4$ として扱う。但し、タップ切換が頻発するおそれがあるタップについては下記の通り $k_2(r) \gg k_1$ (タップ位置現状維持)とする。

<タップ切換頻発を防止するための第 2 項係数切換>

$$k_2(r) = \begin{cases} (VOVER_{Bri} - VUNDER_{Bri}) - (VOVER_{Ori} - VUNDER_{Ori}) \geq TH_{imp} \cdot k_2(r) \gg k_1 \\ \Rightarrow \text{電圧逸脱量合計値が現状より一定値以上改善する場合はタップ切換実行} \\ \\ else: k_2(r) \ll k_1 \\ \Rightarrow \text{改善しない場合はタップ位置を現状維持} \end{cases}$$

【等式制約】

- ・潮流方程式

【不等式制約】

- ・LRT, SVR のタップ位置上下限制約
- ・LRT, SVR のタップ操作可能範囲(現状タップ±タ, 飛び越しタップの禁止)
- ・CVC の電圧調整上下限制約
- ・SVC の無効電力出力上下限制約

【変数】

- k_1, k_2, k_3, k_4 : 各項の重み係数
- ij : 対象フィーダ i 内のノード番号 j , I : 対象バンクのフィーダ総数, J : フィーダ i の中のノード総数,
- n : 対象バンク内の SVC 番号, N : 対象バンク内の SVC 総数,
- m : 対象バンク内の CVC 番号, M : 対象バンク内の CVC 総数,
- r : 対象バンク内の LRT,SVR 番号, R : 対象バンク内の LRT,SVR 総数,

Q_{On} :対象 SVC(番号 n)の操作後無効電力, Q_{Sn} :対象 SVC(番号 n)の定格無効電力,

TAP_{Or} :対象 LRT,SVR(番号 r)の操作後タップ位置,

TAP_{Br} :対象 LRT,SVR(番号 r)の現在タップ位置,

V_{Oij} :対象フィーダ i 内のノード番号 j における操作後ノード電圧

(各ノード高圧電圧値を柱上変圧器タップ比で低圧換算した値),

V_{Bij} :対象フィーダ i 内のノード番号 j における現在ノード電圧

(各ノード高圧電圧移動平均値(平均時間 6 分)を柱上変圧器タップ比で低圧換算した値),

V_H :電圧上限閾値(低圧換算値で設定), V_L :電圧下限閾値(低圧換算値で設定),

THimp:改善判定閾値

$\Delta V_{TOLm} = \min\{(V_H - V_{Omj}) > 0\}$:対象 CVC(m)制御区間内の電圧上限閾値に対する裕度,

$\Delta V_{TOLr} = \min\{(V_H - V_{Orj}) > 0\}$:対象 LRT,SVR(r)制御区間内の電圧上限閾値に対する
裕度,

$\Delta V_{MAXi} = \max\{(V_{Oij} - V_H) > 0\}$:対象フィーダ i 内の操作後各ノード電圧に関する
上限逸脱量最大値,

$\Delta V_{MINi} = \min\{(V_{Oij} - V_L) < 0\}$:対象フィーダ i 内の操作後各ノード電圧に関する
下限逸脱量最大値,

$VOVER_{Ori} = \sum_j\{(V_{Orj} - V_H) > 0\}$:対象 LRT,SVR(r)制御区間内の
操作後各ノード電圧に関する上限逸脱量合計値,

$VUNDER_{Ori} = \sum_j\{(V_{Orj} - V_L) < 0\}$:対象 LRT,SVR(r)制御区間内の
操作後各ノード電圧に関する下限逸脱量合計値,

$VOVER_{Bri} = \sum_j\{(V_{Brj} - V_H) > 0\}$:対象 LRT,SVR(r)制御区間内の
現在各ノード電圧に関する上限逸脱量合計値,

$VUNDER_{Bri} = \sum_j\{(V_{Brj} - V_L) < 0\}$:対象 LRT,SVR(r)制御区間内の
現在各ノード電圧に関する下限逸脱量合計値

実際の操作量の演算にあたっては、ヒューリスティクス手法で求解する。制御フローを図
6.4 に示す。

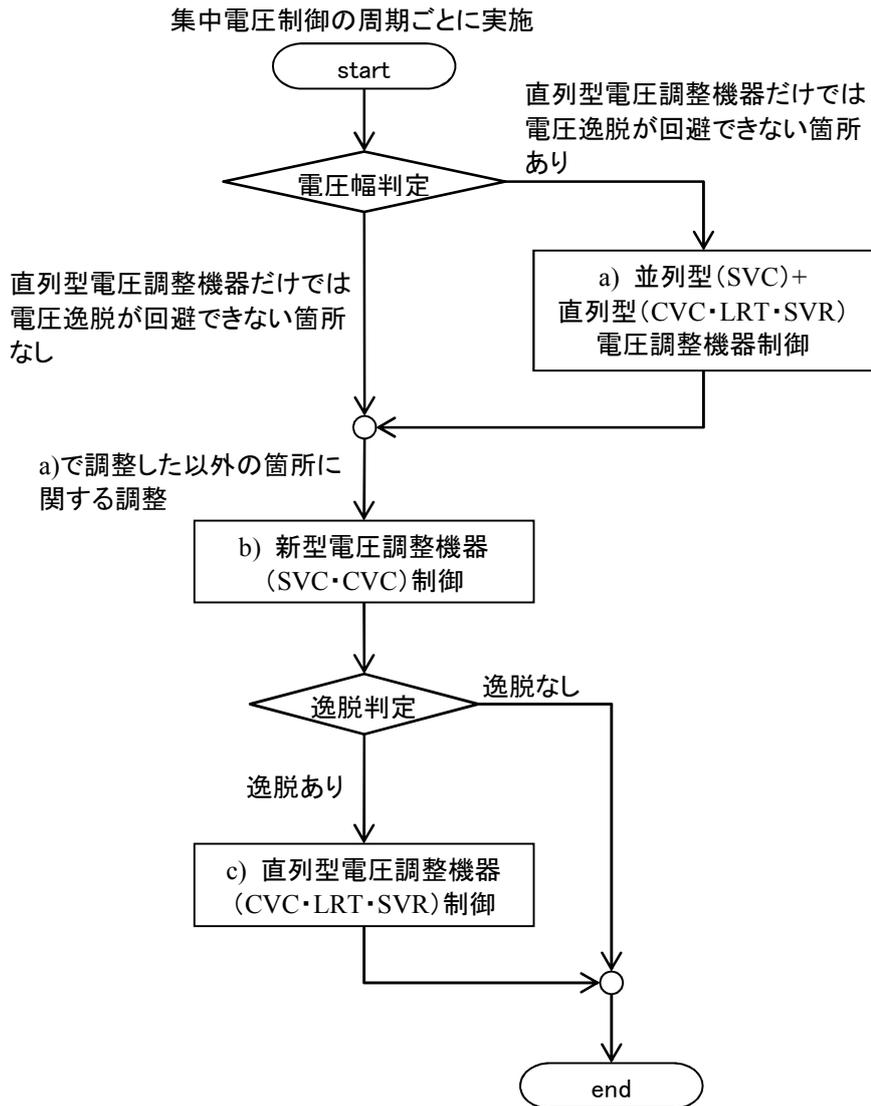


図 6.4 集中電圧制御フロー

a) 並列型 (SVC) +直列型 (CVC・LRT・SVR) 電圧調整機器制御

直列型電圧調整機器 (CVC・LRT・SVR) 二次側の制御領域 (図 6.5 参照) において、電圧幅 (最大電圧-最小電圧) が電圧管理幅を上回っている箇所 (直列型電圧調整機器だけでは電圧逸脱が回避できない箇所) を特定する。

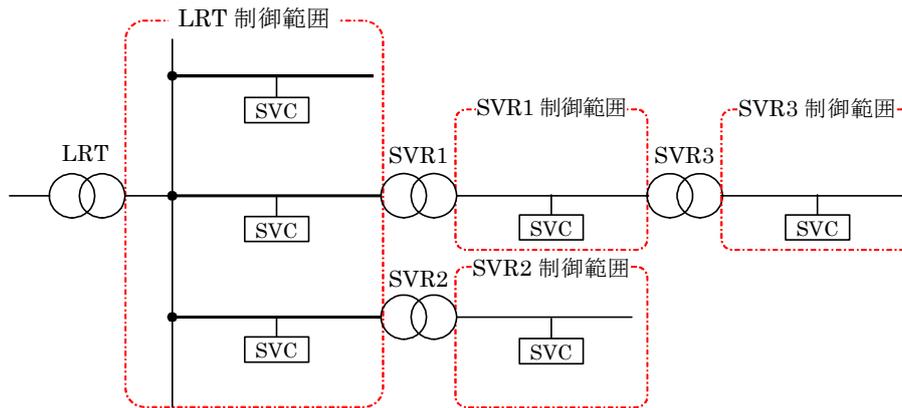


図 6.5 LRT/SVR/CVC 制御範囲のイメージ図

特定した制御領域に対し電圧調整に資する並列型電圧調整機器（SVC）が存在する場合，並列型電圧調整機器（SVC）と直列型電圧調整機器（CVC・LRT・SVR）で協調を図りながら電圧調整を行う。具体的には，SVC で電圧幅を狭めたうえで，LRT・SVR のタップ位置，或いは CVC の目標電圧を制御して電圧を管理範囲内に収める（図 6.6 参照）。

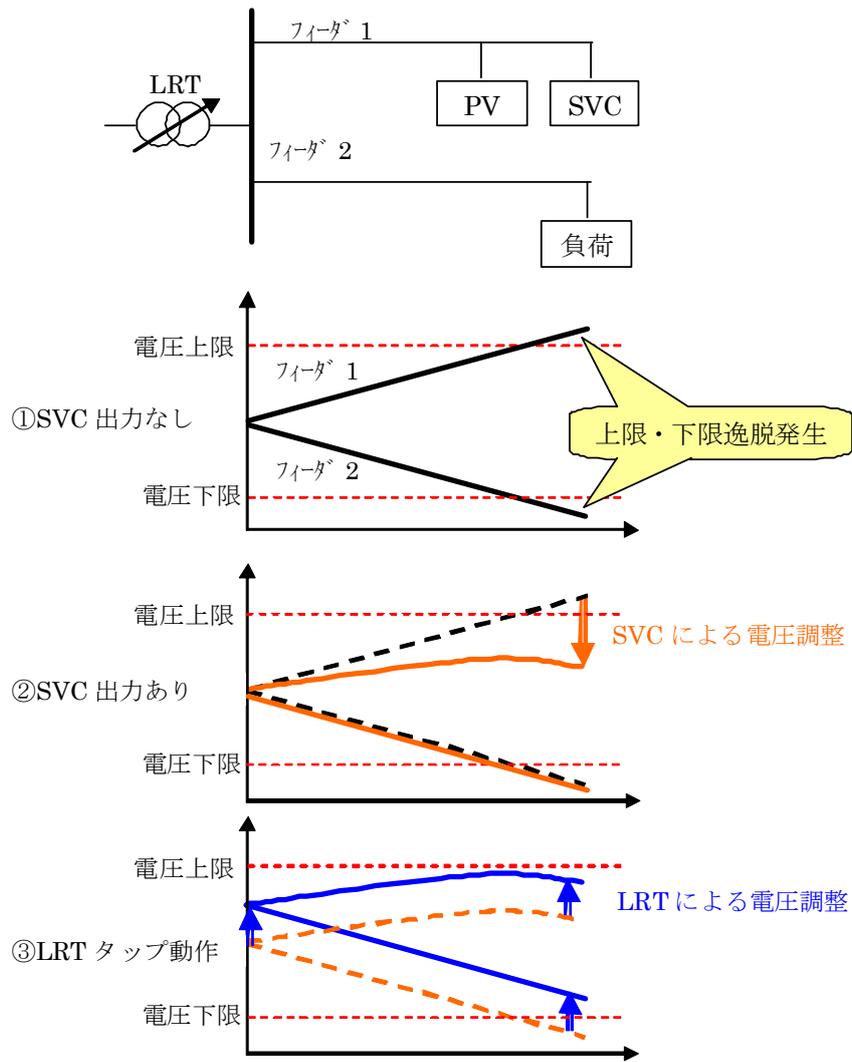


図 6.6 並列型電圧調整機器と直列型電圧調整機器とが協調動作する例

電圧逸脱が回避できない場合は、電圧逸脱最悪値を最小化する様に調整を行う（図 6.7 参照）。

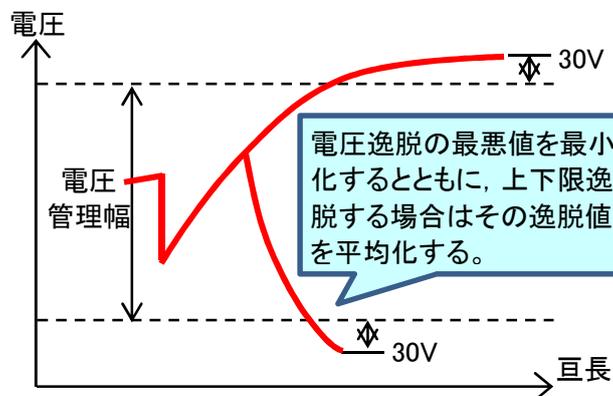


図 6.7 電圧逸脱最悪値の最小化（上下限とも逸脱する場合はその平均化）

なお、電圧逸脱が回避できない場合や電圧逸脱をぎりぎりで回避している場合には、微小な状態変化によって制御周期毎にLRT・SVRのタップ切換が頻発するおそれがある（図6.8参照）。そこで、電圧逸脱量あるいは電圧余裕度を調整前後の状態と比較し、電圧逸脱量合計値が改善判定閾値（THimp）以上改善しない場合はタップを現在値のままとする。これによりタップ切換回数の増加を抑制する。

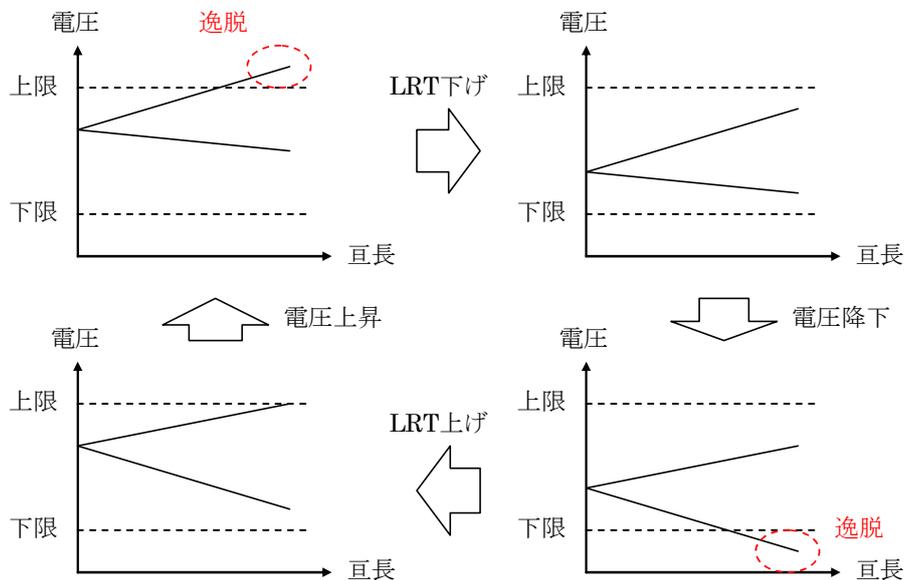


図 6.8 上限逸脱および下限逸脱によるタップ切換頻発例

b) 新型電圧調整機器（SVC・CVC）制御

動作に制限のない新型電圧調整機器（SVC・CVC）のみで電圧調整を行うことで、タップ切換回数の低減を図る。なお、上記 a 項にて調整済みの機器については検討対象から除外する。新型電圧調整機器（SVC・CVC）のみでは電圧逸脱が回避できない場合、本項での検討結果は破棄して次のフローに進む。

SVC の制御に関しては、電圧維持、制御調整余力の確保、不要な無効電力の抑制（配電損失低減）を図るため、出力合計値を単純に最小化するのではなく、機器容量ベースの SVC 出力率の合計値を最小化するよう SVC の出力を決定する（図 6.9 参照）。

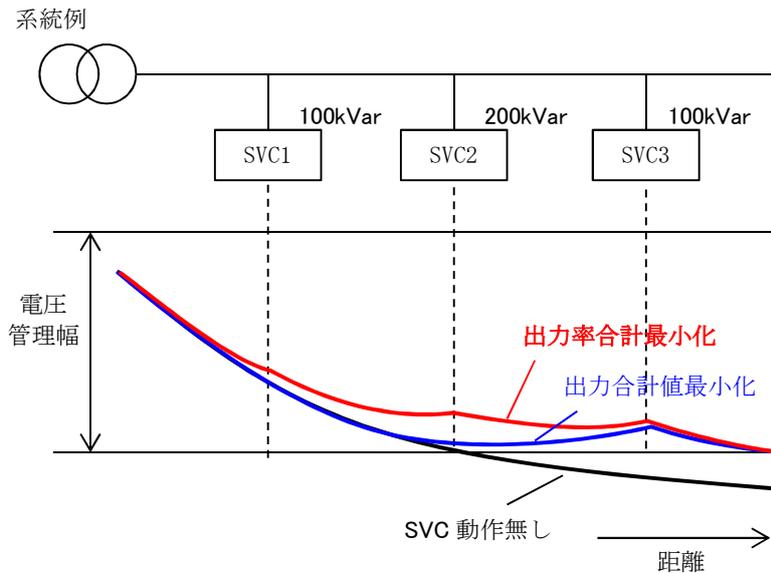


図 6.9 SVC 出力時の電圧プロファイル例

CVC の制御に関しては、CVC 二次側の制御範囲のみならず、下位の SVR・CVC 制御範囲についても電圧を管理範囲内に維持する様に調整を行う（図 6.10 参照）。また、電圧を維持しつつ、配電損失低減を図るため、電圧上限閾値に対する裕度が最小となるように目標電圧を調整する。

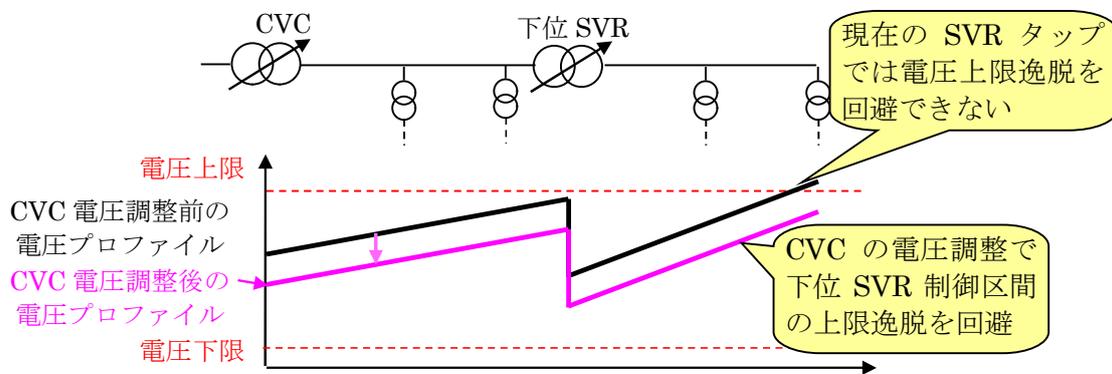


図 6.10 CVC の電圧調整による下位制御範囲の電圧逸脱回避対策

c) 直列型電圧調整機器（CVC・LRT・SVR）制御

直列型電圧調整機器（CVC・LRT・SVR）で電圧調整を行う。なお、上記 a 項にて調整済みの機器については検討対象から除外する。また、SVC については上記 a 項にて調整済み、或いは不要な無効電力を抑制（配電損失低減）する観点から、検討対象より除外する。

直列型電圧調整機器（CVC・LRT・SVR）の基本的な調整方法は、配電損失低減を図るため、また機器間の不要動作を回避するため、上位側から順番に電圧上限閾値に対する裕度が最小となるように調整するものである。なお、タップ切戻回数低減の観点から、電圧が管理範囲内に収まった段階で電圧調整を打ち切る（図 6.11 参照）。

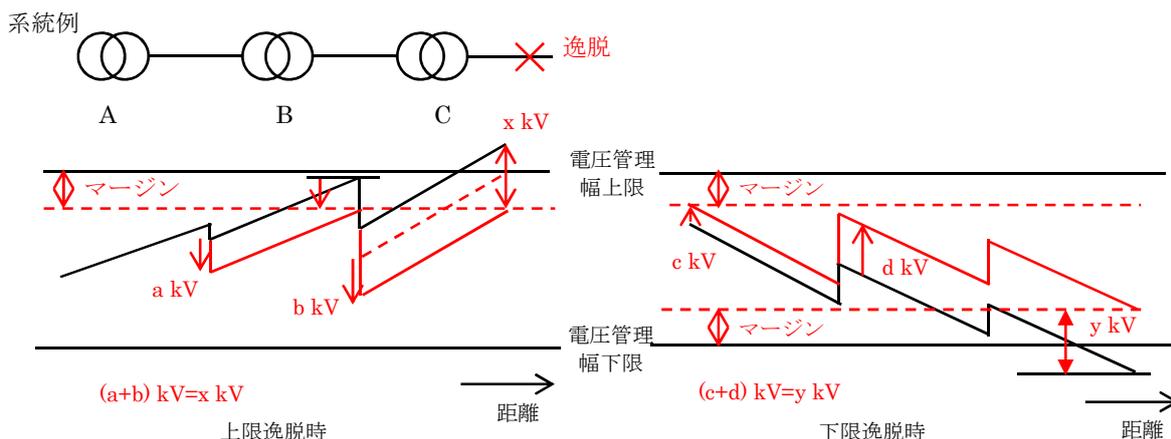


図 6.11 電圧管理幅逸脱時のタップ切換例

③制御指令出力部

制御指令出力部では、上記「集中電圧制御部」で求めた操作量を、各機器に対する制御指令に変換し、配信する。

LRT・SVR には操作量演算部で求めたタップ位置を配信する。

CVC には、操作量演算部で求めた最適な電圧プロファイルから、CVC 自端制御 (LDC 制御) が想定している電圧制御点の電圧を特定し、その値を電圧指令値として配信する。

SVC に関しては、複数台の SVC の電氣的距離が近い場合は、最も電圧逸脱点に影響が大きい 1 台のみを電圧制御 (電圧指令値配信) とし、他の SVC は無効電流制御 (無効電力指令値配信) とする。但し、CVC より下位に設置された SVC については無効電流制御 (無効電力指令値配信) とする。電圧指令値を配信する場合、操作量演算部で求めた最適な電圧プロファイルから SVC 設置点の電圧を電圧指令値として配信する。無効電力指令値を配信する場合、操作量演算部で求めた最適な SVC 無効電力値を配信する。

(4) シミュレーション結果

研究開発項目②において「配電系統の電圧分布制御シミュレーション」で検討した新型電圧調整機器 (CVC, SVC) の導入を考慮した自端制御によるシミュレーションと同じ条件 (系統構成, PV 導入パターン, 機器特性) での集中制御のシミュレーションを実施し、その結果を比較することで、集中制御導入時のメリットと効果的な条件を抽出した。シミュレーション用系統は、フィーダ亘長の異なる 3 つの配電系統モデルを用い (電気協同研究による D22, D21, C2 モデルに準拠), 新型機器の導入による太陽光発電の導入量増加に合わせたシミュレーションを実施する。ただし、既存機器として SVR が設置されているものとし、D22 では 3 台, D21 は 2 台, C2 は 1 台の SVR で構成されている。新型機器は既存機器からの CVC あるいは SVC への置換えを想定し、D22 では最大 2 台, D21 は 1 台, C2 は 1 台の新型機器への置換えを想定する。電圧上下限は低圧で 102.5~107V (高圧換算で 6.443~6.725kV) とし、PV の導入容量は配電用変電所の変圧器容量の観点から 3MW を上限とし、これを 100% と定義する。PV は変動日パターンを用い、PV 導入率の増加に伴う 1 日の電圧制御シミュレーショ

ンを行う。表 6.4～表 6.6 に最も電圧逸脱が発生しやすい PV 条件として、PV を末端に集中設置するものとした場合の自端制御と集中制御の PV 導入可能率の評価結果を示す。ただし、電圧の評価は 30 分移動平均値を用い、表中の○は電圧逸脱なし、×は電圧逸脱ありを表している。

表 6.4 D22 系統での電圧逸脱評価

系統	機器構成	制御方式	PV導入率[%]と電圧逸脱				機器の配置箇所	集中制御によるPV導入率向上効果
			40	50	60	70		
D22 (機器3台)	SVR3台	自端制御	○	×	×	×	SVR3段(既存系統, ベースケース)	0%(ただし, 40~70%でSVRタップ動作回数合計値は平均24%低減)
		集中制御	○	×	×	×		
	CVC1台置換え	自端制御	○	×	×	×	2段目のSVRをCVCに置換え	10%
		集中制御	○	○	×	×		
	SVC1台置換え	自端制御	○	×	×	×	SVCを末端に配置し, 3段目のSVRのタップ位置を固定	10%
		集中制御	○	○	×	×		
	CVC2台置換え	自端制御	○	○	×	×	2段目と3段目のSVRをCVCに置換え	10%
		集中制御	○	○	○	×		
	SVC2台置換え	自端制御	○	×	×	×	SVCを末端と中央に配置し, 2段目と3段目のSVRのタップ位置を固定	20%
		集中制御	○	○	○	×		

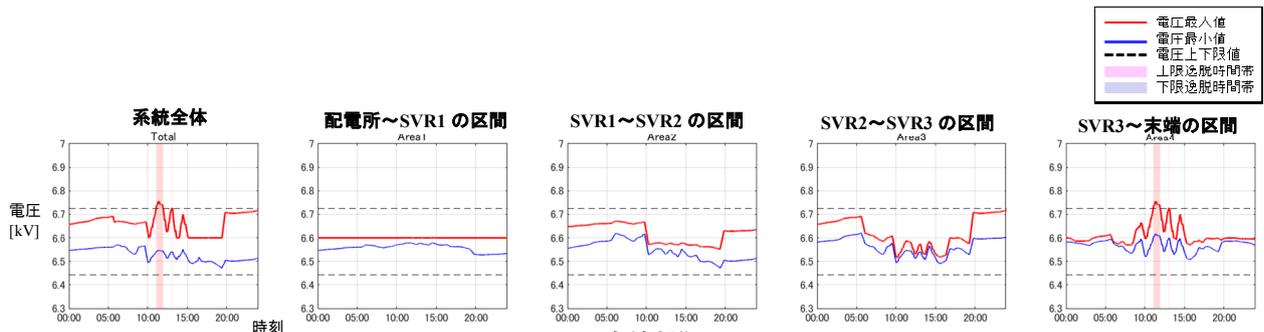
表 6.5 D21 系統での電圧逸脱評価

系統	機器構成	制御方式	PV導入率[%]と電圧逸脱					機器の配置箇所	集中制御によるPV導入率向上効果	
			40	50	60	70	80			90
D21 (機器2台)	SVR2台	自端制御	○	○	○	×	×	×	SVR2段(既存系統, ベースケース)	0%(ただし, 40~70%でSVRタップ動作回数合計値は平均35%低減)
		集中制御	○	○	○	×	×	×		
	CVC1台置換え	自端制御	○	○	○	○	×	×	2段目のSVRをCVCに置換え	10%
		集中制御	○	○	○	○	○	×		
	SVC1台置換え	自端制御	○	×	×	×	×	×	SVCを末端に配置し, 2段目のSVRのタップ位置を固定	10%
		集中制御	○	○	×	×	×	×		

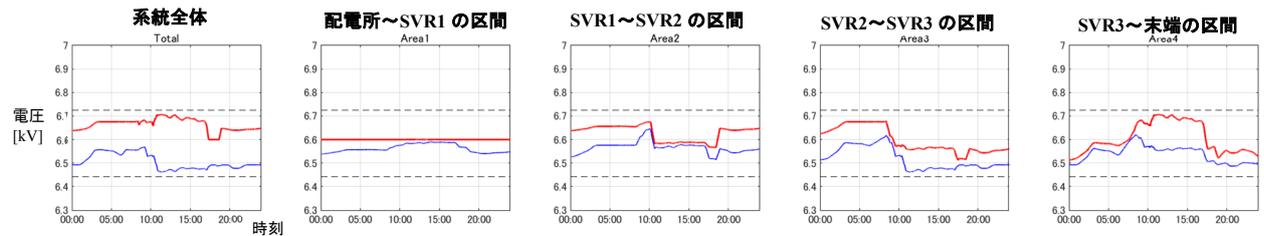
表 6.6 C2 系統での電圧逸脱評価

系統	機器構成	制御方式	PV導入率[%]と電圧逸脱			機器の配置箇所	集中制御によるPV導入率向上効果
			80	90	100		
D21 (機器1台)	SVR1台	自端制御	○	○	×	SVR1段(既存系統, ベースケース)	0%(ただし, 40~70%でSVRタップ動作回数合計値は平均63%低減)
		集中制御	○	○	×		
	CVC置換え	自端制御	○	○	○	SVRをCVCに置換え	0%
		集中制御	○	○	○		
	SVC置換え	自端制御	○	×	×	SVCを末端に配置し, SVRのタップ位置を固定	0%
		集中制御	○	×	×		

シミュレーション例として、D22 系統において、既設の SVR3 台の内、末端の SVR を SVC に置換えた場合の自端制御と集中制御のシミュレーション結果を図 6.12 と図 6.13 に示す。ただし、PV を末端に集中設置するものとし、PV 導入率は 50%とする。



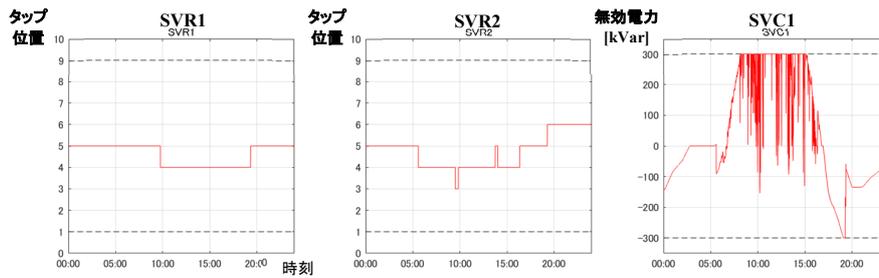
(a) 自端制御



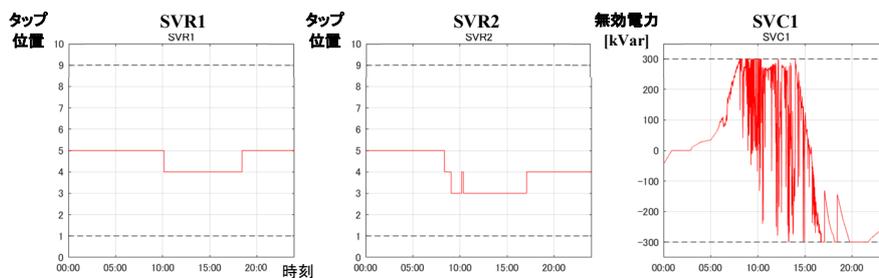
(b) 集中制御

※末端の SVC 設置に伴い、SVR3 のタップ位置は固定

図 6.12 電圧シミュレーション結果 (D22 系統, SVR-SVR-SVC, PV 末端集中, PV 導入率 50%)



(a) 自端制御



(b) 集中制御

図 6.13 機器制御出力シミュレーション結果 (D22 系統, SVR-SVR-SVC, PV 末端集中, PV 導入率 50%)

シミュレーション結果において、自端制御では SVC 容量不足による出力飽和が原因となり、PV 発電時の昼間の時間帯で電圧変動とこれに伴う電圧逸脱が発生する。一方、集中制御では SVC の前段の SVR により電圧をあえて低めに制御することで SVC の出力飽和を防止し、電圧変動を抑制し、電圧逸脱を防止している。このように、集中制御では全体の電圧分布から各機器の制御出力をオンラインで計算するため、機器間の協調を図ることにより、電圧逸脱防止の効果を得ることが可能となる。

(5) 考察

自端制御と集中制御のシミュレーション結果の考察を行い、集中制御が有効となる系統条件を表 6.7 に整理した

表 6.7 集中制御が有効となる系統条件

系統条件	系統例	効果
①複数台機器で構成される場合	・複数台機器での制御が必要な郊外系統	機器 1 台で構成された系統と比較し、複数台機器で構成された系統に導入することで、機器協調による電圧逸脱防止効果あり。
②一定の整定値に基づく自端制御では潮流変化に対応できない場合	・ PV と負荷の潮流変化が大きく、電圧分布が複雑に変化する系統 ・ PV 力率制御により無効電力潮流が大きくなる系統	オンラインで制御区間の電圧分布を把握した上で電圧逸脱防止のための制御を行う。 SVR（離散動作）よりも詳細な設定が可能な CVC（連続動作）の方が集中制御による電圧逸脱防止効果が高い傾向
③自端制御で整定値見直しを行わない場合	・ PV 導入量増加や新型機器（特に SVC）の設置などの環境変化に関わらず、既設機器の整定値見直しを行わない系統	オンラインで電圧分布や系統構成に応じて最適な制御値を配信するため、整定値見直しを行うことなく、電圧制御性能を向上させる。
④複数台 SVR のタップ動作干渉が生じる場合	・複数台の SVR で構成され、PV 導入率増加に伴いタップ動作回数が急増する系統	SVR 間で発生するタップ動作の干渉や無駄動作を防止するため、タップ動作回数の減少に効果あり。
⑤CVC の電圧制御効果の最大化を図る場合	・ CVC の末端側に SVR が設置された系統	末端側の SVR が離散的な動作が原因で電圧逸脱をした場合、電源側の CVC によりこれを補償する効果あり。
⑥SVC の電圧制御効果の最大化を図る場合	・ SVC と既存機器と間で制御干渉が発生する場合	SVC のフィーダ全体への影響を考慮し、全体の電圧分布を管理することで、電圧制御性能の向上や他機器との協調を図ることが可能。

1.1.7 通信インターフェースの開発

(1) 成果と達成度

通信インターフェース開発の成果と達成度を表 7.1 に示す。

表 7.1 開発成果と達成度

最終目標【2016 年度】	成果	達成度
リアルタイムデジタルシミュレータによる通信機器の動作検証完了。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 配電網の通信環境，社内検証（リアルタイムデジタルシミュレータ）の通信環境，現状の標準規格を調査し，実証で使用する通信方式を選定した。 ・ 集中電圧制御，協調電圧制御のそれぞれに必要な通信を決定し，選定した通信方式に基づいた通信仕様を作成した。 ・ 配電自動化システムの最大フィーダ数で想定される電圧調整機器やセンサ付開閉器の最大台数での通信時間を試算し，1分周期での制御が可能である見通しを得た。 ・ 実証システムの通信システム構成を決定した。 ・ 通信システム構成を踏まえた通信機器ハードウェア要件の確定と，通信機器ハードウェア開発完了。 ・ 通信システム構成，通信機器仕様を踏まえた通信プログラム要件の確定と，通信プログラム開発完了。 	○

(2) 通信インターフェースの特徴

電圧調整機器の集中電圧制御や協調電圧制御は，配電網管理の高度化の一要素として導入されるものであるため，その通信はメタルケーブル以上の伝送速度を前提として検討することとした。

高度な配電網管理を実現する環境において使用される通信方式を一つに絞ることは現状では難しいが，複数ベンダの相互運用性を確保する必要性を踏まえ，国際標準規格である IEC TC57 の通信方式を採用した。IEC TC57 の通信規格にも複数あるが，以下の理由から，高度な通信方式である IEC 61850 を採用した。

- ・実証環境の通信方式(100Mbit/s Ethernet)に対応している。
- ・協調電圧制御方式に必要なマルチキャスト(特定の複数の機器への一斉送信)をサポートしている。
- ・新しく高度な通信規格であり，配電自動化への適用に向けた標準化活動が進められている。
- ・テレコン向け規格 IEC 60870-5-101/104 との情報交換ガイドラインがある。

(IEC 61850 で通信仕様を策定すれば，より軽量の通信方式に対応付けが可能である)

(3) 実証システム構成

図 7.1 に実証システム構成, 図 7.2 に通信機器のシステム構成と外観を示す。

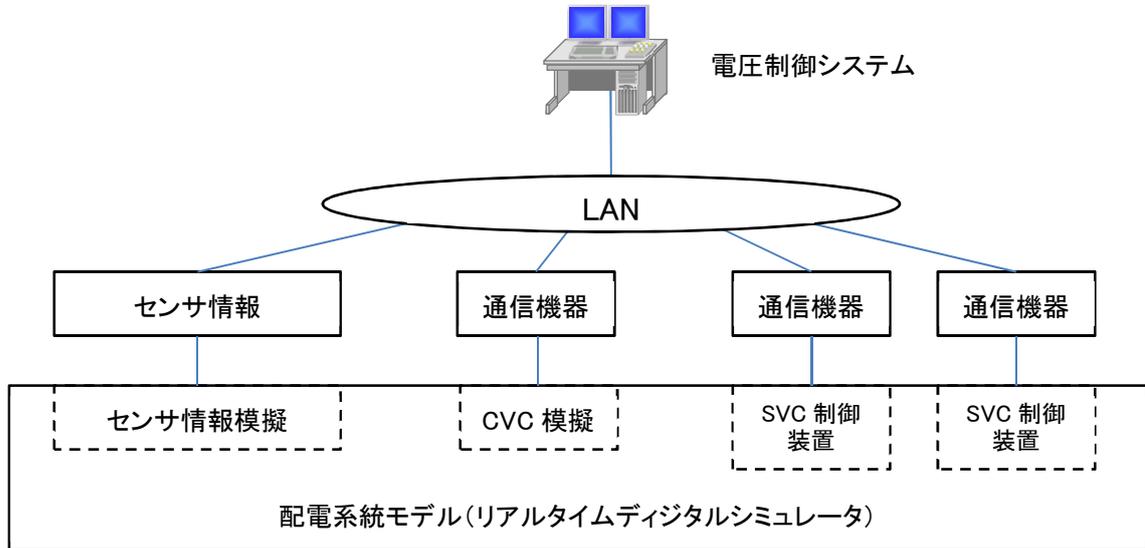


図 7.1 実証システム構成

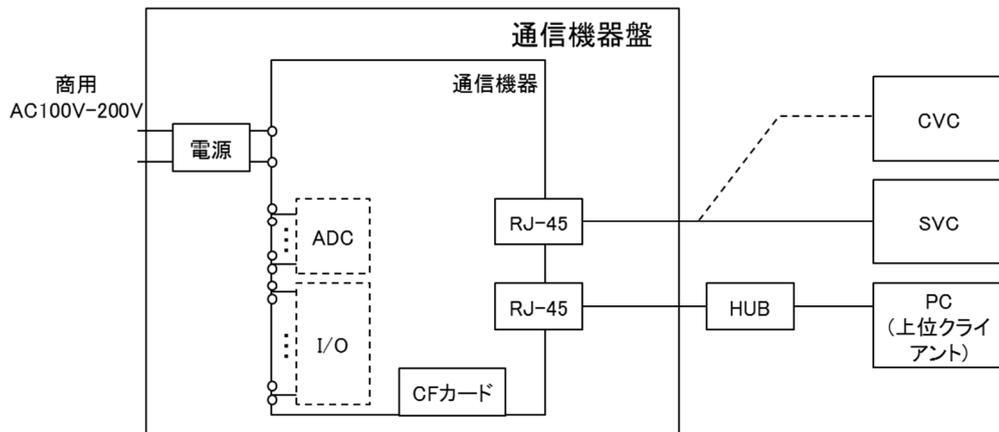


図 7.2 通信機器のシステム構成と外観

1.1.8 知的財産等の取得及び成果の普及

各実施者の特許出願件数、論文等の対外発表の実績を表 8-1 に示す。

表 8.1 知的財産等の取得及び成果の普及

実施者	年度	特許出願 (海外)	学会発表, 論文 (査読付き)	講演, 展示会 その他
富士電機	H26 年度	0	0	0
	H27 年度	17(0)	0	0
	H28 年度	6(0)	4(0)	0
	H29 年度	8(0)	7(1)	0
	H30 年度	4(0)	4(1)	0
東芝	H26 年度	0	0	0
	H27 年度	1(0)	0	0
	H28 年度	2(0)	1	0
	H29 年度	2(0)	1(1)	1
	H30 年度	0	0	1
北芝電機	H26 年度	0	0	0
	H27 年度	0	0	0
	H28 年度	0	0	1
	H29 年度	0	0	2
	H30 年度	0	0	0

【富士電機】

論文・研究発表の主なものを記載する。

- ・3.3kV All-SiC Module for Electric Distribution Equipment
International Power Electrics Conference 2018(2018 年 5 月新潟県朱鷺メッセ)
- ・新型電圧調整器を活用した配電系統向け集中電圧制御
電気学会B部門大会(2016 年 9 月九州工業大学)
- ・将来の配電系統における電圧制御システムの国際標準規格の適用検討
電気学会全国大会(2017 年 3 月富山大学)

【東芝】 【北芝電機】

論文・研究発表の主なものを記載する。

- ・電気学会「配電向け連続電圧補償器(CVC)の開発と 6.6kV,3,000kVA 試作機の製造」
2017 年 3 月 10 日(発表会場:久米島)
- ・EPE' 17ECCE Europe「Development of continuous series voltage compensator for load voltage regulation and negative sequence compensation in a 6.6kV distribution line」
2017 年 9 月 11 日(発表会場:ワルシャワ工科大学)

以上

参考文献

- (1) Thomas Stetz, “Grid Integration of Photovoltaics in Germany—Lessons learned from the past and ongoing developments—”, Proc. of 12th Workshop on the Future Direction of Photovoltaics, 2016–2
- (2) Hawaiian Electric, Maui Electric, Hawai’i Electric Light, “Distributed Generation Interconnection Plan (DGIP) (2014)”
- (3) EPRI: ”Stochastic Analysis to Determine Feeder Hosting Capacity for Distributed Solar PV”, No.1026640 (2012)
- (4) N. Etherden et. al., “The Transparent Hosting–Capacity Approach–Overview, Applications and Developments—”, CIRED2015, No,654

2) 研究開発項目②（電力中央研究所、横浜国立大学、エネルギー総合工学研究所）

1. 研究開発項目②の成果と達成度

1.1 研究開発項目②次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術の開発

1.1.1 成果と達成状況

研究開発項目②の最終目標に向けた成果と達成度について、表 1.1 に示す。

達成度は○、△、×の3段階で記載し、達成しているものは○、一部未達予定のものは△、達成出来ないものは×とした。

表 1.1 研究開発目標に対する成果，達成度

電圧制御機器メーカーおよび電力会社への実態調査(エネ総工研)			
主な内容	最終目標	成果	達成度
電圧制御機器メーカーおよび電力会社への実態調査	機器の将来的な展開を見据えて、国内外における配電システム関連プロジェクトや、機器研究開発状況、市場動向（機器実用化の進展状況や系統課題の顕在化状況等）の調査を有機的に行う。	本事業において、機器開発面で不足していた点（開発機器の性能確認方法、整定値検討他）への対応として、国内の電圧調整機器メーカー（6社）に対して追加で調査を実施し、以下の課題を確認した。 ・系統切替、既存電圧調整機器との協調等、実運用を考慮したシミュレーションツールの整備 ・現場状況に柔軟に対応できる裕度ある機器設計と対応機能の具備 また、配電用パワエレ機器の将来的な海外展開を見据え、海外の機器研究開発状況や市場動向（機器実用化の進展状況や系統課題の顕在化状況等）を調査した。	○

電圧制御機器メーカーおよび電力会社への実態調査(電中研、関西電力)			
主な内容	最終目標	成果	達成度
性能・信頼性法の検討	関西電力の実態を踏まえ、機器を単柱設置する場合の要求仕様・性能に関する調査を行い、取りまとめる。	単柱仕様を標準としている関西電力において、寸法、形状、重量などについて調査、検討し、取りまとめて、研究開発項目①(富士電機)に提示した。 なお、一般的なH柱(2本柱)仕様に比べて、単柱仕様は熱的、電気絶縁的に厳しいことが想定された。	○
機器故障時の対応方法・メンテナンス性評価法の検討	関西電力の実態を踏まえ、装柱性、メンテナンス性、および故障時の対応性に関する調査を行い、まとめる。	関西電力において、装柱性、メンテナンス性について調査、検討し、取りまとめて、研究開発項目①(富士電機)に提示した。 なお、従来より配電機器を製作しているメーカーであれば設計に配慮されるが、そうでない場合には、仕様書などに詳細を記載する必要があることが明らかになった。	○
電圧制御方式の有効性の検証(横浜国大・電中研)			
主な内容	最終目標	成果	達成度
電圧制御方式の有効性の検証	潮流計算により、既存の制御装置および本事業の開発機器を用いた場合の、電圧適正化の効果を明らかにする。また、既存の機器と組み合わせた場合に効果や課題を明らかにする。	巨長の異なる3種類の配電システムモデルに基づいて、既存機器であるSVRを、本事業の開発機器である次世代TVRおよびSVCに入れ替えた場合の電圧制御効果を網羅的に解析した。その結果、次世代TVRやSVRはその高速な制御動作により10秒値での電圧変動を大幅に改善できる一方で、機器の配置によっては30分移動平均値での電圧制御効果が十分に表れない場合もある結果が得られた。今後の課題として、機器の最適な配置やSVRとSVCの間での協調動作手法についての検討が挙げられる。	○
開発機器の装柱性・操作性の評価(電中研、九州電力)			
主な内容	最終目標	成果	達成度
開発機器の装柱性の評価	実際に検証試験を実施することで、本事業の開発機器の装柱性や操作性を評価し、課題を明らかにする。	九州電力の研修所において、実際のH柱(2本柱)に、クレーンを用いて、次世代TVRを装柱した。この作業において、装柱性、操作性、メンテナンス性について評価し、課題を明らかにした。なお、次世代TVRの設計時に、九州電力の装柱仕様を提示しているわけではないので、設計時に改善できるものも含めて課題を抽出した。 具体的な課題の項目は、 1. 次世代TVRの配線：各種作業性 2. 次世代TVRの配線：形成方法、離隔など 3. 保守作業：制御部の取り替え作業など	○

実験室グリッドと瞬時値解析による SiC 機器メリットの検討(横浜国大・電中研)			
主な内容	最終目標	成果	達成度
実験室グリッドと瞬時値解析による SiC 機器メリットの検討	SiC デバイスの特徴を活かせる機能や制御方式を提案し、小回りが利く特徴を活かして、実験室グリッドによる検証や瞬時値解析により効果や課題を明らかにする。	<p>実験室グリッドにおいて自励式 SVC および AVR 付柱上変圧器のミニモデルを用いた試験を行い、以下のような成果を得た。</p> <p>①瞬時電圧低下を主とした系統側の擾乱発生に対して、PV の運転継続を支援する制御方式の有効性を検討した。</p> <p>②瞬時値解析や実効値解析に基づいたパラメータ調整を通じて、自励式 SVC の無効電力制御によるフリッカ補償制御の有効性を検討した。</p> <p>③制御の高速化に伴い制御動作が不安定化するおそれがあるため、自励式 SVC を対象とした瞬時値解析と試験を通じて、系統条件の変化に応じた安定動作条件を明らかにした。</p>	○
自励式 SVC に関する実証評価(SiC デバイスおよび Si デバイス活用機器)(電中研)			
主な内容	最終目標	成果	達成度
自励式 SVC に関する実証評価	自励式 SVC に関して、中間評価までに検討した評価項目に関して、実規模試験設備を活用して実証評価し、課題を明らかにする。	富士電機社製自励式 SVC の実証評価では、機器運転時に高調波電圧、電流が発生しており、実証評価を中断した。これを受け、代替試験として導入実績のある自励式 SVC を対象に試験を実施した。その結果、設置箇所や使用目的に合わせた設定が不十分な場合、設計通りの動作をしないことを明らかにした。	○
次世代 TVR に関する実証評価	次世代 TVR に関して、中間評価までに検討した評価項目に関して、実規模試験設備を活用して実証評価し、課題を明らかにする。	北芝電機製次世代 TVR では、Si 使用機、SiC 使用機、SiC 使用改良機の計 3 回の試験を実施した。Si 使用機と SiC 使用機の電気的特性の差は本実証評価では見られなかった。また、系統運用者が望まない動作があったため、これらについて改良を依頼し、確認した。	○

九州電力薩摩川内試験場における次世代 TVR の実証評価(電中研、九州電力)			
主な内容	最終目標	成果	達成度
実グリッドの整備	模擬グリッド試験による評価をクリアできた次世代 TVR について、実規模潮流条件や実仕様(九州電力仕様)の SVR との組み合わせ条件などの実配電線環境において実証評価し、課題を明らかにする。	九州電力の薩摩川内試験場において、次世代 TVR について、各種系統条件(重負荷、軽負荷、晴天日、出力変動日)における単機試験、他の制御機器との組合せ試験を実施し、電圧適正化の効果を評価した。 上記試験の結果、従来の SVR や TVR のようなタップ切替機器に比べ、連続制御が可能であるため、出力変動日における電圧逸脱が抑制され、また、下流の SVR のタップ動作回数が低減できることが明らかになった。さらに、制御方式(LDC 方式)は SVR と同一であるため、従来の SVR と同一の整定値で有効に動作できることが明らかになった。 以上の結果より、制御性能と現場適用性に優れていることが明らかになった。	○
検討委員会の開催と運営(エネ総工研)			
主な内容	最終目標	成果	達成度
検討委員会の開催と運営	関連業界、大学有識者などをメンバーとする作業検討会を年3回程度実施し評価いただく。	検討委員会は、合計12回(中間評価以降は7回)開催し、有識者の皆様からご意見を頂き、研究計画に反映した。 検討委員会には研究開発項目②の実施者だけでなく、研究開発項目①のメーカーにも出席して頂き、電圧制御機器開発の進捗報告、及び共有化を図り、研究開発項目①の検討委員会としても機能する取組を行った。 また、委員会では会議における議論の他に、実験設備の視察も行った。 第5回(H28.5.25)横浜国大実験室グリッド視察 第8回(H29.11.29-30)電中研赤城模擬グリッド視察 第11回(H30.11.1-2)九州電力薩摩川内試験場,実グリッド視察	○

配電用パワエレ機器と活用した電圧制御の共通基盤技術の提案と構築(電中研)			
主な内容	最終目標	成果	達成度
配電用パワエレ機器と活用した電圧制御の共通基盤技術の提案と構築	従来からの企画基準、メーカーの開発・試験方法、国内外の各種調査、各種解析および実証試験による評価を踏まえ、配電パワエレ機器とそれをを用いた制御方法の、要件、確認・評価方法を明らかにする。また、将来的にあるべき姿を示す。	<p>成果のまとめとして、以下を取りまとめた。</p> <ul style="list-style-type: none"> (1) JEC など規格・基準による試験内容 (2) 実施(追加)すべき試験内容 (3) メーカー基準内容、メーカー工場内容 (4) 電力会社が求める要求仕様内容 (5) 今回の実証研究を踏まえて追加すべき仕様、試験名用 <p>また、今回の実証研究において、今後検討すべき課題、将来技術開発が進んで解決できるであろう課題について取りまとめた。</p>	○

以下、研究開発項目②の当該研究の具体的な実施状況として当該成果報告書を抜粋する。

研究開発項目②成果報告書 抜粋
(電力中央研究所、横浜国立大学、エネルギー総合工学研究所)

1. 研究開発の成果と達成状況

1. 1. 1 中間目標に対する成果と達成状況

1. 1. 1 (1) 中間目標

本研究開発では、平成 28 年度までに、研究開発項目①「次世代電圧調整器・システムの開発」において開発した SiC 適用機器を含む次世代電圧制御機器・システムに関して、要求仕様の調査および計算機シミュレーションにより性能・信頼性評価法、配電システム設計法および機器故障時の対応法を検討し、原案を策定する。

1. 1. 1 (2) 中間目標に関する成果と達成状況

研究開発項目①「次世代電圧調整器・システムの開発」(以下、研究開発項目①)において開発した SiC 適用機器を含む次世代電圧制御機器・システムに関して、以下を実施し中間目標を 100%達成した。

1. 1. 1 (3) パワーエレクトロニクス等に関する国内外の調査

エネルギー総合工学研究所を中心とし、国内の電力会社の配電部門および研究所、配電システム用電圧制御機器メーカーに対して調査を行い、要求仕様、性能・信頼性評価法、配電システム設計法、および機器故障時の対応法について取りまとめた。

調査結果において、現状でも電力会社には、パワエレ機器に対して信頼性やメンテナンス性の不安によりアレルギーがあることが判明した。また、単柱仕様や直列機器の場合の短絡容量などの機器の仕様や性能に関して、要求仕様を十分満たしていないことなどの理由から電力会社が採用に踏み切れない理由であることも判明した。

一方、配電システム用電圧制御機器メーカーでは、これまで電力会社からの要求仕様を基に製造するケースが多く、その性能・信頼性評価方法についても規格に準じた試験以外は電力会社の指定により決定されてきており、標準的な考え方が整理されていないことが明らかになった。

また、エネルギー総合工学研究所により、国外の配電システム事業者や配電システム用電圧制御機器メーカーに対する調査や、学会や実証事業における調査を行い、配電システム用パワエレ機器のニーズや SiC デバイスに関する市場性について取りまとめた。

調査結果において、送電システム用や需要家用のパワエレ機器は導入実績があるものの、配電システム用パワエレ機器はほとんど導入実績がないことが明らかになった。一方、SiC デバイスに関する将来的な市場性の予測に関しては、日本の状況とは異なり、有望視されていることが明らかになった。

さらに、パワエレ機器のコンパクト化や軽量化に関する調査として、将来的な高耐圧化と低損失化に着目し、変圧器を介さずに配電線への接続(トランスレス接続)を想定した場合の機器内部の熱設計に関して熱シミュレーションを行い、トランスレス接続と単柱設置の可能性について取りまとめた。

1. 1. 1 (4) 模擬グリッド・実グリッド試験の実施内容の検討

平成 29 年度以降の模擬グリッド・実グリッドでの実証に向けて、“1. 1. 1 (3) パワーエレクトロニクス等に関する国内外の調査”の結果を考慮した上で、電力中央研究所による機器の制御性能や配電系統や送電系統の運用、事故などの系統イベント時の動作特性に関する評価項目の抽出、横浜国立大学による実験室グリッドによる実験や瞬時値解析を活用した機器の制御性能と安定性に関する評価項目の抽出、および電力中央研究所と横浜国立大学の共同による潮流計算による配電システムの設計法の明確化を実施し、模擬グリッド・実グリッド試験における試験方法や評価方法を取りまとめた。

抽出結果において、起動停止、安定運転の確認、系統擾乱時の挙動確認、電圧制御特性確認、配電線事故時の挙動確認、機器組み合わせ時の試験、装柱性・メンテナンス性などに関する約 30 の試験項目を抽出し、試験方法や評価方法を取りまとめた。

また、将来的に SiC デバイスを活用することにより機器の制御速度を向上させた場合のメリットである事故時運転継続時の電圧サポート機能や電圧フリッカの抑制の可能性評価と、この制御速度を向上させた場合のデメリットである単独運転検出への影響や制御の安定性の悪化について評価した結果、必ずしも両立する結果ばかりではなかった。

さらに、潮流計算により、現状電圧制御機器である配電線自動電圧調整器（以下、SVR）、研究開発項目①が開発した自励式無効電力補償装置（以下、自励式 SVC）と次世代自動電圧調整器（以下、次世代 TVR）について、電圧適正化効果を評価し、PV の導入量に応じた配電システムの設計法を明らかにした。また、上記機器を組み合わせた場合の有効性と課題について取りまとめた。

1. 1. 2 最終目標に対する成果と達成状況

1. 1. 2 (1) 最終目標

平成 30 年度までに、模擬グリッドおよび実グリッドにおいて、開発機器の動作検証と平成 28 年度までに策定した原案の検証を行い、次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術を開発した。

1. 2. 2 (2) 最終目標に関する成果と達成状況

研究開発項目①において開発した SiC 適用機器を含むパワエレ機器に関して、動作検証と平成 28 年度までに取りまとめた試験方法や評価方法に従って電力中央研究所により模擬グリッド試験、九州電力により装柱性試験と実グリッド試験を以下のように実施した。

“1. 1. 1 中間目標に対する成果と達成状況”と上記の試験結果を総合的に評価し、次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術を取りまとめ、最終目標を 100%達成した。

1. 2. 2 (3) 研究開発項目①において開発した機器に関する模擬グリッド試験

研究開発項目①「次世代電圧調整器・システムの開発」において開発した機器は、富士電機殿の単柱仕様の自励式 SVC、北芝電機・東芝エネルギーシステムズ殿(以下、東芝 ESS)殿の次世代 TVR であり、これらの機器について電力中央研究所の赤城試験センター(群馬県前橋市)の実規模実験設備における模擬グリッド試験を実施した。

自励式 SVC については、起動時に配電線のインピーダンスと機器との共振などが発生し、計画していた試験が実施できないことから、研究開発項目①にて原因究明を行った。この結果より、配電系統のように線路インピーダンスが運用により変化し、特定できない条件下では、スイッチングノイズ除去用のフィルタ設計の十分な検討が必要であることが明らかになった。

次世代 TVR については、検証の過程ではいくつかの課題が出てきたが、メーカーにより対策することで課題をクリアでき、計画していた全ての試験項目を実施することができた。その結果、実配電線への接続可能となる条件をクリアしたため、実グリッド試験を実施することとした。また、同時に現時点では実現できていないが、将来的に必要なと思われる仕様および機能を抽出することができた。

1. 2. 2 (4) 配電系統への導入実績がある自励式 SVC に関する模擬グリッド試験
自励式 SVC については、研究開発項目①における原因究明が長期化したため、SiC デバイスを活用した単柱仕様の自励式 SVC の検証を断念し、その代替として、配電系統への導入実績がある H 柱仕様の自励式 SVC (Si デバイス活用) の二機種について試験による検証を実施した。その結果、一機種については、“1. 2. 2 (3) 研究開発項目①において開発した機器に関する模擬グリッド試験”の自励式 SVC と同様に、起動時に配電線のインピーダンスと機器との共振などが発生し、計画していた試験が実施できないことから、メーカーにて原因究明を行い、対策方法を検討した。もう一機種については、計画していた全ての試験項目を実施することができ、現状の自励式 SVC の実力を把握するとともに将来的に必要と思われる仕様および機能を抽出することができた。

1. 2. 2 (5) 研究開発項目①において開発した機器に関する装柱性試験

“1. 2. 2 (3) 研究開発項目①において開発した機器に関する模擬グリッド試験”にて、実配電線への接続可能となる条件をクリアした次世代 TVR について、九州電力の研修所において、実際に装柱しながら詳細の距離や角度を計測し、装柱時の施工性、保守時のメンテナンス性について評価した。本事業で研究開発項目①において開発した次世代 TVR は、九州電力用に製造したものではないため、いくつかの課題が抽出されたが、いずれの課題もメーカーにて対応可能なものであった。本試験により、電圧制御機器を開発する上で必要となる、施工性やメンテナンス性に関する留意点を抽出することができた。

1. 2. 2 (6) 研究開発項目①において開発した機器に関する実グリッド試験

“1. 2. 2 (5) 研究開発項目①において開発した機器に関する装柱性試験”にて、実配電線への接続可能となる条件をクリアした次世代 TVR について、実電圧、実潮流、および実ノイズレベルなどの実配電線の環境下における制御の安定性、電圧制御性、および既存機器 SVR との協調性の評価試験を行った。その結果、制御の安定性や既存機器 SVR との協調性の問題はなく、既存機器 SVR よりも優れた電圧制御性を有していることを確認できた。

1. 2. 2 (7) 次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術

以上に記載したように、国内および国外への調査の実施、実験室グリッド、模擬グリッド、および実グリッドにける試験の実施、試験のサポート、SiC デバイス活用機器のメリットの発掘、および電圧制御機器・配電システムの構成法の検討のための計算機シミュレーションの実施により抽出した、現在から将来にわたり配電系統用の電圧制御機器として必要となる仕様、性能と、それらの構成法、試験法を明らかにし、取りまとめた。

和文要約

1. パワーエレクトロニクス等に関する国内外の調査

エネルギー総合工学研究所を中心とし、国内の電力会社の配電システム部門および研究所、配電システム用電圧制御機器メーカーに対して調査を行い、要求仕様、性能・信頼性評価法などについて取りまとめた。また、国外の配電システム事業者や配電システム用電圧制御機器メーカーへの調査、学会や実証事業に関する調査を行い、配電システム用パワエレ機器のニーズや SiC デバイスに関する市場性について取りまとめた。

国内調査結果において、現状でも電力会社には、パワエレ機器に対してアレルギーがあることが判明した。一方、メーカーでは、これまで電力会社からの要求仕様を基に製造するケースが多く、標準的な考え方が整理されていないことが明らかになった。

国外調査結果において、配電システム用パワエレ機器はほとんど導入実績がないことが明らかになった。一方、SiC デバイスに関する将来的な市場性の予測に関しては、有望視されていることが明らかになった。

2. 将来の SiC デバイスの高耐圧化・低損失化を想定した検討

産業技術総合研究所において、変圧器を介さずに配電線への接続を想定した場合の機器内部の熱設計に関して熱シミュレーションを行い、トランスレス接続と単柱設置の可能性について取りまとめた。

3. 模擬・実グリッド試験での評価項目の検討

1. の調査や 2. の検討を踏まえ、電力中央研究所において、制御性能や配電システムや送電システムの運用・事故時の動作特性に関する評価項目を抽出した。また、横浜国立大学において、実験室グリッドによる試験や瞬時値解析により制御性能と安定性に関する評価項目を抽出した。さらに、両法人において、潮流計算による配電システムの設計法の明確化を実施し、模擬・実グリッド試験における試験方法や評価方法の約 30 の試験項目について取りまとめた。

4. 研究開発項目①において開発した機器に関する模擬グリッド試験

富士電機製自励式 SVC、北芝電機・東芝 ESS 製次世代 TVR に関して電力中央研究所の赤城試験センターの実規模実験設備における模擬グリッド試験を実施した。

自励式 SVC については、設計通りの動作ができずに計画していた試験が実施できなかった。次世代 TVR については、課題が出てきたが、メーカーにより対策することでクリアでき、全ての試験項目を実施することができた。

5. 配電システムへの導入実績がある自励式 SVC に関する模擬グリッド試験

4. と同様に、電力中央研究所において、富士電機製自励式 SVC の代替として、導入実績がある自励式 SVC (Si デバイス活用) の二機種について試験による検証を実施した。その結果、現状の自励式 SVC の実力を把握するとともに、将来的に必要な仕様および機能を抽出することができた。

6. 次世代 TVR に関する装柱性試験

次世代 TVR について、九州電力の研修所において、装柱時の施工性、保守時のメンテナンス性について評価し、留意点を抽出することができた。

7. 次世代 TVR に関する実グリッド試験

九州電力の薩摩川内試験場において、実配電線の環境下における制御の安定性、電圧制御性、および既存機器 SVR との協調性の評価試験を行った。その結果、既存機器 SVR よりも優れた電圧制御性を有していることを確認できた。

8. 次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術

以上に記載したように、国内外への調査、各種試験による検証、各機器の有効性に関する計算機シミュレーションなどを実施することにより、必要となる仕様、性能と、それらの構成法、試験法を明らかにし、取りまとめた。

英文要約

Title: Research Projects for Constructing Next-generation Power Grid with Decentralized Energy Resources. Research Topic 2 Development of Common Fundamental Technology for Constructing Next-generation Distribution System (FY2014-FY2018) Summary Report

1. Research of domestic and international application of power electronics devices for distribution power systems.

Through a survey on the department of distribution power systems of domestic power companies and research institutes, and manufacturers of voltage control equipment for distribution power systems the Institute of Applied Energy (IAE) together with other organizations investigated the required specification, performance and reliability evaluation methods of the voltage control equipment applying power electronics devices for distribution power systems. In addition, needs for voltage control equipment applying power electronics devices and marketability of SiC device were investigated through a survey on foreign distribution power companies and foreign manufacturers of voltage control equipment for distribution power systems and an investigation of the information of foreign electrical engineering society and demonstration projects.

The results of the domestic investigation show that current domestic power companies have an allergy to the power electronics devices. On the other hand, manufacturers design the products based on specifications required from power companies and there is no standard specification for the voltage control equipment applying power electronics devices.

The investigation results for foreign distribution power companies show that there are very few cases where voltage control equipment have been installed applying power electronics devices for distribution power systems. On the other hand, growing expectations for the future marketability of the SiC devices were confirmed.

2. Study of high-voltage application with low loss of the future SiC devices

The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) has conducted thermal simulations for a thermal design of the transformerless voltage control equipment connected to distribution power systems and summarized the possibility of the application of the transformerless voltage control equipment and its installation to a single utility pole.

3. Study of the evaluation items of the experiment using demonstration grid and actual distribution power grids

Based on the results of 1. and 2. described above, the Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI) has studied and picked up the evaluation items of the voltage control equipment in terms of the control performance in a normal situation and the stability performance in a grid fault situation. Yokohama National University has studied and picked up the evaluation items of the voltage control equipment in terms of control and stability performance through a lab-scale demonstration grid test and instantaneous numerical analysis. Also, the CRIEPI and Yokohama National University have studied an appropriate design methodology of distribution power systems using a power flow calculator, and picked up 30 test items for the demonstration test using demonstration grids and actual distribution power grids.

4. Test using demonstration grids using the equipment developed in a research topic

The demonstration test using the demonstration power grids of CRIEPI in the Akagi Testing Center was conducted for the Self-commutated SVC developed by Fuji Electric, and the next generation TVR developed by Kitashiba Electric and Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation.

The planned test could not be conducted for the Self-Commutated SVC because it couldn't operate in an appropriate manner designed. For the TVR, although there were some tasks which needed to be addressed, by applying countermeasures provided by the manufacturer, all planned tests were conducted.

5. Test using demonstration grids using the Self-commutated SVC which has the records to be installed in the real distribution power systems.

A test for the Self-commutated SVC which has the records to be installed in the real distribution power systems was conducted in place of the Self-commutated SVC developed by Fuji Electric.

6. The evaluation test of applicability of a pole-mounted next generation TVR

Through the evaluation of the workability when mounting the next generation TVR to utility poles, easiness of maintenance, and some points to be noted when applying a poles-mounted next generation TVR were discovered.

7. The test using actual power grids using the next generation TVR

Using the test grids of Satsumasendai testing center, which are owned by Kyusyu Electric Power Company and connected to actual power grids, an evaluation test for the next generation TVR was conducted in terms of stability of control, voltage controllability, and performance of co-operation with the conventional SVR. The results show that the next generation TVR has better voltage controllability than the conventional SVR.

8. Basic technologies common in constructing Next generation distribution power systems

Required specifications and performance, appropriate designs and test methods for the next generation voltage control equipment were found out and summarized in this report, which were based on the results obtained from a survey and an investigation to domestic and foreign utilities and manufacturer, a wide variety of validation tests, and the numerical simulation analysis described above.

1. 2 はじめに

PV などの分散型電源の電圧変動対策として、これまで、パワーエレクトロニクス機器を適用した配電システムの電圧制御機器や、これらパワーエレクトロニクス機器を含めた複数の電圧制御機器の協調運用方式の基本的な研究開発が行われてきたが、機器のコンパクト化や信頼性の面で課題が残っていた。このような状況の中、近年、SiC デバイスの開発が進み、低電圧・小容量のパワーエレクトロニクス機器において、Si デバイスに代わり SiC デバイスを活用した機器が開発されており、機器のコンパクト化が実現されつつある。さらに、SiC デバイス自体も高耐圧・大容量のものが開発されつつあり、これらを適用することにより、配電システムの電圧制御機器のコンパクト化やタップ切換機器の長寿命化の可能性が出てきた。

PV は発電出力が秒から分の周期で変動することが知られている。このような PV が連系された配電線では、系統電圧も秒から分の周期で変動する。これに対して、SVR のようなタップ制御による電圧制御機器は、不感帯の上下を秒から分の周期で電圧逸脱する場合には、頻繁にタップ切換動作を行うため、機器の寿命に影響する可能性がある。

一方、SVR の上流側に連続制御が可能な電圧制御機器（SVC や次世代 TVR）が設置されている場合には、上流側の電圧制御機器が変動を抑制するため、SVR の不感帯内に系統電圧を維持できれば、下流側の SVR の頻繁なタップ切り替え動作は減少し、機器の寿命を延命できる可能性がある。

本研究開発では、SiC デバイスを適用した次世代配電システムの実現のため、配電システムに適用するパワーエレクトロニクス機器の共通基盤技術として、これらの性能・信頼性評価法、制御効果やコストを勘案した、配電線形態や再生可能エネルギー導入量等の各種条件に応じた、それぞれの適切な配電システム設計法および機器故障時の対応法の解明・指針整理を行った。

1. 3 全体の事業目的と計画（研究開発項目①～③の全体概要）

本事業では、SiC デバイスを適用した次世代配電システムの実現に向けて、研究開発項目①において、SiC モジュールとそのモジュールを実装した電圧制御機器の開発を実施し、研究開発項目②において、各電圧制御機器の配電システムへの導入要件とその試験法を明確化し、それらを活用した場合の配電システム構成法の明確化と指針の整理を行い、研究開発項目③において、これらの技術の進展を踏まえ、配電システムの更なる将来像を描くフィージビリティスタディを行う。

1. 3. 1 研究開発項目① 次世代電圧調整機器・システムの開発

SiC デバイスを用いた 自励式 SVC 等の次世代電圧調整機器およびその要素技術を開発する。また、これら電圧調整機器の制御アルゴリズムと制御システムを開発する。

1. 3. 2 研究開発項目② 次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術の開発

研究開発項目①で開発した次世代電圧調整機器及およびその制御システムをフィールドに設置し、電圧調整機器単体ではなく、複数の機器が混在する配電システムとして運用検証を行う。また、これら新たな機器・システムを配電システムに適用し、PV 等の再生可能エネルギーの大量導入を図るための共通基盤技術の開発を行う。

1. 3. 3 研究開発項目③ 未来のスマートグリッド構築に向けたフィージビリティスタディ

将来における再生可能エネルギーの導入拡大に向け、現在の状況に捉われない理想的な配電システムのあるべき姿についてフィージビリティスタディを行う。

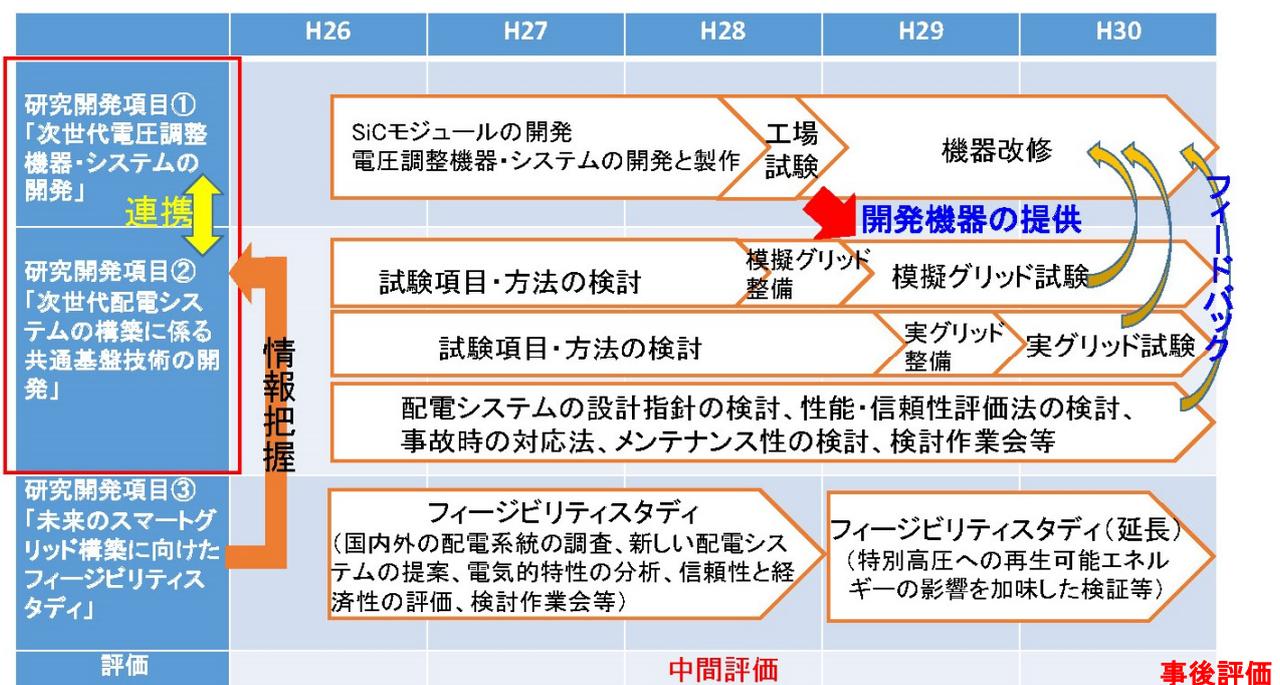


図 3.3-1 本事業の実実施スケジュール

1. 4 事業計画（研究開発項目②の全体概要）

研究開発項目①で開発した次世代電圧調整機器およびその制御システムをフィールドに設置し、電圧調整機器単体ではなく、複数の機器が混在する配電システムとして運用検証を行う。また、これら新たな機器・システムを配電システムに適用し、PV等の再生可能エネルギーの大量導入を図るための共通基盤技術の開発を行う。

具体的には、適用する配電システムの形態や次世代電圧調整機器・システムの種別、設置位置、組合せの違い等に対応する配電システムの設計指針の策定、性能・信頼性評価法の開発、故障時の対応検討等を行う。

本研究開発は、研究開発項目①の実施者と連携・協調して進めるものとし、フィールド検証結果や共通基盤技術の成果は研究開発項目①の取組にも反映させるものとする。

1. 4. 1 性能・信頼性評価法の検討

機器単体および従来型電圧制御機器との混在を含む複数機器による配電システムの電圧制御等の通常時の運転性能、ならびに配電線ルート切替えや、電力系統事故時（瞬時電圧低下等）の系統擾乱時における運転性能、および経年劣化等の信頼性についての各評価手法を開発する。

平成29年度からは、平成28年度までに作成した機器単体および従来型電圧制御機器との混在を含む複数機器による配電システムの電圧制御等の通常時の運転性能、ならびに配電線ルート切替えや瞬時電圧低下等の電力系統事故時の系統擾乱時における運転性能についての各評価方法について、“1. 4. 4 模擬グリッドでの実証評価”と“1. 4. 5 実グリッドでの実証評価”の試験と並行して、平成29年度から30年度に系統解析やメーカー・電力会社への調査を実施し、平成30年度末に取りまとめる。

1. 4. 2 配電システムの設計指針の検討

制御効果ならびにコストを考慮に入れ、配電線の形態、PV等の再生可能エネルギーの導入量等の各条件に応じた、適切なシステム構成・運用形態を明らかにし、これにより次世代配電システムの設計指針を策定する。

平成29年度から30年度も引き続き、系統解析やメーカー・電力会社への調査により、制御効果ならびにコストを考慮に入れ、配電線の形態、PV等の再生可能エネルギーの導入量等の各条件に応じた、適切なシステム構成・運用形態を明らかにし、これにより次世代配電システムの設計指針を策定する。

1. 4. 3 機器故障時の対応法・メンテナンス性評価法の検討

次世代電圧制御機器を配電系統に設置した場合の機器故障時の対応法、修繕法、および施工方法を明らかにする。

平成 29 年度からは、平成 28 年度までに作成した次世代電圧制御機器を配電系統に設置した場合の機器故障時の対応法、修繕法、および施工方法を平成 29 年度の装柱性試験にて検証する。並行して、メーカー・電力会社への調査を実施し、平成 30 年度末に取りまとめる。

1. 4. 4 模擬グリッドでの実証評価

前項までにおいて抽出した各試験項目に基づき、研究開発項目①の開発機器・システムを用いた電圧制御および系統異常時の各性能評価試験を実施する。

平成 29 年度からは、平成 28 年度までに“1. 4. 1 性能・信頼性評価法の検討”において抽出した各試験項目に基づき、平成 29 年度に研究開発項目①の開発機器を用いた電圧制御および系統異常時の各性能評価試験を実施する。なお、研究開発項目①より提供されない機器については、同レベルの電圧制御特性を持つ機器について同様の試験を実施する。

1. 4. 5 実グリッドでの実証評価

平成 30 年度には、実グリッドにおいて、実配電線環境への適用可能性評価として、PV の出力変動時の制御特性、既設機器の置換え機器としての電圧制御特性、実グリッドの試験環境における各種条件での安定運転特性などについて、研究開発項目①開発機器の動作特性を検証する。なお、研究開発項目①より提供されない機器については、実グリッド試験は実施しない。

1. 4. 6 検討委員会の実施

関連業界、大学有識者などをメンバーとする検討委員会を年 3 回程度実施し、研究開発計画、結果に関して評価いただく。また、研究開発項目①の実施者にも参加いただき、研究開発項目①と研究開発項目②の情報交換・共有を実施する。

なお、本実施計画では、研究開発項目①での開発機器として、次世代型の配電系統用自励式 SVC、次世代 TVR を対象とする。なお、万一、研究開発項目①より提供されない場合には、必要に応じて同レベルの電圧制御特性を持つ機器に関する検証を実施する。

1. 4. 7 研究開発項目②の進め方

研究開発項目②は次のように進めることとした。

1. 配電システム用パワエレ機器等に関する国内外の調査

本研究開発の方向性や詳細な実施内容を定めるために、まず初めに、エネルギー総合工学研究所を中心とし、国内の電力会社の配電システム部門および研究所、配電システム用電圧制御機器メーカーに対して調査を行い、要求仕様、性能・信頼性評価法などについて取りまとめる。また、国外の配電システム事業者や配電システム用電圧制御機器メーカーへの調査や、学会や実証事業に関する調査を行い、配電システム用パワエレ機器のニーズや SiC デバイスに関する市場性について取りまとめる。

2. パワエレ機器および配電システムの制御の有効性評価

横浜国立大学を中心に、配電システムモデル、PV の導入量などをパラメータとして、パワエレ機器の制御の有効性、既存 SVR との協調性、整定方法の容易性などを潮流計算により評価する。

3. 実験室グリッドによる模擬・実グリッド試験での評価項目の検討

1. の調査や 2. の検討を踏まえ、電力中央研究所において評価項目を抽出する。また、横浜国立大学において、実験室グリッドによる試験や瞬時値解析により制御性能と安定性に関する評価項目を抽出する。

4. 研究開発項目①の機器に関する模擬グリッド試験による評価

電力中央研究所の赤城試験センターの実規模実験設備において、富士電機製自励式 SVC、東芝 ESS・北芝電機製次世代 TVR について、制御性能や配電システムや送電システムの運用・事故時の動作特性に関する模擬グリッド試験を実施する。

5. 配電システムへの導入実績がある自励式 SVC に関する模擬グリッド試験による評価

4. と同様に、電力中央研究所において、導入実績がある自励式 SVC (Si デバイス活用) の二機種について、制御性能や配電システムや送電システムの運用・事故時の動作特性に関する模擬グリッド試験を実施する。

6. 研究開発項目①の機器に関する装柱性試験

研究開発項目①の機器について、電力会社の研修所において、装柱時の施工性、保守時のメンテナンス性について評価し、留意点を抽出する。

7. 研究開発項目①の機器に関する実グリッド試験

電力会社の実配電線の環境下における制御の安定性、電圧制御性、および既存 SVR との協調性の評価試験を行う。

8. 将来の SiC の高耐圧化・低損失化を踏まえた機器構成に関する熱設計の検討

産業技術総合研究所において、将来の SiC の高耐圧化を踏まえた、変圧器を介さずに配電線への接続を想定した場合の機器内部の熱設計に関して熱シミュレーションを行い、トランスレス接続の可能性について評価する。

9. 次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術

1～8の国内外への調査、各種試験による検証、各機器の有効性に関する計算機シミュレーションなどを実施することにより、必要となる仕様、性能と、それらの構成法、試験法を明らかにし、取りまとめる。

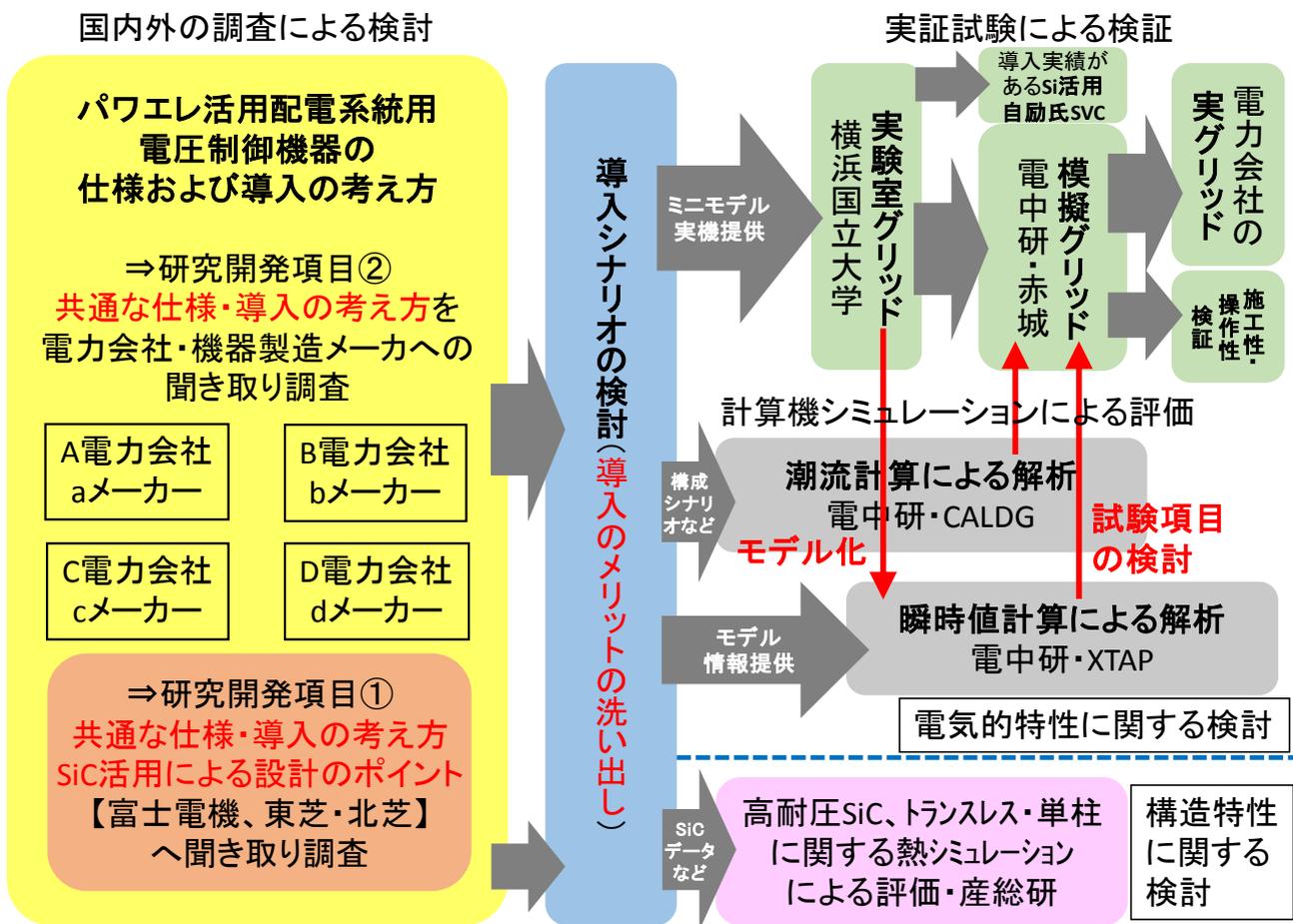


図 4.7-1 研究開発項目②の進め方

1.5 実施事項と結果

1.5.1 電力会社および電圧制御機器メーカーへの実態調査

1.5.1(1)国内外における配電システム用パワエレ機器の開発・導入状況調査

研究開発項目①が開発する配電システム用パワエレ機器へのニーズ提供、および開発機器の模擬グリッドや実グリッド設備での評価検証項目等にフィードバックすることを目的に、国内外における配電システム用パワエレ機器の開発・導入状況等について調査を行った。国内調査では、文献調査結果を基に配電システム用パワエレ機器を導入(試験導入含む)している電力会社、および同機器メーカーに聞き取りを行い、実態を調査した。国外調査では、配電システム用パワエレ機器の将来的な国外展開を見据えて、国外における配電システム関連プロジェクトや機器研究開発状況、市場動向(機器実用化の進展状況や系統課題の顕在化状況等)の調査を行った。調査概要は表5.1-1のとおりである。

表 5.1-1 国内外調査の概要

調査対象	文献調査	聞き取り/現地調査
国内	<ul style="list-style-type: none"> ○電力会社調査 ・過去の技術開発に関する公表資料(論文・研究所レポート等)を調査 ・系統運用やそのシステムに関する最近の公表資料を調査し、課題やニーズを分析 ○メーカー調査 ・機器開発に関する情報を基に、最新動向について調査 	<ul style="list-style-type: none"> ○電力会社調査 ・配電システム用パワエレ機器を導入、または試験導入している電力会社に対し、機器採用経緯や要求性能等についてヒアリングを実施(開発導入時の主管箇所[本店 or 研究所]を中心に調査対象箇所を選定) ○メーカー調査 ・機器開発に関する情報を基に、機器の性能・機能等の最新動向についてヒアリングを実施
国外	<ul style="list-style-type: none"> ○配電システム関連プロジェクト調査 ・欧米で進むプロジェクトに関して、公表資料を調査 ・最新動向や市場ニーズについて取りまとめ ○機器開発状況、市場動向調査 ・機器開発や市場動向に関する情報を基に、最新動向を調査 	<ul style="list-style-type: none"> ○配電システム関連プロジェクト調査 ・国際会議に参加し、最新研究開発状況を調査 ○機器開発状況、市場動向調査 ・左記の机上調査を基に、カンファレンスや展示会等において機器開発の最新情報を調査

1. 5. 1(1)①国内調査

1. 5. 1(1)①1)国内文献調査

はじめに、国内の電力会社および電圧制御機器メーカーが開発している主な配電系統用パワエレ機器(高電圧調整機器)について、過去 20 年程度に公表された文献(ホームページ記載内容含む)について調査した。主な開発機器は表 5.1-2 に示すとおり他励式 SVC(主流はリアクトル可変型の TCR[Thyristor Controlled Reactor]方式)、自励式 SVC、TVR の 3 品種であり、いずれの機器においても、大半は電力会社とメーカーの共同開発品であった。また、参考情報として、パワエレ技術を用いていない電圧調整機器の研究開発状況についても調査した。

表 5.1-2 主な配電系統用パワエレ機器(高電圧調整機器)

品種	概要	主な開発 メーカー数 ^{※3}
他励式 SVC	<ul style="list-style-type: none"> サイリスタとリアクトルの直列接続で構成された TCR 方式が主流 右図のように、コンデンサと組み合わせ、遅相から進相までの無効電力を出力 	3 社
自励式 SVC	<ul style="list-style-type: none"> 自励式変換装置を用いて、遅相から進相までの無効電力を出力 名称は、自励式 SVC の他、SVG^{※1}、STATCOM^{※2}等と呼ばれる 	多数
TVR	<ul style="list-style-type: none"> 負荷時タップ切換器にサイリスタを採用した自動電圧調整器 SVR と異なり切換動作回数に制限がなく、飛越タップ切換が可能といった特徴あり 	3 社

※1 SVG : Static Var Generator

※2 STATCOM : STATic synchronous COMpensatar

※3 共同開発品の場合はそれぞれメーカー数を計上(製品化までに至っていないメーカーも含む)

配電系統用パワエレ機器毎の調査内容、および結果は以下のとおり。

◎他励式 SVC

- ・表 5.1-3 のとおり、他励式 SVC は 3 メーカーでの開発を確認
- ・過去に、SVR との協調運転等に関する運用面の研究が行われていたが、至近における革新的な技術開発等の情報はなし
- ・2000 年に公表されたキューヘンと九州電力の共同開発品については、同年に九州電力管内に初号機の出荷
- ・2009 年からの PV の余剰電力買取制度の導入や、2012 年にスタートした再生可能エネルギーの固定価格買取制度の導入により、他励式 SVC は急速に設置台数が拡大している模様

表 5.1-3 他励式 SVC の主な開発状況

公表年	項目	メーカー	電力会社	研究機関	備考
1997	SVR 協調運転型 SVC 制御装置の開発	松下電器	北陸電力		<ul style="list-style-type: none"> ・実用化等の詳細は不明 ・出典：北陸電力 研究開発報告
1999	配電系統用 SVC の開発他	愛知電機	中部電力		<ul style="list-style-type: none"> ・コンデンサ可変型の TSC 方式[*](6 段階、3 秒切換)、容量 375kVA、重量 3,200kg、H 柱に装荷 ・TSC 方式であるが、中性点に限流抵抗を挿入した回路構成を採用し、初期充電時の突入電流の抑制を行ない、サイリスタとダイオードの耐量低減を実現(小型化・軽量化に寄与) ・SVR2 台、TVR1 台の実線路へ試験導入を行っており、一定の効果を確認 ・出典：愛知電機技報 No.22(1999)

※TSC 方式 (Thyristor Switched Capacitor:コンデンサ可変型)

表 5.1-3 他励式 SVC の主な開発状況(続き)

公表年	項目	メーカー	電力会社	研究機関	備考
2000	SVC の開発	キューヘン	九州電力		<ul style="list-style-type: none"> ・TCR 方式、容量 300kVA、重量 4,800kg、H 柱に装荷 ・並列運転は 3 台まで可(1 台を親機、2 台を子機に設定) ・2000 年から、電力会社向けにフェランチ対策やフリッカ対策として納入 ・出典: キューヘン HP(1993 年開発着手、2000 年初号機出荷)

◎自励式 SVC

- ・2003 年に日本ガイシと北海道電力との共同研究を経て、エナジーサポート社(2012 年に日本ガイシの完全子会社化)より製品化
- ・それ以降は、MMC 方式(Modular Multilevel Converter[モジュラーマルチレベル変換器])のトランスレス STATCOM の研究が実施されており、2013 年に東芝・電中研、2014 年に三菱電機が開発内容を報告
- ・2015 年にキューヘンが国内最小 STATCOM の開発、2016 年に愛知電機が STATCOM の開発と製品化、2017 年にエナジーサポートが同社従来品 STATCOM に対して高性能化品の開発を公表するのなど、(他励式 SVC と比較して)電圧補償の高速応答性に優れる自励式 SVC の研究開発が活発
- ・自励式 SVC はその高速応答性から、2015 年から九州電力管内で発生している配電線電圧変動対策(新型能動方式[ステップ注入付周波数フィードバック方式]を備えたパワコン(PCS)からの無効電力に起因)として試験的に活用されるなど、今後の導入拡大に期待

表 5.1-4 電圧制御機器メーカーの主な配電系統用パワエレ機器

公表年	項目	メーカー	電力会社	研究機関	備考
1999	新制御自励式無効電力補償装置の開発	東北電機製造・日立	東北電力		<ul style="list-style-type: none"> ・SVR との協調運転機能をもった自励式 SVC を開発し、フィールド試験を実施 ・従来の「電圧一定制御」方式から「平均電圧制御＋瞬時制御」方式へ変更のうえ、フィールド試験にて効果を確認 ・解析システムは、パソコンで使用できるインターフェースとし、「配電線・負荷・風力発電機・調相設備機器・SVR・SVC」の各諸元登録により実証試験と近時のデータが得られていることを確認 ・出典：日立評論 Vol.82 No.4(2000)
2002	STATCOM の開発と実証	ダイヘン	東京電力		<ul style="list-style-type: none"> ・SVR との協調運転(目標電圧逸脱分を瞬時補償→動作後に SVR へ制御量を移行)を具備し、フィールド試験によりその効果を確認 ・変圧器部と電力変換器部を分離し、単柱装荷可能な構成 ・パワエレ部冷却をファンレスとするために、自冷式ヒートパイプ放熱器を採用 ・出典：H14 電気学会全国大会(6-225)

表 5.1-4 電圧制御機器メーカーの主な配電系統用パワエレ機器(続き)

公表年	項目	メーカー	電力会社	研究機関	備考
2003	STATCOMの開発	日本ガイシ	北海道電力		<ul style="list-style-type: none"> ・不平衡補償機能を付加した STATCOM を開発し、北海道電力管内でフィールド試験を実施(フリッカ抑制効果も検証) ・不平衡補償については、電圧一定制御の補償量の余力を用いて実施 ・フリッカ抑制については、電圧一定制御と力率一定制御を組み合わせた複合制御方式を採用 ・出典:H15 電気学会全国大会(4-199、4-200)
2010	トランスレス STATCOM のミニモデル実証			東工大	<ul style="list-style-type: none"> ・トランスレス化を志向したモジュラー・マルチ・カスケード変換器(二重スター・チョップセルを用いた MMCC-DSCC)を用いた STATCOM について、ミニモデル(200V、10kVA)にて検証を実施 ・出典:H22 電気学会全国大会(4-045)、H23 電気学会全国大会(4-160)
2011	複数電圧カスケード変換器によるトランスレス STATCOM			電中研	<ul style="list-style-type: none"> ・耐圧の異なる複数のデバイスをカスケード接続したトランスレス STATCOM の制御方法提案 ・直流電圧の分担は、$6:2:1.2 = 3.6\text{kV}:1.2\text{kV}:0.72\text{kV}$ としており、それぞれ、Si(6.5kV、2.5kV)、SiC(1.2kV)のパワーデバイスを使用 ・ミニモデル(200V、10kVA)での結果は良好 ・出典:H23 電気学会全国大会(4-157)

表 5.1-4 電圧制御機器メーカーの主な配電システム用パワエレ機器(続き)

公表年	項目	メーカー	電力会社	研究機関	備考
2013	トランスレス STATCOM の試作検証	東芝		電中研	<ul style="list-style-type: none"> ・Si および SiC インバータを組み合わせたトランスレス・フィルタレス STATCOM の試作・検証を実施 ・6kV 系統連系時の 75kVA 出力のコンデンサ動作において、無効電力出力動作と、各種バランス制御によるコンデンサ電圧のバランス制御動作を確認 ・出典:H25 電気学会 B 部門大会(4-044)
2014	MMC 方式による STATCOM の開発	三菱電機			<ul style="list-style-type: none"> ・2014 年に開発完了し製品化検討中(2016 年以降の出荷を目指す) ・自社製 IGBT モジュールを使用 ・MMC モジュール使用によりフィルタレスとし、他励式と比較して 60%の省スペース化を実現 ・出典:三菱電機ニュースリリース(2014.8)
2015	単柱用 STATCOM の開発	キューベン	九州電力	芝浦工大	<ul style="list-style-type: none"> ・単柱装荷を目指した、一体型・強制風冷式 ・300kVar の分離型を試作後、一体型を開発 ・一体型化により、軽量化(2.7t→2.3t)、小型化(3.4 m³→1.95 m³)を実現 ・出典:H27 電気学会全国大会(4-169) ・展示会にて、ダイヘンがキューベン製 STATCOM(国内最小クラスの別仕様)の製品化を発表(2017.5)

表 5.1-4 電圧制御機器メーカーの主な配電システム用パワエレ機器(続き)

公表年	項目	メーカー	電力会社	研究機関	備考
2016	高圧配電システム用 STATCOM の開発	愛知電機			<ul style="list-style-type: none"> ・H 柱装荷用の一体型・強制風冷式(15年メンテ) ・電圧一定制御、無効電力一定制御、フリッカ抑制制御機能あり ・15年間メンテナンスフリー(交換部品である、プリント基板・電解コンデンサ・冷却ファンをユニット化して15年毎に交換) ・出典:愛知電機技報 No.37(2016)
2017	高性能 STATCOM の開発	エナジーサポート			<ul style="list-style-type: none"> ・インバータユニット(100kVA)の構成変更によって、100kVA~1MVA までの対応が可能 ・同社従来品に対して、電圧補償応答を高速化(80%補償を 70ms⇒46ms)を図り、高調波抑制機能は第5次~第13次までの対応が可能 ・保守性の向上を図るとともに、Wi-fi 通信機能、FRT 機能を搭載 ・出典:H29 電気学会 B 部門大会(177)

◎TVR

- ・従来機器(SVR)では限界がある、以下の「動作時間の制限」と「タップ切換回数の制限」を解決する手段として TVR を開発

【動作時間の制限】

SVR はタップ切換を機械的な接点で行うことから、動作時間に制約があり、急激な電圧変動に追従できない

【タップ切換回数の制限】

SVR は機械的な接点であるため、タップ切換回数に制限があり、その取替サイクルを所定の年数または動作回数以上にする必要あり

- ・2002年に北海道電力と北芝電機が1.5世代TVRの開発を報告
- ・2012年に愛知電機がTVRの開発を報告(製品化済であり複数の電力会社に納入実績あり)
- ・その後も、各メーカーにて飛び越しタップや、応答速度の高速化等の技術を開発

表 5.1-5 TVR の主な開発状況

公表年	項目	メーカー	電力会社	研究機関	備考
2000	直列型 SVC の実証	明電舎	東京電力		<ul style="list-style-type: none"> ・2000 年にシミュレーションによる動作解析、2002 年に実機でフィールド試験を実施 ・容量 75kVA と小容量ではあるが、単柱仕様を目標に開発を行い、実線路の単柱へ装荷のうえ動作を確認(総重量:1.9t、強制風冷式) ・概ね目標とする電圧変動率 5%以下を達成していたが、長期測定試験においては、補償量不足が発生 ・出典: H12 電気学会全国大会(6-109)、H12 電学論 B(120,12)、H14 電学論 B(122,12)
2002	1.5 世代 TVR の開発	北芝電機	北海道電力		<ul style="list-style-type: none"> ・1.5 世代 TVR(遠方監視制御、LDC、逆潮流判別機能を付加)のフィールド試験を実施 ・飛び越しタップの採用、回路構成の改良によって応答特性を 0.1 秒程度(60%短縮)に改善した IGBT 式 TVR を開発 ・タップ切換時の励磁突入電流の低減が課題であり、同報告では投入位相の制御を提案 ・出典: H14 電気学会全国大会(6-227)、H15 電学論 B(123,9)
2012	TVR の開発	愛知電機			<ul style="list-style-type: none"> ・3000kVA、7 タップ(100V 毎)、飛び越しタップ切換、短絡強度 2kA ・サイリスタは間接油冷方式を採用 ・限流リアクトルを省略することで、軽量化・小型化を志向 ・遠制機能を搭載(配電自動化システムへの連係が可能) ・出典: 愛知電機技報 No.33(2012)

◎その他機器

- ・上記に当てはまらない研究開発機器として、表 5.1-6 に示すように 2005 年に東北電力、北芝電機、東北大が「磁束制御型無効電力補償装置」を、2016 年に中部電力、愛知電機が「HVR (Hybrid Voltage Regulator)」の開発を報告

表 5.1-6 その他機器の開発状況

公表年	項目	メーカー	電力会社	研究機関	備考
2004	磁束制御型無効電力補償装置	北芝電機	東北電力	東北大	<ul style="list-style-type: none"> ・磁束制御型可変インダクタを適用した無効電力調整装置 ・鉄心と銅巻線のためのシンプルな構造であり、更に巻線結線法、磁心寸法および磁心材料を適切に選択することで電流歪みが小さくなり高調波フィルタの省略が可能 ・応答速度は 80ms 以内、容量 300kVA (遅れ) ・出典: H16 電気学会 B 部門大会 (396)、H16 電気学会全国大会 (5-239)、電気評論 (2005.1)
2016	HVR の開発	愛知電機	中部電力		<ul style="list-style-type: none"> ・SVC よりも低コストで、TVR よりも高性能化を目指したハイブリッド電圧調整器 (HVR) の開発 ・サイリスタによるタップ切換にて粗調整、IGBT の回路で微調整を行うことで連続制御を実現 (75V ステップの 7 タップの間を補完する $\pm 37.5V$ インバータで構成) ・不平衡補償機能を具備、短絡性能は JEC2200「変圧器」に基づき定格電流の 25 倍に耐える性能 ・開発品は、愛知電機の工場内試験場にて実証 ・出典: 愛知電機技報 No.37 (2016)、中部電力技術開発ニュース No.154 (2016)

- ・東北電力他の開発機器はパワエレ機器ではないものの、低コスト化を目指した独自性のある磁束制御型可変インダクタを適用した無効電力調整装置である。
- ・中部電力他の開発機器は、SVC よりも低コストで、TVR よりも高性能化を目指したハイブリッド電圧調整器(HVR)であり、TVR の得失を踏まえた改善が行われている。

1. 5. 1(1)①2)国内電力会社への聞き取り調査

文献調査結果も参考に、配電系統用パワエレ機器を採用(試験導入含む)している電力会社8社、および配電系統用パワエレ機器(他励式 SVC、自励式 SVC、TVR)を開発・製品化(販売)している電圧制御機器メーカー6社について調査を実施した。(聞き取り調査先は表 5.1-7 参照)

表 5.1-7 電圧制御機器メーカーおよび電力会社の聞き取り調査実績

年	月	調査先
2015	8月	A 電力会社(訪問)
	9月	B 電力会社(訪問)
	10月	C 電力会社(訪問)
	10月	D 電力会社(訪問)
	11月	A メーカー (1回目訪問)
	11月	E 電力会社(訪問)
	11月	B メーカー (1回目訪問)
	12月	F 電力会社(メール)
2016	5月	G 電力会社(訪問)
	5月	C メーカー (1回目訪問)
	7月	C 電力会社(2回目訪問)
	7月	D メーカー (1回目訪問)
2017	11月	H 電力会社(訪問)
2018	2月	F 電力会社(訪問)
	2月	D メーカー (2回目訪問)
	3月	C メーカー (2回目訪問)
	3月	A メーカー (2回目訪問)
	4月	B メーカー (2回目訪問)
	5月	E メーカー (訪問)
	5月	F メーカー (訪問)

◎国内電力会社が導入している配電系統用パワエレ機器

国内電力会社に対し、配電系統用パワエレ機器の本格導入の有無とその理由、並びに種別・台数等の聞き取り調査を実施した。

まず、配電系統用パワエレ機器の本格導入に関する理由は表 5.1-8 のとおりであり、分散型電源大量連系による急峻な電圧変動、およびフリッカや電圧アンバランス対策面でのスポットニーズ(試験導入の位置付け)はあるものの、本格導入に向けては機器本体価格の低減や信頼性の確保が課題であることが分かる。

表 5.1-8 国内電力会社における配電系統用パワエレ機器の本格導入有無とその理由

	本格導入している または 導入に積極的な理由	本格導入していない または 導入に消極的な理由	備 考
性能面	<ul style="list-style-type: none"> 配電系統用パワエレ機器はフリッカや急峻な電圧変動に対して対応可能である 昼夜間で相間アンバランスが異なる系統については既存機器(SVR等)では対応できない 	<ul style="list-style-type: none"> 既存 SVR での電圧調整で対応できている 	<ul style="list-style-type: none"> 分散型電源の連分量や設備形成の違い等により、電力会社によって状況が異なっている模様
価格面	<ul style="list-style-type: none"> 関連設備の増強や、既存 SVR の点検・修理を含めたトータルコストで有利な場合がある 	<ul style="list-style-type: none"> 機器本体が高価である 	<ul style="list-style-type: none"> 現状では既存機器(SVR等)と比較すると高価 機器への要求性能の違いや、量産効果によって価格差が生じている可能性あり
トラブル	<ul style="list-style-type: none"> 問題となるようなトラブル事例はない 	<ul style="list-style-type: none"> 過去のトラブル(雷害等による故障)発生時の対応や、取替部品の確保に苦慮した 	<ul style="list-style-type: none"> トラブル事例は様々ではあるものの、メンテナンスやトラブル発生時の対応容易性について検討する必要あり

また、配電系統用パワエレ機器で導入が進んでいるものは、文献調査結果と同様、表 5.1-9 のとおり他励式 SVC (TCR 方式)、自励式 SVC、TVR の 3 品種であった。

表 5.1-9 電力会社が導入している配電系統用パワエレ機器と導入数

配電系統用パワエレ機器	導入数 (導入社数)
他励式 SVC (TCR 方式)	202 台 (3 社)
自励式 SVC	86 台 (4 社)
TVR	548 台 (6 社)

電力会社毎の配電系統用パワエレ機器導入状況を図 5.1-1 に示す。同図から、他励式 SVC (TCR 方式)、および TVR については、それぞれ電力会社 1 社(他励式 SVC[TCR 方式]:C 電力会社で約 200 台、TVR:B 電力会社で約 500 台)での導入数が突出していることが分かる。

B 電力会社および C 電力会社の 2 社が積極的に配電系統用パワエレ機器を導入している以外は、試験的、もしくは特異な系統へのスポット導入を行っており、配電系統用パワエレ機器の全国的な普及については、未だ途に就いたばかりといえる状況であることが調査によって判明した。

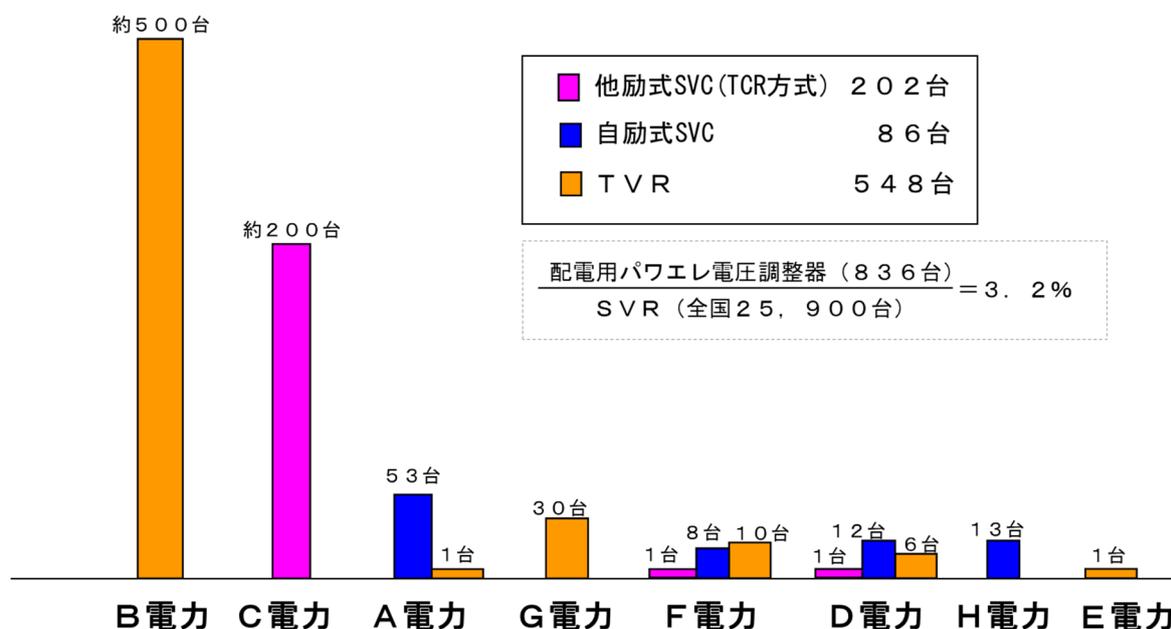


図 5.1-1 電力会社毎の配電系統用パワエレ機器導入状況

◎配電系統用パワエレ機器の導入目的

電力会社毎に導入している配電系統用パワエレ機器が異なることからわかるように、管理する配電系統の状況や問題の対象は異なっているものの、配電系統用パワエレ機器導入に至るまでの流れや設置目的は概ね共通している。

図 5.1-2 のとおり、基本的には従前の設備対策(電線張替[太線化]、柱上変圧器個別管理[タップ変更等]、SVR 設置等)にて電圧対策を実施するものの、それでは改善できない課題への対応(SVR では追従できない急峻な電圧変動や三相不平衡等)が導入のキックとなっている。導入にあたっては積極的に採用している電力会社は少数であり、現状は、配電系統用パワエレ機器に頼らざるを得ない「やむを得ない理由」により導入が少しずつ進んでいると思われる。

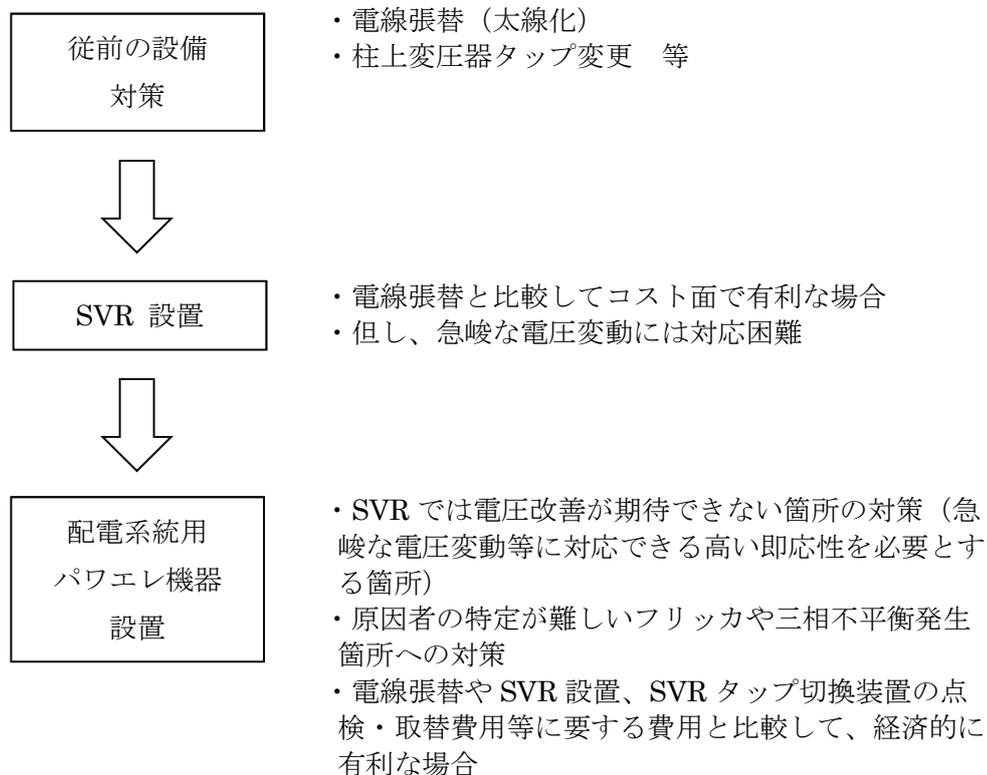


図 5.1-2 配電系統における電圧対策の流れ(一例)

◎電力会社ニーズの調査

電力会社が配電系統用パワエレ機器に求める性能について聞き取り調査を実施した。その結果を仕様面、運用・管理面、保守面に分類した結果を表 5.1-10～11 に示す。各項目の概要は以下のとおり。

<仕様面>

【構造・基本仕様】

適切な短絡性能、耐雷性能の強化、耐振動性の確保について要望あり。

短絡性能は、JEC-2200「変圧器」を基に、定格電流の 25 倍に耐え得る性能を要求している電力会社が多い(既存 SVR も同様)。設置場所に応じた短絡性能でも問題はないが、配電系統の変更に伴う機器の移設や、既存機器(SVR)との置き換え等を考慮すると、既存機器と同様、JEC に基づき短絡性能を選定しているものと思われる。

耐雷性能の強化は、長期信頼性の面から重要であるが、落雷頻度や雷エネルギーは地域によって大きく異なるため、留意する必要あり。

耐振動性の確保は、運搬や設置状況(柱上設置状態においても微振動は発生)等による振動環境下でも耐え得る性能が必要との要望はあるものの、配電系統用パワエレ機器を対象とした具体的な試験項目の規定はない。

【電圧調整機能】

既存機器(SVR 等)との協調制御機能の確認と合わせて、事前シミュレーションツールの整備について強い要望あり。動作原理が異なる電圧調整機器が混在した場合の協調動作について不安の声が多く、精度の高いシミュレーションツールの整備が望まれる。

また、近年は相間電圧のアンバランス傾向が昼夜間で大きく異なる箇所が発生してきており(負荷と分散型電源の時間的な偏在)、電圧不平衡機能の具備についても要望あり。

【遠制機能】

将来の電圧制御機器の集中制御や、基準値や不感帯等の遠隔整定機能を見据えた設計について要望あり。具体的には、各電力会社の遠制化計画に対応できる機能追加を見据えた機器設計が該当する。

<運用・管理面>

【導入効果等の見える化、異常発生時の内容把握】

配電系統用パワエレ機器導入後の効果(異常発生時の原因分析を含む)を定量的に確認・分析するために、動作履歴(ログ)等を容易に取得できる機能の具備について要望あり。

【設置位置・整定値の最適化】

今後、既存 SVR との協調運転や、配電系統パワエレ機器の適用位置・整定値 の最適化、更には SVR 代替機器としての有効性確認のために、精度の高いシミュレーションツール整備の要望あり。

【放熱不良による動作停止対応】

過去に発生した冷却ファンの不具合事例(放熱不良)、並びにメンテナンス労力低減の観点から、自然冷却方式(ファンレス)の採用について要望あり。

<保守面>

【消耗品の取替】

工場持ち込みを必要とする取替は、運搬・設置に要する費用が発生することから、現地(柱上)での消耗品取替を容易にする構造設計(制御基板のユニット化など)について要望あり。

配電系統用パワエレ機器の導入にあたり、その動作特性や SVR 等の既存機器との協調運転特性が検証されていないことや、リプレイスの可否(互換性)等について関心が高い一方、配電系統用パワエレ機器の低コスト化のニーズは強く、既存機器(SVR 等)との置換を想定すると、「コンパクト化・軽量化」より低コスト化が重要との意見もあった。当面は、配電系統用パワエレ機器単体での高コスト化は避けられないとしても、「長寿命化や保守性向上等によるコストメリット」や「他の電圧改善策にかかるコストの低減」等のメリットを定量的に評価することが重要である。

表 5.1-10 電力会社が求める配電系統用パワエレ機器の共通ニーズ

	項目	対象機器		聞き取り結果	備考	
		SVC等 (並列機器)	TVR等 (直列機器)			
仕様面	構造・基本仕様	短絡性能		○	<ul style="list-style-type: none"> 直列機器の場合、設置位置に応じた短絡性能で十分であるが、配電機器は移設するケースがあるためそれを考慮した性能が必要 現状は JEC を基に短絡性能を選定している電力会社が多い 	<ul style="list-style-type: none"> 短絡性能の増強は機器本体のサイズアップ、およびコスト高となる 現時点では、変電所直近(最大短絡電流 12.5kA)への具体的な TVR 設置構想はなし
		耐雷性能	○	○	<ul style="list-style-type: none"> 過去に TVR を数十台導入した電力会社において、雷害と思われる素子故障が多発(それ以降、配電系統用パワエレ機器の導入に消極的) 	<ul style="list-style-type: none"> 発雷の多い電力会社では、低圧回路についても雷インパルス耐電圧性能を規定
		耐振動性	○	○	<ul style="list-style-type: none"> 精密機器で構成されていることから、運搬や設置状況(柱上設置状態においても微振動は発生)等による振動環境下でも耐え得る性能が必要 	
	電圧調整機能	協調制御	○	○	<ul style="list-style-type: none"> 電力調整機器(既存 SVR や異メーカー SVC 間等)間の協調(並列)運転について、事前の確認が必要(不要動作、ハンチングの防止) 	<ul style="list-style-type: none"> 対象機器の組合せを選ばない柔軟性のある制御方式の確立が必要
		電圧不平衡機能	○		<ul style="list-style-type: none"> 自励式 SVC を採用している電力会社においては、電圧不平衡機能の適用事例あり 	<ul style="list-style-type: none"> 相間電圧のアンバランス傾向が、昼夜間で大きく異なる箇所が発生してきており(負荷と分散型電源の時間的な偏在)、変圧器の接続相の架け換えでは対応が困難となっている状況あり

表 5.1-10 電力会社が求める配電系統用パワエレ機器の共通ニーズ(続き)

	項目	対象機器		聞き取り結果	備考	
		SVC等 (並列機器)	TVR等 (直列機器)			
仕様面	電圧調整機能	事前シミュレーション	○	○	<ul style="list-style-type: none"> ・導入システムのインピーダンスを模擬したシミュレーションがメーカーにて実施されているかの確認が必要 ・想定される系統変更時の挙動も併せて確認しておくことも重要 	<ul style="list-style-type: none"> ・メーカー聞き取りの結果、システムのインピーダンス(分布定数を含む)や系統切替のパターンを電力会社から聞き取った上で、事前にシミュレーションを実施 ・各電力会社の設備形態、および各メーカーの電圧制御機器を網羅したシミュレーションソフトの開発が必要
	遠制機能	監視・整定機能	○	○	<ul style="list-style-type: none"> ・系統変更時等の運用者負担軽減の観点から、遠隔整定機能(基準値や不感帯等の変更)の具備を要求 ・将来の集中制御や、遠隔整定機能(基準値や不感帯等)を見据えた設計(機能追加が可能な設計)が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ・通信ケーブルの整備状況や遠制方式は電力会社毎に異なるものの、将来は必要となる機能であるものと想定
		遠制化計画	○	○	<ul style="list-style-type: none"> ・遠隔監視、制御の機能を付加する際は、開閉器遠制化計画の方向性(メタル遠制や光遠制等)と整合が必要 	
運用・管理面	導入効果等の見える化	○	○	<ul style="list-style-type: none"> ・導入効果や、故障時の履歴等を確認・分析する必要があるため、それら情報を記録・出力する機能を要求 	<ul style="list-style-type: none"> ・既存の稼働機器においても、導入効果を十分に把握できていない可能性あり 	
	異常発生時の内容把握	○	○	<ul style="list-style-type: none"> ・機器動作異常時の原因分析用として、運転記録(ログ)の保持、および機器異常内容を地上から目視確認可能なアラーム表示機能について要望あり 		

表 5.1-10 電力会社が求める配電系統用パワエレ機器の共通ニーズ(続き)

	項目	対象機器		聞き取り結果	備考
		SVC等 (並列機器)	TVR等 (直列機器)		
運用・管理面	設定値最適化・ 設置位置	○	○	・効果的な運用のために、最適な設置位置の導出を行なうツールが必要	・各電力会社の設備形態、および各メーカの電圧制御機器を網羅したシミュレーションソフトの開発を期待
	放熱不良による 動作停止対応	○		・以下の原因による放熱不良の事例あり ・素子冷却フィンに塵埃が堆積し、放熱性能が低下 ・空気取入口のメッシュ目詰まり、冷却ファン故障による内部温度上昇	・冷却ファンを省略した、自然空冷方式の採用と合わせて、盤内の気密性能を向上(塵埃等の付着リスクの排除) ・ファン稼働音は騒音の一因でもある
	FRT要件 対応(参考)	○		・現時点では FRT 要件を満足する性能を要求する電力会社はなし(今後検討すべき内容との回答あり)	・電力会社ニーズなしのため参考として記載 ・FRT 要件については補足を参照
保守面	消耗品の取替	○	○	・定期交換部品等は、現場作業(柱上取替)が容易な構造を要求 取替推奨品の例: 制御基板、電解コンデンサ、風冷装置 ・点検および修繕費用も考慮したトータルコストの低減を要求	・現地取替不能な機器構造の場合、工場への持ち帰りが必要となるため、機器の吊り下し・運搬に要する追加費用が発生 ・点検サイクルは電力会社毎に異なるものの、サイクル延伸化の要望あり

(補足)FRT 要件への対応について

【FRT (Fault Ride Through) 要件】
 系統の擾乱(電圧変動・周波数変動)に対する一斉解列による電力品質低下の防止のため、「電力系統の乱れによって解列すべきか、運転継続すべきか」を規定

【出力復帰動作の例】
 電圧低下前の出力に対する比率(%)

電圧復帰後0.1秒以内に電圧低下前の出力の80%以上であること

← 0.3秒以内 電圧復帰 →

【課題】

- FRT要件に対する電圧調整機器として「あるべき動作」の整理
 - ・配電線電圧低下中の動作
 - ・復電後の運転状態復帰プロセス
 - ・単独運転移行を想定した周波数変動耐量
- 上記①の装置設計への反映
 - ・電圧低下中(0.3秒)の制御電源補償対策

表 5.1-11 電力会社が求める配電系統用パワエレ機器の個別ニーズ

	項目	対象機器		聞き取り結果	備考													
		SVC等 (並列機器)	TVR等 (直列機器)															
仕様面	構造・基本仕様	小型・軽量化	○	○	<ul style="list-style-type: none"> ・都心部での設置を容易にする単柱設置可能な寸法・重量を要求(既存SVRは単柱設置としている電力会社あり) ・単柱設置により、工費やランニングコスト(電柱占用料)の低減にも寄与 	<ul style="list-style-type: none"> ・小型・軽量化によりコスト高になるのであれば、単柱設置は必須ではないとの意見もあり 												
		設置環境に耐え得る仕様	○	○	<ul style="list-style-type: none"> ・一部電力会社においては、寒冷地仕様を要求(-35℃環境下での正常動作を確認、必要に応じてスペースヒーターを設置) ・その他、塩雪害を想定した仕様(ブッシング間隔離の確保)を求めている事例あり 	<ul style="list-style-type: none"> ・JECの常規使用状態は以下のとおり規定 <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center;">JEC</p> <p>1. 常規使用状態</p> <p>(1) 冷却媒体温度</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>冷却媒体の種類</th> <th>最低℃</th> <th>最高℃</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>空気</td> <td>0</td> <td>40</td> </tr> <tr> <td>水</td> <td>5</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>油</td> <td>-5</td> <td>30</td> </tr> </tbody> </table> <p>(2) 日間平均空気温度 35℃以下 (3) 年間平均空気温度 20℃以下 (4) 周囲空気の相対湿度 最低15% 最大85% (5) 標高 1000m以下 (6) 保管中の温度 最低-25℃ 最大55℃ (7) 輸送中の温度 最低-25℃ 最大55℃</p> </div>	冷却媒体の種類	最低℃	最高℃	空気	0	40	水	5	30	油	-5	30
		冷却媒体の種類	最低℃	最高℃														
	空気	0	40															
水	5	30																
油	-5	30																
塩害地区適用時の筐体腐食防止を目的に、機器の耐塩仕様(筐体の溶融亜鉛メッキ化等)を要求	○	○	<ul style="list-style-type: none"> ・可能な限り使用期間を延伸すべく、機器の耐塩仕様化ニーズあり(タップレスの利点最大化) ・既存SVRと同様、「標準仕様(塗装のみ)+耐塩仕様」と「全数耐塩仕様」のコスト差について検討を行い、有利な方を選択する方向 															
電圧調整機能	SVRとの互換性		○	<ul style="list-style-type: none"> ・TVRを既設SVRの代替機器(SVRからTVRへの取替)とするならば、電圧調整機能(変圧器容量、電圧調整範囲等)や設置条件等の整合が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ・既存SVRの電圧調整範囲(タップ電圧、タップ数)は電力会社毎に仕様相違 													

1. 5. 1(1)①3)電圧制御機器メーカーへの聞き取り調査

◎配電系統用パワエレ機器の準拠規格

各メーカーが開発、または製品化している配電系統用パワエレ機器の基本仕様を選定するにあたり、準拠している規格について聞き取りを行った。結果は、表 5.1-12 に示す JEC 規格に準拠していることが分かった。

表 5.1-12 配電系統用パワエレ機器に適用する規格

関連規格	SVC		TVR	備考
	他励式	自励式		
JEC-2410 半導体電力変換装置(2010)	○	○	○	・変換装置全体に関する規格として適用
JEC-2440 自励半導体電力変換装置(2013)		○		・自励式変換装置に関する規格として適用
JEC-2200 変圧器(2014)	○	○	○	・変圧器部に適用

その理由としては以下と想定される。

- ・関連する国内規格(JIS 規格等)は勿論のこと、国際電気標準会議(IEC)が整定する国際規格(IEC 規格)と整合を図っている。
- ・国内有識者で構成された委員会・調査会での審議を経て、最新の技術動向に即した内容に適宜改訂されている。
- ・電力会社が規格化している配電機器(パワエレ機器含む)の準拠規格として広く適用されている。

◎メーカー型式試験項目

各メーカーは、JEC に基づく試験項目により配電系統用パワエレ機器の性能を評価している。メーカーが独自に実施している試験項目について聞き取りを行った内容を以下に示す。

【制御部の誤動作対策】

- ・一部のメーカーでは、自主的に制御部の誤動作対策の評価を実施している。
- ・試験は、電力用規格 B-402「デジタル形保護リレーおよび保護リレー装置」に基づき、耐ノイズ性の評価(電波照射 17MHz、430MHz、900MHz [各 5W・1m])やヒートサイクル試験(-20℃～+60℃)を実施し、信頼性を評価している。

【高速応答性の評価方法】

- ・急峻な動作特性を特徴とする自励式 SVC は、各メーカーによってその応答時間を評価している。
- ・しかし、定められた試験条件がないため、共通条件下での評価が望まれる。

- ・一例として、メーカーによる応答時間評価条件を示す。
条件A 50% or 80% or 90% の補償時間を計測
条件B 負荷が投入されてから指定する%値まで補償する時間を計測
(但し、過度現象のため 100%付近では誤差が大きくなる虞あり)

【並列運転性能】

- ・SVC の容量は、±300kVA 程度である場合が多く、容量不足の場合は並列運転を行う必要がある。
- ・主機と従機で無効電力制御量を均等分担する仕組みが一般的であり、聞き取り結果では 2～3 台の並列運転について確認が行われている状況。
- ・なお、現時点では、最大必要容量(最大並列台数)に関する電力会社ニーズは確認されなかった。

◎開発機器の設定値検討に対するシミュレーションの実施

配電系統用パワエレ機器(開発品)の整定値検討に対するシミュレーションの実施状況について、調査を行った結果は以下のとおり。

- ・配電系統用パワエレ機器を導入する系統インピーダンス(分布定数を含む)を電力会社から聞き取ったうえで、シミュレーションを実施(想定される系統切替のパターンについても電力会社から聞き取り)
- ・系統変更や負荷増減等があった場合に、電力会社の社員による整定変更を可能とする設定ツールを整備

なお、事前のシミュレーションは実施しているものの、各メーカー初号機導入時は、設置・運用することでわかる想定外の事象が発生したとのコメントあり。

1. 5. 1(1)①4)国内調査のまとめ

調査結果から、主な配電系統用パワエレ機器の開発・導入品は、他励式 SVC(主流はリアクトル可変型の TCR 方式)、自励式 SVC、TVR の 3 品種であることが分かった。また、一部の電力会社において積極的に配電系統用パワエレ機器の導入を進める一方、

- ・信頼性への不安感(SVR 等の既存機器との協調動作性能、過去の配電系統用パワエレ機器の不具合等)
- ・機器単体が高価でありコストメリットが不透明
- ・導入機器の定量評価が不明(どの程度効果を挙げているのかが分からない)

等を理由に、本格採用・導入を躊躇している現状を把握することができた。

配電系統用パワエレ機器の普及拡大に向けては、上記項目に起因する不安感を各種試験によって払拭するとともに、コスト低減に向けた機器開発を行っていることが重要である。

1. 5. 1(1)②国外調査

配電系統用パワエレ機器開発における国際競争力向上に資することを目的に、文献調査と現地調査を実施した。配電系統用パワエレ機器の将来的な国外展開を見据え、国外における配電システム関連プロジェクトや機器研究開発状況、市場動向(機器実用化の進展状況や系統課題の顕在化状況等)を中心に調査を実施した。

1. 5. 1(1)②1)国外文献調査

◎調査対象

調査は、欧米を中心とする電圧制御機器メーカー、電力会社(ユーティリティ)、研究所等について実施した。調査対象は表 5.1-13 のとおり。

表 5.1-13 文献調査対象とその概要

企業名	企業種別			備 考
	メーカ	電力会社	研究所等	
ABB (米国)	○			・SVC、STATCOM(MMC 含む)の送電レベルの製品は有するものの、配電系統用の製品情報なし
Eaton/Cooper Industries (米国)	○			・パワエレ機器に関する情報なし ・SVR(柱上、地上型)、キャパシタバンク(SC)の配電向け製品あり
GE Energy /Alstom (米国)	○			・SVC(地上型、HV/MV 共用)、SVR のラインナップあり
Gridco systems (米国)	○			・LV 用(In-line Power Regulator(≒TVR)、SVC)のラインナップあり
S&C Electric (米国)	○			・Pure Wave DSTATCOM(特別高圧用コンテナ型地上設置用)のラインナップあり
Schneider (フランス)	○			・配電自動化関連製品、大型トランスのラインナップあり ・Minera SGrid Transformer(AVR 機能付配電系統用変圧器)の製品あり
Siemens (ドイツ)	○			・配電系統用パワエレ機器に関する情報なし ・特高用 STATCOM の製品(SVC plus)あり

表 5.1-13 文献調査対象とその概要(続き)

企業名	企業種別			備 考
	メ-カ	電力会社	研究所等	
Varentec (米国)	○			・ENGO-V10(LV 用 10kVA の SVC)のソリューションあり
Duke Energy (米国)		○		・SGIG プロジェクト(米エネルギー省)に参画 ・その他配電自動化関連プロジェクトに多数参画しており電圧調整機器に関しても導入実績あり
Iberdrola (スペイン)		○		・欧州の主要プロジェクト(UPGRID、GRID4EU、DISCERN、GRID+STORAGE、iGREENGrid、PRIME 等)に参画
EPRI (米国)			○	・米国電力研究所(Electric Power Research Institute) ・FACTS 機器のコンセプトを提唱(1988 年)して以来、その研究開発を主導
DOE (米国)			○	・米国エネルギー省(United States Department of Energy) ・各種プロジェクトを主導
NREL (米国)			○	・米国再生可能エネルギー研究所(The National Renewable Energy Laboratory) ・再エネ導入拡大の観点から、電圧調整機器の研究開発に取り組み
IEC			○	・国際電気標準会議(International Electrotechnical Commission) ・2010 年に「IEC Smart Grid Standardization Roadmap」を発表(FACTS 機器がスマートグリッドで果たすべき役割等について記載あり)
市場調査 レポート			○	・国外調査会社の市場調査レポート(SVC、SiC モジュール)を調査

◎調査結果

<電圧制御機器メーカー>

- ・送電用や民生用については、パワエレ機器に関する市場展開が見受けられるが、配電系統用について情報は得られなかった。(SVR、AVR 機能付配電系統用変圧器や、低圧用 TVR・SVC 等については実運用に関する報告あり)
- ・調査結果の概要は表 5.1-14 のとおり。

表 5.1-14 国外文献調査結果【電圧制御機器メーカー】

調査先	内容
<p>ABB (米国)</p>	<p>○SVC、STATCOM(MMC 含む)の送電用および民生用の製品は有するものの、配電系統用の製品情報なし</p> <p>○480V～、100kVA～の民生用 STATCOM。IGBT 使用。2MVA のシステムで 1 コンテナ収容サイズ</p> <p>○不平衡補償機能あり</p> <p>○屋内設置を想定しており、屋外設置時は建屋もしくはコンテナへの収容が必要</p> <p>○送電用、民生用機器として、そのほかに FSC(Fixed Series Compensation)、サイリスタ制御直列コンデンサ(TCSC: Thyristor Controlled Series Compensation)、SFC(Static Frequency Converters)、SVC 等のラインナップあり</p> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>電源接続</p> <p>電圧 400～480V AC/3～、±10%、直接接続または標準変圧器を介した低圧もしくは高圧</p> <p>周波数 50 または 60 Hz</p> <p>性能</p> <p>効率 > 97% (定格出力時)</p> <p>過負荷機能 480V モジュールにて： 10分 120% 30分 150% 2秒 175% 2秒 200% (200%については予負荷 75%)</p> <p>MTTR < 30 分 (モジュール交換の場合)</p> <p>環境</p> <p>塵埃定格 IP21 (ご希望があればこれより高い IP 定格も可能です)</p> <p>ラック定格 IP20</p> <p>周囲温度 0～50℃、ただし 40℃超でデレレーティング</p> <p>汚染度等級 2</p> <p>冷却方式 強制換気</p> <p>高さ < 1000m で出力低下なし</p> <p>湿度 < 95%、ただし結露がないこと</p> <p>騒音 75～85dBA @ 2m</p> <p>塗体色 RAL 7035 (キャビネット)</p> <p>耐短絡電流定格 65kA</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>インタフェース、プログラマブル I/O</p> <p>ユーザインタフェース 8.4 インチのカラータッチスクリーン</p> <p>アナログ入力×2 電圧信号 -10～+10V, Rin > 200kΩ 電流信号 0 (4)～20mA, Rin = 100Ω 最大遅延 < 2ms 分解能 0.1% 精度 ±2%</p> <p>アナログ出力×2 電圧信号 -10～+10V 電流信号 0 (4)～20mA、負荷 < 500Ω 遅延 < 50ms 精度 ±2%</p> <p>デジタル入力×10 24V DC、内蔵または外付け電源、PNP および NPN 入力インピーダンス 2.5kΩ 最大遅延 < 50ms</p> <p>PTC 入力×1</p> <p>リレー出力×7 最大スイッチング 250V/1～、30V DC 電圧 1A 電流</p> <p>シリアル通信 RS485 Modbus プロトコル (RTU)</p> <p>SCADA Modbus TCP/IP/Ethernet、 インタフェース カラータッチスクリーン使用</p> <p>製品の適合性、規格</p> <p>IEEE 1031-2000 IEEE 519 品質保証システム ISO 9001 CE (申請中)</p> </div> </div> <p>PCS100 STATCOM 自励式無効電力補償装置 100kVAR～10MVAR</p> <p>技術カタログ</p> 
<p>図 自励式無効電力補償装置</p>	
<p>出典: ABB 社 HP</p>	

表 5.1-14 国外文献調査結果【電圧制御機器メーカー】(続き)

調査先	内容
<p>Eaton/Cooper Industries (米国)</p>	<p>○パワエレ応用機器の製品情報なし ○配電系統用 SVR(柱上設置、地上設置)、キャパシタバンク(SC)の製品あり</p> <p>【SVR】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・SVR は 6.6kV の場合、33～396kVA の容量 ・飛び越しタップ機能を有するタップチェンジャー(Quick-Drive tap-changer)を搭載し、比較的高速な制御が可能 <div data-bbox="526 627 1197 1142" data-label="Image"> </div> <p>図 単相 SVR(右図: Quick-Drive tap-changer)</p> <p>【キャパシタバンク】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・50～600kVA までの柱上設置可能(アームを使用) <p style="text-align: right;">出典: Eaton 社 HP</p>
<p>GE Energy /Alstom (米国)</p>	<p>○STATCOM(地上型、HV/MV 共用)、SVR のラインナップあり</p> <p>【STATCOM】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・IGBT を使用 ・応答: 1ms、スイッチング周波数: 4kHz <div data-bbox="446 1523 1340 1904" data-label="Image"> </div> <p>図 地上型 STATCOM</p> <p style="text-align: right;">出典: GE Energy 社 HP</p>

表 5.1-14 国外文献調査結果【電圧制御機器メーカー】(続き)

調査先	内容																																										
<p>GE Energy /Alstom (米国)</p>	<p>【SVR】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・単相 SVR、容量 38kVA～333kVA ・負荷時タップ切換装置については 20 年、200 万回動作を補償 <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <p style="text-align: center;">図 単相 SVR (右図: 柱上設置の場合[3 相分])</p> <p style="text-align: right;">出典: GE Energy 社 HP</p>																																										
<p>Gridco systems 社</p>	<p>○低圧用 (In-line Power Regulator (≒TVR)、SVC) のラインナップあり</p> <p>【IPR (In-Line Power Regulator)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・単相 50kVA 用 (100kVA、150kVA もあり)、自然空冷式 ・電圧調整と無効電力の注入により電力品質を向上 <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: flex-start;"> <div style="width: 45%;">  <p style="font-size: 2em; font-weight: bold; color: orange;">IPR-50</p> <p style="color: orange;">Low Voltage, Single-Phase, 60 Hz, 50 kVA Pole-mounted In-Line Power Regulator™</p> </div> <div style="width: 50%; border: 1px solid #ccc; padding: 5px;"> <p style="font-weight: bold; color: #0070C0;">IPR-50 SPECIFICATIONS</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>Phase</td><td>Single</td></tr> <tr><td>Frequency</td><td>60 Hz</td></tr> <tr><td>Rating (nominal)</td><td>208 A (50 kVA)</td></tr> <tr><td>Form</td><td>Pole-mounted</td></tr> <tr><td>Source Voltage</td><td>240 VAC nominal</td></tr> <tr><td>Source Voltage Range</td><td>0.55 – 1.25 p.u.</td></tr> <tr><td>Load Voltage</td><td>240 VAC nominal</td></tr> <tr><td>Load Voltage Regulation Range</td><td>±10% of nominal @ 208A, ±8% of nominal @ 250A; programmable set point or dead-band</td></tr> <tr><td>VAR Compensation Range</td><td>10% of rating, leading or lagging; programmable VAR or PF set point</td></tr> <tr><td>Harmonic Correction</td><td>3rd to 7th harmonic 3rd to 15th (measured)</td></tr> <tr><td>Harmonic Distortion</td><td>Voltage THD <3% Current TDD <5%</td></tr> <tr><td>Efficiency</td><td>≥ 99%</td></tr> <tr><td>Response Time</td><td>< 1 cycle</td></tr> <tr><td>Operating Temperature</td><td>-40° to 55° C (ambient)</td></tr> <tr><td>Cooling</td><td>Passive air</td></tr> <tr><td>Noise</td><td>< 35 dBA</td></tr> <tr><td>Enclosure</td><td>NEMA-4</td></tr> <tr><td>Communication Protocols (DGC)</td><td>Secure Web Services Secure DNP3.0</td></tr> <tr><td>Communication Modules (DGC)</td><td>3rd party wired or wireless</td></tr> <tr><td>Dimensions</td><td>22"H x 20"W x 25"D</td></tr> <tr><td>Weight</td><td>320 lbs.</td></tr> </table> </div> </div> <p style="text-align: center;">図 In-Line Power Regulator の外観と機器諸元</p> <p style="text-align: right;">出典: Gridco systems 社 HP</p>	Phase	Single	Frequency	60 Hz	Rating (nominal)	208 A (50 kVA)	Form	Pole-mounted	Source Voltage	240 VAC nominal	Source Voltage Range	0.55 – 1.25 p.u.	Load Voltage	240 VAC nominal	Load Voltage Regulation Range	±10% of nominal @ 208A, ±8% of nominal @ 250A; programmable set point or dead-band	VAR Compensation Range	10% of rating, leading or lagging; programmable VAR or PF set point	Harmonic Correction	3 rd to 7 th harmonic 3 rd to 15 th (measured)	Harmonic Distortion	Voltage THD <3% Current TDD <5%	Efficiency	≥ 99%	Response Time	< 1 cycle	Operating Temperature	-40° to 55° C (ambient)	Cooling	Passive air	Noise	< 35 dBA	Enclosure	NEMA-4	Communication Protocols (DGC)	Secure Web Services Secure DNP3.0	Communication Modules (DGC)	3 rd party wired or wireless	Dimensions	22"H x 20"W x 25"D	Weight	320 lbs.
Phase	Single																																										
Frequency	60 Hz																																										
Rating (nominal)	208 A (50 kVA)																																										
Form	Pole-mounted																																										
Source Voltage	240 VAC nominal																																										
Source Voltage Range	0.55 – 1.25 p.u.																																										
Load Voltage	240 VAC nominal																																										
Load Voltage Regulation Range	±10% of nominal @ 208A, ±8% of nominal @ 250A; programmable set point or dead-band																																										
VAR Compensation Range	10% of rating, leading or lagging; programmable VAR or PF set point																																										
Harmonic Correction	3 rd to 7 th harmonic 3 rd to 15 th (measured)																																										
Harmonic Distortion	Voltage THD <3% Current TDD <5%																																										
Efficiency	≥ 99%																																										
Response Time	< 1 cycle																																										
Operating Temperature	-40° to 55° C (ambient)																																										
Cooling	Passive air																																										
Noise	< 35 dBA																																										
Enclosure	NEMA-4																																										
Communication Protocols (DGC)	Secure Web Services Secure DNP3.0																																										
Communication Modules (DGC)	3 rd party wired or wireless																																										
Dimensions	22"H x 20"W x 25"D																																										
Weight	320 lbs.																																										

表 5.1-14 国外文献調査結果【電圧制御機器メーカー】(続き)

調査先	内容																																																																			
<p>GRIDCO 社</p>	<p>【PRT (Power Regulating Transformer)】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・IPR の単相 50kVA 一体型タイプ <p>【SVC】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・低圧用 SVC、単相 20kVA ・「CVR モード」と「無効電力補償モード」あり ・現場でコンデンサ容量の変更が可能 <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>PRT-50</p> <p>Single-Phase, 60 Hz, 50 kVA Pad-mounted Power Regulating Transformer™</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>SVC-20</p> <p>Low Voltage, Single-Phase, 50/60 Hz, 20 kVAR Pole-mounted Static VAR Compensator</p> </div> </div> <p> 図 Power Regulating Transformer 図 低圧用 SVC </p> <p style="text-align: right;">出典: GRIDCO 社 HP</p>																																																																			
<p>S&C エレック トリック</p>	<p>○Pure Wave DSTATCOM(コンテナ型地上設置用)のラインナップあり</p> <p>【DSTATCOM】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・IGBT を使用 ・応答: 2~4ms、スイッチング周波数: 4.86kHz ・コンテナ収容タイプであり、設置可能な箇所は限定的 <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;">  </div> <div style="width: 45%;"> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">Specifications</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>System Voltage</td> <td>480V to 35kV, 50 or 60Hz</td> </tr> <tr> <td>Continuous Output</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Short-Term Current Rating</td> <td>254% for 2 seconds, ramping to 100% at 4 seconds; or 254% for 3 seconds, stepping directly to 100%</td> </tr> <tr> <td>Reactive Current Response Time</td> <td>2 to 4 milliseconds</td> </tr> <tr> <td>Inverter</td> <td>IGBT, pulse-width modulated at 4860Hz</td> </tr> <tr> <td>Temperature Range</td> <td>-40° to +50° C</td> </tr> <tr> <td>Efficiency</td> <td>>98% typical</td> </tr> <tr> <td>Cooling</td> <td>Air/liquid air cooling</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="6">Dimensions and Weights of Pre packaged ISO Style Enclosures (Typical)</th> </tr> <tr> <th rowspan="2">System Rating, MVAR</th> <th rowspan="2">Number of Containers</th> <th colspan="3">Dimensions, Meters</th> <th rowspan="2">Weight, kg</th> </tr> <tr> <th>L</th> <th>W</th> <th>H</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5.0</td> <td>1</td> <td>12.2</td> <td>2.4</td> <td>2.9</td> <td>16,364</td> </tr> <tr> <td>7.5</td> <td>1</td> <td>13.7</td> <td>2.4</td> <td>2.9</td> <td>21,818</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">10.0</td> <td>Container 1: Load, 10 MVAR</td> <td>13.7</td> <td>2.4</td> <td>2.9</td> <td>21,818</td> </tr> <tr> <td>Container 2: Control</td> <td>6.1</td> <td>2.4</td> <td>2.9</td> <td>6,363</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">15.0</td> <td>Container 1: Load and controls, 7.5 MVAR</td> <td>13.7</td> <td>2.4</td> <td>2.9</td> <td>21,818</td> </tr> <tr> <td>Container 2: Auxiliary, 7.5 MVAR</td> <td>12.2</td> <td>2.4</td> <td>2.9</td> <td>16,364</td> </tr> </tbody> </table> </div> </div> <p style="text-align: center;">図 DSTATCOM の外観と機器諸元</p> <p style="text-align: right;">出典: S&CE 社 HP</p>	Specifications		System Voltage	480V to 35kV, 50 or 60Hz	Continuous Output		Short-Term Current Rating	254% for 2 seconds, ramping to 100% at 4 seconds; or 254% for 3 seconds, stepping directly to 100%	Reactive Current Response Time	2 to 4 milliseconds	Inverter	IGBT, pulse-width modulated at 4860Hz	Temperature Range	-40° to +50° C	Efficiency	>98% typical	Cooling	Air/liquid air cooling	Dimensions and Weights of Pre packaged ISO Style Enclosures (Typical)						System Rating, MVAR	Number of Containers	Dimensions, Meters			Weight, kg	L	W	H	5.0	1	12.2	2.4	2.9	16,364	7.5	1	13.7	2.4	2.9	21,818	10.0	Container 1: Load, 10 MVAR	13.7	2.4	2.9	21,818	Container 2: Control	6.1	2.4	2.9	6,363	15.0	Container 1: Load and controls, 7.5 MVAR	13.7	2.4	2.9	21,818	Container 2: Auxiliary, 7.5 MVAR	12.2	2.4	2.9	16,364
Specifications																																																																				
System Voltage	480V to 35kV, 50 or 60Hz																																																																			
Continuous Output																																																																				
Short-Term Current Rating	254% for 2 seconds, ramping to 100% at 4 seconds; or 254% for 3 seconds, stepping directly to 100%																																																																			
Reactive Current Response Time	2 to 4 milliseconds																																																																			
Inverter	IGBT, pulse-width modulated at 4860Hz																																																																			
Temperature Range	-40° to +50° C																																																																			
Efficiency	>98% typical																																																																			
Cooling	Air/liquid air cooling																																																																			
Dimensions and Weights of Pre packaged ISO Style Enclosures (Typical)																																																																				
System Rating, MVAR	Number of Containers	Dimensions, Meters			Weight, kg																																																															
		L	W	H																																																																
5.0	1	12.2	2.4	2.9	16,364																																																															
7.5	1	13.7	2.4	2.9	21,818																																																															
10.0	Container 1: Load, 10 MVAR	13.7	2.4	2.9	21,818																																																															
	Container 2: Control	6.1	2.4	2.9	6,363																																																															
15.0	Container 1: Load and controls, 7.5 MVAR	13.7	2.4	2.9	21,818																																																															
	Container 2: Auxiliary, 7.5 MVAR	12.2	2.4	2.9	16,364																																																															

表 5.1-14 国外文献調査結果【電圧制御機器メーカー】(続き)

調査先	内容
<p>schneider</p>	<p>○Minera SGrid Transformer (AVR 機能付配電系統用変圧器) の製品あり 【Minera SGrid Transformer】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・容量は 160kVA～1,000kVA をラインナップ ・一次側 36kV、二次側 380V～480V ・PR ポイントは、「油入トランス部分に駆動部なし」、「パワエレ部品使用なし」による長寿命化とメンテナンス容易性 <div data-bbox="470 627 1420 996" data-label="Diagram"> </div> <p>図 Minera SGrid Transformer (AVR 機能付配電系統用変圧器)</p> <p style="text-align: right;">出典: schneider 社 HP</p>
<p>Siemens</p>	<p>○特高用 STATCOM (SVC plus) の製品あり ○配電系統用パワエレ応用機器に関する情報なし 【SVC Plus】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・特高用 STATCOM ・IGBT 使用、MMC 技術を利用 ・同容量の従来型 SVC と比較して、50% の設置スペース削減を達成 <div data-bbox="470 1433 1420 1814" data-label="Diagram"> </div> <p>図 SVC Plus の構成</p> <p style="text-align: right;">出典: Siemens 社 HP</p>

表 5.1-14 国外文献調査結果【電圧制御機器メーカー】(続き)

調査先	内容
Varentec	<p>○低圧用 SVC(ENGO-V10)の製品情報あり</p> <p>【ENGO-V10】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・低圧用 10kVA の SVC ・低圧ネットワークに複数台設置し、ヘッドエンドシステムにて集中管理 ・容易に柱上設置ができる点が PR ポイント <div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: flex-start;"> <div style="width: 45%;">  <p>The diagram shows a central brown cabinet with several input/output ports on the left side, each labeled with a function: Voltage Control, Sensing, Fast Dynamic Response, Wireless Comms, and Data Management. To the right, a photograph shows the physical device mounted on a utility pole. A blue wireless signal icon is positioned above the device, indicating its communication capabilities.</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p>Electrical</p> <p>Nominal Voltage: 240/277V, 1 phase</p> <p>Injected VARs: 0-10kVAR leading, 1-phase</p> <p>Nominal Frequency: 60 Hz / 50 Hz</p> <p>Losses: Less than 0.35% at full 10 kVARs</p> <p>Mechanical</p> <p>Dimensions: 27 x 16 x 7 inches (h x w x d)</p> <p>Weight: 40 lbs</p> <p>Installation: Pole top (standard) Pedestal (optional)</p> <p>Transportation: Vibration testing per ISTA 1A, 1E and 2A</p> <p>Networking</p> <p>Communication: Cellular 1xRTT</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">図 ENGO-V10 の外観と機器諸元</p> <p style="text-align: right;">出典: Varentec 社 HP</p>

<電力会社(ユーティリティ)>

- ・欧州、米国とも、官主導のスマートグリッドプロジェクトを積極的に実施しており、大規模なインフラ整備や実証が展開されている。
- ・但し、電圧品質に関しては、ロス低減が主目的の無効電力制御等がメインであり、再エネ起因の急峻な電圧変動やフェランチ等の問題に関する取組みは見受けられない。
- ・調査結果の概要は表 5.1-15 のとおり。

表 5.1-15 国外文献調査結果【電力会社(ユーティリティ)】

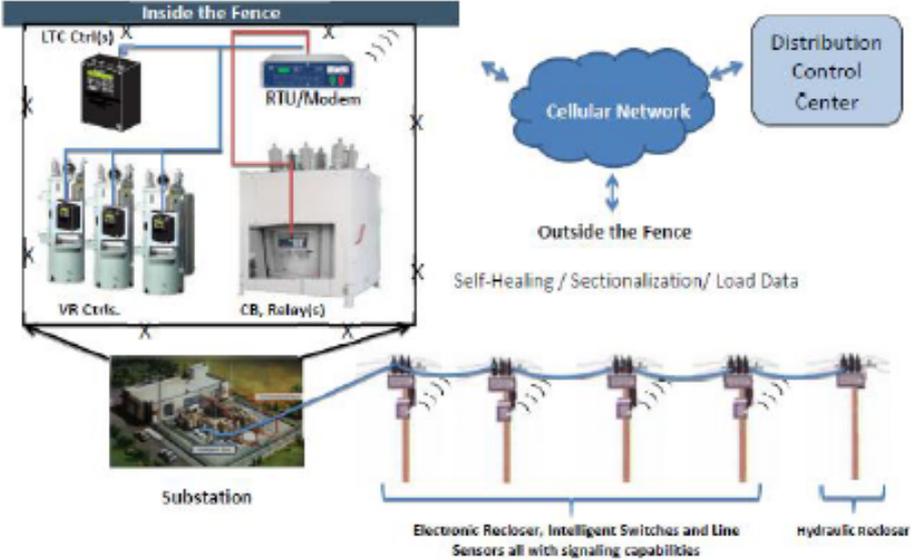
調査先	内容
Duke Energy (米国)	<p>○米国大手のユーティリティ</p> <p>○米国エネルギー省が実施する SGIG プロジェクトに参画</p> <p>○その他配電自動化関連プロジェクトに多数参画しており電圧調整機器についても導入実績あり</p> <p>【SGIG での同社取り組み内容】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・オハイオ州、カロライナ州にて実証 ・停電時間削減、電力品質の改善が目的 ・同社は、高度計量インフラ(AMI)、メーターデータ管理システム(MDMS)、配電自動化、統合電圧/ VAR 制御(IVVC)、新配電管理システム(DMS)、電気自動車などの充電ステーション、顧客ウェブポータル、および顧客価格実証を含む  <p style="text-align: right;">出典：米エネルギー省 HP</p>

表 5.1-15 国外文献調査結果【電力会社(ユーティリティ)】(続き)

調査先	内容
<p>Iberdrola (スペイン)</p>	<p>○スペイン大手のユーティリティ ○欧州の主要プロジェクト(UPGRID、GRID4EU、DISCERN、GRID+STORAGE、iGREENGrid、PRIME 等)に参画</p> <p>【UPGRIDにおける Iberdrola の取り組み】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・スペインのビルバオにて実施のデモ ・1,075 箇所の二次変電所(顧客数:約 19 万口)以下で、低圧 NW のスマート化を実証 ・スマートメーターから得られる情報を SISCO 社の PRIME というネットワークソリューションを用いて集中管理 ・スマートメーターからの電圧情報(5 分毎の情報)に基づき、配電系統用変圧器のタップを制御し電圧適正化を実施 ・顧客向けには、ウェブにてエネルギー消費マネージメントシステムを提供しており、低圧～顧客までの情報 NW を構築した種々の実証を展開 <div data-bbox="411 913 1364 1429" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Spanish demo</p> <ul style="list-style-type: none"> Monitoring and control of LV Network: <ul style="list-style-type: none"> - Tools to operate the LV network → LV Dispatching - Smart meter events analysis for grid operation Monitoring and control of LV communications network PRIME based Empowering Consumers by providing information Demo developed leveraging on <i>adetek</i> project Demo location: Bilbao, North of Spain <ul style="list-style-type: none"> • Urban area • 1.075 secondary substations (SSs) • More than 190.000 consumers </div> <div data-bbox="418 1467 1356 1848" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Remote control in the Secondary Substation – Original topology</p> <p>Remote control with SCADA ↔ Switch — Ethernet — RTU</p> <p>Remote control in the Secondary Substation – UPGRID test control over PRIME</p> <p>Remote control with SCADA ↔ Switch — Ethernet — RTU</p> <p>UPGRID portable cabinet</p> <p>IP over PRIME LV PLC</p> </div>

出典:UPGRID HP

<研究所等>

- ・北米では、EPRI(米国電力研究所)、NREL(米国再生可能エネルギー研究所)、DOE(米国エネルギー省)が連携してスマートグリッド関連の大規模プロジェクトを主導しており、DOEのスマートグリッド投資助成プロジェクト(SGIG: Smart Grid Investment Grant)では、約1万台の電圧調整機器の導入を実施し、国家的に電圧調整機器の必要性については認識があると見受けられる。
- ・IECが2010年にまとめたスマートグリッドに関するレポート(ロードマップ)においても、高圧直流送電とFACTS(Flexible AC Transmission System)はネットワークの制御性の改善に有用であると示されており、将来的な高圧直流送電の実用化までの期間において、FACTS機器のニーズは存在するとされている。
- ・市場調査会社のレポートでは、SVC市場で年平均成長率3~4%、SiCモジュール市場に至っては20%を超える成長率を予測しており、世界的には有望な市場であると見込まれている。
- ・調査結果の概要は表5.1-16のとおり。

表 5.1-16 国外文献調査結果【研究所等】

調査先	内容
EPRI	<p>○米国電力研究所(Electric Power Research Institute)</p> <p>○FACTS機器のコンセプトを提唱(1988年)して以来、その研究開発を主導【The EPRI Smart Grid Demonstration Initiative[※]における Hydro-Quebec 社の取り組み】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・1変電所、12フィーダ(平均巨長10km)。顧客数13,500件(ピーク需要110MW、450GWh/年) ・本フィールドにおいて、「障害箇所特定・自動復元」、「自動開閉器システム」、「EVインフラシステム」、「スマートメーターによる負荷制御」、「PVシステム」、「無線技術(WiMAX)」などの各種実証を実施 ・実証では、同社の高速電力線搬送通信技術、CAT-VAR(VAR制御のシステムパッケージ)も使用 <p>※ The EPRI Smart Grid Demonstration Initiative</p> <ul style="list-style-type: none"> ・DER統合に関するEPRIの大規模国際プロジェクト ・21社のユーティリティが参加 <p style="text-align: right;">出典:EPRI HP</p>

表 5.1-16 国外文献調査結果【研究所等】(続き)

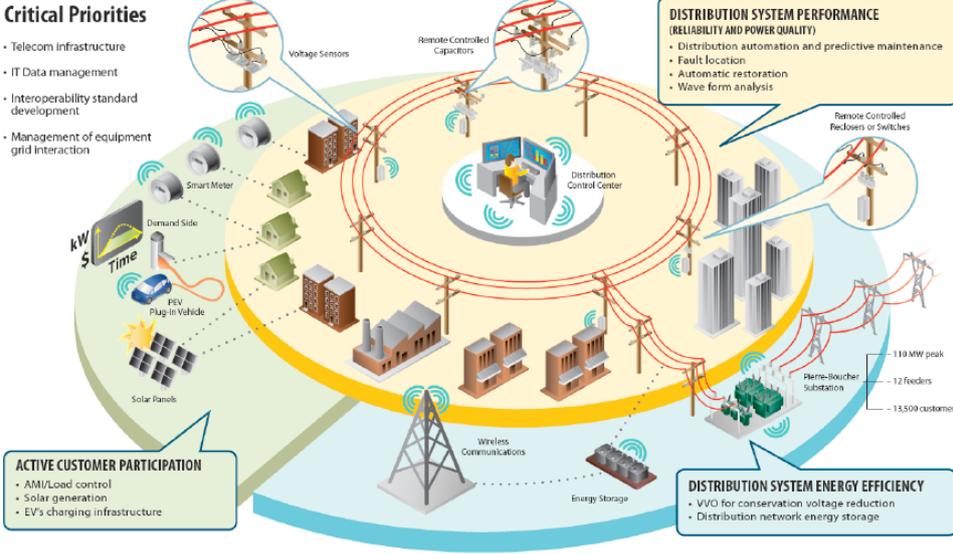
調査先	内容
<p>EPRI</p>	 <p>Critical Priorities</p> <ul style="list-style-type: none"> • Telecom infrastructure • IT Data management • Interoperability standard development • Management of equipment grid interaction <p>DISTRIBUTION SYSTEM PERFORMANCE (RELIABILITY AND POWER QUALITY)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Distribution automation and predictive maintenance • Fault location • Automatic restoration • Wave form analysis <p>ACTIVE CUSTOMER PARTICIPATION</p> <ul style="list-style-type: none"> • AMI/Load control • Solar generation • EV's charging infrastructure <p>DISTRIBUTION SYSTEM ENERGY EFFICIENCY</p> <ul style="list-style-type: none"> • VVO for conservation voltage reduction • Distribution network energy storage <p>出典: EPRI HP</p>
<p>DOE</p>	<p>○米国エネルギー省 (United States Department of Energy)</p> <p>○各種プロジェクトを主導</p> <p>【Power Electronics For Distributed Energy Systems And Transmission And Distribution Applications】(2005/12)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・パワーエレクトロニクス技術の配電システム適用に向けた課題に関するレポート ・米国での FACTS 機器の普及に向けた課題を取りまとめ(7.1 章) <ul style="list-style-type: none"> ✓コスト削減(半導体デバイスのコスト削減、デバイス数の削減、設置方法の標準化など) ✓グリッドの高信頼性に見合う FACTS 機器の高信頼化 ✓複数コンバータの高度制御システムの開発(複数機器の協調制御技術) ✓高調波・電磁干渉の低減 ✓フィールド試験用試供品導入までのリードタイム短縮 <p>出典: DOE HP</p>

表 5.1-16 国外文献調査結果【研究所等】(続き)

調査先	内容																		
DOE	<div data-bbox="571 300 1209 763" data-label="Diagram"> <table border="1" data-bbox="596 678 1193 763"> <thead> <tr> <th>System Needs</th> <th>Device Requirements</th> <th>Material Property Needs</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Large power capacity</td> <td>High breakdown voltage</td> <td>High bandgap energy</td> </tr> <tr> <td>High efficiency, reliability</td> <td>High current density</td> <td>High breakdown electric field</td> </tr> <tr> <td>Less cooling requirements</td> <td>High operational temperature</td> <td>High thermal conductivity</td> </tr> <tr> <td>Reduced passive components</td> <td>High switching frequency</td> <td>High saturated e-drift velocity</td> </tr> <tr> <td>Compact system</td> <td>Low power losses</td> <td>High radiation tolerance</td> </tr> </tbody> </table> </div> <p data-bbox="778 779 1002 801">Fig. 1.4. Power electronics systems.</p> <div data-bbox="448 815 1321 1256" data-label="Figure"> </div> <p data-bbox="448 1272 1337 1335">Fig. 5.6. Comparison of wide bandgap and SiC power electronics for power applications [4].</p> <p data-bbox="411 1397 1241 1429">【Smart Grid Investment Grant Program – Progress Report】(2012/7)</p> <ul data-bbox="443 1447 1369 1955" style="list-style-type: none"> ・「Smart Grid Investment Grant Program」は、全米の電力ネットワーク変革を加速するための投資プログラム ・2009年の「アメリカ復興・再投資法」に基づき総額34億ドルを政府が拠出し、DOEが管理 ・政府拠出の34億ドルに(最低でも)1:1で民間も拠出 ・99のプロジェクトが採択され、投資総額は78億ドル規模で実施 ・2014年までに実施し、2015年に分析・報告を計画(最終報告は2016年に公開済) ・SGIGプロジェクトは、送電システム(ETS)、配電システム(EDS)、高度計量インフラストラクチャ(AMI)、および顧客システム(CS)の4つの分野で構成 <p data-bbox="1225 1973 1369 1995">出典: DOE HP</p>	System Needs	Device Requirements	Material Property Needs	Large power capacity	High breakdown voltage	High bandgap energy	High efficiency, reliability	High current density	High breakdown electric field	Less cooling requirements	High operational temperature	High thermal conductivity	Reduced passive components	High switching frequency	High saturated e-drift velocity	Compact system	Low power losses	High radiation tolerance
System Needs	Device Requirements	Material Property Needs																	
Large power capacity	High breakdown voltage	High bandgap energy																	
High efficiency, reliability	High current density	High breakdown electric field																	
Less cooling requirements	High operational temperature	High thermal conductivity																	
Reduced passive components	High switching frequency	High saturated e-drift velocity																	
Compact system	Low power losses	High radiation tolerance																	

表 5.1-16 国外文献調査結果【研究所等】(続き)

調査先	内容												
DOE	<p> ✓ETS - 位相測定ユニット(PMU)、ラインモニター、および通信ネットワーク ✓EDS(※) - 開閉器、コンデンサ、変圧器のセンサ技術と自動制御 ✓AMI - スマートメーター、通信システム、およびメーターデータ管理システム ✓CS - in-home ディスプレイ、プログラマブル通信サーモスタット、Web ポータル、時間ベースのレートプログラム </p> <div data-bbox="445 636 1331 1093" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: #003366; color: white;"> <th style="padding: 5px;">Electric Transmission Systems</th> <th style="padding: 5px;">Electric Distribution Systems</th> <th style="padding: 5px;">Advanced Metering Infrastructure</th> <th style="padding: 5px;">Customer Systems</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center; padding: 5px;"></td> <td style="text-align: center; padding: 5px;"></td> <td style="text-align: center; padding: 5px;"></td> <td style="text-align: center; padding: 5px;"></td> </tr> <tr> <td style="padding: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> • Synchrophaser technologies • Communications infrastructure • Wide area monitoring and visualization • Line monitors </td> <td style="padding: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> • Automated switches • Equipment monitoring • Automated capacitors • Communications infrastructure • Distribution management systems </td> <td style="padding: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> • Smart meters • Communications infrastructure • Data management systems • Back-office integration </td> <td style="padding: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> • In-home displays • Programmable communicating thermostats • Home area networks • Web portals • Direct load controls • Smart appliances </td> </tr> </tbody> </table> </div> <p style="text-align: center; margin-top: 10px;">Figure 8. Examples of SGIG Technologies and Systems</p> <p>※ EDS(Electric Distribution Systems)</p> <p>配電システムの運用改善のための以下の技術とシステムの検証・導入を実施</p> <p>(1) 自動化された開閉器や再閉路器などの現場機器による停電管理</p> <p>(2) 自動コンデンサ、電圧制御機器、電圧センサなどのデバイスによる電圧/VAR 制御</p> <p>【Distribution Automation –Results From The Smart Grid Investment Grant Program–】(2016/9)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・SGIG プログラムに関する「EDS(Electric Distribution Systems)」部分をまとめた報告書 ・52 プログラムについて総合的に取りまとめ(各プログラムの詳細記述なし) ・同プログラムにて、全米の約 16 万回線の配電線のうち、6,500 回線(4%)に対して、82,000 台のスマートデジタルデバイスを導入 <p style="text-align: right; margin-top: 10px;">出典: DOE HP</p>	Electric Transmission Systems	Electric Distribution Systems	Advanced Metering Infrastructure	Customer Systems					<ul style="list-style-type: none"> • Synchrophaser technologies • Communications infrastructure • Wide area monitoring and visualization • Line monitors 	<ul style="list-style-type: none"> • Automated switches • Equipment monitoring • Automated capacitors • Communications infrastructure • Distribution management systems 	<ul style="list-style-type: none"> • Smart meters • Communications infrastructure • Data management systems • Back-office integration 	<ul style="list-style-type: none"> • In-home displays • Programmable communicating thermostats • Home area networks • Web portals • Direct load controls • Smart appliances
Electric Transmission Systems	Electric Distribution Systems	Advanced Metering Infrastructure	Customer Systems										
													
<ul style="list-style-type: none"> • Synchrophaser technologies • Communications infrastructure • Wide area monitoring and visualization • Line monitors 	<ul style="list-style-type: none"> • Automated switches • Equipment monitoring • Automated capacitors • Communications infrastructure • Distribution management systems 	<ul style="list-style-type: none"> • Smart meters • Communications infrastructure • Data management systems • Back-office integration 	<ul style="list-style-type: none"> • In-home displays • Programmable communicating thermostats • Home area networks • Web portals • Direct load controls • Smart appliances 										

表 5.1-16 国外文献調査結果【研究所等】(続き)

調査先	内容																
DOE	<div data-bbox="598 302 1173 698" data-label="Table"> <table border="1"> <thead> <tr> <th>DA Asset</th> <th>Total Installed</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Remote Fault Indicators</td> <td>13,423</td> </tr> <tr> <td>Smart Relays</td> <td>11,033</td> </tr> <tr> <td>Automated Feeder Switches</td> <td>9,107</td> </tr> <tr> <td>Automated Capacitors</td> <td>13,037</td> </tr> <tr> <td>Automated Voltage Regulators</td> <td>10,665</td> </tr> <tr> <td>Transformer Monitors</td> <td>20,263</td> </tr> <tr> <td>Automated Feeder Monitors</td> <td>4,447</td> </tr> </tbody> </table> </div> <p data-bbox="443 772 1348 952"> ・そのうち、電圧調整機器(変電所負荷時タップ切換装置を含む)は、21 のプログラムにて約 1 万台を設置 (Southern Company Services 社[3,339 台]、Duke Energy 社[2,320 台]、Florida Power & Light Company 社[1,806 台]など) </p> <p data-bbox="486 1012 1005 1048"> <具体例: Southern Company Service 社> </p> <ul data-bbox="526 1059 1364 1713" style="list-style-type: none"> ・プログラムの第一の目的は、配電系統用変電所の送出電圧を低くすること(CVR: Conservation Voltage Reduction)によるピーク時需要削減 ・この目的のために、1,869 台のコンデンサバンクと 3,339 台の電圧調整器を自動化 ・同社は、Georgia Power 社と Alabama Power 社のサービスエリアで同プログラムを実施 ・変電所送出電圧を下げることにより、配電線末端電圧が下がりすぎる場合は、制御装置にてコンデンサバンクをオンにして電圧を調整 ・オペレータは、監視制御システムを介して電圧調整器の電圧設定値を調整(コンデンサバンクは集中制御ではなく自端制御) ・将来的には、AMI のスマートメータデータを組み込み、需要家端の電圧を監視予定。また同社は、開発中の DMS に VVO 制御アルゴリズムを使用する予定 <div data-bbox="443 1729 1364 1899" data-label="Diagram"> <p>The diagram illustrates a power distribution system. On the left, a substation transformer is connected to a control package with comms and a voltage regulator. The line then passes through a capacitor bank and another control package, and continues through several utility poles to the right.</p> </div> <p data-bbox="1220 1921 1372 1953">出典: DOE HP</p>	DA Asset	Total Installed	Remote Fault Indicators	13,423	Smart Relays	11,033	Automated Feeder Switches	9,107	Automated Capacitors	13,037	Automated Voltage Regulators	10,665	Transformer Monitors	20,263	Automated Feeder Monitors	4,447
DA Asset	Total Installed																
Remote Fault Indicators	13,423																
Smart Relays	11,033																
Automated Feeder Switches	9,107																
Automated Capacitors	13,037																
Automated Voltage Regulators	10,665																
Transformer Monitors	20,263																
Automated Feeder Monitors	4,447																

表 5.1-16 国外文献調査結果【研究所等】(続き)

調査先	内 容
NREL	<p>○米国再生可能エネルギー研究所(The National Renewable Energy Laboratory)</p> <p>○再エネ導入拡大の観点から、電圧調整機器の研究開発に取り組み</p> <p>【Smart Grid Investment Grant Program】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・DOE(米エネルギー省)の Smart Grid Investment Grant Program についてハンドリング ・「スマートグリッドの有効性を検証し、コストとメリットを定量化、新しいスマートグリッドビジネスモデルを全米展開可能な規模で検証するための地域スマートグリッドデモンストレーション」と「バッテリー、フライホイール、負荷シフト、ランプ制御、周波数調整サービス、分散型アプリケーション、風力や太陽光などの再生可能資源のグリッド統合などのエネルギー貯蔵システムなどの技術開発」の2種類の32プロジェクトをバックアップ ・全プロジェクトを通じて、約9,000台の自動開閉器、約11,000台の自動キャパシタ、約11,000台の自動電圧調整機器を系統に導入。各ユーティリティの自己資産も含めて、配電自動化に関して約21億ドル、DER関連で約1,500万ドルのDER関連技術への投資を実現 <p style="text-align: right;">出典：NREL HP</p>
IEC	<p>○国際電気標準会議(International Electrotechnical Commission)</p> <p>○2010年に「IEC Smart Grid Standardization Roadmap」を発表</p> <p>○FACTS 機器がスマートグリッドで果たすべき役割について記載あり</p> <p>【IEC Smart Grid Standardization Roadmap(抜粋)】</p> <p><スマートグリッドの定義(3.2章)></p> <ul style="list-style-type: none"> ・スマート技術は電力システムの可観測性・制御性を改善 ・スマートグリッド技術は、電力ネットワークを静的インフラから、積極的に活用されるフレキシブルな「活かしたインフラ」に転換するために重要 ・スマートグリッドを電力システムの近代化コンセプトと定義 ・あらゆる発電源と需要家の間で、電力と情報技術を統合 ・HVDCとFACTSは、送電システムの制御性を向上させ、両者ともアクチュエータであり、電力の流れを制御。配電システムの制御性は、負荷制御と自動スイッチによって改善 ・パワーエレクトロニクスは、電力システム内の「アクチュエータ」の一つ。HVDCやFACTSのようなシステムは、電力フローの実制御を可能にし、短絡電力を増加させることなく送配電容量を増加させるのに役立つ

表 5.1-16 国外文献調査結果【研究所等】(続き)

調査先	内 容
IEC	<p><スマート伝送システム・伝送レベルアプリケーション(4.3.1 章)></p> <ul style="list-style-type: none"> ・典型的な伝送アプリケーションは、FACTS(フレキシブル交流送電システム)とHVDC(高電圧直流) ・FACTS の活用事例は、高速電圧制御、長亘長での送電容量の増加、メッシュ系統での潮流制御、電力発振現象の減衰等が挙げられ、より多くの電力伝送が可能 ・なお、従来の3相交流による伝送が技術的または経済的に限界に達した場合、HVDC が解決策となり得る <p><関連 IEC 規格の概要(6.2 章)></p> <ul style="list-style-type: none"> ・IEC61954(配電システム用パワーエレクトロニクス - SVC のサイリスタバルブテスト)
国外市場調査レポート	<p>OSVC および SiC デバイスに関する国際市場予測レポートを調査【SVC の市場性について】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・2 調査機関(Markets & Markets、Statistics)の報告では、至近で年平均成長率 3~4%程度 <ul style="list-style-type: none"> ⇒ 3.8%(2015-2020) 出典:Markets & Markets [Static VAR Compensator SVC Market - Global Forecast to 2020] ⇒ 4.3%(2015-2019)、6.0%(2015-2022) 出典:Statistics [Flexible AC Transmission Systems (FACTS) - Global Market Outlook (2016-2022)] <p>【SiC デバイスの市場性について】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・米国の調査会社 Hoovers の報告では、至近で年平均成長率 20%程度と高い成長性を予測 <ul style="list-style-type: none"> ⇒ 平均成長率 19.8%(2015-2020) 出典:Hoovers [Global Silicon Carbide Market Analysis 2017 - Forecast to 2023] ・さらには、フランスの調査会社 yole は、至近で 28%、2020-2022 年で 40%の伸びを予測 <ul style="list-style-type: none"> ⇒ 平均成長率 28%(2016-2020)、40%(2020-2022) 出典:yole [SiC technology's added value is today widely understood and accepted by the power electronics community]

1.5.1(1)②) 国外現地調査

◎調査対象

調査は、欧米を中心に開催されたカンファレンスの傍聴、および展示会視察を実施した。調査対象は表 5.1-17 のとおり。

表 5.1-17 現地調査対象

調査年月	調査対象 (開催国)	調査先等	備考
2016. 2	DistribuTECH 2015 (米国)	Eaton CO. PLC	・地上設置型 SVR の展示 ・独自の高速(10 秒以内-33 タップ間)タップチェンジャーを搭載
〃	〃	GRIDCO SYSTEMS	・低圧用 SVC、AVR 機能付 Tr の製品ラインナップあり
〃	〃	カンファレンス (2 件)	・Duke Energy、PG&G による講演
2016. 9	IEEE EPE 2016 (ドイツ)	カンファレンス (4 件)	・日本、ブラジル、ドイツの大学、フランスの研究機関による講演
2016.11	EUW 2016 (スペイン)	SIEMENS	・電圧調整機能付変圧器の展示
〃	〃	MOSTPOWER	・宅内用 AVR 機能タップの展示
2017. 4	IEEE ISGT 2017 (米国)	カンファレンス (2 件)	・スウェーデンの大学、および Duke Energy による講演
2017. 6	CIREN 2017 (英国)	カンファレンス (3 件)	・EPRI、スイスの DSO、ドイツのメーカーによる講演
〃	〃	a-eberle	・低圧用電圧制御装置の展示(ドイツのメーカー)

表 5.1-17 現地調査対象(続き)

調査年月	調査対象 (開催国)	調査先等	備考
2017.6	PowerTECH 2017 (英国)	カンファレンス (3件)	・国際プロジェクト2件、およびドイツの大学による講演
2017.9	IEEE EPE 2017 (ポーランド)	カンファレンス (4件)	・フランス、デンマーク、日本の大学と、アメリカのコンソーシアムによる講演
2017.10	IEEE IECON (中国)	カンファレンス (4件)	・チリ、インド、イギリスの大学と、中国の電力会社による講演
2017.12	IEEE PEDS (米国)	カンファレンス (3件)	・アメリカの大学と、アメリカ、中国の研究機関による講演
2018.6	Electrify Europe (オーストリア)	カンファレンス (4件)	・英国、イタリアのメーカ、英国の DSO、スペインの研究機関による講演

◎調査結果

<DistribuTECH 2015(米国):表 5.1-18 参照>

- ・展示会における電圧調整機器メーカーのブースにおいては、スマートグリッド等のシステム全般の PR が中心であり、電圧調整機器に対するメーカ側の開発・宣伝の意欲は薄い印象を受けた。これは、米国では DR をテーマにした技術開発が中心であり、日本のように分散型電源の大量連系による系統品質問題が未だ顕在化していないのが要因であると想定される。但し、同問題が今後米国においても注目されてくるのは間違いなく、日本が先行して配電系統用パワエレ機器の開発・改良を実施していけば、何れ米国市場の開拓(技術輸出)の礎になるものと思われる。
- ・カンファレンスにおいては、電圧制御機器開発に直結する報告件名は無かったものの、DR や PV 大量連系時の系統電圧安定化等をテーマとした研究開発や実証は積極的に行なわれており、機器開発のシーズ・ニーズも今後顕在化してくると思われる。

表 5.1-18 DistribuTECH 2015 調査概要

調査先	内容
<p>Eaton CO. PLC</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・地上設置型 SVR の展示あり(図 a) ・独自の高速(10 秒以内-33 タップ間)タップチェンジャーを搭載(図 b) ・柱上設置タイプは単相仕様であるため、三相使用時は H 柱に 3 台設置が必要(図 c) <p>Multi-phase pad-mounted step voltage regulator</p> <p>QUIK-DRIVE tap-changer</p> <p>Eaton's Cooper Power Systems leads the industry with advancements to the SVR tap-changer mechanism. The Quik-Drive tap-changer rotates through all 33 positions in less than 10 seconds – providing the quickest response for superior voltage regulation. Other manufacturer's regulators still use 80+ year-old spring-driven technology requiring 5 seconds per step.</p>   <p>図 a</p> <p>図 b</p> <p>Single-phase step voltage regulators</p>   <p>図 c</p> <p>出典: Eaton 社 HP</p>
<p>GRIDCO SYSTEMS</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・SVC-20(図 c)は低圧用 SVC であり、20kVar の容量。同社のグリッドマネジメントシステムと通信し、集中制御することで CVR(Conservation Voltage Reduction※)の一翼を担うもの ・サイズは 56×51×20cm とコンパクトであり、電柱への設置は比較的容易 ・PRT-50(図 e)は、AVR 付 Tr と同等の製品。地上設置型が展示されていたが、柱上設置型もラインナップ。SVC-20 と同様、CVR へのソリューション用の機器としてラインナップ   <p>SVC-20 provides flexible, modular reactive power control</p> <p>Field Upgradeable "VAR modules"</p>  <p>IPR-50 is designed for simple, flexible field installation</p> <p>図 d</p> <p>図 e</p> <p>出典: GRIDCO 社 HP</p>

表 5.1-18 DistribuTECH 2015 調査概要(続き)

調査先	内容
Duke Energy	<p>【Duke Energy Midwest IVVC: Deployment Lessons, Heartbeat and Dual Control Testing】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・Duke Energy(ノースカロライナ州に本社をおくユーティリティ)と GE Grid Solutions によるオハイオ州での VVO※ビジネスケースに関する報告 <small>※VVO: Volt Var Optimization の略。スマートグリッド技術等を用いた電圧・無効電圧最適化システムのこと</small> ・フィーダ 534 回線に 4,085 個のセンサを設置 ・電圧降下は 2%以内に収めた上で省エネにトライし、年間電力量で 1～1.58%の削減を達成(全体で 720 万ドル/年のコスト削減を達成) ・センサにて 10 秒毎に計測収集、15 分毎の制御を実施 ・今後、システムソフトウェアのバージョンアップを予定
PG&E	<p>【Advanced Volt/VAR Optimization Application with Smart Inverters on High DG Penetration Circuits】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・PG&E(カリフォルニア州のユーティリティ)の報告 ・PG&E の供給エリアでは、2025 年までに 60 万件、400MW の PV が連系してくる想定 ・電圧安定化と省エネを目的に、14 のフィーダで 3 年計画の電圧制御プロジェクトを実施しており、現在 2 年目 ・これまでに、夏季で 0.1%、秋季で 2.2%の電力量削減を達成(VVO の発動、非発動を切り替えて削減量を算定)

<IEEE EPE 2016(ドイツ):表 5.1-19 参照>

- ・配電システムに関する理論研究や、シミュレーションに関する研究の発表が多く、電圧調整機器開発に関連するテーマは少なかった。但し、STATCOM に関して実用化につながる研究も含まれており、欧州においても電圧制御機器による電圧安定化対策に着目されつつあることを確認した。個々の発表においては、分散型電源が研究の起点になっているものが多かったことから、本事業に関連性の高い研究の進展が期待される。

表 5.1-19 IEEE EPE 2016 調査概要

調査先	内容
<p>筑波大学 (日本)</p>	<p>【CAPACITOR SIZE REDUCTION OF MMC-BASED STATCOM FOR MEDIUM VOLTAGE POWER DISTRIBUTION NETWORK】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・磯部高範 准教授による発表。交流配電システム用の MMC ベースのトランスレス STATCOM のコンデンサ小型化に関する内容 ・瞬時電力の流入に伴うコンデンサの大容量化に対して、制御技術を用いてコンデンサが小型化できることを提案 ・ケーススタディにより、コンデンサ容量を静電容量で 24%まで低減、物理容量で 34%に低減可能とし、評価に当たっては、容量低減に伴う損失と、温度上昇についても検討しており実現性についてはある程度確度のある研究
<p>サンタマリア 連邦大学 (ブラジル)</p>	<p>【Smart Distribution Transformer for Secondary Voltage Regulation and Load Modeling】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・Josemar O. Quevedo 氏によるポスター発表 ・DG の増加する配電ネットワークにおける、負荷時タップ切換器及び通信システムを含むスマート配電変圧器の提案 ・自動または遠隔の電圧調整に加えて、システムは変圧器 1 次、2 次の負荷モデルを識別することが可能な特性を持ち、システムの運用、計画および収益管理の向上と電力品質の向上を可能にするとの報告 ・シミュレーションツールと実験結果によって、負荷パラメータの同定を実施 ・実験では、5kVA、7.69kV/220V のスマートトランスをシミュレーションしており、IGBT を利用 ・適切な通信を用いた運用が可能であれば、適切なグリッドマネージメントをユーザー(電力会社)へ提供可能であるとしているが、実用化に向けてはコスト、小型化、通信ネットワークの課題あり
<p>ハノーファー 大学 (ドイツ)</p>	<p>【DESIGN AND EVALUATION OF A TEST RIG FOR FULL-SIZE GRID FREQUENCY STABILIZER MODULES WITH ULTRACAPACITORS】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・JOHN Malte 氏による発表 ・商用電源事故時のグリッド周波数安定化のために、無効電力補償装置(SVC)をウルトラキャパシタと組み合わせた内容であり、1MW クラスの試験装置を用いて検証を実施 ・モジュールはカスケード接続 H ブリッジコンバータ用周波数安定化モジュールというもので、有効電力制御のために、DC / DC コンバータと UC バンクで拡張

表 5.1-19 IEEE EPE 2016 調査概要(続き)

調査先	内容
太陽エネルギー研究所 (フランス)	<p>【Multi-Agent System for Day-Ahead Energy Management of Microgrid】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・フランス国立太陽エネルギー研究所 (Institut National de l' Energie Solaire) の Elvira Amicarelli 氏による報告(ポスター) ・マイクログリッド分散制御に関して、JADE とよばれる環境で開発されたマルチエージェントシステムアーキテクチャを報告 ・また、動的な市場価格を考慮したマイクログリッドの前日のエネルギー管理のためのルールベースのアルゴリズムについても報告あり

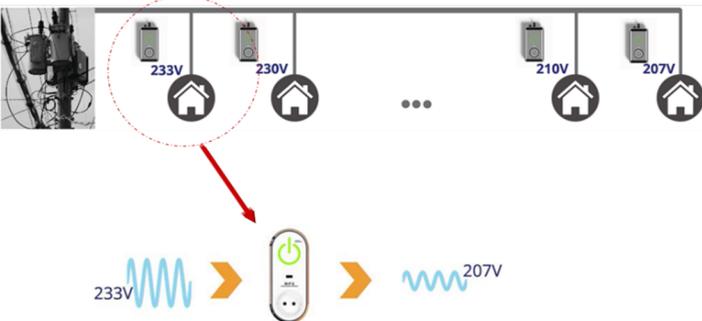
<EUW 2016(スペイン):表 5.1-20 参照>

・展示会およびカンファレンスにおいては、これまで調査した米国、欧州の展示会等と同様、ハードに関する展示や報告は少なく、ソフトによるグリッドマネージメントの PR が多かった。但し、少ないながらも電圧調整に関する機器の展示があったことから、いくらかの市場ニーズは存在することを確認した。先に調査を行った米国では、DR をテーマにした技術開発が中心であったが、同内容の講演はほとんど見受けられなかった。個々の講演においては、先の欧州調査と同様、分散型電源や、市場ルール変革に対応するソフト面でのソリューションが研究の起点となっているものが多かったことから、その先にある系統電圧問題の顕在化により、本事業に関連性の高い研究の進展も期待される。

表 5.1-20 EUW 2016 調査概要

調査先	内容
SIEMENS	<p>【FITformer REG】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・電圧調整機能付きの変圧器(容量は 630kVA まで、展示品は 400kVA) ・高圧側電圧は 36kV まで(展示品は 20kV) ・低圧側電圧は、基準電圧として 3 種類より選択可能であり、選択した電圧の±10%までの範囲で電圧調整を実施 ・モードは 3 種類(自端制御、リモート制御、マニュアル制御)であり、リモートは TCP/IP 準拠 ・タップ制御ではなく、パワエレ応用だと思われるが、詳細について聞き取りするも明言なし

表 5.1-20 EUW 2016 調査概要(続き)

調査先	内容
SIEMENS	
MOSTPOWER	<p data-bbox="435 633 595 667">【Power Bee】</p> <ul data-bbox="467 678 1366 999" style="list-style-type: none"> ・低圧 2 次側に接続する電圧調整器 ・KEPCO ブースの一角で PR していたが、KEPCO との資本関係はなし ・カタログや展示では節電について PR を展開しており、最大 26% の節電効果ありとの説明 ・会場にて容量を尋ねたが、試作機であり詳細仕様については明言なし ・但し、2017 年度には商品化して韓国にて販売予定(入力電圧 233 ~ 207V を 207V で出力、回路構成や節電効果の情報はなく、詳細は不明) <div data-bbox="552 1014 1254 1335">  </div> <p data-bbox="1090 1350 1366 1379">出典: MOSTPOWER 社 HP</p>

<IEEE ISGT 2017(米国):表 5.1-21 参照>

- ・これまでの調査同様、ハードに関する報告は少なく、スマートグリッドの系統安定化や解析技術に関するソフト面でのグリッドマネージメントの研究報告が多かった。但し、再エネの導入拡大に関する課題認識は日本と同様、重要視されてきている傾向を、多くの研究者が課題提起を行っていた。
- ・講演の多くが、測定やモデル解析による系統状況の的確な把握である点や、少ないながらも電圧調整に関する発表もあったことから、現状においても、いくらかの市場ニーズは存在することを確認した。さらには、その系統状況把握の先にある課題の顕在化が進めば、日本のような電圧問題への的確な対応を市場が求めてくる状況も考えられるため、電圧調整機器の有望な市場となることが期待される。

表 5.1-21 IEEE ISGT 2017 調査概要

調査先	内容
<p>チャルマース工科大 (スウェーデン)</p>	<p>【A Comparative Study on SVC and STATOCM in Dynamic Voltage Stability Improvement of a System with Different Load Characteristics】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・スウェーデンのチャルマース工科大、Baheej Alghamdi 氏による講演 ・負荷特性の異なるシステムの動的電圧安定性改善における SVC と STATCOM の比較検討を実施 ・システムの電圧安定性を改善し、障害からの電圧回復時間の短縮のための動的性能について、送電系統における SVC と STATCOM の比較を実施 ・動的解析では、スウェーデンの伝送システムを模擬し、誘導負荷モータを含む様々な負荷特性を考慮して実施 ・さらに、電圧不安定化の軽減に関する電圧調整機器の配置方法の提案もあり ・SVC と STATCOM を比較した結果、STATCOM の方が動的性能に優れており、SVC 比較で、障害後電圧回復時間で 60%減少、電圧回復時間で 26%の減少となることを提示 (STATCOM の IGBT の高速性や、過負荷運転機能(125%まで)が寄与していると結論づけ)
<p>Duke Energy</p>	<p>【Lessons Learned from Two Utility-Owned Island able Microgrid Implementations】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・Duke Energy 社の、Aleksandar Vukojevic 氏の講演 ・Duke Energy の子会社である Duke Energy's Emerging Technologies Office が実施した 2 つのアイランド型マイクログリッド実証(ノースカロライナ州シャーロットとマウントホリー)から得られる示唆についての報告 ・シャーロットのマイクログリッドの主要目的は重要負荷(消防署)の停電バックアップであったが、雷撃による停電検知と系統切離し、およびバックアップに成功する成果を上げているとのこと ・マウントホリーでの主要目的は、OpenFMB pub / sub プロトコル[※]による各デバイス間のシームレスな統合の実施であるが、同マイクログリッドでは、グリッド接続状態からアイランドモードへ 2 サイクル以内でシームレスに移行を行うことに成功 <p>※ SGIP(スマートグリッド相互接続性パネル)と NAESB(北米エネルギー標準会議)が標準採択した、再エネも含めた分散電源活用のための有力なフレームワーク</p>

<CIRED 2017(英国):表 5.1-22 参照>

- ・配電システムに特化したカンファレンスであることもあり、特に欧州で行われているスマートグリッドや再エネ導入拡大対応に係る実証プロジェクトの現状等についての報告が多く見受けられた。また、展示会においてはこれまでの調査と同様、ハードよりソフトの PR が多かったものの、2 件の OLTC 付配電システム用変圧器の展示もあり、ハードも合わせたソリューションが受け入れられる土壤があることを確認した。
- ・展示において現物を確認した OLTC 付配電システム用変圧器の実システム導入事例が示すとおり、電圧諸課題へのハード面でのソリューションが受容されている現状を確認した。さらにその先に、タップによる電圧制御だけでは電圧違反が発生するような状況(「DER の大量導入 + BESS or EV による需要減」などによる過度のフェランチ発生など)が生じてくるようであれば、配電システム用パワエレ機器の市場性も見えてくるのではないかと想定される。

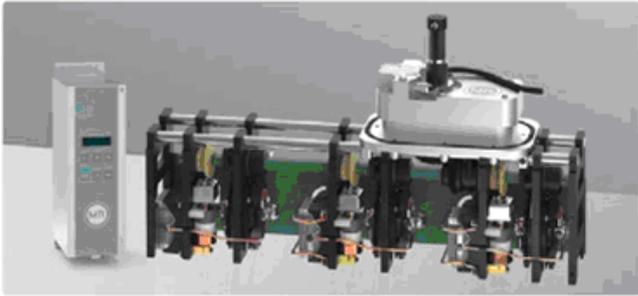
表 5.1-22 CIRED 2017 調査概要

調査先	内容
EPRI	<p>【INTEGRATING PHOTOVOLTAIC AND STORAGE SYSTEMS ON DISTRIBUTION FEEDERS】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・EPRI の Alison O'Connell 氏による講演 ・配電システムへの PV とストレージシステムの統合検討について、実在する配電フィーダへ、5MW の PV と 10MW の蓄電池を設置した場合についてシミュレーションを実施 ・ソーラーシフティング(日々のデマンドを平準化するための蓄電池利活用)、およびバッテリーによる停電補償について、制御の有無の別にて解析を行い、課題等について評価 ・ソーラーシフティングについては有効に機能しているものの、今回の条件においては、10MW の蓄電池から供給可能な無効電力では停電の補償に値する無効電力の供給は困難であることを報告
EWZ	<p>【The Smart Grid Real Lab of ewz: Findings from a large-scale demonstration project】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・スイスチューリッヒの DSO である EWZ 社の Vasileios Poullos 氏の講演 ・2015 年よりフィールドで実施した低圧グリッドでの検証(スマートグリッド・リアル・ラボ(SGRL))の内容に関する報告

表 5.1-22 CIRED 2017 調査概要(続き)

調査先	内容
EWZ 社	<ul style="list-style-type: none"> ・検証には、GridBox System というオペレーションシステムと、BESS、Low Voltage Regulation System(LVRS)という電圧制御装置を使用 ・GridBox システムは、スイスの DSO である BKW 社、スーパーコンピューティングシステム社(開発サービスプロバイダ)、Bacher Energie 社(コンサルティングとプロジェクトサポート)、スイス連邦エネルギー省と共同で3年間の研究プロジェクトで開発されたシステムであり、GPS 同期した端末の双方向通信(光ファイバ、PLC,3G+)にて制御を実施 ・Low Voltage Regulation System(LVRS)は、ドイツ a-eberle 社製の低圧用電圧制御装置であり、変圧器とサイリスタにて構成され、9 段階の電圧制御(相毎)が可能 ・GridBox System は、センサ誤差や通信不達時のための電圧推定システム(SE:state estimator)を用いており、電圧予測値(calculated with Newton Raphson:NR)との近似性を実証にて確認(本システムの利用により電圧逸脱の回避を達成したデータの提示あり)
Maschinenfabrik Reinhausen 社	<p>【BEYOND GRID INTEGRATION OF RENEWABLES - VOLTAGE REGULATION DISTRIBUTION TRANSFORMERS (VRDT) IN PUBLIC GRIDS, AT INDUSTRIAL SITES,AND AS PART OF GENERATION UNITS】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ドイツの機器メーカ Maschinenfabrik Reinhausen 社の Manuel Sojer 氏による、同社の電圧調整機能付配電系統用変圧器(voltage regulation distribution transformers (VRDT))に関する実フィールド適用状況(2012 年～)に関する報告 ・同社は、OLTC や電圧調整機能付配電系統用変圧器の製造や、系統運用に関するシステムの開発を行うとともに、製品の現地での保守管理も実施しており、今回紹介されている VRDT は、同社の特高系統用製品技術の配電適用版というところ ・同技術自体は、OLTC の配電適用というシンプルなものであるが、報告によると、経済性・重量・寸法を通常の配電系統用変圧器と遜色のないレベルに到達させたことがポイント(現在までに 1,500 台程度を設置) ・経済性の根拠は、電圧調整機能の付加により変圧器のカバーできるエリアの拡大を提示

表 5.1-22 CIRED 2017 調査概要(続き)

調査先	内容
Maschinenfabrik Reinhausen 社	<ul style="list-style-type: none"> ・OLTC 付配電系統用変圧器を用いたソリューションに関する報告は他にも数件(No.0832、No.0881、No.0889)あり、日本と比べて一台の配電系統用変圧器が賄う需要家数・需要面積の大きい欧州においては、同様の製品群に対する関心・ニーズが比較的高いという印象
	<ul style="list-style-type: none"> ・展示会にて、VRDT(電圧調整機能付配電系統用変圧器(voltage regulation distribution transformers))に搭載されているタップチェンジャーの紹介があり、動作音も小さく機構もコンパクトに設計されていることを確認 <p data-bbox="598 674 1129 730">THE COMPACT CLASS FOR DISTRIBUTION TRANSFORMERS. Superior technology. Compelling economics.</p>  <p data-bbox="598 1070 815 1099">PRODUCT DESCRIPTION</p>

<PowerTECH 2017(英国):表 5.1-23 参照>

- ・インバータ負荷が支配的になってくる将来系統に対して、負荷が 100%インバータ化した系統状況について検討する国際プロジェクトについて講演あり。パワエレ機器の普及に伴う系統の慣性力不足と、周波数安定度の相関にポイントをおいた研究であり、今後日本でも顕在化してくる事象への取り組みであった。

表 5.1-23 PowerTECH 2017 調査概要

調査先	内容
“Horizon 2020”プロジェクト	<p data-bbox="411 1592 1241 1626">【MIGRATE - Massive InteGRation of power Electronic Devices】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・Horizon2020 内のプロジェクト“MIGRATE”に関するスペシャルセッション ・インバータ負荷が支配的になってくる将来系統に対して、100%インバータ負荷までの系統状況を想定し、課題の抽出、解決策の提案等を検討している欧州 13 か国参加の国際プロジェクト

表 5.1-23 PowerTECH 2017 調査概要(続き)

調査先	内 容
<p>“Horizon 2020”プロジェクト</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・2016年～2019年までの4か年予定のプロジェクトであり、今回は、主要作業部会 WP1～WP5 からそれぞれのミッションについて概要の報告 ・MIGRATE においては、系統安定性の指標のうち、特に周波数に注目しており、パワエレ機器の普及に伴う系統の慣性力不足と、周波数安定度の相関にポイントをおいて研究を実施していくとの内容
<p>“Nobel Grid”プロジェクト</p>	<p>【NOBEL GRID & WISEGRID projects - Clean energy for All 】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・H2020 内の“Nobel Grid”プロジェクトに関する集中報告のスペシャルセッション ・同 PJ は、DSO～顧客までのグリッド全般に係る実証であり、2015年より42か月間の予定で実施中 ・主な目標を3つ掲げており、「安全で安定したスマートグリッドを提供するための DSO 向けソリューションツールの開発」、「プロシューマー(生産消費者)、アグリゲーター、ESCO などのアクターを含むすべての配電ネットワーク関係者のための新たなサービスの開発」、「スマートグリッドのすべてのアクターに対応する低コストスマートメーターの開発」を用いる予定 ・さらに、それらの手法を、5か国(スペイン、ベルギー、イギリス、イタリア、ギリシャ)のユーティリティーのデモサイトにて実証を行う予定 ・セッションにおいては、5名のスピーカーから PJ の概要や開発するスマートメーターのコンセプト、実証するシステムの説明あり
<p>Kiel University (ドイツ)</p>	<p>【Voltage Control By Means Of Smart Transformer In Medium Voltage Feeder With Distribution Generation】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ドイツ Kiel University の Xiang Gao 氏による、DG を有する配電系統におけるスマートトランスを用いた電圧制御に関する研究報告 ・提案のスマートトランスはパワエレ技術による構成であり、3段(AC/DC、DC/DC、DC/AC)のコンバータからなるもの ・SVC と比較して、MV～LV 間の電氣的分離による MV からの外乱遮断が可能であることをメリットとして提示 ・シミュレーション解析においては、英国の代表的なフィーダ形態を模擬した上で、負荷の大小、DG 出力の大小を組み合わせた4ケースの電圧および無効電力の評価を実施している。 ・静的な特性については良好な結果が示されており一定の評価に値すると思慮

<IEEE EPE 2017(ポーランド):表 5.1-24 参照>

・前回と比較して高耐圧(10kVA 以上)SiC モジュールの実用化に向けた研究の報告が多くなった印象あり。学術研究が大半であるものの、シミュレーションだけではなく、試作品の性能評価(モジュールだけでなく、パッケージの最適設計の検討等も含む)を行なっている内容もあり、実用化に向けた動きが確認できた。

表 5.1-24 IEEE EPE 2017 調査概要

調査先	内容
グルノーブル大学 (フランス)	<p>【Higher switching speed of power devices in series connection achieved by modifying the gate driver architecture】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・フランス、グルノーブル大学の Van-Sang NGUYEN 氏による講演 ・BPI France と OSEO のプロジェクト「#MEGaN」による研究 ・直列接続されたパワーデバイスのスイッチング速度の高速化に関する手法の研究 ・カスケード接続されたゲートドライバの電源構造の改良により、コモンモードにおけるスイッチング速度等の改善を実験的に確認
オールボー大学 (デンマーク)	<p>【Reduction of parasitic capacitance in 10 kV SiC MOSFET power modules using 3D FEM】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・デンマーク、オールボー大学の Nicklas Christensen 氏による講演 ・デンマークの IEPE および APETT プロジェクトと、MV プラットフォーム・プロジェクトの支援に基づく研究 ・10kV 級 SiC モジュールについて、高速スイッチング時のモジュール-ヒートシンク間の容量結合低減による電磁干渉の低減に関して、3D シミュレーションと実験により改善を実施 ・DBC(Direct Bonded Copper)の寸法を小さくし、トラック幅を狭くすることで、出力結合容量の合計を 167pF から 85pF に減少 ・熱抵抗の若干の増が許容できる場合については、セラミックの厚さを増加させることにより、85pF から 57pF へのさらなる低減も可能
大阪工業大学	<p>【Study on Characteristics of Hybrid Switch using Si IGBT and SiC MOSFET depending on External Parameters】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・日本、大阪工業大学の上野聡氏(大森研究室)による講演 ・Si IGBT と SiC MOSFET を用いたハイブリッドスイッチの外部パラメータ依存特性の検討

表 5.1-24 IEEE EPE 2017 調査概要(続き)

調査先	内容
大阪工業 大学	<ul style="list-style-type: none"> ・ハイブリッドスイッチの損失を低減し、周波数と電流の動作範囲を拡大することを目的に、特性解析のための各種パラメータの依存性を測定 ・Si IGBT に寄生インダクタンスや逆並列ダイオードに影響を与えるゲートオプションに注目し、転流を用いた新しいゲート信号オプションを提案 ・ゲートシグナルのパターン、ハイブリッドスイッチの各デバイス間の配線長と電流プローブの挿入位置等を試験的に調査し、全体のロスミニを検討
バージニア 工科大 (米国)	<p>【Design and Development of a High-Density, High-Speed 10 kV SiC MOSFET Module】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・アメリカ、バージニア工科大内コンソーシアム Center for Power Electronics Systems の Christina DiMarino 氏による講演 ・高密度、高速 10kV SiC MOSFET モジュールの設計と開発に関する研究 ・高速スイッチングパワー半導体の高密度実装には、通常、低寄生インダクタンス、高熱抽出、および高い熱機械的信頼性が必要であり、10kV SiC MOSFET などの高電圧パワー半導体の高密度実装にはさらに低電界が必要であるため、電磁気、熱および機械分析に加えて、電場の評価も実施 ・10kV、54A ハーフブリッジモジュールを試作し、ゲート及びパワーループのインダクタンスは 9nH、電力密度は 7.0W/mm³ を実現 ・これは、逆並列ダイオードをなくし、基板設計とダイと端子の配置を最適化することによって達成(モジュール内の電界も最適化) ・2つの DBA (direct-bonded aluminum) を積み重ね、中間金属層の印加電圧を半分にするにより、PDIV (PD inception voltage) を 63% 増加

<IEEE IECON(中国):表 5.1-25 参照>

- ・テーマが産業応用機器について多岐にわたっていることもあり、本事業に直結する内容は少なかった(スマートグリッドやマイクログリッドに関するセッションはあるものの、技術開発による課題解決ではなく、予測や解析に関するものが大半)。
- ・但し、中国の配電系統(特に農山村部)においても再エネに起因する電圧上昇問題が発生し、その対応に苦慮している現状が中国の大学やメーカーから報告されており、同国がパワーエレクトロニクス用電圧調整機器の市場となる可能性を確認した。

表 5.1-25 IEEE IECON 調査概要

調査先	内 容
<p>コンセプション大学 (チリ)</p>	<p>【A Reactive Power Compensation Method for a Smart Grid Connected Inverter Using a Residential PV System】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・Claudio Valenzuela 氏(コンセプション大学:チリ)による講演 ・住宅用 PV システムを用いたスマートグリッド接続インバータの無効電力補償方法に関する研究 ・系統電圧問題に対し、コンデンサバンクの代用として PV 用インバータを無効電力補償装置として活用 ・6.2kW の PV システムを例に、数値計算を実施し、無効電力電流(Isq)に対する有効電力量を試算 ・スイッチング損失と DC リンクに関連する損失により、有効電力出力は 0.013p.u.分減少してしまうことを示唆
<p>インド工科大学 (インド)</p>	<p>【Voltage Quality Improvement in Smart Transformer Integrated Distribution Grid】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・Hrishikesan VM 氏(インド工科大学:インド)による講演 ・スマートトランスの配電ネットワークへの統合による電圧品質改善に関する研究発表(ドイツのキール大学との共同研究) ・従来型トランスをスマートトランスに置き換え、無効電力注入を行うことにより、電圧の調整と高調波に関する品質改善方策を検討(解析には、PSCAD と MATLAB を使用) ・3 回線のフィーダ構成のうち、1 回線にスマートトランスを入れた構成にてシミュレーションを行い、それぞれ、「MV 側コンバータ」、「DC-DC コンバータ」、「LV 側コンバータ」にて制御を行なったケースで検証
<p>The State Grid Shanghai Electric Power Company (中国)</p>	<p>【Using Electric Springs to Address Over-voltage Issue of Distribution Networks in Rural Area in China】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・Xiao Luo 氏(The State Grid Shanghai Electric Power Company:中国)による講演 ・農山村部の系統電圧安定化に対して電気バネ(ES: Electric Spring)を制御対象としてシミュレーションにより検証を実施 ・電気バネは、2012 年に香港大学の研究グループが提唱した方式であり、制御可能な負荷端(電気温水器など)に分散的に接続することで系統全体の無効電力を制御して系統電圧を安定化 ・発表者らは、STATCOM より少ない無効電力容量にて同等の効果を発揮できると過去に報告※ <p>※ X. Luo, Z. Akhtar, C. K. Lee, B. Chaudhuri, S. C. Tan, and S. Y. Hui, "Distributed voltage control with electric springs: compare with STATCOM," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 1, pp. 209-219 Jan. 2015</p>

<IEEE PEDS(米国):表 5.1-26 参照>

- ・パワエレに関する学会であることから、高耐圧(10kVA 以上)SiC モジュールの実用化に向けた研究内容を調査することができた。系統システム技術に関する研究についてもある程度報告があり、学術研究が大半であるものの、シミュレーションだけではなく、電圧制御手法の実グリッド検証に関する報告について確認できた。
- ・その他、モジュールの効率的な制御手法に関する講演も行われた。

表 5.1-26 IEEE PEDS 調査概要

調査先	内容
Chinese Academy of Sciences (中国)	<p>【A Novel Unbalance loads compensation method based on ultra-capacitor】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・Zhang Zhihao 氏 (Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences) による講演 ・系統の不均衡補償について、STATCOM とウルトラキャパシタを組み合わせた新たな不均衡補償手法についてシミュレーションを実施 ・高調波の発生に配慮しつつ、STATCOM で賄えない容量について、キャパシタの利用で大幅に補償容量を確保可能であることを示唆
ハワイ大学 (米国)	<p>【Distributed Voltage Control Method Using Volt-Var Control Curve of Photovoltaic inverter for a Smart Power Grid System】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・Abdul Motin Howlader 氏 (University of Hawaii) による講演 ・ハワイのマウイ島で行った、スマートインバータを用いた配電電圧制御実証(マウイ アドバンスド ソーラー イニシアチブ プロジェクト)に関する報告 ・実証には、4.5kW,6.0kW のスマートインバータを使用し、無効電力の吸収、生成を行ない系統電圧の制御に成功
山口大学	<p>【New Hybrid Static Var Compensator With Series Active Filter】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・Ayumu Tokiwa 氏 (山口大学、中国電機製造) による講演 ・新たなアクティブフィルタ(AF)を備えた SVC の提案 ・デジタルシミュレーションにて、アクティブフィルタの容量を従来品から 2.7% 抑制できるとの検討結果 ・直列 AF は、Δ接続の TCR と Δ接続の PLC (phase-leading capacitors) で構成され、直列 AF は巻数比 1:2 のトランスを介して三相 PLC に直列に接続

< Electrify Europe (オーストリア) : 表 5.1-27 参照 >

- ・昨年度までは Power-Gen Europe (発電プラント関係) として開催されていたため、展示に関してはその流れから発電関連が主であったが、今後、再エネ関連やストレージ関連の展示が増えていくものと思われる。
- ・カンファレンスでは、至近の欧州動向に関する情報の収集を行った。系統安定化に関する取り組みについては再エネ導入の進む我が国においても避けられない課題だと認識しており、今後も欧州の研究開発動向については確認していく必要あり。
- ・展示会については、大規模発電プラント関連の製品が主であり、パワエレ機器や、系統関係の機器およびソリューション等の展示は見受けられなかった。

表 5.1-27 Electrify Europe 調査概要

調査先	内容
Reactive Technologies 社 (英国)	<p>【Enabling the Transition to a Greener Energy Mix Through Inertia Measurement】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・Reactive Technologies 社(エネルギー管理の高度化を提唱する通信ベンダー)による報告 ・慣性力の測定に基づくエネミックスの可能性に関するプレゼンテーション ・再エネが系統に大量導入される中で、大規模発電所のもつ慣性力が相対的に減少してきた場合に、いかに慣性力を見積もるかを考察 ・大規模発電所と需要家側の慣性量の総和から周波数変動を計算する手法では、連続的な解析ができないため、同社と National Grid UK にて系統の慣性力測定プロジェクト「SIM (System Inertia Measurement) project」を実施し、需給双方のリアルタイムの監視システムを用いた慣性力の連続的な監視システムを実証
ABB S.A. 社 (イタリア)	<p>【How Utilities Enable Savings by Investing in the Digital Intelligent Grid Towards a self-healing Distribution Network】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ABB のイタリア法人、ABB S.A. 社による報告 ・セルフヒーリング型配電網の投資抑制手法に関する講演 ・再エネが大量に導入される系統に対して、品質向上のための自動化を進める上での投資抑制に関して考察を実施 ・欧州諸国における近年の平均停電時間と平均停電回数の統計データから、再エネ導入による系統の不安定化と複雑化が進んでいる中でも、両者ともに減少していることを示唆(両指標に基づく系統品質は向上) ・ABB では、多周波中性アドミタンス測定 (multi-frequency neutral admittance measurement: MFA) に基づいた障害診断システムに関するソリューションを提供しており、それらはさらなる平均停電時間、平均停電回数の指標を向上(顧客満足度の向上)させることで、投資に見合う効果を期待できると提言

表 5.1-27 Electrify Europe 調査概要(続き)

調査先	内容
UK Power Networks 社 (英国)	<p>【Reducing Low Voltage Network Losses for the Age of Distributed Generation】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ロンドンの DSO である UK Power Networks 社による報告 ・分散型電源を含む低圧ネットワークの損失低減に関する内容 ・ロンドンにおいて、低圧地中ネットワークに関する調査を実施し、ケーブルのロスや、記録されない消費ロス(盗電)や街路灯のロスに至るまで測定・見積もりを行ない、低炭素化社会に対してそれが無視できない量であることを指摘
Tecnalia Research and Innovation Foundation (スペイン)	<p>【Design and Simulation of Novel Demand Response Management Systems under Enhanced TSO-DSO Interaction】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・スペインの研究機関である Tecnalia Research and Innovation Foundation 社と、同国の DSO である Endesa 社による報告 ・DSO、TSO 相互連携の下での DR マネージメントシステムの設計とシミュレーションに関するパイロットプロジェクトに関する内容 ・スペインとデンマークにおいて、The SmartNet Project の中で、TSO、DSO 間の情報交換管理のためのインターフェース最適化に関して実証を実施 ・実証の内容としては、DSO からの TSO への付随サービス(電圧調整、周波数調整など)を提供するメカニズムと、それに必要な情報交換の検証や、DSO が TSO への付随サービスを提供するために需要家と DG アグリゲーターによって提供される柔軟性をどのように統合できるかを検討 ・携帯電話用無線基地局のデマンドの柔軟的利用等についても実証

1. 5. 1(1)③) 国外調査のまとめ

調査結果から、再エネ導入率の上昇に伴う急峻な電圧変動が顕在化するまでは、欧米における配電系統用パワエレ機器の市場ニーズは高まらないものと想定される。但し、徐々にではあるが問題点が顕在化しつつあり、電圧品質に関する産学の意識も変わりつつある傾向が現地調査で確認できた。DOE の報告にもあるとおり、パワエレ機器本体のコスト低減や、電力会社等が求める信頼性が達成できるのであれば、その実用化時期は早まる可能性があるため、国内での普及によるコスト低減、並びに実用化による信頼性向上策の検討・実施が国外展開に向けて重要であると言える。

1. 5. 1(2)国内外における調査のまとめ

1. 5. 1(2)①機器の仕様・性能に関する評価項目と確認方法

再生可能エネルギー大量導入による系統電圧管理の複雑化等を背景に、パワエレ応用電圧制御機器については、各メーカーが開発・製品化を行っており、積極的に導入を進める電力会社がある一方、電力会社へのヒアリングの結果から、

- ・信頼性への不安感(過去のパワエレ機器不具合が原因)
- ・機器単体が高価でありコストメリットが不透明
- ・既存機器との協調を含めた運用方法確立が途上
- ・導入機器の定量評価が不明(どの程度効果を挙げているのかが分からない)

等を理由に、一部の電力会社において本格採用・導入を躊躇している現状を把握することができた。

本研究開発においては、パワエレ機器信頼性の不安感を払拭すべく、信頼性確認を目的とした試験項目や、電力会社が求める要求仕様を抽出した。更に、多様な条件下でのパワエレ機器動作特性を確認し、今後、電力会社がパワエレ機器を導入する際の判断材料や、型式試験等を規定する際の示唆となり得る内容を提示した。

また、パワエレ機器導入のネックは本体価格であるとの電力会社意見も多かったことから、メーカーは機器への不安感の払拭を進めることと合わせて、コストの優位性を示すことが重要である。既存機器(SVR等)とのインシヤルコストの差を縮める開発・改良を進めるとともに、保守性向上等による「ランニングコストの低減」や、他の系統電圧管理手法との比較に基づく「費用対効果の優位性」等を定量的に評価できるか否かが、国内だけでなく国外展開に向けた重要なポイントになると想定される。

以下に、国内メーカー、および電力会社への聞き取り、並びに文献調査等を基に、今後の配電系統用パワエレ機器に必要な試験項目と要求仕様を調査した結果をまとめる。

1. 5. 1(2)①1)JEC など規格・基準による試験内容

<適用規格>

メーカ、および電力会社への聞き取り結果を踏まえ、以下の理由から、配電系統用パワエレ機器の準拠規格として、表 5.1-28 に示す JEC 規格を提案する。

- ・関連する国内規格(JIS 規格等)は勿論のこと、国際電気標準会議(IEC:International Electrotechnical Commission)が整定する国際規格(IEC 規格)と整合を図っている。
- ・国内有識者で構成された委員会・調査会での審議を経て、最新の技術動向に即した内容に改訂されている。
- ・国内メーカ、および電力会社が開発する配電系統用パワエレ機器の準拠規格として適用されている。

表 5.1-28 配電系統用パワエレ機器に適用する規格

関連規格	SVC		TVR	備考
	他励式	自励式		
JEC-2410 半導体電力変換装置(2010)	○	○	○	・変換装置全体に関する規格として適用
JEC-2440 自励半導体電力変換装置(2013)		○		・自励式変換装置に関する規格として適用
JEC-2200 変圧器(2014)	○	○	○	・変圧器部に適用

<実施(追加)する試験項目>

パワエレ機器の性能は、原則、表 5.1-28 に示す JEC 規格を満足することを前提とするが、機器の普及に向けては、電力会社のニーズや設置環境に応じた追加仕様も必要であることが分かった。ここでは、パワエレ機器の効率的かつ効果的な開発の一助となることを目的として、電力会社が保有する留意点やニーズを織り込んだ試験項目を抽出した。なお、設置環境等によって、試験条件の設定が困難な試験項目については、電力会社(使用者)と協議のうえ試験条件を決定することとした。

【短絡強度試験】

○直列機器(TVR)については、JEC-2200「変圧器」に準じて定格電流の 25 倍にも耐えうる短絡性能が望まれる。

- ・パワエレ機器を変電所直近に設置する可能性があれば、最大短絡電流(12.5kA)にも耐え得る性能を要求する必要があるが、電力会社への聞き取り結果からその可能性は低いと想定される。
- ・並列機器(SVC)については、機器内部で短絡が生じた場合においても、公衆安全が確保できる耐短絡性能は必要。
- ・但し、短絡容量の低減によってパワエレ機器の小型化や本体コスト低減につながることから、電力会社ニーズによっては個別に対応することも検討。

【耐インパルス性能の向上】

- 過去に、雷害と思われる過電圧、過電流によって、パワエレ機器の制御部の不具合が多発した事例を踏まえ、耐インパルス性能の向上が望まれる。
- 主回路のみならず、低圧部(制御回路、通信回路等)についても十分な対策を実施し、長期信頼性の確保が必要。

<補 足>

- ・インパルス耐電圧試験は必要であるものの、配電線、架空地線、接地形態などの現場状況は電力会社によって様々であり、パワエレ機器に侵入する雷電流波高値やエネルギーを一律に規定することは容易でないため、本項目については使用者との協議によることとした。

【振動環境下における動作確認】

- パワエレ機器は精密機器で構成されていることから、運搬等(柱上設置状態においても微振動は発生)による振動環境下でも異常のないことを確認することが望まれる。
- 参考として、表 5.1-29 に開閉器の制御装置に適用される JIS C4605「高圧交流負荷開閉器」の振動試験の内容を例示する。

表 5.1-29 JIS C4605「高圧交流負荷開閉器」の振動試験(制御装置対象)

試験の種別	振動条件		
	複振幅(mm)	振動数(Hz)	時間(min)
通電試験	0.2	16.7	10
無通電試験	4.0	16.7	60

【寒冷地適用時の性能確認】

- JEC の常規使用状態は規定されているが、北日本などの寒冷地にパワエレ機器を適用する電力会社においては、環境条件として-35℃での動作保証や、塩雪害を想定した仕様(ブッシング間離隔の確保)が望まれる。
- また、ブッシング間の距離が小さい場合、塩分を含んだ積雪により相间短絡に移行する恐れが否定できないため、その仕様については使用者と協議する必要がある。

【耐塩仕様】

- 配電設備全般の劣化要因として、塩害による腐食が挙げられるため、他の配電機器と同様に耐塩仕様のラインナップが望まれる。
- 耐塩仕様の例として、筐体の溶融亜鉛メッキ化や亜鉛アルミ溶射可などが挙げられるが、いずれもコストアップとなることから、一般仕様(塗装のみ)と耐塩仕様とするのか、耐塩仕様で統一するのは、電力会社と協議する必要がある。

1. 5. 1(2)①2)メーカー基準、メーカーの工場試験内容

各メーカーは、JEC に基づく試験項目によりパワエレ機器の性能を評価しているが、独自に実施している試験項目があるため、その一例を以下に示す。

【高速応答性の評価方法】

- 急峻な動作特性を特徴とする自励式 SVC であるが、その応答時間の評価方法については定められた試験条件がないため、共通条件下での評価が望まれる。
- 一例としてメーカーによる応答時間評価時の補償電圧値を示す。
 - ・50% or 80% or 90% or $\pm 1\%$ 以内の補償時間を計測
 - ・負荷が投入されてから指定する%値まで補償する時間を計測
(但し、過度現象のため 100%付近では誤差が大きくなることが想定される)

【並列運転】

- SVC の並列運転を行う場合においても、高速応答が可能であることを確認する。
- 主機と従機で無効電力制御量を均等分担する仕組みであり、市販品では 2~3 台の並列運転について確認が行われている状況。
- 現時点では、最大必要容量(最大並列台数)に関するユーザーニーズは確認されなかった。

1. 5. 1(2)①3)電力会社が求める要求仕様

電力会社への聞き取りを中心に、配電系統用パワエレ機器の構造、および導入に向けて検討が必要な事項を整理した。配電系統用機器は面的に広がり設置数も膨大となる特徴があるため、運用が容易であり、保守面の負担を軽減することが強く望まれていることが分かった。以下に、電力会社が求める機器構造、運用面、保守面に関する内容を示す。

<機器構造>

【小型・軽量化】

- 単柱設置可能な寸法として、実績のある電力会社への聞き取り結果から「高さ:2.5m 以内、幅:1.3m 以内、奥行:1m 以内、重さ:1.8t 以下」を候補とした。
- 但し、小型・軽量化を指向することでパワエレ機器本体のコスト増や、保守性(点検、消耗品取替)に支障を招くのであれば、H 柱設置を前提とした機器設計を検討する。(現状では H 柱への設置を想定している電力会社が大半であることも考慮)

【自然冷却方式(ファンレス)の採用】

- 冷却ファンの故障や、通風口目詰まり等による放熱不良により、内部基盤の損傷に至った事例あり。
- 保守面でも課題提起するが、冷却ファンは消耗品の中でも取替周期が早いことから、メンテナンス労力低減の観点からファンレス構造が望まれる。

<運用面>

【既存 SVR との協調制御】

- 常時の電圧変動は SVR で補償し、急峻な変動は SVC で補償することが望まれる。(既存 SVR との協調運転を不安視する電力会社あり)

【シミュレーションツールの整備】

- 今後、既存 SVR との協調運転や、設置位置・整定値の最適化、更には SVR 代替機器としての有効性を確認するために、精度の高いシミュレーションツールの整備が望まれる。

【電圧不平衡補償】

- 分散型電源の普及によって、相間電圧のアンバランス傾向が昼夜間で大きく異なる等、変圧器の相結線変更では対応困難なケースが発生してきており、不平衡補償についてはニーズが高まる可能性がある。
- 現行品では、補償容量の余力により不平衡補償する機器もあるが、今後は任意に設定可能な仕様も望まれる。

【導入効果の見える化】

- パワエレ機器導入後の効果を確認・分析するために、動作履歴等を容易に取得できる機能具備が望まれる。
- パワエレ機器導入効果を定量的に評価する際に必要な機能であり、今後、パワエレ機器導入を検討する電力会社への説明材料としても有効と思われる。

<保守面>

【消耗品の取替容易性・点検サイクル延伸化】

- 工場持ち込みを必要とする取替は、運搬・設置に要する費用が発生することから、現地(柱上)での消耗品取替を容易にする構造(制御基板のユニット化など)が望まれる。
- なお、上記で冷却ファンの課題を述べているが、部品メーカー取替推奨期間が短いものについては、その省略を検討することが必要である。一例として、冷却ファンの廃止(自然空冷式の採用)や、電解コンデンサの未使用化などが挙げられる。

<主な消耗品のメーカー取替推奨期間(一例)>

- | | |
|----------|--------------------|
| ・強制風冷装置 | 3～5年 or 10年 or 15年 |
| ・電解コンデンサ | 10年 or 15年 |
| ・電装品 | 10年 or 15年 |

【異常発生時の内容把握】

- 遠制機能の未整備を考慮し、柱上に設置されたパワエレ機器の異常内容を地上から目視確認可能なアラーム表示機能の具備について要望あり。

最後に、ここまで述べた国内外の調査実施時点での各評価項目に対する実施状況のまとめを表 5.1-30 に示す。表中のハッチングは、本研究開発において実施した国内調査、解析評価、装柱性試験、実証試験(実験室、模擬グリッド、実グリッド)による評価から抽出された課題を、実務者が参照しやすいように①構造特性、②ノイズ、③通信、④通常時の運転特性、⑤制御の追従性、⑥制御性能、⑦配電系統事故、⑧ループ切替、⑨系統擾乱、⑩操作、⑪メンテナンスの十一のカテゴリとその中を項目に分類し、それぞれの研究フェーズにおいて評価対象とした項目を示したものである。

表 5.1-30 各評価項目に対する実施状況のまとめ(国内外の調査実施時点)

項目	研究開発項目①				解析	実証評価						研究開発項目①	要件・指針(共通基盤)					
	メーカー	メーカー	電力	電力		定常解析	過渡解析	熱解析	実験室G	模擬G	線柱性		実G	メーカー	JEC等規格・基準	メーカー基準・工場試験	電力が求める仕様・試験	追加すべき仕様・試験
構造特性	大きさ(単柱)																	
	重量(単柱)																	
	大きさ(H柱)																	
	重量(H柱)																	
	形状																	
	トランスレス																	
	配電線との接続																	
	耐振動																	
	寒冷地																	
	耐塩																	
	耐雷																	
	冷却方式																	
ノイズ	電気ノイズ																	
	騒音																	
通信	遠方制御子局																	
通常時の運転特性	系統条件(インピーダンス)																	
	微小な電圧変動																	
	電圧不平衡																	
	高調波																	
制御の追従性	SVRとの協調																	
	LRT, SVR																	
	負荷変動																	
	励磁突入電流																	
	分散形電源出力変動																	
制御性能	ハンチング																	
	定常制御																	
	瞬時電圧低下サポート																	
	フリッカ抑制																	
配電系統事故	不平衡補償																	
	短絡																	
	地絡																	
	断線																	
	単独運転																	
ループ切替	復電時の再閉路																	
	電圧変動																	
	位相変動																	
系統擾乱	他回線の整定等																	
	瞬時電圧低下																	
	周波数ステップ																	
操作	周波数ランプ																	
	整定																	
	モード切替																	
メンテナンス	効果の見える化																	
	点検時																	
	保守時																	

1. 5. 2 調査結果を踏まえた導入シナリオと評価項目の抽出

1. 5. 2(1)配電系統用の制御機器としての要求仕様の検討

調査結果より、配電系統に設置する場合の要件を検討し、本研究開発において検討対象とする機器の仕様を明確にする。

1. 5. 2(1)①重量・体積等に関する要求仕様

配電系統に設置する場合の要件として、単柱設置、H 柱設置などの設置方法に応じた機器の大きさ、重量、および形状に関して仕様を明確にした。

配電系統に設置する条件として最も厳しい単柱設置する場合の「重量は、1.8t 以下」とした。これは、通常、配電系統用機器を単柱設置している関西電力の柱の強度、止金具の強度、風圧荷重等より決定した。

また、最も厳しい単柱設置する場合の機器サイズは、「高さ:2.5m 以内、幅:1.3m 以内、奥行:1m 以内」とした。これは、通常、配電系統用機器を単柱設置している関西電力の柱の強度、高圧線、低圧線、弱電流電線の架線位置、施工方法、およびメンテナンス方法より決定した。

1. 5. 2(1)②EMC・騒音などに関する要求仕様

調査結果より、配電系統に設置する場合の各種ノイズの要件として、伝導性ノイズ、放射性ノイズ、騒音に関して仕様を明確にした。

伝導性ノイズとして、「各次電流歪み率:3%以下(2~40 次)、総合電流歪み率:5%以下(2~40 次)、DC 分:1%以下」とした。また、放射性ノイズとして、「526.5kHz~1605.5kHz において準せん頭値で 36.5dB 以下」とした。さらに、騒音として、「50dB 以下(通常時)」とした。

これらのノイズに関する評価は、メーカーの工場にて実施可能と考えている。

1. 5. 2(1)③通信子局の設置

本検討には、集中制御による電圧制御を含めない条件において、調査結果より、起動／停止の指令、軽故障／重故障の表示、および整定値の変更に必要となる通信用子局の設置の可能性を評価することとした。

1. 5. 2(2)性能・信頼性評価法の検討

1. 5. 2(2)①性能評価法の検討

調査結果より、配電系統に設置する場合の機器の性能を検討し、本研究開発において評価すべき項目を抽出する。

1. 5. 2(2)①1)現状の規格、基準に応じた性能

現状、研究開発項目①において開発した次世代 TVR のように、新たに開発された機器には、専用規格は存在していないため、類似の機器の規格を適用することとする。本研究開発の対象機器に類似する機器に関する規格を抽出すると、変換装置全体に関する規格として、JEC-2410 半導体電力変換装置(2010)、自励式変換装置に関する規格として、JEC-2440 自励半導体電力変換装置(2013)、変圧器部に適用として、JEC-2200 変圧器(2014)がある。ただし、専用規格ではないため、不要な部分は適用せず、不足する部分の追加を検討することとする。

1. 5. 2(1)①2)通常時の運転特性

通常の状態かつ通常電圧制御において、電圧制御の追従性や制御後の安定性などの通常時の運転状態で評価すべき項目を抽出した。

通常運転時の安定性の評価項目として、配電系統の電圧の微小変動時の動作特性、電圧不平衡発生時の動作特性、高調波発生時の動作特性を抽出した。

電圧制御の追従性の評価項目として、変電所 LRT や SVR 動作時の追従性、負荷変動時の追従性、分散形電源の出力変動時の追従性を抽出した。また、追従速度として、目標電圧まで3サイクル以内を目安とする。なお、追従速度を上げた場合の制御の安定性の面の評価項目として、制御機器同士のハンチングの発生の有無を抽出した。

1. 5. 2(1)①3)配電系統の事故時の動作特性

配電系統の事故時の動作において、短絡事故時、地絡事故時、断線事故時、事故運用時、単独運転時の運用への影響として、評価すべき項目を抽出した。

短絡事故時の評価項目として、事故点への短絡電流の供給の有無、変電所の短絡保護リレー感度への影響有無、直列機器の場合の短絡容量を抽出した。地絡事故時の評価項目として、地絡事故時の零相回路への影響、変電所の地絡保護リレー感度への影響有無を抽出した。断線事故時の評価項目として、断線事故の検出方法、断線事故時に停止特性を抽出した。

また、配電系統の事故運用では、事故区間を決定するために、再閉路、再々閉路が行われる。この停電と復電が繰り返している間の適切な電圧制御機器の動作シーケンスを評価項目として抽出した。

さらに、過去の実証事業でも評価・検討したが、解決できていない単独運転検出感度への影響についても評価項目とし、可能な範囲で対策技術を検討した。

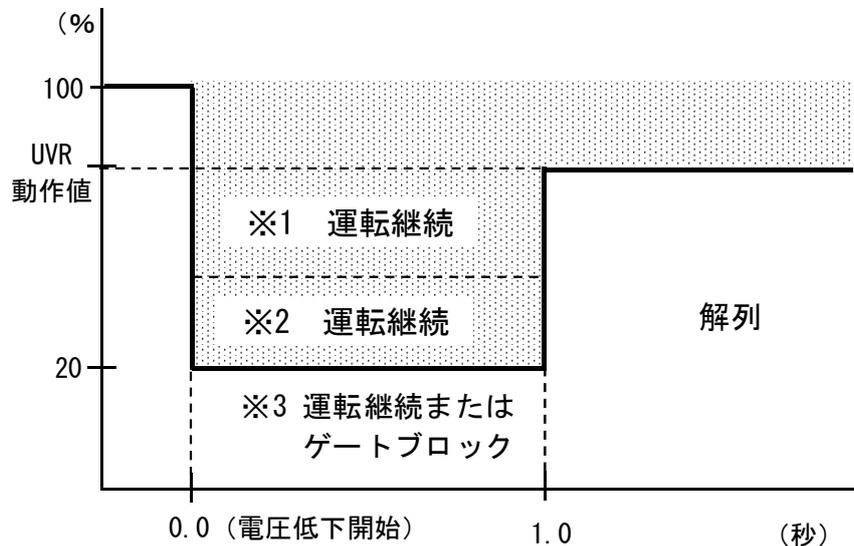
1. 5. 2(1)④) ループ切替時の動作特性

配電システムのループ切替運用時の動作において、電圧急変時、位相急変時の動作の安定性として、評価すべき項目を抽出した。また、ループ切替運用時に電圧制御機器が他の配電線に接続される場合の設定値、整定値の変更方法を評価項目として抽出した。

ループ切替運用時の評価項目として、「電圧変化量 10%以内」、「位相変化量 10 度以内」を抽出した。設定値、整定値の変更方法は、通信子局を設置した場合、現地作業する場合、自動判定する場合について検討した。

1. 5. 2(1)⑤) 電力系統擾乱時の動作特性

配電システムよりも上位の送電システムの擾乱時の動作において、瞬時の電圧変化時、周波数変化時の安定性として、評価すべき項目を抽出した。評価の基準となるのは、PV 等に課せられている事故時運転継続(FRT)機能であり、以下の要件を参照するべきと考えている。



- 残電圧 20%以下の場合: 運転継続またはゲートブロック
- 残電圧 20~52%の場合: 運転継続
- 残電圧 52%以上 & 41 度位相変化の場合: 運転継続

図 5.2-1 瞬時電圧低下に関する要件

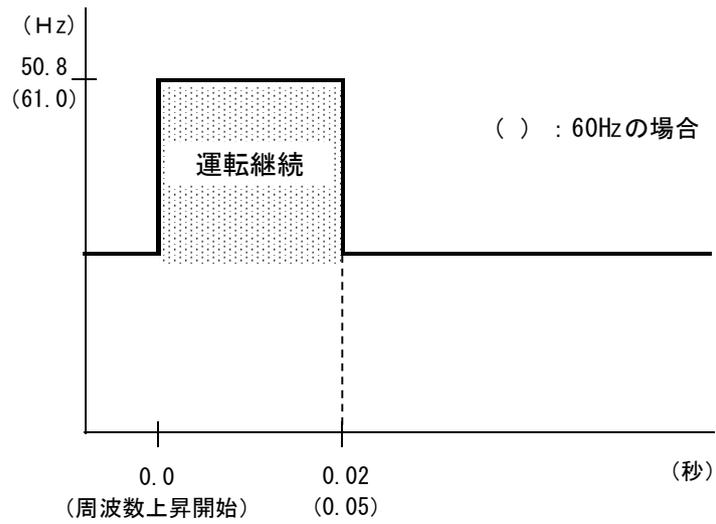


図 5.2-2 周波数ステップ変動に関する要件

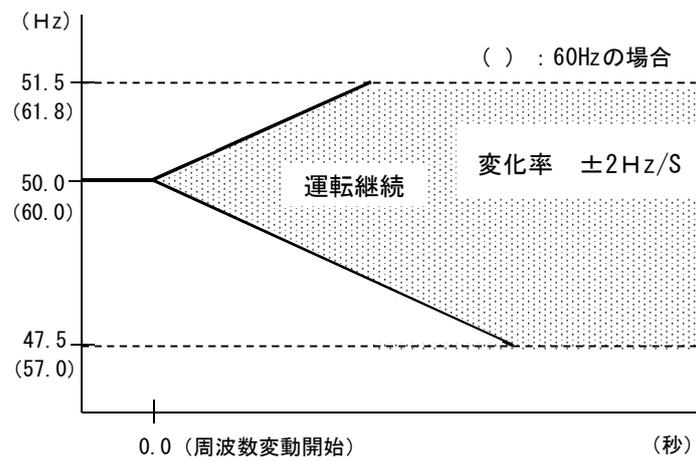


図 5.2-3 周波数ランプ変動に関する要件

1. 5. 2(2)②信頼性評価法の検討

メーカー等への調査により、機器の信頼性の評価項目について検討し、重要な評価項目を、機器の構成(単柱、H柱)毎に抽出した。電氣的信頼性の重要な評価項目として、雷サージ対応を抽出し、熱的信頼性の重要な評価項目として、内部の熱設計を抽出した。以下にそれぞれの抽出した理由を述べる。

表 5.2-1 機器の構成と信頼性の評価項目の関係

設置	トランスの有無 (機器内電圧)	電氣的信頼性		熱的信頼性		デバイスの特性			
		雷サージ対応		熱設計		耐圧		損失	
		易い	難しい	易い	難しい	低	中	低	中
単柱	有(低)	○			×	●		●	
	無(高)		××		×		●	●	
H柱	有(低)	◎		○		●			●
	無(高)		×	○			●		●

1. 5. 2(2)②1)電氣的信頼性に関する評価

電圧制御機器の単柱仕様を目指す場合、コンパクト化や軽量化は重要である一方で、雷サージに対しては比較的弱くなる。また、配電線との接続にトランスを介す場合には、雷サージはトランスを通過する際に減衰するため、雷サージに対しては比較的強い。しかし、コンパクト化や軽量化とトランス有りは、トレードオフの関係に近い。このため、雷サージへの対応と単柱仕様への移行のバランスは、機器のユーザーである電力会社の考え方で決定すべきである。

1. 5. 2(2)②2)熱的信頼性に関する評価

一方、電圧制御機器の単柱仕様を目指す場合、コンパクト化や軽量化は重要である一方で、内部の熱設計は非常に厳しくなる。また、配電線との接続にトランスを介す場合には、内部電圧が低いためコンパクトにできる反面、内部のデバイスや部品が密集することになり、熱設計的には厳しい状況となっている。

1. 5. 2(3)装柱性・メンテナンス性の検討

1. 5. 2(3)①単柱仕様の場合の装柱性を考慮した仕様

関西電力において、SVC を配電系統に設置する場合の要件として、関西電力の標準である単柱設置の設置方法に応じた機器・システムの仕様の明確化を行った。

①機器の質量の検討

SVC の要求質量は、以下の SVR 相当の施設条件から算出した。

(i) 施設条件

- ・SVC を接続する高圧線は、当社が高圧幹線部分に用いている水密圧縮型屋外用架橋ポリエチレン絶縁電線(SB-OCW)80mm²とする。
- ・電線径間は当社標準径間である 40m とする。
- ・SVC の設置スペースを確保するため、変圧器等の接続用開閉器以外の機器、低圧線は施設しない。
- ・専用バンドの耐荷重から 2,000kg 以下とする。
- ・都市部での施設を考慮して、通信線等の共架物があるものとする。

(ii) 算出結果

算出結果を表 5.2-2 に示す。

表 5.2-2 SVC の要求質量

施設柱		最大荷重(kgf)
丈尺(m)	設計荷重(kg)	
16	700	1,800

この結果から、本実研究開発では既設の電柱に吊架することを想定し、設計荷重 700kg の電柱へ施設可能な 1,800(kg)を要求仕様とした。関西電力の仕様規定に基づく専用バンド(ハンガ一接続)により単柱への施設状況を図 5.2-4 に示す。

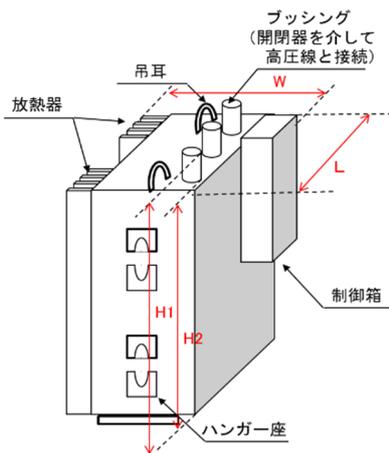


図 5.2-4 単柱への施設状況

②機器の寸法・形状の検討

電気設備の技術基準に規定される機器および架空電線路の地上高を確保し、かつ柱上における高圧本線作業時の作業空間の確保、および柱上から SVC の保守作業が可能となるように、図 5.2-5 のとおり要求仕様とした。

なお、施工時にクレーン等で吊上可能な吊耳を具備することを規定し、安全に設置工事ができるよう吊上げ時に機器の水平が保たれることを研究開発項目①に提案した。



※ 関西電力標準支持物（16m 柱）に施設できることが条件。

		要求仕様(案)	現行仕様
高さ [mm]	H1	2,500 以内	規定なし(約 2,430)
	H2	2,300 以内	規定なし(約 2,100)
幅 [mm]	W	1,300 以内	規定なし(約 1,160)
奥行 [mm]	L	1,000 以内	規定なし(約 850)
総質量 [kg]		1,800 以下	1,750 以下 (約 1,540)

()内は現行 SVR の実測値

図 5.2-5 SVC の寸法に関する要求仕様(案)

1. 5. 3 解析による評価

1. 5. 3(1)パワエレ機器を活用した電圧制御方式の評価

1. 5. 3(1)①検討の目的

PV の系統連系が進展すると、逆潮流に伴う電圧上昇が重要な課題となる。特に PV の出力は気象条件に依存して変化する不確実性を有するため、日射の変動に合わせて電圧上昇と電圧降下の双方が現れるため、頻繁な電圧変動に追従する高い電圧制御性能が求められる。一般に、配電系統用変電所二次側母線の電圧は LRT により制御可能であり、配電線での電圧降下の状況に応じて、配電線の幹線(フィーダ)の送り出し電圧を調整する方式が従来より用いられてきた。しかし、郊外地域などでフィーダの亘長が長い場合には、フィーダ送り出し点での電圧調整だけでは十分ではなく、必要に応じてフィーダの途中に SVR を導入し、そのタップ位置(変圧比)を LDC(Line Drop Compensation)方式により自動調整することで、電圧適正化が行われてきた。なお、亘長が長くないフィーダにおいても、配電系統用変電所二次側母線に電圧変動の様相が異なる複数のフィーダが接続されている場合には LRT により複数フィーダを一括して制御することには限界があり、SVR がフィーダごとに導入される場合もある。

SVR のタップ位置の切替は機械的スイッチに基づくため、PV の出力変動に起因した頻繁な電圧変動を SVR で補償する場合、制御の遅れに起因した短時間での電圧逸脱の発生、ならびにタップ位置の制御回数の増加に起因した短寿命化が重要な問題となる。そこで本章では、以下の事項について検討した。

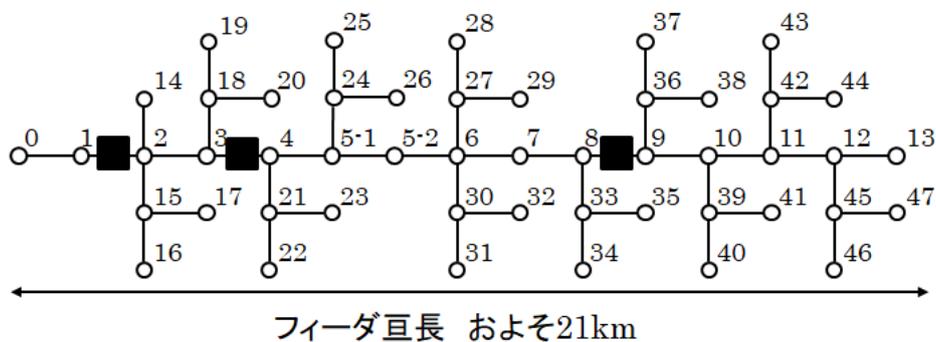
- ・ 高速な電圧制御が可能と期待される、次世代 TVR および SVC を対象に、多様な系統条件により現行広く採用されている SVR との比較を通じて、その有効性を評価する。
- ・ PV の導入量増加に合わせた電圧変動の様子を解析することで、各電圧制御機器に導入による PV の導入可能容量の変化を示す。ここで、PV の力率を下げて連系する方式の有無や、PV の配置による違いについても検討する。

1. 5. 3(1)②配電システムモデルの作成

電気協同研究第37巻3号[1]においては、現実の配電システムを住宅地や郊外地域などの特徴に応じて分類し、区分ごとに構築した標準的な配電システムモデルが示されている。PVの普及拡大による電圧面での影響は、主として配電線の亘長が長いほど大きいと考えられる。そのため本章では、同文献から亘長が異なる3つのモデル(D22、D21、C2)を抽出して検討を行う。各モデルの詳細を以下に記す。

○中規模郊外システムモデル(D22)

中規模郊外地域を想定したモデルとして、図5.3-1に示すD22のシステムモデルを用いた。フィーダ幹線の亘長は21kmと比較的長く、大きな電圧変動を補償するために電圧制御機器が直列に3段導入されていることを想定した。ここでノード0は配電システム用変電所の変圧器2次側母線を示す。また、配電線インピーダンスを表5.3-1に示す。配電システム用変電所に近い地域ほど需要が密であると想定して、図5.3-2に示すようにモデルを3区間に分類し、各区間に1ノードあたりの負荷の大きさが100:80:50の比率となるように全体の負荷を配分した。なお、ノード5-1と5-2は同一のノードを記載の都合上2分割しているため、ノード5-2には負荷は接続していないものとした。PVが末端集中接続する場合の接続箇所はノード12とした。SVRの導入箇所は、ノード1-2間、3-4間、8-9間としたが、この配置の想定方法については後述する。また、2段目および3段目のSVRをSVCに入れ替える場合は、一般に電圧-無効電力制御感度が配電線末端側ほど高いことに着目し、それぞれノード8および13にSVCを接続するものとした。



■…SVRもしくは次世代TVRの導入箇所

図5.3-1 配電システムモデル1(D22)の系統図

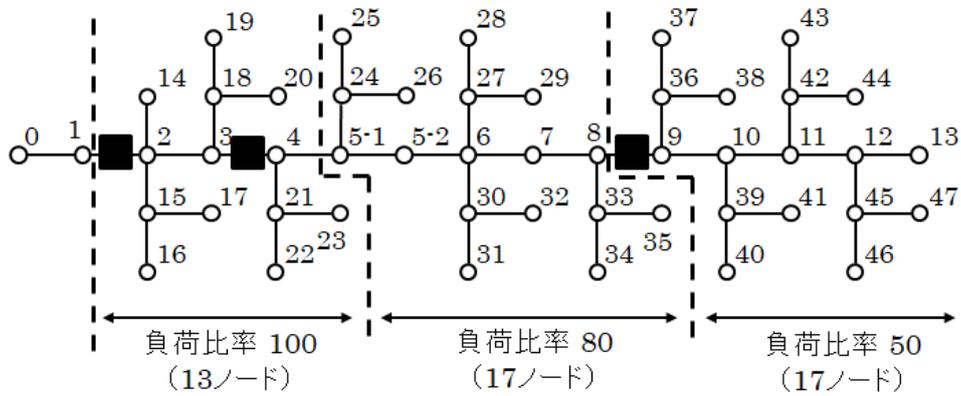


図 5.3-2 配電システムモデル1 (D22)における負荷の配分

表 5.3-1 配電線インピーダンス(D22)

線路インピーダンス[\square]	区間
$0.0078 + j0.0039$	0-1
$0.3467 + j0.5258$	1-2
$0.2736 + j0.4151$	6-7
$0.1411 + j0.2148$	7-8
$0.4147 + j0.6299$	2-3、3-4、4-5、5-6、8-9、9-10、10-11、11-12
$1.0581 + j0.4552$	15-16、18-19、21-22、24-25、27-28、30-31、33-34、36-37、39-40、42-43、45-46
$0.8098 + j0.3485$	15-17、18-20、21-23、24-26、27-29、30-32、33-35、36-38、39-41、42-44、45-47
$0.4138 + j0.1782$	2-15、3-18、4-21、5-24、6-27、6-30、8-33、9-36、10-39、11-42、12-45

○小規模郊外系統モデル(D21)

D22 より巨長の短い郊外系統のモデルとして、図 5.3-3 の D21 系統モデルを用いた。線路インピーダンスは表 5.3-2 に示す。巨長 7.76km であり、D22 より電圧降下が小さいため、電圧制御機器が 2 段導入されている想定とした。D22 とは異なり、負荷は全区間に一様に接続していると想定した。すなわち、各線路に区間長が異なるため、系統全体の負荷を各区間に線路長の比率に応じて配分し、区間の末端側ノードを代表点として接続した。PV 末端集中の場合はノード 15 に接続し、SVR の導入箇所はノード 2-3 間、ならびに 8-9 間とした。2 段目の SVR を SVC に入れ替える場合は、ノード 15 に SVC を接続する。

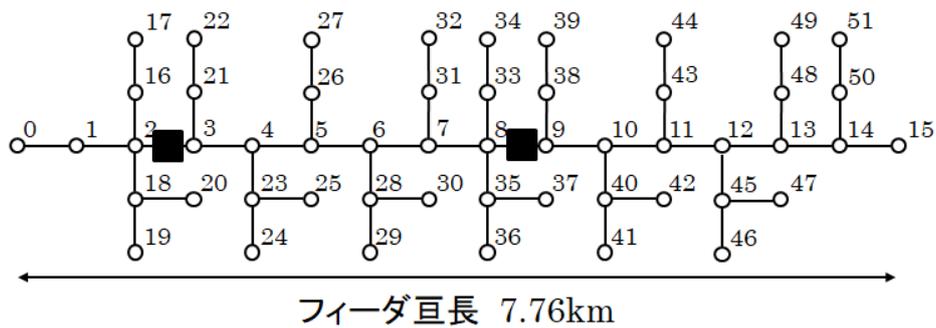


図 5.3-3 配電系統モデル1 (D21)の系統図

表 5.3-2 配電線インピーダンス(D21)

線路インピーダンス[Ω]	区間
$0.005886 + j0.005112$	0-1
$0.1686 + j0.1762$	1-2、2-3、3-4、4-5、5-6、6-7、7-8、8-9、9-10、10-11、11-12、12-13、13-14
$0.01808 + j0.1295$	2-16、2-18、3-21、4-23、5-26、6-28、7-31、8-35、9-38、10-40、11-43、12-45、13-48、14-50
$0.01325 + j0.1384$	8-33
$0.3326 + j0.1292$	16-17、18-19、21-22、23-24、26-27、28-29、31-32、35-36、38-39、40-41、43-44、45-46、48-49、50-51
$0.6023 + j0.2340$	18-20、23-25、28-30、40-42、45-47
$0.2067 + j0.08032$	33-34
$0.1144 + j0.1196$	14-15
$0.8540 + j0.3317$	35-37

○住宅地域システムモデル(C2)

住宅地域を想定した配電システムモデルとして、図 5.3-4 に示す C2 モデルを用いる。配電線インピーダンスは表 5.3-3 の通りである。フィーダ長は 4.04km と前述の系統よりも短く、電圧制御機器は 1 段のみで、その配置はノード 2-3 間とした。D21 と同様に負荷は全区間に区間長に応じて配分した。PV 末端集中の場合の接続箇所はノード 9 である。

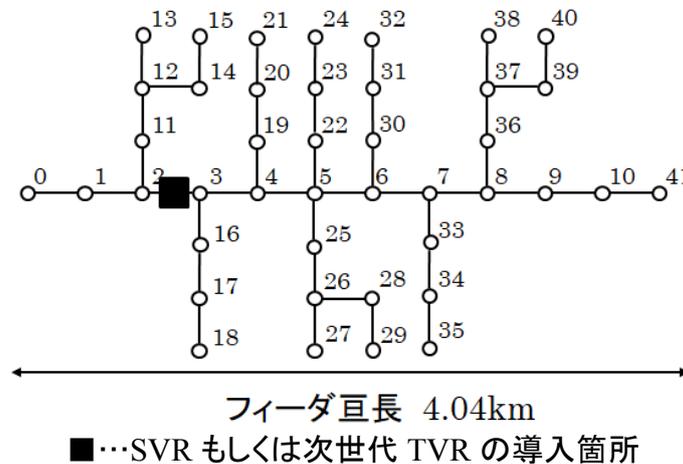


図 5.3-4 配電システムモデル1(C2)の系統図

表 5.3-3 配電線インピーダンス(C2)

線路インピーダンス[Ω]	区間
$0.0183 + j0.0109$	0-1
$0.1176 + j0.1490$	1-2、2-3、3-4、4-5、5-6、6-7、7-8
$0.04504 + j0.05706$	2-11、3-16、4-19、5-25、6-30、7-33、8-36
$0.4047 + j0.1241$	12-13、17-18、20-21、26-27、31-32、34-35、37-38
$0.01025 + j0.006766$	11-12、16-17、19-20、25-26、30-31、33-34、36-37
$0.007506 + j0.009511$	8-9
$0.04761 + j0.01460$	10-41
$0.03075 + j0.02030$	22-23
$0.08332 + j0.02555$	14-15、39-40
$0.1428 + j0.04380$	28-29
$0.07178 + j0.04736$	9-10
$0.05255 + j0.06657$	5-22
$0.1281 + j0.08458$	12-14、37-39
$0.1333 + j0.08796$	26-28
$0.4642 + j0.1424$	23-24

○負荷とPV出力、SVR配置の想定

各モデルについて、ピーク負荷の値は NEDO 委託事業“太陽光発電の集中連系実証事業”[2]において実測された 2007 年における年間の負荷および PV の出力変動データに基づいて上記の通り定めた。配電線の容量は 3MW とし、これに応じて PV の最大導入量も 3MW と定め、これを PV 導入量の 100%と定義した。日間の負荷および PV の出力変動パターンとしては、上記文献での実測データに基づいて図 5.3-5 の通り定めた。各系統に負荷容量が異なる想定としているため、ピーク負荷の比率に応じて負荷の曲線を線形に補正して用いた。PV 導入容量も各試算パターンに異なるため、都度同図の PV 出力曲線に導入容量の比率を乗じて用いた。

電圧制御機器の配置としては、重負荷期の夜間ピーク時間帯における大きな電圧降下を補償するために必要な箇所に SVR がこれまで配置されてきたことを想定して決定した。すなわち、ピーク負荷の時間帯において、配電系統用変電所側からフィーダ末端に向けた電圧降下に対して、電圧分布が適正範囲の下限値に到達したか、もしくは電圧降下幅が適正範囲の幅として定めた 300V を上回る場合に、そこに新たな電圧制御機器が必要であると考えた。各系統モデルにおけるピーク時間帯での電圧分布をそれぞれ図 5.3-6 に示す。また、SVR の仕様について表 5.3-4 に示す。SVR を次世代 TVR に入れ替えるパターンについては、SVR の導入箇所と同一のブランチに次世代 TVR を導入した。また、SVC に入れ替える場合には、前述の通り電圧－無効電力制御感度の観点から、初期状態で SVR による電圧制御されていた区間の末端付近に SVC を導入することとした。

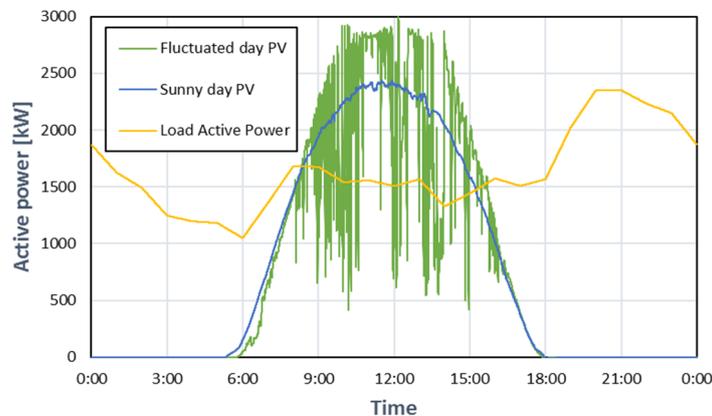
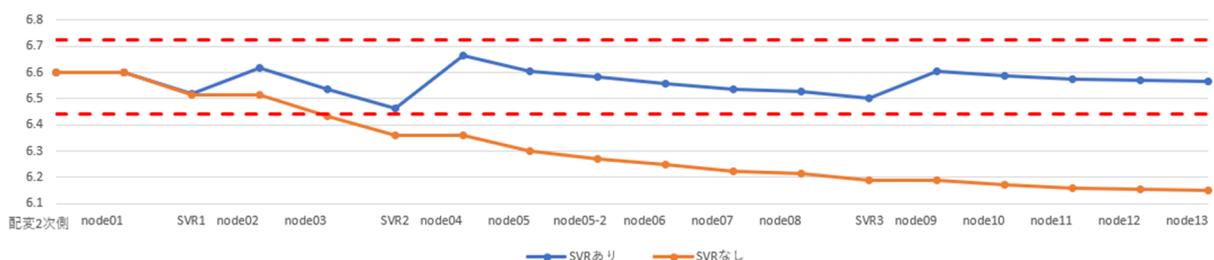
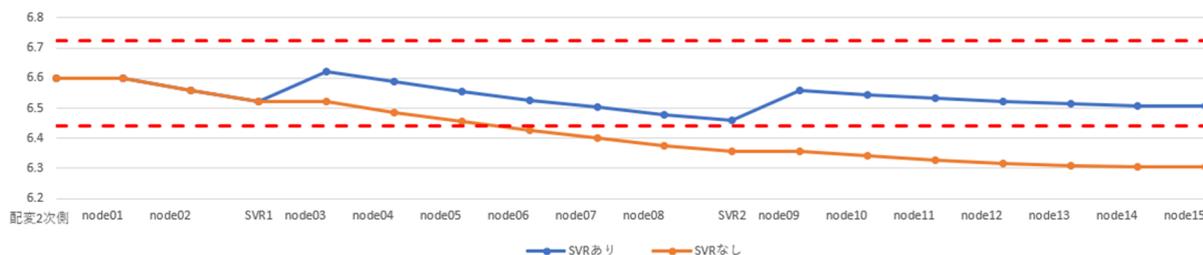


図 5.3-5 負荷とPV出力の日間変動[2]

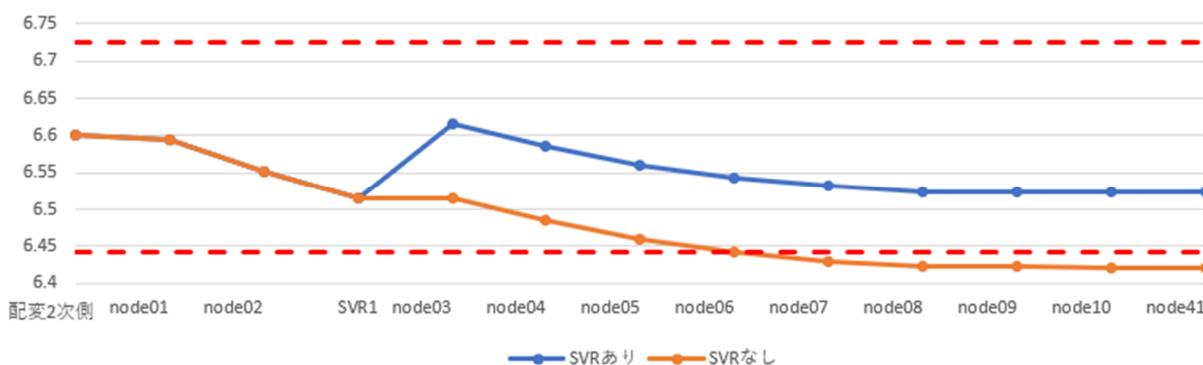
出典：NEDO：“集中連系型太陽光発電システム実証研究”より作成



(a)D22



(b)D21



(c)C2

図 5.3-6 各配電系統モデルにおけるピーク負荷時間帯の電圧分布

表 5.3-4 SVR の仕様

1 次側電圧	6600V
2 次側電圧	6100V～6900V(100V 刻み)
漏れリアクタンス	0 と近似
タップ制御方式	不感帯からの電圧逸脱を時間積分して動作時限に到達したらタップ切替を適用
LDC パラメータ (Vref、%R、%X)	文献[3]の方法により決定
不感帯幅	Vref に対して±1%
動作時限	D22: 60、90、120 sec D21: 60、90 sec C2: 60 sec (配電系統用変電所に近い側から)

SVR や次世代 TVR の自端制御に用いる LDC 論理においては、%R、%X、Vref などの制御パラメータを定める必要がある。このパラメータ決定に際しては、近年から採用事例が見られる文献[3]の手法を用いた。スマートメータ等により配電系統各地の負荷の過去の計測データが十分に利用できると想定し、ここから導き出される各時間断面での電圧変動に対する電圧制御機器の最も望ましい二次側電圧 V_s を求め、 V_s と電圧制御機器を通過する有効・無効電力潮流(それぞれ P_{SVR} 、 Q_{SVR})との関係から、重回帰分析により %R、%X、 V_{ref} を得る方法である。この手法の概念図を図 5.3-7 に示す。

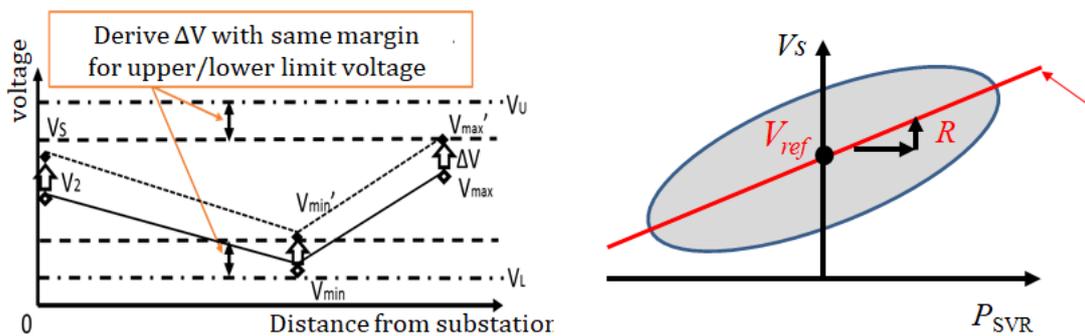
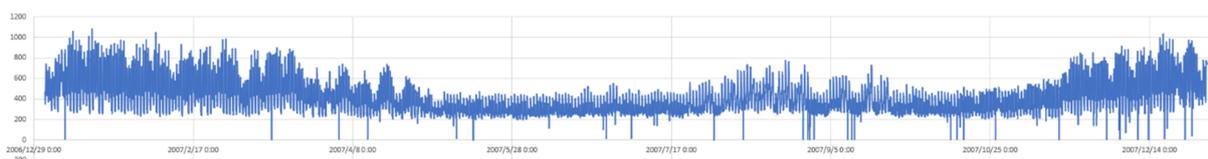


図 5.3-7 LDC の制御パラメータ決定手法

出典: 松田勝弘、二上貴文、堀越和宏、瀬戸寿之、渡辺雅浩、村越潤、高橋玲児「計測情報に基づく SVR の LDC 整定および制御アルゴリズムの検討」、電気学会論文誌 B、132 巻、8 号、pp.701-708 (2012)を基に作成

なお、本章における試算では、上記手法により LDC の制御パラメータを定めたが、以下の点に留意されたい。

- SVR の制御パラメータは、従来は年間を通じて同一の値が用いられている。そのため、SVR の制御パラメータの整定においては、文献[2]において公開されている需要および PV 出力の年間データを用いた(図 5.3-8)。2007 年において計測対象とされていた全 563 軒の需要および PV の出力変動データを合計し、各モデルならびに試算ケースにおける需要と PV の想定と合うようにデータ全体に係数をかけて補正した。最後に、計算に要する負荷を低減するために 30 分ごとに 1 点を抜き出して、年間で合計 17250 点(48 点×365 日)のデータに変換して、これを用いて LDC パラメータを決定した。
- 現実の SVR では LDC の制御パラメータは離散値で指定する仕様となっているものが多いが、本稿では仮想的に、連続値として指定可能とした。ただし、%R もしくは %X は負の値には指定できないものとした。上記手法により負の値が導出された場合には、同パラメータの値を 0 とした。



(a)需要データ



(b)PV 出力データ

図 5.3-8 年間の PV および需要データ

出典:NEDO:“集中連系型太陽光発電システム実証研究”より作成

また、SVR が複数段導入されているケースでは、動作の時限協調を図る必要がある。一般に配電系統用変電所に近いほど動作時限を短く設定することで、全 SVR を通算した合計動作回数の低減が期待できると考えられるため、本研究開発においては最大で 3 台となる SVR の動作時限を、それぞれ上流側から 60sec、90sec、120sec と定めた。

○SVC モデル

SVC モデルでは、SVC 設置地点における連系点電圧が上限逸脱判定電圧と下限逸脱判定電圧から構成される不感帯のいずれか一方を逸脱したときに、不感帯内に連系点電圧が収まるまで、無効電力の調整と潮流計算を繰り返すことで、所望の無効電力出力量を算出する。SVC の高速な電圧制御を模擬するため、計算ステップごとに繰り返し計算により無効電力出力を計算し、計算ステップ移行時に算出した無効電力を用いて潮流計算を実施する。SVC が複数設置された場合には、複数 SVC の無効電力量を同時に決定することでハンチング動作を軽減している。以上の SVC の動作イメージを図 5.3-9 に示す。

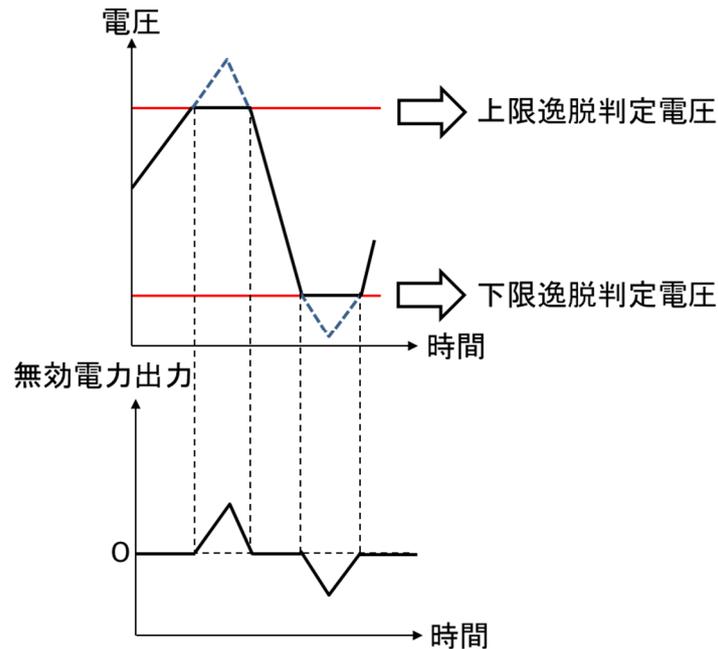


図 5.3-9 SVC の動作イメージ

○次世代 TVR

次世代 TVR は高速かつ連続的に電圧制御する機能を有するため、数値解析モデルでは CALDG に実装されている TVR モデルのタップ幅(本研究開発ではタップ幅は 5V)を小さくし、ハンチング防止用に設定されている不感帯を小さくすることで等価的に連続制御を模擬する。また、TVR の動作時限を 0 と設定することで高速動作が可能となり、上記の連続制御と組み合わせることで高速性と連続性を有した次世代 TVR を模擬することができる。電圧の推定方式に関しては SVR と同様の LDC 論理を適用し、%R と %X を調整可能なパラメータとして設定した。以上の動作イメージを図 5.3-10 に示す。

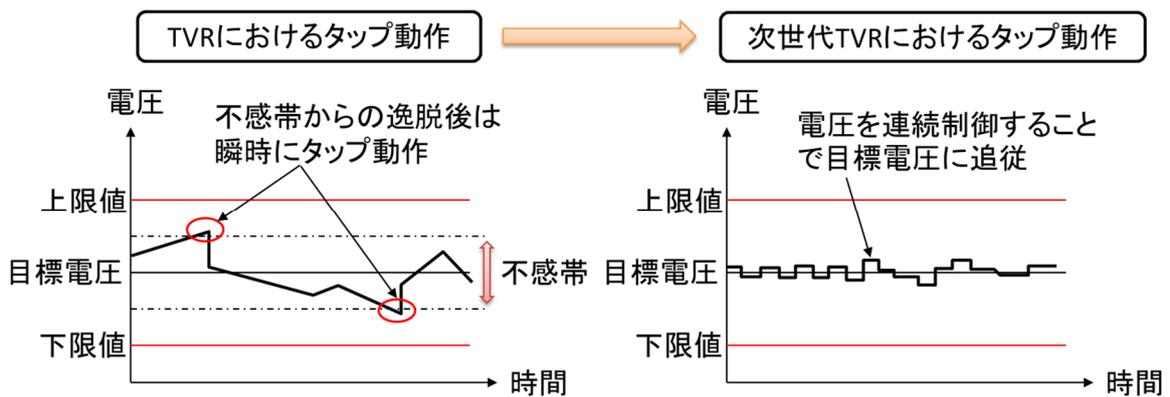


図 5.3-10 次世代 TVR の動作イメージ

1. 5. 3(1)③解析ケースの設定

◎解析ケース

電圧制御機器の有効性を評価するために、多様な系統条件を想定して網羅的に数値計算を実行した。前項に示した各配電系統モデルについて、電圧分布に影響する要因として、以下の事項を変化させた解析パターンを用意した。

○PV の導入箇所(分散および集中)

一般に、PV が住宅にルーフトップ形にて導入される場合、各家庭に PV が導入されるため、PV の配置箇所は平均的には需要量に応じた分散的な配置になると想定される。この場合、逆潮流は配電系統各地のノードから均等に発生することになり、電圧分布に及ぼす影響は比較的小さいと想定される。一方で、メガソーラなどの PV の形態で連系される場合、特に配電線末端付近に接続する際には、配電線フィーダ上を末端から配電系統用変電所にわたり大きな逆潮流が流れることになり、特に電圧変動に与える影響が大きい。

○PV 出力の力率(1.0 および 0.95)

PV 出力は、配電系統への影響を考える必要がなければ、通常は力率を 1.0 として有効電力のみを出力することが最も効率的である。一方で、配電系統の電圧上昇に与える影響がより大きくなりつつある背景を受けて、2017 年には日本電気協会による系統連系規程が改訂され、力率 0.95 一定での運転も可能とすることが追加された。PV による無効電力制御の有効性を検討するため、力率 1.0 および 0.95 の 2 パターンを想定に組み込むこととした。

○PV 導入容量

配電系統におけるフィーダの多くは、配電線の容量を最大 3MW として運用されている。そこで単一フィーダからなる上記3点の配電系統モデルについて、それぞれ PV の導入量は 3MW であると想定し、これを PV の導入率の 100%と定めた。本章の試算では、PV の導入量として、0%(導入無)から 100%(3MW 導入)までを、10%刻みで解析することとした。

○電圧制御機器の導入パターン

前述の通り、本章では既存の SVR を次世代 TVR もしくは SVC に更新した場合の有効性について検討を行う。D22、D21、C2 の各系統モデルについて、それぞれ前述の通り 3 台、2 台、1 台の SVR が導入されている状態を初期値とする。ここから単一もしくは複数の SVR が次世代 TVR もしくは SVC に置き換わった場合の電圧変動波形を導出して、各機器の導入効果を議論する。ただし、D22 と D21 系統については、配電系統用変電所に最も近い配置の SVR には比較的大きな電力潮流が生じるため、次世代 TVR の場合には容量が十分では無い可能性を考えて、中段、もしくは下段の SVR のみを次世代 TVR へのリプレース候補とした。また、SVC については無効電力の注入および吸収による電圧制御感度は、一般に配電系統用変電所と SVC 接続箇所との間のインピーダンスの大きさに依存する。したがって、配電系統用変電所に近い側に SVC を導入した場合、制御効果は相応に低いと考えられるため、次世代 TVR と同様に中段、もしくは下

段の SVR のみを SVC へのリプレイスの候補とした。なお、SVR を SVC に入れ替える場合には、制御感度をできるだけ上げて電圧制御感度を大きくするために、それぞれ前述した箇所へ配置する想定とした。なお、次世代 TVR と SVC の両者が導入される場合には、別途両者間の協調制御の在り方を検討する必要があるため、本試算の対象とはしなかった。以上より、各システムモデルでの電圧制御機器の組み合わせを以下の通り定義する。ここで、R は SVR、T は次世代 TVR、C は SVC をそれぞれ意味する。

D22: R-R-R、R-R-T、R-T-R、R-T-T、R-R-C、R-C-R、R-C-C

D21: R-R、R-T、R-C

C2 :R、T、C

○解析パターン数

以上の要因を組み合わせ、各モデルでの解析パターン数は以下の通り整理できる。

D22: 合計 308 通り

(PV 配置 2 通り×PV 力率 2 通り×PV 導入率 11 通り×電圧制御機器 7 通り)

D21: 合計 132 通り

(PV 配置 2 通り×PV 力率 2 通り×PV 導入率 11 通り×電圧制御機器 3 通り)

C2: 合計 132 通り

(PV 配置 2 通り×PV 力率 2 通り×PV 導入率 11 通り×電圧制御機器 3 通り)

○計算条件

その他、同解析に関連する試算条件は以下の通りとする。

- ・本解析では、高圧配電システムのみに着目して電圧制御結果を評価する。高圧配電システムにおける電圧分布の適正範囲の上下限値を、それぞれ 6.443kV および 6.725kV と定めた。
- ・電圧変動の解析は電力中央研究所開発の CALDG[4]を用いて行う。電圧変動解析の時間刻み幅は 10sec とした。
- ・系統連系規程において 30 分移動平均値での電圧値を適正值に収めることが求められている [5]。そこで、解析結果の 30 分移動平均値を導出し、これに基づいて PV の導入可否を判断する。また、電圧変動解析の 10 秒値をそのまま用いた場合の評価も合わせて行う。

◎評価指標

電圧変動の解析結果は、以下に示す指標により評価する。

○電圧逸脱量(kV・sec)

30 分値および 10 秒値での電圧変動について、電圧逸脱幅(kV)を時間(sec)積分した値を指標とする。この電圧逸脱量の 30 分移動平均値が 0 の場合は、系統連系規程に違反しないと考えて、当該容量の PV 導入は可であると判定する。ただし、タップ制御の整定結果によっては、概ね電圧を適切に維持できていても、系統の一部においてごく軽微な逸脱が継続してしまう場合がある。このような軽微な逸脱は、実系統においては都度タップの整定を調整することで解消されると期待されるが、本研究開発においては一様な条件で比較検討をするために、タップ整定の都度再調整は実施していない。以上の事情を反映して、本研究開発では 30 分移動平均値が 1kV・sec 未満の場合は、実系統では整定値の再調整で解消される軽微な電圧逸脱であると考え、当該パターンにおける PV 容量は接続可であると評価すると共に、結果の記載において上記判断を適用した箇所であることを明記した。

○電圧逸脱時間(sec)

いずれかのノードにおいて電圧が逸脱している状態の持続時間を指標とする。

○SVR タップ制御回数

配電系統内の全 SVR のタップ制御回数の合計値を指標とする。

○SVC 最大無効電力制御量(kVar)

SVC の容量は全パターンにおいて定格 300kW として導入する。しかしその全量が必要ではないケースもあるため、日間を通じた最大の無効電力出力(10 秒値)に着目して、必要な SVC 容量の最大値として評価の対象に加えた。

◎LDC パラメータ

前述の方法により各 PV 導入量に応じた LDC パラメータを定めた結果を表 5.3-5 から表 5.3-10 に示す。

表 5.3-5 LDC パラメータの設定(D22 モデル、PV 末端集中)

(a) PV 力率 1.0

PV力率1.0	SVR1			SVR2			SVR3		
	R	X	Vref	R	X	Vref	R	X	Vref
0	1.667	1.867	109.78	3.4	7.4	109.78	4.067	0	109.67
10	1.567	2.233	109.78	4.733	1.7	109.67	4.333	0	109.67
20	1.567	2.233	109.78	4.667	2.1	109.67	4.5	0	109.67
30	1.567	2.233	109.78	4.633	2.167	109.67	4.533	0	109.67
40	1.567	2.233	109.78	4.6	2.267	109.67	4.533	0	109.67
50	1.567	2.2	109.78	4.6	2.433	109.67	4.533	0	109.67
60	1.567	2.2	109.78	4.567	2.6	109.67	4.5	0	109.67
70	1.567	2.2	109.78	4.533	2.8	109.67	4.5	0	109.67
80	1.567	2.233	109.67	4.533	3.267	109.67	4.467	0.5	109.67
90	1.6	2.7	109.67	4.6	5.867	109.56	4.667	8.567	109.56
100	1.633	3.8	109.67	4.867	11.5	109.45	5.233	26.1	109.34

(b) PV 力率 0.95

PV力率0.95	SVR1			SVR2			SVR3		
	R	X	Vref	R	X	Vref	R	X	Vref
100	1.467	1.967	109.78	4.333	6.033	109.67	6.6	12.1	109.45
90	1.5	2.1	109.78	4.2	5.567	109.67	5.133	7.967	109.56
80	1.533	2.2	109.78	4.033	5.133	109.67	3.933	4.533	109.67
70	1.567	2.267	109.78	4	5	109.67	3.467	3.233	109.67
60	1.567	2.267	109.78	3.967	4.967	109.67	3.4	3	109.67
50	1.567	2.3	109.78	3.967	5	109.67	3.4	3.033	109.67
40	1.533	2.3	109.78	3.967	5.033	109.67	3.4	3.033	109.67
30	1.533	2.333	109.78	3.967	5.033	109.67	3.4	3.1	109.67
20	1.533	2.333	109.78	3.967	4.967	109.67	3.4	3.2	109.67
10	1.533	2.333	109.78	3.967	4.967	109.67	3.333	3.433	109.67

表 5.3-6 LDC パラメータの設定(D21 モデル、PV 末端集中)

(a) PV 力率 1.0

PV力率1.0	SVR1			SVR2		
PV導入量	R	X	Vref	R	X	Vref
100	3.133	0.3	109.67	3.4	0	109.56
90	3.133	0.2	109.67	3.367	0	109.56
80	3.133	0.133	109.67	3.367	0	109.56
70	3.167	0.067	109.67	3.333	0	109.56
60	3.167	0	109.67	3.3	0	109.56
50	3.167	0	109.67	3.267	0	109.56
40	3.167	0	109.67	3.167	0	109.67
30	3.167	0	109.67	3.033	0	109.67
20	3.167	0	109.67	2.8	0	109.67
10	3.167	0	109.67	2.4	0	109.67
0	2.433	3.533	109.78	2.633	0	109.67

(b) PV 力率 0.95

PV力率0.95	SVR1			SVR2		
PV導入量	R	X	Vref	R	X	Vref
100	2.733	1.967	109.67	2.3	0	109.67
90	2.733	1.967	109.67	2.3	0	109.67
80	2.733	1.967	109.67	2.333	0	109.67
70	2.733	1.967	109.67	2.333	0	109.67
60	2.733	1.967	109.67	2.333	0	109.67
50	2.733	1.967	109.67	2.3	0	109.67
40	2.733	2	109.67	2.3	0	109.67
30	2.733	1.967	109.67	2.267	0	109.67
20	2.733	1.933	109.67	2.2	0.167	109.67
10	2.733	1.933	109.67	2.067	0.633	109.67

表 5.3-7 LDC パラメータの設定(C2 モデル、PV 末端集中)

(a) PV 力率 1.0

(b) PV 力率 0.95

PV力率1.0	SVR1			PV力率0.95	SVR1		
PV導入量	R	X	Vref	PV導入量	R	X	Vref
100	2.1	0	109.67	100	1.533	0.667	109.78
90	2.1	0	109.67	90	1.533	0.7	109.78
80	2.067	0	109.67	80	1.533	0.7	109.67
70	2.033	0	109.67	70	1.533	0.733	109.67
60	2	0	109.67	60	1.5	0.767	109.67
50	1.967	0	109.67	50	1.5	0.8	109.67
40	1.9	0	109.67	40	1.5	0.867	109.67
30	1.833	0	109.67	30	1.467	0.867	109.67
20	1.767	0	109.67	20	1.5	0.733	109.67
10	1.733	0	109.67	10	1.533	0.667	109.67
0	1.233	2.067	109.78				

表 5.3-8 LDC パラメータの設定(D22 モデル、PV 分散配置)

(a) PV 力率 1.0

PV力率1.0	SVR1			SVR2			SVR3		
PV導入量	R	X	Vref	R	X	Vref	R	X	Vref
100	1.6	2.067	109.67	3.533	5	109.78	3.033	4.433	109.78
90	1.6	2.067	109.67	3.533	5.033	109.78	3.033	4.4	109.78
80	1.6	2.067	109.67	3.5	5.033	109.78	3.033	4.4	109.78
70	1.6	2.1	109.67	3.5	5.067	109.78	3.033	4.367	109.78
60	1.6	2.1	109.67	3.5	5.067	109.78	3.067	4.333	109.78
50	1.6	2.1	109.67	3.5	5.067	109.78	3.067	4.3	109.78
40	1.6	2.133	109.67	3.5	5.1	109.67	3.1	4.267	109.78
30	1.6	2.133	109.67	3.5	5.133	109.67	3.1	4.267	109.78
20	1.6	2.133	109.67	3.5	5.167	109.67	3.1	4.233	109.78
10	1.6	2.1	109.78	3.467	5.3	109.67	3.1	4.3	109.67
0	1.667	1.8	109.78	2.967	7.5	109.67	4	0	109.67

(b) PV 力率 0.95

PV力率0.95	SVR1			SVR2			SVR3		
PV導入量	R	X	Vref	R	X	Vref	R	X	Vref
100	1.6	2.1	109.67	3.567	4.933	109.78	3.1	4.2	109.78
90	1.6	2.1	109.67	3.567	4.933	109.67	3.1	4.2	109.78
80	1.6	2.1	109.67	3.567	4.967	109.67	3.1	4.2	109.78
70	1.6	2.1	109.67	3.533	5	109.67	3.1	4.2	109.78
60	1.6	2.133	109.67	3.533	5.033	109.67	3.1	4.2	109.78
50	1.6	2.133	109.67	3.533	5.033	109.67	3.133	4.2	109.78
40	1.6	2.133	109.67	3.533	5.067	109.67	3.133	4.167	109.78
30	1.6	2.133	109.67	3.533	5.1	109.67	3.133	4.2	109.67
20	1.6	2.167	109.67	3.5	5.1	109.67	3.133	4.2	109.67
10	1.6	2.167	109.67	3.5	5.133	109.67	3.133	4.2	109.67

表 5.3-9 LDC パラメータの設定(D21 モデル、PV 分散配置)

(a) PV 力率 1.0

PV力率1.0	SVR1			SVR2		
PV導入量	R	X	Vref	R	X	Vref
100	2.533	3.033	109.67	1.9	3.5	109.67
90	2.533	3.067	109.67	1.833	3.7	109.67
80	2.533	3.1	109.67	1.8	3.933	109.67
70	2.5	3.167	109.67	1.733	4.3	109.67
60	2.5	3.2	109.67	1.633	4.767	109.67
50	2.5	3.267	109.67	1.467	5.433	109.67
40	2.467	3.333	109.67	1.267	6.433	109.67
30	2.467	3.4	109.67	0.933	7.967	109.67
20	2.433	3.433	109.67	0.467	10.33	109.67
10	2.433	3.5	109.67	0	12.47	109.67
0	2.433	3.533	109.78	0	12.47	109.67

(b) PV 力率 0.95

PV力率0.95	SVR1			SVR2		
PV導入量	R	X	Vref	R	X	Vref
100	2.6	2.8	109.67	2.1	2.5	109.67
90	2.6	2.833	109.67	2.1	2.533	109.67
80	2.567	2.833	109.67	2.067	2.6	109.67
70	2.567	2.867	109.67	2.067	2.7	109.67
60	2.567	2.9	109.67	2.033	2.833	109.67
50	2.567	2.967	109.67	2	3	109.67
40	2.533	3.033	109.67	1.933	3.3	109.67
30	2.533	3.1	109.67	1.8	3.9	109.67
20	2.5	3.267	109.67	1.533	5.167	109.67
10	2.467	3.4	109.67	0.8	8.733	109.67

表 5.3-10 LDC パラメータの設定(C2 モデル、PV 分散配置)

(a) PV 力率 1.0

PV力率1.0	SVR1			PV力率0.95	SVR1		
PV導入量	R	X	Vref	PV導入量	R	X	Vref
100	1.333	1.633	109.67	100	1.333	1.633	109.67
90	1.333	1.633	109.67	90	1.333	1.633	109.67
80	1.333	1.633	109.67	80	1.333	1.633	109.67
70	1.333	1.633	109.67	70	1.333	1.633	109.67
60	1.333	1.633	109.67	60	1.333	1.633	109.67
50	1.333	1.633	109.67	50	1.333	1.633	109.67
40	1.333	1.633	109.67	40	1.333	1.633	109.67
30	1.333	1.633	109.67	30	1.333	1.633	109.67
20	1.333	1.633	109.67	20	1.333	1.633	109.67
10	1.333	1.667	109.67	10	1.333	1.633	109.67
0	1.233	2.067	109.67	10	1.333	1.633	109.67

1. 5. 3(1)④検討に使用した解析ツールについて

電力中央研究所が開発した配電系統総合解析ツール(CALDG)は、同所において潮流計算の計算時間を短縮できるように改良したL法を内蔵し、入力データの時間間隔毎に制御データを引き渡しながら連続的に潮流計算を実行できる高機能な解析ツールである。L法の求解にはニュートンラプソン法を用いており、精度向上のために全ての変数を倍精度で扱っている。本解析ツールは、単相計算も三相計算も可能であるが、検討内容に不平衡を含んでいないため、単相計算で実施した。

配電線モデルは、ノードとノード間をπ型で模擬し、ノードに各時刻の負荷や分散形電源を定電力で模擬し、時間変化データを入力することで、24時間連続的な解析が可能となっている。

本検討は、配電線単位で解析するため(他配電線がない)、バンクのLRT(load ratio control transformer)の制御を設定しても制御を模擬することができない。このため、他配電線も考慮した場合のタップ位置を模擬したプログラムコントロール(プロコン)[タップのスケジュール運転]として解析した。本解析ツールのプロコンは、タップ制御を模擬せず時刻毎に設定された変圧器二次側電圧を時刻毎に一定値に固定している。

1. 5. 3(1)⑤解析結果の評価

1. 5. 3(1)⑤1)基本ケース

数値解析により得られた結果の内、代表的なものを以下に記載する。各パターンの詳細については付録(1)として整理した。

◎D22 系統における PV 導入可能容量

表 5.3-11 に、D22 系統における各パターンでの PV 導入可能容量を示す。また、PV 力率 1.0 かつ末端集中ケースについて、10 秒値での電圧逸脱量ならびにタップ制御回数について図 5.3-11 に示す。PV 力率 1.0 かつ末端集中の場合は条件が最も厳しくなる傾向であり、現状に最も近い SVR3 台のパターンでは PV 導入量が 40%となった。この導入限界における電圧分布およびタップ位置の日間変動を図 5.3-12 に示す。PV 出力変動の影響を受けて、電圧分布が大きく変動している様子がわかる。30 分移動平均値ではまだ逸脱が生じていない状態であるが、電圧適正化のために SVR のタップ位置も下流側を中心に頻繁に切り替えられていることがわかる。

一方で、2 段目の SVR を次世代 TVR に入れ替えた場合の電圧分布およびタップ位置の日間変動を図 5.3(1)-13 に示す。高速な電圧制御効果により 10 秒値での電圧変動が大きく緩和されていることが図 5.3-11 よりわかる。このように、SVR を次世代 TVR に入れ替えた場合の主たるメリットは高速な電圧制御の実現であり、30 分移動平均値で生じていた逸脱を大幅に改善するものではない。そのため、SVR1 台を次世代 TVR に入れ替えたパターンでは、表 5.3-12 に記載の通り PV 導入可能容量は 40%のままで大きな増加は見られない。ただし 2 段目と 3 段目の両 SVR を次世代 TVR に入れ替えたパターンでは、50%へと一定の改善が見られた。

SVR を SVC に入れ替えるケースについても、制御の効果としては概ね同様であり、主として高速な電圧制御が補償されることで 10 秒値は大きく改善されている。特に SVC の制御効果は配電系統全体にわたるため、より広い範囲で電圧変動が低減された結果となっている。一方で 30 分移動平均値での電圧逸脱量は SVR と同程度であり、表 5.3-12 の通り PV 導入可能容量の指標からは、3 段目の SVR を入れ替えた場合、および 2 段目と 3 段目の両方を入れ替えた場合では 40%のままとなっている。3 段目の SVR を SVC へと入れ替えた場合の電圧分布およびタップ位置の日間変動を図 5.3-14 に示す。ここで、2 段目の SVR のみを SVC に入れ替えたパターンでは、逆に 30%と PV 導入可能容量が減少している点に注意する必要がある。SVC の制御効果は主として配電系統用変電所から SVC 接続点までの配電線インピーダンスによって決まるため、一般に配電線の末端側に接続するほど制御効果が高いと想定できる。したがって 2 段目を SVC に入れ替えた場合は制御感度の観点から制御効果がやや落ちるため、他の SVR との協調制御が一層重要となる。今回採用した自端制御手法では、SVR と SVC の協調制御の概念は組み込まれていないため、同パターンでは SVC を導入したことによる電圧分布改善効果が 30 分移動平均値の観点からは見られていないものと考えられる。

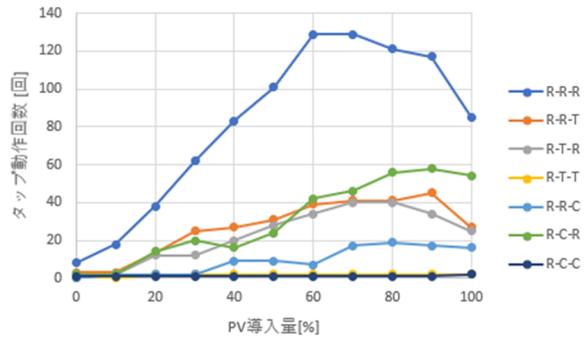
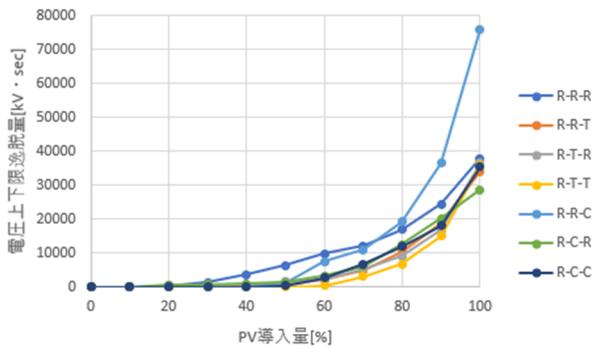
PV 分散配置の場合、ならびに PV 力率 0.95 として連系される場合には、概ね PV 連系による電圧変動への影響が大きく緩和されることにより、PV 導入可能容量は全体的に大きく改善されている。SVR3 台の場合でも、力率 0.95 もしくは分散配置と変えた場合では PV 導入可能容量はいずれも 90%と大きく改善されている。一例として、PV 容量を同じ 40%とした。また、力率を 0.95

とした場合の電圧分布およびタップ位置の日間変動を図 5.3-15 に示す。無効電力制御の効果により電圧変動幅が非常に小さくなっており、遅れ力率で連系することの有効性がわかる。

表 5.3-11 D22 系統における PV 導入可能容量

	R-R-R	R-R-T	R-T-R	R-T-T	R-R-C	R-C-R	R-C-C
PV 力率 1.0 末端集中	40%	40%	40%	50%	40%	30%	40%
PV 力率 1.0 分散	90%	90%	90%	90%	100%	90%	100%
PV 力率 0.95 末端集中	90%	90%	100%	90%	80%	80%	90%
PV 力率 0.95 分散	100%	100%	100%	100%	100%	90%	100%

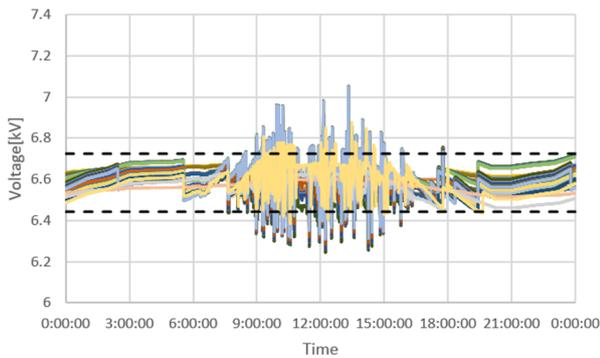
(注 1) RTC の記号の意味は、それぞれ次の通り: R...SVR、T...次世代 TVR、C...SVC。記号の左から順に、配電系統用変電所側に近い導入箇所での設備を示す。



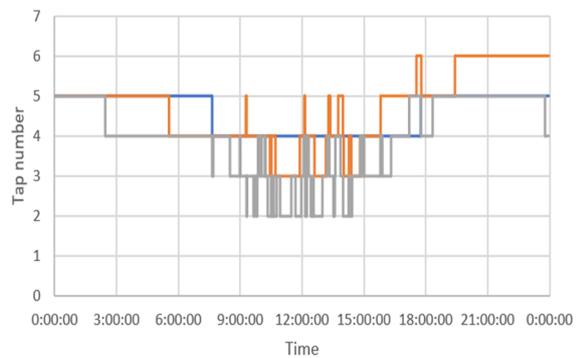
(a) 電圧逸脱量(10秒値)

(b)タップ制御回数

図 5.3-11 各パターンにおける電圧逸脱量(10秒値)とタップ制御回数(D22)

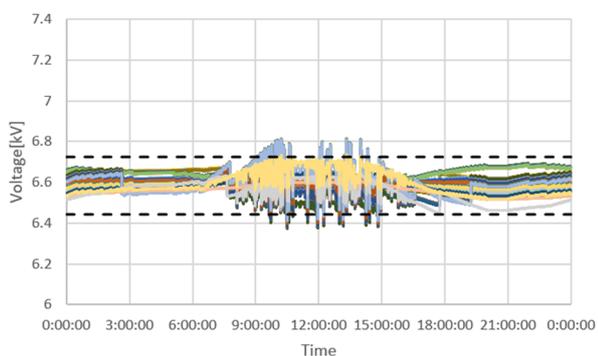


(a)電圧分布

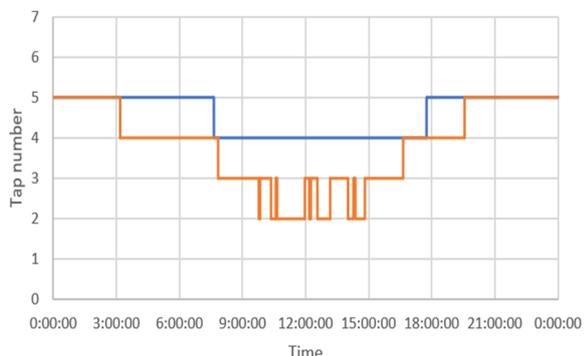


(b)タップ位置

図 5.3-12 解析結果(D22、PV 力率 1.0、末端集中、PV 容量 40%、SVR-SVR-SVR)

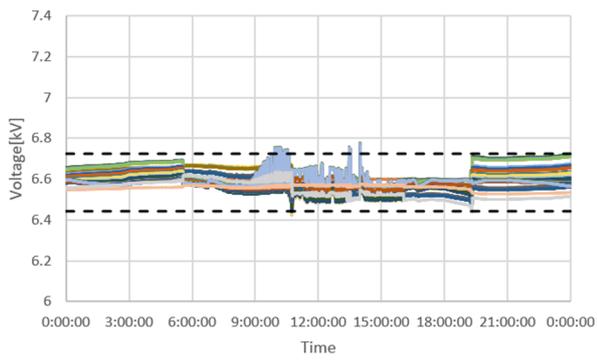


(a)電圧分布

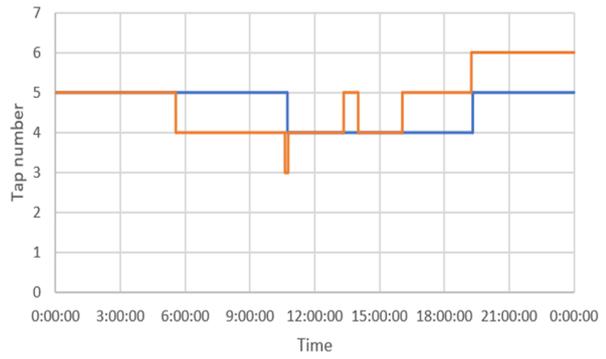


(b)タップ位置

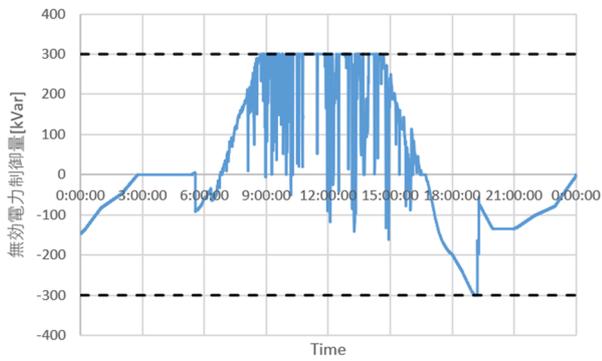
図 5.3-13 解析結果(D22、PV 力率 1.0、末端集中、PV 容量 40%、SVR-TVR-SVR)



(a)電圧分布

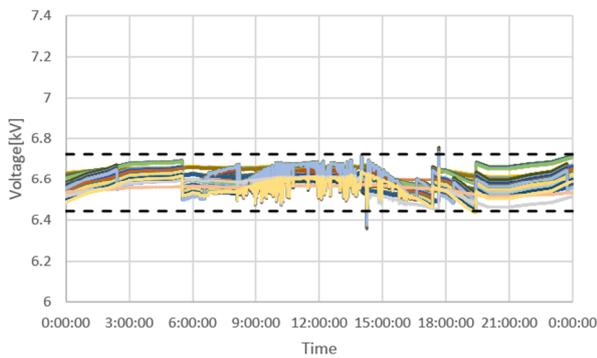


(b)タップ位置

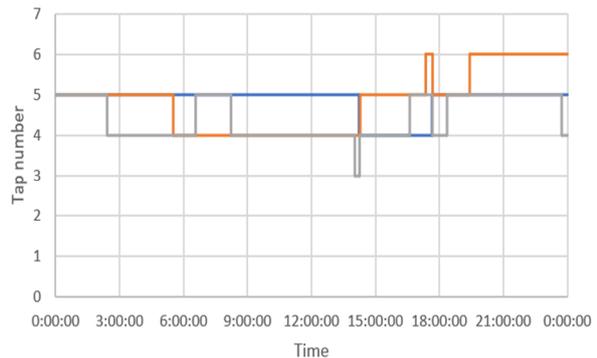


(c)SVC の無効電力制御

図 5.3-14 解析結果(D22、PV 力率 1.0、末端集中、PV 容量 40%、SVR-SVR-SVC)



(a)電圧分布



(b)タップ位置

図 5.3-15 解析結果(D22、PV 力率 0.95、末端集中、PV 容量 40%、SVR-SVR-SVR)

◎D21 系統における PV 導入可能容量

表 5.3-13 に、D21 系統における各パターンでの PV 導入可能容量を示す。また、PV 力率 1.0 かつ末端集中ケースについて、10 秒値での電圧逸脱量ならびにタップ制御回数について図 5.3-16 に示す。D22 と同様に、PV 力率 1.0 かつ末端集中の場合は条件が最も厳しく、現状に最も近い SVR2 台のパターンでの PV 導入量は 60%となった。D21 系統は D22 と比較すると配電線フィーダの亘長が短いため、PV 接続による電圧変動への影響は相対的に小さく、SVR のみでも D22 よりも大容量の PV を連系できる結果となっている。

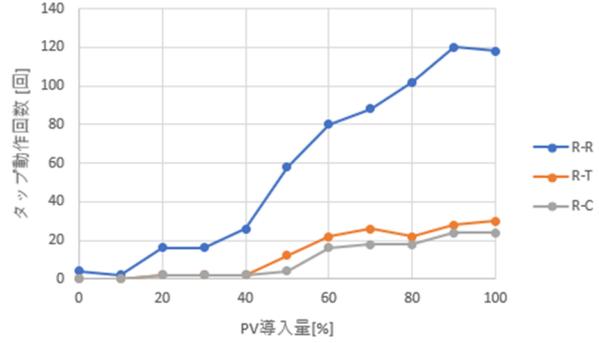
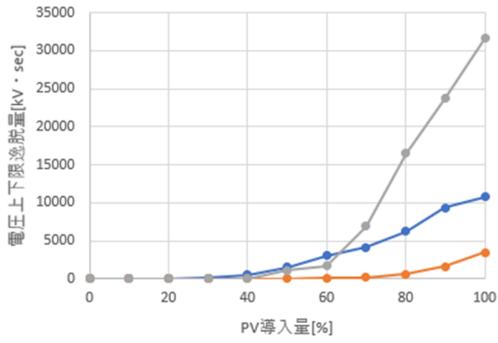
PV 力率 1.0 かつ末端集中配置について、PV 導入量 60%における各制御機器導入パターンでの電圧分布およびタップ位置の日間変動を、図 5.3-16～19 にそれぞれ示す。2 段目の SVR を、次世代 TVR および SVC と入れ替えた場合の制御効果は、概ね D22 系統での結果と同じ傾向である。次世代 TVR を導入すると、高速な電圧制御により 10 秒値での電圧逸脱は大きく低減されるが、30 分移動平均値での評価には大差がない。また、SVC を導入すると、配電系統全体にわたり高速な電圧変動が低減できているが、30 分移動平均値に基づく PV 導入可能容量については、逆に 40%へと低下した結果となっている。1 段目の SVR と SVC との協調制御を適切に設計することが非常に重要であると考えられる。

D22 と同様に、PV 分散配置の場合、ならびに PV 力率 0.95 として連系される場合には、PV 連系による電圧変動への影響が大きく緩和され、SVR のみを用いた場合でも PV 導入可能容量は 90%以上となった。PV 導入量を 60%のままとして、PV 末端集中で力率を 0.95 とした場合の電圧分布およびタップ位置の日間変動を図 5.3-20 に示す。無効電力制御の効果により、D21 においても電圧変動が適切に緩和されていることがわかる。

表 5.3-13 D21 系統における PV 導入可能容量

	R-R	R-T	R-C
PV 力率 1.0 末端集中	60%	60%	40%
PV 力率 1.0 分散	100%	100%	100%
PV 力率 0.95 末端集中	90%	100%	80%
PV 力率 0.95 分散	100%	100%	100%

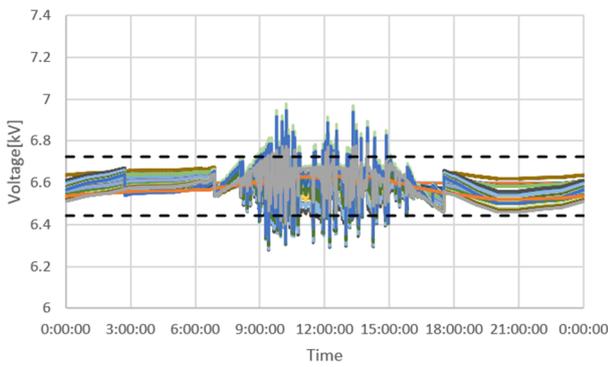
(注)RTC の記号の意味は、それぞれ次の通り：R...SVR、T...次世代 TVR、C...SVC 記号の左から順に、配電系統用変電所側に近い導入箇所での設備を示す。



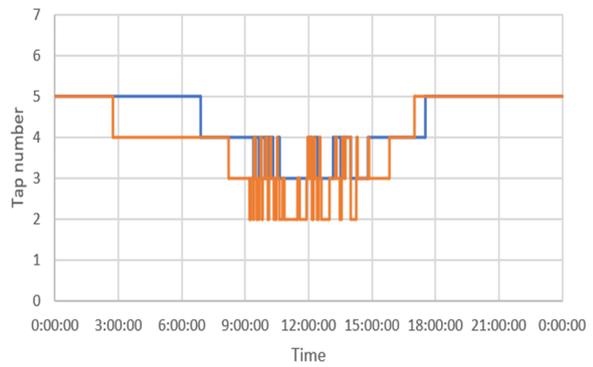
(b) 電圧逸脱量(10 秒値)

(b)タップ制御回数

図 5.3-16 各パターンにおける電圧逸脱量(10 秒値)とタップ制御回数(D21)

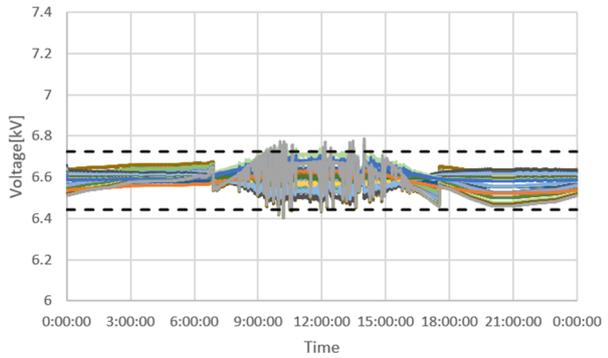


(a)電圧分布

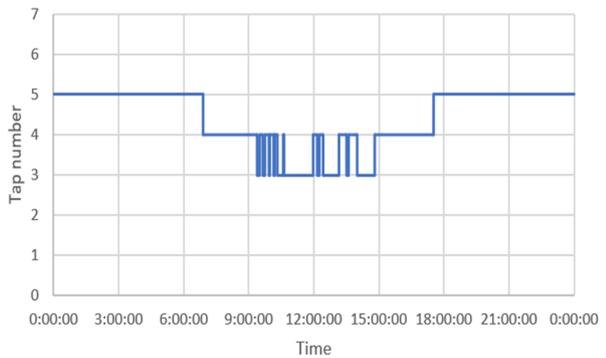


(b)タップ位置

図 5.3-17 解析結果(D21、PV 力率 1.0、末端集中、PV 容量 60%、SVR-SVR)

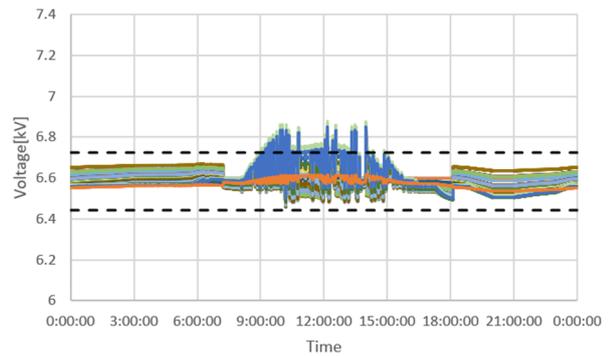


(a)電圧分布

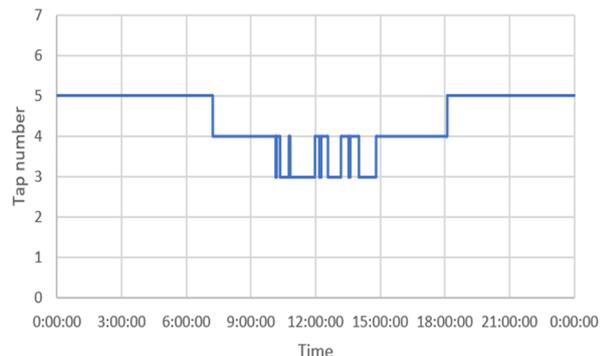


(b)タップ位置

図 5.3-18 解析結果(D21、PV 力率 1.0、末端集中、PV 容量 60%、SVR-TVR)

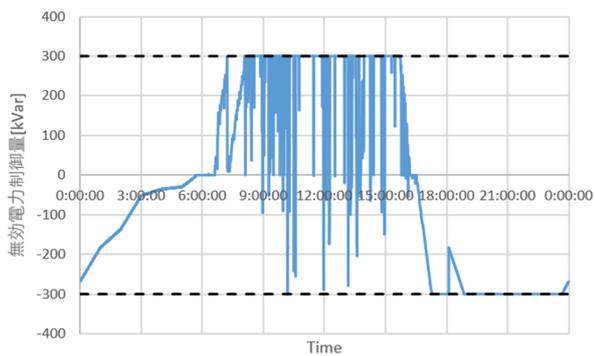


(a)電圧分布



(b)タップ位置

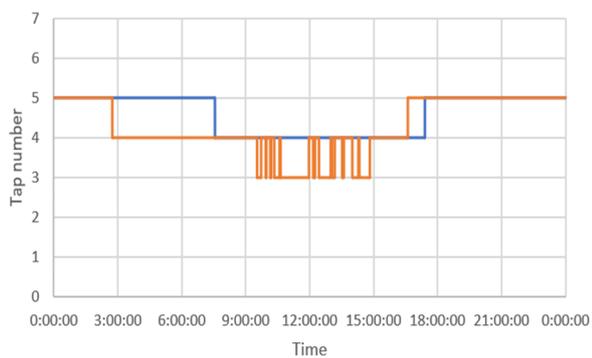
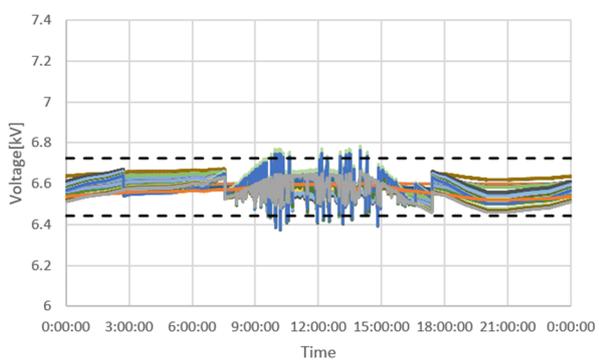
(a)電圧分布



(b)タップ位置

(c)SVC の無効電力制御

図 5.3-19 解析結果(D21、PV 力率 1.0、末端集中、PV 容量 60%、SVR-SVC)



(a)電圧分布

(b)タップ位置

図 5.3-20 解析結果(D21、PV 力率 0.95、末端集中、PV 容量 60%、SVR-SVR)

◎C2 系統における PV 導入可能容量

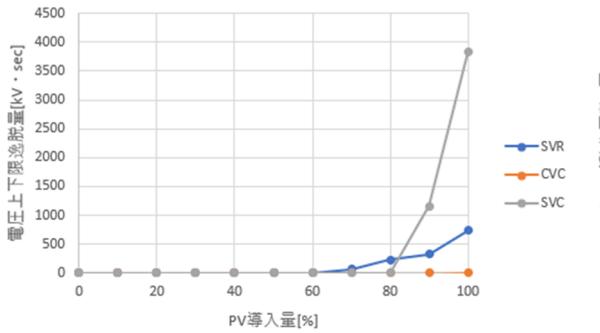
表 5.3-14 に、C2 系統における各パターンでの PV 導入可能容量を示す。また、PV 力率 1.0 かつ末端集中ケースについて、10 秒値での電圧逸脱量ならびにタップ制御回数について図 5.3-21 に示す。本ケースでも、PV 力率 1.0 かつ末端集中の場合は条件が最も厳しいと考えられるが、C2 系統では D22 や D21 と比較してフィーダの亘長はさらに短いため、SVR を用いたパターンにおいても、90%までの PV 導入が可能との結果になった。

PV 力率 1.0 かつ末端集中配置について、PV 導入量 90%における各制御機器導入パターンでの電圧分布およびタップ位置の日間変動を、図 5.3-22～24 にそれぞれ示す。SVR を次世代 TVR に入れ替えると、高速な電圧制御により 10 秒値での電圧逸脱は大きく低減されると共に、30 分移動平均値に基づく PV 導入可能容量も 100%が達成されている。SVC に入れ替えたケースについては、逆に 80%へと低下している。本ケースでは制御対象機器が1台のみであるため、他の機器との協調という観点から問題は生じていないが、図 5.3-24(c)に示した通り、本ケースでは SVC の無効電力制御が上限値に張り付いた状態となっている。フィーダ亘長が短いため無効電力制御による電圧制御感度が十分には大きくないため、想定した 300kVar の容量では十分な効果が得られなかったことが要因と考えられる。

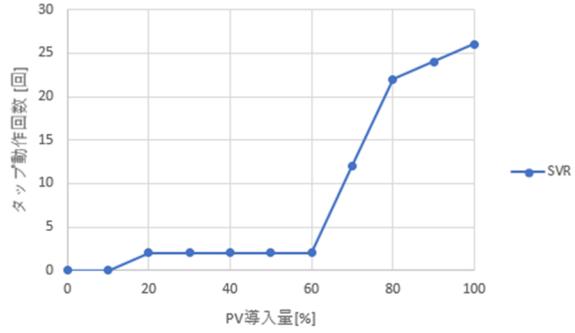
C2 系統においても、PV 分散配置の場合、ならびに PV 力率 0.95 として連系される場合に PV 連系による電圧変動への影響が大きく緩和されることは同一であり、SVR のみを用いた場合でも PV 導入可能容量 100%を達成できている。PV 導入量を 90%のままとして、PV 末端集中で力率を 0.95 とした場合の電圧分布およびタップ位置の日間変動を図 5.3(1)-25 に示す。

表 5.3-14 C2 系統における PV 導入可能容量

	SVR	TVR	SVC
PV 力率 1.0 末端集中	90%	100%	80%
PV 力率 1.0 分散	100%	100%	100%
PV 力率 0.95 末端集中	100%	100%	100%
PV 力率 0.95 分散	100%	100%	100%

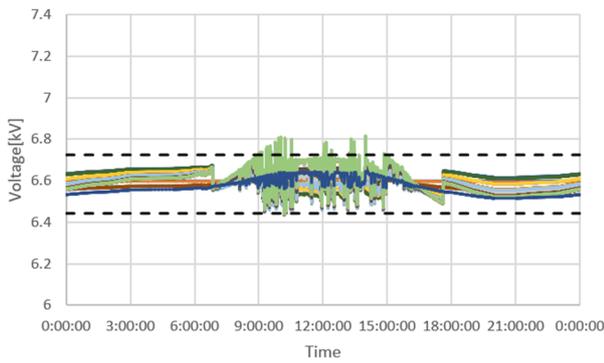


(c) 電圧逸脱量(10秒値)

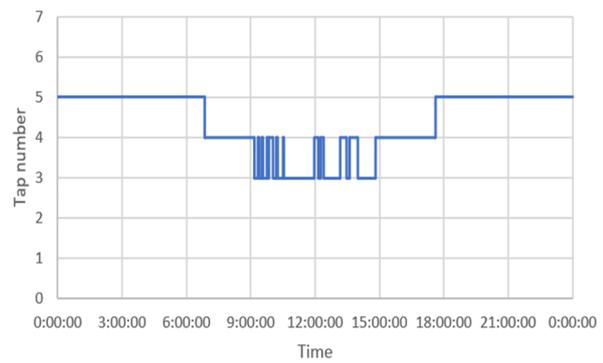


(b)タップ制御回数

図 5.3-21 各パターンにおける電圧逸脱量(10秒値)とタップ制御回数(C2)



(a)電圧分布



(b)タップ位置

図 5.3-22 解析結果(C2、PV 力率 1.0、末端集中、PV 容量 90%、SVR)

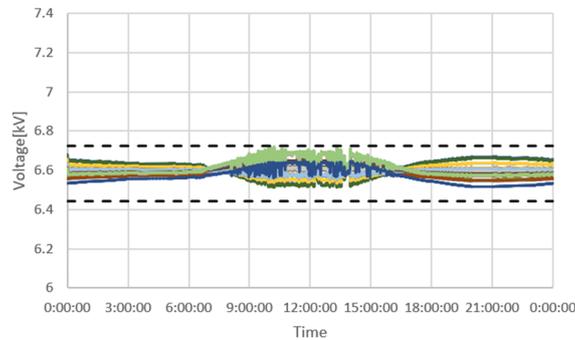
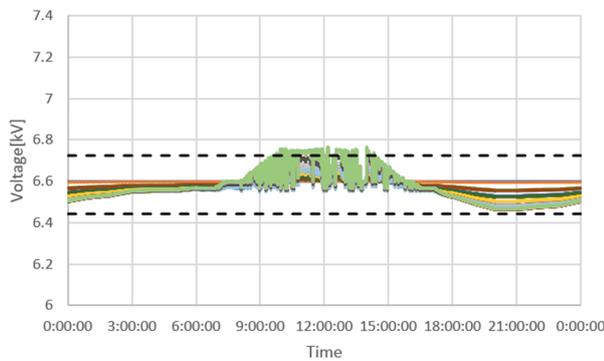
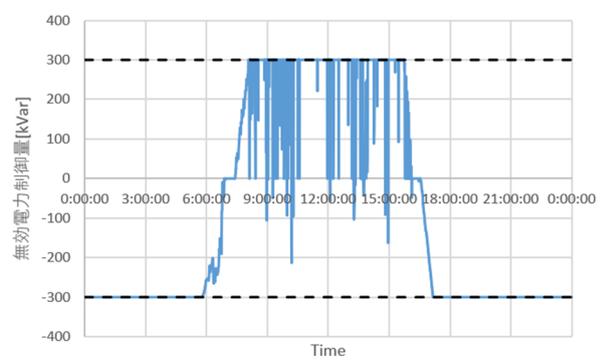


図 5.3-23 解析結果(電圧分布)(C2、PV 力率 1.0、末端集中、PV 容量 90%、TVR)

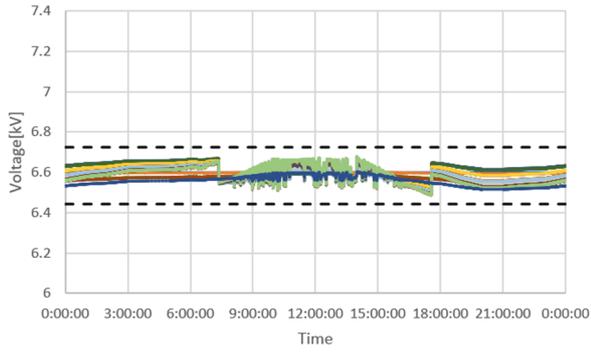


(a)電圧分布

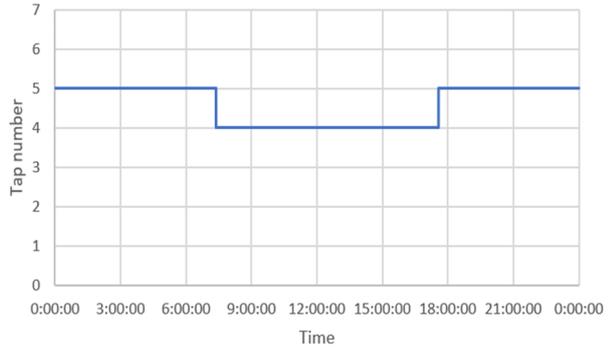


(b)SVC の無効電力制御

図 5.3-24 解析結果(C2、PV 力率 1.0、末端集中、PV 容量 90%、SVC)



(a)電圧分布



(b)タップ位置

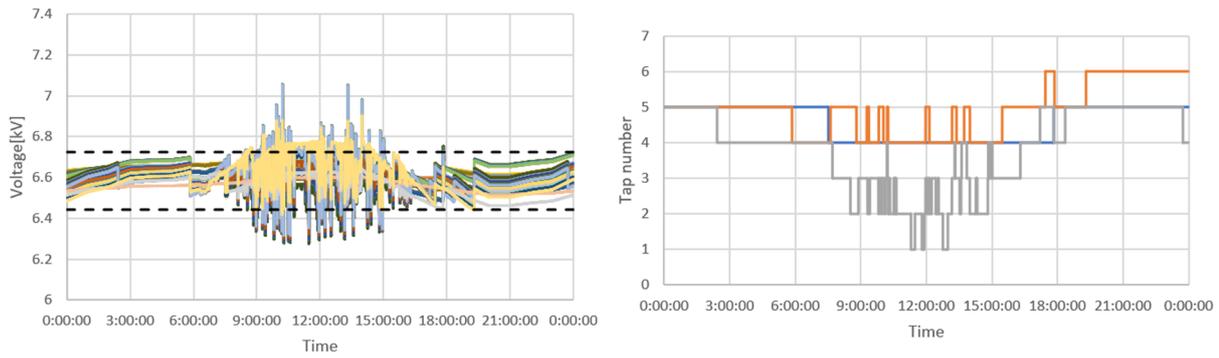
図 5.3-25 解析結果 (C2、PV 力率 0.95、末端集中、PV 容量 90%、SVR)

1. 5. 3(1)⑤2)追加ケース

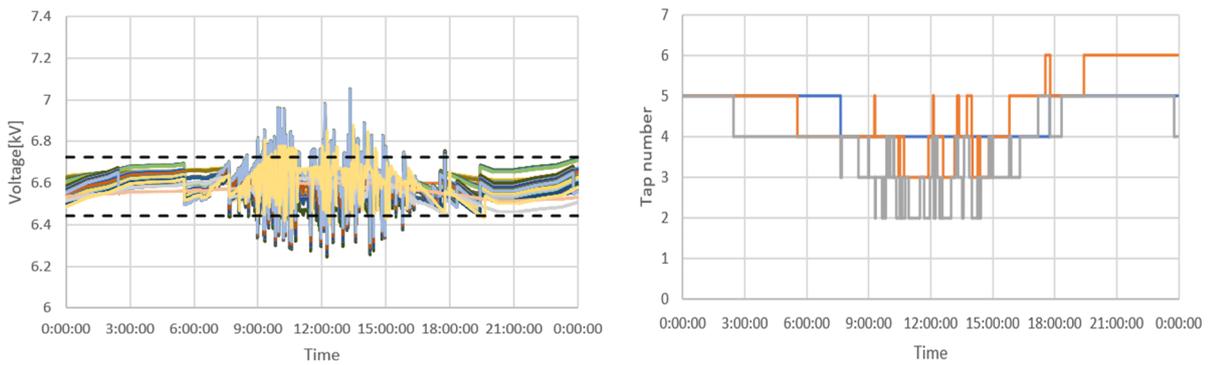
ここまでの数値解析においては、PV の普及拡大に応じて都度 LDC パラメータを最適化していた。しかし現実には、PV の普及に応じて LDC パラメータを随時最適な値に維持することは容易ではないと考えられる。そこで本節では、実運用における最も障壁の低い方法として、PV 導入量の変化に関わらず同一の LDC パラメータを利用し続けた場合の評価についても数値解析を行った。D22 系統において、SVR が 3 台導入されているケースについて、PV が力率 1.0 および末端集中で導入される場合の 30 分移動平均値での評価を表 5.3-15 に示す。LDC パラメータが随時更新される場合では、PV 導入量が 40%までは 30 分移動平均値での電圧分布は適正值となっていたが、LDC パラメータの更新を伴わない場合では、PV 導入量 30%が限界の値となっている。また、PV 導入量 40%において LDC パラメータを更新する場合としない場合の電圧分布とタップ位置の変化を図 5.3-26 に示す。LDC パラメータが更新される場合では、PV 出力が大きい昼間の時間帯を中心にタップ制御がより積極的に働くことで、LDC パラメータの更新無の場合に生じていた定常的な電圧逸脱の発生が回避できている様子がわかる。

表 5.3-15 評価指標(D22、R-R-R:LDC パラメータの更新無)

PV導入量[%]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
電圧逸脱量 (上限) [kV・sec]	0	0	0	0	148.29	199.07	1307.3	6271.6	14487	25205	37066
電圧逸脱量 (下限) [kV・sec]	0	0	0	0	0	0	0	1.1538	0	4.0438	0
電圧逸脱量 (合計) [kV・sec]	0	0	0	0	148.29	199.07	1307.3	6272.8	14487	25209	37066
電圧逸脱時間 (上限) [sec]	0	0	0	0	5740	7180	16610	21210	25500	28320	29830
電圧逸脱時間 (下限) [sec]	0	0	0	0	0	0	0	330	0	270	0
電圧逸脱時間 (合計) [sec]	0	0	0	0	5740	7180	16610	21540	25500	28590	29830
最大電圧[kV]	6.7109	6.7109	6.7109	6.7109	6.7638	6.7641	6.8023	6.8714	6.9553	7.0296	7.0947
最小電圧[kV]	6.4565	6.4494	6.4537	6.4542	6.4546	6.4486	6.4555	6.4404	6.4519	6.4351	6.4565
タップ動作回数	8	20	28	70	73	97	113	101	97	89	73



(a)LDC パラメータ更新無(左:電圧分布、右:タップ位置)



(b)LDC パラメータ更新有(左:電圧分布、右:タップ位置)

図 5.3-26 解析結果(D22、PV 力率 1.0、末端集中、PV 容量 40%、SVR-SVR-SVR)

1. 5. 3(1)⑥解析のまとめ

以上、PVの導入拡大ならびに対応して、SVRを次世代TVRやSVCに入れ替えた場合を想定した電圧分布解析について述べた。本文中では、特に電圧適正化の観点から問題が生じやすいPV力率1.0かつ末端集中配置のケースに着目して、試算を取りまとめた結果について述べたが、その他の全パターンの試算結果については、付録(1)に示した。以下に、得られた知見を整理したものを示す。

- ・ PVの導入拡大に伴い、一番条件が厳しい力率1.0かつ末端集中配置の場合では、最も亘長の長いD22系統において、PV40%程度の導入量で、おおよそ30分移動平均値での電圧逸脱の観点から導入限界に到達する。LDCパラメータが更新されない場合には30%が導入限界となる見込みでもあり、今後の一層のPV普及拡大に対応するためには、運用面もしくは設備面での対策が必要になる。
- ・ 現状設備のままでの運用面での対策としては、LDCパラメータ設定の高度化が挙げられ、PV導入量に応じた適切なパラメータを与えることで、PV導入量を10%ほど増加可能と期待できる。
- ・ 設備面の観点から、SVRを次世代TVRもしくはSVCに入れ替えた場合、まず、10秒値での電圧変動は大きく低減できる。10秒値の電圧変動もしくは電圧逸脱量は、本研究開発ではPV導入容量を決める要因とはしなかったが、電力品質の観点から、10秒値の電圧変動の緩和は効果があると考えられる。
- ・ 次世代TVRを導入した場合、30分値ではSVRに対してPV導入容量を増加できるケースもあるが、差は比較的小さい。
- ・ SVCを導入した場合、30分値ではSVRに対してPV導入容量を増加できるケースもあるが、逆に低下してしまうケースが多く見られる。SVCの配置をフィーダ末端ではなく区間の末端と設定したこと、ならびにSVC・SVRの制御パラメータが相互の協調動作を十分考慮した設計になっていないことが原因と考えられる。自端制御に基づいてSVRとSVCの協調を取る方法は十分に確立されていないと考えられ、集中制御の適用が有効な対策の一つとなる可能性がある。
- ・ PVの力率を落とした連系およびPVの分散配置は、PV普及による電圧変動の緩和に大きく寄与すると期待される。今後どのような対策が最も経済効率的であるか、慎重に検討する必要があると思われる。

◎付録

付録(1)として以下のデータを示した。

付録(1)1:全パターンを通じた解析結果の表による整理(評価指標)

付録(1)2:全パターンを通じた解析結果のグラフによる整理(評価指標)

付録(1)3:全パターンでの解析結果(電圧、タップ位置、無効電力制御)

◎参考文献

[1] 電気協同研究会:“配電系統の高調波防止対策”、第 37 巻、第 3 号、1981 年

[2] NEDO:“集中連系型太陽光発電システム実証研究”

[3] 松田勝弘、二上貴文、堀越和宏、瀬戸寿之、渡辺雅浩、村越潤、高橋玲児「計測情報に基づく SVR の LDC 整定および制御アルゴリズムの検討」、電気学会論文誌 B、132 巻、8 号、pp.701-708 (2012)

[4] 上村敏、三宅靖彦「配電系統総合解析ツールの開発(その2)-PV 連系検討機能の追加と実用性の向上-」電力中央研究所報告、R15024 (2016)

[5] 系統連系規程

1. 5. 3(2) 電圧制御方式の検討

1. 5. 3(2)① 検討の目的

前項では、電力会社の運用を念頭において重回帰分析により自端制御の設定パラメータを設定した(重回帰分析)。重回帰分析では、SVR を通過する有効電力、無効電力、電圧の関係から LDC 方式の推定精度を最大化するように制御パラメータを設定するが、機器間の協調や SVC 等の無効電力との協調を考慮することが困難である。パラメータの最適化により機器間の協調や機器単体の制御性能の向上が可能となり、総合的に自端制御の制御性能を向上させることが可能となる。そこで、本項では最適化計算により算定された制御パラメータを用いた制御性能と従来手法に基づく制御性能を比較することで、従来手法によるパラメータ設定の有効性を PV 導入可能量の観点から比較・検証する。

1. 5. 3(2)② 検討概要

検討条件については従来手法と比較を行うため、前項と同様のケースで検証を実施し、各検証ケースに対して制御機器の設定パラメータを最適することで制御限界を算定する。本検討で最適化する対象機器は SVR と次世代 TVR とし、制御性能に関連するパラメータである %R、%X を最適化することで制御性能の向上を図る。また、SVR を次世代 TVR に置き換えにより電圧を適正範囲に維持可能なパラメータ設定範囲の変遷を定量的に評価することで、連続電圧制御機器がパラメータ設定に与える影響について評価を行う。

1. 5. 3(2)③最適化問題の定義

制御機器の設定パラメータを最適化対象として、制御性能を最大化させるパラメータを決定する最適化問題として定義する。式(1)、式(2)に各制御機器の%R、%Xより構成されるパラメータの組み合わせを示す。式(3)～式(5)に制約条件を示す。電圧制約条件は電気事業法施行規則代三十九条第三項で規定されている電圧の測定方法に基づき、全ノードの30分移動平均電圧が適正電圧範囲内に収まることを条件とした。式(4)、(5)に示す設定パラメータの探索範囲は標準的なLDC方式のパラメータ設定可能な範囲として、0%から24%まで1%刻みでパラメータを離散化した。30分移動平均電圧が適正範囲に維持可能なパラメータ候補のうち、計算時間刻みの電圧逸脱を最小化するパラメータを最適パラメータとして評価し、式(6)と式(7)より構成される電圧逸脱率を目的関数として定義する。電圧逸脱率は計算時間断面ごとの電圧逸脱判定値をシミュレーション時間全体での合計値をシミュレーション時間で除算することで、算出する。電圧逸脱率は瞬時の電圧逸脱を評価する指標で、電圧逸脱率を最小化することで瞬時の電圧制御性能を最大化することを目的としている。また、配電系統に複数台電圧制御機器が設置されたケースにおいて、設置台数に応じてパラメータの組み合わせ数が指数関数的に増加するため、全数を探索することは現実的な時間内では不可能である(2台設置されたケースでは約39万通り、3台設置されたケースでは2.4億通りとなる)。そこで複数台電圧制御機器が設置されたケースでは現実的な時間内に最適解を導出するため、変電所を上流、フィーダ末端を下流として上流に設置されるSVR(次世代TVR)から順次最適化を実施する。階層式に最適化を実施することで組み合わせ数を大幅に削減することができ、現実的な時間範囲内で最適解を導出することが可能となる。電圧制御機器の管理区間は下流側に設置される電圧制御機器の1次側までとし、上流側の電圧制御機器動作を前提として、管理区間の最適な電圧制御性能を担保することが可能となる(図5.3-27参照)。ただし、本手法で最適化された設定パラメータは厳密解とはならず、局所的な最適解(準最適解)となる可能性があることに注意が必要である。

[探索パラメータ]

$$\mathbf{R} = [R_1 R_2 \cdots R_N] \quad (1)$$

$$\mathbf{X} = [X_1 X_2 \cdots X_N] \quad (2)$$

ただし、 \mathbf{R} :%R ベクトル、 \mathbf{X} :%X ベクトル、 R_i :i 番目機器の%R 設定値、 X_i :i 番目機器の%X 設定値

[制約条件]

$$\underline{V} \leq \forall V_{avg}(t, \mathbf{R}, \mathbf{X}) \leq \bar{V} \quad (3)$$

$$0 \leq R_i \leq R_{max} \quad (4)$$

$$0 \leq X_i \leq X_{max} \quad (5)$$

ただし、 \underline{V} : 適正電圧下限値、 \bar{V} : 適正電圧上限値、 V_{avg} : 30 分移動平均電圧、 R_{max} : %R 設定範囲の最大値、 X_{max} : %R 設定範囲の最大値

[目的関数]

$$VT(t, \mathbf{R}, \mathbf{X}) = \begin{cases} 0 & (\underline{V} \leq \forall V(t, \mathbf{R}, \mathbf{X}) \leq \bar{V}) \\ 1 & otherwise \end{cases} \quad (6)$$

$$F(\mathbf{R}, \mathbf{X}) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T VT(t, \mathbf{R}, \mathbf{X}) \cdots \cdots \cdots Minimize \quad (7)$$

ただし、VT:電圧逸脱判定値、T: シミュレーション時間、F: 電圧逸脱率

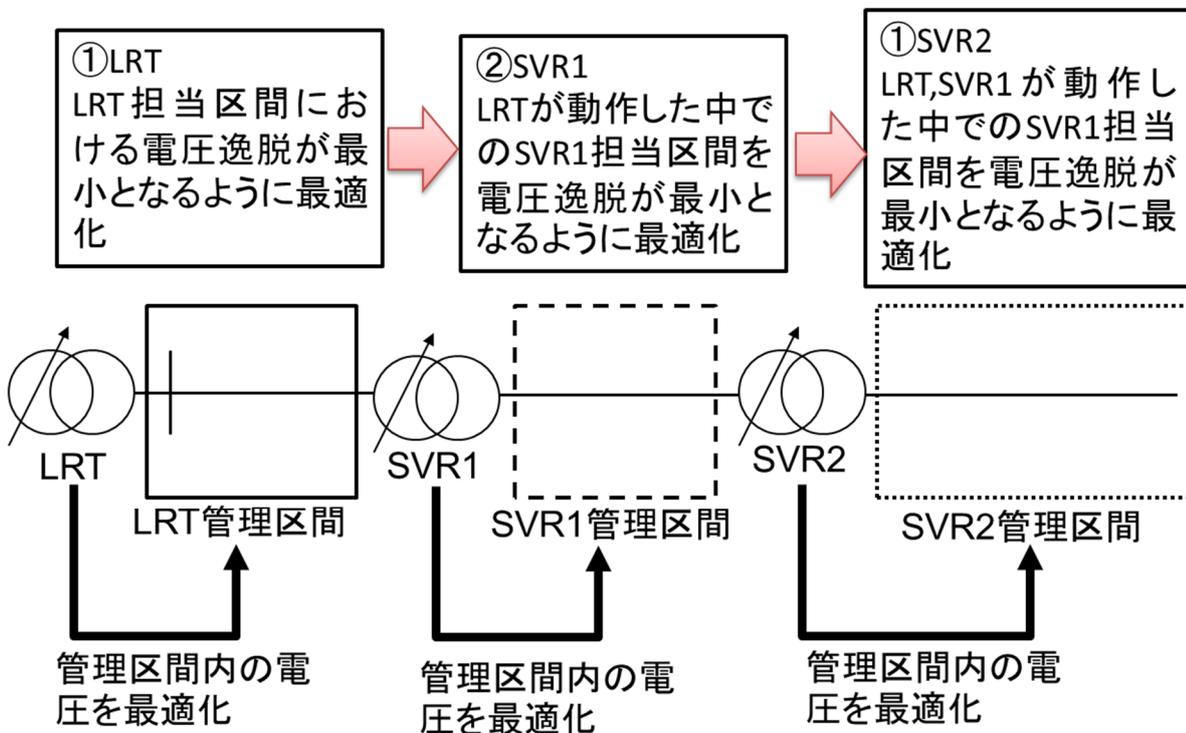


図 5.3-27 電圧制御機器の最適化手順

1. 5. 3. (2)④シミュレーション概要

検討に用いる配電システムモデルは実施項目 1.5.3 で記載している 2 つの配電システムモデル(C2、D21)を用いて検討する。表 5.3-16 にシミュレーション条件と制御機器の設定値を示す。実施項目 1.5.3 で算出された%R と%X は現行の運用方式を念頭におき、重解析分析によりパラメータ整定を行った手法であるため、本項目では従来整定は重回帰分析と呼び、最適に基づいた制御手法は最適化計算と呼ぶ。重回帰分析によりパラメータ整定したケースと最適整定を行ったときのケースについて PV 導入可能量を用いて、制御性能の検証を行う。また、現行方式により算出された整定パラメータと最適化計算により算出されたパラメータを比較することでパラメータ整定方法について検討を行う。

表 5.3-16 シミュレーション条件と制御機器の設定値

項目		設定値
PV 導入率 [%]		10～100(10%刻み)
力率		0.95、1
PV 分布形態		均等、末端集中
柱上変圧器タップ比		6600V/105V
SVR	不感帯 [%]	1.5
	動作時限 [%・sec]	60、90、120
	LDC 方式	ベクトル方式
SVC	上限逸脱判定電圧[V]	105(低圧換算値)
	下限逸脱判定電圧[V]	104.5(低圧換算値)

1. 5. 3. (2)⑤最適パラメータ適用時における制御性能の比較

◎配電システムモデル(C2)における検証結果

配電システムモデル C2 は配電システム内に制御機器が 1 台設置されたモデルであり、本項目では最適化計算との比較による制御性能評価と次世代 TVR の置き換えがパラメータに与える影響をパラメータの整定可能範囲(以下、実行可能解)を比較することで検証する。図 5.3-28 に重回帰分析と最適化計算における PV 導入可能量を示す。重回帰分析と最適化計算ともに PV 導入可能量はおおむね一致しており、電圧制御機器が 1 台設置されるケースにおいて、重回帰分析を用いた整定で十分な制御性能となることを確認した。PV 導入可能量に変化が生じたケースの系統条件は PV が末端集中、力率 100%のケースとなり、最適化計算のほうが 10%増加する結果となった。図 5.3-29 に PV 導入量に差が生じた PV 末端集中、PV 導入量=100%、力率 1.0 のケースにおける重回帰分析と最適化計算による 10 秒値と 30 分の移動平均値の電圧を示し、図 5.3-30 にタップ位置を示す。電圧が最大となる時間(11 時付近)において、重回帰分析を適用したケースでは上限逸脱が発生しているのに対して、最適化計算を適用したケースではタップ位置を低めに制御することで上限電圧逸脱を回避していることが図 5.3(2)-29 より確認できた。図 5.3-31 に SVR の PV 導入率 90%と PV 導入率 100%における実行可能解を示す。PV 導入率 90%の場合では、重回帰分析で算出したパラメータが実行可能解に内包されているのに対して、PV 導入率 100%の場合では実行可能解が減少し、実行可能解の範囲外に重回帰分析によるパラメータが整定されている。しかし、PV 導入率が 100%時の整定可能なパラメータの候補は 1 通りであり、このパラメータを整定するためには負荷需要・PV 発電量を事前に把握する必要があり、実運用を考慮すると最適解を整定することは困難である。以上より、電圧制御機器が単機で設置されるケースにおいて、重回帰分析を用いてパラメータを決定することは最適なパラメータと同等程度の精度でパラメータ整定が可能であり、制御性能を最大化できることから PV 導入可能量も限界値となる。

次世代 TVR の設置がパラメータ整定に与える影響について、SVR の実行可能解と比較することで検証を行った。図 5.3-32 に系統条件として PV が末端集中、力率 1、PV 導入率=100%における SVR と次世代 TVR の実行可能解を示す。SVR では実行可能解は 1 つであったのに対して、次世代 TVR では実行可能解は 9 つに増加している。SVR の実行可能解が減少する要因として、PV 導入率が増加することで最小電圧と最大電圧の差が大きくなり、SVR のようにタップ幅が固定されている制御機器では離散的にしか電圧制御を行えないことが実行可能解を減少する原因である。一方で、次世代 TVR を設置することで連続的に電圧制御することが可能となり、運用可能なパラメータ数が増加することを確認した。 $\%R$ 、 $\%X$ は電圧制御機器の推定精度を規定するパラメータであり、整定次第では大きな推定誤差が発生する。SVR のタップ幅は離散的であり、推定誤差が電圧制御に与える影響が大きい。次世代 TVR は電圧を連続制御が可能となるため、推定誤差が電圧制御に与える影響は軽微である。そのため、次世代 TVR を適用するは推定誤差に起因する電圧の制御性能の低下を抑えることができるといえる。

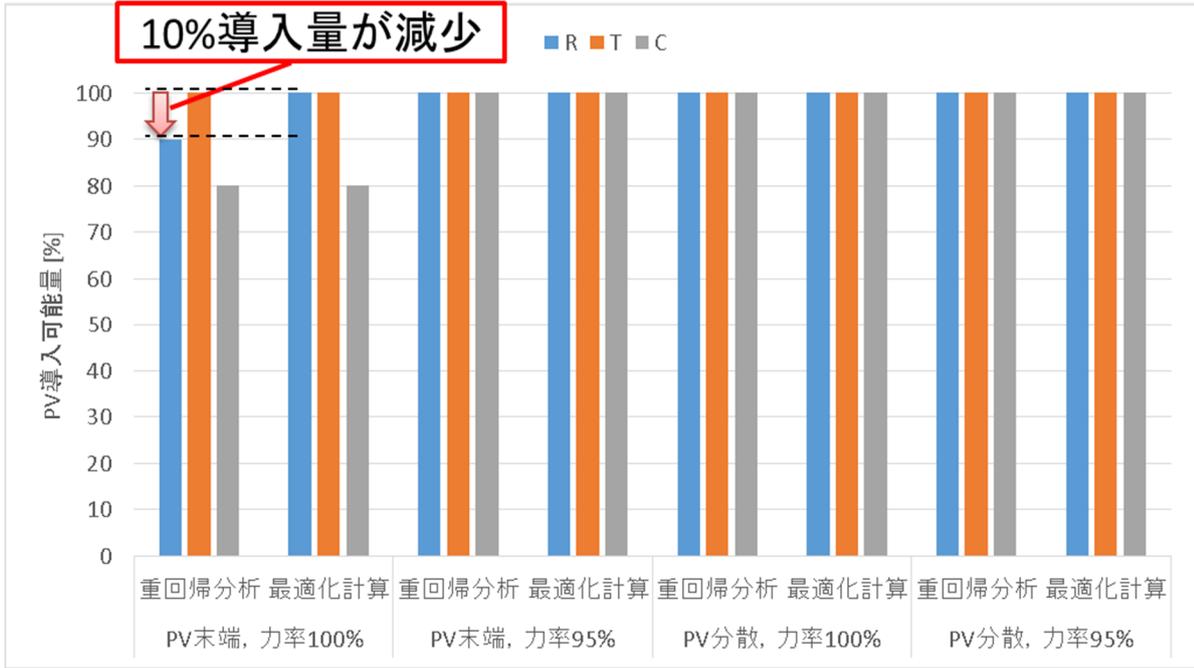
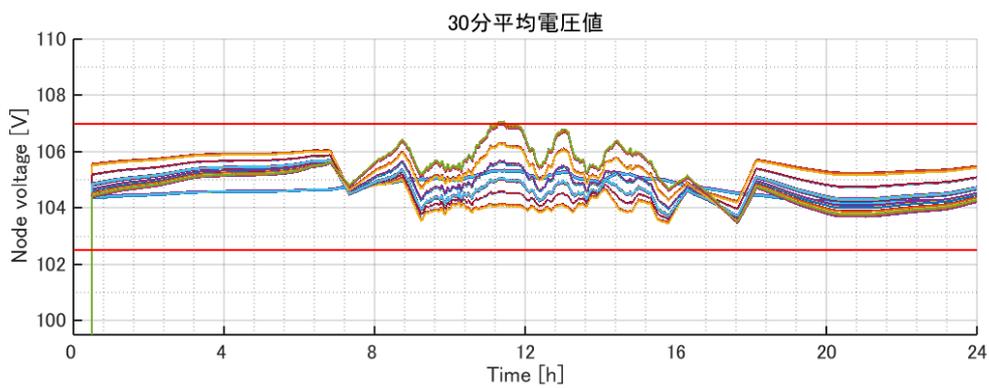
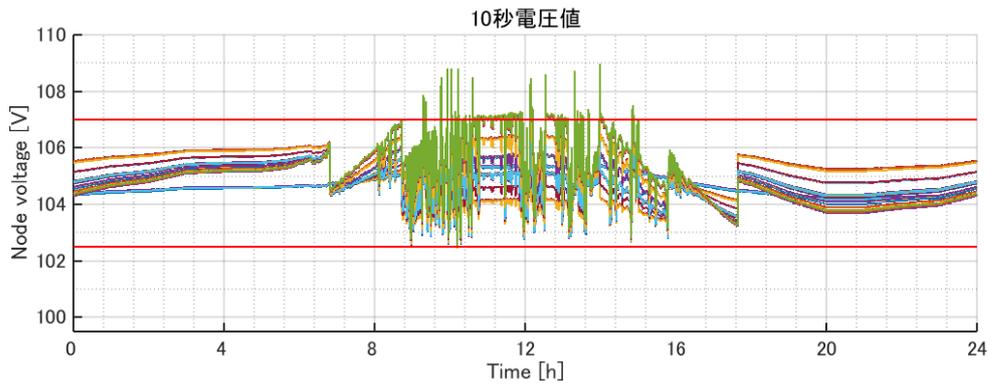
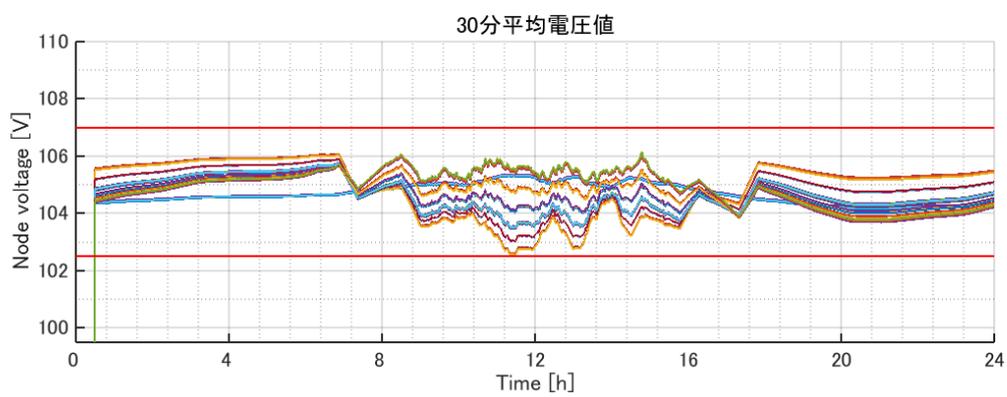
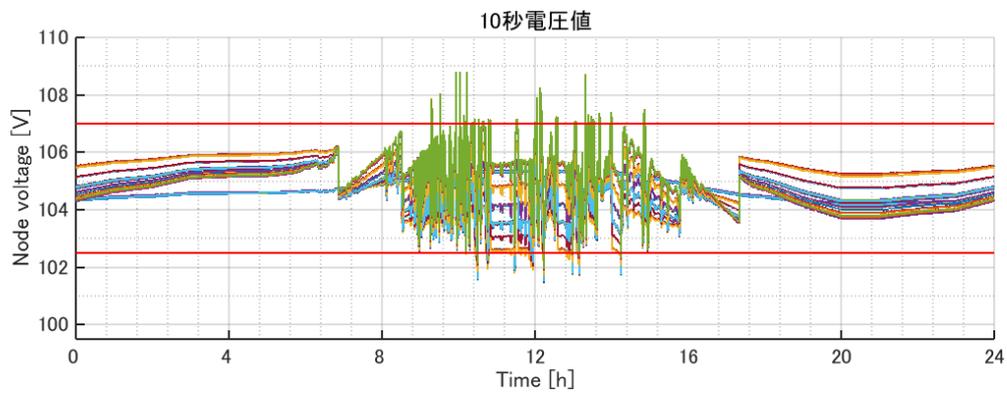


図 5.3-28 配電システムモデル(C2)における PV 導入可能量

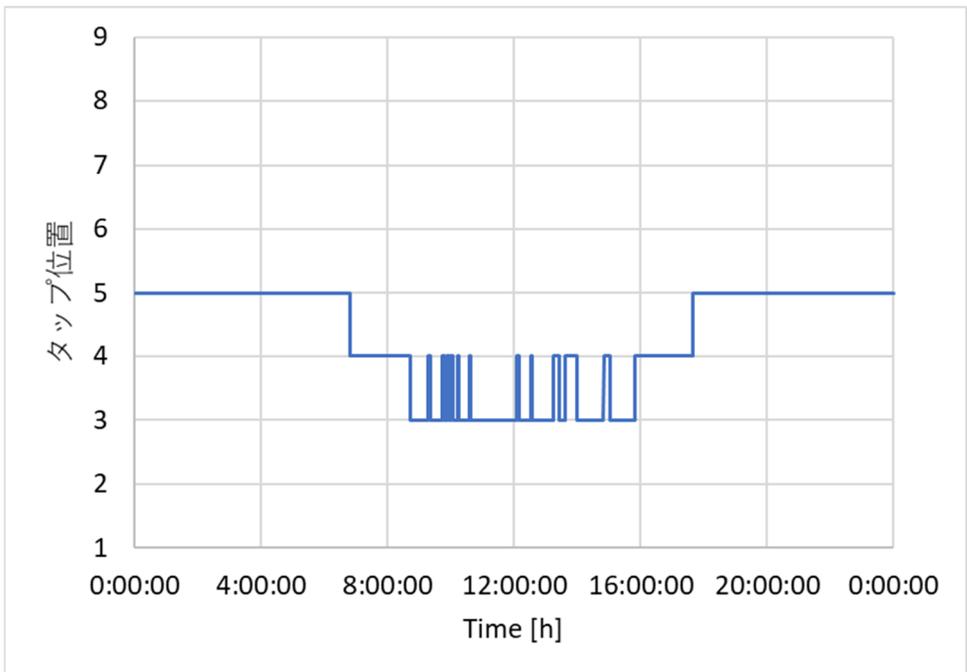


(a) 重回帰分析

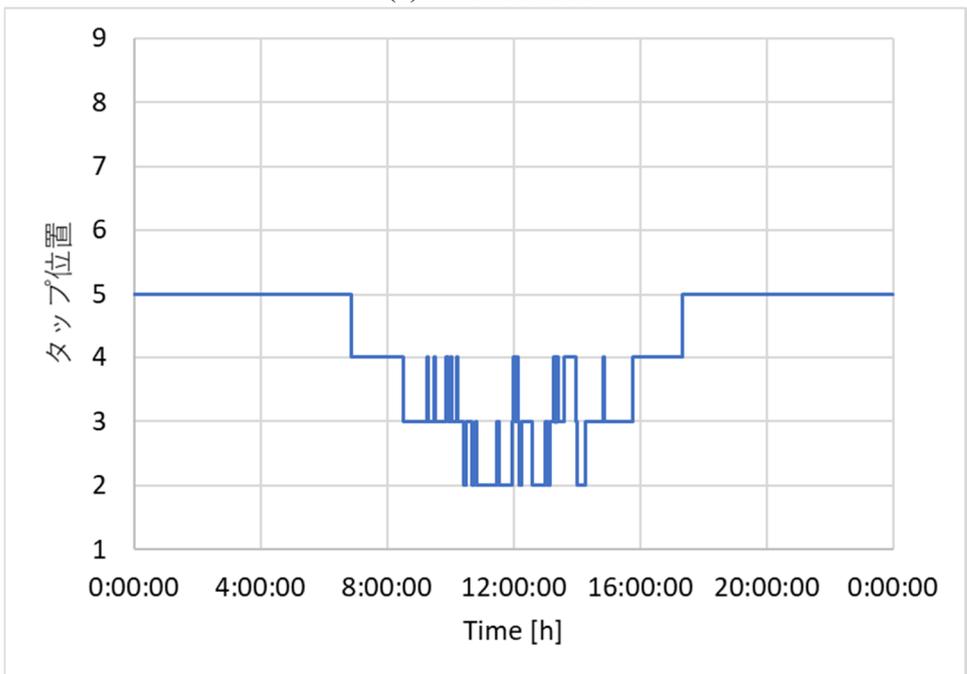


(b) 最適化計算

図 5.3-29 SVR における各制御方式適用時の電圧制御結果
(末端、PV 導入率=100%、力率=1.0)

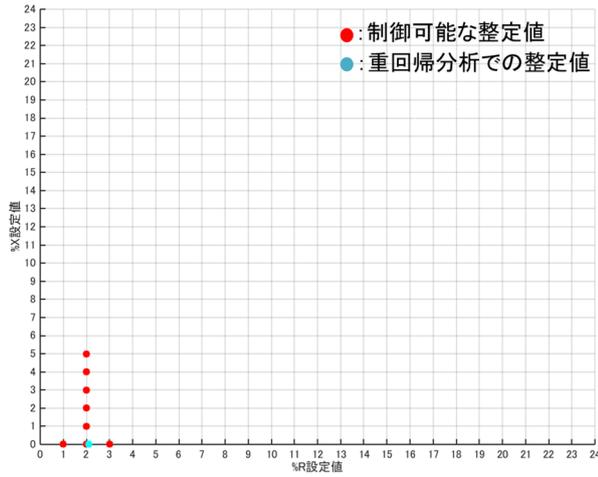


(a) 重回帰分析

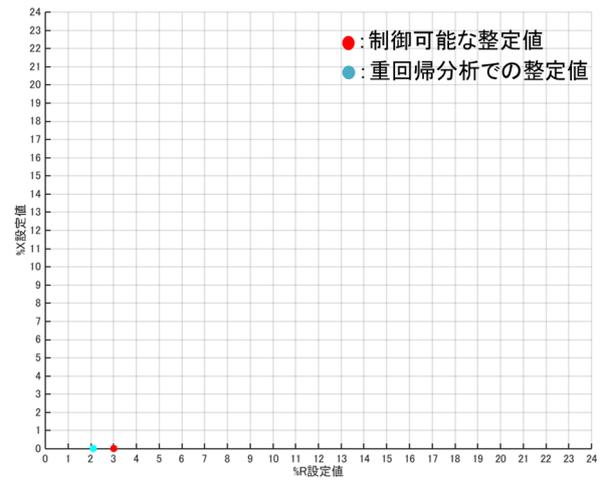


(b) 最適化計算

図 5.3-30 SVR における各制御方式適用時のタップ位置
(末端、PV 導入率=100%、力率=1.0)

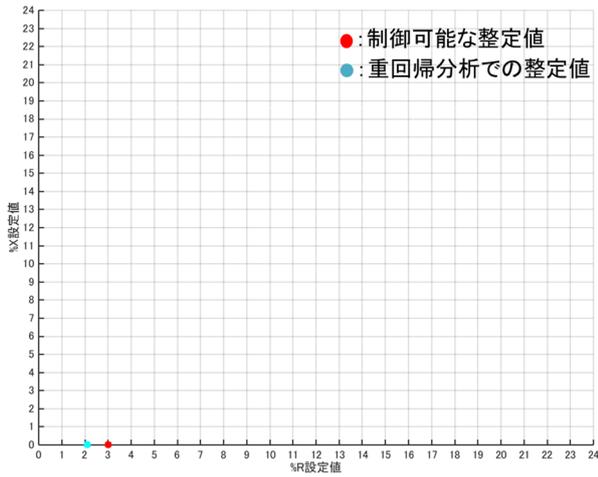


(a) PV 導入率=90%

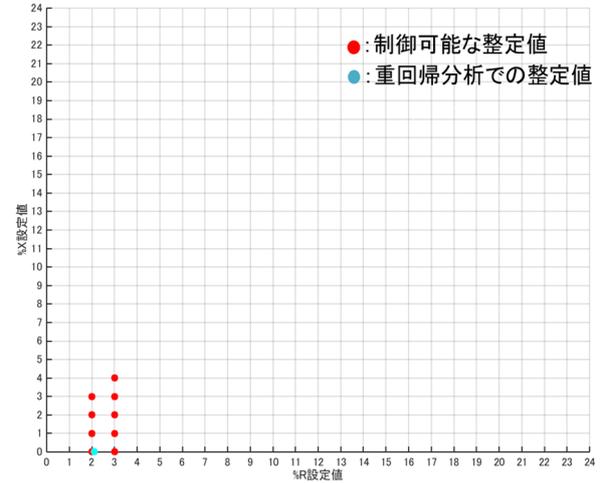


(b) PV 導入率=100%

図 5.3-31 配電システムモデル(C2)における実行可能解(末端、力率=1.0)



(a) SVR



(b) 次世代 TVR

図 5.3-32 配電システムモデル(C2)における実行可能解
(末端、PV 導入率=100%、力率=1.0)

◎配電系統モデル(D21)における検証結果

配電系統モデル D21 は配電系統内に制御機器が 2 台設置されたモデルであり、本項では重回帰分析と最適化計算について、機器間の協調動作の観点から比較・検証を行う。図 5.3-33 に各条件における重回帰分析と最適化計算における PV 導入可能量を示す。最適化計算の方が重回帰分析よりも PV 導入可能量が同等以上の結果となった。図 5.3(2)-33 に示す SVR と SVC を導入したケースにおいて、PV 導入可能量の差が顕著となり、PV 導入可能量が最大 20%増加する結果となった。導入量が減少した要因は SVR によるタップ制御と SVC の無効電力制御との協調ができていなかったことに起因する。以降は PV 導入可能量の増加が顕著となる PV 末端集中、力率 1.0、0.95 のケースに着目して考察を行う。SVC が導入されたケース(PV 末端集中、PV 導入量=90%、力率 0.95)における重回帰分析と最適化計算の電圧波形を図 5.3-34 に示し、図 5.3-35 に SVC 出力と SVR のタップ位置を示す。重回帰分析を適用時に PV 出力が最大となる時間に上限逸脱が発生しており、SVR タップ位置が変化していないことから、電圧制御が SVC に偏っていることが分かる。一方で、最適化計算の適用時においては、図 5.3-34 より上限逸脱が解消されていることが分かる。図 5.3-35 の SVC 出力と SVR タップ位置から、PV 出力が最大となる時間帯において SVC 出力と SVR タップ位置を制御することで電圧制御している。具体的には、SVR のタップ位置を下げ方向に制御し、過制御により下限電圧が発生する部分を SVC により補償して電圧全体を制御しており、SVR と SVC 間で協調制御ができていないことが確認できる。重回帰分析では SVC の動的な制御を考慮することが難しいため、協調が可能な整定方法が必要となる。SVC は連系点電圧に応じて、制御を行うため、事前に系統内の潮流状態(事前潮流)を把握することはできないため、重回帰分析により協調制御が可能な制御パラメータを整定することは困難である。一方で、力率一定制御のように系統内の無効電力が想定可能な状態では事前に系統内の潮流状態を把握することができ、重回帰分析を用いることで制御性能を向上させることは可能である。なお、PV 分散・力率 100%のケースにおいて、最適化計算の PV 導入可能量が下回っているが、%R、%X を離散化したことで運用可能なパラメータを選定できなかったことが原因と考えられる。

次世代 TVR の置き換えによる効果について、SVR 設置したケースと PV 導入可能量の観点から比較する。図 5.3(2)-7 より PV 導入可能量を比較すると、次世代 TVR を設置することで、どのケースにおいても同等以上となることが分かる。次世代 TVR では電圧を連続制御ができることで、SVR のような離散的に電圧制御する機器では制御が困難となる電圧に対して、有効であり、PV 導入可能量を増加させることができる。また、次世代 TVR の実行可能解は SVR よりも多くなり、制御パラメータの設定が容易である。

重回帰分析によるパラメータ
 整定ではSVCとの協調が困難
 となるため、PV導入量が減少

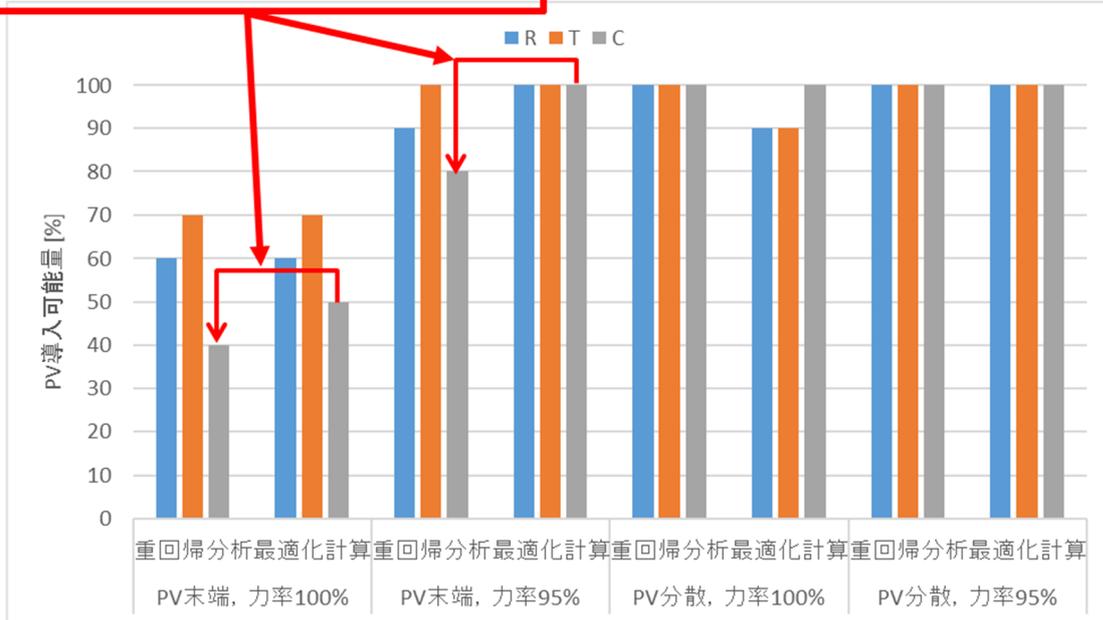
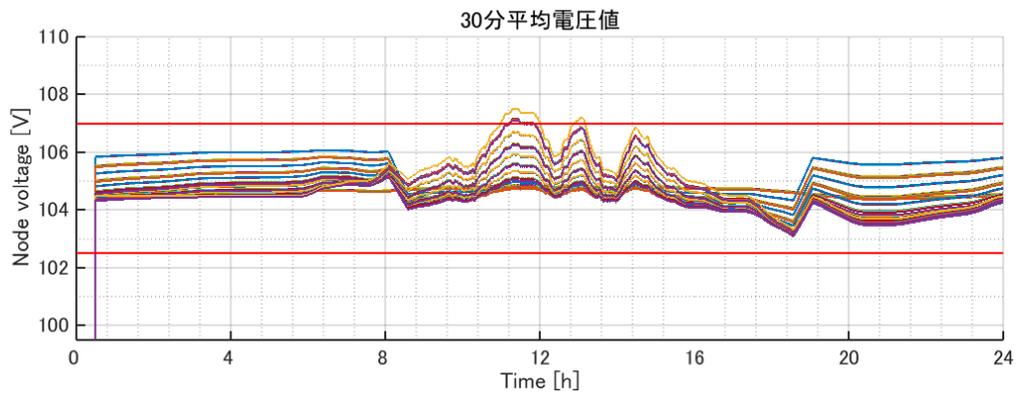
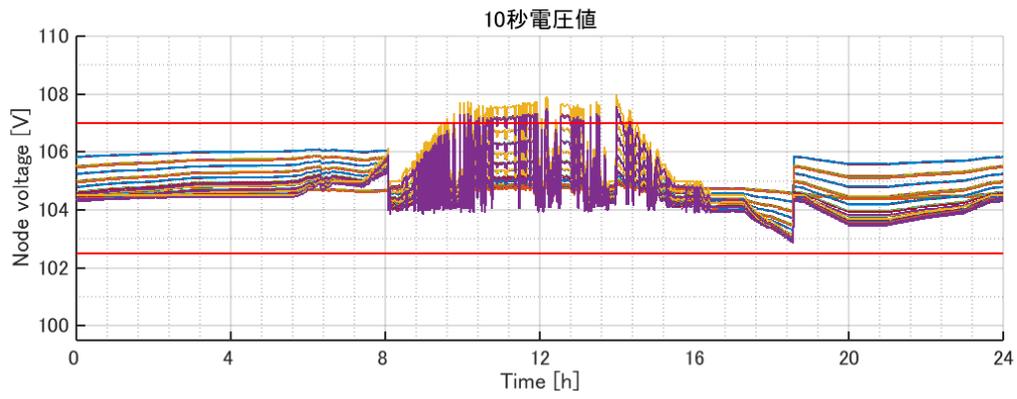
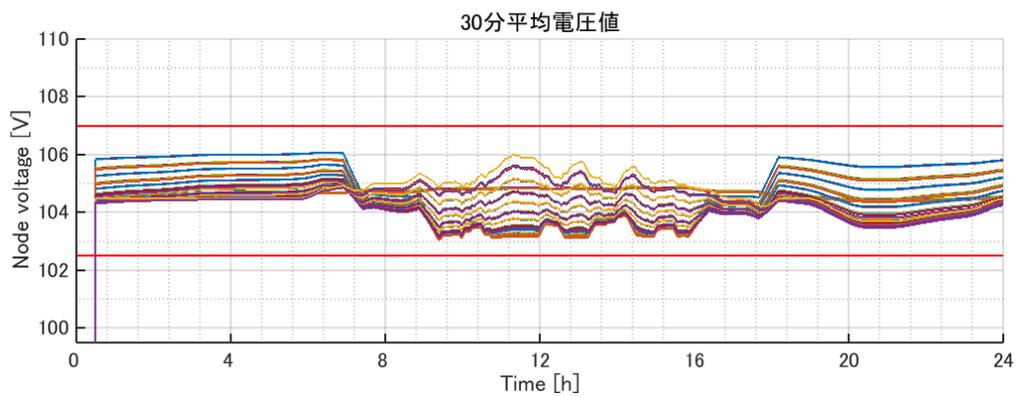
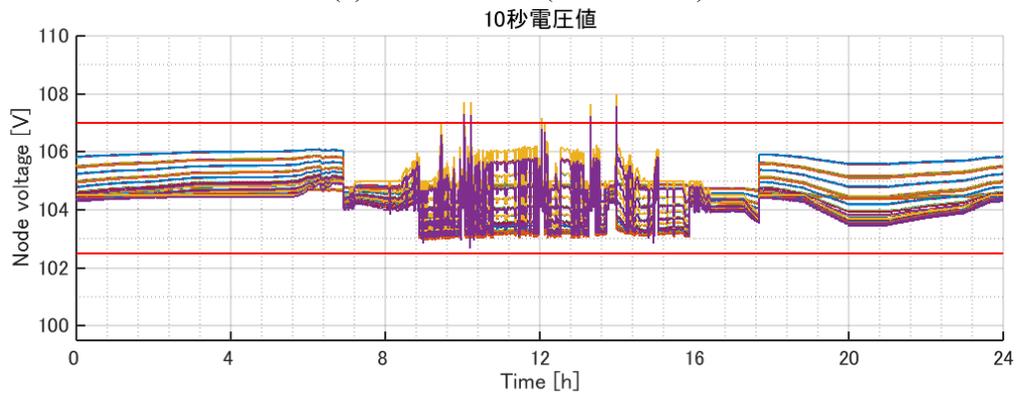


図 5.3-33 配電システムモデル(D21)における PV 導入可能量

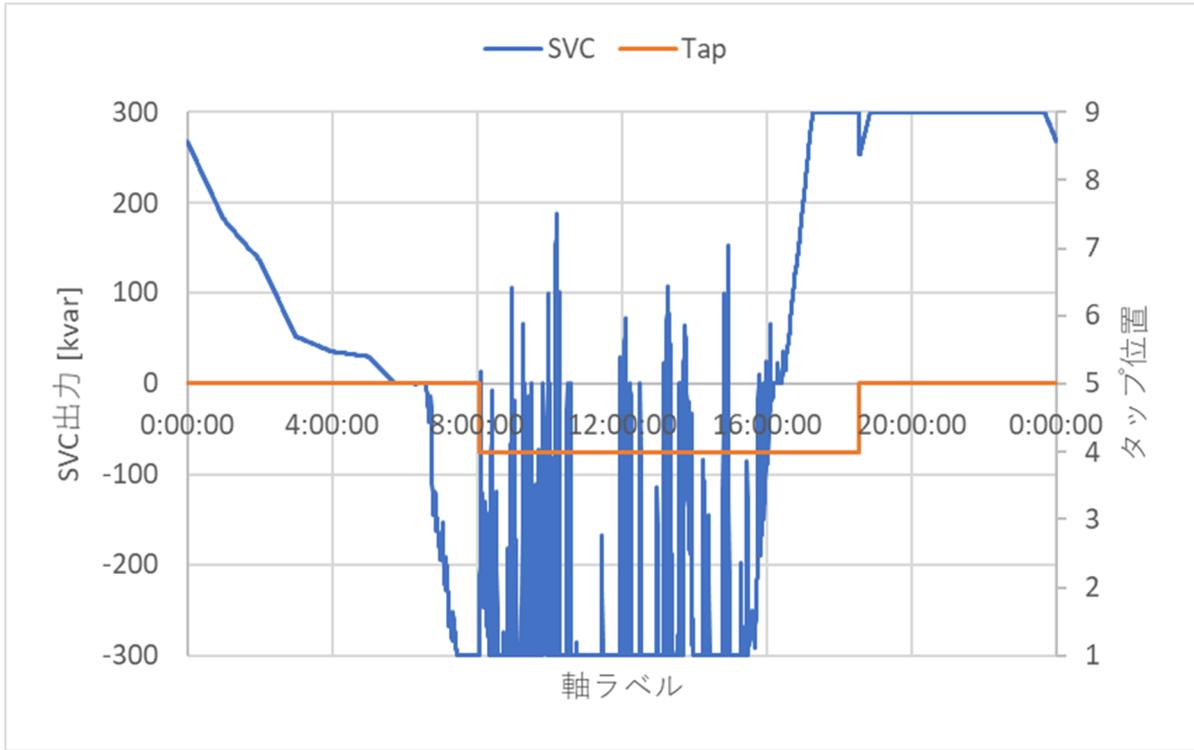


(a) 重回帰分析(SVR+SVC)

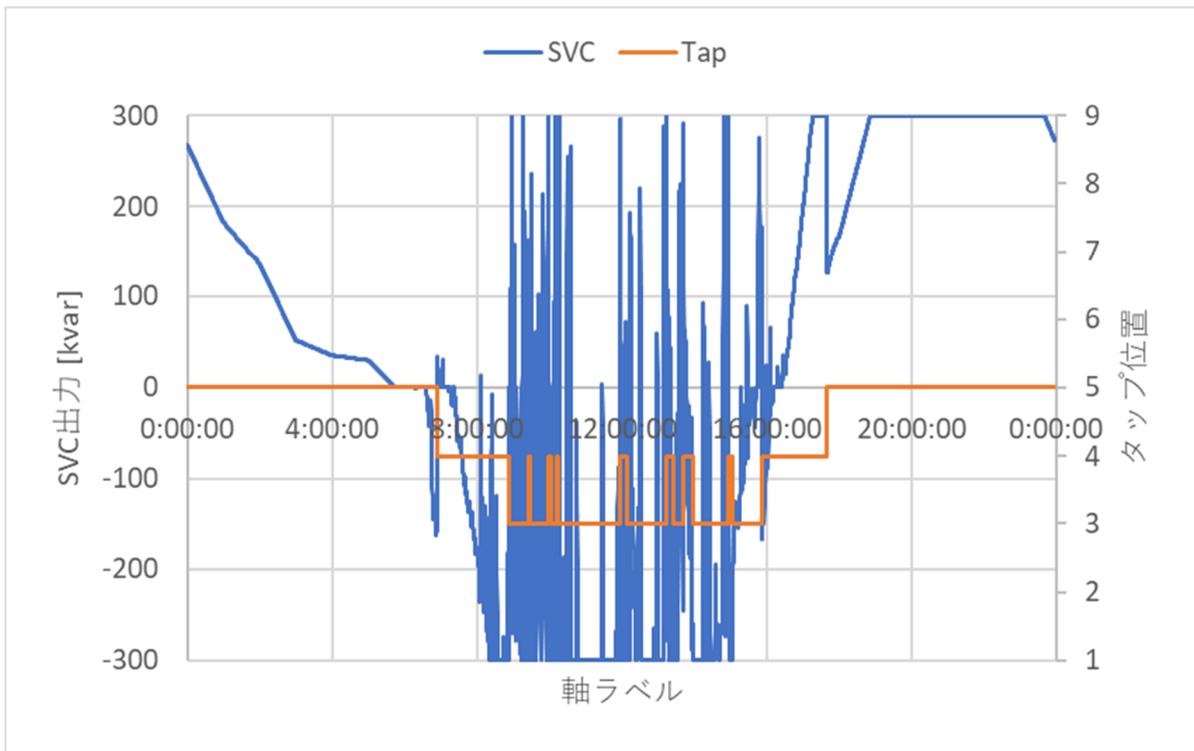


(b) 最適化計算(SVR+SVC)

図 5.3-34 各制御方式適用時の電圧制御結果(末端、PV 導入率=90%、力率=0.95)



(a) 重回帰分析(SVR+SVC)



(b) 最適化計算(SVR+SVC)

図 5.3-35 各制御方式適用時の SVC 出力とタップ位置
(末端、PV 導入率=90%、力率=0.95)

◎まとめ

従来法として重回帰分析によるパラメータ整定と最適化計算に基づくパラメータ整定を PV 導入可能量の観点から比較することで、自律制御方式の制御限界について検証を行った。配電系統内に制御機器が1台設置される場合においては、重回帰分析によりパラメータ整定を行うことで、最適化計算と同等の制御性能となることを確認した。次世代 TVR に置き換えにより連続的な電圧制御が可能となり、実行可能解の数が増加し、パラメータ整定が簡便に可能となることを確認した。タップ制御機器と SVC 等の無効電力制御が導入されるケースでは、重回帰分析と最適化計算で PV 導入可能量が異なることから、SVC が導入されるケースでは協調動作を行うようにタップ制御機器のパラメータ整定を行う必要がある。本項での最適化計算ではタップ制御機器は有効電力に重みを置いて制御を実施し、タップ制御機器では制御できなかった部分を SVC からの無効電力により補償することで協調が図られていた。複数台電圧制御機器が導入されたケースにおいて、次世代 TVR を導入することで PV 導入可能量が増加することから機器間での干渉は少ないといえる。

以上より、重回帰分析と最適化計算の比較により、重回帰分析を用いることで限界値に近い PV 導入可能量を達成できるが、SVC 等の動的に無効電力制御(電圧応じて無効電力制御)が導入されるケースでは重回帰分析では協調が難しく、無効電力制御機器との協調方法が必要となる。また、次世代 TVR のように電圧を連続的に制御可能な機器の導入により実行可能なパラメータ整定範囲が拡大し、パラメータ整定が簡便となることから、運用性を向上させることが可能と言える。

以上より潮流計算により、現状電圧制御機器である SVR、研究開発項目①が開発した自励式 SVC と次世代 TVR について、電圧適正化効果を評価し、PV の導入量に応じた配電システムの設計法を明らかにした。また、上記機器を組み合わせた場合の有効性と課題について取りまとめた。

1. 5. 3(3)パワエレ機器の信頼性評価

1. 5. 3(3)①電氣的信頼性に関する評価

主な電氣的信頼性の評価項目として抽出した雷サージについては、耐雷レベルは規格・基準に定義されているため検討する必要がないと判断した。

1. 5. 3(3)②熱的信頼性に関する評価

この点に関する解析手法や評価は平成 26 年度から 28 年度にかけて産業技術総合研究所にて実施した。(詳細は平成 26 年度～平成 28 年度 成果報告書「分散型エネルギー一次世代電力網構築実証事業 2.次世代配電システムの構築に係る共通基盤技術の開発」(産総研)を参照のこと。)

これらの解析結果を踏まえると、パワエレ機器の熱的信頼性はパワー半導体の発熱量に大きく依存すると考察される。

1. 5. 3(4)解析による評価のまとめ

ここまで述べた各種解析実施時点での各評価項目に対する実施状況のまとめを表 5.3-17 に示す。表中のハッチングは、本研究開発において実施した国内調査、解析評価、装柱性試験、実証試験(実験室、模擬グリッド、実グリッド)による評価から抽出された課題を、実務者が参照しやすいように①構造特性、②ノイズ、③通信、④通常時の運転特性、⑤制御の追従性、⑥制御性能、⑦配電系統事故、⑧ループ切替、⑨系統擾乱、⑩操作、⑪メンテナンスの十一のカテゴリとその中を項目に分類し、それぞれの研究フェーズにおいて評価対象とした項目を示したものである。

表 5.3-17 各評価項目に対する実施状況のまとめ(各種解析実施時点)

項目	研究開発項目①				解析	実証評価							研究開発項目①	要件・指針(共通基盤)						
	メーカー	メーカー	電力	電力		定常解析	過渡解析	熱解析	実験室G	模擬G	装柱性	実G		メーカー	JEC等規格・基準	メーカー基準・工場試験	電力が求める仕様・試験	追加すべき仕様・試験	試験実施場所	
構造特性	大きさ(単柱)																			
	重量(単柱)																			
	大きさ(H柱)																			
	重量(H柱)																			
	形状																			
	トランスレス																			
	配電線との接続																			
	耐振動																			
	寒冷地																			
	耐塩																			
	耐雷																			
	冷却方式																			
ノイズ	電気ノイズ																			
	騒音																			
通信	遠方制御子局																			
通常時の運転特性	系統条件(インピーダンス)																			
	微小な電圧変動																			
	電圧不平衡																			
	高調波																			
制御の追従性	SVRとの協調																			
	LRT, SVR																			
	負荷変動																			
	励磁突入電流																			
	分散形電源出力変動																			
制御性能	ハンチング																			
	定常制御																			
	瞬時電圧低下サポート																			
	フリッカ抑制																			
配電系統事故	不平衡補償																			
	短絡																			
	地絡																			
	断線																			
	単独運転																			
ループ切替	復電時の再閉路																			
	電圧変動																			
	位相変動																			
系統擾乱	他回線の整定等																			
	瞬時電圧低下																			
	周波数ステップ																			
操作	周波数ランプ																			
	整定																			
	モード切替																			
メンテナンス	効果の見える化																			
	点検時																			
	保守時																			

1.5.4 実証試験による評価

まず、本研究開発で実証試験にて検証した機器の一覧を表 5.4 に示す。
詳細については、各項にて述べる。

表 5.4 本研究開発で検証した機器の一覧表

番号	機種	備考	使用先
a-1	SVC(Si)	試作 1 号機	実験室グリッド試験
a-2	SVC(SiC)	試作 2 号機	模擬グリッド試験
a-3	SVC(SiC)	試作 3 号機	装柱性試験
a-4	SVC(SiC)	試作 4 号機	
b	AVR(Si)	試作 1 号機	実験室グリッド試験
c-1	次世代 TVR(Si)	試作 1 号機	模擬グリッド試験
c-2	次世代 TVR(SiC)	試作 2 号機	模擬グリッド試験・装柱性試験
c-3	次世代 TVR(SiC)	試作 3 号機	模擬グリッド試験
c-4	次世代 TVR(SiC)	試作 4 号機	実グリッド試験
d-1	SVC(Si)	A 社市販 SVC	模擬グリッド試験
d-2	SVC(Si)	B 社市販 SVC	模擬グリッド試験

1. 5. 4(1)実験室グリッドによる評価

1. 5. 4(1)①実験室グリッドによる評価の目的とプロセス

1. 5. 4(1)①1)実験室グリッドによる評価の目的

パワエレ技術に基づく電圧制御機器の配電システムへの導入に際しては、従来より配電システムに導入されてきた SVR などの機器と比較して制御の特性は大きく異なるため、十分に事前の試験を行う必要がある。本研究開発では、実規模にて開発した新型電圧制御機器を 6.6kV の模擬グリッド、ならびに実グリッドに導入して検証するが、その模擬グリッドでの検証の前段階として、実高圧配電システムを 200V 級に降圧した小規模模擬システムを実験室内に構築し、一部機器(SVC および AVR 付き柱上変圧器)の事前検討を実施した。実験室グリッドは限られた点数の装置により構成された小規模設備となり、様々な外乱の入り込む余地が少ないため、機器自体の特性を試験するためには理想的な環境となる。ただし、実システムと比較して電圧階級や規模は大きく異なるため、模擬グリッドでの試験の代替になるものではない。また、本事業で研究開発項目①にて開発された機器の中には、高速な制御が可能であるパワエレ機器の強みを活かして、瞬時電圧低下やフリッカを補償する機能が提案されているものもある。そこで本項目では、実験室グリッドの機動性を活かして、このような電圧制御機器の高度利用の可能性について多様な条件下で試験を行うことも目的とした。

1. 5. 4(1)①2)実験室グリッドによる評価のプロセス

本研究開発では実験室グリッドを構築して、以下のプロセスに沿って試験を進めた。

○研究開発項目①で開発された機器の内、並列および直列機器の代表として、自励式 SVC(以下 SVC。表 5.4 中の a-1)および AVR 付柱上変圧器(以下 AVR-Tr。表 5.4 中の b)のミニモデルの基礎特性を試験した。ミニモデルは電圧階級や容量の観点から 6.6kV システムに導入される実機とは異なるが制御系は概ね同様であるため、実験室グリッドにおいて制御特性を把握することに努めた。

○特に SVC について、試験結果を基に瞬時値解析用モデルを構築した。実験室グリッドにおいて直接的に模擬できる系統条件はどうしても限られてしまうため、より多様な系統条件での SVC の挙動は本モデルを用いた瞬時値解析により可能となる。

○パワエレ機器の制御の高速性を活かして、SVC および AVR-Tr による瞬時電圧低下およびフリッカの補償制御について実験室グリッドを用いた試験を実施した。また、高速制御のために高ゲインとした場合の SVC 制御の安定性について、数値解析により検討を深めた。

1. 5. 4(1)②実験室グリッドの構成

1. 5. 4(1)②1)実験室グリッドのコンセプト

研究開発項目①より提供された機器 a-1:SVC および機器 b:AVR-Tr の制御特性を試験するために、実験室グリッドを構築した。住宅地域における基準電圧 6.6kV、亘長 3km の高圧配電システムを、200V にスケールダウンできるように仕様を定めた。具体的には、文献[1]において示されている図 5.4(1)-1 の 6.6kV の配電システムモデルにおける電圧分布の概形が、基準電圧 200V の実験室グリッドにおいても再現できるように設計を行った。図 5.4(1)-1 の標準モデルにおいて、ピーク負荷 2MW、PV 最大出力 3MW として図 5.4(1)-2 に示す負荷変動パターンを与えたときの日間の電圧変動を図 5.4(1)-3 に示す。

同様の電圧変動が実験室グリッドでも再現できるように、後述の通り仕様を定めた結果、実験室グリッドでの電圧変動の想定値は図 5.4(1)-3(b)の通りとなった。さらに、本事業の目的に照らして、以下の特徴を有する実験装置となるように詳細設計した。

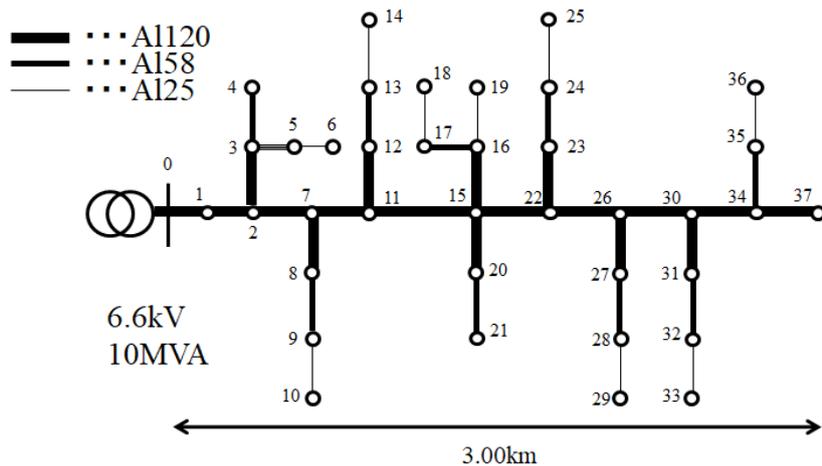
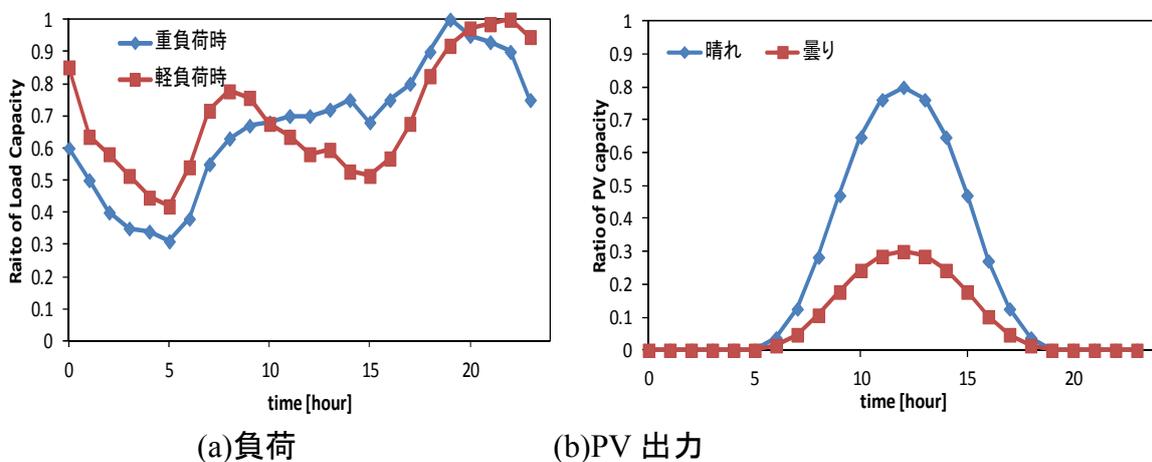


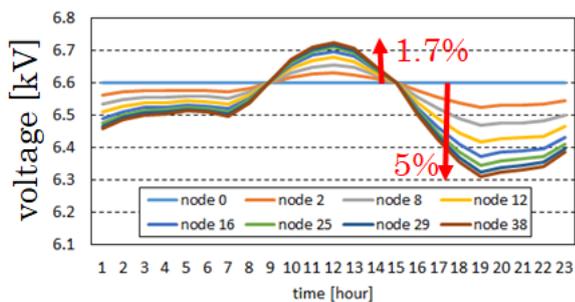
図 5.4(1)-1 住宅地域標準モデル[1]



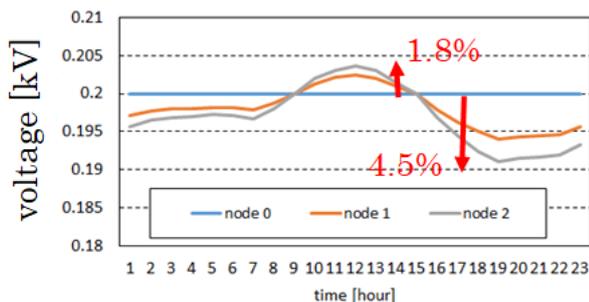
(a)負荷

(b)PV 出力

図 5.4(1)-2 負荷と PV の日間変動パターン例



(a)6600V



(b)200V

図 5.4(1)-3 6600V と 200V での電圧分布概形

- 瞬時値解析に主眼を置く必要があるため、過度現象の試験に適した装置とする。
 - 高性能低圧交流電源装置を備えることで、多様な擾乱を生成できる。
 - 高速な応答性を備えた PV 模擬装置を備える。
 - 高周波帯域の現象が観測できるように、アナログ負荷および空芯リアクトルによる線路インピーダンス装置を備える。
- 三相個別に PV 出力、負荷、擾乱を設定でき、三相不平衡の試験が可能。
- AVR-Tr の試験に資するように単相回路用設備を備える。

1. 5. 4(1)②2)実験室グリッドの構成

まず、図 5.4(1)-4 に実験室グリッドの基本構成を示す。配電系統用変電所を模擬する交流電源装置から、三相 3 線式による配電線模擬装置を介して、総負荷 28kW(内 RL 負荷 8kW)、PV (PCS)容量 28kW を接続して構築されている。以下に各装置の概要を述べる。

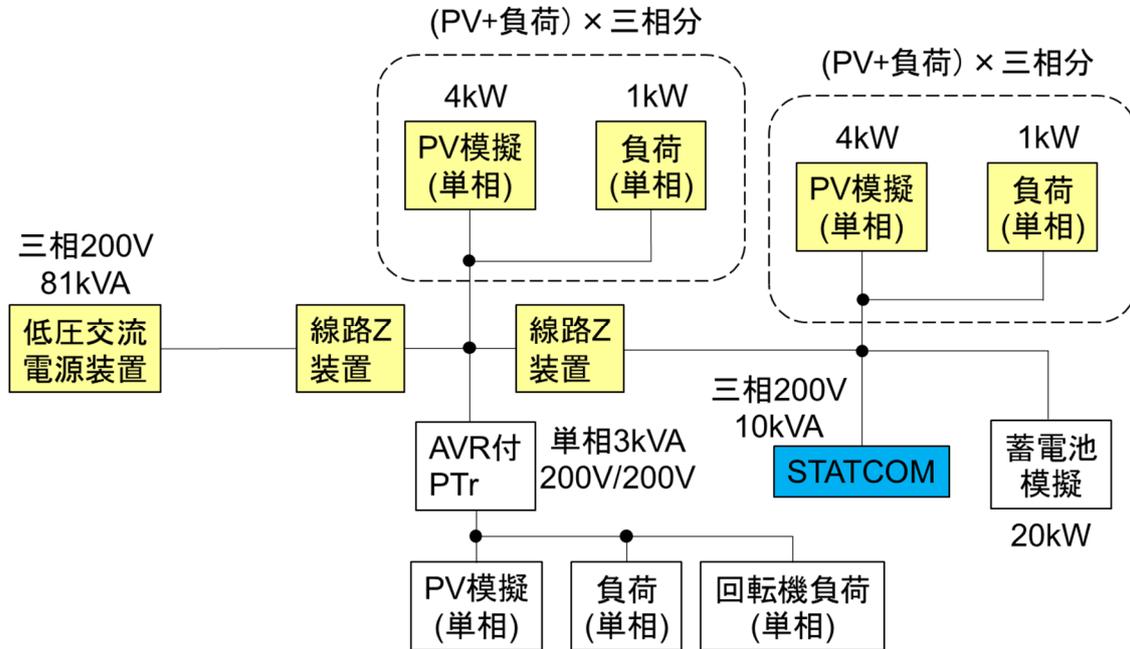


図 5.4(1)-4 実験室グリッドの構成

◎高機能交流電圧源(図 5.4(1)-5)

標準電圧 6.6kV の高圧配電系統を標準電圧 200V で模擬するために、安定的な交流 200V(三相 3 線式)を生成することで配電系統用変電所を模擬する交流電圧源である。上位の系統における様々な擾乱の影響を試験することを目的に、電圧や周波数などの急変、さらには含有する高調波などを自由に指定して波形を生成する機能を有する。主要な特徴は以下の通りである。

- 三相 3 線式、200V、81kW(逆潮流耐量 24kW)、5~1kHz
- 最大電流 270A(最大ピークはその 3.5 倍)、最大電圧 300V
- 電圧歪率 0.3%、進相から遅相の 0~1 の力率に対応
- 2~7 次の高調波印加設定可能
- 専用ソフトウェアにより LAN 経由で任意の電圧変動パターンを生成可能。



图 5.4(1)-5 高機能低圧交流電源装置

◎配電系統模擬装置

高圧配電系統のフィーダ幹線を模擬する三相3線式のインピーダンス装置である。系統電圧急変時の過渡現象を正確に模擬できるように、空芯リアクトルを用いて構成されている。主たる特徴は以下の通り。

- インピーダンスの設定範囲(確度±8%以内)
抵抗値:0、0.0144、0.0288、0.0432Ω インダクタ値:0、0.0458、0.0917、0.1374mH
- 許容電流(連続値)は、100A(1段目)および50A(2段目)



図 5.4(1)-6 配電系統模擬装置

◎PV 模擬装置

PCS により系統連系する PV を模擬する。直流電源と I-V 特性を表す制御装置を組み合わせ、太陽光パネルを模擬し、PCS と組み合わせることで単相分の PV を模擬し、これを三相分組み合わせ、これを各ノードでの PV とした。主要な特徴は以下の通り。

- 模擬ソフトウェアにより編集された I-V 特性に従って、コントローラが直流電源を制御。PCS の MPPT 制御と連携して動作する。
- 日射量や気温の時系列変化を読み込んで動作させることが可能。なお、日射量、パネル温度の環境変化は 1 倍～120 倍の速度で再生可能。
- ソフトウェアを用いて、開放電圧、短絡電流、カーブ係数、内部抵抗係数を指定してパネル特性を模擬できる。I-V 特性は多数点を補完して非線形にモデル化される。
- 直流電源は、最大電圧 400V、最大電流 12A、最大電力 5kW。
- 高速版の直流電源はバイポーラ電源により構成され、応答時間 100 μ sec 以下。
- PCS の定格入力／定格出力は 4kW。MPPT 制御の機能を備える。また、2017 年 4 月以降に適用の FRT 要件を満足し、ステップ注入付周波数フィードバック方式による単独運転検出機能を備える。

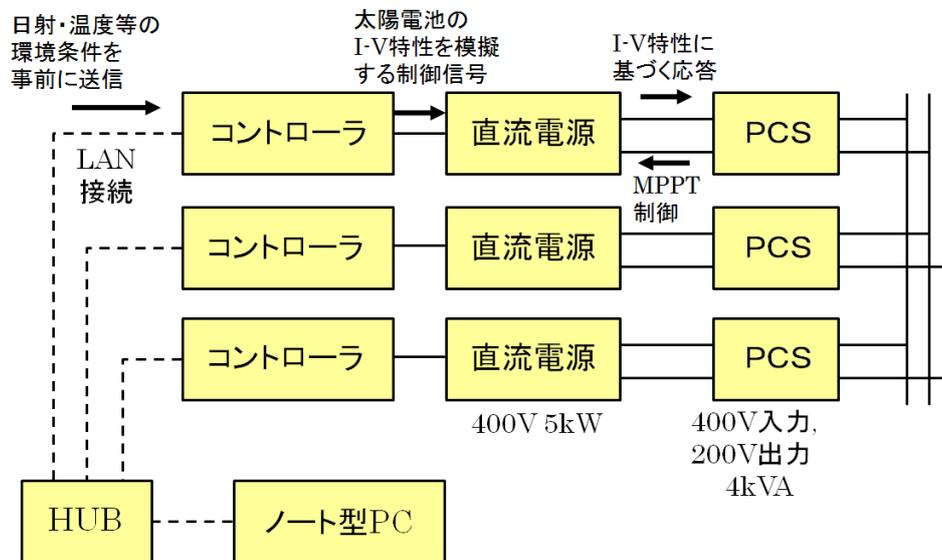


図 5.4(1)-7 PV 模擬装置の概要



图 5.4(1)-8 PV 模拟装置

◎負荷模擬装置

定インピーダンスの電圧特性を有する負荷装置であり、R、L、C の受動素子により構成される。PV と同様に、単相負荷を三相分組み合わせて各ノードの負荷とした。主な仕様は以下の通り。

- 三相 3kW + 3kVar(誘導性および容量性)
- 1～500W(1～500Var)の組み合わせにより詳細な切替可
- 相ごとに独立した切替により、不平衡負荷を設定可
- 力率 0.1～1.0(遅れ、および進み)の範囲を設定可



図 5.4(1)-9 負荷装置(RLC 負荷)

◎自励式 SVC(検証機器 a-1:ミニモデル)

研究開発項目①にて開発された自励式 SVC のミニモデルを、実験室グリッドのフィーダ末端に接続して用いた。制御特性を把握することが主目的であるため、スイッチング素子は Si により構成されている。同装置の詳細は研究開発項目①の報告書を参照されたい。また、主要な機能は以下の通りである。

・電圧制御機能

線間電圧を目標値に維持するように、スロープリアクタンスを用いたフィードバック制御により遅れ、もしくは進みの無効電力を制御する。目標電圧、不感帯、スロープリアクタンス、AVR ゲインなどのパラメータを任意に設定して使用できる。

・三相不平衡補償機能

連系点における線電流を計測し、電流不平衡を補償するように無効電力制御する。

・瞬時電圧低下補償機能

上位系統における事故発生などにより瞬時電圧低下が配電系統で現れた場合、無効電力を最大出力まで急速に制御することで残電圧をできる限り上昇させる。詳細は後述する。

同ミニモデルの当初の仕様は定格 10kVA であったが、後述するように SiC による設備とした場合には短時間では定格容量の 200%までの電流が許容できると考えられるため、仮想的に本装置の定格容量は 5kVA と見なして動作するように設計されている。瞬時電圧低下の発生時には 200%まで動作した場合を想定して 10kVA までの出力が可能となる。この詳細については後述する。

◎AVR 付き柱上変圧器(検証機器 b:ミニモデル)

研究開発項目①で開発された AVR 付き柱上変圧器のミニモデルを、実験室グリッドの上流側ノードに接続して用いた。励磁交流電圧をインバータにより制御することで、高速に変圧器二次側の電圧を制御することが可能である。

SVC ならびに AVR-Tr について、実際の 6.6kV 系統用に対するミニモデルの仕様比較を表 5.4(1)-1 に示す。両機器の制御に関しては多数のパラメータが存在し、実験室グリッドでの試験結果を研究開発項目①へとフィードバックしながら調整したものも含まれる。また、瞬時電圧低下補償機能の制御方式の一部も、研究開発項目②から①へのフィードバックを通じて開発したものである。

表 5.4(1)-1 実証機とミニモデルの仕様比較(SVC および AVR-Tr)

SVC				AVR付柱上変圧器				
	項目	実証機	検証機		項目	実証機	検証機	
	主回路 電圧 周波数	6600 V 50 or 60Hz	200 V 50Hz		主回路 電圧 周波数	6600 V 50 Hz	200 V 50Hz	
	定格容量	300 kVA	10 kVA		二次電圧	210 V	200 V	
	INV部 一次電圧	1650V	200 V		インバー タ素子	SiC 1.2 kV 75A	Si 1.2 kV 100 A	
	インバー タ部	インバー タ素子	SiC 3.3kV 75A		Si 1200 V 100 A (※1)	スイッチング 周波数	15kHz (※2)	同左
	制御装置	スイッチング 周波数	13kHz		同左	出力電圧, 補償電圧	105+105 V ± 5V	100+100V ± 10V
		制御方式 制御装置	DDC		実証機と 同一品	制御方式 制御装置	DDC	実証機と 同一品

1. 5. 4(1)③SVC の基礎特性試験

1. 5. 4(1)③1)試験方法

SVC の基礎的な特性を、実験を通じて試験した。主に SVC 単体の特性試験を目的としたため、図 5.4(1)-10 に示す簡易的な構成により試験を実施した。主な試験条件は以下の通りである。

- 三相 3 線式により電源装置、インピーダンス装置、SVC、負荷装置を接続した。
- 各装置の接続方法は Δ 結線による。
- 線路インピーダンス装置は、各 $43.2\text{m}\Omega$ 、 137.5mH とした。
- 以下に示す電圧急変試験、周波数急変試験、位相跳躍試験、電圧歪耐量試験、瞬時電圧低下試験については無負荷にて実施し、擾乱は高機能低圧交流電源装置により生成した。
- 負荷の投入や解列に対する応答試験は、図 5.4(1)-10 の通りノード3に接続する負荷の入切にて実施した。

なお、次頁以降で示す実験結果において、電圧は全て線間電圧を計測した結果であり、図中の凡例 R、S、T は、それぞれ R-S、S-T、T-R の線間電圧を示す。

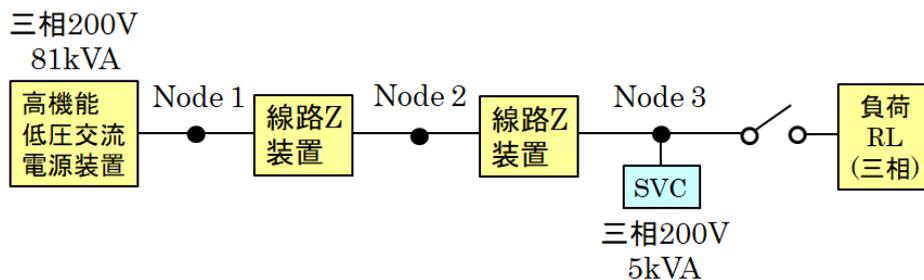
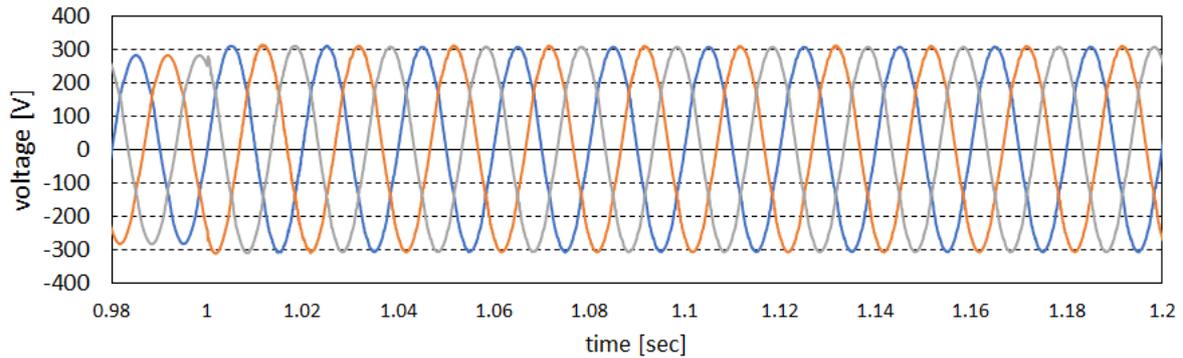


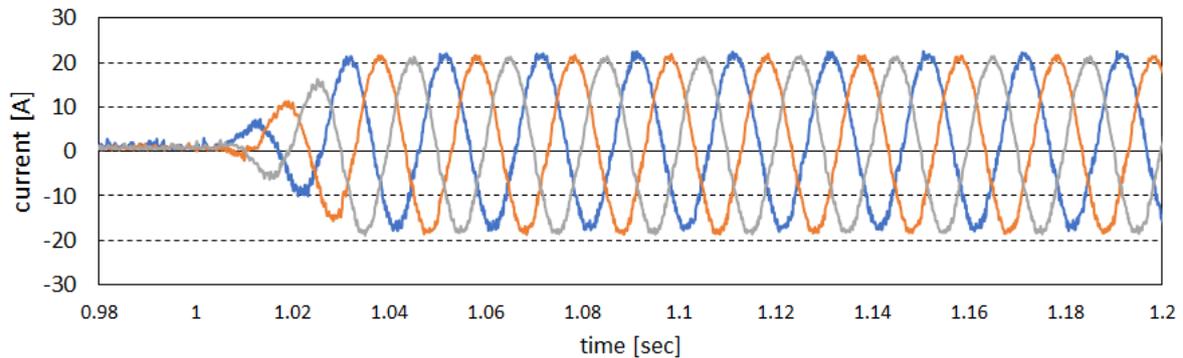
図 5.4(1)-10 試験回路構成 (SVC 基礎特性試験)

1. 5. 4(1)③2) 電圧急変試験(ステップ)

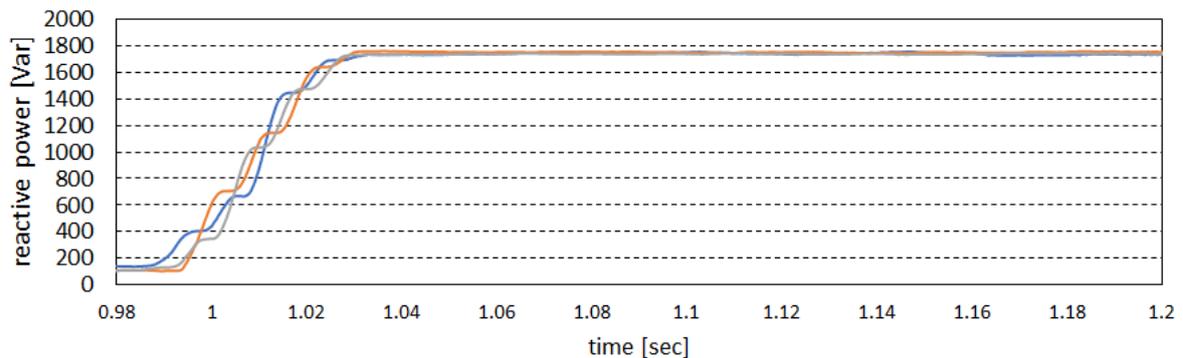
高機能低圧交流電源装置の電圧をステップ状に増加および低下させることで、電圧の急変、ならびに電圧の過不足に対する動作を確認した。まず図 5.4(1)-11 には時刻 1.0sec において電圧を 100%(実効値 200V)から 110%へと増加させた場合の波形を示す。三相交流電圧のステップ状の増加に伴い、電圧を目標値へと維持するための無効電力制御が急激に働き、数 10msec 以内に電流が定常値に達していることがわかる。なお、定常値は無効電力に換算すると上限値である 5kVar に相当する。



(a)ノード 3 電圧



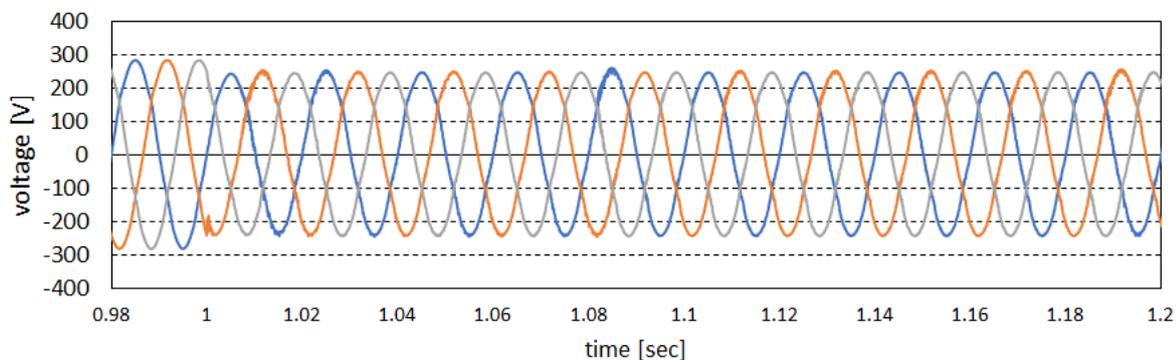
(b)SVC 電流



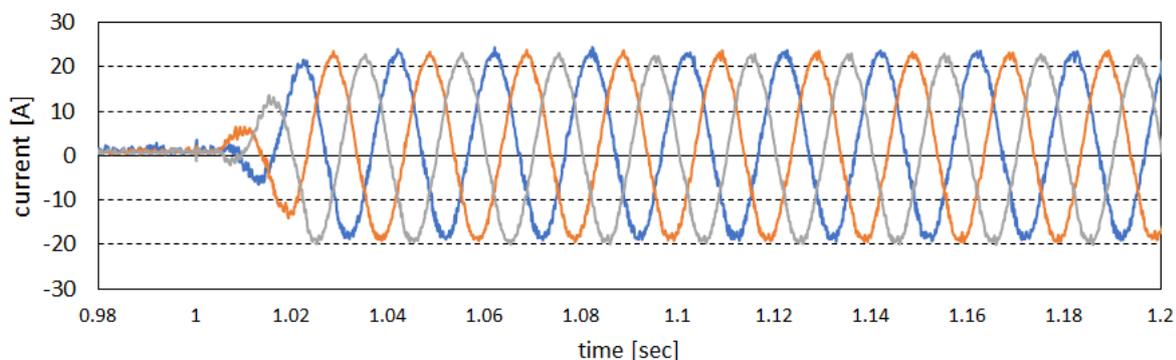
(c)SVC 無効電力

図 5.4(1)-11 電圧急変試験(100→110%)

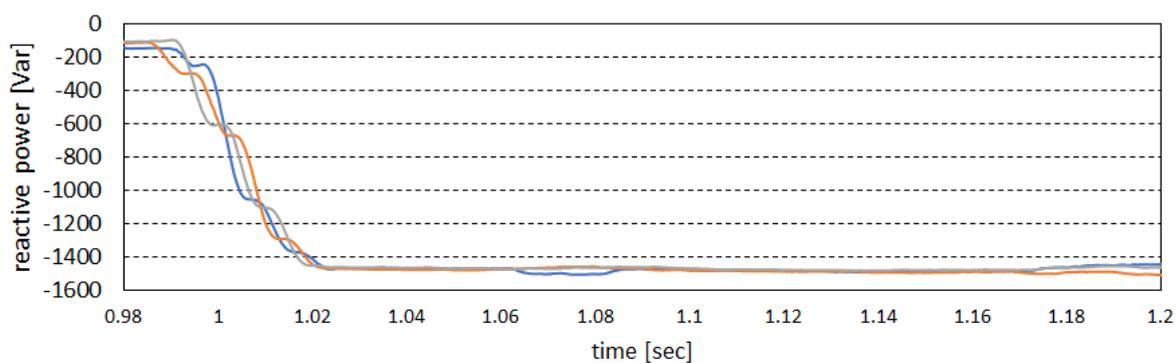
不足電圧側にステップ状の電圧急変を適用した場合の応答も概ね同様である。図 5.4(1)-12 は 100%(200V)→85%へと電圧低下させた場合の波形であり、数 10msec 以内に定常値(三相で 5kVar)へと到達している。



(a)ノード 3 電圧



(b)SVC 電流



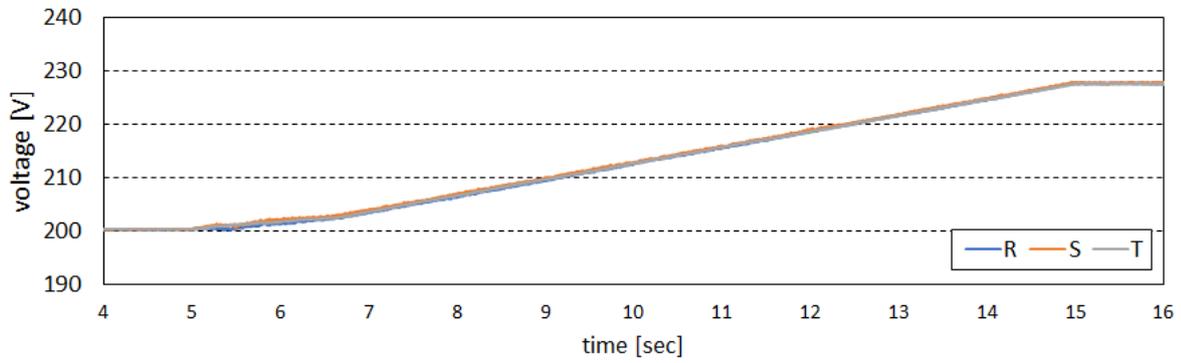
(c)SVC 無効電力

図 5.4(1)-12 電圧急変試験 (100→85%)

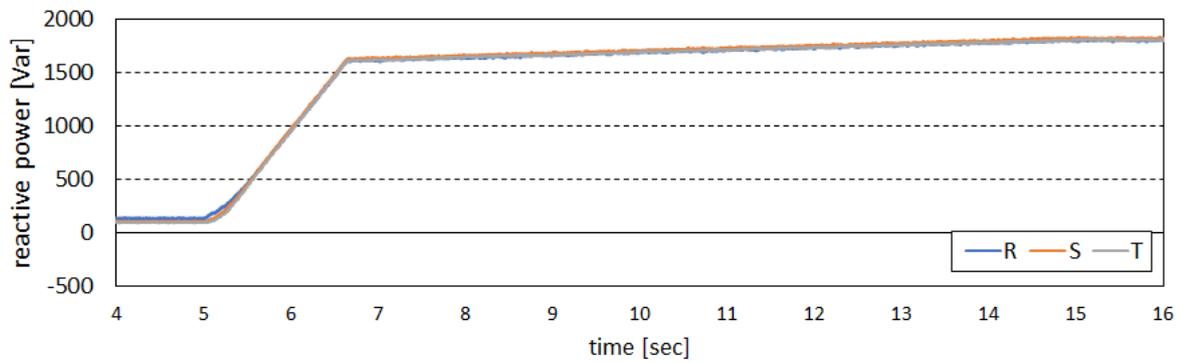
1. 5. 4(1)③3)電圧急変試験(ランプ)

高機能低圧交流電源装置の電圧をランプ状に増加および低下させて、その応答を確認した。まず図 5.4(1)-13 には時刻 5sec から 15sec の 10 秒間で電圧を 100%(実効値 200V)から 115%(実効値 229V)へと増加させた場合の SVC の出力を示す。電圧上昇に伴い、電圧を目標値へと維持するために無効電力制御(遅れの無効電力を吸収する動作)が働き、時刻 6~7sec の間に三相合計 5kVar に到達している。その後は、SVC の出力電流は定格値に到達したことで一定値となっているが、電圧が引き続きランプ上昇しているため、これに伴い無効電力は緩やかに増加している。

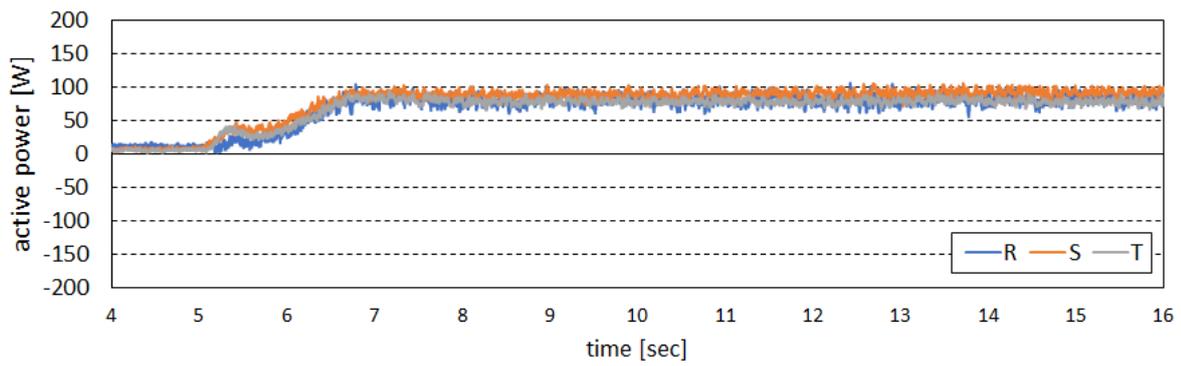
不足電圧側にランプ状の電圧急変を適用した場合の応答は概ね逆の挙動である。図 5.4(1)-14 は時刻 15sec から 25sec の 10 秒間で電圧を 100%(実効値 200V)から 85%(実効値 170V)へと低下させた場合の SVC の応答である。時刻 15~17sec の間に電圧を目標値へと維持するための無効電力制御(遅れの無効電力を注入する動作であり、図面上は負の値で表現している)が働き、三相合計 5kVar に到達している。SVC の出力電流は定格値に到達したことで一定値となっているが、電圧が引き続きランプ低下しているため、これに伴い無効電力の系統への注入量(図面上は負符号であるが、絶対量の意味)は緩やかに低下している。



(a)ノード3電圧(実効値)

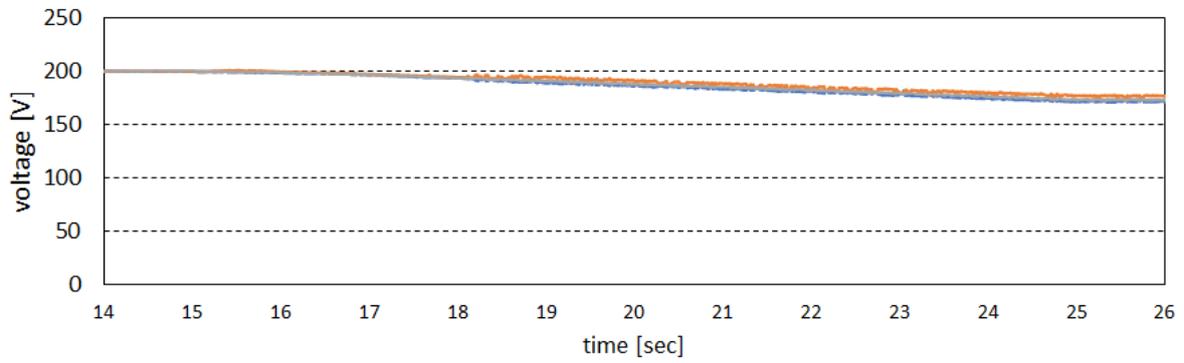


(b)SVC 無効電力

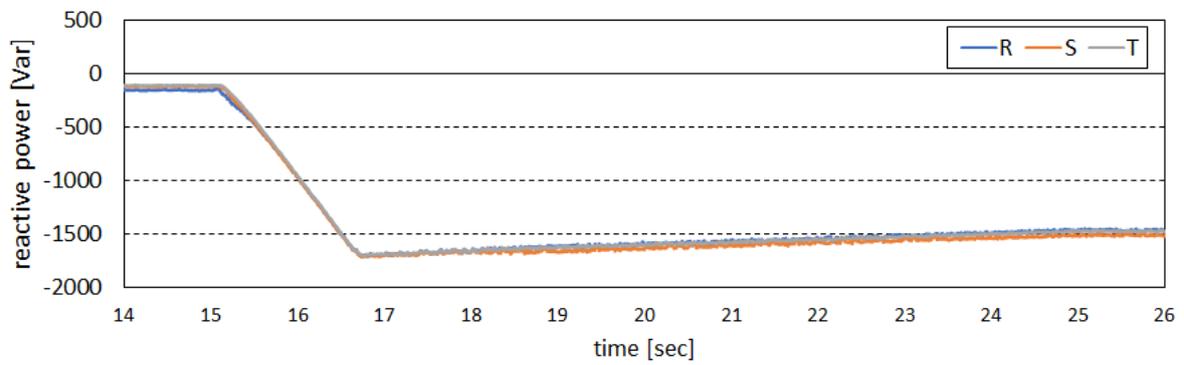


(c)SVC 有効電力

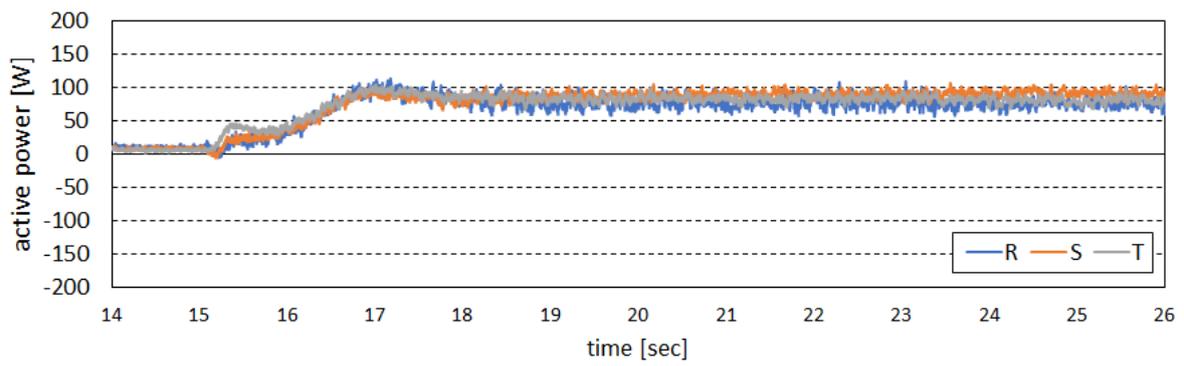
図 5.4(1)-13 電圧急変試験(ランプ:100→115%)



(a)ノード3電圧(実効値)



(b)SVC 無効電力



(c)SVC 有効電力

図 5.4(1)-14 電圧急変試験(ランプ:100→85%)

1. 5. 4(1)③4)周波数急変試験(ステップ)

系統周波数を 50Hz→51.5Hz へとステップ状に急変させた場合の応答を図 5.4(1)-15 に示す。1.0sec において周波数のステップ変動を適用したところ、少し遅れを伴いながら電流増加が生じ、およそ 60~70msec 程度で最大値に至った後は、電圧には変化がないため徐々に元の 0A 付近へと戻っている。この一時的な電流増加は、PLL 論理による系統周波数の検出遅れに伴うものと考えられる。

なお、周波数のステップ状の低下を適用した場合の挙動もおおよそ同様であるが、継続運転可能な耐量としては周波数低下側の方が裕度は小さく、49.5Hz 以下となるような周波数低下に対しては停止する特性がある。そのため、図 5.4(1)-16 では 50Hz→49.5Hz と急変した場合の応答を示す。周波数上昇側に比較して変動幅が小さいため、一時的な電流増加幅も限定的である。

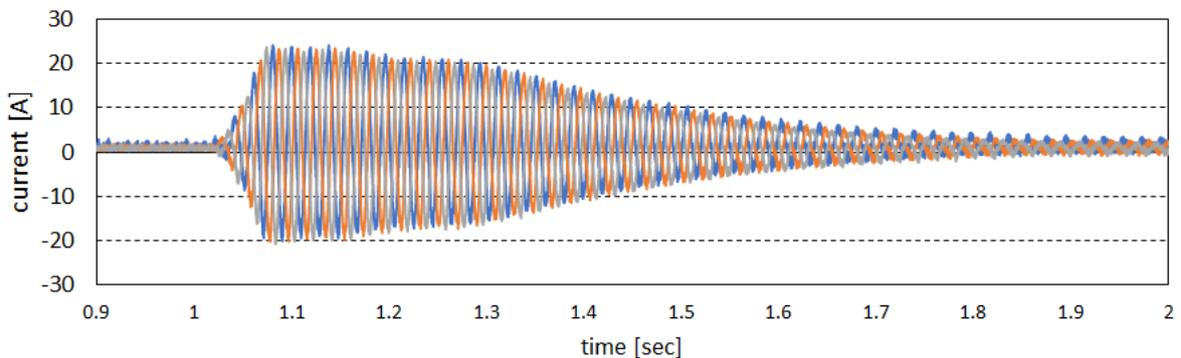


図 5.4(1)-15 周波数ステップ応答(50Hz→51.5Hz)

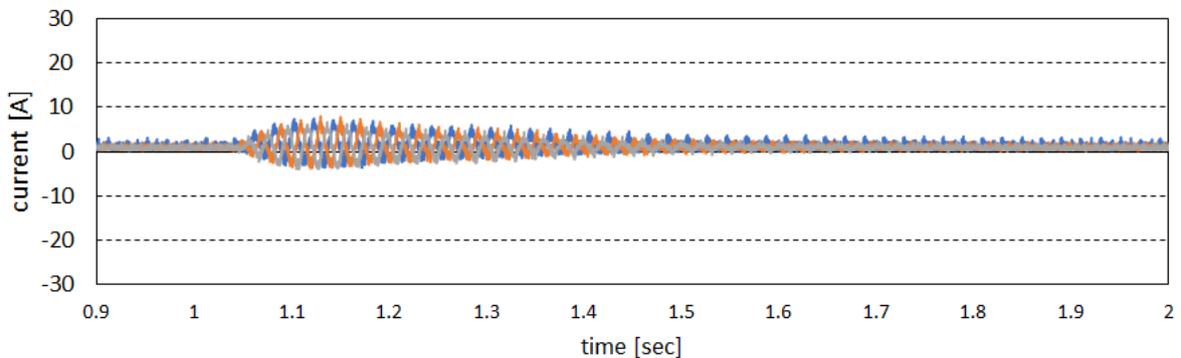
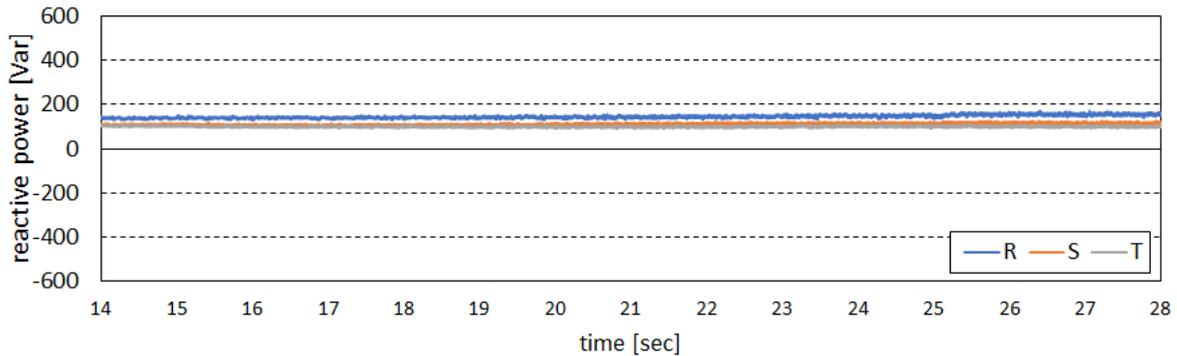


図 5.4(1)-16 周波数ステップ応答(上: 50Hz→49.5Hz)

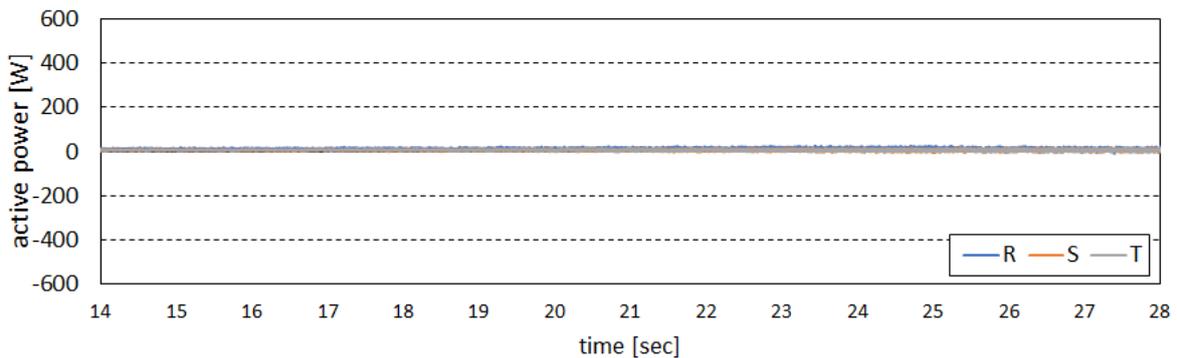
1. 5. 4(1)③5)周波数急変(ランプ)

系統周波数を時刻 15sec から 25sec の 10 秒間をかけて 100%(50Hz)→103%(51.5Hz)へとランプ状に変化させて、SVC の応答を観測した波形を図 5.4(1)-17 に示す。周波数変動の影響により無効電力および有効電力の制御量がやや変化しているものの、大きな影響は受けずに運転継続できている様子がわかる。

同様に、時刻 15sec から 25sec の 10 秒間をかけて 100%(50Hz)→97%(48.5Hz)へとランプ状に変化させた場合の SVC の応答を図 5.4(1)-18 に示す。周波数低下側も支障なく運転継続できている様子がわかる。

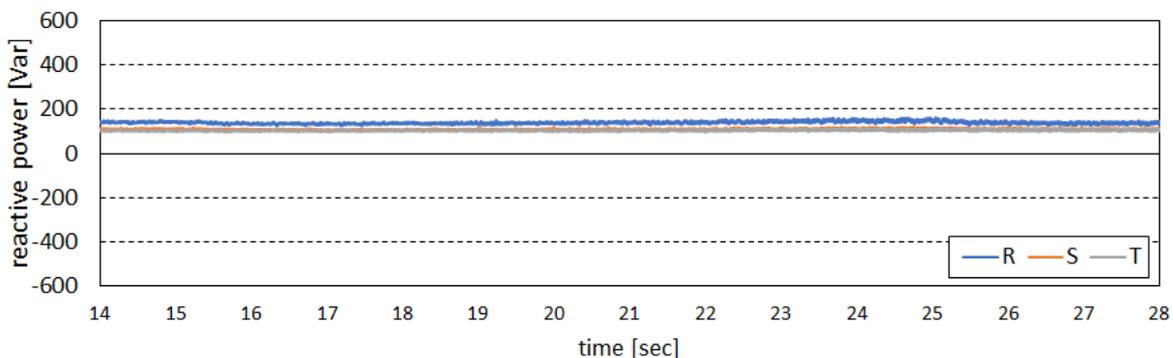


(a)SVC 無効電力

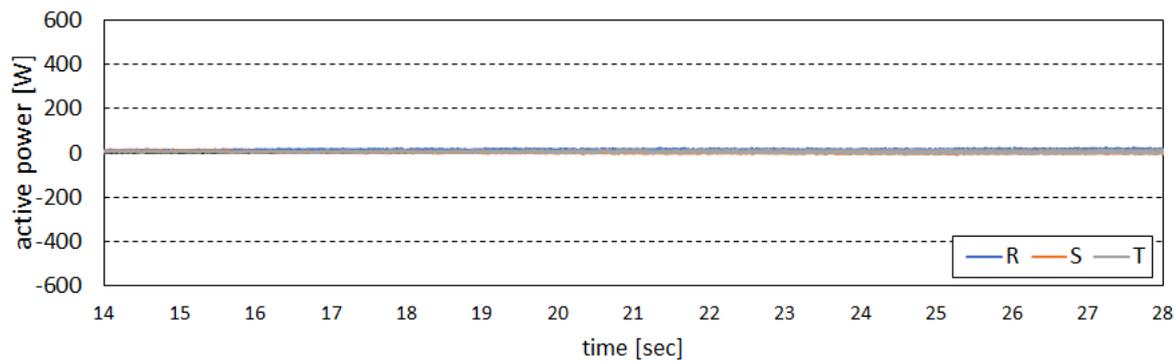


(b)SVC 有効電力

図 5.4(1)-17 周波数ランプ応答(100%→103%)



(a)SVC 無効電力

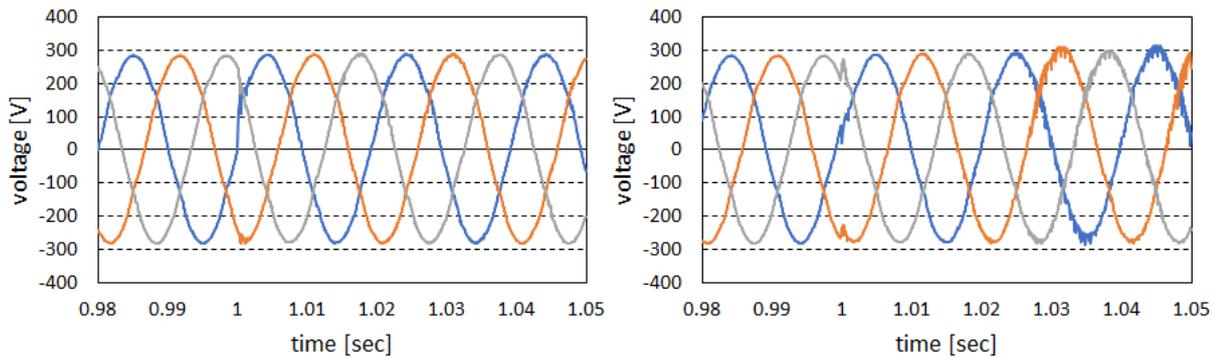


(b)SVC 有効電力

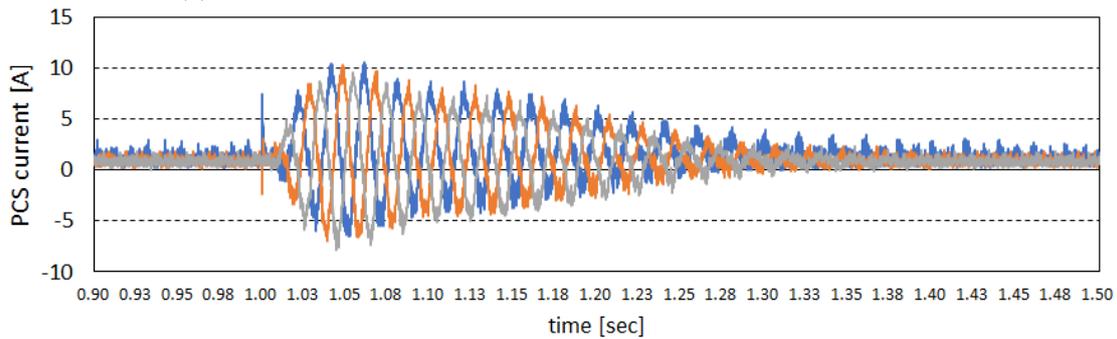
図 5.4(1)-18 周波数ランプ応答(100%→85%)

1. 5. 4(1)③6)位相跳躍応答試験

配電系統内のループ切替や上位系統での系統構成の切替に伴い、位相跳躍が生じることがある。位相切替に際しては、周波数急変と同様にPLL論理の位相検出に遅れが生じるために擾乱が生じる。SVCミニモデルでの特性としては、おおよそ 20° 前後の位相跳躍が運転継続できる限度であった。図5.4(1)-19には 15° の位相跳躍が生じた場合の波形を示す。位相跳躍の発生に引き続いて一時的にSVC電流が増加し、おおよそ300~400msec程度で元の定常状態に戻っている。



(a)位相跳躍時の系統電圧(左: 15° 進み、右: 15° 遅れ)

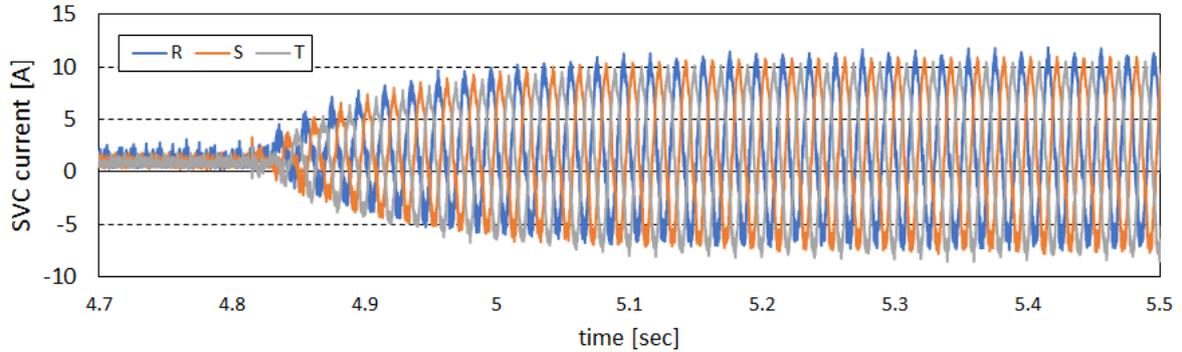


(b)SVC電流(位相 15° 進み)

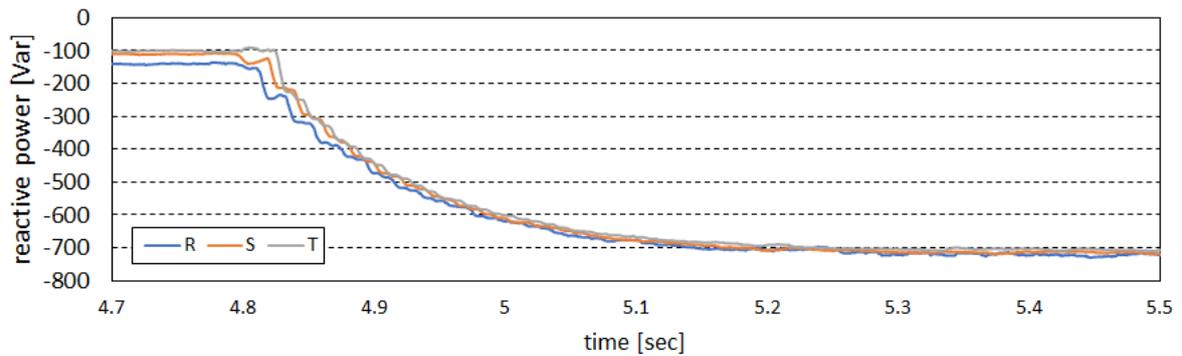
図5.4(1)-19 位相跳躍応答試験

1. 5. 4(1)③7) 負荷の投入と解列

三相平衡負荷の投入および解列により生じた電圧変動に対する制御応答を図 5.4(1)-20 および図 5.4(1)-21 に示す。1.0sec での負荷投入に対して、100msec 程度の時定数で電流が増加および減少し、電圧適正化に貢献している様子がわかる。

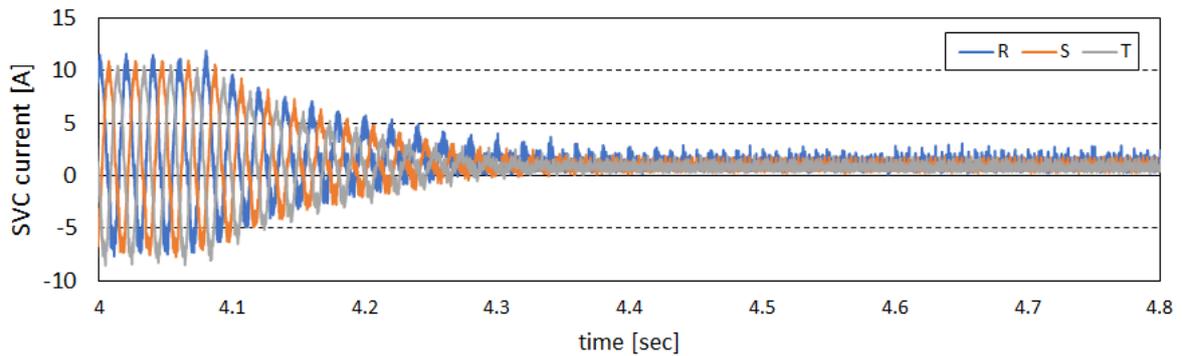


(a)SVC 電流

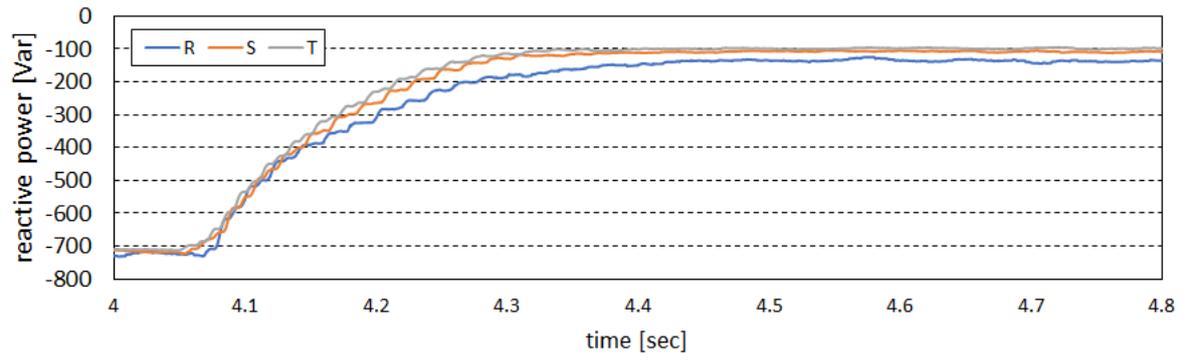


(b)SVC 無効電力

図 5.4(1)-20 負荷投入(抵抗負荷)時の制御応答(1kW)



(a)SVC 電流

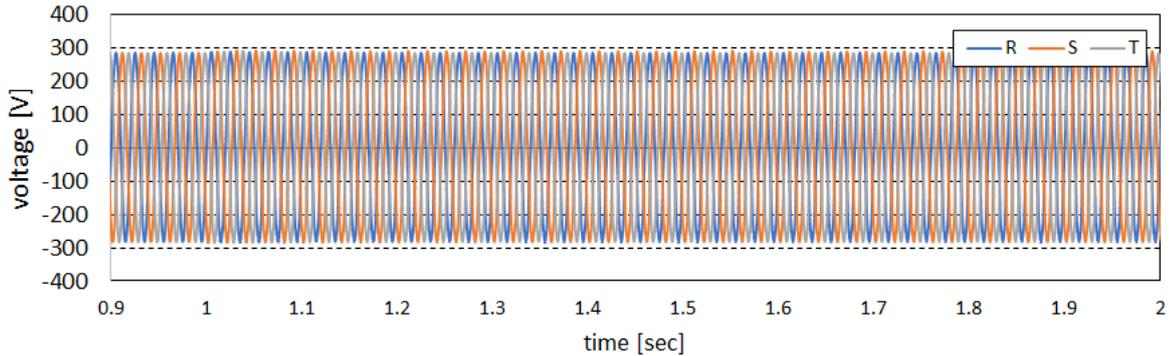


(b)SVC 無効電力

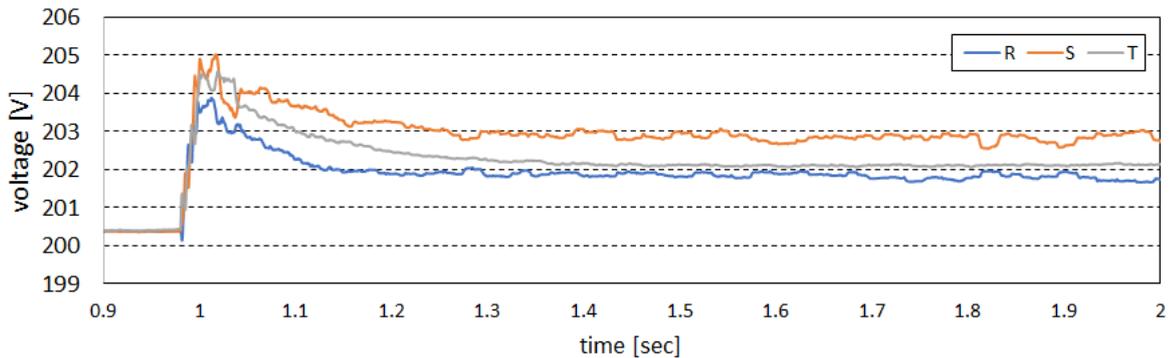
図 5.4(1)-21 負荷解列(抵抗負荷)時の制御応答(1kW)

1. 5. 4(1)③8) 電圧歪耐量試験

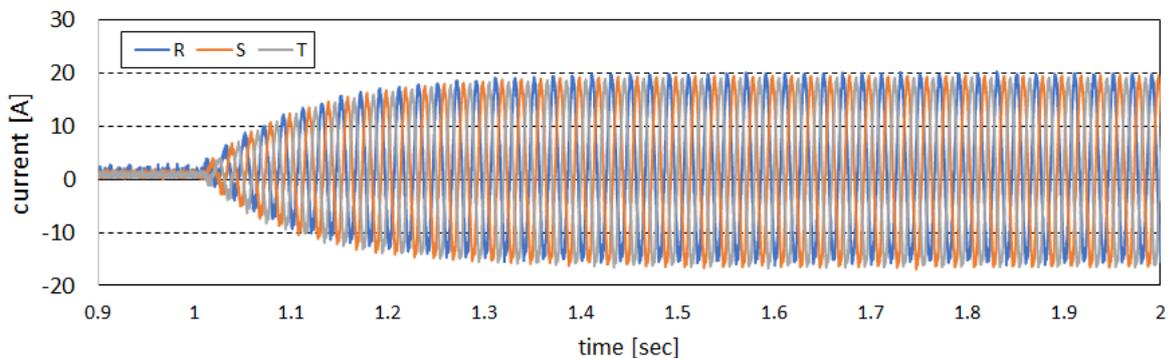
総合歪率が5%の高調波を含む電圧波形を時刻1secにて印加し、その応答を観測した。なお、基本波成分の無効電力制御が影響を受けずに機能することを確認するため、同時に2%のステップ状の電圧上昇を合わせて印加した。Node3の電圧およびSVCの応答を図5.4(1)-22に示す。同図(b)より電圧が実効値で4Vほどステップ状に増加したあと、SVCの無効電力制御により徐々に電圧が低下し、三相平均の電圧がおおよそ202V程度となるところまで制御されている様子がわかる。有効電力制御の挙動も含めて、特段の不具合は認められず、電圧歪の下でも適切に動作継続できたと言える。



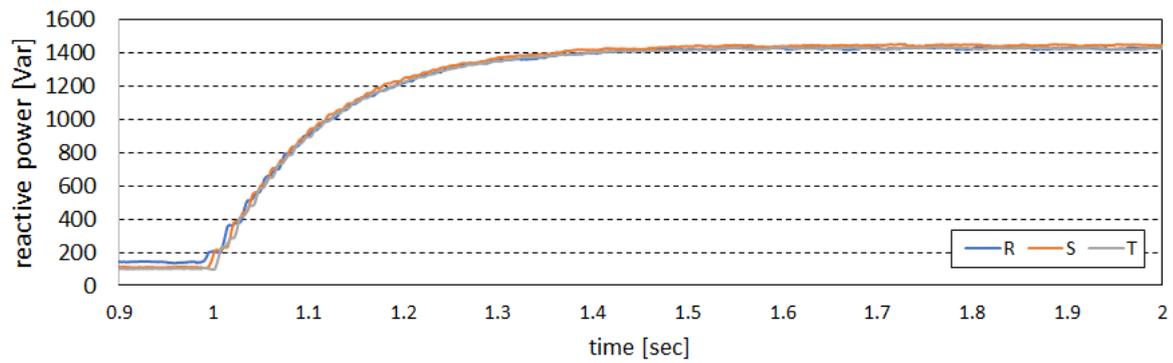
(a)ノード3 電圧(瞬時値)



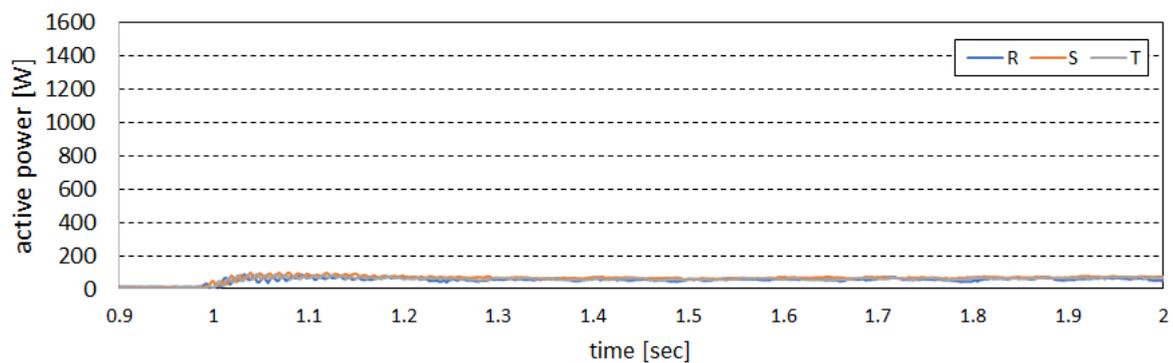
(b)ノード3 電圧(実効値)



(c)SVC 電流



(d)SVC 無効電力

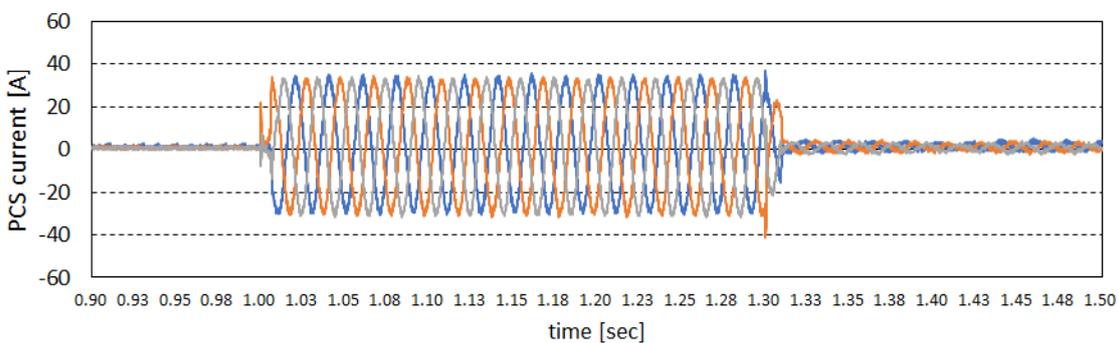
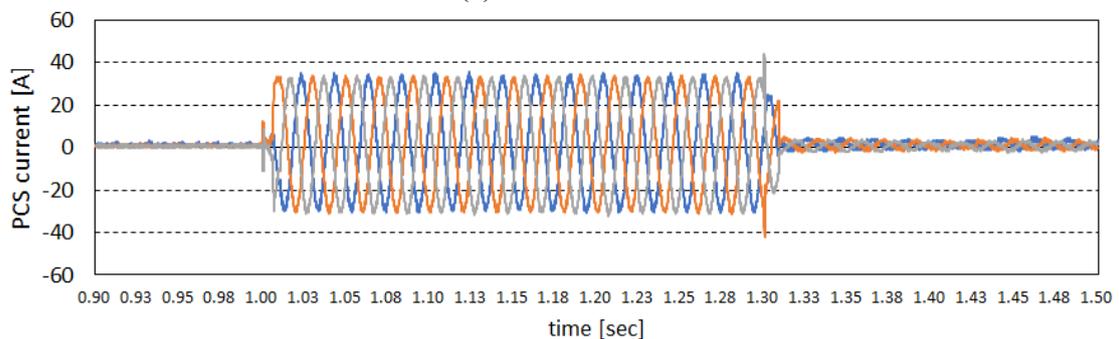
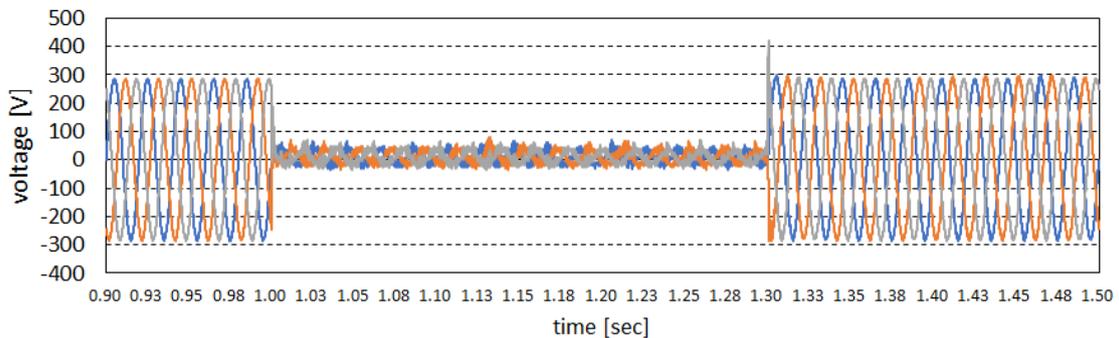


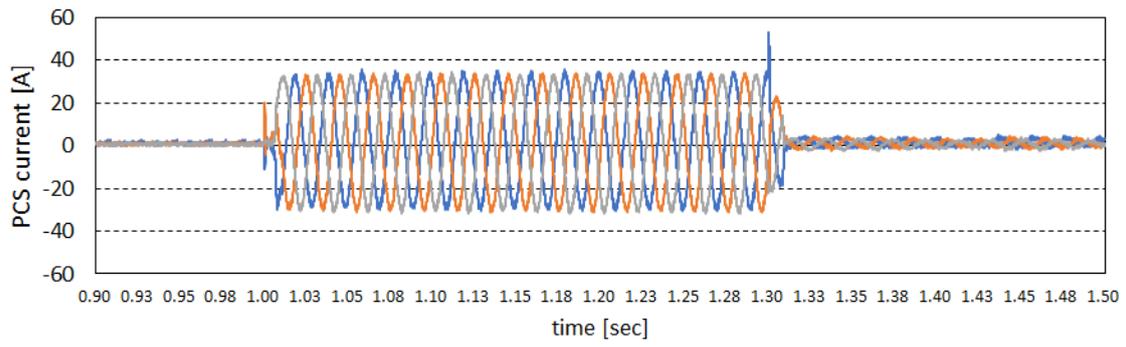
(e)SVC 有効電力

図 5.4(1)-22 電圧歪耐量試験(SVC)

1. 5. 4(1)③9)瞬時電圧低下試験

交流低電圧電源装置の電圧を急激に低下させることで、無負荷状態での挙動について試験した結果を図 5.4(1)-23 に示す。残電圧が 8%より低くなると不足電圧により停止することがあるため、ここでは残電圧 8%での挙動を示した。前述の通り、残電圧が低い電圧低下の発生時には、PV の運転継続支援のために無効電力を定格値の 200%まで急速に増加させる機能が備わっているため、同図中に示す通り急激に電流が 200%まで増加している。このような瞬時的な挙動は瞬時電圧低下発生タイミングにも依存する可能性があるため、瞬低の発生する位相(R 相)を 0° 、 45° 、 90° と変化させて観測した。オフ位相が 90° となる場合には、電圧回復時に瞬時的に大きな電流が生じたが、それ以外には大きな差異は認められなかった。





(d)SVC 電流(オフ位相 90°)
図 5.4(1)-23 瞬時電圧低下試験

1. 5. 4(1)④AVR 付柱上変圧器の基礎特性試験

1. 5. 4(1)④1)試験方法

図 5.4(1)-24 の通り、単相回路のみに着目して以下の試験を実施した。主な試験条件は以下の通りである。

- 三相 3 線式の電源装置および線路インピーダンス装置に対し、R 相で接続する AVR 付柱上変圧器を介して単相回路を接続し、主として AVR 付柱上変圧器 2 次側に相当するノード4の電圧に対する制御性能を観測した。
- 線路インピーダンスは、 $43.2\text{m}\Omega$ 、 137.5mH とした。
- 以下に示す電圧急変試験、周波数急変試験、位相跳躍試験、電圧歪耐量試験、瞬時電圧低下試験については無負荷にて実施し、擾乱は高機能低圧交流電源装置により生成した。
- 負荷の投入や解列に対する応答試験は、図の通りノード4に接続する負荷の入切にて実施した。

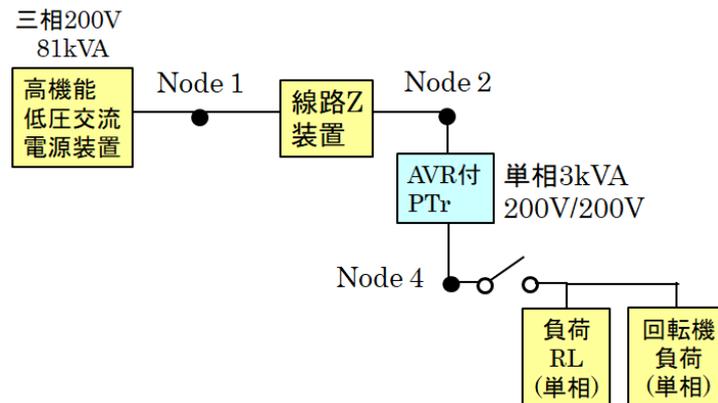


図 5.4(1)-24 AVR 付柱上変圧器の特性試験用回路構成

1. 5. 4(1)④2) 電圧急変試験(ステップ)

交流低圧電源装置の出力電圧をステップ状に変化させて、その応答を観測した。図 5.4(1)-25 に、AVR 付柱上変圧器の一次側にあたる Node 2(R 相)および二次側の Node 4 での電圧を重ねて示した。ステップ状の電圧上昇および降下に対して、いずれも 500msec 程度をかけて電圧制御が機能している様子がわかる。出力電圧の変動補償範囲は±10V であるため完全に電圧は 100%まで回復していないが、擾乱発生から 1sec 程度後にはほぼ定常値に到達している様子がわかる。

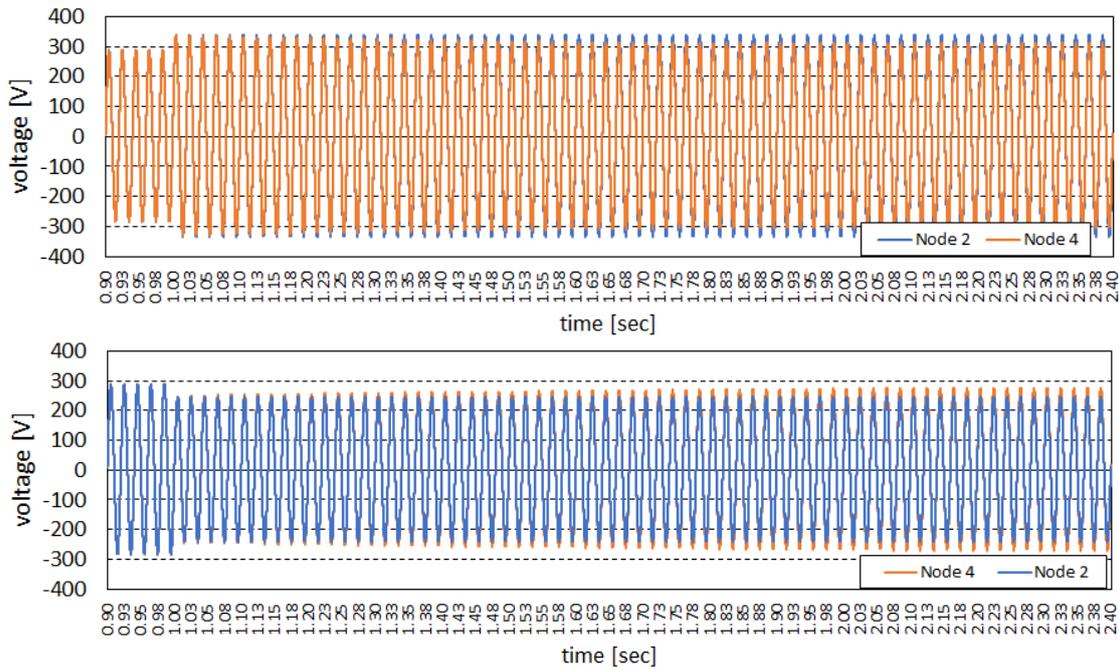


図 5.4(1)-25 AVR-Tr の電圧急変試験(上:100→118%、下:100→85%)

1. 5. 4(1)④3)周波数急変試験(ステップ)

交流低圧電源装置の出力電圧の周波数をステップ状に変化させて、図 5.4(1)-26 の通り AVR 付柱上変圧器二次側の Node 4 の電圧を観測した。両図とも時刻 1sec にて周波数急変を発生しているが、不要動作等の影響は受けずに運転継続できている。ここでは 50Hz に対して 52Hz および 48.5Hz へ急変した場合を示しているが、周波数変動幅がもう少し増加すると、制御範囲外となり運転継続できずに制御機能が停止に至る傾向であった。

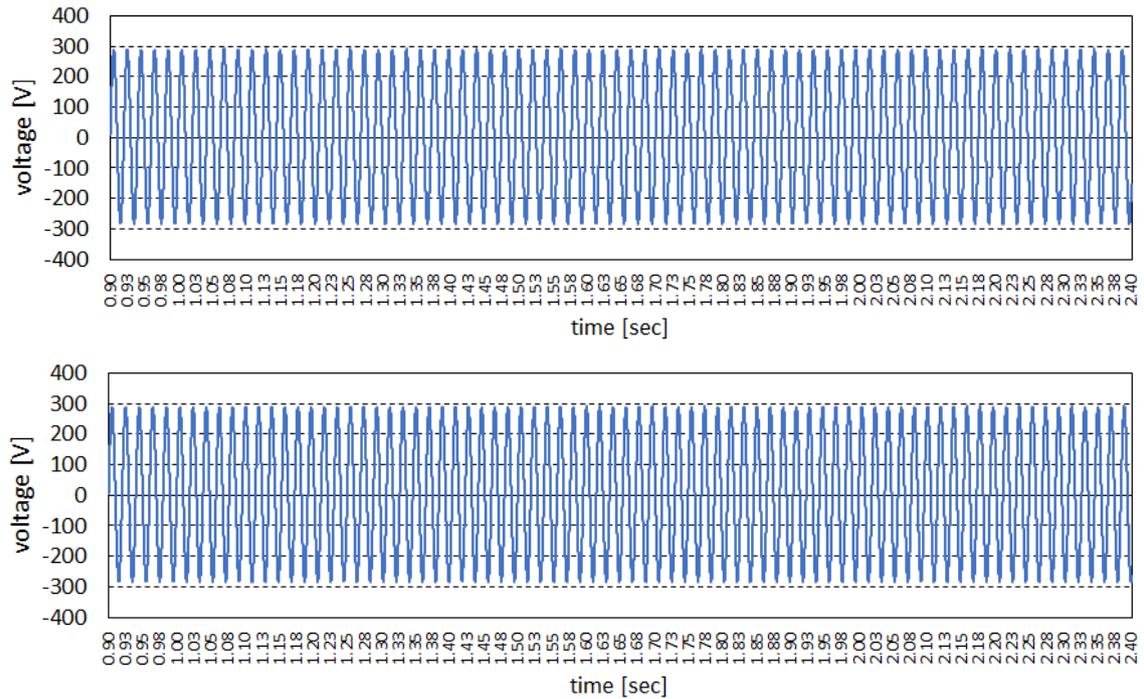


図 5.4(1)-26 AVR-Tr の周波数急変試験(上:50→48.5Hz、下:50→52Hz)

1. 5. 4(1)④4)位相跳躍試験

位相跳躍の発生に対して AVR 付柱上変圧器は大きな影響を受けず、位相跳躍の度合いを 120° とした場合でも、運転停止するケースが見られなかった。図 5.4(1)-27 には一例として 30° の位相跳躍が生じた場合の Node 4 の電圧波形を示す。

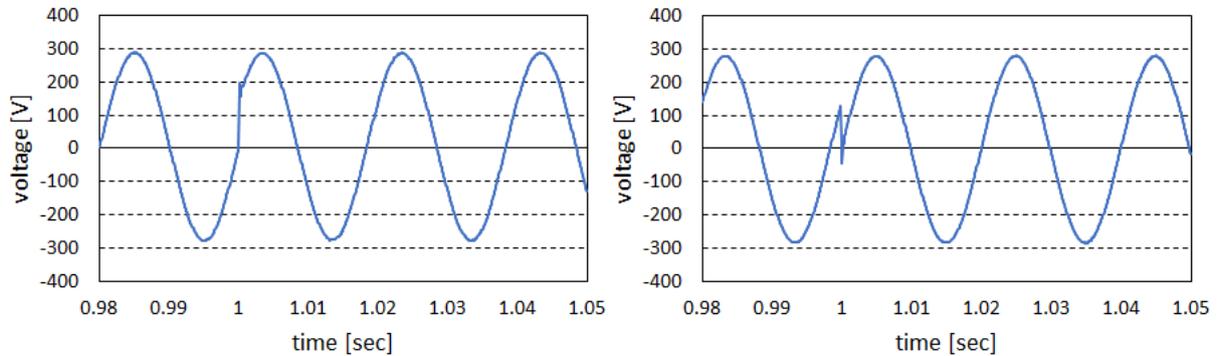


図 5.4(1)-27 系統電圧位相跳躍時の AVR-Tr の 2 次側電圧
(左: 30° 進み、右: 30° 遅れ)

1. 5. 4(1)④5)電圧歪耐量試験

SVC の特性試験と同様に、総合歪率が 5% となる高調波を含むステップ状の電圧変動を適用し、その応答を観測した結果を図 5.4(1)-28 に示す。特段に電圧歪の影響を受けることはなく、 $3.5 \sim 4\text{sec}$ 程度の間電圧が 200V へと制御されている。

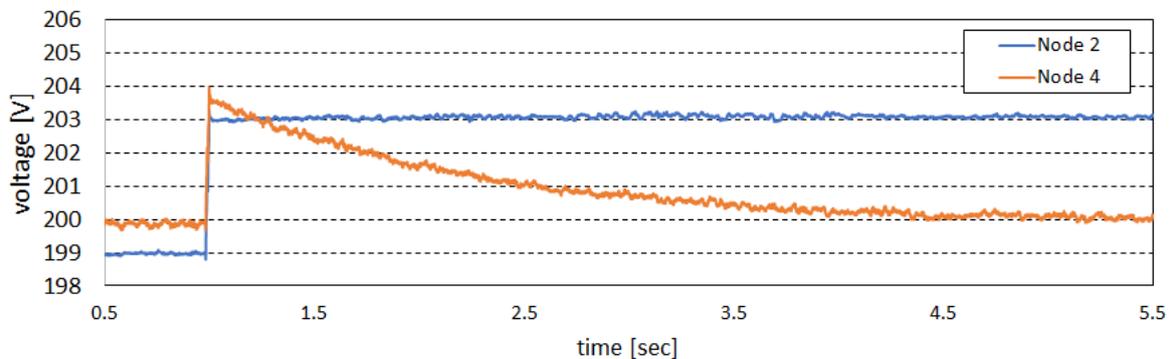
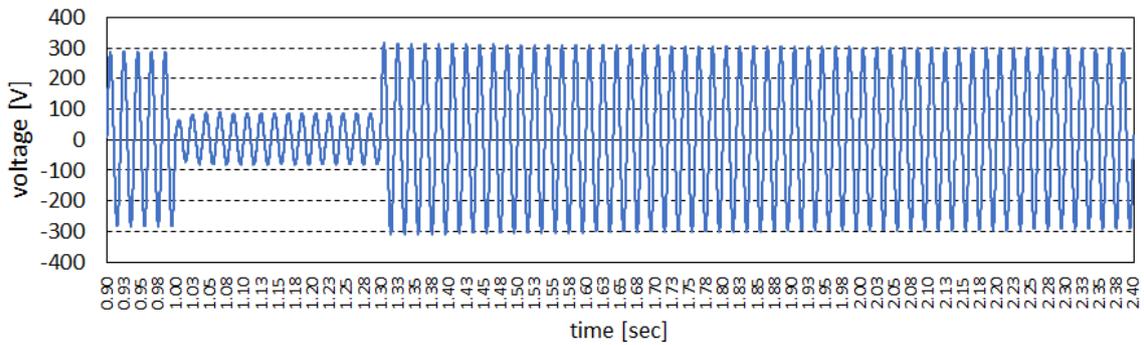


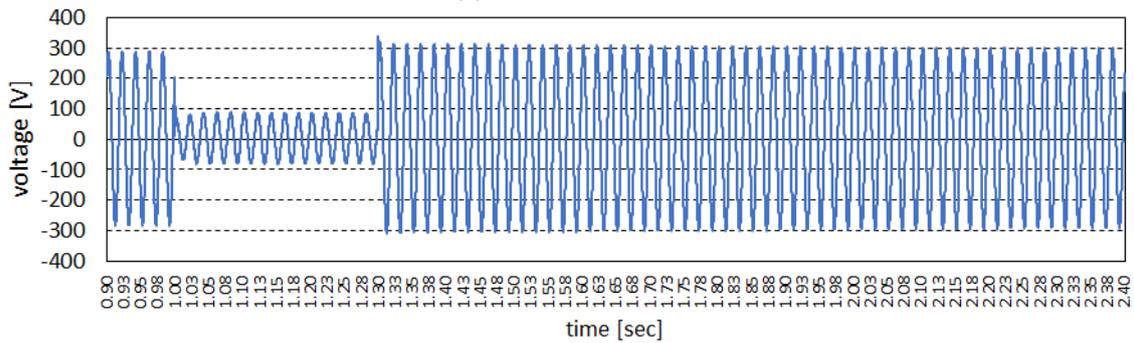
図 5.4(1)-28 電圧歪耐量試験

1. 5. 4(1)④6)瞬時電圧低下試験

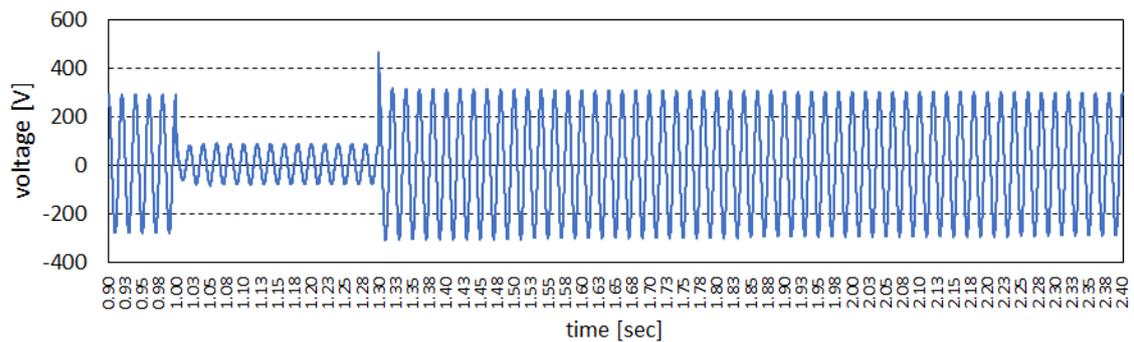
交流低電圧電源装置により瞬時電圧低下を発生させて、その応答を図 5.4(1)-29 の通り観測した。SVCの場合と同様に、瞬時電圧低下発生タイミングに影響を受ける可能性を考えて、位相 0° 、 45° 、 90° で瞬時電圧低下が発生した場合を想定した3つの波形を示している。いずれも瞬時電圧低下発生時の直後には数10msecの短時間のうちに電圧制御が働き、瞬時電圧低下発生中の電圧増加に貢献している様子がわかる。なお、位相 90° の場合には電圧回復時に瞬時的に大きな電圧が生じている点はSVCと同様である。



(a)オフ位相 0°



(b)オフ位相 45°



(c)オフ位相 90°

図 5.4(1)-29 AVR-Tr の瞬時電圧低下試験、残電圧 20%、持続時間 300msec
(上:オフ位相 0° 、中:オフ位相 45° 、下:オフ位相 90°)

1. 5. 4(1)⑤PV の出力変動に対する電圧変動抑制制御

1. 5. 4(1)⑤1)試験方法

SVC や AVR-Tr の定常的な制御特性を確認するために、図 5.4(1)-30 の回路構成にて、表 5.4(1)-2 に沿って 2 時間分の PV の出力変動(図 5.4(1)-31)に対する電圧制御の様子を実験した。同図に示す PV 出力の変動パターンは、横浜国立大学にて測定した日射変動の実測値に基づいたものである。試験条件は以下の通りである。

- 全ケース共通で、三相負荷は両ノードいずれも各相 878W + j128Var、単相回路に接続される負荷は 1kW + j128Var、PV 出力は各相 3.1kW ピークとした。
- 線路インピーダンスは、いずれも 43.2mΩ、137.5μH とした。
- PV 模擬装置の再生時間を変化させる機能を用いて、12 倍速で実施した。

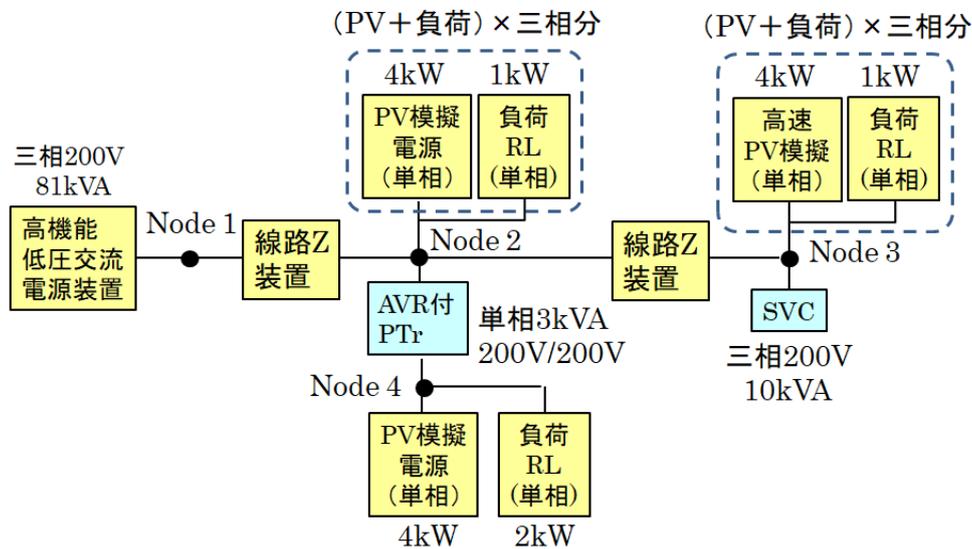


図 5.4(1)-30 PV による電圧変動解析用回路構成

表 5.4(1)-2 シミュレーションケース

	PV 出力	Node 4	SVC	AVR
Case 1	平衡	無	停止	停止
Case 2	平衡	無	稼働	停止
Case 3	不平衡 (node 3 T 相 PV 出力半減)	有	停止	停止 / 稼働
Case 4	不平衡 (node 3 T 相 PV 出力半減)	有	稼働	稼働

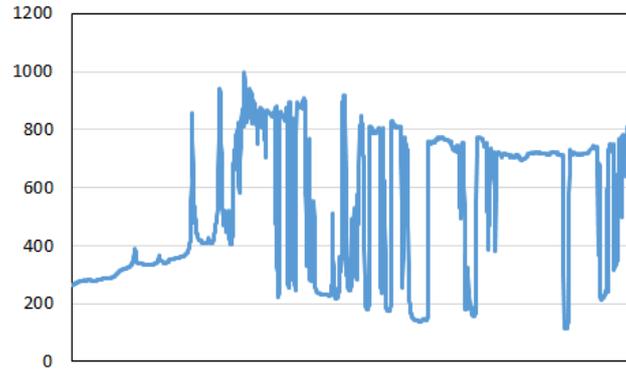
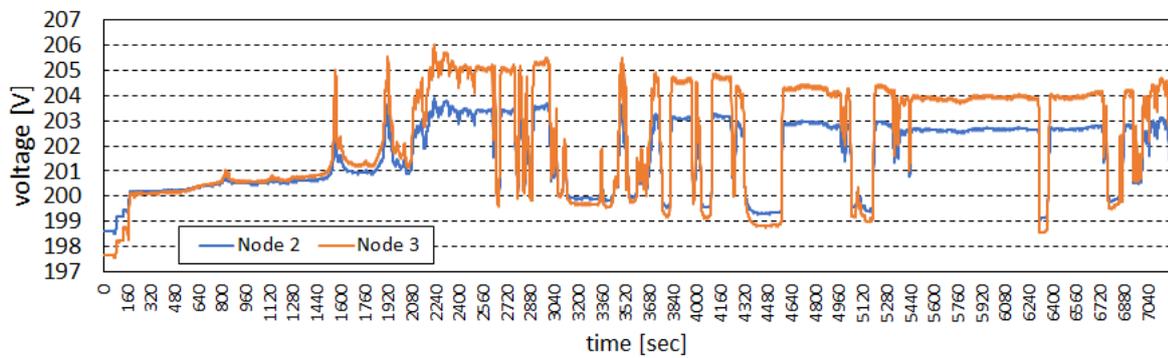


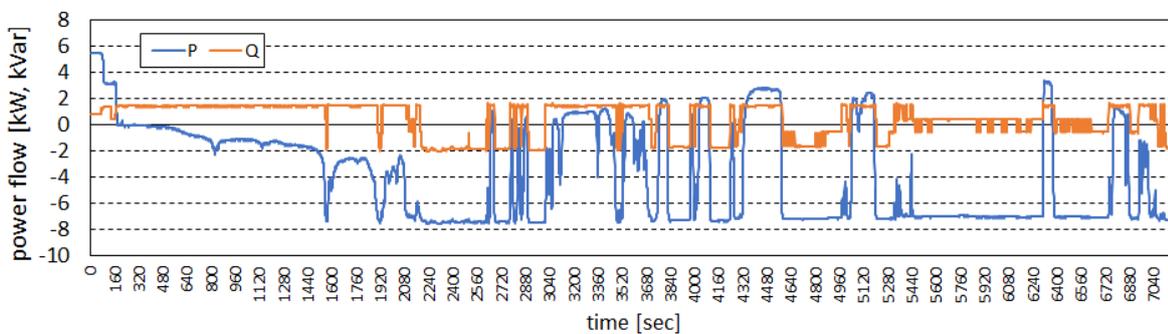
図 5.4(1)-31 PV 出力の変動パターン

1. 5. 4(1)⑤2)試験結果-Case 1-

まず、PV および負荷の双方を三相平衡状態としたまま PV 出力を図 5.4(1)-31 の通り変動させて、SVC および AVR-Tr が停止した状態で実験した結果を図 5.4(1)-32 に示す。同図(a)にはノード 2 および 3 の代表相(R-S 線間)電圧の実効値を示す。PV 出力の変動に合わせて電圧が大きく変動している様子がわかる。なお、基準値となる200Vに対して±1.5%(197V~203V)を適正範囲と考える場合、これを大きく逸脱している。特に電圧変動の大きさは、フィーダ末端側に位置するノード 3 において特に大きくなっている。同図(b)には、ブランチ 1 で観測された三相合計での電力潮流を示す。PV 模擬装置が起動した 150 sec あたりからは、概ね逆潮流が流れ続けている。なお、無効電力潮流は固定のアナログ負荷に起因するためほぼ一定であるが、特に電圧上昇が大きい時間帯では PCS の電圧上昇抑制機能による無効電力制御の影響で変動が見られる。



(a)ノード電圧

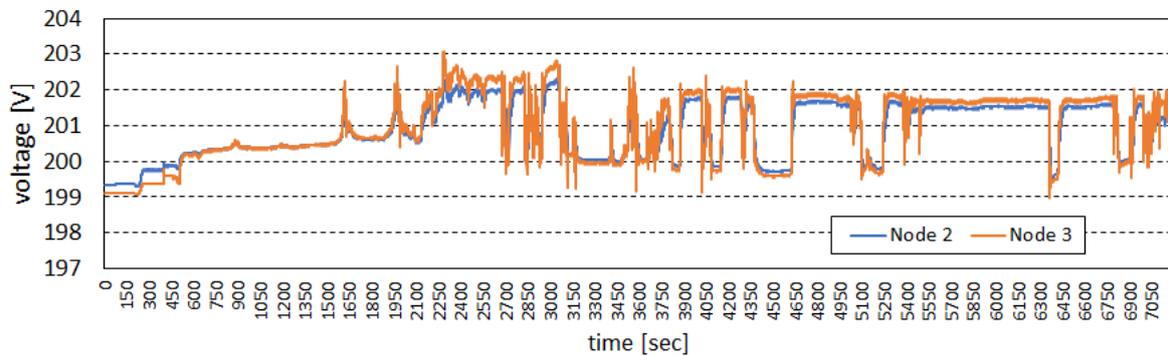


(b)ブランチ1での電力潮流(正:負荷方向、負:逆潮流)

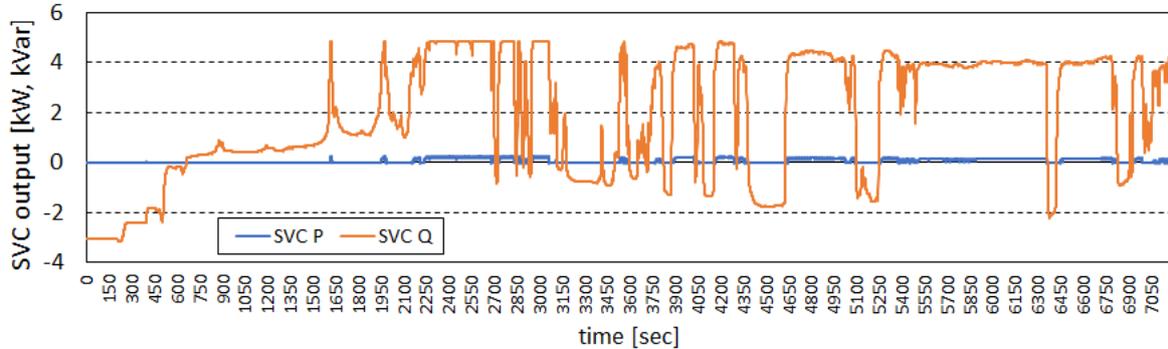
図 5.4(1)-32 実験結果(Case 1)

1. 5. 4(1)⑤3)試験結果-Case 2-

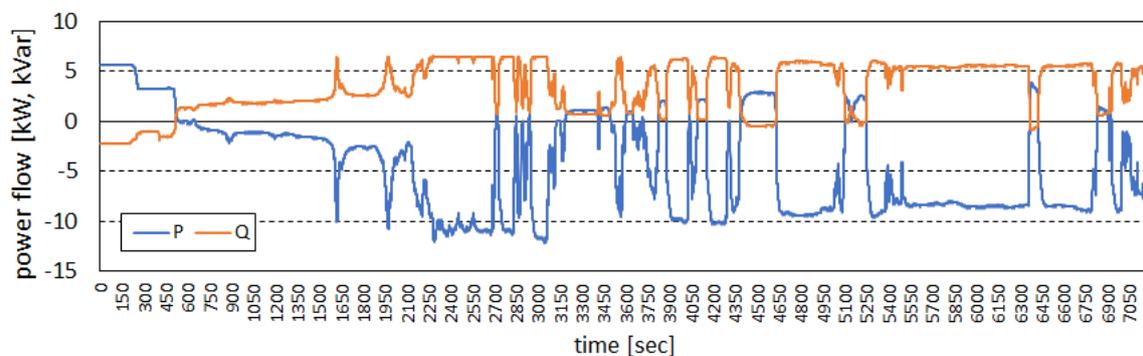
次に SVC を起動して、電圧変動の抑制効果を確認した。実験結果を図 5.4(1)-33 に示す。SVC の連系するノード3の電圧変化に合わせて無効電力制御が働き、同図(a)に示すように Case 1 に比較して電圧変動幅が大きく改善され、前述の $200\text{V} \pm 1.5\%$ の範囲に概ね収まっている様子がわかる。このときの SVC 出力は同図(b)に示す通りであり、電圧上昇を抑制するように遅れの無効電力を吸収する制御が行われている。2300~3000sec あたりの時間では、SVC の無効電力制御量が上限の 5kVar に到達して飽和している。なお、直流電圧を維持するために多少の有効電力が制御されている。同図(c)にはブランチ1で観測される電力潮流を示す。PV 出力に起因して有効電力は概ね逆潮流となっている一方で、電圧上昇を抑制する SVC の働きにより無効電力は負荷方向へ主として流れている。



(a)ノード電圧



(b)SVC 出力

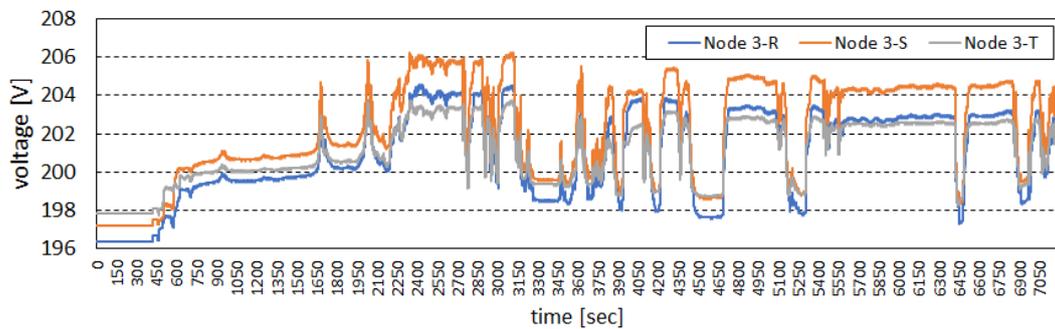


(c)ブランチ1での電力潮流(正:負荷方向、負:逆潮流)

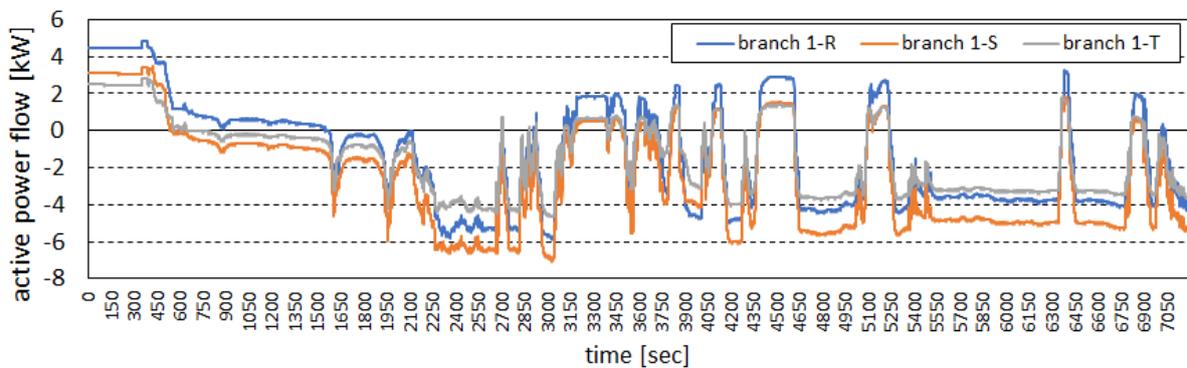
図 5.4(1)-33 実験結果(Case 2)

1. 5. 4(1)⑤4)試験結果-Case 3-

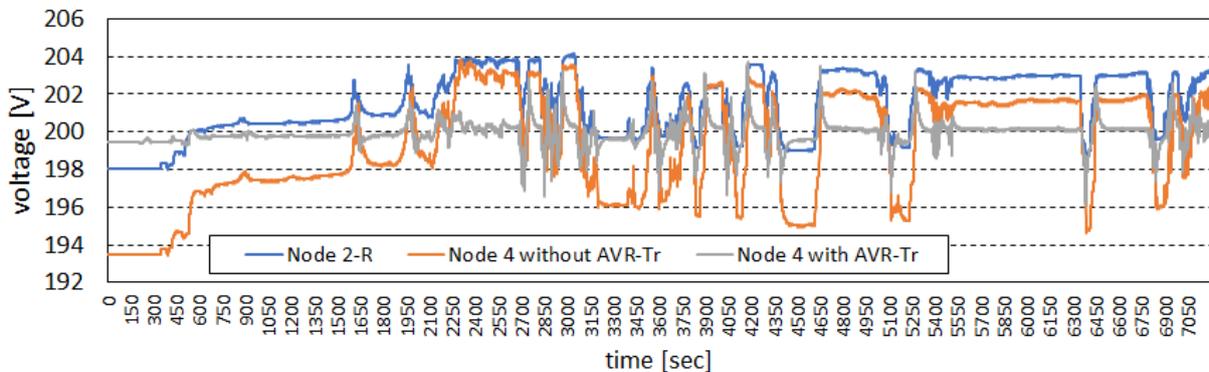
再び SVC を停止状態とした上で、前述の通り PV 出力を三相不平衡とし、ノード4を接続して電圧変動を観測した結果を図 5.4(1)-34 に示す。同図(a)にはノード3における各相の電圧を個別に示した。単相回路(ノード4)が接続した R-S 相や、PV 出力が半減となった T-R 相では電圧が低めとなり、三相不平衡が拡大している様子がわかる。これに対応してブランチ1における電力潮流も、同図(b)の通り R-S 相や T-R 相では比較的重くなる結果となっている。また、ノード4における電圧変化を、柱上変圧器の1次側に相当するノード2の R-S 相と共に同図(c)に示した。変圧器リアクタンスの影響が大きく、ノード2の R-S 相に対してノード4では大きく電圧が低下している。ここで、AVR-Tr を稼働した場合の結果を同図中に示した。急峻な電圧変動の発生直後には一時的に電圧が大きく変動する箇所もあるが、概ね良好にノード4の電圧を目標とする 200V 付近に維持できている。



(a)ノード3の三相電圧



(b)ブランチ1の三相電力潮流

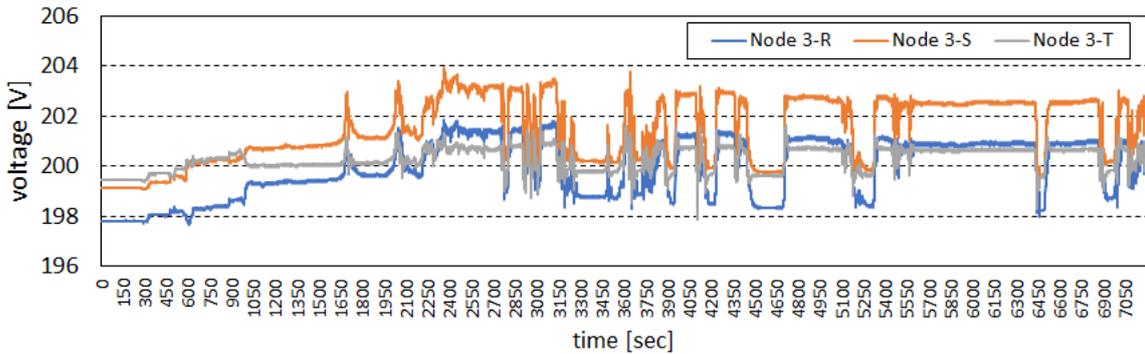


(a)単相回路の電圧制御(AVR-Tr による制御効果)

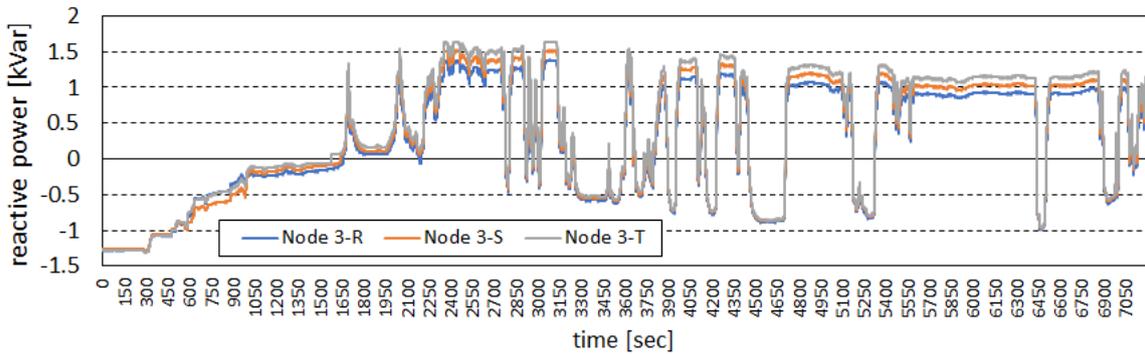
図 5.4(1)-34 実験結果(Case 3)

1. 5. 4(1)⑤5)試験結果-Case 4-

Case 3と同じ条件下にて、SVCも起動した場合の結果を図 5.4(1)-35 に示す。三相不平衡状態が SVC により改善されることを期待したケースであるが、SVC の容量が限定的であるため、すでに三相全体の電圧制御のためにおおよそ全ての容量が制御されており、あまり三相不平衡が解消される結果には至っていない。そこで三相不平衡解消の制御効果を確認するために、SVC の容量を 10kVA とした場合の実験結果を図 5.4(1)-36 に示す。同図の通り、SVC に十分な容量があれば、三相不平衡率が改善されて不平衡率も大きく低下できている様子がわかる。



(a)ノード3の三相電圧



(b)ノード3の SVC の三相無効電力

図 5.4(1)-35 実験結果 (Case 4)

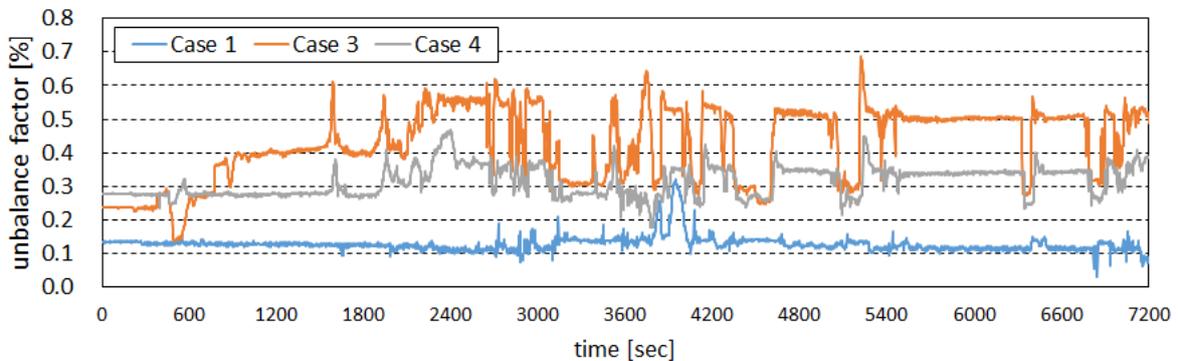


図 5.4(1)-36 SVC を 10kVA とした際の三相不平衡率

1. 5. 4(1)⑥SVC ミニモデルの同定試験

一般的に SVC の制御系は、連系点の電圧を目標値に維持する機能(ACAVR)、および半導体スイッチ背後の直流電圧を目標値に維持する機能(DCAVR)により構成される。この両機能は主として SVC の無効電力および有効電力の制御目標値を生成する役割を果たし、SVC の出力電流を定める機能(ACR)へと引き継がれ、さらにはスイッチング制御によりインバータの交流側電圧を生成する機能へと引き渡される。この制御系の概要を図 5.4(1)-37 に示す。

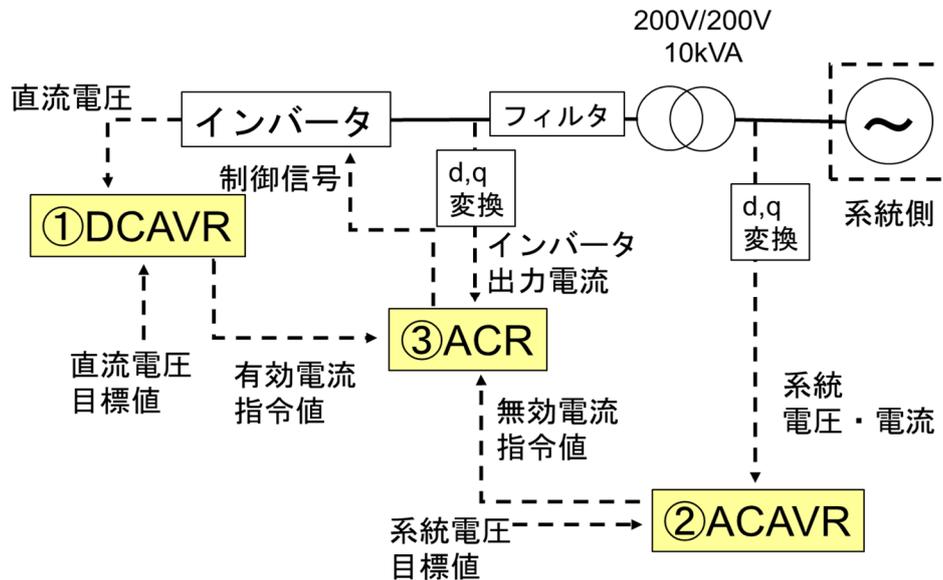
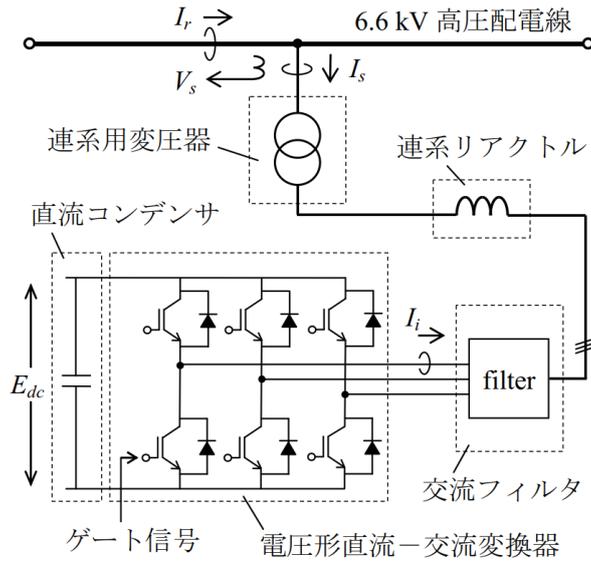
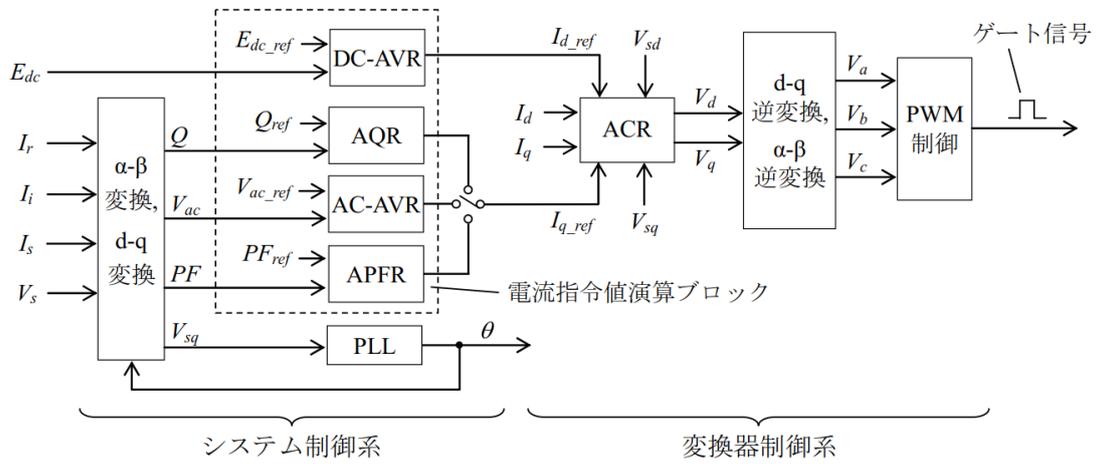


図 5.4(1)-37 SVC の制御系モデル

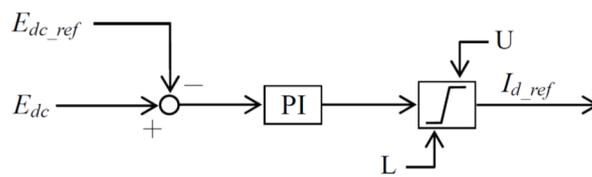
同様の構成に基づく SVC モデルの検討事例として、文献[3]において示されている SVC モデルが挙げられる。同文献における SVC モデルの主回路および制御系の概要を図 5.4(1)-38 に示す。このモデルは瞬時値解析用のモデルであり、電力中央研究所開発の電力系統瞬時値解析プログラム(XTAP)での動作が前提となっている。詳細については同文献を参照されたい。本章ではこの SVC モデルを基にして、以下の実験を通じて実験室グリッドに導入された SVC モデルのパラメータの同定を行い、SVC モデルを確定させた。



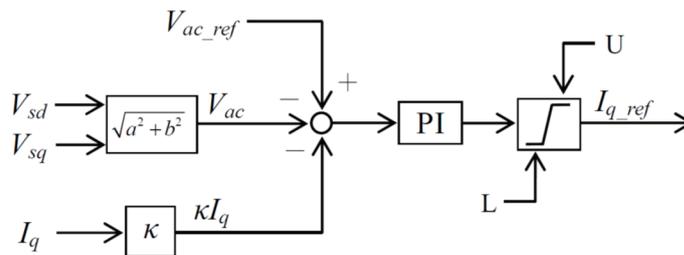
(a)主回路



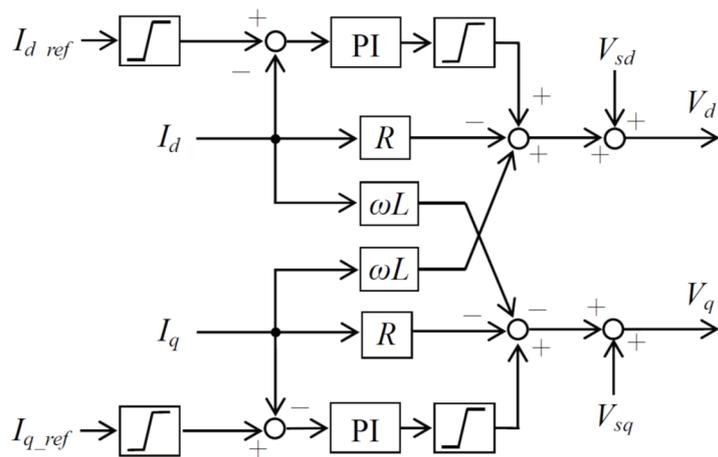
(b)制御系



(c)DCAVR



(d)ACAVR



(e)ACR

図 5.4(1)-38 SVC の瞬時値モデルの構成[3]

出典：長嶋友宏、福島健太郎、野田琢：“瞬時値解析による配電システムの動的電圧解析手法(その2)－配電システム用 STATCOM のモデル化－”、電力中央研究所報告、H14014 (2015)

表 5.4(1)-3 SVC の瞬時値モデルの基本仕様

定格容量	10kVA
交流定格電圧	200V
直流定格電圧	447.5V
直流コンデンサ	4950 μ F
高調波フィルタ	C:200 μ F、L:830 μ H
連系用変圧器のインピーダンス	3.5%

表 5.4(1)-4 SVC の瞬時値モデルの制御系パラメータ

ACA VR ゲイン	1
ACA VR 時定数	16 msec
スロープリアクタンス	0.7%
電圧検出フィルタ時定数	10 msec
DCA VR ゲイン	1
DCA VR 時定数	100 msec
ACR ゲイン	3

SVC のミニモデルでは様々なパラメータの設定が必要であるが、SVC のミニモデルの仕様に合わせて、主要なパラメータを表 5.4(1)-3 の通り定めた。制御の動特性に関わる各種パラメータに

関しては、負荷投入や瞬時電圧低下に対するステップ応答、ならびに周波数特性試験を通じて、表 5.4(1)-4 の通り定めた。具体的には以下の通りである。

まず、図 5.4(1)-10 の実験回路構成において、負荷をステップ状に投入した場合の SVC の電流（実効値）の変化を図 5.4(1)-39 に示した。上記の SVC 瞬時値モデルでは、ACAVR におけるスローリアクタンスおよび PI 制御定数（ゲインと時定数）が、この挙動に主に影響する。

次に、前述の瞬時電圧低下試験と同様の回路構成により、残電圧 90% の瞬時電圧低下を 1sec 継続した場合の直流電圧の変化を図 5.4(1)-40 に示す。この直流電圧の挙動は DCAVR の PI 制御定数（ゲインと時定数）によって概ね定まる。

最後に、図 5.4(1)-41 の実験回路構成により高機能低圧交流電源の出力電圧を様々な周波数で振動させながら SVC 出力の追従性を観測することで、図 5.4(1)-42 のようにボード線図を描いた。ACAVR の PI 制御定数や、同制御系の先頭に導入されているフィルタ時定数を調整することで、シミュレーションモデルの応答を実機に合わせ込むことが可能である。

以上の検討を基に、SVC モデルの各種動特性に関わるパラメータについて、表 5.4(1)-4 の通り定めた。ただしこれらの特性は、後に示すフリッカ補償制御や安定性解析に際しては、随時再調整した。

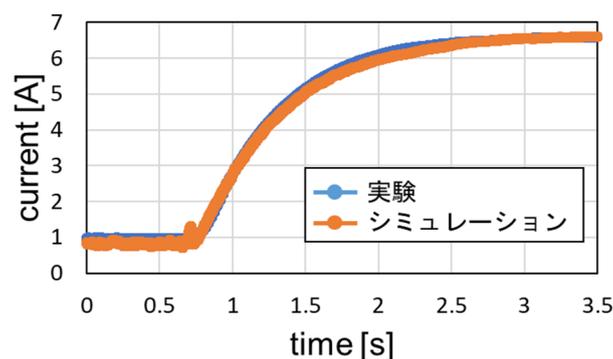


図 5.4(1)-39 負荷のステップ変動に対する制御応答(SVC 電流)

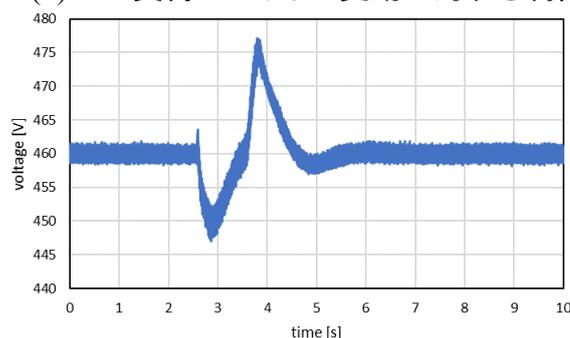
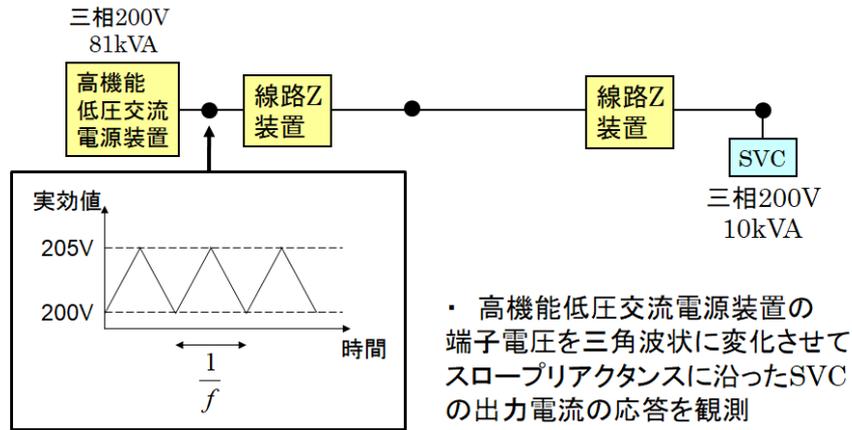


図 5.4(1)-40 瞬時電圧低下発生時の制御応答(SVC 直流電圧)



- ・ SVCのスローリアクタンス: 3.5%
- ・ 線路Z: 両ブランチともに、43.2 mΩ, 137.5 μH

図 5.4(1)-41 試験条件(周波数特性)

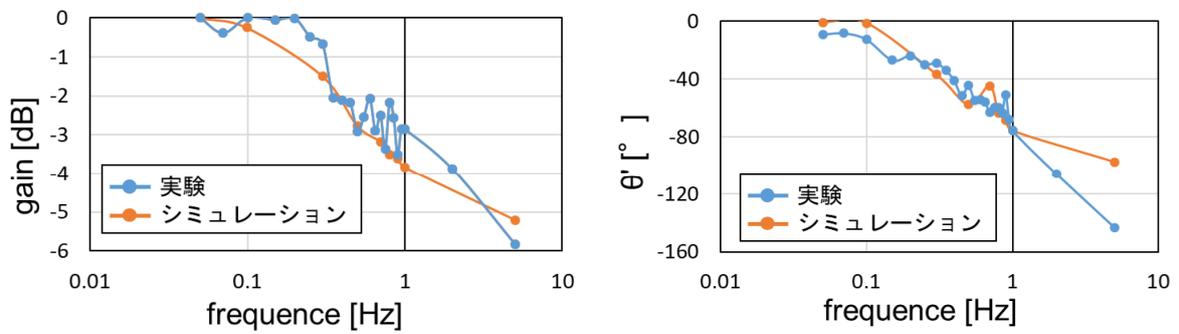


図 5.4(1)-42 SVC の周波数応答

1. 5. 4(1)⑦SVC および AVR-Tr による瞬時電圧低下補償制御

1. 5. 4(1)⑦1)瞬時電圧低下補償制御の概要

電力系統において瞬時電圧低下が発生すると、該当する地域の配電系統でも広く瞬時電圧低下が生じ、条件によっては当該地域内の PV が一斉に停止する可能性が危惧される。2017 年 4 月以降に導入された PV については、図 5.4(1)-43 に示す FRT 要件が適用されており、残電圧 20%以上の瞬時電圧低下に対しては解列しないと考えられるが、それよりも低い残電圧となる瞬時電圧低下に対しては一斉解列となる可能性がある。また、2017 年 4 月以前に導入された PV については旧 FRT 要件が適用されており、より残電圧が高い場合でも一斉解列の可能性はある。

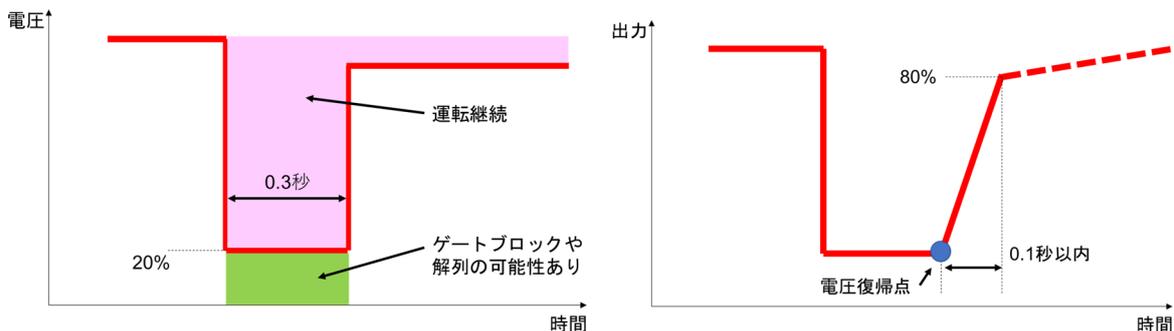


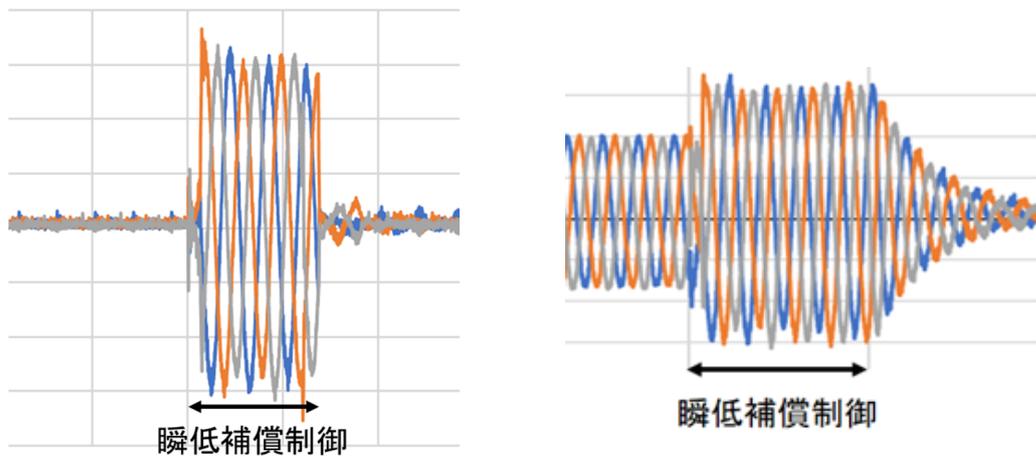
図 5.4(1)-43 PV に対する FRT 要件(2017 年 4 月以降)[5]

そこで研究開発項目①においては、瞬時電圧低下発生時に SVC もしくは AVR-Tr が急峻に残電圧を回復させるように制御を実施することで、瞬時電圧低下時における残電圧を少しでも上昇させることで、一斉解列のリスクを低減させる機能を持たせている。本節ではこの性能に関する試験結果について報告する。

研究開発項目①より提供された SVC ミニモデルにおける瞬時電圧低下補償制御の機能は以下の通りである。また、この動作の概要を図 5.4(1)-44 に示す。

- ・ 線間電圧が定格値の 50%以下となった場合に、通常時の制御から瞬時電圧低下補償制御へと動作モードを切り替える。
- ・ 瞬時電圧低下補償制御に移行した後は、極めて高速に無効電力出力を電流容量で定まる上限値まで増加させ、残電圧をできる限り増加させる。
- ・ 系統電圧の復帰により電圧が定格値の 80%以上に回復した際には、通常時の制御モードに復帰する。
- ・ 瞬時電圧低下の継続時間が指定した時間(300msec 程度が推奨される最大持続時間)を超過した際には、SVC 電流は一時的に 0 となり、同じ 300msec 後に再び最大出力へと復帰する。この一時的な制御停止時には、同図(a)に示すように直ちに停止するモードと、同図(b)に示すように徐々に停止するモードとのいずれかを選択できる。

- ・ 残電圧 5%程度までは不足電圧により停止しない。



(a) 直ちに停止するモード

(b) 徐々に停止するモード

図 5.4(1)-44 瞬時電圧低下補償制御モードの概要

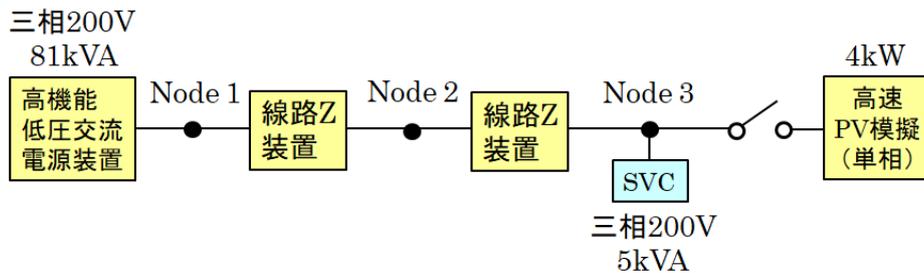
研究開発項目①より提供された AVR-Tr については、SVC とは異なり、瞬時電圧低下時にも通常時と同じ制御モードにて動作する。

1. 5. 4(1)⑦2) SVC および AVR-Tr による瞬時電圧低下補償制御検証

◎ SVC による瞬時電圧低下補償制御検証

○試験方法

図 5.4(1)-45 の回路構成にて、PV 出力を段階的に変化させながら、残電圧および持続時間の異なる様々な瞬時電圧低下を発生させて、SVC の有無に応じた PV の運転継続の可否を確認した。主な試験条件は以下の通りである。



- 配電線インピーダンスおよび PV はいずれも三相平衡。
- 線路インピーダンスは $Z1$ と $Z2$ で同一で、 $R=43.2\text{m}\Omega$ 、 $L=0.1374\text{mH}$ とした。
- 瞬時電圧低下発生直後の残電圧が概ね同様となるように、PV 出力が異なるケースの解析に際しては、PV 連系点の電圧が 200V になるように低圧交流電源装置の初期出力を適宜調整した上で、瞬時電圧低下を発生させた。

○試験結果

PV 出力を 1kW から 4kW まで段階的に変化させた場合の各ケースでの結果を表 5.4(1)-5 の通り整理した。

波形の一例を図 5.4(1)-46 と図 5.4(1)-47 に示す。両図は PV 出力が 1kW の場合に、SVC なしでは一相停止が生じていた場合(図 5.4(1)-46)に、SVC ありとすることで三相とも運転継続できた場合(図 5.4(1)-47)の事例である。まず図 5.4(1)-46 では、時刻 0.2sec のところで残電圧 12%となる三相の瞬時電圧低下(持続時間 70msec)が発生している。瞬時電圧低下継続中に、PV は出力を目標値に維持するために電流を増加させていくが、系統電圧が復帰したタイミングで少しスパイク上の電圧上昇が発生し、そのまま一相分の PV が停止に至っている(線電流を観測した結果を示しているため、2 線分の電流が減少している様子がわかる)。電圧復帰時に生じた過電流、もしくは PCS の直流電圧の異常によるものと考えられる(本研究開発では PCS の内部状態までは観測していない)。一方で SVC ありのケースでは、瞬時電圧低下継続中に SVC が無効電力を 200%まで出力することで、残電圧を上昇させ、事故継続中の PV 電流の上昇は、やや緩やかに制限されている。そのため系統電圧復帰時のスパイク状の電圧上昇も相対的に小さく、PV 停止することなく三相とも運転継続できている。

表 5.4(1)-5 実験結果
(a)ケース1 PV 出力 1kW

	瞬低の継続時間 [msec]						
		50	55	60	65	70	75
残電圧 [%]	12	○	○	○	○	×(1)	○
	11	○	○	○	×(1)	×(1)	○
	10	△(1)	△(1)	△(1)	△(1)	△(1) ×(1)	△(1)
	9	△(1)	△(1)	△(1)	△(1)	△(1)	△(1) ×(1)
	8	△(2)	△(2)	△(2)	△(2)	△(2)	△(2)

○ PV 運転継続(三相) △ PV ゲートブロック × PV 停止

()内の数字は△もしくは×の場合に当該事象の発生した相数

網掛けの箇所は、SVC 有の場合に改善されるところ(主に○となる)

(b)ケース2 PV 出力 2kW

	瞬低の継続時間 [msec]						
		50	55	60	65	70	75
残電圧 [%]	12	○	○	○	×(1)	×(1)	×(1)
	11	○	○	○	×(1)	×(1)	×(1)
	10	○	○	○	×(1)	×(1)	×(1)
	9	△(1)	△(1)	△(1)	△(1) ×(1)	△(1) ×(1)	△(1) ×(1)
	8	△(2)	△(2)	△(2)	△(2)	△(2)	△(2)

○ PV 運転継続(三相) △ PV ゲートブロック × PV 停止

()内の数字は△もしくは×の場合に当該事象の発生した相数

網掛けの箇所は、SVC 有の場合に改善されるところ(主に○となる)

(c)ケース3 PV 出力 3kW

	瞬低の継続時間 [msec]						
		50	55	60	65	70	75
残電圧 [%]	12	○	○	○	○	×(1)	×(1)
	11	○	○	○	×(1)	×(1)	×(1)
	10	○	○	○	×(1)	×(1)	×(1)
	9	△(1)	△(1)	△(1)	△(1) ×(1)	△(1) ×(1)	△(1) ×(1)
	8	△(1)	△(1)	△(1)	△(1) ×(1)	△(1) ×(1)	△(1) ×(1)

○ PV 運転継続(三相) △ PV ゲートブロック × PV 停止

()内の数字は△もしくは×の場合に当該事象の発生した相数

網掛けの箇所は、SVC 有の場合に改善されるところ(主に○となる)

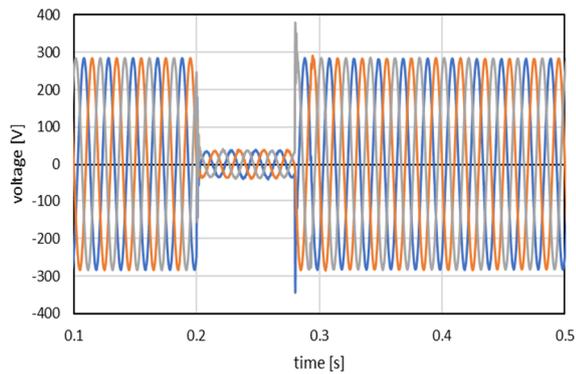
(d)ケース4 PV 出力 4kW

	瞬低の継続時間 [msec]						
		50	55	60	65	70	75
残電圧 [%]	12	○	○	○	○	○	○
	11	○	○	○	○	○	○
	10	○	○	○	○	○	○
	9	○	○	○	×(1)	×(1)	×(1)
	8	△(1)	△(1)	△(1)	△(1)	△(1)	△(1) ×(1)

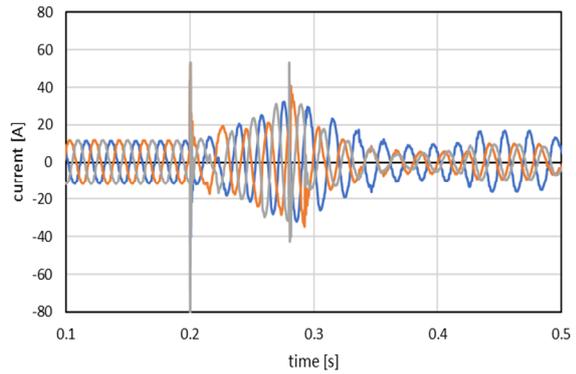
○ PV 運転継続(三相) △ PV ゲートブロック × PV 停止

()内の数字は△もしくは×の場合に当該事象の発生した相数

網掛けの箇所は、SVC 有の場合に改善されるところ(主に○となる)

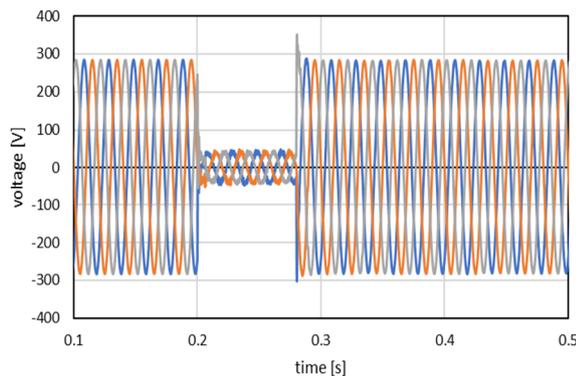


(a)電圧

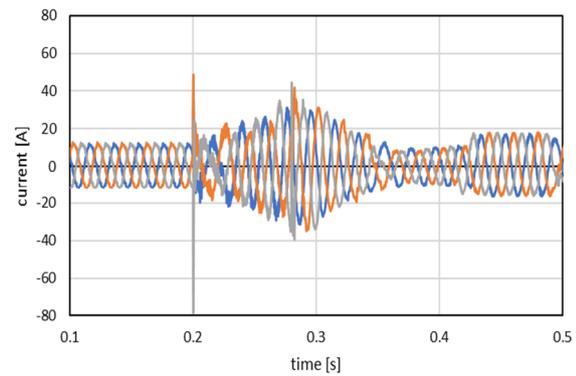


(b)線電流(PV 電流)

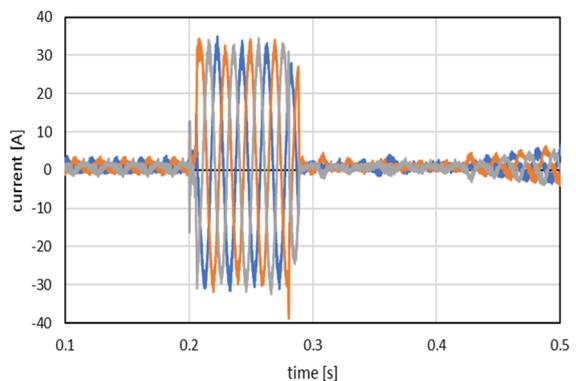
図 5.4(1)-46 実験結果(PV 出力 1kW、残電圧 12%、持続時間 70msec、SVC なし)



(a)電圧



(b)PV 電流



(c)SVC 電流

図 5.4(1)-47 実験結果(PV 出力 1kW、残電圧 12%、持続時間 70msec、SVC あり)

一方で、瞬時電圧低下の持続時間が長い場合には、SVC による補償制御が逆に運転継続の支障にならないように留意する必要がある。例として、PV 出力 3.2kW で、持続時間 200msec の瞬時電圧低下が発生した場合の実験結果を図 5.4(1)-48～図 5.4(1)-50 に示す。SVC なしの場合には、図 5.4(1)-48 に示す通り PV は三相とも瞬時電圧低下によく耐えて、系統電圧復帰後は速やかに元の電流に復帰して運転継続できている。しかし SVC 有の場合には素子の熱耐力の観点から瞬時電圧低下の補償制御の継続時間がどうしても制限される。例として、図 5.4(1)-49 に SVC が瞬時電圧低下開始から 100msec 経過したところで無効電力制御を停止した場合の波形

を示す。このとき、PV 電流は SVC の停止に引き続いて急激に出力を下げ、三相とも停止に至っている。このように SVC が急激に運転停止すると、これが新たな擾乱となって PV の運転継続の支障となる可能性がある。そこで、SVC の制御を 300msec の時定数にて緩やかに停止した場合の実験結果を図 5.4(1)-50 に示す。ここでは SVC が急激に停止することなく、PV は三相とも無事に運転継続できており、緩やかに制御停止することの有用性が示されている。

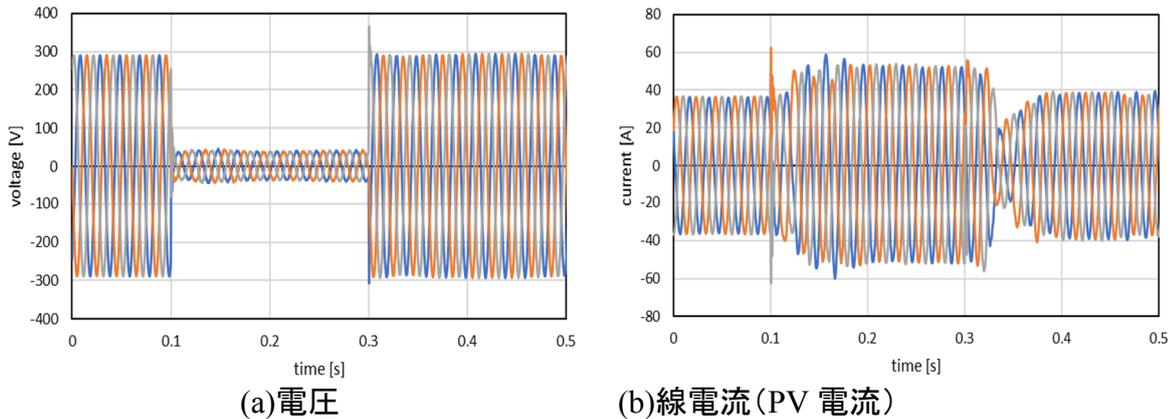


図 5.4(1)-48 実験結果(PV 出力 3.2kW、残電圧 10%、持続時間 200msec、SVC なし)

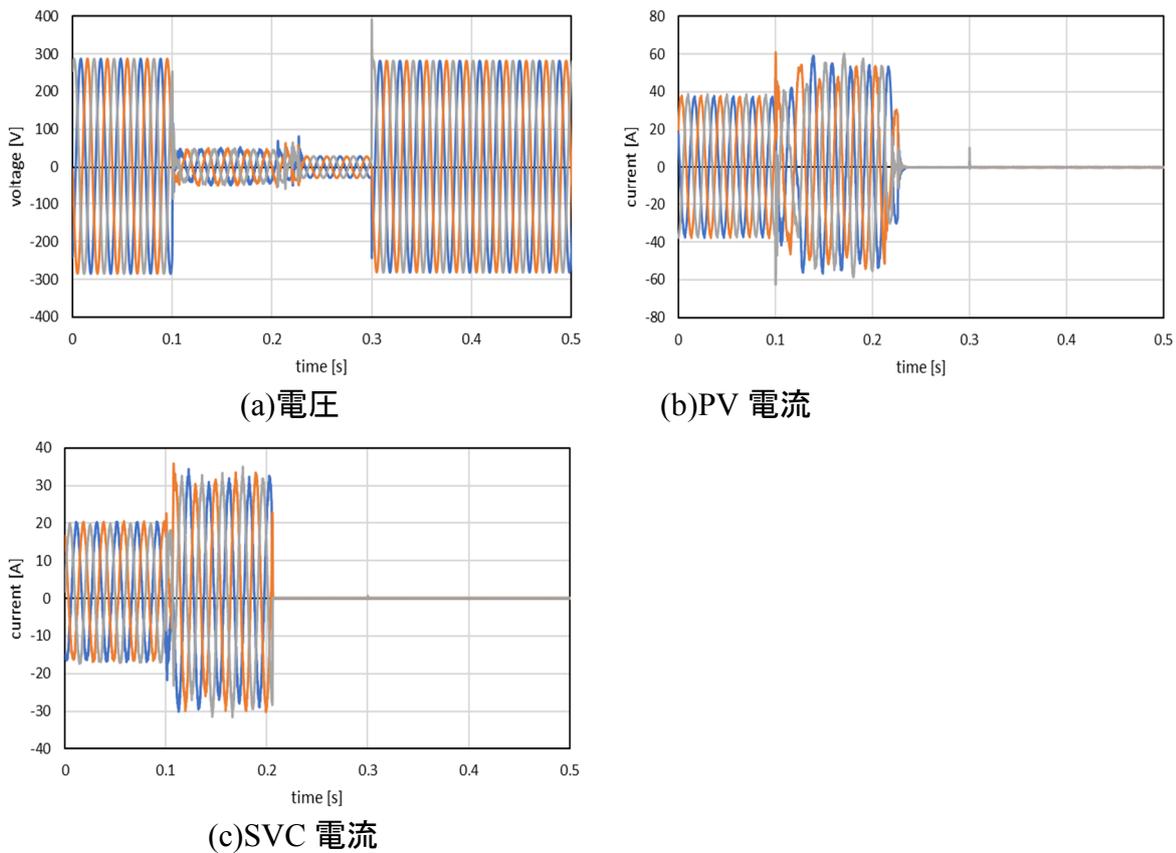
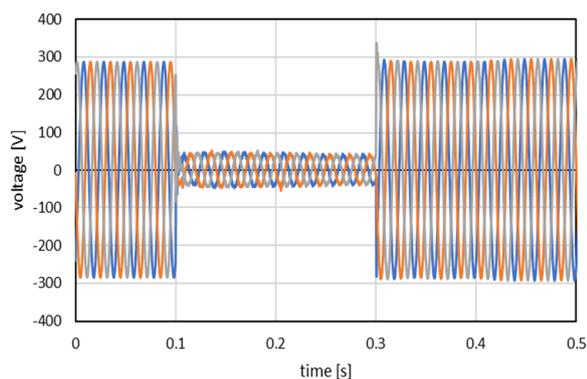
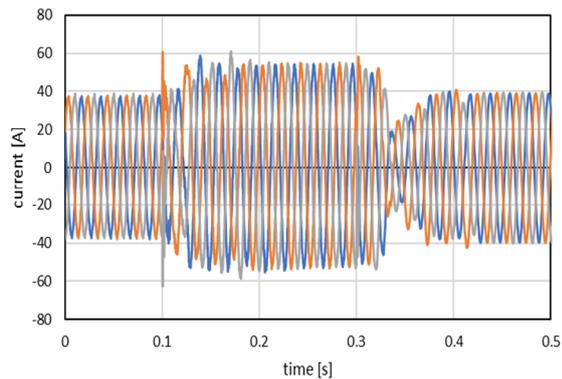


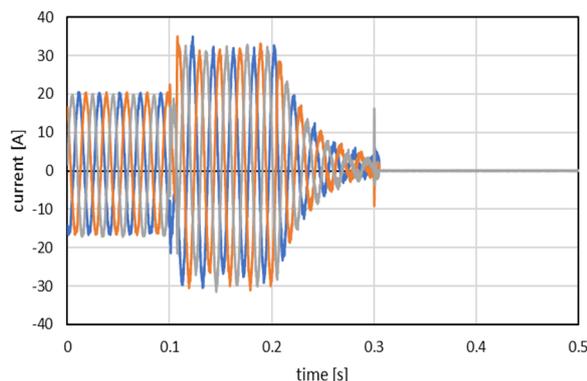
図 5.4(1)-49 実験結果
(PV 出力 3.2kW、残電圧 10%、持続時間 200msec、SVC あり(通常通り停止))



(a)電圧



(b)PV 電流



(c)SVC 電流

図 5.4(1)-50 実験結果

(PV 出力 3.2kW、残電圧 10%、持続時間 200msec、SVC あり(時定数 300msec で停止))

以上の通り、SVC による瞬時電圧低下の補償制御を適用することで、PCS の脱落量を低減できる可能性があることを示したが、その効果は限定的であった。その理由としては、実験室グリッドにおける配電線長が十分に長いケースではないため、SVC の無効電力制御が十分に効きづらいことが挙げられる。また、機器の SiC 化が実現すると、熱耐量が向上して短時間であれば定格容量の 200%程度の出力が出せると考えられるため、より瞬時電圧低下の補償機能の有効性が向上すると見込まれる。

◎AVR-Tr による瞬時電圧低下補償制御

○試験方法

瞬時電圧低下発生時に、AVR-Tr により変圧器 2 次側電圧が急速に増加することにより、AVR-Tr を介して接続された低圧系統内の PV の運転継続を支援できる可能性がある。この効果について、図 5.4(1)-51 の回路構成にて、残電圧および持続時間の異なる様々な瞬時電圧低下を発生させて、AVR-Tr の有無に応じた PV の運転継続の可否を確認した。主な試験条件は以下の通りである。

- 単相回路に着目して、三相負荷および PV は全て停止させて試験した。
- 低圧系統模擬回路の PV 出力は 1kW とし、負荷は停止とした。
- 線路インピーダンスはノード 1-2 間のみを用いた(線路インピーダンス $43.2\text{m}\Omega$ 、 137.5mH)。

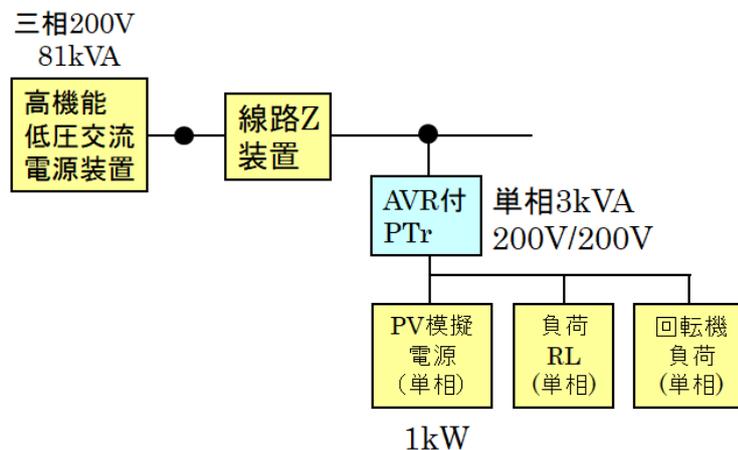
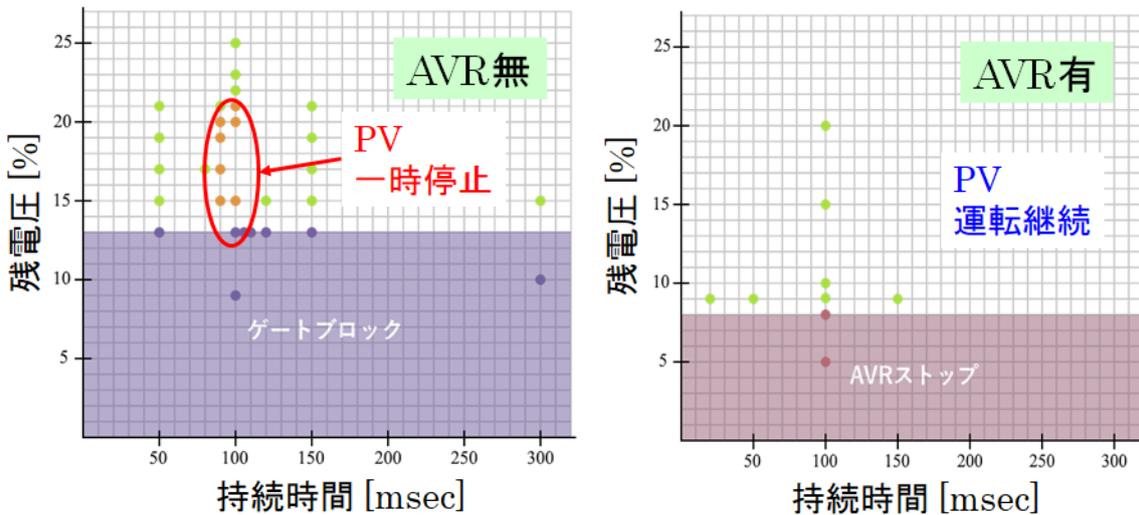


図 5.4(1)-51 瞬時電圧低下補償制御(AVR-Tr)検証用の回路構成

○試験結果

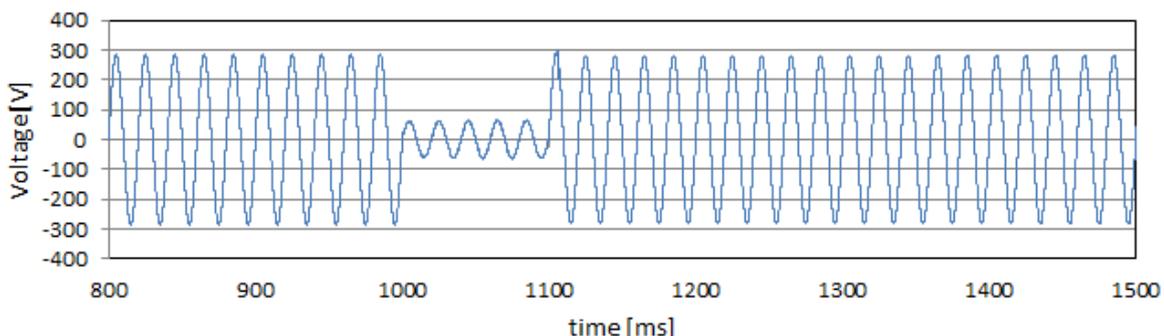
試験結果のまとめを図 5.4(1)-52 に示す。AVR-Tr が無い場合は、概ね残電圧 13%以下の瞬時電圧低下により PV 停止へと至っていた。AVR-Tr 有の場合では、概ね 5%程度は安定して電圧を増加させることができるため、9%程度の残電圧までは PV が運転継続できる結果となった。一方で AVR-Tr 無の場合には、持続時間 100msec 程度の場合には、20%以下の残電圧では運転停止となった。AVR-Tr 有の場合には、このような特殊な条件下では高い残電圧でも停止するような現象は無く、安定的に9%程度の残電圧までは運転継続できた。残電圧 20%、瞬低持続時間 100msec の条件にて、AVR-Tr 無および有による試験結果をそれぞれ図 5.4(1)-53 および図 5.4(1)-54 に示す。それぞれ、時刻 1000msec にて瞬時電圧低下が発生し、両図とも、瞬低継続中に PCS 電流が増加している様子がわかる。これは瞬低の発生により PCS 出力が大きく低下するため、目標出力への追従のための電流増加と考えられる。同様に、PCS 出力が低下すればすぐに PCS 直流電圧が増加するため、その解消のために一層出力を増加させる必要があるためと考えられる。AVR-Tr 無の図 5.4(1)-53 では、電流増加中に系統電圧が復旧し、復旧直後にも電流制御系の遅れによりさらに電流が増加することで出力過剰となり、PCS の過電力リレーにより停止した可能性がある。一方で AVR-Tr 有の場合では、瞬低継続中の残電圧が高めに維持されるため、前述の電流制御および直流電圧増加の影響が緩和された結果、PV 停止を回避できたと考えられる。



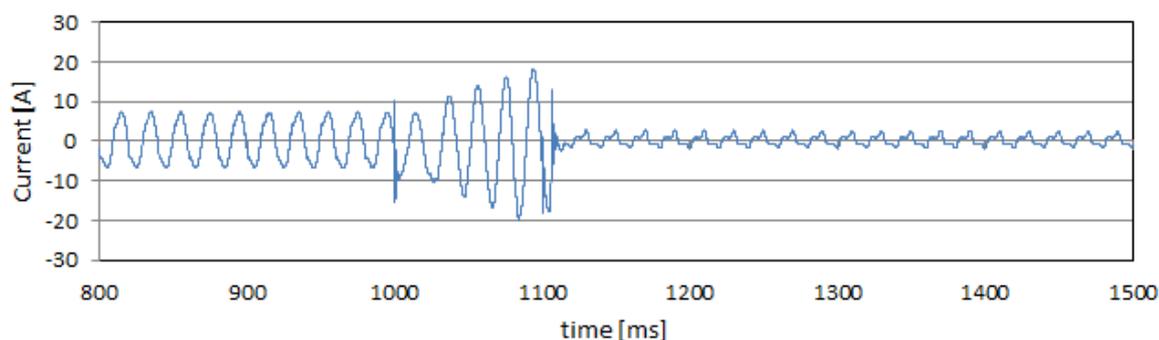
(a)AVR-Tr 無

(b)AVR-Tr 有

図 5.4(1)-52 実験結果のまとめ

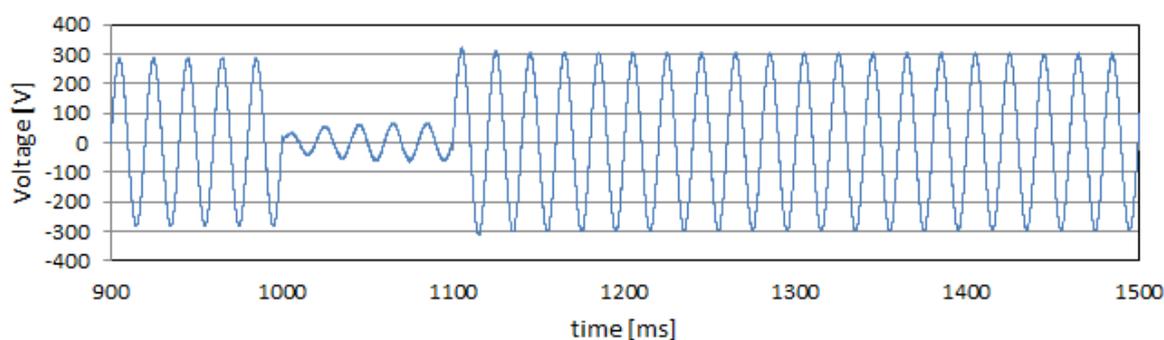


(a)系統電圧

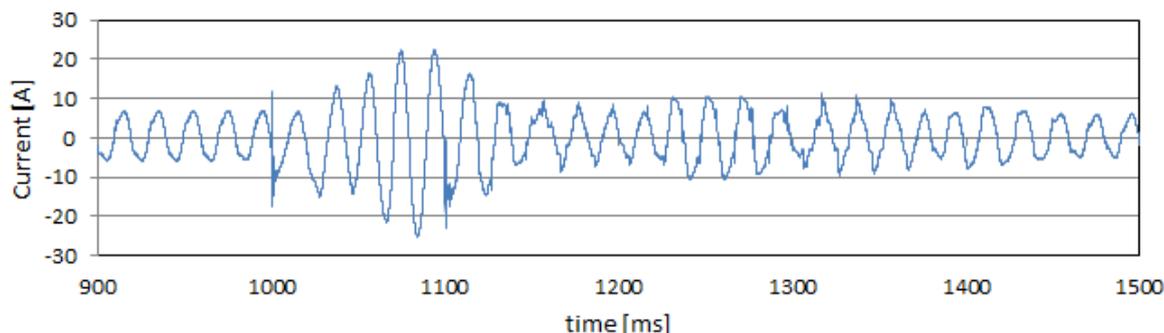


(b)PCS 電流

図 5.4(1)-53 実験結果(AVR-Tr 無、残電圧 20%、持続時間 100msec)



(a)系統電圧



(b)PCS 電流

図 5.4(1)-54 実験結果(AVR-Tr 有、残電圧 20%、持続時間 100msec)

1. 5. 4(1)⑧SVC によるフリッカ補償制御

1. 5. 4(1)⑧1)検証モデル

PV の導入量の増加に伴い、PCS に搭載された無効電力ステップ注入機能付周波数フィードバック方式(以下、新型能動方式)による単独運転検出機能の効果により、2017年初め頃には九州地域において広域的な電圧フリッカ現象が発生し問題となった。SVC は高速な制御が可能であるため、適切に無効電力を制御することで、フリッカを低減できることが期待される。そこで、SVC の制御系を調整して高周波数帯域まで応答できる帯域を上げることにより、フリッカ抑制への貢献可否について数値解析および実験の両面から検討した。また、フリッカが PCS による新型能動

方式に起因して生じている場合、同方式による無効電力制御を SVC が補償することで、単独運転の検出機能が逆に低下してしまう可能性もある点に注意を要すると考えられるため、この点についても数値解析および実験により検討した。

フリッカ抑制制御の実験検討に先立ち、SVC の制御パラメータを決定するために実効値モデルによる数値解析を実施した。SVC の実効値解析モデルを図 5.4(1)-55 に示す。基本波を無視して実効値のみに着目することで、dq 変換や $\alpha\beta$ 変換などが省略されており、先に示した瞬時値モデルよりも簡易的な構成となっている。すなわち、計測した連系点の電圧位相は理想的に d 軸方向となっており、PLL 回路の挙動による遅れなどは考慮されていない。また、ACR によりスイッチング回路の交流側電圧が指定された後は、スイッチングの遅れや LCL フィルタが省略されており、概ね 50Hz 帯以上に速い現象は全て考慮しない解析となっている。

以上の通り、高速な現象に対する応答性の解析に際しては限界があるモデルとなっているが、逆にモデルの次数が下がり、取り扱いやすいモデルとなっているため、本検討ではボード線図等に基づいた解析的なアプローチにより制御系設計を行う際に本モデルを用いた。なお、DCAVR、ACAVR、ACR の各内部回路は瞬時値モデルと同一である。また、回路については図 5.4(1)-56 の通り、後述する実験室グリッドでの回路構成に合わせてモデルを組み、配電システム用変電所から SVC 連系点までの線路インピーダンスに応じて、SVC の有効・無効電力に対する電圧変動感度を模擬した。

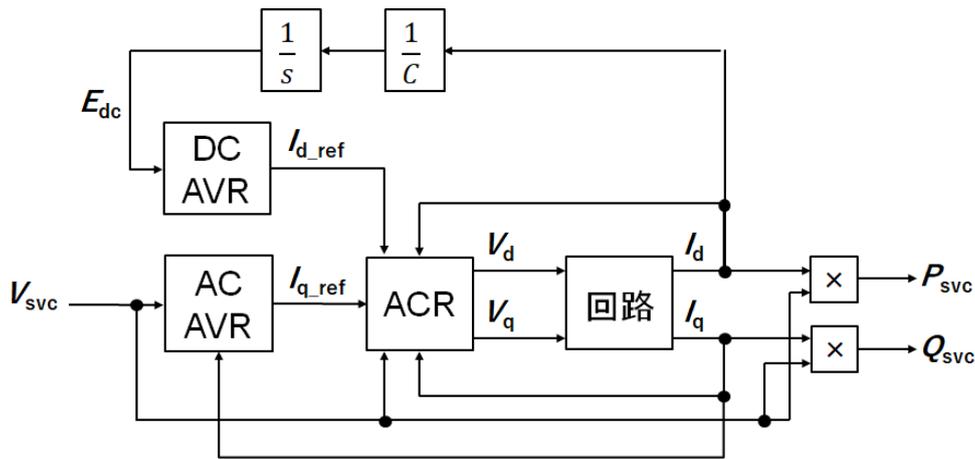


図 5.4(1)-55 SVC の実効値モデル

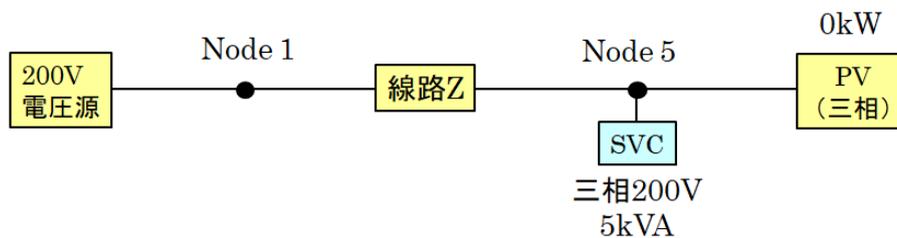


図 5.4(1)-56 フリッカ抑制シミュレーション用配電システムモデル

実験結果との比較を通じて、実効値モデルの各パラメータについて表 5.4(1)-6 の通り定めた。ACAVR の制御パラメータについては、図 5.4(1)-56 の配電システムモデルにおいて、6Hz 程度のフリ

ツカが十分に補償できるように周波数特性に基づいて定めた。配電線末端には単相 PCS が 3 台それぞれ線間に接続されている。このときの周波数特性を図 5.4(1)-57 に示した。なお、同図中では安定性が確認できるように相当に高い周波数領域までを含めているが、実効値モデルに基づいた解析であるため、相当に周波数が高い領域の制御動作はモデル化されておらず精度を保証するものではない点に注意されたい。

表 5.4(1)-6 配電システムモデルの定数

基準電圧	200V
系統周波数	60Hz
線路インピーダンス	0.753 Ω 、0.2748mH
PCS 定格容量	4kVA
PCS 発電電力	0W
SVC 定格容量	5kVar
SVC 制御パラメータ	
SVC ACR ゲイン	1.8
SVC DCAVR ゲイン	0.01
SVC DCAVR 時定数	100msec
SVC ACAVR ゲイン	56
SVC ACAVR 時定数	500msec
SVC スロープリアクタンス	0%
SVC フィルタ時定数	5msec
SVC 移動平均フィルタ	なし

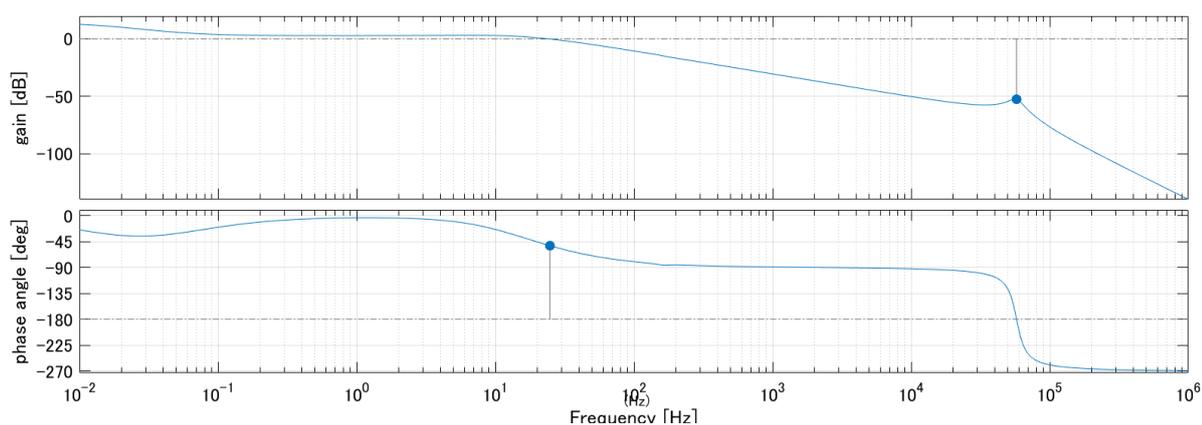


図 5.4(1)-57 周波数特性

PV の大量連系を模擬するために、同モデルでは仮想的に配電線インピーダンスを大きくとっている。これにより PV の無効電力制御による電圧変動幅が増大することで、PV の大量連系を等価的に模擬できる。

1. 5. 4(1)⑧2)シミュレーション結果

同実効値モデルに基づいて、フリッカ現象のシミュレーションを行った。ここで、新型能動方式を備えた PCS は、文献[4]の方式によりモデル化した。SVC が無い場合の電圧変動(実効値)の解析結果を図 5.4(1)-58 に示す。新型能動方式の無効電力制御に起因して、およそ 6Hz 程度のフリッカが観測されている。このフリッカ低減を目的として、前述の通り調整した SVC モデルを接続した場合の解析結果を図 5.4(1)-59 に示す。電圧フリッカが RMS 値においておよそ 44%改善される結果となった。

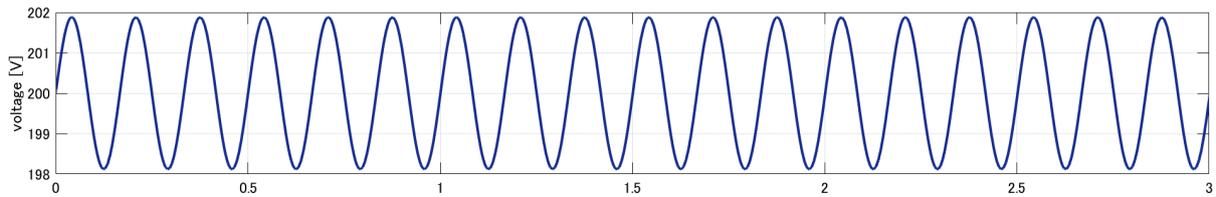
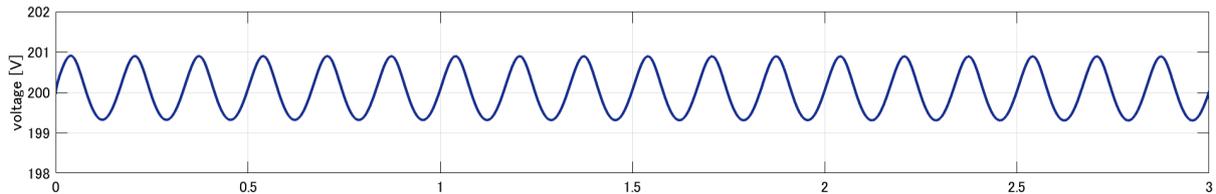
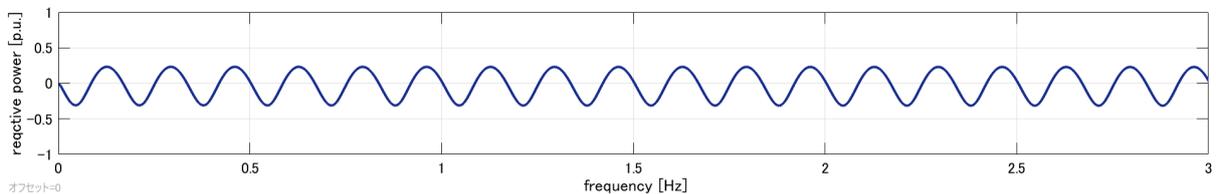


図 5.4(1)-58 シミュレーション結果(電圧実効値):SVC なし



(a)電圧変動



(c)SVC 無効電流

図 5.4(1)-59 シミュレーション結果(実効値):SVC あり

1. 5. 4(1)③)PCS によるフリッカの発生(実験)

実効値解析と同様の条件となるように実験室グリッドを図 5.4(1)-60 の構成として、PCS の単独運転検出機能に起因したフリッカを実験的に観測した。主な試験条件は以下の通りである。

- 三相 3 線式による回路構成である。
- Node1 ~ 3 までの線路インピーダンス 2 点は、これまでの検討と同じ各 $R=43.2\text{m}\Omega$ 、 $L=137.5\text{mH}$ とした。Node3に新たに接続した線路インピーダンスは、 $R=0.66\Omega$ と大きい値とすることで、等価的に $\square\square$ の大量普及を模擬した。
- PV 出力は 0kW とした。初期状態ではわずかなフリッカしか見られないため、高性能低圧交流電源装置により 5° の位相跳躍を与えることで、より大きなフリッカを誘発した。

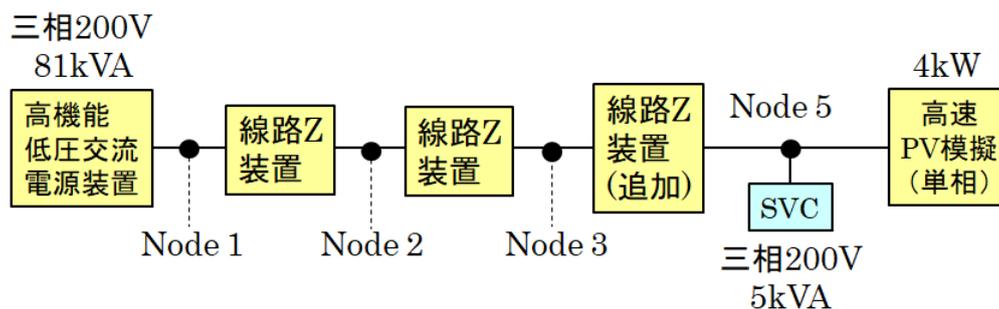
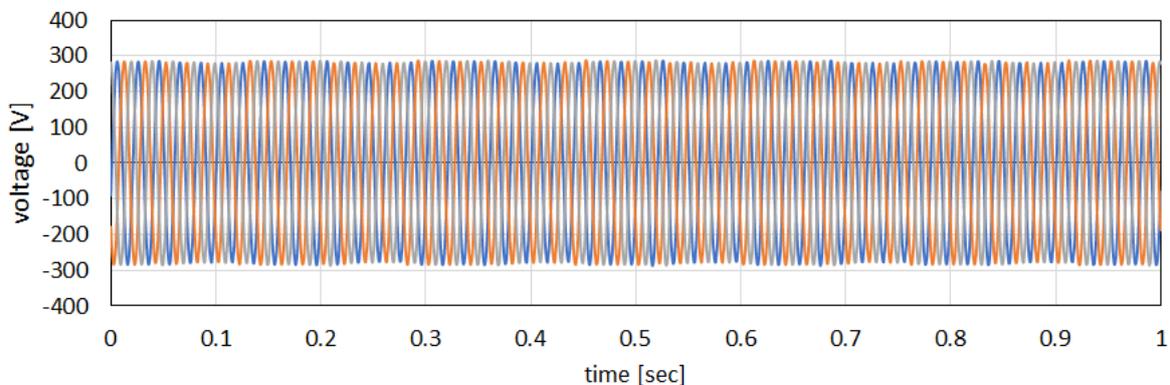
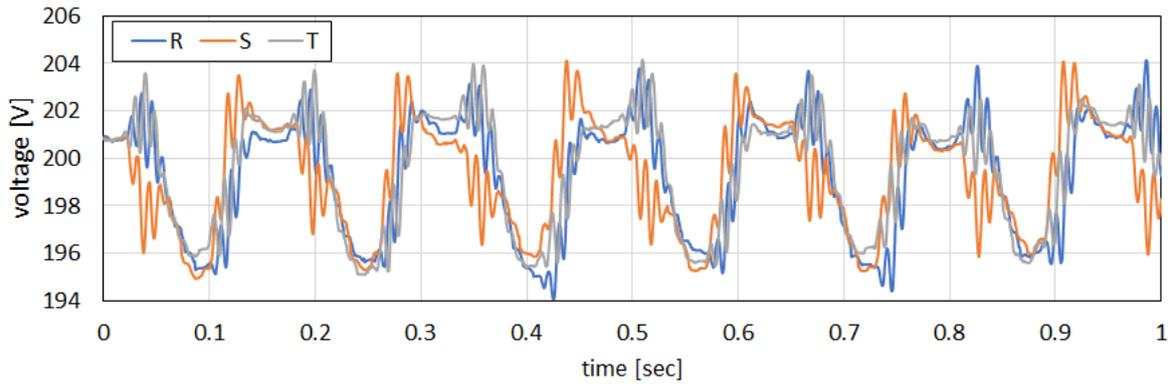


図 5.4(1)-60 実験室グリッドの構成(フリッカ観測用)

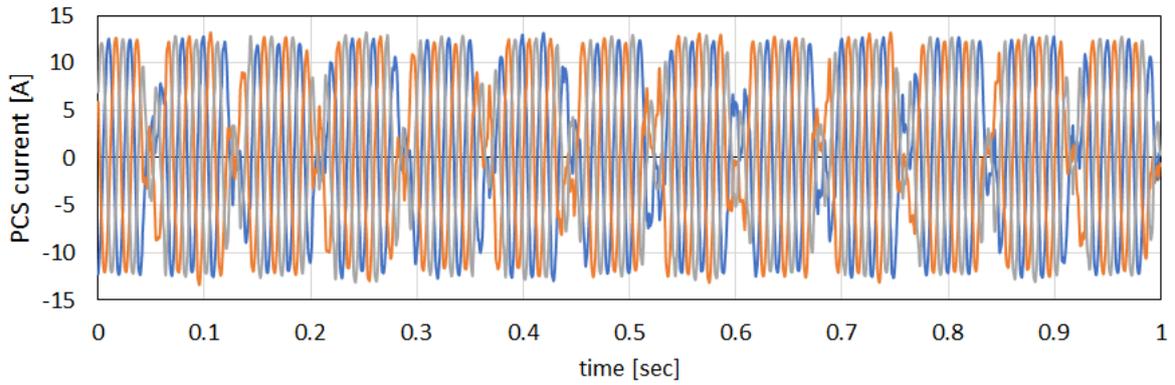
結果を図 5.4(1)-61 に示した。同図(a)および(b)に、PCS の連系端となる Node 5 について、電圧変動の様相を瞬時値と実効値によりそれぞれ示した。同図(b)から、おおよそ 6~7Hz のフリッカが生じている様子が見える。R、S、T の各相において、それぞれ PLL により検出した周波数変動に基づいたフィードバックにより無効電力を制御しているため、結果的に全ての相の電圧変動が同期した結果となっている。同図(c)~(e)には、このフリッカの原因となっている PCS の制御の様子を示す。前述の通り、全ての相が同期して有効電力と無効電力の双方が振動し、フリッカの原因となっている様子が見える。



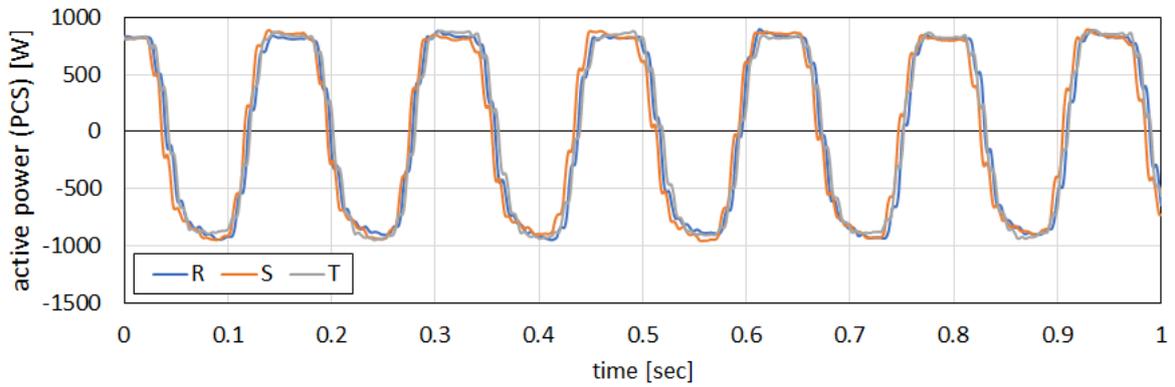
(a)電圧変動(瞬時値)



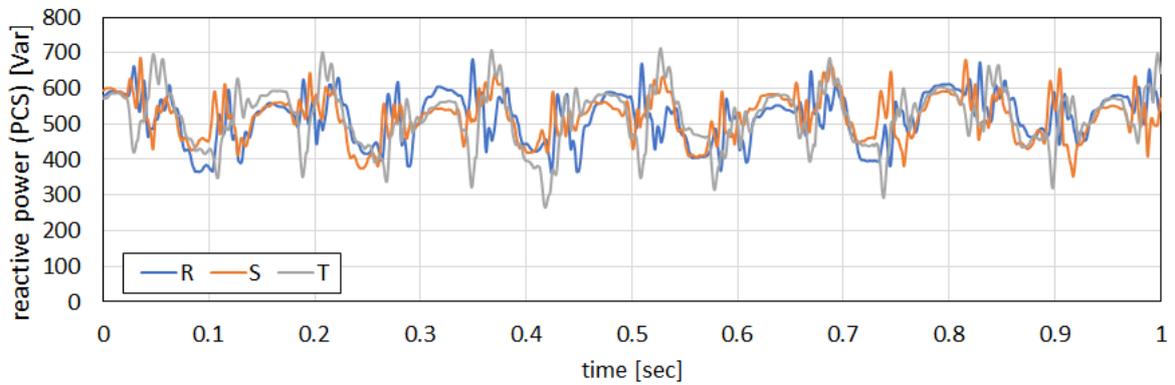
(b)電圧変動(実効値)



(c)PCS 電流(瞬時値)



(d)PCS 有効電力

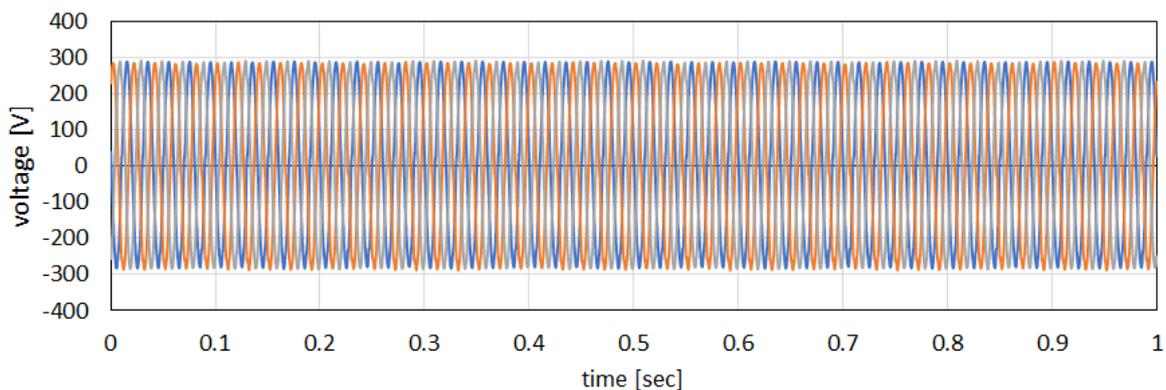


(e)PCS 無効電力

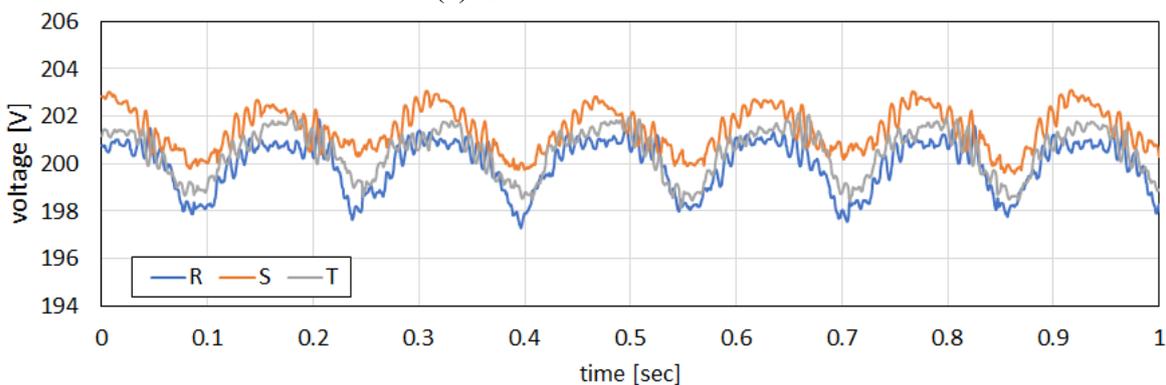
図 5.4(1)-61 実験結果1:SVC なし、PCS によるフリッカの発生

1. 5. 4(1)④SVC によるフリッカ抑制(実験)

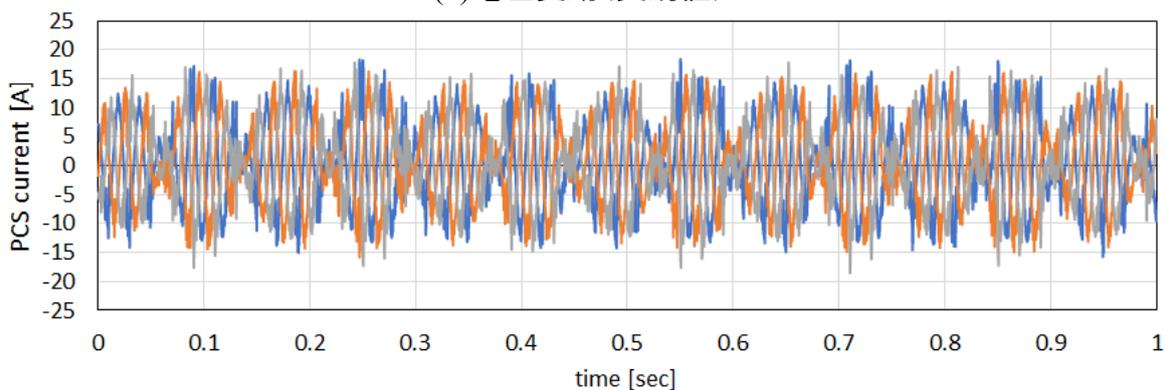
次に同様の実験室グリッドの構成のまま SVC を起動し、フリッカの抑制効果を観測した結果を図 5.4(1)-62 に示す。図 5.4(1)-61 と同様に Node 5 の電圧や PCS の挙動を示した後に、SVC の挙動を同図(f)~(h)に示している。PCS の有効電力や無効電力の挙動に比較して、SVC はいずれも逆位相となるように有効電力および無効電力が制御されており、フリッカを生じさせる電力潮流の変動が緩和されたことがわかる。その結果、同図(b)に示すように、同じ 6~7Hz のフリッカ電圧の変動幅はおおよそ各相で 3V 程度となり、SVC 無しの場合と比較するとおおよそ 50%程度に改善されている結果となった。



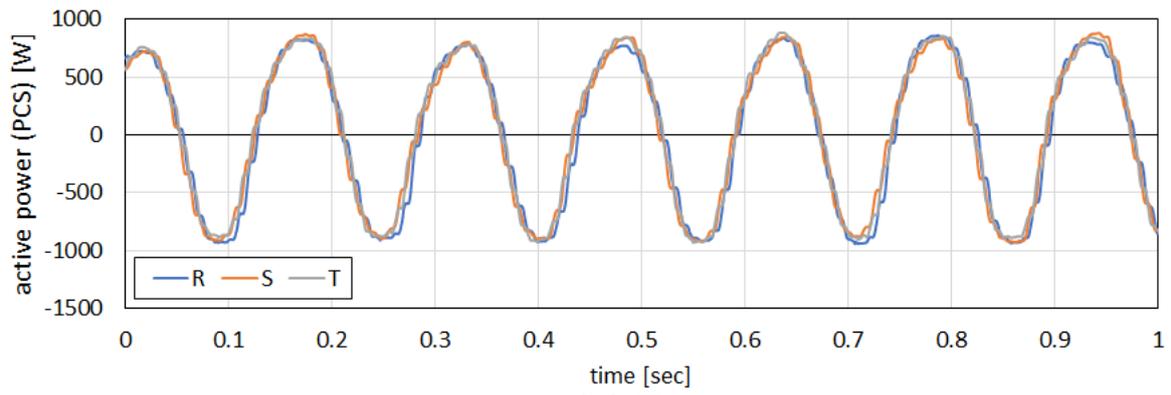
(a)電圧変動(瞬時値)



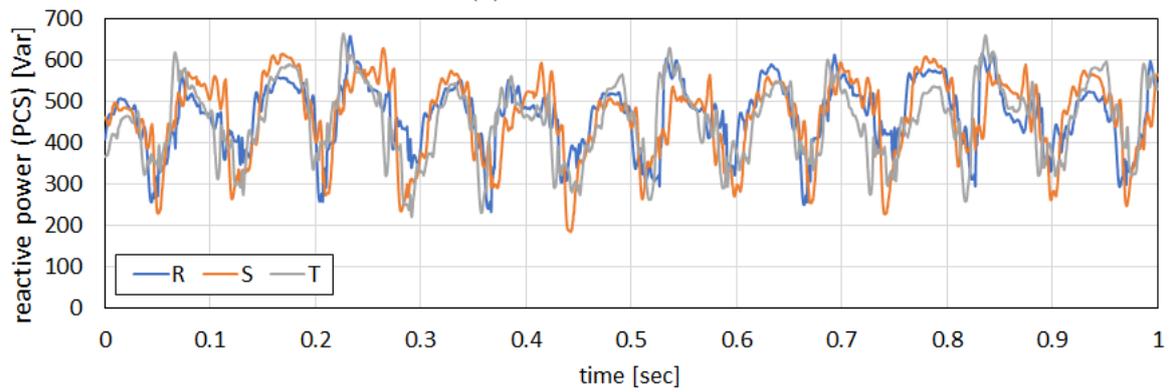
(b)電圧変動(実効値)



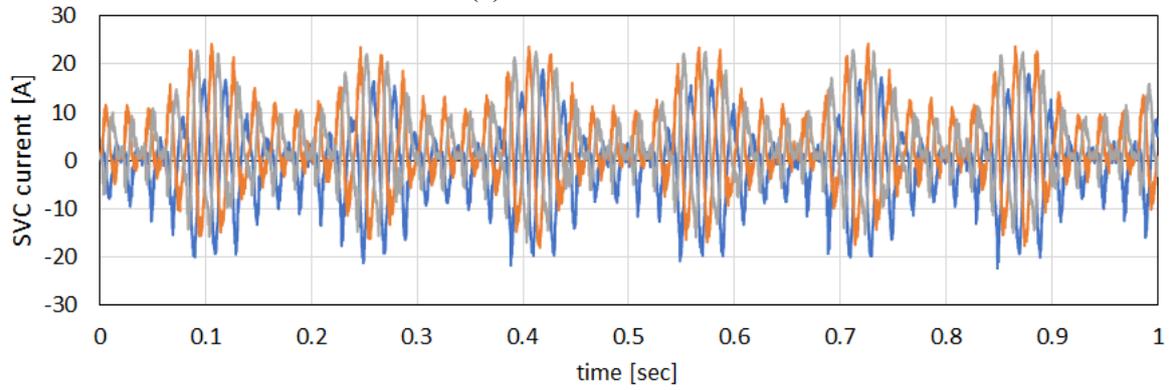
(c)PCS 電流



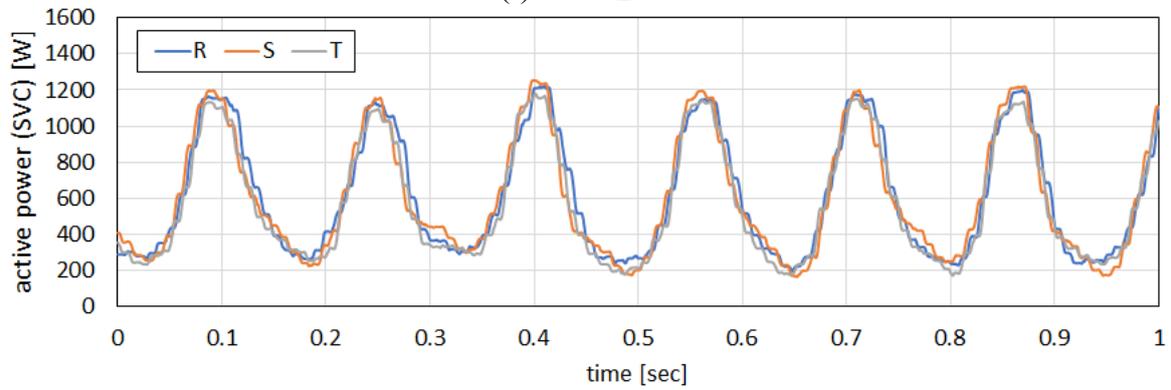
(d)PCS 有効電力



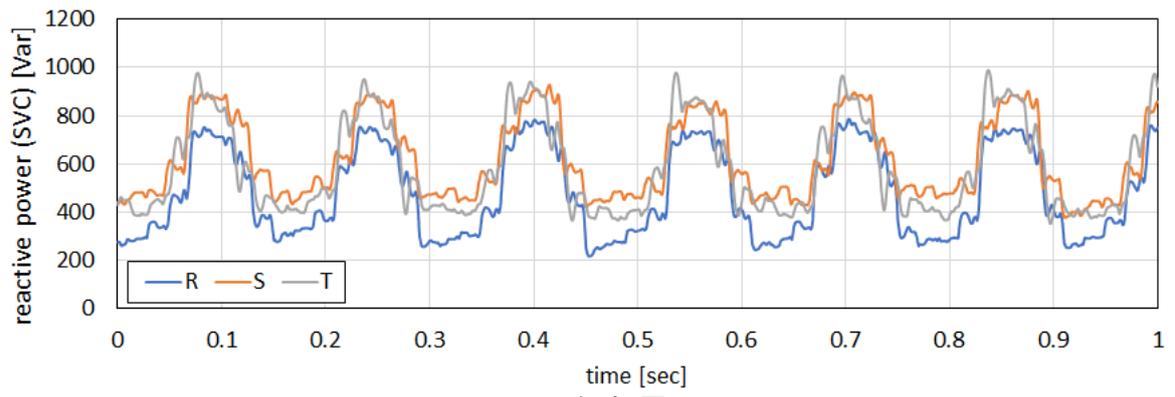
(e)PCS 無効電力



(f)SVC 電流



(g)SVC 有効電力



(h)SVC 無効電力

図 5.4(1)-62 実験結果2:SVC あり、フリッカ抑制結果

1. 5. 4(1)⑤)瞬時値解析によるフリッカ抑制効果の確認

以上の結果について、瞬時値モデルによる数値解析でも同様の制御パラメータを指定して解析を行い、妥当性を検証した。SVCを含む配電システムのモデルは図 5.4(1)-63 の通りである。その結果を図 5.4(1)-64 および図 5.4(1)-65 に示す。多少波形の違いが見られるものの、フリッカの低減効果の観点からは同様の結果となっている。

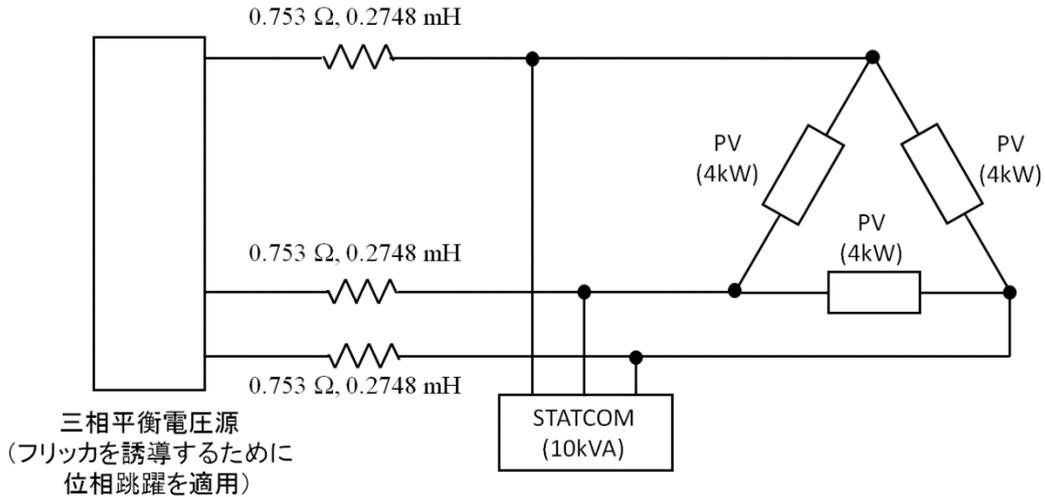


図 5.4(1)-63 フリッカ補償制御検討用配電システムモデル(瞬時値)

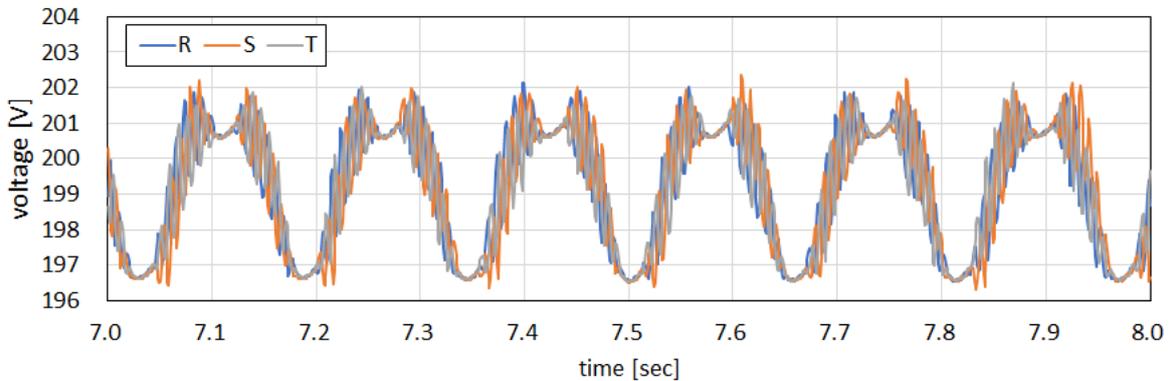


図 5.4(1)-64 シミュレーション結果(瞬時値):SVC なし

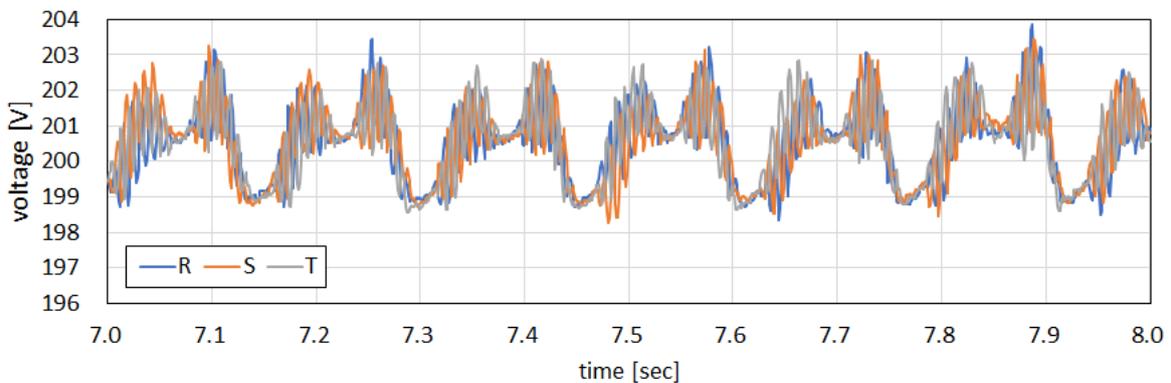
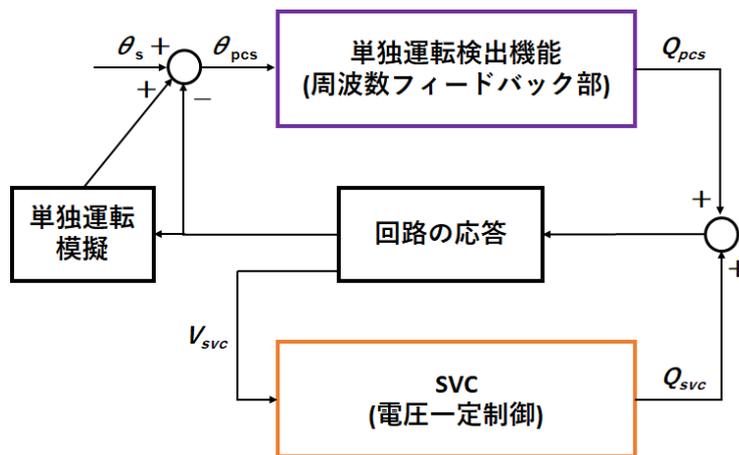


図 5.4(1)-65 シミュレーション結果(瞬時値):SVC あり

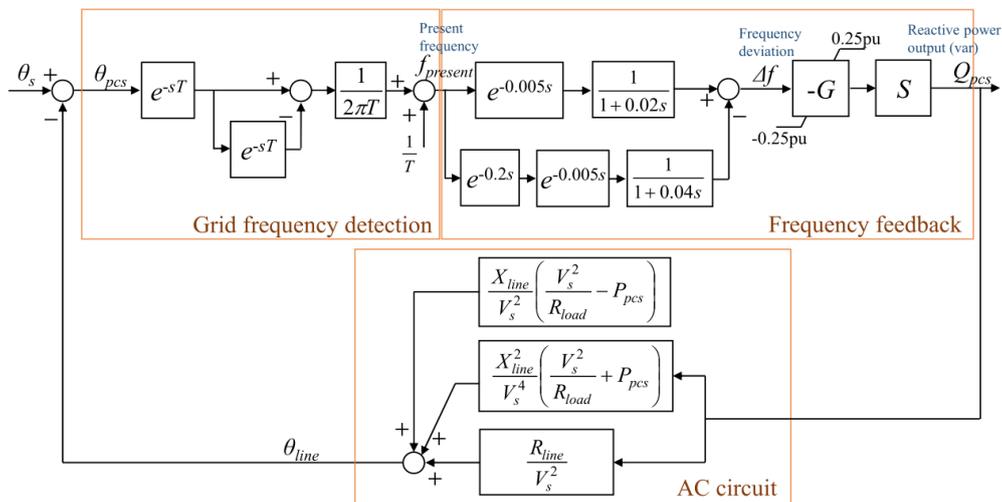
1. 5. 4(1)⑧6) 単独運転検出機能への影響

SVC を高ゲインにて制御することにより、前述の通りフリッカなどの高速な電圧変動を補償できる可能性を示したが、この際、新型能動方式による無効電力注入の影響が打ち消されることにより、単独運転検出の感度が低下する可能性が考えられる。そこで、図 5.4(1)-66 で示した実効値モデルを用いて、単独運転検出感度低下の可能性を数値計算により検討した。

まず SVC が無い場合について、時刻 5sec において系統電圧に 5° の位相跳躍を発生させた場合の応答を図 5.4(1)-67 に示す。位相跳躍に伴い PLL が検出する系統周波数が大きく変動するため、これがきっかけとなって PCS の無効電力制御が強く働き、過渡的に 6Hz 程度のフリッカが生じていることがわかる。一方で単独運転を模擬した場合の波形を図 5.4(1)-68 に示す。単独系統内でのわずかな需給偏差(供給過多)により周波数が上昇すると、PCS は無効電力を吸収して負荷側の電圧を下げるように働く。これにより定インピーダンスの電圧特性で表現された負荷が減少することで需給偏差が拡大して、より大きく周波数上昇が加速される。その結果、電源停止の閾値となる周波数偏差を 1Hz と定めた場合には、同図(a)に示すように単独運移行後 120 msec で停止する結果となった。



(a)モデル全体



(b)回路モデル

出典: 佐野憲一郎、岡田有功、白崎圭亮、岩月秀樹: “ステップ注入付周波数フィードバック方式に起因する無効電力振動の継続条件”、電気学会論文誌 B、第 138 巻、第 8 号、pp.659-670 (2018)

図 5.4(1)-66 新型能動方式を備えた PCS および SVC を含む配電系統モデル(実効値)

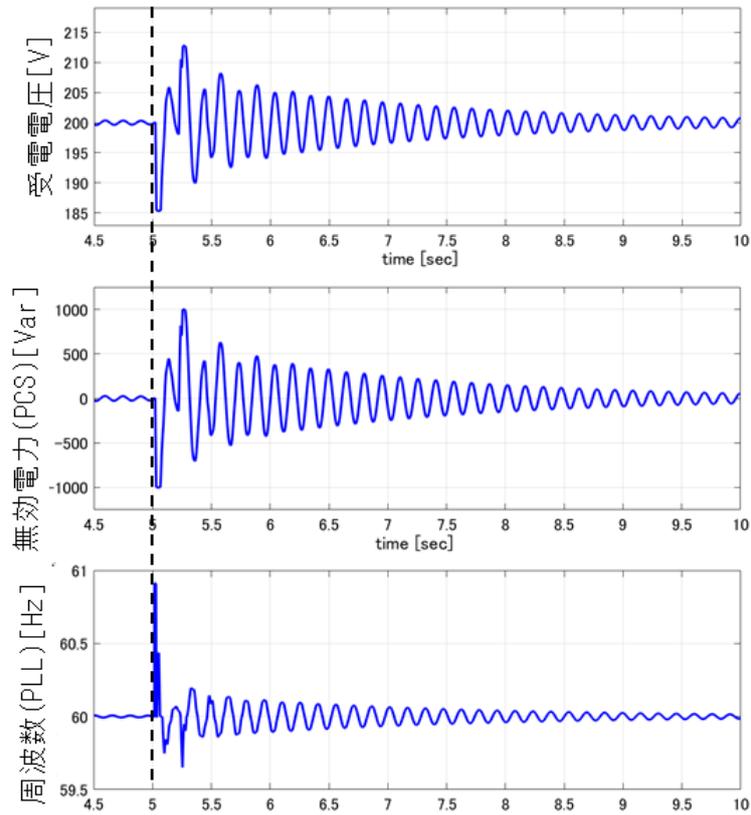


図 5.4(1)-67 ケース1(SVC なし:平常時)

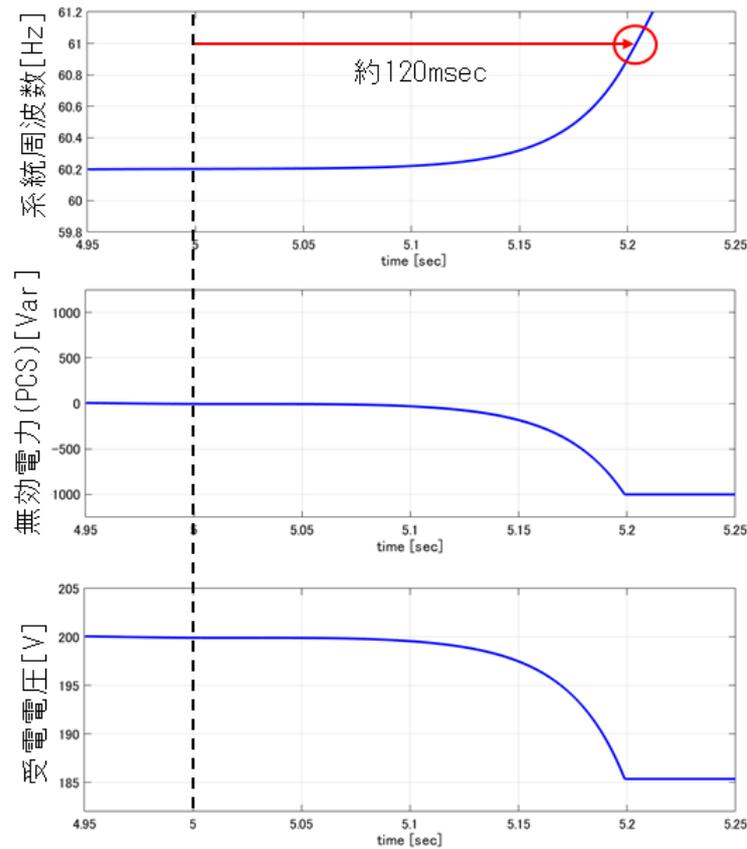


図 5.4(1)-68 ケース1 (SVC なし: 単独運転時)

一方で SVC がある場合について、比較的高い制御ゲインを適用した場合に系統電圧へ 5° の位相跳躍を適用した結果を図 5.4(1)-69 に示す。位相跳躍に伴い PLL の検出する系統周波数が大きく変動して PCS の無効電力制御が始めることは同様であるが、SVC の無効電力制御が強く働くことで過渡的なフリッカをごく短時間の内に解消できていることがわかる。一方で図 5.4(1)-70 に示すように、単独運転状態を模擬した場合にも PCS が出力する無効電力制御を打ち消すように SVC が働いたため、系統周波数はごく緩やかにしか変動せず、単独運転検出により自動停止するまでの時間が相当に長期化していることがわかる。この問題を緩和するために、SVC の制御ゲインを低く設定した場合に、系統電圧に 5° の位相跳躍を与えた場合と単独運転に移行した場合の結果を、それぞれ図 5.4(1)-71 と図 5.4(1)-72 に示す。SVC を高ゲインとした場合と比較して、過渡的なフリッカの収束は遅くなっているが、単独運転検出までの時間は改善されている。このように、SVC の制御の高速化と単独運転検出機能の確実な動作とは、原理的にはトレードオフの関係になり得ると考えられる。

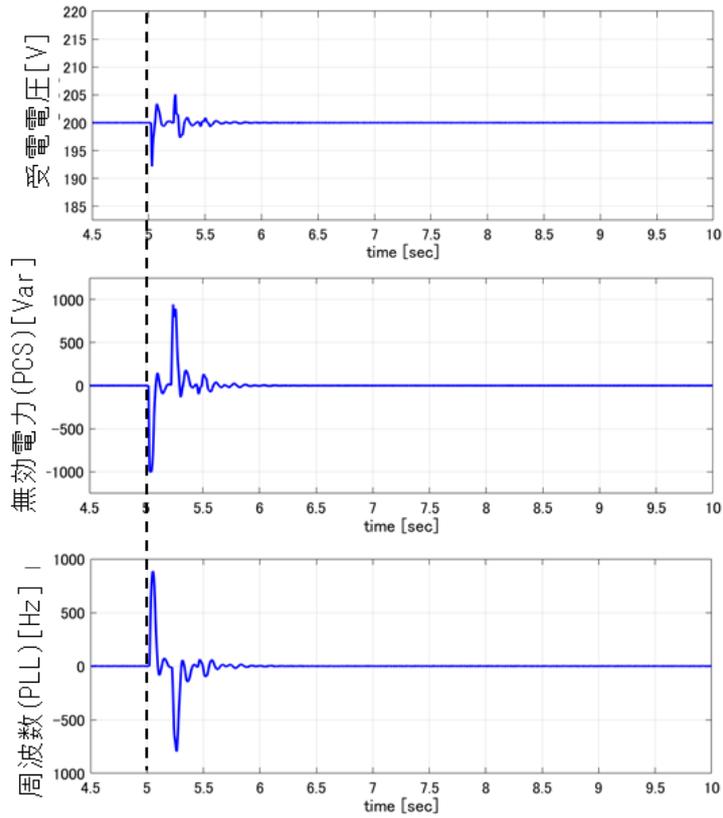


図 5.4(1)-69 ケース2(SVCあり、高ゲイン:平常時)

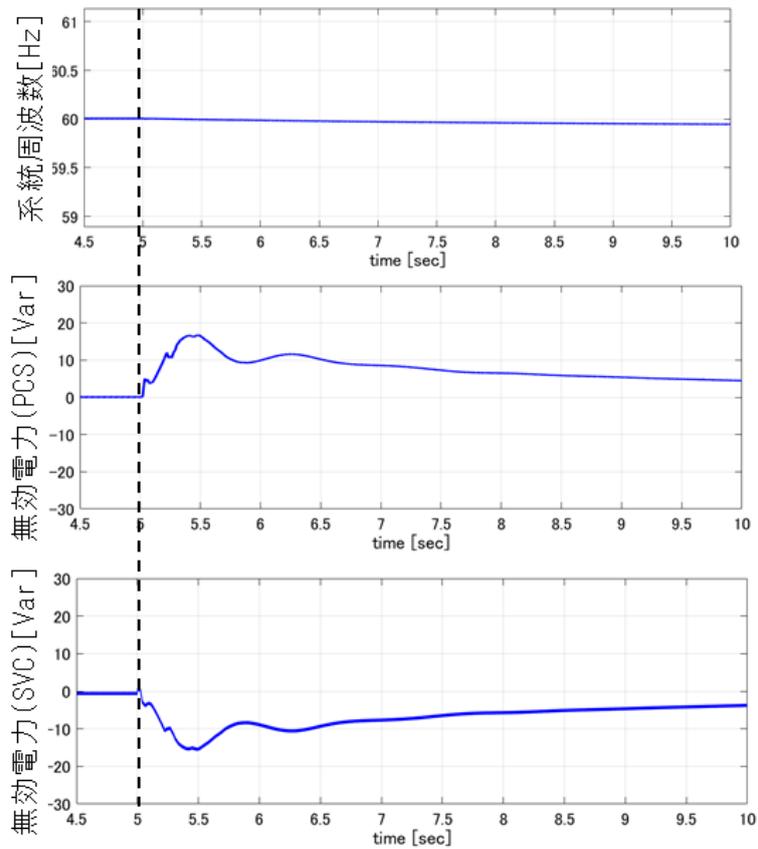


図 5.4(1)-70 ケース2(SVCあり、高ゲイン:単独運転時)

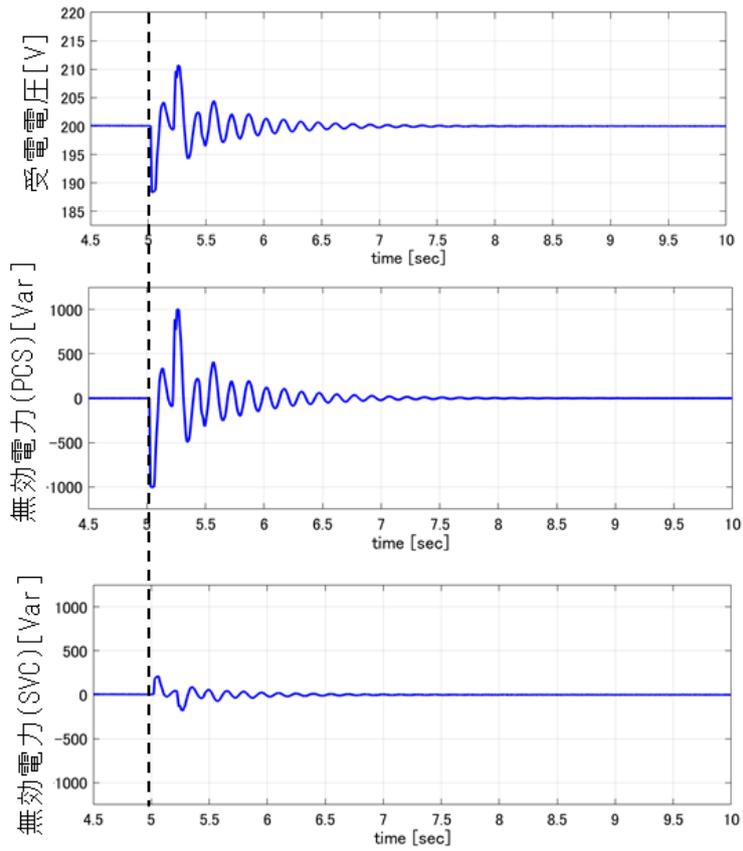


図 5.4(1)-71 ケース3(SVCあり、低ゲイン:平常時)

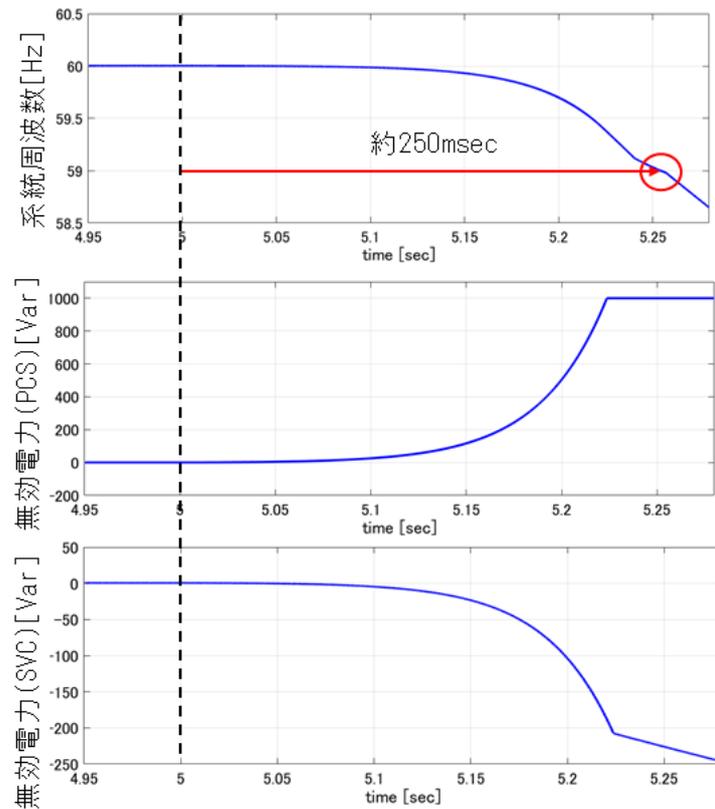
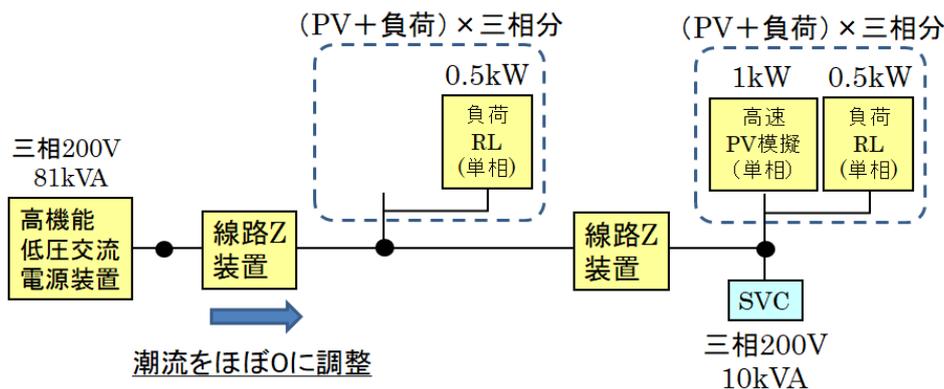


図 5.4(1)-72 ケース3(SVCあり、低ゲイン:単独運転時)

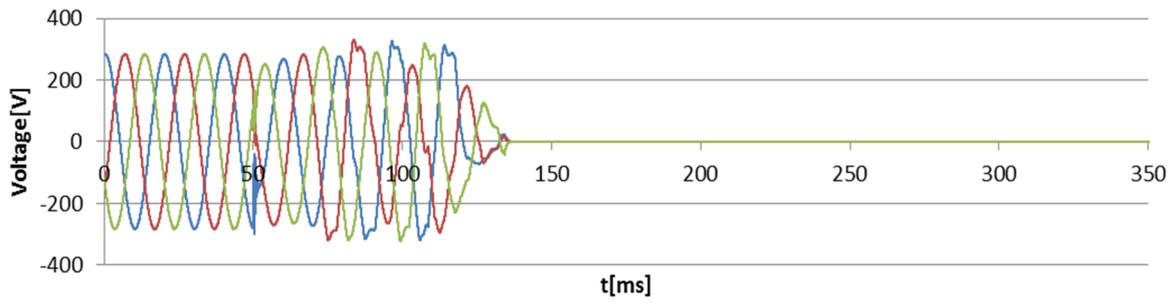
1. 5. 4(1)⑧7) 単独運転検出試験

SVC の無効電力制御が単独運転検出機能に及ぼす影響を、図 5.4(1)-73 に示す回路構成にて、実験的に検討した。実験室グリッド内部で PV 出力と負荷のそれぞれの合計が一致するように調整し、高機能交流電源に出入りする電流ができるだけ 0 となるように調整した上で高機能交流電源の出力をオフとすることで単独運転状態を模擬した。SVC が無い場合と有る場合での実験結果を、それぞれ図 5.4(1)-74 と図 5.4(1)-75 に示した。SVC 無の場合では、単独運転発生のおよそ 80 msec 後に電源が停止して電流 0 となっているが、SVC 有の場合には SVC の制御が強く働くことで、電源が完全に停止するまでの時間がおよそ 200 msec 程度と長期化していることがわかる。ただしこの特性は、高機能交流電源をオフとするタイミングにも依存すると考えられるため、図 5.4(1)-76 以降には、電源オフとする位相を 0° 、 45° 、 90° と変化させた場合の実験結果も示した。その結果、SVC の有無によらず、電源オフ位相の影響により自動停止までの時間が変化する傾向のあることがわかる。以上より、高ゲインに設定された SVC の導入により、原理的には単独運転検出までの時間を長期化させる可能性があるものの、現実的な影響は限定的であろうことが示された。

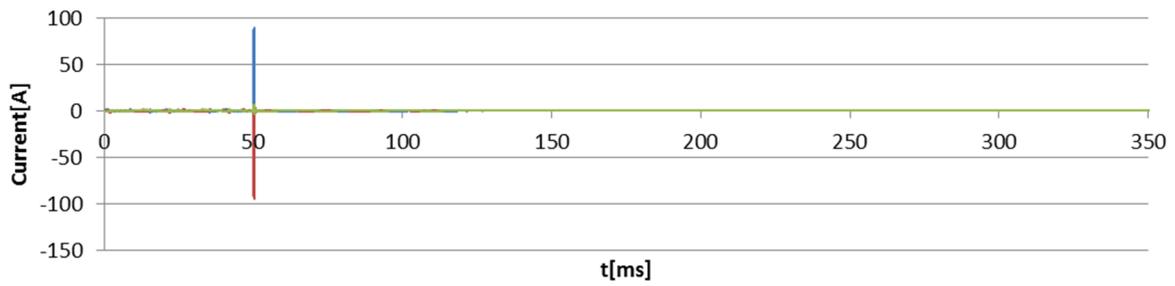


- ・ 負荷とPV出力をバランスさせて、高機能低圧交流電源との出入りの潮流をゼロに調整。同交流電源を開としてPVの停止状況を観測。
- ・ 三相PV出力(平衡): 各相1kW(やや遅れ力率)
- ・ 三相負荷(平衡): 両ノードとも、各相0.5kW+62var
- ・ 線路Z: 両ブランチともに、43.2 mΩ, 137.5 μH

図 5.4(1)-73 試験条件(単独運転)

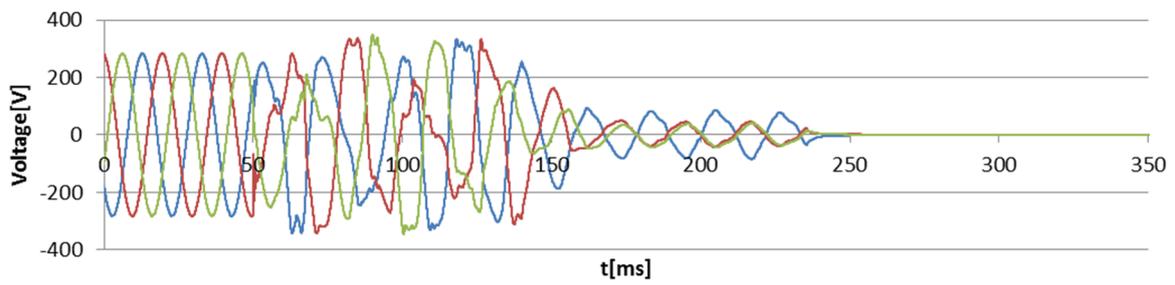


(a)電圧(末端ノード)

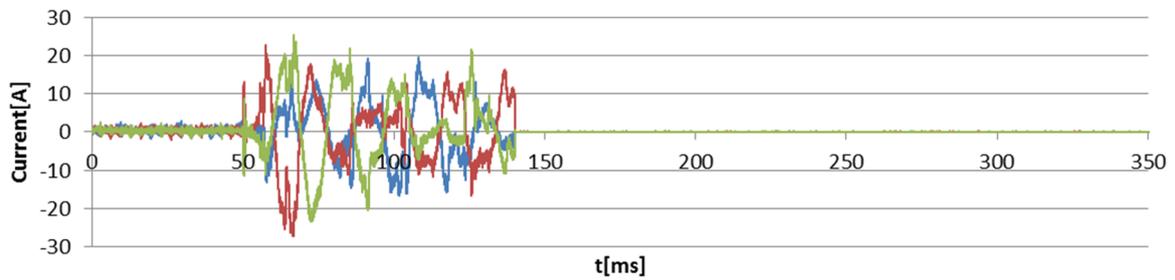


(b)線電流

図 5.4(1)-74 単独運転検出機能による停止(SVC 無)

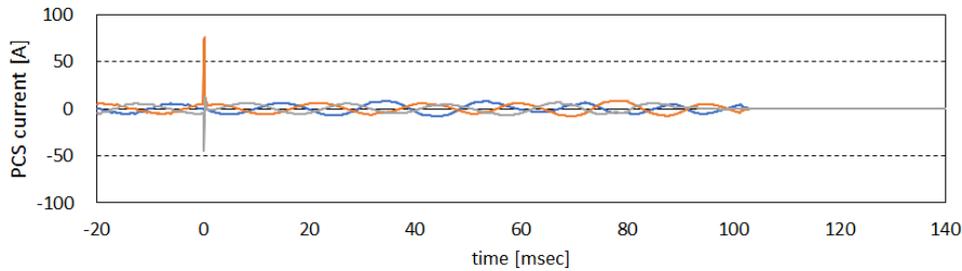
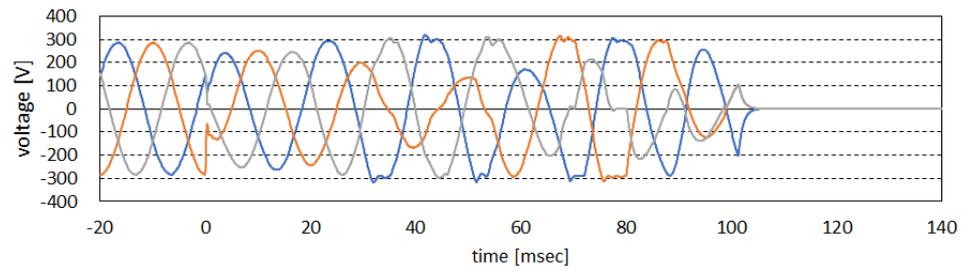


(a)電圧(末端ノード)

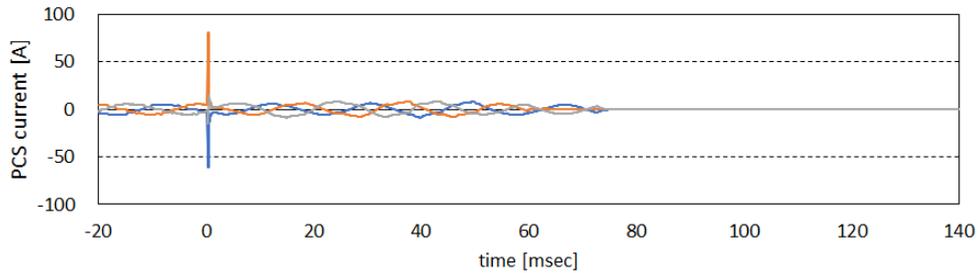
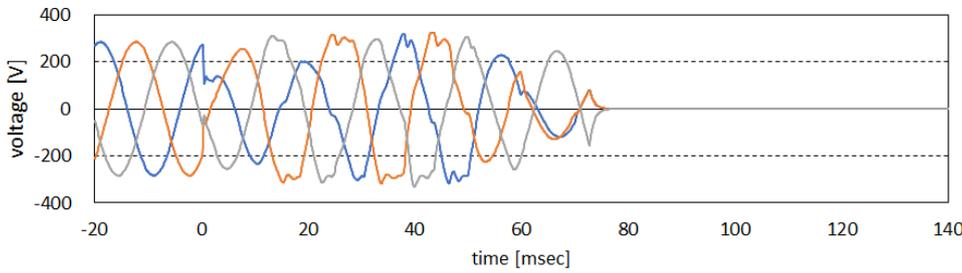


(b)SVC からの三相電流

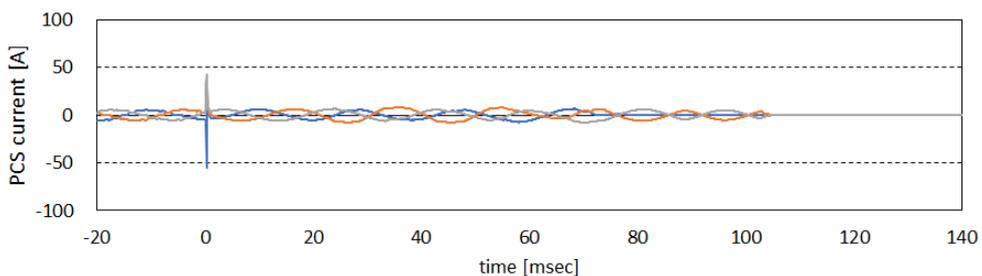
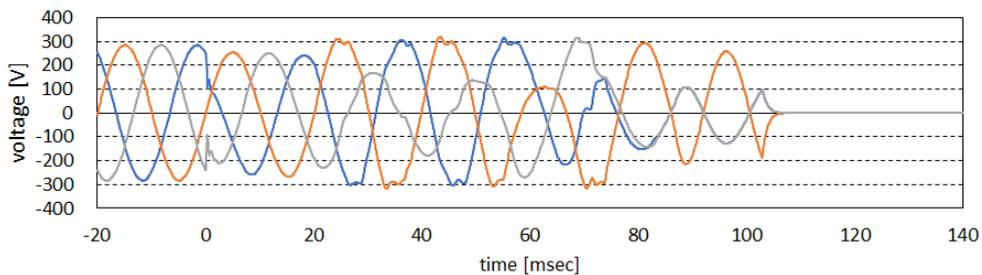
図 5.4(1)-75 単独運転検出機能による停止(SVC 有)



(a)オフ位相 0° (上:系統電圧、下:SVC 電流)



(b)オフ位相 45° (上:系統電圧、下:SVC 電流)



(c)オフ位相 90° (上:系統電圧、下:SVC 電流)

図 5.4(1)-76 単独運転検出機能試験(SVCなし)

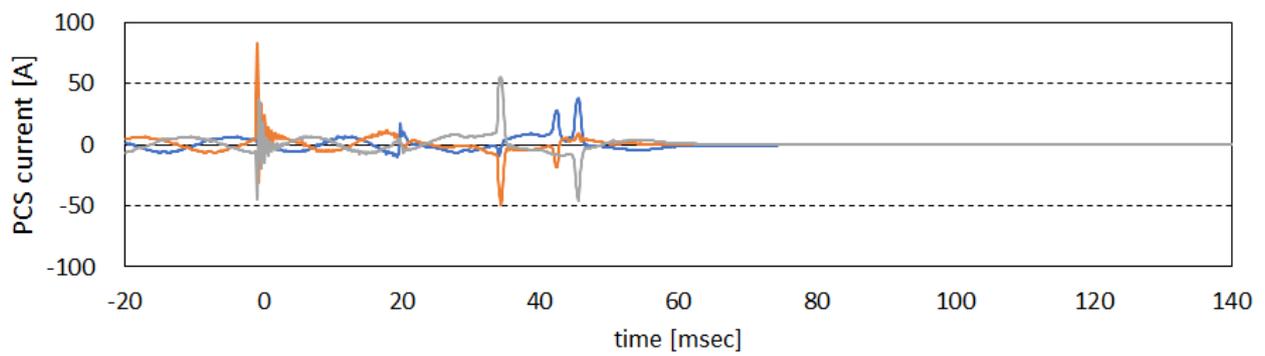
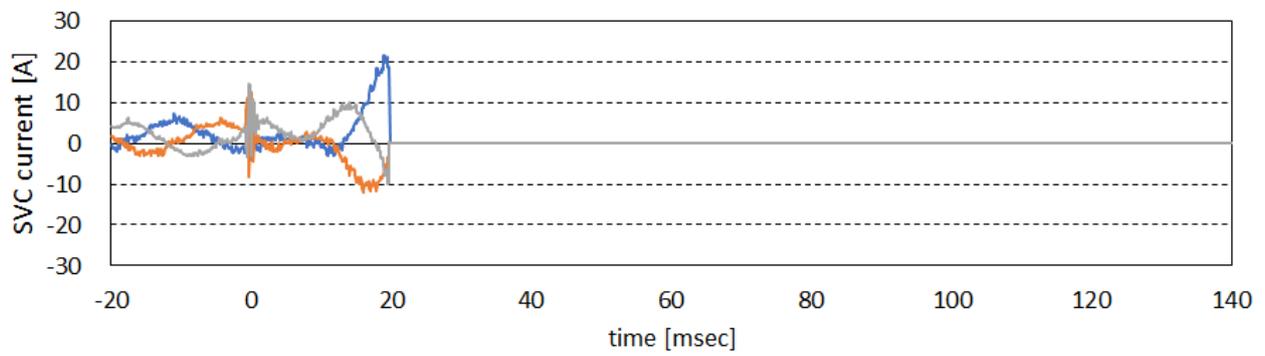
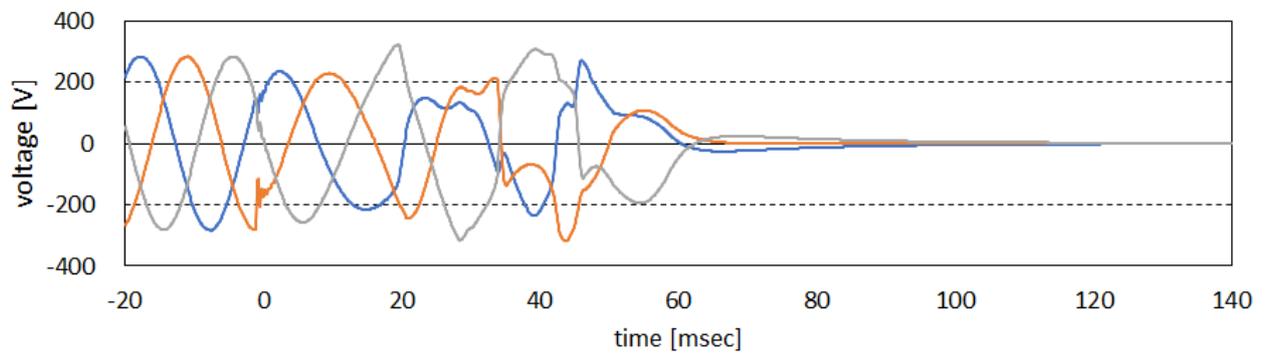


図 5.4(1)-77 単独運転検出試験(SVC 通常ゲイン、オフ位相 0°)
 (上:系統電圧、中:SVC 電流、下:PCS 電流)

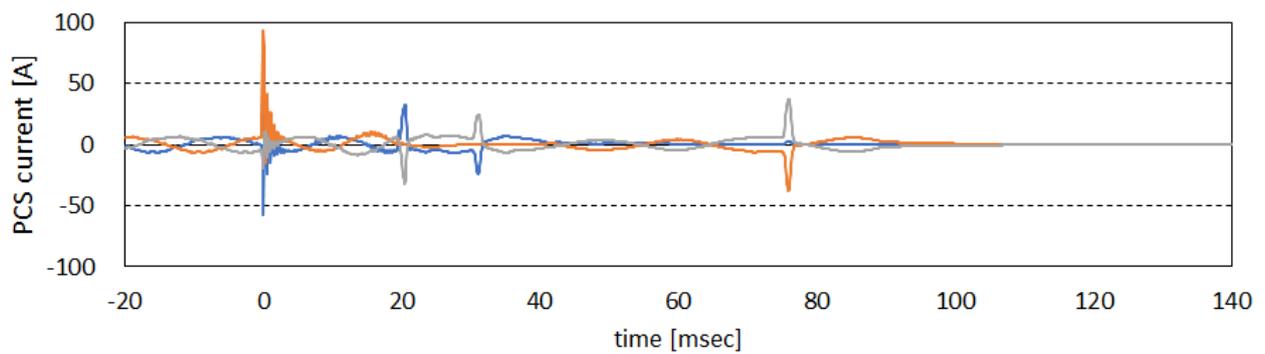
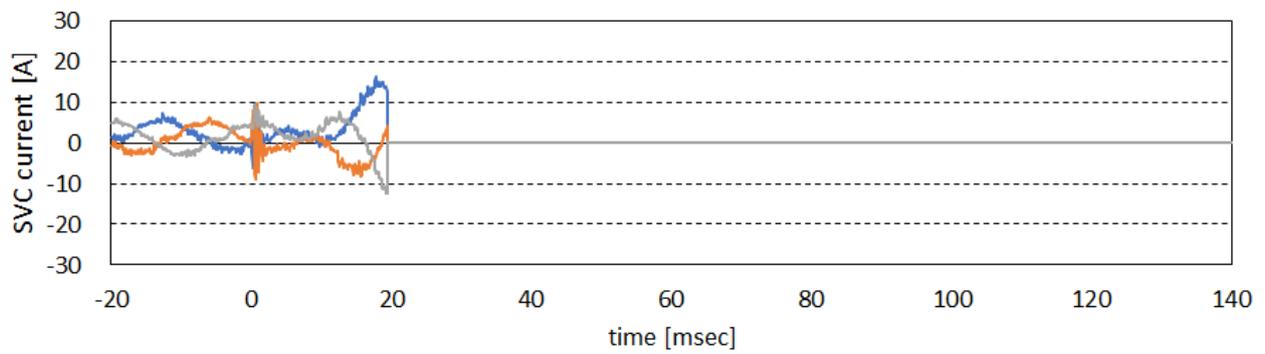
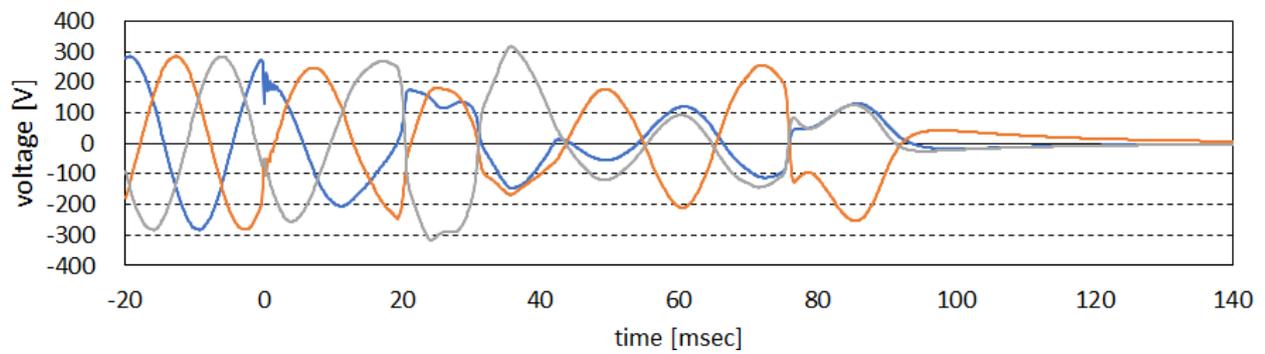


図 5.4(1)-78 単独運転検出試験(SVC 通常ゲイン、オフ位相 45°)
 (上:系統電圧、中:SVC 電流、下:PCS 電流)

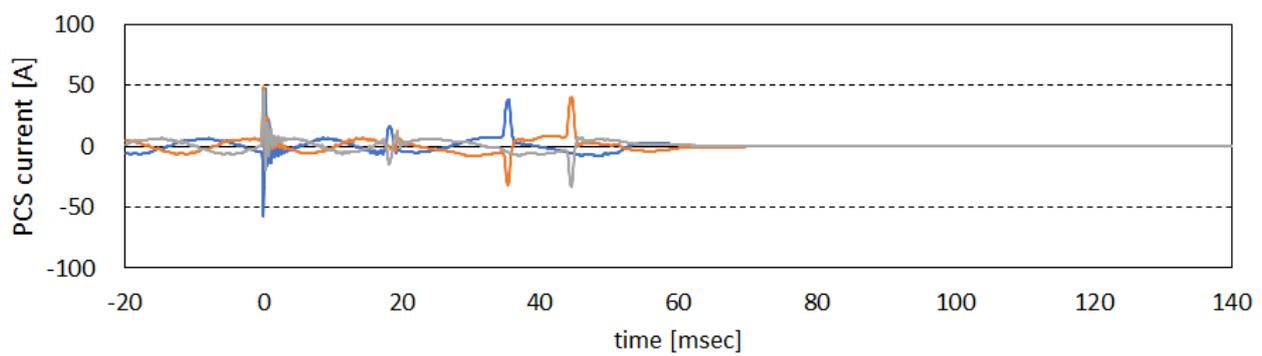
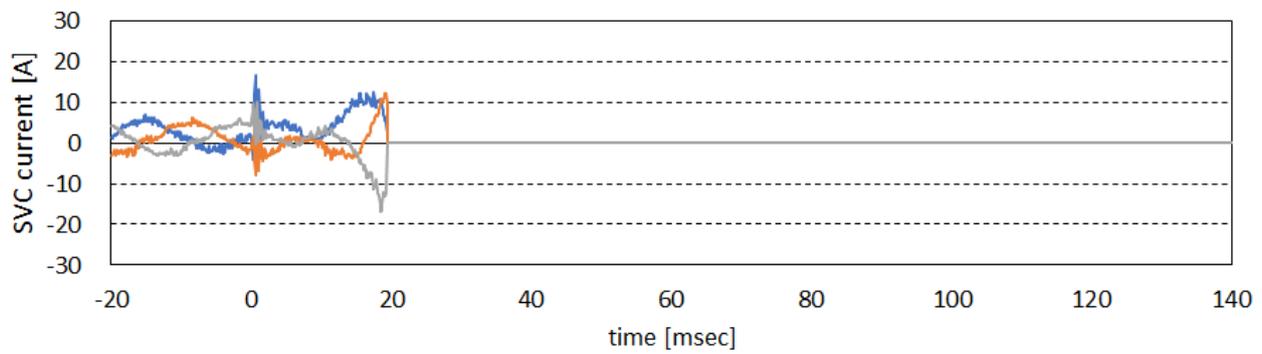
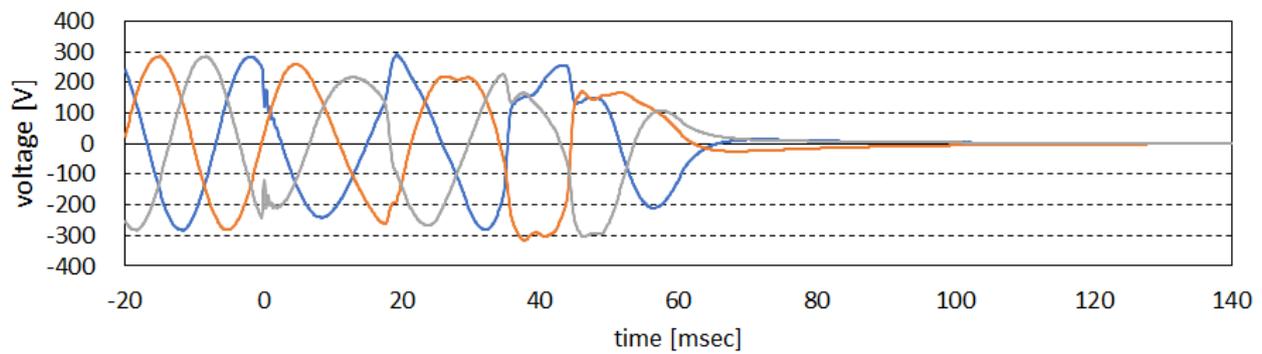


図 5.4(1)-79 単独運転検出試験(SVC 通常ゲイン、オフ位相 90°)
 (上:系統電圧、中:SVC 電流、下:PCS 電流)

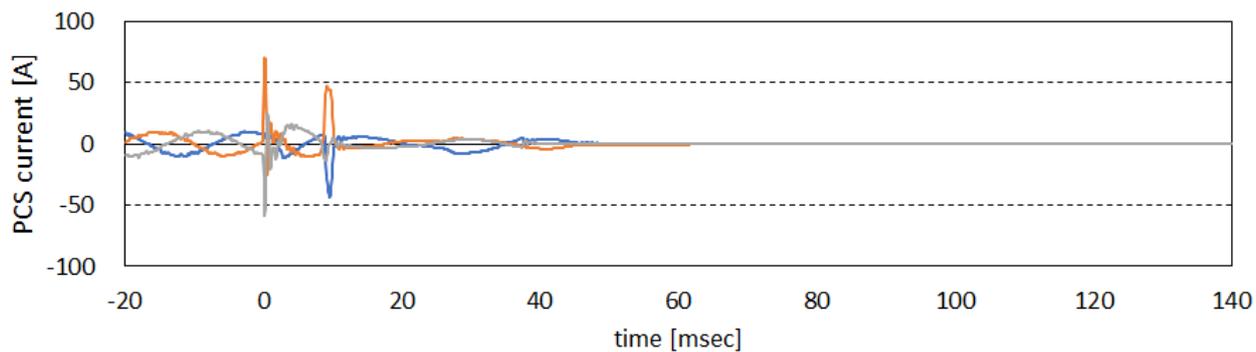
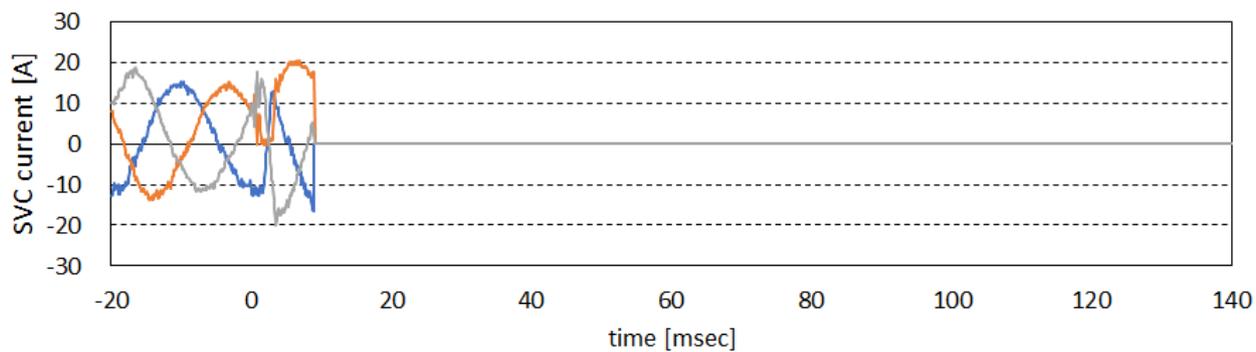
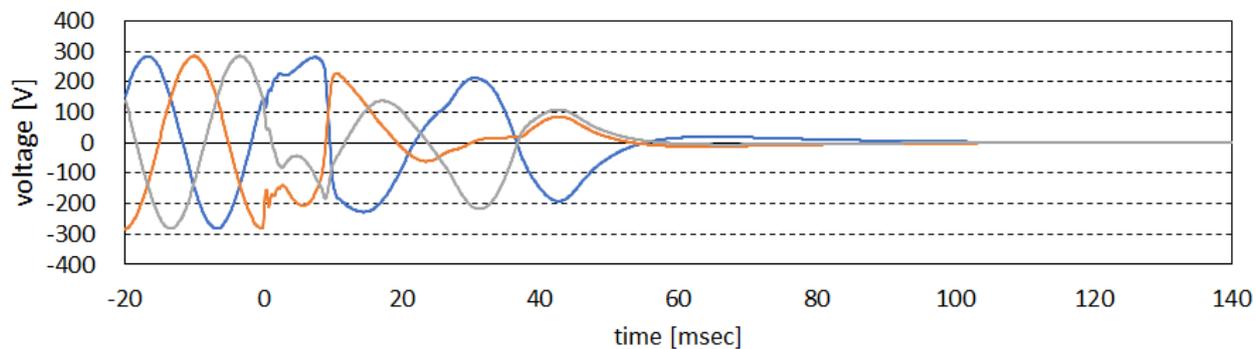


図 5.4(1)-80 単独運転検出試験(SVC 高ゲイン、オフ位相 0°)
 (上:系統電圧、中:SVC 電流、下:PCS 電流)

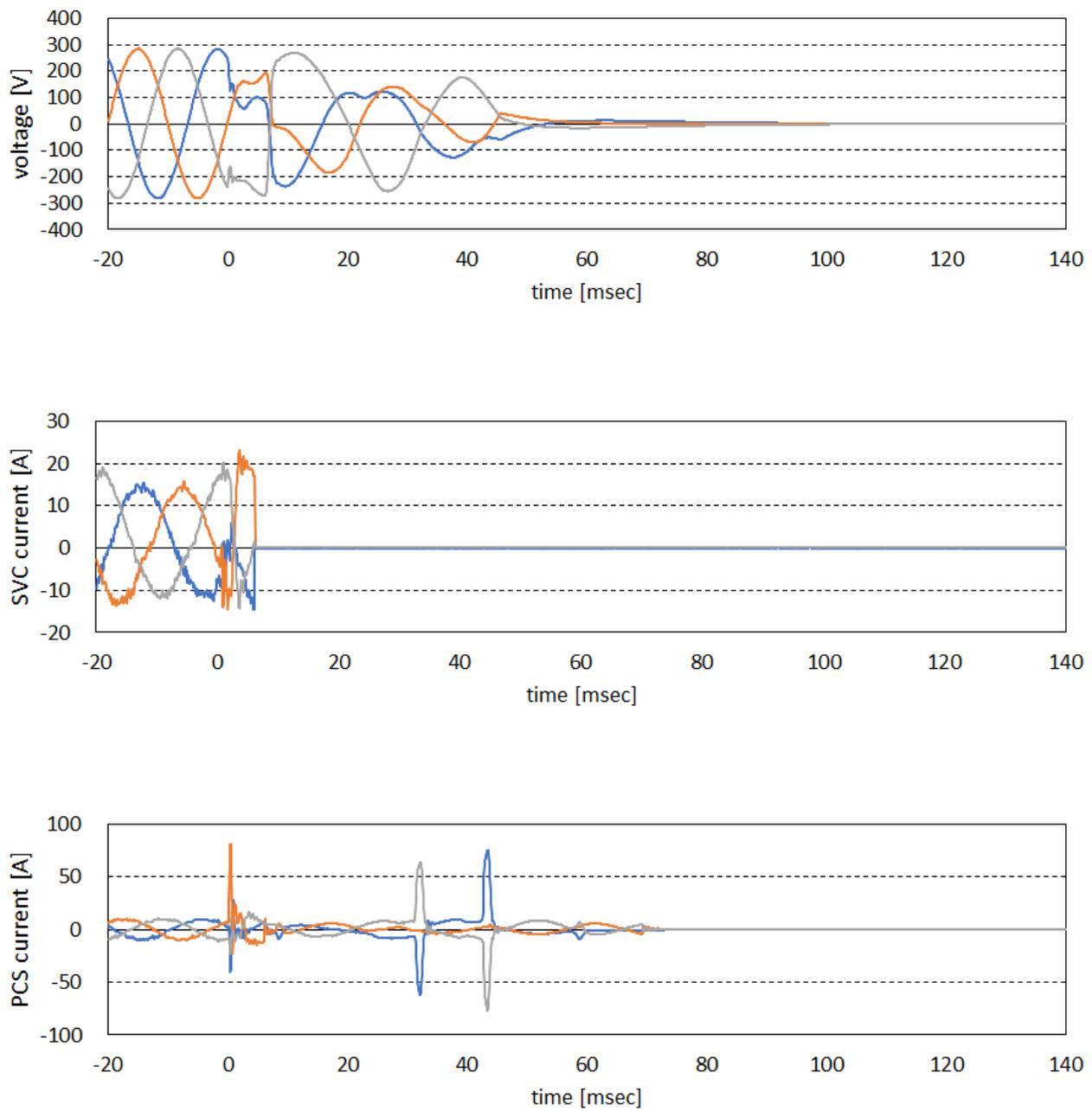


図 5.3-81 単独運転検出試験(SVC 高ゲイン、オフ位相 45°)
 (上:系統電圧、中:SVC 電流、下:PCS 電流)

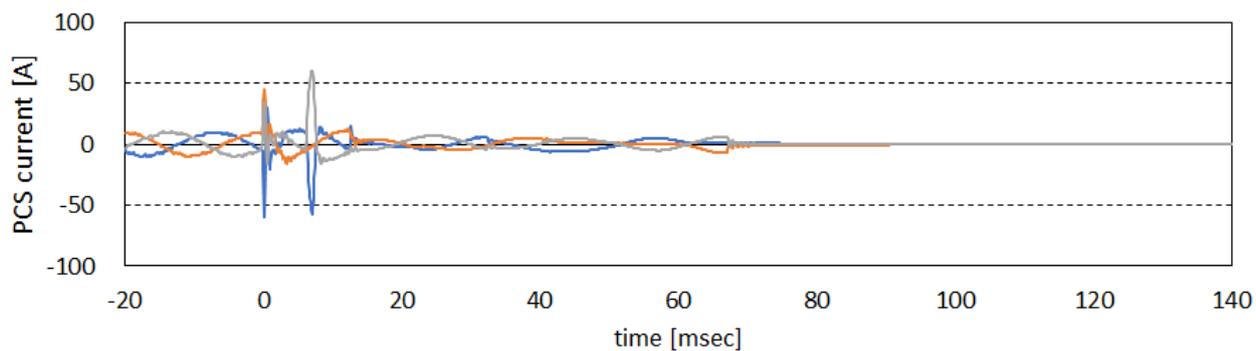
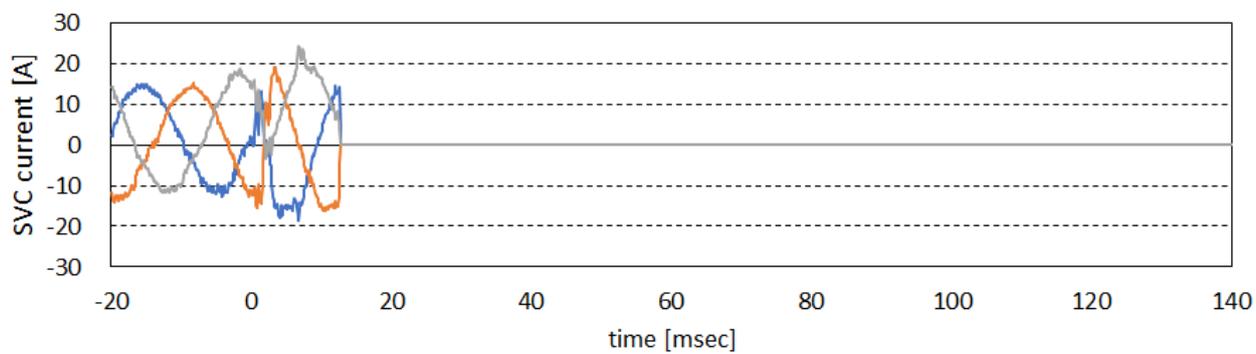
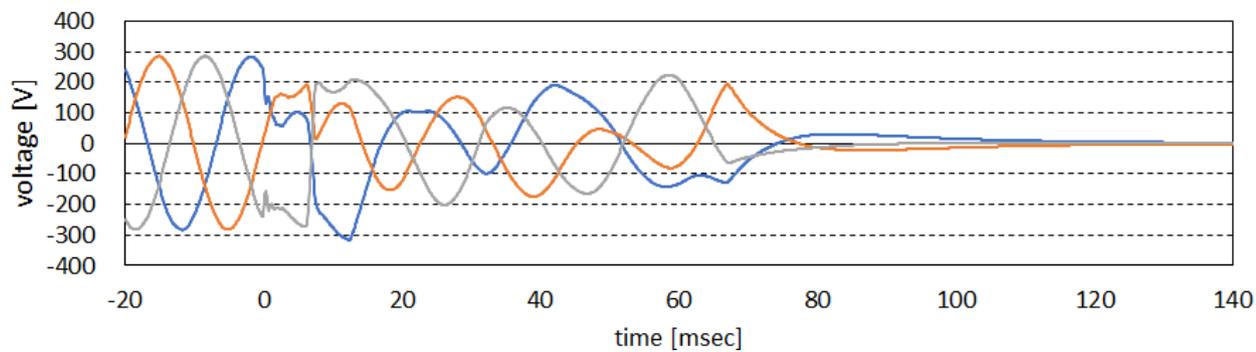


図 5.4(1)-82 単独運転検出試験(SVC 高ゲイン、オフ位相 90°)
(上:系統電圧、中:SVC 電流、下:PCS 電流)

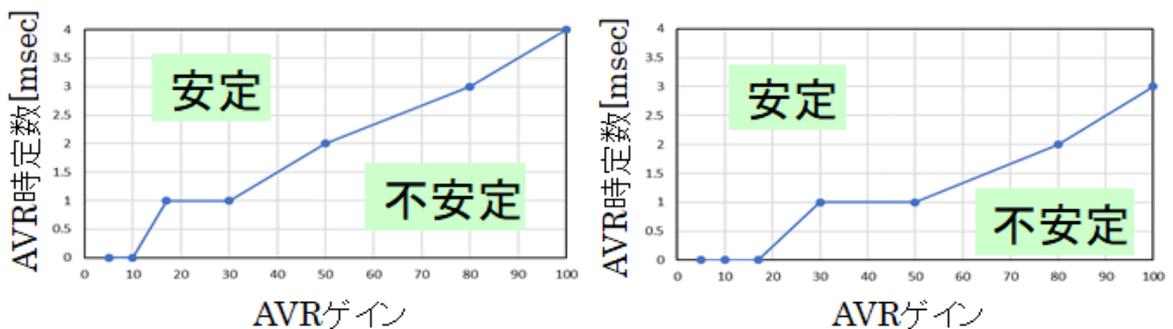
1. 5. 4(1)⑨高ゲイン領域における SVC の安定の評価

上記⑦や⑧で示した通り、瞬時電圧低下やフリッカを補償するためには制御を高速化する必要がある。しかし高速化のために制御系を高ゲインに調整すると、過度に鋭敏な動作により制御動作が不安定となる可能性が懸念される。そこで、前述の実効値モデルならびに瞬時値解析モデルを用いて、様々な亘長の配電系統において1台もしくは2台の SVC が連系した場合を想定し、安定動作する制御パラメータの範囲を解析した。また、SVC が1台の場合に関しては、合わせて実験による安定動作可否の検証を実施した。

1. 5. 4(1)⑨1)SVCが1台の場合

まず、SVCが1台の場合について検討した。図5.4(1)-10と同様の回路構成により、node 3の負荷1kWをステップ状に投入し、擾乱発生後の制御動作の安定性を確認した。フィーダの亘長を変えながら、ACAVRの制御パラメータ(ゲイン、時定数、スローリアクタンス)を変化させて数値解析を繰り返し実施することで、安定に動作する条件を解析した結果を図5.4(1)-83に示す。同図(a)では実験室グリッドと同一の線路インピーダンス値(フィーダ亘長を3kmと想定)を用いた。スローリアクタンスを0および1%とした場合のそれぞれについて、AVRゲインとAVR時定数の組み合わせを変化させながら安定領域を導出した結果を示した。同図中に示された通り、AVRゲインが小さく、AVR時定数が長い、すなわち制御が緩やかであるほど安定となりやすい結果が示されている。この傾向は、スローリアクタンスの変化についても同様であり、スローリアクタンスを0%としたケースではより制御が早く、制御の安定領域は小さい結果となっている。ただし制御が不安定となる条件は非常に限定的であり、AVRゲインを100程度と大きくした場合でも、AVR時定数を4msec以下にまで小さくしなければ動作は安定となっている。

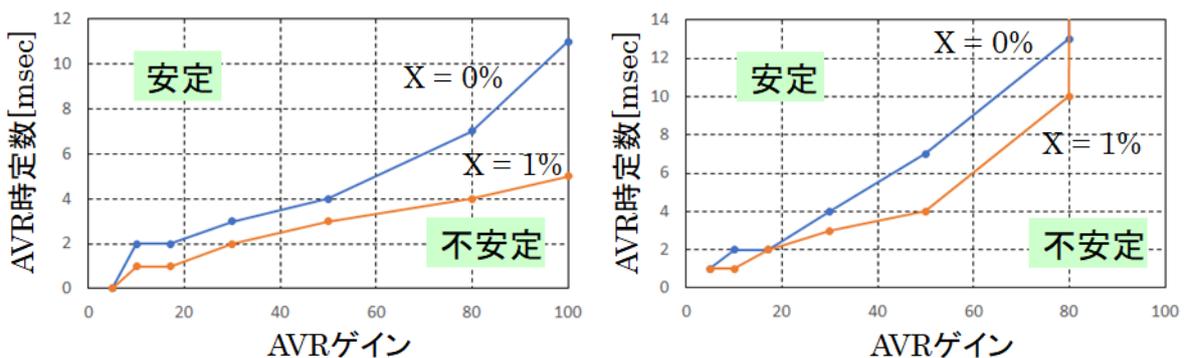
同様に、線路インピーダンスを2倍および3倍とした場合の安定性について検討した結果を同図(b)および(c)に示した。線路インピーダンスが大きい程安定領域が減少し、制御が不安定となりやすい結果が示されている。特に線路インピーダンスを3倍としたケースでは、AVR時定数を十分に大きくしても不安定化を回避できない結果となっている。このように、特に線路インピーダンスが大きい場合には制御を鋭敏にすることで不安定化しやすく、安定性が適切に維持されるように十分に留意する必要がある。



スローリアクタンス X=0%

スローリアクタンス X=1%

(a)線路インピーダンス R=0.0432Ω、L=0.1374mH(3km 相当)



(b)線路インピーダンス 2 倍(6km 相当) (c)線路インピーダンス 3 倍(9km 相当)

図 5.4(1)-83 安定動作領域(SVC1台)

また、図 5.4(1)-84 の構成にて、線路インピーダンスが 3km 相当の試験条件にて安定動作領域を実験的に検討した結果を図 5.4(1)-85 に示す。定常的な電圧変動の様子を観測すると共に、時刻 5sec 程度で 1kW の負荷を投入して、その応答を合わせて観測した。数値解析結果と同様に、制御ゲインが大きく、時定数が短い程不安定となりやすい傾向となっているが、このように高速に動作する領域では、どうしても実験結果と数値計算の差異が生じやすくなっている。例えばゲインが 20 およびスロープリアクタンス 0%の場合には、時定数 5msec 程度が安定限界であり、図 5.4(1)-86(a)に示した安定限界(時定数 1msec)とは多少乖離がある。参考に、安定および不安定での実験波形の例を図 5.4(1)-86 に示した。(b)の不安定ケースでは、時刻 5sec 付近での負荷投入により制御が一層不安定となっている。

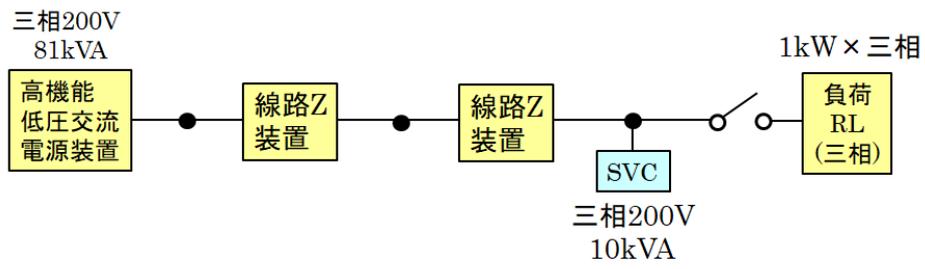


図 5.4(1)-84 安定判別検証用回路構成

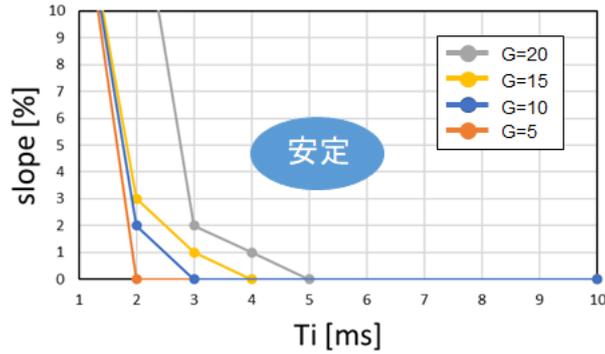
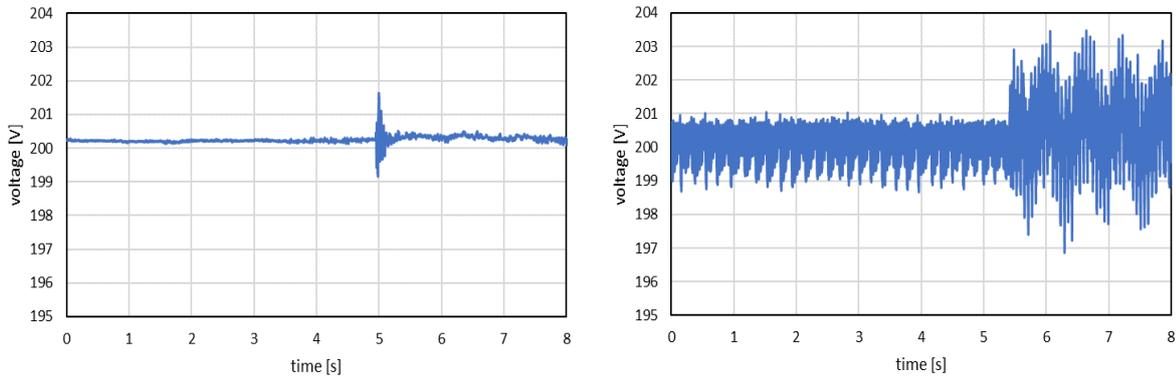


図 5.4(1)-85 安定動作領域(SVC1台、フリッカ検証用回路)



(a)安定

(b)不安定

図 5.4(1)-86 安定領域内外での実験波形

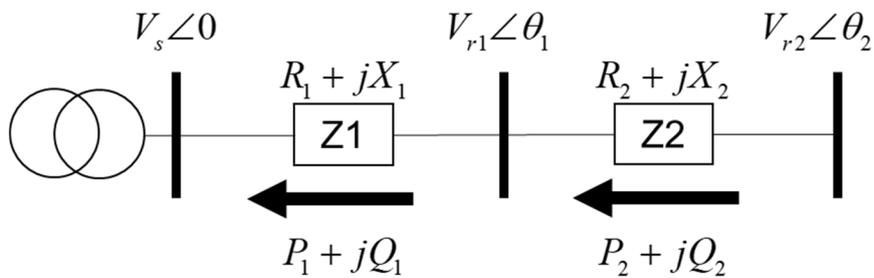


図 5.4(1)-87 SVCを2台含む場合の配電システムモデル

次に、SVC2 台が同一フィーダに接続された場合の安定性について検討した。実験室グリッドでは SVC は 1 台のみであるため、本検討は数値解析により実施した。瞬時値解析モデルを 2 台組み合わせる場合には、より詳細なモデルの調整が必要になると考えられるため、ここでは大まかな傾向を把握するために実効値モデルに基づいた解析とした。まず、配電システムモデルを図 5.4(1)-87 に示す。系統電圧の位相を基準として、二つの線路インピーダンスの中間と末端で STATCOM や負荷、PV が接続されることで系統に有効電力、無効電力が流れる回路で検討を行う。まず、電圧制御系を以下の通り線形化する。線路インピーダンスの中間の電圧は

$$V_{r1}e^{j\theta_1} = V_s + (R_1 + jX_1) \cdot \frac{P_1 - jQ_1}{V_s} \dots\dots\dots (4-1)$$

となるため、Vs を 200V、1pu で一定とすると

$$V_{r1}e^{j\theta_1} = 1 + (R_1P_1 + X_1Q_1) + j(X_1P_1 - R_1Q_1) \dots\dots\dots (4-2)$$

$$V_{r1}[\text{Re}] = 1 + (R_1P_1 + X_1Q_1) \dots\dots\dots (4-3)$$

$$V_{r1}[\text{Im}] = X_1P_1 - R_1Q_1 \dots\dots\dots (4-4)$$

となる。同様に末端の電圧は

$$V_{r2}e^{j\theta_2} = V_{r1}e^{j\theta_1} + (R_2 + jX_2) \cdot \frac{P_2 - jQ_2}{V_{r1}e^{j\theta_1}} \dots\dots\dots (4-5)$$

$$V_{r2}[\text{Re}] = V_{r1}[\text{Re}] + \frac{(R_2P_2 + X_2Q_2)\cos\theta_1 - (X_2P_2 - R_2Q_2)\sin\theta_1}{V_{r1}} \dots\dots\dots (4-6)$$

$$V_{r2}[\text{Im}] = V_{r1}[\text{Im}] + \frac{(X_2P_2 - R_2Q_2)\cos\theta_1 + (R_2P_2 + X_2Q_2)\sin\theta_1}{V_{r1}} \dots\dots\dots (4-7)$$

となる。それぞれの電圧ベクトルに対して、大きさは

$$|V| = \sqrt{V[\text{Re}]^2 + V[\text{Im}]^2} \dots\dots\dots (4-8)$$

で表され、位相は

$$\theta \square 1 \dots\dots\dots (4-9)$$

とすると

$$\theta = \sin^{-1} \theta = \frac{V[\text{Im}]}{|V|} \dots\dots\dots (4-10)$$

で表される。

図 5.4(1)-88 に回路のブロック線図を示す。線路インピーダンスの中間と系統末端に STATCOM と消費電力 0.1pu の抵抗をそれぞれ接続した。それぞれの計算ブロックでは式(4-1)～(4-10)を用いて電圧ベクトルの実部と虚部から電圧の大きさと位相を求めた。求めた電圧の大きさが STATCOM に入力され、出力電力が電圧計算ブロックに入力される形になっている。

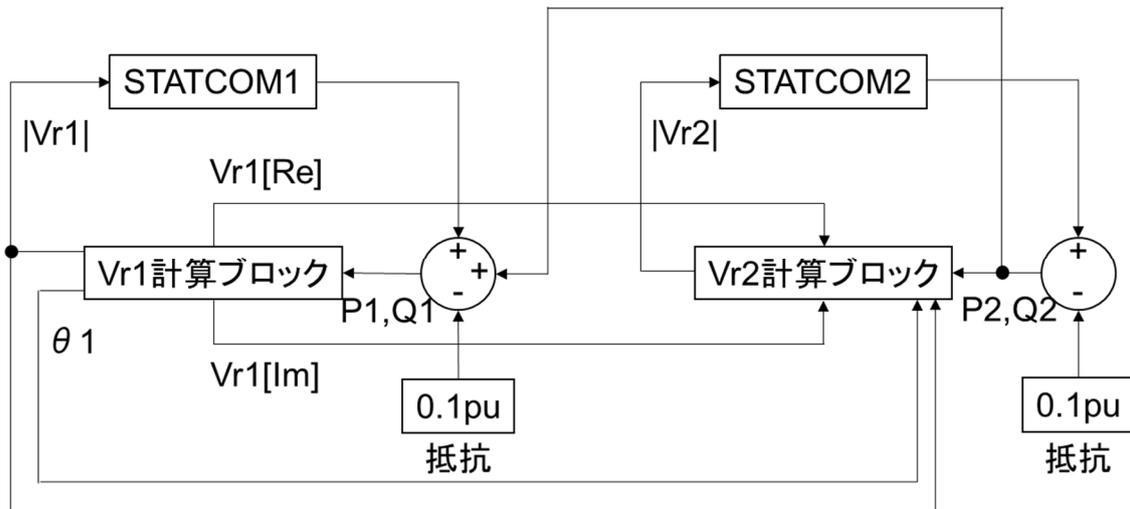


図 5.4(1)-88 電圧制御系の線形化表現

前述の実効値モデル、ならびに表 5.4(1)-6 のシミュレーション条件により安定条件を解析した。実験回路における線路インピーダンス($R=43.2\text{m}\Omega$, $L=137.5\mu\text{H}$)の大きさを 1pu として、上流下流の線路インピーダンスの組み合わせに対する安定領域の変化を図 5.4(1)-89 に示した。一般に配電システム用変電所から SVC 連系点までの距離が長くなるほど電圧-無効電力制御感度が高くなることで、より鋭敏な制御パラメータとした場合には不安定化が懸念される。本試算結果においても同様に、SVC までの配電線の亘長が長くなるほど安定性が低下する傾向となった。安定動作の例として、Z1、Z2 とともに 1pu のときの連系点電圧および SVC の無効電力を図 5.4(1)-90 に示す。同様に、不安定動作の例も Z1、Z2 とともに 10pu のときのを図 5.4(1)-91 に示す。図 5.4(1)-91 では電圧が目標値である 200V の上下でハンチングする結果となった。

表 5.4(1)-6 SVC のパラメータ設定

DC-AVR	比例ゲイン	1
	積分時間[ms]	100
AC-AVR	比例ゲイン	1
	積分時間[ms]	2
	スロープリアクタンス[%]	0.7
ACR	比例ゲイン	3
	積分時間[ms]	10

両 SVC 間の電氣的距離、ならびに配電システム用変電所側の SVC の接続箇所をパラメータとして、安定動作条件を示したものが図 5.4(1)-92 である。

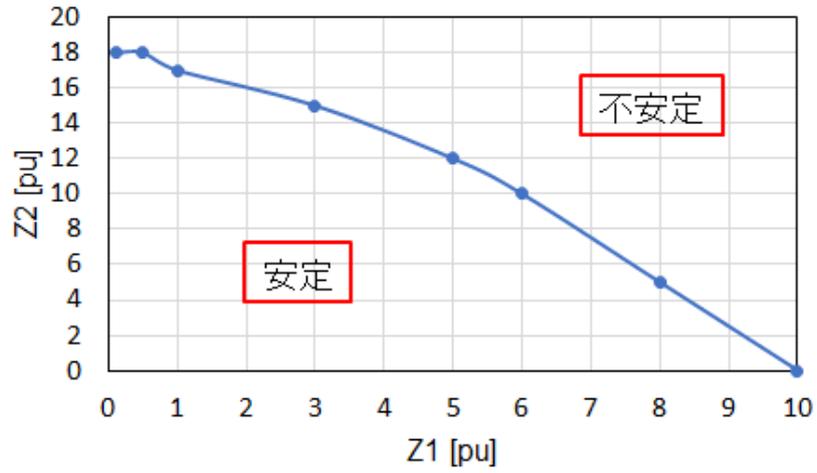
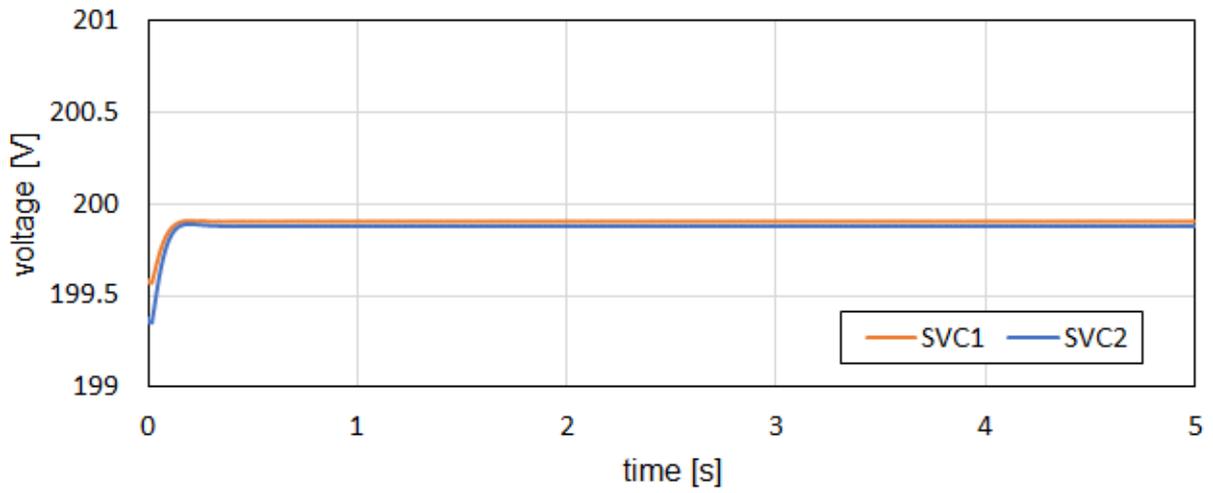
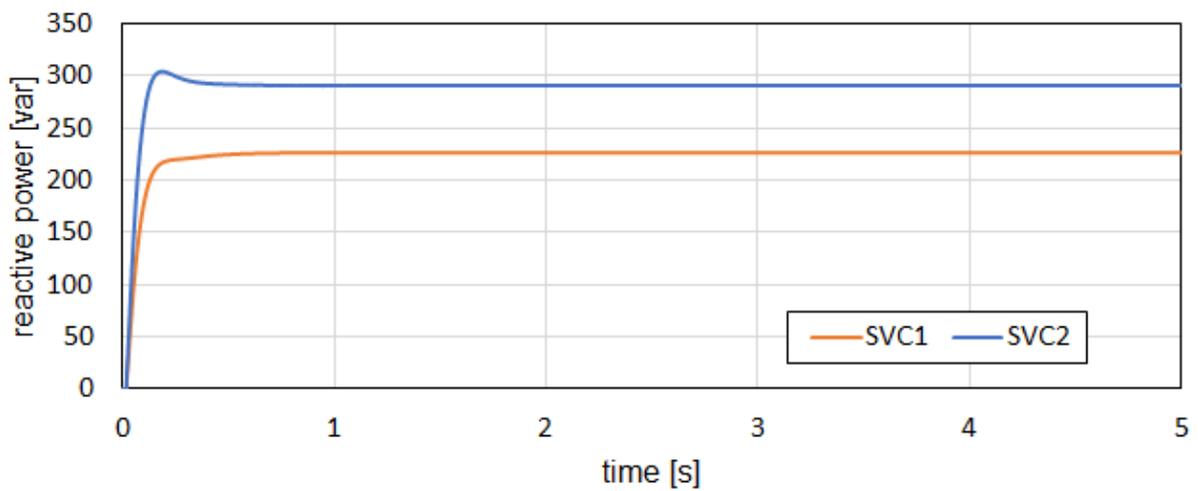


図 5.4(1)-89 SVC2 台の場合の安定領域

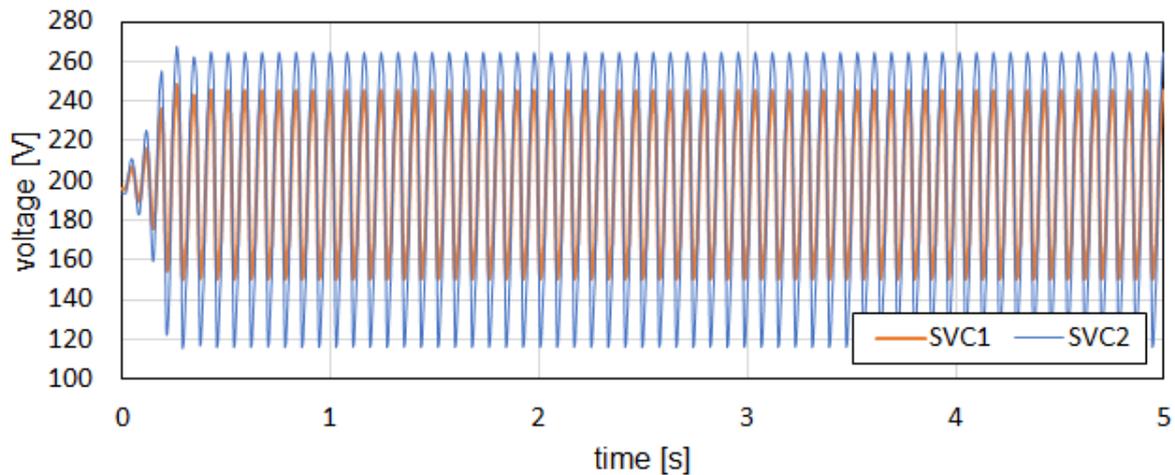


(a) 接続点の系統電圧

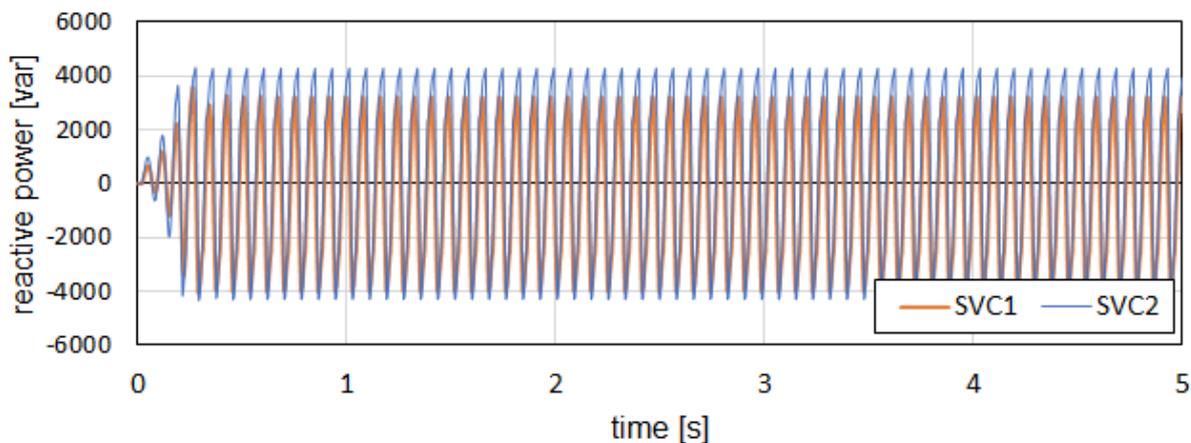


(b) 出力無効電力

図 5.4(1)-90 Z1、Z2=1pu での応答



(a) 接続点の系統電圧



(b) 出力無効電力

図 5.4(1)-91 $Z_1, Z_2=10pu$ での応答

図 5.4(1)-92 に $Z_1=8pu, Z_2=5pu$ での、図 5.4(1)-93 に $Z_1=9pu, Z_2=4pu$ での接続点の系統電圧を示す。配電線全体の亘長は $13pu$ で同じだが、図 5.4(1)-92 では電圧が振動的ではあるものの収束に対し、図 5.4(1)-93 では収束せずに持続的な振動状態に至った。このように、複数の SVC がいずれも配電線末端側に近いほど、1台の SVC に等価的に縮約した場合の連系点は末端側に位置すると考えられ、より高い電圧—無効電力制御感度により不安定化しやすい結論となる。

以上で示した通り、フリッカの変動抑制のためには ACAVR の制御ゲインを上げる必要があるが、高ゲインの SVC を採用した場合、フィーダの亘長が長い場合などにおいて上図で示した通り安定動作条件が満足されない場合があることがわかる。したがって、様々な系統条件に対して広く安定動作を実現しながらフリッカ補償制御を適用するための一つの方法として、瞬時電圧低下補償制御では今回実装されていたように、目的に応じた複数の制御モードを用意し、それらを都度切り替えることなどが有効になり得ると考えられる。

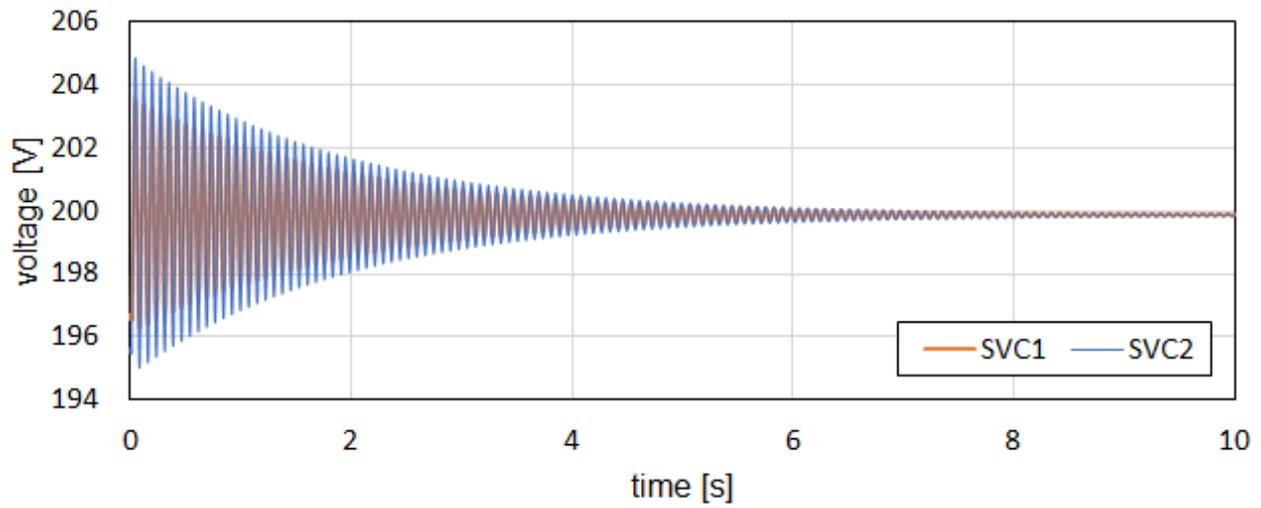


図 5.4(1)-92 $Z1=8pu$ 、 $Z2=5pu$ での応答

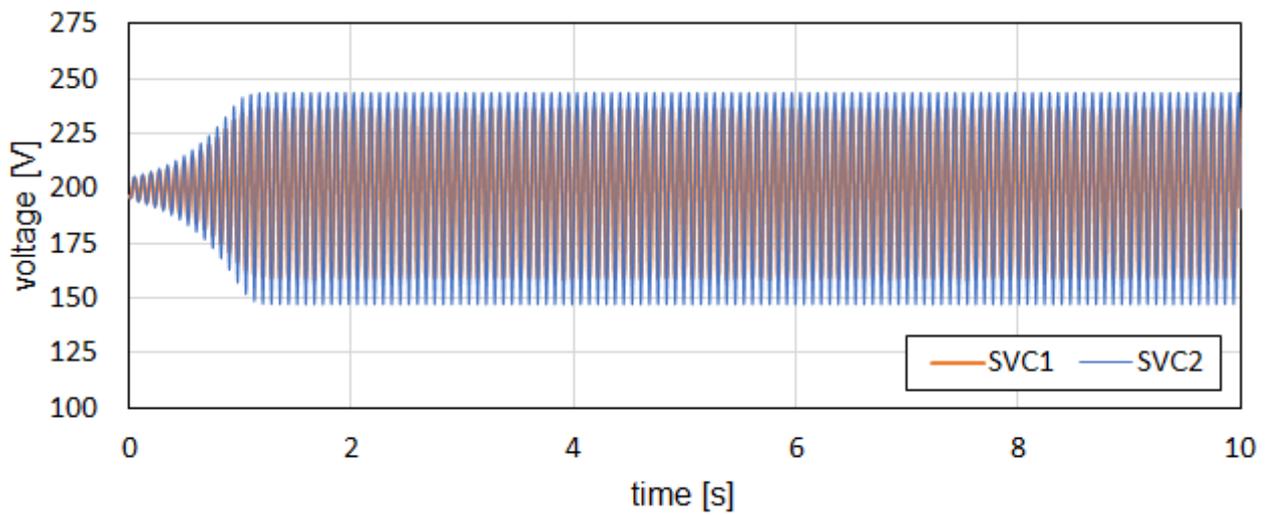


図 5.4(1)-93 $Z1=9pu$ 、 $Z2=4pu$ での応答

○共振現象の確認

一般にスイッチングによるパワエレ機器を系統連系する場合には、共振現象に伴う高調波を生じないように十分に留意する必要がある。実験室グリッドにおいても、SVC のスイッチング素子から見た交流回路側のインピーダンスが、特定の周波数で共振条件に近づく場合には高調波を生じる可能性がある。一例として、SVC の連系点の直近にキャパシタが接続されている無負荷の場合を想定すると、共振に近い条件が成立し、図 5.4(1)-94 に示すような波形が生じる。基本波である 50Hz の信号の周りで 2.5kHz (50 次) の高調波が重畳し、その増大に伴い SVC が自動停止した波形となっている。

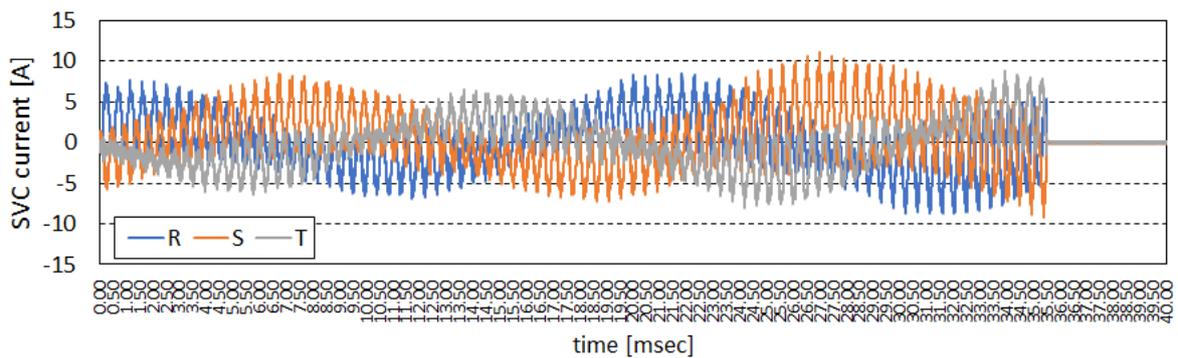


図 5.4(1)-94 高調波が重畳した SVC 電流の例(実験室グリッド)

1. 5. 4(1)⑩実験室グリッドによる評価のまとめ

研究開発項目①より提供された SVC および AVR-Tr について各種試験を行い、数値計算による補足と合わせて、以下のような知見を得た。

- ・ 研究開発項目①より提供された SVC および AVR-Tr の基礎的な特性を試験した。両機器は、いずれも様々な擾乱が発生した場合にも問題なく動作することが確認された。また、PV の出力変動による配電系統の電圧変動に対しても、両機器の電圧制御が容量の範囲内で適切に動作し、電圧変動が緩和されることが示された。SVC による電圧変動の緩和効果の詳細は 1.5.3 節で示した通りであるが、より速い変動に対する追従性ならびに安定動作という観点から、その有効性が実験的に示された。また、負荷変動に対するステップ応答や周波数応答の試験を通じて、SVC の挙動を表す瞬時値解析モデルを構築した。
- ・ SVC および AVR-Tr の瞬時電圧低下時の電圧補償制御の有効性を実験的に検討した。SVC の無効電力制御による電圧上昇効果は、主として上位系統から SVC 連系点までの線路リアクタンスに依存すると考えられるが、実験室グリッドの線路インピーダンスの大きさは、亘長数 km 程度の配電線を模擬したものであり比較的短い。このような観点から、実験による瞬時電圧低下の補償制御効果は限定的ではあったが、PCS の脱落量が改善されることを実験的に示した。
- ・ SVC の制御を高帯域化することにより、フリッカ抑制に貢献できることを示した。ただし制御の高帯域化により制御の安定余裕は低下するため、系統条件によっては不安定化が懸念されることを示した。本研究開発では平常時の電圧制御機能を基に、制御パラメータの調整によりフリッカの抑制を実現したが、他の制御論理を適用することで一層効果的にフリッカを抑制できることが期待される。そのため、フリッカ抑制に適した制御を別途構築した上で、制御モードを必要に応じて切り替えて用いることが有効と考えられる。SVC が新型能動方式によるフリッカ抑制制御を行うと、原理上は単独運転の検出機能を低下させるおそれがあるが、実験的には優位な差は見られなかった。

[参考文献]

- [1] 電気協同研究会：“配電系統の高調波防止対策”、第 37 巻、第 3 号、1981 年
- [2] NEDO：“集中連系型太陽光発電システム実証研究”
- [3] 長嶋友宏、福島健太郎、野田琢：“瞬時値解析による配電系統の動的電圧解析手法(その2) —配電系統用 STATCOM のモデル化—”、電力中央研究所報告、H14014 (2015)
- [4] 佐野憲一郎、岡田有功、白崎圭亮、岩月秀樹：“ステップ注入付周波数フィードバック方式に起因する無効電力振動の継続条件”、電気学会論文誌 B、第 138 巻、第 8 号、pp.659-670 (2018)

1. 5. 4(2)赤城模擬グリッドでの実証評価

1. 5. 4(2)① 赤城模擬グリッドでの検証の目的

開発機器等に対する電圧制御性能や安定運転性等の基礎評価だけでなく、実システムで再現が不可能な系統擾乱・事故時等における機器の挙動を確認し、実配電システムに導入するにあたっての有効性と懸念事項を抽出し、取りまとめる。

また、懸念事項について、研究開発項目①に対策の可能性を評価いただく。可能な場合には次回検証試験までに改修いただいて、確認を行う。

さらに、今後導入するにあたっての評価すべき項目、判定基準について検討し、取りまとめる。

1. 5. 4(2)② 赤城模擬グリッドの構成と増強

1. 5. 4(2)②1) 電中研所有の実験設備の概要

赤城模擬グリッドでの実証評価には、電力中央研究所・赤城試験センターに既設の「需要地系統ハイブリッド実験設備」を使用した。

この実験設備は、分散形電源の導入がシステムの電力品質や保護保安等に与える影響、ならびにこれらの課題に対する系統側・分散形電源側それぞれの対策技術の開発・評価や総合的な実証試験を行うことを目的に、電力中央研究所が赤城試験センター（群馬県前橋市）に構築したものである。

図 5.4(2)-1 に需要地系統ハイブリッド実験設備の構成を示す。

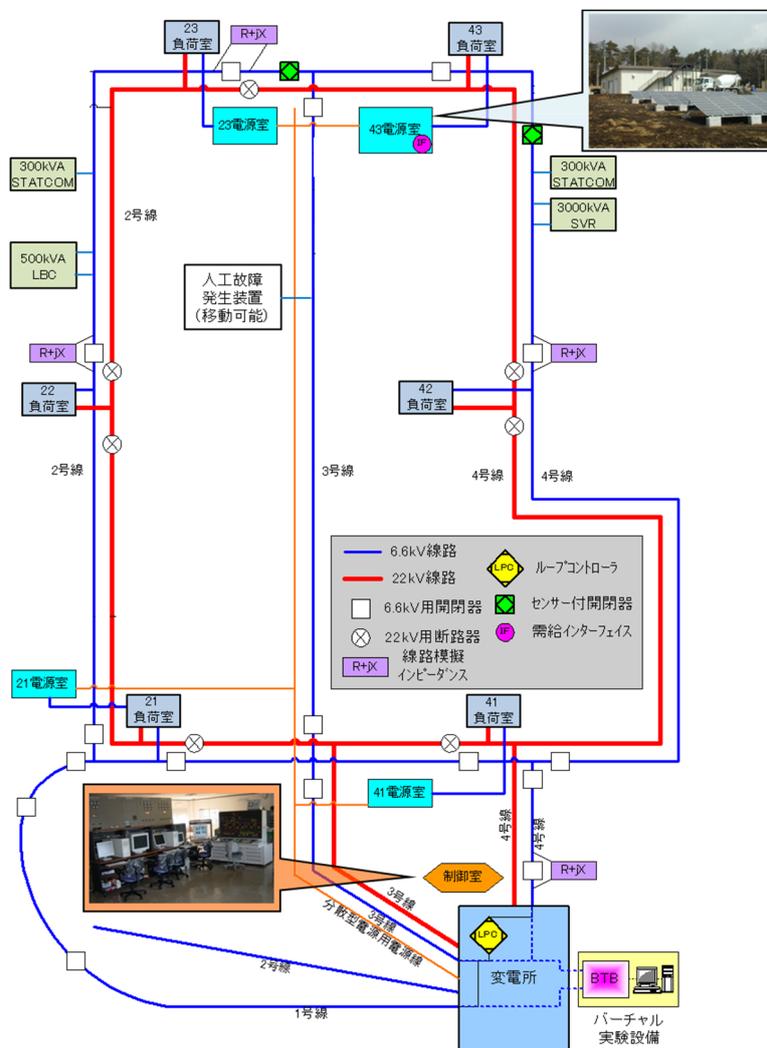


図 5.4(2)-1 需要地系統ハイブリッド実験設備の構成

試験設備は、実規模の配電設備(変電所、変圧器(66kV/22kV/6.6kV)2000kVA×2バンク、22kV および 6.6kV の高圧配電線、高圧模擬線路)、電圧制御装置(SVR、SVC、LBC)、分散形電源設備(同期発電機、誘導発電機、インバータ電源)、模擬負荷装置(インピーダンス負荷、回転機負荷、電子負荷)、光ファイバ情報通信ネットワークなどにより構成される。また、バーチャル実験設備(リアルタイムシミュレータとBTB 電源装置)により、上位系統や隣接系統の挙動をリアルタイムで模擬することができる。

本設備の概要は、以下の通りである。

◎ 配電系統

我が国の種々の配電形態に対応できるように、6.6kV および 22kV の放射状、ループ状等の種々の構成を可能としている。また、高圧模擬線路を併用し、20km 以上の長亘長配電線を模擬可能としている。さらに、変電所を2バンク構成(2000kW/バンク)とし、電圧や位相の異なった異バンク間のループ構成の実証を可能にしている。変電所の 2000kW 主変圧器はそれぞれ負荷時タップ切換装置を有する変圧器(LRT)であり、6.6kV 送出し電圧を 75V 刻みで手動および自動で変更できる。

加えて、地絡・短絡事故を発生させる人工故障発生装置および瞬断・瞬低発生装置を併設し、各種事故や系統異常時の実証評価を可能としている。

◎ 分散形電源

1配電線当たりの設備容量の 40%~50%に相当する 950kW 程度の分散形電源を設置し、系統運用への問題点や導入可能量を実規模スケールで実証評価できるようにしている。これらの分散形電源は、次に示す負荷設備とともに、4ヶ所の電源室に分散して設置されている。分散形電源の種類は、同期発電機(コジェネ模擬)、誘導発電機(風力発電模擬)、インバータ電源(PV 模擬)である。これらを4箇所分散設置し、常時および系統異常時の各種評価試験を可能にしている。

◎ 負荷設備

先に示した分散形電源に負荷設備を併設し、負荷を有する実配電線に即した条件で各種の実証評価を可能にしている。負荷の種類は、インピーダンス負荷(R、L、C)、回転機負荷、および高調波発生源としても利用可能な電子負荷で構成される。

◎ 計測システム

変電所および電源室に計測器を設置し、また実験設備全域に計測用の情報通信ネットワーク(光ファイバ)を設置している。これらの計測システムを用いて、瞬時値および実効値で、各地点の電圧、電流、電力(有効電力、無効電力)等を同時計測できる構成としている。

◎ バーチャル実験設備

リアルタイムシミュレータと 1500kW 級の BTB 電源装置により構成されるバーチャル実験設備により、実証試験設備だけでは模擬が不可能な上位系統からの影響、隣接する配電系統の影響(事故の影響や電圧変動など)、これら系統間での相互干渉特性など、より広範囲な系統現象を実証可能としている。

さらに、BTB 電源装置により、6.6kV 実験用配電線において、送り出し電圧を任意の値で安定出力できるとともに、瞬時電圧低下、位相急変、周波数動揺等の各種擾乱を発生させることができる。また、BTB 電源装置は、三相各相の電圧を独立して制御できるため、系統電圧の不平衡を模擬することもできる。

1. 5. 4(2)②2)試験設備の増強

赤城模擬グリッドでの実証試験に向け、平成 28 年度に電力中央研究所において、以下のような試験設備の増強を行った。

- ◎大規模 PV 模擬電源装置
- ◎低圧住宅用 PV 模擬電源装置
- ◎試験データ計測・収集用配電線センサシステム
- ◎実証機器設置箇所のコンクリート基礎
- ◎瞬時値計測用計測器

増強した各試験設備の概要を以下に示す。

◎大規模 PV 模擬電源

配電系統に連系される大規模 PV を模擬するための電源装置として、100kW 級大規模 PV 模擬電源装置(図 5.4(2)-2)と、20kW 級大規模 PV 模擬電源装置(図 5.4(2)-3)を設置した。

これらの電源装置は、いずれも太陽電池アレイの直流出力を模擬する直流電源と配電系統に交流で連系するための系統連系インバータを組み合わせて構成しており、系統連系インバータは系統連系規程(JEAC9701-2012)に準じた単独運転検出機能と事故時運転継続機能を具備した。また、様々な条件での試験を実施できるようにするため、保護リレーの整定値の一部を変更可能とした。さらに、大規模 PV 模擬電源装置は、通信により遠隔から有効電力・無効電力の出力設定値を指令できるようにした。



図 5.4(2)-2 100kW 級大規模 PV 模擬電源装置



図 5.4(2)-3 20kW 級大規模 PV 模擬電源装置

◎大規模 PV 模擬電源

○100kW 級大規模 PV 模擬電源装置

100kW 級大規模 PV 模擬電源装置は、直流電源と系統連系インバータにより構成した(図 5.4(2)-4)。入力電圧と出力電圧は交流 400V(入力・出力ともに、変圧器を介して 6600V 配電線に接続)、直流部分の定格電圧は 700V とした。また、系統連系インバータの出力周波数は 50Hz と 60Hz のいずれにも対応可能とし、実験用配電線の周波数を自動検出するものとした。100kW 級系統連系インバータの主な仕様を表 5.4(2)-1 に示す。

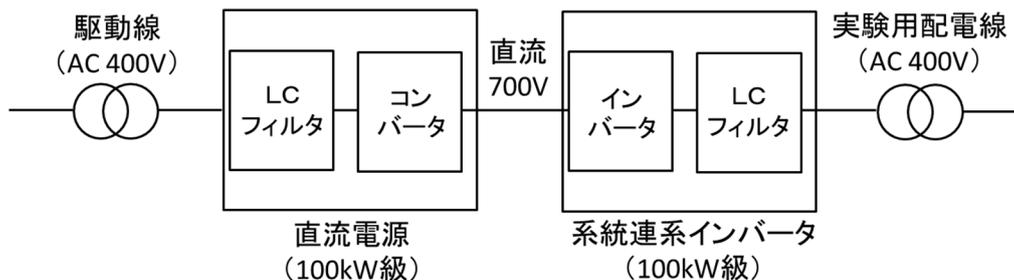


図 5.4(2)-4 100kW 級大規模 PV 模擬電源装置の構成

表 5.4(2)-1 100kW 級系統連系インバータの主な仕様

項目	仕様
交流定格容量	100 kW
交流定格電圧	三相 AC 400 V
直流定格電圧	DC 700 V
周波数	50 Hz / 60 Hz
電流歪率	総合 5%以下、各次 3%以下

系統連系インバータの制御方式は、交流定電力制御(P、Q)を基本とし、制御モードの切り替えにより、電圧上昇抑制制御、力率一定制御に切り替え可能とした(表 5.4(2)-2)。また、系統連系インバータの出力指令値は、手動入力と外部入力の双方に対応可能とした。

表 5.4(2)-2 100kW 級系統連系インバータの制御モード

名称	略称	内容
電圧上昇抑制	AVR	有効・無効電力指令値による制御。電圧上昇抑制機能が有効。
力率一定	APFR	有効電力指令値による制御。指定した力率に応じて無効電力出力。
無効電力制御	MQR	有効・無効電力指令値による制御。電圧上昇抑制機能は無効。

外部入力は、有効電力・無効電力の出力指令値をそれぞれアナログ入力可能とした。アナログ入力信号は DC 5V とし、BNC ケーブルで入力するものとした。外部入力の仕様は、表 5.4(2)-3 の通りである。

表 5.4(2)-3 100kW 級系統連系インバータの外部入力の仕様

項目	設定範囲	アナログ入力
有効電力指令値	0 ~ 100kW	0 ~ 4.5V
無効電力指令値	-100 kVar ~ 100 kVar	-4.5V ~ 4.5V

系統連系保護機能として、系統電圧異常、周波数異常、単独運転を検出する機能を具備した（表 5.4(2)-4）。これら系統連系保護機能の整定値および検出時限は、手動により変更可能とした。また、単独運転検出機能は、手動により機能を無効にできる仕様とした。

表 5.4(2)-4 100kW 級系統連系インバータの保護機能の仕様

項目	設定範囲	備考
系統電圧異常	OVR	400 ~ 480 Vrms デフォルト値 440
	UVR	320 ~ 400 Vrms デフォルト値 360
	検出時限	0 ~ 10 sec デフォルト値 0.5
周波数異常	OFR	50~55 / 60~65 デフォルト値 51.0/61.2
	UFR	45~50 / 55~60 デフォルト値 48.5/58.2
	検出時限	0 ~ 10 sec デフォルト値 0.5
単独運転検出	受動方式	機能を無効にできること
	能動方式	機能を無効にできること

◎大規模 PV 模擬電源

○20kW 級大規模 PV 模擬電源装置

20kW 級大規模 PV 模擬電源装置は、100kW 級大規模 PV 模擬電源装置と同様に、直流電源と系統連系インバータにより構成した(図 5.4(2)-5)。本装置は、100kW 大規模 PV 模擬電源装置とは電圧が異なり、入力電圧と出力電圧は交流 200V(入力・出力ともに、変圧器を介して 6600V 配電線に接続)、直流部分の定格電圧は 400V とした。また、系統連系インバータの出力周波数は 50Hz と 60Hz のいずれにも対応可能とし、実験用配電線の周波数を自動検出するものとした。20kW 級系統連系インバータの主な仕様を表 5.4(2)-5 に示す。

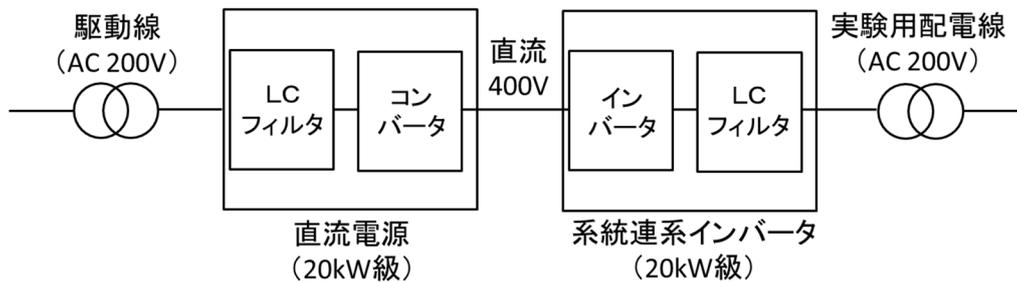


図 5.4(2)-5 20kW 級大規模 PV 模擬電源装置の構成

表 5.4(2)-5 20kW 級系統連系インバータの主な仕様

項目	仕様
交流定格容量	20 kW
交流定格電圧	三相 AC 200 V
直流定格電圧	DC 400 V
周波数	50 Hz / 60 Hz
電流歪率	総合 5%以下、各次 3%以下
変換方式	PWM 方式

系統連系インバータの制御方式は、交流定電力制御(P、Q)を基本とし、制御モードの切り替えにより、電圧上昇抑制制御、力率一定制御に切り替え可能とした。また、系統連系インバータの出力指令値は、手動入力と外部入力の双方に対応可能とした。

外部入力は、有効電力・無効電力の出力指令値をそれぞれ BNC ケーブルによりアナログ入力可能とした。外部入力の仕様は、表 5.4(2)-6 の通りである。

表 5.4(2)-6 20kW 級系統連系インバータの外部入力の仕様

項目	設定範囲	アナログ入力
有効電力指令値	0 ~ 20kW	0 ~ 4.5V
無効電力指令値	-20 kVar ~ 20 kVar	-4.5V ~ 4.5V

系統連系保護機能は、100kW 級と同様に、系統電圧異常、周波数異常、単独運転を検出する機能を具備した(表 5.4(2)-7)。これら系統連系保護機能の整定値および検出時限は、手動により変更可能とした。また、単独運転検出機能は、手動により機能を無効にできる仕様とした。

表 5.4(2)-7 保護機能の仕様

項目		設定範囲	備考
系統電圧異常	OVR	200 ~ 260 Vrms	デフォルト値 230
	UVR	140 ~ 200 Vrms	デフォルト値 180
	検出時限	0 ~ 10 sec	デフォルト値 0.5
周波数異常	OFR	50~55 / 60~65	デフォルト値 51.0/61.2
	UFR	45~50 / 55~60	デフォルト値 48.5/58.2
	検出時限	0 ~ 10 sec	デフォルト値 0.5
単独運転検出		受動方式	機能を無効にできること
		能動方式	機能を無効にできること

◎大規模 PV 模擬電源

○PV 模擬電源装置の計測・制御システム

PV 模擬電源装置の計測データを一括して収集するとともに、PV 模擬電源装置を外部指令により運転可能とするための計測・制御システムを設置した(図 5.4(2)-6)。計測・制御システムの構成を図 5.4(2)-7 に示す。

計測子局には、電流(相電流)と電圧(線間電圧)を入力とし、電圧・電流・有効電力・無効電力・周波数の実効値を出力可能なトランスデューサを内蔵しており、これらの計測値を通信により親局に一定周期で送信する。なお、有効電力と無効電力の計測は2電力計法によるものとし、2相の電流計測と3相の線間電圧計測を行う仕様とした。

制御親局には、計測データをリアルタイムで数値表示およびグラフ表示を可能な計測ソフトウェアと、PV 模擬電源装置に出力指令を与えるための制御ソフトウェアを導入した。PV 模擬電源装置の出力指令は、LAN 経由で制御子局にデジタル値を送信するものとした。

制御子局は、制御親局より受信した指令値をアナログ出力(DC 5V)に変換し、BNC ケーブルを介して PV 模擬電源装置に指令値を出力する。

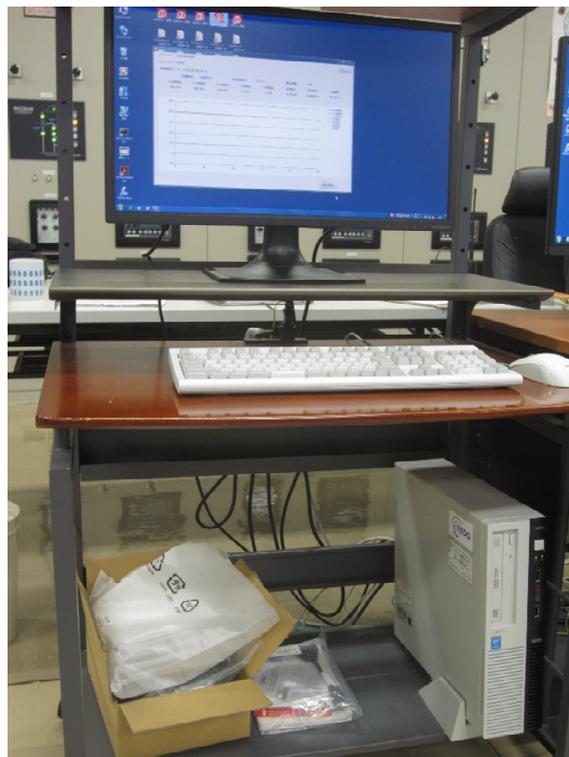


図 5.4(2)-6 PV 模擬電源装置の計測・制御システム(計測制御親局)

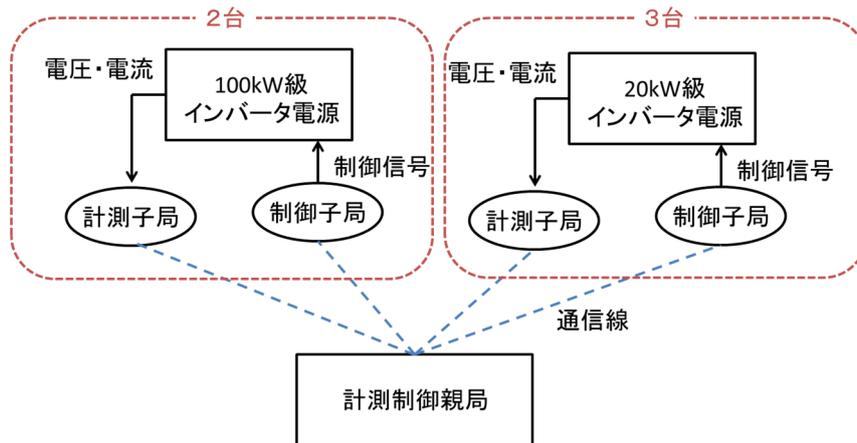


図 5.4(2)-7 計測・制御システムの構成

◎低圧住宅用 PV 模擬電源装置

低圧住宅用 PV 模擬電源装置(図 5.4(2)-8)は、太陽電池の出力を模擬する直流電源と、市販の住宅 PV 用パワーコンディショナ(4kW)により構成した(図 5.4(2)-9)。本装置の直流電源は、太陽電池の出力を詳細に模擬するため、高速演算が可能な模擬コントローラと組み合わせ、PC にインストールされたソフトウェアから、各種のパラメータを設定できるものとした。なお、PC と模擬コントローラの間は LAN 接続により通信する仕様とした。



図 5.4(2)-8 低圧住宅用 PV 模擬電源装置

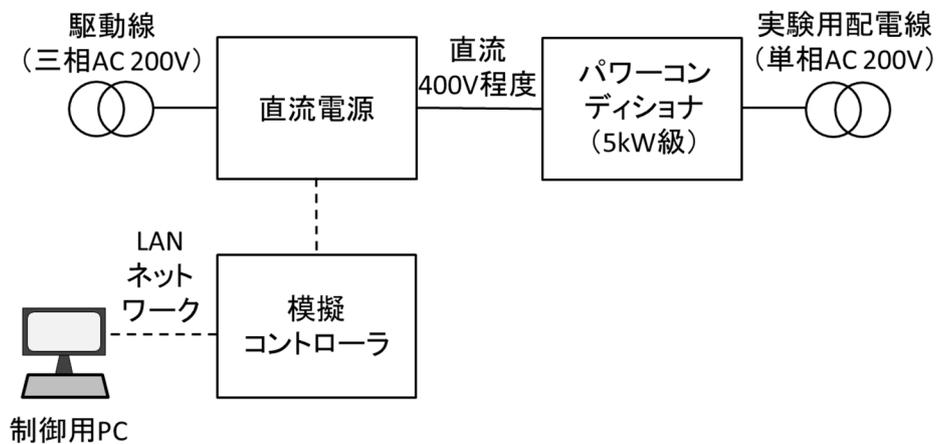


図 5.4(2)-9 低圧住宅用 PV 模擬電源装置の構成

直流電源の主な仕様を表 5.4(2)-8 に示す。直流電源の入力は三相交流 200V であり、定格出力電圧は直流 450V である。出力電流は、最大 50A とし、住宅用の太陽電池アレイの模擬できる十分な容量を確保した。また、計測部は、電圧 0.01V、電流 0.001A、電力 1W 刻みでの計測を可能とし、細かい刻みで計測することにより、太陽電池の特性を詳細に模擬できる仕様とした。

表 5.4(2)-8 直流電源の主な仕様

入力	電圧	三相 AC200V±10%
	周波数	50Hz±2Hz
出力	定格出力電圧	DC 450V
	最大電流	DC ±50A
計測部	電圧	計測分解能:0.01V
	電流	計測分解能:0.001A
	電力	計測分解能:1W
変換効率		80%以上
保護機能	非常停止	非常停止スイッチが押されるか、外部から非常停止信号が入力されると直ちに停止すること
	過電圧	系統電圧の過電圧を検出した場合、エラー表示を行うとともに出力を停止すること
	不足電圧	系統電圧の不足電圧を検出した場合、エラー表示を行うとともに出力を停止すること
	周波数上昇	系統周波数の上限逸脱を検出した場合、エラー表示を行うとともに出力を停止すること
	周波数低下	系統周波数の下限逸脱を検出した場合、エラー表示を行うとともに出力を停止すること

◎配電線センサシステムの増強

模擬グリッドによる試験を実施するため、既設の配電線センサシステムを増強し、実証用電圧制御機器の設置箇所周辺に配電線センサ装置を2台追加設置するとともに、データ収集用の親局システムを更新した。

配電線センサ装置は、配電柱の柱上に設置する装置であり、6.6kV配電線各地点の電圧(線間電圧)、電流、有効電力、無効電力を計測・演算し、親局システムに送信するものである(図5.4(2)-10)。配電線センサ装置は、定格電圧6600V 定格電流300Aであり、VT(6600/110V)とCT(300/5A)を内蔵している。配電線センサ装置の仕様を表5.4(2)-9に示す。

今回の増強では、実証用電圧制御機器の設置箇所周辺に、配電線センサ装置(2台)を追加設置した。赤城試験センターの模擬配電システムにおける配電線センサ装置の設置位置を図5.4(2)-11に示す。

配電線センサ装置と親局の間は、光ファイバ・ケーブルにより接続し、常時1秒周期で通信する仕様とした。親局に送信する計測データの計測項目と計測範囲は、表5.4(2)-10に示す通りである。

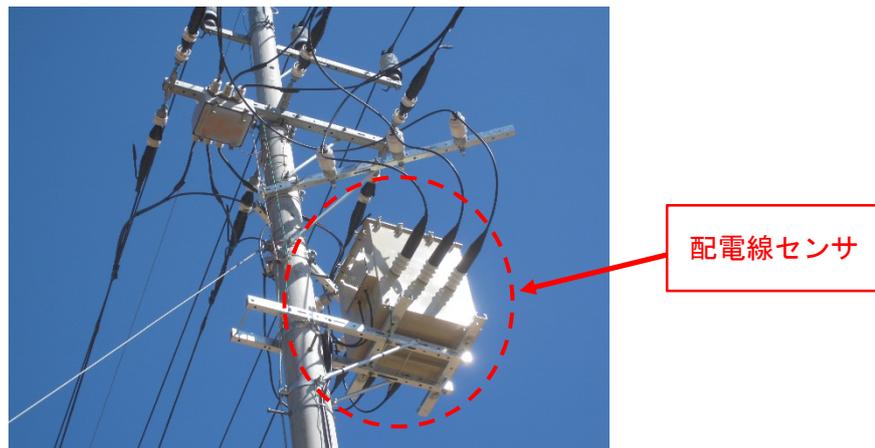


図 5.4(2)-10 配電線センサ装置

表 5.4(2)-9 配電線センサ装置の主な仕様

項目	仕様
相数	3相
周波数	50 Hz
定格電圧	6,600 V
定格電流	300 A
VT	6,600/110V
CT	300/5A

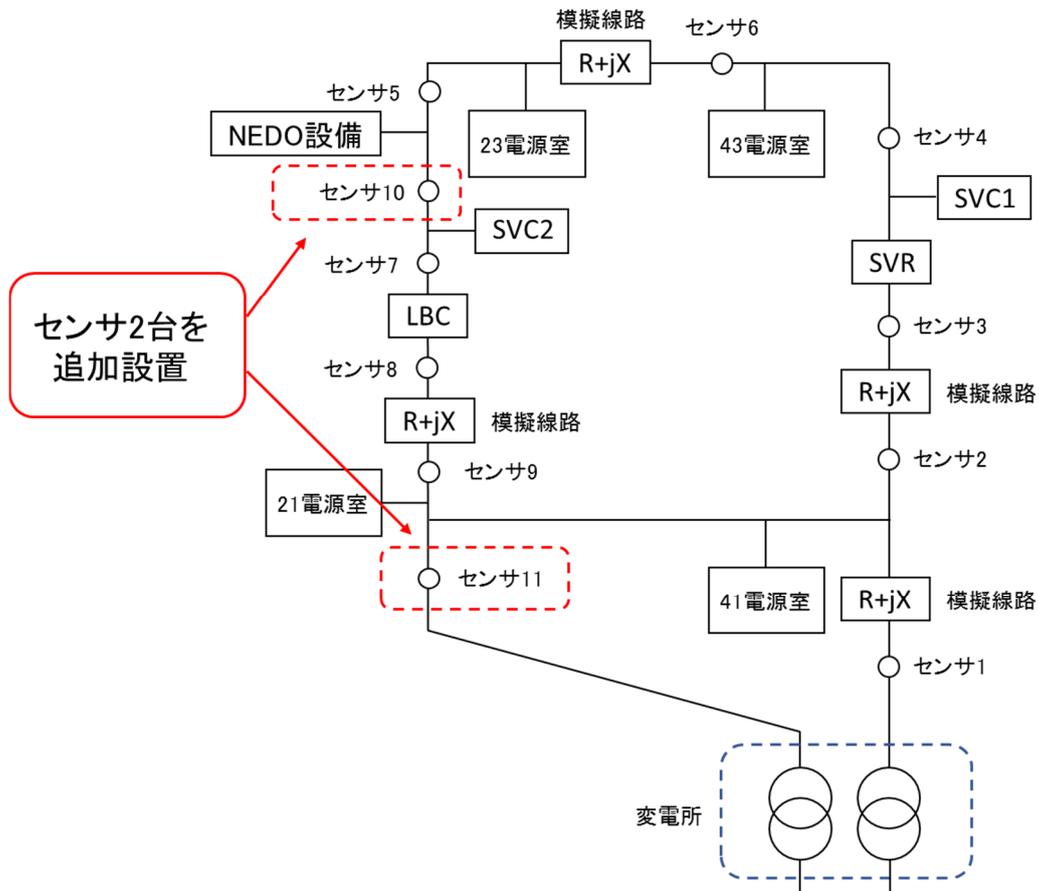


図 5.4(2)-11 配電線センサ装置の設置箇所

表 5.4(2)-10 配電線センサ装置の計測項目と計測範囲

計測項目	計測範囲	備考
相電流実効値 (R相)	0~200 A	定格:200 A
相電流実効値 (S相)	0~200 A	定格:200 A
相電流実効値 (T相)	0~200 A	定格:200 A
線間電圧実効値 (R-S相)	0~9,000 V	定格:6,600 V
線間電圧実効値 (S-T相)	0~9,000 V	定格:6,600 V
線間電圧実効値 (T-R相)	0~9,000 V	定格:6,600 V
有効電力	-2,286 kW ~ +2,286 kW	
無効電力	-2,286 kvar ~ +2,286 kvar	

データ収集用の親局システムは、新設する配電センサ装置と既設の装置(配電センサ装置、配電線電圧制御装置(SVR、SVC))の各種データを同時に収集・保存できるものとし、変電所制御室に設置した(図 5.4(2)-12)。

親局装置は、全体系統監視画面(図 5.4(2)-13)により、11 台の配電線センサ装置の計測値と既設の配電線電圧制御装置の計測値(代表相)をリアルタイムで数値表示できるものとした。また、全体系統監視画面上で、各種機器(センサ装置、電圧制御装置)をダブルクリックすることにより、詳細表示画面に移行し、各相の電圧・電流を表示可能とした(図 5.4(2)-14)。



図 5.4(2)-12 配電線センサデータ収集用親局装置

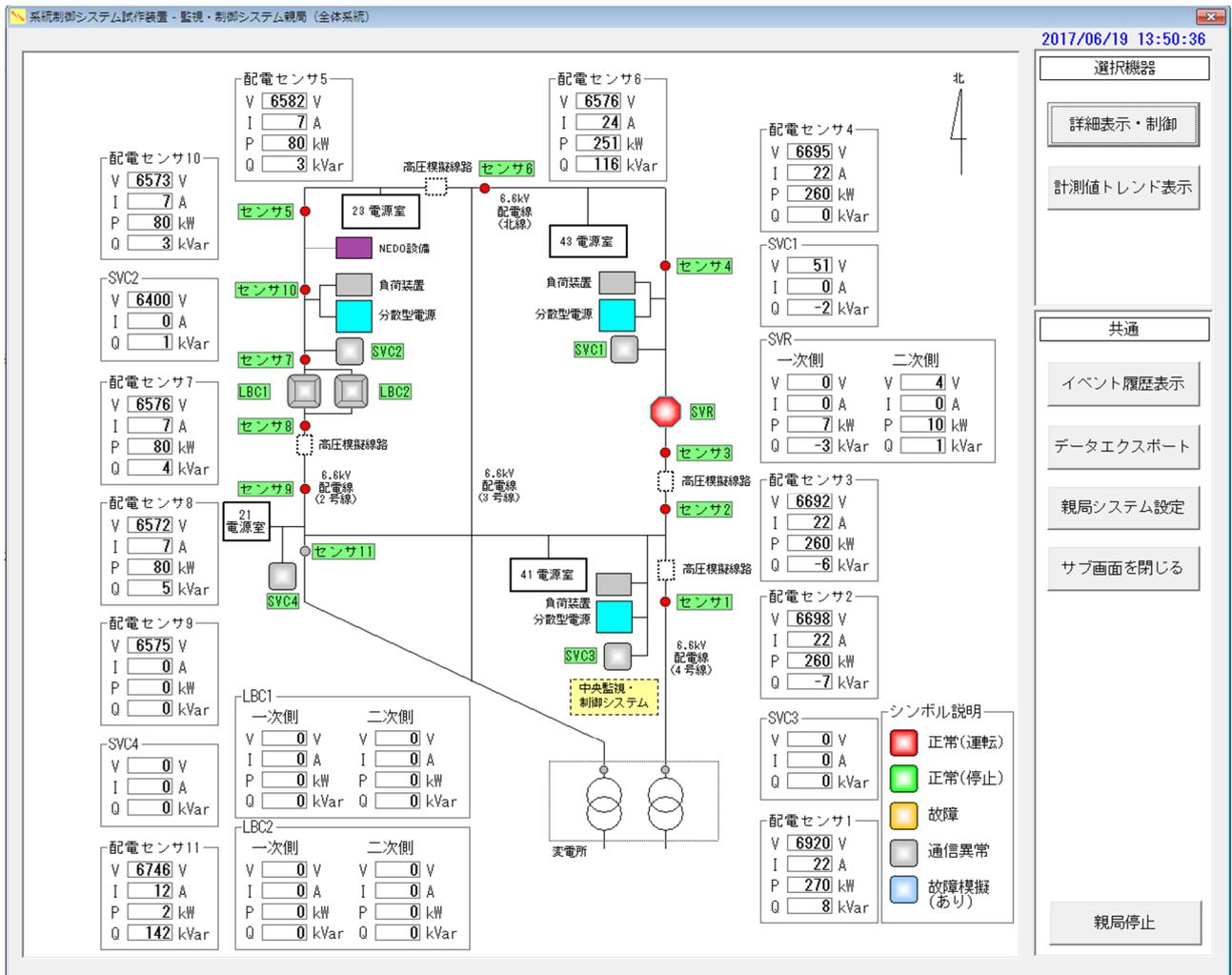


図 5.4(2)-13 全体系統監視画面

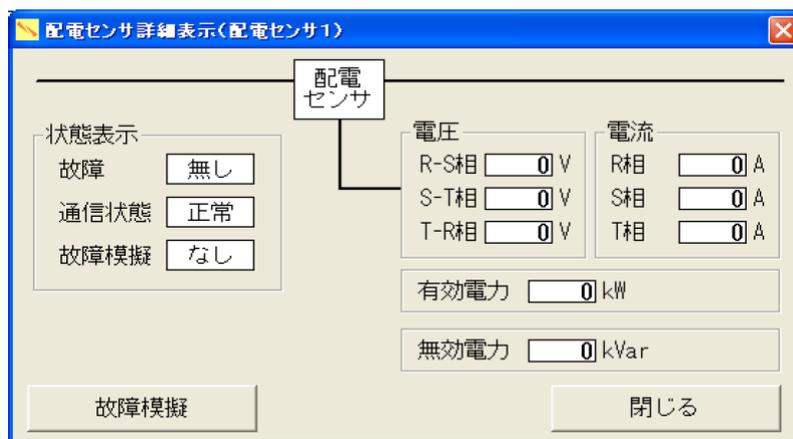
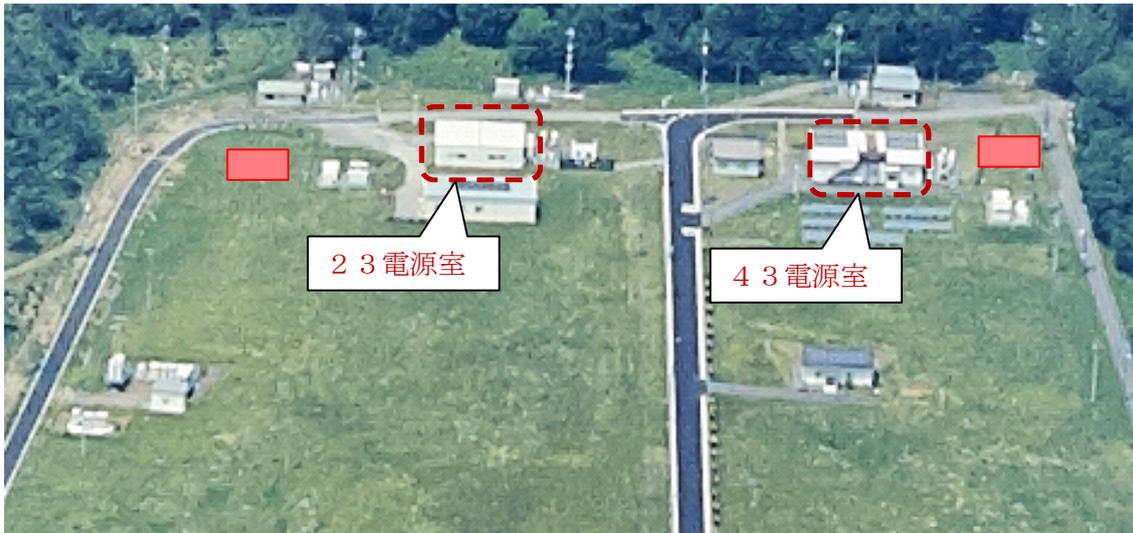


図 5.4(2)-14 配電センサの詳細画面

◎実証機器設置箇所のコンクリート基礎

実証機器である電圧制御装置(自励式 SVC・次世代 TVR)を模擬グリッドに設置するためのコンクリート基礎工事を行った。なお、実証機器を2箇所を設置可能とするため、コンクリート基礎は23 地点と43 地点の2箇所を設置した(図 5.4(2)-15)。

コンクリート基礎の平面寸法は、8,000mm×4,000mm 以上のスペースを確保した。また、安全のため、コンクリート基礎の周囲には、高さ 1,800mm 程度のフェンスを設けた(図 5.4(2)-16)。



■ 設置場所

図 5.4(2)-15 コンクリート基礎の設置場所



図 5.4(2)-16 実証試験用コンクリート基礎(43 地点)

◎瞬時波形計測用計測器

実証試験における瞬時波形を計測するため、アナログ 32ch 対応の瞬時波形計測器を実証試験設備の計測地点(変電所、電源室、他)に設置した(図 5.4(2)-17)。



図 5.4(2)-17 瞬時波形計測器

瞬時波形計測器は、メモリハイコーダ(HIOKI MR8827)に 32 チャンネル分のアナログユニット(HIOKI 8966)を組み合わせて構成しており、最小で 50ns サンプルングの瞬時波形を計測できる(表 5.4(2)-11、表 5.4(2)-12)。

また、対応する計測ソフトウェアおよび波形表示ソフトウェアを計測用 PC に導入した。これにより、瞬時波形計測用計測器で計測した各種波形データについては、既設の計測用通信ネットワーク(光ファイバ)を介して、計測用 PC による LAN 経由でのデータ計測および波形表示を可能とした。

表 5.4(2)-11 瞬時波形計測器の仕様

型式	HIOKI 社 MR8827
計測チャンネル数	アナログ 32ch(最大)
最高サンプリング速度	20MS/秒
サンプリング周期	50ns(最小)
通信機能	[LAN]100BASE-TX
オプション	プリンタユニット、SSD ユニット、 アナログユニット

表 5.4(2)-12 瞬時波形計測用アナログユニットの仕様

型式	HIOKI 社 8966
チャンネル数	2ch
入力端子	絶縁 BNC 端子
最大入力電圧	DC 400V
周波数特性	DC～5MHz
測定分解能	測定レンジの 1/100
最高サンプリング速度	20MS/秒

1. 5. 4(2)③模擬グリッドでの実施内容

1. 5. 4(2)③1)試験項目・内容

試験項目と試験内容は、先の1. 4. 2(1)性能・信頼性評価法の検討を基に以下試験内容で実施する。詳細の試験内容は付録(2)に記載する。

◎基本性能

○機器起動・停止動作の確認

- ・機器起動動作 正常に起動するか確認する。
- ・機器停止動作: 正常に停止するか確認する。
- ・系統復帰時動作: 正常に復帰するか確認する。
- ・通信不能(集中制御): 通信不能時の機器の動作を確認する。

○機器故障時の動作

- ・軽故障発生時動作: 軽故障を模擬的に発生させた際の動作を確認する。
- ・重故障発生時動作: 重故障を模擬的に発生させた際の動作を確認する。

◎性能評価

○通常運転時の安定性

- ・電圧三相不平衡時: 送出力電圧不平衡時の動作を確認する。
- ・負荷不平衡時 負荷不平衡時の動作を確認する。
- ・高調波発生時 送出力電圧高調波重畳時の動作を確認する。

○配電系統事故時の動作

- ・地絡事故 地絡事故時の動作を確認する。
- ・短絡事故 短絡事故時の動作を確認する。
- ・断線事故 断線事故の動作を確認する。

○事故時運用時の動作

- ・単独運転検出能動信号との協調: 単独運転検出能動信号出力時の動作を確認する。
- ・単独運転時: 単独運転時の動作を確認する。

○ループ切替時の動作

- ・ループイン・ループアウト時: ループイン・ループアウト時の動作を確認する。

○電力系統擾乱時の動作

- ・瞬時電圧低下: 瞬時電圧低下時の動作を確認する。
- ・周波数ステップ変動時: 周波数ステップ変動時の動作を確認する。
- ・周波数ランプ変動時: 周波数ランプ変動時の動作を確認する。

◎電圧制御

○通常運転

- ・LRT タップ動作時: LRT タップ動作時の動作を確認する。
- ・電圧ステップ変化: 電圧ステップ変化時の動作を確認する。
- ・変圧器投入インラッシュ: 変圧器投入インラッシュ時の動作を確認する。

○負荷特性による影響

- ・負荷の投入・開放: 負荷の投入・開放時の動作を確認する。
- ・モータ負荷: モータ負荷運転・停止時の動作を確認する。

○分散型電源の発電特性による影響

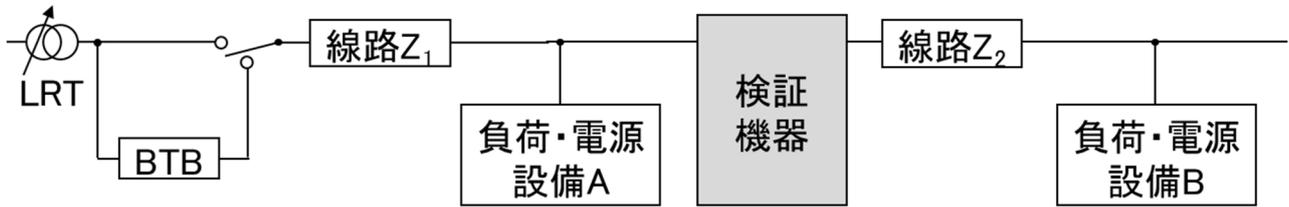
- ・分散型電源の起動・停止: 分散型電源起動・停止時の動作を確認する。

○フリッカへの有効性確認

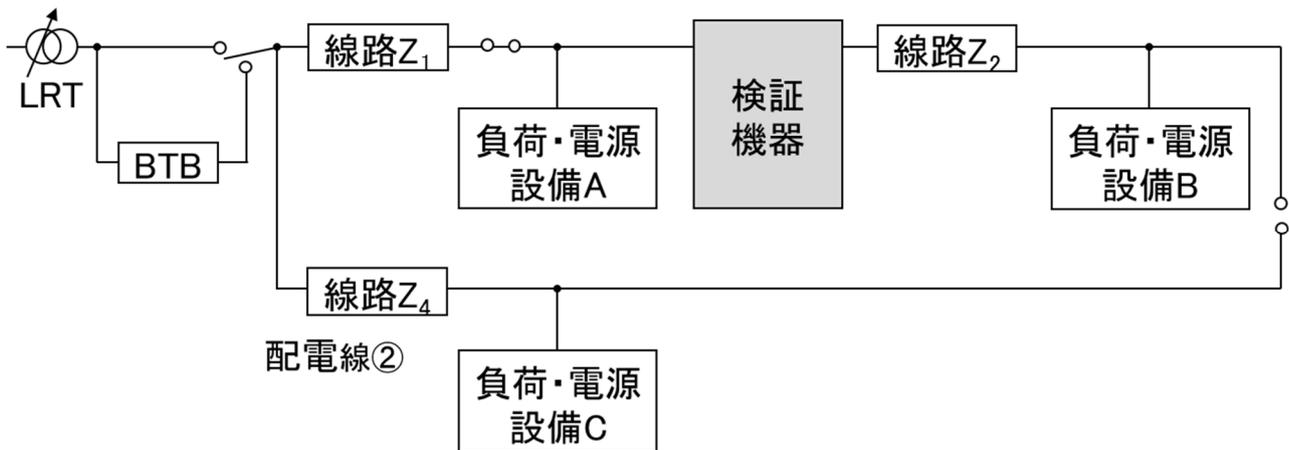
- ・フリッカ発生時: 送り出し電圧がフリッカ時の動作を確認する。

1. 5. 4(2)③2)試験回路

検証機器単体の試験時は図 5.4(2)-18 (a)、検証機器単体のループイン・ループアウト試験時は図 5.4(2)-18 (b)の回路にて実施した。



(a) 単機試験時



(b) ループイン・ループアウト試験時

図 5.4(2)-18 機器検証時の試験回路

1. 5. 4(2)③3) 検証機器

表 5.4(2)-13 に本研究開発にて検証対象とした機器を示す。a-1～4 は研究開発項目①富士電機が本事業で開発した自励式 SVC、b は同社の AVR、c-1～4 は北芝電機・東芝 ESS が開発した次世代 TVR である。また、d-1～2 は配電系統機器メーカー A 社、B 社にて製造され、実システムに導入されている自励式 SVC である。各種機器の仕様の一例を表 5.4(2)-14 から表 5.4(2)-17 に示す。

模擬グリッド試験では、研究開発項目①が開発した自励式 SVC、次世代 TVR と、実システムに導入されている自励式 SVC を対象に試験を実施した。

表 5.4(2)-13 本研究開発で検証した機器の一覧表(再掲)

番号	機種	備考	使用先
a-1	SVC(Si)	試作 1 号機	実験室グリッド試験
a-2	SVC(SiC)	試作 2 号機	模擬グリッド試験
a-3	SVC(SiC)	試作 3 号機	装柱性試験
a-4	SVC(SiC)	試作 4 号機	
b	AVR(Si)	試作 1 号機	実験室グリッド試験
c-1	次世代 TVR(Si)	試作 1 号機	模擬グリッド試験
c-2	次世代 TVR(SiC)	試作 2 号機	模擬グリッド試験・装柱性試験
c-3	次世代 TVR(SiC)	試作 3 号機	模擬グリッド試験
c-4	次世代 TVR(SiC)	試作 4 号機	実グリッド試験
d-1	SVC(Si)	A 社市販 SVC	模擬グリッド試験
d-2	SVC(Si)	B 社市販 SVC	模擬グリッド試験

表 5.4(2)-14 検証機器 a: 研究開発項目①開発 SiC デバイス使用
 自励式 SVC(富士電機製)の仕様の一例
 (本事業原簿より引用)

定格容量	300kVA
定格電圧	6,600V
構成	SVC 用変圧器+3 レベルインバータ
素子	3.3kVSiC-MOS(1in1)12 個 3.3kVSiC-SBD(1in1) 6 個
冷却	自然冷却
寸法と質量	50Hz 試作機 W 1,281mm×D 1120mm×H 2490mm 質量:2,090kg 60Hz 試作機 W 1281mm×D 985mm×H 2318mm 質量:1,790kg
制御機能	<ul style="list-style-type: none"> ・電圧変動抑制 ・不平衡電圧補償 ・FRT アシスト機能
付属機能	<ul style="list-style-type: none"> ・通信機器との接続 (制御定数の受信と設定)
写真	

表 5.4(2)-15 検証機器 c: 研究開発項目①開発 SiC デバイス使用
次世代 TVR(北芝電機・東芝 ESS 製)の仕様の一例
(本事業原簿より引用)

定格容量	3,000kVA	
定格電圧	6,600V	
補償電圧	±300V	
素子	IGBT(2in1)6 個	SiC(1in1)24 個
冷却	自然冷却	
寸法	W1,700 mm D1,400 mm H2,550 mm	W1,595 mm D1,468 mm H2,250 mm
連続電圧補償	可能	
不平衡補償	可能	
力率改善補償	可能	
応答性(補償速度)	即時(100ms 以内)	
切換回数制限	連続補償により、無し	
連続繰返切替間隔制限	連続補償により、無し	
短絡電流	定格電流 25 倍 2 秒	
システム概要	<p>一次側 3相6.6kV 系統 二次側 直列変圧器 次世代TVR(CVC) 並列変圧器 保護回路 変換器 変換器 フィルタ</p>	
写真		

※CVCは北芝電機株式会社の商標です。

表 5.4(2)-16 検証機器 d-1:市販自励式 SVC(A 社)の一例

定格補償容量	300kvar (遅れ, 進み)	
相数	3 相	
定格電圧	6,600V	
定格周波数	50Hz / 60Hz	
応答時間	電圧制御時	50%補償時間 40msec 以内
		80%補償時間 80msec 以内
冷却方式	強制風冷 (リアクトル、インバータ用半導体素子部)	
	油入自冷 (変圧器部分)	
概略重量	2,500kg	
運転方式	電圧制御、力率制御	

表 5.4(2)-17 検証機器 d-2:市販自励式 SVC(B 社)の一例

無効電力発生量	進相 300kvar～遅相 300kvar	
定格電圧、周波数	三相 6,600V、50Hz/60Hz	
電圧調整範囲	6,300V～6,960V	
線路電圧補償精度	±1.0%以内	
応答時間	30ms	
冷却方式	変圧器部:油入自冷式密封型 電力変換部:強制風冷式密閉型	
高周波電流含有率	各次 3.0%以下、総合 5.0%以下	
機能	固定出力、電圧一定制御、力率一定制御、SVR 協定制御	
外形寸法、体積	W1.11m×D1.69m×H2.04m	
質量	2.4t	

1. 5. 4(2)④赤城模擬グリッドでの試験結果

1. 5. 4(2)④1)赤城模擬グリッド試験経過

○検証機器 a: 研究開発項目①開発 SiC デバイス使用自励式 SVC(富士電機製)

a-2: 試作 2 号機に対して模擬グリッド試験を実施した結果、メーカーの設計通りに起動しなかった。このため、試験実施を中止し、メーカーで原因調査、対策検討を実施頂いた。

○検証機器 c: 研究開発項目①開発 SiC デバイス使用次世代 TVR(北芝電機・東芝 ESS 製)

SiC を使用した次世代 TVR の予備試験として、c-1(Si 版次世代 TVR)に対して模擬グリッド試験を実施し、この際に研究開発項目②として要望事項を抽出した。これを踏まえて、研究開発項目①にて SiC 版次世代 TVR を製作し、c-2(SiC 版次世代 TVR 実グリッド導入試作 1 号機)に対して模擬グリッド試験を実施した。この際に、更なる研究開発項目②として要望事項を抽出し、c-3(SiC 版次世代 TVR 実グリッド導入試作 2 号機)に対して模擬グリッド試験を実施した。

○検証機器 d: 市販自励式 SVC

検証機器 a に関して十分な検証が実施出来なかったため、自励式 SVC の配電システムの共通基盤技術を抽出することを目的として、市販されている自励式 SVC d-1、d-2 に対して模擬グリッド試験を実施した。

1. 5. 4(2)④2) 赤城模擬グリッドの試験結果と考察

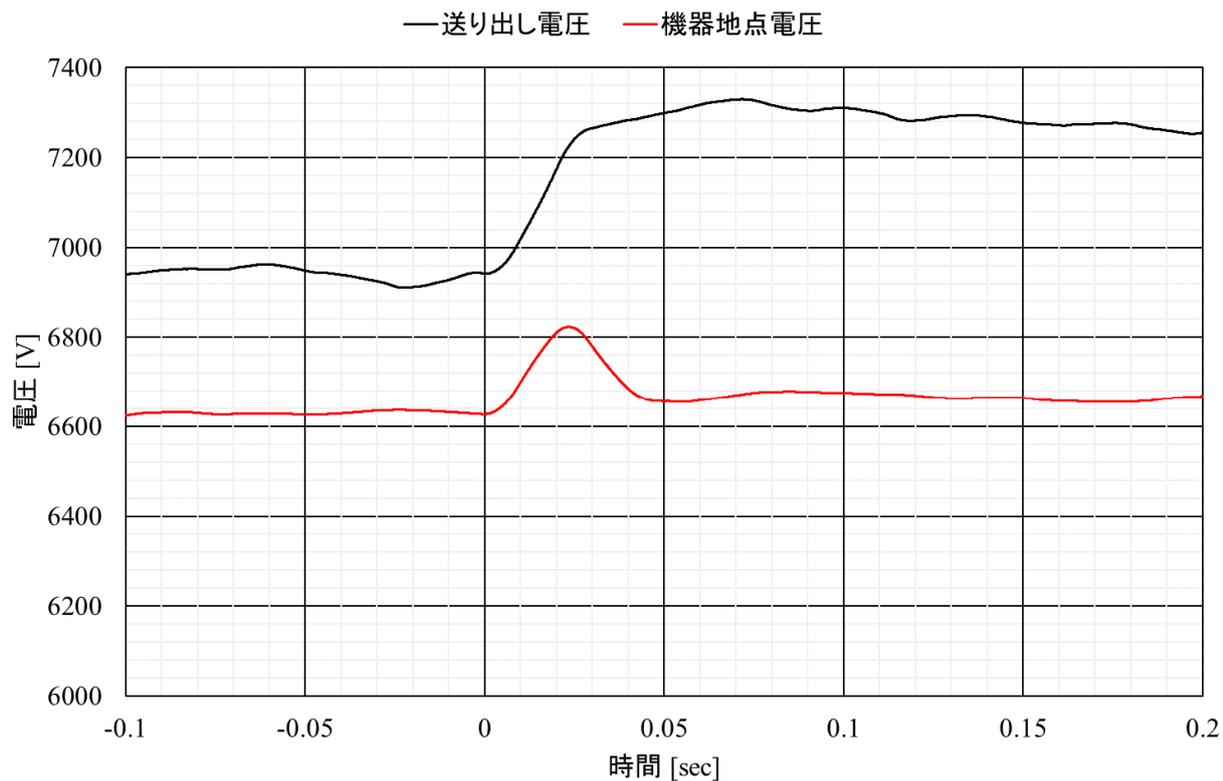
実施した各種試験結果については付録(2)に記載する。ここでは、特徴的な試験結果について抽出して述べる。

○電圧ステップ変化

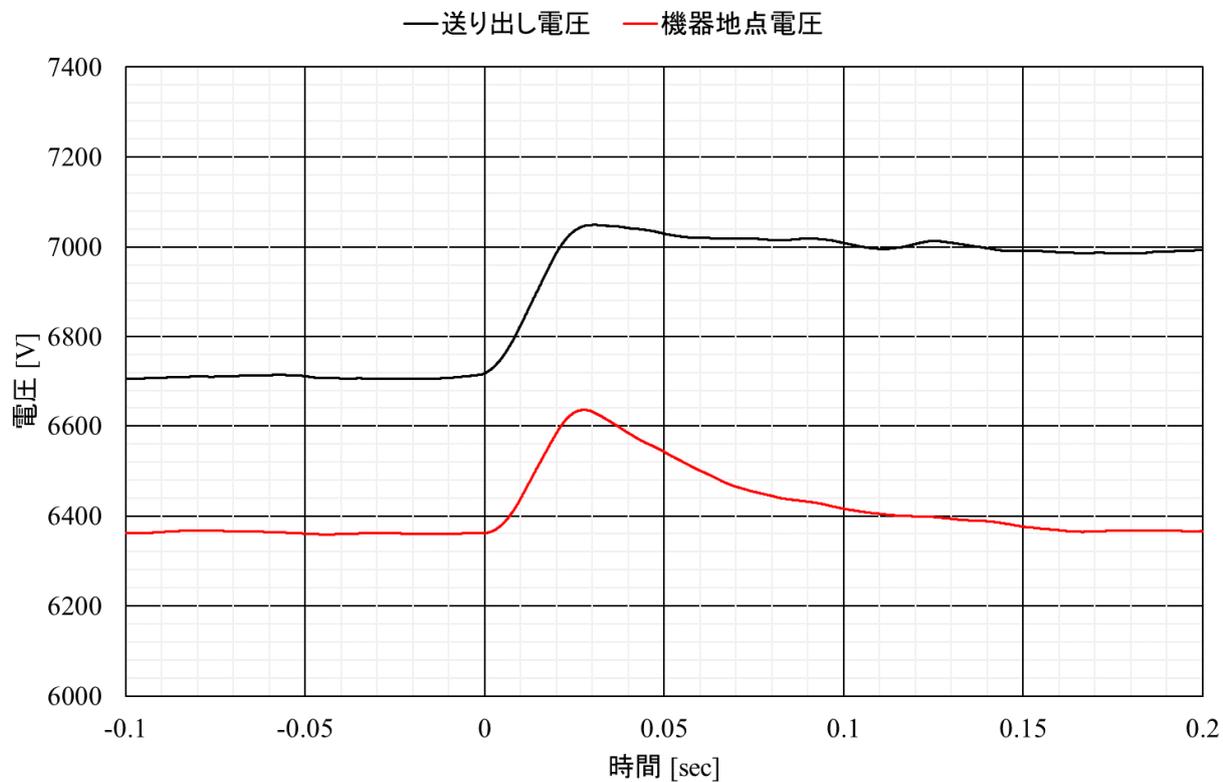
電圧ステップ変化時について図 5.4(2)-19 の手順で検証した結果を、図 5.4(2)-20 に示す。検証機器 d-1 は電圧ステップ変化後 100msec 程、機器 c-2、d-2 は 50msec 程で制御が収束している。一方で、d-2 は途中でオーバーシュートしていることが確認できる。この場合、機器 d-2 は他の機器と比較して制御が不安定化しやすい状況であり、系統構成の変更による線路インピーダンスの変化等をきっかけに制御が不安定化する可能性がある。

対象	大項目	中項目	小項目
単機	電圧制御	通常運転時の安定性	電圧ステップ変化
試験回路			
試験手順	<ol style="list-style-type: none"> ①配電線に6kV電圧を印加 ②検証機器の制御電源投入 ③検証機器を起動 ④電圧ステップ変化(上げ300V) ⑤動作の確認 ⑥電圧ステップ変化(下げ300V) ⑦動作の確認 		
試験パラメータ	<p style="text-align: right;">Z=5Ωとは、R=5Ω、X=5Ωとする</p> $ \begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 \\ 3\Omega & 0\Omega \\ 5\Omega & 0\Omega \\ 5\Omega & 5\Omega \\ 10\Omega & 0\Omega \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{負荷B} \\ R280kW \\ R280kW+L100kvar \\ R280kW+C100kvar \\ R560kW \\ R560kW+L200kvar \\ R560kW+C200kvar \end{pmatrix} $		

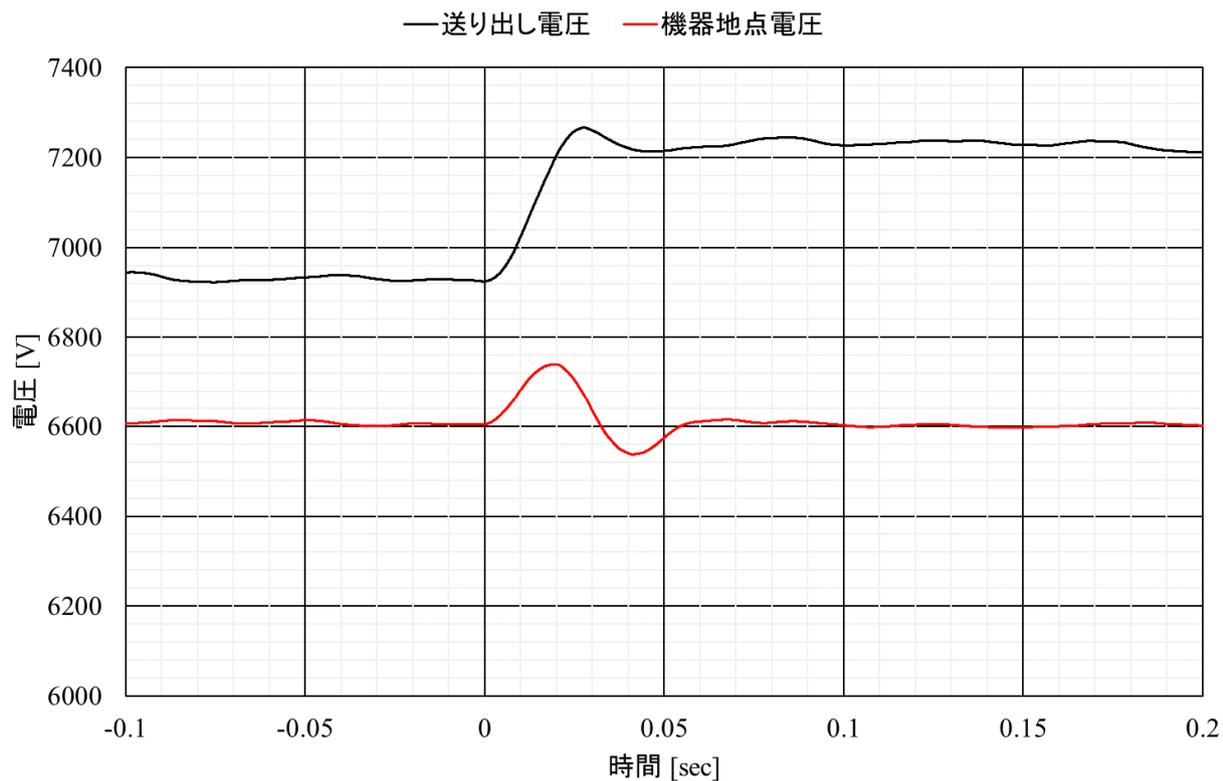
図 5.4(2)-19 試験手順(電圧ステップ変化)



(a) 検証機器 c-2 (制御目標電圧 6600V)



(b) 検証機器 d-1 (制御目標電圧 6300V)



(c) 検証機器 d-2 (制御目標電圧 6600V)

図 5.4(2)-20 電圧ステップ変化時の送り出し電圧と機器設置地点電圧
 (線路 Z1:5Ω、負荷 B:R280kW、L100kav、電圧不平衡条件:不平衡率 3%、S 相電圧低下)

○電圧三相不平衡時

図 5.4(2)-21 の試験手順で検証を行なった際の、送出し電圧の 3 つの相電圧の平均値が一定で、電圧不平衡率のみが 3%となるように急変させた場合の結果を図 5.4(2)-22、1 相電圧低下により電圧不平衡率が 3%となるように急変させた場合の結果を図 5.4(2)-23 に示す。本図では機器設置地点での線間電圧、電圧不平衡率を示している。変電所送り出し地点にて、0 秒から電圧不平衡率が 3%となるように各相の電圧を急変させている。

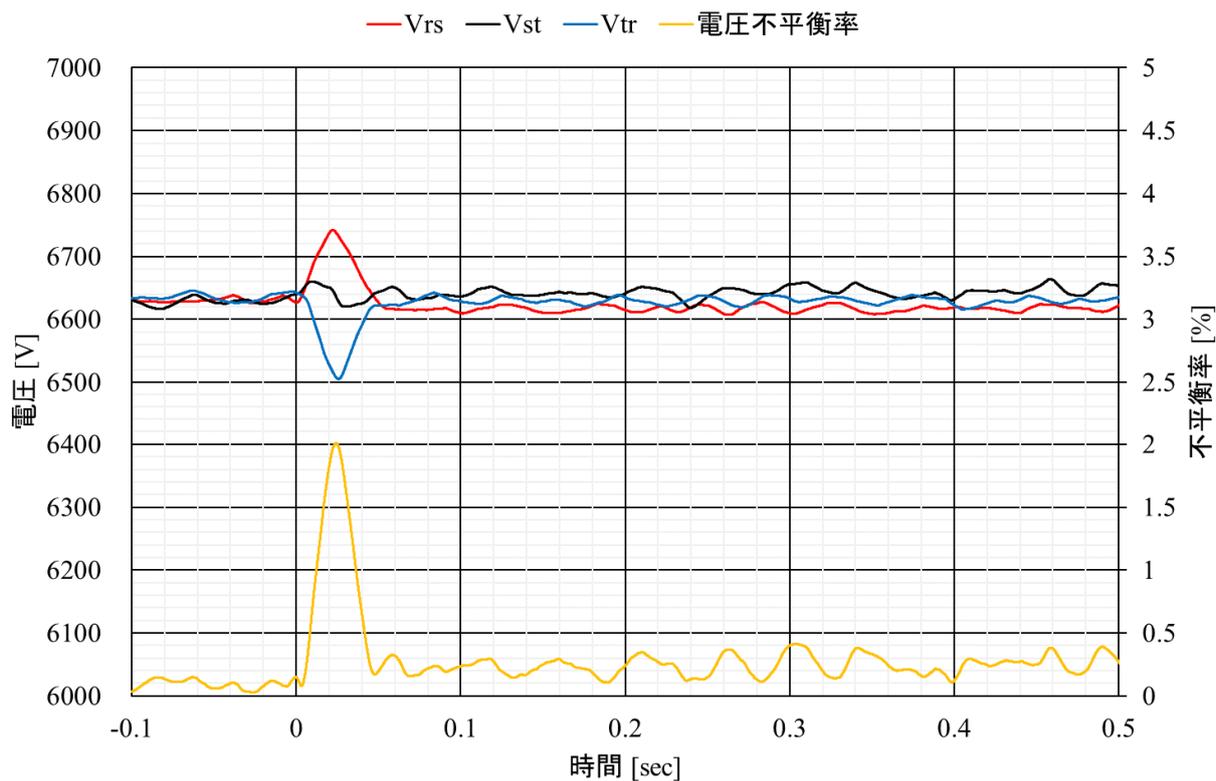
図 5.4(2)-22 より、3 つの相電圧の実効値の平均値が一定で電圧不平衡が発生した場合、検証機器 d-1、d-2 は電圧不平衡時でも運転継続していたことを確認した。また、検証機器 c-2 は電圧不平衡が発生してから不平衡が改善するように動作していることが確認できる。

一方図 5.4(2)-23 より、3 つの相電圧の平均値が変化するような電圧不平衡が発生する場合は、検証機器 c-2 でも電圧不平衡率があまり改善はなく、平均電圧が低下した分、全体として電圧が上げられていることが見られる。

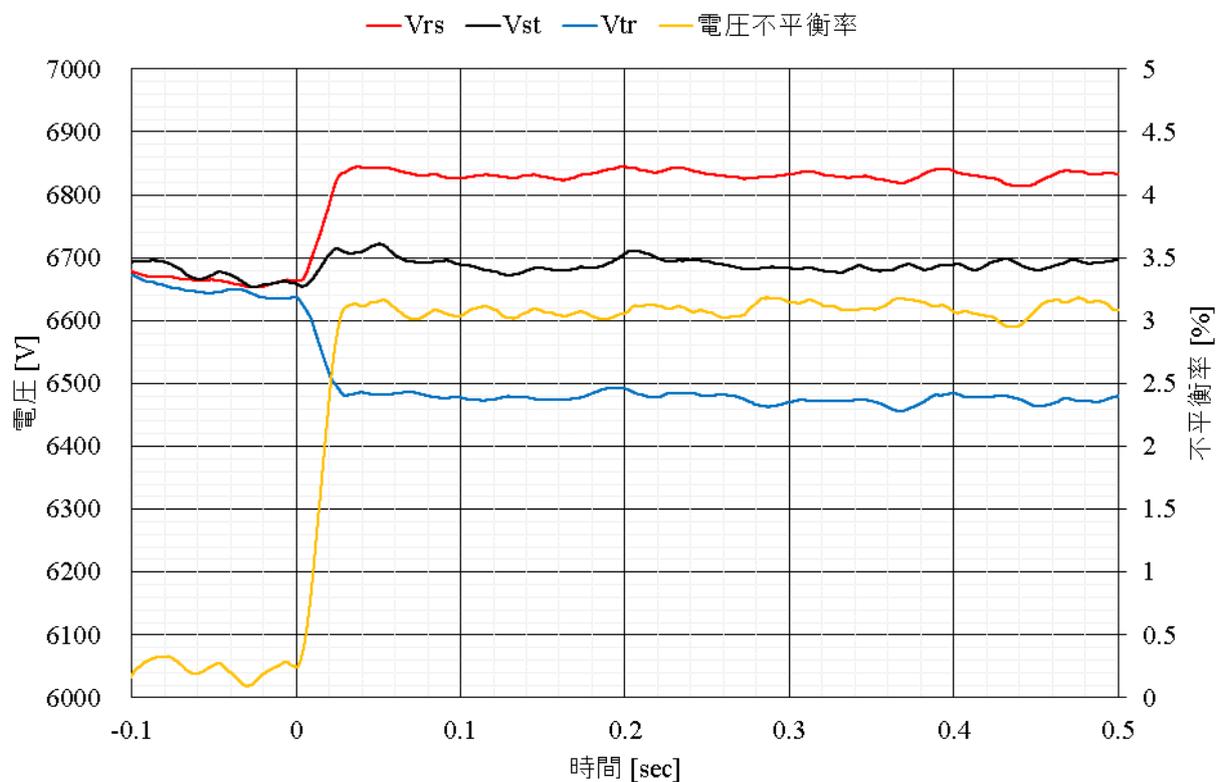
なお今回の試験では、定常の電圧変動の適正化に寄与する通常の制御モードにて検証を行なっているため、不平衡対策に特化した制御モードであれば、不平衡を改善できる可能性がある。

対象	大項目	中項目	小項目
単機	性能評価	通常運転時の安定性	電圧三相不平衡時
試験回路			
試験手順		試験パラメータ	
<ol style="list-style-type: none"> ①配電線に6kV電圧を印加 ②検証機器の制御電源投入 ③検証機器を起動 ④三相平衡⇒三相不平衡 ⑤動作の確認 ⑥三相不平衡⇒三相平衡 ⑦動作の確認 		$Z=5\Omega$ とは、 $R=5\Omega$ 、 $X=5\Omega$ とする $\begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 \\ 5\Omega & 0\Omega \\ 10\Omega & 0\Omega \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{負荷B} \\ R280kW+L100kvar \\ R280kW+C100kvar \\ R560kW+L200kvar \\ R560kW+C200kvar \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{電圧不平衡率:3\%} \\ \cdot \text{平均電圧一定} \\ \cdot \text{1相低下} \\ \cdot \text{2相低下} \end{pmatrix}$	

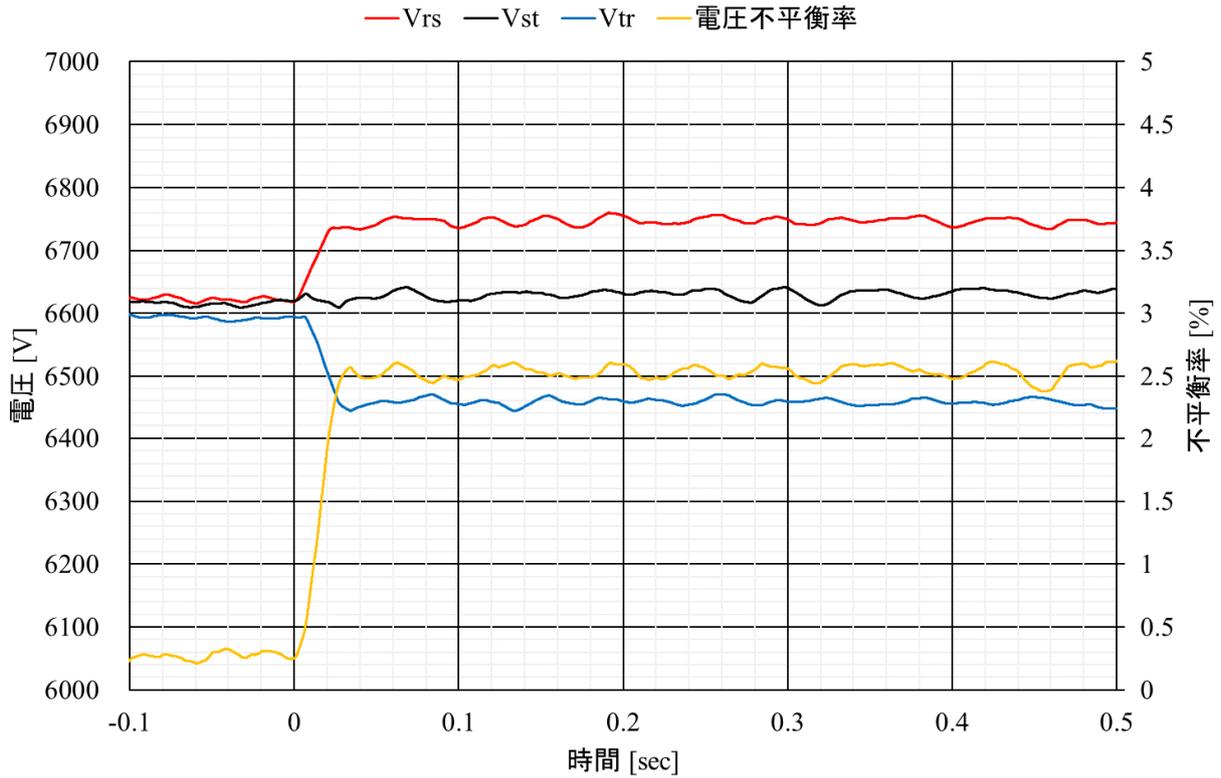
図 5.4(2)-21 試験手順(電圧三相不平衡時)



(a) 検証機器 c-2 (制御目標電圧 6600V)



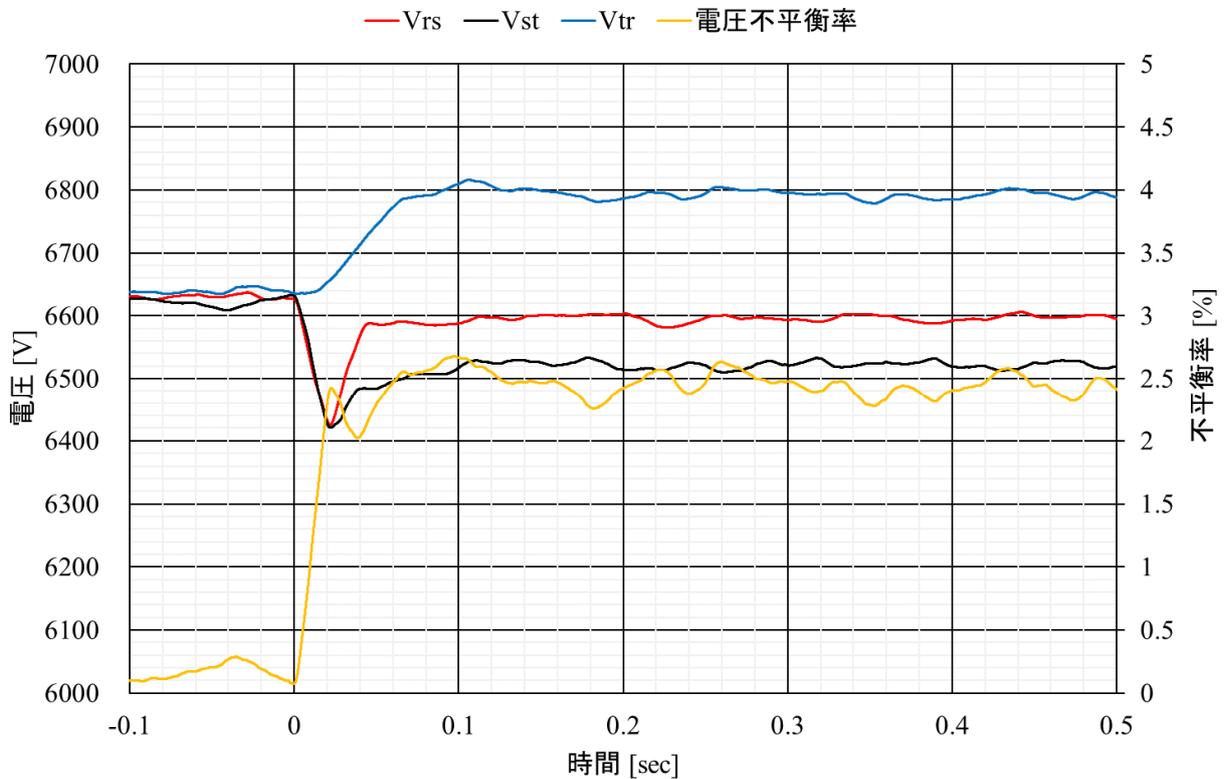
(b) 検証機器 d-1 (制御目標電圧 6600V)



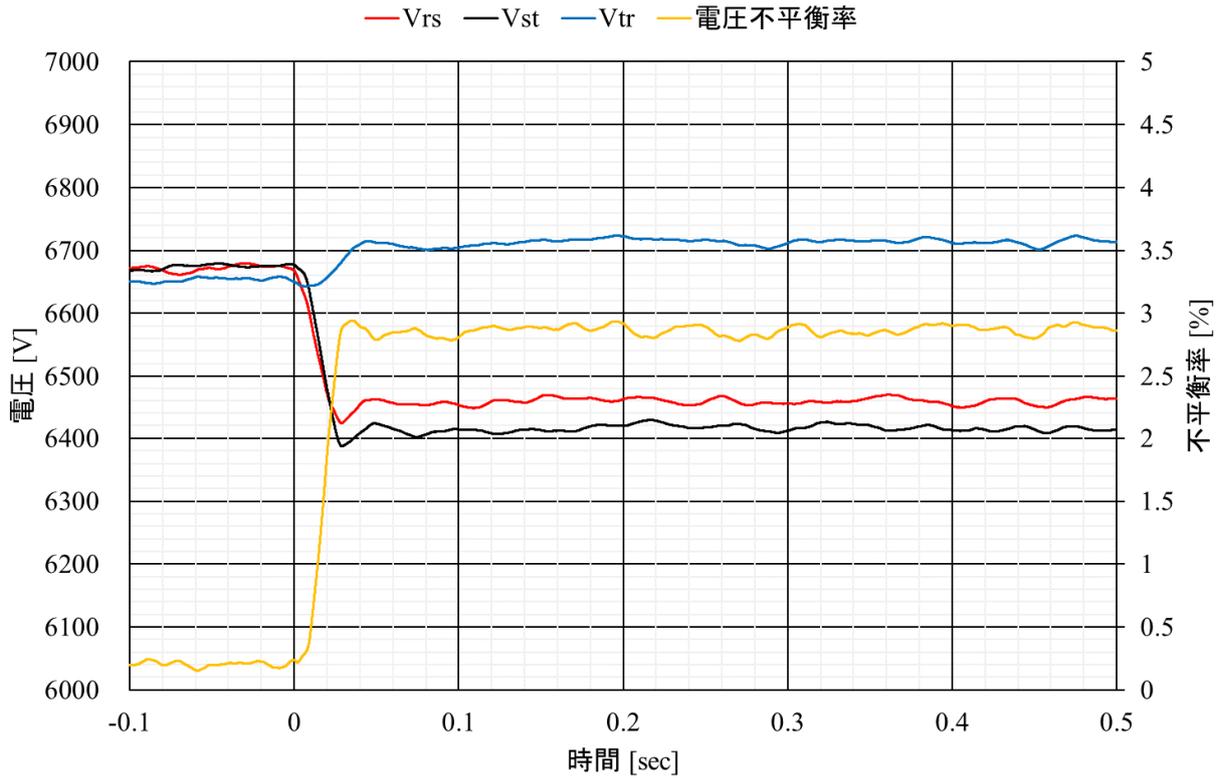
(c) 検証機器 d-2 (制御目標電圧 6600V)

図 5.4(2)-22 電圧不平衡時の機器地点の各相電圧

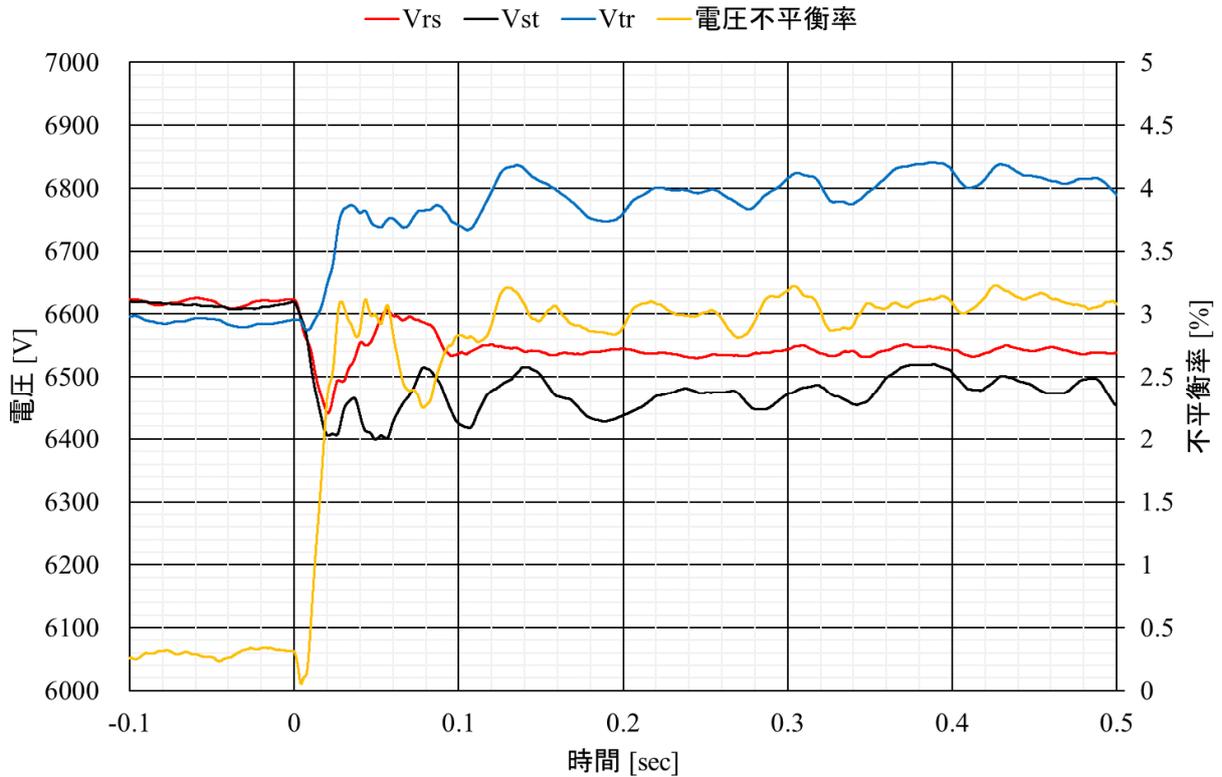
(線路 Z1:5Ω、負荷 B:R280kW、L100kav、電圧不平衡条件:不平衡率 3%、平均電圧一定)



(a) 検証機器 c-2 (制御目標電圧 6600V)



(b) 検証機器 d-1 (制御目標電圧 6600V)



(c) 検証機器 d-2 (制御目標電圧 6600V)

図 5.4(2)-23 電圧不平衡時の機器地点の各相電圧

(線路 Z:5Ω、負荷 B:R280kW、L100kav、電圧不平衡条件:不平衡率 3%、S 相電圧低下)

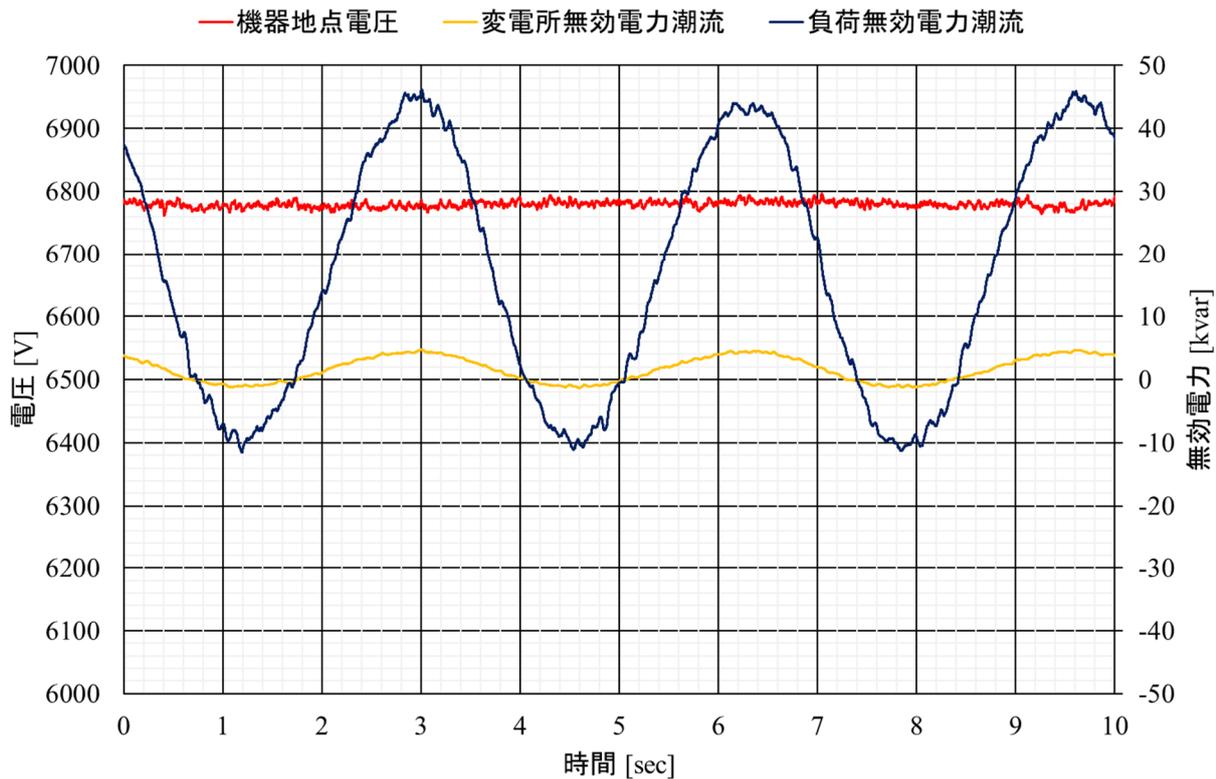
○単独運転検出能動信号との協調

単独運転検出能動信号との協調について図 5.4(2)-24 の手順で検証した結果、今回検証した全ての機器においては図 5.4(2)-25 (a)、(b)、(c)の通り、回転型電源から出力していた正弦波状の無効電力変動方式の単独運転検出能動信号に対して、検証機器が信号を打ち消し、変電所での無効電力潮流がほぼ変動がない状態となった。この信号が打ち消された場合、電圧、電流、周波数の変動が小さくなるため、分散電源での単独運転検出が長時間化する恐れがある。

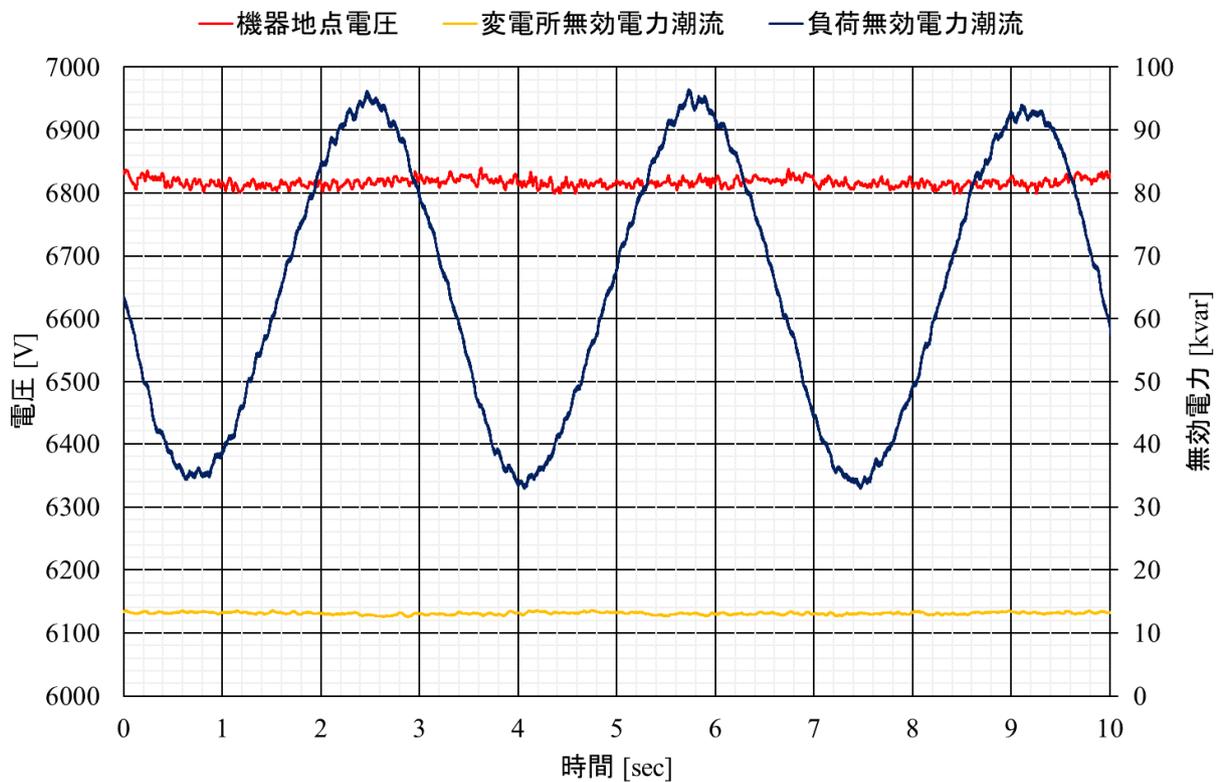
これを受けて、検証機器 c-2 では当該信号を打ち消すことがないように、機器改良として単独運転検出非干渉モードを具備させ、図 5.4(2)-25(d)の通り、改良を確認した。

対象	大項目	中項目	小項目			
単機	性能評価	事故発生運用時	単独運転検出との協調			
試験回路						
試験手順	<ol style="list-style-type: none"> ①配電線に6kV電圧を印加 ②検証機器の制御電源投入 ③検証機器を起動 ④分散型電源の起動 ⑤単独運転検出信号の出力 ⑥動作の確認 					
試験パラメータ	<p>Z=5Ωとは、R=5Ω、X=5Ωとする</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="border: none;"> $\left[\begin{array}{ccc} Z_1 & Z_2 & \text{負荷B} \\ 5\Omega & 0\Omega & R280kW+L100kvar \end{array} \right]$ </td> <td style="border: none; text-align: center; vertical-align: middle;"> \times </td> <td style="border: none;"> $\left[\begin{array}{c} \text{電源B} \\ \text{IN70kW(新型能動方式)} \\ \text{SG150kW(無効電力変動方式)} \end{array} \right]$ </td> </tr> </table>			$\left[\begin{array}{ccc} Z_1 & Z_2 & \text{負荷B} \\ 5\Omega & 0\Omega & R280kW+L100kvar \end{array} \right]$	\times	$\left[\begin{array}{c} \text{電源B} \\ \text{IN70kW(新型能動方式)} \\ \text{SG150kW(無効電力変動方式)} \end{array} \right]$
$\left[\begin{array}{ccc} Z_1 & Z_2 & \text{負荷B} \\ 5\Omega & 0\Omega & R280kW+L100kvar \end{array} \right]$	\times	$\left[\begin{array}{c} \text{電源B} \\ \text{IN70kW(新型能動方式)} \\ \text{SG150kW(無効電力変動方式)} \end{array} \right]$				

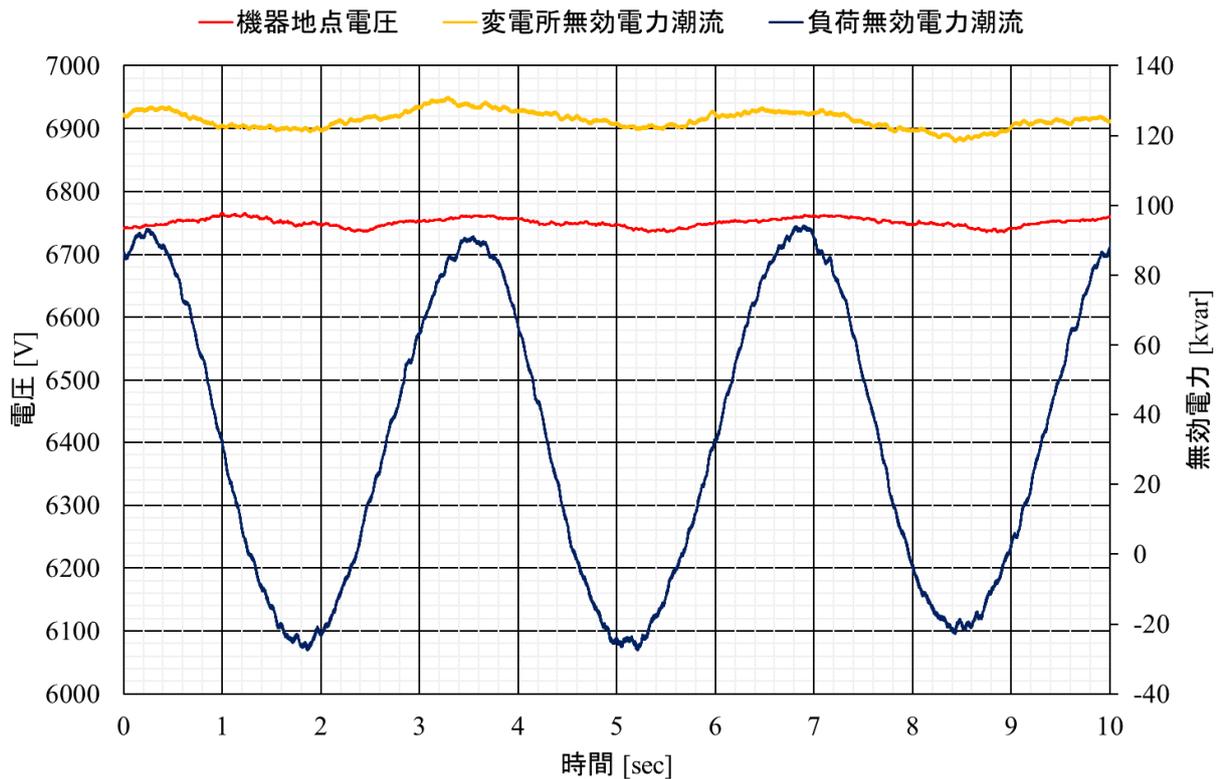
図 5.4(2)-24 試験手順(単独運転検出との協調)



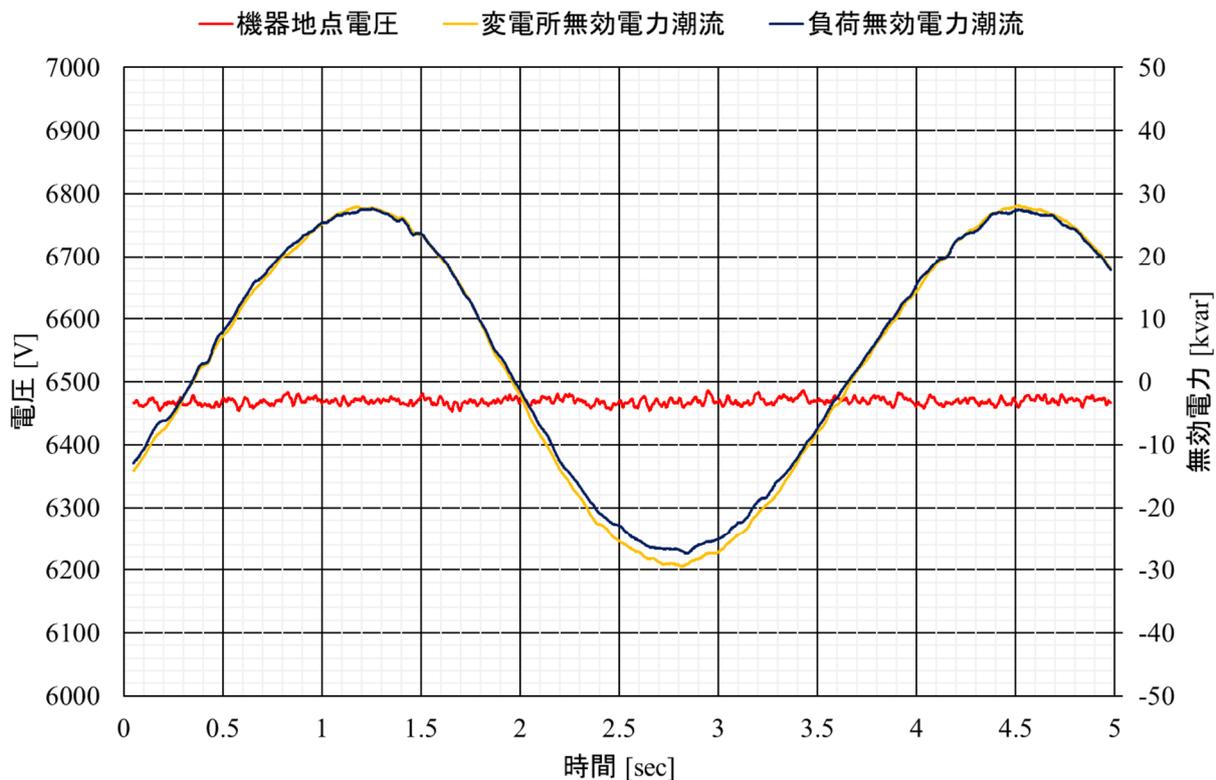
(a) 検証機器 c-2(制御目標電圧 6800V)



(b) 検証機器 d-1(制御目標電圧 6800V)



(c) 検証機器 d-2(制御目標電圧 6800V)



(d) 検証機器 c-1 (制御目標電圧 6500V、単独運転検出非干渉モード)

図 5.4(2)-25 単独運転検出能動信号注入時の機器地点電圧と無効電力潮流
(線路 Z:5Ω、負荷 B:回転型電源 150kW、無効電力変動方式、0.3Hz、10%)

○単独運転時

単独運転時について図 5.4(2)-26 の手順で検証した結果、新型能動方式を具備したインバータ型電源による単独運転時は表 5.4(2)-18 の通り、検証機器の有無に関わらず単独運転時間がほぼ同じで、検証機器による悪影響はなかった。

回転型電源についても、無効電力変動方式の単独運転検出能動信号を無効化したときは、検証機器の有無に関わらず単独運転時間が長時間化しなかった。

無効電力変動方式の単独運転検出能動信号を有効化したときは、検証機器 c-2、3、d-1 を運転させた場合、検証機器を停止した場合と比較して単独運転検出が長時間化した。これは、前試験項目での単独運転検出能動信号の打ち消しによるものだと考えられる。なお系統連系規程では、この条件において単独運転検出時限は 3 秒程度と例示されている。

一方、d-2 を動作させた場合、c-2 に改良として具備された単独運転検出非干渉モードにて動作させた場合は、単独運転時間が顕著に長時間化せず、例示された時間内に単独運転検出が可能であった。

対象	大項目	中項目	小項目
単機	性能評価	事故発生運用時	単独運転時
試験回路			
<p>送り出し部で潮流0(有効潮流=0、無効潮流=0)に調整し、遮断器を開放して、単独運転を発生。</p>			
試験手順		試験パラメータ	
<ol style="list-style-type: none"> ①配電線に6kV電圧を印加 ②検証機器の制御電源投入 ③検証機器を起動 ④分散型電源投入 ⑤負荷投入・調整 (変電所送り出し潮流P=0, Q=0) ⑥変電所遮断器の開放 ⑦動作の確認 		<p>Z=5Ωとは、R=5Ω、X=5Ωとする。 IN: インバータ, SG: 同期発電機</p> <p> $\begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 \\ 5\Omega & 0\Omega \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{電源B} \\ \text{IN70kW(新型能動方式)} \\ \text{SG150kW(無効電力変動方式)} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{負荷B} \\ \text{送り出し部で潮流0} \\ \text{(有効潮流=0、無効潮流=0)} \\ \text{になるようR負荷、C負荷を投入} \end{pmatrix}$ </p> <p> $\times \begin{pmatrix} \text{検証機器の有無} \\ \text{無しの場合} \\ \text{有りの場合} \end{pmatrix} \times 1 \text{ケースにつき3回程実施}$ </p>	

図 5.4(2)-26 試験手順(単独運転時)

表 5.4(2)-18 各試験条件における単独運転検出時間

	機器停止時	機器 c-2、3	機器 d-1	機器 d-2
インバータ電源 (新型能動方式)	0.097 秒	0.106 秒	0.141 秒	0.100 秒
回転型電源 (能動信号なし)	5.887 秒	3.568 秒	4.687 秒	3.106 秒
回転型電源 (無効電力変動方式)	1.403 秒	3.575 秒 (2.031 秒※)	3.680 秒	1.955 秒

※ 改良として具備された単独運転検出非干渉モードにて実施。

○瞬時電圧低下時

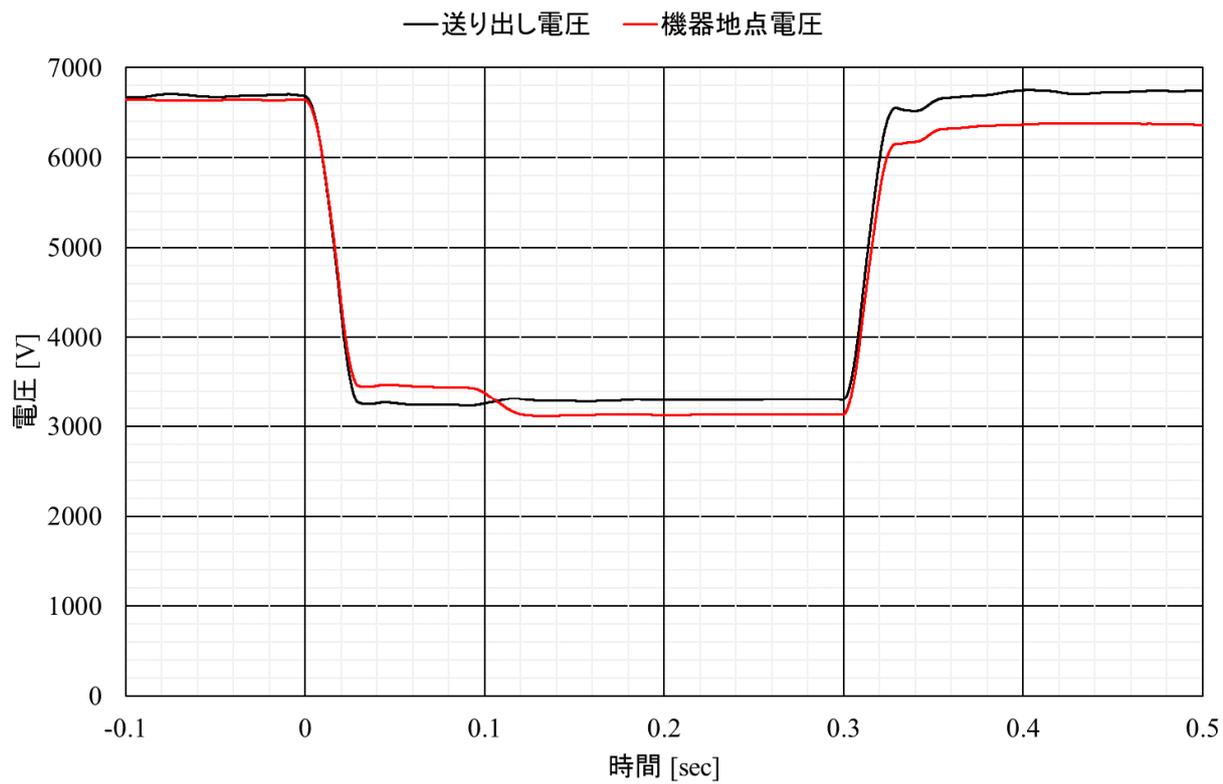
単独運転時について図 5.4(2)-27 の手順で検証した結果、瞬時電圧低下時の残電圧が 50%で継続時間が 0.3 秒、もしくは 0.1 秒の条件において、今回検証した全ての機器が一時停止した。瞬時電圧低下時の送り出し電圧、機器設置地点電圧を図 5.4(2)-28 に示す。

機器 c-2 は、電圧低下後、0.1 秒付近まで機器設置地点電圧が押し上げられていることが確認できるが、その後、機器設置地点電圧がさらに低下している。機器 d-1 も電圧低下後、0.05 秒付近までは機器設置地点電圧が送り出し電圧と同じとなる程度に上昇しているが、電圧復帰直前の 0.1 秒付近で機器設置地点電圧がさらに低下している。

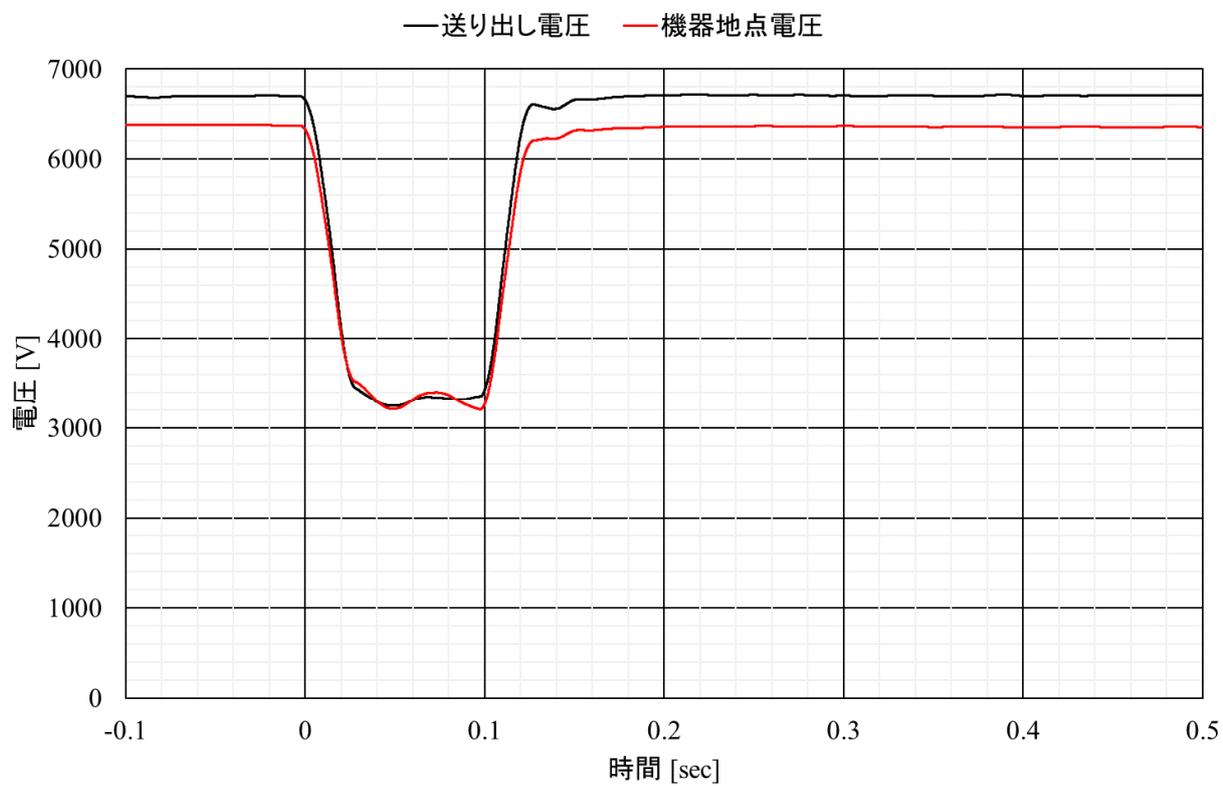
なお、高圧配電線、低圧配電線に連系する PV 等は、この瞬時電圧低下の条件においては運転継続が求められている。

対象	大項目	中項目	小項目
単機	性能評価	電圧系統擾乱時の動作	瞬時電圧低下
試験回路			
$\begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 \\ 5\Omega & 0\Omega \\ 10\Omega & 0\Omega \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{負荷B} \\ R280kW+L100kvar \\ R280kW+C100kvar \\ R560kW+L200kvar \\ R560kW+C200kvar \end{pmatrix}$			
試験手順		試験パラメータ	
<ol style="list-style-type: none"> ①配電線に6kV電圧を印加 ②検証機器の制御電源投入 ③検証機器を起動 ④瞬時電圧低下発生 ⑤動作の確認 		$Z=5\Omega$ とは、 $R=5\Omega$ 、 $X=5\Omega$ とする $\begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 & \text{負荷B} \\ 5\Omega & 0\Omega & R280kW+L100kvar \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{瞬低時} \\ \text{残電圧} \\ 50\% \\ 20\% \\ 0\% \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{瞬低時} \\ \text{継続時間} \\ 300msec \\ 1sec \end{pmatrix}$	

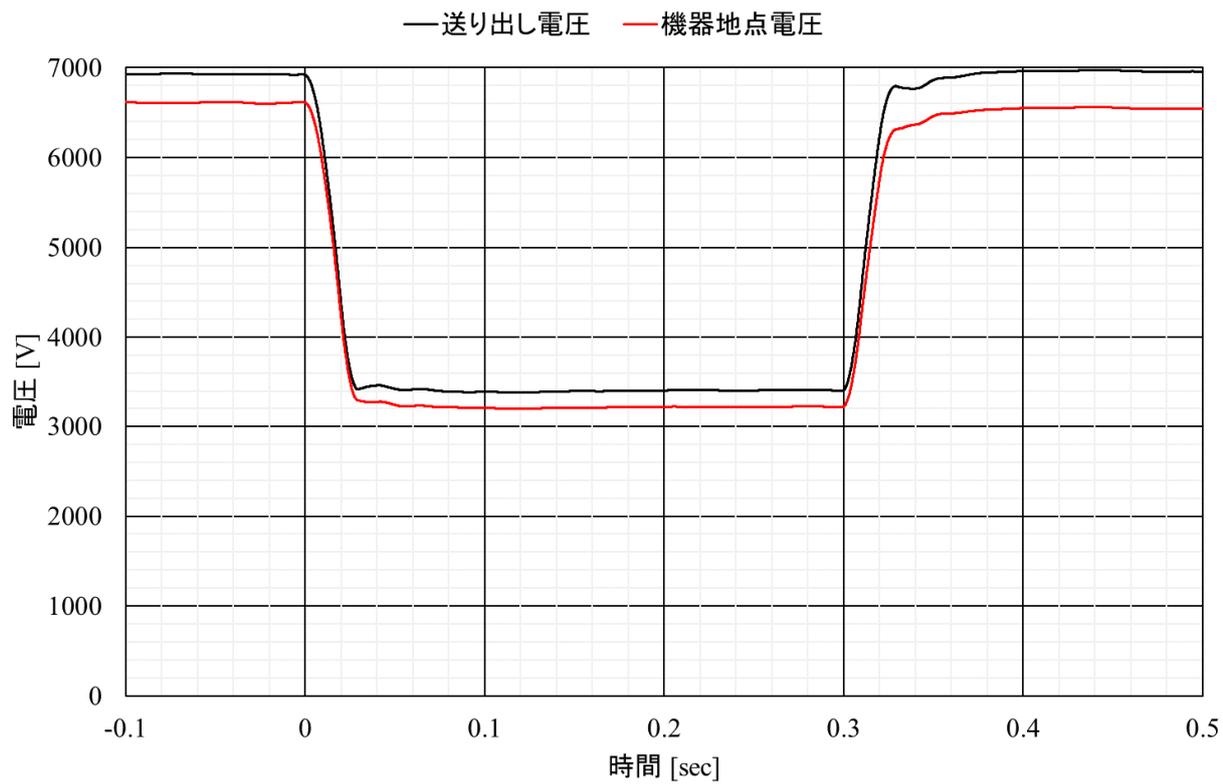
図 5.4(2)-27 試験手順(瞬時電圧低下時)



(a) 検証機器 c-2 (制御目標電圧 6600V)



(b) 検証機器 d-1 (制御目標電圧 6300V)



(c) 検証機器 d-2 (制御目標電圧 6600V)

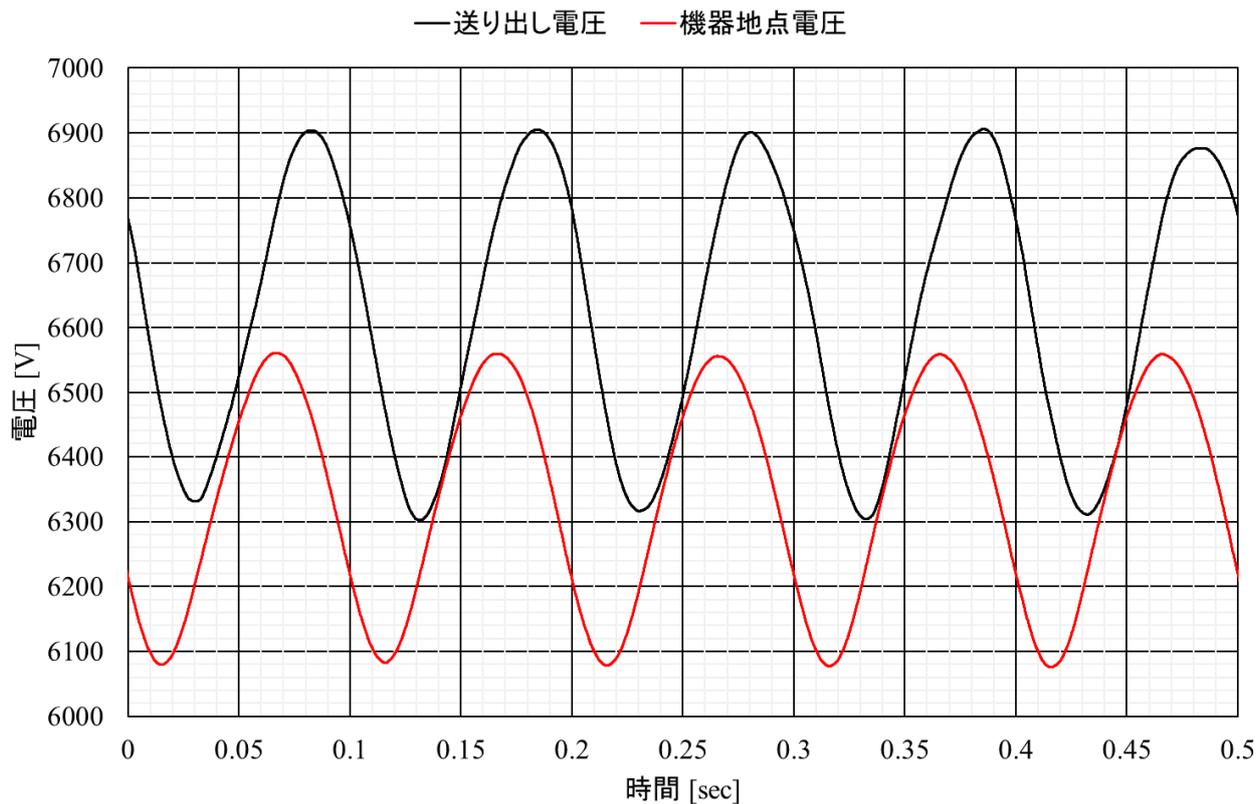
図 5.4(2)-28 瞬時電圧低下時の送り出し電圧と機器地点電圧
(線路 Z:5Ω、負荷 B:回転型電源 150kW、無効電力変動方式、0.3Hz、10%)

○電圧フリッカ時

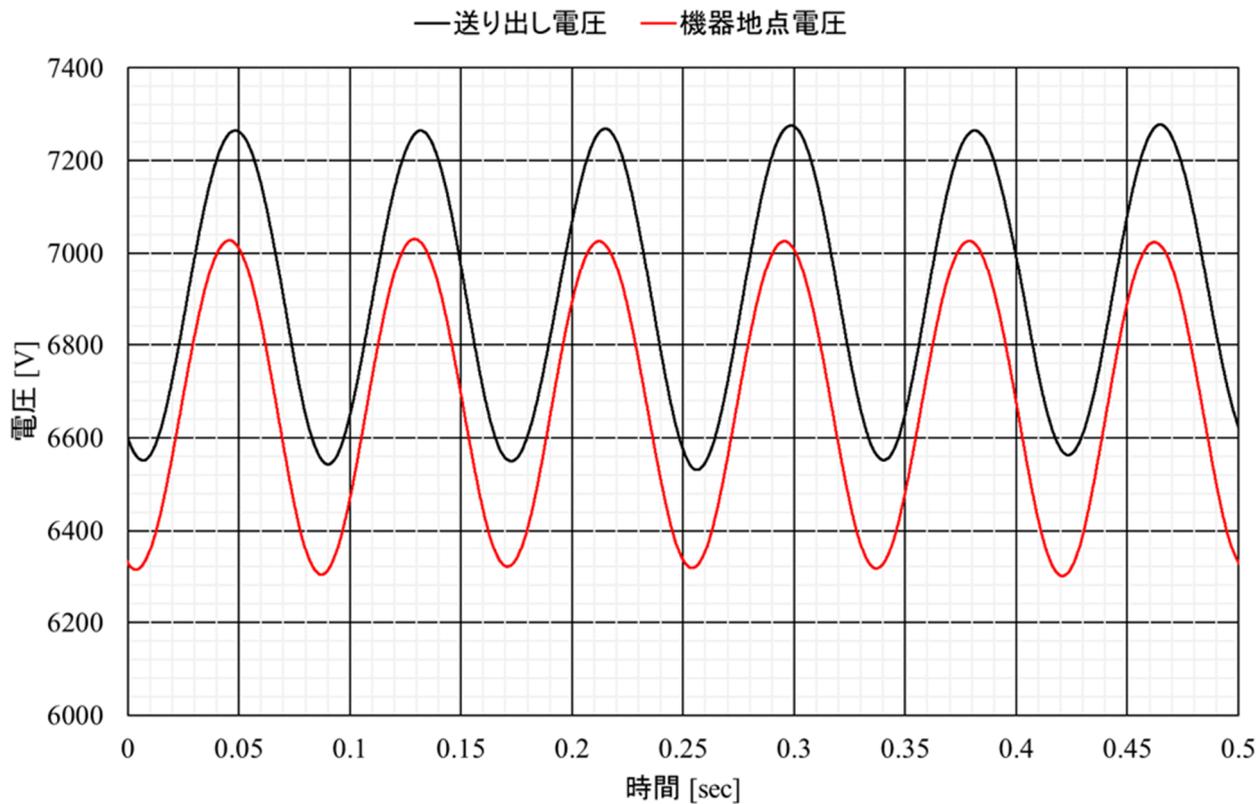
図 5.4(2)-29 の試験手順で検証を行なった際の、電圧フリッカ発生時の送り出し電圧と機器地点電圧を図 5.4(2)-30 に示す。機器 d-1 では、機器地点電圧が目標値の 6600V 付近に推移していたが、電圧変動幅は送り出し電圧と同じであった。一方で機器 d-2 は、機器設置地点電圧が 6600V 付近で推移しており、電圧変動幅も送り出し電圧変動に対して半分程に抑制されていた。c-2 については、通常の制御モードでは検証機器 d-1 と同様の結果であったが、図 5.4(2)-31 に示す電圧フリッカ抑制に特化した制御モードであれば、変動周期 6Hz の電圧フリッカを抑制可能であった。

対象	大項目	中項目	小項目
単機	性能評価	電圧系統擾乱時の動作	フリッカ(送出し電圧)
試験回路			
試験手順		試験パラメータ	
<ol style="list-style-type: none"> ①配電線に6kV電圧を印加 ②検証機器の制御電源投入 ③検証機器を起動 ④電圧変動(フリッカ)発生 ⑤動作の確認 		$Z=5\Omega$ とは、 $R=5\Omega$ 、 $X=5\Omega$ とする $\left[\begin{array}{ccc} Z_1 & Z_2 & \text{負荷B} \\ 5\Omega & 0\Omega & R280kW+L100kvar \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{変動周期} \\ \cdot 10\text{Hz} \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{変動幅} \\ \cdot 60\text{V} \\ \cdot 120\text{V} \\ \cdot 300\text{V} \\ \cdot 600\text{V} \end{array} \right]$	

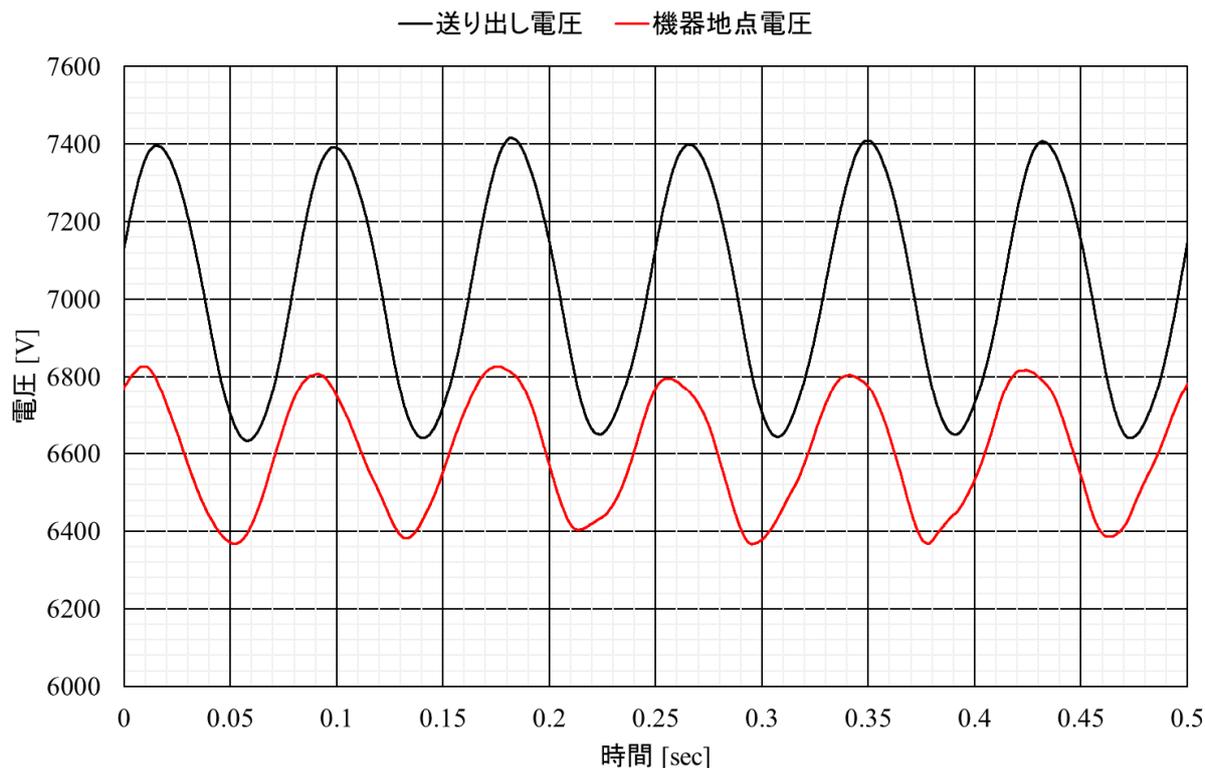
図 5.4(2)-29 試験手順(フリッカ)



(a) 機器 c-3 (制御目標電圧 6300V)



(b) 機器 d-1 (制御目標電圧 6600V)



(c) 機器 d-2 (制御目標電圧 6600V)

図 5.4(2)-30 フリッカ時の送り出し電圧と機器地点電圧
(線路 Z:5Ω、負荷 B:R280kW、L100kvar、送り出し電圧変動:10Hz、300V)

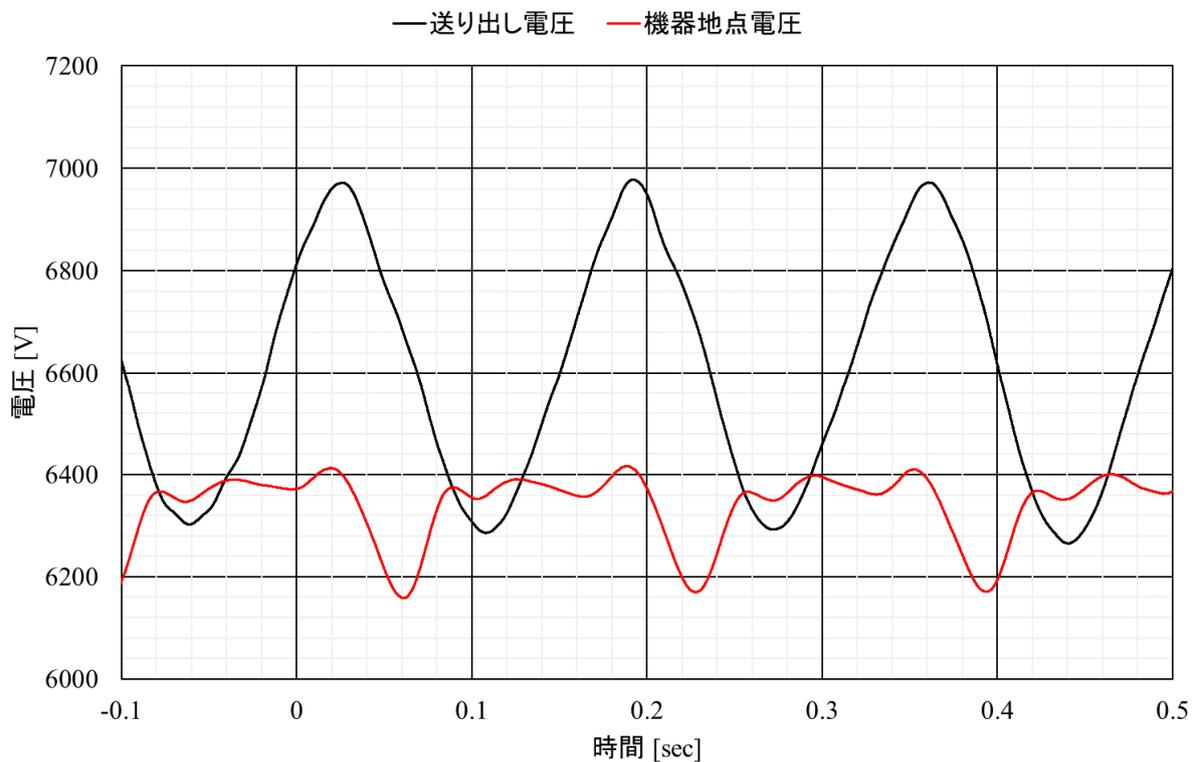


図 5.4(2)-31 フリッカ時の送り出し電圧と機器地点電圧

機器 c-3 (制御目標電圧 6300V、フリッカ抑制モード)
(線路 Z:5Ω、負荷 B:R280kW、L100kvar、送り出し電圧変動:6Hz、300V)

○機器の安定運転性

試験開始時の動作確認として、線路インピーダンス等を変化させた際の実出力確認を実施した。その結果、ある条件において高調波電圧、電流が発生する場合があった。また、電圧制御が一定値に収束せず、不安定となる場合もあった。配電系統では、系統切り替えを伴う運用や近隣の需要家の移動等により、線路インピーダンス等が大きく変化する可能性がある。このため、機器を使用する際は想定される条件において安定して運転できることを確認する必要がある。

1. 5. 4(2)⑤ 模擬グリッドでの検証結果のまとめ

○機器の安定運転性

配電系統は、系統切り替えを伴う運用や近隣の需要家の移動等により、インピーダンスが大きく変化する場合がある。したがって、特定の設置位置のインピーダンスにフィルタ設計や制御応答を合わせる設計は適切ではない。最も理想的なのは、配電系統のどこに設置しても問題なく、ある程度の電圧制御特性が得られることである。しかしながら、これまでメーカーは、電力会社より設置位置の条件を指定され、その条件に合わせた設計を実施し、かつ、設置した後、問題があれば再度調整することで導入してきた。このため、模擬グリッド試験のように、配電系統のインピーダンスを変化させる場合の設計方法が分からないまま機器を製造してしまい、想定外の問題が発生することになった。

○単独運転との協調

将来的には、定常的な電圧変動、過渡的な電圧変動、および電圧フリッカなどに有効に動作すると同時に、トレードオフの関係にある単独運転検出への影響を最小限にする方式の開発が必要である。

○瞬時電圧低下時の運転

低圧系統に連系される住宅用の PV 等では、近年、事故時運転継続(FRT)機能が具備されたため、瞬時電圧低下時には大部分が解列しないが、FRT 機能が具備される以前の PV も少なくない。このため、電圧制御機器が瞬時電圧低下時に停止せずに無効電力を出力し、少しでも電圧を高めに維持することができれば、住宅用の PV の解列数を低減できる可能性がある。

○電圧不平衡補償機能

定常時の変動に対する電圧制御と併用した場合、電圧不平衡補償は先の制御量に応じて不平衡補償可能な制御量が変わるため、状況によっては不平衡改善出来ない可能性もある。このため、電圧不平衡補償を主目的として機器を導入する際は、これらに留意する必要がある。

○フリッカ補償機能

PV 用 PCS を起因とする電圧フリッカは約 6~7Hz であり、通常の接続された箇所の電圧からフリッカを検出し、それにフィードバック制御を適用しても、電圧フリッカに追従できず、かえって、電圧フリッカを増大させてしまう可能性もある。やこのため、配電線の幹線にセンサを設置し、フリッカ発生時のみ、通過する無効電力を打ち消すように無効電力注入することで、追従性を上げることが必要となる。

1. 5. 4(3)装柱性・メンテナンス性評価

1. 5. 4(3)①単柱設置の場合の評価

1. 5. 4(3)①1)装柱時の留意点と評価

装柱においては、作業性を考慮し、開閉器からの高圧引下線と接続できるブッシングを機器上面に上向きスタッド型に設けることとした。図 5.4(3)-1 に SVC の高圧配電線との接続イメージを示す。

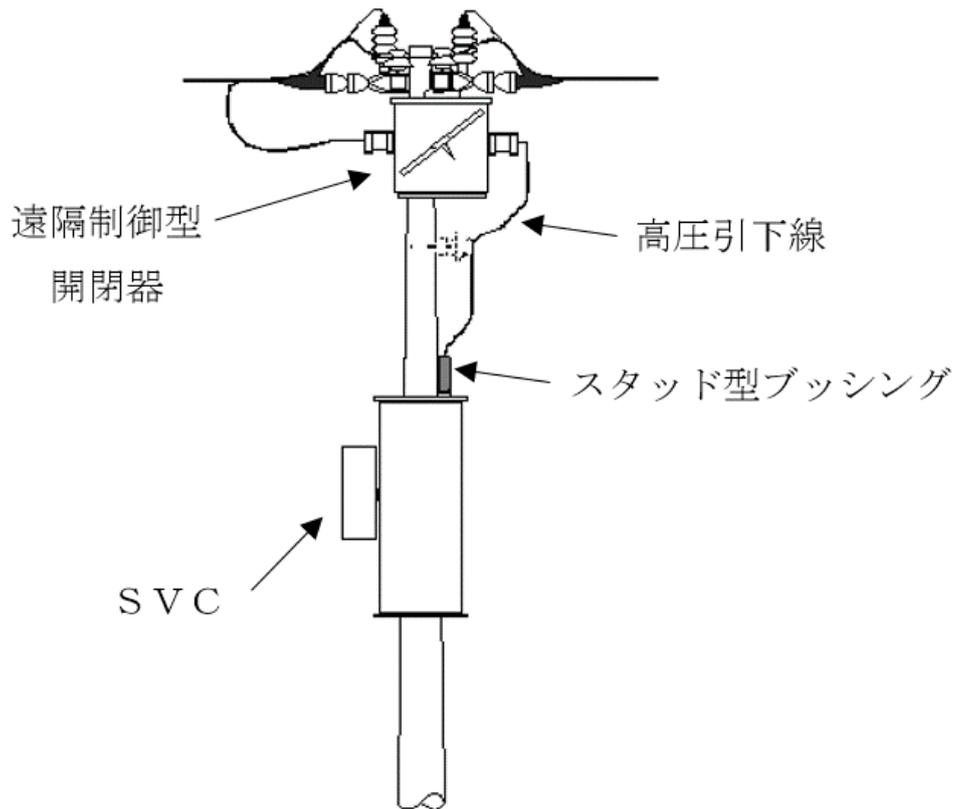
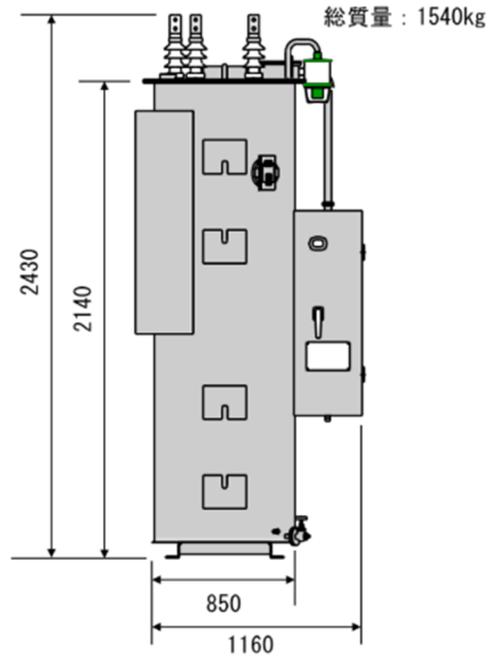


図 5.4(3)-1 SVC の接続イメージ

また、富士電機より開発中の機器において、変圧器とインバータの分離型構造の提案があったが、接続する高圧線の露出など保守性に課題があったため、機器の形状は、既設電柱での昇柱作業を考慮し、一体型(変圧器、インバータ間の高圧線が露出せず、一体構造である)が望ましいことを提案した。

参考に、関西電力の SVR の装柱状況を図 5.4(3)-2 に示す。



装柱状況 形状・寸法
 図 5.4(3)-2 関西電力の SVR の装柱状況と形状・寸法

1. 5. 4(3)①2)メンテナンス時の留意点と評価

メンテナンス性の実証評価を行うにあたり、SVCを設置工事・メンテナンスする上での必要な評価項目を表5.4(3)-1に示す。評価項目については、関西電力における基本評価項目に基づくものであり、妥当であると評価する。

表 5.4(3)-1 メンテナンス性の実証評価項目

大項目	小項目	評価内容
施工性	機器の懸吊作業	本体吊り耳位置
		吊り治具、吊金具のサイズ確認、施工性
		吊り上げ時の水平具合
		吊り上げ時の他装柱機器との離隔距離
		クレーン停車位置(定格荷重・作業半径を考慮停車位置)
		適用クレーンの選定(定格荷重・作業半径を考慮したクレーン)
	電柱への固定作業	調整器バンドとの適合性
		固定強度、安定性
	高圧線との接続作業	高圧線廻り線の接続
		当社端子と機器側端子の適合性(カバーの適合性含む)
		締付トルク等の確認
	他設置機器との干渉	同一柱に設置される機器との離隔確保及び作業時の相互干渉
		効率的に作業を行うための取付順序
	制御変圧器・低圧線の接続作業	低圧線(制御電源用)・CVVケーブルの配線方法、および機器との接続方法
		機器設置後の新規お客さま供給への対応可否
		機器～制御箱間ケーブル配線方法、および機器との接続方法
		接地線の配線方法、および機器との接続方法
		弱電線の地上高確保
	作業スペース	施工に必要な占有面積(作業車、クレーン設置)
		安全対策の実施方法
	その他	施工時の留意点
		現場運搬方法(使用トラックや機器端子、ハンガ座養生方法)
	操作性・保守性	取付完了後の機器操作
制御箱の取付箇所		
機器異常表示部の視認性		
点検時の安全帯ロープ取付位置		
機器運用中のメンテナンス		機器運用中のメンテナンス(部品の経年交換等)の作業性

1. 5. 4(3)②H柱設置の場合の装柱性試験による評価

今回の装柱性試験結果は、都市部より離れた周辺部(郊外)の配電線への設置を想定した。前提条件としては、郊外設置に加え、弱電線ケーブルの道路横断、変圧器3台(子局用電源、一般負荷)設置とし、地上高の確保と装柱が輻輳する過酷な条件としている。

今回の検証は、既設 SVR を次世代 TVR に取り替えることを前提としたため、既存 SVR と同様、H 柱及び SVR 用の架台を流用することになっている。架台は、SVR から次世代 TVR に変わることにより固定ボルト穴のピッチが変わるため、スペーサーを設けることでボルト穴を調整し、次世代 TVR の固定を行っている。図 5.4(3)-3 参照。

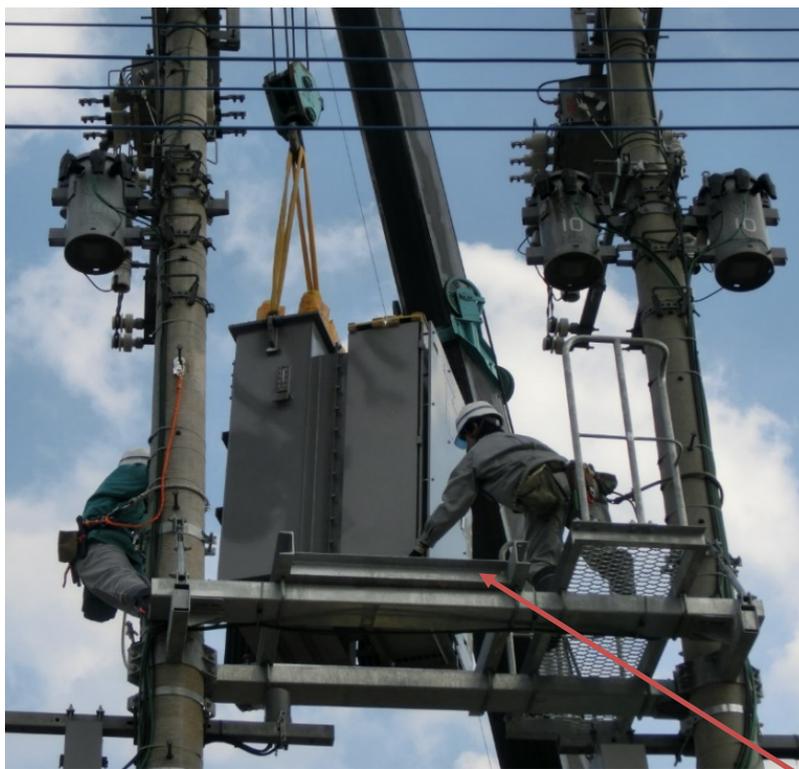


図 5.4(3)-3 次世代 TVR 設置状況

スペーサー

九州電力の社員研修所にH柱を建柱し、検証項目を1.次世代 TVR の設置、2.次世代 TVR の配線、3.保守作業、4.設置後の追加工事の4つに分け、検証を実施した。検証項目および判定については、表 5.4(3)-2 のとおりである。判定については、当社の標準装柱による検証とし、○、△、×の3段階により判定した。どの検証項目についても概ね問題なく作業可能であった。なお、3.保守作業の制御部の取替作業は×と判定しているが、制御部を取替える場合、次世代 TVR の機器本体の取替が必要となる。この検証項目は制御部のみを取り外して取替可能なかを検証予定であったため、取替不可として×と判定している。詳細については表 5.4(3)-3 から表 5.4(3)-7 の装柱性試験の検証結果を参照。

表 5.4(3)-2 装柱性試験の検証項目および判定

	検証項目	判定
次世代TVRの設置	(1) 16tクレーン車の設置位置	○
	(2) 次世代TVRの玉掛け	○
	(3) 次世代TVRの固定（取付台座へのボルトの締付）	○
	(4) 次世代TVR固定後の状態等の確認	○
次世代TVRの配線	(1) 縁線接続の作業性	△
	(2) 縁線の形成（途中支持なし）	△
	(3) 縁線の形成（途中支持あり）	△
	(4) その他（最適な縁廻り線を形成するための装柱と隔離）	△
保守作業	(1) 制御部の点検等の作業	○
	(2) 制御部の取替作業	×
	(3) カットアウトヒューズ不良取替作業	○
	(4) カットアウト不良取替作業	○
	(5) 変圧器取替作業	○
設置後の追加工事	供給工事への対応	○

「○」⇒ 問題なく作業可能

「△」⇒ 装柱変更や機材の軽微な変更等を実施することで作業可能

「×」⇒ 機材等を抜本的に変更しなければ作業不可能

また、次世代 TVR の吊上げに使用する 16t クレーン車の設置位置については、安全に次世代 TVR を運搬台車から吊上げ、次世代 TVR 設置箇所へ吊下しが可能な、最小設置(電柱側に最も近づけて設置)時の占用幅等の距離を計測した結果、現行 SVR とほぼ同等の占有面積で作業可能であることを確認した。建駐車にもクレーンが搭載されており、定格荷重 2.9t の仕様のものであるが、作業半径や吊上揚程を考慮すると、次世代 TVR を H 柱の設置箇所まで吊り上げることはできない。

以下、装柱性試験の検証結果から 3 つの懸念事項について記載する。

1. 5. 4(3)②1)次世代 TVR の縁線接続の作業性検証

図 5.4(3)-4 のように次世代 TVR 頂部の縁線接続後に専用端子カバーを取り付けるが、電線サイズごとのカバーが無い場合、現場の電線サイズに適合するように加工作業が必要となる。加工作業によっては、カバーと電線の間隙が生じる可能性があるため留意する必要がある。隙間が生じると、鳥獣害による影響(営巣材や蛇侵入等)が懸念される。参考までに、九州電力で使用している SVR 端子カバーは電線サイズごとに準備されており、加工する必要はない。図 5.4(3)-5 は、九州電力管内で使用している 200mm² の電線との接続例である。



図 5.4(3)-4 次世代 TVR 専用端子カバーの取付

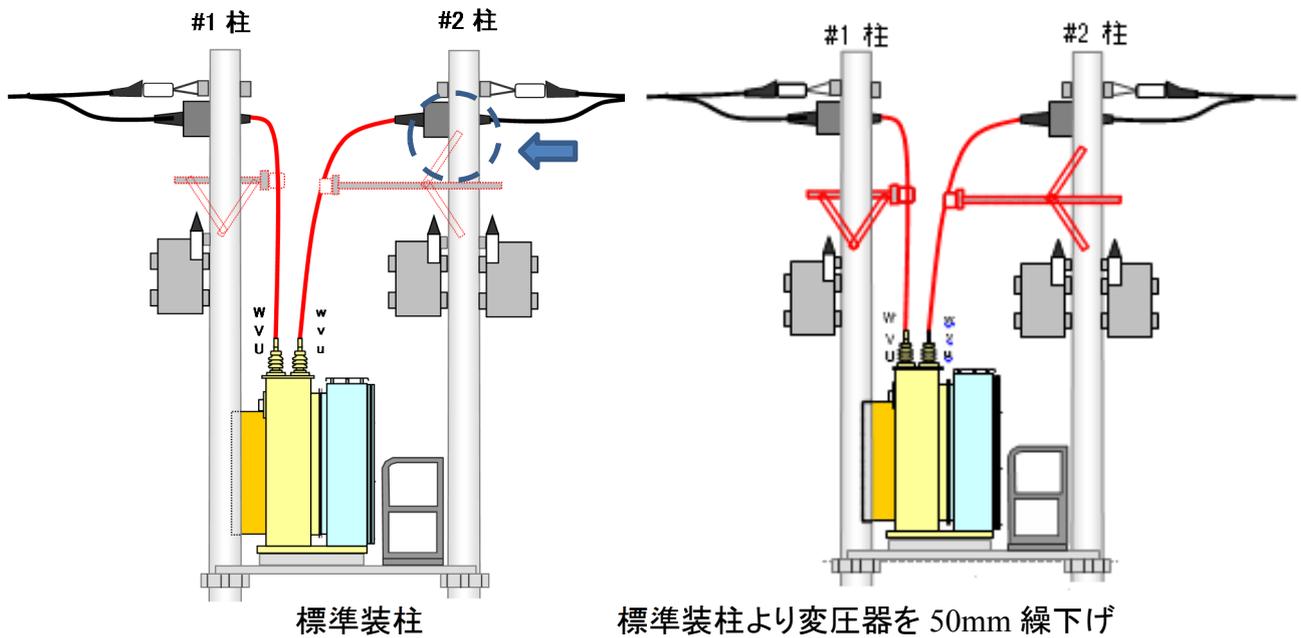


図 5.4(3)-5 参考:SVR 端子カバー

1. 5. 4(3)②)次世代 TVR の縁線の形成作業性検証

次世代 TVR は SVR に比べ高さが 200mm 高いため、開閉器～次世代 TVR 端子間が短く、また、次世代 TVR 端子位置が片側の電柱に偏るため縁形成に時間を要した。縁線は、台風等による飛来物接触等により、線間距離が短くなることで短絡が発生する懸念がある。そのため、途中支持について検証した(図 5.4(3)-6)。

#1 柱側は変圧器蓋から 80 mm 上部に 1200mm アーム、800 mm アームタイを使用し、#2 柱側は変圧器蓋から 100 mm 上部に 1800mm アーム、800 mm アームタイを使用することで、途中支持が可能である。この装柱時に#2 柱側の開閉器操作網とアームタイバンドとの干渉が有るため、変圧器カットアウト取付用のアーム(PC アーム)、変圧器を 50 mm 繰下げること、干渉を回避できる(図 5.4(3)-7)。



※上図には、高圧引下線、子局は含まない

図 5.4(3)-6 途中支持がある場合の装柱例

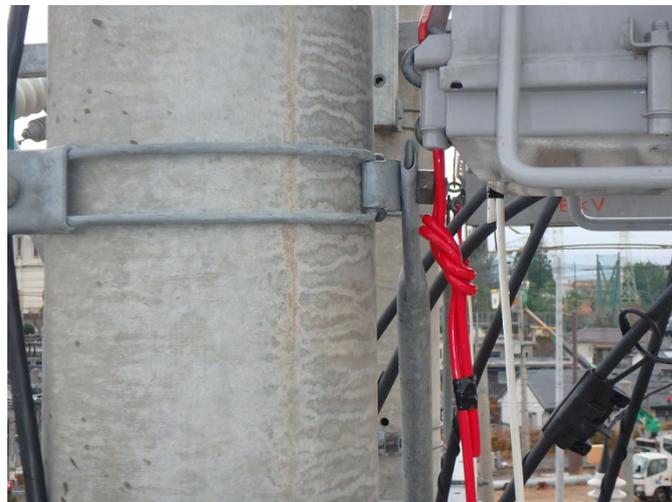


図 5.4(3)-7 開閉器操作網とアームタイバンドの干渉(上左図の矢印方向からの写真)

また、装柱性試験は、遠制ケーブルが道路横断している状況(遠制ケーブルの地上高 6m 以上を確保)を想定して実施したが、道路横断しない場合は、規程上 1m 程度の線下げが可能となる。線下げることによって縁線が長くなり、作業性が向上する。なお、遠制ケーブルが道路横断する場合は、2m 継柱や変圧器を隣接柱に移設することで作業性が向上するものと判定した。



図 5.4(3)-8 次世代 TVR 設置例(遠制ケーブルあり)

1. 5. 4(3)②3)装柱性試験による評価のまとめ

次世代 TVR に関して装柱性試験を実施した結果、いくつかの課題が見つかったが、いずれもメーカーにより修正可能である内容であった。そもそも今回開発した次世代 TVR は、試験を実施した九州電力の仕様を基に製造したものではないため、細かな点で課題が出るのは当然であることに留意いただきたい。

なお、以下の表に装柱性試験の全体概要を示す。

表 5.4(3)-3 装柱性試験の検証結果(その1)

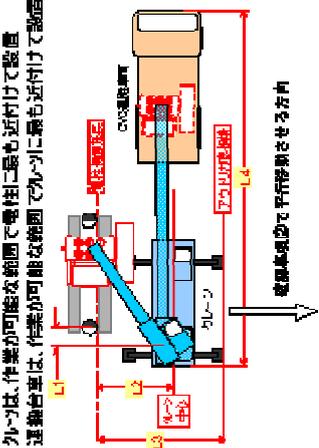
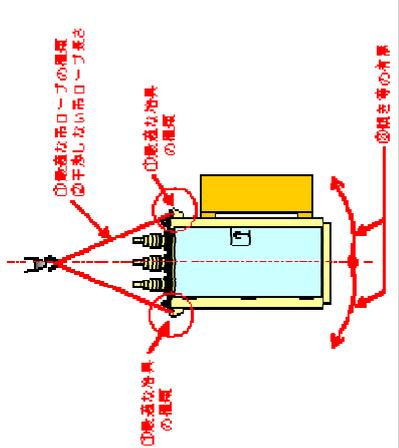
検証項目	確認事項	検証結果	判定																						
1. CV ①の設置	<p>※ 判定は、事前構築設備で問題なく作業可⇒○、装柱変更や機材の種別な変更等で作業可⇒△、高圧停止で作業可⇒×、機材等を基本的に変更しない作業ができれば⇒「×」</p> <p>① 安全に CMC を運搬台車から吊上げ～CMC 組立設置場所へ吊下しが可能か、最小設置(電柱側)にも近づけて設置)時の、次の運搬台車は、作業が可能な範囲で外側に最も近づけて設置の占用幅等の距離は何mか？</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ L1= 電柱中心 ~ 外→回旋機中心 ・ L2= 電柱側面 ~ 外→の中心 ・ L3= 電柱側面 ~ 外→の中心(感振端) ・ L4= 外→後ろ ~ 運搬車両の前 	<p>○ L1(電柱中心 ~ 外→回旋機中心) = 1.0 m</p> <p>○ L2(電柱側面 ~ 外→の中心) = 4.0 m</p> <p>○ L3(電柱側面 ~ 外→の中心(感振端)) = 7.0 m</p> <p>○ L4(外→後ろ ~ 運搬車両の前) = 17.0 m</p> <p>○ 通行 8m と 戻り等の占有幅で作業可能</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ L3=7m のため、片側 1車線道路では全面通行止め ・ 道路占有面積については、18×14=118 m² 	○																						
② CV ②の玉掛け	<p>② ①の最小設置位置から道路側(右図の下側)にクレーンを動かすとした場合、向 m までが安全に吊上げ、吊下し作業が可能か？ (外→がレールを経験済でも可)</p> <p>③ ①が下の 1st クレーンでも、②の状態で作業が可能か？ (外→がレールを経験済で可)</p> <p>④ クレーンの設置に関する、その他の留意点等はないか？</p> <p>⑤ 安全かつ確実に吊上げるための、吊金具へ取付ける固定治具(シャックル、吊ロープ、面掛け等)、及び吊ロープ(スリング、ワイヤー等)は何か？</p> <p>⑥ ①により吊上げる場合の、フック部と干渉しない吊ロープの長さ？</p> <p>⑦ ②により吊上げた場合に、CMC のパランスに問題はないか？ CMC 固定作業時に支障がある傾き等はないか？</p> <p>⑧ CV ②の玉掛けに関する、その他の留意点等はないか？</p>	 <table border="1" data-bbox="542 313 606 806"> <tr> <td>動かす距離</td> <td>0.5m</td> <td>1.0m</td> <td>1.5m</td> <td>2.0m</td> <td>2.5m</td> <td>3.0m</td> <td>3.5m</td> <td>4.0m</td> <td>4.5m</td> <td>5.0m</td> </tr> <tr> <td>作業の可否</td> <td>○</td> </tr> </table> <p>※ 作業可⇒○、作業不可⇒×</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 5m まで移動可能 (5m 超回は不可) ○ ②の状態にて作業可能 (L1~L4の距離は、ほぼ同等) ○ ③について、1.0m まで移動可能 ○ その他なし ○ 固定治具 ⇒ 耐荷重 10t 以上のシャックル ○ 最適吊ロープ ⇒ スリング及びワイヤーロープ 	動かす距離	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m	2.5m	3.0m	3.5m	4.0m	4.5m	5.0m	作業の可否	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
動かす距離	0.5m	1.0m	1.5m	2.0m	2.5m	3.0m	3.5m	4.0m	4.5m	5.0m															
作業の可否	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○															
		 <ul style="list-style-type: none"> ① 最適吊ロープの長さ ② 干渉しない吊ロープ長さ ③ 最適吊金具の長さ ④ 最適吊金具の長さ ⑤ 傾き等の留意 	○																						
		<ul style="list-style-type: none"> ○ 干渉しない吊ロープの長さ ⇒ 2.0m 以上 ○ 吊上げ時に 3° の傾きあり ○ その他なし 	○																						
		<ul style="list-style-type: none"> ○ その他なし 	○																						

表 5.4(3)-5 装柱性試験の検証結果(その3)

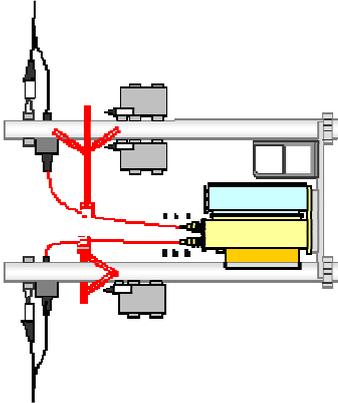
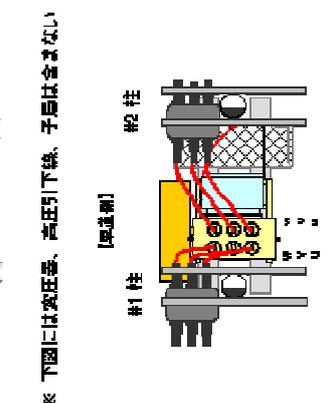
2. ○ V ○ の配線	(1) 線線の形成 (垂直配線金物での途中支持なし)	<p>①_#1 柱側の繰廻り線(UVW)の形成は、極端な曲がり等がなくスムーズか?</p> <p>②_#2 柱側の繰廻り線(UVW)の形成は、極端な曲がり等がなくスムーズか?</p> <p>③_#1 柱側の繰廻り線(UVW)の線間最小離隔は何 mm での地点はどこか?</p> <p>④_#2 柱側の繰廻り線(UVW)の線間最小離隔は何 mm での地点はどこか?</p> <p>⑤_線線の形成(垂直配線金物支持なし)に関する、その他留意点等はないか? (含む、機器類との離隔不足等)</p> <p>⑥_#1 柱側の繰廻り線(UVW)を途中支持をすとした場合は、どの地点、向きで、何のアー・ム・アー・ム・タイを使用するのが最適か?</p> <p>⑦_#2 柱側の繰廻り線(UVW)を途中支持をすとした場合は、どの地点、向きで、何のアー・ム・アー・ム・タイを使用するのが最適か?</p> <p>⑧_#1 柱側の繰廻り線(UVW)の線間最小離隔は何 mm での地点はどこか?</p> <p>⑨_#2 柱側の繰廻り線(UVW)の線間最小離隔は何 mm での地点はどこか?</p> <p>⑩_線線の形成(垂直配線金物支持有り)に関する、その他留意点等はないか? (含む、機器類との離隔不足等)</p> <p>⑪_①②で繰廻り線の形成に問題がある場合は、どのような装柱性、装柱距離とすれば、問題が解消されるか?</p>	<p>○ 問題なし</p> <p>○ 問題なし</p> <p>○ 問題なし</p> <p>△</p> <p>△</p> <p>△</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>△</p>
		<p>※ 下図には高圧引下線、子層は含まない</p>  <p>※ 下図には変圧器、高圧引下線、子層は含まない</p> 	<p>○ 問題なし</p> <p>○ 問題なし</p> <p>○ 問題なし</p> <p>△</p> <p>△</p> <p>△</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>△</p>
	<p>(2) 線線の形成 (垂直配線金物での途中支持なし)</p> <p>(3) その他(垂直配線金物支持有り)のため、線柱と線</p>	<p>○ 問題なし</p> <p>○ 問題なし</p> <p>○ 問題なし</p> <p>△</p> <p>△</p> <p>△</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>△</p>	<p>○ 問題なし</p> <p>○ 問題なし</p> <p>○ 問題なし</p> <p>△</p> <p>△</p> <p>△</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>△</p>

表 5.4(3)-6 装柱性試験の検証結果(その4)

3. 保守作業	(1) 制御部の点検等の作業	(2) 制御部の取替作業	(3) カットワイヤが不良取替作業
	<p>① 作業は、高圧活線状態で、架台の上から(追加)ア取付け、高圧部との接近限界距離及び体位遷定基準を遵守して作業可能か？ その時の作業体位で最も高圧部に接近する距離と距離は？</p> <p>② 制御部の点検等の作業に関する、その他留意点等はないか？</p>	<p>① 制御部の解体は、高圧活線状態で、架台の上から(追加)ア取付け、高圧部との接近限界距離及び体位遷定基準を遵守して作業可能か？その時の作業体位で最も高圧部に接近する箇所と距離は？</p> <p>② 制御部の解体は、高圧活線状態で、車道側に設置した高圧作業車から、高圧部との接近限界距離及び体位遷定基準を遵守して作業可能か？その時の作業体位で最も高圧部に接近する箇所と距離は？</p> <p>③ 制御部の吊下し吊上げは、高圧活線状態で、車道側に設置した高圧作業車から、高圧部との接近限界距離及び体位遷定基準を遵守して作業可能か？その時の作業体位で最も高圧部に接近する箇所と距離は？</p> <p>④ 制御部の点検等の作業に関する、その他留意点等はないか？</p>	<p>① 柱の作業は、高圧活線状態で、柱上から、高圧部との接近限界距離及び体位遷定基準を遵守して作業可能か？</p> <p>② 柱の作業は、高圧活線状態で、柱上から、高圧部との接近限界距離及び体位遷定基準を遵守して作業可能か？</p> <p>③ 柱の作業は、高圧活線状態で、架台の上から(追加)ア取付け、高圧部との接近限界距離及び体位遷定基準を遵守して作業可能か？</p>
	<p>※ 下図には高圧引下線、予備は含まない</p>	<p>○ 可能 最も高圧部に接近する箇所と距離 その距離 70 cm</p> <p>○ その値なし</p> <p>○ 可能 最も高圧部に接近する箇所と距離 その距離 cm</p> <p>○ 可能 最も高圧部に接近する箇所と距離 その距離 cm</p> <p>○ 可能 最も高圧部に接近する箇所と距離 その距離 cm</p>	<p>○ 可能 最も高圧部に接近する箇所と距離 その距離 70 cm</p> <p>○ 可能 最も高圧部に接近する箇所と距離 その距離 85 cm</p> <p>○ 可能 最も高圧部に接近する箇所と距離 その距離 85 cm</p>
		<p>○ 制御部の解体取替は、EVC の構造上不可。(特種作業にてEVC 本体を吊降るす必要有)</p>	
			<p>(国台時(懸垂作業で上図に類似のため))</p>

1. 5. 4(4)実グリッドによる実証評価

1. 5. 4(4)①実グリッドでの検証の目的

1. 4. 4に記載した模擬グリッドでは、実規模の電圧(6.6kV)系統や電圧制御機器 SVR や無効電力補償装置 SVC の実機を用いた検証試験や、配電線事故時や電力系統擾乱時の試験を実施することが可能であった。一方、実証試験による検証としては、実規模の潮流や実ノイズレベルなどの実配電線の環境下における評価が必要である。そこで、最終評価として、九州電力の実規模実証試験設備である薩摩川内試験場において、制御の安定性、電圧制御性、および既存機器 SVR との協調性の評価試験を行う。

1. 5. 4(4)②実グリッドの構成と構築

実グリッドの試験を実施する薩摩川内試験場は、太陽光など出力が不安定な再エネが大量に普及した場合においても、高品質、高信頼度の電力供給が維持できるよう、将来のスマートグリッド構築に向けた技術的な課題解決のため、鹿児島県薩摩川内市内に建設された実証試験場である。

試験場内には模擬配電設備が構築され、SVR や SVC などの電圧調整機器や最大 40km の線路巨長を模擬できる模擬線路装置、最大で 2,000kW まで出力できる模擬負荷装置で構成されている。その他、機器の接続点で電圧・電流をリアルタイムで計測可能となっている。また、試験場は 6.6kV 配電線より直接受電した電圧を使用しており、実グリッドに近い環境で試験が可能である。

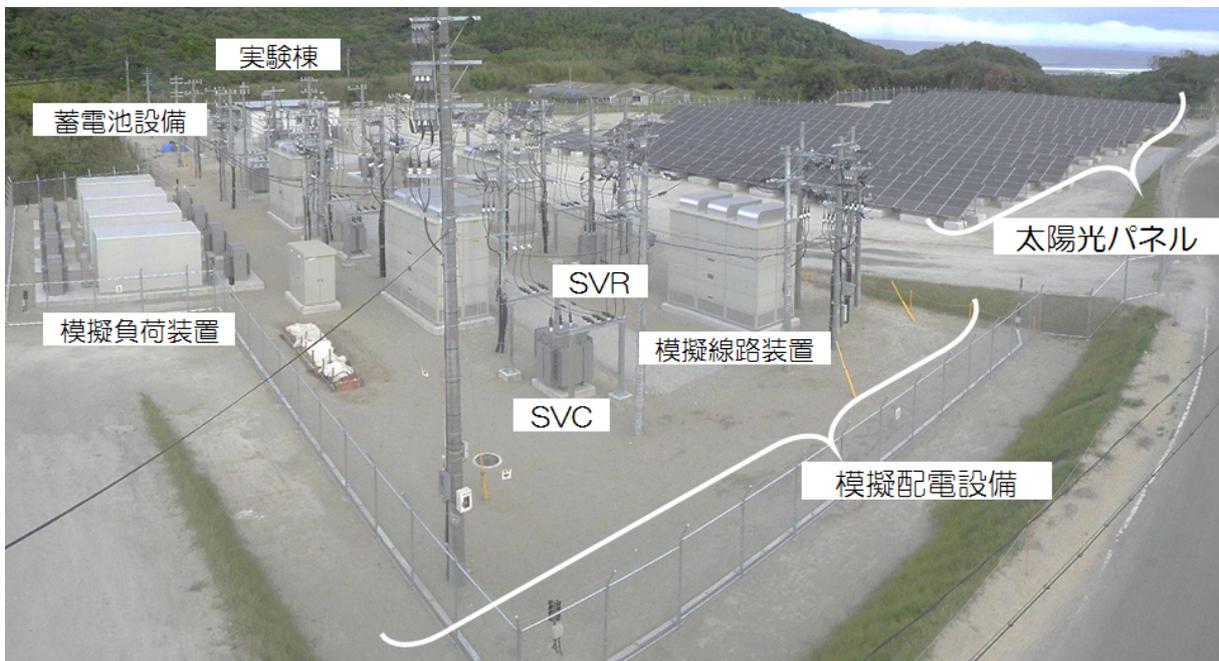


図 5.4(4)-1 薩摩川内試験場

1. 5. 4(4)③実グリッドでの実施内容

薩摩川内試験場の模擬配電設備では、九州の配電線及び負荷の特徴を模擬した系統構成で試験が実施できるようにされている。本研究開発では、SVR1 台が設置されている郊外の平均的な配電線モデルにより検証を行うことにした。検証は、配電線モデルに PV 連系が増加した場合の電圧制御性を SVR と次世代 TVR それぞれで確認し、その結果を比較することで次世代 TVR を評価する。

薩摩川内試験場の模擬配電設備の線路インピーダンスや負荷量を調整し、評価ノード(n010、n080、n090、n153)の電圧降下が配電線モデル(図 5.4(4)-2 (a))と一致するように実証試験系統(図 5.4(4)-2 (b))を構築した。なお、シミュレーションに使用した負荷カーブは実測データを基に作成された図 5.4(4)-3 を使用した。

今回の実証試験は、電圧調整機器が 1 台の場合と 2 台の場合において、以下の 3 つの項目で行った。

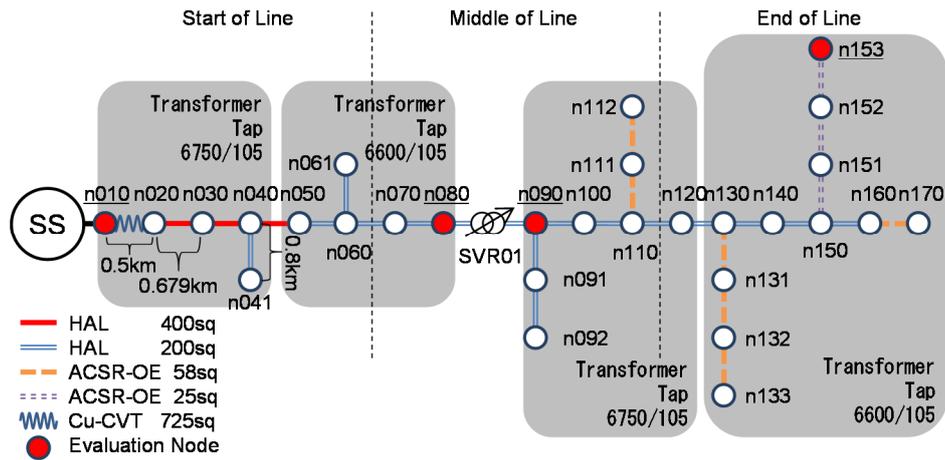
1 つ目は、負荷(重負荷及び軽負荷)のみの試験を行う。これは、SVR1 台の動作が適正電圧の管理幅に収まることを確認後、次世代 TVR に置き換えた場合に管理幅に収まるのか確認を行う。検証では、適正電圧の管理幅を設け、管理幅を逸脱した場合は、適正電圧の維持が困難とした。適正電圧とは、九州電力管内の低圧線、引込線の電圧降下限度値を考慮し、各ノードの 30 分移動平均電圧が 102V~107V(100V ベース)以内とした。また、柱上変圧器タップを変電所からの距離に応じ 6750、6600 の 2 タップ設定としている。

2 つ目は、負荷に PV を重畳させたときの快晴時の動作特性を検証する(図 5.4(4)-4)。PV の重畳パターンについては、配電線モデルの最大負荷に対する PV の最大出力の割合を PV 接続率とし、検証は PV 出力のある 6:30~19:30 において適正電圧管理幅に収まる PV 接続率の上限を 10%刻みで変化させて確認し、SVR 及び次世代 TVR に置き換えた場合を比較した。

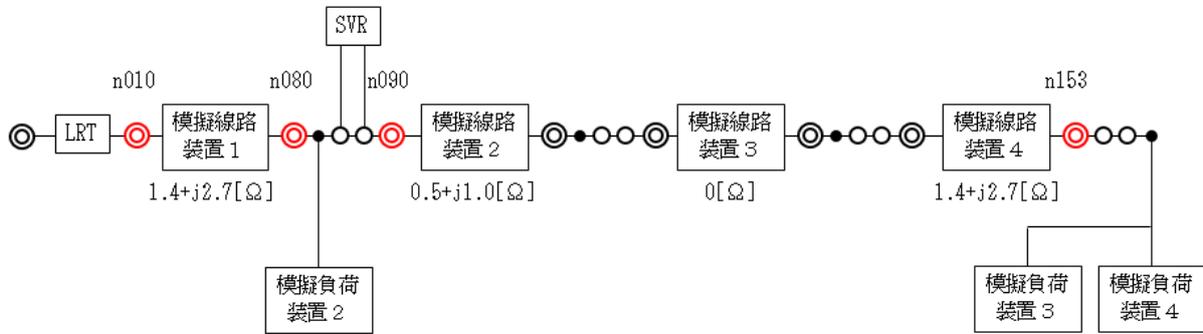
3 つ目は、負荷に PV を重畳させたときの曇天時(PV 出力の変化大)の動作特性を検証する(図 5.4(4)-5)。実測値を基に日射強度の変化が最も急峻な 10:00~11:00 の電圧変動量について SVR 及び次世代 TVR への置き換えによる違いを確認する。また、PV 接続率は、快晴時の SVR のみの試験で電圧逸脱した接続率を採用し、30 分移動平均電圧では均されるため、1 秒値で確認する。

試験条件は以下のとおりとする。なお、SVR における PV 接続率及び SVR の整定値は、準備試験で確認したものである。

次世代 TVR は、不感帯や時限を持たないため、基準電圧とパーセントインピーダンスの設定値を SVR と同じにした(表 5.4(4)-1)。



(a) 配電線モデル(シミュレーション)



(b) 配電線モデル(薩摩川内試験場)

図 5.4(4)-2 試験系統

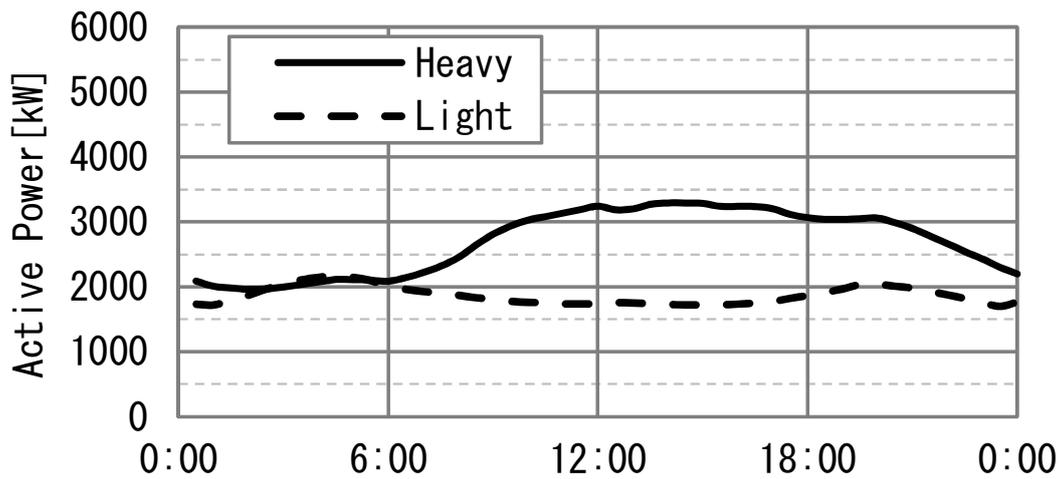


図 5.4(4)-3 負荷カーブ

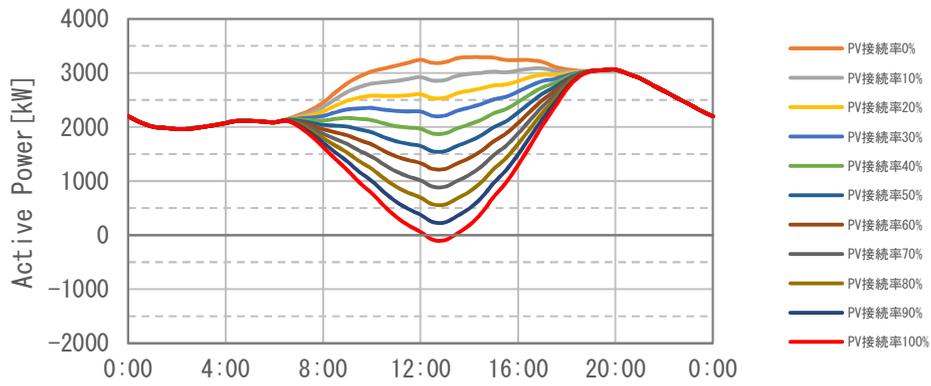


図 5.4(4)-4 快晴時の PV と負荷カーブの合成例(重負荷)

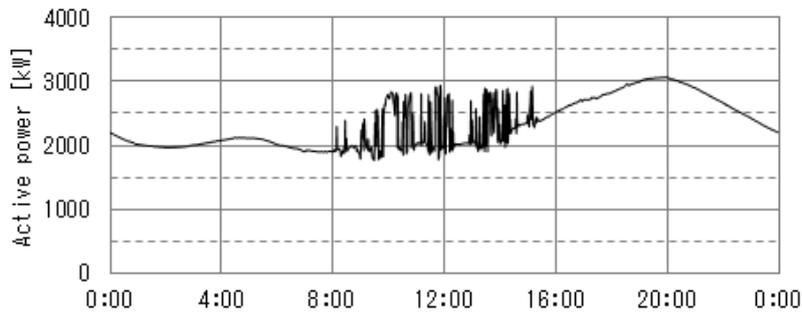


図 5.4(4)-5 日射変動時の PV と負荷カーブの合成例(重負荷 PV70%)

表 5.4(4)-1 試験項目

機器	負荷カーブ	PVカーブ	PV接続率	整定値				
				基準電圧	不感帯	時限	%R	%X
SVR	重負荷	-	0%	6,600V	1.5%	45s	7%	13%
	軽負荷							
次世代TVR	重負荷	-	0%	6,600V	-	-	7%	13%
	軽負荷							
SVR	重負荷	快晴	80%	6,600V	1.5%	45s	7%	13%
	軽負荷		40%					
	重負荷	変動	80%					
	軽負荷		40%					
次世代TVR	重負荷	快晴	80%	6,600V	-	-	7%	13%
	軽負荷		40%					
	重負荷	変動	80%					
	軽負荷		40%					
次世代TVR	重負荷	快晴	100%	6,600V	-	-	7%	13%
	軽負荷		60%					

機器*	負荷カーブ	PVカーブ	PV接続率	上流側機器 整定値					下流側機器 整定値				
				基準電圧	不感帯	時限	%R	%X	基準電圧	不感帯	時限	%R	%X
SVR01 + SVR02	重負荷	快晴 変動	90%	6,720V	1.5%	45s	1%	2%	6,600V	1.5%	60s	4%	9%
	軽負荷		60%										
SVR01 + 次世代TVR	重負荷	快晴 変動	90%	6,720V	1.5%	45s	1%	2%	6,600V	-	-	4%	9%
	軽負荷		60%										
次世代TVR + SVR02	重負荷	快晴 変動	90%	6,720V	-	-	1%	2%	6,600V	1.5%	60s	4%	9%
	軽負荷		60%										

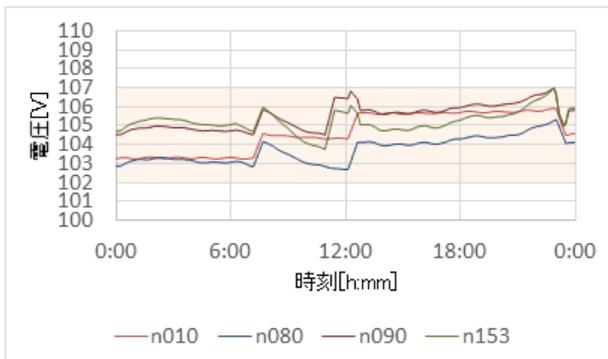
※複数台の機器名は、「上流側設置機器+下流側設置機器」である。

1. 5. 4(4)④実グリッドでの検証結果

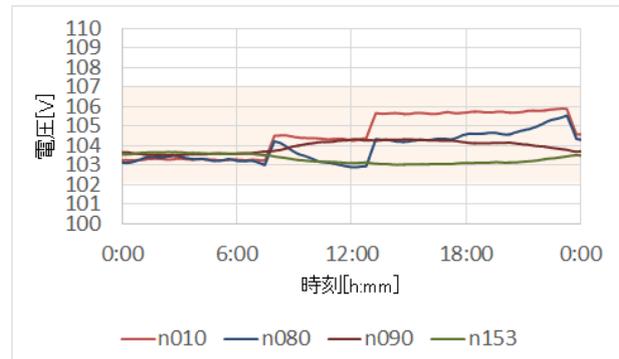
1. 5. 4(4)④1)機器1台の試験による評価

◎負荷のみ

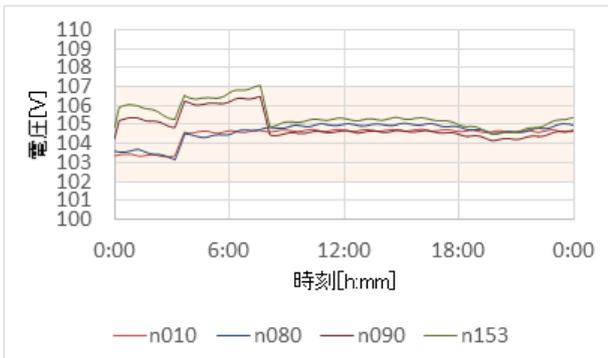
本試験は、PVを重畳させず、負荷のみで実施し、適正電圧の管理幅内で電圧変動を行うのか確認した。図5.4(4)-6は重負荷、及び軽負荷の電圧変動の時系列グラフである。どちらの場合のSVR試験においても、適正電圧の管理幅に収まっている。また、次世代TVRについても同様の試験を実施し、適正電圧の管理幅に収まっていることを確認した。図5.4(4)-7に試験システムを示す。



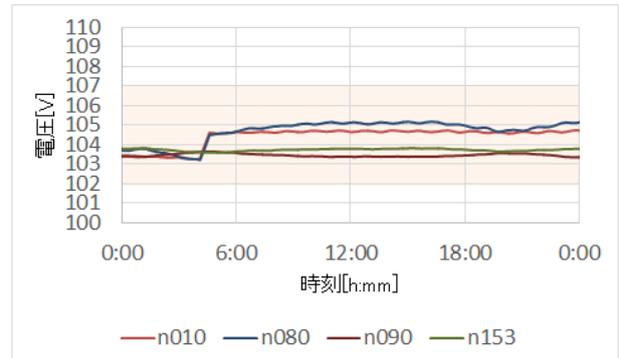
(a)SVR(重負荷)



(b)次世代 TVR(重負荷)

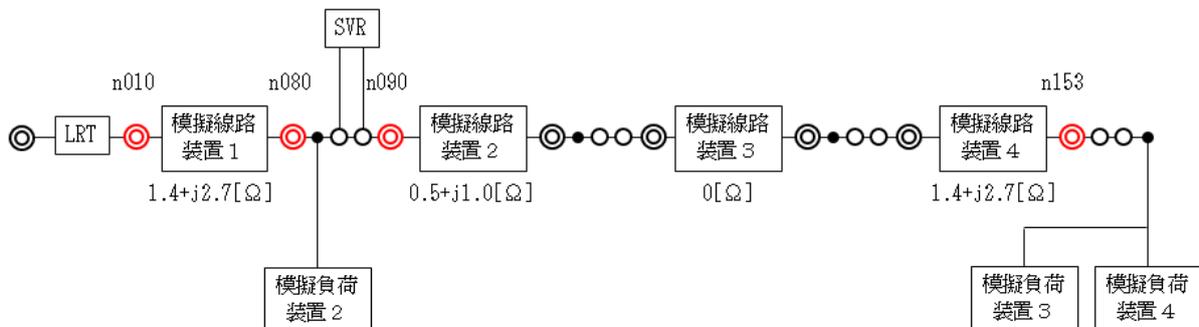


(c)SVR(軽負荷)

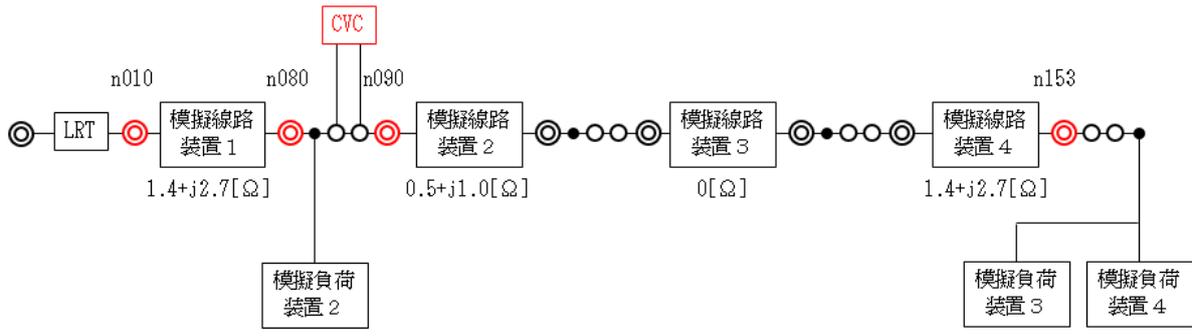


(d)次世代 TVR(軽負荷)

図 5.4(4)-6 試験結果



(a) 試験系統(SVR)



(b) 試驗系統(次世代 TVR)

圖 5.4(4)-7 試驗系統

◎負荷に PV を重畳させた試験

本試験は、SVR1 台で下記の結果を確認した。

表 5.4(4)-2 SVR1台での試験結果

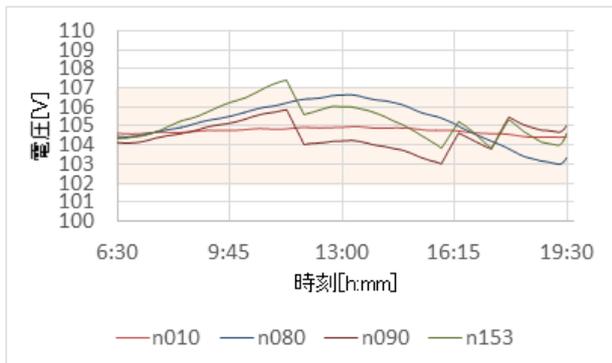
負荷パターン	PVパターン	PV接続率	電圧逸脱有無	負荷パターン	PVパターン	PV接続率	電圧逸脱有無
重負荷	快晴	70%	無	軽負荷	快晴	30%	無
		80%	有			40%	有

以上の結果から、以下の考察は、電圧逸脱したケースで行う。

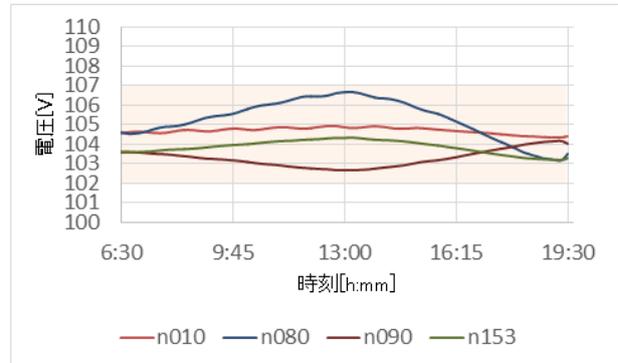
○重負荷、快晴、PV80%の場合

SVR では PV 接続率が、80%で電圧逸脱を確認した。これは、PV 出力増加により系統末端の電圧が上昇したためである。管理幅を超えて電圧上昇が続き、SVR の電圧一定点の電圧が上限電圧を超えると SVR のタップ動作により降圧し、その後は管理幅に収まる結果になった。SVR の動作としては、PV 出力の上昇およびタップ動作により電圧一定点の電圧が上下することを確認した。

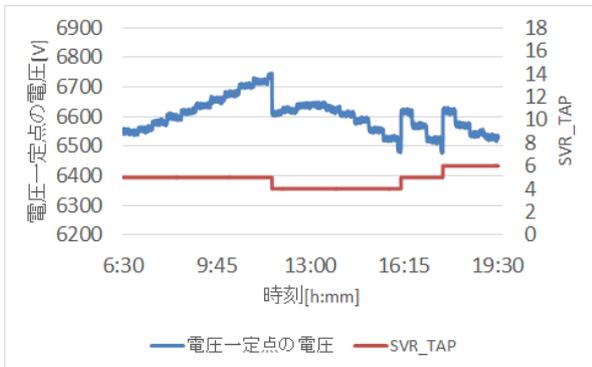
SVR を次世代 TVR に置き換えた場合の試験ケースは、SVR で電圧逸脱を確認した PV80%で検証した。次世代 TVR は、電圧制御する応答速度が SVR より高速であるため、短い時間で細かな電圧制御をすることにより、電圧逸脱を回避したことを確認した。電圧一定点の電圧は、ほぼ一定で推移していた(図 5.4(4)-8 参照)。



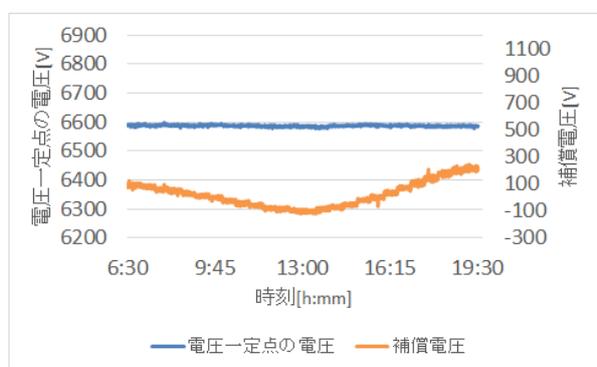
(a)SVR



(b)次世代 TVR



(c)SVR の動作



(d)次世代 TVR の動作

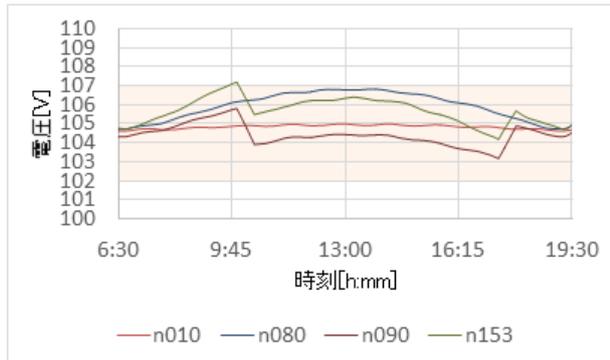
図 5.4(4)-8 試験結果(重負荷、快晴、PV 接続率 80%の場合)

○軽負荷、快晴、PV 接続率 40 の場合

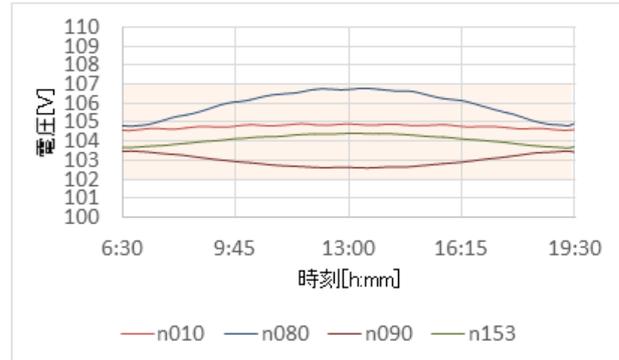
SVR では PV 接続率が、40%で電圧逸脱を確認した。これは、PV 出力増加により系統末端の電圧が上昇したためであり、重負荷のときと同じ様相を確認した。

PV40%で SVR を次世代 TVR に置き換えた場合は、SVR で電圧逸脱が確認された末端の電圧逸脱の回避を確認した(図 5.4(4)-9 参照)。

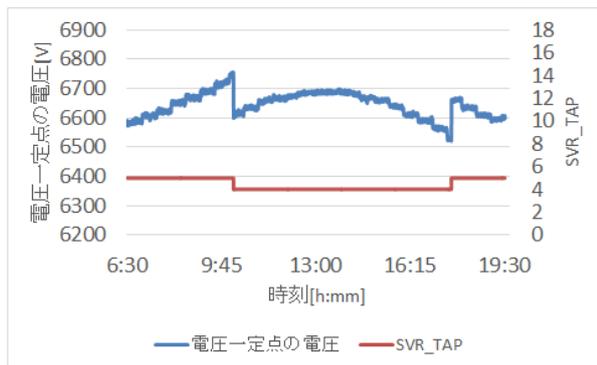
次世代 TVR1 台の検証で重負荷及び軽負荷のそれぞれで、次世代 TVR の方が SVR より PV 接続率の増加が見込める可能性を示した。逸脱する限界点の見極めが理想的であるが、時間的な制約から+20%までの確認を行った。その結果を次項に示す。



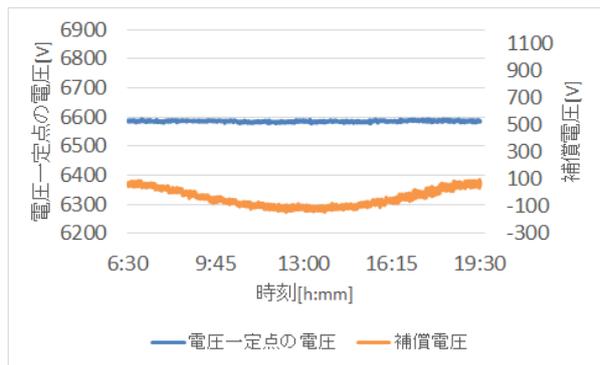
(a)SVR



(b)次世代 TVR



(c)SVR の動作

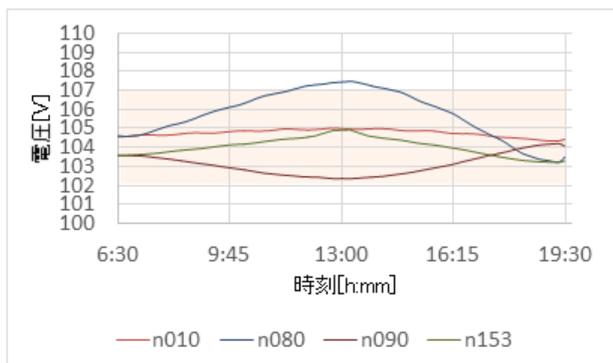


(d)次世代 TVR の動作

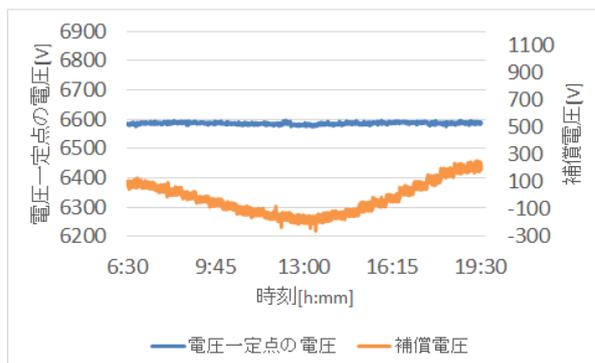
図 5.4(4)-9 試験結果(軽負荷、快晴、PV 接続率 40%の場合)

○重負荷、快晴、PV 接続率 100%の場合

PV 接続率 100%で試験を行った。PV80%のときと電圧変動はほぼ変わらない様相を示し、SVR よりも PV 接続率の増加が見込めることを確認した。今回の結果では、次世代 TVR 設置地点より上流側のノードで電圧逸脱が確認された。これは、LRT の基準電圧は負荷カーブに合わせて整定しているため、PV 出力増加により負荷カーブが変化すると、PV 出力増加による電圧上昇に対し、LRT は電圧調整が困難になるためである(図 5.4(4)-10 参照)。



(a)次世代 TVR



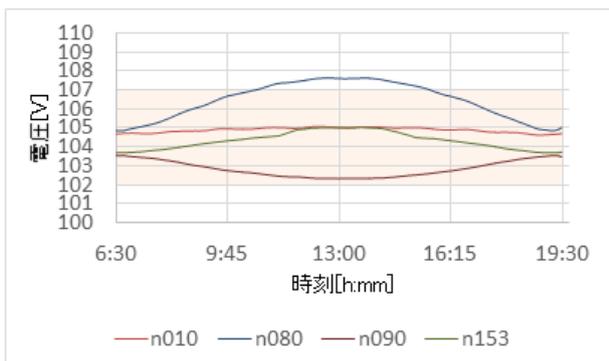
(b)次世代 TVR の動作

図 5.4(4)-10 試験結果(重負荷、快晴、PV 接続率 100%の場合)

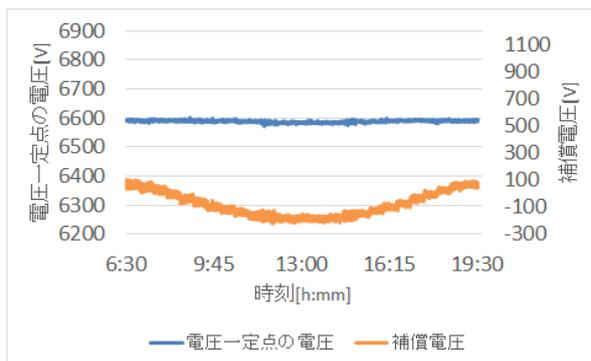
○軽負荷、快晴、PV 接続率 100%の場合

PV 接続率 60%で試験を行った。PV40%のときと電圧変動はほぼ変わらない様相を示し、SVR よりも PV 接続率の増加が見込めることを確認した(図 5.4(4)-11 参照)。

変動の場合は、試験システムの末端(ノード n153)が最も電圧変動していたため、末端電圧の電圧変動量の確認を行った。



(a)次世代 TVR



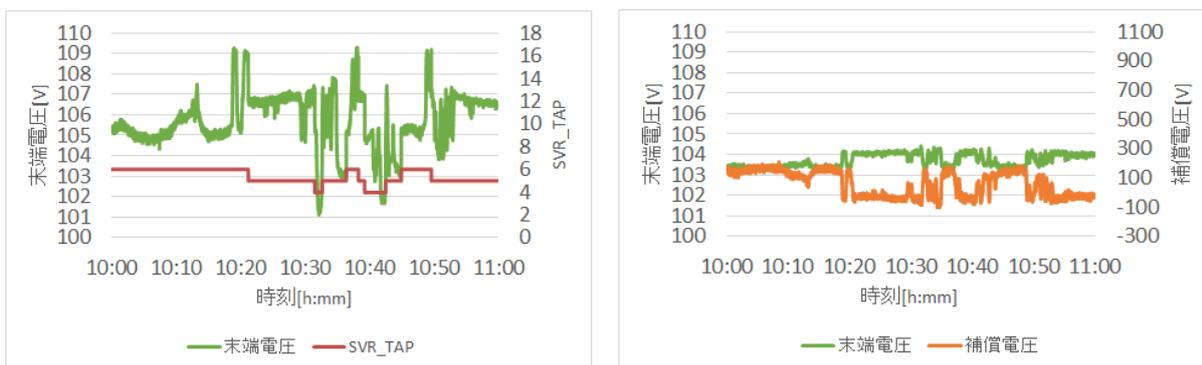
(b)次世代 TVR の動作

図 5.4(4)-11 試験結果(軽負荷、快晴、PV 接続率 100%の場合)

○重負荷、変動、PV 接続率 80%の場合

PV 接続率が 80%で変動させたときの電圧変動量を確認した。SVR は 101V~109V(変動量 8V)の間を最大 2.4V/sec 変動しており、電圧一定点の電圧を制御するためにタップ動作を 9 回実施した。SVR は 1 回のタップ動作で 1.9V 程度変動するため、その結果が図 5.4(4)-12(a)に示されたと考えられる。

SVR を次世代 TVR に置き換えた場合は、103V~104.4V(変動量 1.4V)の間を最大 0.4V/sec 変動しており、SVR に比べて変動量は 6.6V 抑制できていることを確認した。電圧制御の応答速度が高速に動作することで、電圧変動量を小さくすることができている。



(a)SVR

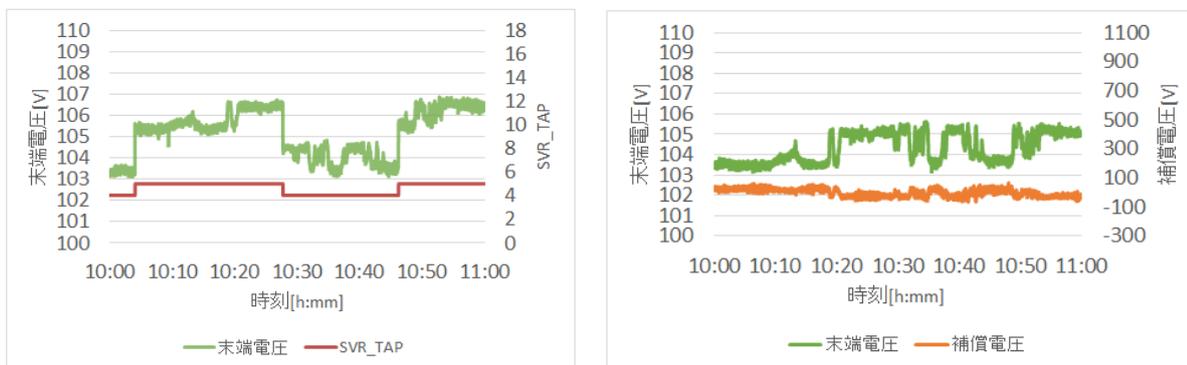
(b)次世代 TVR

図 5.4(4)-12 試験結果(重負荷、変動、PV 接続率 80%の場合)

○軽負荷、変動、PV 接続率 40%の場合

PV 接続率が 40%で変動させたときの電圧変動量を確認した。SVR は 103V~107V(変動量 4V)の間を最大 2.2V/sec 変動しており、タップ動作を 3 回実施した。

SVR を次世代 TVR に置き換えた場合は、103V~105.6V(変動量 2.6V)の間を最大 0.5V/sec 変動しており、SVR に比べて変動量は 1.4V 抑制できていることを確認した。



(a)SVR

(b)次世代 TVR

図 5.4(4)-13 試験結果(軽負荷、変動、PV 接続率 40%の場合)

1. 5. 4(4)④2)機器 2 台の試験による評価

機器 2 台の試験は、2 台目を追加設置することによる電圧面の効果を検証する。

SVR1 台での検証の結果は、重負荷に PV(快晴)を重畳させた場合、SVR～末端間で電圧が上限逸脱することを確認した。通常、PV 接続の増加にあわせて電圧を適正に維持するために大規模なルート変更工事や電圧調整機器の追加工事、変圧器のタップ変更工事などの対策が行われているが、今回は機器の追加設置による対策の効果を確かめることとし、既設 SVR～末端間に SVR を追加設置したときの検証を行う。次世代 TVR については、追加設置の SVR の置き換えに加え、上流側の SVR の置き換えも実施し、電圧制御に変化が生じるのか確認を行う。機器 2 台では、図 5.4(4)-14 のように上流側 SVR を SVR01、下流側 SVR を SVR02 と記載する。

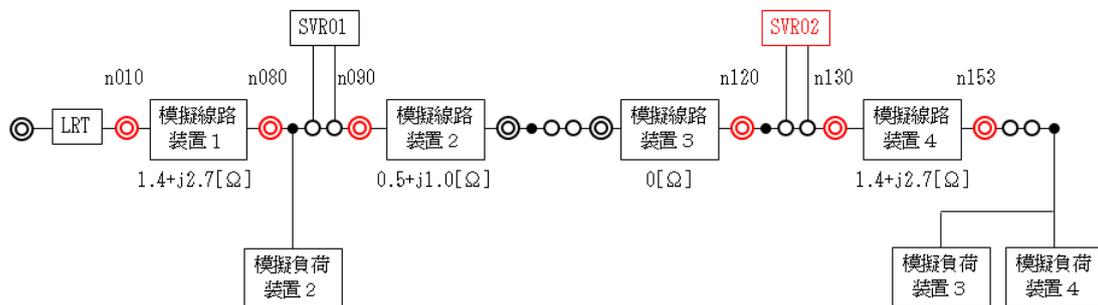


図 5.4(4)-14 試験系統(SVR01+SVR02)

◎下流側の SVR を置き換えた場合

○重負荷、快晴、PV 接続率 90%の場合

SVR1 台の場合、重負荷は PV 接続率 70%まで電圧逸脱しなかったが、SVR02 の追加設置により PV 接続率が增加するのか確認する。追加設置試験の結果、重負荷時は PV90%で電圧逸脱し、+10%増加することを確認した。これは、追加設置した SVR02 により末端付近の電圧を調整したためである。PV90%のときの SVR02 の動作は、PV の増加に伴い電圧が上昇し、SVR02 の電圧一定点の電圧が上限を超えた後、SVR02 が降圧動作を行っている。

SVR02 を次世代 TVR に置き換えた場合、末端電圧は 1V 程度の電圧変動しかしておらず、電圧逸脱は確認されなかった。なお、試験系統は図 5.4(4)-15、試験結果は図 5.4(4)-16 参照。

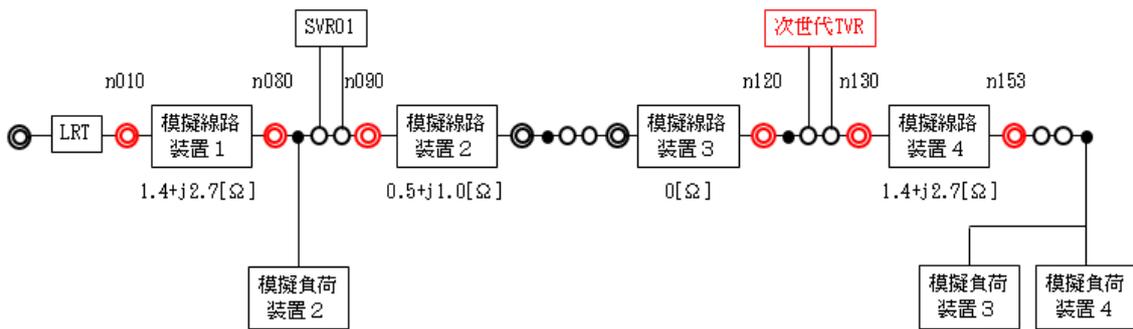
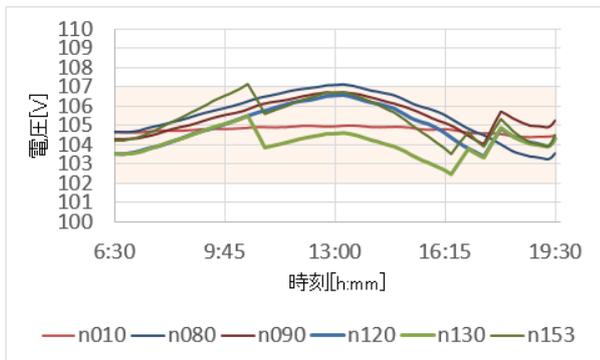
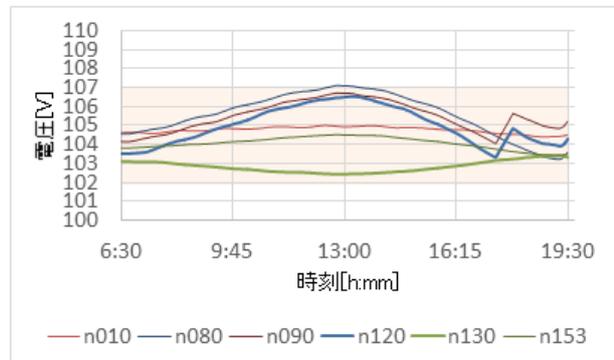


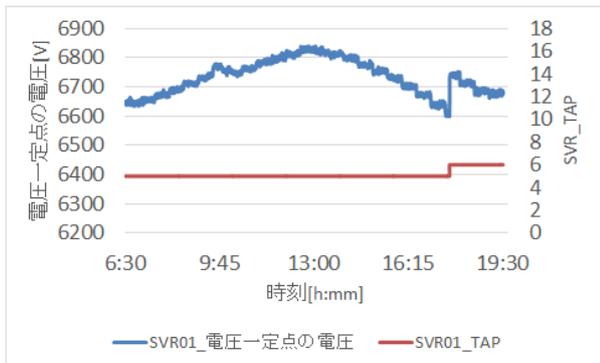
図 5.4(4)-15 試験系統(SVR01+次世代 TVR)



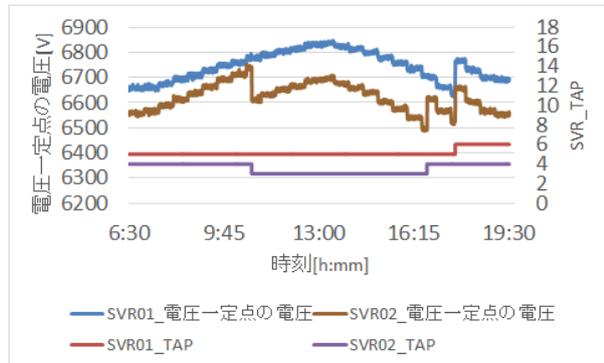
(a)SVR01+SVR02



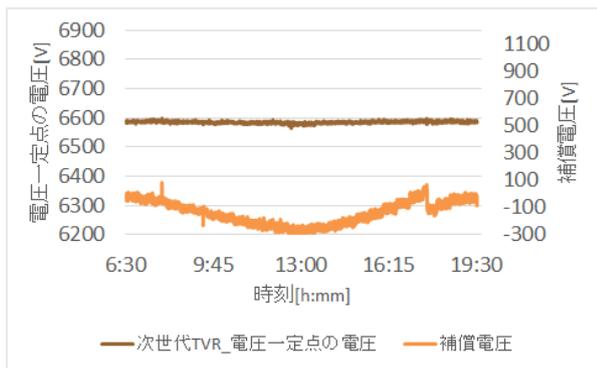
(b)SVR01+次世代 TVR



(c)SVR01+SVR02 の動作



(d)SVR01+次世代 TVR の動作



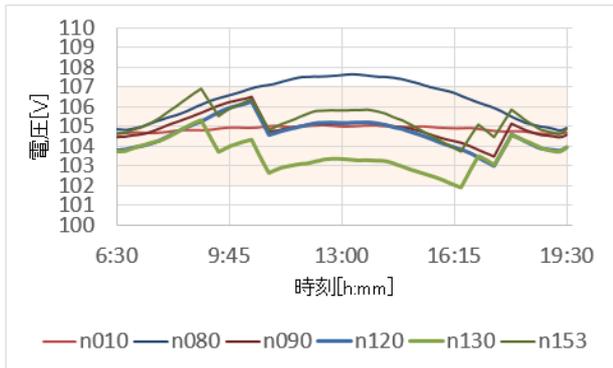
(e)SVR01+次世代 TVR の動作

図 5.4(4)-16 試験結果(重負荷、快晴、PV 接続率 90%の場合)

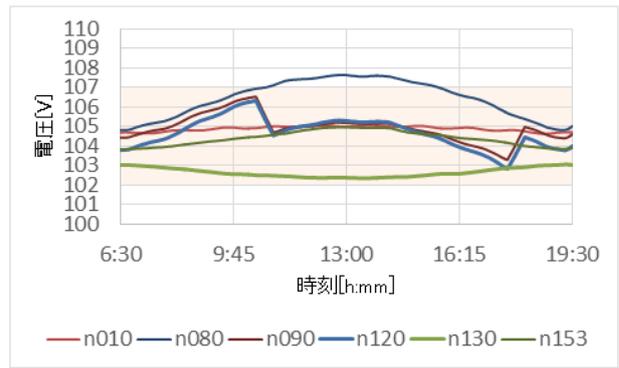
○軽負荷、快晴、PV 接続率 60%の場合

SVR1 台の場合、軽負荷は PV40%で電圧逸脱したため、SVR02 の追加設置により PV 接続率が增加するのか確認する。追加設置試験の結果、軽負荷時は PV60%で電圧逸脱し、+20%増加することを確認した。PV 出力の減少により電圧上昇が小さくなり SVR02 の下限電圧に到達するが、SVR の昇圧が遅れることで適正範囲の電圧を逸脱する結果になった。

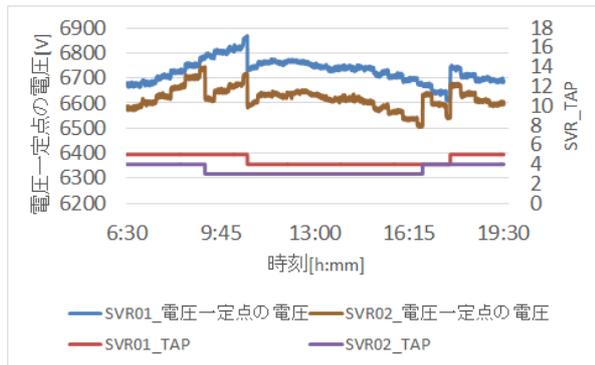
SVR02 を次世代 TVR に置き換えた場合は、電圧一定点の電圧がほぼ基準電圧の 6,600V になっており、電圧変動が抑えられたことを確認した。



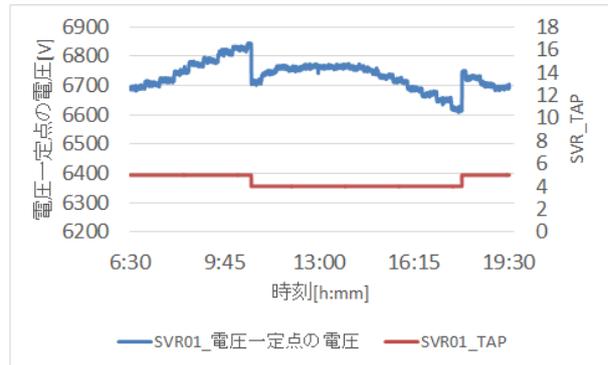
(a)SVR01+SVR02



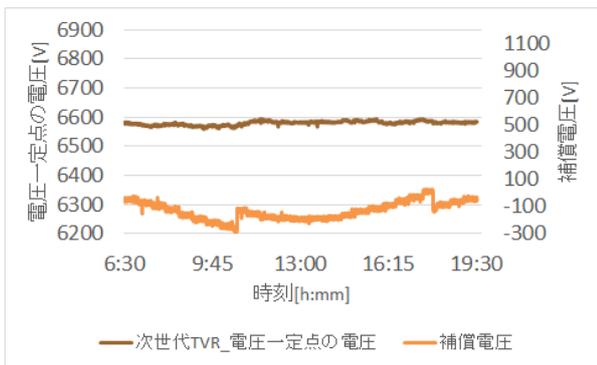
(b)SVR01+次世代 TVR



(c)SVR01+SVR02 の動作



(d)SVR01+次世代 TVR の動作



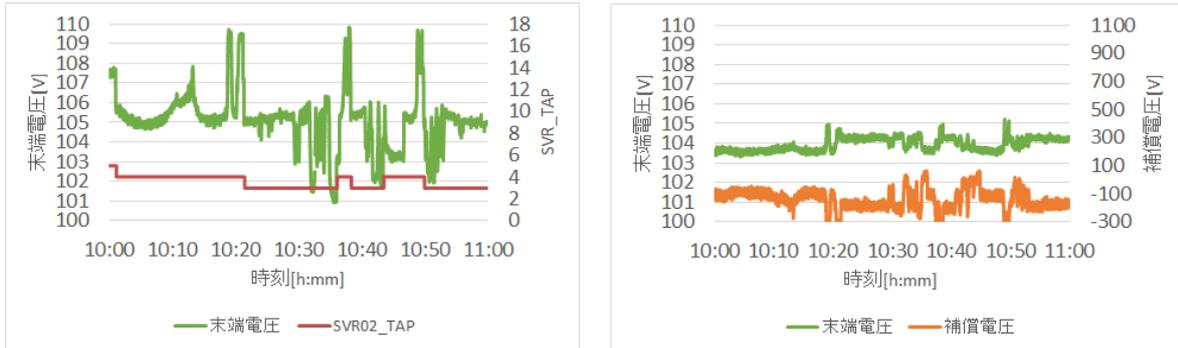
(e)SVR01+次世代 TVR の動作

図 5.4(4)-17 試験結果(軽負荷、快晴、PV 接続率 60%の場合)

○重負荷、変動、PV 接続率 40%の場合

変動の場合は、試験システムの末端(ノード n153)が最も電圧変動していたため、末端電圧の電圧変動量の確認を行った。PV 接続率 90%での電圧変動量を確認した。SVR02 は 101V~110V (変動量 9V)の間を最大 2.3V/sec 変動しており、電圧一定点の電圧を制御するためにタップ動作を 6 回実施した。

SVR02 を次世代 TVR に置き換えた場合、103V~105V(変動量 2V)の間を最大 0.8V/sec 変動しており、SVR02 に比べて変動量は 7V 抑制できていることを確認した。



(a)SVR01+SVR02

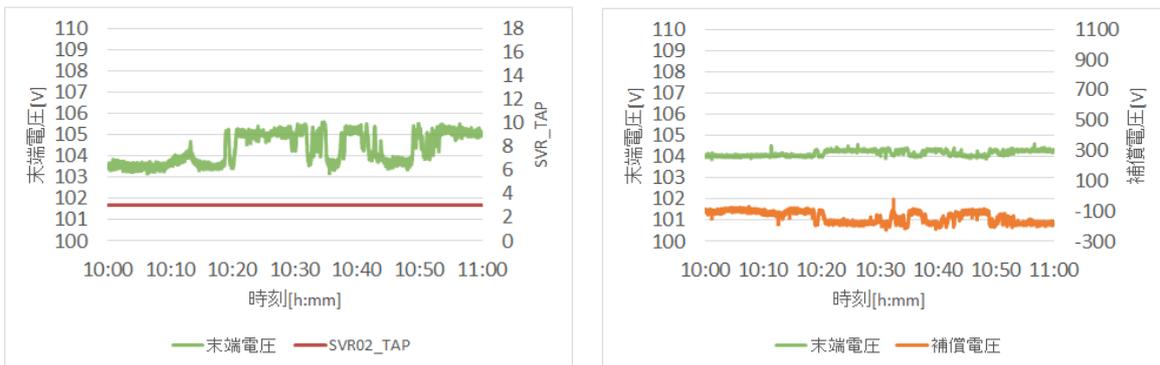
(b)SVR01+次世代 TVR

図 5.4(4)-18 試験結果(重負荷、変動、PV 接続率 40%の場合)

○軽負荷、変動、PV 接続率 60%の場合

PV 接続率 60%での電圧変動量を確認した。SVR02 は 103V~105.6V(変動量 2.6V)の間を最大 0.5V/sec 変動しており、タップ動作は 0 回で動作しなかった。

SVR02 を次世代 TVR に置き換えた場合は、104V~104.6V(変動量 0.6V)の間を最大 0.5V/sec 変動しており、SVR02 に比べて変動量は 2V 抑制できていることを確認した。



(a)SVR01+SVR02

(b)SVR01+次世代 TVR

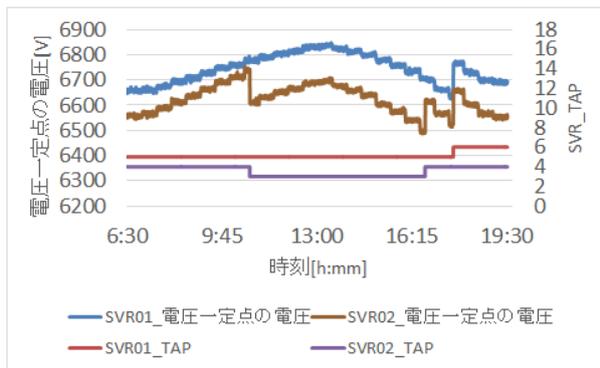
図 5.4(4)-19 試験結果(軽負荷、変動、PV 接続率 60%の場合)

◎上流側の SVR を置き換えた場合

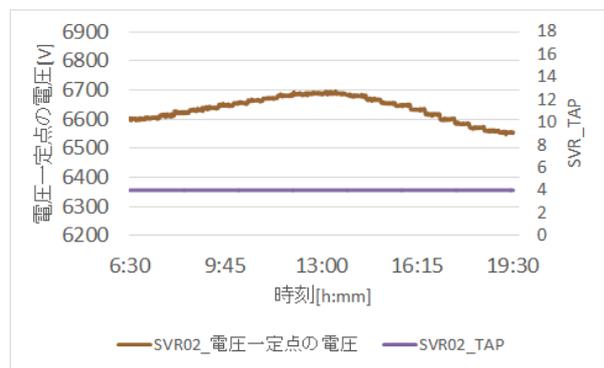
SVR1 台の試験結果は、末端電圧の逸脱のため、上流側の追加設置により電圧逸脱は解消されないが、比較検証のため実施した結果、下流側の SVR02 のタップ動作回数が減少したことを確認した。なお、試験結果は図 5.4(4)-20 から図 5.4(4)-23、試験系統は図 5.4(4)-24 参照。

○重負荷、快晴、PV 接続率 90%の場合

SVR01-SVR02 の組み合わせの場合、SVR02 のタップ動作回数は 2 回であるが、次世代 TVR-SVR02 の組み合わせの場合、SVR02 のタップ動作回数は 0 回であった。次世代 TVR が電圧変動に追従して高速制御することで、SVR02 のタップ動作回数の減少に寄与したと考えられる。



(a)SVR01+SVR02 の動作

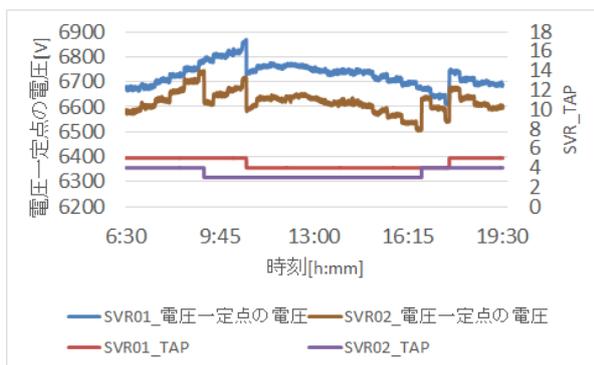


(b) 次世代 TVR+SVR02 の動作

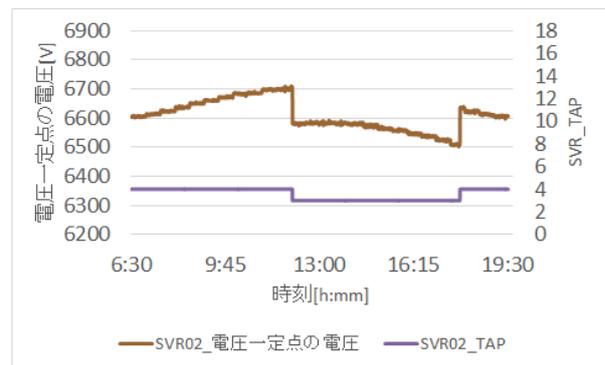
図 5.4(4)-20 試験結果(重負荷、快晴、PV 接続率 90%の場合)

○軽負荷、快晴、PV 接続率 60%の場合

SVR01-SVR02 の組み合わせの場合、SVR02 のタップ動作回数は 2 回であり、次世代 TVR-SVR02 の組み合わせの場合、SVR02 のタップ動作回数は 2 回であった。



(a)SVR01+SVR02 の動作

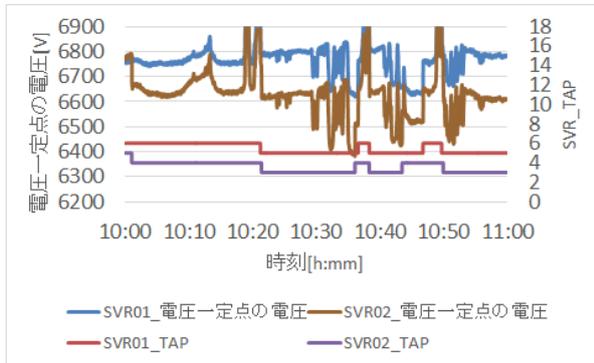


(b) 次世代 TVR+SVR02 の動作

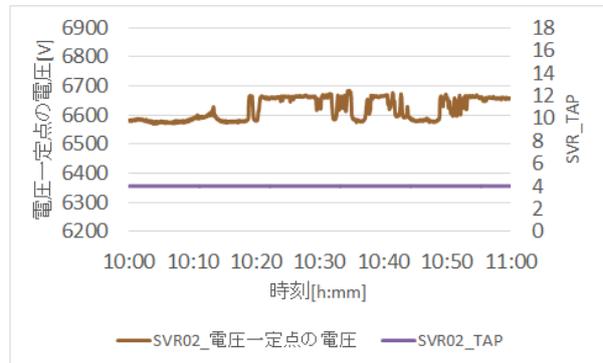
図 5.4(4)-21 試験結果(軽負荷、快晴、PV 接続率 60%の場合)

○重負荷、変動、PV 接続率 90%の場合

SVR01-SVR02 の組み合わせの場合、SVR02 のタップ動作回数は 6 回であるが、次世代 TVR-SVR02 の組み合わせの場合、SVR02 のタップ動作回数は 0 回であった。



(a)SVR01+SVR02 の動作



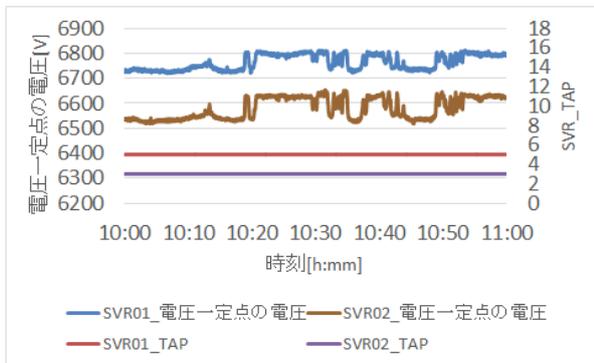
(b) 次世代 TVR+SVR02 の動作

図 5.4(4)-22 試験結果(重負荷、変動、PV 接続率 90%の場合)

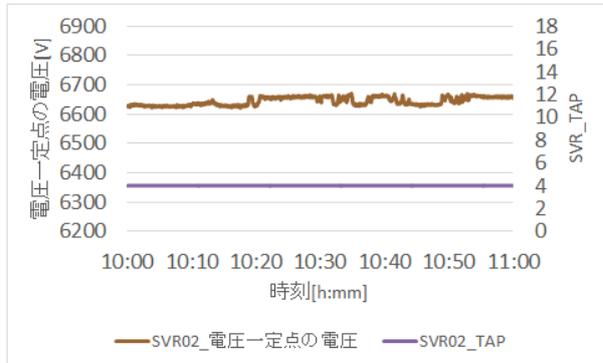
○軽負荷、変動、PV 接続率 60%の場合

SVR01-SVR02 の組み合わせの場合、SVR02 のタップ動作回数は 0 回であり、次世代 TVR-SVR02 の組み合わせの場合、SVR02 のタップ動作回数は 0 回であった。

軽負荷の場合は、SVR のタップ動作回数に変化はなかったが、重負荷のように負荷が大きく、電圧変動量が多い場合に SVR のタップ動作回数を減少させ、機器(SVR02)の寿命を延ばす可能性を確認した



(a)SVR01+SVR02 の動作



(b) 次世代 TVR+SVR02 の動作

図 5.4(4)-23 試験結果(軽負荷、変動、PV 接続率 60%の場合)

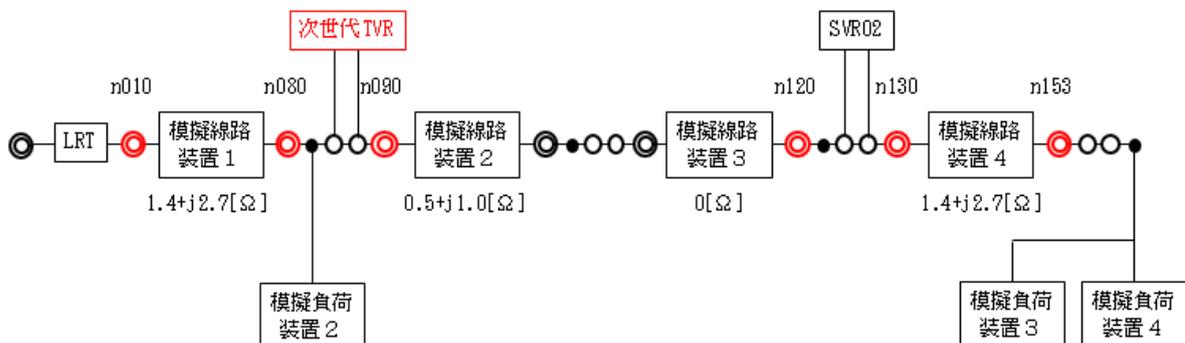


図 5.4(4)-24 試験系統(次世代 TVR+SVR02)

機器の追加設置による効果を検証した結果、本実証の条件下では、下流側に次世代 TVR を設置することで、電圧変動を抑制し、PV 接続率の増加につながることを確認した。しかし、実際の配電線では、負荷量や PV 接続量が異なるため、どこに設置するのかは都度、検討が必要である。

SVR では不感帯や動作時限の影響で電圧逸脱するような場合でも、次世代 TVR は、電圧制御する応答速度が 100ms 以内と高速のため、短い時間で細かな電圧制御をすることにより、SVR で確認した電圧逸脱を回避できたと考えられる。配電系統で電圧変動が大きい場合や SVR のタップ動作回数が多い場合に次世代 TVR を設置すると効果があると考えられる。

1. 5. 4(4)⑤実グリッドによる評価のまとめ

次世代 TVR に関する実グリッド試験を実施した結果、配電線に単機で設置された場合においても、SVR と組み合わせて設置された場合においても、十分な高速性と連続性を確認することができた。具体的には、制御性能面で既存の機器である SVR との比較では、連続性の効果が現れ、制御の不感帯による電圧逸脱がなくなり、また、組み合わせる SVR のタップ動作回数を低減することができることを確認した。

ここで、各実証試験実施時点での、各評価項目に対する実施状況のまとめを表 5.4(4)-3 に示す。表中のハッチングは、本研究開発において実施した国内調査、解析評価、装柱性試験、実証試験(実験室、模擬グリッド、実グリッド)による評価から抽出された課題を、実務者が参照しやすいように①構造特性、②ノイズ、③通信、④通常時の運転特性、⑤制御の追従性、⑥制御性能、⑦配電系統事故、⑧ループ切替、⑨系統擾乱、⑩操作、⑪メンテナンスの十一のカテゴリと其中を項目に分類し、それぞれの研究フェーズにおいて評価対象とした項目を示したものである。

1. 5. 4(5)実証試験による評価のまとめ

実証試験による評価の全体のまとめとして、大部分の評価項目において問題なく、配電系統において電圧適正化の効果を発揮することを確認できた。一方、多く評価項目の中の一部ではあるが、残された課題があった。この課題について、メーカーの設計と異なる動作をしたものを「機器設計との乖離」、もともとのメーカーの設計に問題があるものを「機器設計の課題」、今回の開発機器の問題点ではないが、将来的に電圧制御機器としてのあるべき姿に到達できていないものを「将来のあるべき姿」と分類し、以下に説明する。

1. 5. 4(5)①機器設計との乖離

1. 5. 4(5)①1)機器同士の協調方法

次世代 TVR は、基本的な動作が SVR と同一であるため、協調には苦勞しないが、自励式 SVC はそうではない。いくつかのメーカーが、自励式 SVC と SVR を協調させるための制御モードを備えており、十分協調できると説明されている。この協調方式は、どのメーカーの方式も基本的に、瞬間的な電圧変動には自励式 SVC が高速に動作し、無効電力を出力した後、変動後の電圧が維持した場合に、徐々に無効電力を減らしていくことで、後から SVR を動作させる仕組みとなっている。この制御は、単発で発生する電圧変動には有効であるが、再エネに起因する電圧変動は、雲の流れなどによるもので、周期が短く連続で変動が発生してしまうため、無効電力を減らしていく時間がない。このため、いくつかのメーカーが提案している方式では、協調が困難であり、新たな協調方式を開発する必要がある。

1. 5. 4(5)①2)瞬時電圧低下時の挙動

瞬時電圧低下時の動作は、低下時間が長くなると直流コンデンサの電圧が低下し、出力できなくなることや、低下が深くなると過電流が発生することにより、制御機器を一旦停止する。一方、瞬時電圧低下の時こそ動作して、少しでも電圧を支えてほしいというのが、本来の自励式 SVC に期待することであるように思う。

1. 5. 4(5)②機器設計の課題

1. 5. 4(5)②1)配電システムのインピーダンスへの対応

配電システムは、系統切り替えを伴う運用や近隣の需要家の移動等により、インピーダンスが大きく変化する場合がある。したがって、特定の設置位置のインピーダンスにフィルタ設計や制御応答を合わせる設計は適切ではない。最も理想的なのは、配電システムのどこに設置しても問題なく、ある程度の電圧制御特性が得られることである。しかしながら、これまでメーカーは、電力会社より設置位置の条件を指定され、その条件に合わせた設計を実施し、かつ、設置した後、問題があれば再度調整することで、導入してきた。このため、模擬グリッド試験のように、配電システムのインピーダンスを変化させる場合の設計方法が分からないまま機器を製造してしまい、想定外の問題が発生することになった。

1. 5. 4(5)②2)設置位置と短絡容量

次世代 TVR は、配電線に直列に制御回路が挿入されるため、短絡事故時の対策が必要となる。しかしながら、配電システムの最大の短絡電流(12.5kA)に耐えられる機器を製造すると、大きさ、重量、およびコストが増大してしまい現実的ではなくなる。一方、電圧制御器の設置される配電システムや位置は、短絡容量が大きい変電所付近ではなく、配電線の間よりも末端側の場合が多い。以上のように、電圧制御の効果と設置位置の短絡電流(容量)の関係を考慮した上で、機器の短絡容量を決定すべきであると思う。

1. 5. 4(5)②3)現場作業員による設定値、整定値の決定方法

各種制御機器の設定値や整定値については、潮流計算などを活用した詳細の検討を実施せず、手計算あるいは Excel シートによる計算により、現場作業員が決定するものである。解析による評価結果では、同一配電線に SVR と自励式 SVC が設置される場合、適切な制御にするためには、潮流計算や最適化計算が必要となることが明らかとなった。したがって、自励式 SVC を導入する場合、新たな協調方式を開発するか、通信システムを活用した集中制御システムの導入が必要となる。

1. 5. 4(5)②4)系統切り替え時の設定値、整定値の変更方法

系統切り替え時の設定値や整定値については、切り替えを自動的に判定し設定する機能、配電自動化と遠方制御機能により変更する機能、もしくは、系統切り替え時の標準系統ではない場合には停止する機能を具備する必要がある。しかしながら、過去にメーカーが開発した自動的に判定し設定する機能は誤判定が多く、配電自動化を活用するには多大なコストがかかるため、新たな判定、設定方式の開発が必要である。

1. 5. 4(5)③電圧調整機器の将来のあるべき姿

1. 5. 4(5)③1)単独運転検出機能との非干渉性

将来的には、定常的な電圧変動、過渡的な電圧変動、および電圧フリッカなどに有効に動作すると同時に、トレードオフの関係にある単独運転検出への影響を最小限にする方式の開発が必要である。

1. 5. 4(5)③2)瞬時電圧低下へのサポート

低圧系統に連系される住宅用の PV 等では、近年、事故時運転継続(FRT)機能が具備されたため、瞬時電圧低下時には大部分が解列しないが、FRT 機能が具備される以前の PV も少なくない。このため、電圧制御機器が瞬時電圧低下時に停止せずに無効電力を出力し、少しでも電圧を高め維持することができれば、住宅用の PV の解列数を低減できる可能性がある。

1. 5. 4(5)③3)再エネを起因とする電圧フリッカへの対応

PV 用 PCS を起因とする電圧フリッカは約 6~7Hz であり、通常の接続された箇所の電圧からフリッカを検出し、それにフィードバック制御を適用しても、電圧フリッカに追従できず、かえって、電圧フリッカを増大させてしまう可能性もある。このため、配電線の幹線にセンサを設置し、フリッカ発生時のみ、通過する無効電力を打ち消すように無効電力注入することで、追従性を上げることが必要となる。

最後に、各評価項目に対する実施状況のまとめを表 5.4(5)-1 に示す。表中のハッチングは、本研究開発において実施した国内調査、解析評価、装柱性試験、実証試験(実験室、模擬グリッド、実グリッド)による評価から抽出された課題を、実務者が参照しやすいように①構造特性、②ノイズ、③通信、④通常時の運転特性、⑤制御の追従性、⑥制御性能、⑦配電系統事故、⑧ループ切替、⑨系統擾乱、⑩操作、⑪メンテナンスの十一のカテゴリとその中を項目に分類し、それぞれの研究フェーズにおいて評価対象とした項目を示したものである。併せて、研究開発項目②の 5 年間の実施スケジュールを表 5.4(5)-2 に示す。

表 5.4(5)-1 各評価項目に対する実施状況のまとめ

項目	研究開発項目①				解析							実証評価			要件・指針(共通基盤)				
	メーカー	メーカー	電力	電力	定常解析	過渡解析	熱解析	実験室G	模擬G	装柱性	実G	メーカー	JEC等規格・基準	メーカー基準・工場試験	電力が求める仕様・試験	追加すべき仕様・試験	試験実施場所		
構造特性	大きさ(単柱)																—		
	重量(単柱)																—		
	大きさ(H柱)																—		
	重量(H柱)																—		
	形状																—		
	トランスレス																—		
	配電線との接続																—		
	耐振動																メ、三		
	寒冷地																メ、三		
	耐塩																メ、三		
	耐雷																メ、三		
冷却方式																—			
ノイズ	電気ノイズ																メ、三		
	騒音																メ、三		
通信	遠方制御子局																—		
通常時の運転特性	系統条件(インピーダンス)																三		
	微小な電圧変動																三		
	電圧不平衡																三		
	高調波																三		
制御の追従性	SVRとの協調																三		
	LRT, SVR																三		
	負荷変動																三		
	励磁突入電流																三		
	分散形電源出力変動																三		
制御性能	ハンテング																三		
	定常制御																メ、三		
	瞬時電圧低下サポート																三		
	フリッカ抑制																三		
配電系統事故	不平衡補償																三		
	短絡																三		
	地絡																三		
	断線																三		
	単独運転																三		
ループ切替	復電時の再閉路																三		
	電圧変動																三		
	位相変動																三		
系統擾乱	他回線の整定等																三		
	瞬時電圧低下																三		
	周波数ステップ																三		
操作	周波数ランプ																三		
	整定																—		
	モード切替																—		
メンテナンス	効果の見える化																—		
	点検時																—		
	保守時																—		

要件・指針(共通基盤)については、国内調査、解析評価、装柱性試験、実証試験(実験室、模擬グリッド、実グリッド)による評価の全ての結果より導かれた評価結果である。表中の文字による表記の意味は以下の通りである。

メ:メーカーの工場で行うべきor出来るもの、

三:第三者機関でないと出来ないもの、

—:評価対象外

表 5.4(5)-2 研究開発項目②の5年間の実施スケジュール

実施内容	平成26年度(2014年度)				平成27年度(2015年度)				平成28年度(2016年度)				平成29年度(2017年度)				平成30年度(2018年度)			
	第1Q	第2Q	第3Q	第4Q																
1.性能・信頼性評価法の検討	取りましょめ																			
(1)性能評価法の検討	取りましょめ																			
通常時の運転特性	電中研(関西・九州)																			
配電系統の事故時の動作特性	電中研(関西・九州)																			
ループ切替時の動作特性	電中研(関西・九州)																			
電力系統擾乱時の動作特性	電中研(関西・九州)																			
過電圧や過負荷に対する耐量	電中研(関西・九州)																			
機器寿命の評価	電中研(関西・九州)																			
2.配電システムの設計指針の検討	電中研(関西・九州)																			
(1)配電制御機器としての要求仕様	電中研(関西・九州)																			
機器の仕様(質量・体積などの設置面)に関する要求	電中研(関西・九州)																			
機器の仕様(EMC等外部環境影響回避面)に関する要求	電中研(関西・九州)																			
通信性能への要求	電中研(関西・九州)																			
配電制御機器の実態調査	電中研(関西・九州)																			
解折ツール(潮流計算)の改良	電中研(関西・九州)																			
解折モデル(潮流計算)の構築	電中研(関西・九州)																			
システム構成・運用方式解析・評価	電中研(関西・九州)																			
3.機器故障時の対応法・メンテナンス性評価法の検討	電中研(関西・九州)																			
4.模擬グリッドでの実証評価	電中研(関西・九州)																			
(1)模擬グリッドによる実証項目・方法の検討	電中研(関西・九州)																			
潮流計算による電圧制御方式の実証項目の検討	電中研(関西・九州)																			
実験室グリッドの構築	電中研(関西・九州)																			
瞬時値解折モデルの構築(XTAP)	電中研(関西・九州)																			
制御方式の評価	電中研(関西・九州)																			
瞬時値解析による性能・信頼性評価項目の検討	電中研(関西・九州)																			
2.実機グリッドの構築	電中研(関西・九州)																			
(3)模擬グリッド実証試験の実施と評価	電中研(関西・九州)																			
施工性・操作性の実証評価	電中研(関西・九州)																			
機能・信頼性の実証評価	電中研(関西・九州)																			
5.実グリッドでの実証評価	電中研(関西・九州)																			
(1)実グリッド実証項目・方法の検討	電中研(関西・九州)																			
2.実グリッドの整備	電中研(関西・九州)																			
(3)実証試験の実施と評価	電中研(関西・九州)																			
6.検討作業の実施	電中研(関西・九州)																			
実験設備の構築	電中研(関西・九州)																			
開発機器の提供(SVC)	電中研(関西・九州)																			
開発機器の提供(CVC)	電中研(関西・九州)																			
要求仕様のフィードバック	電中研(関西・九州)																			

1.5.5 検討委員会の実施

1.5.5(1)検討委員会の設置と目的

関連業界、大学有識者などをメンバー(表 5.5-1 参照)とする検討委員会を設置し、研究開発計画、結果、今後の方向性等、効果的かつ効率的なプロジェクト推進に向けて審議、検討した。

また、検討委員会には研究開発項目②の実施者だけでなく、研究開発項目①の実施者である富士電機、東芝 ESS、北芝電機のメーカーも出席し、電圧制御機器開発の進捗報告、及び共有化を図り、研究開発項目①の検討委員会としても機能する取り組みを行った。

表 5.5-1 検討委員会構成メンバー

	氏名 ^{※1}	所属・役職 ^{※2}
委員長	奈良 宏一 <small>なら こういち</small>	茨城大学 名誉教授
委員	△饗場 潔 <small>あいば きよし</small>	東京電力パワーグリッド株式会社 配電部 配電技術グループマネージャー
	△佐野 健太 <small>さの けんた</small>	同上
	△小林 直樹 <small>こばやし なおき</small>	東京電力パワーグリッド株式会社 配電部 配電系統技術グループマネージャー
	○吉永 淳 <small>よしなが じゅん</small>	同上
"	△越中 洋 <small>こしなか ひろし</small>	電気事業連合会 工務部 副長
	○森 成人 <small>もり あきひと</small>	同上
"	清水 洋隆 <small>しみず ひろたか</small>	職業能力開発総合大学校 能力開発院 新成長分野系 電気環境エネルギーユニット 教授
"	田中 和幸 <small>たなか かずゆき</small>	富山大学 大学院理工学研究部 客員教授
"	舟木 剛 <small>ふなき つよし</small>	大阪大学 大学院工学研究科 教授

※1 △印は途中退任、○印は途中就任を示す

※2 在任時の所属・役職を記載

1. 5. 5(2)検討委員会の実施実績

検討委員会は、合計 12 回開催し(平成 26 年度:2 回、平成 27 年度:2 回、平成 28 年度:2 回、平成 29 年度:3 回、平成 30 年度:3 回)、審議を重ねた。また、検討委員会と合わせて各種試験状況も視察した。表 5.5-2 に、検討委員会での主な審議内容を示す。

表 5.5-2 検討委員会の実施状況

	開催日	主な審議内容	備考
第 1 回	H26. 9.29	<ul style="list-style-type: none"> ・全体計画(実施項目、検討体制、スケジュール) ・開発機器の設計概要 ・電圧シミュレーションモデルの設定と評価方法 	
第 2 回	H27. 1.26	<ul style="list-style-type: none"> ・開発機器の基本仕様 	
第 3 回	H27. 5.15	<ul style="list-style-type: none"> ・開発機器の信頼性評価方法 ・実験室グリッド設備の構成と試験項目 	
第 4 回	H28. 2. 2	<ul style="list-style-type: none"> ・開発機器の基本仕様と信頼性評価方法 ・模擬グリッド設備での試験項目 	
第 5 回	H28. 5.25	<ul style="list-style-type: none"> ・開発機器の要求仕様と導入効果 ・中間評価委員会での報告内容 	・横国大視察
第 6 回	H28.12. 2	<ul style="list-style-type: none"> ・開発機器の設計見直しに伴う計画変更 ・熱解析による信頼性評価の方向性 ・中間評価委員会コメントを受けた今後の取組方針 	
第 7 回	H29. 6. 2	<ul style="list-style-type: none"> ・開発機器の改良内容と今後のスケジュール ・模擬グリッド設備での試験計画 	
第 8 回	H29.11.29 ~30	<ul style="list-style-type: none"> ・機器開発状況を考慮した研究開発項目②の今後の進め方 	・電中研赤城地区視察
第 9 回	H30. 2. 5	<ul style="list-style-type: none"> ・機器開発状況を考慮した研究開発項目②の今後の進め方 	
第 10 回	H30. 6.15	<ul style="list-style-type: none"> ・模擬グリッド試験の評価項目 ・各種集中制御方式の特徴と得失評価 ・次世代 TVR 適用時(SVR と取替)の評価と有効性 	
第 11 回	H30.11. 1 ~ 2	<ul style="list-style-type: none"> ・模擬グリッド、実グリッド試験状況 ・SVC パラメータの設定検討 ・成果報告書の目次と構成 	・九州電力薩摩川内試験場視察
第 12 回	H31. 1.25	<ul style="list-style-type: none"> ・各種最終試験結果 ・最終報告書の概要と研究開発項目①実施者要望への対応案 	

1. 5. 6 成果のまとめと普及について

1. 5. 6(1) 成果のまとめ

国内および国外への調査の実施、電圧制御機器・配電システムの構成法の検討のための計算機シミュレーションの実施、実験室グリッド、模擬グリッド、および実グリッドにおける検証試験の実施により、以下の内容を検討した。

- ① 電力会社のニーズ、メーカーの設計方針を調査・整理
- ② 定常解析によりパワエレ機器の有効性を抽出
- ③ 電氣的にも熱的にも単柱仕様の難しさを明確化
- ④ 実験室グリッドでの検証試験により、マルチな機能のパワエレ機器の難しさを明確化
- ⑤ 模擬グリッドでの検証試験により、規格・基準、電力会社指定以外の確認項目を抽出
- ⑥ 実グリッドでの検証試験により、実配電線への導入の可能性を確認

以上の検討結果を踏まえ、現状のパワエレ機器の有効性の明確化、将来必要な機能の抽出、これらを確認できる評価項目と試験方法を取りまとめることができた。

1. 5. 6(2) 普及の反映について

1. 5. 6(2)① 成果の反映方法

本研究開発の成果として取りまとめた現状パワエレ機器の課題や将来的な課題を、ユーザーである電力会社とメーカーと共有し、コストを考慮しながら解決策を検討する必要がある。この検討結果を基に、パワエレ機器の仕様や性能とその確認法について指針を定めることで、ユーザーのアレルギーを解消し、ニーズに合致したパワエレ機器が開発することができるようになる。最終的に、配電システムの電圧制御が高度化および高速化し、さらなる再エネの普及・拡大を実現できる可能性が高まる。

1. 5. 6(2)② 電圧制御機器のあるべき姿

1. 5. 6(2)②1) パワエレ活用の配電システム用機器の望ましい仕様

- ① 長寿命: 20 年程度
- ② 基本はメンテナンスフリー: 消耗品の交換は必要
- ③ 小型・軽量: 可能であれば単柱仕様、耐量や機能とのバランス
- ④ 比較的安価: 既存の SVR と同等+ α レベル
- ⑤ 静寂性・低ノイズ

1. 5. 6(2)②2) パワエレ活用の配電システム用機器の望ましい動作

- ① 必要な時に確実に動作: 再エネによる電圧変動対策
- ② 不必要な時は速やかに停止: 単独運転検出への影響など余計なことをしない
- ③ 既設の電圧制御機器と干渉しない: SVR との干渉
- ④ 設定・整定が容易または直観的に可能: 現場作業に耐え得る機器
- ⑤ 高速性と連続性を活かした機能の追加: FRT サポート機能、フリッカ抑制

1.5.7 おわりに

本研究開発では、配電系統側の電圧制御機器に SiC デバイスや新たな制御方法などの新技術を適用することで、再エネ電源のさらなる導入を実現する技術開発ができたものと考えている。一方で、配電系統側のみで対策する場合、条件によっては高コストとなる可能性がある。また、今後は、再エネ電源のみならず、蓄電池システムや電気自動車の系統接続(V2G)の導入が加速する可能性がある。これら全てに対応するためには、配電系統側の対策に加えて、需要家側の対策も必要となってくる。需要家側では、再エネ電源、蓄電池システム、電気自動車の共通な機器として、系統連系用のパワーコンディショナ(PCS)が必ずあり、この PCS の高機能化や活用した高機能システムの開発が望まれている。これらについては、今後の我が国の技術開発に期待したい。

本研究開発の実施にあたり、奈良委員長をはじめ各委員の皆様には、計画通りに進まない中、的確かつ有益な助言をしていただき、心より感謝いたします。また、研究開発項目①および③の実施者の皆様には、技術的な助言をしていただくことで、事業全体の成果を創出でき、感謝の意を表します。