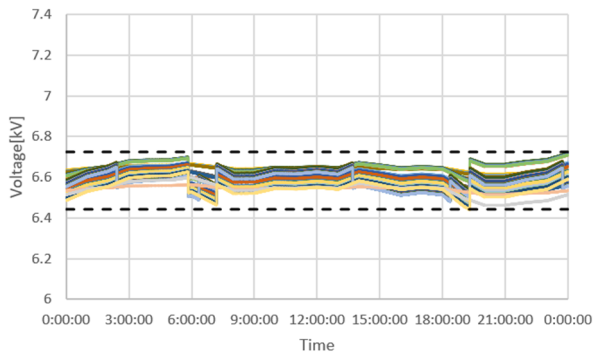
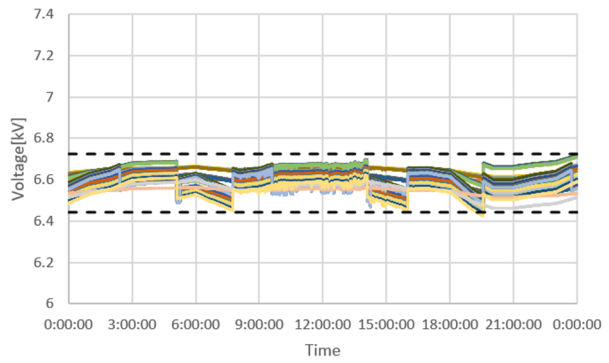


OD22 系統, PV 力率 0.95, 分散配置, SVR-SVR-SVR

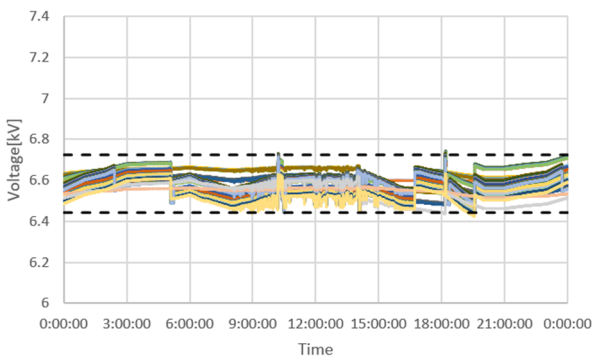
(上: 電圧分布, 下: タップ位置)



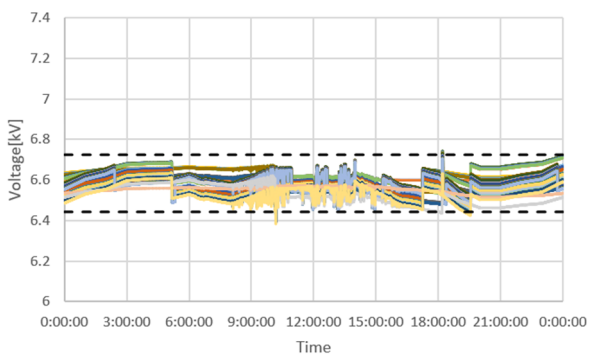
(a) PV 0%



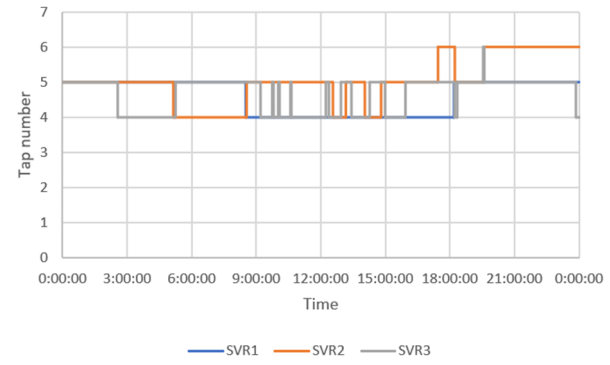
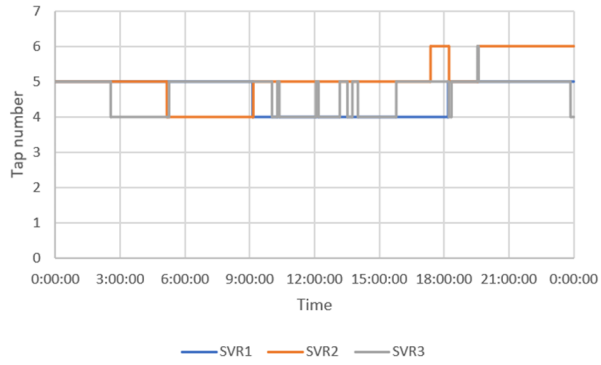
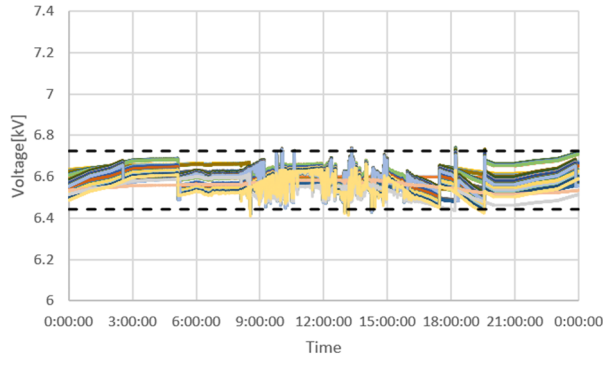
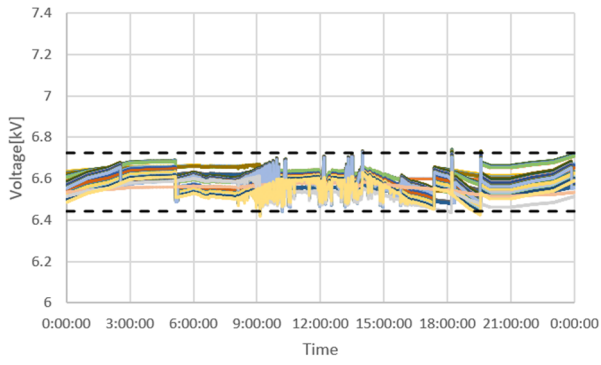
(b) PV 10%



(c) PV 20%

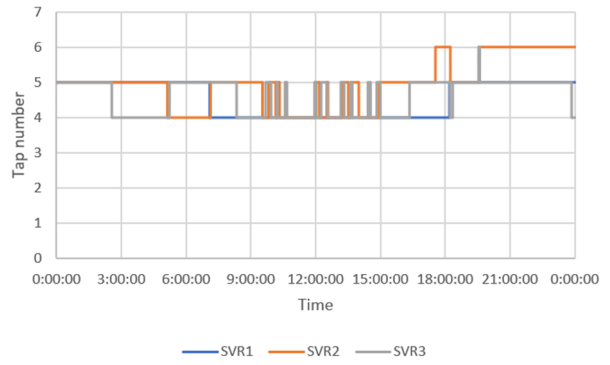
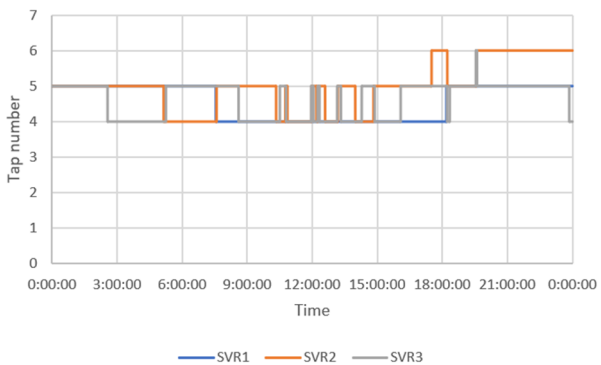
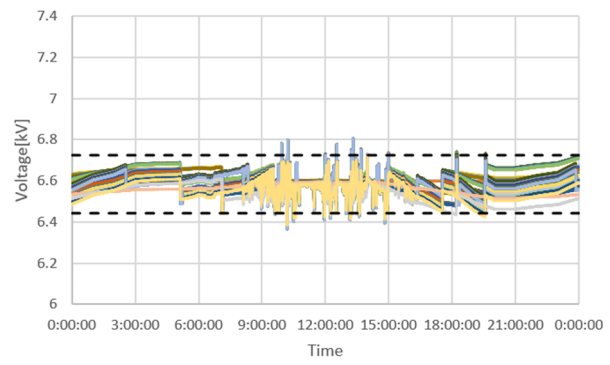
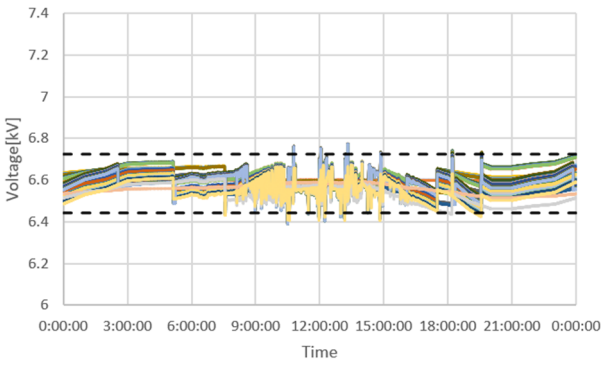


(d) PV 30%



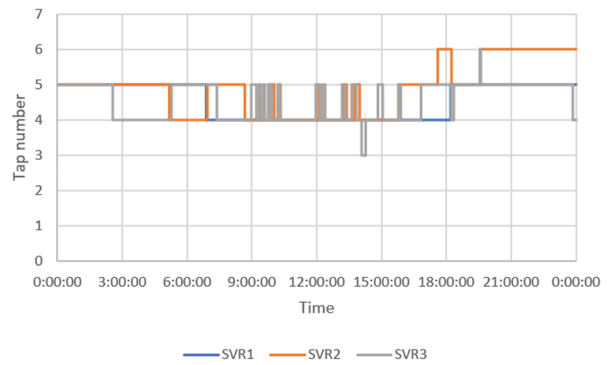
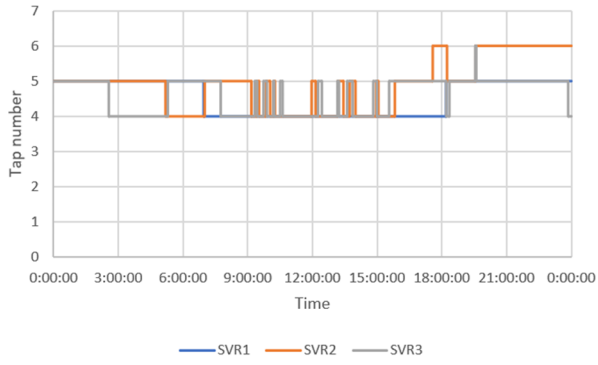
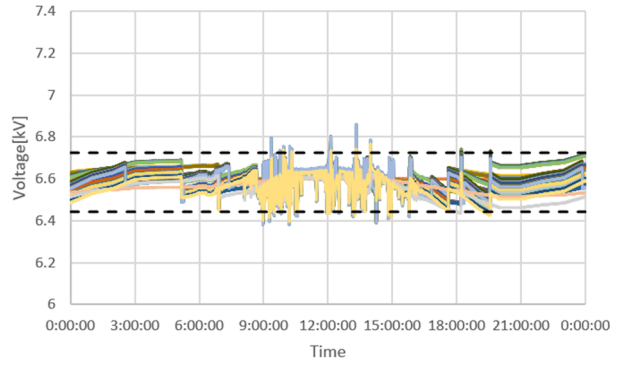
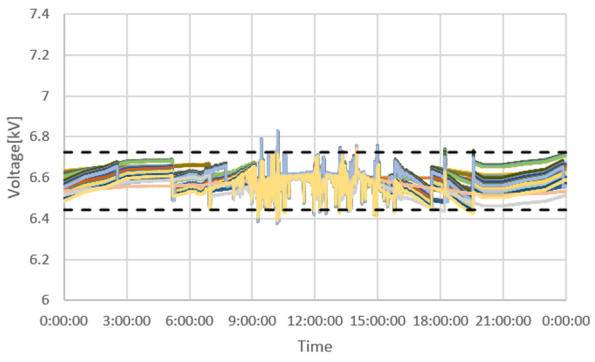
(e) PV 40%

(f) PV 50%



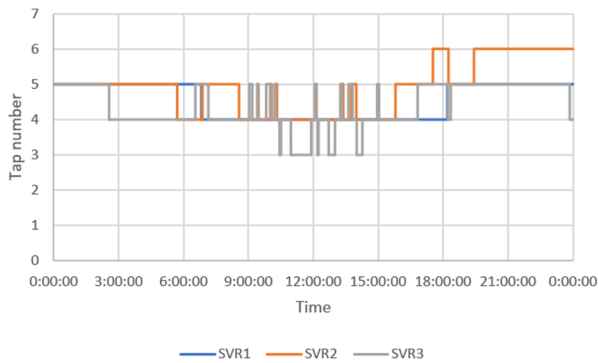
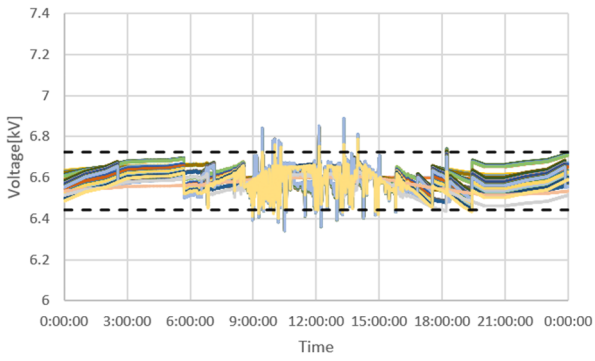
(g) PV 60%

(h) PV 70%



(i) PV 80%

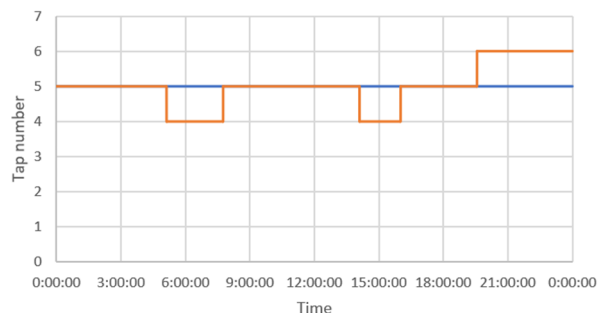
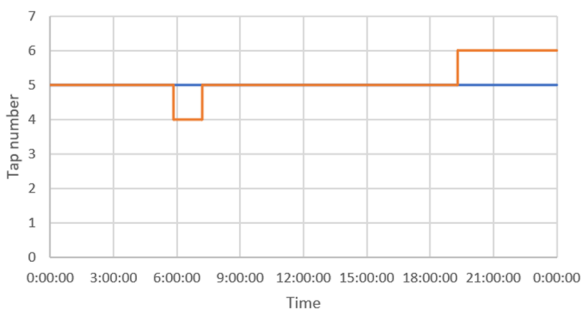
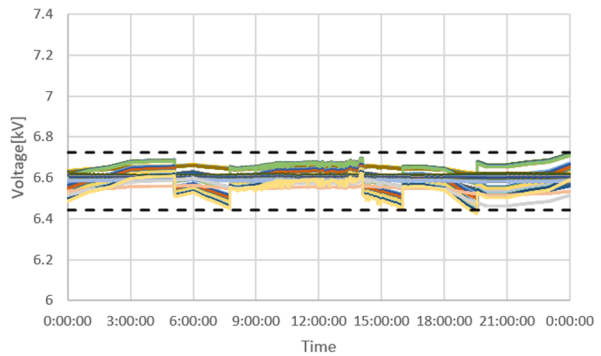
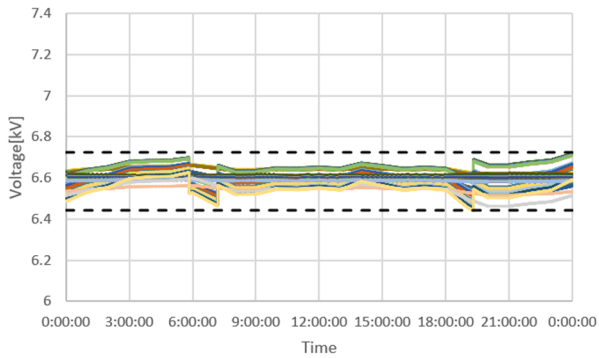
(j) PV 90%



(k) PV 100%

OD22 系統, PV 力率 0.95, 分散配置, SVR-SVR-TVR

(上: 電圧分布, 下: タップ位置)

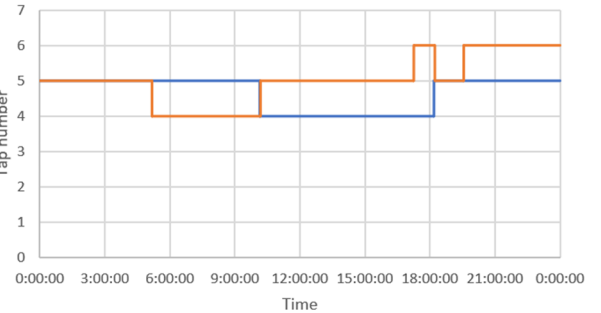
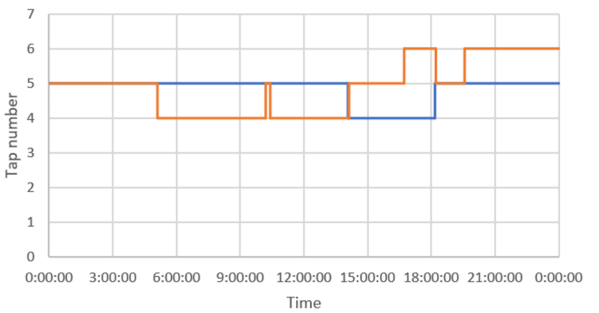
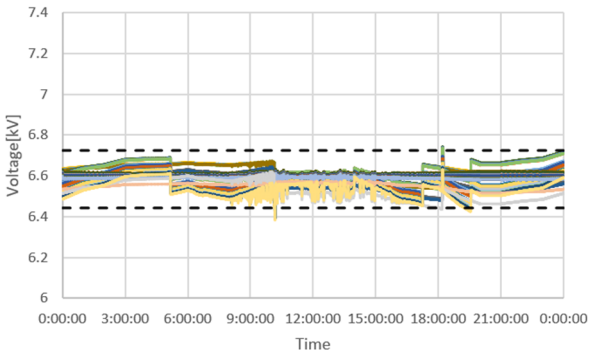
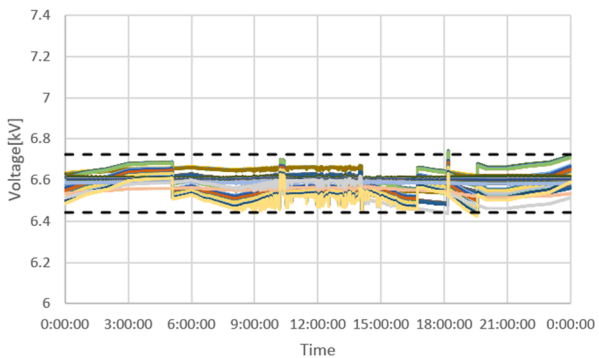


— SVR1 — SVR2

— SVR1 — SVR2

(a) PV 0%

(b) PV 10%

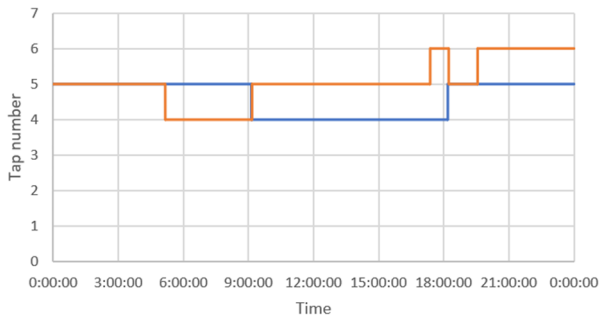
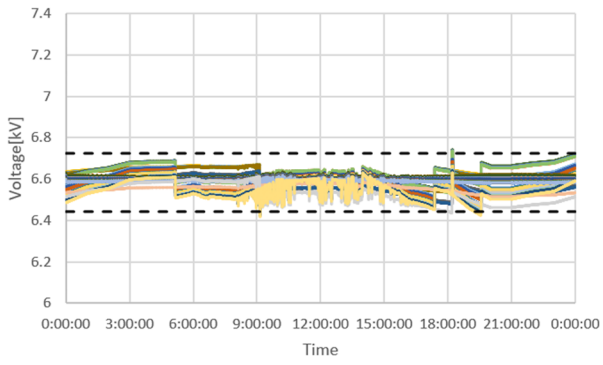


— SVR1 — SVR2

— SVR1 — SVR2

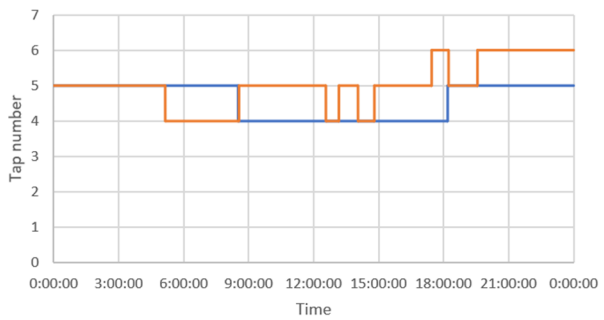
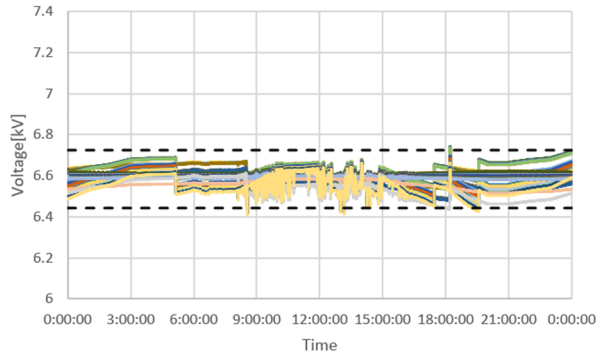
(c) PV 20%

(d) PV 30%



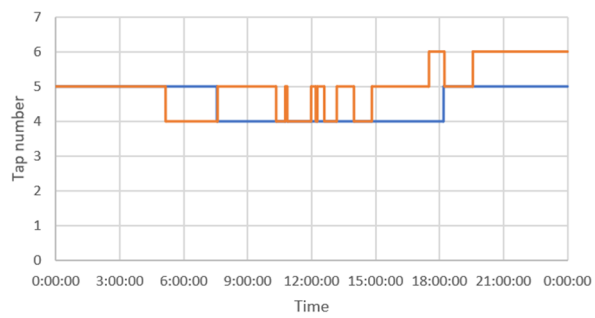
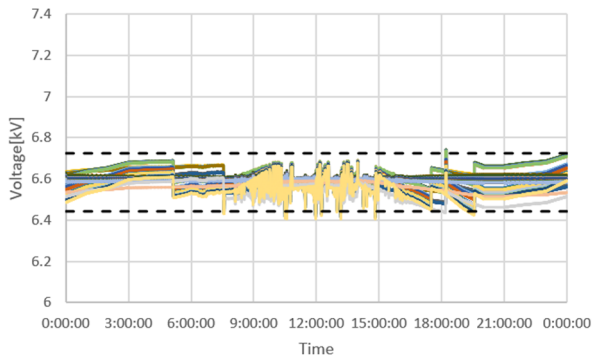
— SVR1 — SVR2

(e) PV 40%



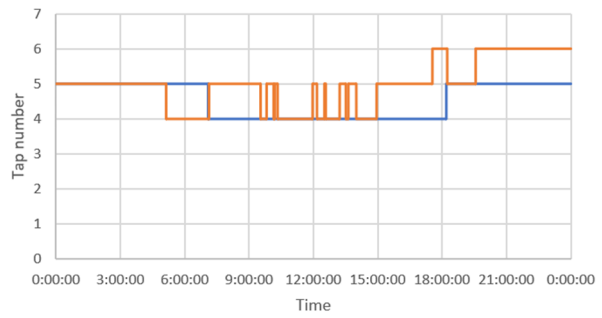
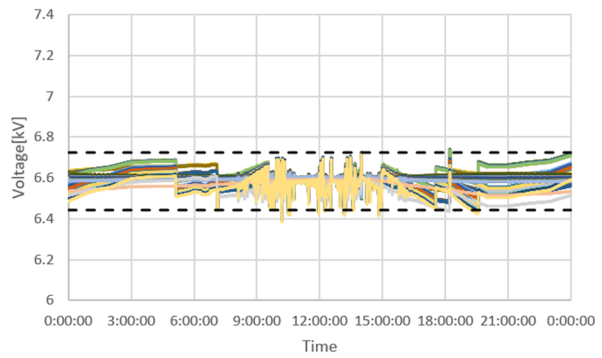
— SVR1 — SVR2

(f) PV 50%



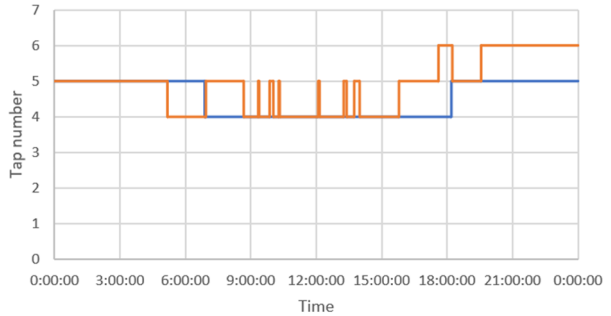
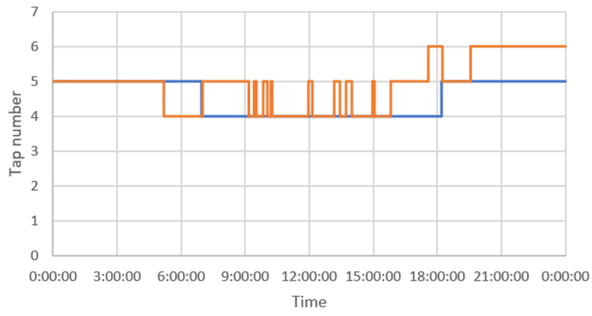
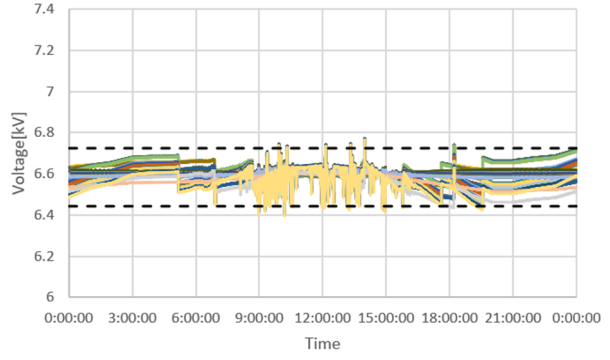
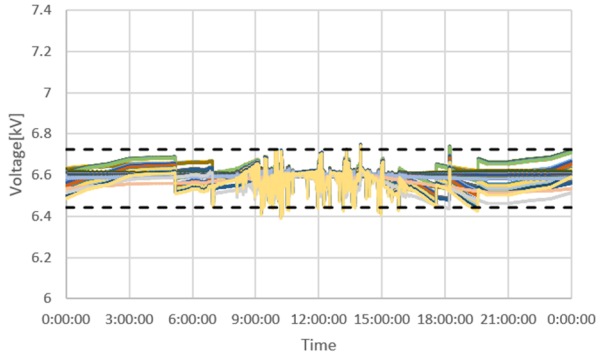
— SVR1 — SVR2

(g) PV 60%



— SVR1 — SVR2

(h) PV 70%

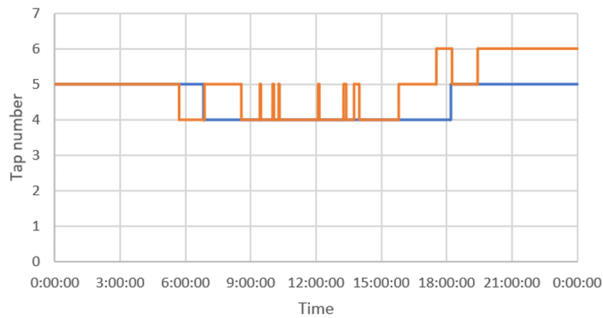
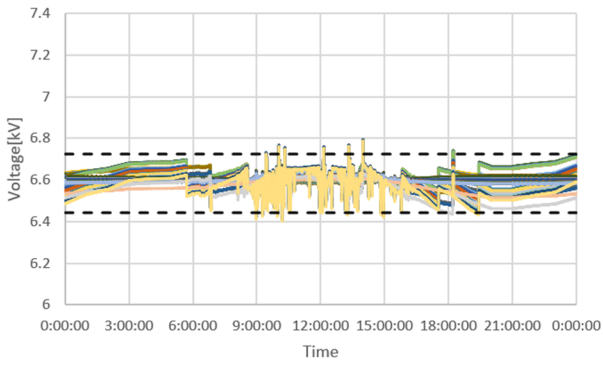


— SVR1 — SVR2

— SVR1 — SVR2

(i) PV 80%

(j) PV 90%

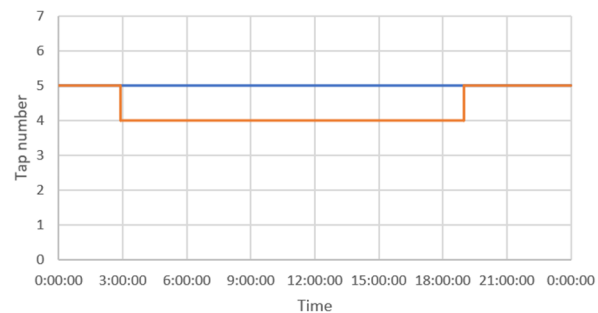
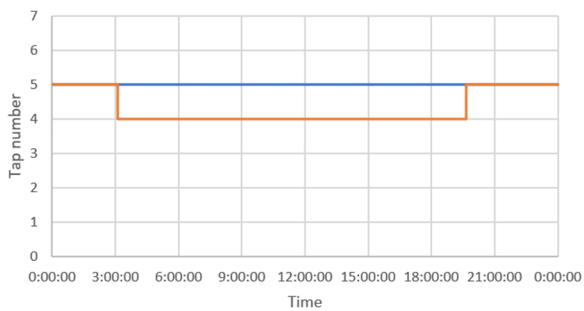
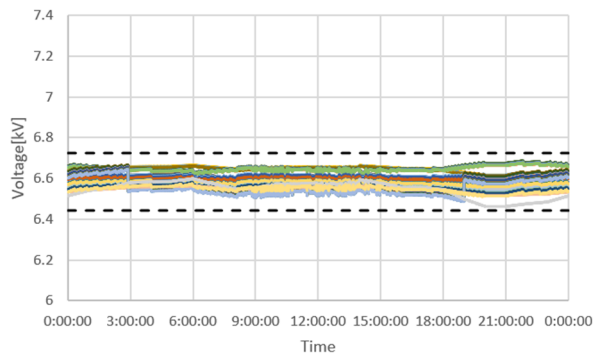
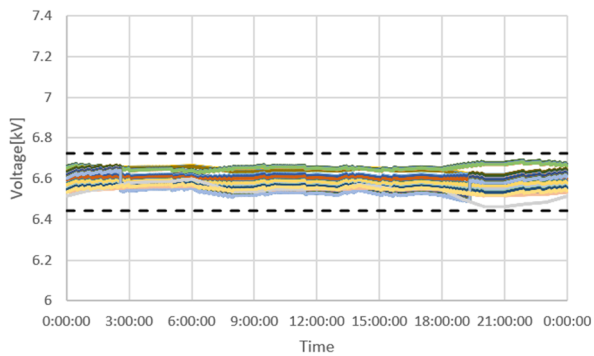


— SVR1 — SVR2

(k) PV 100%

OD22 系統, PV 力率 0.95, 分散配置, SVR-TVSR-SVR

(上: 電圧分布, 下: タップ位置)

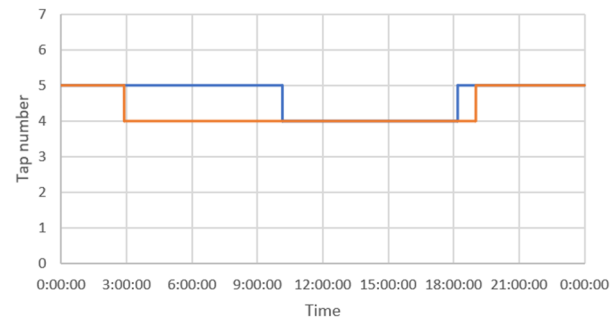
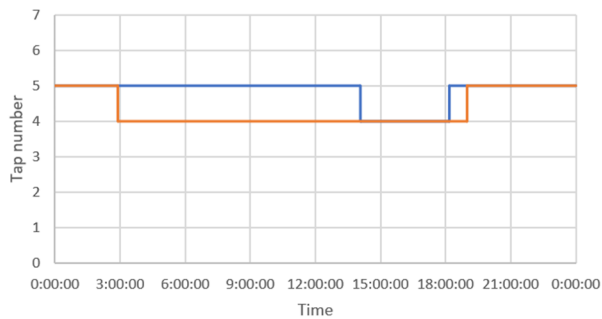
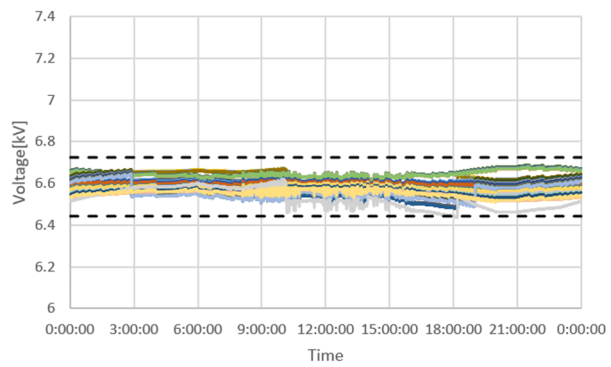
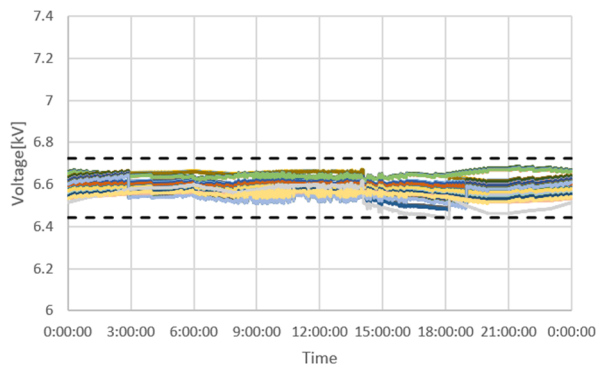


— SVR1 — SVR2

— SVR1 — SVR2

(a) PV 0%

(b) PV 10%

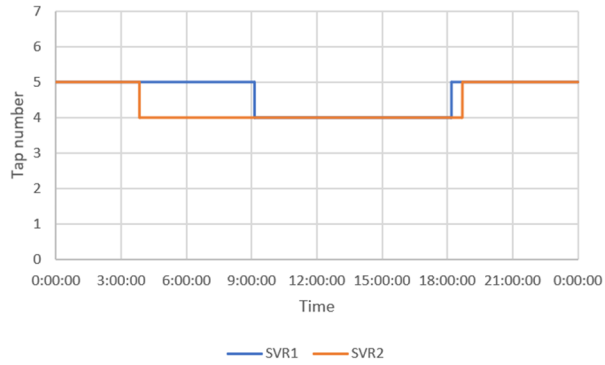
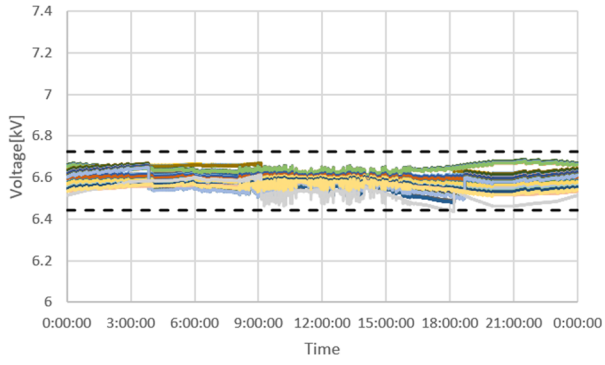


— SVR1 — SVR2

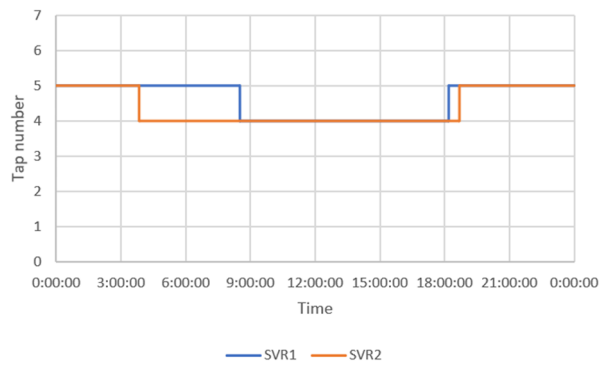
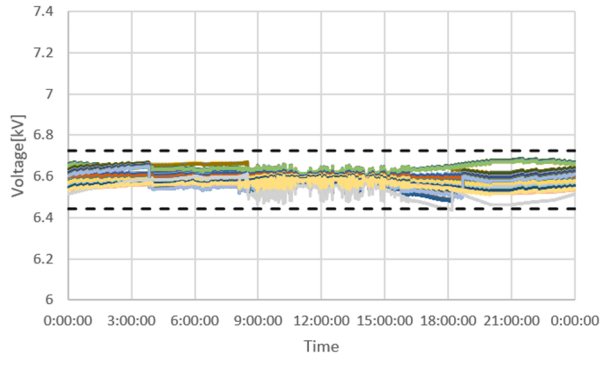
— SVR1 — SVR2

(c) PV 20%

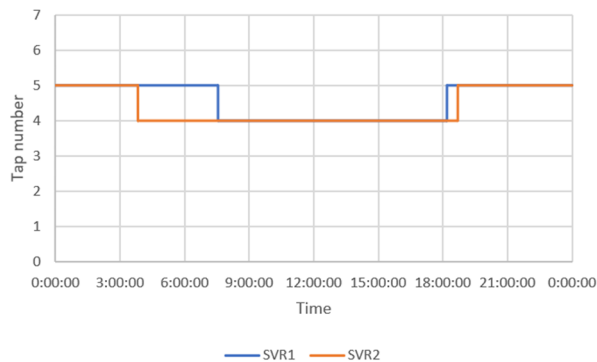
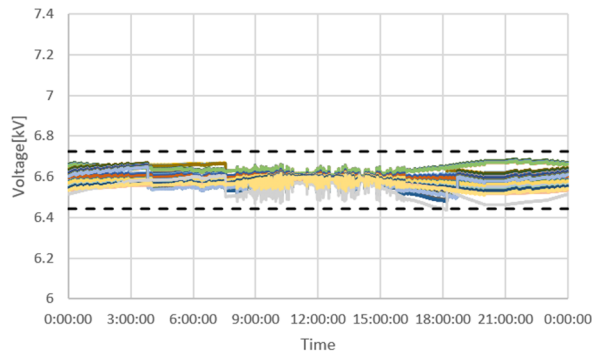
(d) PV 30%



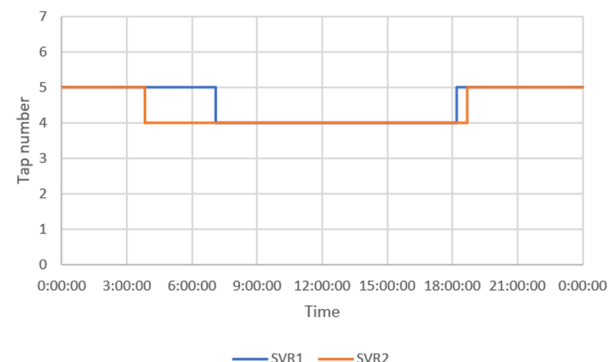
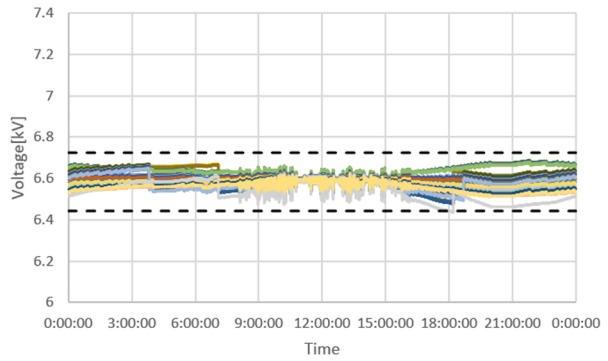
(e) PV 40%



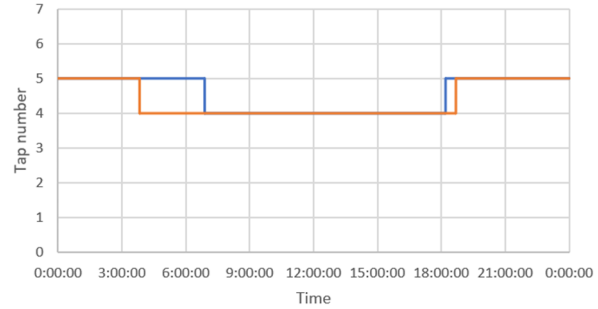
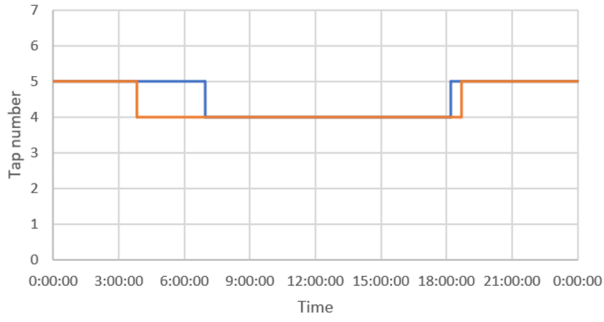
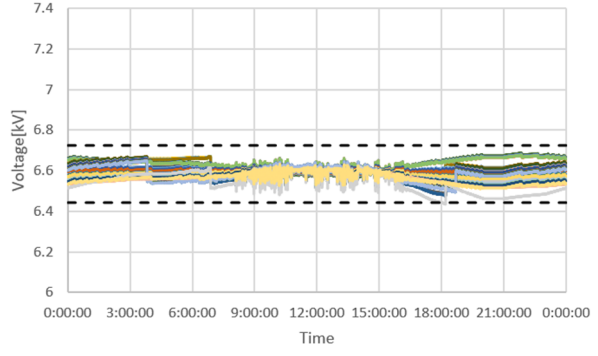
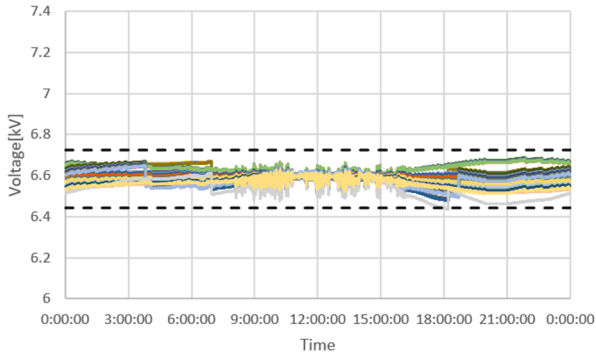
(f) PV 50%



(g) PV 60%



(h) PV 70%

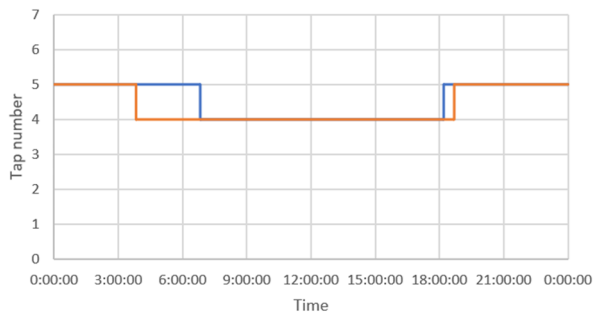
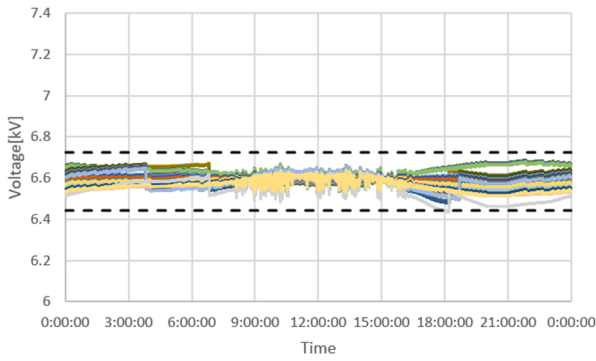


— SVR1 — SVR2

— SVR1 — SVR2

(i) PV 80%

(j) PV 90%

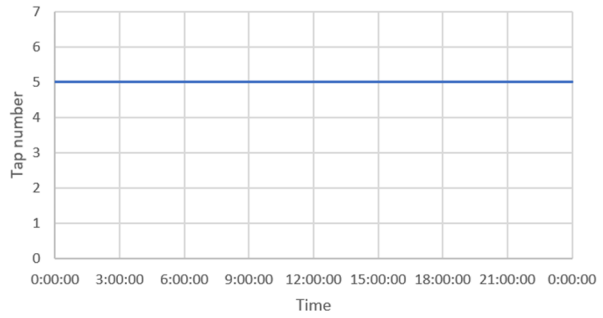
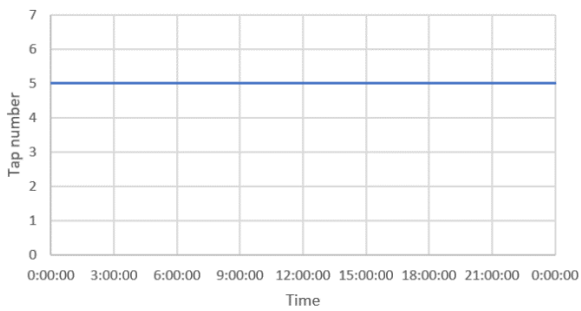
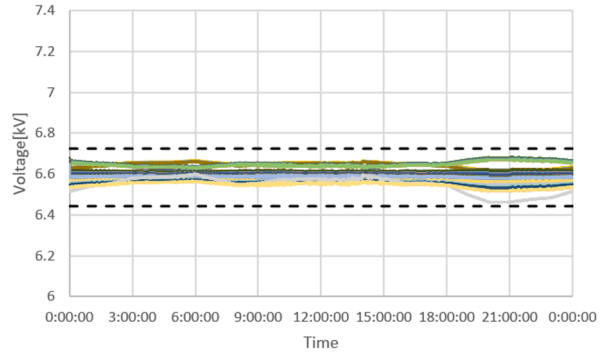
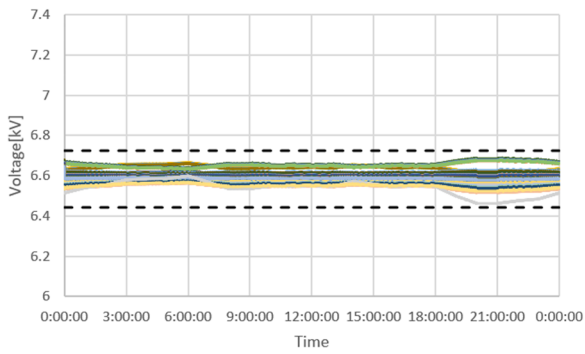


— SVR1 — SVR2

(k) PV 100%

OD22 系統, PV 力率 0.95, 分散配置, SVR-TV_R-TV_R

(上: 電圧分布, 下: タップ位置)

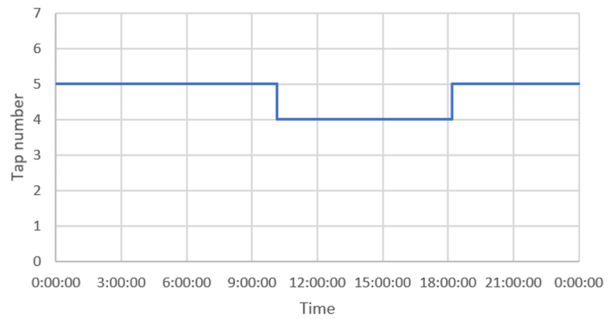
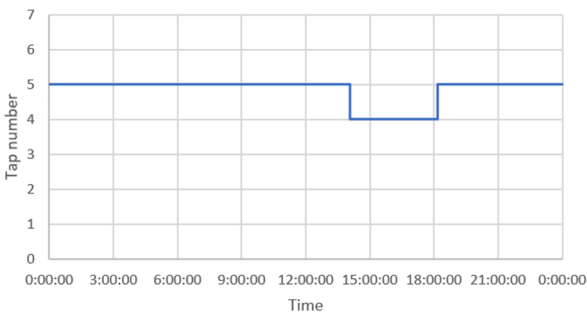
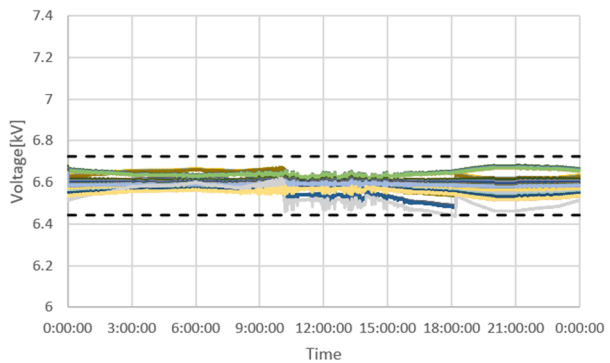
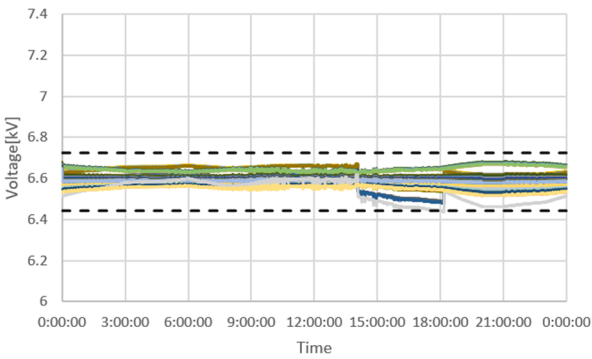


— SVR1

— SVR1

(a) PV 0%

(b) PV 10%

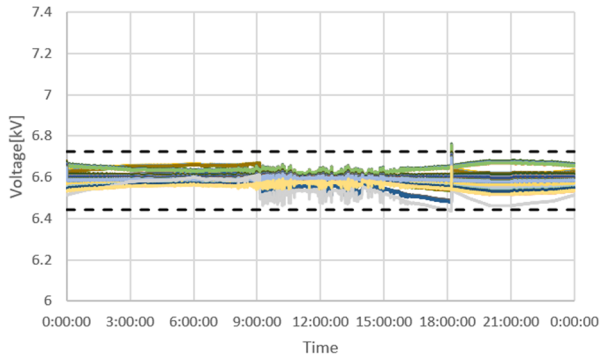


— SVR1

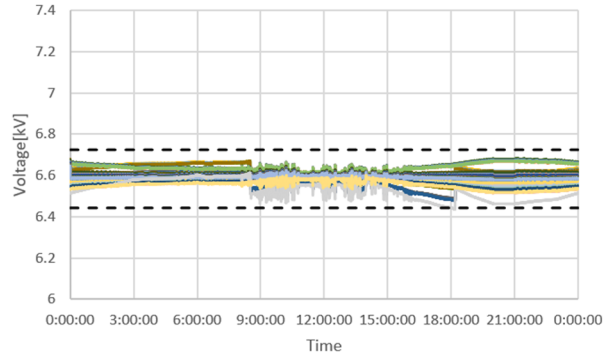
— SVR1

(c) PV 20%

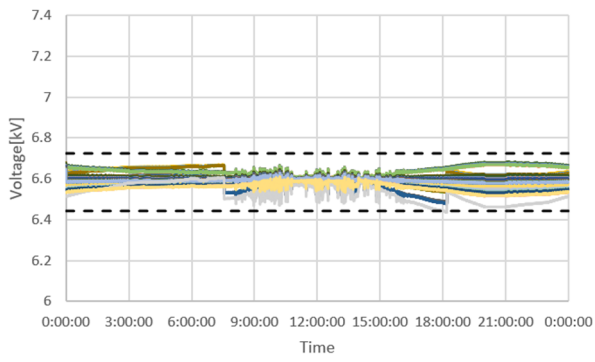
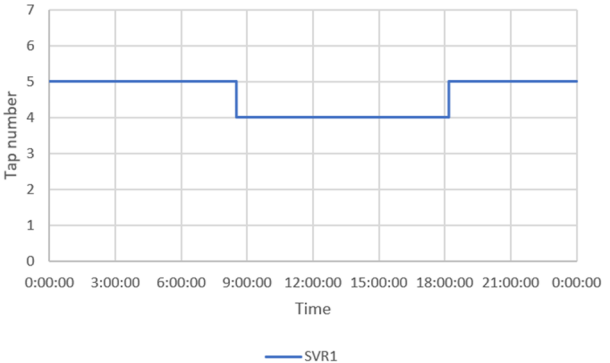
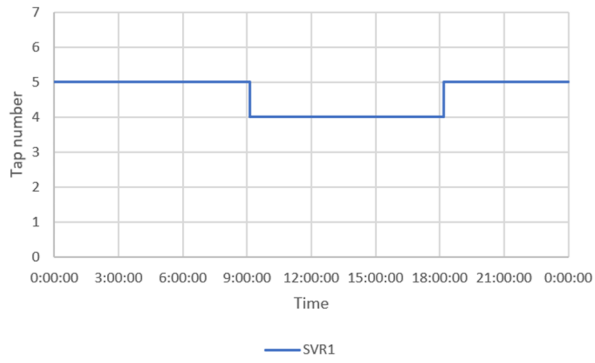
(d) PV 30%



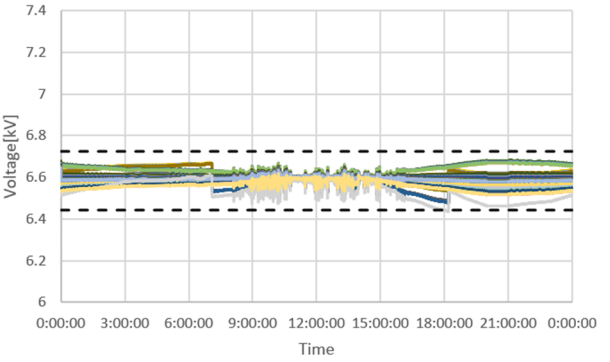
(e) PV 40%



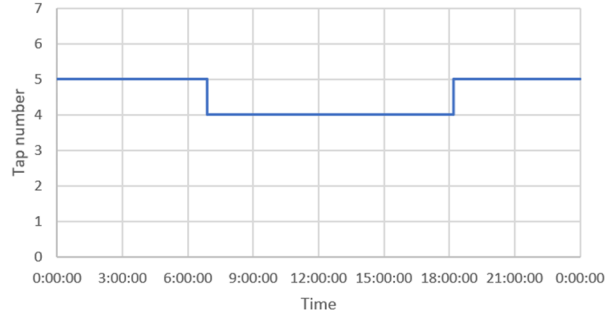
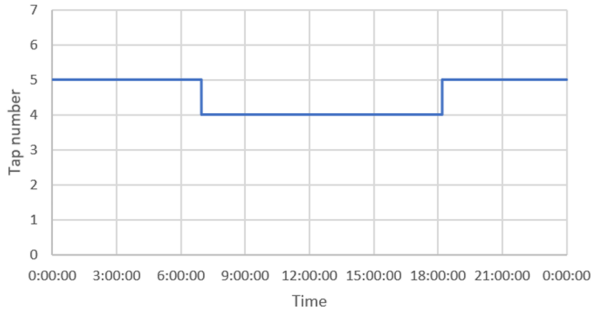
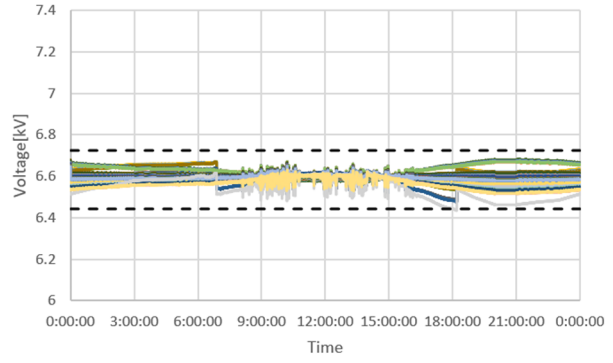
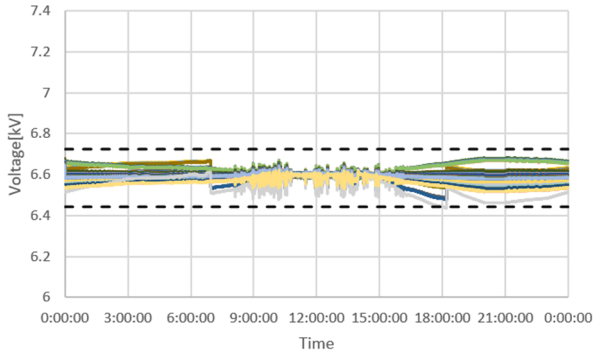
(f) PV 50%



(g) PV 60%



(h) PV 70%

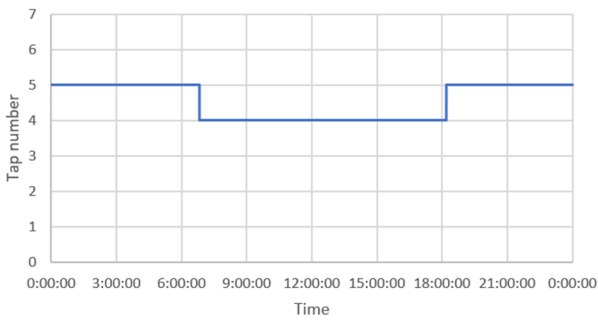
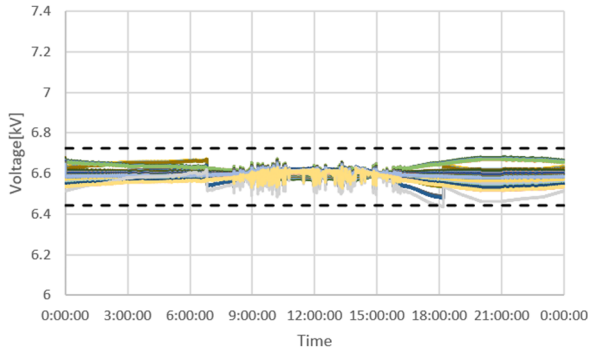


— SVR1

(i) PV 80%

— SVR1

(j) PV 90%

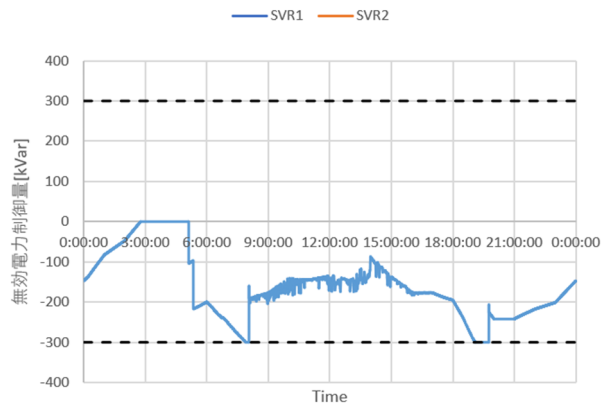
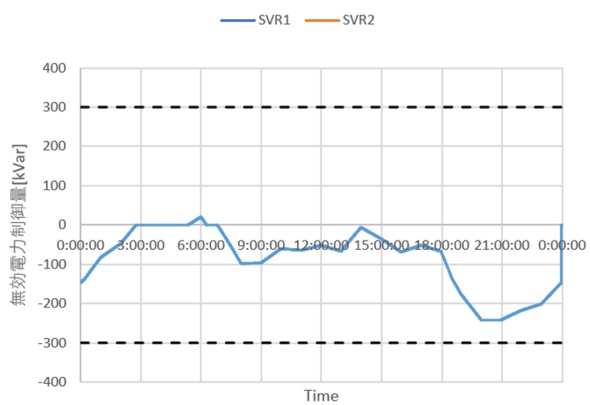
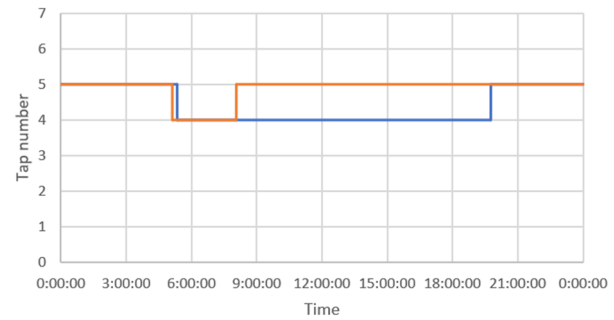
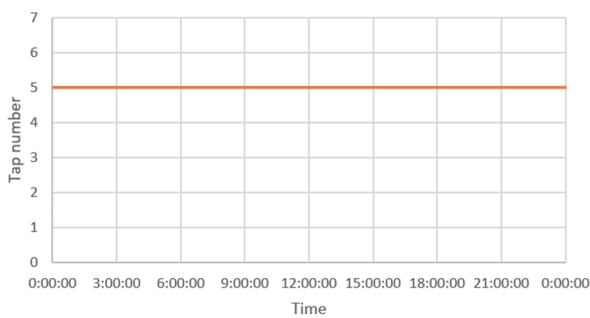
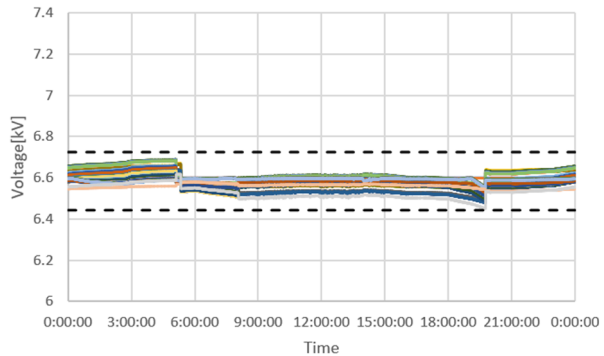
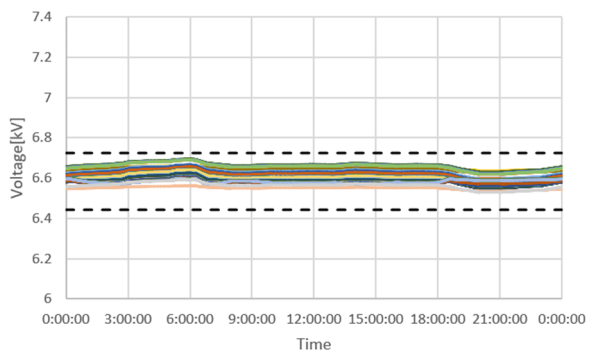


— SVR1

(k) PV 100%

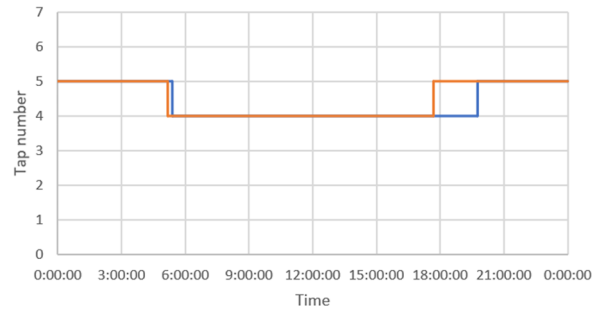
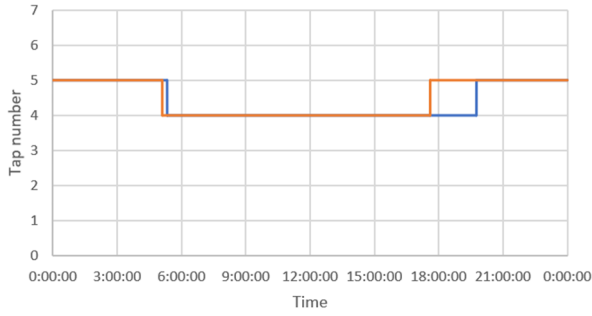
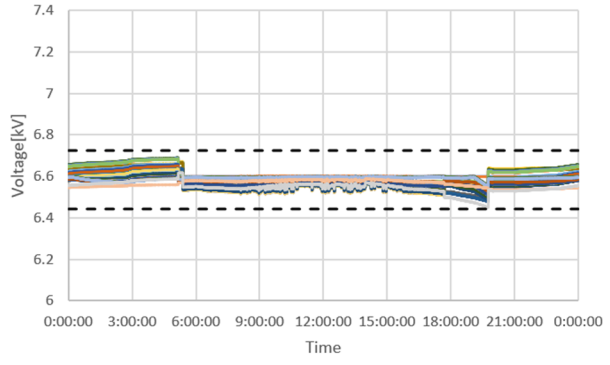
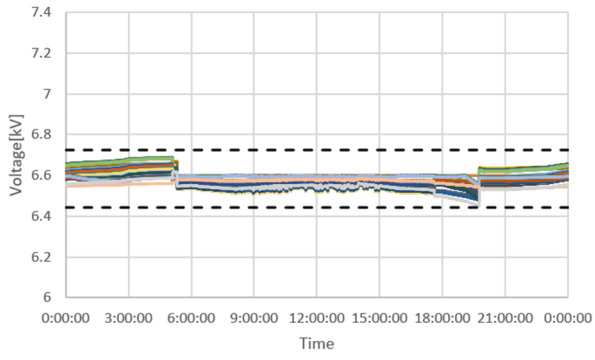
OD22 系統, PV 力率 0.95, 分散配置, SVR-SVR-SVC

(上: 電圧分布, 中: タップ位置, 下: SVC の無効電力)



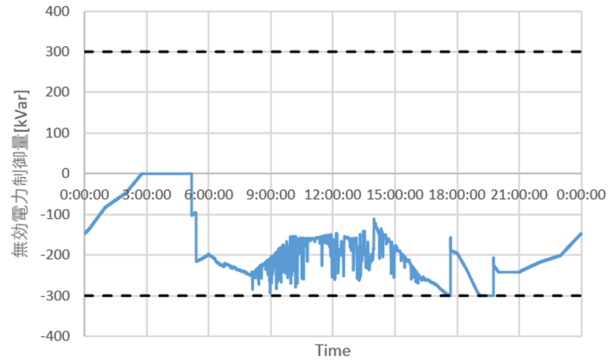
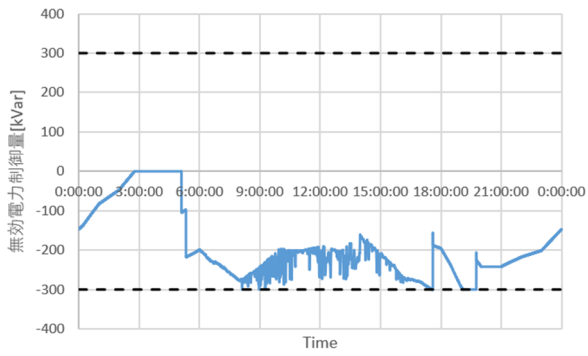
(a) PV 0%

(b) PV 10%



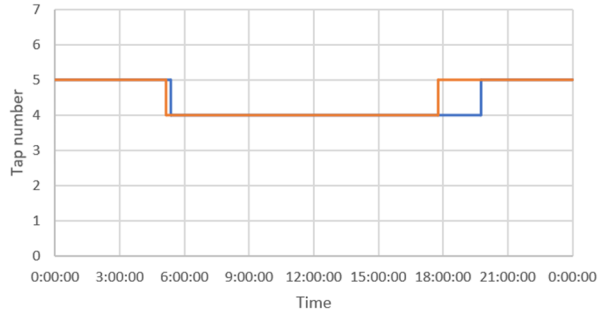
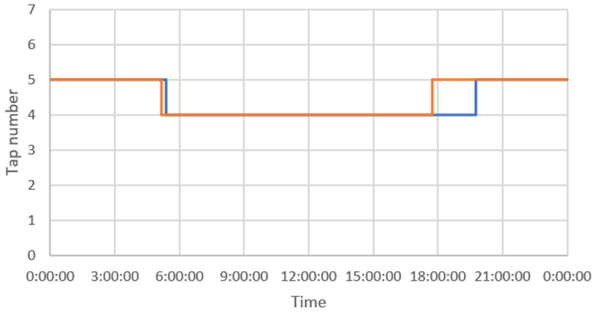
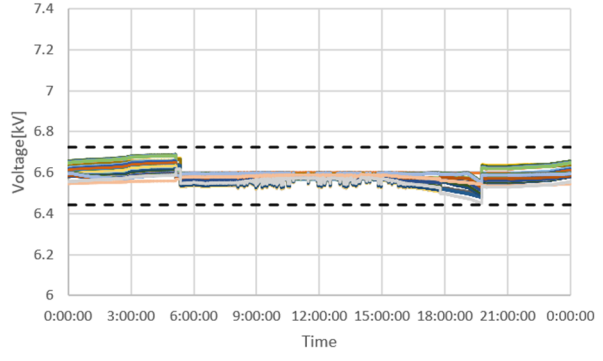
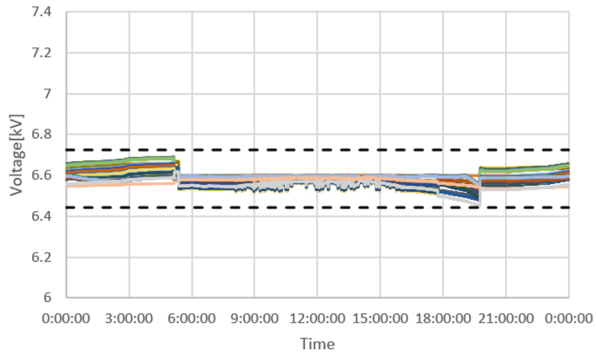
— SVR1 — SVR2

— SVR1 — SVR2



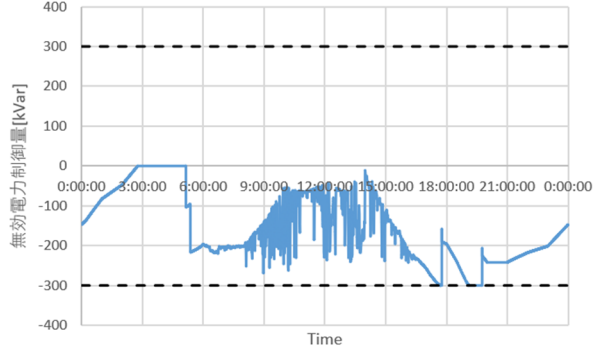
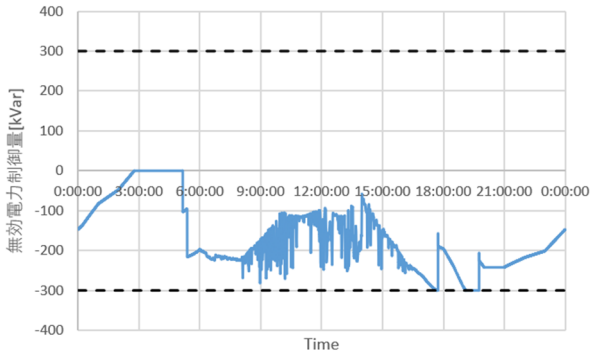
(c) PV 20%

(d) PV 30%



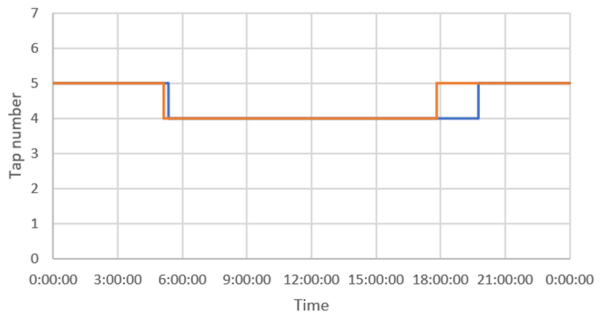
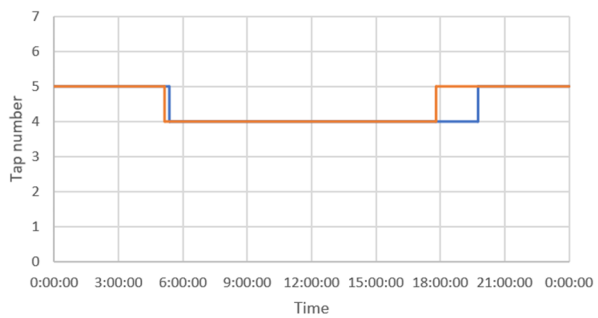
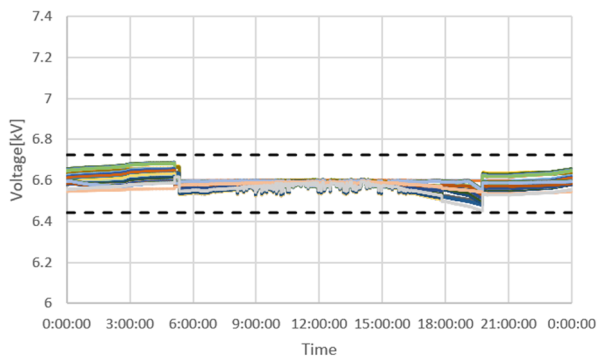
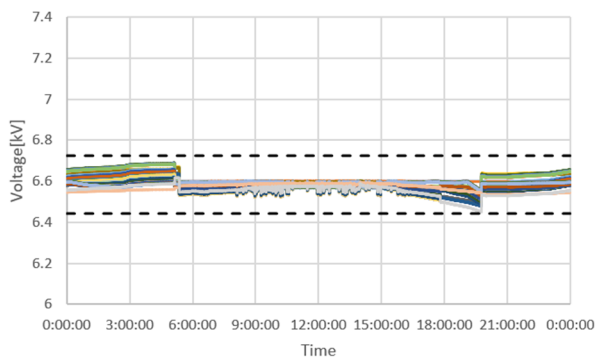
— SVR1 — SVR2

— SVR1 — SVR2



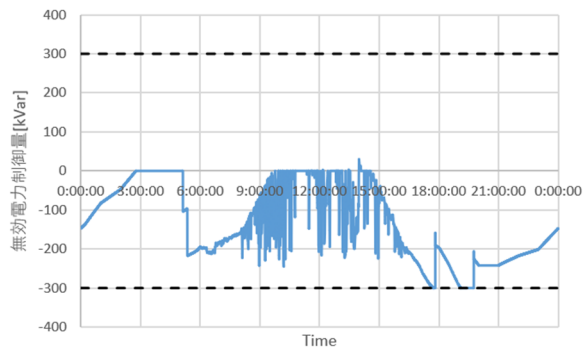
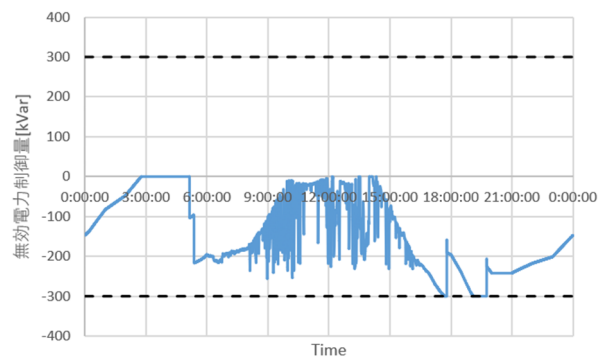
(e) PV 40%

(f) PV 50%



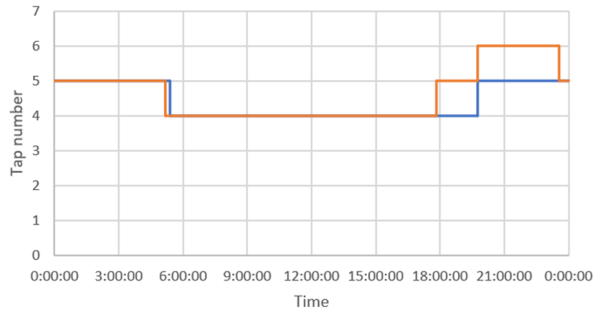
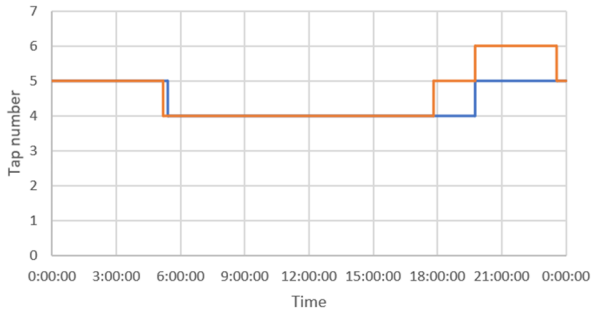
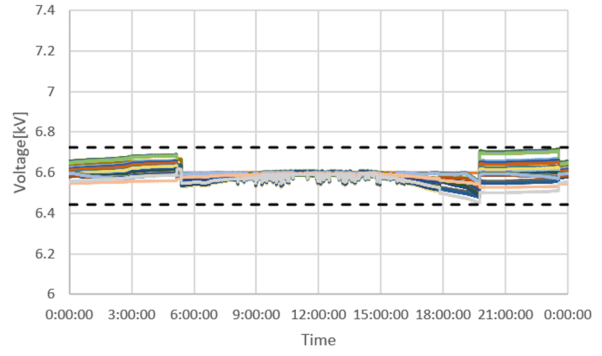
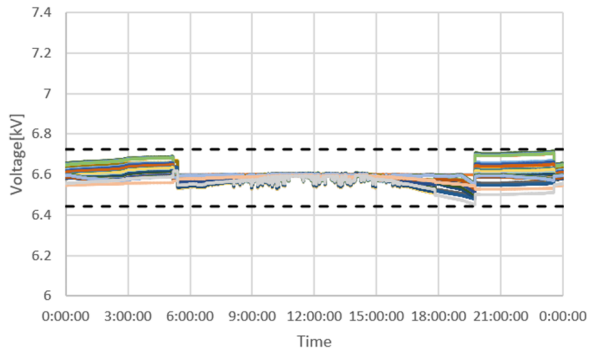
— SVR1 — SVR2

— SVR1 — SVR2



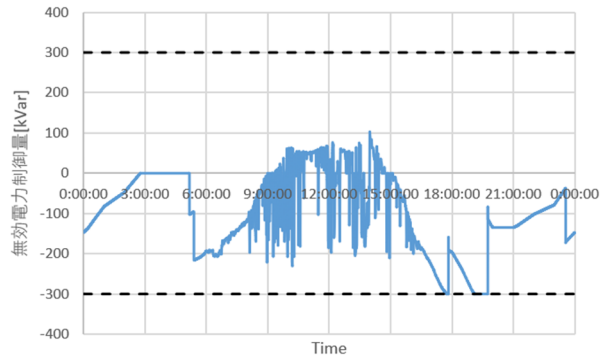
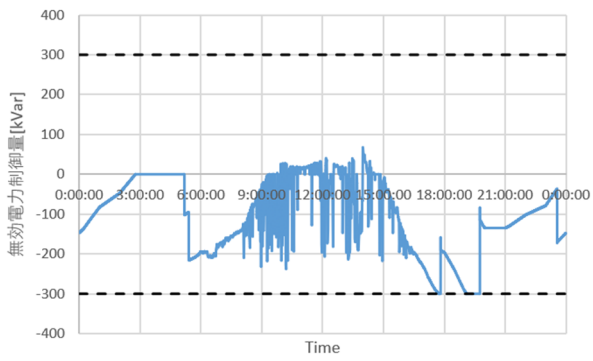
(g) PV 60%

(h) PV 70%



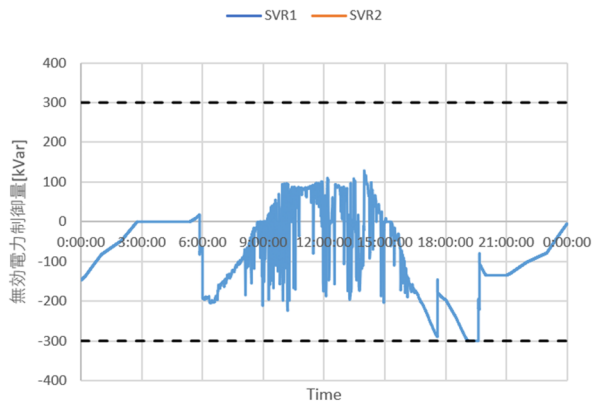
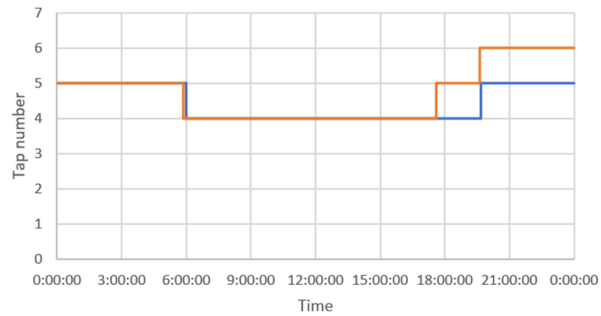
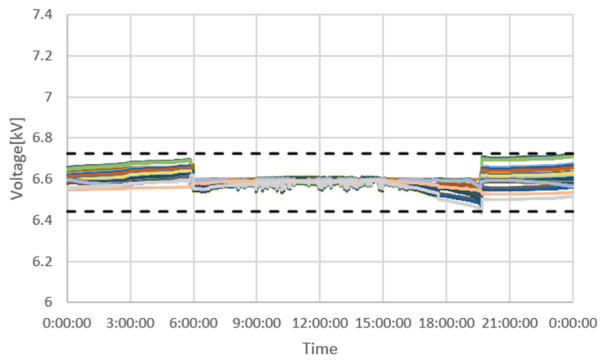
— SVR1 — SVR2

— SVR1 — SVR2



(i) PV 80%

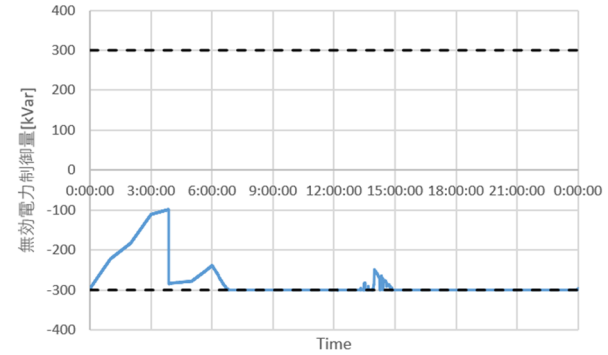
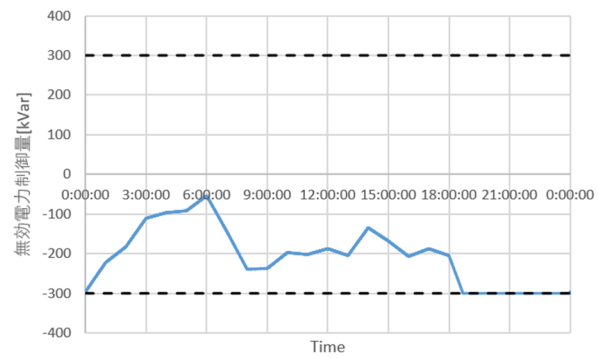
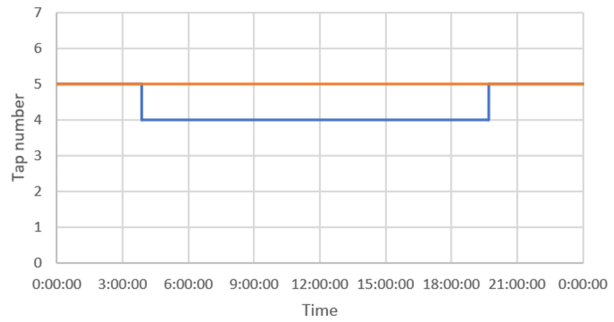
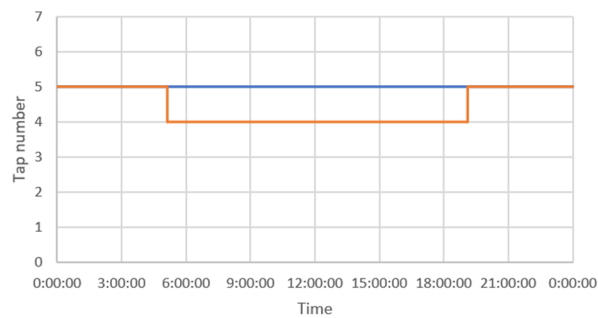
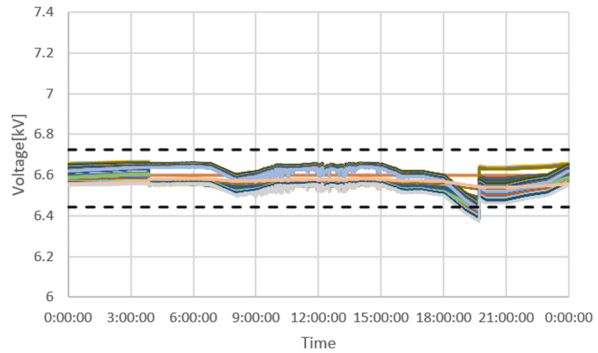
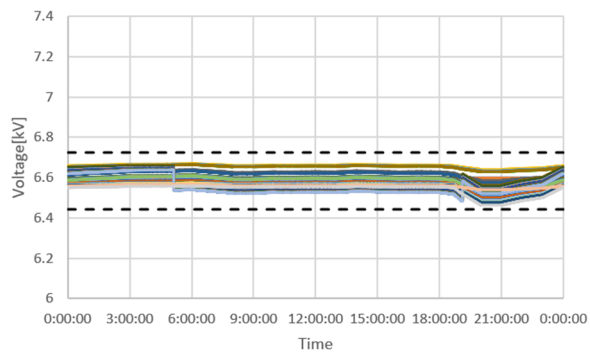
(j) PV 90%



(k) PV 100%

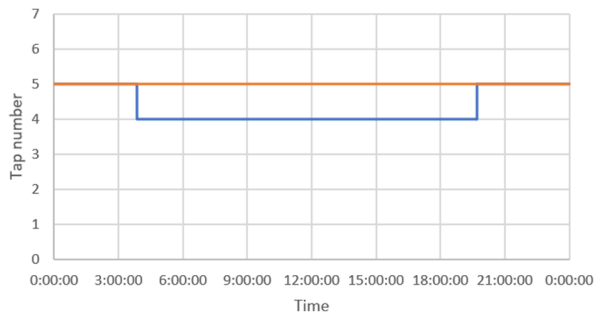
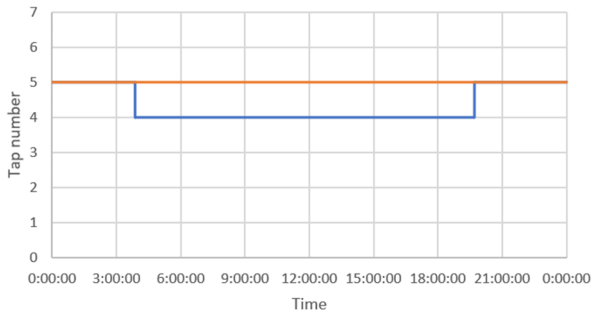
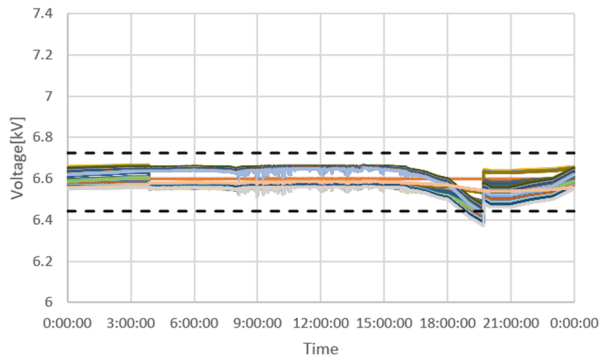
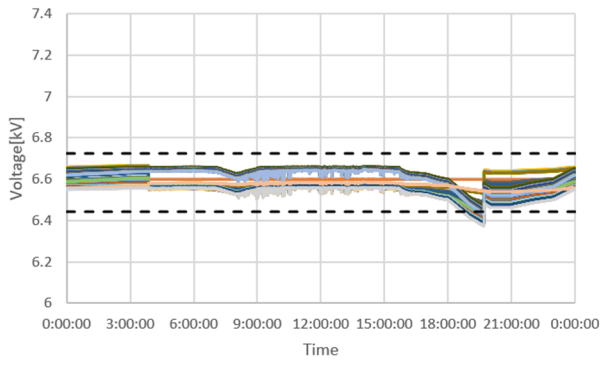
OD22 系統, PV 力率 0.95, 末端集中, SVR-SVC-SVR

(上: 電圧分布, 中: タップ位置, 下: SVC の無効電力)



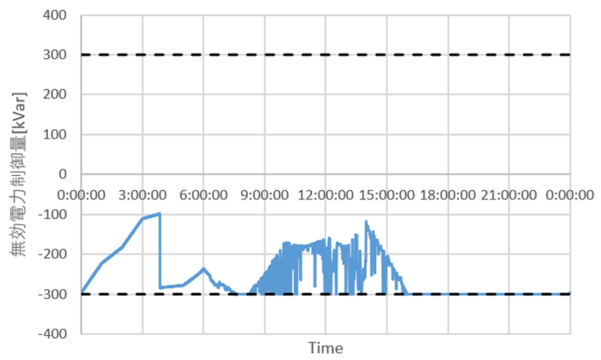
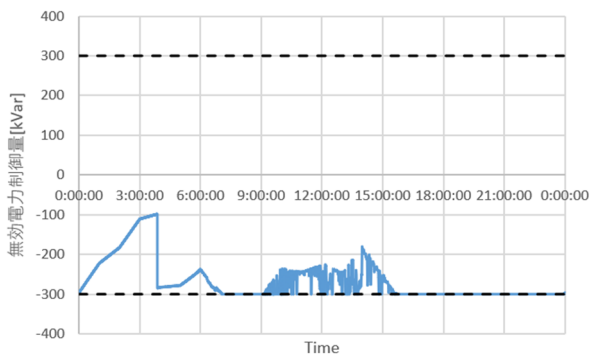
(a) PV 0%

(b) PV 10%



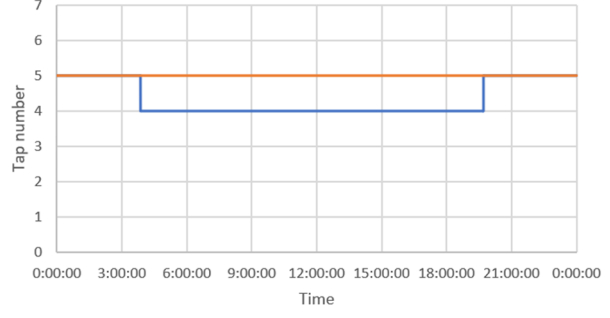
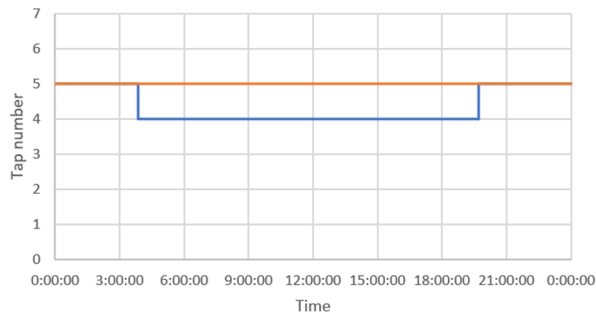
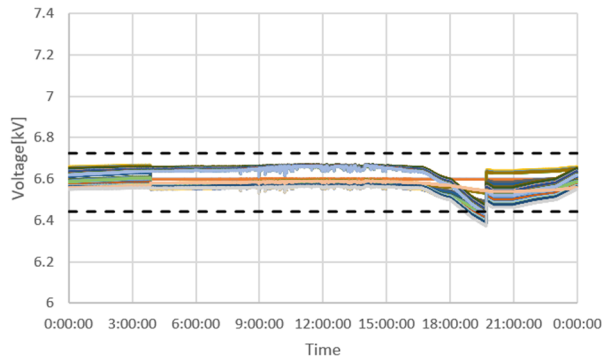
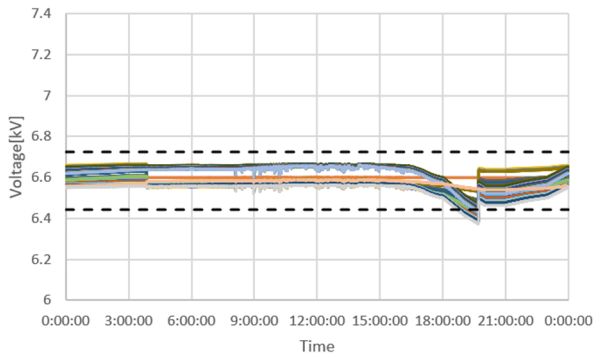
— SVR1 — SVR2

— SVR1 — SVR2



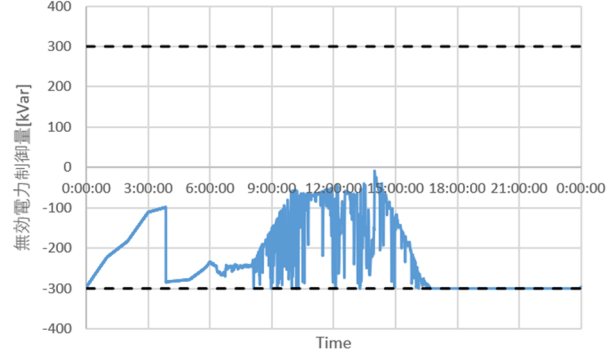
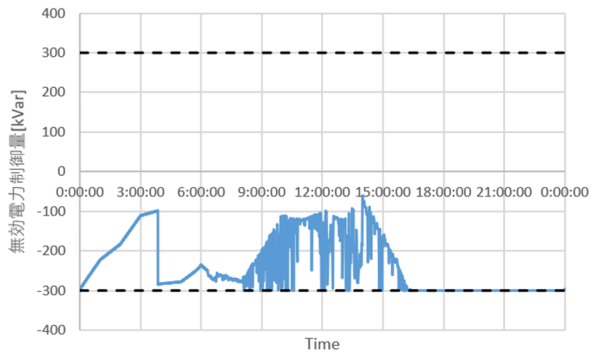
(c) PV 20%

(d) PV 30%



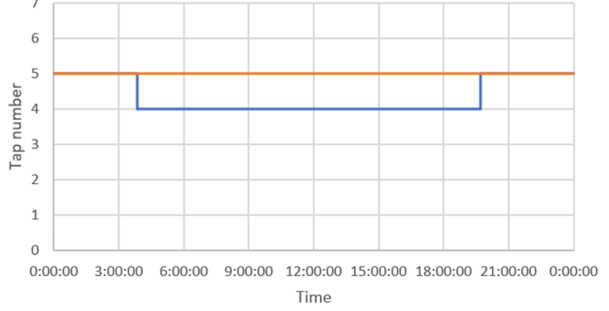
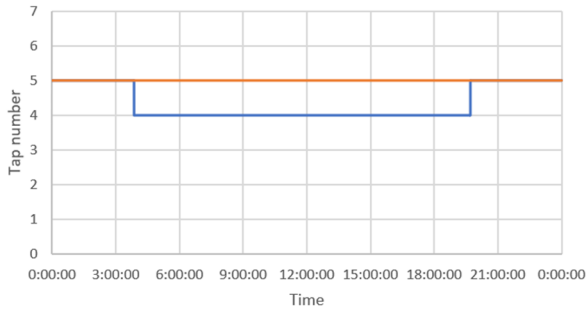
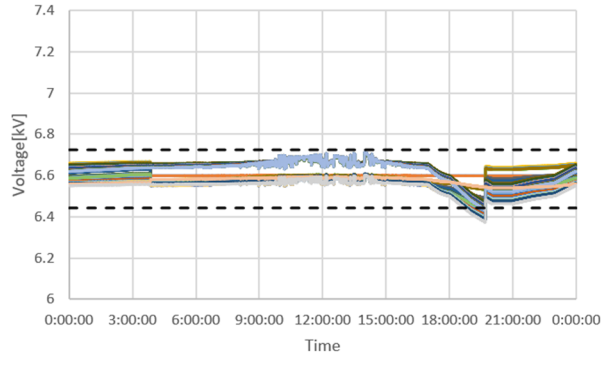
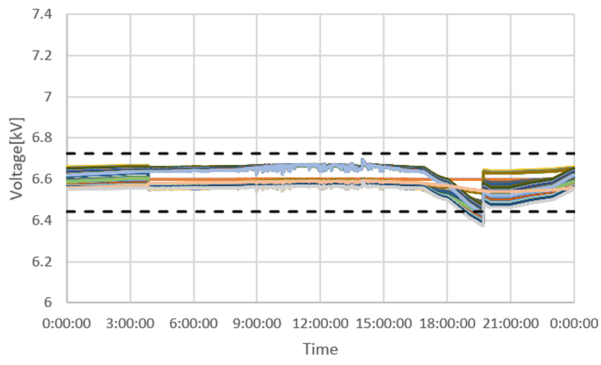
— SVR1 — SVR2

— SVR1 — SVR2



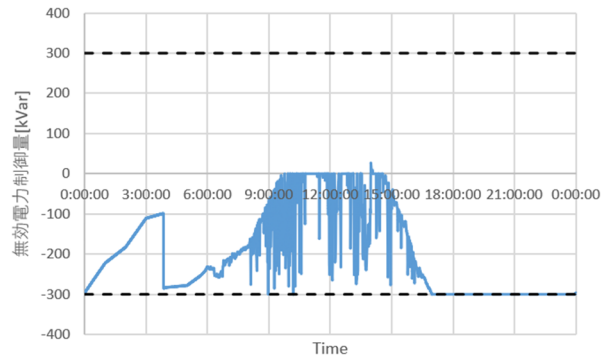
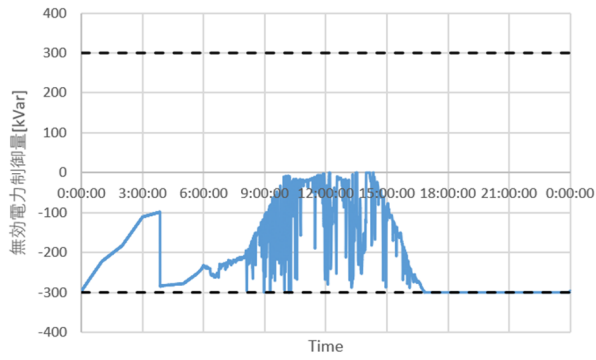
(e) PV 40%

(f) PV 50%



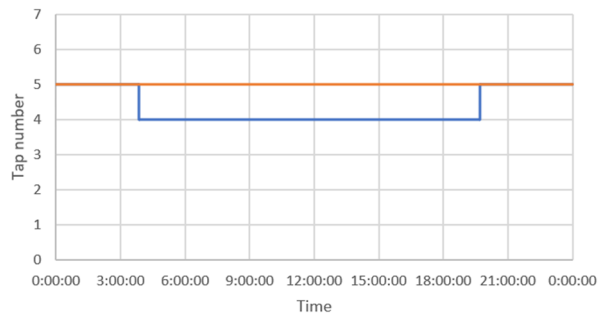
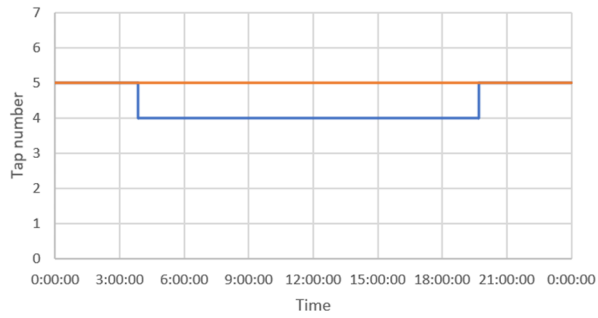
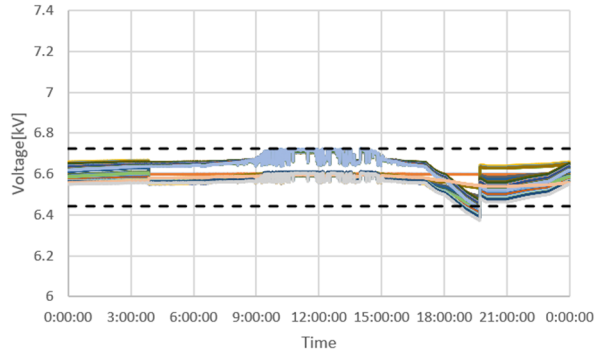
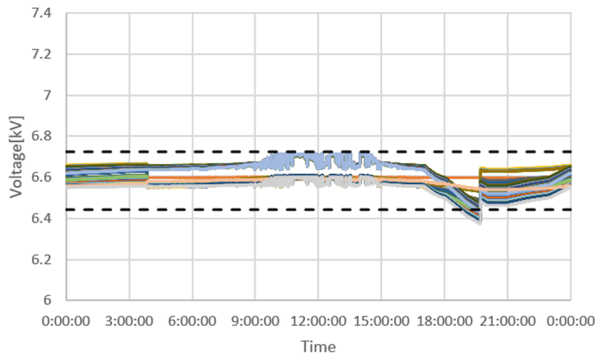
— SVR1 — SVR2

— SVR1 — SVR2



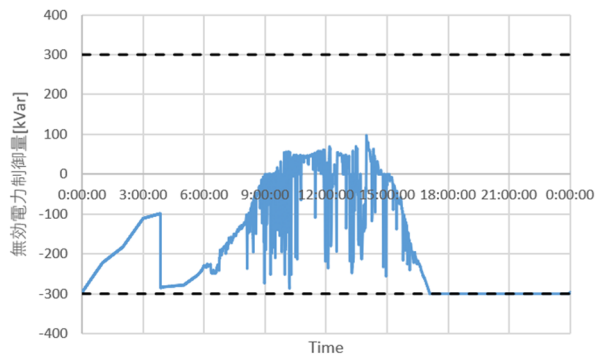
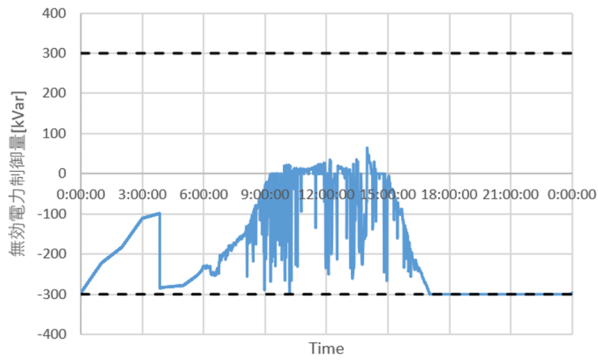
(g) PV 60%

(h) PV 70%



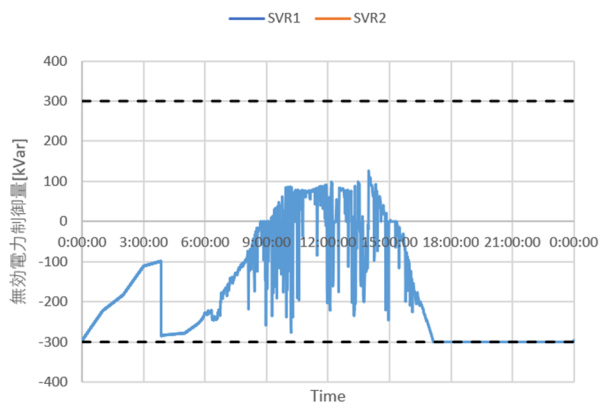
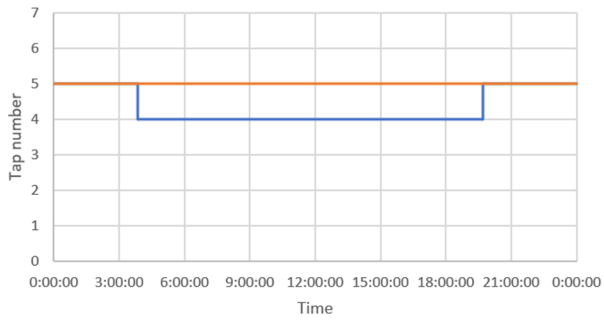
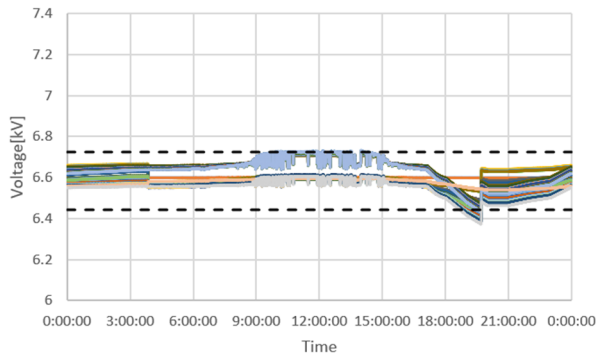
— SVR1 — SVR2

— SVR1 — SVR2



(i) PV 80%

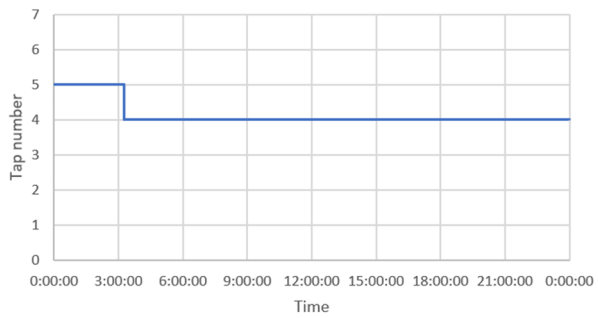
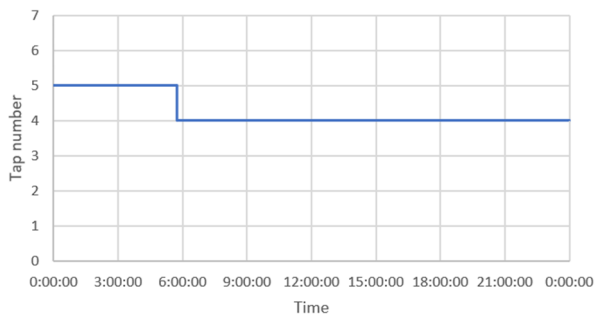
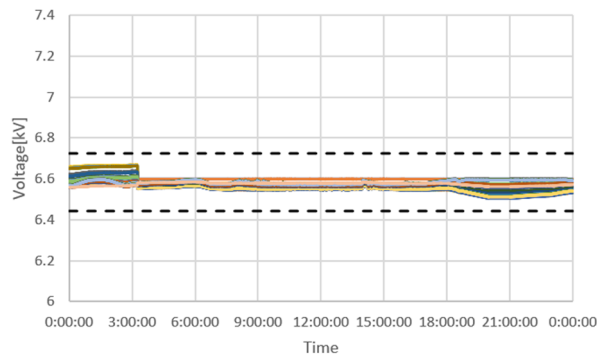
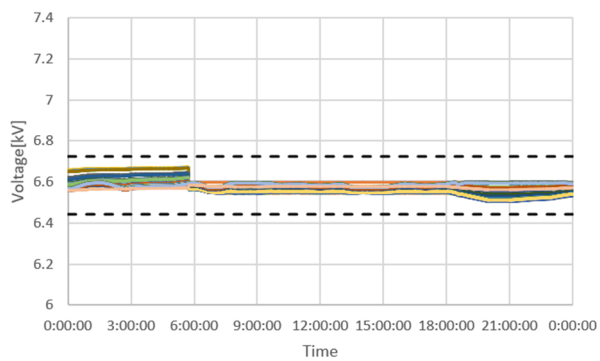
(j) PV 90%



(k) PV 100%

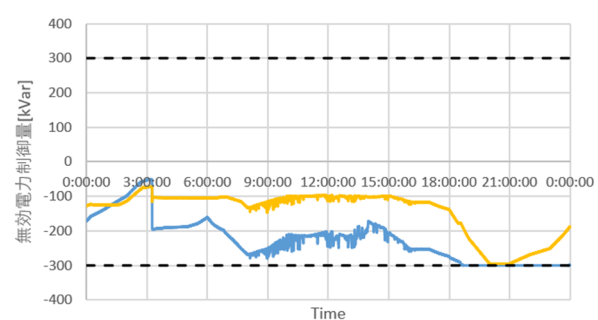
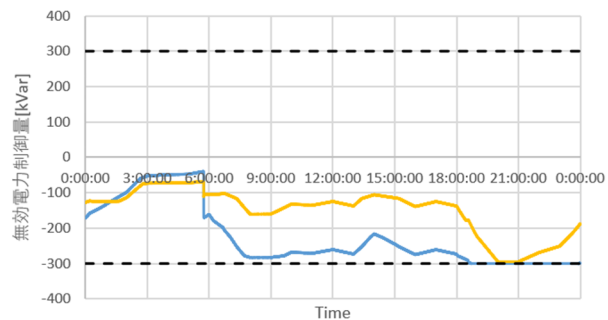
OD22 系統, PV 力率 0.95, 分散配置, SVR-SVC-SVC

(上: 電圧分布, 中: タップ位置, 下: SVC の無効電力)



— SVR1

— SVR1

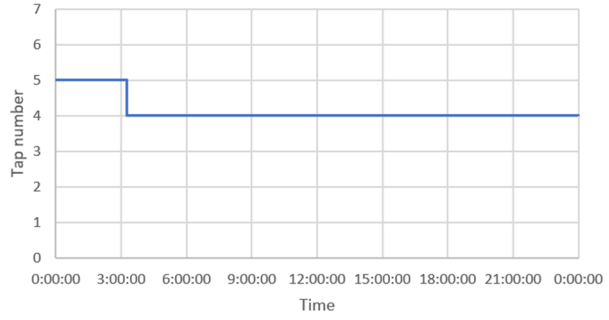
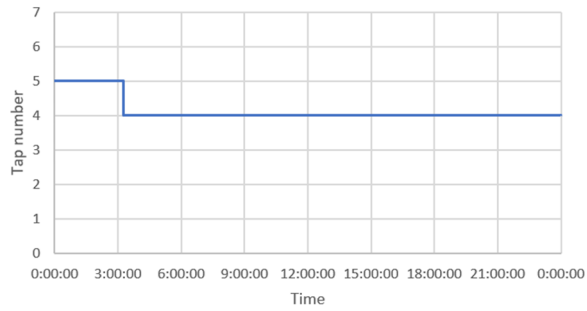
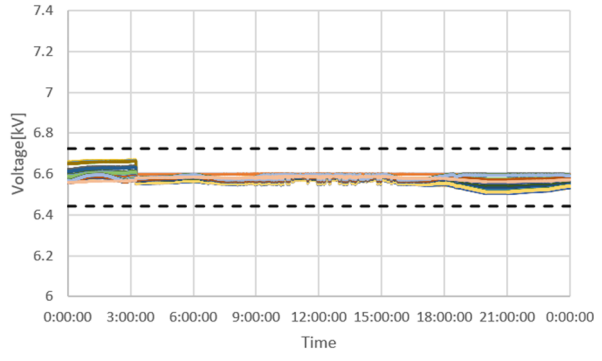
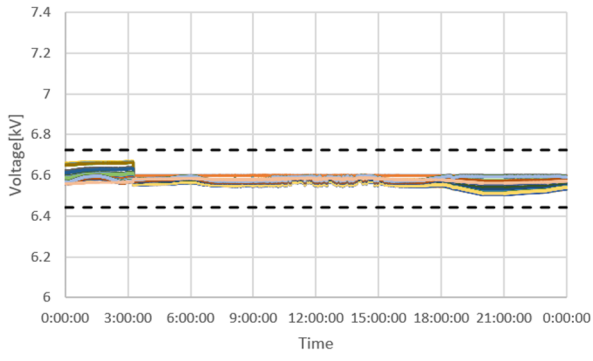


— SVR1 — SVR2

— SVR1 — SVR2

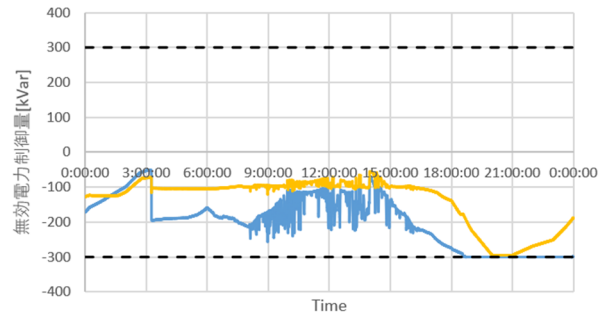
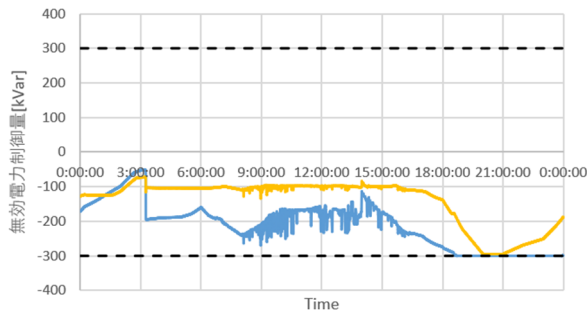
(a) PV 0%

(b) PV 10%



— SVR1

— SVR1

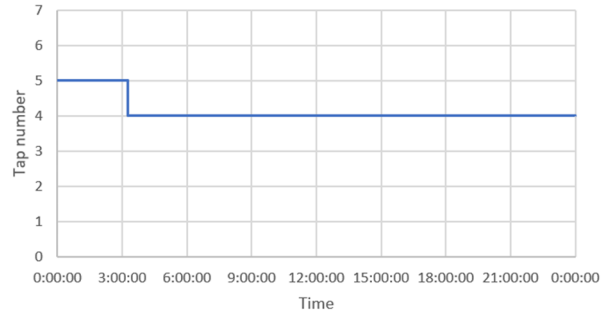
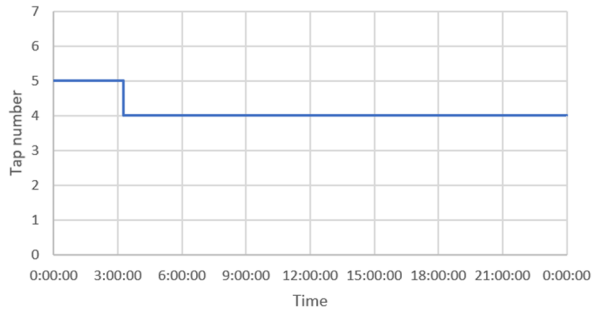
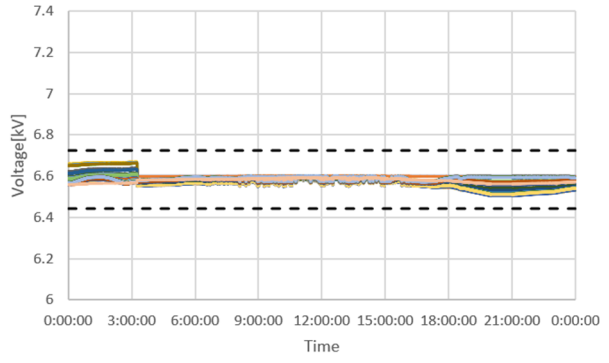
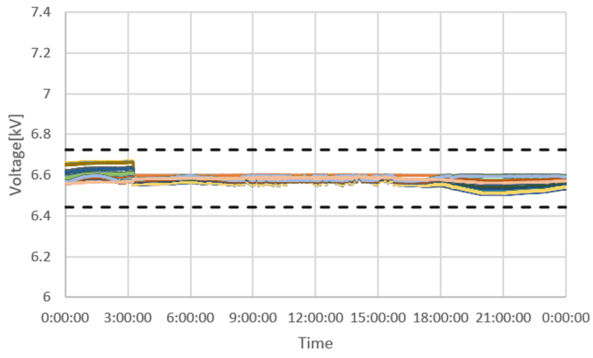


— SVR1 — SVR2

— SVR1 — SVR2

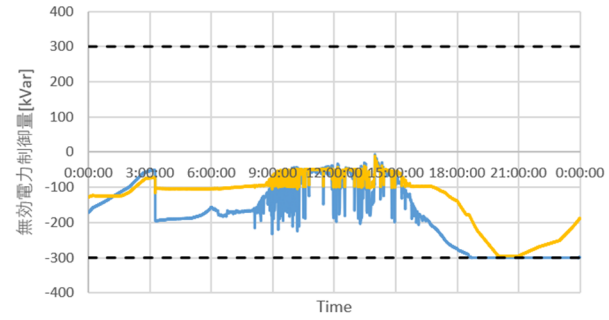
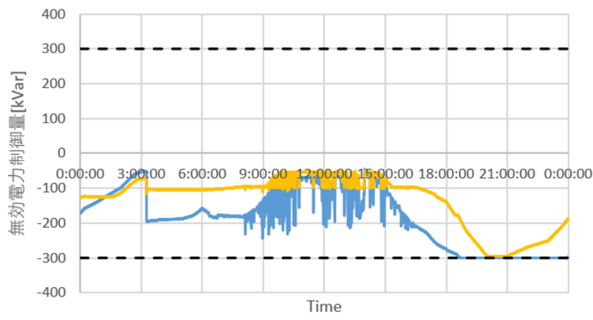
(c) PV 20%

(d) PV 30%



— SVR1

— SVR1

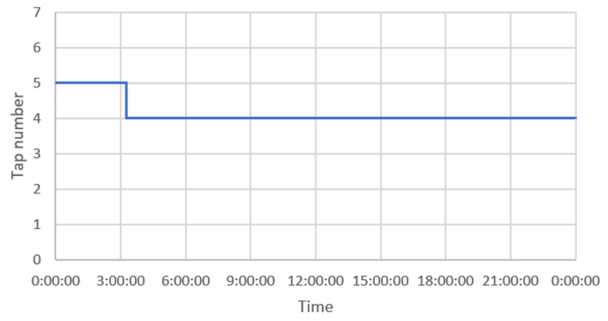
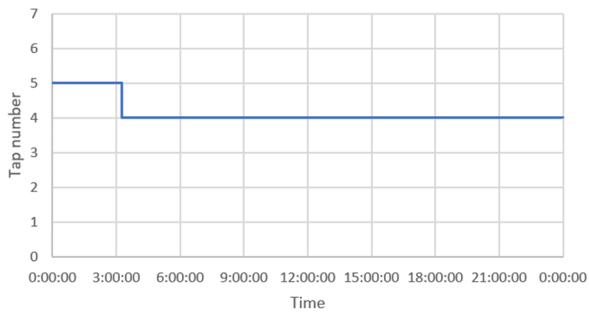
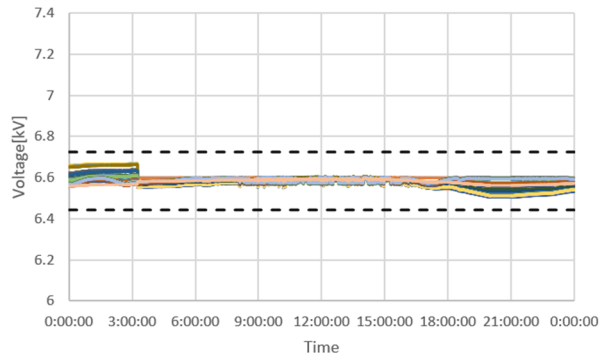
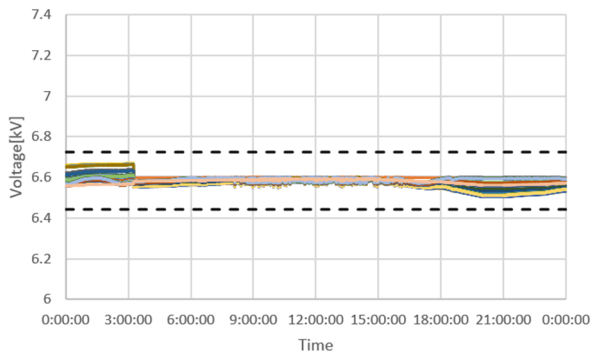


— SVR1 — SVR2

— SVR1 — SVR2

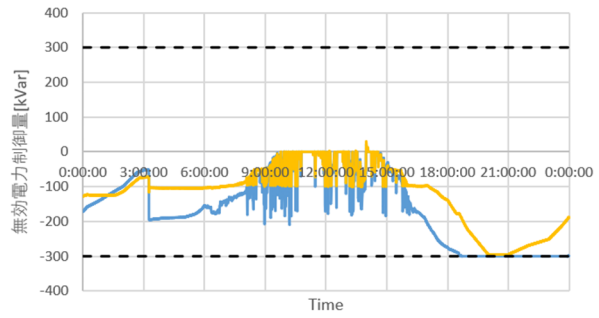
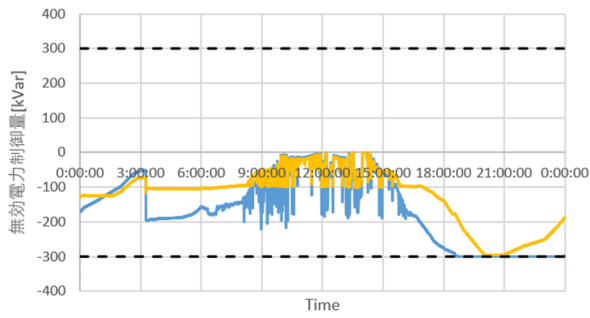
(e) PV 40%

(f) PV 50%



— SVR1

— SVR1

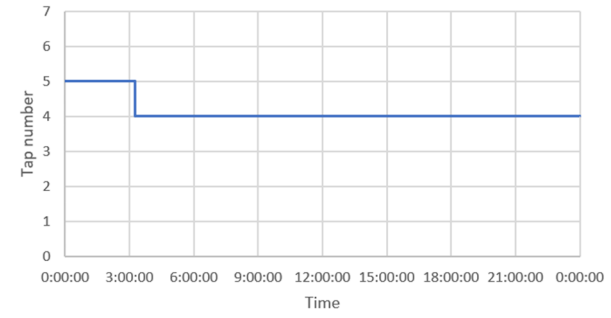
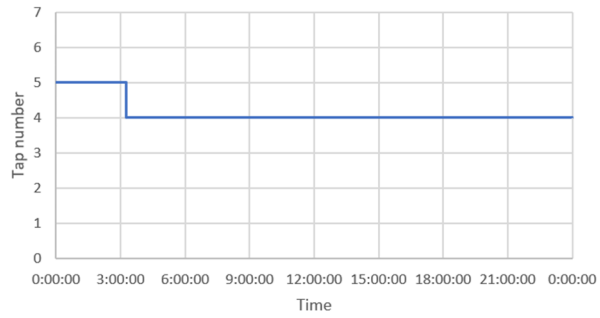
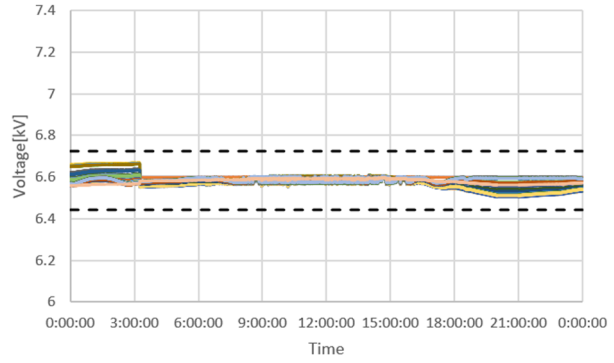
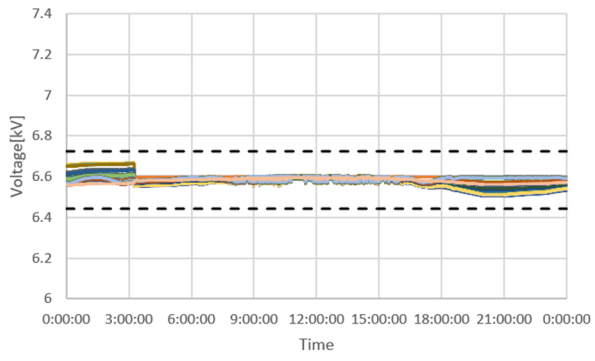


— SVR1 — SVR2

— SVR1 — SVR2

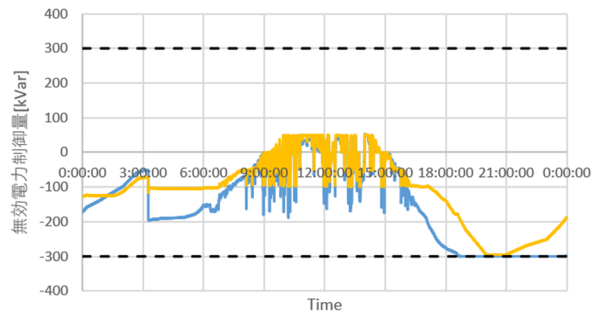
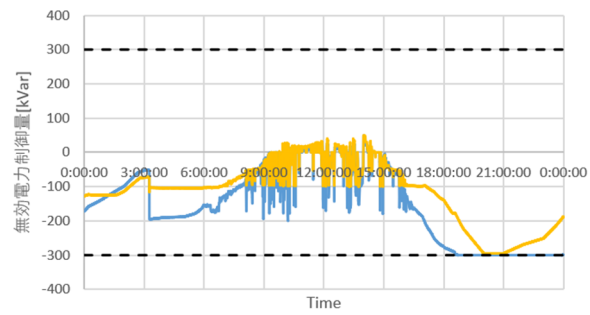
(g) PV 60%

(h) PV 70%



— SVR1

— SVR1

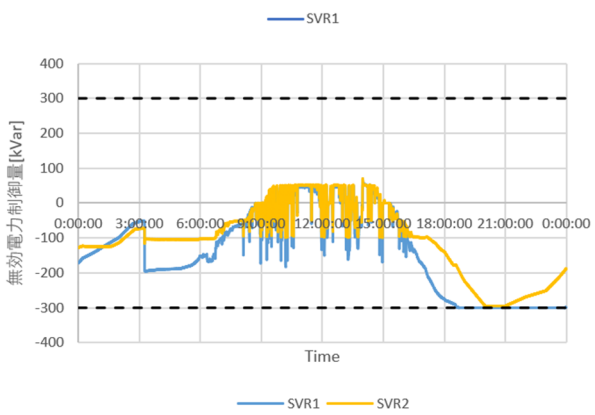
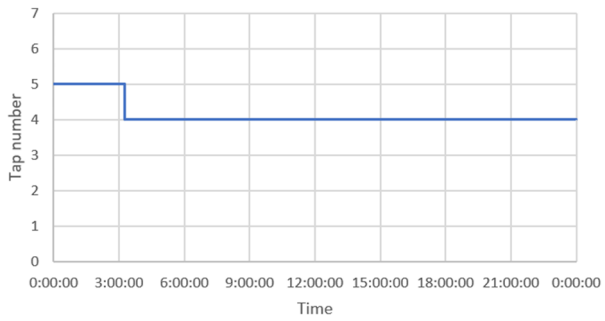
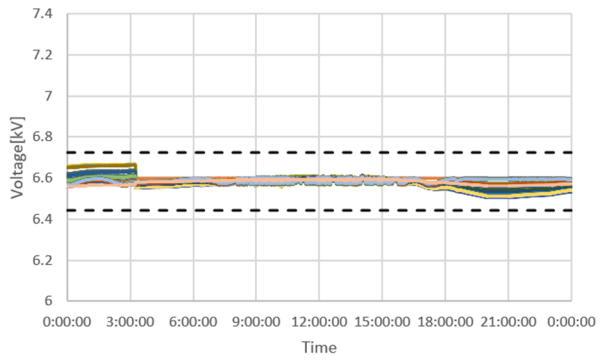


— SVR1 — SVR2

— SVR1 — SVR2

(i) PV 80%

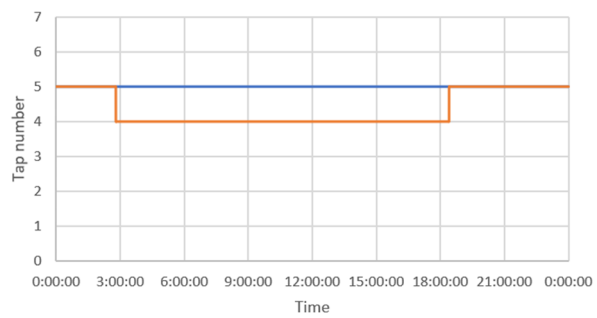
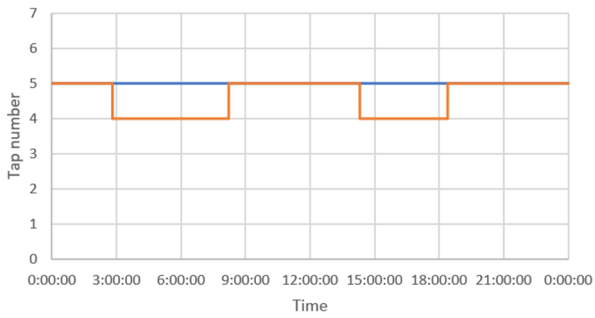
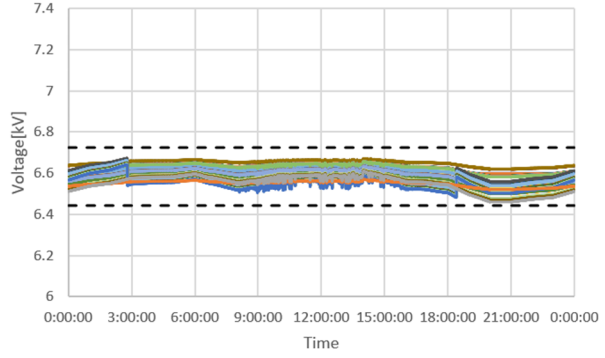
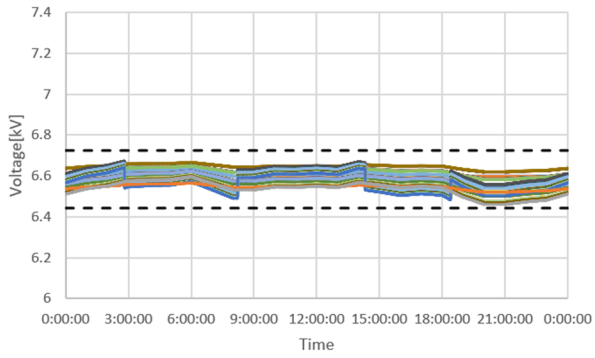
(j) PV 90%



(k) PV 100%

OD21 系統, PV 力率 1.0, 分散配置, SVR-SVR

(上 : 電圧分布, 下 : タップ位置)

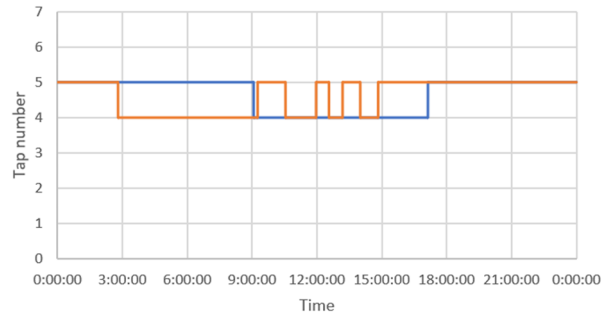
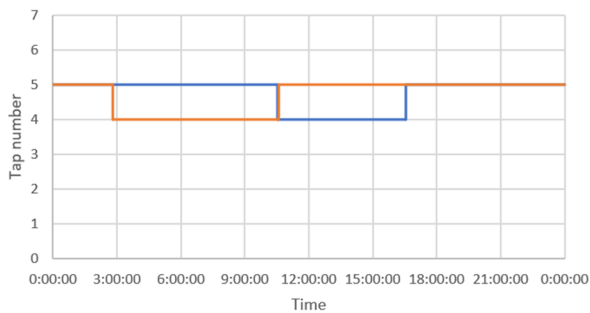
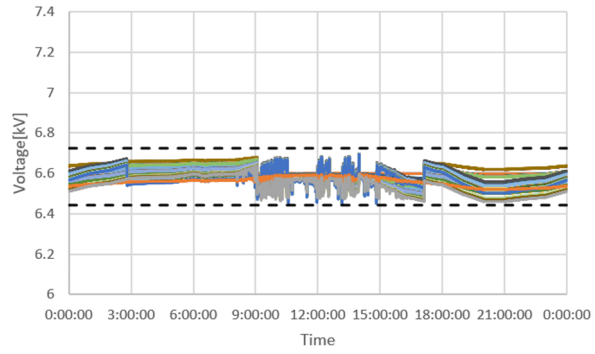
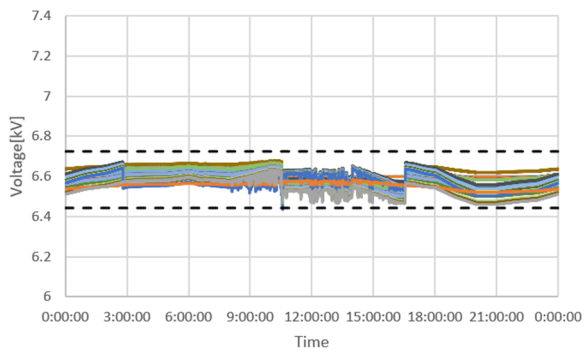


— SVR1 — SVR2

(a) PV 0%

— SVR1 — SVR2

(b) PV 10%

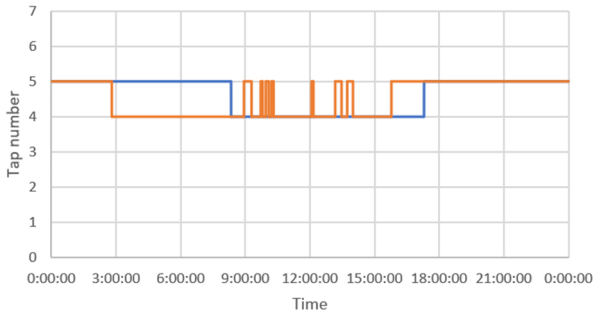
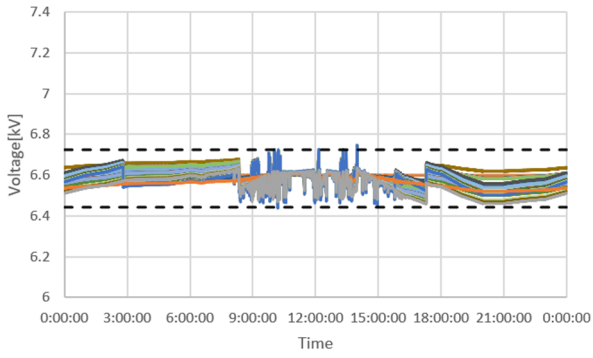


— SVR1 — SVR2

(c) PV 20%

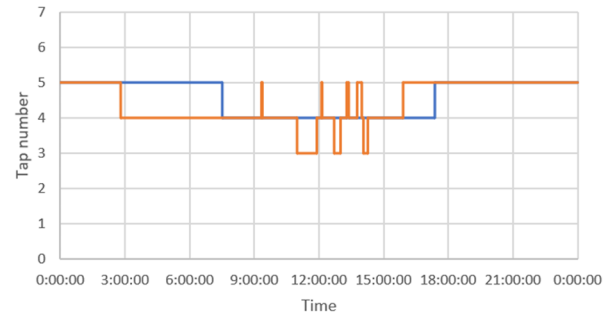
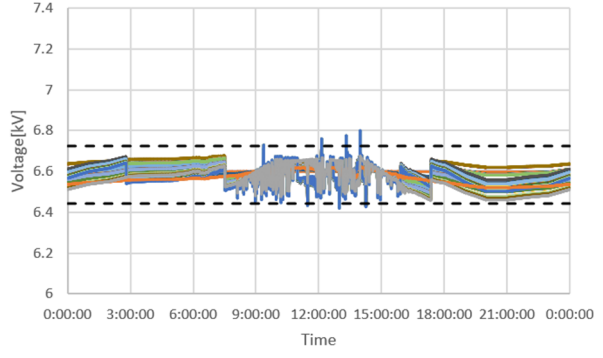
— SVR1 — SVR2

(d) PV 30%



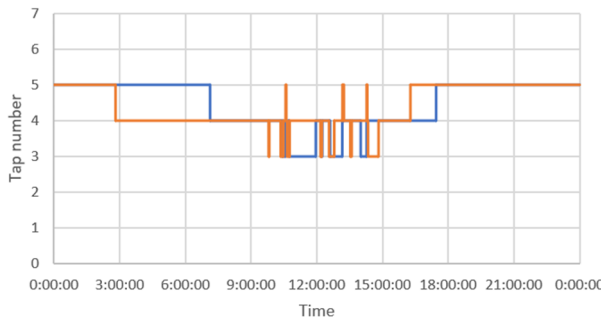
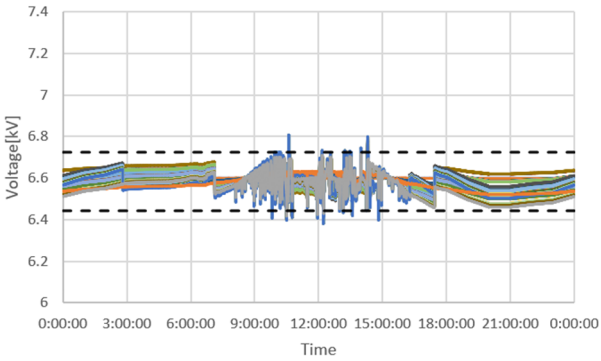
— SVR1 — SVR2

(e) PV 40%



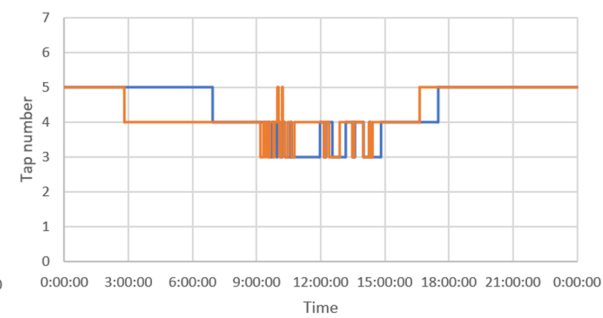
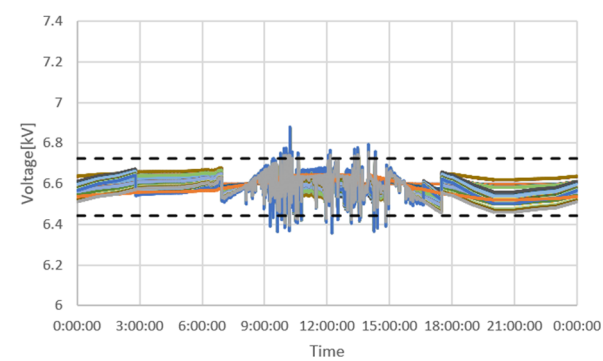
— SVR1 — SVR2

(f) PV 50%



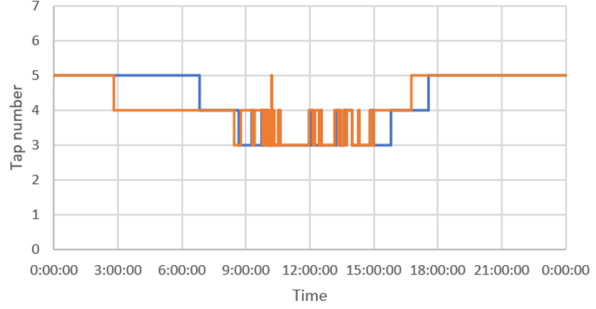
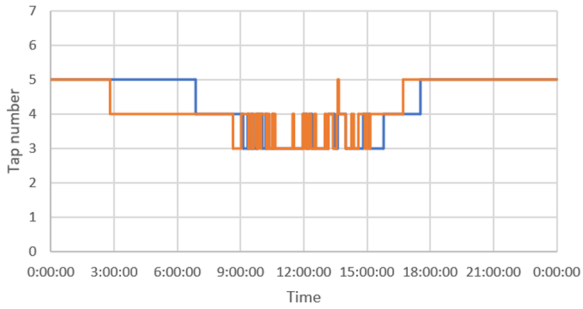
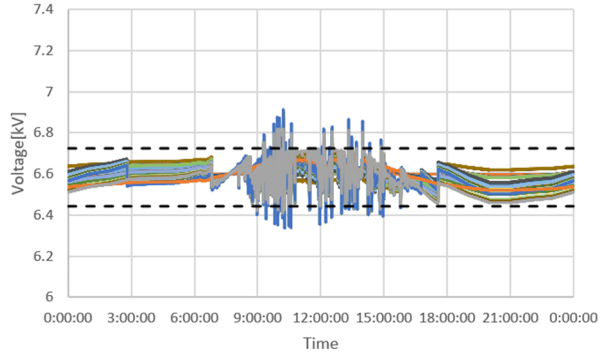
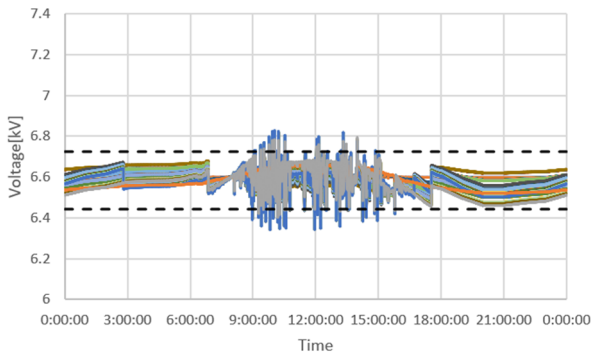
— SVR1 — SVR2

(g) PV 60%



— SVR1 — SVR2

(h) PV 70%

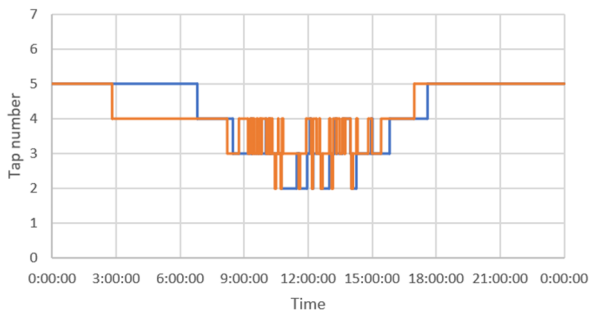
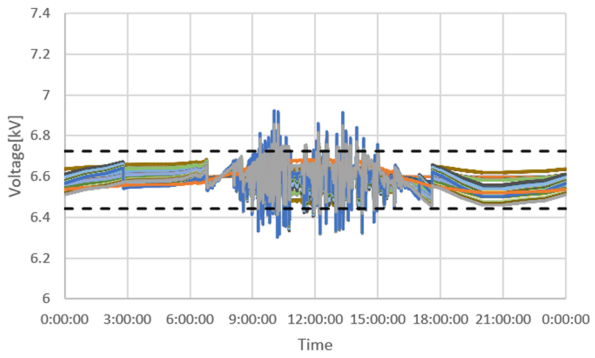


— SVR1 — SVR2

(i) PV 80%

— SVR1 — SVR2

(j) PV 90%

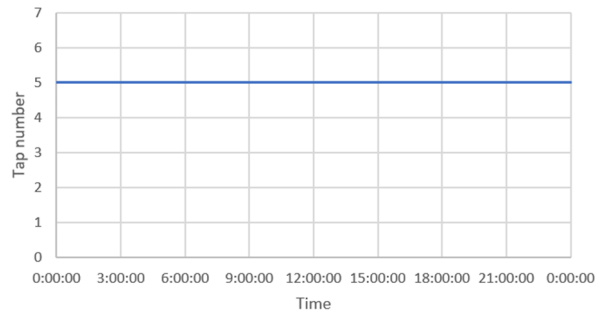
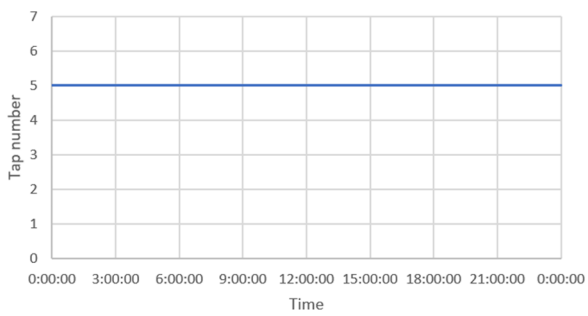
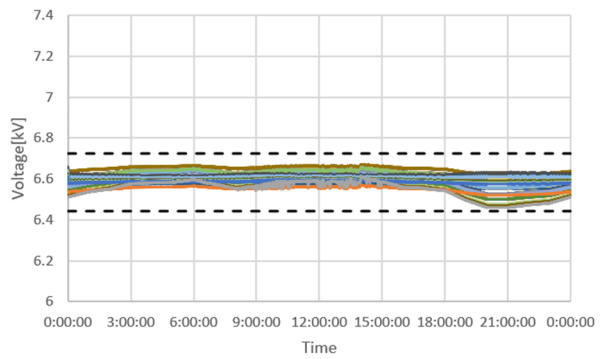
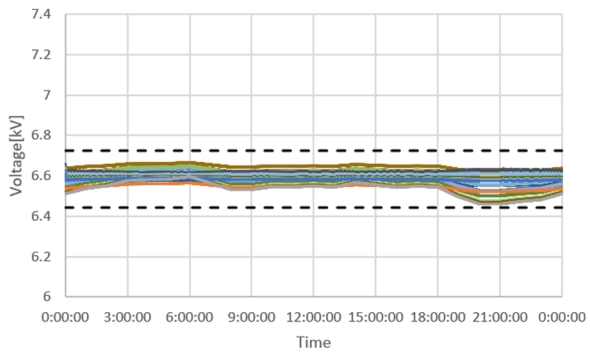


— SVR1 — SVR2

(k) PV 100%

OD21 系統, PV 力率 1.0, 分散配置, SVR-TVV

(上: 電圧分布, 下: タップ位置)

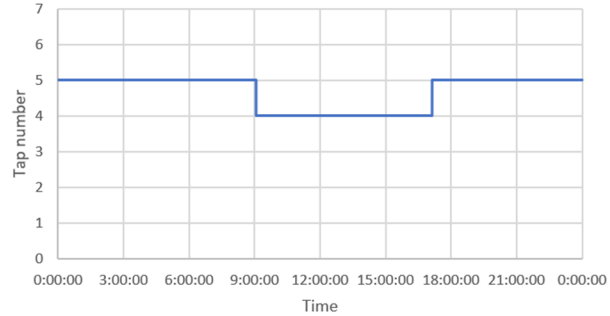
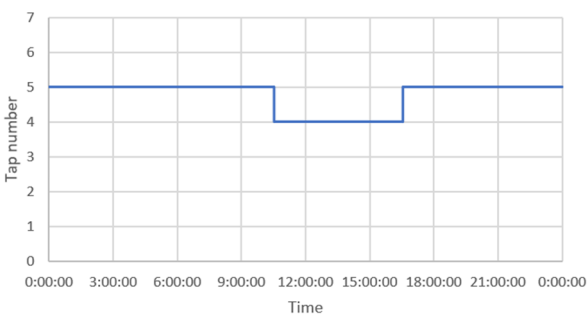
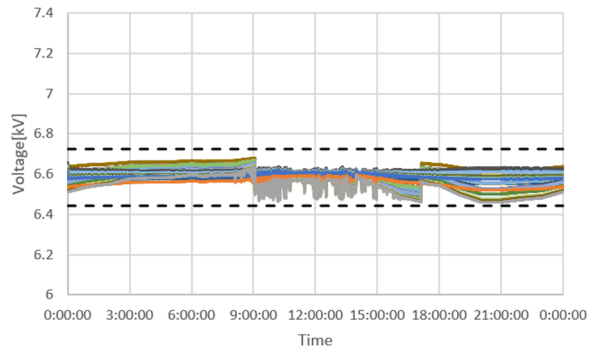
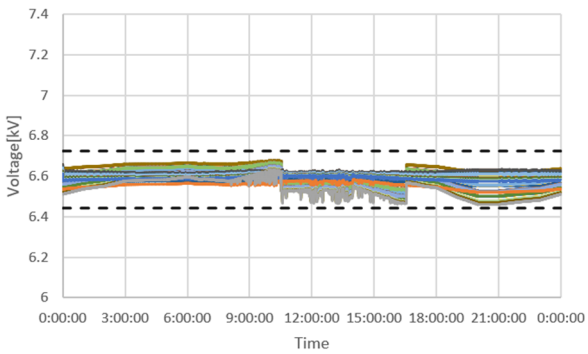


— SVR1

— SVR1

(a) PV 0%

(b) PV 10%

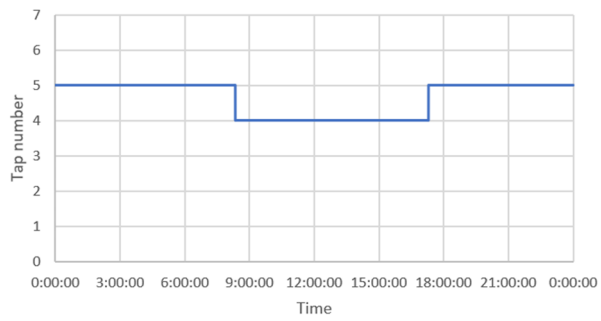
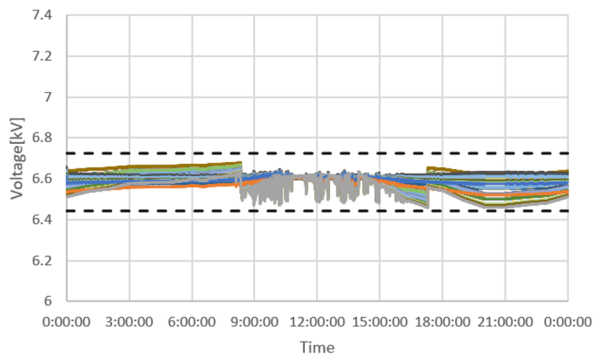


— SVR1

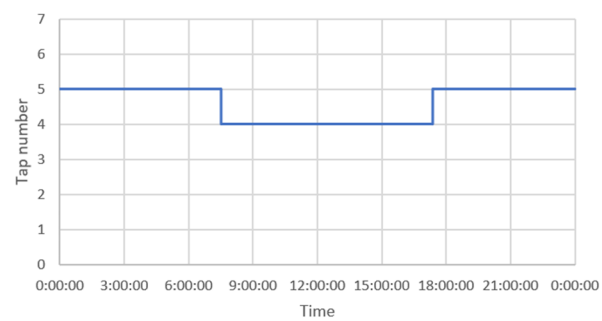
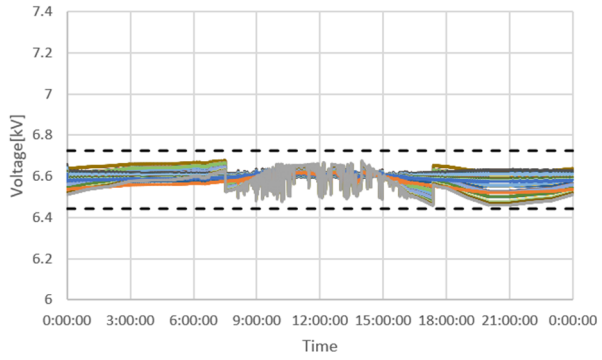
— SVR1

(c) PV 20%

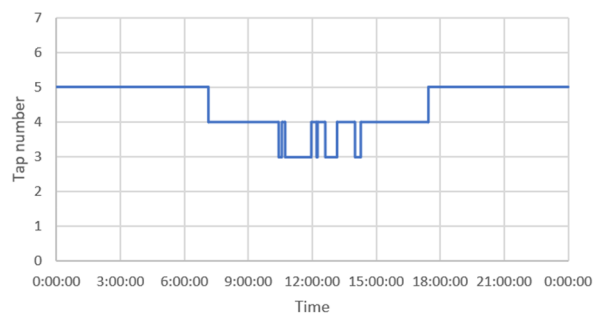
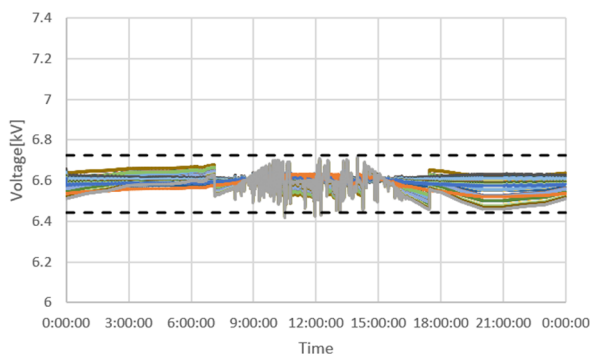
(d) PV 30%



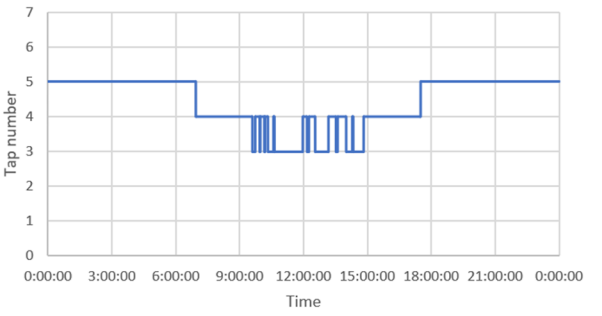
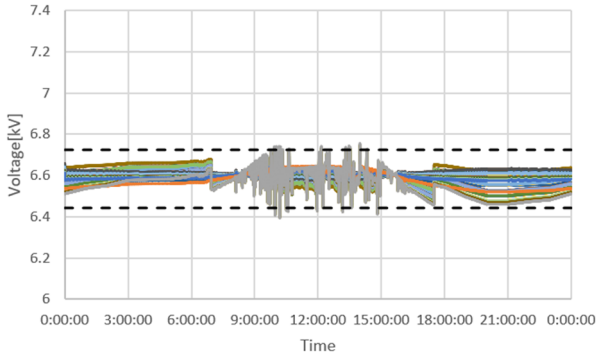
— SVR1
(e) PV 40%



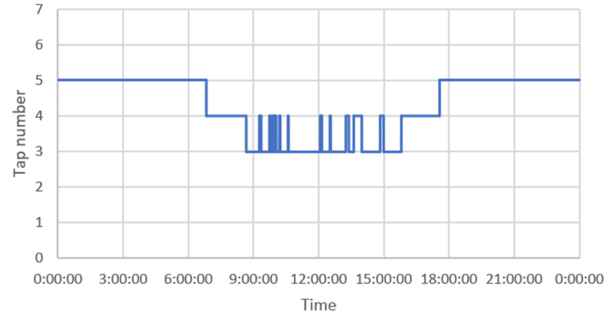
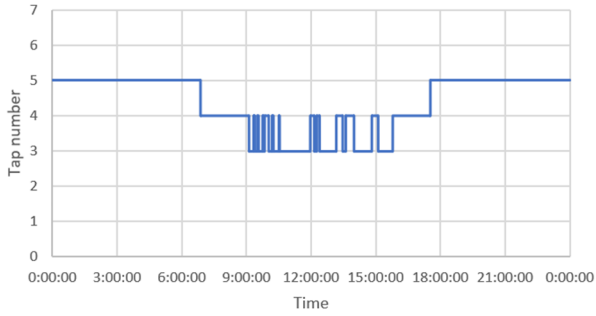
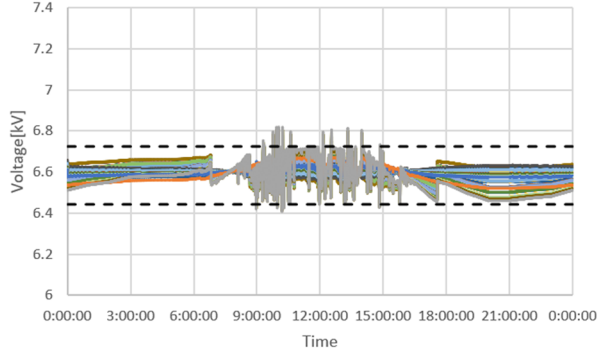
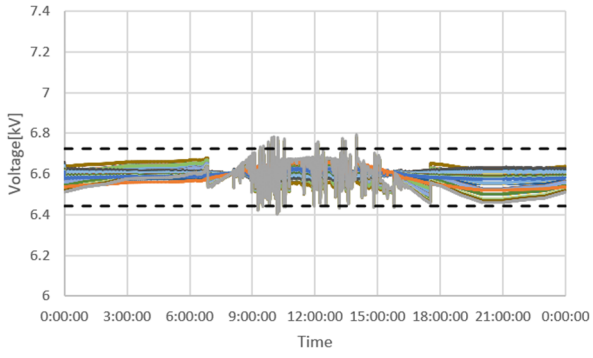
— SVR1
(f) PV 50%



— SVR1
(g) PV 60%

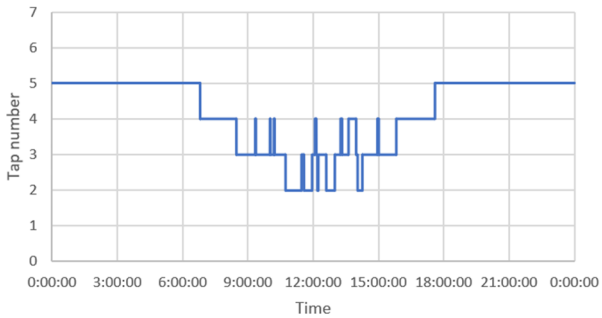
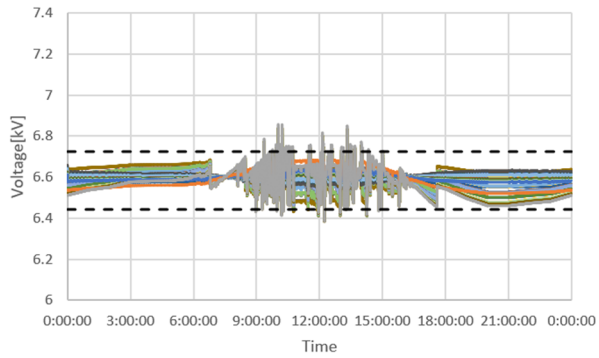


— SVR1
(h) PV 70%



(i) PV 80%

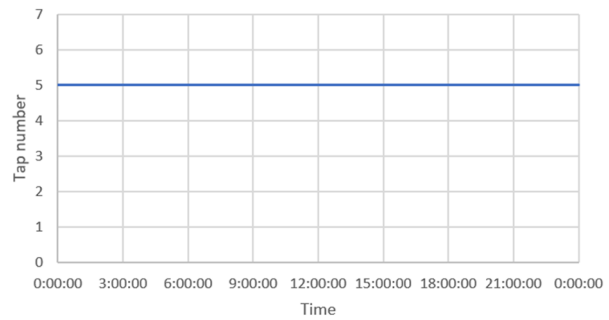
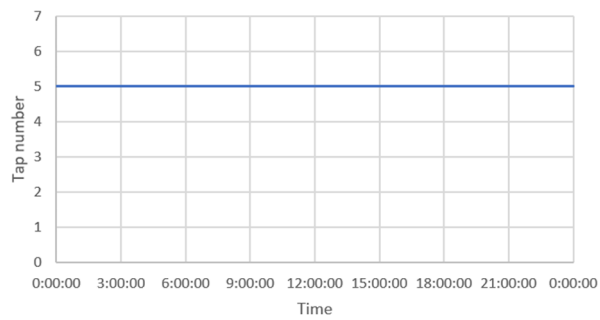
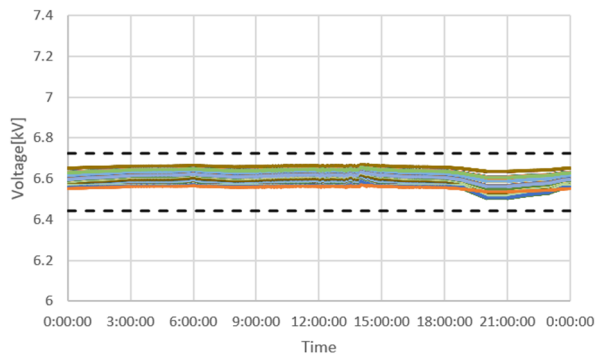
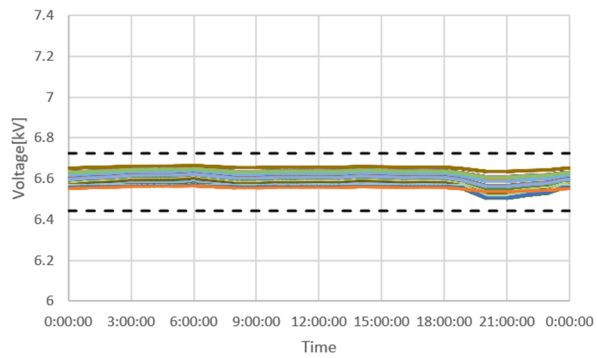
(j) PV 90%



(k) PV 100%

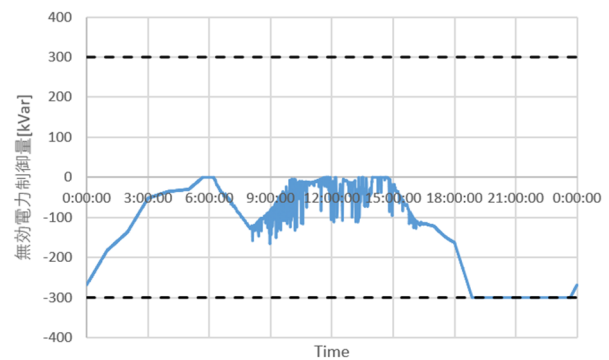
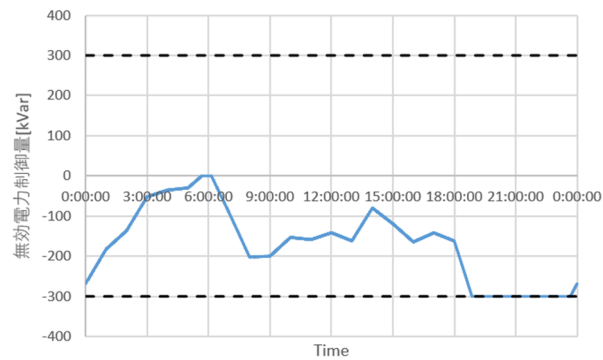
OD21 系統, PV 力率 1.0, 末端集中, SVR-SVC

(上 : 電圧分布, 中 : タップ位置, 下 : SVC の無効電力)



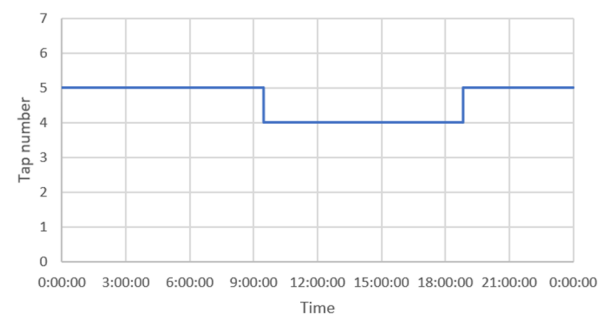
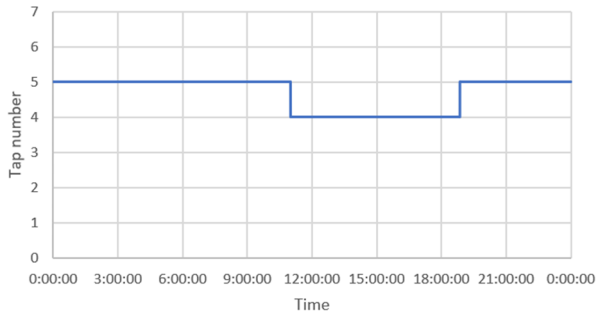
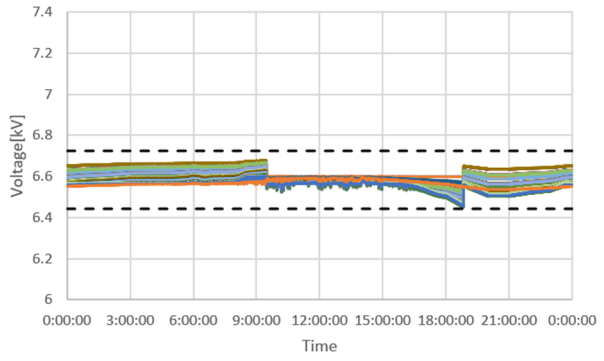
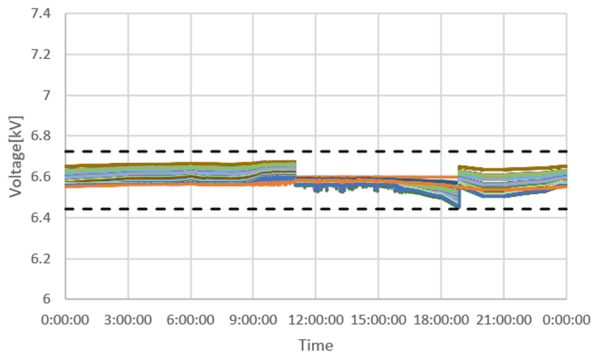
— SVR1

— SVR1



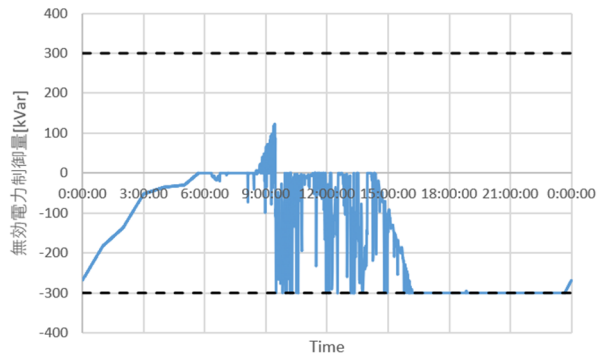
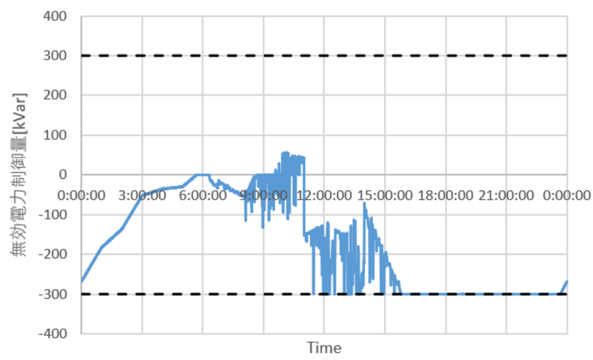
(a) PV 0%

(b) PV 10%



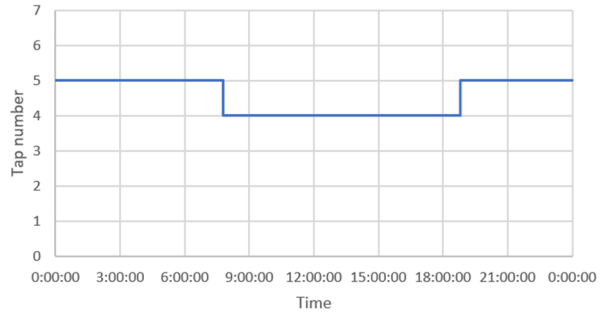
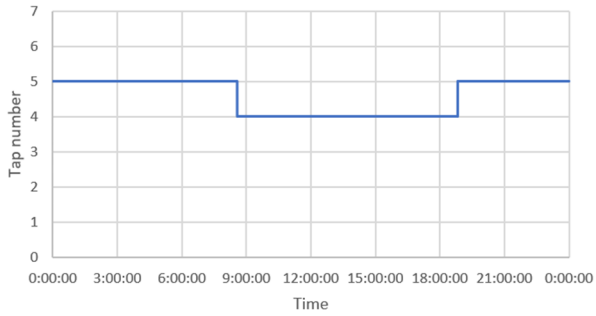
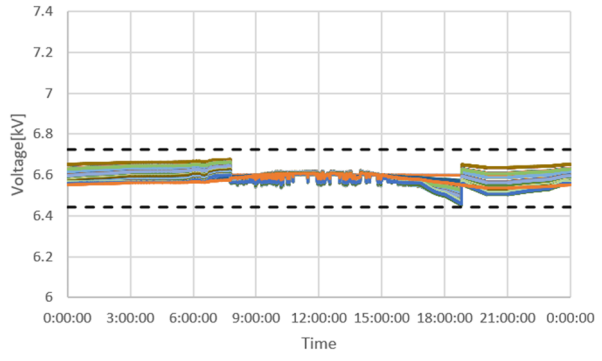
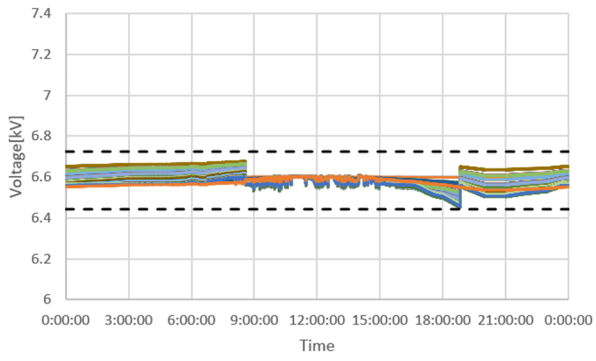
— SVR1

— SVR1



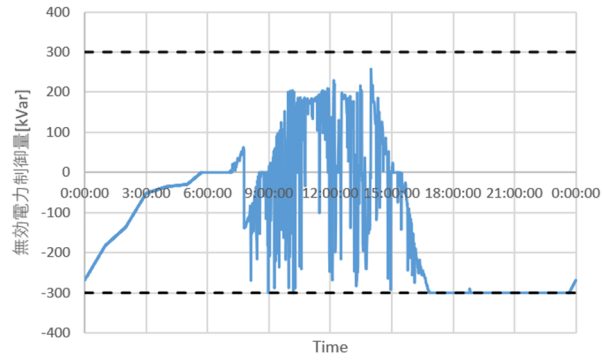
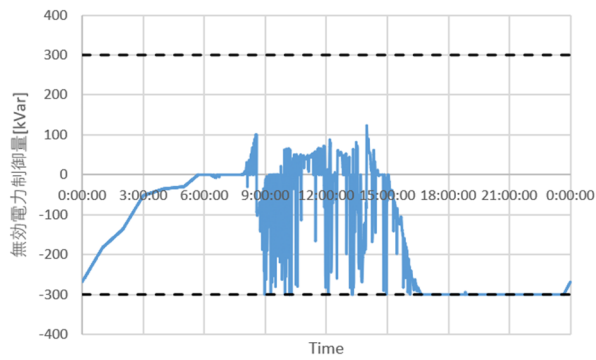
(c) PV 20%

(d) PV 30%



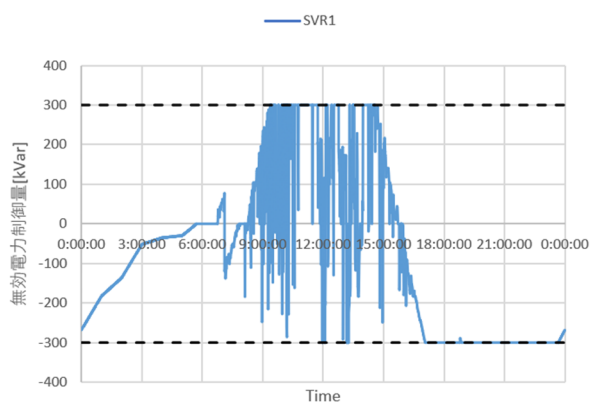
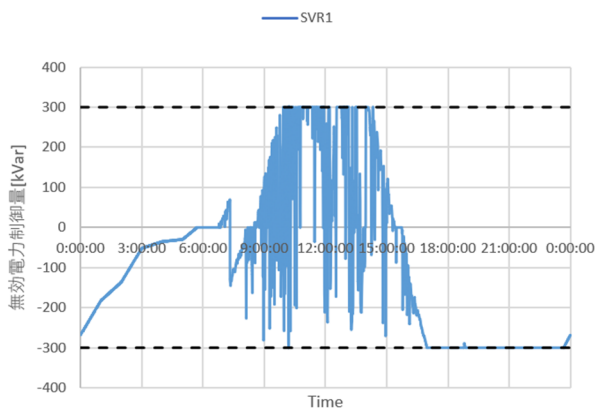
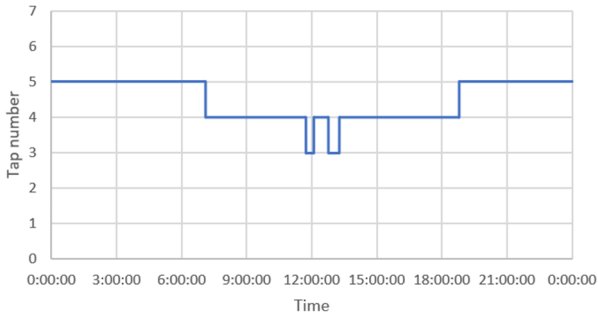
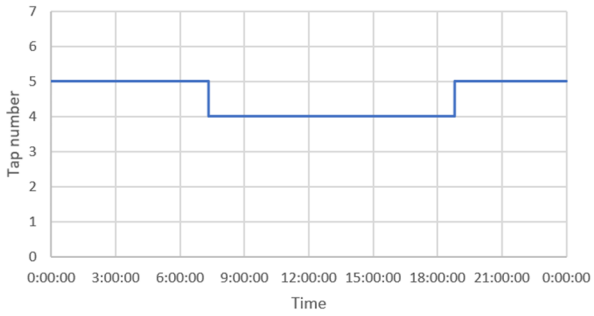
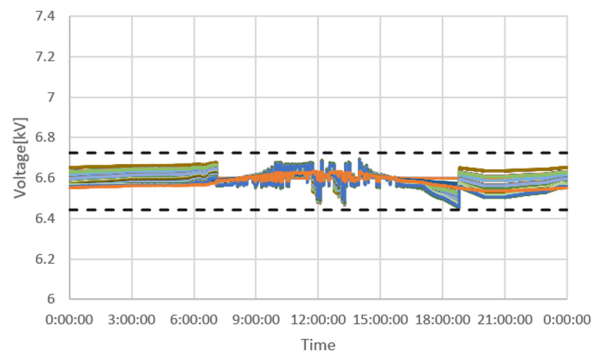
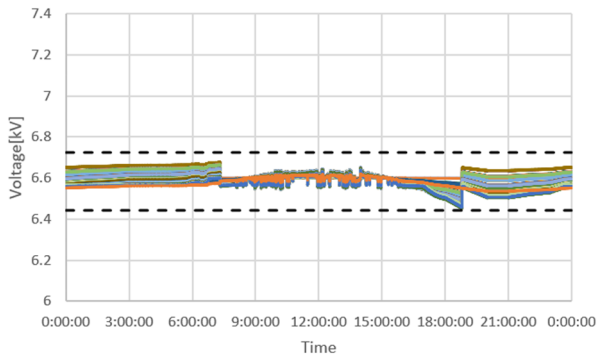
— SVR1

— SVR1



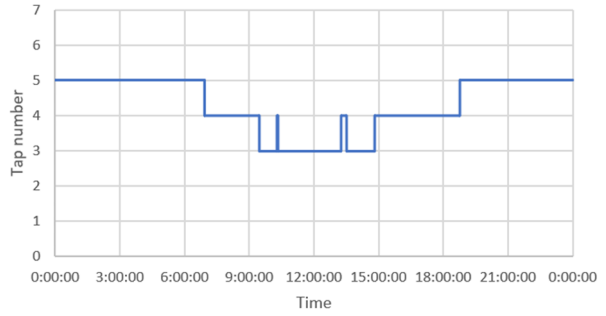
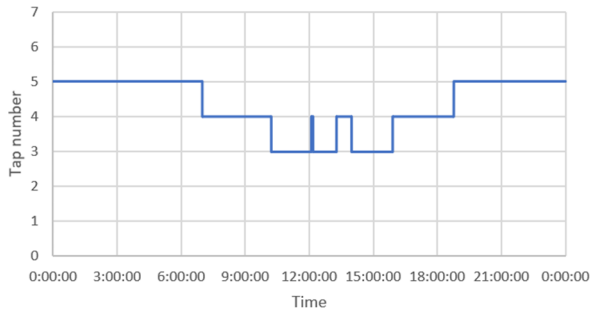
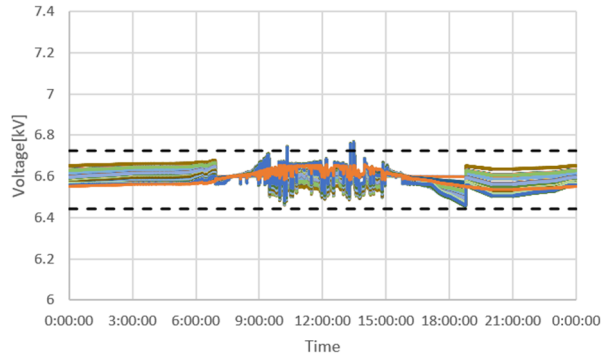
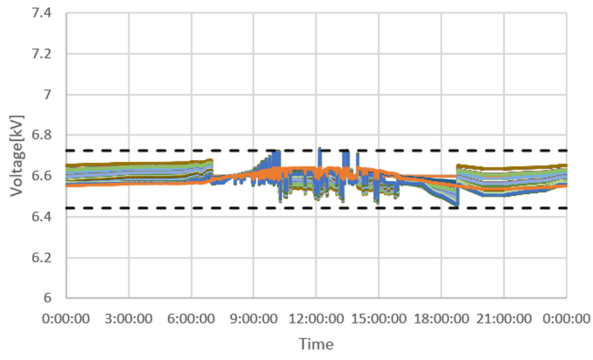
(e) PV 40%

(f) PV 50%



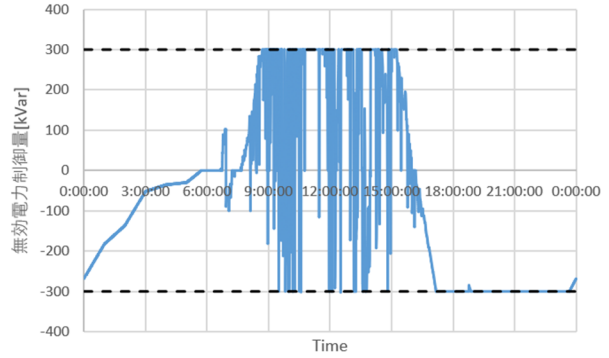
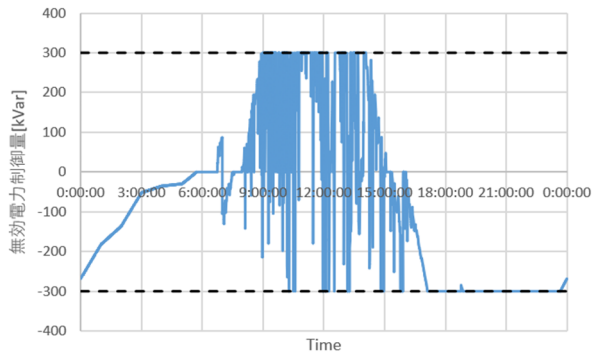
(g) PV 60%

(h) PV 70%



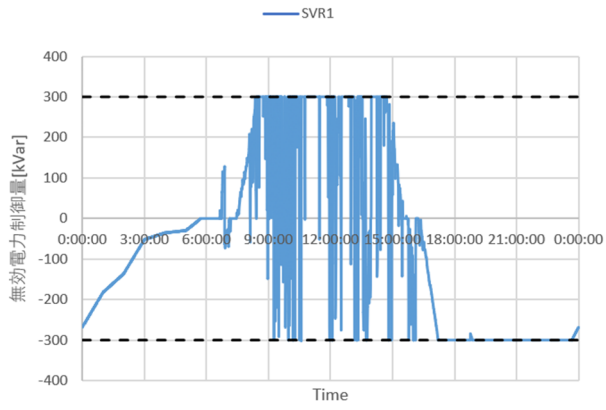
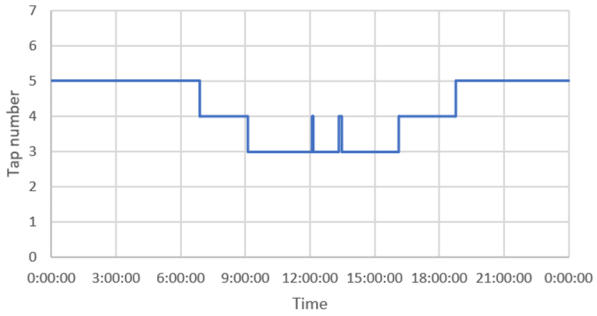
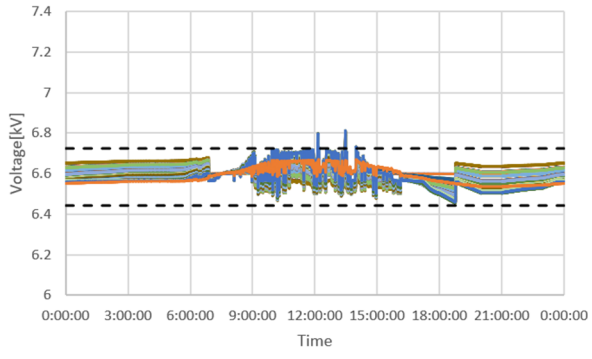
— SVR1

— SVR1



(i) PV 80%

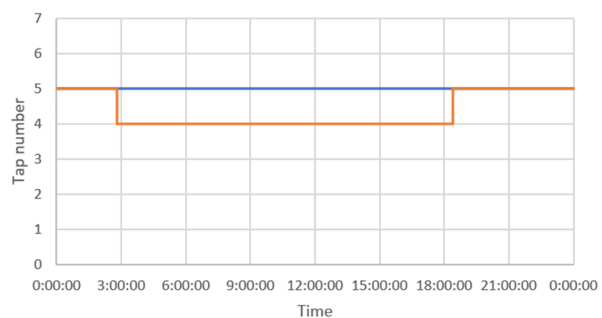
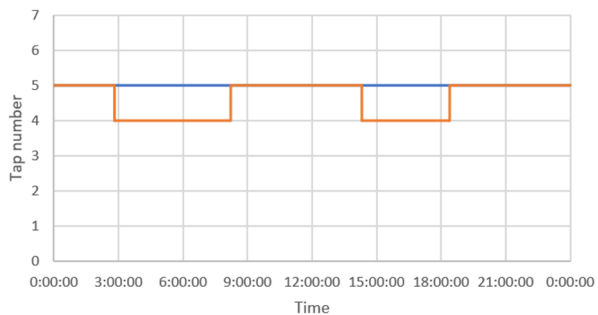
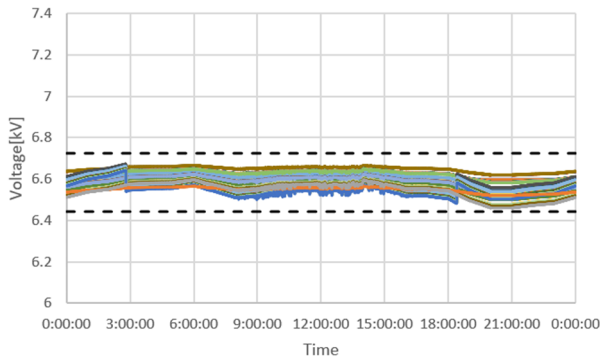
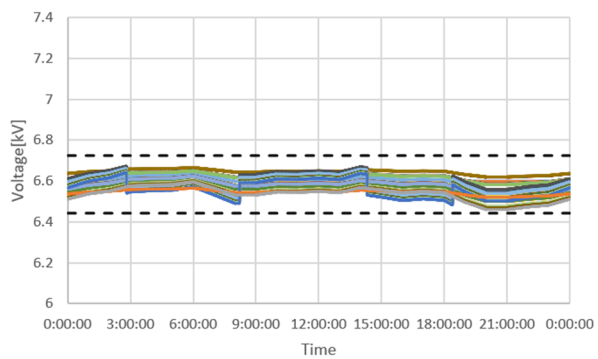
(j) PV 90%



(k) PV 100%

OD21 系統, PV 力率 0.95, 分散配置, SVR-SVR

(上 : 電圧分布, 下 : タップ位置)

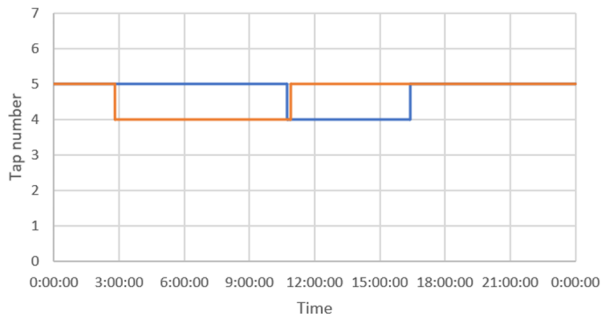
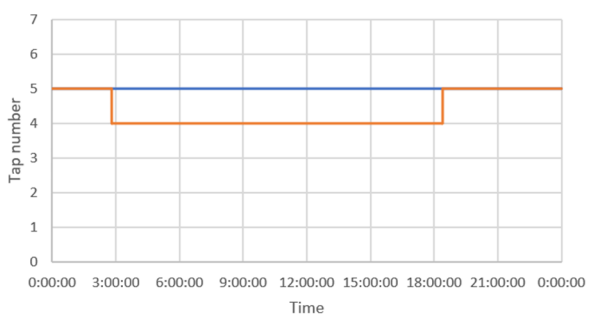
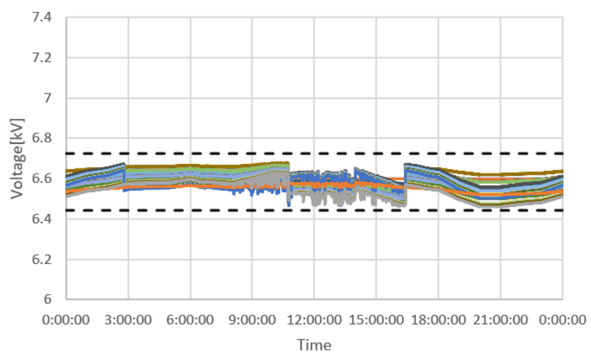
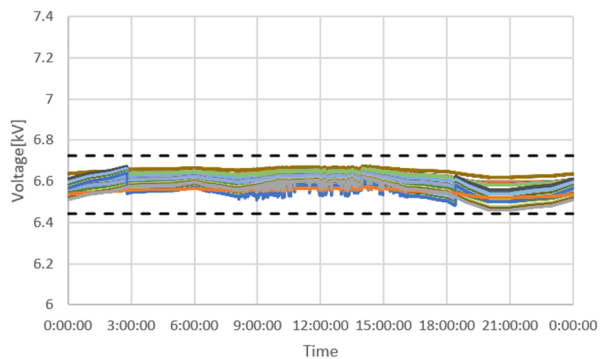


— SVR1 — SVR2

— SVR1 — SVR2

(a) PV 0%

(b) PV 10%

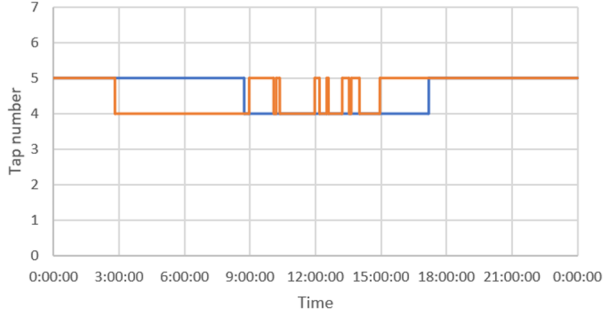
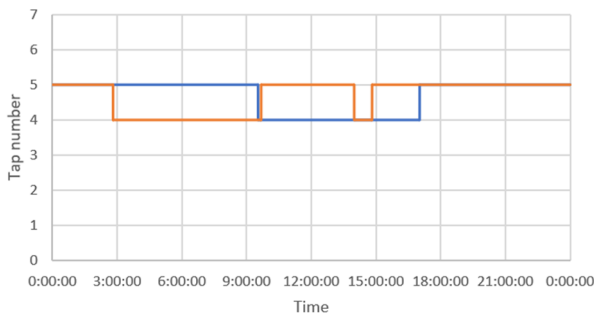
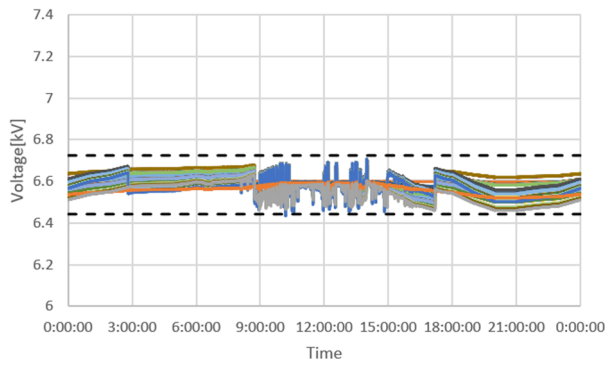
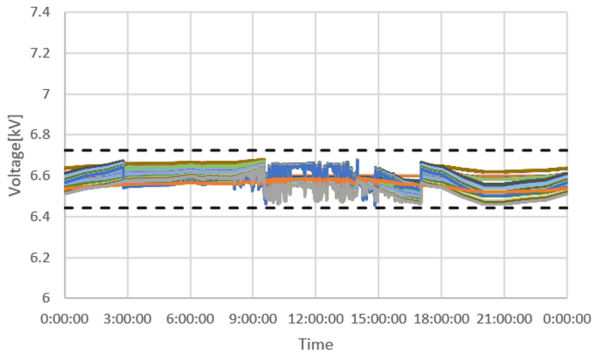


— SVR1 — SVR2

— SVR1 — SVR2

(c) PV 20%

(d) PV 30%

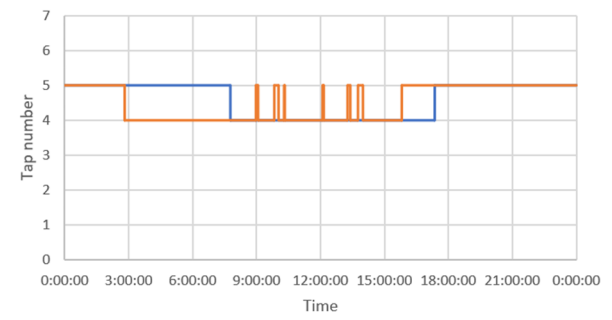
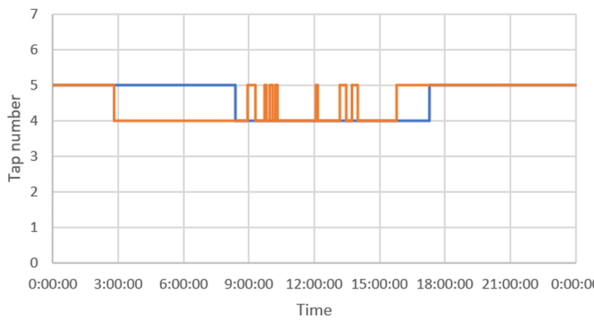
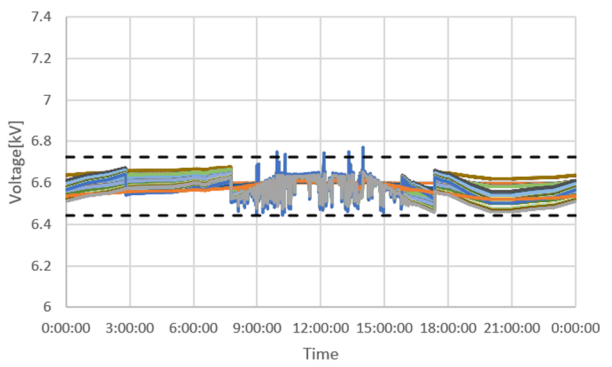
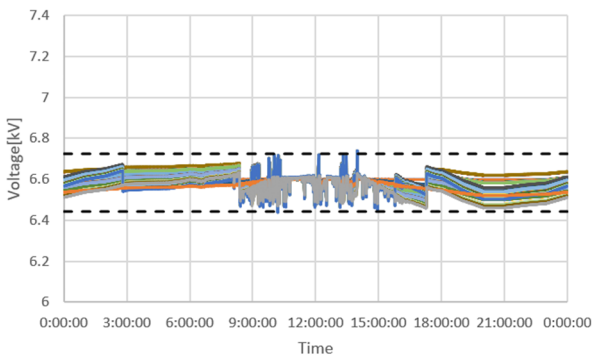


— SVR1 — SVR2

(e) PV 40%

— SVR1 — SVR2

(f) PV 50%

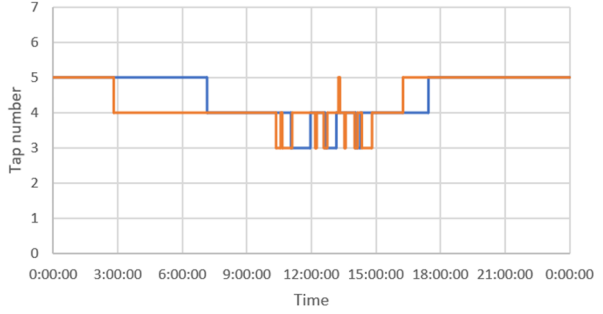
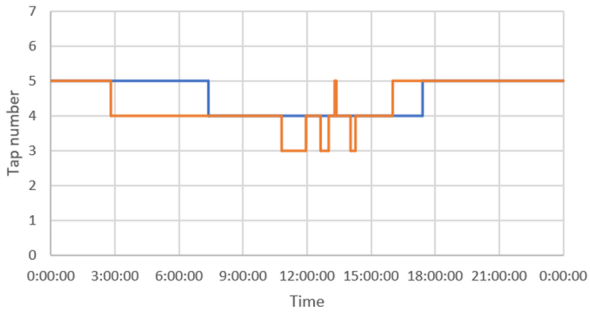
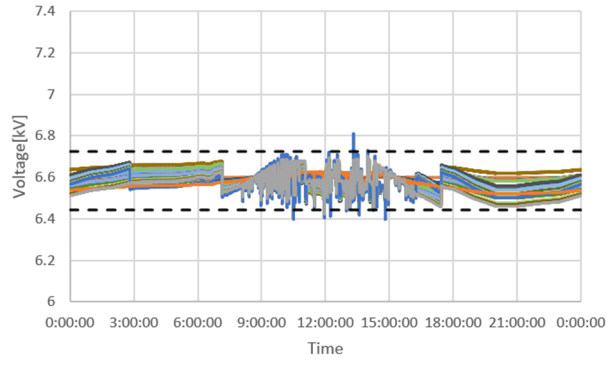
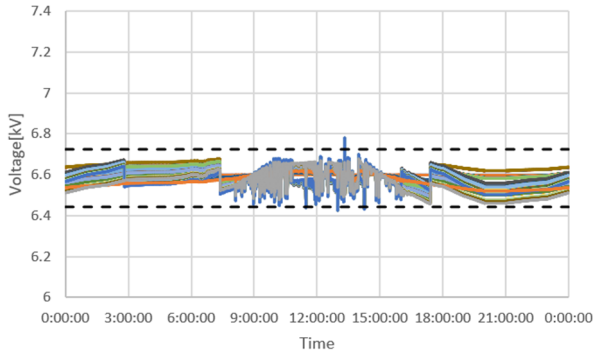


— SVR1 — SVR2

(g) PV 60%

— SVR1 — SVR2

(h) PV 70%

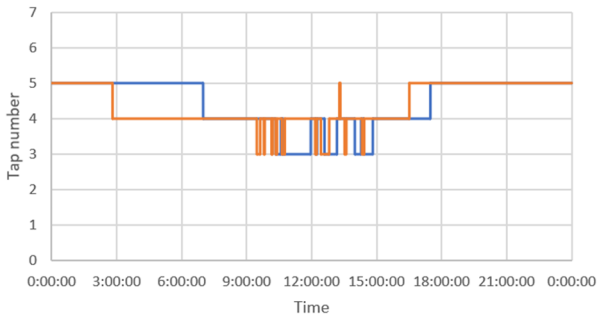
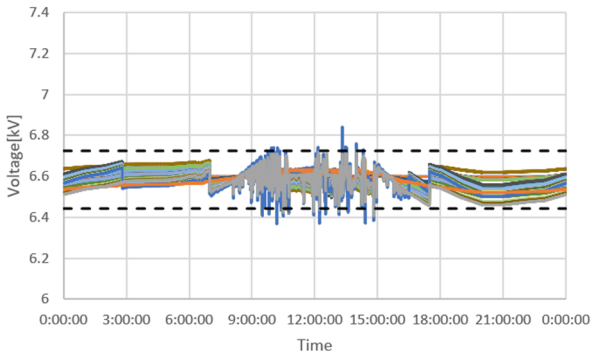


— SVR1 — SVR2

— SVR1 — SVR2

(i) PV 80%

(j) PV 90%

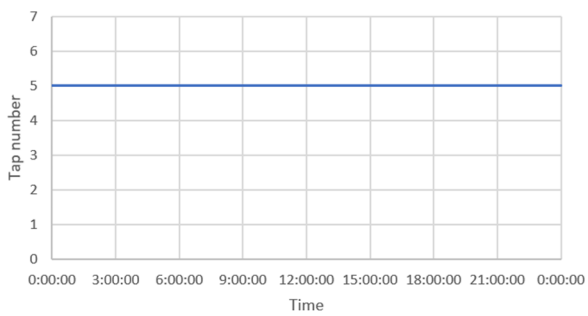
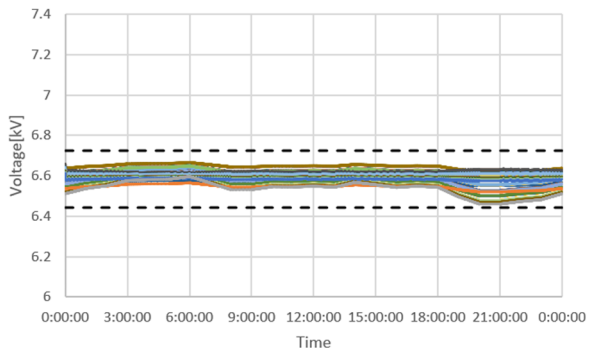


— SVR1 — SVR2

(k) PV 100%

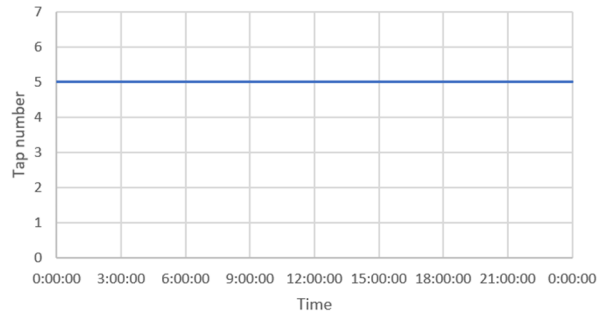
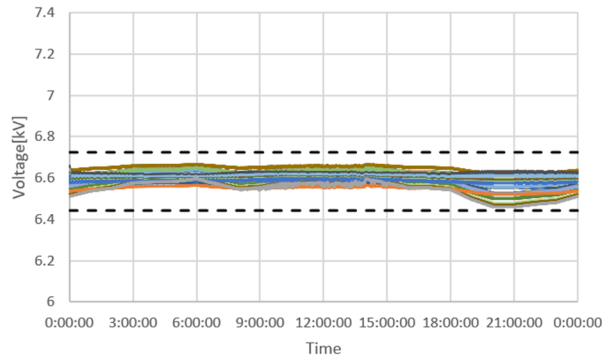
OD21 系統, PV 力率 0.95, 分散配置, SVR-TVV

(上: 電圧分布, 下: タップ位置)



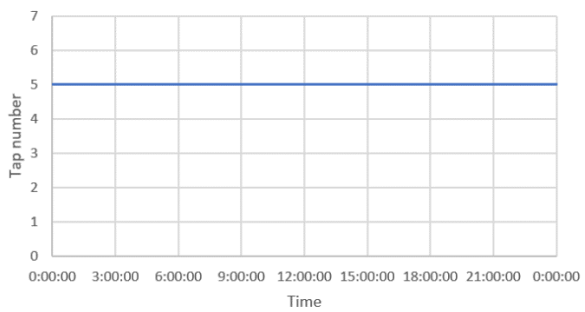
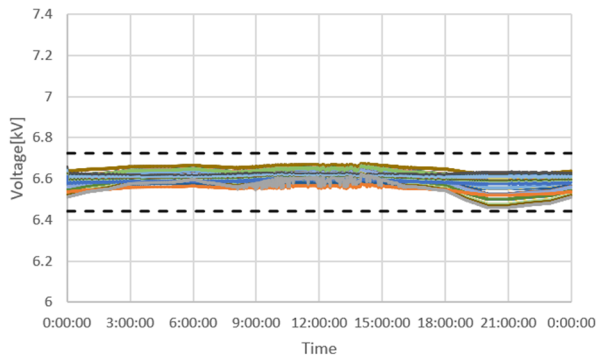
— SVR1

(a) PV 0%



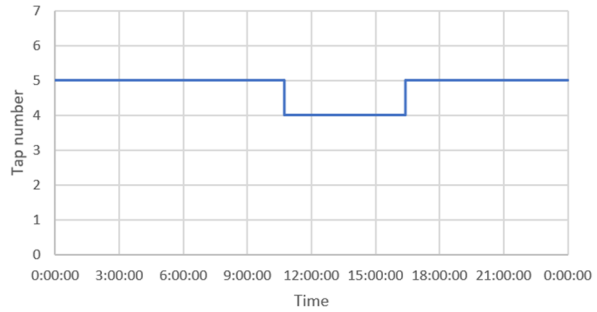
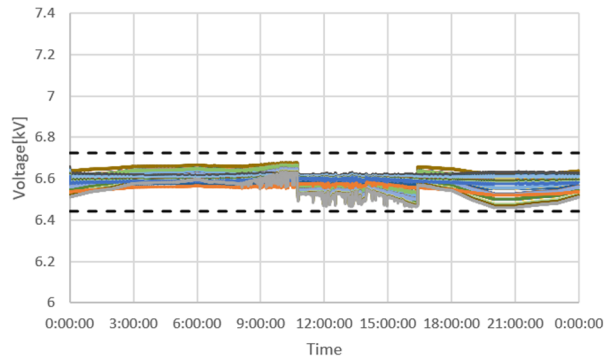
— SVR1

(b) PV 10%



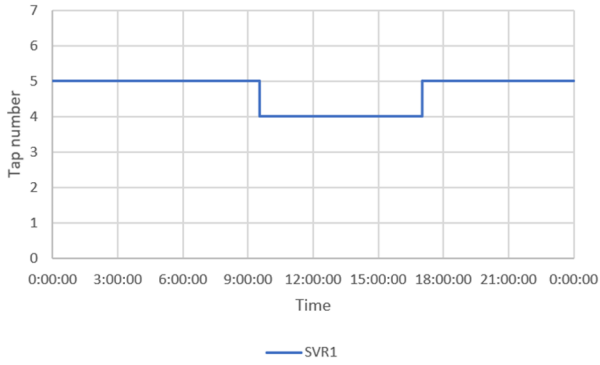
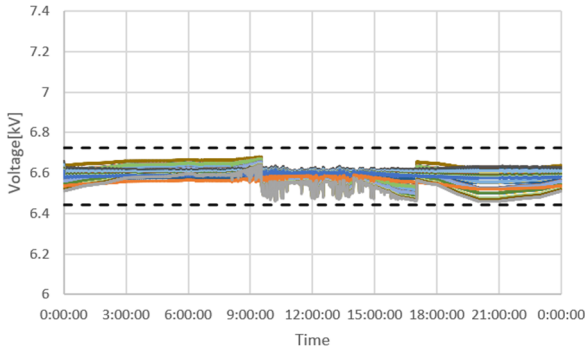
— SVR1

(c) PV 20%

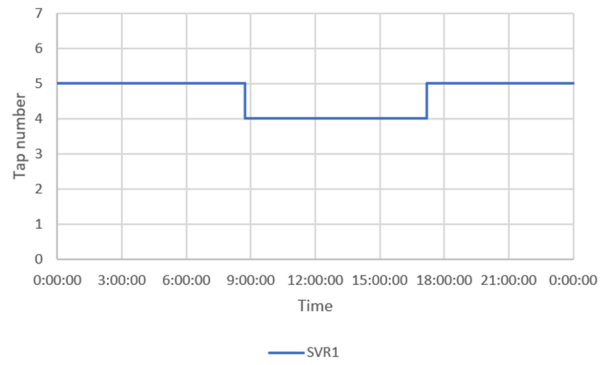
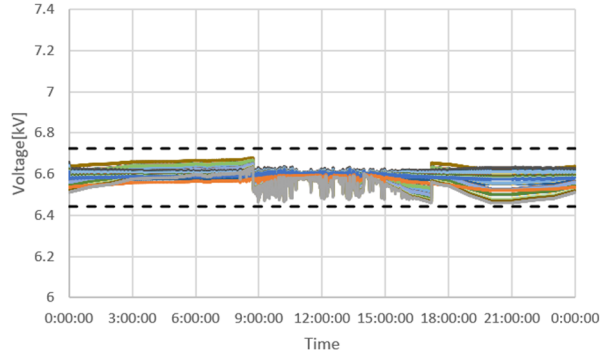


— SVR1

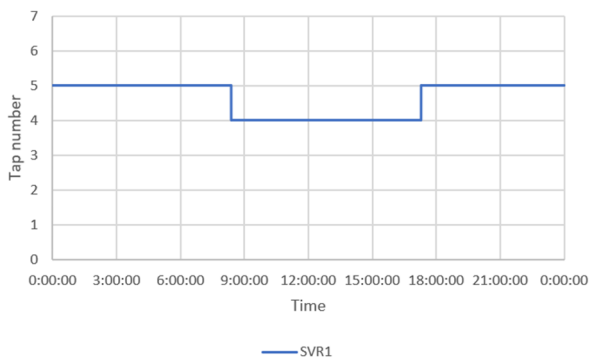
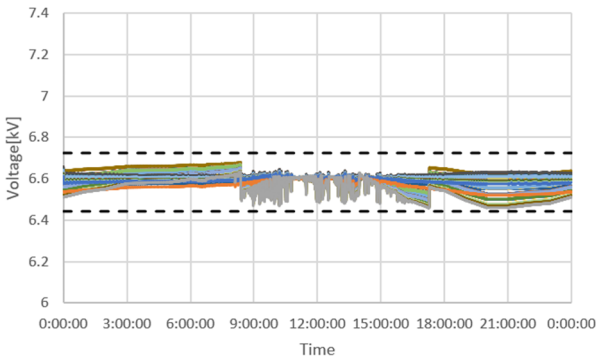
(d) PV 30%



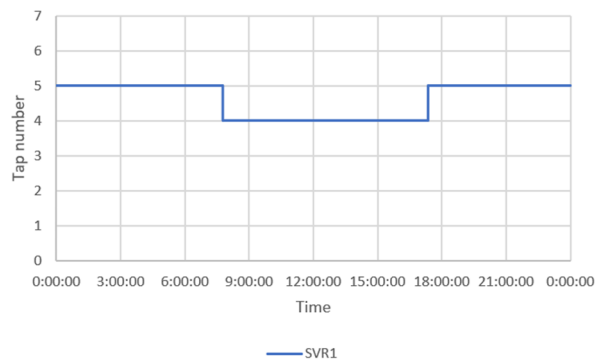
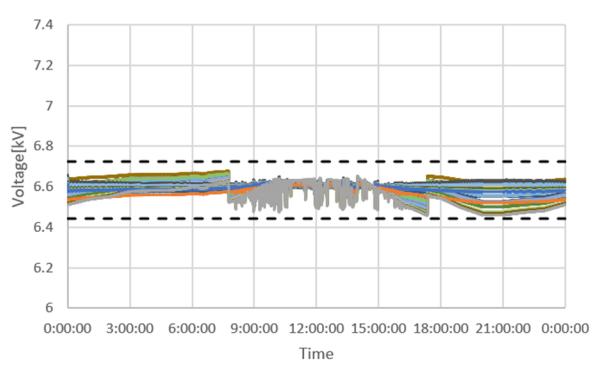
(e) PV 40%



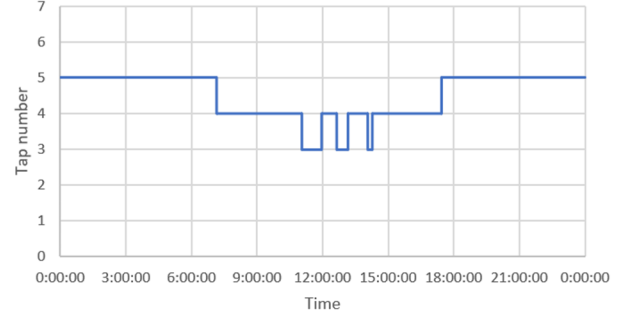
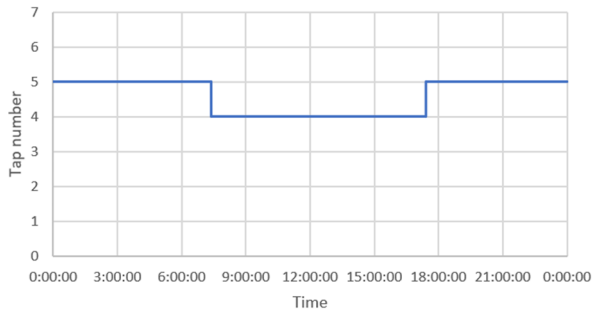
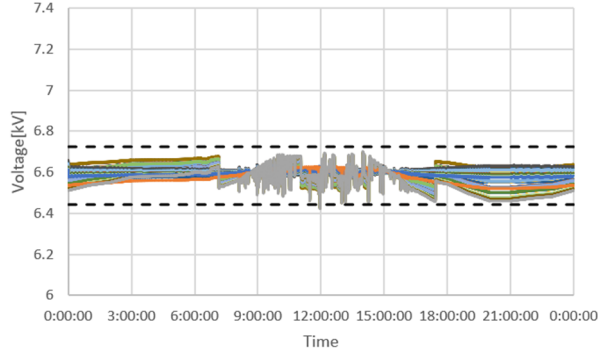
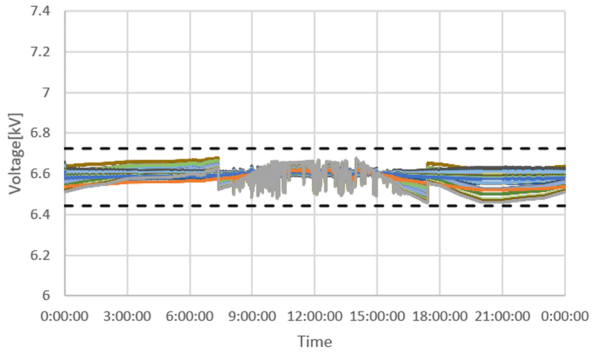
(f) PV 50%



(g) PV 60%

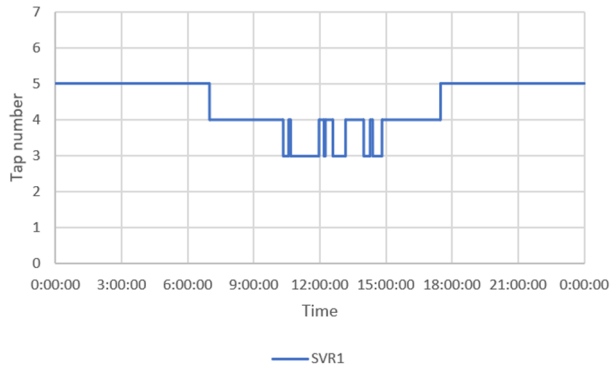
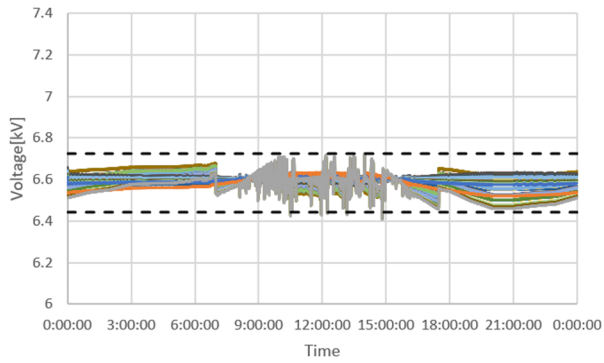


(h) PV 70%



(i) PV 80%

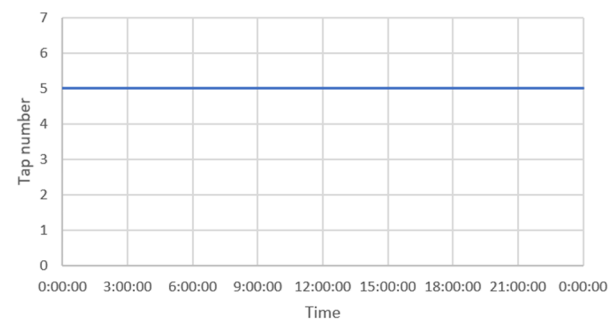
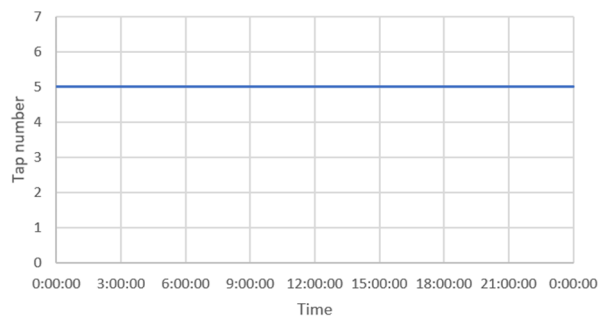
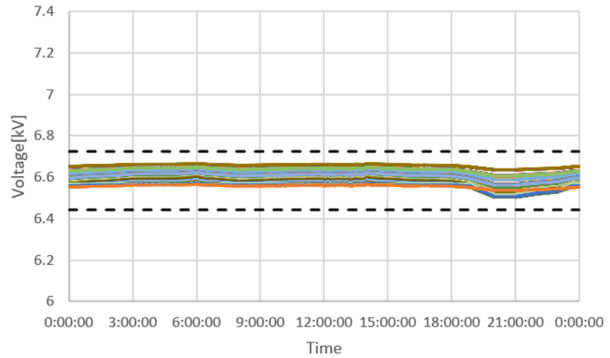
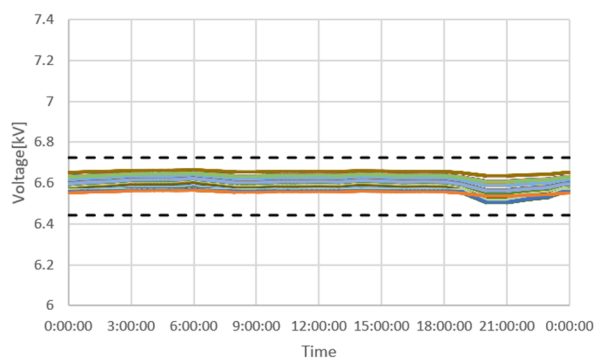
(j) PV 90%



(k) PV 100%

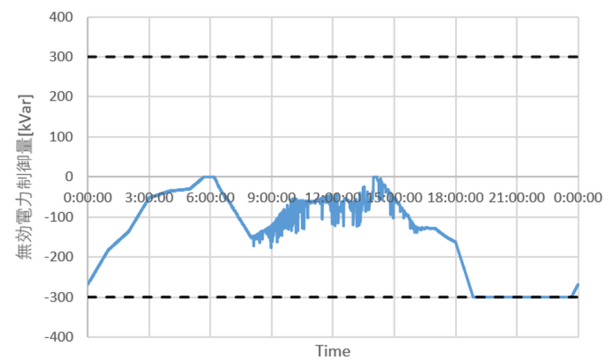
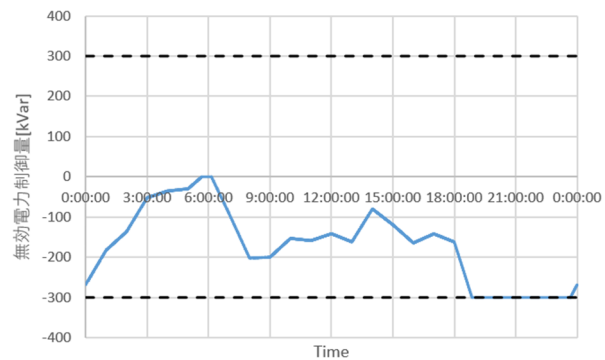
OD21 系統, PV 力率 0.95, 分散配置, SVR-SVC

(上: 電圧分布, 中: タップ位置, 下: SVC の無効電力)



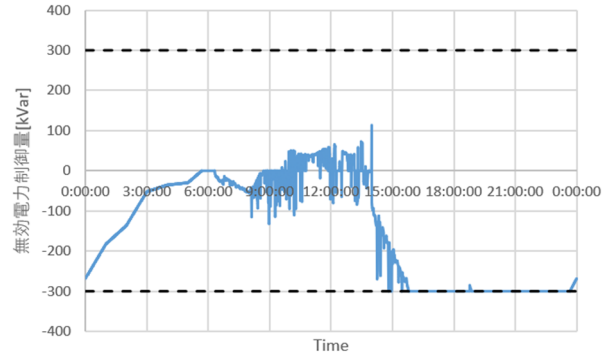
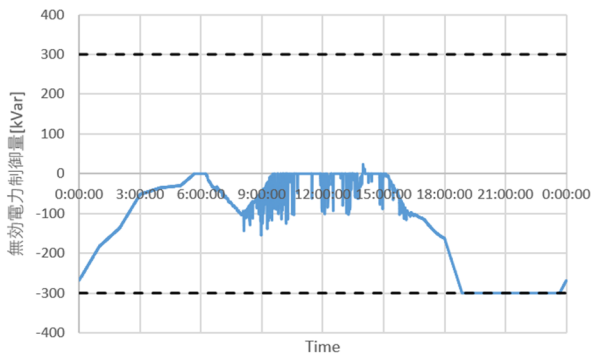
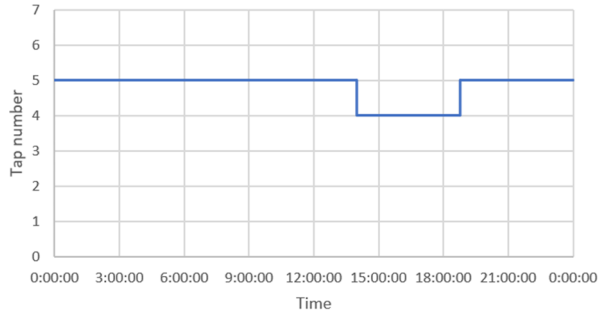
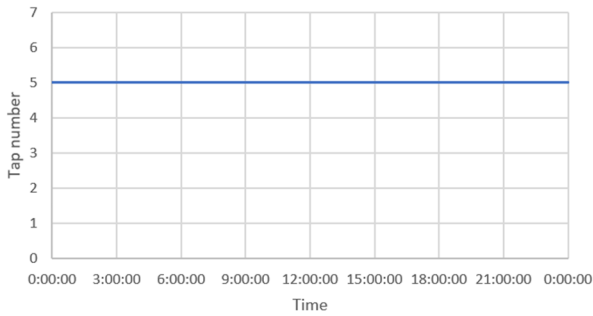
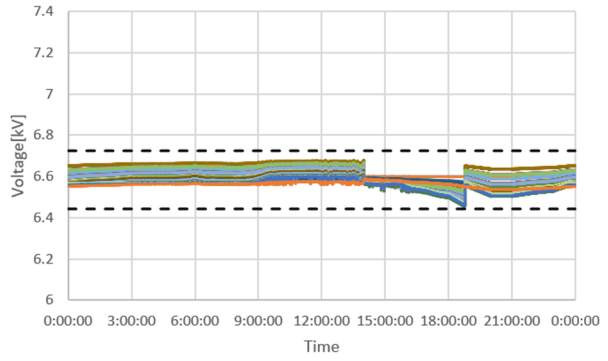
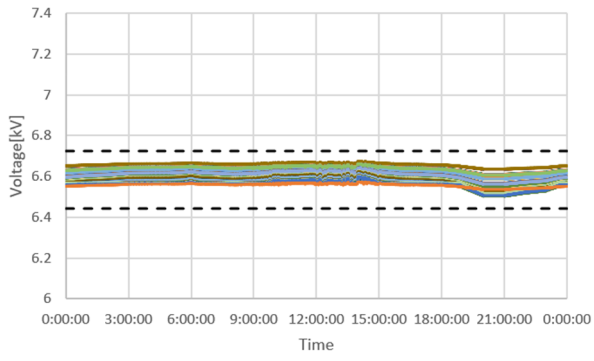
— SVR1

— SVR1



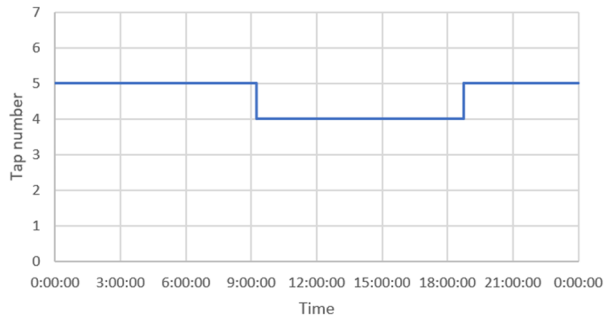
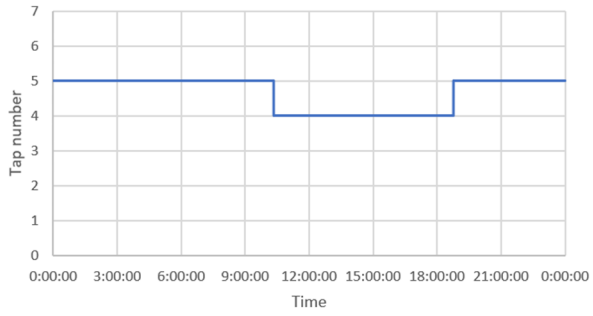
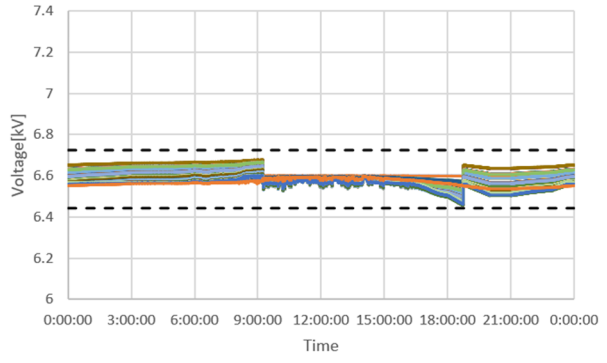
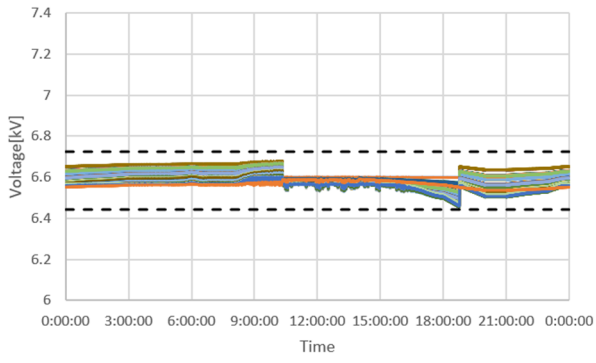
(a) PV 0%

(b) PV 10%



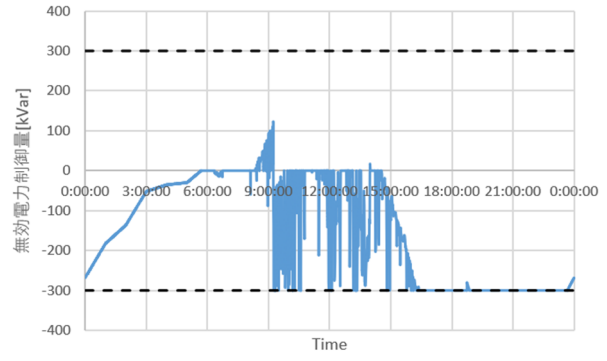
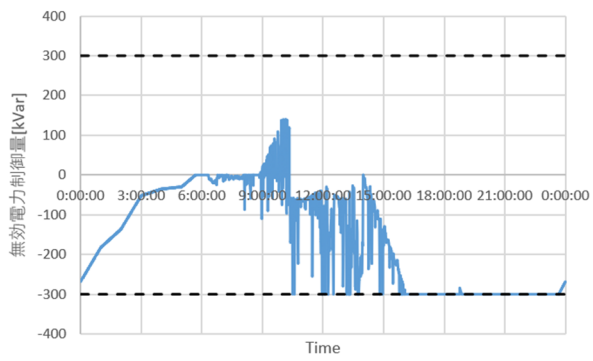
(c) PV 20%

(d) PV 30%



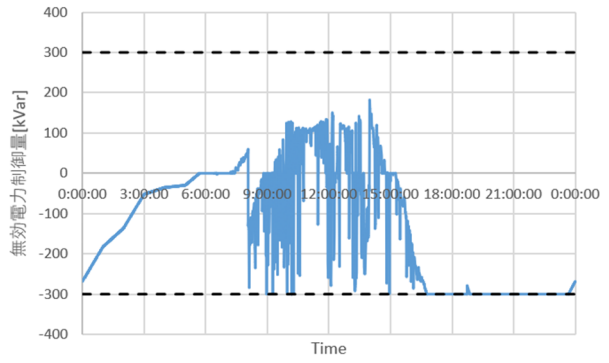
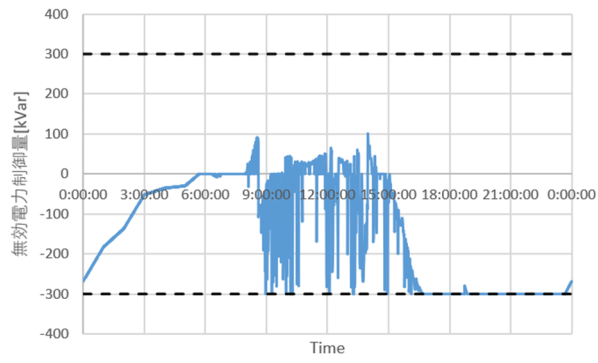
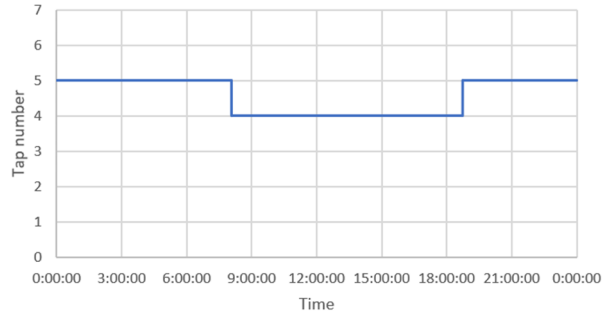
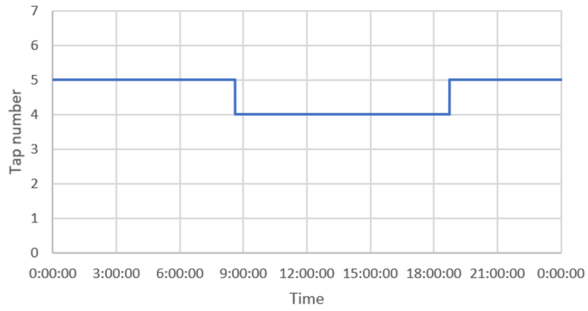
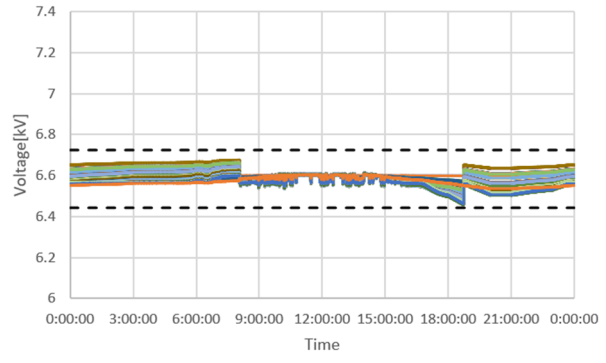
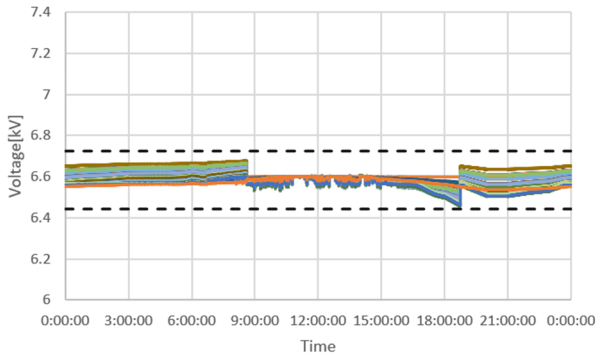
— SVR1

— SVR1



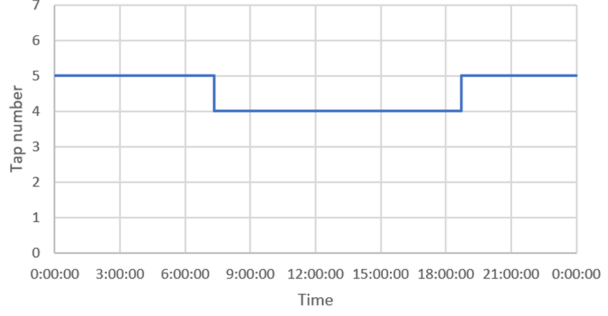
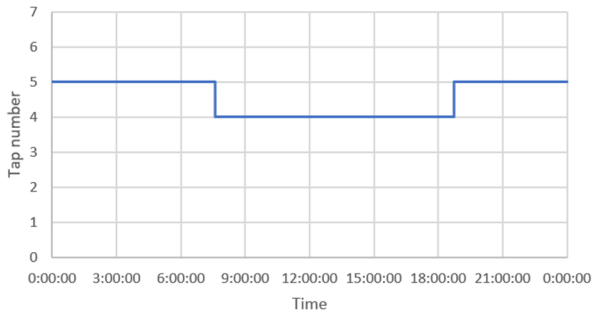
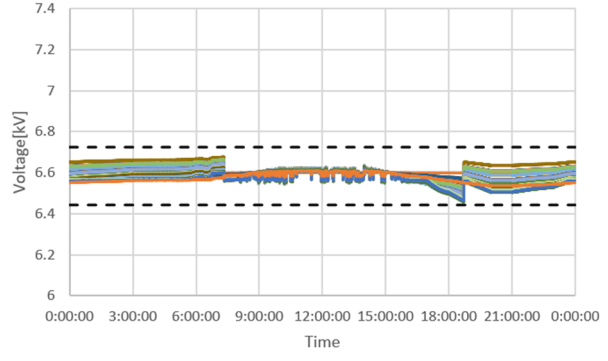
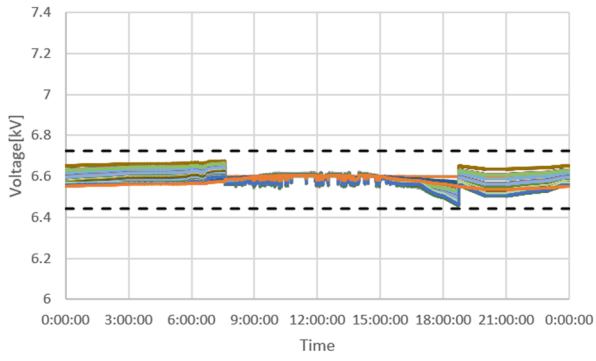
(e) PV 40%

(f) PV 50%



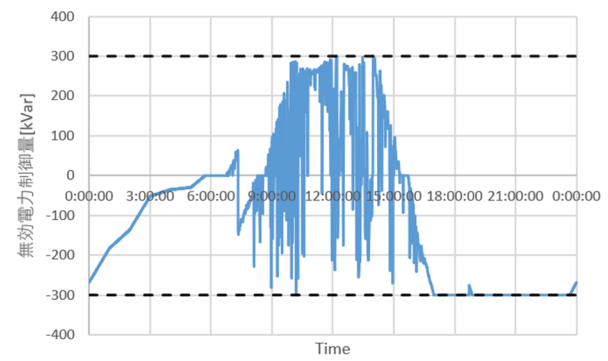
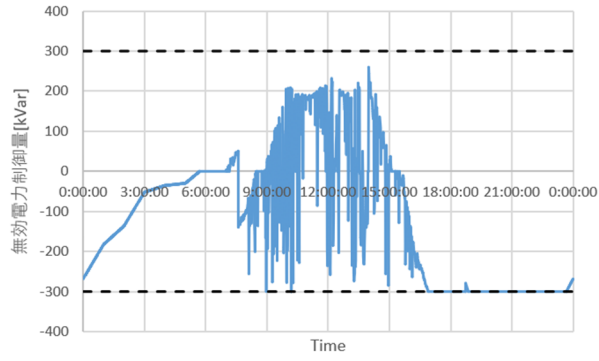
(g) PV 60%

(h) PV 70%



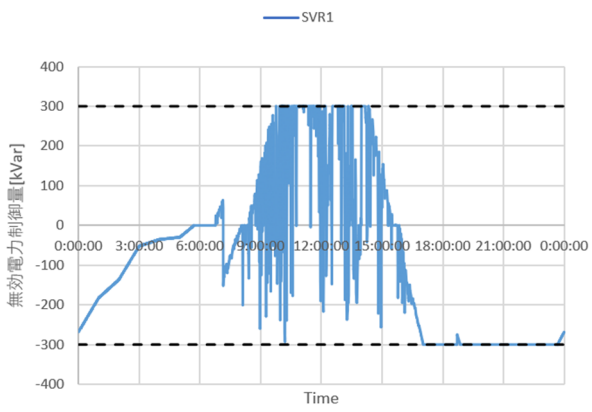
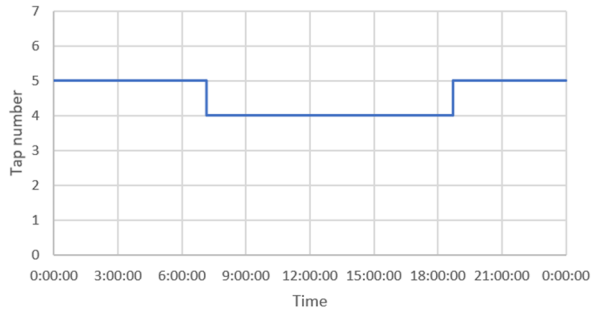
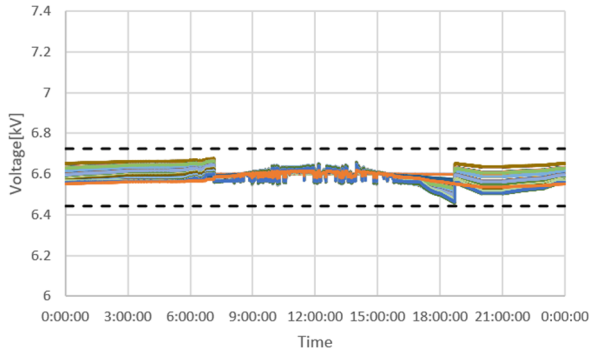
— SVR1

— SVR1



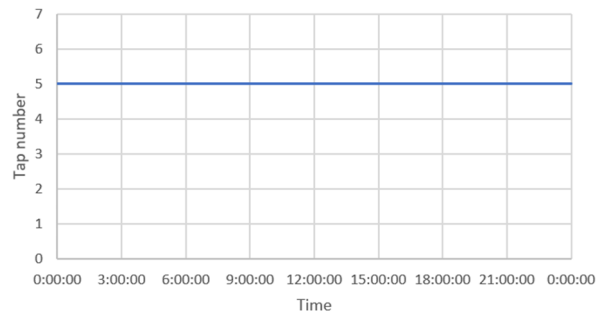
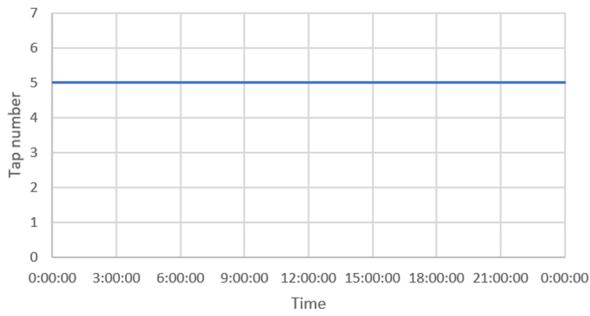
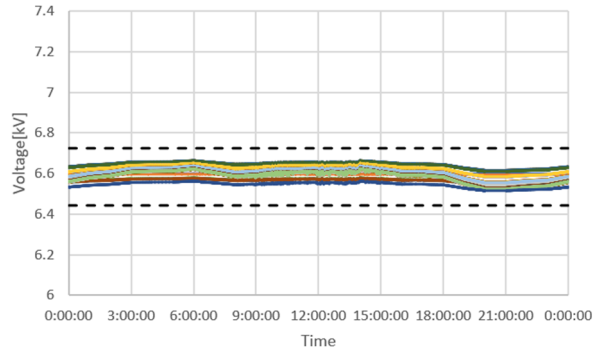
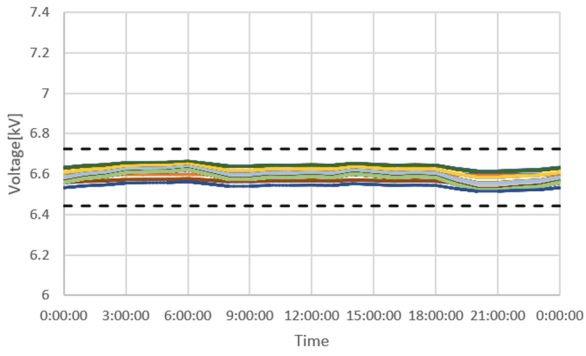
(i) PV 80%

(j) PV 90%



(k) PV 100%

OC2 系統, PV 力率 1.0, 分散配置, SVR
 (上: 電圧分布, 下: タップ位置)

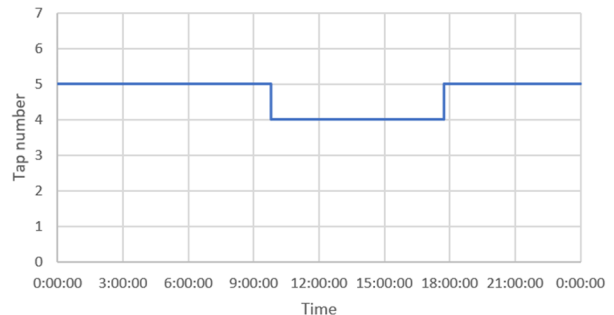
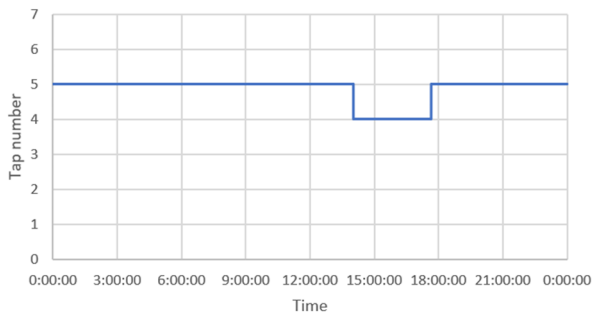
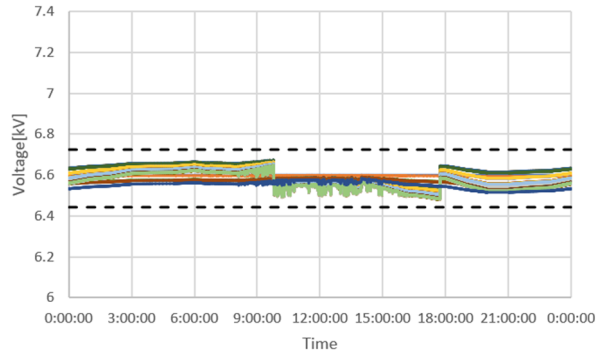
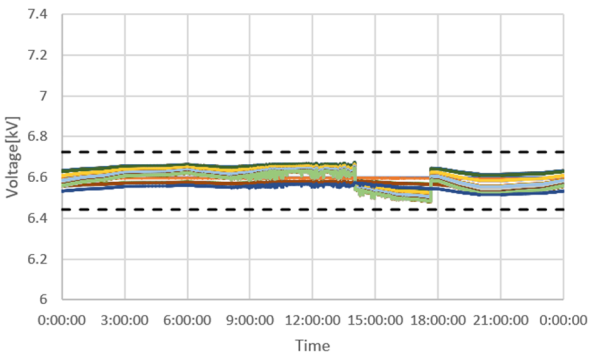


— SVR1

— SVR1

(a) PV 0%

(b) PV 10%

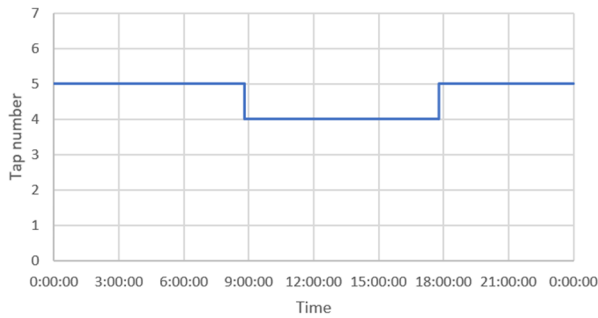
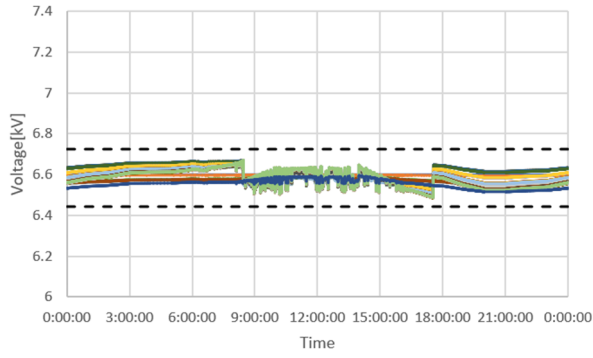


— SVR1

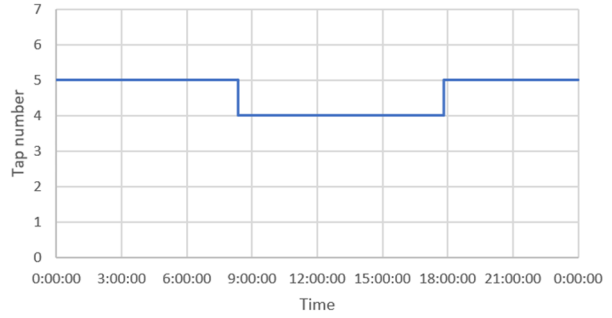
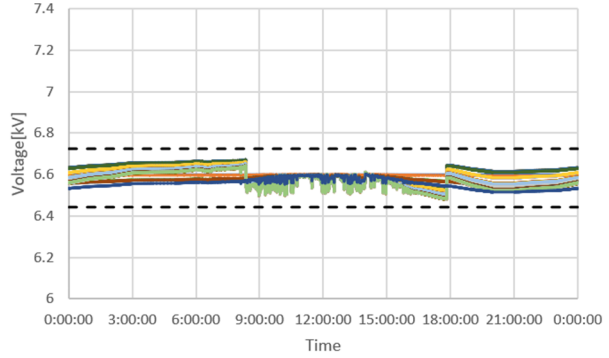
— SVR1

(c) PV 20%

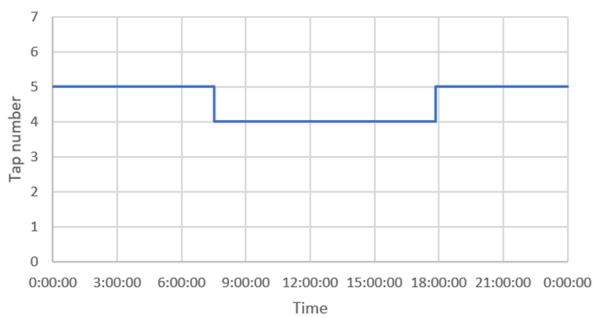
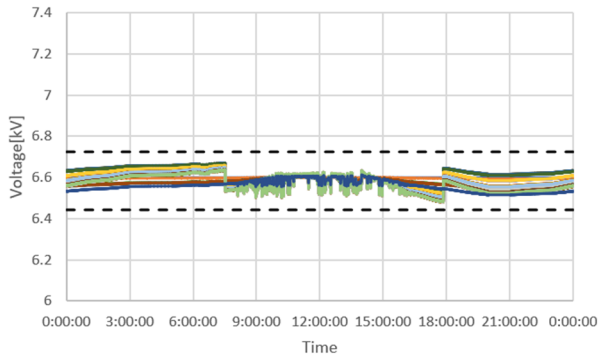
(d) PV 30%



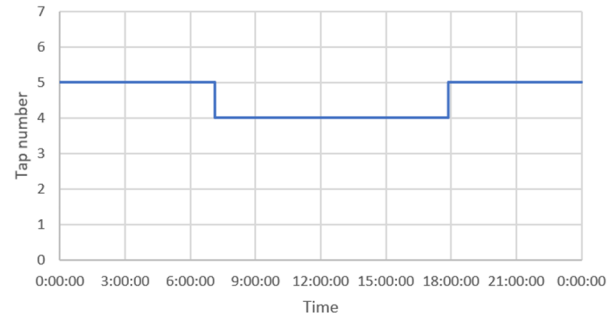
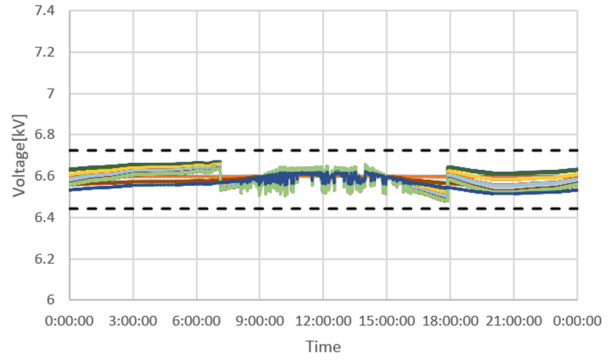
(e) PV 40%



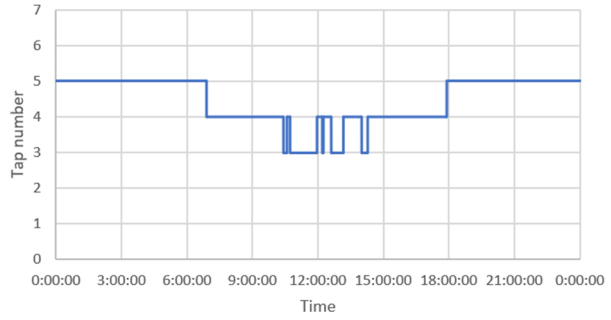
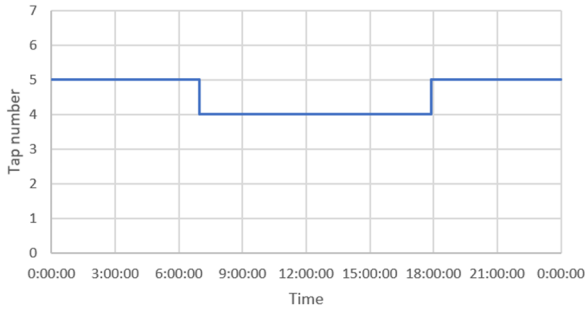
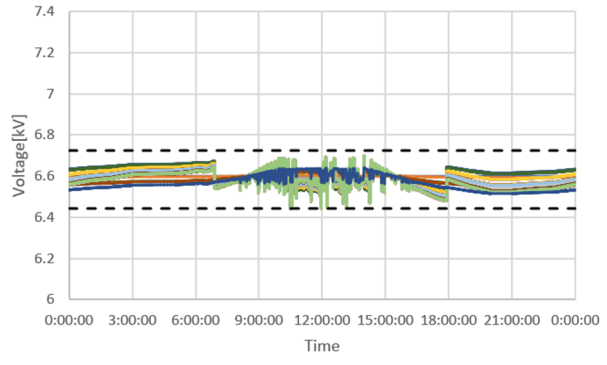
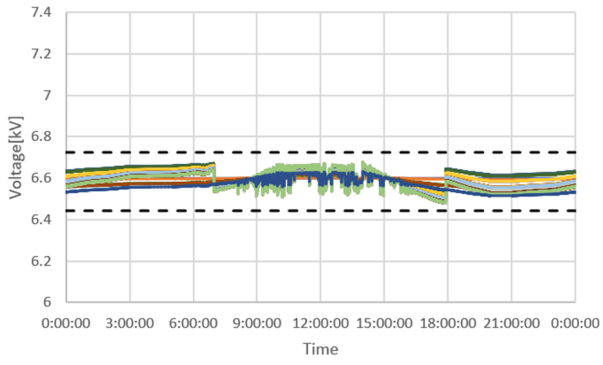
(f) PV 50%



(g) PV 60%



(h) PV 70%

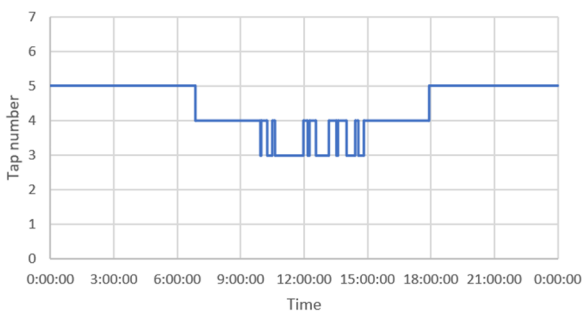
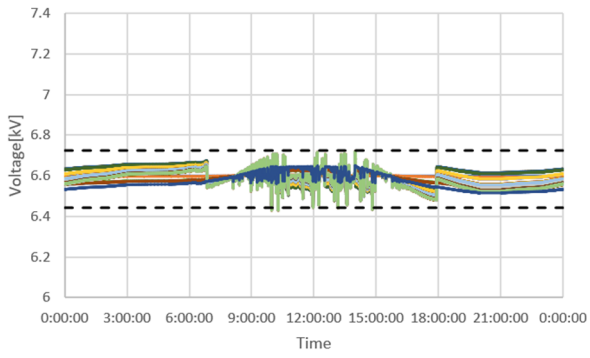


— SVR1

— SVR1

(i) PV 80%

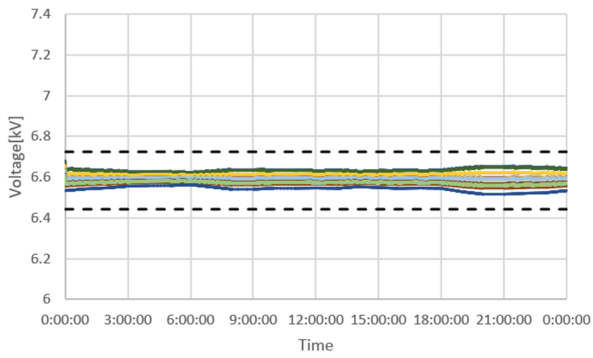
(j) PV 90%



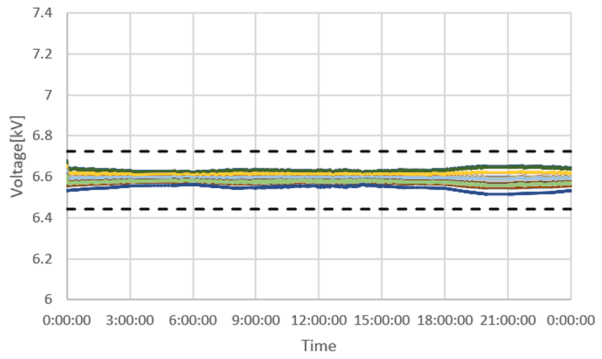
— SVR1

(k) PV 100%

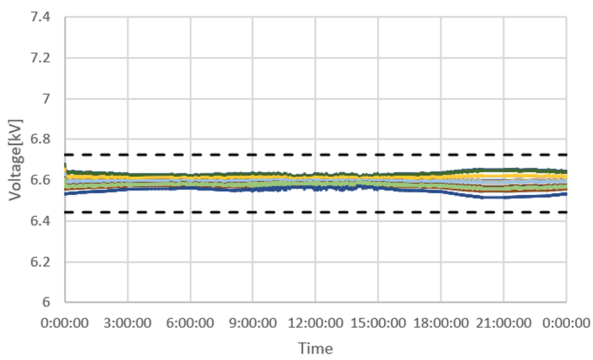
OC2 系統, PV 力率 1.0, 分散配置, TVR
 (上: 電圧分布, 下: タップ位置)



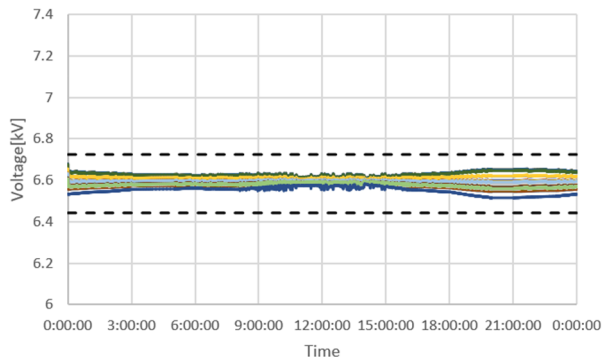
(a) PV 0%



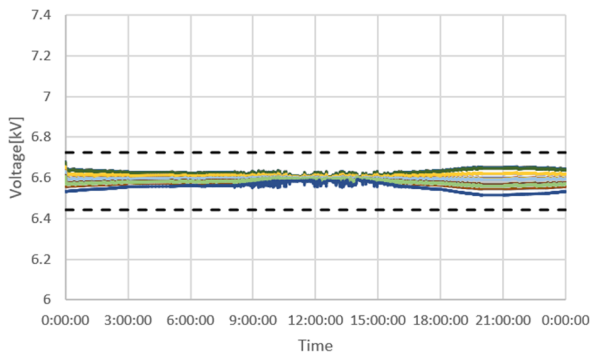
(b) PV 10%



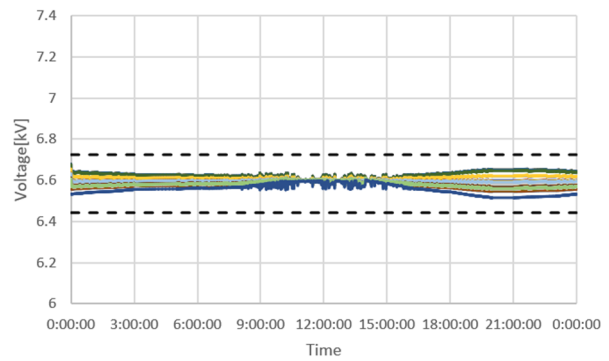
(c) PV 20%



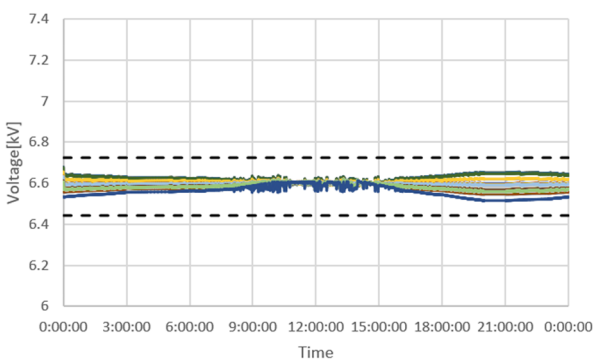
(d) PV 30%



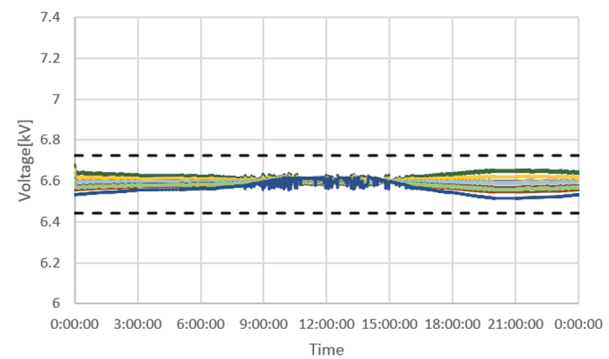
(e) PV 40%



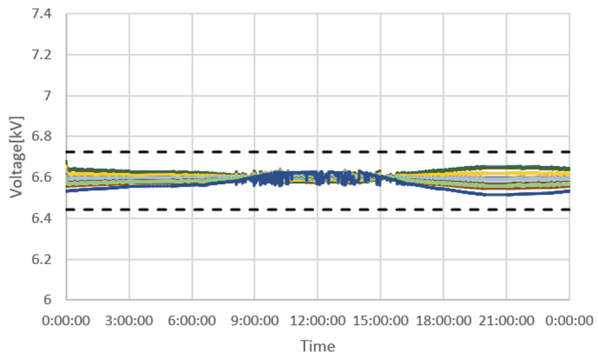
(f) PV 50%



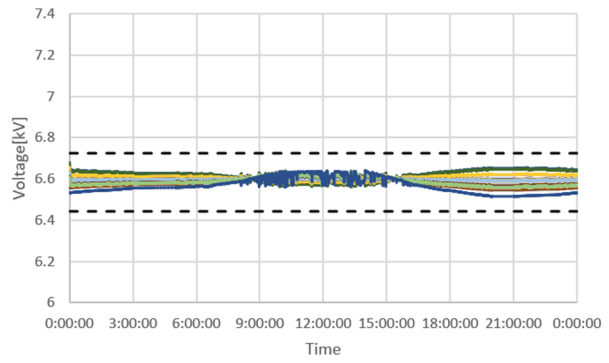
(g) PV 60%



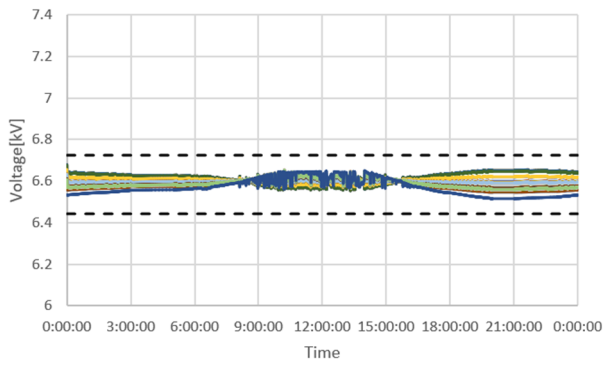
(h) PV 70%



(i) PV 80%



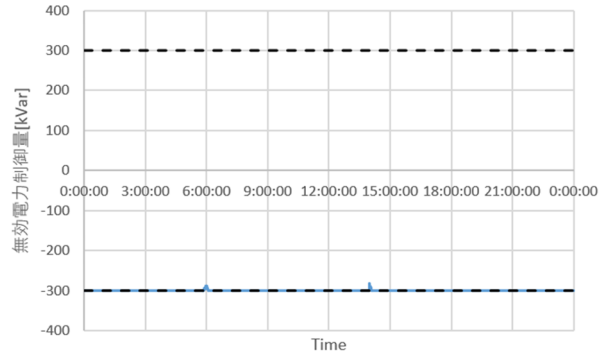
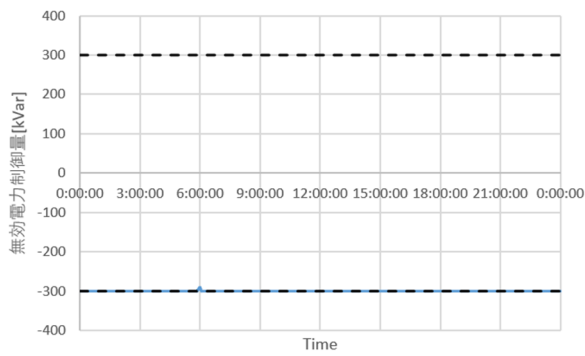
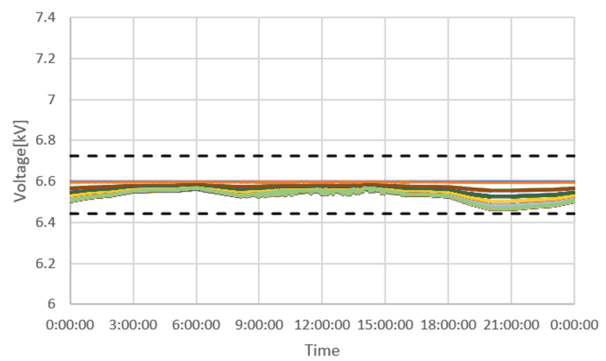
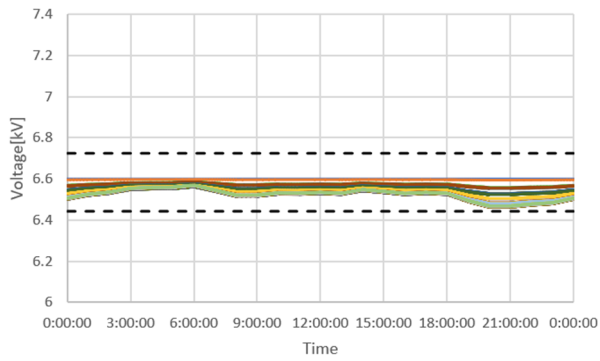
(j) PV 90%



(k) PV 100%

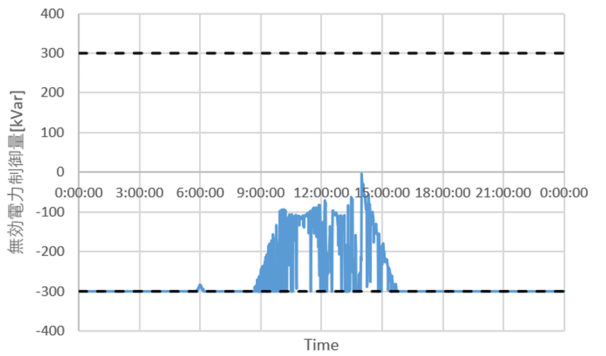
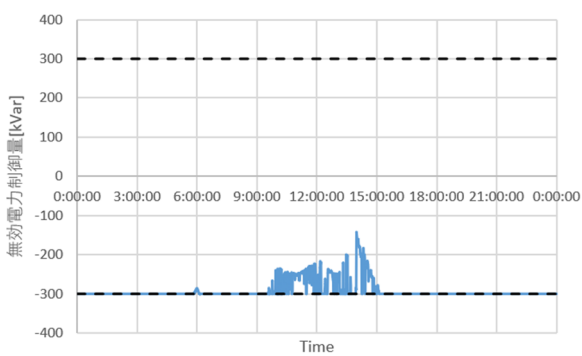
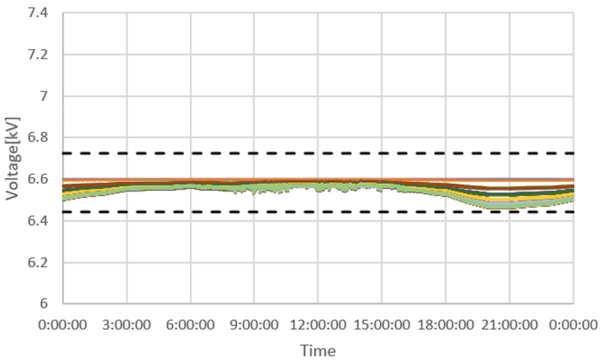
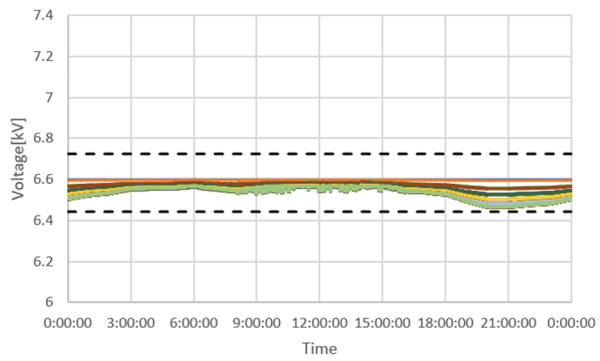
OC2 系統, PV 力率 1.0, 分散配置, SVC

(上: 電圧分布, 中: タップ位置, 下: SVC の無効電力)



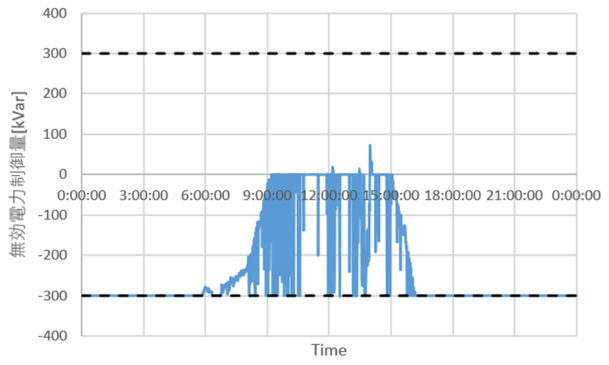
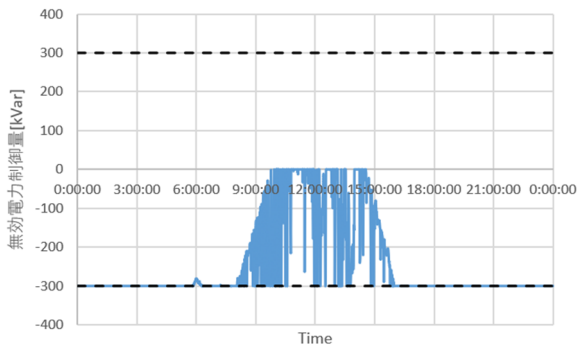
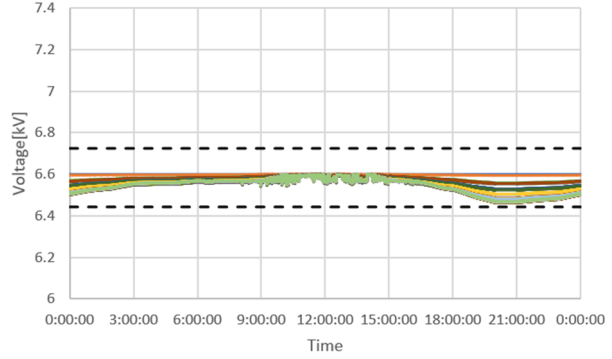
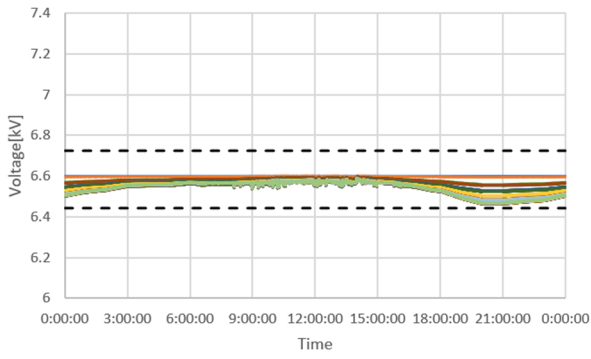
(a) PV 0%

(b) PV 10%



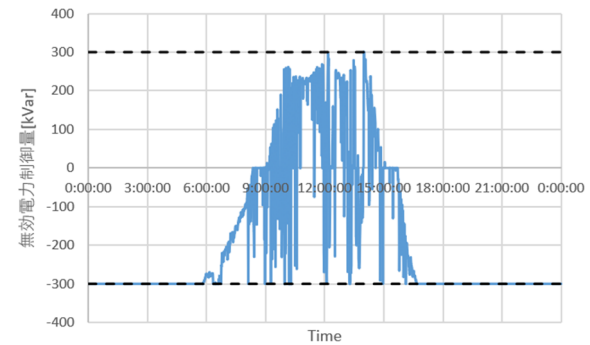
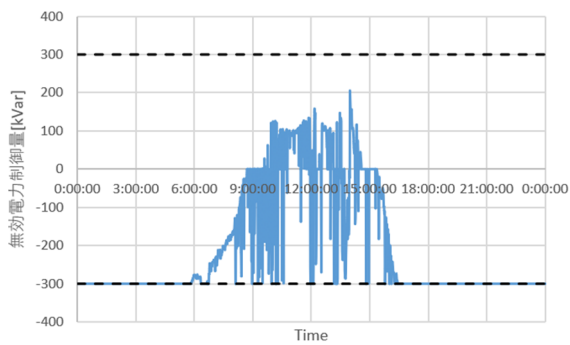
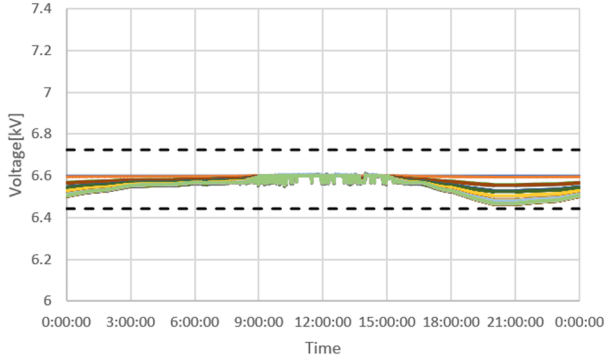
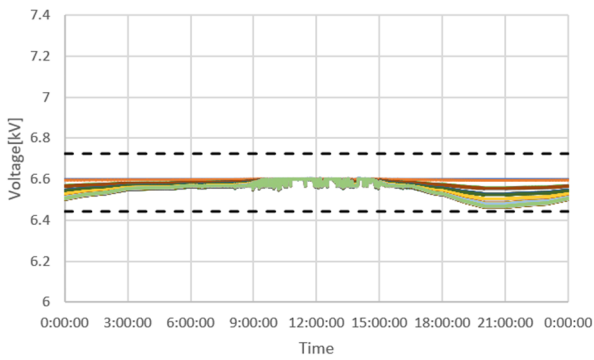
(c) PV 20%

(d) PV 30%



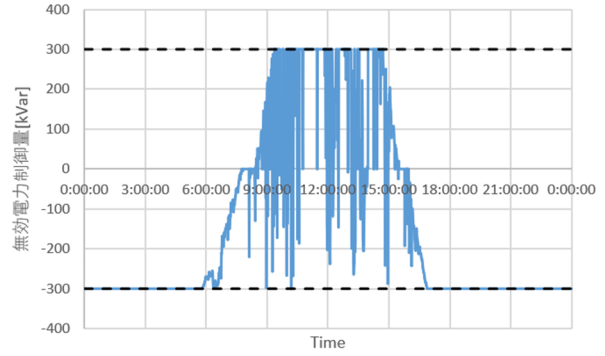
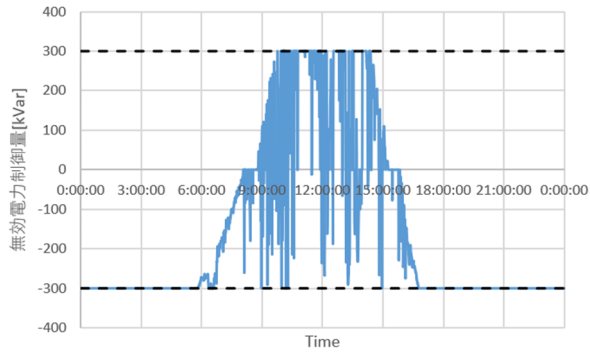
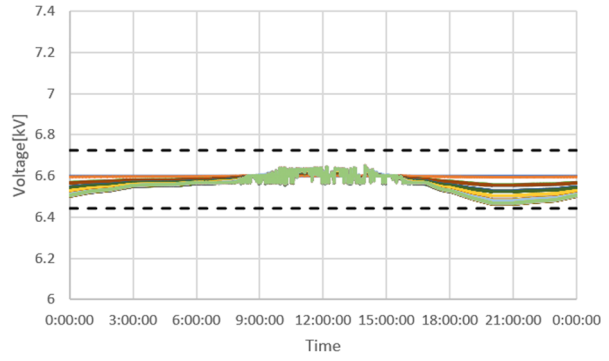
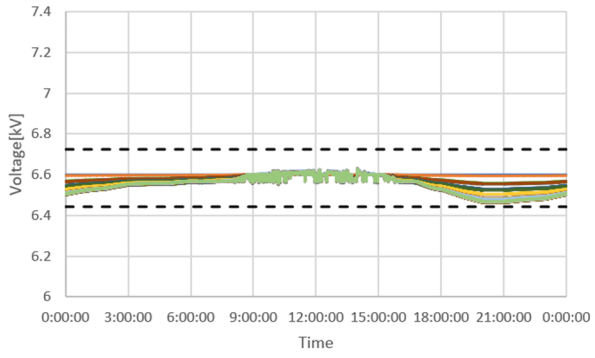
(e) PV 40%

(f) PV 50%



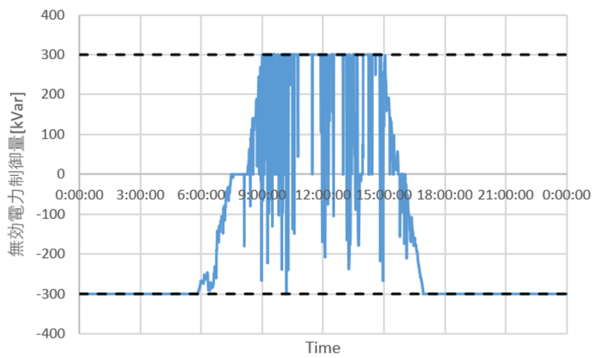
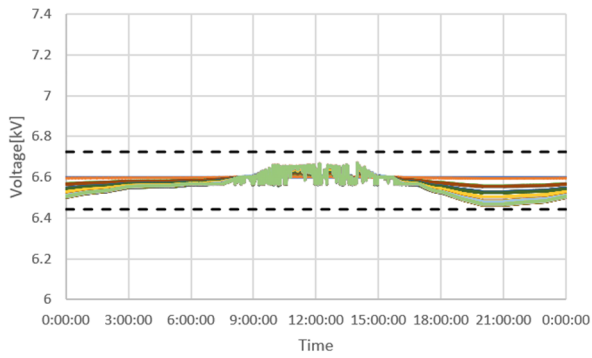
(g) PV 60%

(h) PV 70%



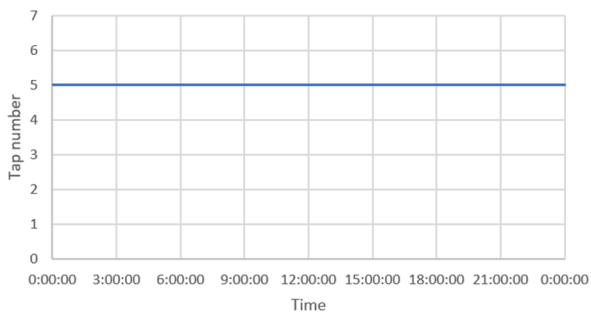
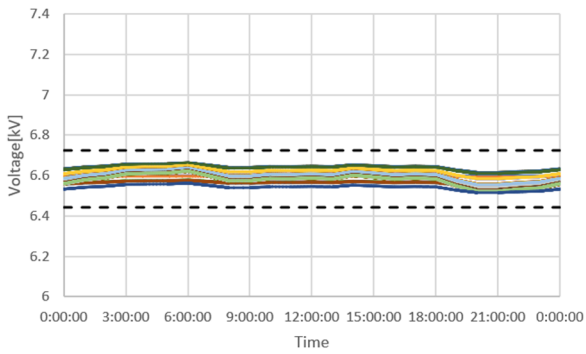
(i) PV 80%

(j) PV 90%



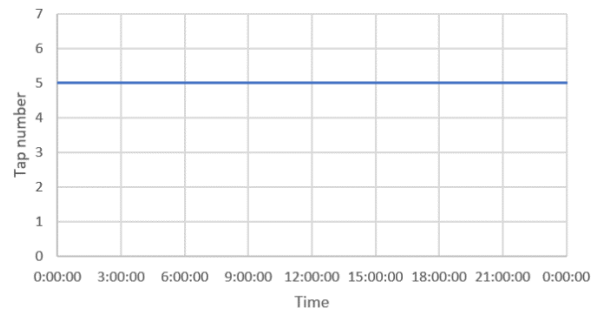
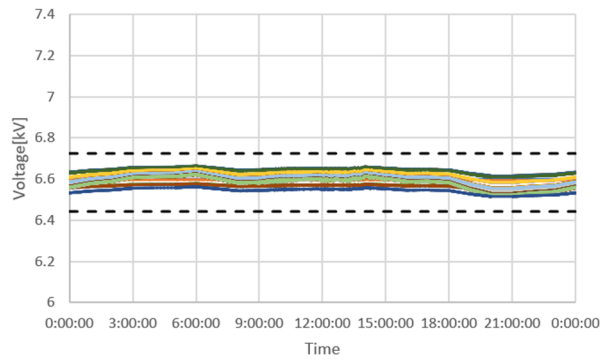
(k) PV 100%

OC2 系統, PV 力率 0.95, 分散配置, SVR
 (上: 電圧分布, 下: タップ位置)



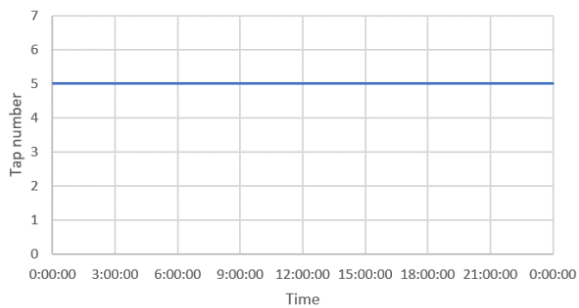
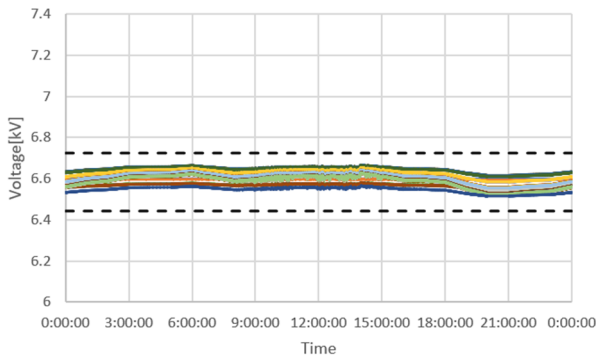
— SVR1

(a) PV 0%



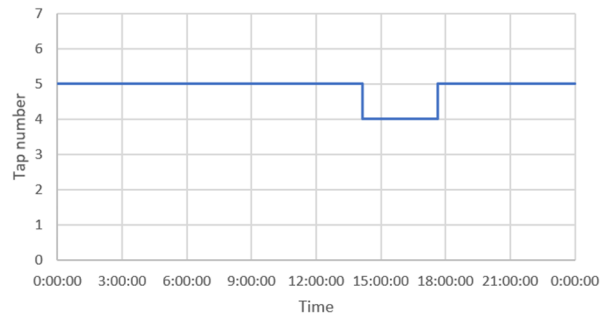
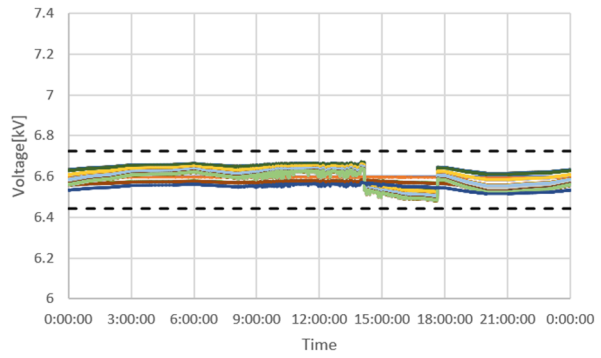
— SVR1

(b) PV 10%



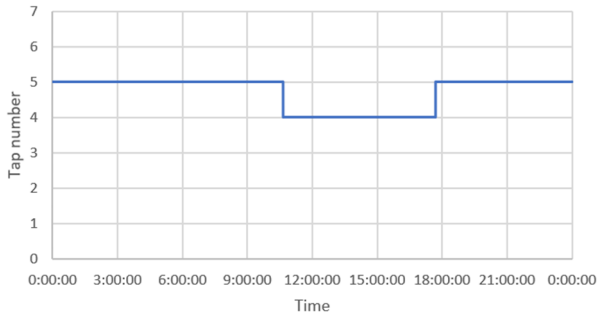
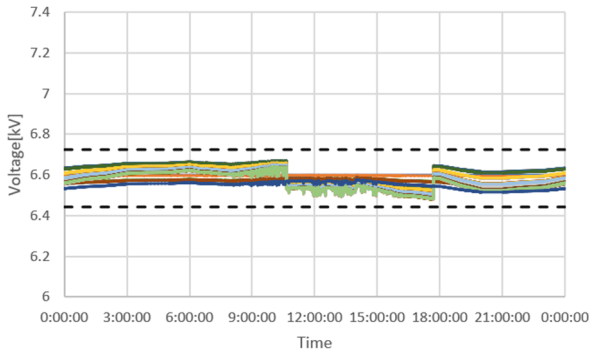
— SVR1

(c) PV 20%

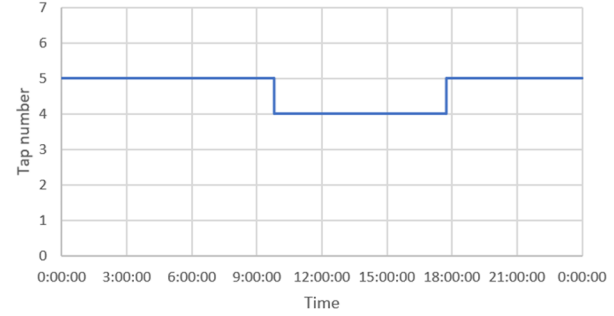
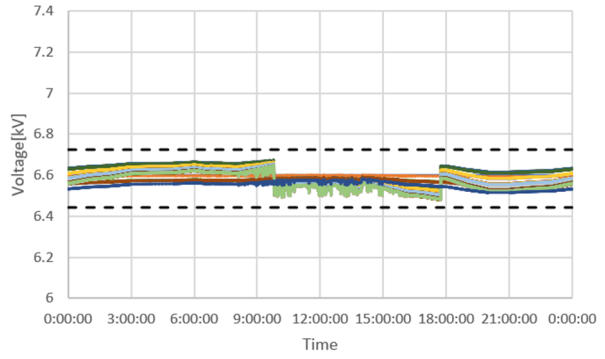


— SVR1

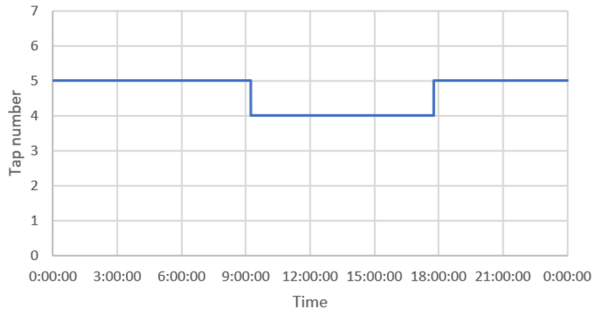
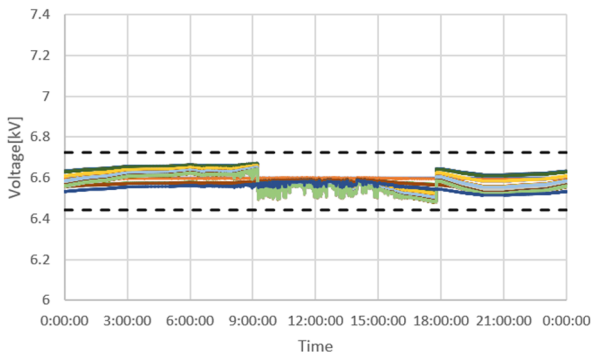
(d) PV 30%



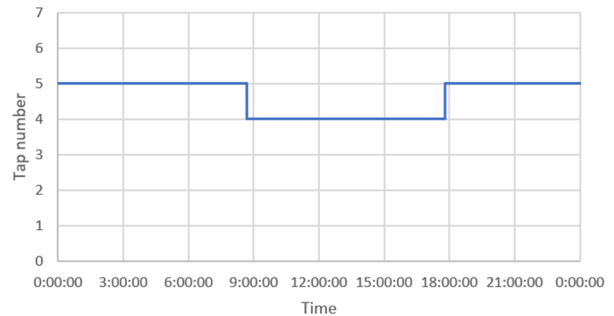
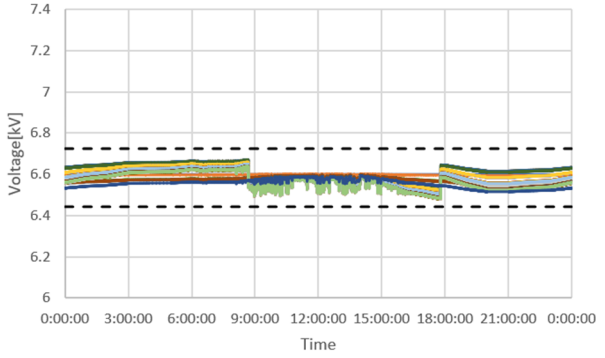
(e) PV 40%



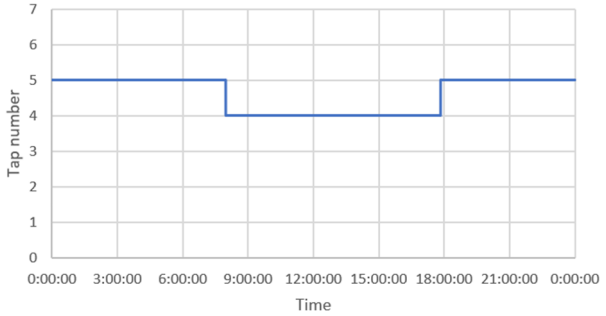
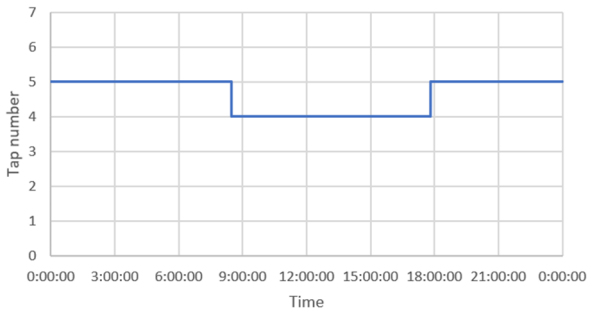
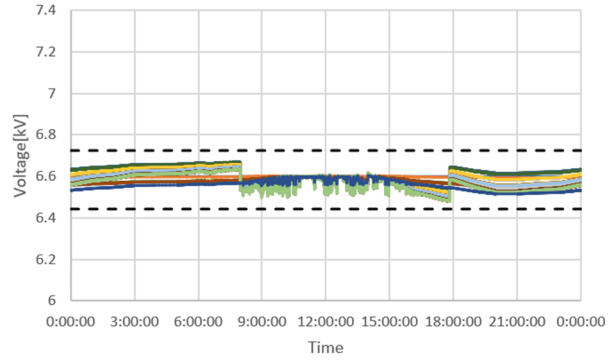
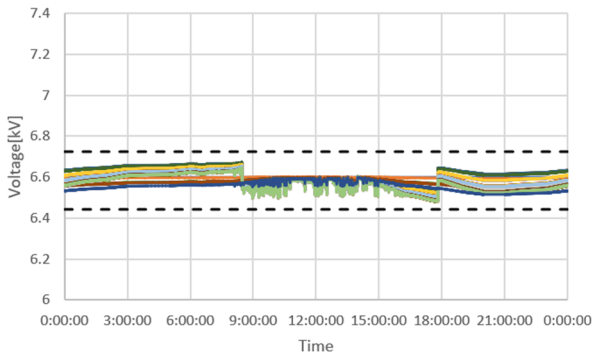
(f) PV 50%



(g) PV 60%

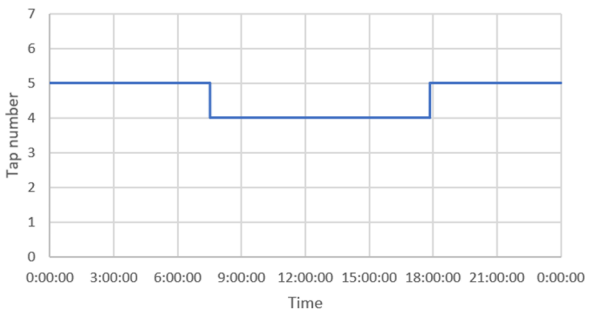
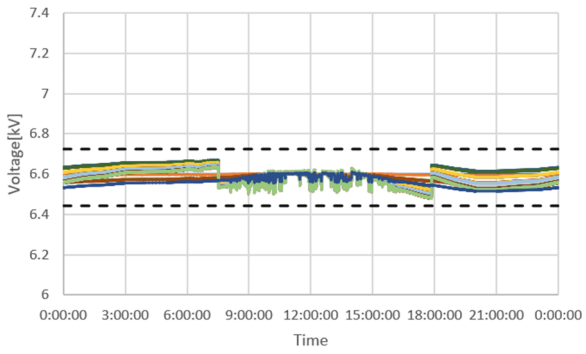


(h) PV 70%



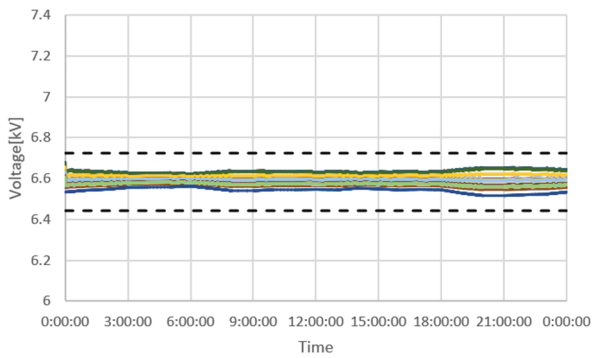
(i) PV 80%

(j) PV 90%

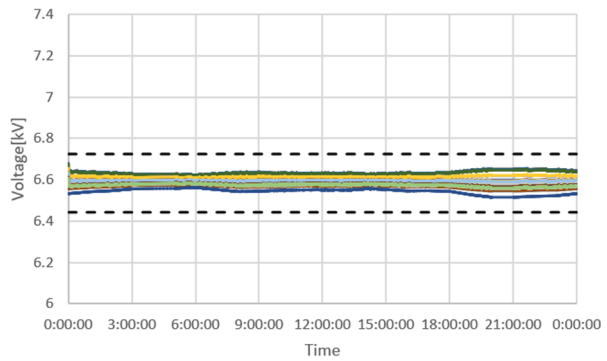


(k) PV 100%

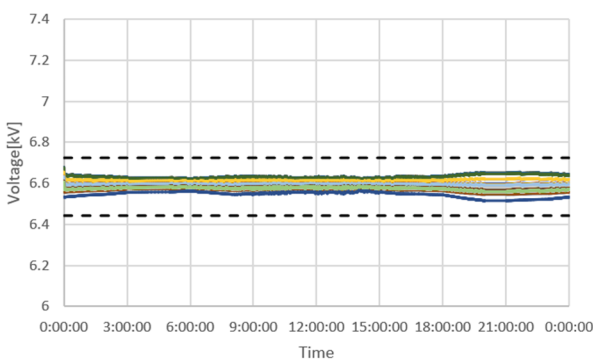
OC2 系統, PV 力率 0.95, 分散配置, TVR
 (上 : 電圧分布, 下 : タップ位置)



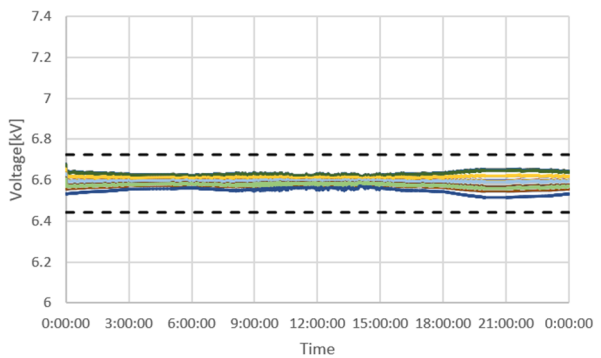
(a) PV 0%



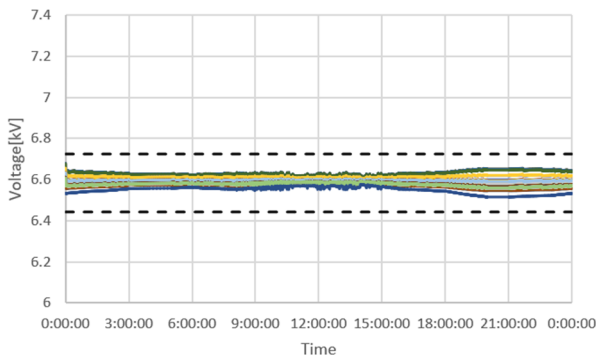
(b) PV 10%



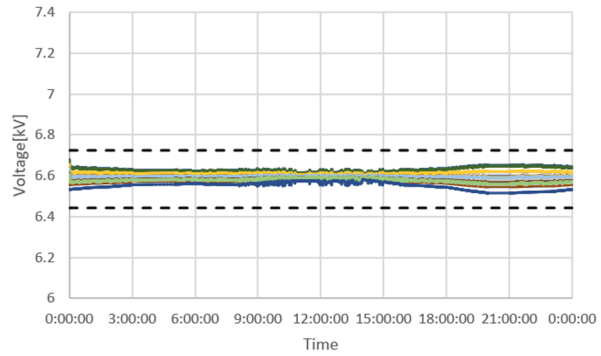
(c) PV 20%



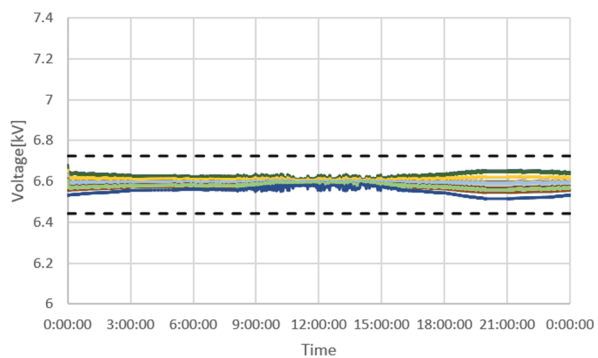
(d) PV 30%



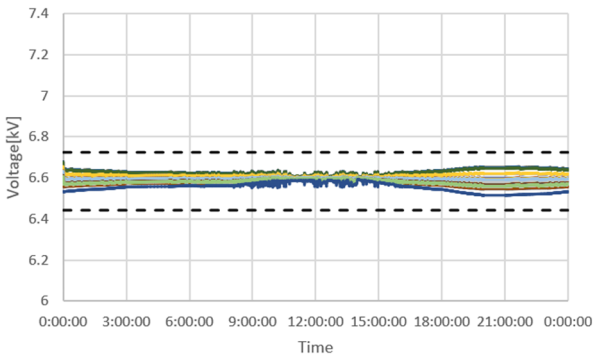
(e) PV 40%



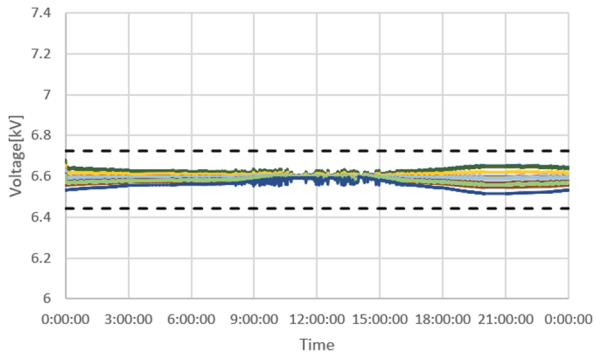
(f) PV 50%



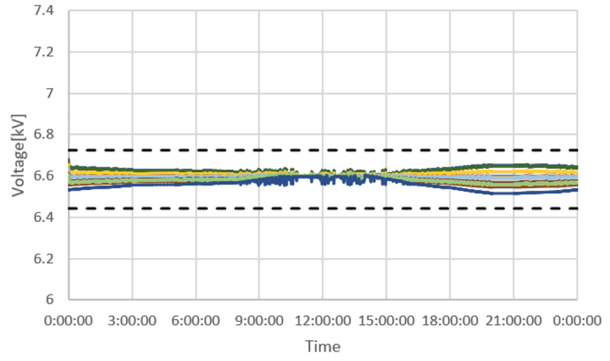
(g) PV 60%



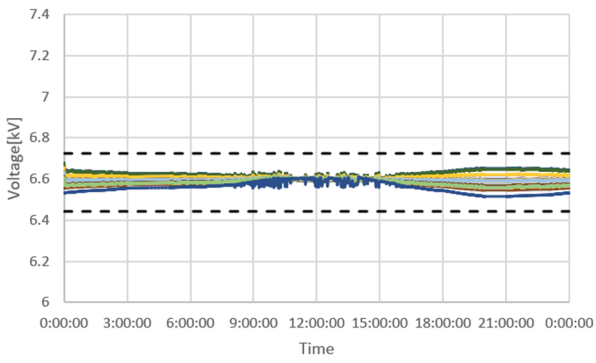
(h) PV 70%



(i) PV 80%



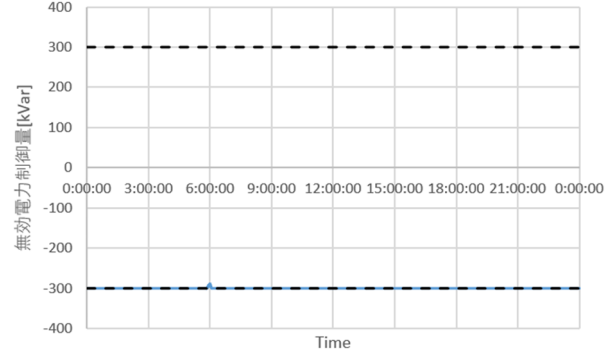
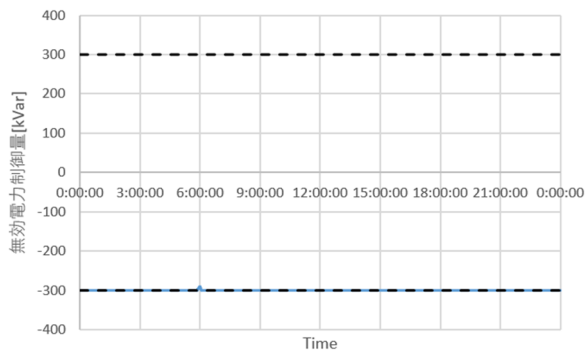
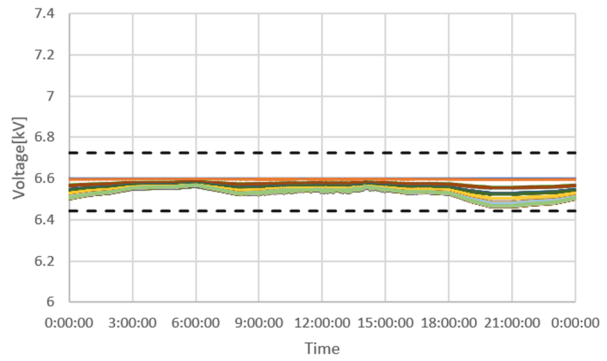
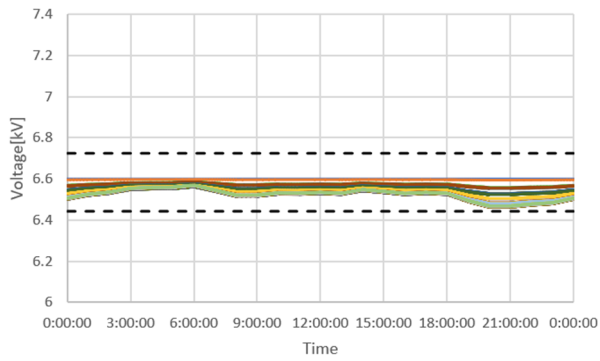
(j) PV 90%



(k) PV 100%

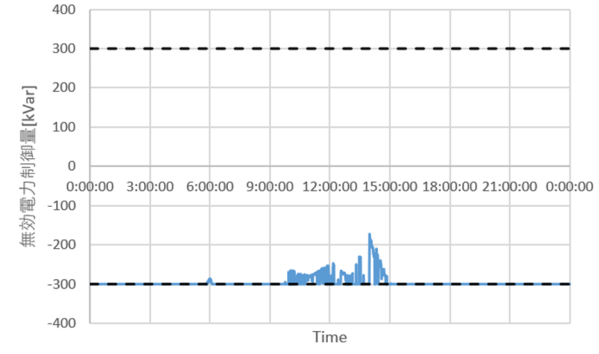
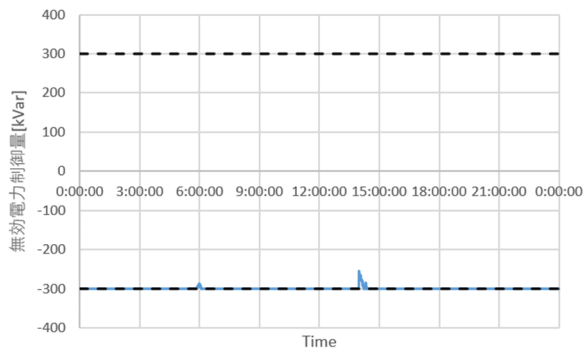
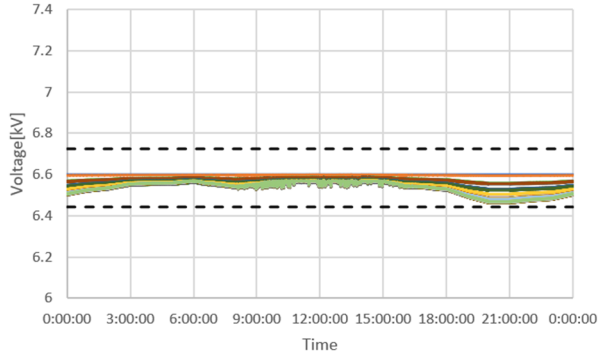
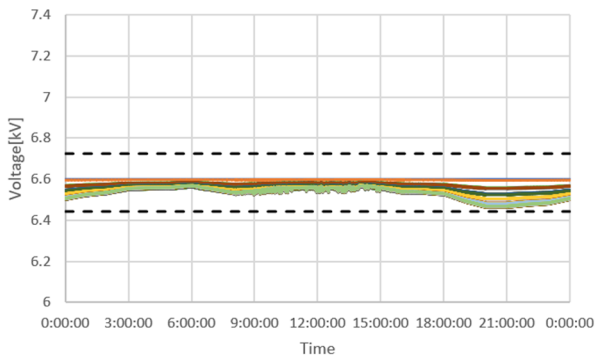
OC2 系統, PV 力率 0.95, 分散配置, SVC

(上: 電圧分布, 中: タップ位置, 下: SVC の無効電力)



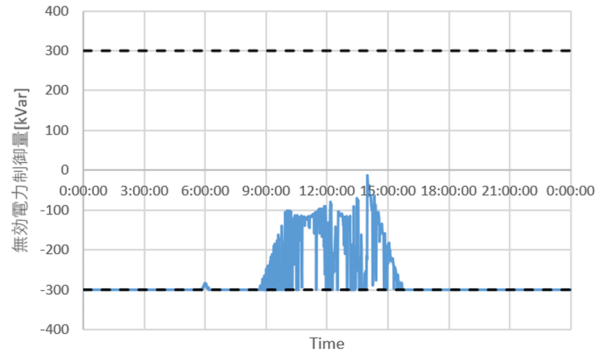
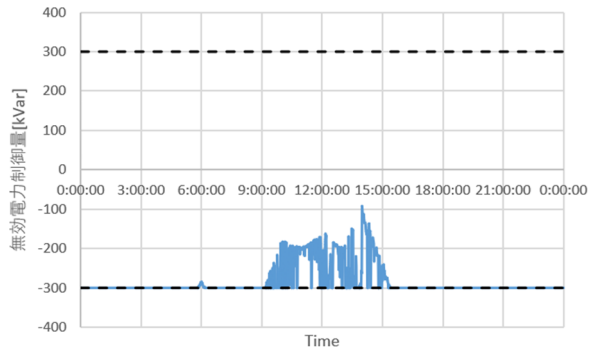
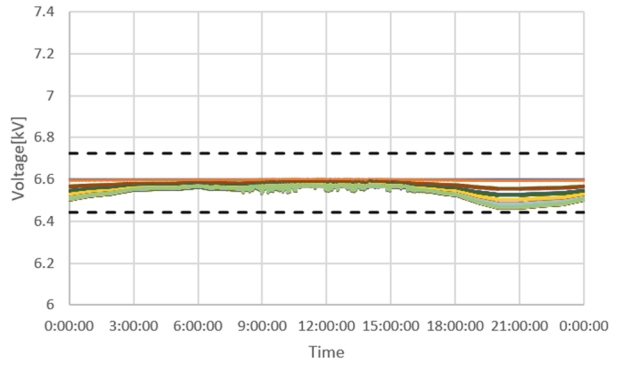
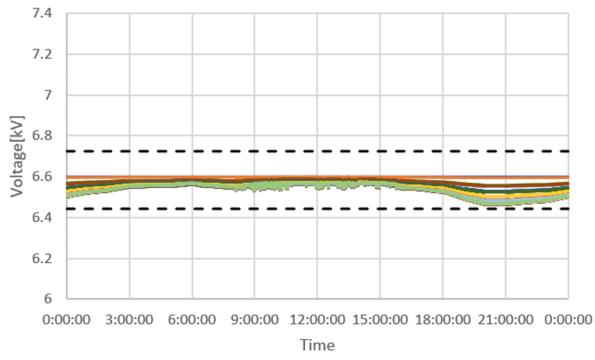
(a) PV 0%

(b) PV 10%



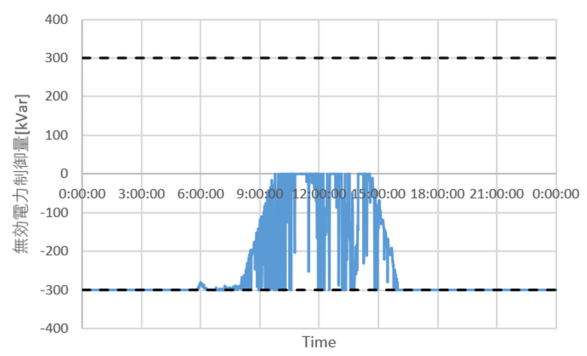
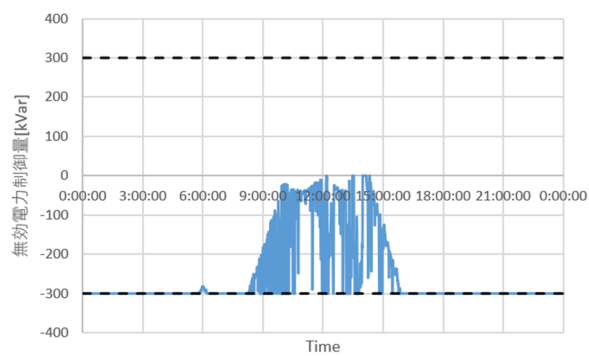
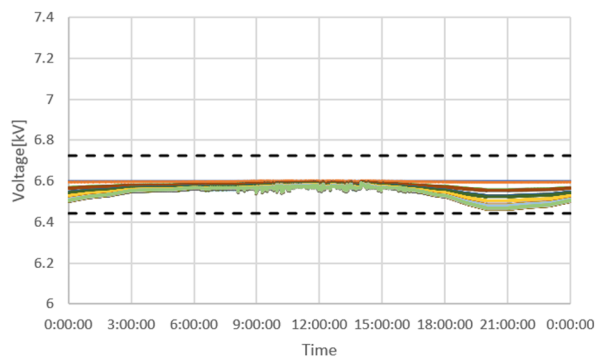
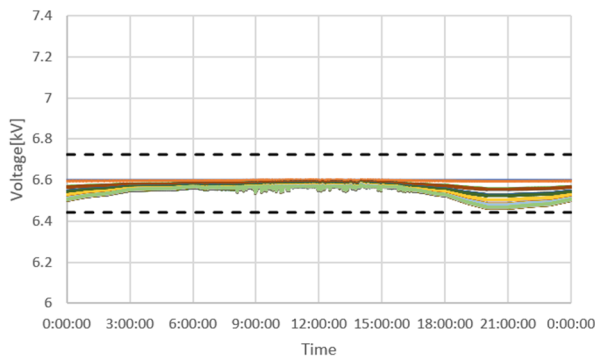
(c) PV 20%

(d) PV 30%



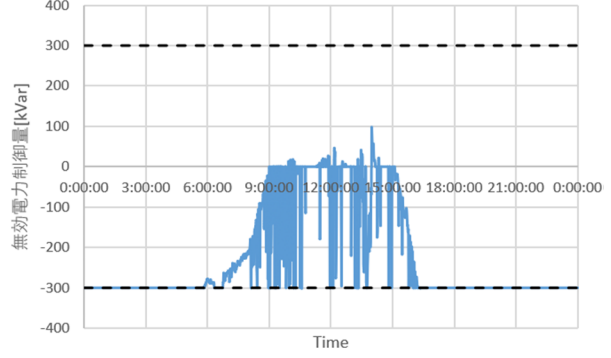
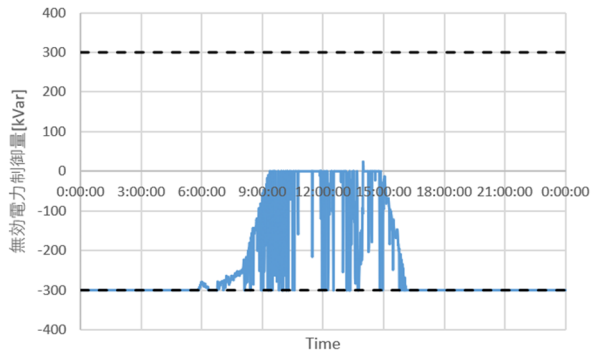
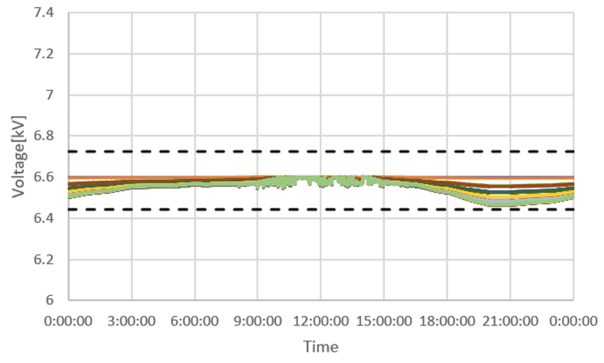
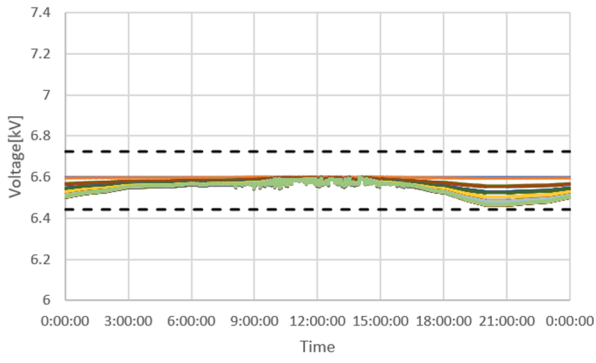
(e) PV 40%

(f) PV 50%



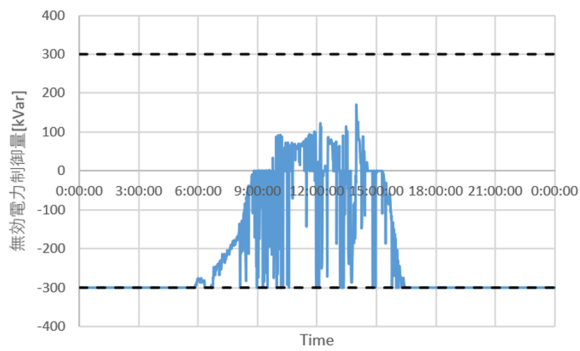
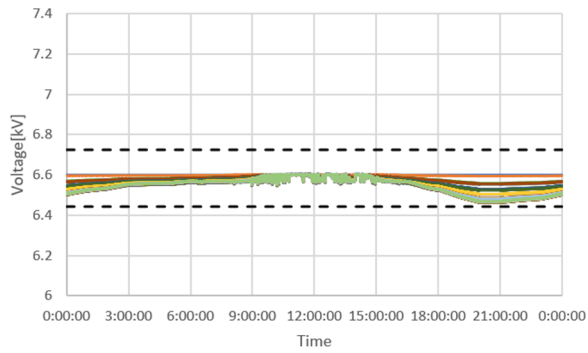
(g) PV 60%

(h) PV 70%



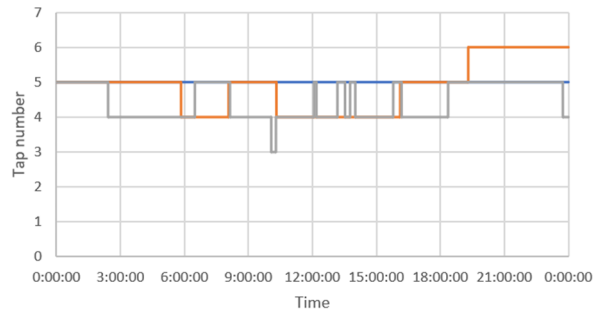
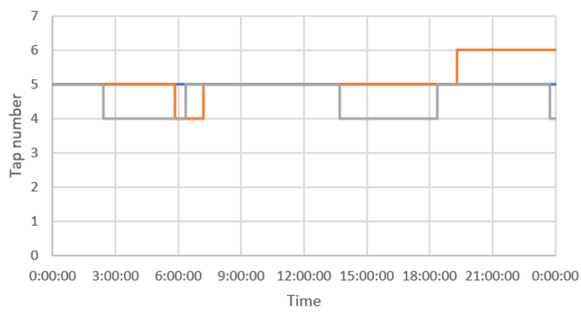
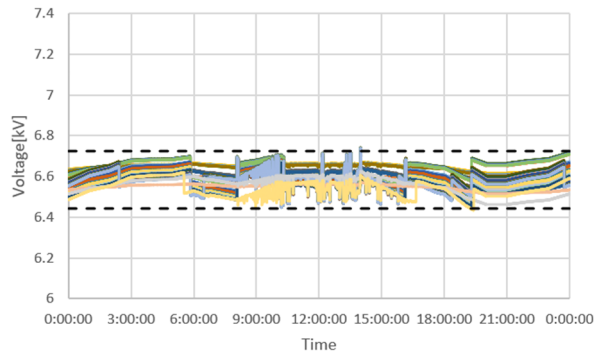
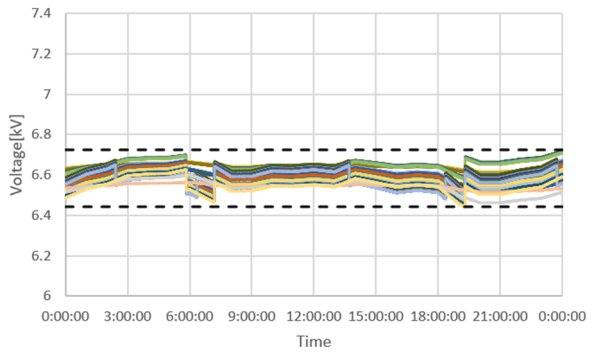
(i) PV 80%

(j) PV 90%



(k) PV 100%

OD22 系統, PV 力率 1.0, 末端集中, SVR-SVR-SVR, LDC パラメータ再計算無し
 (上: 電圧分布, 下: タップ位置)

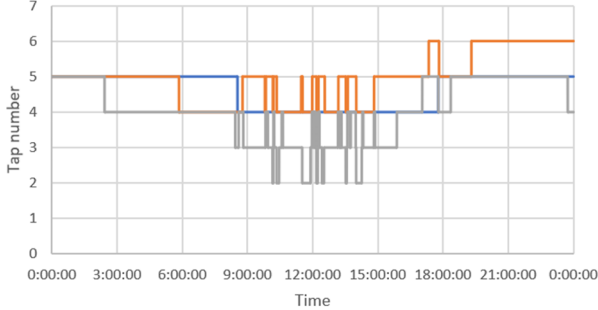
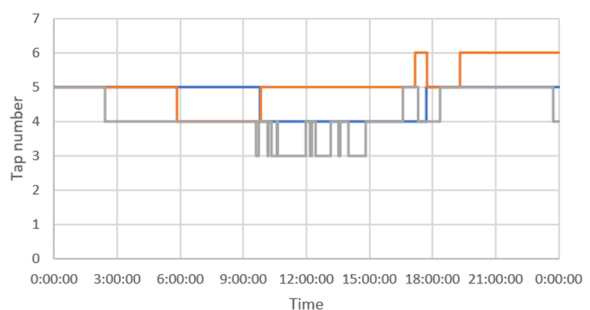
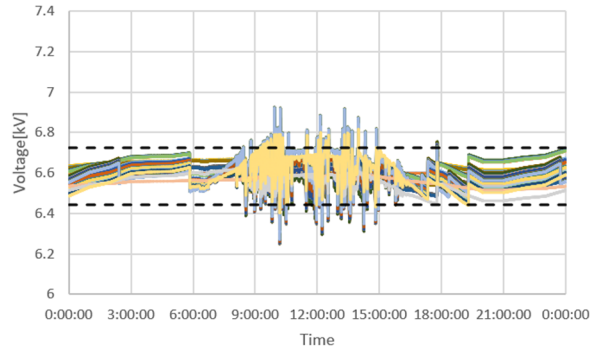
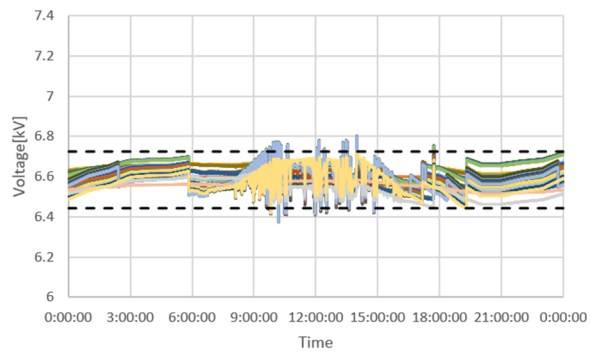


— SVR1 — SVR2 — SVR3

— SVR1 — SVR2 — SVR3

(a) PV 0%

(b) PV 10%

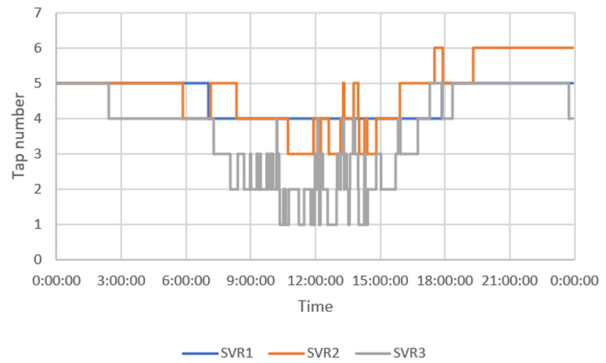
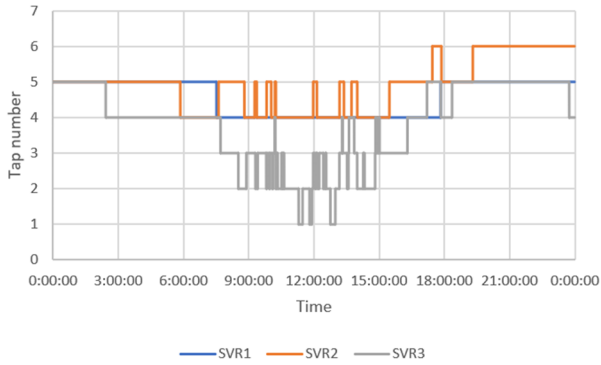
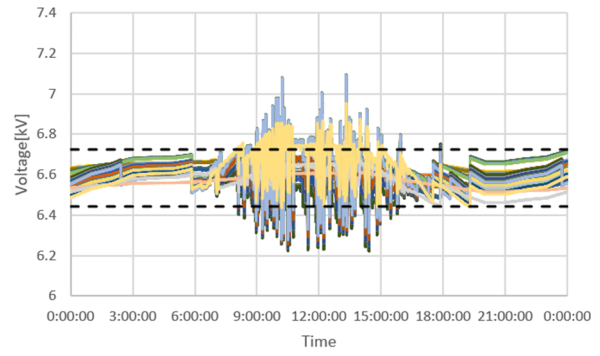
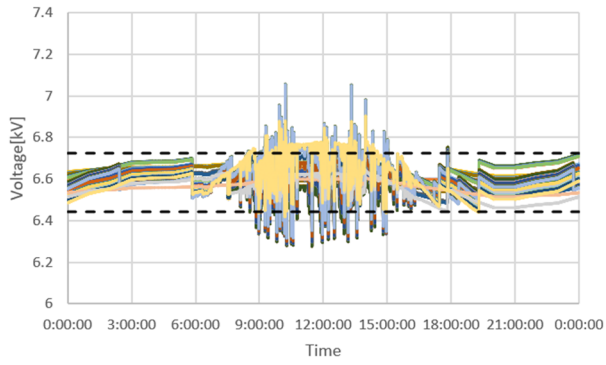


— SVR1 — SVR2 — SVR3

— SVR1 — SVR2 — SVR3

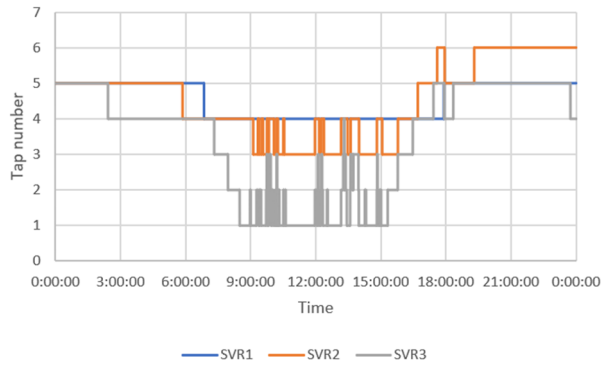
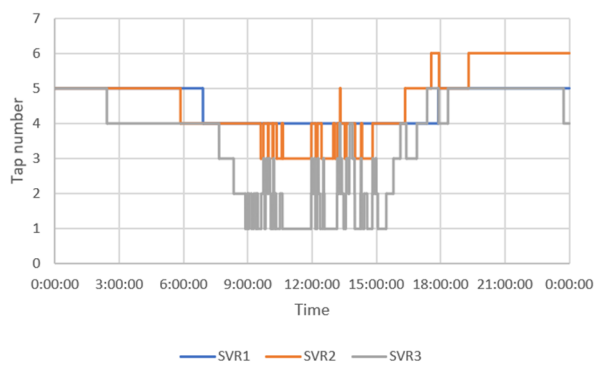
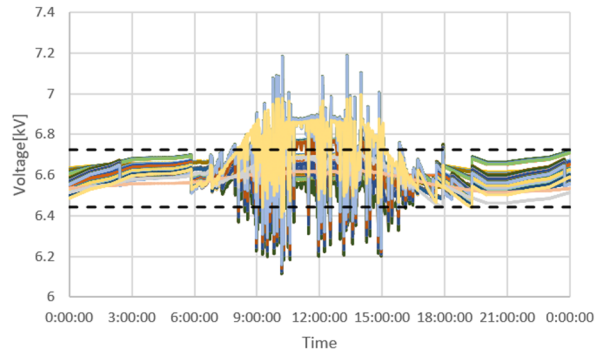
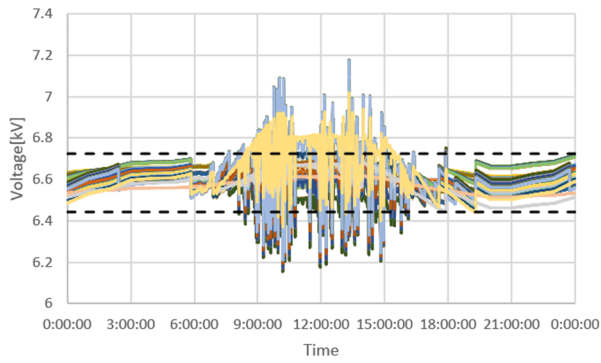
(c) PV 20%

(d) PV 30%



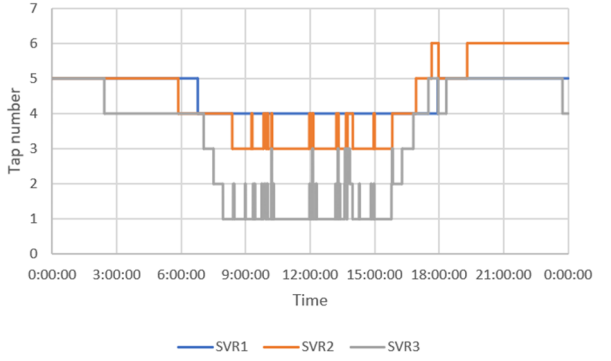
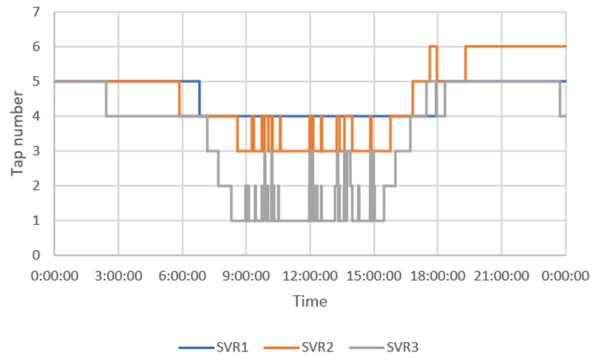
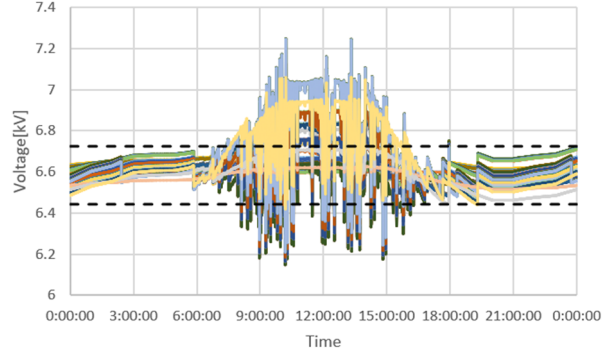
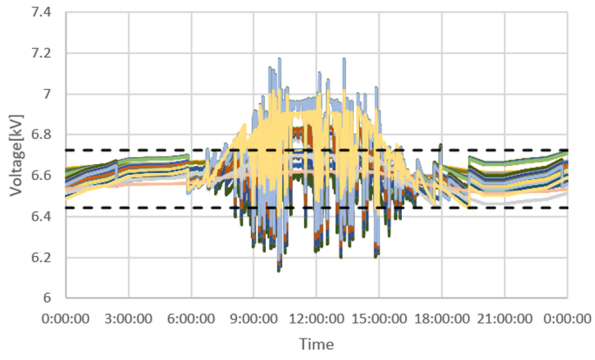
(e) PV 40%

(f) PV 50%



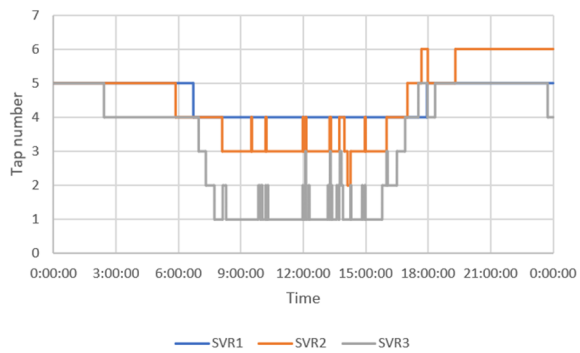
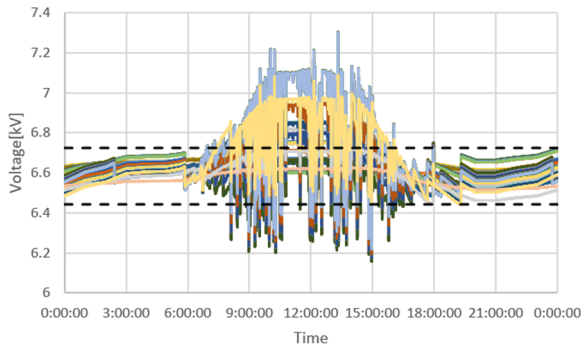
(g) PV 60%

(h) PV 70%



(i) PV 80%

(j) PV 90%



(k) PV 100%

付録(2) 模擬グリッドの実験データ

1. 検証機器

表付 2-1-1 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, 実系統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付 2-1-2 から表付 2-1-5 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, 実系統に導入されている自励式 SVC を対象に試験を実施した。

表付 2-1-1 本事業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

表付 2-1-2 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(富士電機社製)の仕様の一例
 (研究開発項目①成果報告書より引用)

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 1281mm × 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	

表付 2-1-3 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(北芝電機製)の仕様の一例
(研究開発項目①成果報告書より引用)

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	
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		

※CVCは北芝電機株式会社の商標です。

表付 2-1-4 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	6600V	
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	2500kg	
運転方式	電圧制御, 力率制御	

表付 2-1-5 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 6600V, 50Hz/60Hz	
電圧調整範囲	6300V~6960V	
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 協調制御	
外形寸法, 体積	W1.11m × D1.69m × H2.04m	
質量	2.4t	

2. 試験方法と試験結果

2. 1 基本性能

2. 1. 1 機器起動・停止動作の確認

2. 1. 1 ① 機器起動動作

図付 2-2.1.1-1 の手順で検証した結果, 検証機器 c-1, c-2, c-3, d-1, d-2 は正常に起動した。一方, 検証機器 a-2 は, 製造メーカーの設計通りに起動しなかった。

対象	大項目	中項目	小項目
単機	基本性能	機器起動・停止動作の確認	機器起動動作
試験回路			
試験手順		試験パラメータ	
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動作の確認		特になし	

図付 2-2.1.1-1 試験手順(機器起動動作)

2. 1. 1②機器停止動作

図付 2-2.1.1-2 の手順で検証した結果、検証機器 c-1, c-2, c-3, d-1, d-2 は正常に停止した。

対象	大項目	中項目	小項目
単機	基本性能	機器起動・停止動作の確認	機器停止動作
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検証機器を停止 ⑤動作の確認 		特になし	

図付 2-2.1.1-2 試験手順(機器停止動作)

2. 1. 1③系統復帰時動作:

図付 2-2.1.1-3 の手順で検証した結果, 検証機器 c-1, c-2, c-3, d-1, d-2 は正常に一時停止, 運転復帰した。

対象	大項目	中項目	小項目
単機	基本性能	機器起動・停止動作の確認	系統復帰時動作
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変電所にて遮断器開放 ⑤動作の確認 ⑥変電所にて遮断器投入 ⑦動作の確認 		
試験パラメータ	特になし		

図付 2-2.1.1-3 試験手順(系統復帰時動作)

2. 1. 1 □通信不能(集中制御)

検証機器 c-1, c-2, c-3, d-1, d-2 全てに通信機能はないため, 試験実施を省略した。

対象	大項目	中項目	小項目
単機	基本性能	機器起動・停止動作の確認	通信不能(集中制御)
試験回路			
試験手順		試験パラメータ	
<ul 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集中制御モードに切り替え ⑤動作の確認 ⑥通信不能の模擬 ⑦動作の確認 		特になし	

図付 2-1.1.1-4 試験手順(通信不能)

2. 1. 2機器故障時の動作

2. 1. 2①軽故障発生時動作

図付 2-2.1.2-1 の手順で検証した結果, 検証機器 c-1, c-2, c-3, d-1, d-2 全て軽故障事象発生時に機器が停止, 軽故障事象が解消した後に自動で運転復帰し, 正常に動作した。

対象	大項目	中項目	小項目
単機	基本性能	機器故障時の動作	軽故障発生時動作
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軽故障の模擬 ⑤動作の確認 		
試験パラメータ	特になし		

図付 2-2.1.2-1 試験手順(軽故障発生時)

2. 1. 2②重故障発生時動作

図付 2-2.1.2-2 の手順で検証した結果, 検証機器 c-1, c-2, c-3, d-1, d-2 全て重故障事象発生時に機器を停止し, 重故障事象が解消した後も自動で運転復帰せず停止を継続し, 正常に動作した。

対象	大項目	中項目	小項目
単機	基本性能	機器故障時の動作	重故障発生時動作
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軽故障の模擬 ⑤動作の確認 		
試験パラメータ	特になし		

図付 2-2.1.2-2 試験手順(重故障発生時)

2. 2性能評価

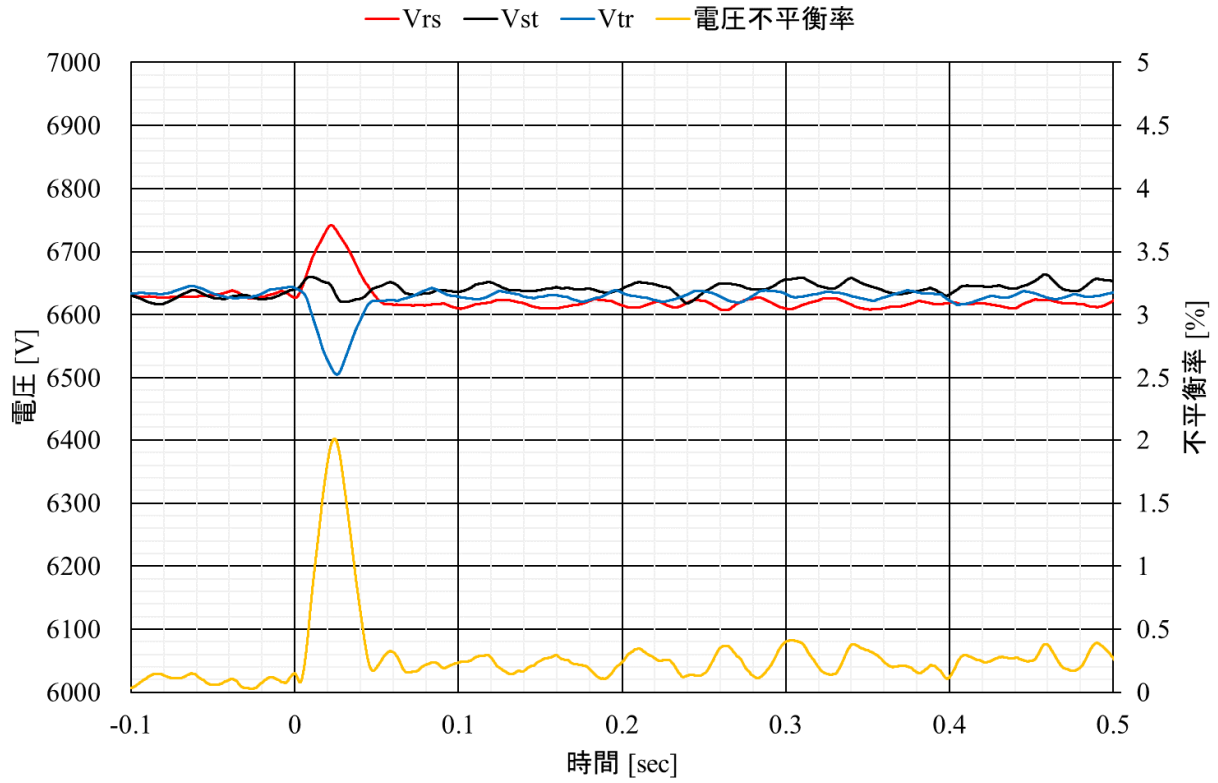
2. 2. 1通常運転時の安定性

2. 2. 1□電圧三相不平衡時

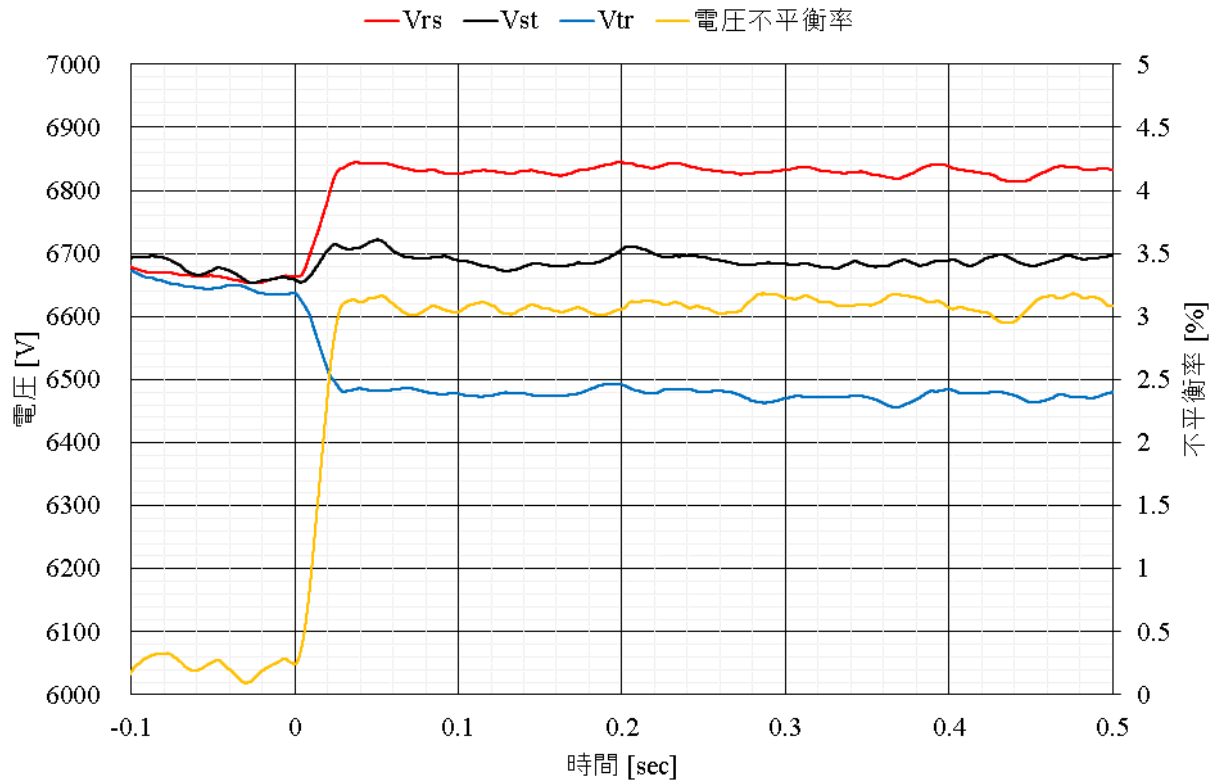
試験手順を図付 2-2.2.1-1 に示す。送出し電圧の 3 つの相電圧の平均値が一定で、電圧不平衡率のみが 3%となるように急変させた場合の結果を図付 2-2.2.1-2, 1 相もしくは 2 相の電圧低下により電圧不平衡率が 3%となるように急変させた場合の結果を図付 2-2.2.1-3 に示す。

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			
<p>BTBを用いて送出し電圧不平衡を発生</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 $\begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 \\ 5\Omega & 0\Omega \\ 10\Omega & 0\Omega \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{負荷B} \\ R280kW+L100kvar \\ R280kW+C100kvar \\ R560kW+L200kvar \\ R560kW+C200kvar \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{電圧不平衡率:3\%} \\ \cdot \text{平均電圧一定} \\ \cdot \text{1相低下} \\ \cdot \text{2相低下} \end{pmatrix}$	

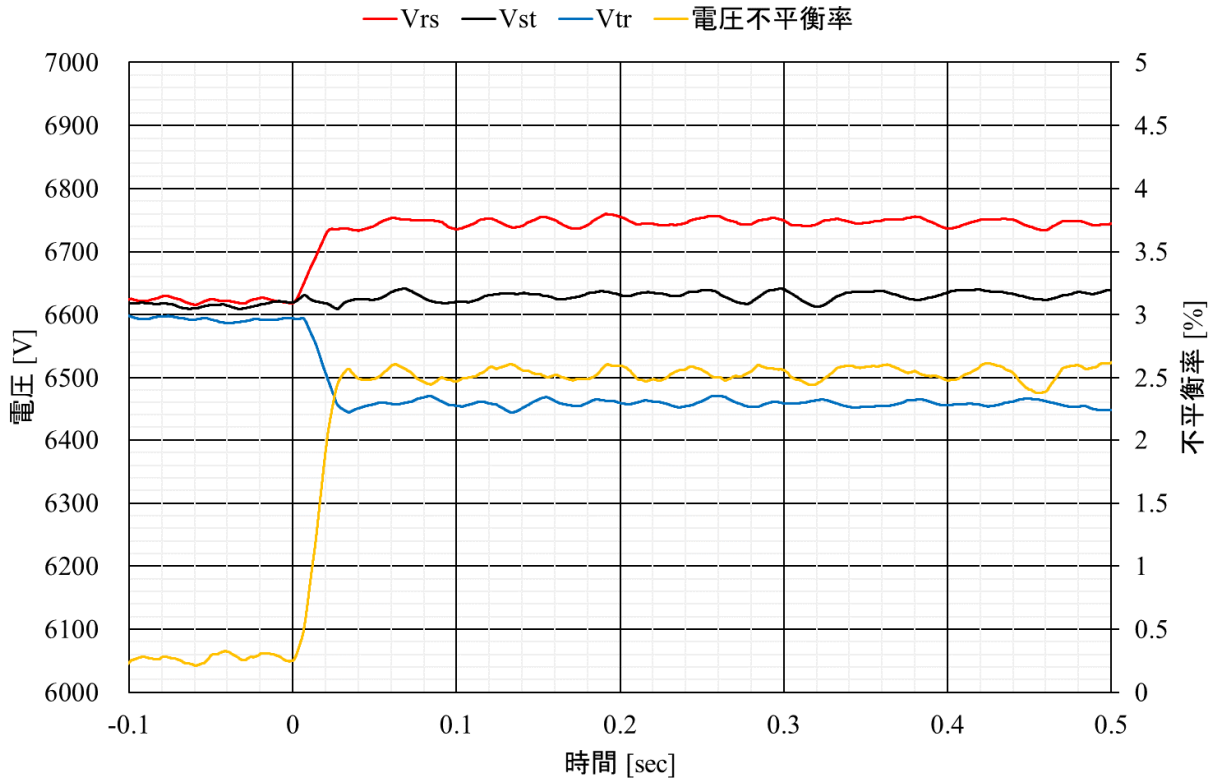
図付 2-2.2.1-1 試験手順(電圧三相不平衡)



(a) 検証機器 c-2 (制御目標電圧 6600V)



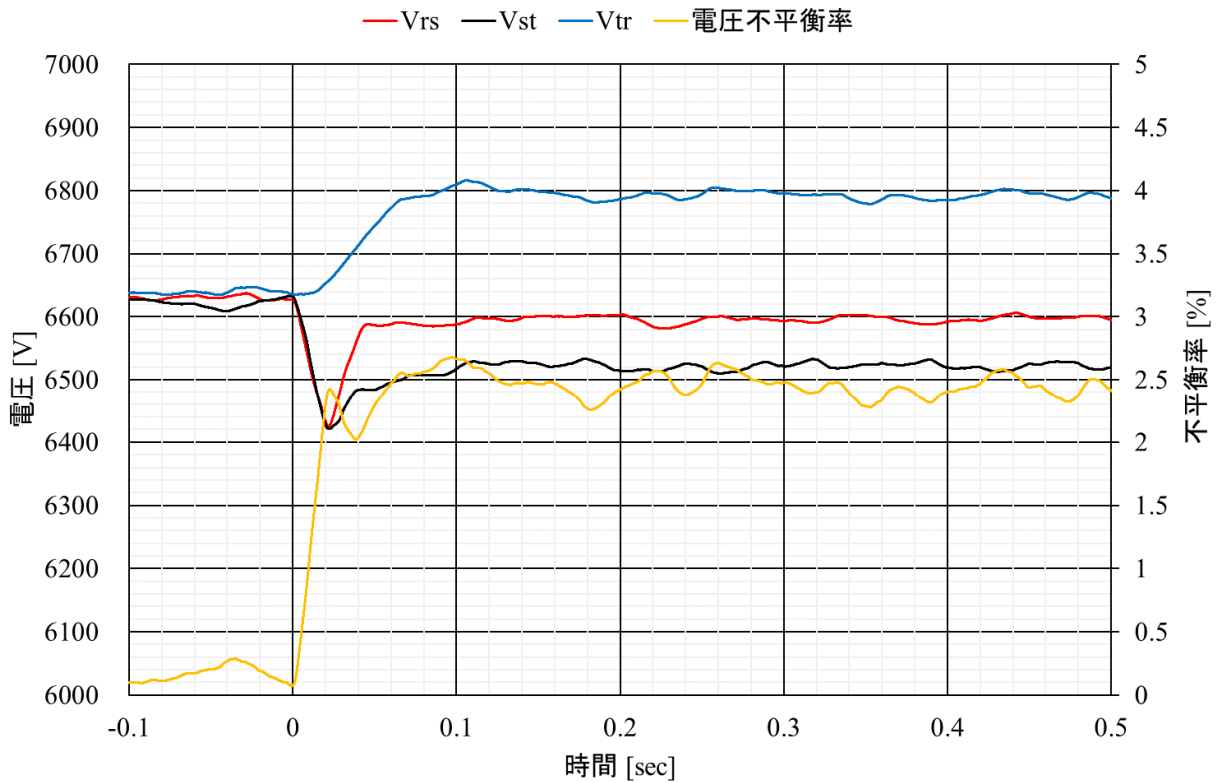
(b) 検証機器 d-1 (制御目標電圧 6600V)



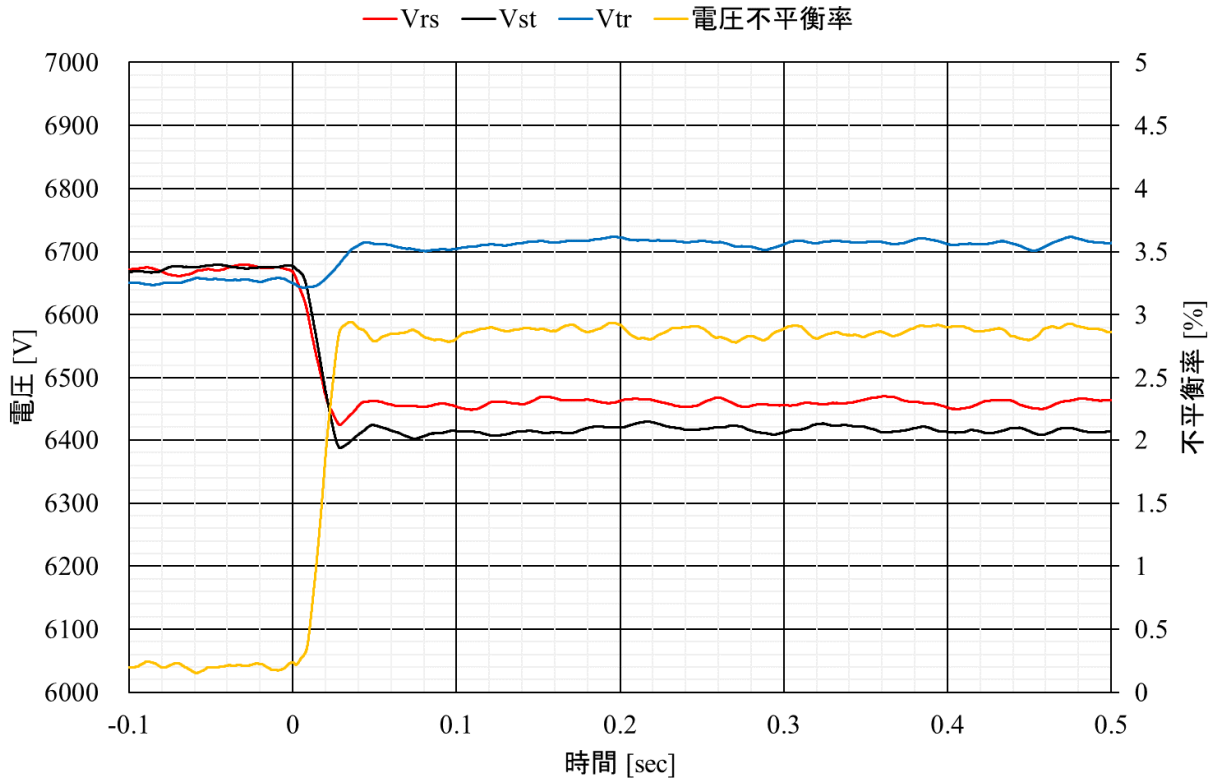
(c) 検証機器 d-2 (制御目標電圧 6600V)

図付 2-2.2.1-2 電圧不平衡時の機器設置地点電圧

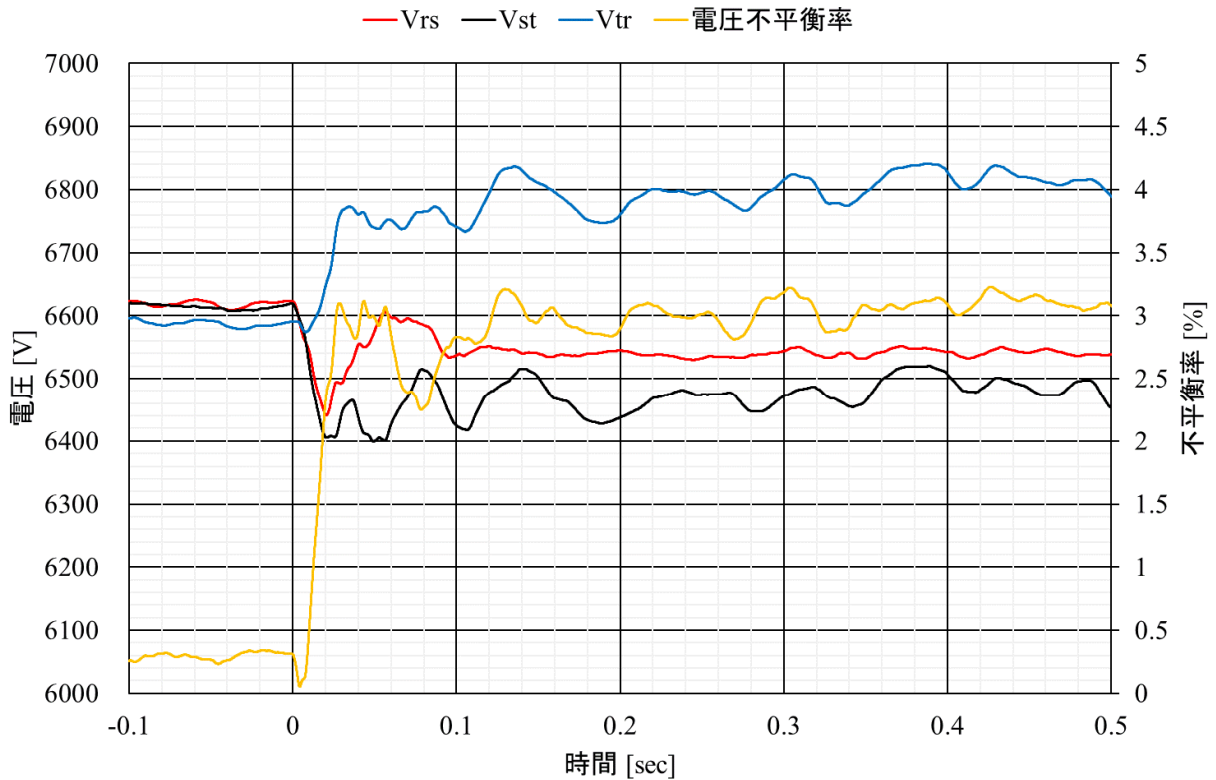
(線路 Z1.5Ω, 負荷 B:R280kW, L100kav, 電圧不平衡条件:不平衡率 3%, 平均電圧一定)



(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)

図付 2-2.2.1-3 電圧不平衡時の機器設置地点電圧

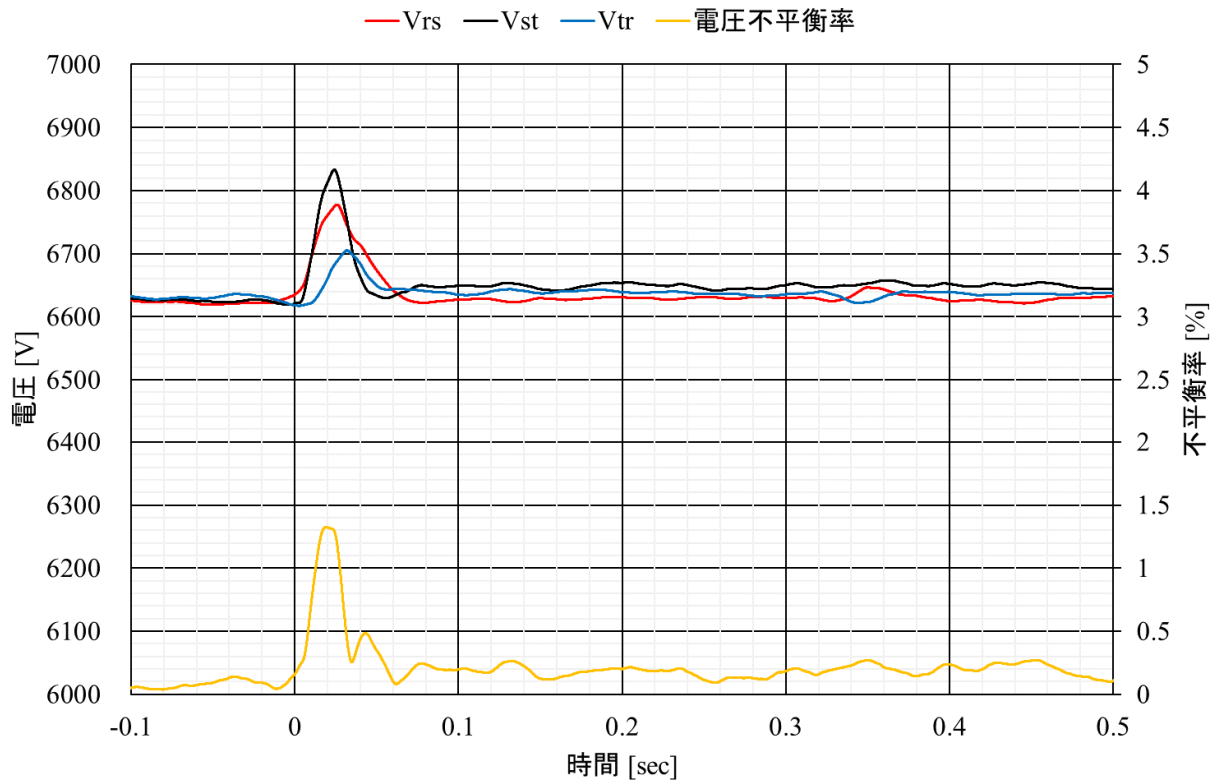
(線路 Z:5Ω, 負荷 B:R280kW, L100kav, 電圧不平衡条件:不平衡率 3%, S 相電圧低下)

2. 2. 1②負荷不平衡時

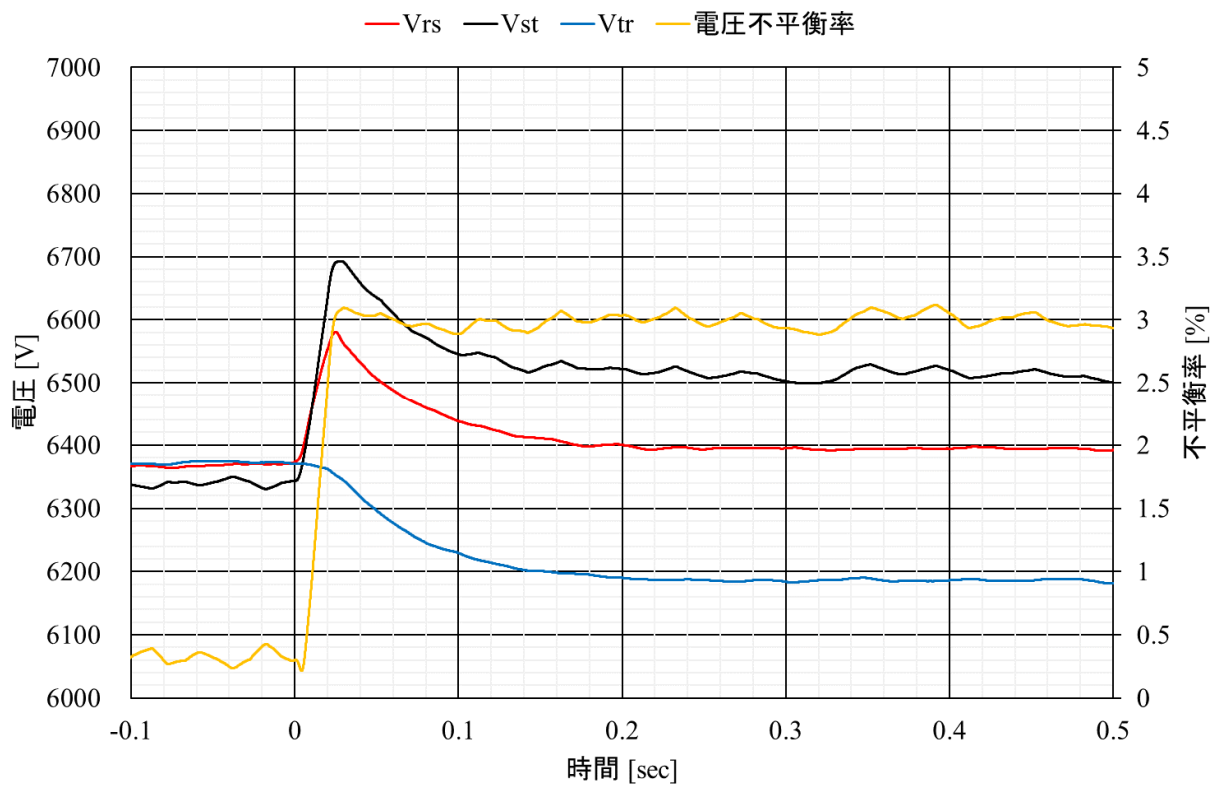
試験手順を図付 2-2.2.1-4, R280kW+L100kvar 負荷を不平衡にさせた場合の結果を図付 2-2.2.1-5 に示す。本図では機器設置地点での線間電圧, 電圧不平衡率を示している。

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	負荷不平衡時
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 $\begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 \\ 5\Omega & 0\Omega \\ 10\Omega & 0\Omega \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{負荷B} \\ R280kW+L100kvar \\ R280kW+C100kvar \\ R560kW+L200kvar \\ R560kW+C200kvar \end{pmatrix}$	

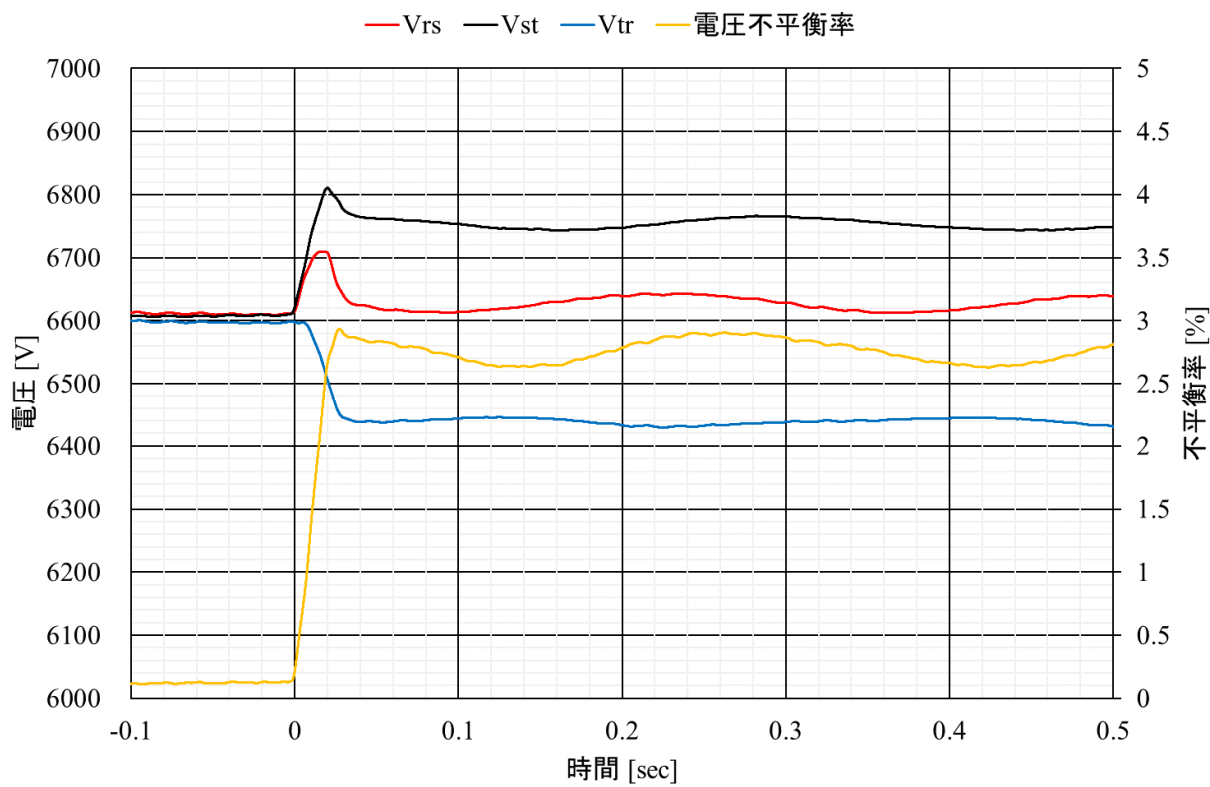
図付 2-2.2.1-4 試験手順(負荷不平衡時)



(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 6300V)



(c) 検証機器 d-1 (制御目標電圧 6300V)
 図付 2-2.2.1-5 負荷不平衡時の機器設置地点電圧
 (線路 Z1:5Ω, 負荷 B:R280kW, L100kvar)

2. 2. 1③高調波発生時

図付 2-2.2.1-6 の手順で検証した結果, 検証機器 c-2, d-1, d-2 ともに高調波を発生させても機器は正常に運転継続することを確認した。

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	高調波発生時
試験回路			
<p>BTBを用いて高調波電圧を発生</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単独運転検出能動信号注入 ⑤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> $\begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 \\ 5\Omega & 0\Omega \\ 10\Omega & 0\Omega \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{負荷B} \\ R280kW+L100kvar \\ R280kW+C100kvar \\ R560kW+L200kvar \\ R560kW+C200kvar \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{送出し電圧高調波} \\ \text{総合電圧歪率3\%} \\ \text{5次、7次混在} \end{pmatrix}$	

図付 2-2.2.1-6 試験手順(高調波発生時)

2. 2. 2配電系統事故時の動作

2. 2. 2①地絡事故

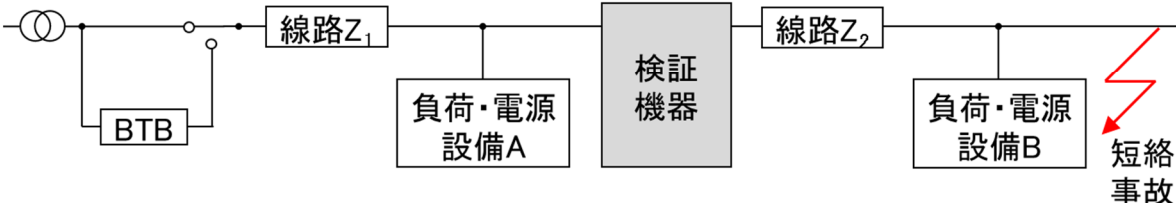
図付 2-2.2.2-1 の手順で検証した結果, 検証機器 c-1, 検証機器 d-1 とともに地絡事故を発生させても機器は異常動作しないことを確認した。

対象	大項目	中項目	小項目
単機	性能評価	配電系統事故時の動作	地絡事故
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地絡事故発生 ⑤動作の確認 		$Z=5\Omega$ とは、 $R=5\Omega$ 、 $X=5\Omega$ とする $\begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 & \text{負荷B} \\ 5\Omega & 0\Omega & R280kW+L100kvar \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{地絡電流} \\ 3.6A (1\mu F/\text{相}) \\ 10.8A (3\mu F/\text{相}) \end{pmatrix}$	

図付 2-2.2.2-1 試験手順(地絡事故)

2. 2. 2②短絡事故

図付 2-2.2.2-2 の手順で検証した結果、検証機器 c-1, 検証機器 d-1 とともに地絡事故を発生させても機器は異常動作しないことを確認した。

対象	大項目	中項目	小項目
単機	性能評価	配電系統事故時の動作	短絡事故
試験回路			
<p>SVCの二次側で二相短絡事故を発生させる。変電所の変圧器容量の制約により、短絡電流を限流する必要があることと、各地点の電圧降下を模擬するために、上流と下流に$Z=5+j5[\Omega]$の場合と上流に$Z=10+j10[\Omega]$とする。</p>			
試験手順	<p>試験パラメータ Z=5Ωとは、R=5Ω、X=5Ωとする</p> $\begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 \\ 5\Omega & 5\Omega \\ 10\Omega & 0\Omega \\ 0\Omega & 10\Omega \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{負荷B} \\ R280kW+L100kvar \end{pmatrix}$		
<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短絡事故発生 ⑤動作の確認 			

図付 2-2.2.2-2 試験手順(短絡事故)

2. 2. 2③断線事故

図付 2-2.2.2-3 の手順で検証した結果、検証機器 c-1, 検証機器 d-1, d-2 とともに断線事故を発生させても機器は異常動作しないことを確認した。

対象	大項目	中項目	小項目
単機	性能評価	配電系統事故時の動作	断線事故
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断線事故発生 ⑤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> $\begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 & \text{負荷B} \\ 5\Omega & 0\Omega & R280kW+L100kvar \end{pmatrix}$		

図付 2-2.2.2-3 試験手順(断線事故)

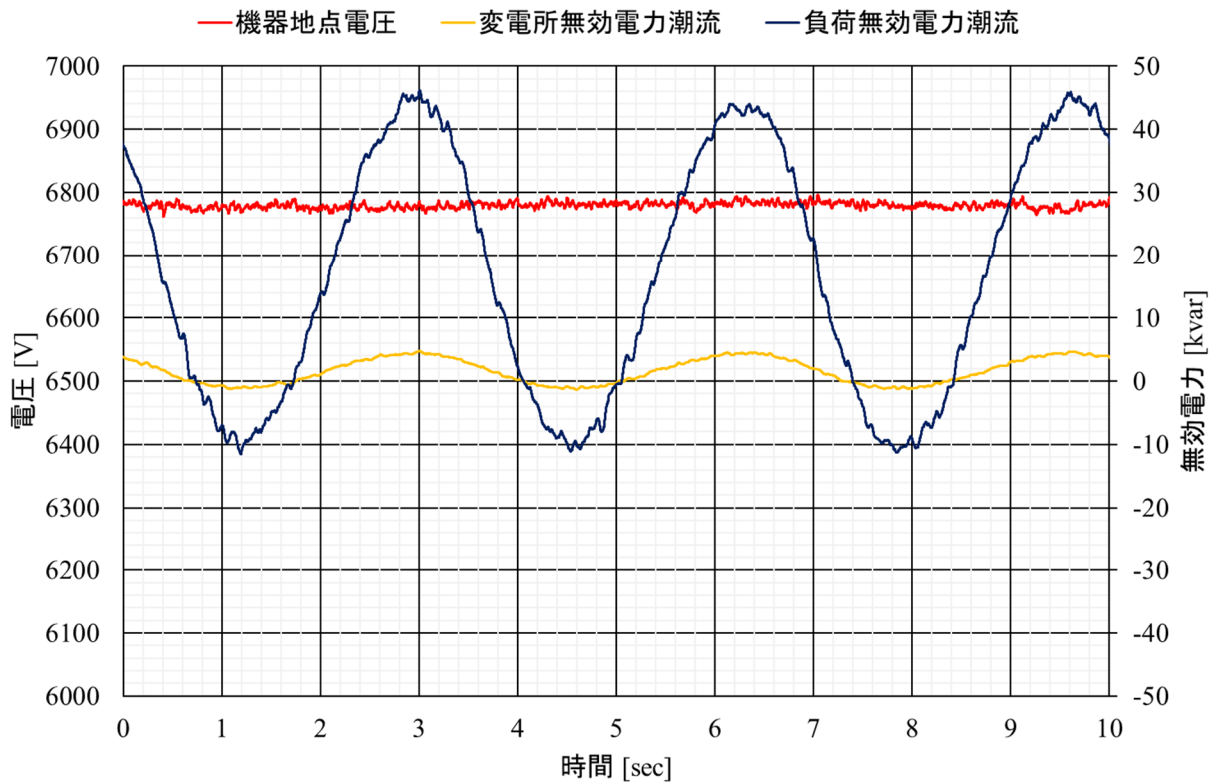
2. 2. 3 事故時運用時の動作

2. 2. 3① 単独運転検出能動信号との協調:

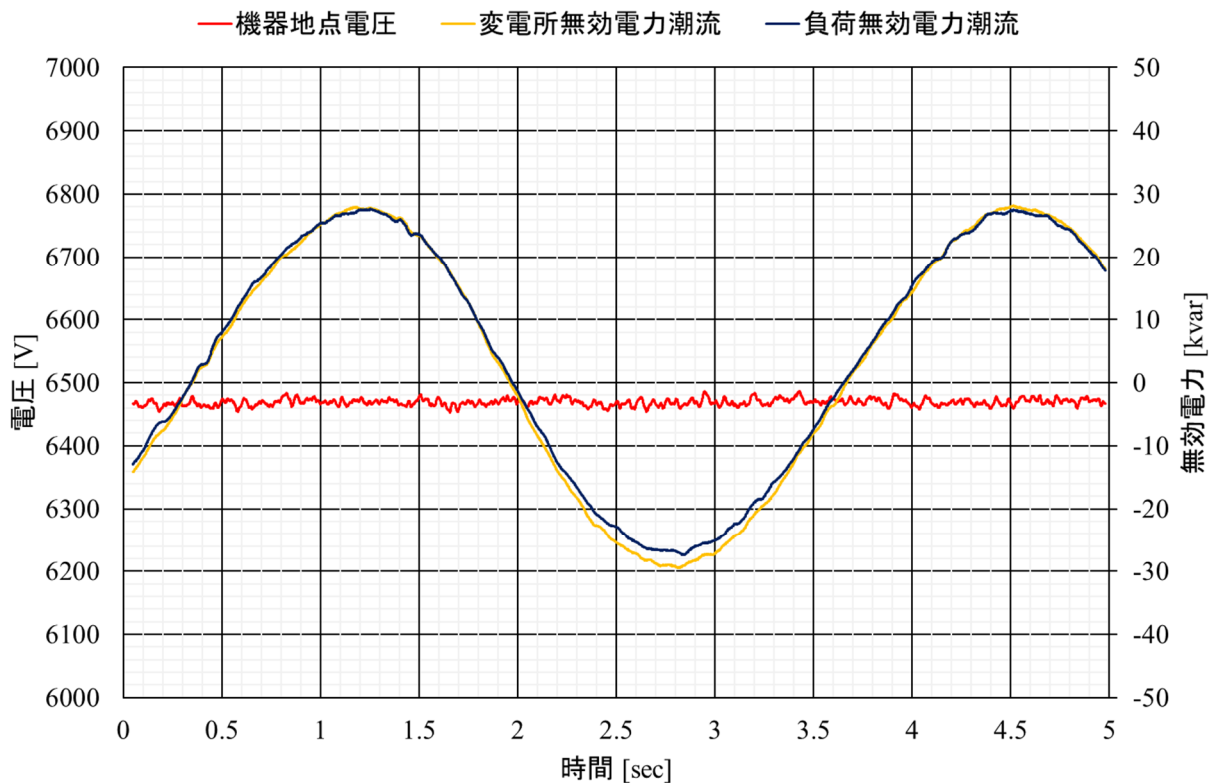
試験手順を図付 2-2.2.3-1, 試験時の機器設置地点電圧, 変電所, 負荷地点での無効電力潮流を図付 2-2.2.3-2 に示す。

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		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 $\left(\begin{array}{ccc} Z_1 & Z_2 & \text{負荷B} \\ 5\Omega & 0\Omega & R280kW+L100kvar \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{c} \text{電源B} \\ IN200kW(\text{無効電力変動方式}) \\ IN70kW(\text{新型能動方式}) \\ SG150kW(\text{無効電力変動方式}) \end{array} \right)$	

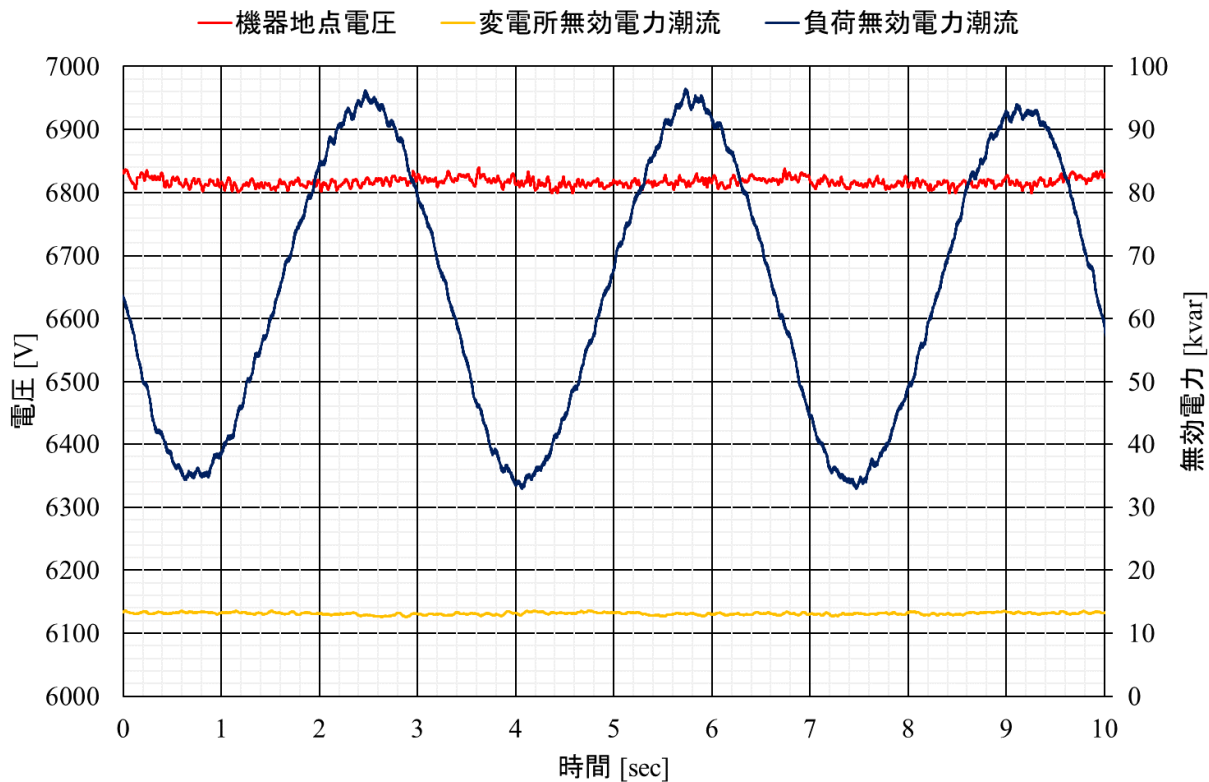
図付 2-2.2.3-1 試験手順(単独運転検出能動信号との協調)



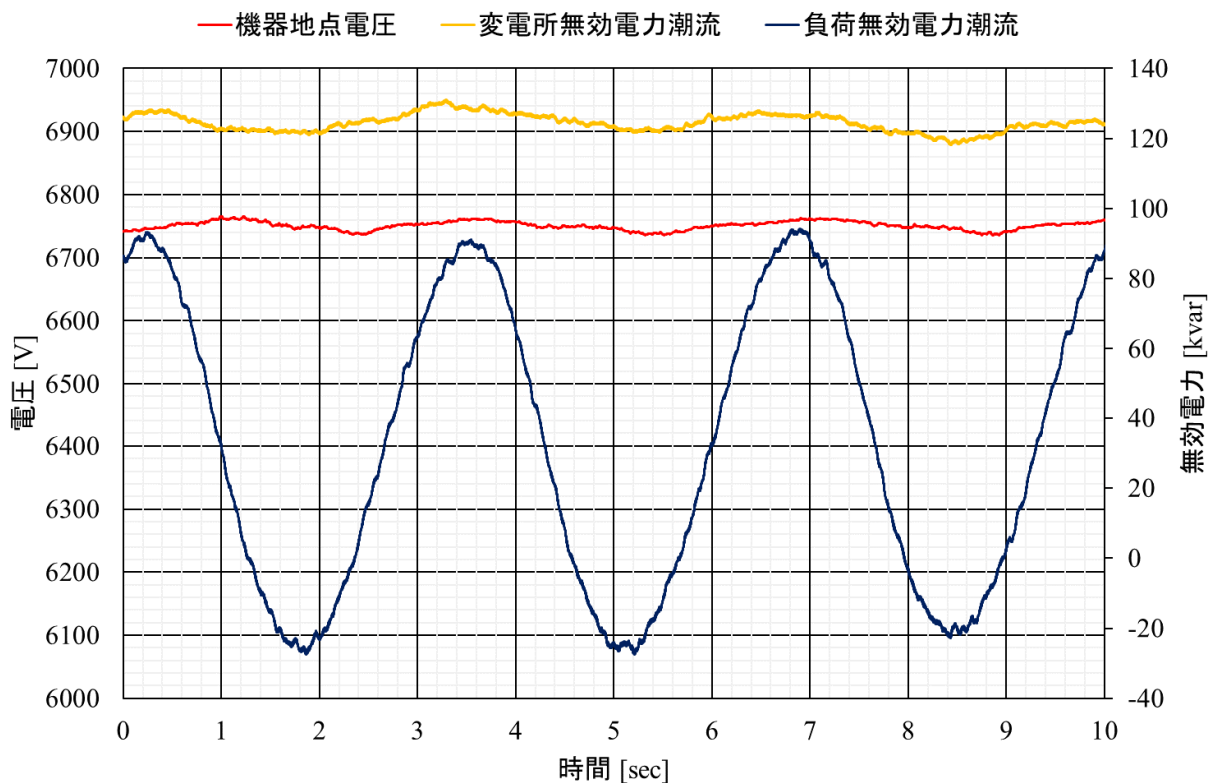
(a) 検証機器 c-2 (制御目標電圧 6800V)



(b) 検証機器 c-2 (制御目標電圧 6500V, 単独運転検出非干渉対応モード)



(c) 検証機器 d-1 (制御目標電圧 6800V)



(d) 検証機器 d-2 (制御目標電圧 6800V)

図付 2-2.2.3-2 負荷不平衡時の機器設置地点電圧と変電所潮流
 (回転型電源 150kW, 単独運転検出能動信号: 無効電力変動方式, 0.3Hz, 10%)

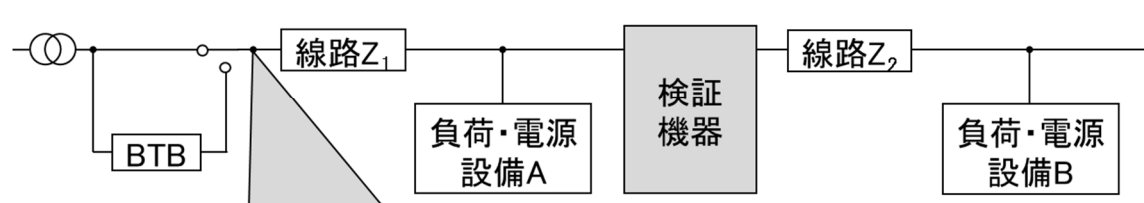
2. 2. 3② 単独運転時

試験手順を図付 2-2.2.3-3, 各試験条件における単独運転検出時間を表付 2-2.2.3-1 に示す。
なおこの時間は、複数回実施した試験データを平均化した時間である。

表付 2-2.2.3-1 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。

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	<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 		
試験パラメータ	<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> $\left(\begin{matrix} Z_1 & Z_2 \\ 5\Omega & 0\Omega \end{matrix} \right) \times \left(\begin{matrix} \text{電源B} \\ \text{IN200kW(無効電力変動方式)} \\ \text{IN70kW(新型能動方式)} \\ \text{SG150kW(無効電力変動方式)} \end{matrix} \right) \times \left(\begin{matrix} \text{負荷B} \\ \text{送り出し部で潮流0} \\ \text{(有効潮流=0、無効潮流=0)} \\ \text{になるようR負荷、} \\ \text{C負荷を投入} \end{matrix} \right)$ </p> <p> $\times \left(\begin{matrix} \text{SVCの有無} \\ \text{無しの場合} \\ \text{有りの場合} \end{matrix} \right) \times 1\text{ケースにつき3回実施}$ </p>		

図付 2-2.2.3-3 試験手順(単独運転時)

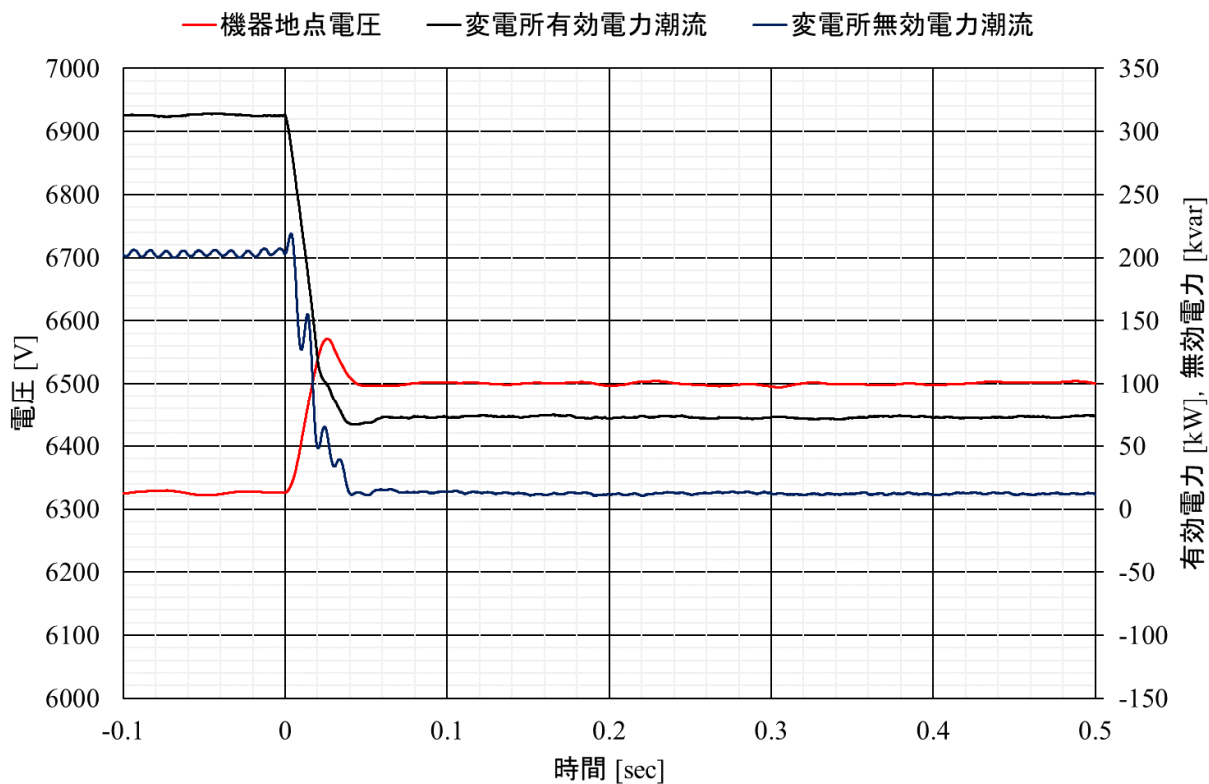
2. 2. 4 ループ切替時の動作

2. 2. 4① ループイン・ループアウト時

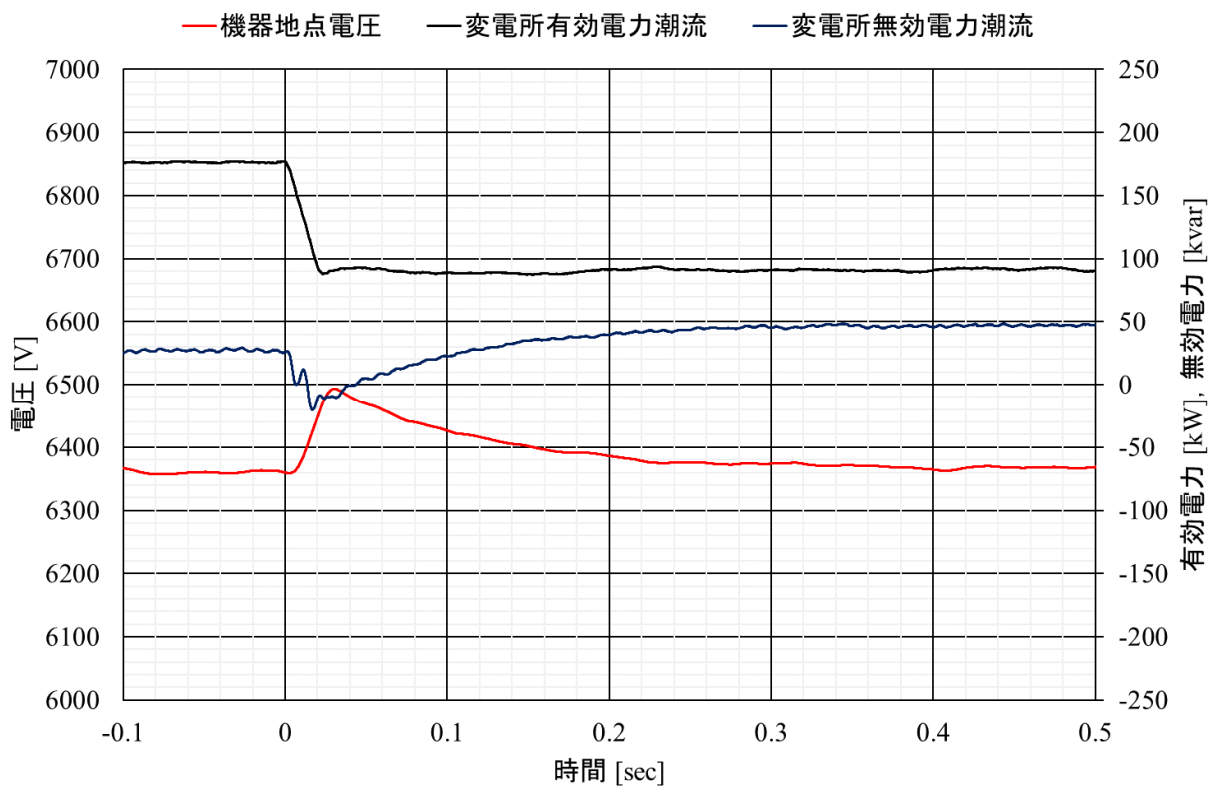
試験手順を図付 2-2.2.4-1, ループイン時の機器設置地点電圧, 変電所, 負荷地点での無効電力潮流を図付 2-2.2.4-2 に示す。

対象	大項目	中項目	小項目																
単機	電圧制御	ループ切替時動作	ループイン・ループアウト動作																
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 負荷投入 ⑤ 開閉器e投入(ループイン) ⑥ 動作の確認 ⑦ 開閉器f開放(ループアウト, 変電所方向反転) ⑧ 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 border="0"> <tr> <td>配電線①</td> <td>Z₄</td> <td>Z₃</td> <td>負荷量</td> </tr> <tr> <td></td> <td>5Ω</td> <td>0Ω</td> <td>R280kW+L300kvar</td> </tr> <tr> <td>配電線②</td> <td>Z₄</td> <td></td> <td>負荷量</td> </tr> <tr> <td></td> <td>5Ω</td> <td></td> <td>C150kVar</td> </tr> </table> <p> × (SVCの有無) × (変電所方向) <ul style="list-style-type: none"> ・無しの場合 ・有りの場合 <ul style="list-style-type: none"> ・反転しない場合 ・反転する場合 </p>			配電線①	Z ₄	Z ₃	負荷量		5Ω	0Ω	R280kW+L300kvar	配電線②	Z ₄		負荷量		5Ω		C150kVar
配電線①	Z ₄	Z ₃	負荷量																
	5Ω	0Ω	R280kW+L300kvar																
配電線②	Z ₄		負荷量																
	5Ω		C150kVar																

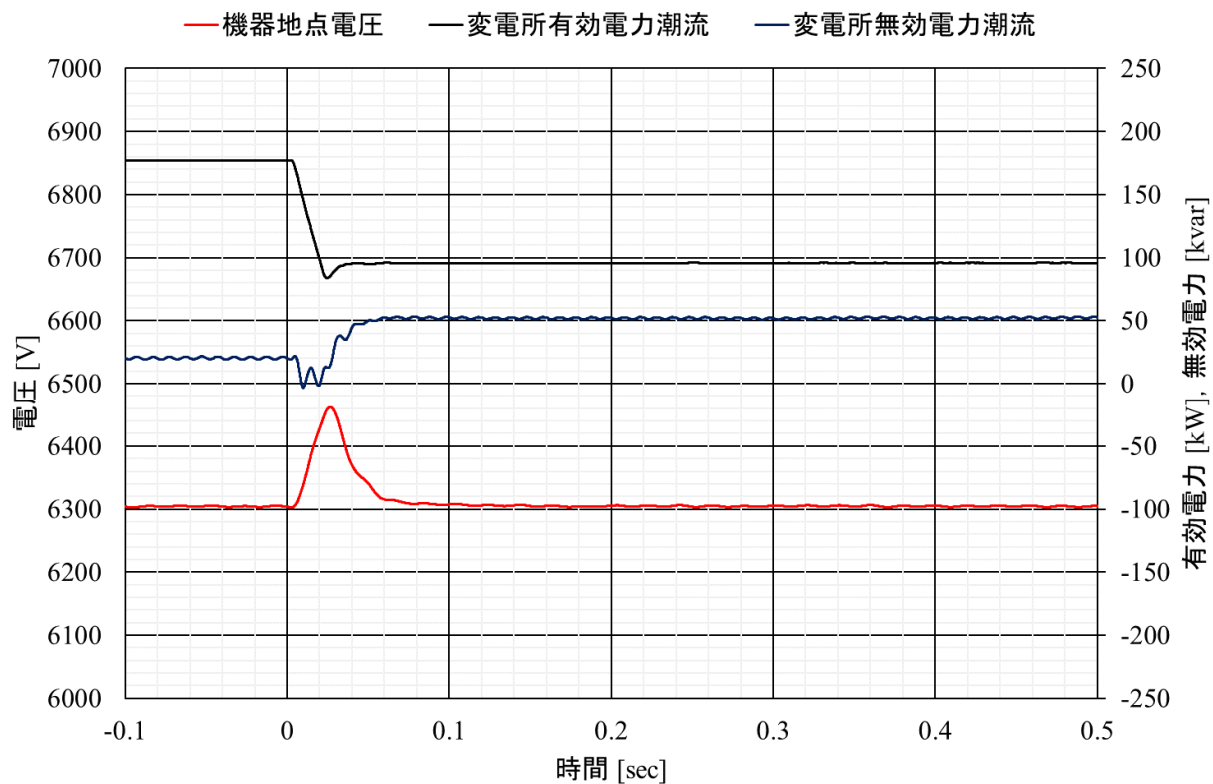
図付 2-2.2.4-1 試験手順(ループイン・ループアウト時)



(a) 検証機器 c-3 (制御目標電圧 6300V、
線路 Z1:5Ω、負荷 B:R280kW、L300kvar、線路 Z4:5Ω、負荷 C:C150kvar)



(b) 検証機器 d-1 (制御目標電圧 6300V、
線路 Z1:5Ω、負荷 B:R180kW、L200kvar、線路 Z4:5Ω、負荷 C:C150kvar)



(c) 検証機器 d-2 (制御目標電圧 6300V、
 線路 Z1:5Ω、負荷 B:R180kW、L200kvar、線路 Z4:5Ω、負荷 C:C150kvar)
 図付 2-2.2.4-2 ループイン時の機器設置地点電圧と変電所潮流

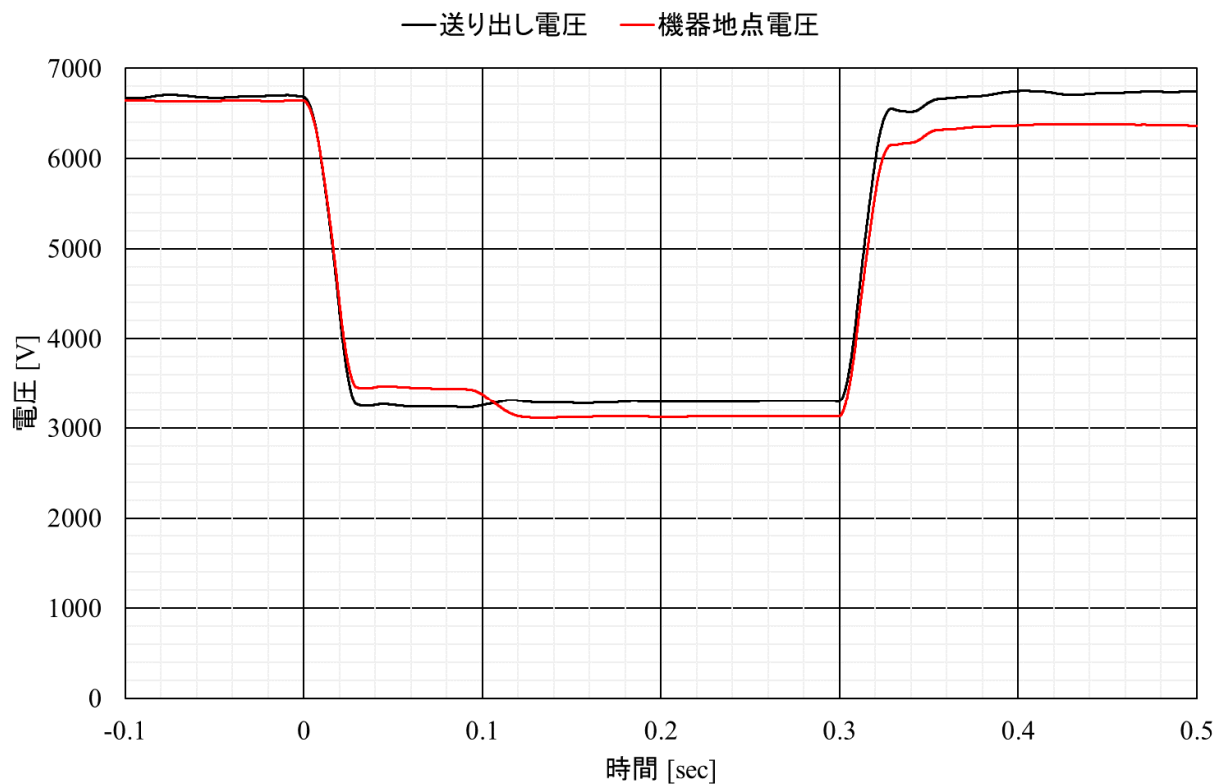
2. 2. 5 電力系統擾乱時の動作

2. 2. 5① 瞬時電圧低下時:

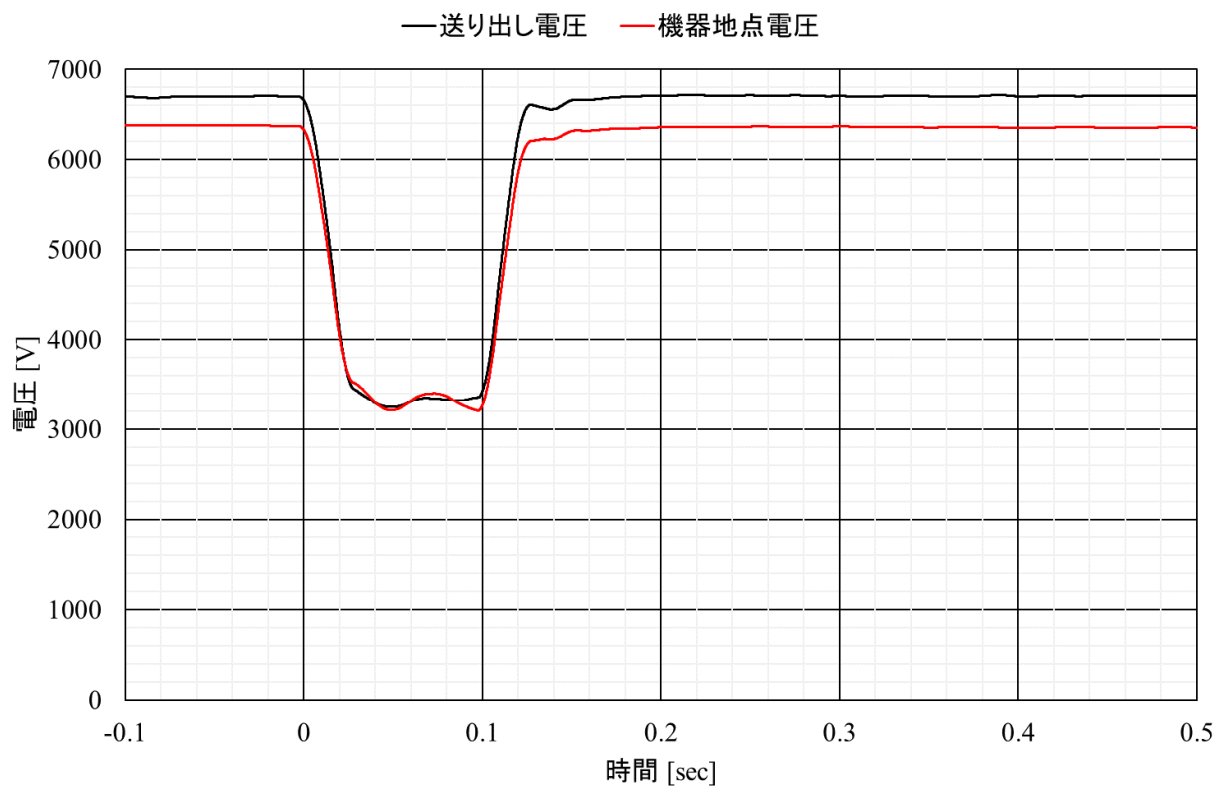
試験手順を図付 2-2.2.5-1, 瞬時電圧低下時の機器設置地点電圧を図付 2-2.2.5-2 に示す。

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			
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">BTBを用いて任意の瞬時電圧低下を発生</div> <div style="text-align: center;"> $\begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 \\ 5\Omega & 0\Omega \\ 10\Omega & 0\Omega \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{負荷B} \\ R280kW+L100kvar \\ R280kW+C100kvar \\ R560kW+L200kvar \\ R560kW+C200kvar \end{pmatrix}$ </div> </div>			
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 		<p style="text-align: right;">Z=5Ωとは、R=5Ω、X=5Ωとする</p> <div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center; margin-top: 10px;"> $\begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 & \text{負荷B} \\ 5\Omega & 0\Omega & R280kW+L100kvar \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{瞬低時} \\ \text{残電圧} \\ 50\% \\ 20\% \\ 0\% \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{瞬低時} \\ \text{継続時間} \\ 300msec \\ 1sec \end{pmatrix}$ </div>	

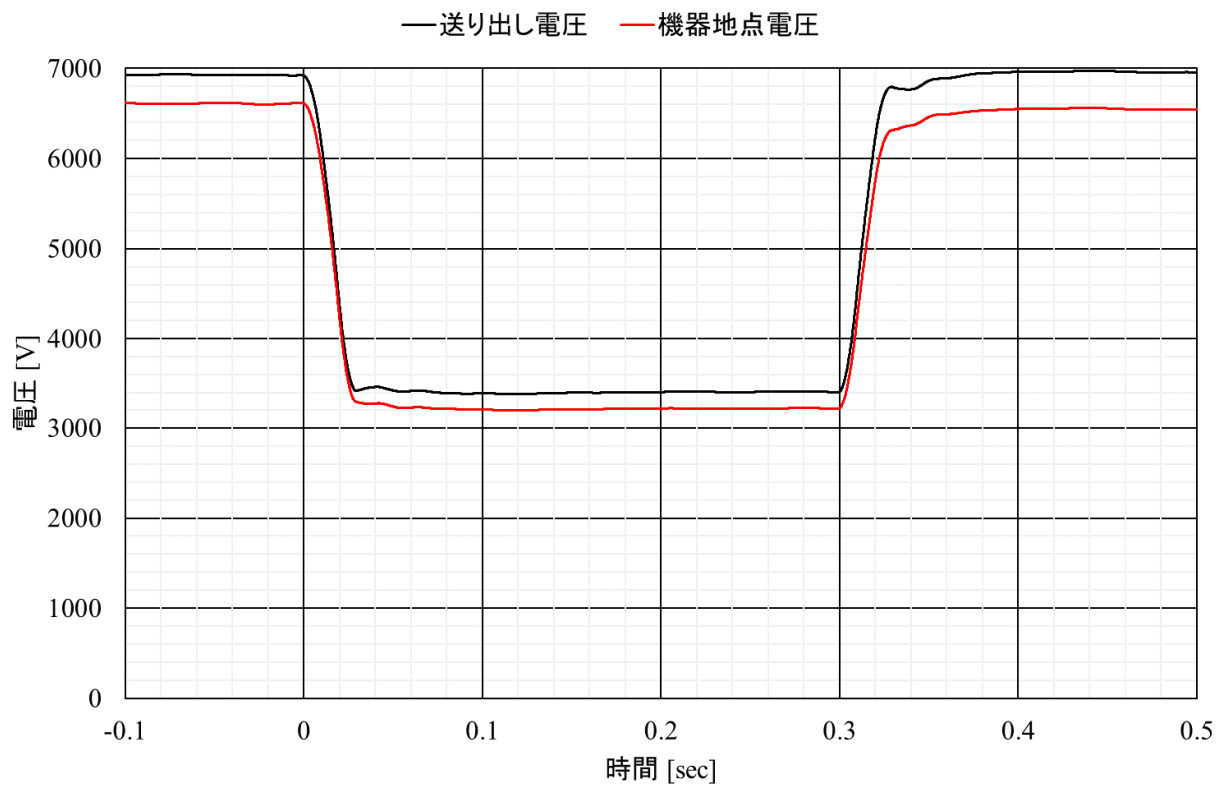
図付 2-2.2.5-1 試験手順(瞬時電圧低下時)



(a) 検証機器 c-2 (制御目標電圧 6300V, 瞬時電圧低下継続時間 0.3sec)



(b) 検証機器 d-1 (制御目標電圧 6300V, 瞬時電圧低下継続時間 0.1sec)



(c) 検証機器 d-2 (制御目標電圧 6600V, 瞬時電圧低下継続時間 0.3sec)

図付 2-2.2.5-2 ループイン時の機器設置地点電圧と変電所潮流
 (線路 Z1:5Ω、負荷 B:R180kW、L200kvar、瞬時電圧低下時残電圧 50%)

2. 2. 5② 周波数ステップ変動時:

図付 2-2.2.5-3 の手順で検証した結果, 検証機器 c-1, 検証機器 d-1, d-2 とともに周波数ステップ変動を発生させても機器は異常動作しないことを確認した。

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	周波数ステップ変動時
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周波数変動発生 ⑤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> $\left(\begin{array}{ccc} Z_1 & Z_2 & \text{負荷B} \\ 5\Omega & 0\Omega & R280kW+L100kvar \end{array} \right) \times \left(\begin{array}{c} \text{周波数変動} \\ \cdot +0.8\text{Hzステップ} \\ \cdot -0.8\text{Hzステップ} \end{array} \right)$		

図付 2-2.2.5-3 試験手順(周波数ステップ変動時)

2. 2. 5③ 周波数ランプ変動時:

図付 2-2.2.5-4 の手順で検証した結果, 検証機器 c-1, 検証機器 d-1, d-2 とともに周波数ランプ変動を発生させても機器は異常動作しないことを確認した。

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	周波数変動(ランプ)
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周波数変動発生 ⑤動作の確認 		$Z=5\Omega$ とは、 $R=5\Omega$ 、 $X=5\Omega$ とする $\left[\begin{array}{ccc} Z_1 & Z_2 & \text{負荷B} \\ 5\Omega & 0\Omega & R280kW+L100kvar \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{周波数変動} \\ \cdot +2\text{Hz/secランプ} \\ \cdot -2\text{Hz/secランプ} \end{array} \right]$	

図付 2-2.2.5-4 試験手順(周波数ランプ変動時)

2.3. 電圧制御

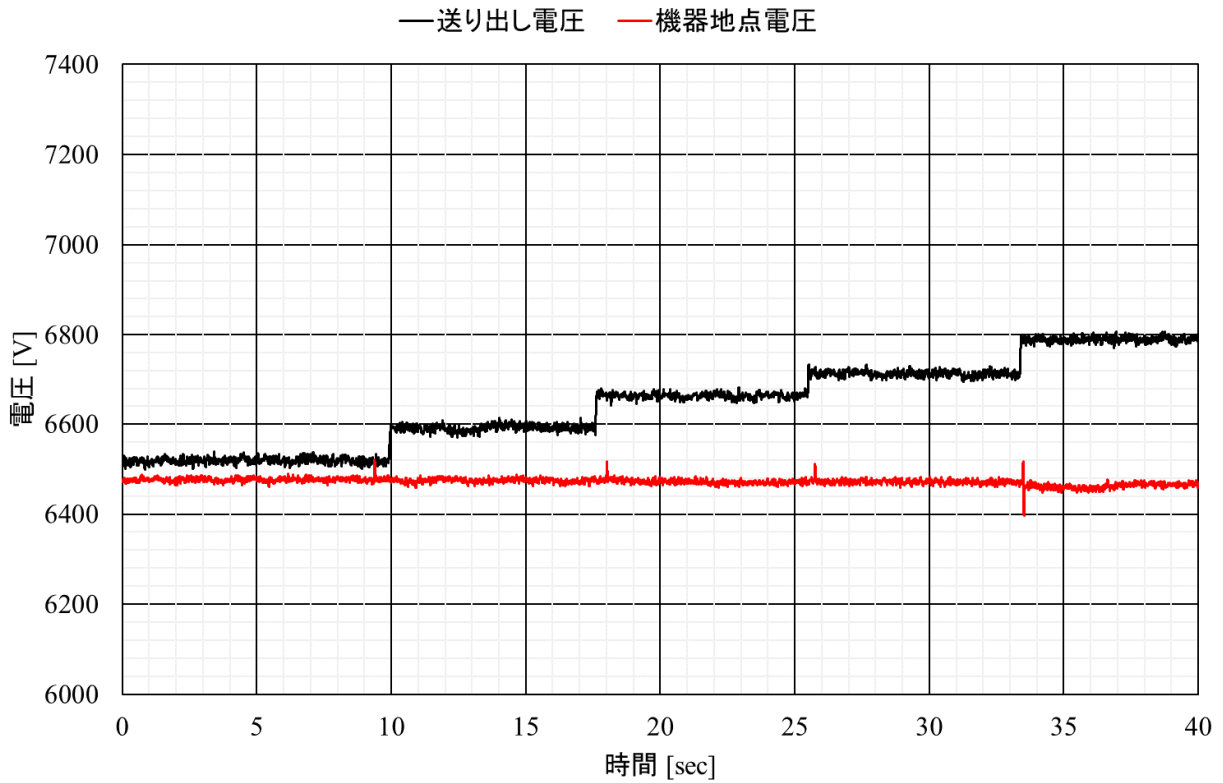
2.3.1 通常運転

2.3.1① LRT タップ動作時:

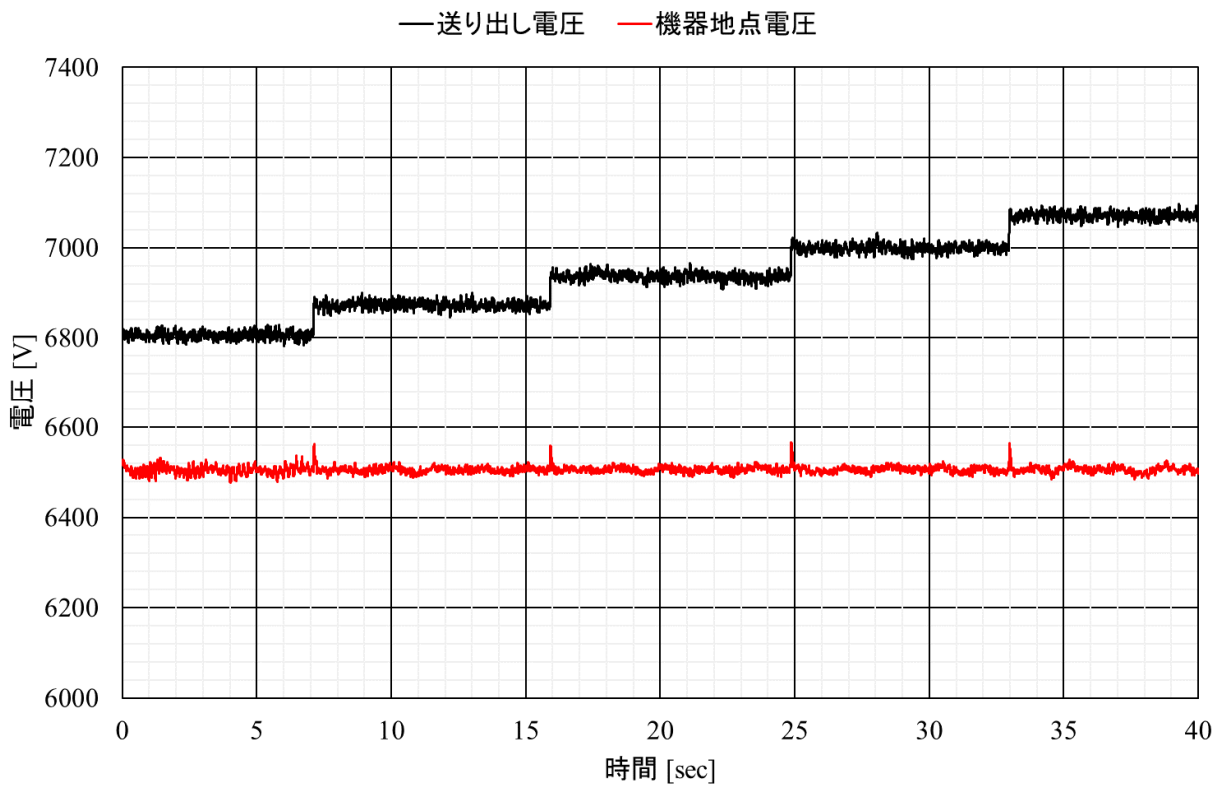
試験手順を図付 2-2.3.1-1, LRT タップ上昇動作時の機器設置地点電圧を図付 2-2.3.1-2, LRT タップ降下時の結果を図付 2-2.3.1-3 に示す。

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	LRTのタップ動作時
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 ④LRT 66kV/6.6⇒75Vタップ上げ ⑤動作の確認 ⑥75Vタップ下げ ⑦動作の確認 		$Z=5\Omega$ とは、 $R=5\Omega$ 、 $X=5\Omega$ とする $\begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 \\ 3\Omega & 0\Omega \\ 5\Omega & 0\Omega \\ 5\Omega & 5\Omega \\ 10\Omega & 0\Omega \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{負荷B} \\ R280kW \\ R280kW+L100kvar \\ R280kW+C100kvar \\ R560kW \\ R560kW+L200kvar \\ R560kW+C200kvar \end{pmatrix}$	

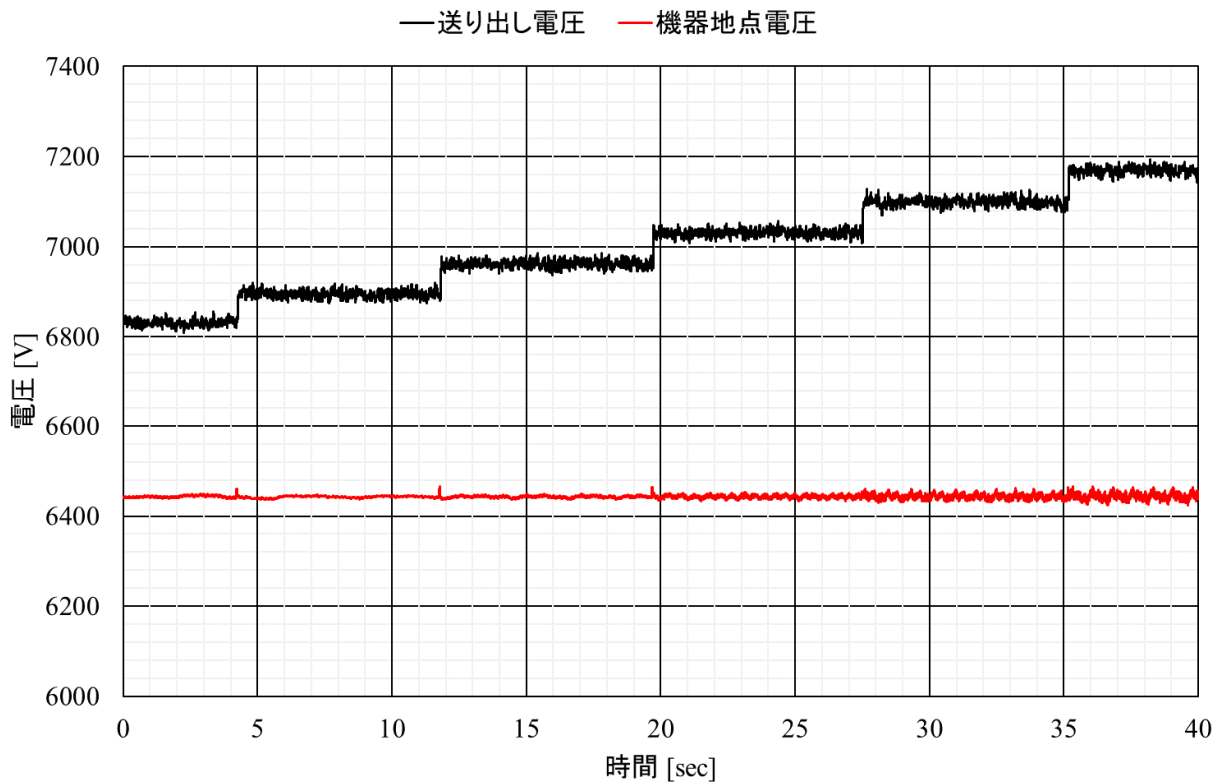
図付 2-2.3.1-1 試験手順(LRT タップ動作時)



(a) 検証機器 c-2 (制御目標電圧 6500V)

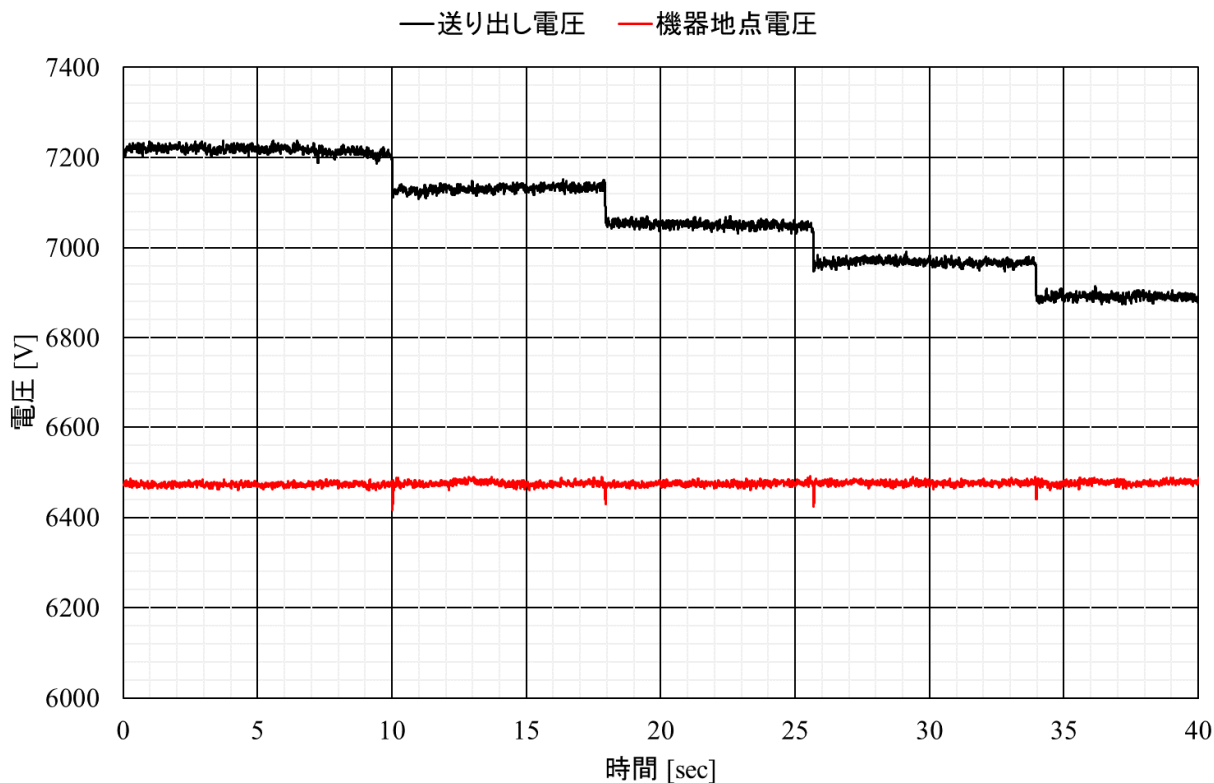


(b) 検証機器 d-1 (制御目標電圧 6500V)

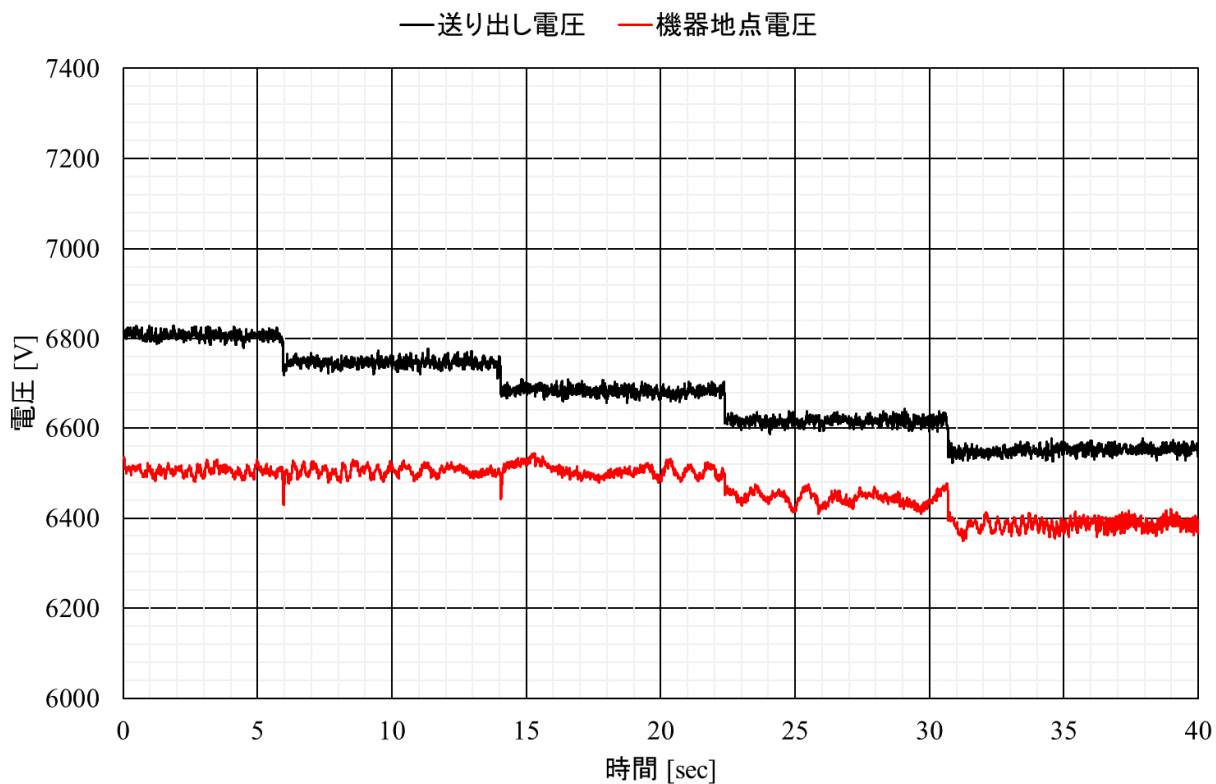


(c) 検証機器 d-2 (制御目標電圧 6500V)

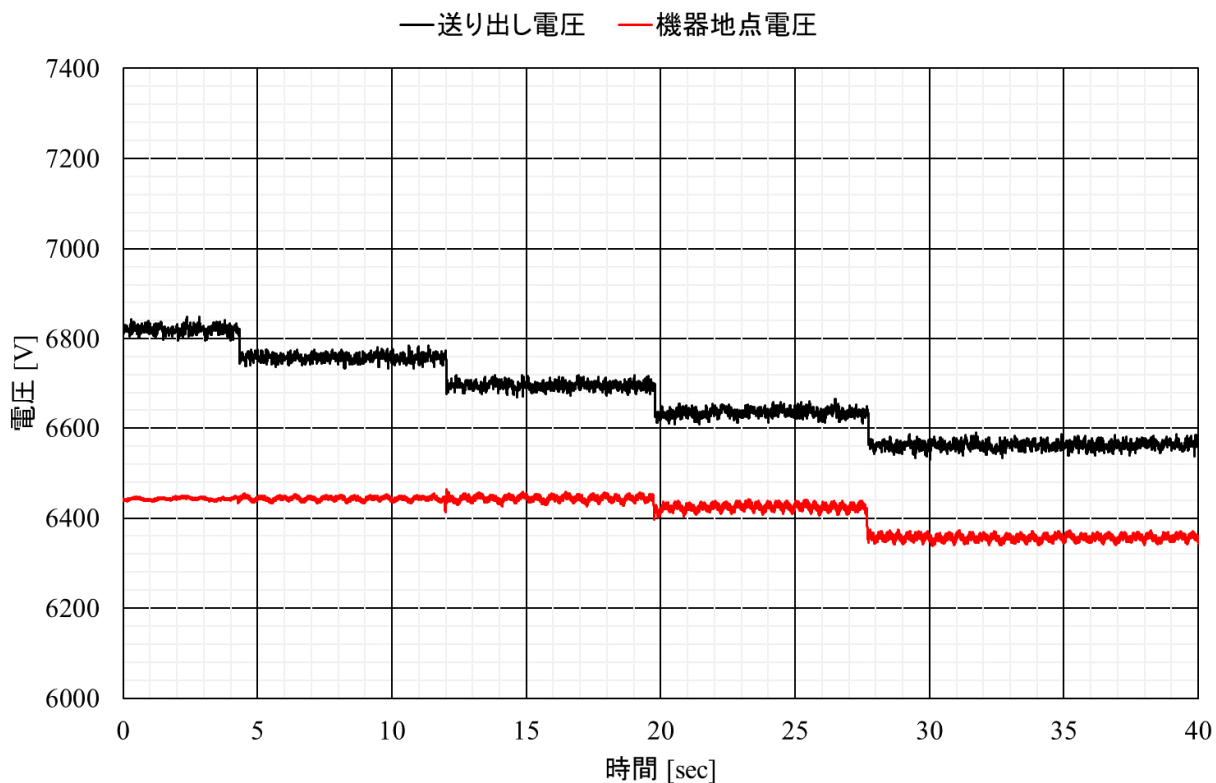
図付 2-2.3.1-2 LRT タップ上昇動作時の機器設置地点電圧
(線路 Z1:5Ω、負荷 B:R280kW、L100kvar)



(a) 検証機器 c-2 (制御目標電圧 6500V)



(b) 検証機器 d-1 (制御目標電圧 6500V)



(c) 検証機器 d-2 (制御目標電圧 6500V)

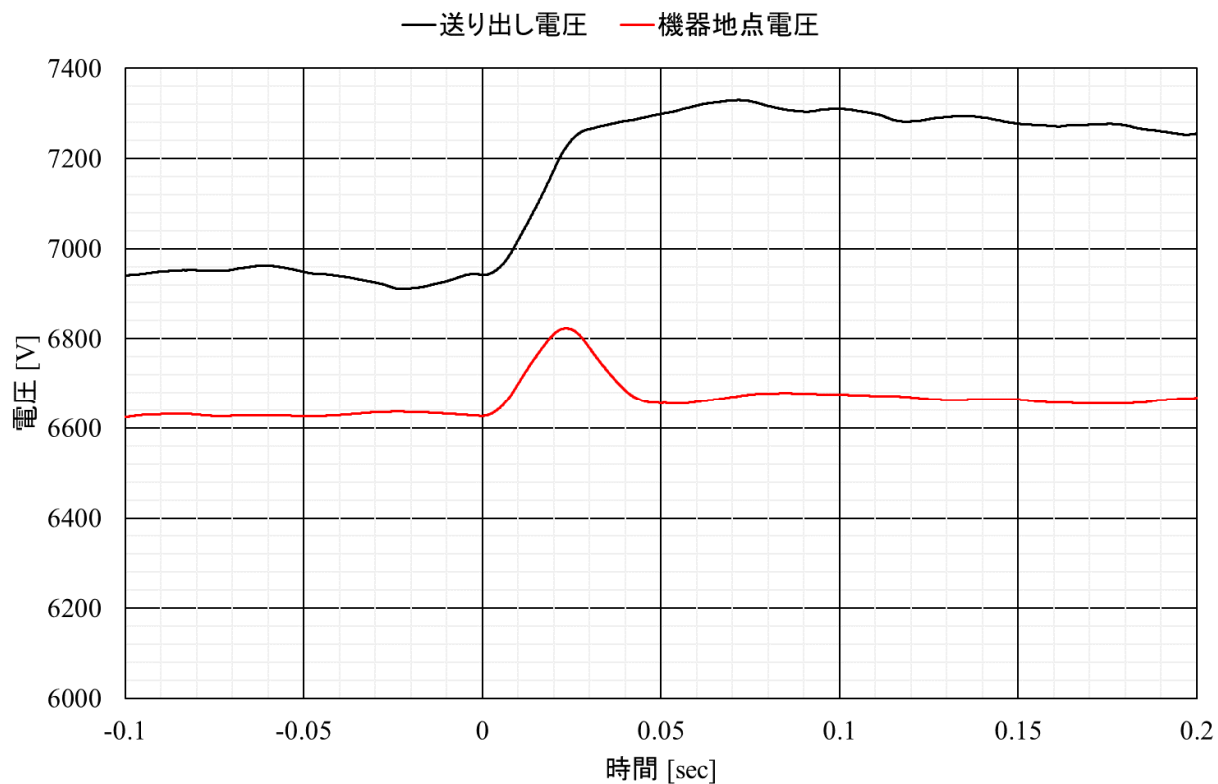
図付 2-2.3.1-3 LRT タップ降下動作時の機器設置地点電圧
(線路 Z1:5Ω、負荷 B:R280kW、L100kvar)

2.3.1② 電圧ステップ変化時:

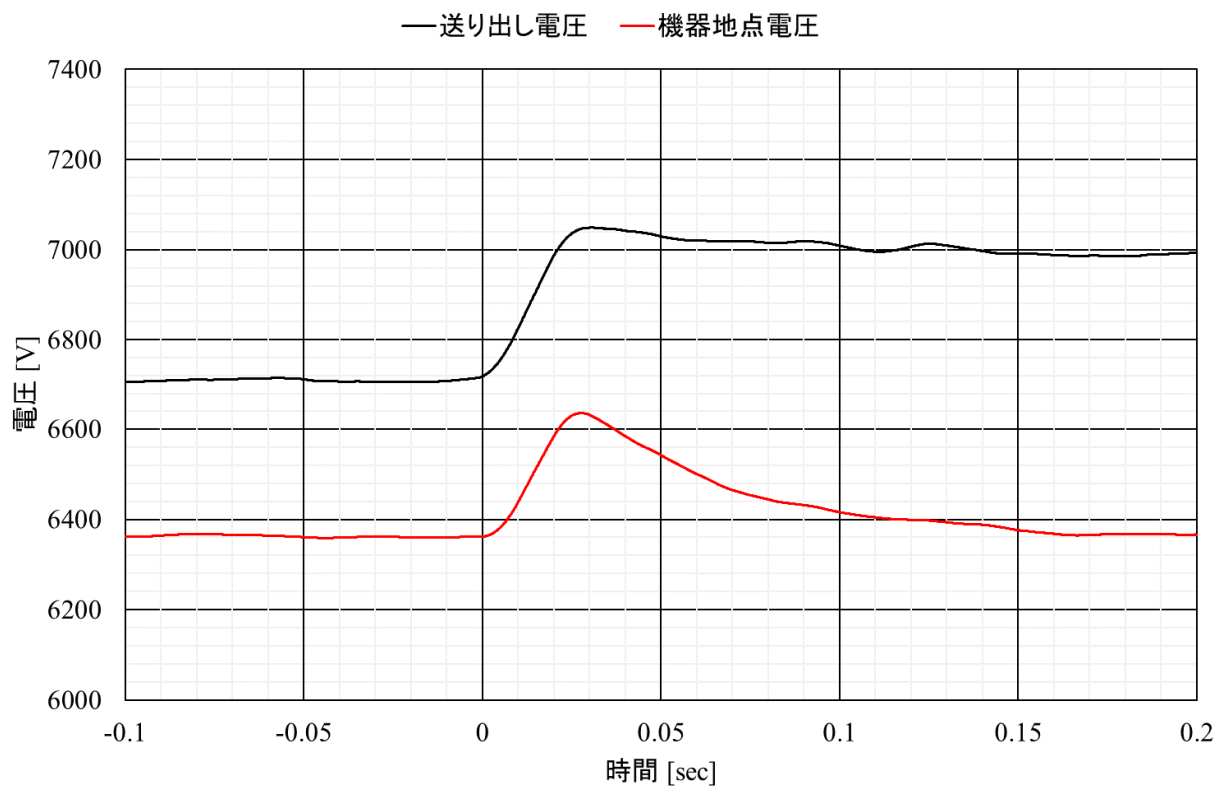
試験手順を図付 2-2.3.1-4, 電圧ステップ変化時の機器設置地点電圧を図付 2-2.3.1-5 に示す。

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		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 		<p>Z=5Ωとは、R=5Ω、X=5Ωとする</p> $\begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 \\ 3\Omega & 0\Omega \\ 5\Omega & 0\Omega \\ 5\Omega & 5\Omega \\ 10\Omega & 0\Omega \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{負荷B} \\ R280kW \\ R280kW+L100kvar \\ R280kW+C100kvar \\ R560kW \\ R560kW+L200kvar \\ R560kW+C200kvar \end{pmatrix}$	

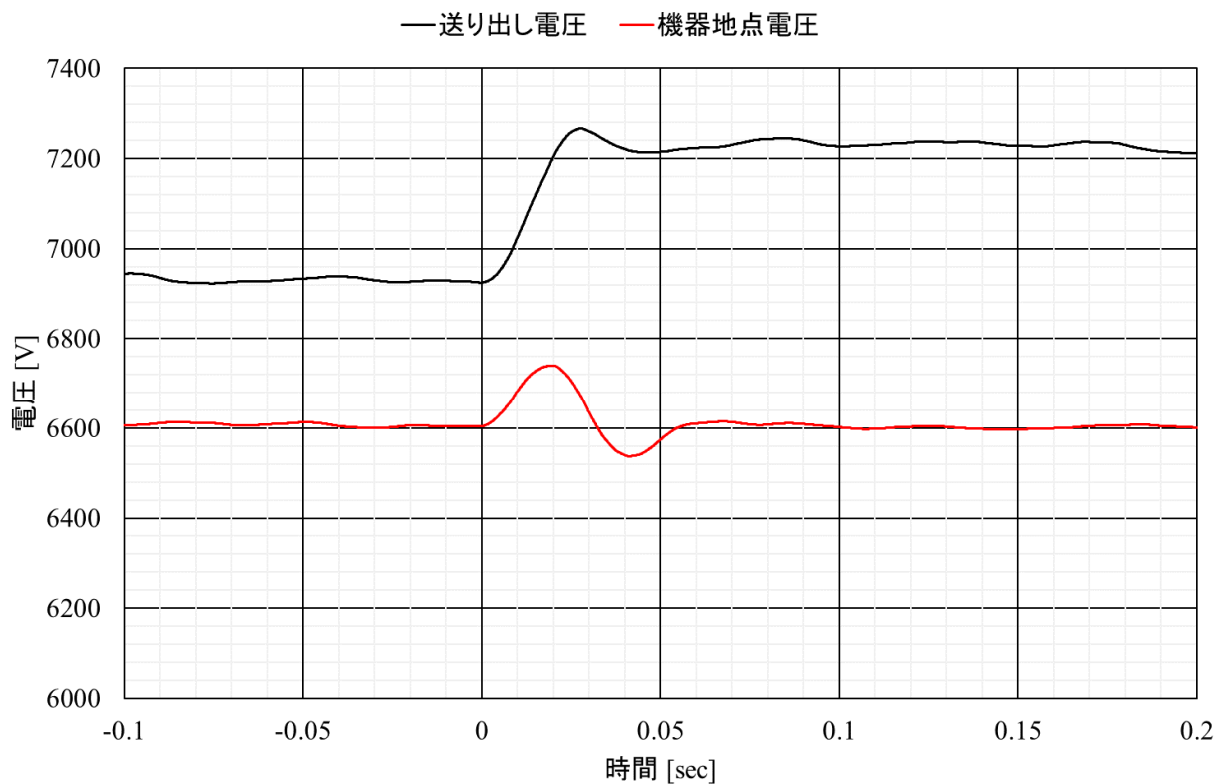
図付 2-2.3.1-4 試験手順(電圧ステップ変化時)



(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)
 図付 2-2.3.1-5 電圧ステップ変化時の機器設置地点電圧
 (線路 Z1:5Ω、負荷 B:R280kW、L100kvar)

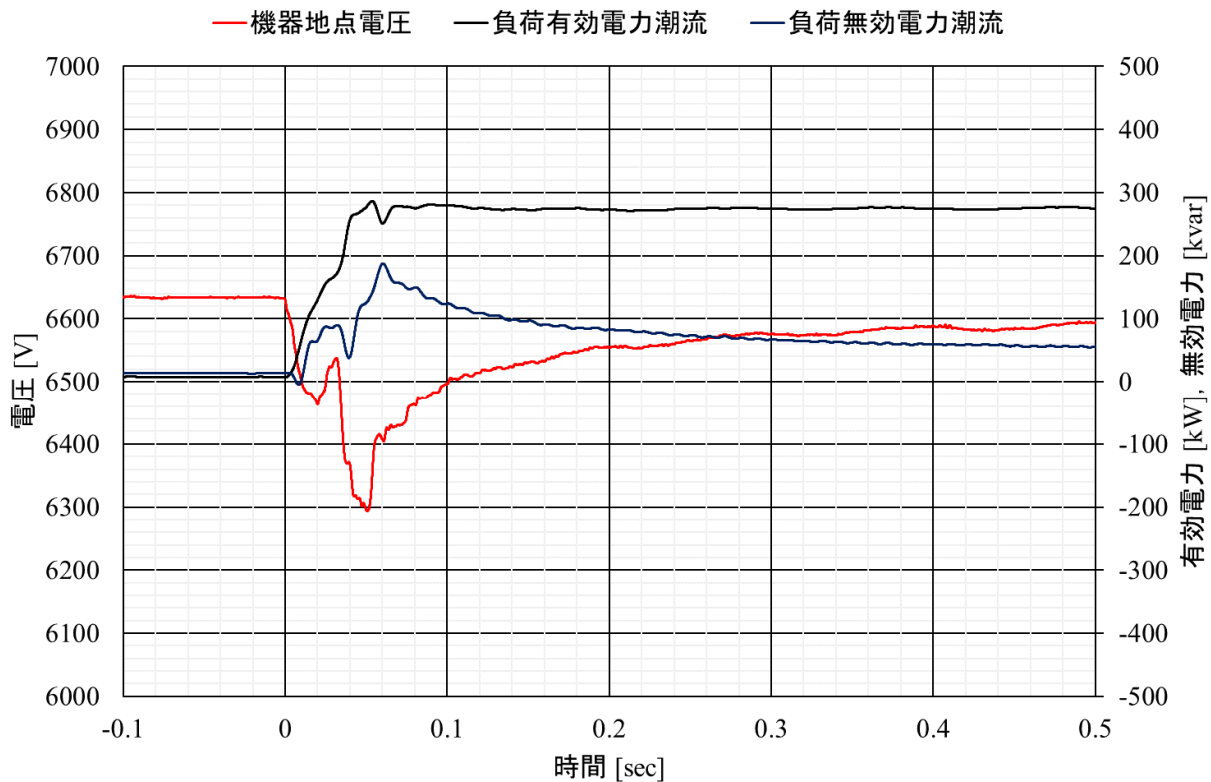
2.3.2 負荷特性による影響

2.3.2① 負荷の投入・開放時:

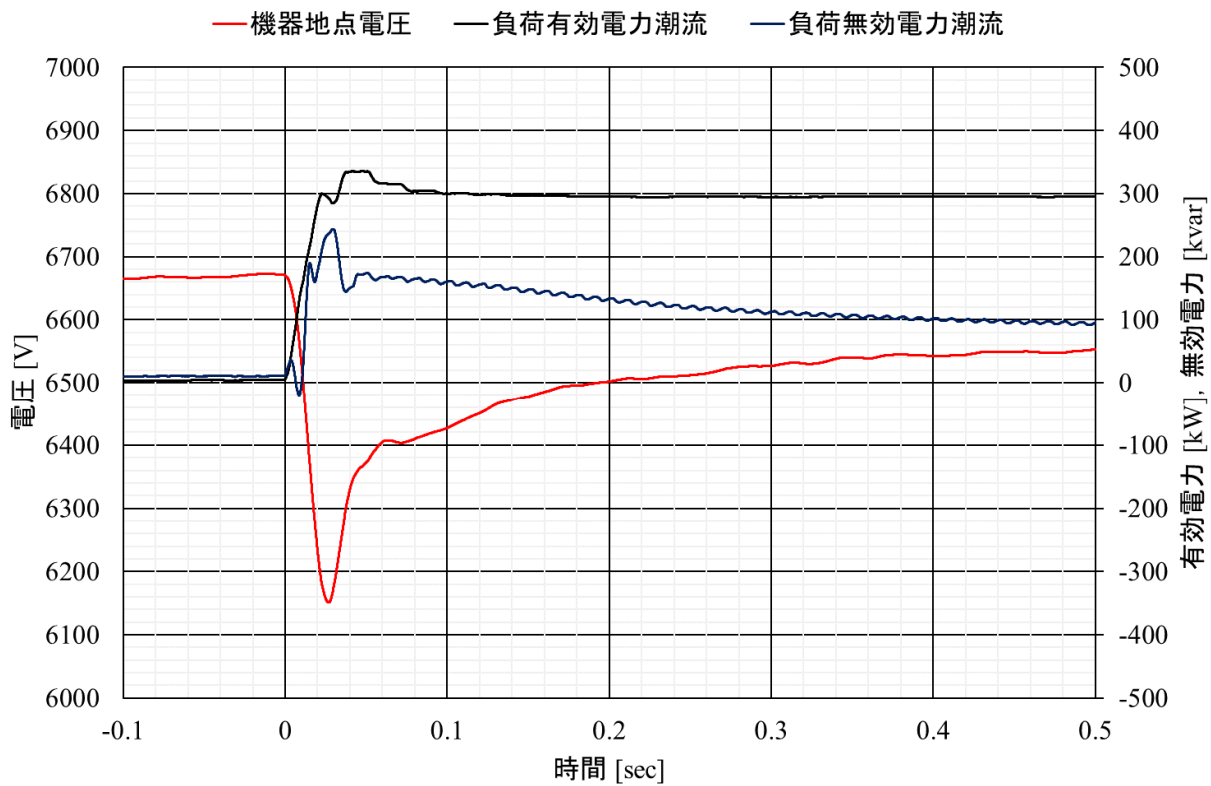
試験手順を図付 2-2.3.2-1, 負荷投入時の機器設置地点電圧を図付 2-2.3.2-2, 負荷開放時の結果を図付 2-2.3.2-3 に示す。

対象	大項目	中項目	小項目
単機	電圧制御	負荷特性による影響	負荷の投入・開放
試験回路			
試験手順		試験パラメータ	
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無負荷⇒負荷投入 ⑤動作の確認 ⑥負荷投入⇒無負荷 ⑧動作の確認		$Z=5\Omega$ とは、 $R=5\Omega$ 、 $X=5\Omega$ とする $\begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 \\ 3\Omega & 0\Omega \\ 5\Omega & 0\Omega \\ 5\Omega & 5\Omega \\ 10\Omega & 0\Omega \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{負荷B} \\ R280kW \\ R280kW+L100kvar \\ R280kW+C100kvar \\ R560kW \\ R560kW+L200kvar \\ R560kW+C200kvar \end{pmatrix}$	

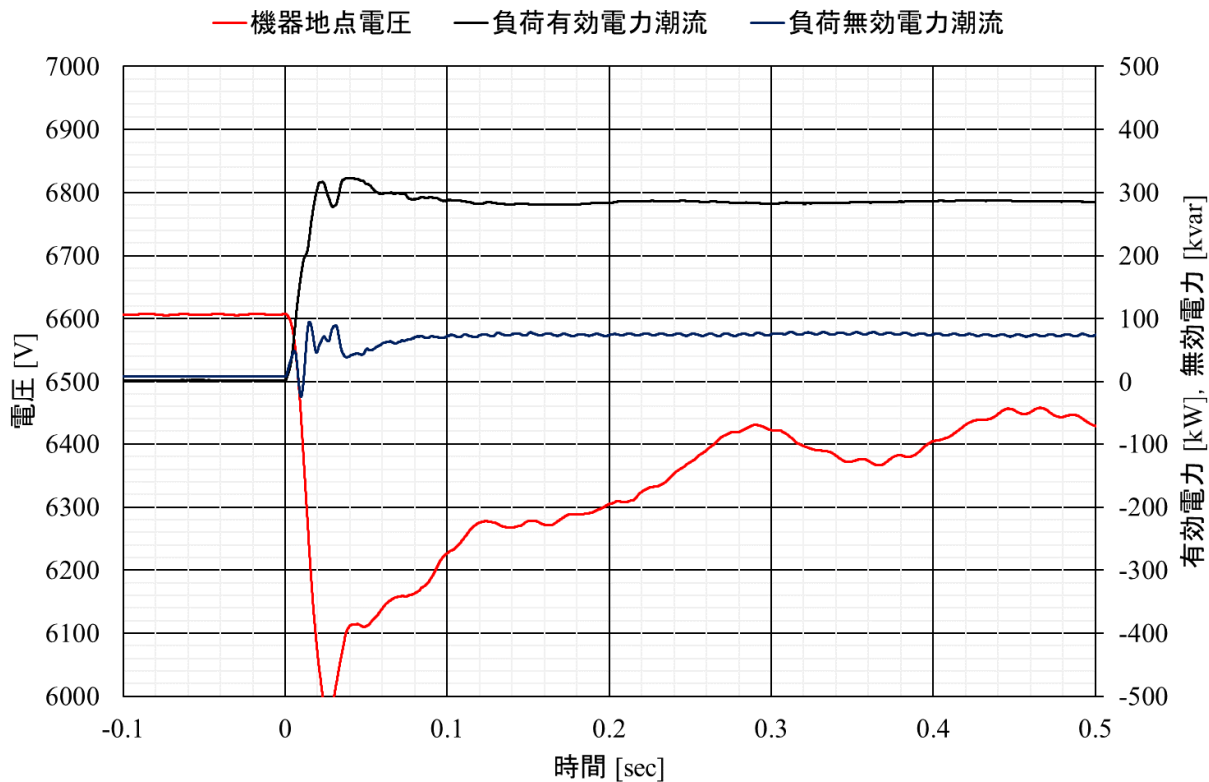
図付 2-2.3.2-1 試験手順(負荷の投入・開放時)



(a) 検証機器 c-2 (制御目標電圧 6600V)

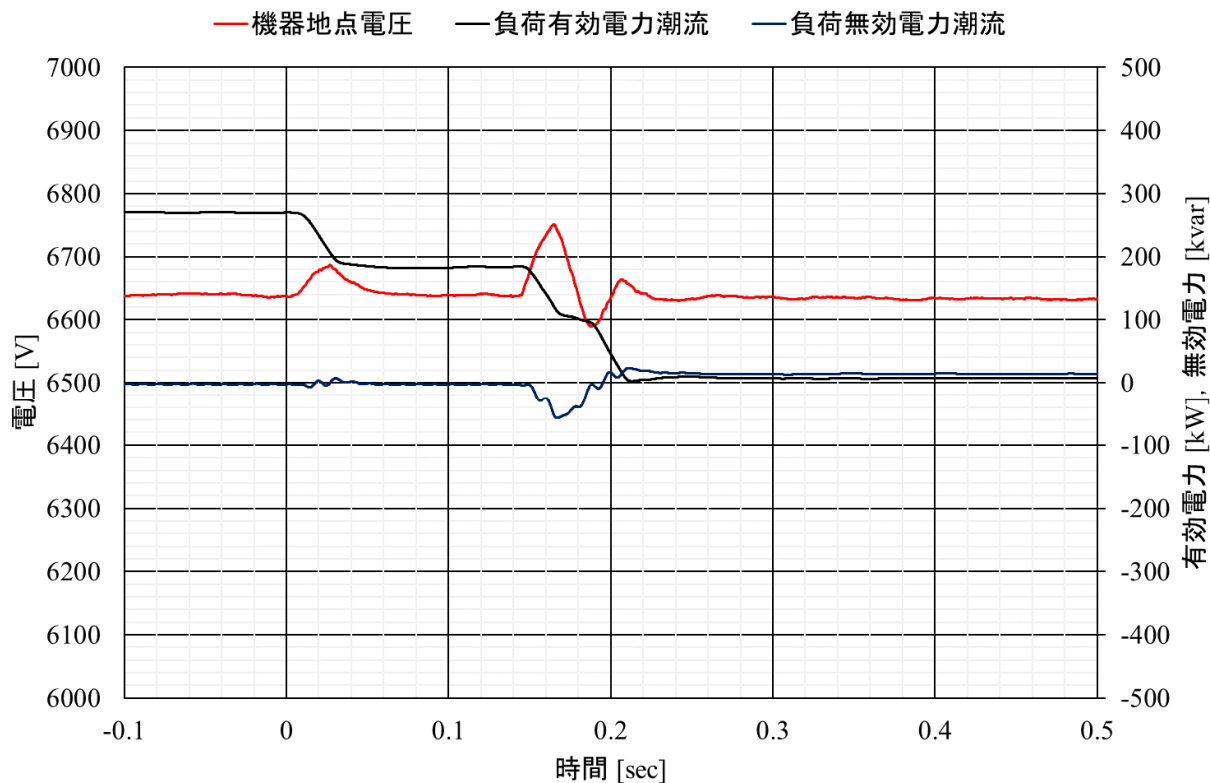


(b) 検証機器 d-1 (制御目標電圧 6600V)

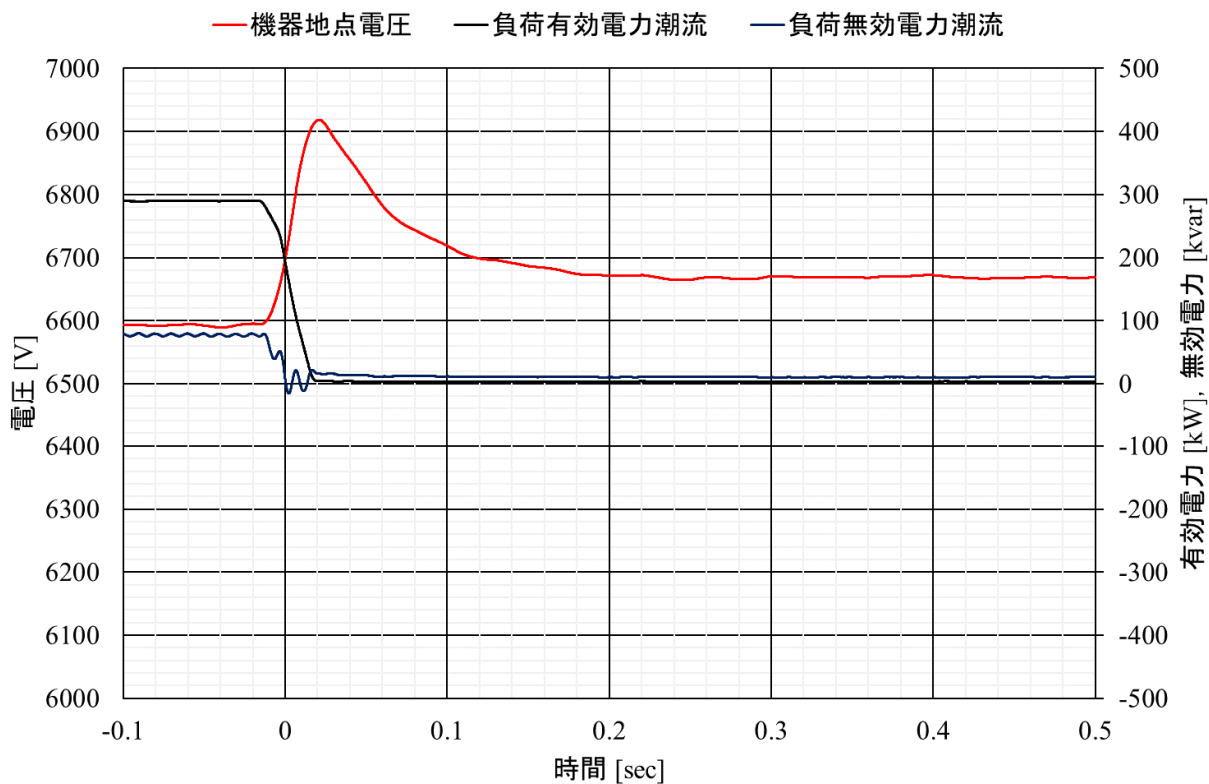


(c) 検証機器 d-2 (制御目標電圧 6600V)

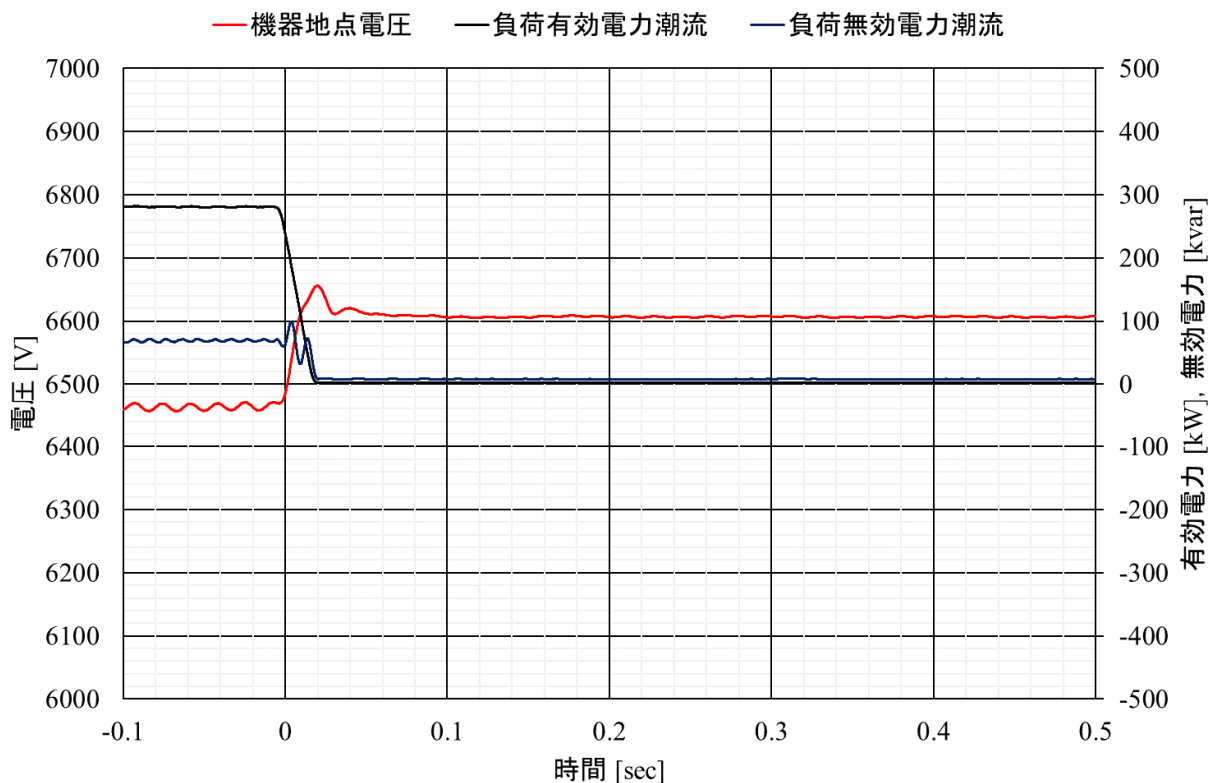
図付 2-2.3.2-2 負荷投入時の機器設置地点電圧と負荷潮流
(線路 Z1:5Ω, 負荷 B:R280kW, L100kav)



(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)

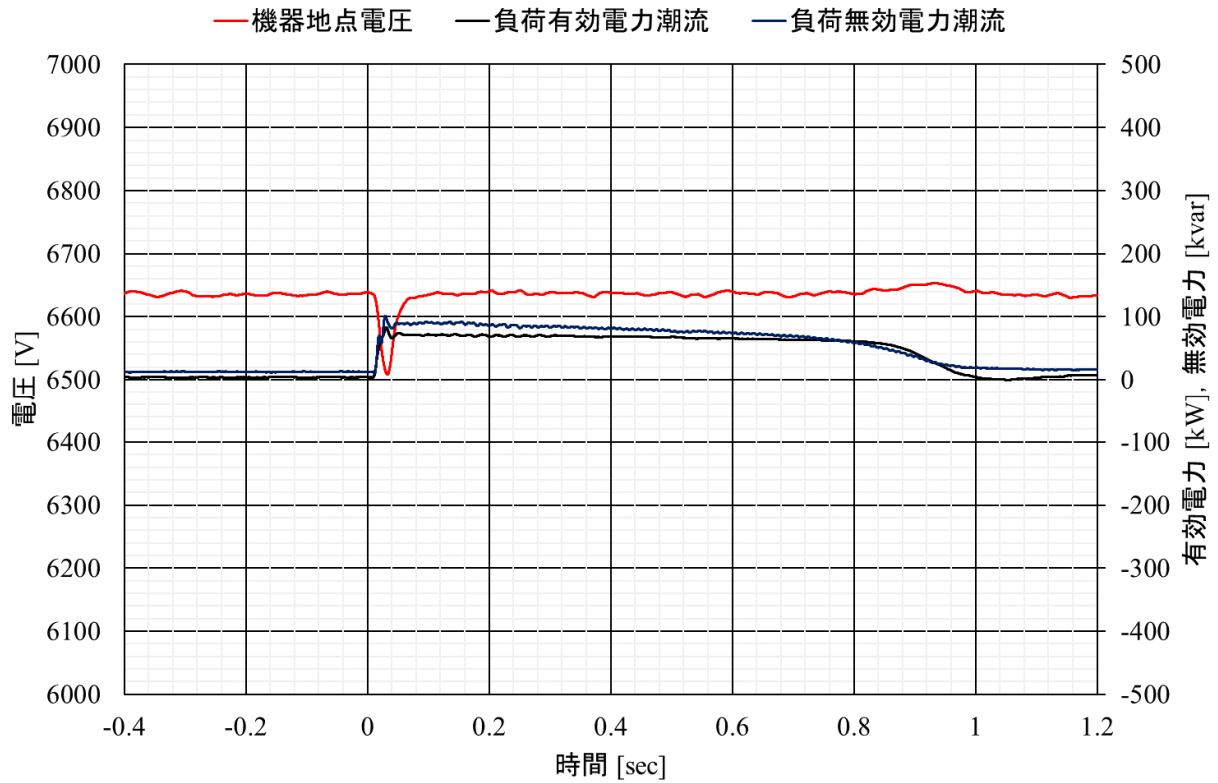
図付 2-2.3.2-3 負荷開放時の機器設置地点電圧と負荷潮流
(線路 Z1:5Ω, 負荷 B:R280kW, L100kav)

2.3.2② モータ負荷:

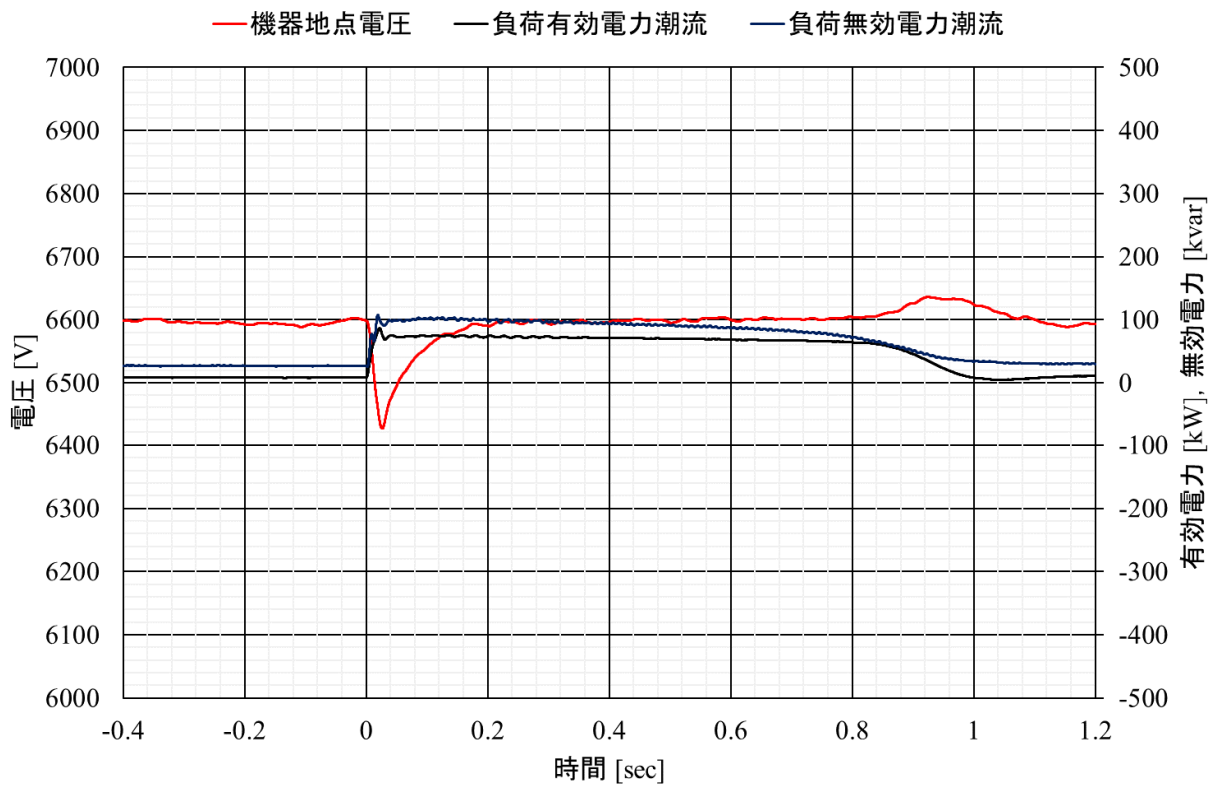
試験手順を図付 2-2.3.2-4, 負荷投入時の機器設置地点電圧を図付 2-2.3.2-5, 負荷開放時の結果を図付 2-2.3.2-6 に示す。

対象	大項目	中項目	小項目
単機	電圧制御	負荷特性による影響	モータ負荷
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無負荷⇒負荷投入 ⑤動作の確認 ⑥負荷投入⇒無負荷 ⑦動作の確認 		<p>Z=5Ωとは、R=5Ω、X=5Ωとする</p> $\begin{pmatrix} Z_1 & Z_2 \\ 5\Omega & 0\Omega \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{負荷B} \\ \text{モータ負荷40kW} \\ \text{R280kW+モータ負荷40kW} \\ \text{R560kW+モータ負荷40kW} \end{pmatrix}$	

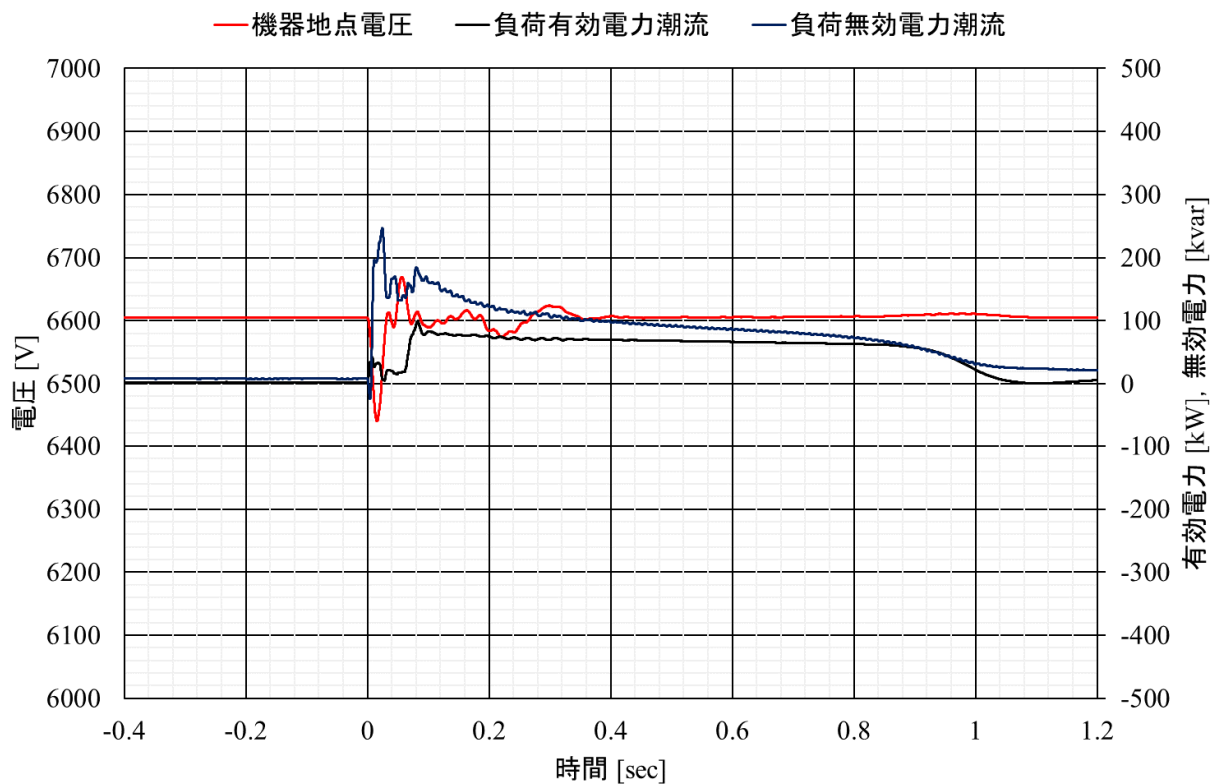
図付 2-2.3.2-4 試験手順(モータ負荷)



(a) 検証機器 c-3 (制御目標電圧 6600V)

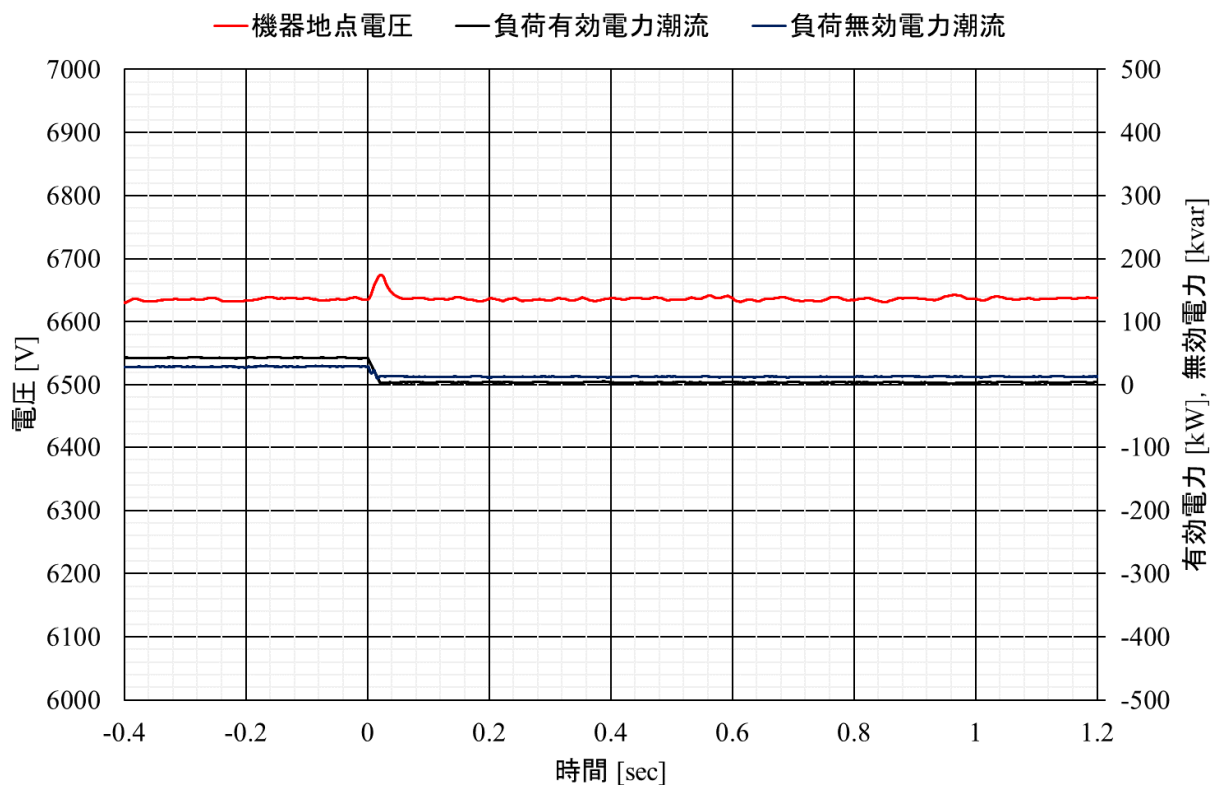


(b) 検証機器 d-1 (制御目標電圧 6600V)

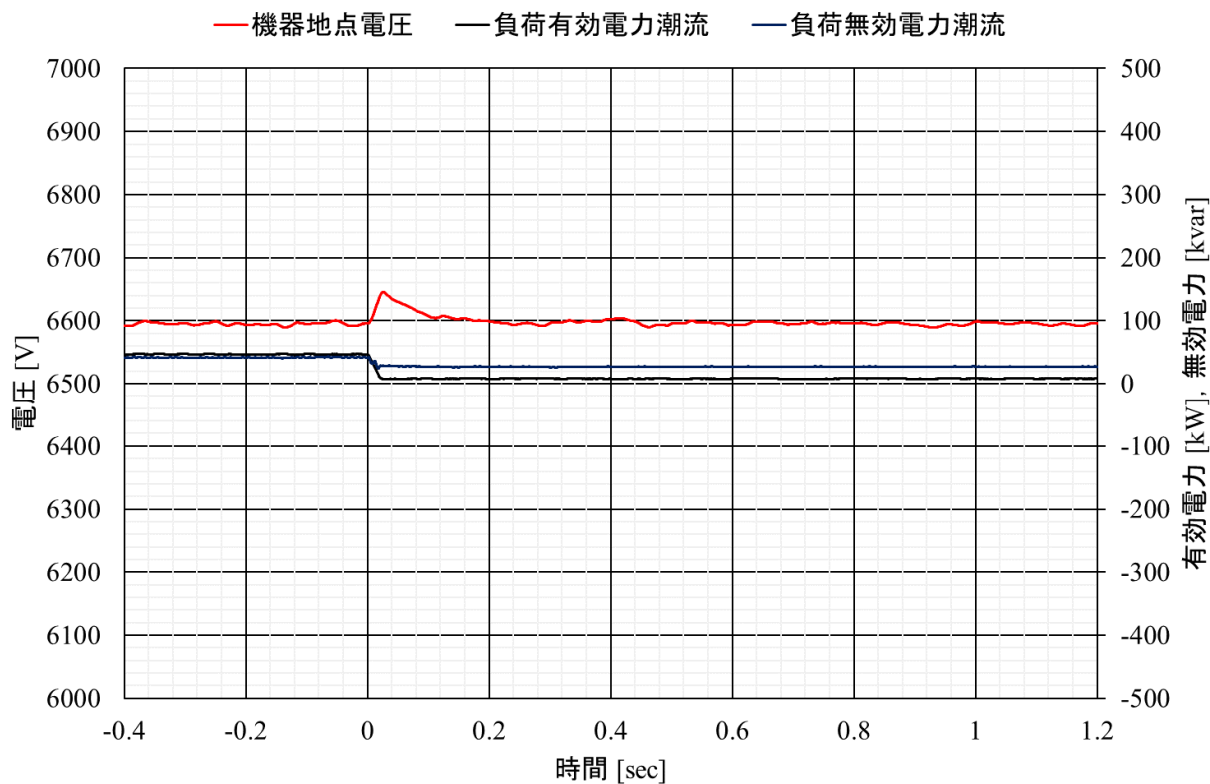


(c) 検証機器 d-2 (制御目標電圧 6600V)

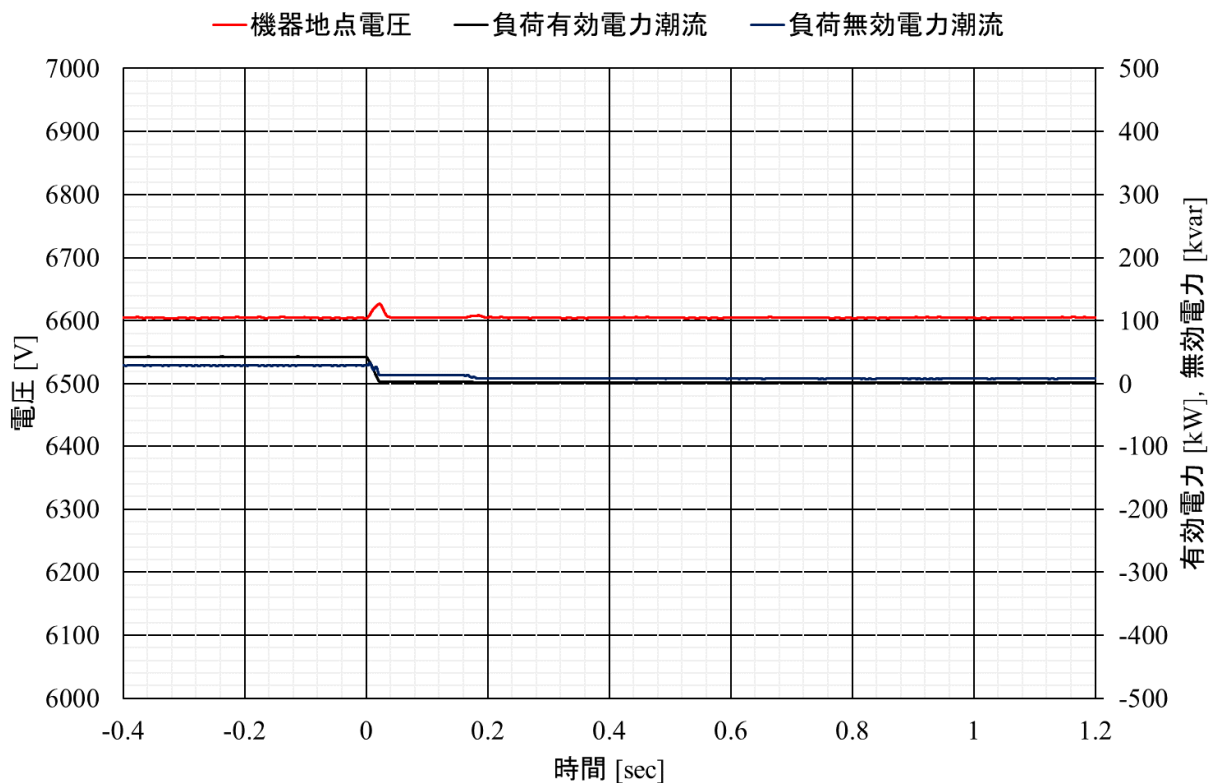
図付 2-2.3.2-5 モータ負荷投入時の機器設置地点電圧と負荷潮流
(線路 Z1:5Ω, 負荷 B:モータ負荷 40kW)



(a) 検証機器 c-3 (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)

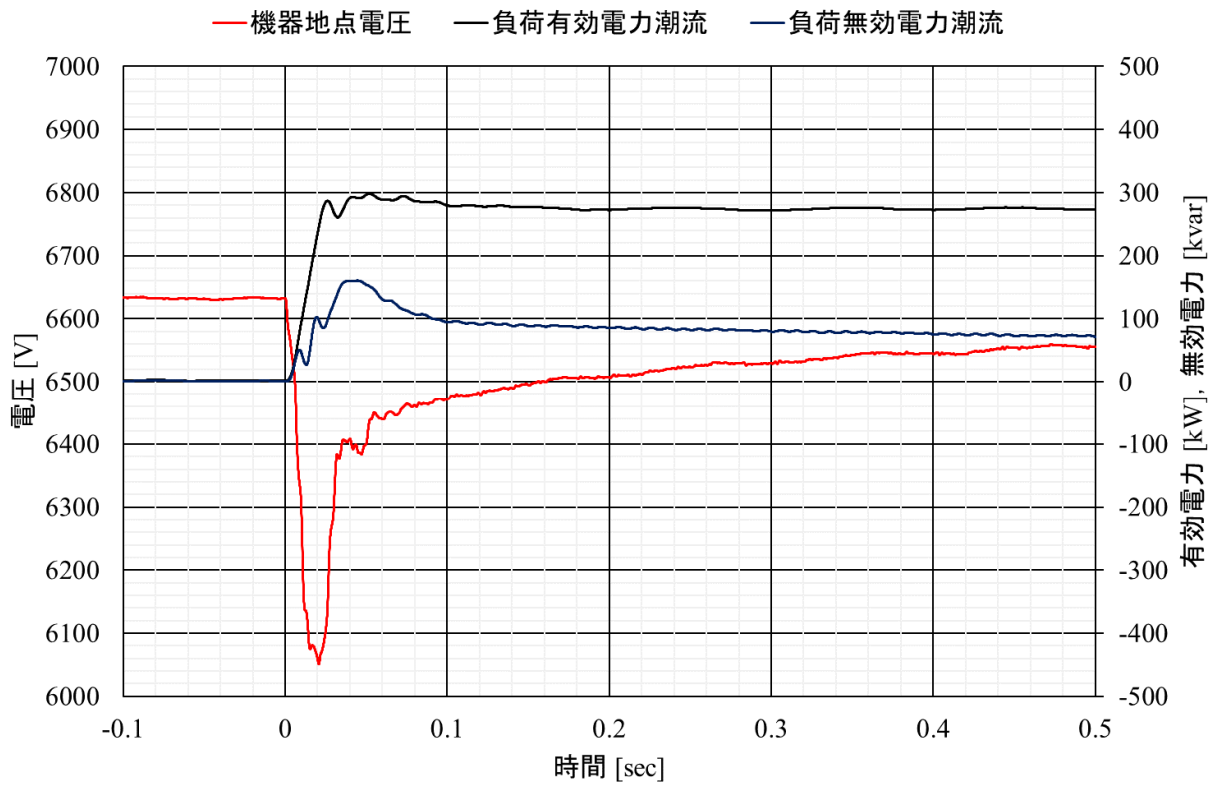
図付 2-2.3.2-6 モータ負荷投入時の機器設置地点電圧と負荷潮流
(線路 Z1:5Ω, 負荷 B:モータ負荷 40kW)

2.3.2③変圧器投入インラッシュ

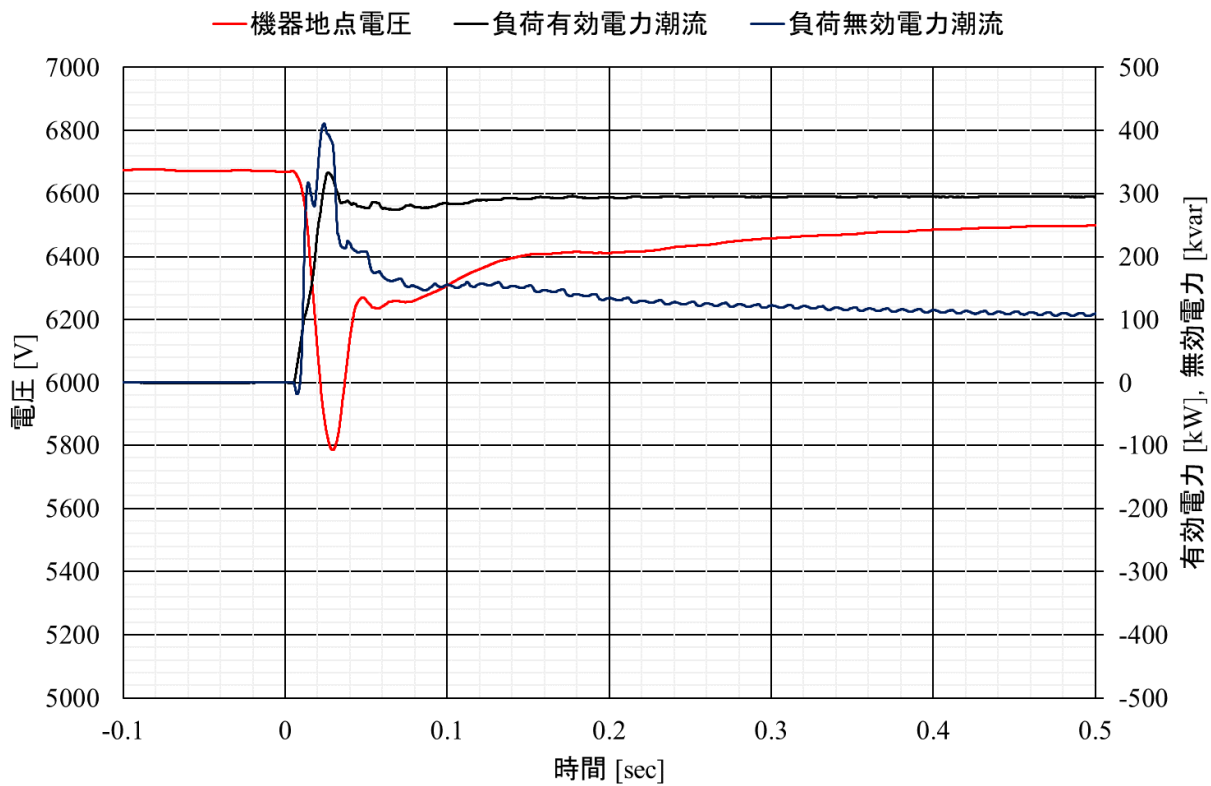
試験手順を図付 2-2.3.2-7, 変圧器投入インラッシュ時の機器設置地点電圧を図付 2-2.3.2-8 に示す。

対象	大項目	中項目	小項目
単機	電圧制御	負荷特性による影響	変圧器投入インラッシュ
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無負荷⇒負荷投入(変圧器励磁) ⑤動作の確認 ⑥負荷投入⇒無負荷 ⑦動作の確認 		<p>Z=5Ωとは、R=5Ω、X=5Ωとする</p> $\begin{bmatrix} Z_1 & Z_2 \\ 5\Omega & 0\Omega \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \text{負荷B} \\ R280kW+L100kvar+\text{変圧器}300kVA \times 3\text{台} \\ R560kW+L200kvar+\text{変圧器}300kVA \times 3\text{台} \end{bmatrix}$	

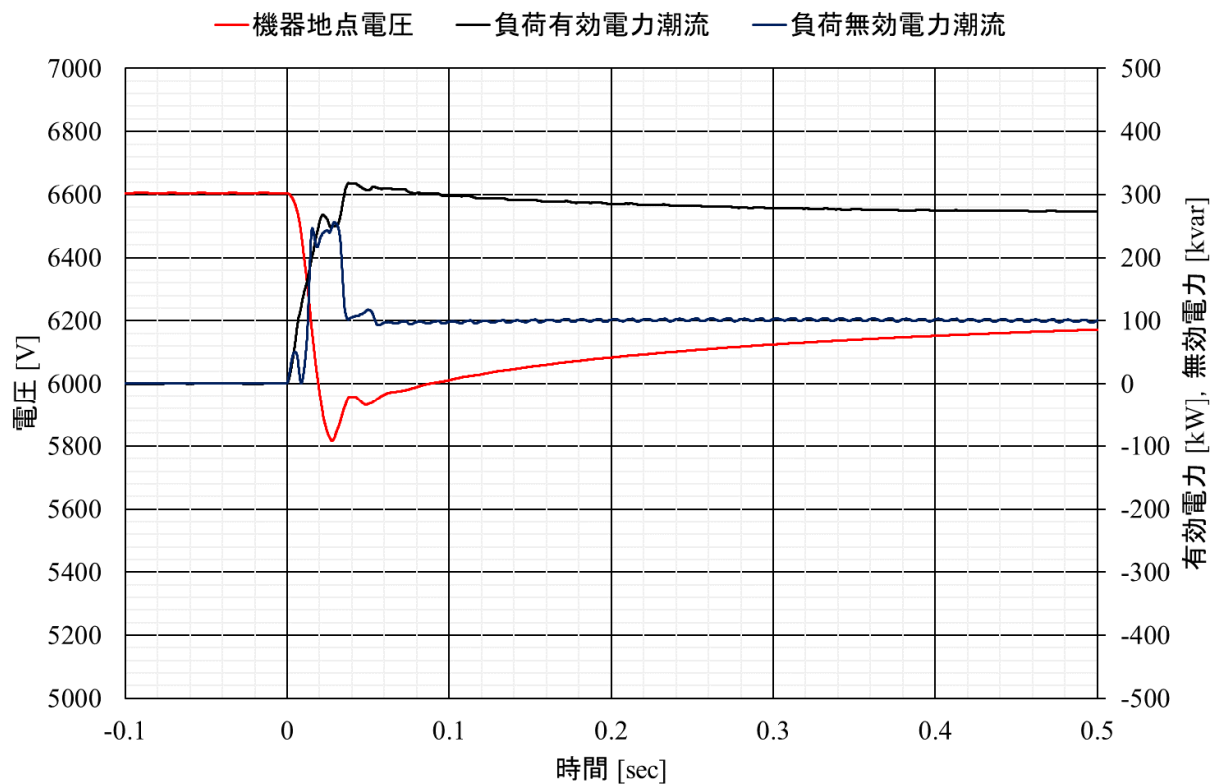
図付 2-2.3.2-7 試験手順(変圧器投入インラッシュ)



(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)

図付 2-2.3.2-8 モータ負荷投入時の機器設置地点電圧と負荷潮流
 (線路 Z1:5Ω, 負荷 B:R280kW、L100kvar、変圧器 300kVA3 台)

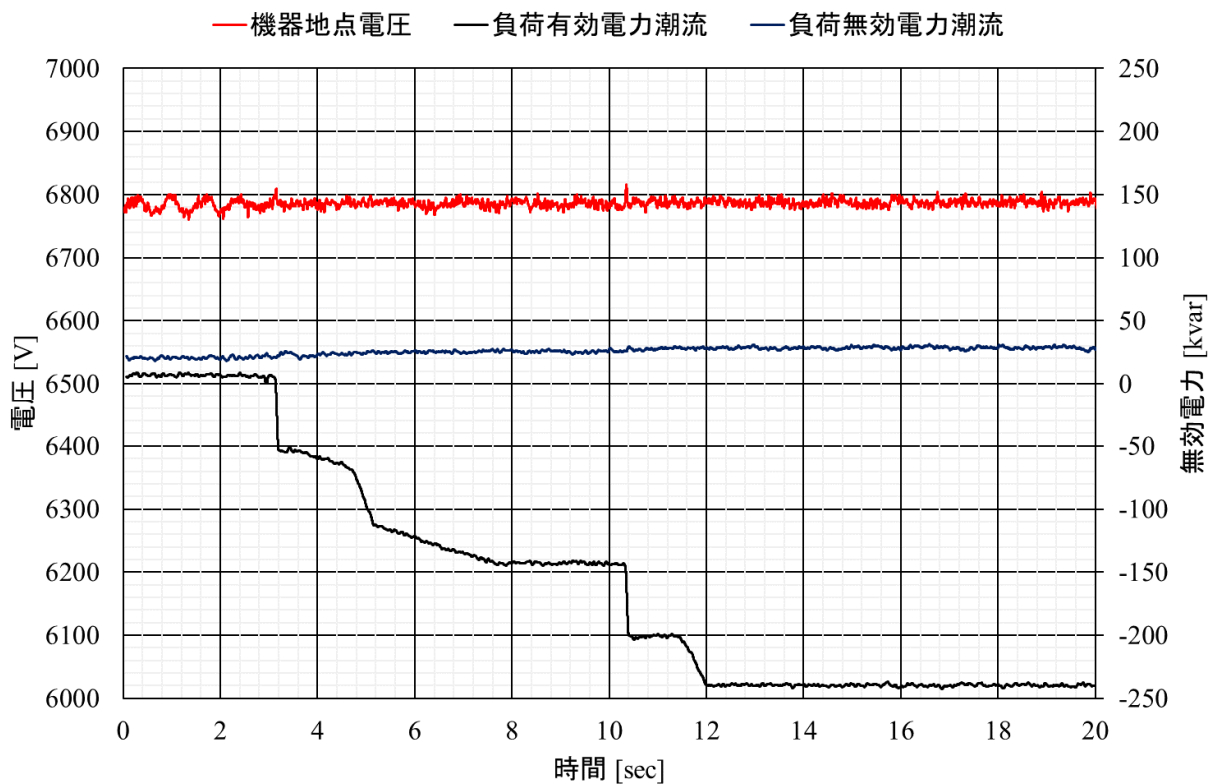
2.3.3 分散型電源の発電特性による影響

2.3.3① 分散型電源の起動・停止時

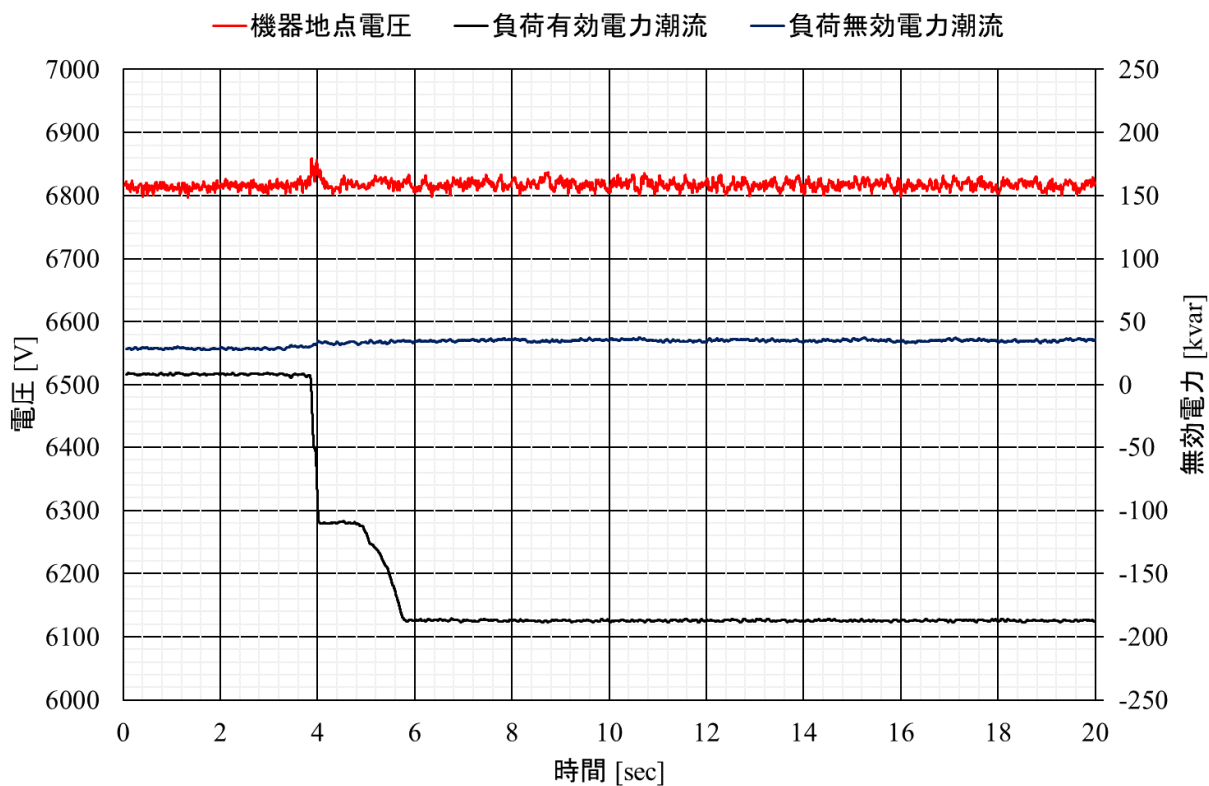
試験手順を図付 2-2.3.3-1、インバータ型電源起動時の機器設置地点電圧を図付 2-2.3.3-2、インバータ型電源停止時の機器設置地点電圧を図付 2-2.3.3-3 に示す。また、回転型電源起動時の機器設置地点電圧を図付 2-2.3.3-4、回転型電源停止時の機器設置地点電圧を図付 2-2.3.3-5 に示す。

対象	大項目	中項目	小項目
単機	電圧制御	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
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負荷の投入 ④検証機器を起動 ⑤分散型電源を定格出力運転 ⑥動作の確認 ⑦分散型電源を運転停止 ⑧動作の確認 		$ \begin{matrix} Z_1 & Z_2 \\ 3\Omega & 0\Omega \\ 5\Omega & 0\Omega \\ 5\Omega & 5\Omega \\ 10\Omega & 0\Omega \end{matrix} \times \begin{matrix} \text{負荷・電源B} \\ R280kW+L100kvar+IN200kW \\ R280kW+L100kvar+SG150kW \\ IN200kW \\ IN400kW \\ SG150kW \\ SG270kW \end{matrix} $ <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>	

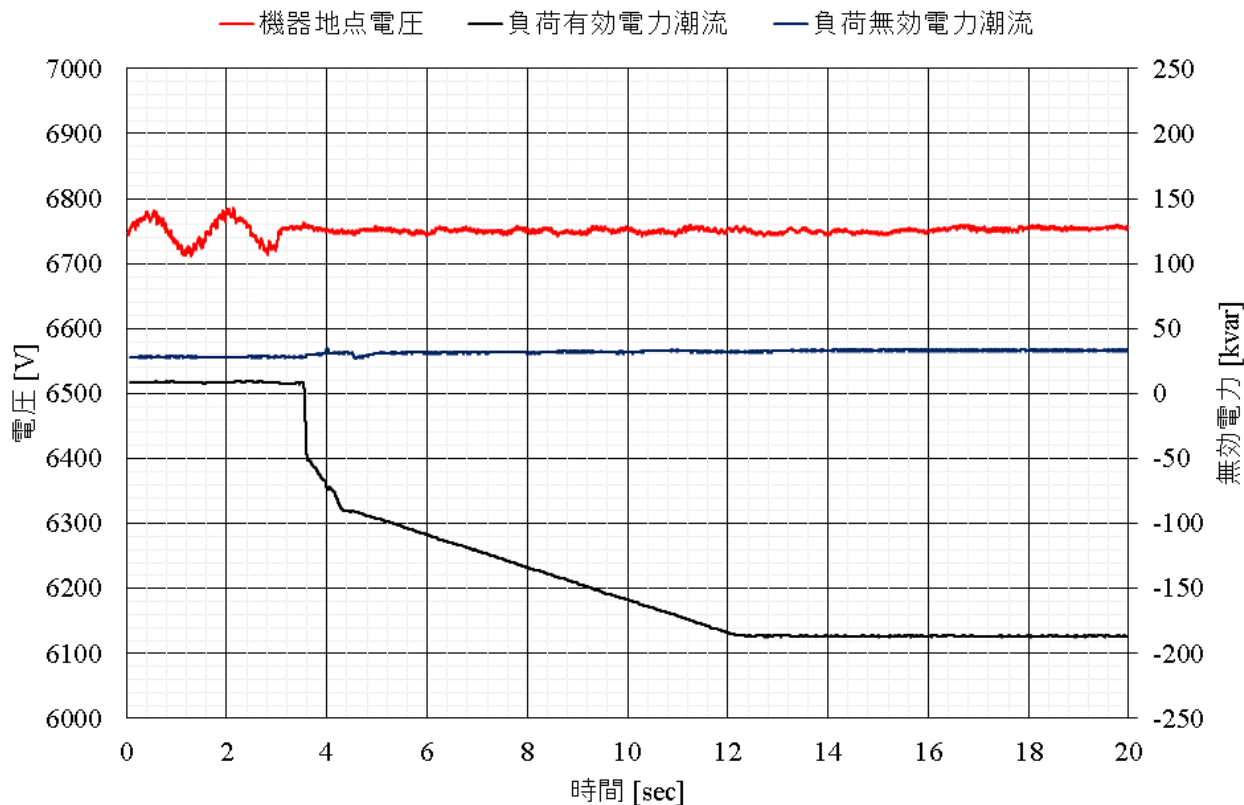
図付 2-2.3.3-1 試験手順(分散型電源の起動・停止時)



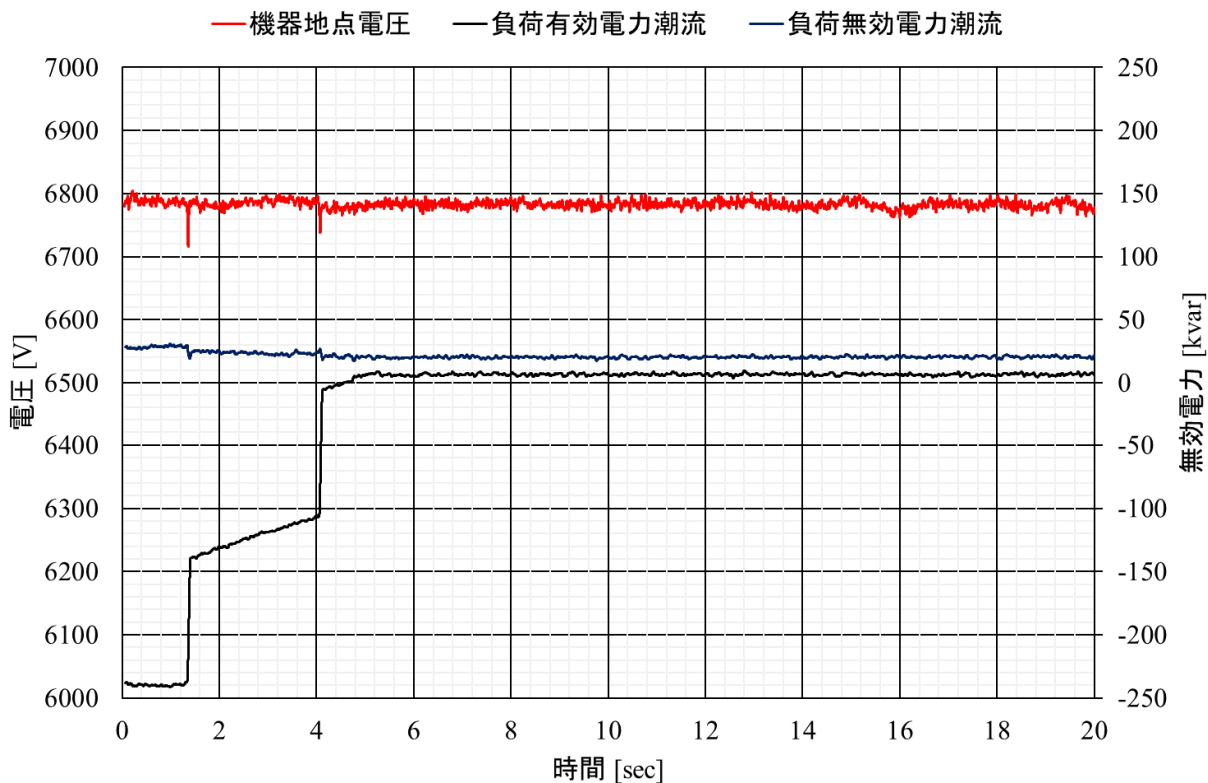
(a) 検証機器 c-3 (制御目標電圧 6800V、インバータ型電源 250kW)



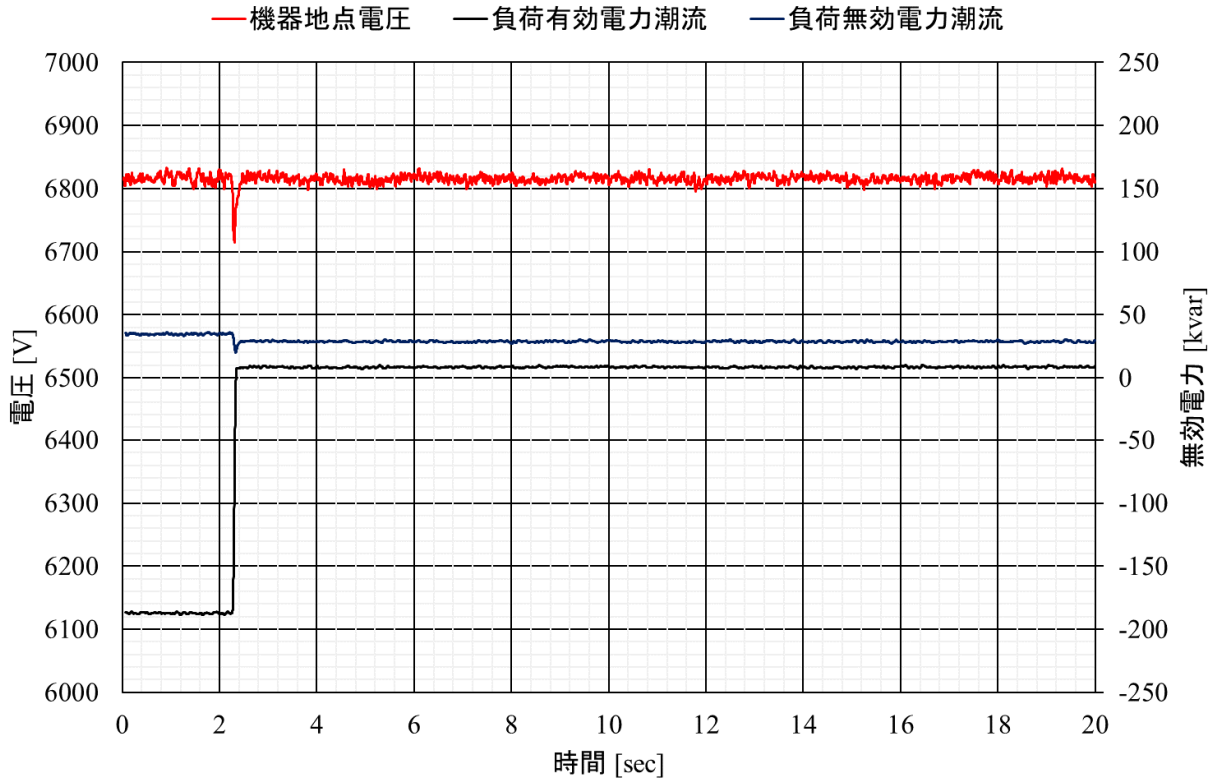
(b) 検証機器 d-1 (制御目標電圧 6800V、インバータ型電源 200kW)



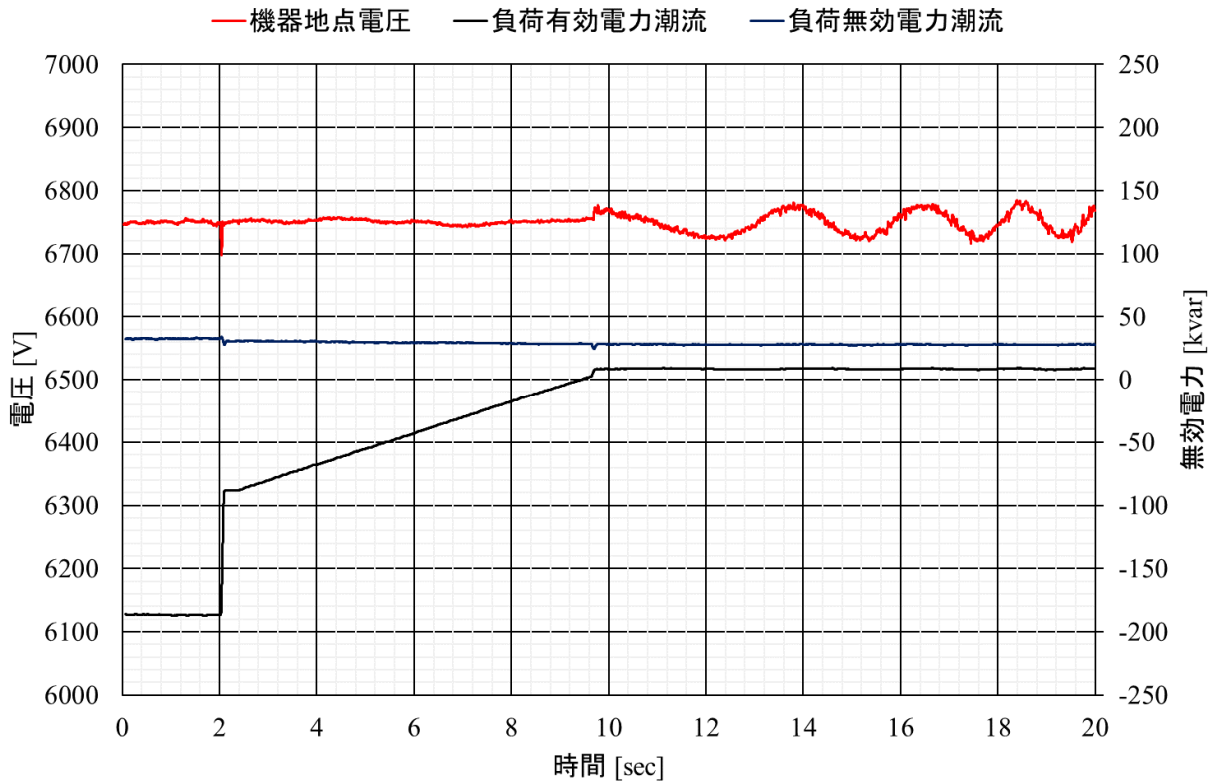
(c) 検証機器 d-2 (制御目標電圧 6750V、インバータ型電源 200kW)
 図付 2-2.3.3-2 インバータ型電源起動時の機器設置地点電圧と負荷潮流



(a) 検証機器 c-3 (制御目標電圧 6800V)

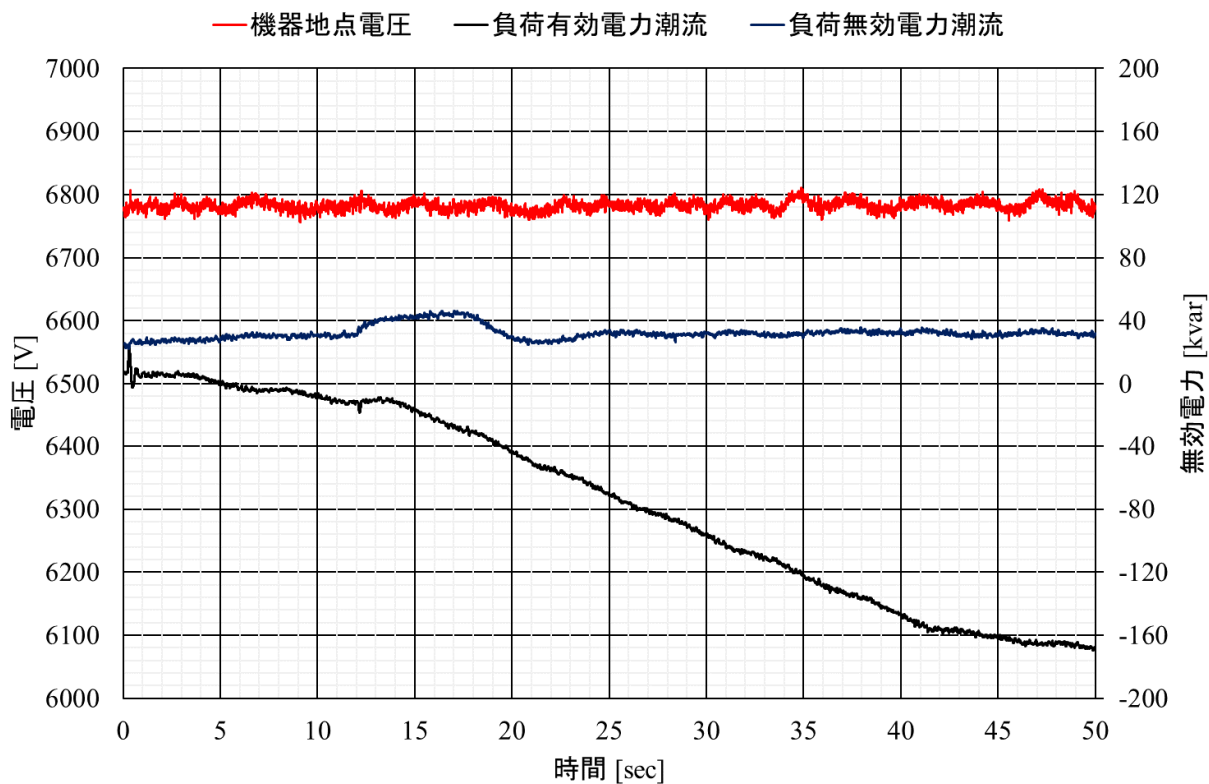


(b) 検証機器 d-1 (制御目標電圧 6800V、インバータ型電源 200kW)

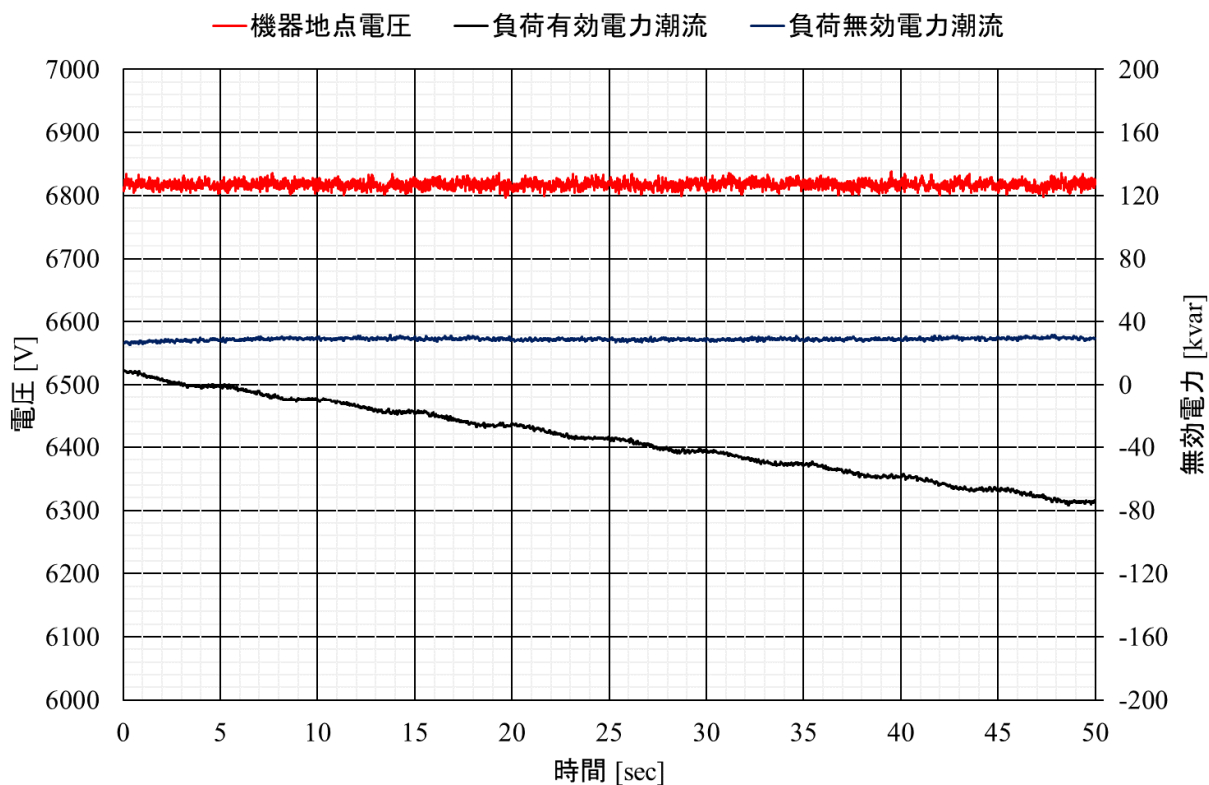


(c) 検証機器 d-2 (制御目標電圧 6750V、インバータ型電源 200kW)

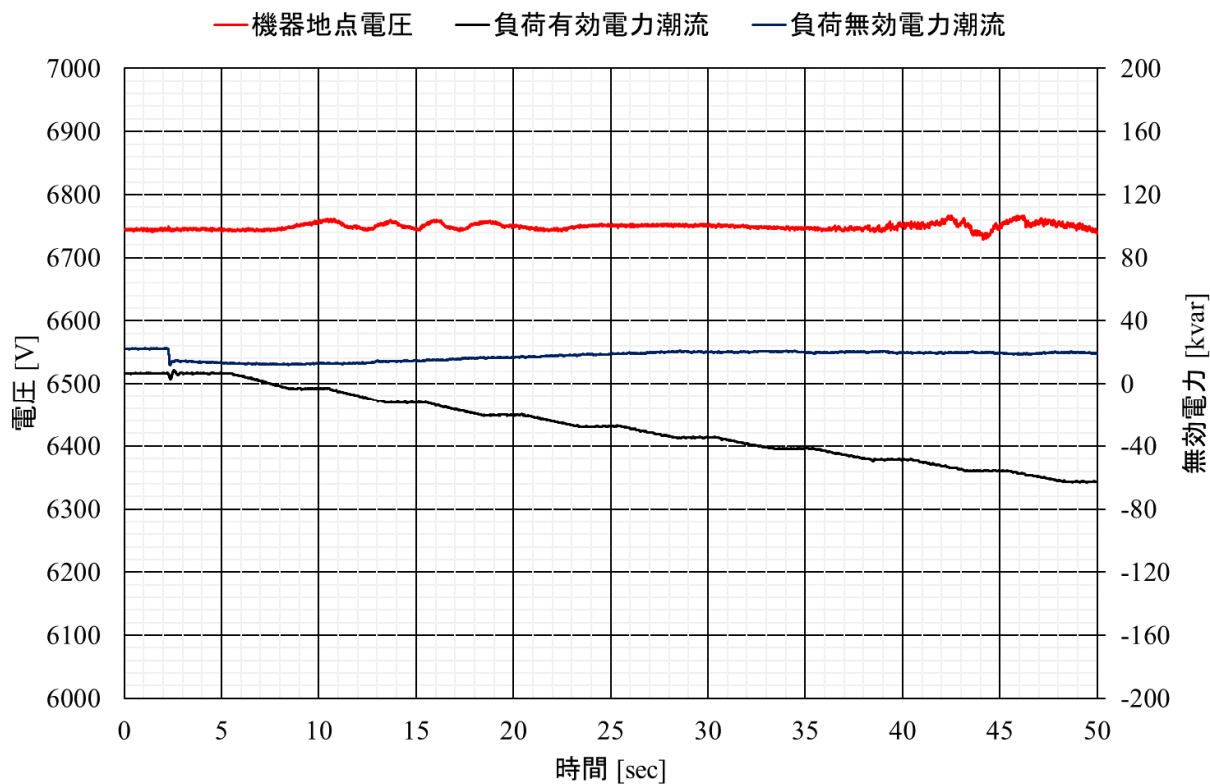
図付 2-2.3.3-3 インバータ型電源停止時の機器設置地点電圧と負荷潮流



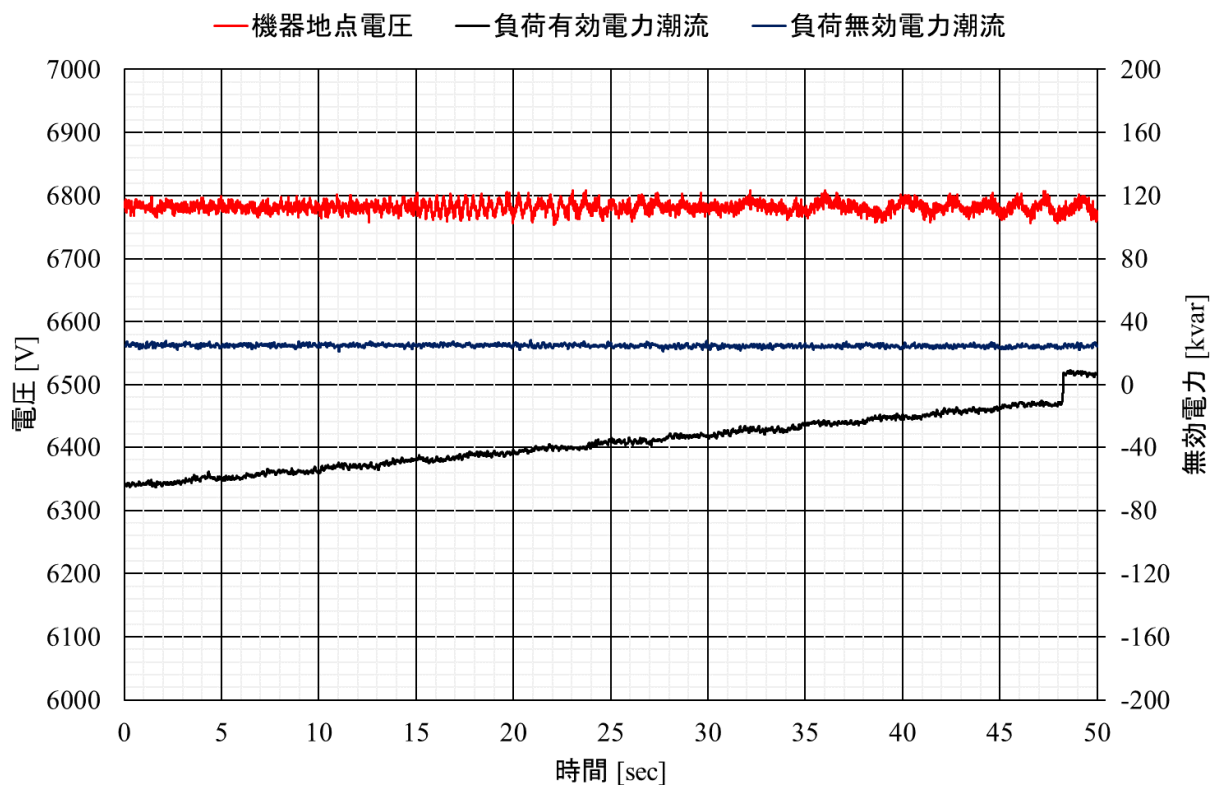
(a) 検証機器 c-3 (制御目標電圧 6800V、回転型電源 150kW、120kW)



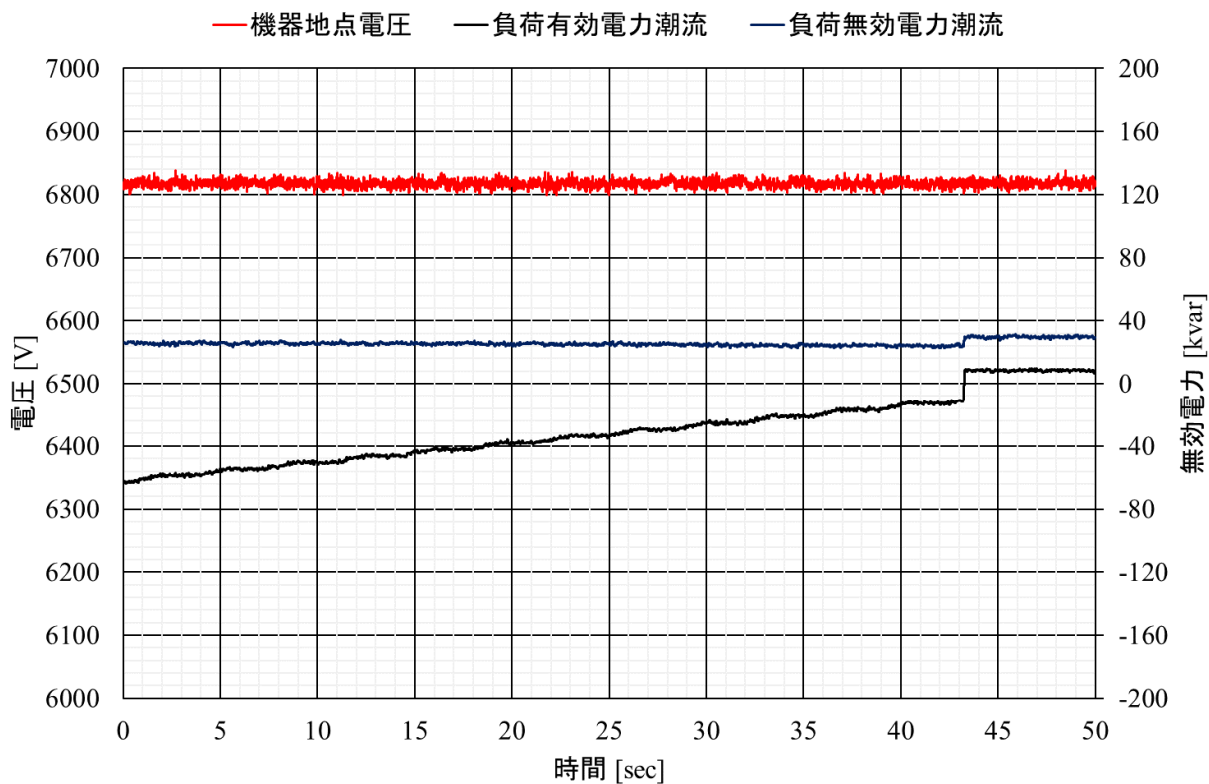
(b) 検証機器 d-1 (制御目標電圧 6800V、回転型電源 150kW)



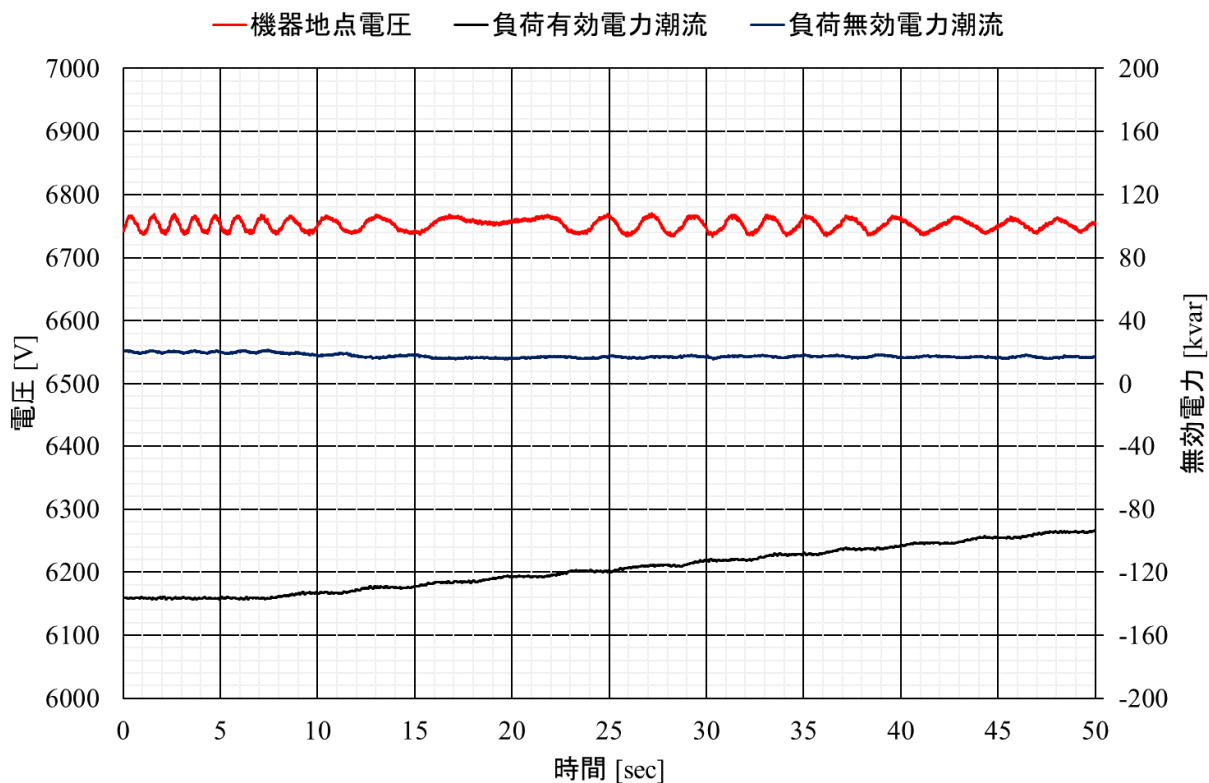
(c) 検証機器 d-2 (制御目標電圧 6800V、回転型電源 150kW)
 図付 2-2.3.3-4 回転型電源起動時の機器設置地点電圧と負荷潮流



(a) 検証機器 c-3 (制御目標電圧 6800V、回転型電源 150kW、120kW)



(b) 検証機器 d-1 (制御目標電圧 6800V、回転型電源 150kW)



(c) 検証機器 d-2 (制御目標電圧 6800V、回転型電源 150kW)

図付 2-2.3.3-5 回転型電源停止時の機器設置地点電圧と負荷潮流

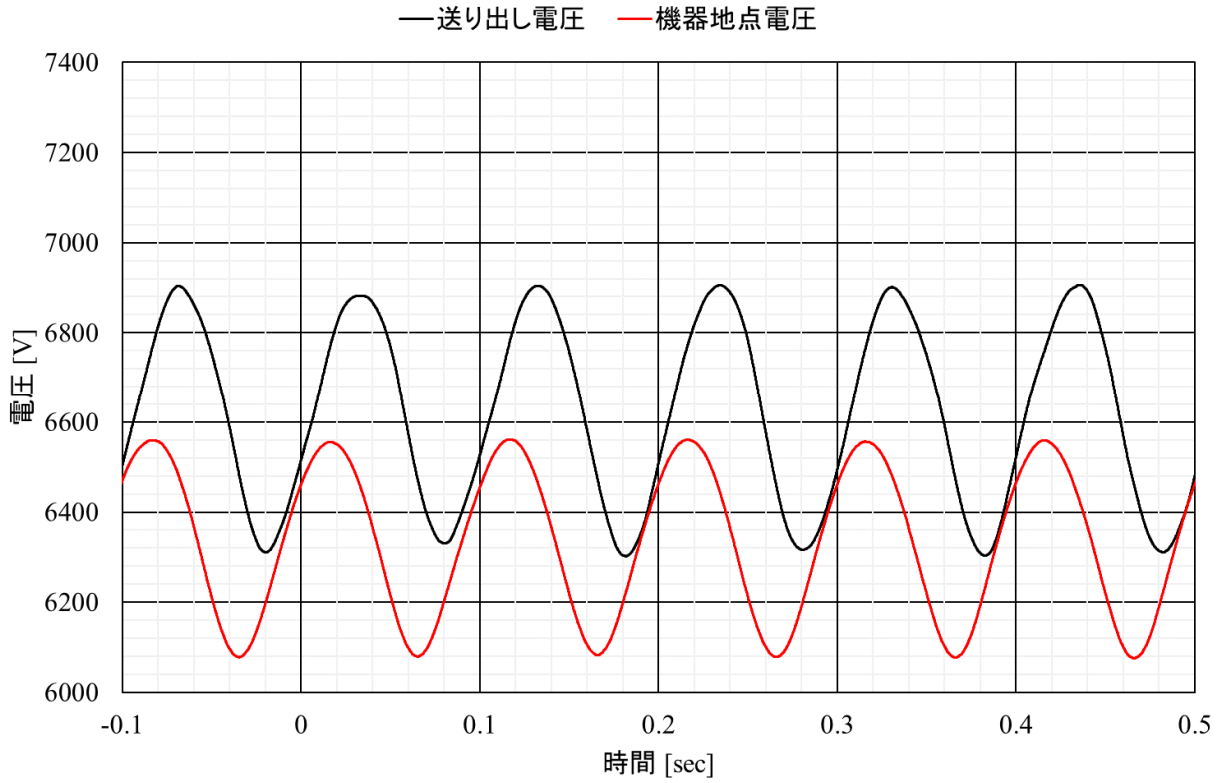
2. 3. 4フリッカへの有効性確認

2. 3. 4①フリッカ発生時

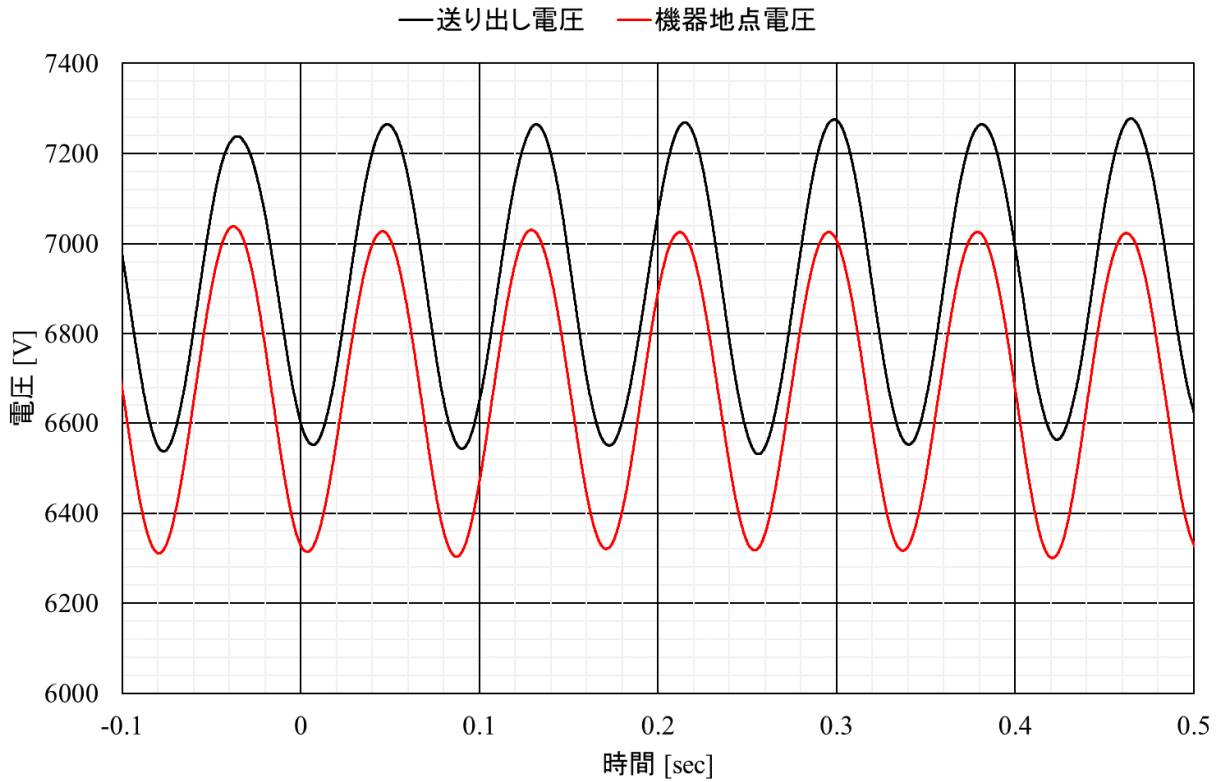
試験手順を図付 2-2.3.4-1、送り出し電圧フリッカ発生時の機器設置地点電圧を図付 2-2.3.4-2、
図付 2-2.3.4-3 に示す。

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 $\left[\begin{array}{ccc} Z_1 & Z_2 & \text{負荷B} \\ 5\Omega & 0\Omega & R280kW+L100kvar \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{変動幅} \\ \cdot 60V \\ \cdot 120V \\ \cdot 300V \\ \cdot 600V \end{array} \right] \times \left[\begin{array}{c} \text{変動幅} \\ \cdot 10Hz \end{array} \right]$	

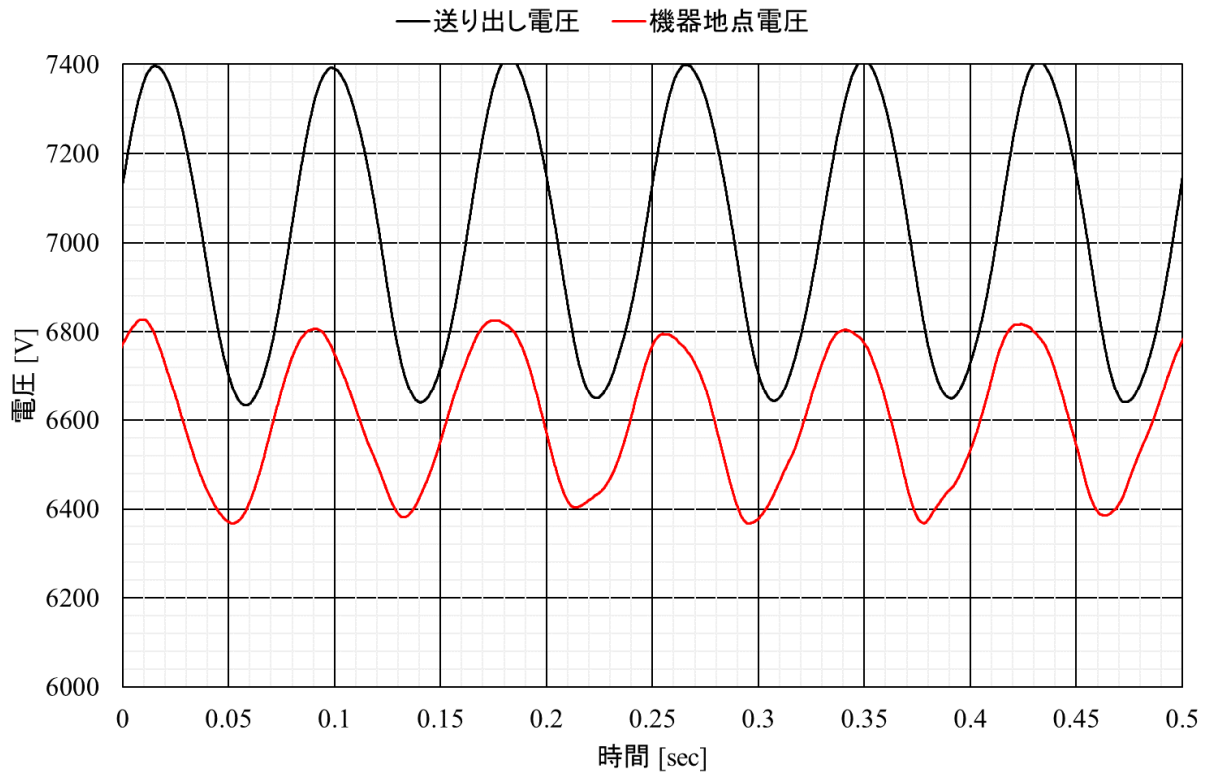
図付 2-2.3.4-1 試験手順(フリッカ発生時)



(a) 検証機器 c-2 (制御目標電圧 6300V)



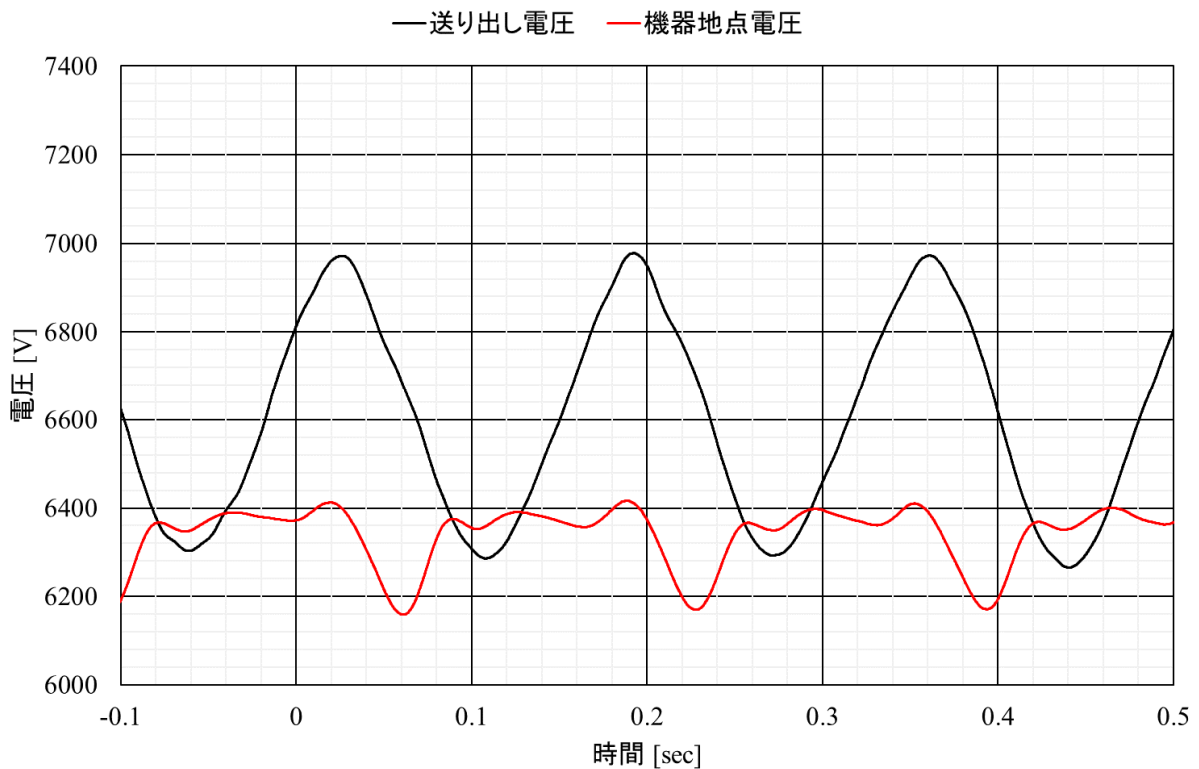
(b) 検証機器 d-1 (制御目標電圧 6600V)



(c) 検証機器 d-2 (制御目標電圧 6600V)

図付 2-2.3.4-2 送り出し電圧フリッカ発生時の電圧変動

(線路 Z1:5Ω, 負荷 B:R280kW, L100kav, 電圧フリッカ条件:変動幅±300V, 変動周期 10Hz)



図付 2-2.3.4-3 送り出し電圧フリッカ発生時の電圧変動

(線路 Z1:5Ω, 負荷 B:R280kW, L100kav, 電圧フリッカ条件:変動幅±300V, 変動周期 6Hz)

検証機器:c-2, フリッカ補償モード)

契約管理番号：14101445-0
契約管理番号：14101446-0
契約管理番号：14101447-0

3) 研究開発項目② (産業技術総合研究所)

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

性能・信頼性評価法の検討(産業技術総合研究所)			
主な内容	最終目標	成果	達成度
信頼性評価法の検討 (機器側の検討) ・機器のコンパクト化・軽量化を志向した際に生じる熱的課題に対する信頼性評価の検討	既存の信頼性試験方法やレファレンス機器との比較評価法等に関する調査結果を踏まえ、多様なデータ取得に有効とされる熱解析による信頼性評価の検討を行う。そのために、コンパクト化・軽量化を志向した 10kV 級耐圧 SiC デバイス構成 SVC 全体機器(モデル機器)を例に熱設計を実施するとともに、運転状況や周囲環境条件の変化等も踏まえた検討を行い、熱的観点からの機器寿命や信頼性等に関して共通基盤的な設計指針の策定を行う。	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行った。 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。 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。	○

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
(産業技術総合研究所)

1. まえがき

(1)事業目的

太陽光発電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系統の電圧制御機器や、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、配電系統の電圧制御機器のコンパクト化やタップ切替機器の長寿命化の可能性が出てきた。

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のため、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・指針整理を幾つかの事業者が担当して行い、産業技術総合研究所もその一翼を担うものである。

(2)事業内容

本研究では、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」における[1]性能・信頼性評価法の検討のうち、[1]－2 信頼性評価法の検討に関わる部分として、自然環境下での経年劣化等に関して、寿命(余寿命)の評価方法と判断基準を検討する。具体的には既存の信頼性試験方法やレファレンス機器との比較評価法に関する調査結果を踏まえ、多様なデータ取得に有効とされる熱解析による信頼性評価の検討を行う。

そのために、コンパクト化・軽量化を志向した 10kV 級耐圧 SiC デバイス構成 SVC 全体機器(モデル機器)を例に熱設計を実施するとともに、運転状況や周囲環境条件の変化等も踏まえた検討を行い、熱的観点からの機器寿命や信頼性等に関して共通基盤的な設計指針の策定を行う。

2. 成果の要約

(1)和文概要

次世代電圧制御機器に対する信頼性評価法を開発することを目的に、10kV 級耐圧の SiC デバイスで構成される SVC の熱設計、パワーモジュール内部の熱応力数値解析を実施し、機器寿命や信頼性評価を行うための手法検討およびそれに基づく信頼性評価を行った。

現存しない次世代電圧制御機器の信頼性評価の手法を開発するために、既存の信頼性試験方法等に関する調査を行った。数値熱解析による方法がコスト等のメリットが大きいことが示されたことから、本手法を 10kV 級耐圧 SiC デバイス構成 SVC 次世代電圧制御モデル機器の信頼性評価に適用した。4kW 級太陽光発電用パワーコンディショナの実験結果との比較から数値解析モデルが妥当であることを確認した上で、屋外設置を前提とした電柱一本に搭載可能かつ変圧器無しに AC6.6kV 系統へ連系することを想定した 300kVA の自然空冷式 SVC の回路設計と構造設計を行い、その構造に合わせた熱流体解析を行った。

使用される環境条件を含む各部品に要求される仕様との関係において、機器寿命に最も大きな影響を与える因子である温度分布の把握等に基づいて信頼性評価を行い、機器全体の状態把握から機器の弱点の抽出を進めた。この方法では、運転状態における各部品の状態を明らかにすることができ、本例の場合は設計上の要注意点が、パワー素子やリアクトルからの抜熱方式に強く影響される温度上昇の部分と、日射による筐体への入熱対策の部分にある点を明らかにした。また、部品温度上昇の時間応答挙動や応力分布、部品類の性能が向上した際の効果を明確化することができた。本手法は実機による最終確認を必要とするが、設計段階における次世代電圧制御機器の信頼性評価に十分適用可能であることを示すことができた。

(2)英文概要

In order to develop the evaluation method for the deterioration and the lifetime of advanced voltage regulation systems, we numerically conducted thermal analyses of a Static Var Compensator (SVC) constituted of SiC power devices with over 10kV blocking voltage and performed the thermal stress analysis inside the power module, and we also investigated the deterioration and the lifetime of the components based on the developed method for the evaluation.

We first surveyed conventional evaluation methods for the reliability of the existing electric devices in order to develop a new method for a non-existing advanced voltage regulation systems. Because the results reveal that a numerical thermal analysis is one of the most effective way for the evaluation, we applied it for the reliability evaluation of the modeled SVC constituted of the SiC power devices. After the validity of the numerical analysis was confirmed by the comparison with the experimental results of an existing 4kW power conditioner for photovoltaic generation, we designed of the electric circuit and the structure of the 300kVA natural cooled SVC which can be set on an outside power pole and can be connected to AC6.6kV power line without any transformer, and then conducted the numerical heat and air flow simulation on it.

Considering that temperature is the most affective factor on the lifetime of the SVC with the relation to the required spec of each devices including operating conditions, we tried the evaluation of the reliability of the SVC based on the numerically obtained temperature distribution inside the equipment and abstracted the weak point of the equipment. This method can clarify the operating conditions of the all components constituting the SVC. In this case, we could indicate the importance of the cooling system of the power devices and the reactors. In addition, the importance of the countermeasure to the solar insolation is clarified. We could also clarify the time evolution and the stress distribution of each component, and the impact of the performance gain of the components. It was indicated that this method can be available for the deterioration and the lifetime evaluation of advanced voltage regulation systems on the stage of the design although the final check using the actual equipment was required.

3. 成果の達成状況および外部発表等の状況

(1) 成果の達成状況

本研究は次世代電圧制御機器に対する信頼性評価法を開発することを目的に実施した。既存の電力機器に対する信頼性試験方法等に関する調査を行った結果、現存しない次世代電圧制御機器の信頼性評価に対しては数値熱解析による方法が効率的と示され、本手法を10kV級耐圧SiCデバイス構成SVC次世代電圧制御モデル機器の信頼性評価に適用した。実機を用いた実験結果との比較により数値解析モデルが妥当であることを確認した上でSVCの回路設計と構造設計を行い、その構造に合わせた熱流体解析を行った。使用される環境条件を含む各部品に要求される仕様との関係において、機器寿命に最も大きな影響を与える因子である温度分布等に基づいて信頼性評価を行い、機器全体の状態把握から機器の弱点の抽出を進めた。この方法では、運転状態における各部品の状態を明らかにすることができるとともに、部品温度上昇の時間応答挙動や応力分布、部品類の性能が向上した際の効果を明確化することができた。本手法は実機による最終確認を必要とするが、設計段階における信頼性の評価に十分適用可能であることを示すことができ、「次世代電圧制御機器に対する機器寿命や信頼性等に関して共通基盤的な設計指針の策定を行い、信頼性評価法を開発する」という目標を達成した。

(2) 外部発表等

[1] 研究発表・講演(口頭発表も含む) :

・齋藤喜康:「次世代電圧調整器の熱設計における逆解析の活用」, 熱設計フォーラム, 東京 (2017年6月7日発表予定)

[2] 特許等 : 実績なし

[3] 受賞実績: 実績なし

(3) その他特記事項

[1] 成果普及の努力(プレス発表等): 実績なし

[2] その他: 特になし

4. 成果報告

4.1 はじめに

太陽光発電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系統の電圧制御機器や、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、配電系統の電圧制御機器のコンパクト化・長寿命化の可能性が出てきており、その適用可能性を判断するための信頼性評価手法の確立は重要である。しかしながら、次世代電圧制御機器の寿命等を含めた信頼性評価手法を確立することは困難な作業である。特に屋外に設置されることを考慮すると自然環境下での経年劣化等も加わり、複雑な影響が絡み合うことになる。

本研究では、自然環境下での経年劣化等も含めた次世代電圧制御機器の寿命(余寿命)の評価方法と判断基準を検討した。以下の報告に示すように既存の信頼性試験方法に関する調査を行うとともに、次世代電圧制御機器が現存せず、適切な劣化試験等が実施できない場合に対して有効な信頼性評価手法について検討した。その結果、モデル機器を設計して熱的な観点から数値解析的に信頼性評価を行うことが、多様なデータを得る上で最も効率的と判断し、熱解析を中心に電圧制御機器の信頼性評価の検討を行った。

熱解析では次世代電圧制御機器の代表例として SVC (Static Var Compensator)を取り上げ、小型化および軽量化が期待できる10kV級耐圧のSiCデバイスで構成されるトランスレスSVC全体機器の簡易設計をもとに信頼性評価を行った。定格運転時や周囲環境条件の変化等に応じた全体機器の熱設計等を実施し、その結果を元に機器寿命や信頼性評価を行うための手法検討およびそれに基づく信頼性評価を行った。具体的にはハード面での小型化や軽量化への課題、機器寿命等の運用面での課題について、解決策の提示も含めて共通基盤的な設計指針を作成するとともに、機器メーカーにおける機器開発や、ユーザーにおける導入のメリット・デメリットを判断するための材料提供を行うこととした。

4.2 次世代電圧制御器に対する信頼性評価法の考え方

次世代電圧制御機器が利用者の要求仕様を満たせる期間を予測するための信頼性評価手法を開発することは容易なことではない。試験対象(EUT)は導入場所において様々な劣化要因にさらされることから、システム全体に対する現実的な多くの環境試験が重要となるが、既存の試験法では、部品に対する試験法しか存在しておらず、部品試験を重ねてシステム全体の信頼性を評価するのは難しい。ここではまずパワー半導体や電気機器、電力機器等に対する既存の信頼性試験法や関連規格を調査し、その手法について次世代電圧制御器に対する信頼性評価法としての適用可能性について検討した。

4.2.1 信頼性評価の基本的考え方

信頼性評価の目的は、電圧制御機器が劣化等による故障によって利用者の要求仕様を満たせなくなり、修理困難となるまでの期間を予測することである。また、信頼性評価法は、メーカーによる信頼設計のためだけではなく、利用者側にとっても運用面等を含めた導入のメリット・デメリットを判断ができる評価手法となる必要がある。ここで、信頼性設計とは、設計対象が一定期間(寿命)中は要求機能を果たせるよう、故障や性能劣化が発生しないように考慮して設計する手法である。しかしながら、次世代電圧制御器のように現存しない場合には、直接の試験を行うことは難しく、また設置環境等の影響についても評価が求められる。ここでは、できるだけ効率的で多様性を持つ評価手法を検討する。

なお、信頼性は、JIS Z 8115 において「アイテムが与えられた条件で、規定の期間中、要求された機能を果たすことが出来る性質」と定義されている。ここでアイテムとは「信頼性の対象となるシステム、サブシステム、機器、装置、構成品、部品、素子、要素などの総称またはいずれか」である。

4.2.2 試験対象(EUT)

配電系統の電圧制御を目的とする電圧制御機器には、負荷時タップ切換変圧器(LRT)、ステップ式自動電圧調整器(SVR)、サイリスタ式自動電圧調整器(TVR)、静止型無効電力補償装置(他励式)(SVC)、静止型無効電力補償装置(自励式)(STATCOM)、ATC付柱上変圧器(自動電圧調整型柱上変圧器)など様々なものが存在するが¹⁾、いずれも単一部品では無く複数の部品によって構成された機器である。特に、本事業で開発される次世代電圧制御機器は、パワー半導体回路による高度な制御機能が実装され、システムと呼ぶべき機器である。次世代電圧制御機器を機能別にサブシステムに分類すると、図4.2.1の信頼性ブロック図として表せる。ここでは、機能として、信号入出力回路や表示器・計器から構成される「通信・表示」と、パワー半導体回路によって電力変換を行う「制御」、変圧器やコンデンサ、屋外盤と言った電気部品で構成される「電気部品」の3つに分類した。システムの信頼性を謳う場合には、これらのどの機能も失ってはいけないため、サブシステムは直列に繋がった結合系である。

サブシステムそれぞれには、その頑健性を達成するために、通常は、設計マージンやサージ・ノイズ対策回路等の並列系ブロックが加えられる。サブシステムに要求仕様を超える異常の入力が加わった場合に保護系が動作し、メインのサブシステムを不具合や故障から守り、システム全体をフェイルスルー動作、または異常停止させる。

メーカーの信頼性設計においては、システムを階層的に捉え、重大故障の因果関係を階層に沿った樹形図に展開するFTA(Fault Tree Analysis;故障の木解析)の手法や、システムの構成要素(サブシステム等)毎に故障モードを挙げて全体システムへの影響を予測するFMEA(Failure Mode and Effect Analysis;故障モード影響解析)が広く使われている。メーカーはこれらの故障の分析手法を用いて、信頼性に大きな影響のある構成要素に対する多重化やマージン確保等の対策を施している。信頼性設計において重要なことは、個々の部品やサブシステムに対する劣化要因や劣化形態を予想した上で設計に反映し、適切な部品を選択することである。

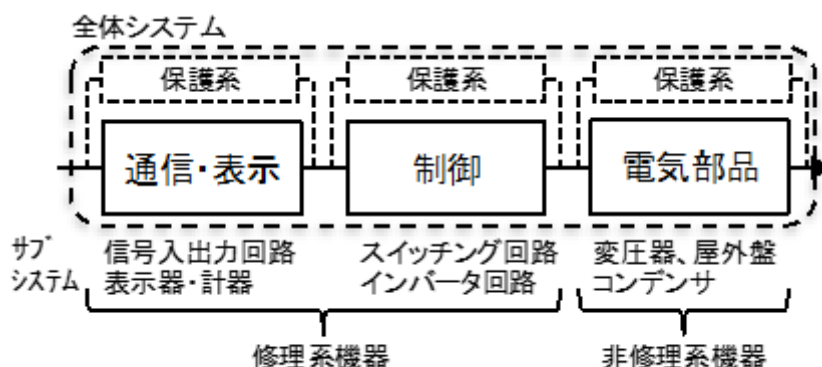


図 4.2.1 次世代電圧制御機器のサブシステムの信頼性ブロック図

4.2.3 既存の信頼性試験法

試験対象(EUT)が、規程の期間中、要求された機能を果たすことが出来なくなる要因は、EUTが外部から受けるストレスによる劣化である。その劣化の要因(ストレス)は主に以下の4つである²⁾。

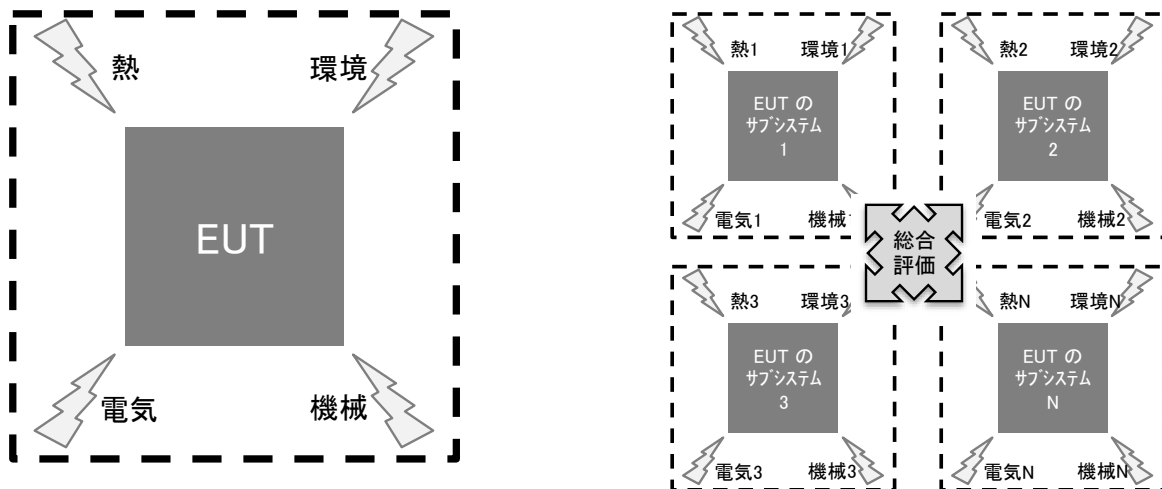
- [1]熱的劣化:部品の発熱、周囲から供給される熱
- [2]環境的劣化:湿度、腐食性ガス、粉塵など
- [3]電氣的劣化:部品に流れる電流や印加される電圧、ノイズなど
- [4]機械的劣化:熱衝撃、振動の繰り返し応力、回転や加速に伴う応力、摺動や開閉に伴う応力

信頼性試験は、この様なストレスを単独または同時に EUT に対して与え、要求された機能を維持できるか否かを確認するためのものである。このため、信頼性試験では、EUT に対してどのようなストレスを与えるのか、そのストレスを与えるための試験環境をどう構築するのか、機能の確認をどのように行うのかを定義する必要がある。

EUT に対する信頼性試験法は、図 4.2.2 に示すとおり、EUT を丸ごと試験環境に入れて、全体として試験する方法と、サブシステム等の要素毎に試験する方法が考えられる。次世代電圧制御機器において、EUT をシステム丸ごと試験する信頼性評価方式として既存の規格は存在しなかった反面、構成部品に対する試験規格や試験通則は、表 4.2.1 に示すとおり、数多く存在する。一例として、パワーデバイスに対する信頼性試験法を表 4.2.2 に掲げる。なお、表 4.2.2 中に掲げた規格等のリストを参考にして、パワーデバイスの信頼性評価法について網羅的にまとめた結果を付録 A に記載する。

このような中で、試験者(主にメーカー)が既存規格の枠組みで容易に試験できる方法は、「サブシステム毎」に試験を実施する方法である。この場合、試験者は、区分可能なサブシステムや部品毎に信頼性試験を実施し、その複数の試験結果を FMEA における信頼性ランクと照らし合わせて、信頼性の総合評価を行う。また、信頼性確保に最重要の部品・サブシステムに対しては、通常の規格試験よりも過酷な試験条件を課すことも多い。一般的に、このような総合評価の結果が利用者に提示されることは無いと思われる。

EUT のシステム全体に対する試験法としては、実際の設置条件に合わせた環境試験が行われる。ここで、環境試験とは、JIS C 60068-1『環境試験方法-電気・電子-通則』の定義では、「供試品が実際に受ける環境条件をシミュレートするか、又は環境の影響を再現するかのいずれかによって、供試品が規定された環境条件に耐え、かつ、動作することの確かさの程度を示す」試験のことである。表 4.2.3 に電源アダプタのような小型の電気製品に対して行われる信頼性試験をまとめた。自動車や建設機械、住宅、太陽電池と言った大型で屋外において使用される完成品に対しては、地球上の各種の気象条件を再現する環境試験が行われることがある。通常、環境試験は、様々な使用環境に耐えうる耐久性を確認するため合否判定を行うためのものであって、システムの耐用年数を確認するものではない。



EUT が実使用条件または過酷な使用条件に対して耐久性があることを確認する

EUT を構成する部品の個々の信頼性(故障率や寿命)を確認する

図 4.2.2 信頼性試験の二通りの方法(左:システム全体、右:サブシステム毎)

表 4.2.1 電力機器・半導体デバイスに対する性能試験法が記載されている標準規格・通則

JEC-210 低圧制御回路絶縁試験法・試験電圧標準
JEC-5918 電力通信用電源装置(その2)インバータ
JEC-2200 変圧器
JIS C 4306 配電用 6kV モールド変圧器
JIS C 60068 (IEC 60068) 環境試験方法 - 電気・電子 -
JIS C 0508 (IEC61508) 電気・電子・プログラマブル電子の機能安全
JEC-2407 絶縁形パワー半導体モジュール
JEC-2410 半導体電力変換装置
JSIA-300 分電盤通則
JSIA-T2001 配電盤の更新推奨時期判定の手引き
JESC-E7002 電気機械器具の熱的強度の確認方法
ED-4701 半導体デバイスの環境及び耐久性試験方法
EDR-4704A 半導体デバイスの加速寿命試験運用ガイドライン
電力規格 B402 デジタル保護継電器および保護継電装置

表 4.2.2 パワーデバイスに対する主な信頼性試験の目的、及び規格

項目	目的	規格
熱衝撃試験	急激な温度変化に対する耐性	JIS C 60068-2-14、MIL-STD-883、EIAJ ED-4701/300
温度サイクル試験	温度変化に対する耐性	MIL-STD-883、EIAJ ED-4701/100
温湿度サイクル試験	温湿度変化に対する耐性	JIS C 60068-2-38、MIL-STD-883、EIAJ ED-4701/200
高温保存試験	長期間、高温下で保存した場合の耐性	JIS C 60068-2-38、MIL-STD-883、EIAJ ED-4701/200
低温保存試験	長期間、低温下で保存した場合の耐性	JIS C 60068-2-1、MIL-STD-883、EIAJ ED-4701/200
高温高湿保存試験	長期間、高温高湿下で保存した場合の耐性	JIS C 60068-2-3、EIAJ ED-4701/100
結露サイクル試験	高温・高湿雰囲気での繰り返し環境下で生じる結露の影響	JPCA ET-09
衝撃試験	輸送または使用時に受ける耐衝撃性の確認	JIS C 60068-2-27、MIL-STD-883、EIAJ ED-4701/400
振動試験	輸送または使用時に受ける耐振動性の確認	JIS C 60068-2-6、MIL-STD-883、EIAJ ED-4701/400
複合振動試験	温度・湿度さらに振動が複合的に加えられた環境での耐久試験	JIS C 60068-2-50、JIS C 60068-2-51、JIS C 60068-2-53、
自然落下試験	搬送・使用時における製品の耐落下衝撃	JIS C 60068-2-32、JIS Z 0202、JEITA ET-7409
塩水噴霧試験	塩水雰囲気に対する耐食性	JIS C 60068-2-11、MIL-STD-883、EIAJ ED-4701/200
ガス腐食試験	硫化水素・亜硫酸ガス雰囲気に対する耐食性	JIS C 60068-2-42、JIS C 60068-2-43
ばっき(暴気)試験	アンモニア・硝酸・シリコン雰囲気に対する耐食性	JIS H 3250、JIS H 8620
薬品浸漬試験	各種薬品に対する耐食性	JIS K 7114
オゾン試験	空気中に存在するオゾンに対する耐性	JIS K 6259、JIS K 6301、JIS D 0205
耐候性試験	太陽光・温度・湿度・降雨などの屋内外の条件を人工的に再現し、劣化を促進	JIS D 0205
減圧試験	航空機中、山上、高層ビルなど、低圧環境での耐性	JIS C 60068-2-13、JIS C 60068-2-40、JIS C 60068-2-41
塵埃試験	塵埃に対する耐塵性能を評価	JIS D 0207、JIS C J60068-2-68、JIS C 0920
防水・散水試験	風雨、水しぶきなどを受けた場合の耐水性、防水性を評価	JIS D 0203、SAE J 575、JIS C 0920、IEC60529、ISO 20653、DIN 400
IP 等級試験	電気機械器具の外郭への異物、ホコリや水に対する保護等級への耐性性能を評価	JIS C 0920、IEC60529

表 4.2.3 電気製品の信頼性試験(環境試験等)の分類³

No.	試験項目		試験目的	適用	通電条件
1	温湿度特性試験及び電源変動特性試験		製品の稼働時における最高温湿度、及び最低温湿度状態で発生する始動不良、誤動作、異常発熱、破損などを確認	◎	★
2	高温試験		製品が高温状態で使用、または貯蔵される場合に発生する膨張、強度劣化、摩擦変化、絶縁劣化、断線などを確認	○	☆
3	低温試験		製品が低温状態で使用、または貯蔵される場合に発生する収縮、虚弱化、摩擦変化、絶縁劣化、断線などを確認	○	☆
4	温湿度サイクル試験		製品が高湿度状態で温度変化が繰り返され、表面に結露が生じるような条件で使用、または貯蔵される場合に発生する膨張、呼吸作用による腐食、静電容量の増加などを確認	○	☆
5	高温高湿放置試験		製品が高温高湿状態で使用、または貯蔵される場合に発生する膨張、寸法変化、腐食、摩擦変化、絶縁劣化、断線などを確認	○	☆
6	熱衝撃試験		製品が温度変化、湿度変化の繰り返し状態で使用、または貯蔵される場合に発生する膨張、収縮、強度劣化、変形、割れ、絶縁劣化、断線などを確認	○	☆
7	振動試験	サイン	製品が輸送中、または使用中に振動を受け、発生する誤動作、電線の擦れ、結合部の緩み、亀裂、破損、断続的接触不具合、断線、ノイズ発生、短絡などを確認	☆	
		地震 (ランダム振動)	製品が使用中地震によるランダムな振動を受け、発生する誤動作、電線の擦れ、結合部の緩み、亀裂、破損、断続的接触不具合、断線、ノイズ発生、短絡などを確認	—	
		微振動	道路脇に設置された屋外固定製品がトラックなどの重量物運搬車が通過した際に振動を受け、発生する誤動作、電線の擦れ、結合部の緩み、亀裂、破損、断続的接触不具合、断線、ノイズ発生、短絡などを確認	—	
		梱包振動 (ランダム振動)	製品が梱包状態で輸送中にランダムな振動を受け、発生する誤動作、電線の擦れ、結合部の緩み、亀裂、破損、断続的接触不具合、断線、ノイズ発生、短絡などを確認	—	
8	落下試験		製品が使用中や修理中などで落下した場合に発生する変形、割れ、剥がれ、特性劣化などを確認	△	☆
9	梱包落下試験		製品が梱包された状態で輸送及び荷扱い中などで落下した場合の梱包材の劣化の確認及び製品の変形、割れ、剥がれ、特性劣化などを確認	△	—
10	衝撃試験		製品が輸送中または使用中に比較的頻度が少なく、かつ繰り返しのない衝撃を受ける場合に発生する永久的変形、部品間の干渉、摩擦変化、断線などを確認	—	—
11	梱包圧縮試験		製品が梱包状態で輸送中、または使用中に段積などにより圧縮加重が加わり、内容品に損傷が発生するかどうかを確認	△	—
12	塩水噴霧試験	一定	類似した構造の製品の塩水噴霧に対する劣化性(めっき剥がれ、塗装剥がれ、腐食など)の比較 保護被膜の品質や均一性の比較	—	
		サイクル	製品が塩分を含む大気中で使用または晒されても耐えるように設計された製品にめっき剥がれ、塗装剥がれ、腐食などが発生するかを確認(加速試験)	—	
13	腐食性ガス試験		製品が大気に含まれた汚染されたガス(亜硫酸がガス:SO ₂ 、硫化水素ガス:H ₂ S、窒化酸化物:NO _x など)雰囲気で使用または晒される場合に発生する変色、腐食、導通不良などを確認	○	—
14	塵埃試験		製品が風で運ばれる砂塵雰囲気で使用、または晒される場合に発生する表面の摩耗、シール内への侵入、かみ合い部への付着、電気回路の劣化などを確認	○	☆

15	散水試験	製品が輸送、保管、または使用中に降雨などの受水環境に晒された後に発生する防水性の劣化を確認	○	☆
16	耐候性試験	製品が日光、オゾン、降雨、温度及び湿度の自然環境下で使用、または晒される場合に発生する退色、塗装剥離、割れなどを確認	○	—
17	表示強度試験	製品の文字などの表示部が、使用中に人に触れられ、擦れや汗によって消えたり、薄くなることなどの悪影響を確認	—	—
18	電氣的寿命試験	コネクタ、ボタンスイッチ、リレーなどの機械部品が搭載された製品で動作の繰り返しによる摩耗、接触不具合などを確認	○	★
19	機械的寿命試験	通電状態(無負荷でも可)で連続動作を行い、動作不具合、誤動作、部品不良などの発生を確認	○	☆
20	軽衝撃連続試験	携帯製品でどこかにぶつかるなどの衝撃が常に繰り返され、コネクタの外れ、はんだ剥がれ、ねじ緩みなどの発生を確認	—	—
21	筐体折り曲げ連続試験	比較的薄い携帯製品で中央部などが折り曲げられる変形が繰り返えされコネクタの外れ、はんだ剥がれなどの発生を確認	—	—
22	バッテリー瞬断連続試験	バッテリー駆動の携帯製品で軽い衝撃の繰り返しで、バッテリーの瞬断が発生するかを確認	—	★

適用:

◎: 装置(製品)で必ず実施する必要のある試験項目

○: 装置の搭載重量などの関係から装置(製品)で実施困難な場合は、ユニット、PKG 及び部品などの代替品で必ず実施する必要のある試験項目

△: 費用、工数、納期などのリスクを考慮し、実施可否を判断する試験項目

—: 出荷から設置以降に環境ストレスが加わることが比較的少なくリスクを考慮しても実施する必要のない項目

通電条件:

★: 必ず通電または梱包状態で実施する必要のある試験項目

☆: 費用、工数、納期などのリスクを考慮し、実施可否を判断する試験項目

—: 通電または梱包状態で実施する必要のない試験項目

4.2.4 次世代電圧制御機器に対する信頼性試験法

4.2.4.1 リファレンス機器との比較試験による信頼性評価法

運用実績のない次世代電圧制御機器の開発品を EUT とする場合、信頼性評価の判定基準が定まらず、耐久性を証明することが難しい。この場合、運用実績のある類似機器の試験法を適用することで、EUT の一つの試験法とすることが最初に考えられる。つまり、類似する既存機器で信頼性試験を行い、同等の判定基準を満たすことで、既存機器に相当する信頼性を EUT の信頼性を類推する方式である。ただし、この比較試験によって、信頼性の評価結果が同等であると見なすためには、既存機器と EUT の間に表 4.2.4 の様な関係が必要と思われる。これを満たす既存機器を EUT のリファレンス機器と呼ぶ。

表 4.2.4 リファレンス機器の選定基準

部位	選定基準
部品・素子	同一の部品・素子を使用している、異なる場合には、表 4.2.2 の様な素子レベルでの信頼性試験の結果が同等である。
サブシステム	同一のサブシステムを使用している。簡単に言えば構造が同等である。異なる場合には、表 4.2.3 のような機器レベルでの信頼性試験の結果が同等であるか、故障メカニズムが同等である。
システム	信頼性設計の考え方が同等である。→ ① 判別が付かない場合には、総合評価を行う→ ②

表 4.2.5 部品・サブシステム別の劣化要因と劣化形態の分類 (TVR の例)

サブシステム	部品	使用材料	機能区分	主劣化要因	劣化形態	修復対応
筐体	外箱	鋼板、メッキ皮膜、塗料	機器収納・固定・防塵・防水・保護	環境	腐食・破損	非修理
	ケーブル貫通部	樹脂、コンパウンド		熱・環境	弾性低下・変質・変形・破損	修理
	冷却装置	多種	冷却	経過年	摩耗	修理
通信・表示	表示器	多種	表示	通電熱	断芯・破損	修理
	計器	多種	記録	経過年・通電熱	誤差増大・破損	修理
	変換器	多種	信号伝送	環境	腐食・破損	修理
制御部	端子台	鉄・鋼合金	電氣的制御	環境	汚損・絶縁低下・腐食・破損	修理
	電磁接触器	鉄・鋼合金		経過年・通電熱	汚損・絶縁低下・腐食・破損	修理
	サイリスタ回路	半導体		通電熱・環境	汚損・絶縁低下・腐食・破損	修理
電気部	絶縁支持物	樹脂・合成ゴム	絶縁	熱・環境	汚損・絶縁低下	非修理
	タップ切換器	多種	通電	経過年・通電熱	動作不良・破損	非修理
	変圧器	鉄・鋼合金		熱・電気・環境	絶縁低下・破損	非修理

表 4.2.4 において、部品・素子およびサブシステムの選定基準は、適用が比較的容易である。まず、EUT および目標とする既存機器に対し、表 4.2.5 に示すような劣化要因と劣化形態の分類表を作り、関係する信頼性試験法を当てはめて、個々に同等性を確認すれば良い。例えば、次世代電圧制御機器が SVC であれば既存の SVC がリファレンス機器としてふさわしいと考えられるし、TVR、AVR 付き変圧器でも同様と考えられる。

問題は、個々の部品・サブシステムレベルでの信頼性試験結果が同等であっても、信頼性設計の考え方が異なって、システムとしての信頼性が同等と見なせない場合、例えば異なるメーカーによる電圧制御機器を選んだ場合や、EUT において既存機との信頼性設計方式を大幅に変更した場合であり、これについての方式と考察は次に述べる。

①信頼性設計の考え方が同等の場合

FMEA の様な信頼性設計の方式において、個別部品・サブシステムに対する信頼性ランクがほぼ同様であれば、システムレベルでも信頼性が同等であると仮定し、リファレンス機器として採用する。EUT とリファレンス機器のメーカーが同一の場合にはこの方式に蓋然性が高いと考えられる。メーカーにヒアリングの上、EUT とリファレンス機器の信頼性設計の方式を確認し、同等性が認められない場合には②を実施することで対策する。

②システムレベルでの信頼性の同等性が判別できない場合

EUT とリファレンス機器が別メーカーの場合や、メーカーから信頼性ランクの情報が出てこない場合には、部品・素子およびサブシステムでの信頼性試験結果を足し合わせて総合評価を行い、総合評価点が同水準であれば、EUT がリファレンス機器と同程度の信頼性を持つと仮定する。

この方法で総合評価点を決めるのはメーカーではなく、利用者の役割とする。例えば表 4.2.6 のような部品・機器やサブシステムに対する評価項目を利用者に提示し、その優先順位によって配点を決定する仕組みとする。

表 4.2.6 総合評価の配点表のイメージ

MA1:変圧器	評価項目	配点
標準試験	絶縁抵抗、雷インパルス耐電圧、	各〇点
環境試験	高温高湿試験、温湿度サイクル試験、耐候性試験、等	各〇点
劣化現象	表示部が不動作、主回路部が変色、本体に塗装の剥離、等	各〇点

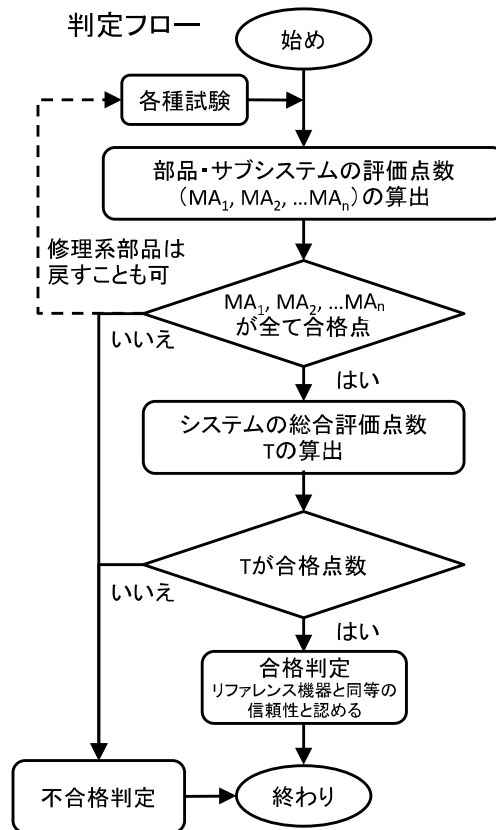


図 4.2.3 総合評価点方式によるリファレンス機器を用いた信頼性試験の合格判定法

リファレンス機器が決まれば、メーカーの指定または利用者の要求する信頼性試験、例えば熱的な劣化試験、ヒートサイクル試験を実施し、リファレンス機器の総合評価によって予め EUT に対する合格点を決めておき、図 4.2.3 のフローチャートにしたがって EUT の総合評価点数が合格点を上回れば、利用者から見て EUT はリファレンス機器と同等の信頼性を持つものと仮定する。

4.2.4.2 数値熱解析による信頼性評価法

比較試験による信頼性評価法は、類似機器との比較から次世代電圧制御機器の信頼性を類推するという、あくまでも実物による試験に根ざした評価方法であるが、他方で実物を極力利用せずに数値熱解析によって信頼性を評価する方法がある。実物に基づく評価は、実際に得られる測定結果を基にする評価方法なので、機器の利用者にとって有効かつ分かり易い情報が得られる。このため、利用者にとって有益な情報の確認手段となっている。その反面、実物に基づく評価であるが故に、試験条件を数多く確保するのが難しく、評価試験の条件は限定的とならざるを得ない。これに対し、数値解析による評価は実機による試験を直接的に行わない方法であるが、種々の想定条件下での挙動を把握できるという点で優れた方法である。このため、機器設計をする段階におい

での有用な手段となっており、マージンを含む設計の妥当性確認などに広く利用されている。

最近では電力機器のみならずさまざまな産業における機器や機械の設計において、数値熱解析はコンピュータの能力向上や市販の熱流体・構造解析ソフトの精度向上や使い勝手の良さも相まって、頻繁に利用されるようになってきている。自動車、ロケットや航空機の空力設計やエンジンの燃焼計算や熱応力解析、建設機械の応力解析等を行いながら、機器や機械の初期設計の段階から活用し、実際のプロトタイプ製作とフィードバックをし、効率的なモノづくりに生かしている。

数値熱解析の利点はその柔軟性と多様性にある。設計変更の容易さのみならず、数値解析上で運転条件や環境条件を細かく設定できる上、結果も素早く得ることができる。最終的にプロトタイプを製作し、実際の運転条件や環境で試験をする必要はあるが、そこに至るまでのプロセスに要する時間を大幅に短縮することができる。また、プロトタイプとの比較や小規模の検証実験を行いながら解析精度も向上させることが可能であり、得られた結果に対する信頼性も高くなる。

数値解析による電力機器の開発・設計・信頼性評価は、個別の材料・部品での評価と、それらを組み合わせた状態での評価の2種類に大別される。前者は、比較的単純な系であるので、種々の対応がなされているが、後者は系が複雑である点から設計や信頼性の評価という観点では、構造上の弱点把握の色彩が強い。4.2.3節で挙げた劣化の4要因の中では、要因2が比較的対応がしやすい項目である。要因1,3,4は、相互に影響を及ぼしあう場合が多いのが実情であるため、組み合わせ評価においては、要因1,3,4に着目する解析が重要となる。

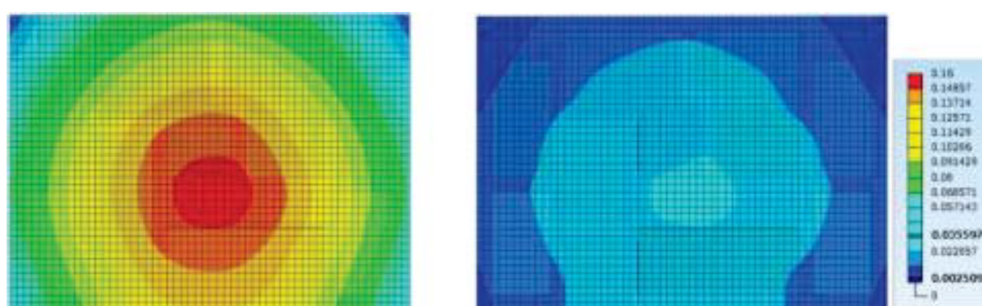
熱・電気・機械の各現象の解析にはFEM(有限要素法)が用いられることが多いが、FEMの適用に際しては解析用のメッシュ作成に注意を払う必要がある。FEMは、解析対象のエネルギーを微細空間要素ごとに計算する方式であるため、この微細空間を決めるための計算メッシュは解析対象ごとに最適なものを用意する必要がある。不適切な計算メッシュの使用は解析の精度が上がらない。このため、不適切な計算メッシュを信頼性評価に利用すると、誤った劣化モードや弱点を対象に改善を図ることになり、誤った寿命評価や改善策に労力を割く結果となる。

このため、熱・電気・機械の各現象を共通のメッシュで解析する手法では、解析上の精度が出にくい点に注意を要する。しかし、熱・電気・機械の現象ごとに最適の計算メッシュを用意して連成解析を行う手法には、解析精度の向上が期待出来る反面、大きな計算機資源を必要とする問題があるため、現実の解析での適用は困難であることが多い。このため、実用解析では、重要な現象を把握した上で、どの現象の解析精度確保を優先するかを判断して、優先する現象に適合した計算メッシュを選んで一次解析を行い、この一次解析に基づいて他の現象の解析を行うことで解析の精度と計算機資源節約の両立を図る例が多い。

パワエレ装置の場合は、電氣的動作に起因するパワー素子発熱の変動等が周辺の材料・部品の温度変化を招くことで機械的な劣化(例えば、材料の線膨張率差と温度変化に起因した熱機械応力による機械的な疲労破壊)が進行する現象が寿命面での課題となる。そこで、温度分布の把

握が重要と考え、熱解析(温度分布の解析)に注力し、これを基に機械的現象の解析を行う場合が多い。

数値熱解析を電力機器の開発・設計・信頼性評価に活用した事例としては、構造上の弱点を把握する解析がある。結果の例を図 4.2.4 に示す。この例は、接合形成工程での経験温度に起因して発生するモジュールの反り変形量についての解析である。(本例の場合、Cu ベースプレートを使用した場合の方が大きな変形が発生することが示されている。)ここに示されるモジュールの反り変形からモジュール構成部材の変形が把握出来る。変形量が大きい場所、特に変形が塑性域になる場所は構造上の弱点になる。よって、構成材料に作用する応力による変形が弾性領域内に収まるように材料の選択や構造の設計を行うなどして、寿命の向上を図る。



(a) Cu ベースプレート

(b) SUS410 ベースプレート

図 4.2.4 解析例(ベースプレート材質を変化させた場合の反り解析)

出典:NEDO 成果報告書「低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト 研

究開発項目① 低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト

(9) 交代熱部品統合パワーモジュール化技術開発」 (平成 27 年 2 月)

前述の解析に代表されるように、構造上の弱点把握などの数値解析は寿命設計の上で有力な手段となる。しかし、解析を行う上では、いくつかの注意事項がある。解析現象に応じて適切な計算メッシュを用意する必要性については前述の通りである。それを踏まえた上で、特に重要となる点は、解析内容に応じた材料物性の正確な把握である。すなわち、解析に使用する材料物性の温度依存性などが正しく把握出来ていないと、得られる解析結果も正確な結果とはならない。(特に、物性値が非線形特性を示す場合には注意を要する。)不正確な材料物性特性に基づく評価は、結果として現実とは異なる劣化モードの現象が得られてしまう場合や、弱点となる場所が現実と異なる結果が得られる場合などがあるので、注意が必要である。

4.2.4.3 信頼性評価法の検討

ここでは上述した二つの信頼性評価法について、本研究の課題である 10kV 級耐圧の SiC デバイスで構成されるトランスレス SVC への適用可能性について検討する。

レファレンス機器との比較試験による信頼性評価法は、類似とはいえ実物を用いた試験を行う。表 4.2.4 の選定基準を満たす必要はあるが、規格に則った試験を行うことから、既存機器との部品構成やシステム構成が大幅に異なる限り、試験結果に対する信頼性は高い。さらに加速試験等を通じて実際に劣化しそうな場所の特定や余寿命等についても本格的な検討が可能と思われる。しかしながら、使用部品や素子、システム構成等が異なる場合や、屋外設置を前提とした自然環境条件の影響等について検討する場合、そのつど被評価機 (EUT) と機能が同じレファレンス機器を用意し、かつその外部条件を満たす環境実験室を用意する必要があることから、効率性やコスト面の観点から優れた方法とは言い難い。

一方、数値熱解析による信頼性評価では、実物による試験は最終に近い段階において最小限の範囲で実施されると想定されることから、コスト的には大きなメリットが得られると考えられる。運転条件や自然環境条件の変化に対しても温度分布や応力分布が部品レベルで速やかにかつ多面的に取得できることから、熱的あるいは機械的なストレスが機器のどの部分に集中するか等の情報が効率的に得られる。また、新たな冷却構造の改善方法やストレスの低減方法等についても容易に試すことができる。実機による試験を最小限とすることから、信頼性という点ではやや不安が残る部分もあるが、実際の電力機器との検証実験等の比較によって精度向上を図ることが可能である。さらに本課題で扱う 10kV 級耐圧の SiC デバイスで構成されるトランスレス SVC は、部品構成やシステム構成が既存機器とは根本的に異なる上、重要部品であるパワーデバイスが市販品でないことから、レファレンス機器が表 4.2.4 のどのレベルにおいてもその選定基準を満たすことは困難であり、レファレンス機器との比較試験法で実施した場合には結果の信頼性が薄らぐことになる。

他方、機器利用者側の立場から考えると、最終製品に対する信頼性試験は規格に則って行われなくてはならない点ではいずれの方法も同じであるが、数値解析による信頼性評価によっていくつかの信頼性評価試験を省くことができる、あるいは特殊な条件下での結果について設計段階において情報を得られるといったメリットがある。信頼性評価法の違いやメーカ及び機器利用者等の立場の違いによる信頼性評価法の得失について表 4.2.7 にまとめる。

以上より、本研究では特に現存しない電力機器の信頼性評価に対して数値熱解析による方法はコスト等のメリットが大きいと考え、本手法を次世代電圧制御機器の信頼性評価に適用し、その適用可能性を検討した。

表 4.2.7 信頼性評価法の得失

	数値熱解析	実機による試験
評価データの利用主体	主に機器設計者	主に機器利用者
評価コスト	実機製作が基本不要なので、 大容量機ほど低コスト (計算機資源は必要)	実機製作が必要
評価条件の設定範囲	多数の評価条件に対応可能 (破壊模擬も可能)	多数の評価条件に対応困難 (破壊を伴う試験を実施する場 合は、複数台の準備が必要)
概念設計段階での予備評価	対応可能	評価モデルの作製が必要
設計変更への対応	柔軟に対応可能	評価モデルの作製が必要

4.2.5 まとめ

4.2 節では電圧制御器に対する信頼性評価法について調査検討した。

信頼性評価の基本的考え方として、その目的が電圧制御機器の実質的な使用期間を予測することであるとすれば、メーカーによる信頼設計のためだけではなく、利用者側にとっても運用面等を含めた導入のメリット・デメリットを判断ができる評価手法となる必要がある。一方で、次世代電圧制御器のように現存しない場合には、その機器の信頼性を評価することは難しい。機器メーカーにとっては仕様を変更することに実機を製作し、そのつど劣化試験等を実施することはコスト的にも避けたいところである。最終的に実機を用いた試験は必要であるとの認識ではあるが、可能な限り設計段階で信頼性を高めておきたいところである。

これまでの既存の信頼性試験法の調査等の結果によれば、次世代電圧制御機器に対する信頼性試験法として活用できそうな方法として、レファレンス機器との比較試験による信頼性評価法と数値熱解析による信頼性評価法があることがわかった。それぞれの特徴として、レファレンス機器との比較試験による信頼性評価法は、類似とはいえ実物を用いた規格に則った試験を行うことから、既存機器との部品構成やシステム構成が大幅に異なる限り、試験結果に対する信頼性は高い。しかしながら、そのつど被評価機(EUT)と機能が同じレファレンス機器を用意しなくてはならず、かつその外部条件を満たす環境実験室を用意する必要があることから、効率性やコスト面の観点から優れた方法とは言い難い。

一方、数値熱解析による信頼性評価は、さまざまな運転条件や自然環境条件に対する結果を速やかに得ることができるだけでなく、新たな冷却構造の改善方法や熱応力の低減方法等についても容易に試すことができ、機器メーカーにとっては効率的な設計を可能とする手段になりうる。実物による試験を最小限とすることから、信頼性という点ではやや不安が残る部分もあるが、実機との検証実験等を行うことによって精度向上を図ることが十分可能である。さらには機器利用者側にとっても、数値解析による信頼性評価によっていくつかの信頼性評価試験を省くことができる、あるいは特殊な条件下での結果について設計段階において情報を得られるといったメリットがある。

以上より、本研究では特に現存しない電力機器の信頼性評価に対して数値熱解析による方法はコスト等のメリットが大きいと考え、本手法を次世代電圧制御機器の信頼性評価に適用し、その適用可能性を検討した。

4.3 次世代電圧制御器に対する数値熱解析手法

ここでは次世代電圧制御機器の代表例として小型化および軽量化が期待できる 10kV 級耐圧の SiC デバイスで構成されるトランスレス SVC 全体機器の簡易モデル設計をもとに数値熱解析を行う。本節では定格運転時や周囲環境条件の変化等に応じた全体モデル機器の熱設計を実施し、その結果を元に機器寿命や信頼性評価を行うための手法検討を行う。

4.3.1 検証実験との比較による数値熱解析の精度評価

4.2.4.2 節で述べたように数値熱解析の精度向上には検証実験が不可欠である。他方で、本研究において検討するトランスレス SVC は 300kVA 級であり、実物も現存しないことから直接の検証は不可能である。そこで SVC とほぼ同じ電気基本回路を持ち、かつ自然空気冷却を採用している 4kW 級太陽光発電用パワーコンディショナ(PCS)を検証実験用の機器として用いることとする。

(1) 太陽光発電用 PCS の仕様と製品外観および製品内部

太陽光発電用 PCS の主な仕様は表 4.3.1.1 のとおりである。なお、製品付属の標準仕様書より定格仕様の部分を抜粋したものを付録 B に記した。定格出力は 4.0kW であり、太陽光発電で得た直流電流を電圧制御し、パワーモジュールで直交変換したのちに系統への逆潮流、あるいは屋内にて利用が可能となっている。パワーモジュールの変換効率は 96%程度であり、一般的な Si の IGBT 変換効率となっている。

本研究で用いた PCS の外観写真、主要外形寸法図および背面側通風口寸法図を図 4.3.1.1 に示す。本機器は屋内設置の壁掛け式であり、壁取付け板に引っ掛ける形で取り付けられ、機器背面と壁取付け板の間には空気が流れる程度の隙間がある。本機器は排気ファンのない自然空冷方式を採用しており、直射日光が当たらない条件での運転が前提となっている。ヒートシンクは壁側に設置されており、空気は底面と背面に開けた通風口から導入され、パワーモジュールの発熱でヒートシンクを通じて暖められた空気が自然対流によって上面のスリットから抜けていく。設置の際には、冷却に十分な空気の流れを確保するために左右両側に 100mm 程度、上下に 300mm 程度のスペースを確保する必要がある。

図 4.3.1.2 に PCS のカバーをはずして機器内部を撮影した 4 枚の写真を示す。写真 1 はカバーを取り外したところ、写真 2 はコンデンサや制御盤等が取り付けられたメイン基板を取り外したところ、写真 3 は底面板を外してヒートシンク側面が見えているところ、写真 4 はヒートシンク上に取り付けられたパワーモジュールを示す。図中、筐体内の左側にある茶色の部品が、後ほど説明する電気回路におけるノイズフィルタ用のインダクタランスであり、これは電源周波数にのる高周波をカットするためのものである。黒い円筒状のものはコンデンサであり、外部への供給電圧を安定させるためのものである。筐体内右側にある四角い部品は電源および外部への接続端子である。ヒートシンク

はアルミ製で、厚さ約1.6mm、長さ30mmのフィンが間隔7.1mmで27本平行に並んで付いている。
 パワーモジュールは熱伝導性の良い樹脂を挟み込んだ形でヒートシンクにネジ止めされている。

表 4.3.1.1 太陽光発電用 PCS の主な仕様

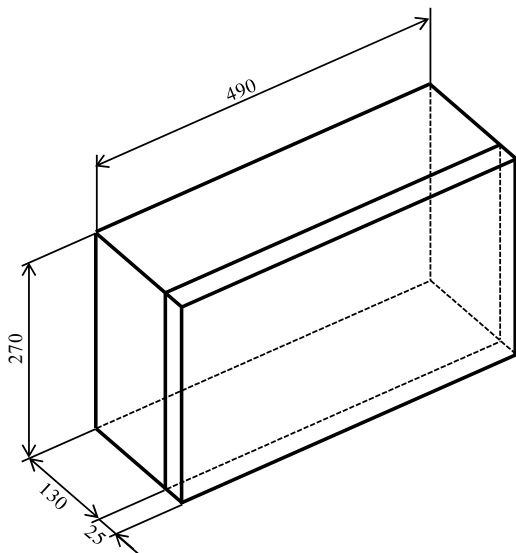
定格出力	4.0kW
定格出力電圧	AC202V (単相 2 線式、ただし連系は単相 3 線式)
定格出力周波数	50Hz または 60Hz
定格時電力変換効率	96.0%



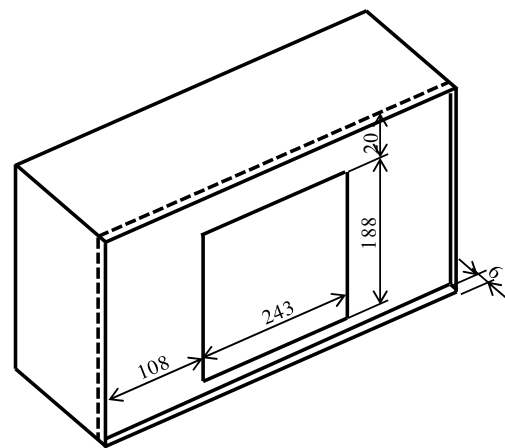
正面側外観写真(上方向より)



背面側外観写真(上方向より)



主要外形寸法図



背面側通風口寸法図

図 4.3.1.1 PCS の外観および寸法図

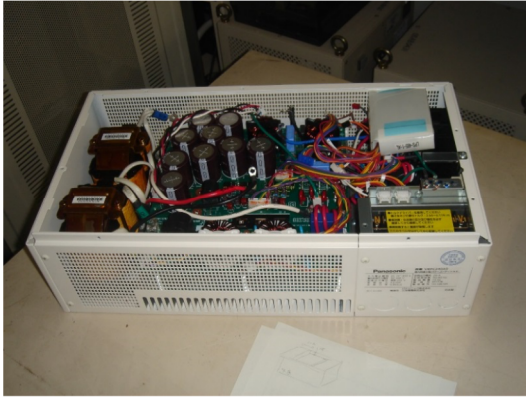


写真 1(外カバー取り外し時)

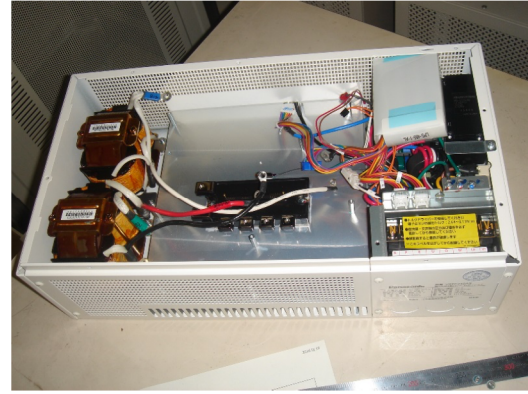


写真 2 (メイン基板取り外し時)

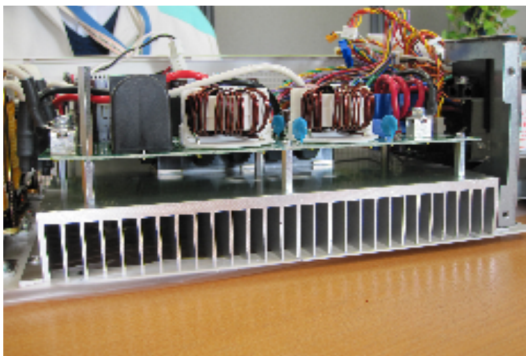


写真 3(ヒートシンク側面)



写真 4(ヒートシンク上のモジュール)

図 4.3.1.2 PCS の内部写真

(2) 電気回路

太陽光発電用 PCS の電気回路の概略図を図 4.3.1.3 に示す。PCS は太陽電池パネルから出力される変動性の直流電力を安定した電力・電圧にして交流電力系統に逆潮流させるための機器である。PCS は大きく 3 つの要素で構成される。一つは、太陽電池パネルから供給される変動性の直流をノイズフィルタ、コンデンサと電圧コントローラで安定した直流電圧に変換する DC コンデンサ部である。つぎに、パワーモジュール部において、パワー半導体デバイスによって所定の周波数と電圧の交流に変換する。最後に AC フィルタ部において、交流に変換された電力をインダクタンスやノイズフィルタによってきれいな波形に変換した後に系統電源等の外部電源へ供給する。

後述するが、電力系統に設置する電圧制御用の SVC も PCS と同様に DC コンデンサ部、パワーモジュール部、AC フィルタ部の 3 つの要素で構成されていることから、PCS も SVC も解析方針は同じと考えることができる。本研究で検討する SVC は 300kVA 級であり、現存しない 10kV 級耐圧の SiC デバイスで構成されるトランスレス SVC であることから、数値計算結果の精度検証を実機で行うことは困難である。したがって、本 PCS を検証機として用い、比較実験を行うこととする。

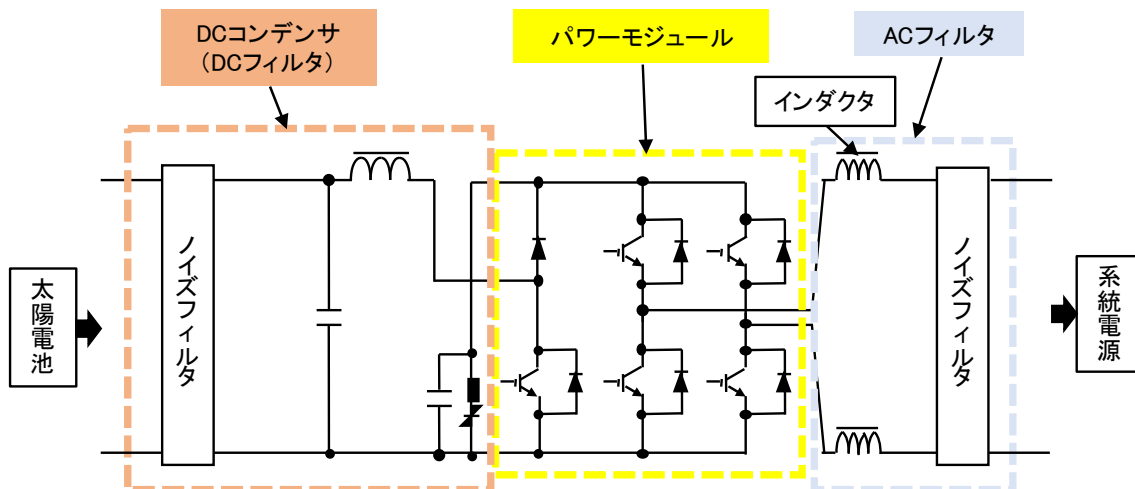


図 4.3.1.3 太陽光発電用 PCS 回路の概略図

(3) 筐体内部構造と数値解析用メッシュ

PCS 定格運転時の熱解析を実施する上で、筐体内の空気の流れはできるだけ実機に忠実である必要はあるが、配線や小さな部品等にまでメッシュで刻むと計算が膨大となり、計算結果が得られなくなる恐れがある。ここでは、空気の流れが現実と大きく異ならない範囲で筐体内部の構造を簡略化し、計算用メッシュを構築する。構築したメッシュで熱解析の計算を行い、同時に行う PCS 定格運転時の内部状態の測定実験の結果と比較し、計算精度の検証を行う。

図 4.3.1.4 に簡略化した内部構造モデルを示す。実際の部品との対応をわかりやすくするために図 4.3.1.2 の筐体内部写真(写真 1 と 2)も示した。構造化の際にはインダクタや部品が搭載されている基板等は簡略化したが、パワーモジュールが接しているフィン付きヒートシンクについてはほぼ原寸通りに構造化した。図 4.3.1.4 において隠れて見えないヒートシンクとパワーモジュールの構造について図 4.3.1.5 に示す。

構造化モデルの各部品の材料および熱物性値については表 4.3.1.2 のとおりである。なお、実際の部品はいくつかの材料で構成されているが、簡略化のために主要な材料のみで構成されるとし、密度、比熱、熱伝導率についても主要な材料の値で代表している。

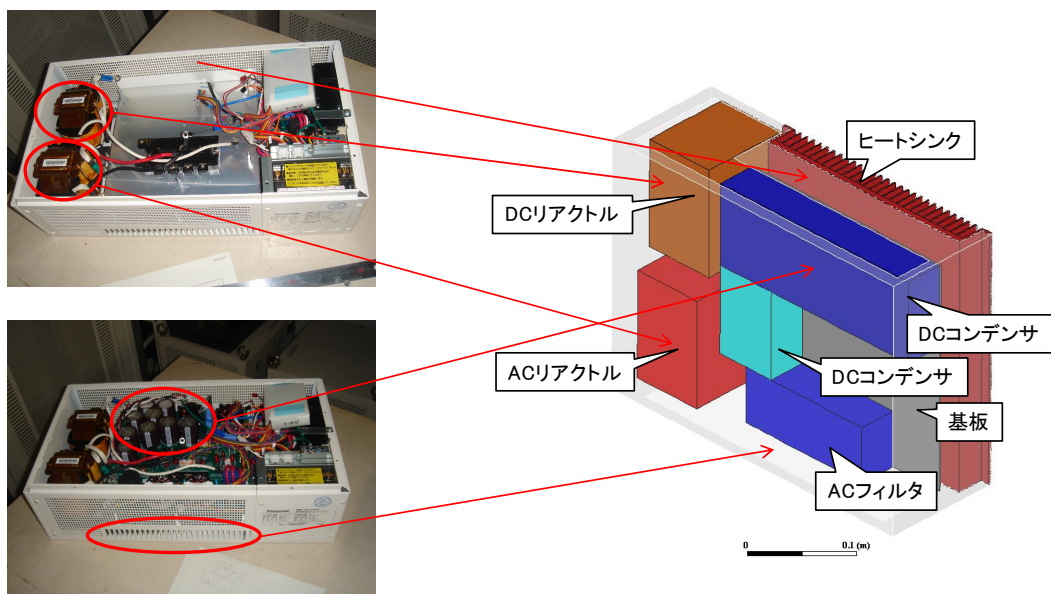


図 4.3.1.4 筐体内部の構造モデル図

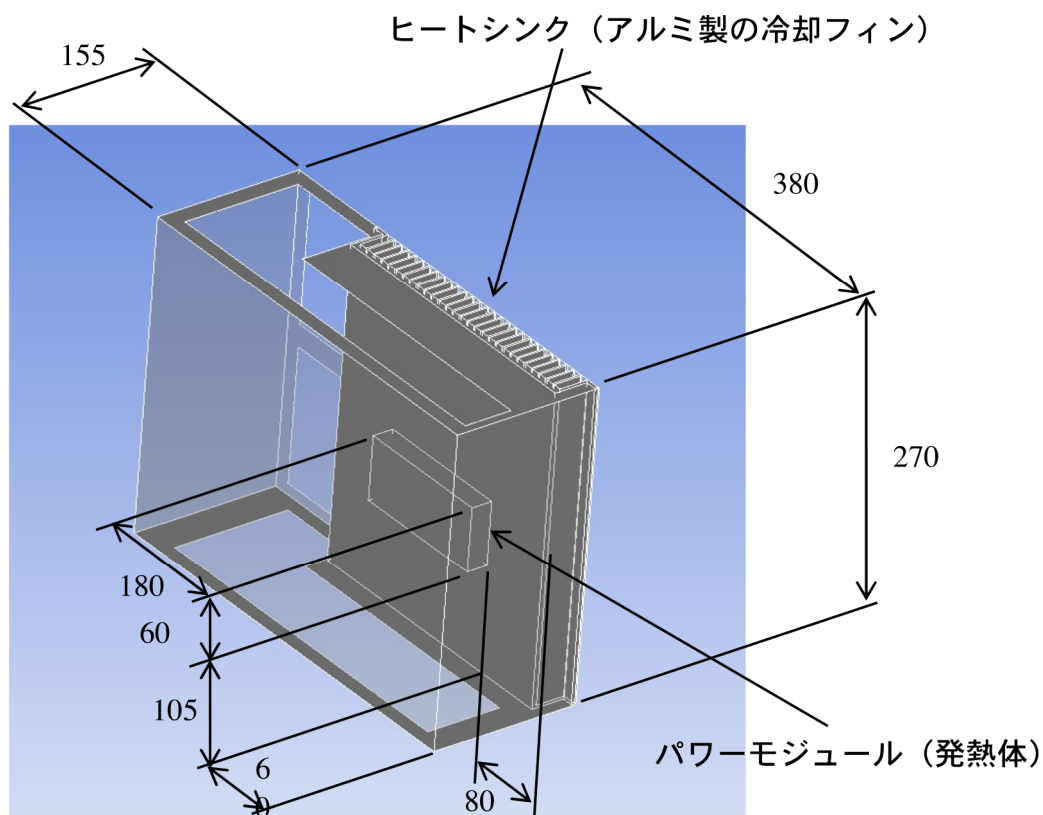


図 4.3.1.5 ヒートシンクとパワーモジュールの構造概略図

表 4.3.1.2 各部品の材料および熱物性値

部品名	主な材料	密度 (kg/m ³)	比熱 (J/kg/K)	熱伝導率 (W/m/K)
パワーモジュール	鋼	8030.0	502.48	16.270
ヒートシンク	アルミニウム	2719.0	871.00	202.40
リアクトル 1 & 2	鋼	8030.0	502.48	16.270
基板	ガラス・エポキシ	1500.0	950.00	0.40000
DCコンデンサ 1 & 2	鋼	8030.0	502.48	16.270
ACフィルタ	鋼	8030.0	502.48	16.270
筐体	鋼板	8030.0	502.48	16.270

図 4.3.1.6 に各部品内部のメッシュ構造図を示す。図に示されるように構造物の内部は矩形メッシュを適用した。各構造部品の熱伝導率は空気に比べて十分大きく、部品によらずほぼ均等な間隔でメッシュを刻んだ。

一方、気体側については非構造メッシュを適用した。図 4.3.1.7 にパワーモジュールのほぼ中心を通るように切断した断面図を示す。左側の図はヒートシンクのフィン頂を通る断面を、右側の図はフィン底を通る断面を示す。図 4.3.1.7 左図より、ヒートシンクフィン内部は構造部品であり、流れもないことから、前述したように矩形均一メッシュを適用している。一方、図 4.3.1.7 右図よりフィン間の空気層の流れを解く場合には矩形均一メッシュではあるが、メッシュ間隔は構造部品に比べて数分の 1 の細かさになっている。また、構造物外の空気層については部品表面の境界層が形成される部分は細かくメッシュを刻み、離れるにしたがってメッシュを大きくした。本計算における総セル数は約 470 万である。

計算における境界条件は次のとおりである。図 4.3.1.8 に示すように、計算領域の外部境界は自然対流の影響が十分緩和される程度、すなわち PCS 外側の各方向 1m 離れたところに設定した。PCS 上下面の境界の圧力条件はそれぞれ静圧が 0 となるように設定し、速度については水平方向速度をゼロ、垂直方向の速度勾配をゼロとした。側面の境界条件は面に垂直方向の圧力勾配をゼロとした。また、面に垂直方向の速度成分をゼロ、面に沿った速度成分については面に垂直な方向の速度勾配をゼロとした。機器内の発熱はパワーモジュールからのみと仮定し、発熱はモジュール全体で均一に発生するとし、その総発熱量を与えた。また、後述する実験との比較検証のため、前面カバーを外した状態で計算を行った。

数値解析では、固体内の熱伝導を含め、自然対流を考慮した空気の 3 次元流れを計算した。乱流モデルは $k-\epsilon$ Realizable モデルを用い、自然対流は空気の密度変化をブジネスクモデルで近

似し、重力項を付加して計算した。数値計算手法は有限体積法である。

これらのモデルが組み込まれ、かつ応力解析も連成できる汎用熱流体解析ソフトには ANSYS/FLUENT⁴、COMSOL^{®5}、FINAS/CFD⁶ 等があり、いずれも適用可能と思われるが、本解析では ANSYS/FLUENT を使用した。計算機には HP WSZ840(64 bit) 2Intel Xeon CPU ES-2690v 32.6GHz を用いた。定常までの計算時間は条件にもよるが、2CPU の計算でおよそ 8 時間である。

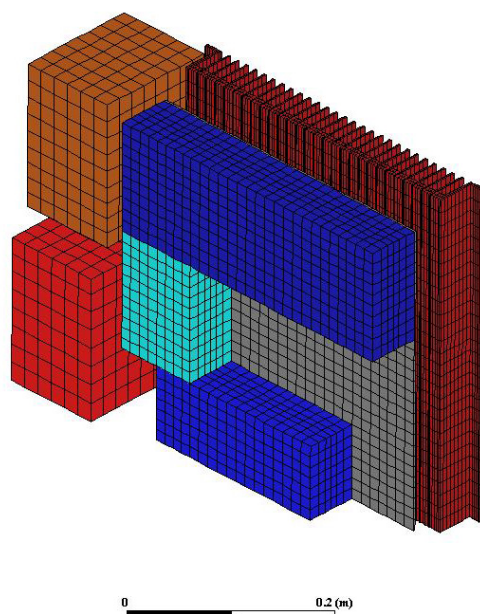
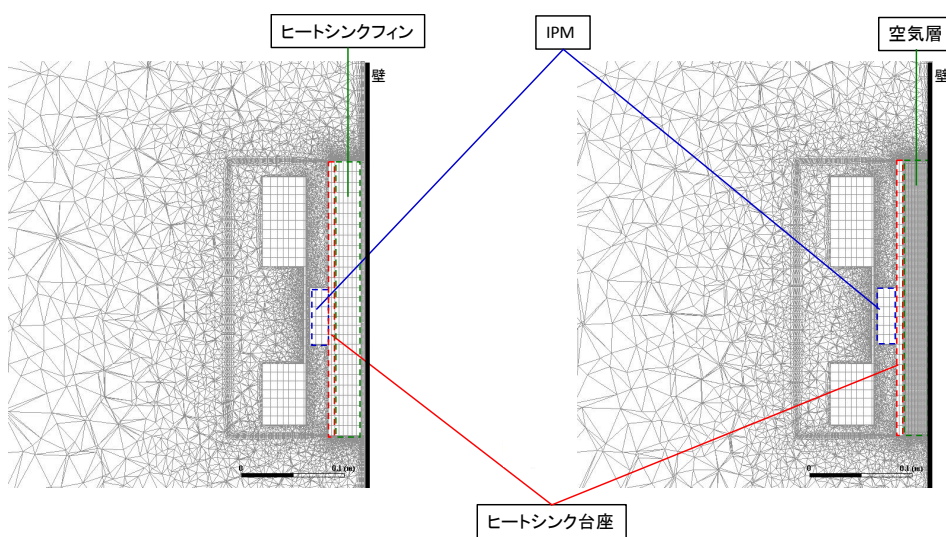


図 4.3.1.6 各部品内部のメッシュ構造図



ヒートシンクフィン頂を通る断面(金属部)

ヒートシンクフィン底を通る断面(空気層)

図 4.3.1.7 IPM 中心付近のヒートシンク断面におけるメッシュ構造図

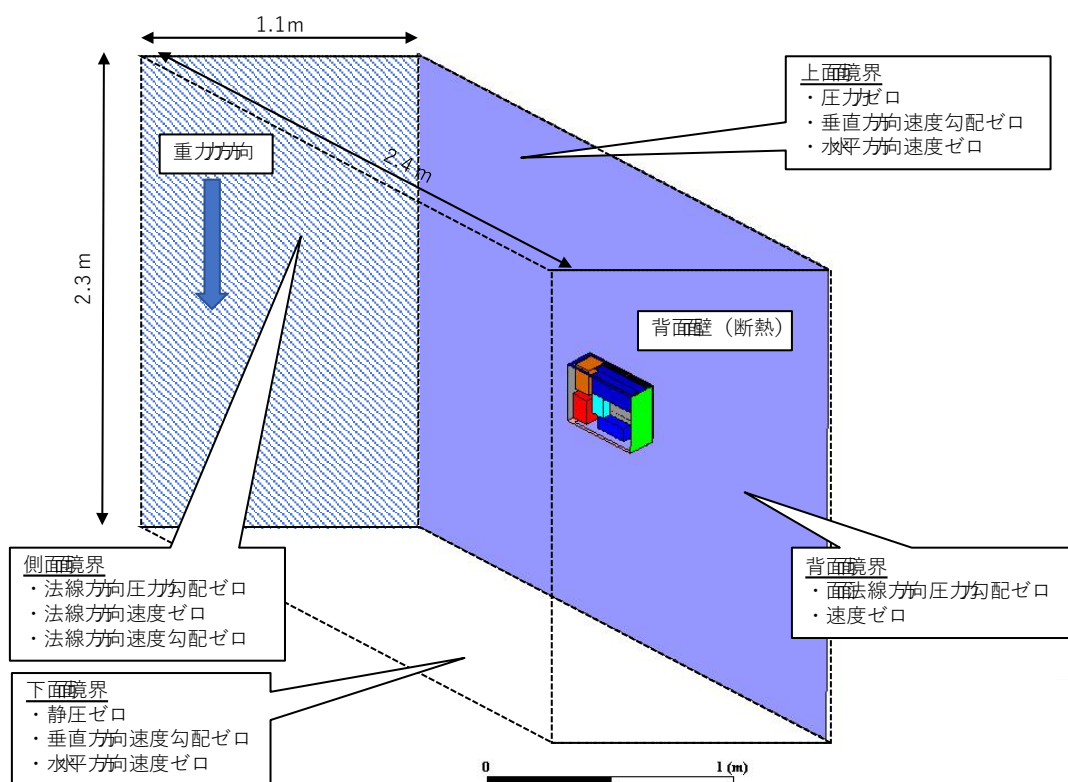


図 4.3.1.8 計算領域と境界条件

(4) 数値熱解析結果

周囲温度を 25℃とし、IPM からの発熱量をパラメータとして PCS 全体の熱解析を行った。

図 4.3.1.9a から図 4.3.1.9e に PCS 内部部品の表面温度分布を示す。IPM からの発熱量はそれぞれ a:50W、b:75W、c:100W、d:150W、e:200W とした。温度は図の左にある棒グラフに示した色で示している。図より、発熱量が増加するにしたがい、基板表面温度およびモジュール表面温度が上昇していることがわかる。部品ごとに見ると、IPM が最も温度が高いが、それを除けば IPM に直接接続しているヒートシンクが最も高温となっている。

一方、ヒートシンクに比べて部品等を設置されている基板やコイル等の部品の温度上昇は比較的上手に抑えられている。カタログによると定格出力 4kW の際の損失は 4%程度であることから、発熱量 150W の結果(図 4.3.1.9d)が実際の定格運転の場合に近い結果となる。この場合でもパワーモジュールは 110℃付近まで上昇し、ヒートシンクは 80℃を超える高温となるが、基板表面上の温度は 60℃以下に抑えられている。IPM からの発熱がうまくヒートシンクに流れて適切に熱が除去され、基板上の部品の温度が一般的な電気部品の耐熱温度以下に抑えられていることがわかる。これは全体の熱設計がうまく機能していることを示しており、空気層を熱抵抗層としてうまく活用しつつ、パワーモジュールの発熱をいち早くヒートシンクに拡散させることが可能な構造を作り上げていることがわかる。

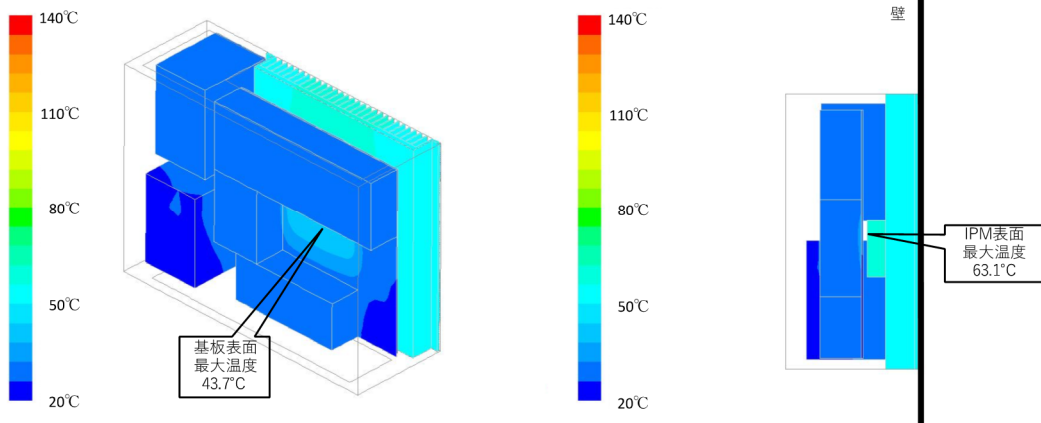


図 4.3.1.9a PCS 内部の温度分布(IPM 発熱量:50W)

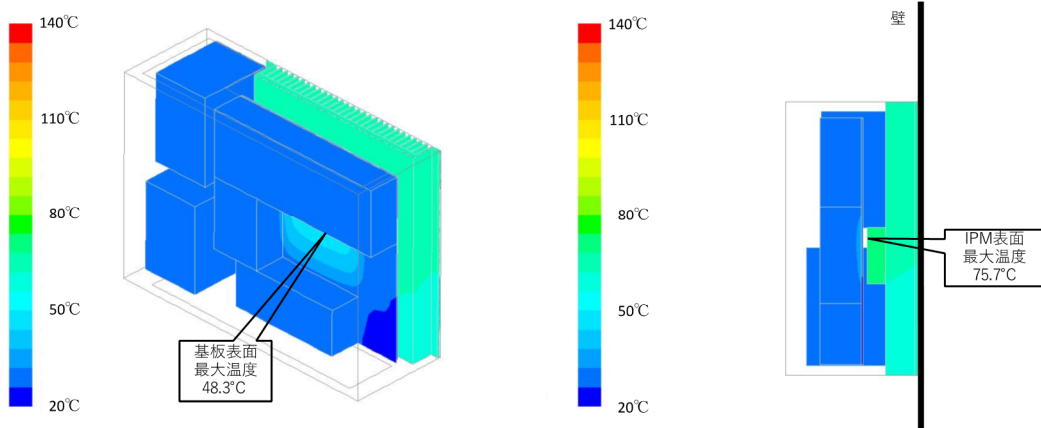


図 4.3.1.9b PCS 内部の温度分布(IPM 発熱量:75W)

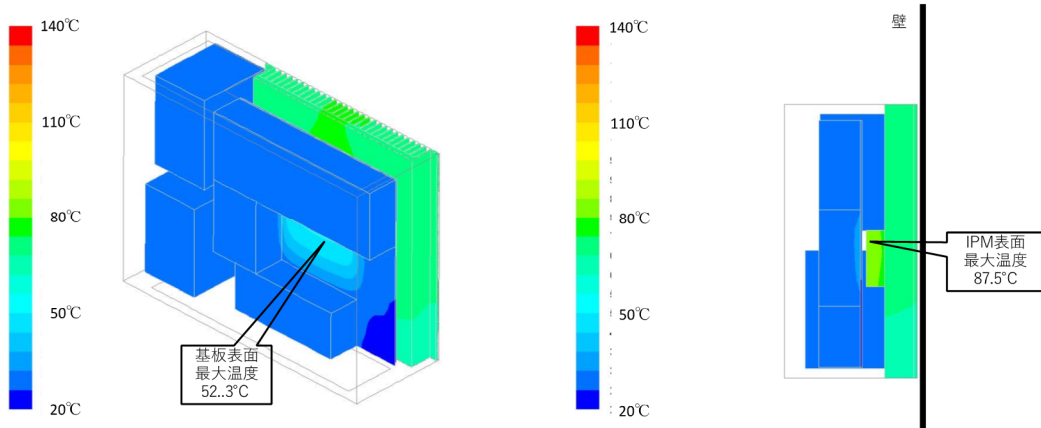


図 4.3.1.9c PCS 内部の温度分布(IPM 発熱量:100W)

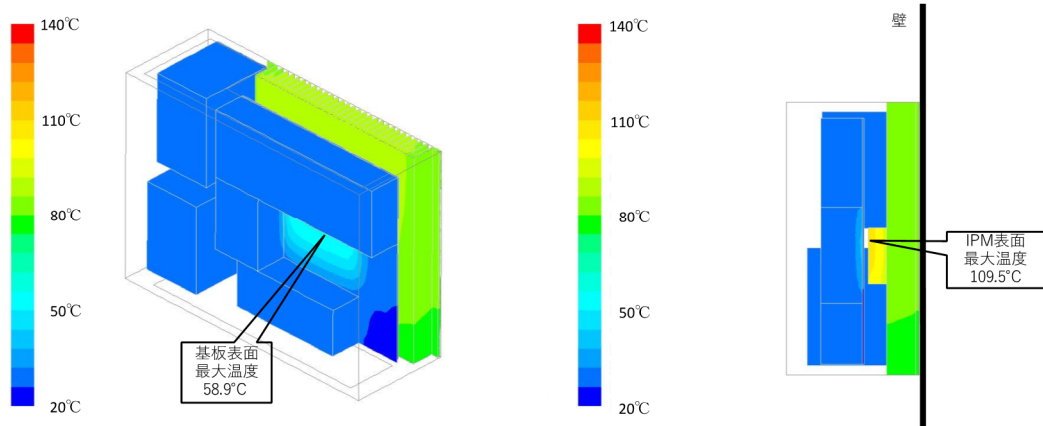


図 4.3.1.9d PCS 内部部品の表面温度分布(IPM 発熱量:150W)

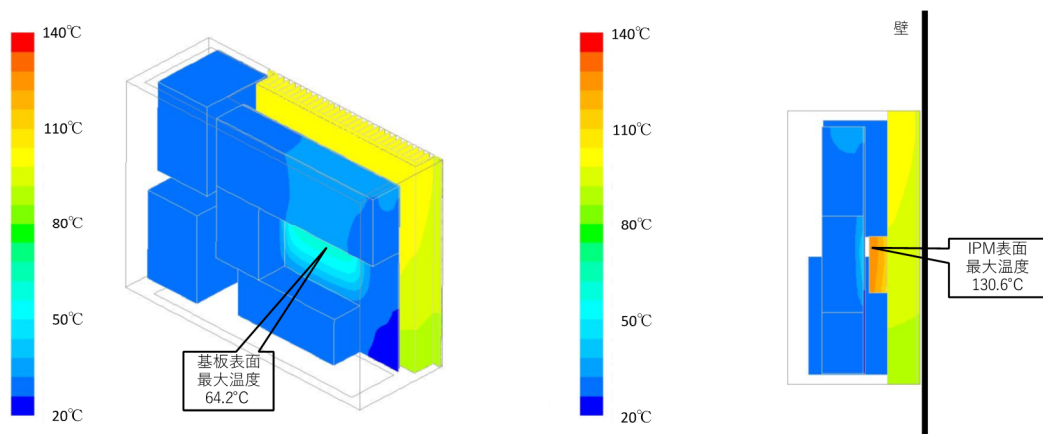


図 4.3.1.9e PCS 内部の温度分布(IPM 発熱量:200W)

図 4.3.1.10a から図 4.3.1.10e に PCS 内部空気の流跡線を示す。a から e のそれぞれの発熱量は図 4.3.1.9 と同じである。流跡線中の色は流速を示している。図よりヒートシンクの熱で暖められた空気が上昇気流を生成していることがわかる。また、発熱量が上昇するにしたがい、ヒートシンクの隙間を流れる空気の流速が速くなっている。特に IPM の真裏あたりの中心部の流速が増加しており、ヒートシンク内での効果的な熱除去につながっていることがわかる。

空気はヒートシンクフィンとの隙間を主に流れており、ヒートシンク台座と基板の間、基板面や部品間の流れは小さくなっている。熱による自然対流が大きなドライビングフォースとなっていることが理解でき、フィン形状も流れの抵抗にならないような適切な形状となっている。実際、定格運転時に近い発熱量の場合(図 4.3.1.10d)は、0.4m/s を超える空気の流れが生じており、この流れによってヒートシンクから熱を効果的に除去できている。

それぞれの IPM 発熱量に対する平均除去熱流束を概算した結果を表 4.3.1.3 に示す。フィンを

含めた総面積は約 0.5m²である。また、表中の平均温度差は周囲温度 25℃との差である。概算した平均熱伝達率は 3.3~5.5W/m²/K であり、発熱量の増加に伴い、平均熱伝達率が増加している。一方、一般的に自然対流による熱伝達率は 10 W/m²/K 以下であり、これまでの知見とほぼ一致しており、本計算手法で自然対流の流れ場が適切に解けていることが確認できる。

表 4.3.1.3 計算結果より概算した平均熱伝達率

IPM 発熱量(W)	50	75	100	150	200
平均温度差(℃)	30	40	50	60	75
平均熱伝達率(W/m ² /K)	3.3	3.7	4	5	5.5

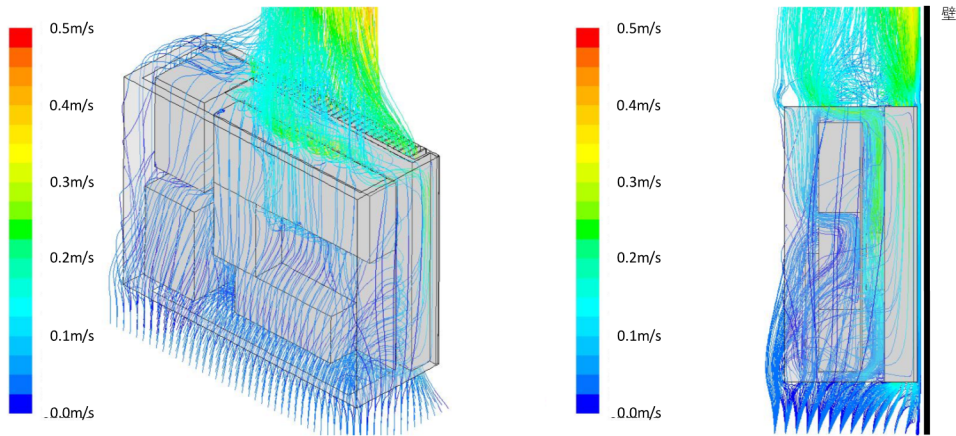


図 4.3.1.10a PCS 内部空気の流跡線分布(IPM 発熱量:50W)

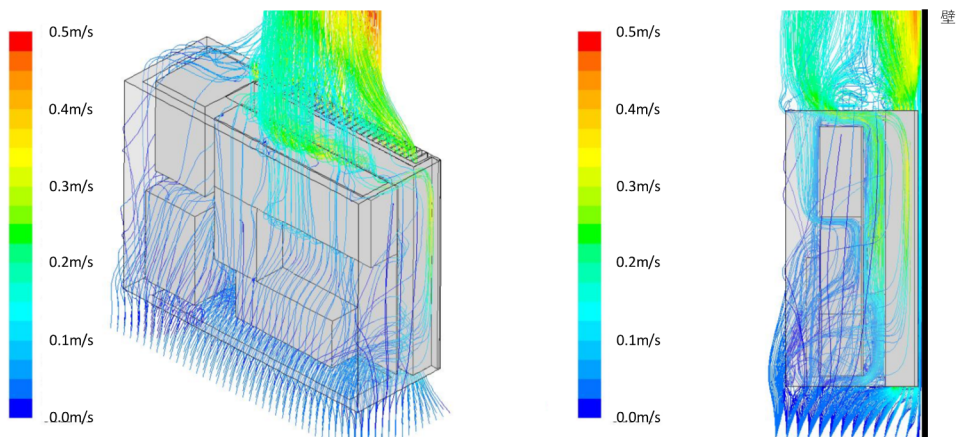


図 4.3.1.10b PCS 内部空気の流跡線分布(IPM 発熱量:75W)

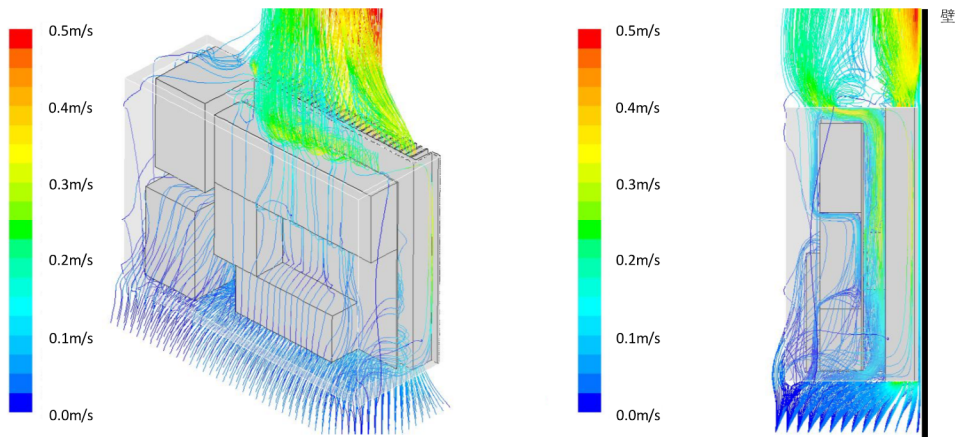


図 4.3.1.10c PCS 内部空気の流跡線分布(IPM 発熱量:100W)

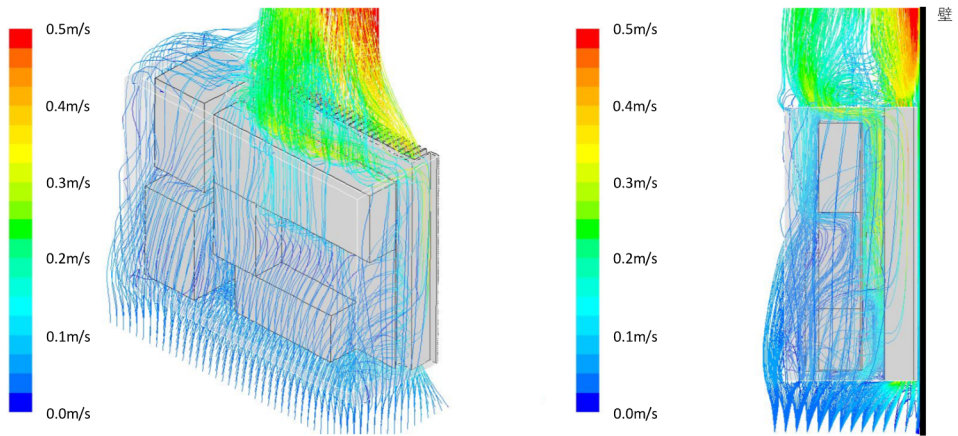


図 4.3.1.10d PCS 内部空気の流跡線 (IPM 発熱量:150W)

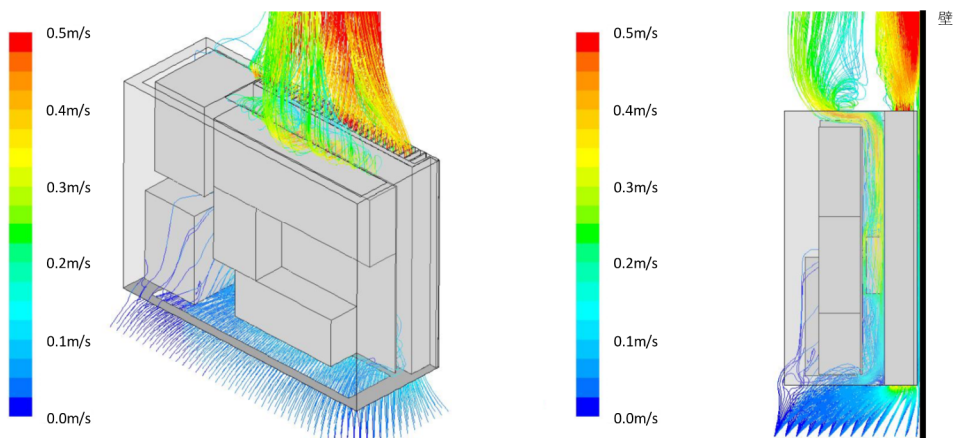
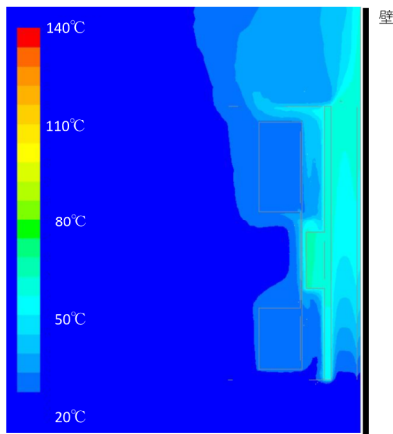
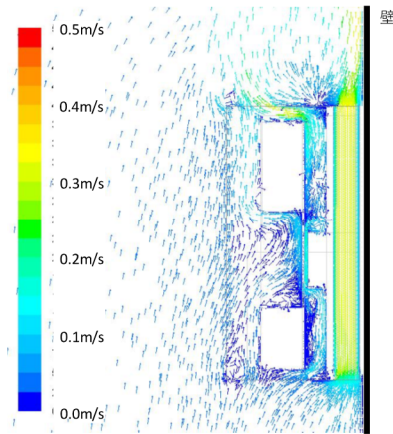


図 4.3.1.10e PCS 内部空気の流跡線分布(IPM 発熱量:200W)

図 4.3.1.11a から図 4.3.1.11e に IPM 中心付近を通るヒートシンク断面の温度および速度分布を示す。左図は温度分布、右図は速度分布である。断面は IPM からの発熱量はそれぞれ a:50W、b:75W、c:100W、d:150W、e:200W とした。温度は図の左にある棒グラフに示した色で示している。速度分布におけるベクトルの色は流速を示している。図より発熱量が大きくなるにしたがい、自然対流の速度が上昇する。ヒートシンクフィン内部の流れは層流に近い流れとなっていることがわかる。また、ヒートシンクフィン内部で強い流れが生じ、基板とヒートシンクに挟まれた部分の流れは比較的弱い流れとなっている。このことはヒートシンク側に熱が効率的に伝達されていることを示している。

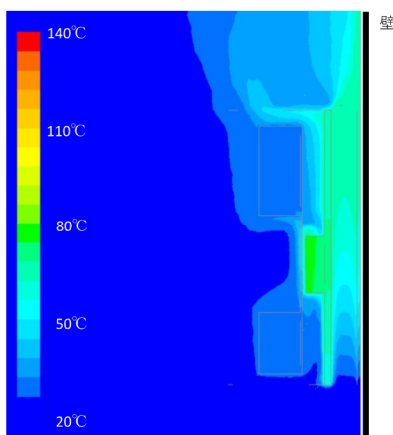


温度分布

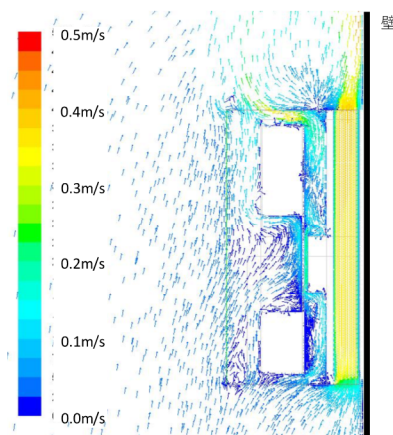


速度分布

図 4.3.1.11a ヒートシンク断面の空気層温度および速度分布(モジュール発熱量 50W 時)

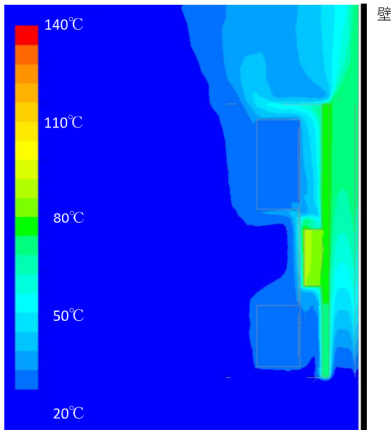


温度分布

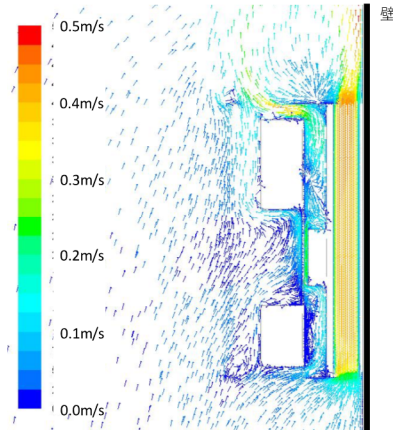


速度分布

図 4.3.1.11b ヒートシンク断面の空気層温度および速度分布(モジュール発熱量 75W 時)

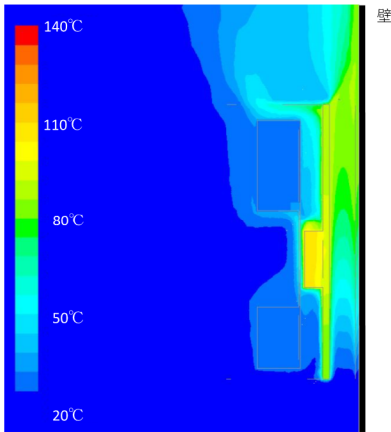


温度分布

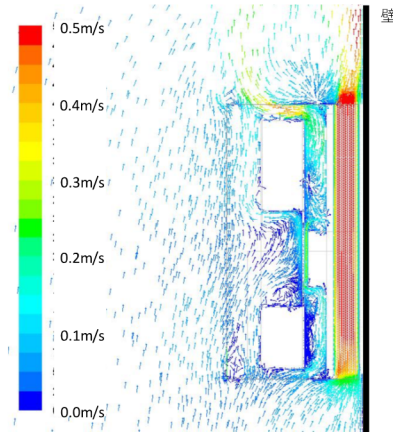


速度分布

図 4.3.1.11c ヒートシンク断面の空気層温度および速度分布(モジュール発熱量 100W 時)

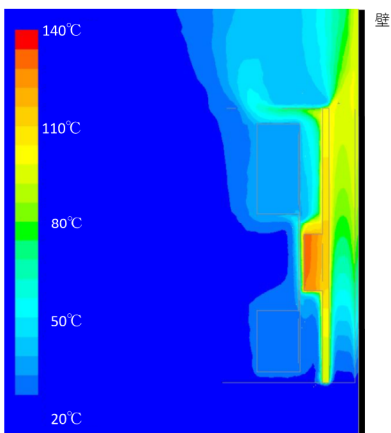


温度分布

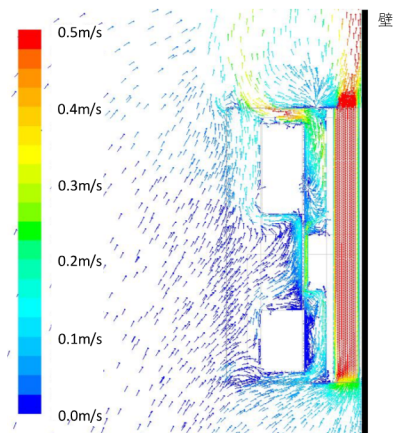


速度分布

図 4.3.1.11d ヒートシンク断面の空気層温度および速度分布(モジュール発熱量 150W 時)



温度分布



速度分布

図 4.3.1.11e ヒートシンク断面の空気層温度および速度分布(モジュール発熱量 200W 時)

(5)4kW 級太陽光発電用 PCS の内部温度測定試験

自然空冷方式の数値熱解析が精度よく行われているかを検証するために、4kW 級の太陽光発電用 PCS を用いて、パワーモジュール損失とヒートシンクによる抜熱の性能を測定し、解析値との比較による確認を行った。(特に、ヒートシンクと空気との熱抵抗、ヒートシンクと伝熱グリスの間の熱抵抗が正確に模擬できているかどうかは、数値解析の精度を検証する上で、重要な確認点である。)確認に利用した PCS 主回路の概略回路図を図 4.3.1.12 に示す。

この図において、DC 入力(+端子および-端子)が太陽電池パネルからの直流電力の入力端子を、AC 出力(U 端子およびW 端子)が交流系統への交流出力端子である。DC 入力端子から入った直流電力は、ノイズフィルタを経てチョップ回路により最大電力追尾制御が行われるとともに、電圧が安定化される。(安定化後の直流電圧は、パワーモジュールの P 端子と-端子の間に発生する。)そして、この安定化後の直流電圧からインバータにより交流系統に電力が出力される。本例の場合、パワーモジュール内には、チョップ用のスイッチ素子とダイオードの 2 素子、単相インバータ用のスイッチ素子 4 素子の計 6 素子が実装されている。

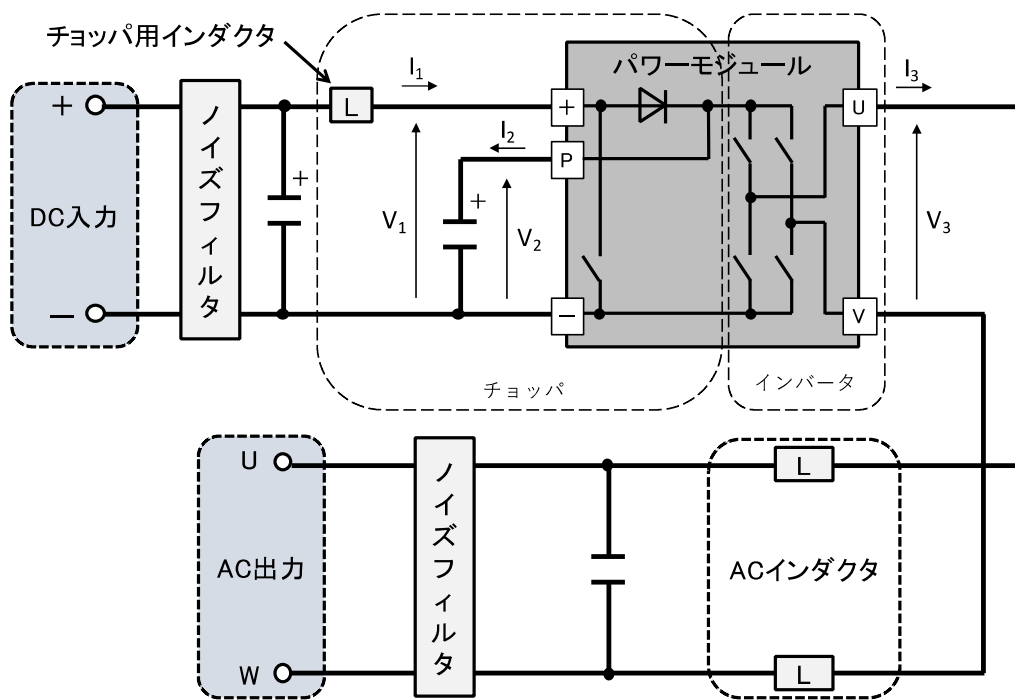


図4.3.1.12

図 4.3.1.12 検証試験に用いた 4kW 級 PCS の回路図

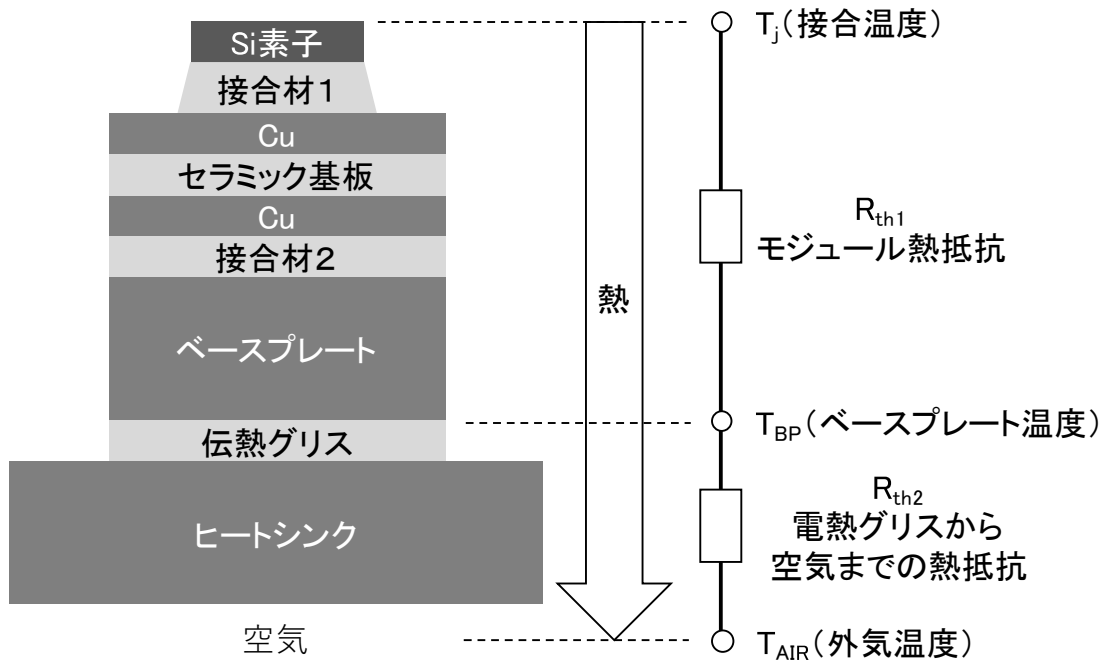


図 4.3.1.13 熱抵抗とパワー素子温度

パワーモジュールの損失は、自然空冷のヒートシンクによって冷却されているので、このパワーモジュールの損失とそれによるモジュール温度変化を測定し、解析の妥当性を検証するためのデータを得る。なお、検証用のデータを取得した電力変換器は Si パワー素子を利用しているが、熱解析においてはパワー素子を発熱体としか扱わないので、Si パワー素子の回路で取得したデータであっても、数値熱解析の検証を行う上では問題にならない。なお、モジュールの損失は、図中に示した各部の電圧・電流を計測することで求める。具体的には、 $V_1I_1-V_2I_2-V_3I_3$ により算出している。また、パワーモジュールの内部温度の計測ができないため、パワー素子の温度は、パワーモジュール内の熱抵抗(パワー素子とベースプレートの間の熱抵抗)を用いて推定する。

ベースプレート温度からパワー素子の温度を求める方法を、図 4.3.1.13 を用いて説明する。

この図において、モジュール熱抵抗 R_{th1} は既知量であり、伝熱グリスから空気までの熱抵抗 R_{th2} が未知量である。外気温度 T_{AIR} およびベースプレート温度 T_{BP} 、パワー素子の発熱量が計測可能な物理量であるので、寿命評価に大きな影響を持つパワー素子温度(接合温度) T_j は計算により求めることが可能である。

しかし、 R_{th2} に含まれる伝熱グリス部分の熱伝導性能(伝熱グリスの接触状態が熱伝導性能に大きく影響する。)およびヒートシンクのフィンと空気間の熱伝導性能(フィンと空気の間には複雑な気流が発生する。)は解析に大きく影響するので、この部分のモデル化は注意が必要となる。したがって、これらの伝熱性能のモデルの妥当性検証が重要である。

(6)検証結果とまとめ

検証試験の結果を図 4.3.1.14 に示す。この図はパワーモジュールの発熱量とパワー素子温度の関係を示している。(実機を用いた検証試験では、PCS の交流出力を約 300W～4kW の範囲で変化させ、その時のパワーモジュール損失と温度 T_{AIR} および T_{BP} を測定することで、パワー素子の温度を得ている。)図に示される通り、解析結果と実測より得た素子温度はよく一致しており、ヒートシンクと空気との熱伝導や伝熱グリスの熱伝導の性能がよく模擬できていることが確認出来る。すなわち、本熱解析で用いているモデルが妥当である事が確認出来る。

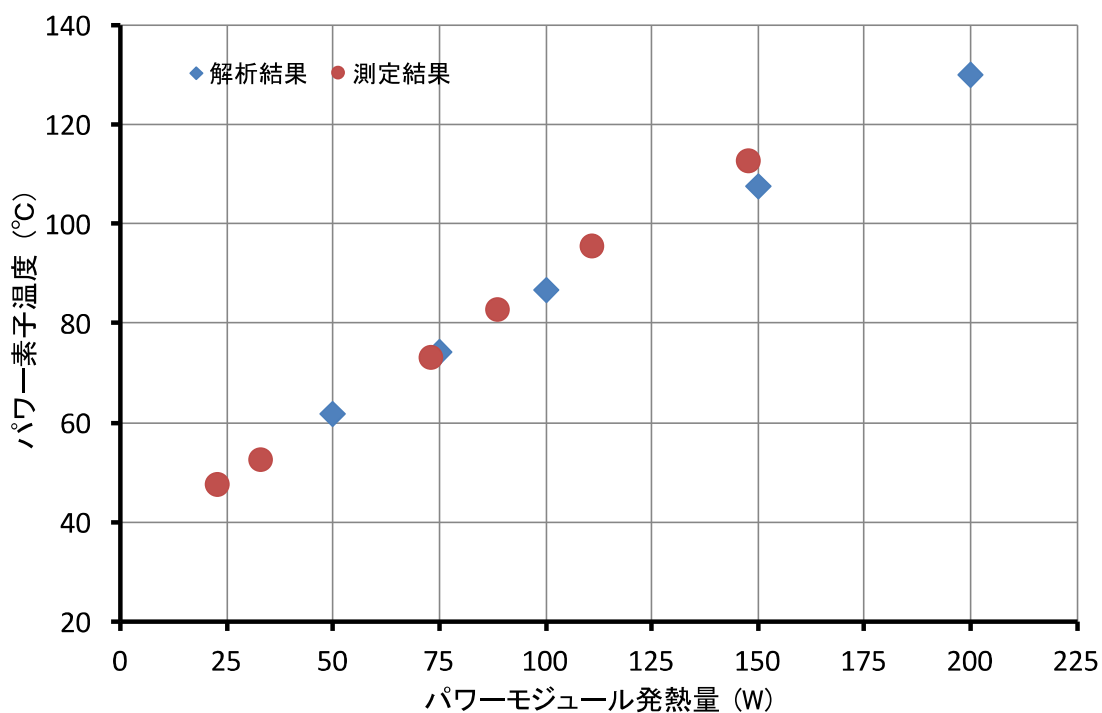


図 4.3.1.14 数値熱解析結果と実測の比較

4.3.2 300kVA 級次世代電圧制御器(SVC)の熱解析

4.3.1 節において、数値解析結果が実験結果と良好な一致を示すこと、数値的に得られた平均熱伝達率が自然対流の熱伝達率に関する従来の知見と一致すること等が確認できたことから、4kW と規模は小さいが電圧制御器に対する数値熱解析の精度が十分保たれることが確認された。ここでは、本来の目的である 300kVA 級次世代電圧制御器(SVC)の熱解析を実施する。

本研究で検討する SVC は屋外設置を前提とし、通常電柱二本で支えるところ、電柱一本に搭載可能で、かつ 10kV 級耐圧の SiC デバイスを搭載することで変圧器無しに AC 6.6kV 系統へ連系することを想定している。具体的には大きさが幅 1.3m、奥行き 1m、高さが 2.5m 以内で重さが 1.8 トン以下とすることを目標としており、そのためには軽量化かつ小型化が課題となる。軽量化にはトランスレスであることが大きく貢献し、比較的容易に達成可能と思われるが、小型化には大きな課題があると想定される。

まず内部的にはコンデンサ等の電気部品間の絶縁設計が大きな課題となる。さらに定格 300kVA の電力を扱うことから、仮に 1% 程度の機器損失があった場合でも全体で約 3kW 程度の発熱が生じる。今、外気温が 35°C で、ヒートシンク温度を 135°C 程度に抑えることとする。4.3.1 節で議論したように自然対流による熱伝達率を 5W/m²/K 程度と仮定すると、温度差 100°C で 3kW の熱を放熱するためには 6m² 程度の伝熱面積が必要となることから、自然空冷式で冷却する熱設計は容易ではない。

以上のように、小型化のためには絶縁設計と熱設計を同時に実施する必要があるが、ここでは熱設計を優先し、絶縁については空気絶縁を前提とした SVC の設計を行った。空気絶縁式は SVC の小型化には不向きであるが、逆に筐体内部に空間が確保される構造となることから、機器および部品冷却に対するさまざまな工夫が可能となり、自然空冷式 SVC において小型化を実現するための冷却構造に対する課題抽出が可能となる。

4.3.2.1 空気絶縁型次世代電圧制御器の熱解析

(1) 電気回路設計

AC6.6kV 配電系統用の SVC の電気回路設計を行った。SVC の定格容量は三相 300kVA とし、AC 6.6kV の系統に変圧器無しで接続されるものとした。

SVC の場合は 4.3.1 節で検討した PCS とは異なり、三相それぞれにて電圧制御を行うことから、単相回路が 3 つ連結されるといった単純な回路ではなく、同期式あるいは非同期式等さまざまな回路形式がある。他方で再生可能エネルギーの発電出力が秒単位で変動するのに比較して、機器の温度変化の時間スケールはその熱容量の大きさから分単位以上となり、電気的な回路形式の違いは熱的には大きな影響を与えない。つまり、熱設計における重要な点はモジュールサイズとその発熱量の見積もりであり、したがって熱設計を行うためだけの回路構成は、SVC に三相分の電力

が流れるとしても、実質的には独立した単相回路が3つ内蔵されているという単純な系に帰着させることができる。結果的に SVC 回路は単純化され、規模が大きくなった PCS の単相回路が3つ並列に並んだ回路形式とみなすことができる。4.3.1 節にて PCS 実機との比較で数値熱解析の信頼性が検証されていることから、この解析手法を SVC に対して展開してもその結果は十分信頼できると考えることができる。

回路構成は以下の通りとし、これに基づく電気回路設計を実施し、コンデンサ容量等の電気的定数の決定およびそれに基づく部品類の選定を行った。

- ① パワーモジュールは 10kV 級耐圧の SiC デバイスで構成
- ② ACリアクトルは変圧器無しで AC 6.6kV 系統に連系できる容量
- ③ DC コンデンサは三相 AC 6.6kV 系統に連系して 300kVA の無効電力を供給できる容量

以上を前提条件とし、熱解析を実施することを目的に SVC は単相回路が3つ並列に内蔵された単純な回路系とし、PCS での検証結果を最大限利用可能とする。図 4.3.2.1 に SVC の単相基本回路を、表 4.3.2.1 に本回路にて使用される主な部品の仕様を示す。交流 6.6kV ではあるが、安全性を考慮してパワーモジュール部は 10kV 級 SiC パワー半導体を 2 段直列に並べ、さらに並列化した。DC コンデンサ部は電圧制御を行い、AC フィルタでは周波数調整やノイズ除去を行っている。

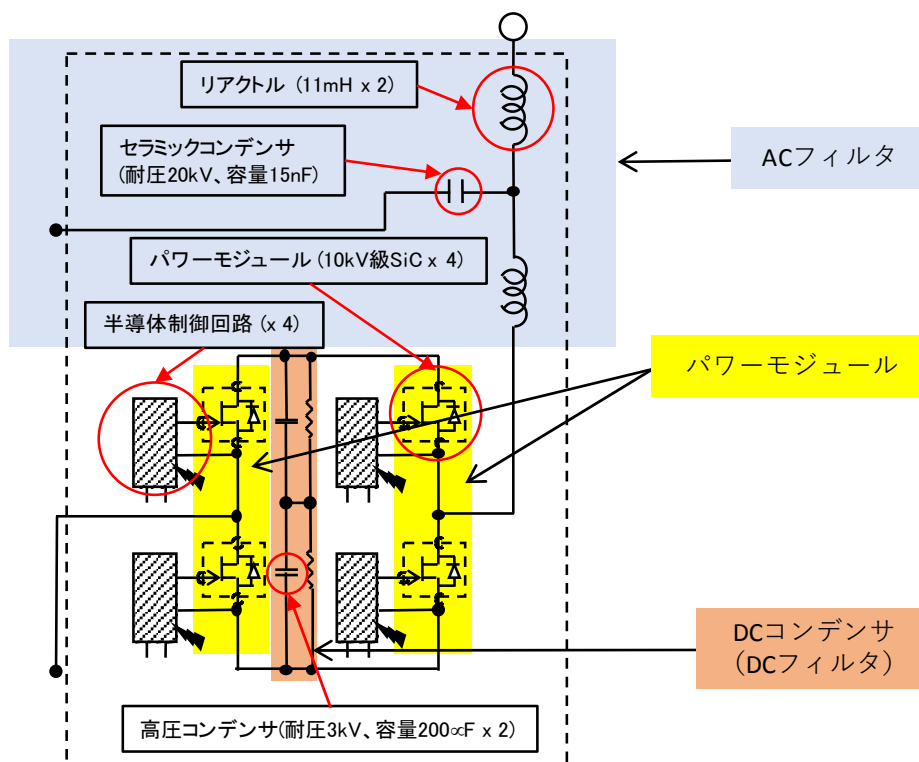


図 4.3.2.1 SVC の単相基本回路

表 4.3.2.1 主要部品の仕様

品名	形式	仕様	数
リアクトル		11 mH	6
高圧セラミックコンデンサ	EPSR20-7000MA	20 kV, 15 nF	3
SiC パワー半導体		16 kV, 40 A	12
SiC パワー半導体制御回路			12
高圧コンデンサ	330DM418	DC 3kV, 200 μ F	6
高圧抵抗	RH4HVS	5 M Ω	6

(2)構造設計

電気回路設計に基づき、構造設計を実施した。本 SVC は最終的には電柱一本に搭載可能な程度の大きさ、すなわち高さ 2.5×幅 1.3m×奥行き 1m 程度の大きさに収まることを目標としている。それを実現するためには絶縁設計と熱設計を同時に実施する必要があるが、どちらも難しい課題であることから、ここでは熱設計を優先し、絶縁については空気絶縁を前提とした SVC の設計を行い、機器および部品冷却に対するさまざまな工夫を行い、自然空冷式 SVC を実現するための課題を抽出する。

構造設計を実施するにあたり、全体機器は高さ 2.5m 以下、かつ重量 2トン以下を目標とし、自然空冷方式で冷却し、空気絶縁方式で電気絶縁を行うとした。この条件のもとで行った構造設計図の概略図を図 4.3.2.2 に示す。

SVC の大きさは高さ 2.5m×幅 2m×奥行き 1m となっており、高さと奥行きについては目標の大きさに収まっているが、幅が 0.7m 程度大きくなっている。これは空気絶縁を前提とする限りは限界に近い大きさである。

SVC は屋外設置を前提としていることから、外筐体と内筐体の二重構造とした。SVC は主に背面側の外筐体と内筐体の隙間を通る風によって冷却をされ、その風は底部より侵入し、ヒートシンクで暖められて上部に抜ける構造となっている。したがって、外筐体下部には空気取り込み口を、上部には暖まった空気が抜ける排気口を設けた。排気口は外筐体内部に雨等が侵入しにくいように下向きに設置した。また、内筐体には換気のための通気口を上面に二つ設けた。図より、SVC の大きさは目標より大きい、重量については約 1070kg と目標の6割以下の重さに抑えられた。これはトランスがない効果である。表 4.3.2.2 に筐体および部品の材料、大きさ、個数および重量を、表 4.3.2.3 に主要部品の材料および熱物性値を示す。作動流体である空気の密度は 1.18[kg/m³]、比熱は 1008[J/kg/K]、熱伝導率は 0.0272[W/m/K]、粘性係数は 1.91×10⁻⁰⁵[kg/m/s]とした。

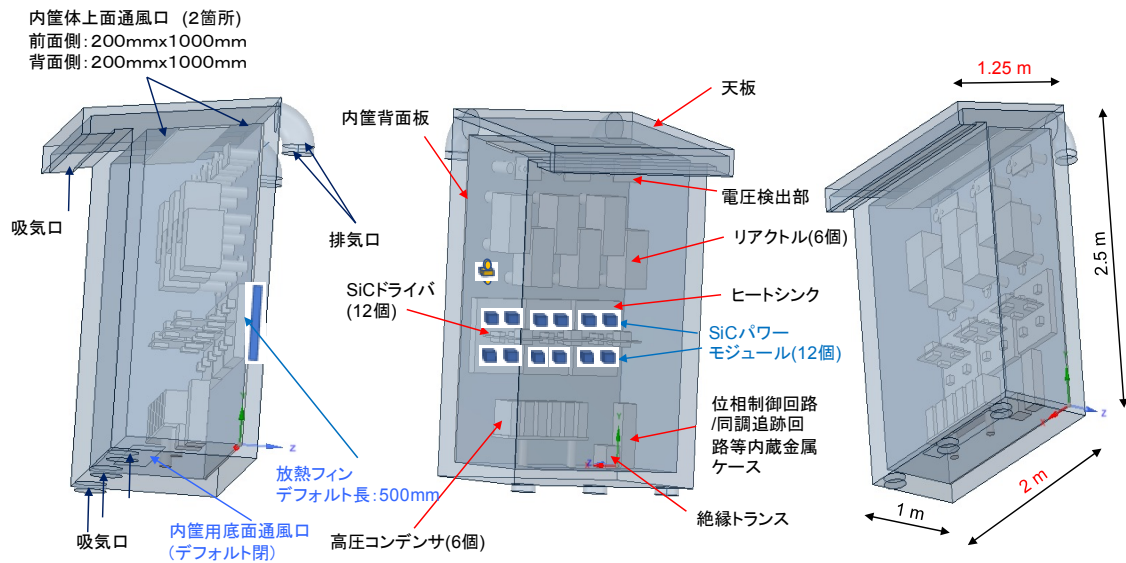


図 4.3.2.2 SVC の構造概略図

表 4.3.2.1 各筐体および各部品の材料、大きさ、個数および重量

	材質	密度 (kg/m ³)	サイズ (mm)	個数	重量 (kg/個)	総重量 (kg)
外部筐体(裏面)	鋼板	7850	2500×2000×3.2	1	125.7	125.7
外部筐体(表面)	鋼板	7850	2500×2000×3.2	1	113.2	113.2
外部筐体(側面)	鋼板	7850	2500×915×3.2	2	57.5	115.0
外部筐体(下面)	鋼板	7850	915×2000×3.2	1	46.0	46.0
外部筐体(上面)	鋼板	7850	1250×2000×3.2	1	62.9	62.9
ヒートシンク	アルミ	2710	500×500×30	3	20.0	61.0
内部筐体(裏面)	アルミ	2710	2250×1800×15	1	164.6	164.6
内部筐体(表面)	アルミ	2710	2250×1800×5	1	54.9	54.9
内部筐体(側面)	アルミ	2710	2500×700×5	2	23.7	47.4
内部筐体(下面)	アルミ	2710	700×1800×5	1	17.1	17.1
内部筐体(上面)	アルミ	2710	1250×1800×5	1	30.5	30.5
リアクトル	鉄、銅他	8030	237×225×390	6	32.0	192.0
コンデンサ	絶縁油他	900	95×116×197	6	2.4	14.4
絶縁トランス	鉄、銅他	8030	150×150×150	1	9.5	9.5
碍子	エポキシ樹脂他	940	75 Φ×90mm	46	0.4	18.4
合計						<u>1072.6</u>

表 4.3.2.3 主要部品の材料および熱物性値

部品名	主な材料	密度(kg/m ³)	比熱(J/kg/K)	熱伝導率(W/m/K)
パワーモジュール	シリコーンゲル他	970	1510	0.15
内筐体, ヒートシンク	アルミ	2720	880	222
リアクトル	鉄、銅他	7850	473	51.6
トランス	鉄、銅他	7850	473	51.6
コンデンサ	絶縁油他	900	1600	0.15
碍子	エポキシ樹脂他	2000	1200	5
外筐体	鋼板	7850	473	51.6

(3)数値解析用メッシュ作成

構造設計図に基づき、数値解析用の計算メッシュ作成を行った。計算メッシュの作成の際にはPCSと同様に部品等を一部簡略化する必要がある。図 4.3.2.3a～図 4.3.2.3c に SVC 全体の概略寸法図、外部筐体寸法図、内筐体寸法図を示す。また、図 4.3.2.4a および図 4.3.2.4b に内部筐体背面に設置するヒートシンクおよびフィンについて形状を示す。

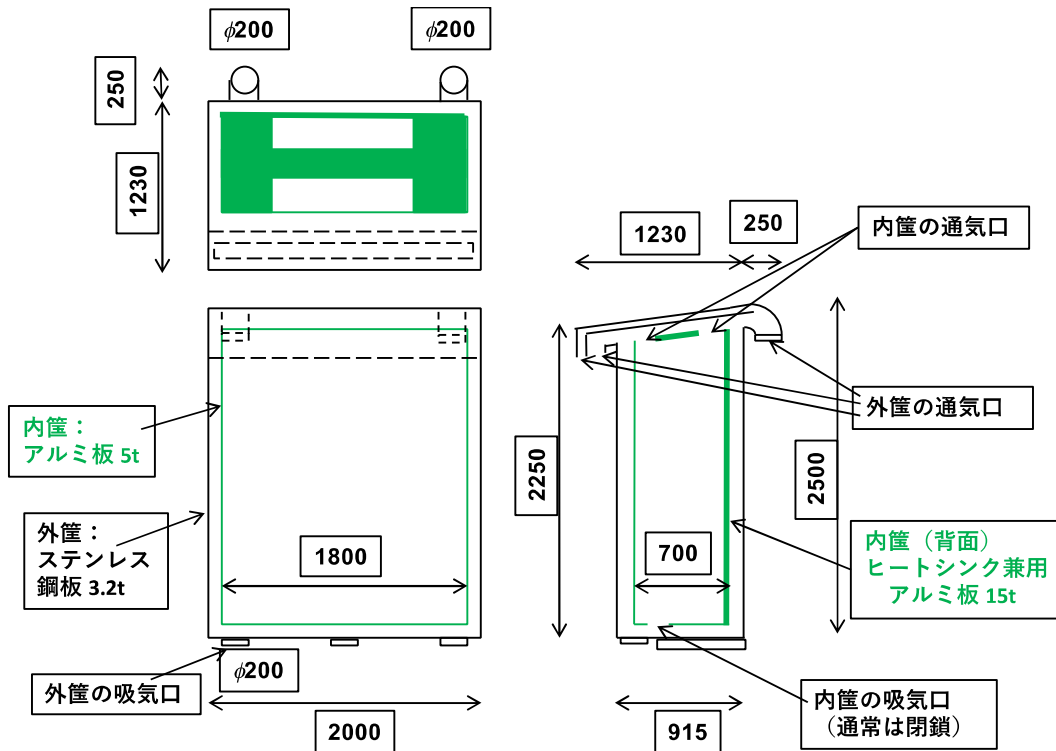


図 4.3.2.3a SVC 全体の概略寸法図

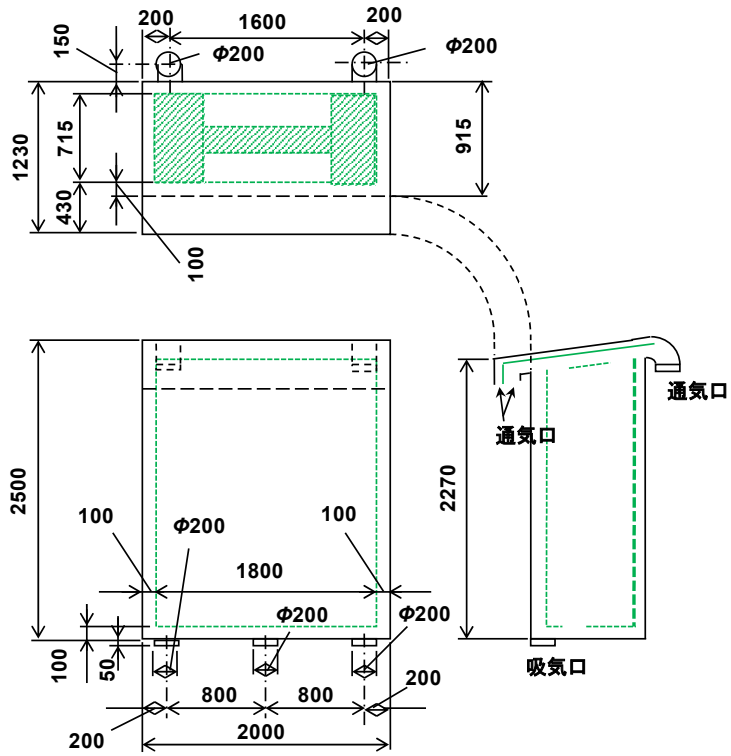


图 4.3.2.3b SVC 外部筒体寸法图

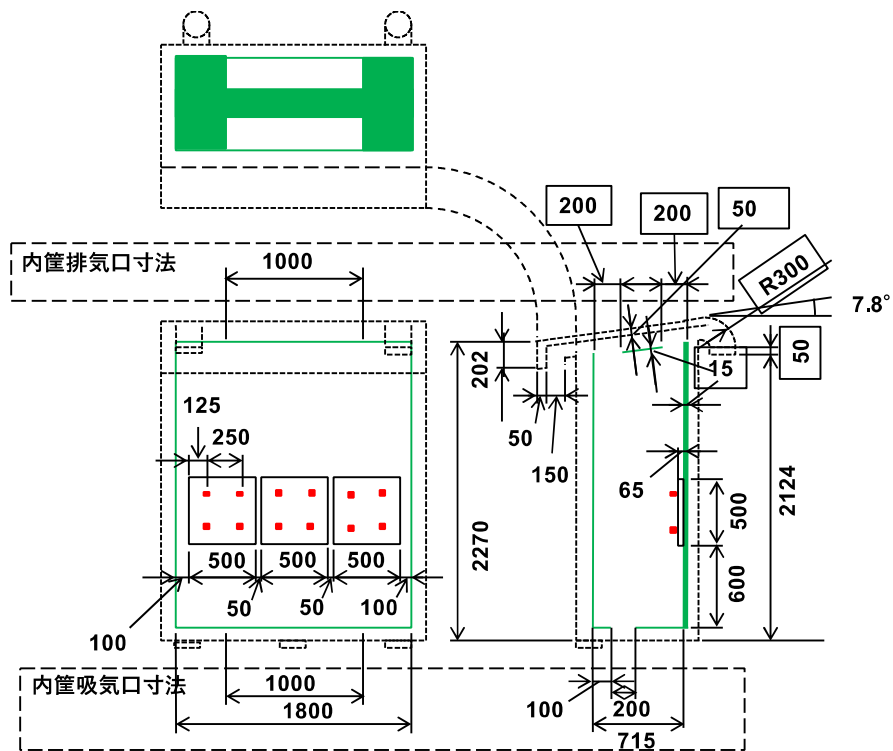


图 4.3.2.3c SVC 内部筒体寸法图

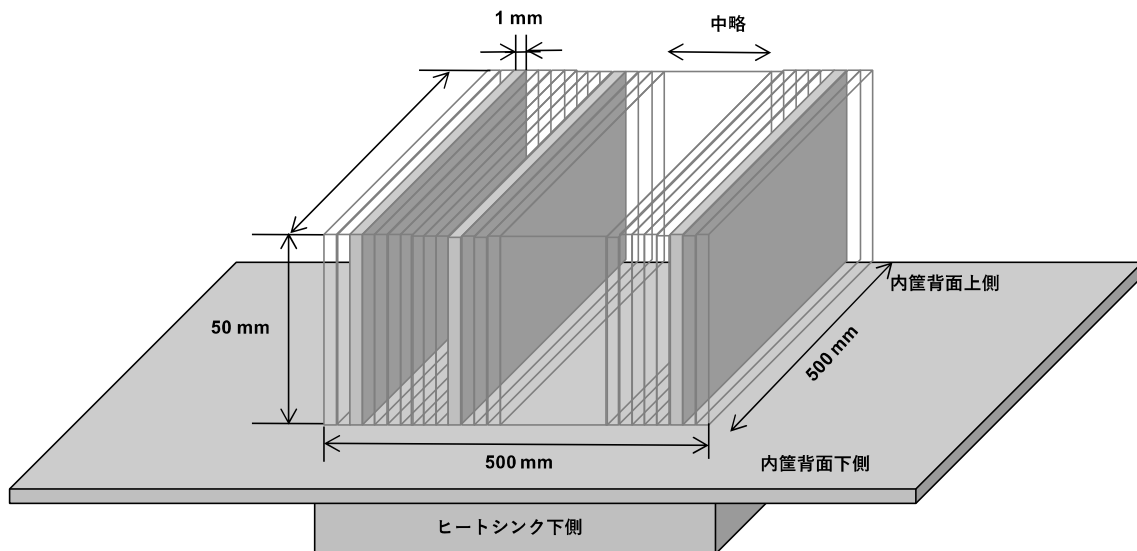


図 4.3.2.4a ヒートシンクフィン基本形状

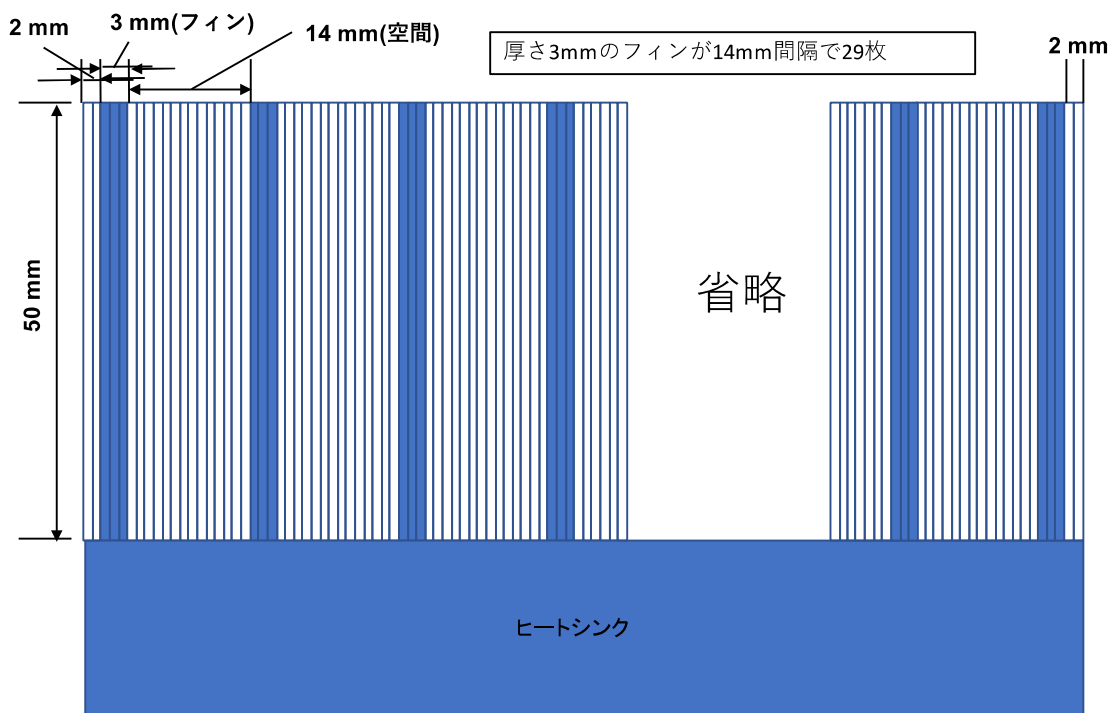


図 4.3.2.4b ヒートシンクフィンのモデル

図 4.3.2.4a に示すように、ヒートシンクフィンの厚さと間隔を自在に設定できるよう、フィンの幅は 1mm、奥行きは 50mm、長さは 500 mm との板状とし、それを 500 枚並べて特定の数ごとにフィンを指定し、残りを空間とする。図 4.3.2.4b のモデルでは、左右両端の 2 枚を空間とし、3～5 枚目をフィンとし、14 枚分の空間を設置し、また 3 枚分をフィンとする。このようにすることで厚さ 3mm のフィ

ンが 14mm の間隔で 29 枚設置されることになる。このとき、ヒートシンクの一枚あたりの伝熱面積は約 1.7m^2 となり、3 枚合計で 5.1m^2 となる。

図 4.3.2.3a～図 4.3.2.3c および図 4.3.2.4a、図 4.3.2.4b に沿って作成した SVC 内外領域のメッシュ図を図 4.3.2.5a に示す。PCS の場合と同様、SVC の場合も固体である部品内部には矩形メッシュを採用した。メッシュサイズについては固体の熱伝導率等に合わせて適切な大きさとする一方で、気体側については非構造メッシュを採用した。構造物外の空気層については部品表面近傍の境界層が形成される部分は細かくメッシュを刻み、離れるにしたがいメッシュサイズを大きくした。

図 4.3.2.5b にパワーモジュール近傍の拡大図を示す。図に示すように、主要な発熱体であるパワーモジュール素子近傍において細かくメッシュを刻んだ。メッシュサイズは流れの計算を試行錯誤しながら調整し、最終的には本計算におけるメッシュの総セル数は 1326 万セルとなった。

計算における境界条件は次のとおりである。図 4.3.2.6 に示すように、SVC は計算領域の中心に置き、外部境界は自然対流の影響が十分緩和される程度、すなわち SVC 外側の上下方向には各 7.5m、左右方向には各 6m、前後方向には各 5m の距離が離れたところに設定した。上下面の境界の圧力条件はそれぞれ静圧が 0 となるように設定し、速度については水平方向速度をゼロ、垂直方向の速度勾配をゼロとした。側面の境界条件は面に垂直方向の圧力勾配をゼロとした。また、面に垂直方向の速度成分をゼロ、面に沿った速度成分については面に垂直な方向の速度勾配をゼロとした。

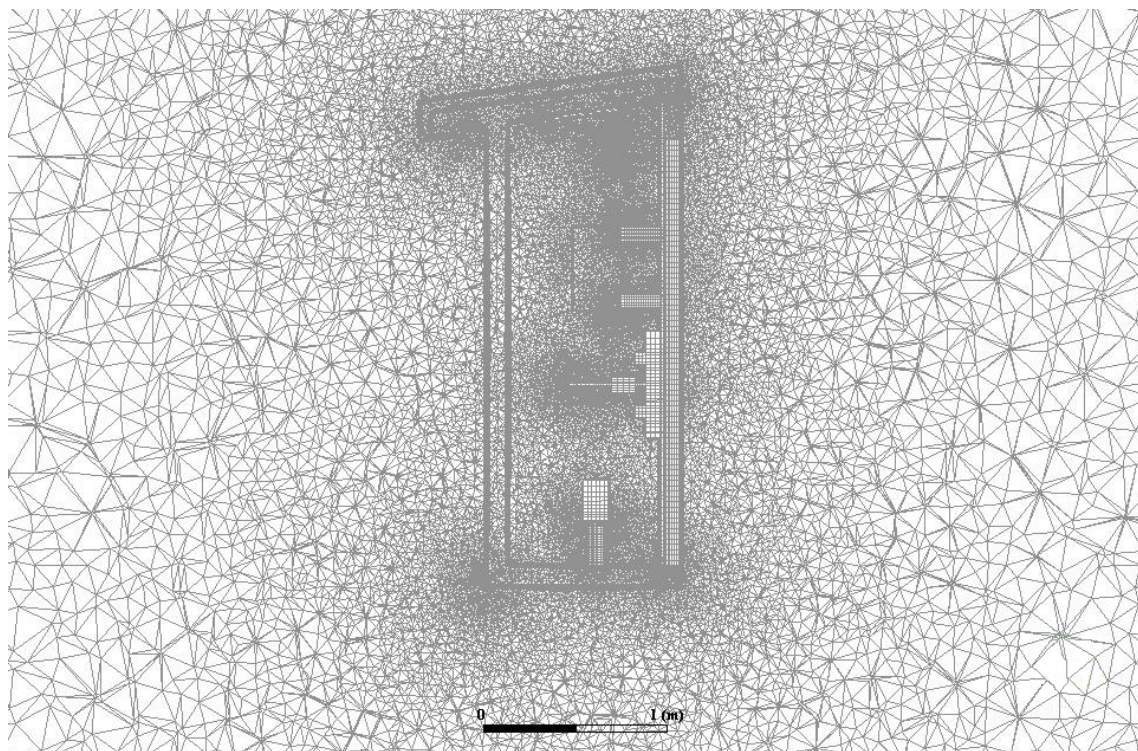


図 4.3.2.5a SVC 内外領域のメッシュ図

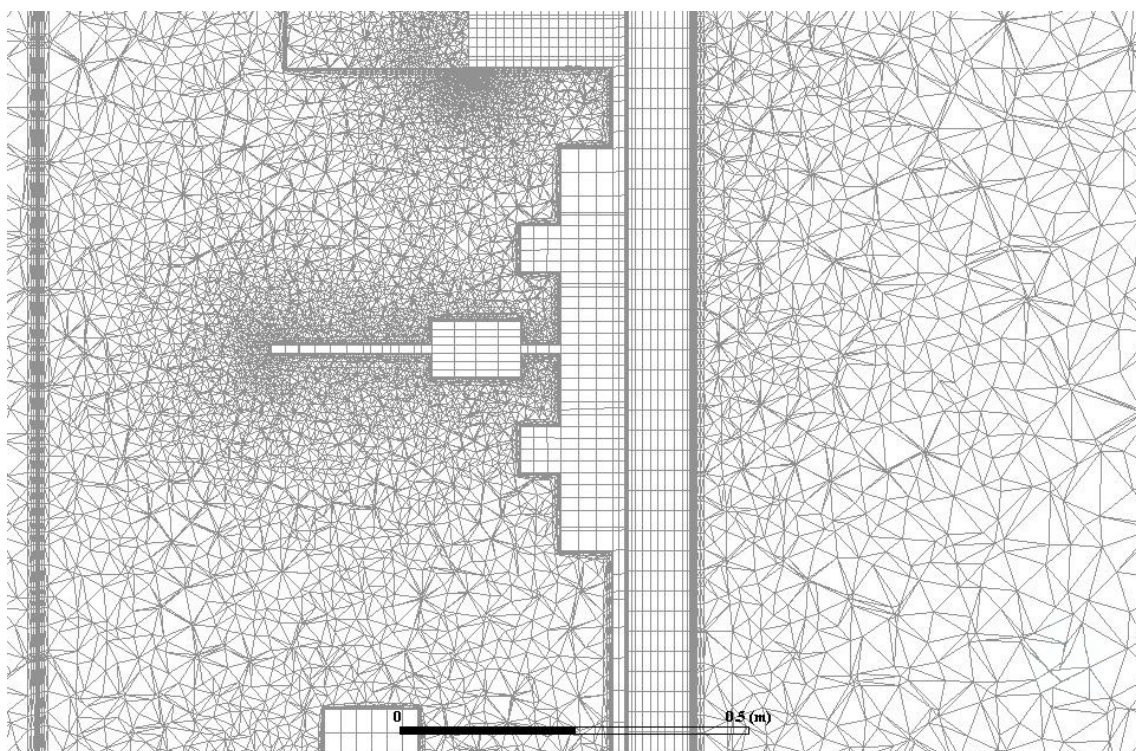


図 4.3.2.5b SVC 内パワーモジュール近傍のメッシュ図

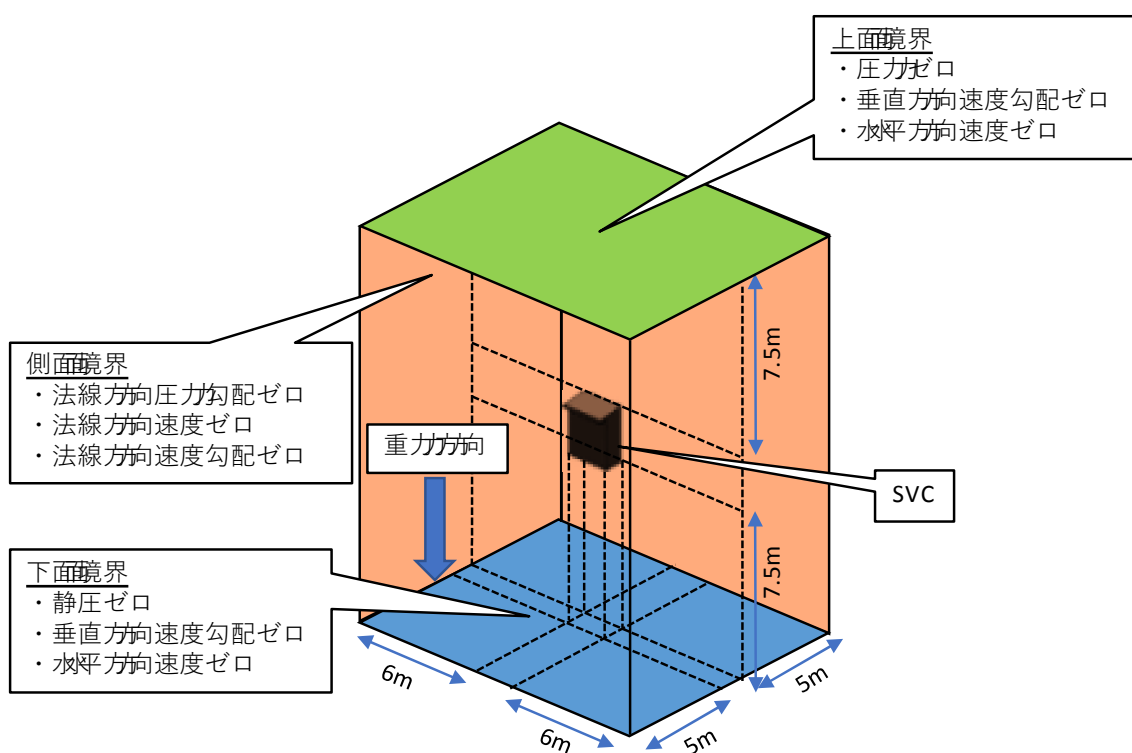


図 4.3.2.6 計算領域と境界条件

表 4.3.2.4 各部品の定格出力時の発熱量および耐熱温度

部品	パワー半導体	コンデンサ	リアクトル	小型変圧器	セラミックコンデンサ	全体
発熱量(W/個)	321	10	70	10	5	
個数	12	6	6	1	3	
総発熱量(W)	3852	60	420	10	15	4347
耐熱温度	150℃	50℃(使用温度)	150℃	50℃(使用温度)	150℃	

機器内においてはパワーモジュール、コンデンサ、リアクトル、小型変圧器、セラミックコンデンサから発熱すると仮定した。表 4.3.2.4 に各部品の発熱量及び耐熱温度を示す。パワーモジュールは縦 57mm×横 57mm×高さ 35mm の樹脂製の箱型構造を仮定した。モジュールは厚さ3mm の Cu 製ベースプレート上に取り付けられ、そのベースプレートがヒートシンクに接着されている。樹脂製箱内部には IGBT とダイオードが各 2 個ずつ納められている。SiC パワーモジュール 1 個当たりの発熱量を 321W とした⁴。なお、本発熱量のおおよその見積もりを付録 C に記載する。したがって、総発熱量は 3.85kW となる。モジュール下の Cu 製ベースプレートが均一に発熱、その総発熱量が一個あたりの発熱量に一致する設定で解析した。このときパワーモジュールを冷却するのに必要なヒートシンクの伝熱面積は、自然対流の熱伝達係数を 6W/m²/K とし、パワーモジュールの耐熱温度を 150℃、周囲温度を 30℃とすると、5.4m²となる。したがって、図 4.3.2.4b で示したモデルではほぼ伝熱面積が足りることとなる。他の電気部品については、それぞれ部品内部全体で均一に発熱するとし、各部品の発熱量が一個あたりの発熱量に一致するように与えた。耐熱温度は同種の市販部品で最高温度のもの、表示がない場合はその部品の上限使用温度とした。

数値解析では、固体内の熱伝導を含め、自然対流を考慮した空気の 3 次元流れを計算した。乱流モデルは $k-\epsilon$ Realizable モデルを用いた。自然対流は機器の発熱量が大きく、密度変化に対するブジネスク近似が適用できないことから、非圧縮性理想気体モデルを用いた。非圧縮性理想気体モデルは絶対的な基準圧力を設定し、密度は局所温度に反比例する形で求められる。ブジネスクモデルは気体の体積膨張率を一定とし、密度が温度変化に対して線形に変化することから、温度変化が大きくなると過度に密度変化を評価してしまう欠点がある。一方、非圧縮性理想気体モデルは基準温度の密度に対して反比例した形で密度を計算することから、密度変化を緩和した形で求めることができる。この密度変化を重力項に導入して計算した。数値計算手法は有限体積法である。

数値計算は PCS と同様に Fluent/ANSYS を使用して行った。計算機には HP WS Z840(64 bit) 2Intel Xeon CPU ES-2690v 32.6GHz を用いた。メモリ容量は 64GB である。計算時間は条件にもよるが、おおよそ 15 時間程度である。

(4)数値熱解析結果

SVC の冷却構造を検討するにあたり、フィン等の冷却効果を検証するための比較データとしてヒートシンクに冷却フィンを取り付けなかった場合について計算を行った。図 4.3.2.7a に正面側と背面側から見た SVC 内筐体内部品およびヒートシンクの表面温度分布を示す。図より発熱量の最も大きいパワーモジュール近辺を最高に垂直方向に向かって強い温度分布が、水平方向にゼロではないが比較的弱い温度分布が形成されている。内筐体全体は高熱伝導率を持つアルミで構成されているが、それでも垂直方向には 100℃以上の温度差がついている。横方向はパワーモジュールが横3列に並んでいることから、均一に近く発熱していることで分布が小さくなっている。全体的には放熱面積が不足していることが明らかで、冷却フィンが必要であることがわかる。なお、ヒートシンクの最高温度は約 220℃であり、その場所は後ほど詳細に説明するが、3 列に並んだパワーモジュール設置プレートの真ん中のプレートのパワーモジュール設置面となっている。

図 4.3.2.7b に自然対流で生じた流れの流跡線を示す。線の色はその場所での気体の速さを示している。図より、外筐体の前面にある吸入口で吸い込まれた空気が背面側を通り、ヒートシンクの熱で暖められて上昇し、上部の前後の通気口から排出される。一般に配管等空間内部にある空気が暖められた場合に生じる下から上への流れを煙突効果と呼ぶが、本計算でもその効果が認められる。この流れは暖められる側で流れが強くなることから、前面側の流れは弱く、背面側の流れが強くなっている。さらに背面側の空気の流れは一度絞られた状態になり、出口に向かって広がっていく。これは温度勾配が中心から外側に向かって形成され、結果的に中心部分の浮力が強くなって強い上昇気流が生じることによる。PCS の場合と同様、SVC においても冷却ファンを用いない自然空冷方式で冷却するばあいにはこの煙突効果と冷却フィンを上手に活用する必要がある。特に SVC は PCS と異なり、垂直方向に長い構造となっていることから冷却フィンの高さや長さ、フィンの間隔がフィン間の空気流れの抵抗つまり流速に直接関係する。結果的に冷却能力に影響を及ぼし、小型化を図る際にはもっとも重要なパラメータとなる。後述するが、空気絶縁型次世代電圧制御器の熱解析においてはフィン長さの影響について検討する。

図 4.3.2.7c に SVC 中央断面の温度分布と気体の速度ベクトルを示す。図 4.3.2.7a では電気部品を含めた機器構成部材の表面温度のみであったが、ここでは空気の温度分布についても示している。図より内筐体の内外で大きな空気の温度差が生じていることがわかる。ヒートシンク背面の空気温度がほとんど上昇していない。背面側に流れる空気によって内筐体内部はあまり冷却されず、内筐体の上面にある二つの通気口を通した換気によって熱を放熱している様子が理解できるが、基本的に伝熱面積が不足していることが明らかであり、内筐体内部に熱がこもった状態になっている。速度ベクトルについても内筐体の正面側と背面側で大きな速度の違いはなく、煙突効果が生じていることは観察されるが、それだけでは十分な冷却効果は上げられず、効果的にフィンを導入する必要があることがわかる。

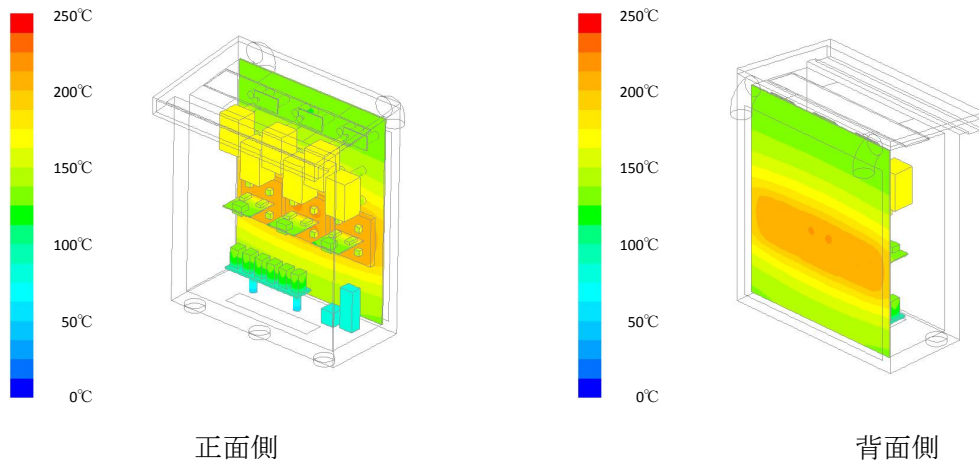


図 4.3.2.7a SVC の内筐体内部部品およびヒートシンクの表面温度分布(フィンがない場合)

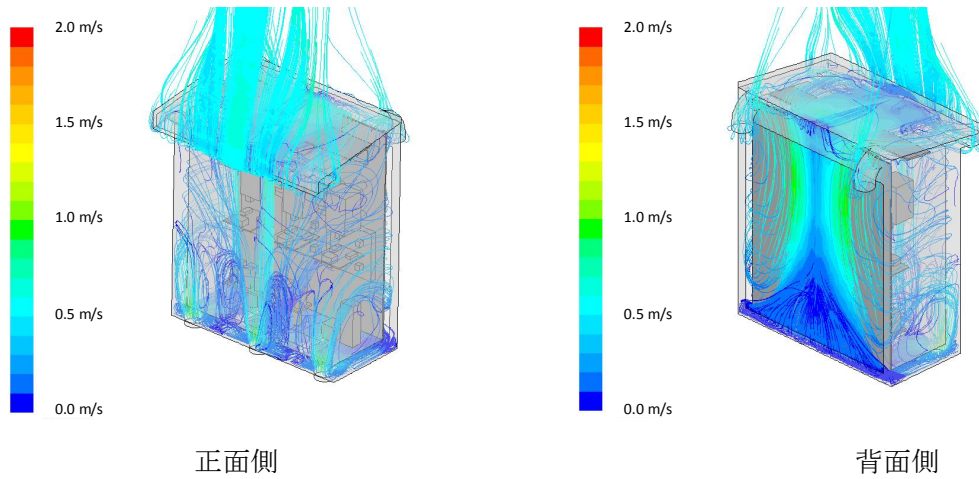


図 4.3.2.7b SVC 内を流れる空気の流跡線(フィンがない場合)

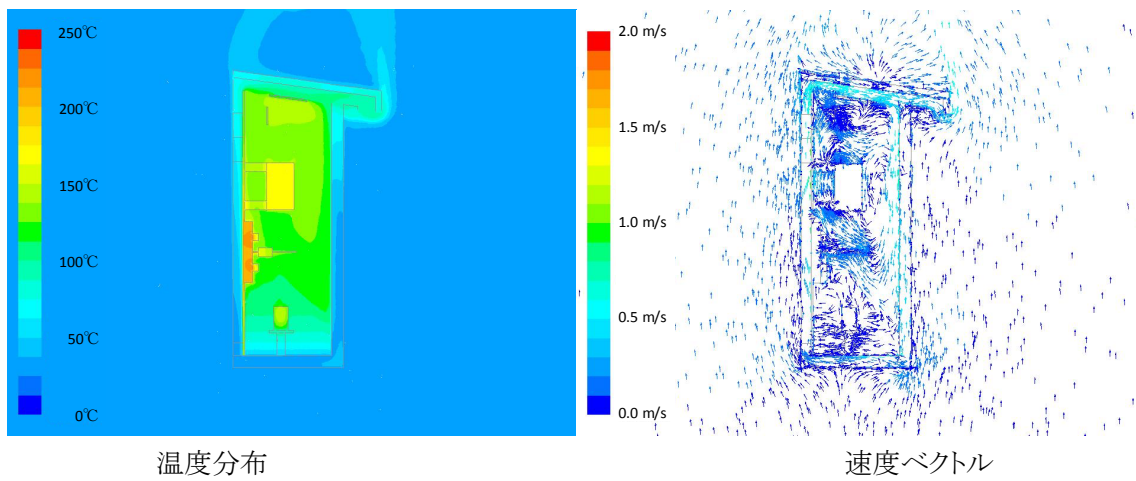


図 4.3.2.7c SVC 中央断面の温度分布と気体の速度ベクトル(フィンがない場合)

一方、リアクトル等の部品についても相当な高温となっていることがわかる。リアクトルやコンデンサについてはそれ自身発熱することからなんらかの冷却が必要であるが、他方で電気的な絶縁についても十分考慮する必要があることから、フィン等による冷却が難しい場合もあり、部品それぞれに対して個別に冷却方法を検討する必要がある。

これらの部品の冷却を検討する前に仮にパワーモジュールのみの発熱をゼロとした場合、すなわちそれぞれの部品の自己発熱のみでどの程度の温度まで上昇するかについて検討した。図 4.3.2.8 にパワーモジュールのみ発熱をゼロとした場合の SVC の内筐体内部部品およびヒートシンクの表面温度分布を示す。図に示されるようにリアクトルの温度が比較的高く、自己発熱のみで 100℃を超える温度となっている。リアクトルの耐熱温度は高いものでも安全性を考慮して 150℃程度であることから、周囲の発熱体からの熱を考慮すると自己発熱のみの状況で厳しい状態に至っている。リアクトルの電気的絶縁は筐体との間で取られることから碍子で支持する必要がある。碍子は通常エポキシ樹脂等の熱伝導率が低い材料で構成されており、それが放熱の悪い一つの原因となっている。内筐体内部は密閉状態に近く、空気の循環で放熱を促すことが構造上難しいことから、アルミの内筐体に効果的に熱を逃し、内筐体と外筐体の間を流れる空気で冷却する構造を検討する必要がある。また、筐体下部にある高圧コンデンサも比較的高い温度となっている。ただし、こちらについてはコンデンサ周囲温度が 50℃以下となっていることから、パワーモジュールの発熱が加わっても使用周囲温度以内に抑えられる可能性が十分ある。

ここでは冷却構造の効果を確認するために、①パワーモジュールが取り付けられたアルミベースプレートと同じ大きさの冷却フィンを取り付けた場合(フィン長さ等倍)、②冷却フィンを 3 倍に長くした場合(フィン長さ 3 倍)、③部品で最も高温となっているリアクトルの支持部品である碍子について、通常のエポキシ樹脂ではなく熱伝導率をアルミ程度まで向上させた材料で製作した場合(高熱伝導碍子の場合)について検討する。

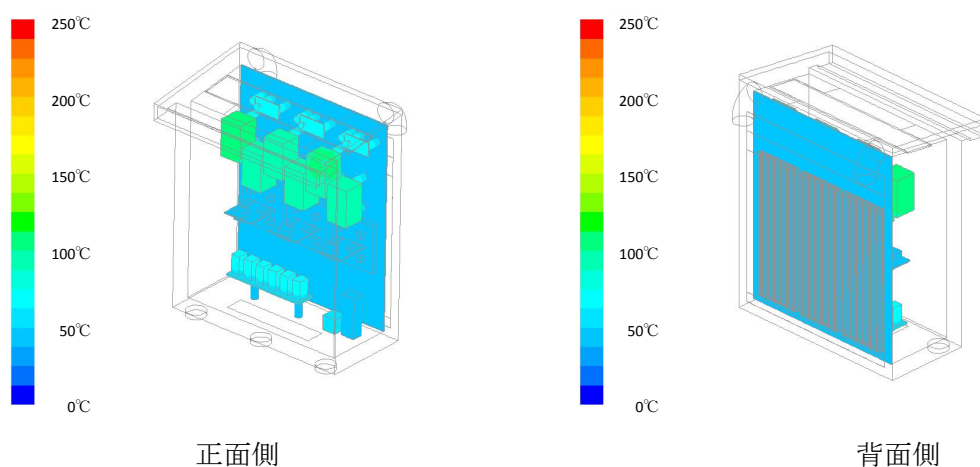


図 4.3.2.8 SVC の内筐体内部部品およびヒートシンクの表面温度分布(パワーモジュール発熱ゼロ)

①フィン長さ等倍の場合

図 4.3.2.9a に SVC の内筐体内部品およびヒートシンクの表面温度分布、図 4.3.2.9b に SVC 内を流れる空気の流跡線を示す。

図 4.3.2.9a に示されるように表面温度はフィンがない場合に比較して、パワーモジュール部において 50℃以上、他の部品においても 30℃程度の温度低下が見られ、フィンが効果的に内筐体内部の熱を放熱していることがわかる。特に直接フィンに接しているパワーモジュールの放熱効果が大きくなっている。パワーモジュールは耐熱温度の 150℃以下になっており、本計算で想定した SiC パワーモジュールの損失レベルであれば十分に放熱が可能であることがわかる。図 4.3.2.9b に示されるように煙突効果で生じた上昇気流がフィン外側ではフィンなしの場合と同様に偏りのある流れとなっているが、フィン上部に強い流れが生じていることからわかるようにフィン内部では偏ってはいるが空気がしっかりと流れ、効果的にパワーモジュールを冷却できている。一方、内筐体の前面側ではフィンのない場合と大きな流れの差はなく、圧倒的に空気は背面側を流れていることがわかる。つまり、前面側の流路は狭くしても大きな問題はないことがわかる。

図 4.3.2.9c に SVC 中央断面の温度分布と気体の速度ベクトルを示す。この図からは内筐体内部の空気の温度分布と流れがわかる。明らかにフィンがない場合に比べて空気温度が低下していることがわかる。具体的にはフィンがない場合には空気温度が 130℃程度まで上昇しているが、フィンがある場合には 100℃以下にまで低下している。部品等の自己発熱量は変化していないことから、この差はパワーモジュールの発熱がフィンを通じて内筐体外部に放熱されたことによる。一方で内筐体内部の空気の流れには大きな差は見られない。フィンがない場合と同様、上段や中段で内部循環するような弱い流れが生じているだけで、外部との熱交換にほとんど効果を及ぼしていないことがわかる。したがって、部品等の自己発熱に対する冷却を効果的に行うためには内筐体を構成するアルミ材に対して何らかの方法で熱伝導させる方法を工夫する必要がある。

次にパワーモジュール近傍の温度分布を詳しく見てみる。図 4.3.2.10 に SVC 中央断面のパワーモジュール近傍の温度分布を示す。図中、黒太線で示している銅プレートで一様に発熱している。図に示されるようにフィン周りには急峻な温度境界層が形成されていることがわかる。このときの熱伝達係数は周囲温度 35℃との平均温度差が 75℃程度であるとする、概算の平均熱伝達率は 10.1W/m²/K となっており、自然対流としては高い熱伝達率を示しており、伝熱面積としては依然足りないことがわかる。

一方、アルミヒートシンク及びフィン内部の温度分布はほとんど形成されずに比較的一様な温度となっているが、ややヒートシンクの上部に温度の高い領域が形成されており、パワーモジュールで発生した熱の広がり十分速やかではないことがわかる。これは SiC チップが小型であることが要因であり、本計算で想定しているレベルでの発熱であれば問題はないが、より小型で発熱量が同レベルの場合には発熱体近傍の熱の広がりが問題となる可能性がある。

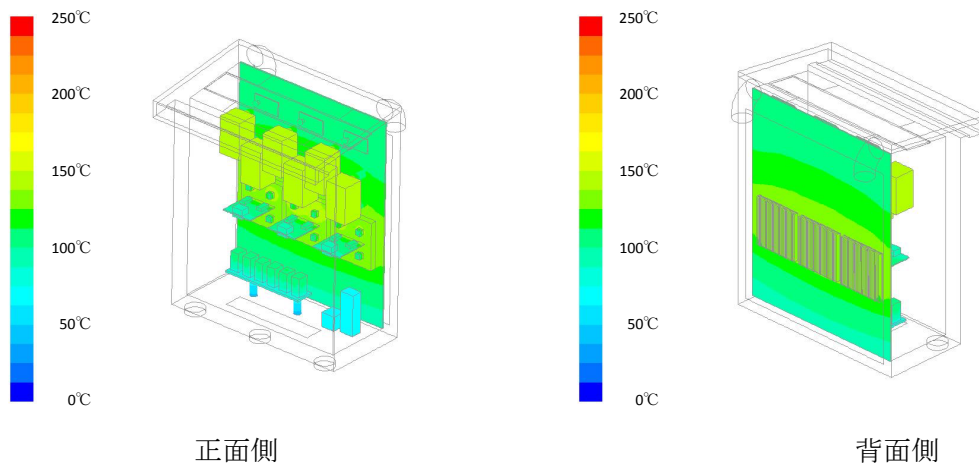


図 4.3.2.9a SVC の内筐体内部品およびヒートシンクの表面温度分布(フィン長さ等倍)

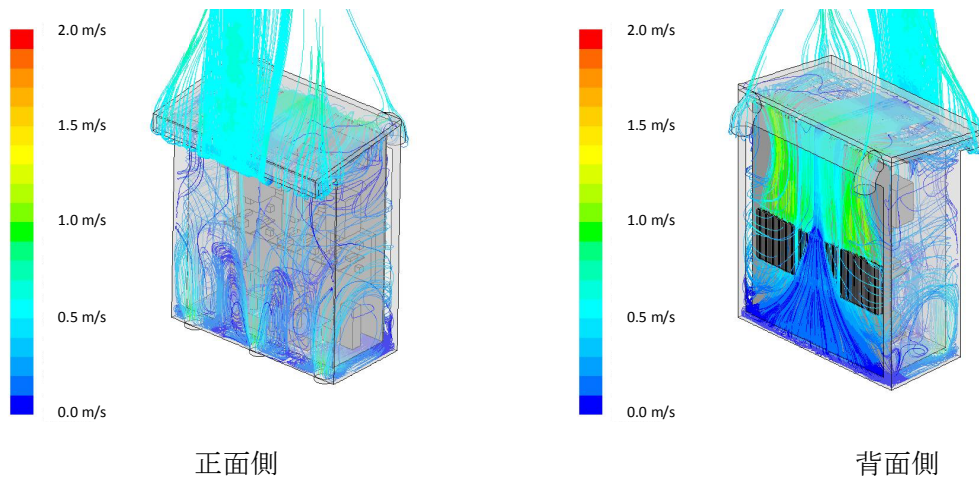


図 4.3.2.9b SVC 内を流れる空気の流跡線(フィン長さ等倍)

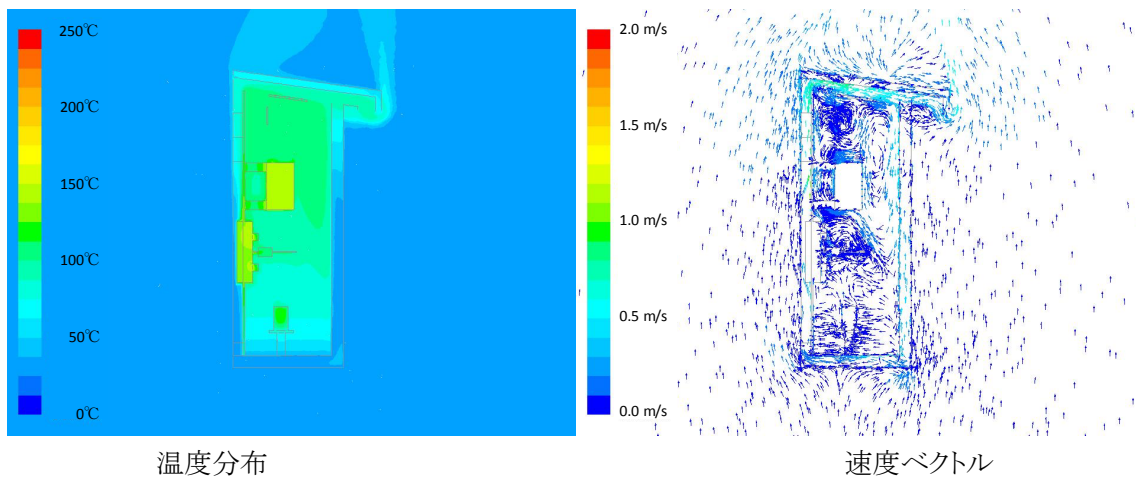


図 4.3.2.9c SVC 中央断面の温度分布と気体の速度ベクトル(フィン長さ等倍)

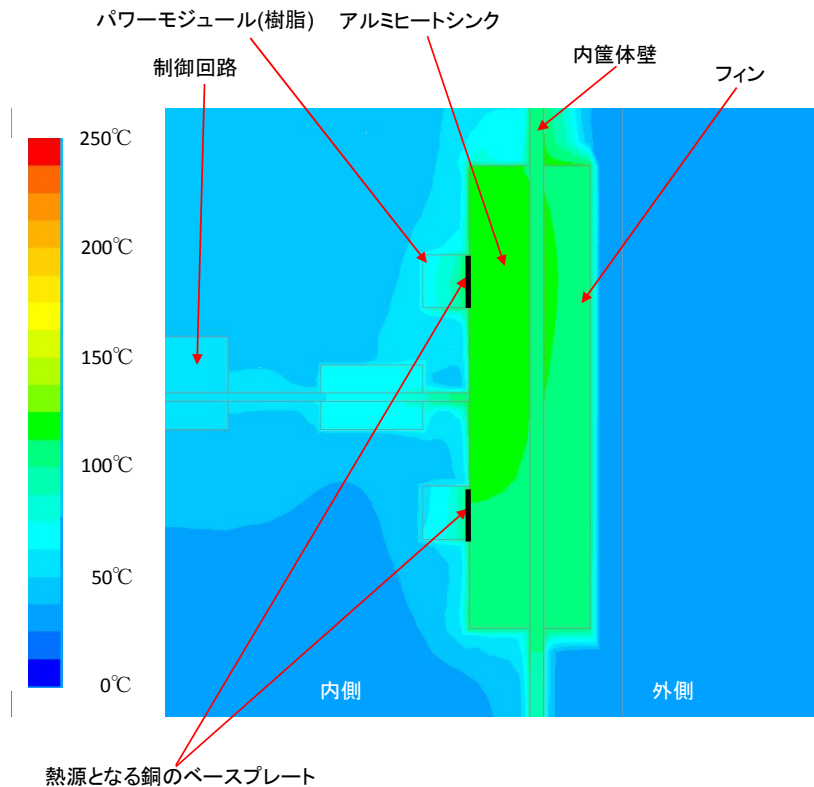


図 4.3.2.10 SVC 中央断面のパワーモジュール近傍の温度分布（フィン長さ等倍）

②フィン長さ3倍の場合

ここではフィン長さを3倍にした場合の効果について検討する。図 4.3.2.11a に SVC の内管体内部品およびヒートシンクの表面温度分布、図 4.3.2.11b に SVC 内を流れる空気の流跡線を示す。図に示されるようにヒートシンクを延長することで、内管体下部での冷却効果が上がっていることがわかる。内管体下部の冷却効果を高めることで、高圧コンデンサや電源用小型変圧器の温度が低下している。SVC 内を流れる空気についてはフィン内部の流れに違いが現れている。フィン長さが等倍の場合にはフィン上部に強い偏った流れが観察されるが、フィン長さが3倍の場合にはフィン上部にそれほど強い流れが生じておらず、全体にゆるやかな流れで比較的全てのフィンで均等に冷却効果が得られており、フィン長さを3倍にする効果が現れている。

図 4.3.2.11c に SVC 中央断面の温度分布と気体の速度ベクトルを示す。部品等の表面温度と同様に内管体下部の空気温度が大きく低下しており、部品への熱的負担を下げていることがわかる。全体としては伝熱面積が3倍に増加することで平均熱伝達率は低下している。概算では、 $4.2 \text{ W/m}^2/\text{K}$ となっており、自然対流としてはやや低い熱伝達率を示しており、定量的にも十分な伝熱面積が確保されていることがわかる。それでも上部にあるリアクトルの冷却についてはまだ不十分であり、その対策が必要である。

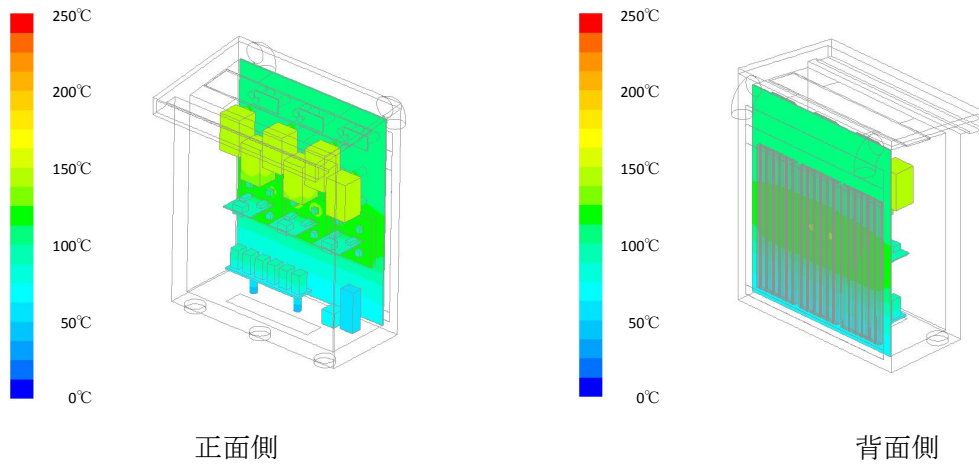


図 4.3.2.11a SVC の内筐体内部品およびヒートシンクの表面温度分布(フィン長さ3倍)

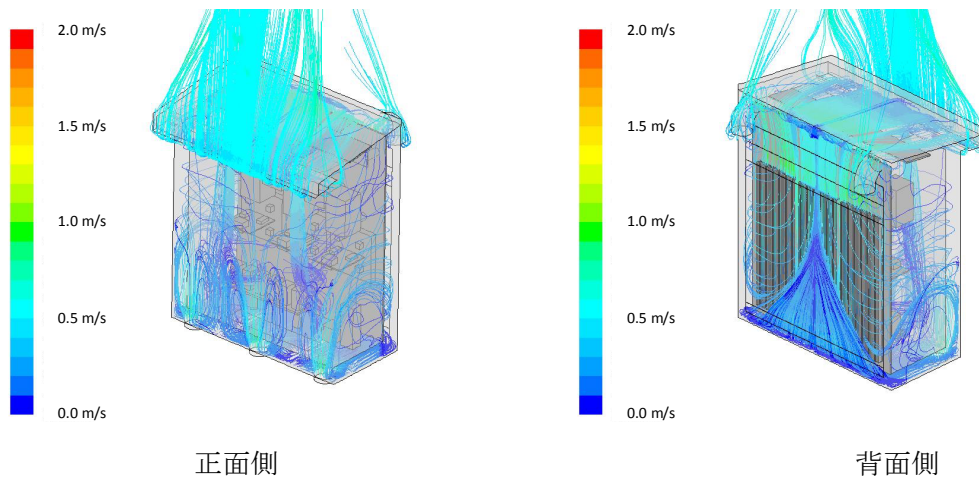


図 4.3.2.11b SVC 内を流れる空気の流跡線(フィン長さ3倍)

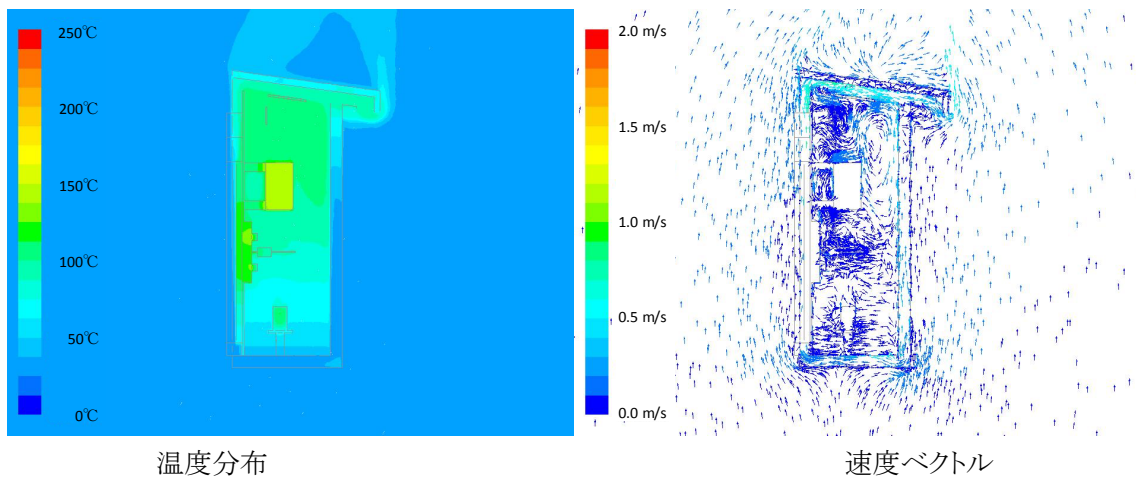


図 4.3.2.11c SVC 中央断面の温度分布と気体の速度ベクトル(フィン長さ3倍)

③高熱伝導碍子の場合

これまでの議論よりパワーモジュールに対して十分なフィン長を確保した場合、内筐体下部の部品に対しては熱負荷を下げることは可能であるが、上部にある部品の温度は依然として高い状況であり、対策が必要である。ここではリアクトルの支持部品である碍子について、エポキシ樹脂ではなく、熱伝導率をアルミ程度まで向上させた材料で製作した場合について検討する。

図 4.3.2.12a に SVC の内筐体内部部品およびヒートシンクの表面温度分布、図 4.3.2.12b に SVC 内を流れる空気の流跡線を示す。ただし、フィンの長さは3倍としている。図 4.3.2.12a より劇的というほどではないが、リアクトルの表面温度が 10℃以上低下していることがわかる。その際、リアクトルの発熱量はパワーモジュールの発熱量に比較すれば小さいことから、アルミ内筐体やヒートシンクフィンの温度の上昇や図 4.3.2.12b より空気の流れ方にも違いはほとんど見られず、全体としての冷却能力としては全く問題がないことがわかる。

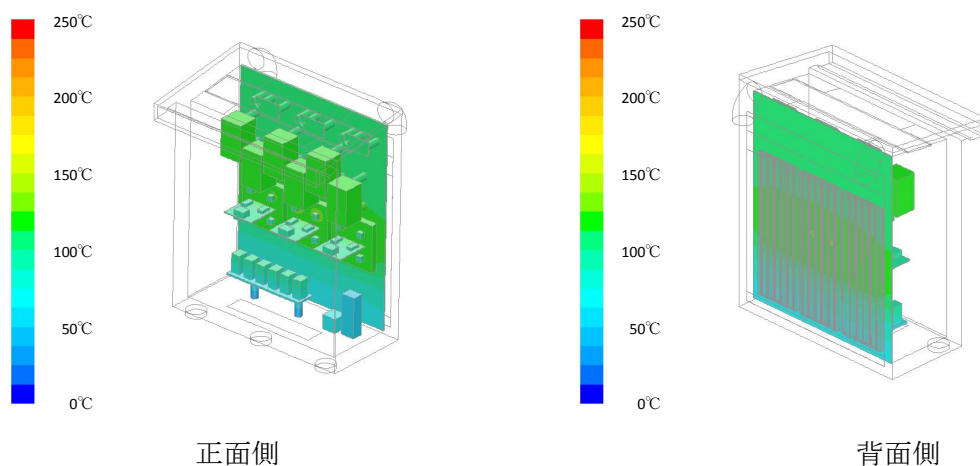


図 4.3.2.12a SVC の内筐体内部部品およびヒートシンクの表面温度分布(高熱伝導碍子)

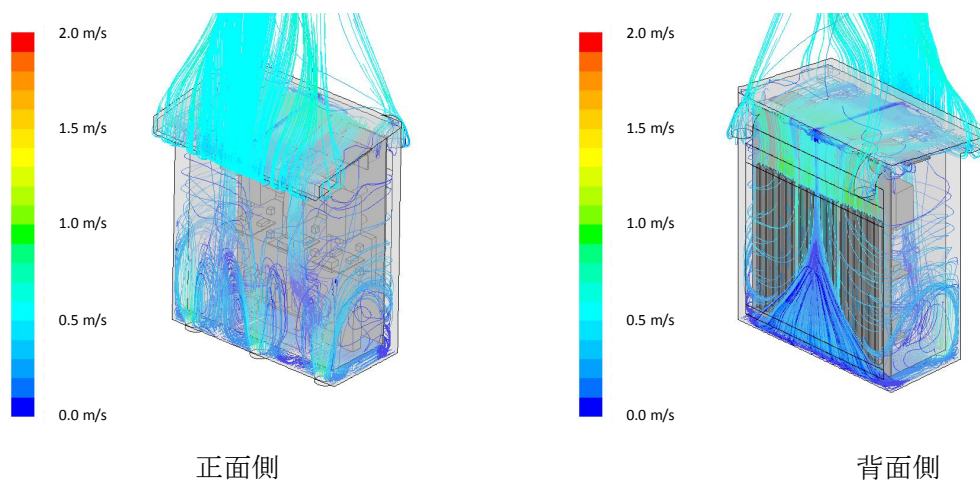


図 4.3.2.12b SVC 内を流れる空気の流跡線(高熱伝導碍子)

(5)まとめ

図 4.3.2.13 に冷却手法の違いによる各部品の最高温度を示す。図中の目標温度は各部品の耐熱温度を示し、これは部品に含まれる材料や接着剤等の耐熱性で決められるものでこの温度以下で運転をすることが必要である。一方、使用周囲温度はこの温度以下の環境で使用されることが望まれる目標値を示しており、部品の耐熱温度を示すものではない。耐熱性で言えば、この温度を超えても十分運転可能であるが、超える温度幅が高いほど部品の寿命が短くなる。

ヒートシンクにフィンを取り付けることで温度上昇が大幅に抑えられる。特にパワーモジュールの温度低下に効果があり、パワーモジュールの大きさに比べて同等の大きさからさらに3倍に大きくした場合は、フィンの有無の場合に比べては小さいが、耐熱温度の目標値からさらに低下させることにおいては効果がある。一方、部品に対してはフィンの効果は限られる。部品の自己発熱のみで相当な温度上昇がある上、電気絶縁を考慮すると熱伝導性の高い碍子等が使えないことから放熱が難しい。仮に碍子の熱伝導率を大きくすることができたならば、各部品の最高温度を下げるのが可能となる。その他には内筐体内部の空気の流れを生成することができれば、放熱にも効果があると思われる。これについては 4.3.2.2 節で検討する。

以上の結果から、次節で実施する小型化電圧制御器の解析では、フィンの長さをパワーモジュールプレートの3倍の長さとした上で、さらに冷却対策を施していくこととする。

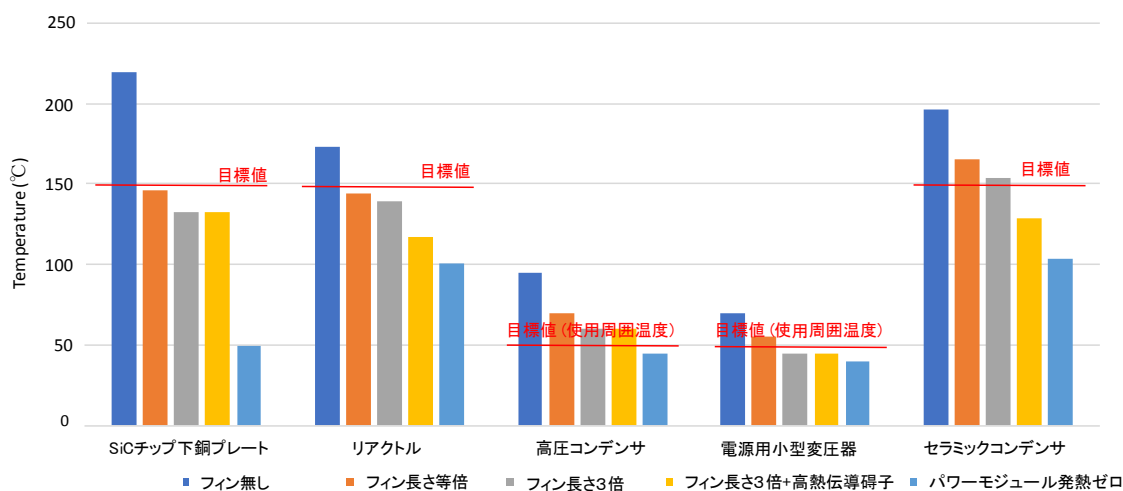


図 4.3.2.13 冷却手法の違いによる各部品の最高温度

4.3.2.2 モールド化小型次世代電圧制御器の熱解析

(1)構造設計

4.3.2.1 節では空気絶縁型の電圧制御器について検討し、フィンの長さ等を適切にすればモジュール及び部品等に対する熱的な負担を十分軽減できることがわかった。ここでは内部の部品をモールド化することで幅 1.3m×奥行き 1m×高さ 2.5m 以内の大きさに納めることを目指し、同時に熱流体解析を行い、熱的な問題が生じないための工夫も行う。

図 4.3.2.14 に高圧コンデンサをモールド化した電圧制御器の構造設計概略図を示す。小型化、モールド化することで熱的な負担は増加する。最近では高耐熱のモールド材が開発されているが⁵、可能な限り放熱面積を増加させるためにコの字型の各面にパワーモジュールを設置する等の工夫を行った。6個の高圧コンデンサは2個ずつモールド化し、ポリエチレン製の容器に納めて電気的な絶縁を確保した。図 4.3.2.15 にモールド化コンデンサ及び容器の構造設計図を示す。図に示すようにモールド化することで、これまでコンデンサ間距離を 70mm ほど確保する必要があったところ、30mm まで近づけることが可能となり、小型化した内筐体の空間にうまく納めることが可能となった。結果的に、電気的絶縁は確保した状態で横幅が 1.3m、奥行きが 1m、高さが 2.5m 以内とすることができた。重量についてはさらに軽量化されて 850kg 程度となった。表 4.3.2.5 に筐体および部品の材料、個数および重量を示す。

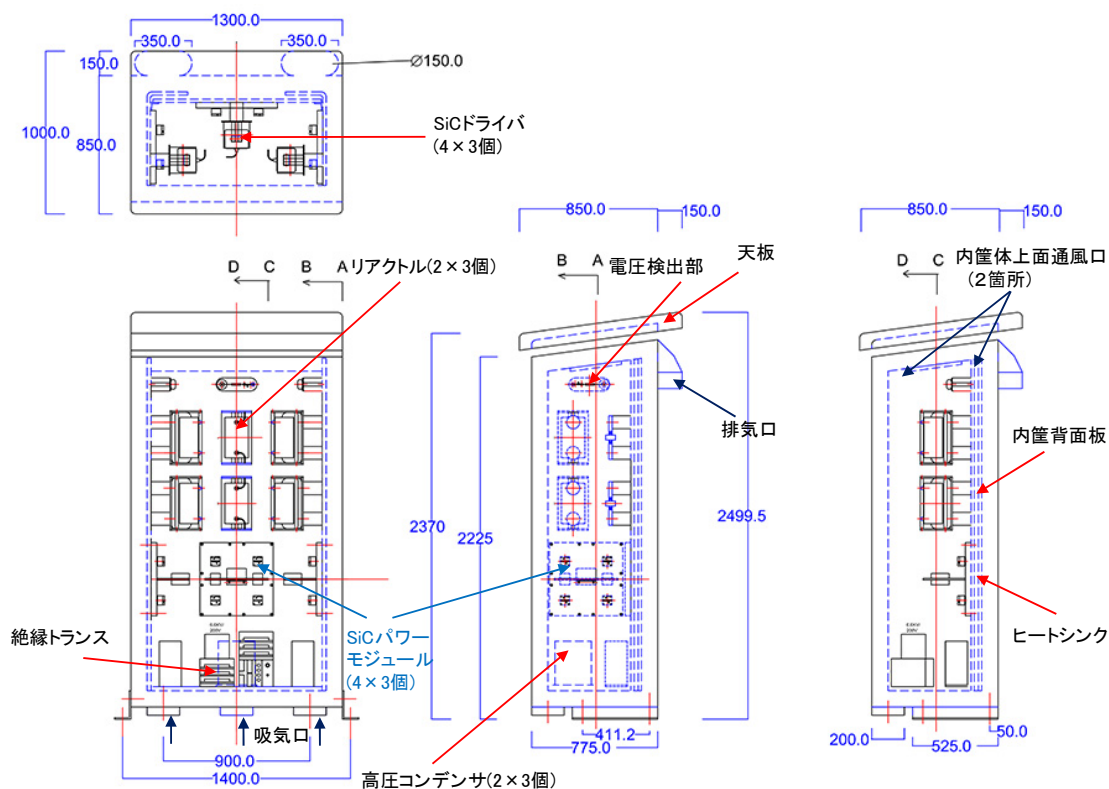


図 4.3.2.14 モールド化小型次世代電圧制御器の構造設計概略図

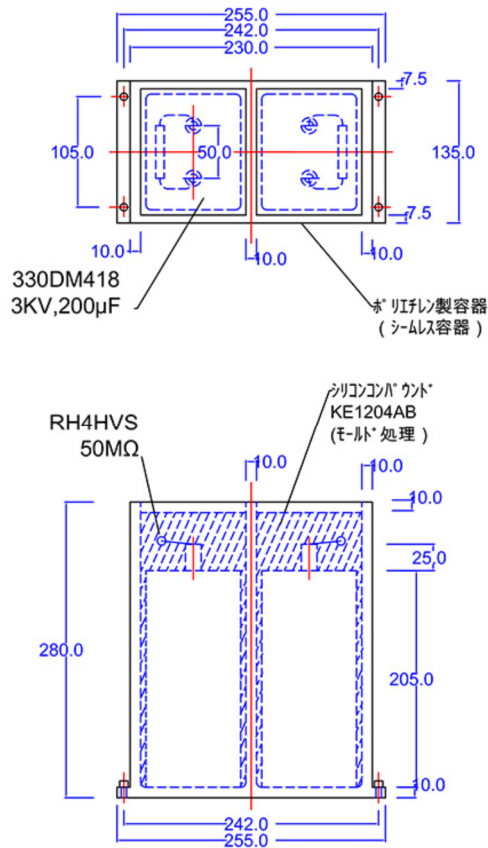


図 4.3.2.15 モールド化コンデンサ及び容器の構造設計図

表 4.3.2.5 各筐体および各部品 material、大きさ、個数および重量

	材質	密度 (kg/m ³)	個数	重量 (kg/個)	総重量 (kg)
外部筐体(全体)	鋼板	7850	1	307.0	306.7
ヒートシンク	アルミ	2710	3	20.3	61.0
内部筐体(全体)	アルミ	2710	1	251.0	251.0
リアクトル	鉄、銅他	8030	6	32.0	192.0
コンデンサ	絶縁油他	900	6	2.4	14.4
絶縁トランス	鉄、銅他	8030	1	9.5	9.5
碍子	エポキシ樹脂他	940	34	0.4	13.6
合計					<u>848.1</u>

(2) 小型化 SVC 詳細熱解析のための予備解析

ヒートシンク形状や内外筐体の通風口の配置等の詳細設計を行う前に、FlowDesigner を用いて SVC の最適な冷却構造を予備的に検討した。

FlowDesigner は扱える流体が「非圧縮性流体」に限定され、ブジネスク近似以外で自然対流を扱えない、扱えるメッシュが「直交系構造格子」に限定されている等、本解析で扱う SVC のような複雑な構造や温度変化の大きな流れには不向きな部分があるが、シンプルな解析手法であることから計算速度も速い。さらに、通常の流体計算ソフトでは開口部等の形状や位置の最適化を行う場合にはパラメータ(開口部のサイズ、位置、風速等)をマニュアルで変えながら計算を繰り返し、その結果から感度解析を行う必要があるが、FlowDesigner は逆解析(ノンパラメトリック感度解析)機能を搭載しており、定常解に対してのみであるがパラメータスタディをせずに改善すべきパラメータの感度を解析できる。具体的には、ノンパラメトリック感度解析では、得られた支配方程式の解析結果をもとに因果律を反転させる。すなわち、目標値と実際の結果との差分情報を目標部分から発生させ、因果律を反転させた支配方程式を解くことによって、その差分の影響が境界条件にどのように反映されるかを調べる。これによって目標値を敏感に変化させる条件が明らかとなる。

この手法を用いてここでは外筐体の開口部位置、パワーモジュール部と部品間の仕切り板の挿入有無等の形状的な影響を検討し、最終的に ANSYS/FLUENT で実施する詳細熱解析のための冷却設計を行う。

図 4.3.2.16 に FlowDesigner で解析した簡易モデルを示す。表 4.3.2.6 に解析するために設定した各部品の材質、発熱量および熱物性値を記した。

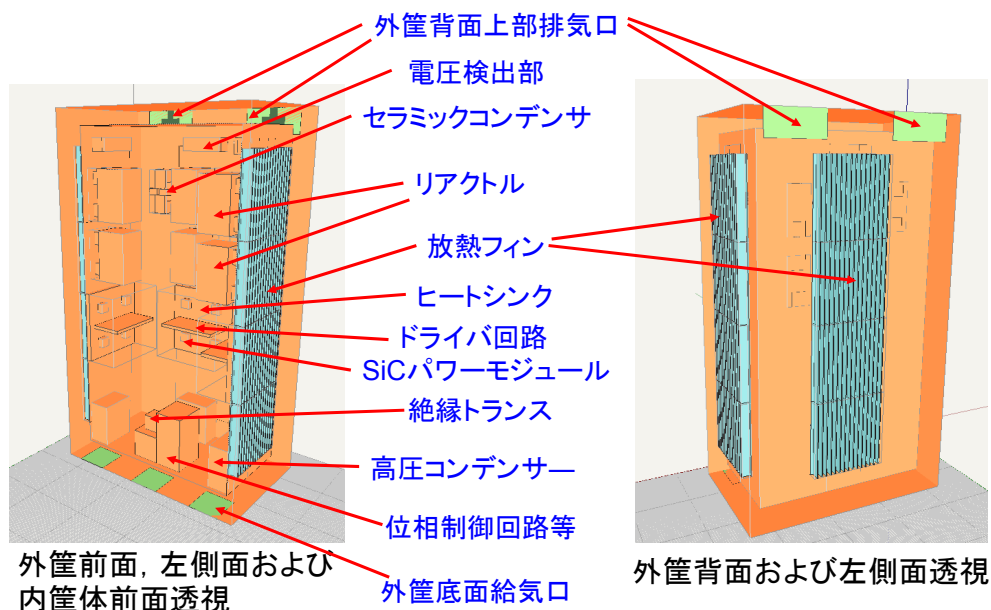


図 4.3.2.16 FlowDesigner 解析用簡易モデル

表 4.3.2.6 各 부품の材質、発熱量および熱物性値

名称	材質	数量	発熱量 [W]	密度 [kg/m ³]	比熱 [J/(kg・K)]	熱伝導率 [W/(m・K)]
セラミックコンデンサ	セラミック	6	5	3890	779	36.00
セラミックコンデンサ部基板	ガラスエポキシ	3	0	1470	795	0.80
ドライバ	層プリント基板 FR4	3	0	2000	1000	9.00
パワーモジュール	シリコーンゲル	12	321	970	1510	0.15
放熱フィン	アルミニウム	180	0	2710	904	222.00
放熱フィンベース	アルミニウム	12	0	2710	904	222.00
ベースプレート	アルミニウム	3	0	2710	904	222.00
リアクトル	ガラスエポキシ	6	70	1470	795	0.80
碍子	エポキシ樹脂	18	0	950	2100	0.41
回路部	ガラスエポキシ	2	0	1470	795	0.80
絶縁トランス	鉄他	1	10	900	1600	0.15
電圧検出部基板	ガラスエポキシ	3	0	1470	795	0.80
高圧コンデンサモールド材	シリコーンゲル	6	0	970	1510	0.15
高圧コンデンサ	絶縁油(追加)	6	10	900	1600	0.15
高圧コンデンサ外装	ポリエチレン	3	0	950	2100	0.41

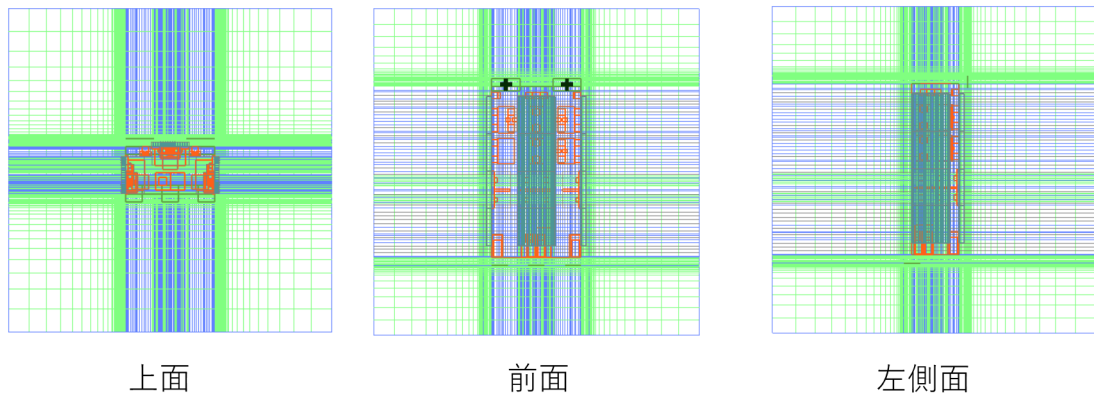


図 4.3.2.17 FlowDesigner 解析用メッシュ

図 4.3.2.17 に FlowDesigner 解析用メッシュを示す。解析空間は 4m×4m×4m であり、不均一直交メッシュで構成されている。それぞれの格子数は 239×203×164 であり、総要素数は 7,956,788 である。

気流解析は周囲温度 40°C、部品等からの発熱は一定とした条件下で定常解析を行った。乱流解析には高レイノルズ数型/ $k-\epsilon$ 乱流モデルを採用し、完全な無風状態での不安定性を避けるために外気風速を右側面側より風速 0.1m/s で与えた。なお、空気の密度は 1.13 kg m^{-3} 、粘性係数は $1.98 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、比熱は $1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 、熱伝導率は $0.0262 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 、体膨張率は 0.0034 K^{-1} とした。自然対流はブジネスク近似で密度変化を評価し、N-S 方程式における重力項として与えた。

[1]内筐体完全密閉－外筐体通風口位置初期案－放熱フィンなしの場合

図 4.3.2.18 に内筐体を完全密閉し、かつ放熱フィンがない場合の SVC の内部部品の表面温度分布を示す。外筐体の通風口は図 4.3.2.16 に示す通り前方の3箇所を設定した。計算結果によれば、それぞれの部品の最高温度はパワーモジュールが 263.2°C、リアクトルが 155.0°C、セラミックコンデンサが 146.4°C、高圧コンデンサが 130.4°C、絶縁トランスが 160.6°Cとなっている。本解析では空気は非圧縮を仮定しているが、パワーモジュール近傍では温度が 200°Cをはるかに越えており、高温部では密度一定の仮定は破綻している。したがって、本結果の定量性については疑問が残るが、冷却へのさまざまな工夫に対する効果の比較対象としては用いることができると考え、密度一定の仮定のまま取り扱うこととする。今後、内筐体及び外筐体に通気口や仕切り板を導入し、その適切な位置や効果を検討するが、本計算はそのベースとして比較検討されるものとなる。

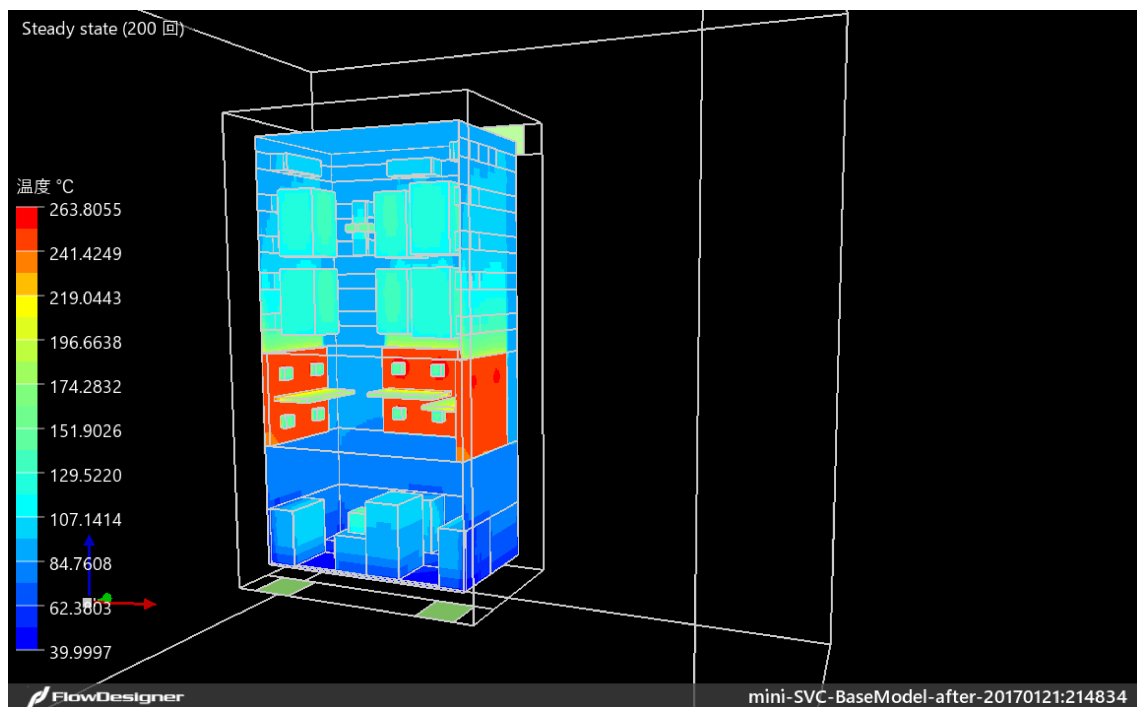


図 4.3.2.18 SVC の内筐体内部部品の表面温度分布
(内筐体完全密閉－外筐体通風口位置初期案－放熱フィンなしの場合)

[2]内筐体天面開口－外筐体底面全面疑似密閉－背面と側面に放熱フィンを取り付けた場合

図 4.3.2.19 に内筐体の天面を開口し、外筐体底面全面疑似密閉した上で、背面と側面に放熱フィンを取り付けた場合の SVC の内部部品表面温度分布を示す。内筐体の天面の通風口は図 4.3.2.14 に示す通り前方と後方の2箇所を設定した。計算結果によれば、それぞれの部品の最高温度はパワーモジュールが 167.6℃、リアクトルが 146.0℃、セラミックコンデンサが 135.1℃、高圧コンデンサが 138.6℃、絶縁トランスが 149.2℃となっている。フィンを取り付けた効果によりパワーモジュールが 167.6℃において大きな温度低下が見られる一方、リアクトルやセラミックコンデンサでの温度低下は小さい。本計算の場合には外筐体底面を全面において疑似的に密閉していることから外気が導入されず、フィンが取り付けられていても外筐体の外に放熱する力は小さい。結果的にはフィンを取り付けたことで内筐体全体に熱が拡散し、最高温度は下がる一方で高温部領域が広がっている。これにより高圧コンデンサの温度は上昇している。

次にこの解析結果に対して、本ソフトウェアの特徴のひとつである逆解析(ノンパラメトリック感度解析)機能を施してみる。図 4.3.2.20 に内筐体天面開口－外筐体底面全面疑似密閉の解析結果に対して逆解析結果を示す。逆解析の手法は次の通りである。パワーモジュールのベースプレートとリアクトルの目標温度を 100℃と設定する。逆解析によってこの目標値に近くするための壁の流入条件の感度分布を計算する。プラスの感度は流入することで目標値に近づく感度を持っており、マイナス

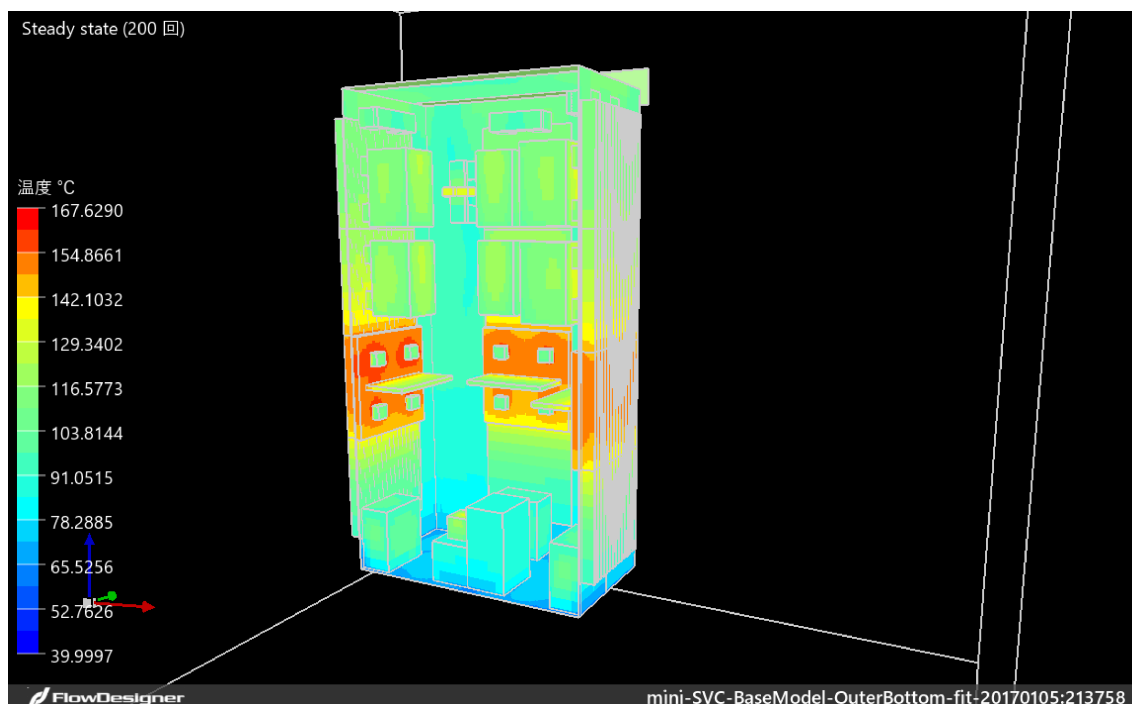


図 4.3.2.19 SVC の内筐体内部品の表面温度分布

(内筐体天面開口－外筐体底面全面疑似密閉－背面と側面に放熱フィンを取り付けた場合)

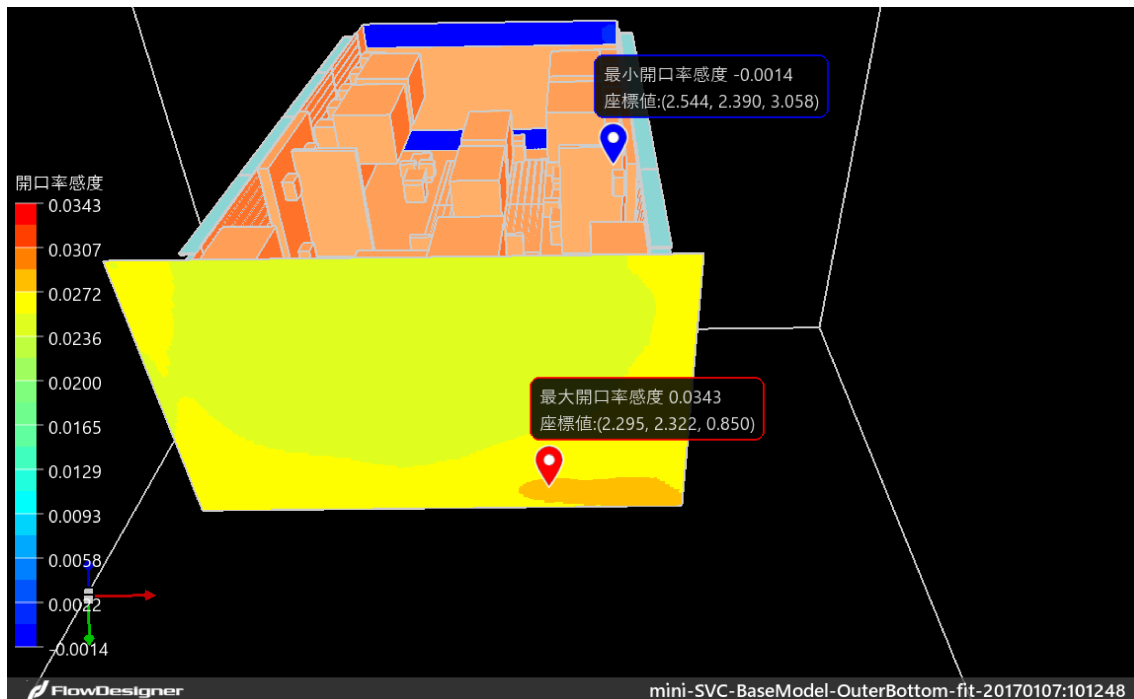


図 4.3.2.20 SVC の内筐体内部品の表面温度分布
(図 4.3.2.19 の結果に対する逆解析)

の感度はその逆である。色は感度の強弱を表している。図 4.3.2.20 に示されるように底面の外縁周辺領域が強い感度を示しており、開口部として効果が高いことを示している。本最初の解析で前面側に 3 箇所の通風口を設けて計算を行ったが、後方側あるいは側方側に通気口を設けた方がより効果が高いことがわかる。一方、天面を開口する効果は小さいことがわかる。なお、この結果は相対的に効果が高いことを意味しているだけで、これによって目標が達成できることを意味しているわけではないことには注意を要する。

[3]内筐天面開口ー外筐底面開口部設定ー背面と側面に放熱フィンを取り付けた場合

[2]の逆解析結果の効果を確認するために外筐体の外縁周辺領域を開口した場合の計算を行った。図 4.3.2.21 に内筐体の天面を開口し、外筐体底面外縁部を開口した上で、背面と側面に放熱フィンを取り付けた場合の SVC の内部部品の表面温度分布を示す。計算結果によれば、それぞれの部品の最高温度はパワーモジュールが 141.0℃、リアクトルが 135.1℃、セラミックコンデンサが 127.7℃、高圧コンデンサが 119.9℃、絶縁トランスが 138.7℃となっており、ベースケースの場合に比べてパワーモジュール温度は 120℃程度低下させることができている。他の部品については 10℃～30℃程度の温度低下を達成できているが、パワーモジュールの温度低下に比較するとその低下量は少なくなっており、さらなる工夫が必要である。

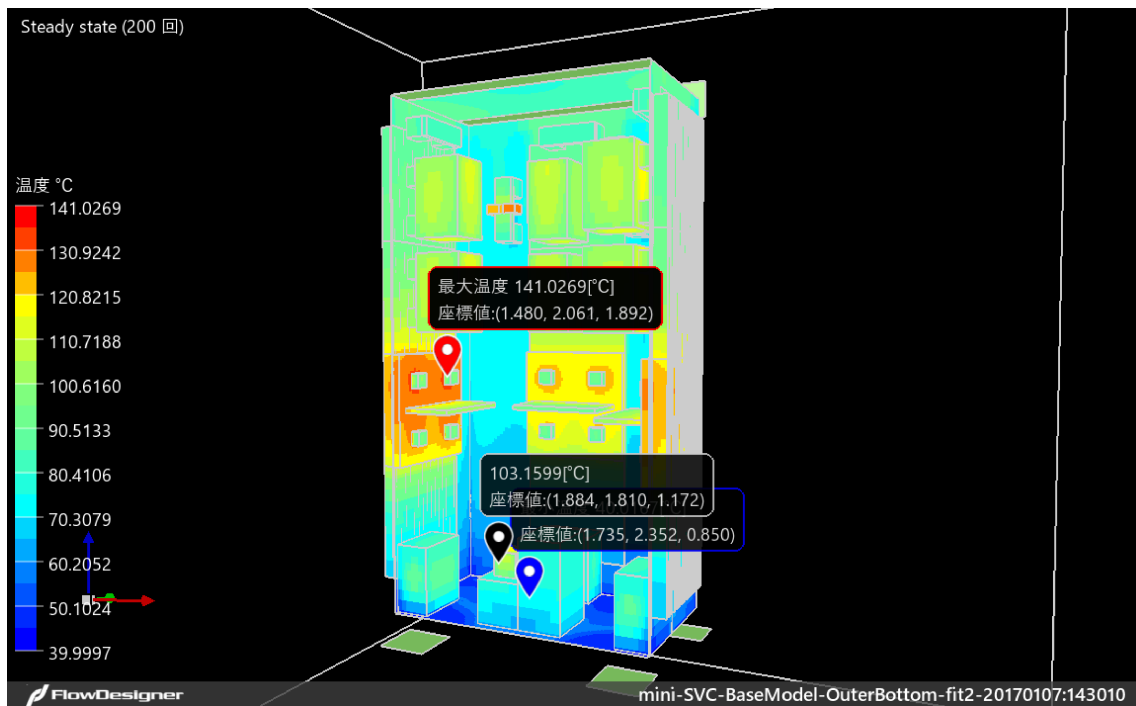


図 4.3.2.21 SVC の内筐体内部品の表面温度分布
(内筐体天面開口ー外筐体底面外縁部開口ー背面と側面に放熱フィンを取り付けた場合)

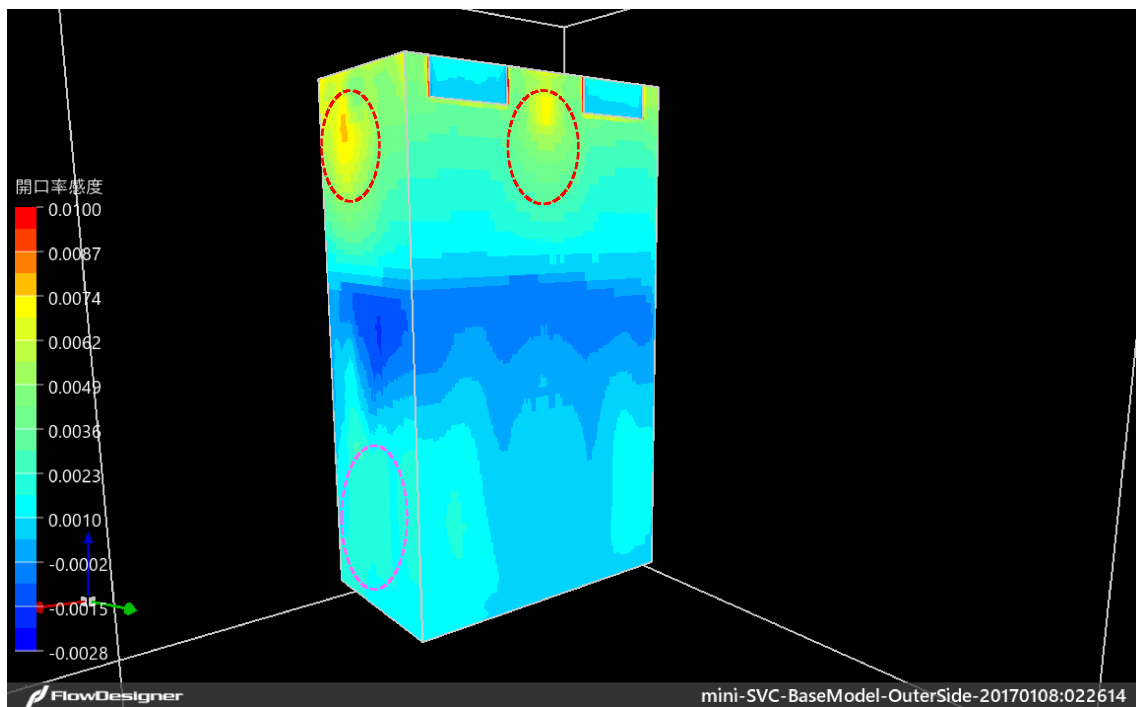


図 4.3.2.22 SVC の内筐体内部品の表面温度分布
(図 4.3.2.21 の結果に対する逆解析)

次に外筐体の背面および側面に開口部を設けた場合の効果について検討する。ここでは、内筐体天面を開口し、外筐体底面の開口部を修正した上で開口した時に、外筐体背面および側面の開口率に対する逆解析を行った。図 4.3.2.22 に図 4.3.2.21 の結果に対する逆解析結果を示す。目標温度は、前解析と同様にパワーモジュールのベースプレートとリアクトルの目標温度を 100℃と設定している。図 4.3.2.22 に示されるように外筐体の排出口は側面、背面それぞれに設けた方が、背面に2箇所設置の現状位置よりは効果がある。もともとパワーモジュールは側面、背面に設置していることから、気流がストレートに排出口から出るように設定するのが良いという自然な結果となっている。しかし感度そのものは小さいことから、今回は排出口の位置は変更しないこととする。

さらに内筐体上部の温度が高いことに対する対策として、内筐体の前面を開口させることの効果について検討する。ここでは、内筐体天面と外筐体底面を開口した際の内筐体の前面開口率に対する逆解析を行った。図 4.3.2.23 に逆解析結果を示す。目標温度は図 4.3.2.22 の場合と同様である。図に示されるように前面開口に対する感度は比較的大きく、中段のやや上部あたりに通気口を設けることが効果的であることがわかる。リアクトルの温度低下を目標に設定していることから、この結果は自然であり、解析結果もそのことを示している。しかし、ここで注意しなければならないのは感度が大きいことが必ずしも目標値に大きく近づくことを保証しているわけではなく、この結果を用いた順解析を行ってその効果を確認する必要がある。

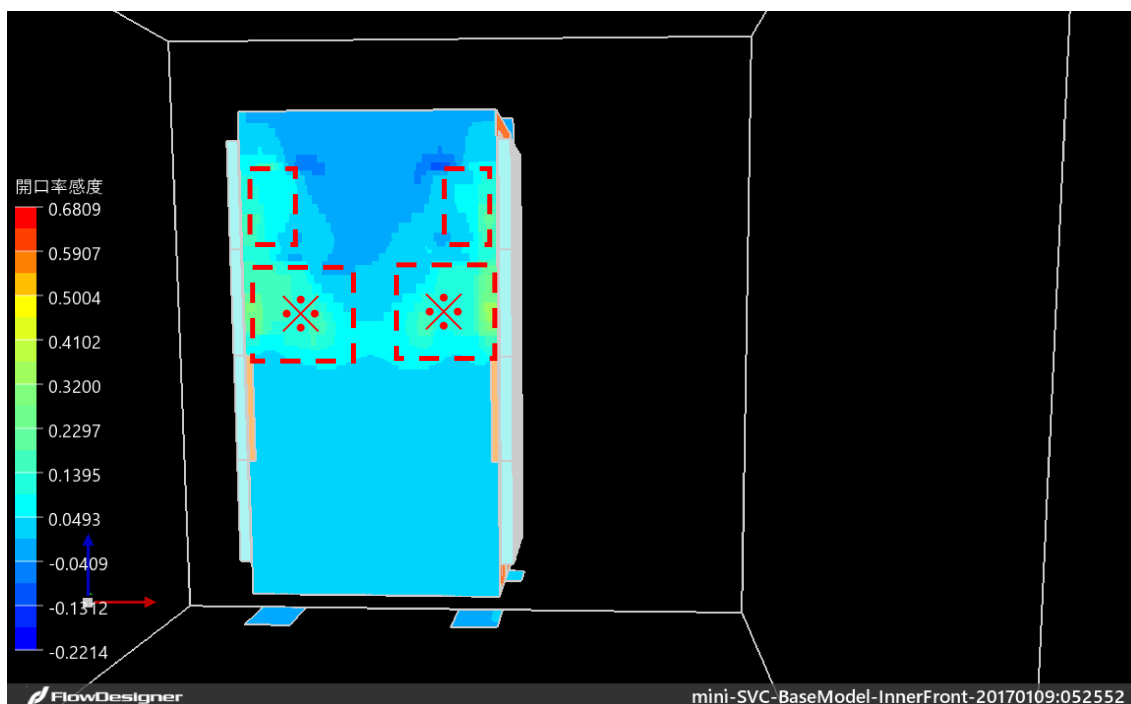


図 4.3.2.23 SVC の内筐体内部品の表面温度分布
(図 4.3.2.21 の結果の内筐体の前面開口率に対する逆解析)

[4]外筐底面開口ー内筐前面開口した場合

[3]の逆解析結果の効果を確認するために内筐体前面の中段あたりを開口した場合の計算を行った。図 4.3.2.24 に SVC の内部部品の表面温度分布を示す。計算結果によれば、それぞれの部品の最高温度はパワーモジュールが 137.2℃、リアクトルが 126.3℃、セラミックコンデンサが 114.4℃、高圧コンデンサが 114.0℃、絶縁トランスが 128.5℃となっており、内筐体の天面を開口し、外筐体底面外縁部を開口した上で、背面と側面に放熱フィンを取り付けた図 4.3.2.21 の場合に比べて、リアクトルやセラミックコンデンサ等、上部にある部品については 10℃程度の温度低下を達成できており、一定の効果が示されている。一方、パワーモジュールや下部にある高圧コンデンサや絶縁トランスについては数℃の温度低下と、それほど効果は見られない。

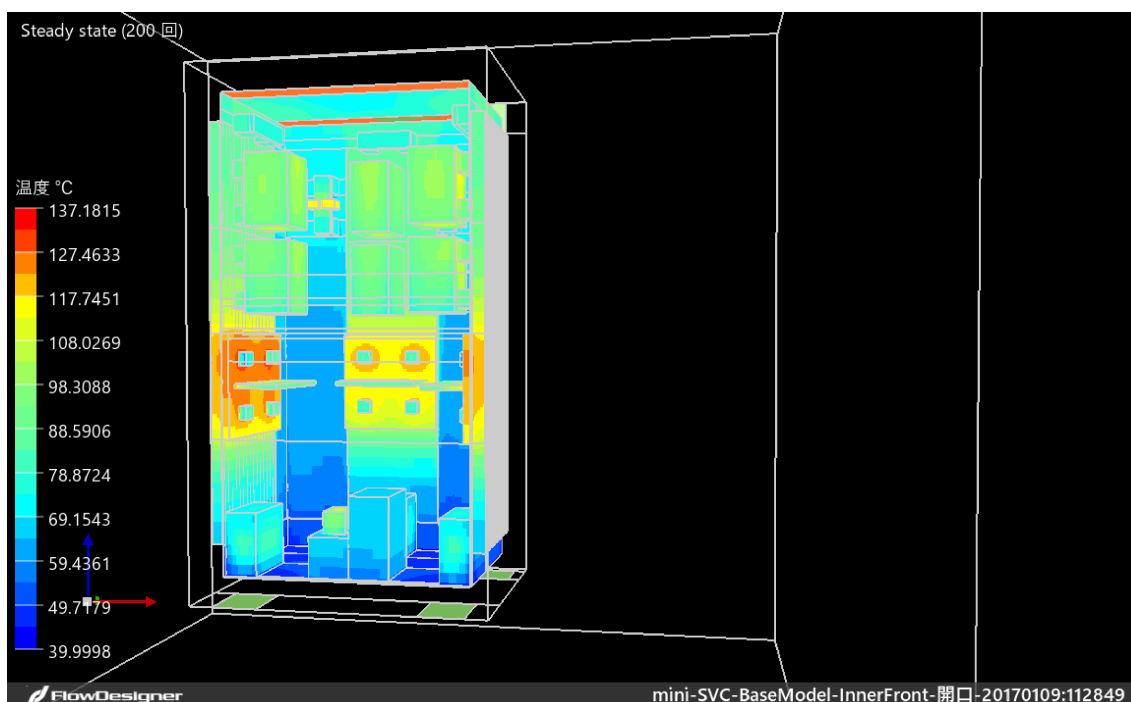


図 4.3.2.24 SVC の内筐体内部品の表面温度分布
(内筐体前面の中段あたりを開口した場合)

[5]内筐体内部に上下仕切り板を挿入した場合

内筐体上部の温度が上昇する一つの原因として、パワーモジュールの発熱で暖められた空気が上部に淀むことが考えられる。ここでは内筐体内部に上下を仕切る板を挿入し、その効果を検討する。図 4.3.2.25 に内筐体前面を開口し、中段に上下仕切り板を挿入した場合の SVC の内筐体内部品の表面温度分布を示す。計算結果によれば、それぞれの部品の最高温度はパワーモジュールが 131.5℃、リアクトルが 130.2℃、セラミックコンデンサが 126.6℃、高圧コンデンサが 112.1℃、

絶縁トランスが 130.5℃となっており、仕切り板を挿入しなかった場合と比べて効果が見られない、あるいは悪化していることがわかる。これは 4.3.2.1 節で検討した空気絶縁式の場合と同様にパワーモジュールからの発熱はフィンによって十分放熱され、内筐体内部の温度上昇はその他の部品の自己発熱によるものであることから、むしろ空間を大きくした方が内筐体内部の平均気温は低下し、上部にあるリアクトルやセラミックコンデンサに対しては動作周囲温度の低下につながると考えられる。

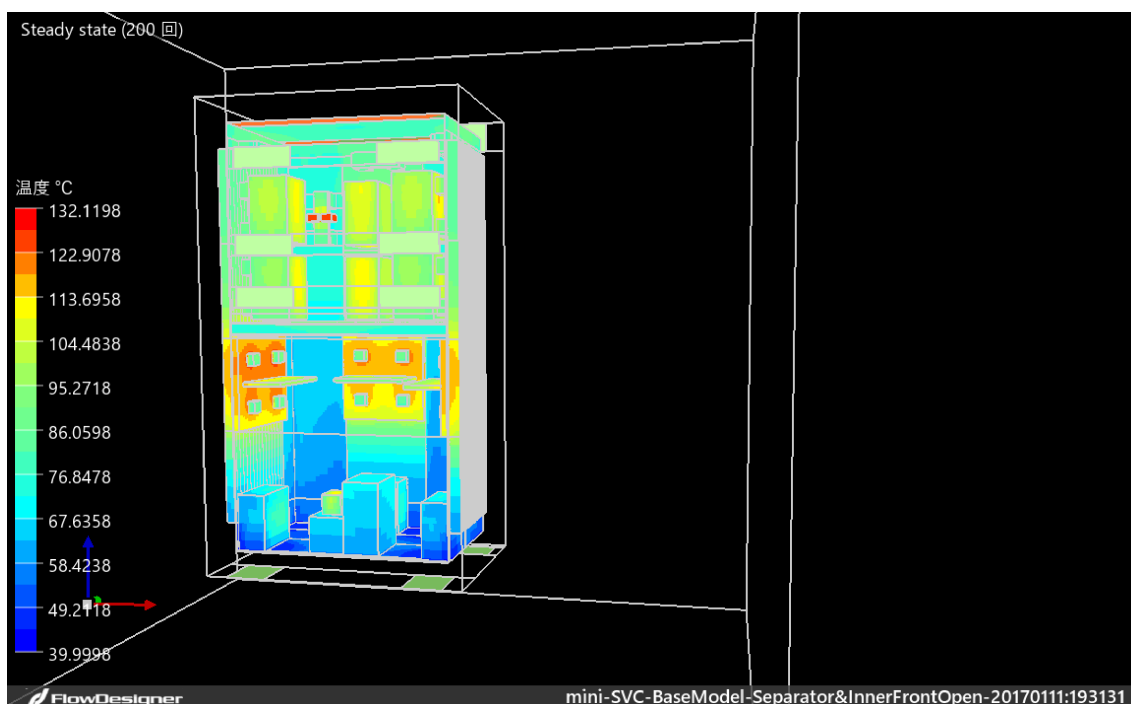


図 4.3.2.25 SVC の内筐体内部品の表面温度分布
(内筐体前面を開口し、中段に上下仕切り板を挿入した場合)

以上のそれぞれの対策に対して各部材の最高温度がどのように変化するかを示したのが図 4.3.2.26 である。図中の目標温度は各逆解析における目標設定温度である。

図より、パワーモジュールについてはフィンを取り付けることが最も効果的な冷却方法であることがわかる。さらに外筐体底面の適切な位置に通風口を設置して外気を取り込むことで、さらに温度低下を図ることができる。

一方、碍子による絶縁が必要なリアクトルやセラミックコンデンサについては、直接放熱フィンに接していないことから、各対策による温度低下量が少なくなっている。前節で検討したように温度上昇は自己発熱が要因であることから抜本的対策は難しいが、碍子の熱伝導率向上や内筐体内部の空気の流れ制御等によって少しずつ温度低下を図る他に方法がない。

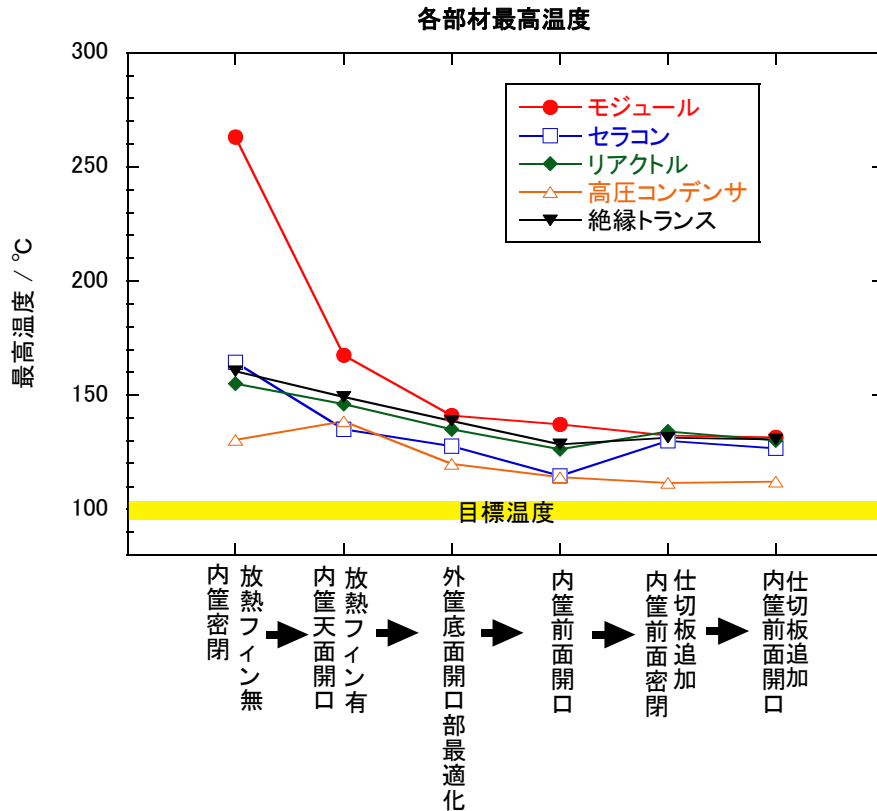


図 4.3.2.26 各対策に応じた各部品品の最高温度の変化

(3)数値解析用メッシュ設計および解析手法

以上の予備解析をもとに、ANSYS/FLUENT による詳細解析のための計算メッシュ作成を行った。図 4.3.2.14 のモールド化小型次世代電圧制御器の構造設計図を元に部品等を一部簡略化した数値解析用構造設計図を図 4.3.2.27 に示す。ヒートシンクフィンについては、前節と同様にヒートシンクフィンの厚さと間隔を自在に設定できるように、フィンの幅は 1mm、奥行きは 50mm とした。今回の基本長さは 1500 mm との板状とし、それを 500 枚並べて特定の数ごとにフィンを指定し、残りを空間とした。さらに図 4.3.2.28 に示すような断続フィンや千鳥フィン等についても解析可能なように長さ方向に 50mm ずつ区切りをいれた。基本的なフィン断面方向には前節と同様に厚さ 3mm のフィンを 10mm の間隔で 42 枚設置した。このとき、ヒートシンク一枚あたりの伝熱面積は約 9.6m²となり、3 枚合計で 28.8 m²となる。

図 4.3.2.29 に SVC 内外領域のメッシュ図を示す。前節と同様に固体である部品内部は矩形メッシュとした。メッシュサイズについては固体の熱伝導率等に合わせて適切な大きさとする一方で、気体側については非構造メッシュを採用した。構造物外の空気層については部品表面近傍の境界層が形成される部分は細かくメッシュを刻み、離れるにしたがいメッシュサイズを大きくした。メッシュサイズは流れの計算を試行錯誤しながら調整し、最終的には本計算におけるメッシュの総セル

数は 2300 万セルとなり、空気絶縁式と比べて 1000 万ほどセル数が増加した。計算の安定性を考慮して、外部領域として小型化 SVC 寸法の 3 倍の距離で作成した。計算における外部領域の境界条件は前節と同様である。

本解析では日射の影響についても検討した。ANSYS/FLUENT にはあらかじめ太陽負荷モデルが組み込まれており、本計算ではそのうちの Solar Ray Tracing 法を使用した。本手法では日本各地の任意の時間における日射を FLUENT 内蔵の太陽カリキュレータを使用することで設定可能である。

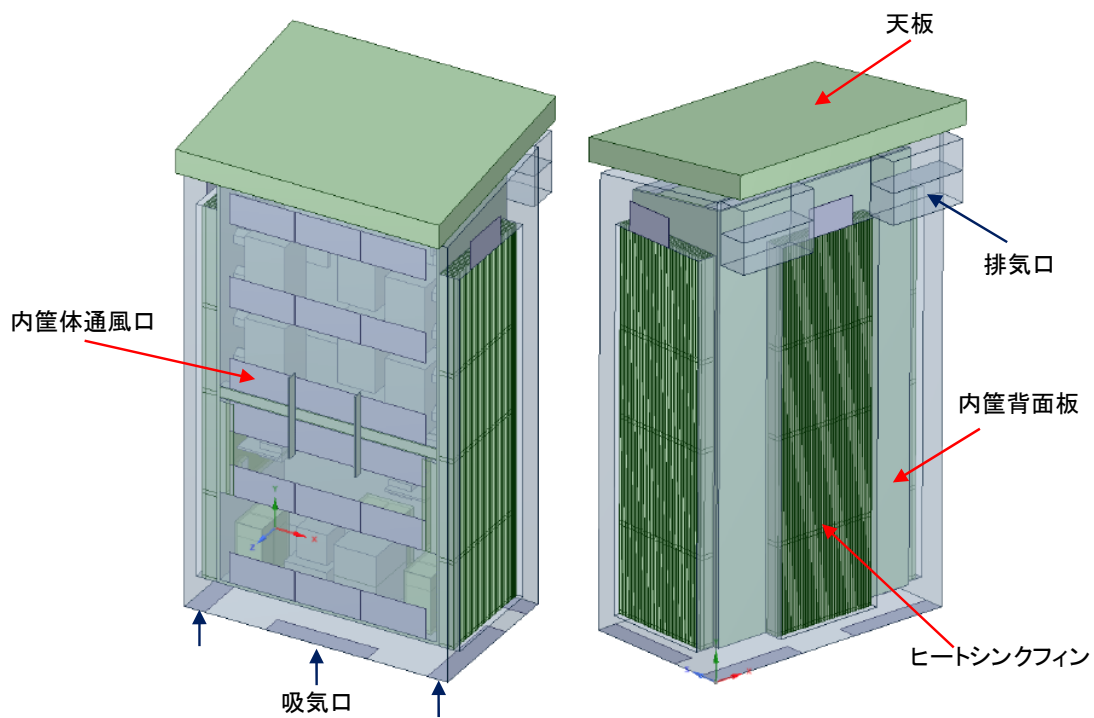


図 4.3.2.27 小型化 SVC の数値解析用構造概略図

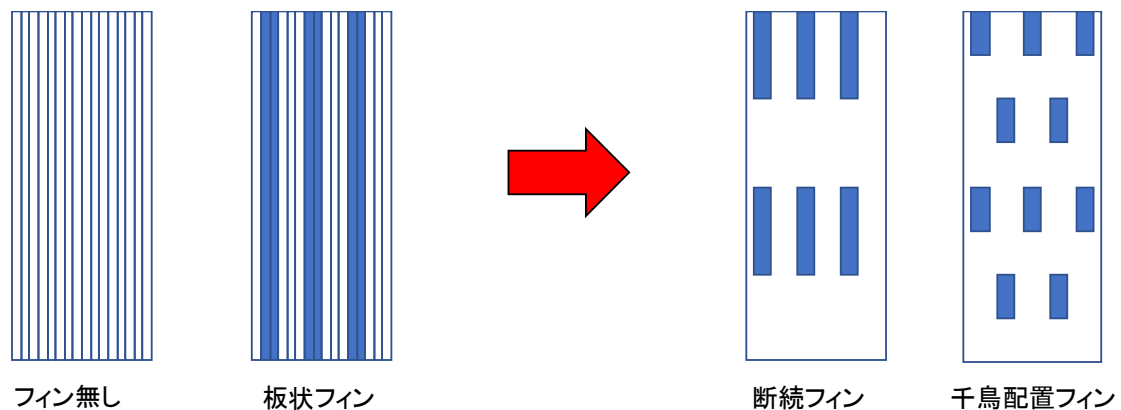


図 4.3.2.28 ヒートシンクフィンモデル

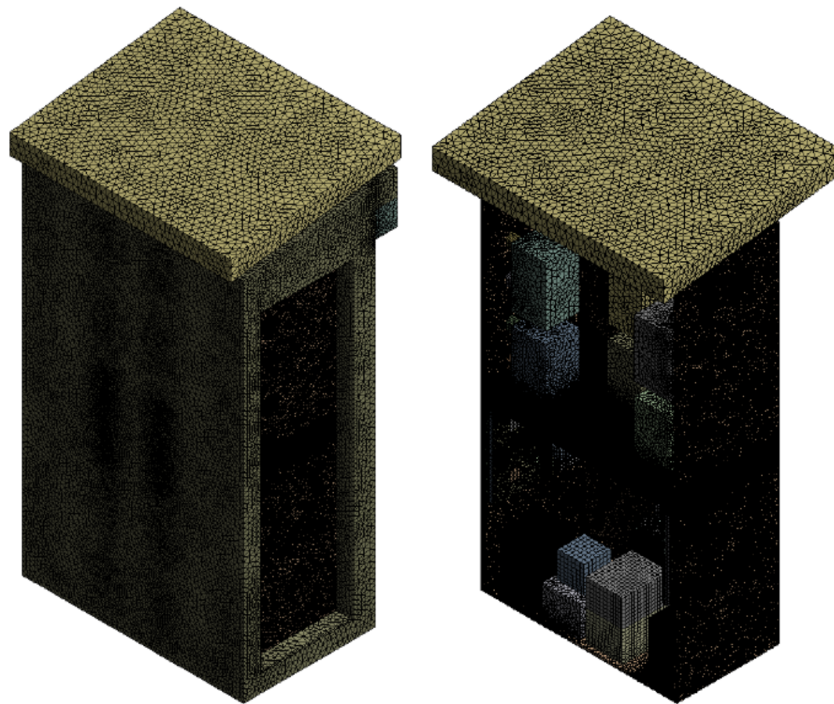
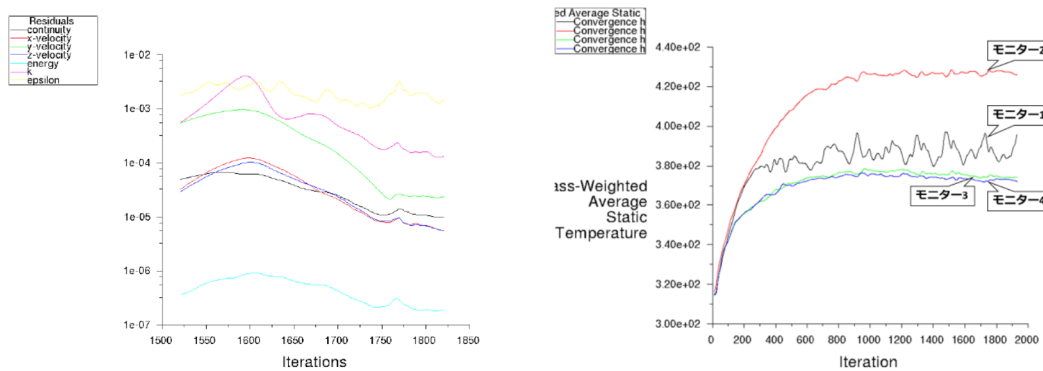


図 4.3.2.29 SVC 内外領域のメッシュ図

機器内における各 부품の発熱量及び耐熱温度は表 4.3.2.4 に示す通りである。数値解析手法も前節と同様である。数値計算は Fluent/ANSYS を使用して行った。計算機には HP WS Z840(64 bit) 2Intel Xeon CPU ES-2690v 32.6GHz を用いた。メモリ容量は 64GB である。計算時間は条件にもよるが、おおよそ 30 時間程度である。

(4) 計算の収束性の確認および解析結果例



計算の残差

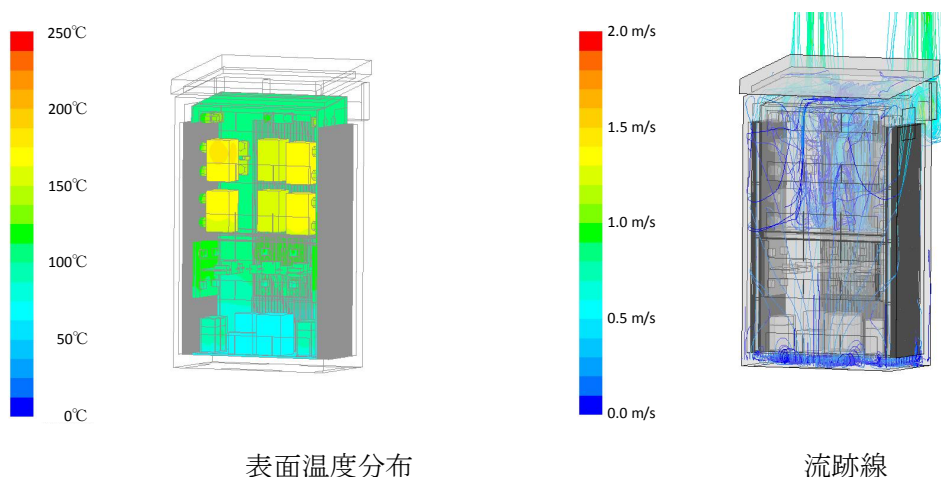
モニタリング温度

図 4.3.2.30 計算の残差とモニタリング温度の時間変化

本計算はメッシュの総セル数が 2300 万セルと大規模な計算となっていることから、計算の収束性について十分な確認が必要である。図 4.3.2.30 に連続性や気流速度、エネルギー及び乱流エネルギーについての計算の残差の時間変化と 4 箇所モニタリングしている温度の時間変化を示す。図より計算の残差は右肩下がりとなっており安定的に計算が進行している。モニタリング温度に関しても、数値が振動しておりやや非定常性は見られるが、ある幅の範囲内で収まっており、ほぼ定常に近い状況となっていることがわかる。

図 4.3.2.31 に正面側から見た SVC 内筐体内部部品およびヒートシンクの表面温度分布と流跡線を示す。線の色はその場所での気体の速さを示している。4.4 節にて詳しい考察を行うが、小型 SVC の熱解析においてもモジュール等の発熱による自然対流が表現され、表面温度についても妥当な値となっており、精度の高い解が得られていることが確認できた。

小型化 SVC では底面に設置した高圧コンデンサを図 4.3.2.15 のようにモールド化しており、空気絶縁の際にはコンデンサ間の間隔が 70mm であったところ、モールド化によって 30mm に縮まっている上にポリエチレンの容器に格納した上でシリコンを充填している。これにより自己発熱の放熱が悪くなっている可能性があることから、全体計算を実施する前にモールド化による高圧コンデンサの放熱阻害効果をチェックした。図 4.3.2.32 に空気絶縁タイプとモールドタイプのコンデンサの定常時の温度分布を示す。図に示されるようにモールド化によっても内部の最高温度は空気絶縁タイプより約3℃最高温度が上昇する程度であり、かつ比較的周囲温度の低い SVC 底面部に設置されることもあり、モールド化高圧コンデンサに対してはさらなる冷却のための方策をとる必要性はないことがわかった。



表面温度分布
流跡線
図 4.3.2.31 SVC の内筐体内部品の表面温度分布と流跡線

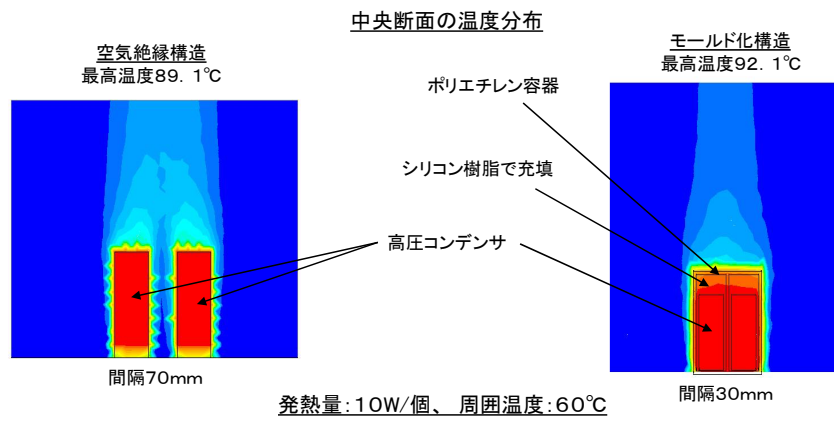


図 4.3.2.32 空気絶縁タイプとモールドタイプのコンデンサの中央断面の温度分布

4.3.3 まとめ

4.3 節では次世代電圧制御器に対する数値熱解析手法について検討した。

最初に数値熱解析モデルの精度検証のため、SVC とほぼ同じ電気基本構成を持ち、かつ自然空気冷却を採用している 4kW 級太陽光発電用パワーコンディショナ(PCS)を用いて温度上昇の実測を行った。また、同様の機器に対する数値熱解析も行い、実験結果と比較検討を行った。その結果、解析結果と実測より得た素子温度はよく一致し、本熱解析で用いる数値解析モデルが妥当であることが確認できた。

次に、屋外設置を前提とし、電柱一本に搭載可能で、かつ 10kV 級耐圧の SiC デバイスを搭載することで変圧器無しに AC 6.6kV 系統へ連系することを想定した 300kVA 級の SVC の回路設計及び空気絶縁を前提とした構造設計を行った。さらにその構造に対する熱流体解析を行い、自然空冷式 SVC における小型化を実現するための冷却構造に対する課題抽出を行った。その結果、ヒートシンクにフィンを取り付けることで温度上昇が大幅に抑えられ、特にパワーモジュールの温度低下に効果があり、フィンが大きいほど効果が大きいことがわかった。一方、部品については、自己発熱のみで相当な温度上昇がある上、電気絶縁を考慮すると熱伝導性の高い碍子等が使えないことから放熱が難しく、フィンの効果は限られることがわかり、さらなる小型化のためには筐体内部の構造の工夫や部品の発熱量の抑制が必要であることがわかった。

最後に電柱1本に搭載可能な大きさの目安である幅 1.3m、奥行き 1m、高さが 2.5m 以内の大きさに SVC の大きさを納めることを目指し、電気的な絶縁を確保するために内部の部品をモールド化する等をした上で構造設計を行った。構造設計では小型化による熱的負担を軽減するために、放熱面積を増加させる工夫等を行った。また、ヒートシンク形状や内外筐体の通風口の配置等の詳細設計を行う前に、逆解析(ノンパラメトリック感度解析)機能を持つ熱流体ソフト(本例では FlowDesigner)を活用し、SVC のより良い冷却構造を予備的に検討した。その結果として、温度低下を図る外筐体底面の適切な位置等を明らかになり、詳細解析のための冷却構造に反映させた。さらに汎用熱流体解析ソフト(本例では、ANSYS/FLUENT)による解析を行い、収束性の確認等も行った上で精度の高い解が得られていることが確認できた。

4.4 次世代電圧制御器に対する熱的信頼性手法に関する考察

本節ではハード面での小型化や軽量化への課題、機器寿命等の運用面での課題について、解決策の提示も含めて共通基盤的な設計指針を作成するとともに、機器メーカーにおける機器開発や、ユーザーにおける導入のメリット・デメリットを判断するための材料提供を行う。

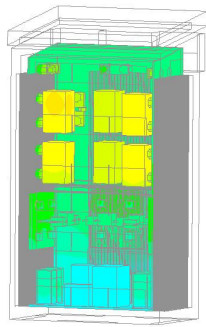
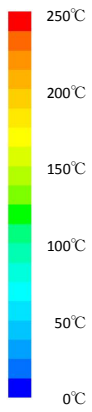
4.4.1 小型 SVC の冷却構造対策の影響

小型 SVC の冷却構造対策の影響を検討するにあたり、ベースケースを設定した。ベースケースは以下の通りである。

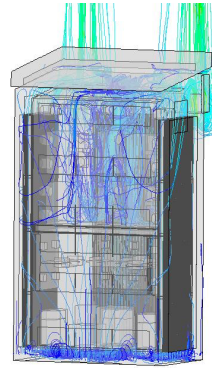
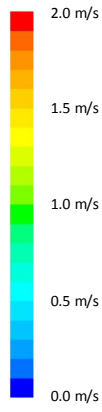
- ・フィンの深さ:70mm、間隔:10mm、厚さ:3mm、長さ:1500mm
- ・内筐体内部の圧力上昇を抑えるために、上部に一箇所のみ通気口を設置
- ・外筐体壁面の通気口はなし

図 4.4.1.1a に SVC 内部品の表面温度分布と空気流れの流跡線、図 4.4.1.1b に SVC 内筐体のアルミヒートシンクの表面温度分布、図 4.4.1.1c に SVC の中心断面における温度分布と空気の流れベクトルを示す。図 4.4.1.1a に示されるようにパワーモジュールについては 135°C程度と目標の 150°C以下に収まっている。このことはフィンによる放熱効果が十分であることを示しており、図 4.4.1.1b にも示されるように、フィンがアルミ筐体の相当な面積をカバーしていることから熱の広がりが早く、上下では 60°C程度の温度差が生じているが、十分許容範囲内に温度上昇が抑えられている。流跡線を見ると外筐体の外から流入した空気はほとんどが背面側を通過して排気口から流出していることがわかる。今回の構造設計ではより小型化するために前面側の流路幅を減じているが、そのこと自体は全く問題がないことがわかる。以上より、小型化に際してもパワーモジュールの発熱に対する熱的な問題は十分解決できることがわかる。

一方で、図 4.4.1.1a より内筐体内部の部品で最も温度が高くなるのが内筐体上部にあるリアクトルとセラミックコンデンサである。前節で検討した空気絶縁式においては半導体チップの温度が一番高くなっていたことからここは大きな違いである。これは内筐体の大きさを小型化し、さらに内筐体の通風口を一箇所にし、密閉性をやや高めたことで内筐体内部の熱交換が悪くなったからと考えられる。このことは図 4.4.1.1c の速度ベクトルの図から SVC 内筐体内部の前方部の流れが淀んでいることからわかる。セラミックコンデンサについては耐熱温度 150°Cに対して、145°C程度であることからギリギリ条件を満たすが、リアクトルについては 175°Cとなっており、設定した耐熱温度 150°Cを上回っている。リアクトルには H 種という耐熱温度が 180°Cというより高耐熱のリアクトルが存在し、それを使用することで解決可能ではあるが、熱による他の部品への悪影響をできるだけ軽減する必要があると考え、より冷却効果を高める方法を模索する。

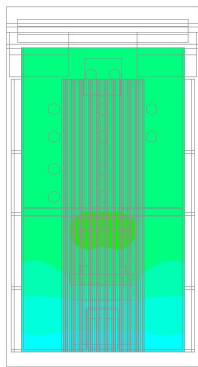
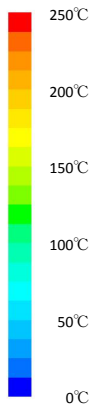


温度分布

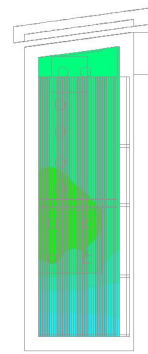
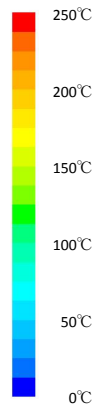


流跡線

図 4.4.1.1a SVC 内部品の表面温度分布と空気流れの流跡線

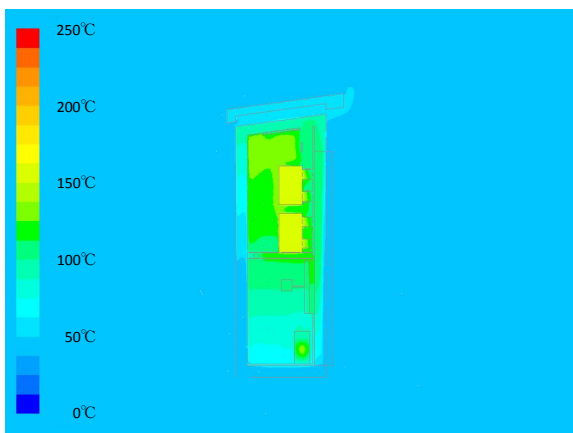


背面

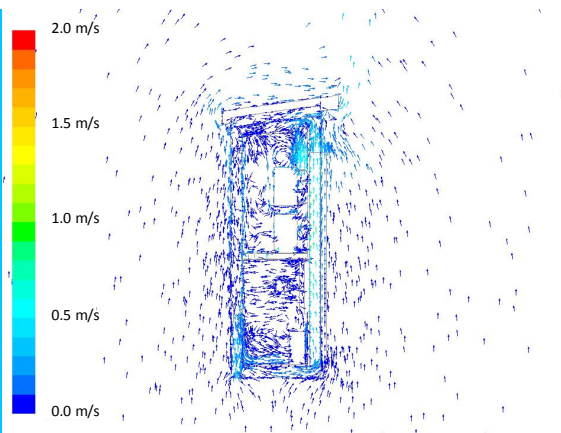


側面

図 4.4.1.1b SVC 内筐体のアルミヒートシンクの表面温度分布



温度分布



速度ベクトル

図 4.4.1.1c SVC 中心を通る断面における温度分布と空気速度ベクトル

まず、フィン形状の影響について検討する。フィン形状についてはフィンの深さと図 4.4.1.2 に示すような分断フィン、千鳥配置フィン等のさまざまなフィン形状について検討を行った。ここで千鳥配置というのはフィンを途中で区切って段違いとした配置であり、流れをやや複雑化して流体の混合度をあげ、温度の均一化を図っている。図 4.4.1.3 にさまざまなフィン形状に対する熱抵抗を示す。ここでは簡単のためにフィンのみを取り出して、熱抵抗を計算した。フィン深さの影響では、70mm 以上の深さではほとんど深さの効果はなくなることがわかる。ここでは 50mm の深さの場合と比較し、深さの効果について確かめる。一方、フィン分断の効果と千鳥配置については比較の図からわかるように2段分断と3段分断の千鳥配置がやや効果があることがわかる。分断距離の影響からわかるように 20mm 以上離してもほとんど効果がないことからここでは 20mm とした。

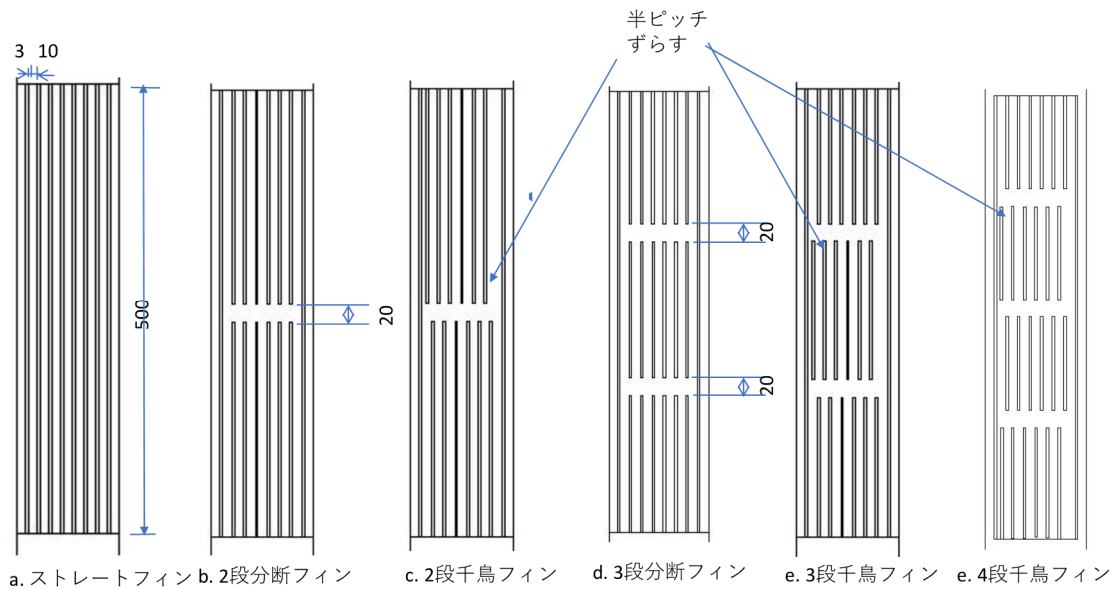
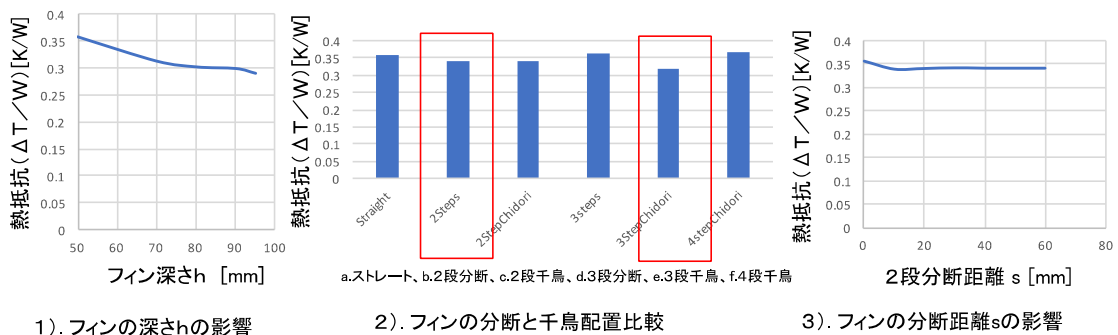


図 4.4.1.2 さまざまなフィン形状



1). フィンの深さhの影響

2). フィンの分断と千鳥配置比較

3). フィンの分断距離sの影響

図 4.4.1.3 さまざまなフィン形状に対する熱抵抗

図 4.4.1.4 にベースケース、フィン深さ 50mm、2 段分断フィン、3 段分断の千鳥配置フィンについて各部品の最高温度を示す。図に示されるようにフィン深さ 70mm と 50mm では半導体チップ下銅プレートの温度は 15℃程度の差があり、70mm にする効果が大きいことがわかる。伝熱面積としてはヒートシンクフィン一枚あたり約 9.6m²から約 2.5m²ほど増加していることから、この面積増加による冷却効果が大きいと思われる。他の部品についても 70mm にすることで 10℃近く温度低下しており、ヒートシンク側に熱を伝えることによる一定の効果があることがわかる。

2 段分断フィン、3 段分断の千鳥配置フィンの効果については図 4.4.1.3 にて示されたように熱抵抗が最大 1 割程度低下する程度であることから、半導体チップ下銅プレート、リアクトル、高压コンデンサ、小型変圧器とほとんど最高温度の変化がない。このことは図 4.4.1.5 に示した SVC 内筐体のアルミヒートシンク背面の表面温度分布において、3つの場合にほとんど温度分布に違いがないことからわかる。一方で、セラミックコンデンサのみ温度が上昇しているが、これについては理由が不明であるが、結果的には深さ 70mm のストレートフィンで十分であることが理解できる。

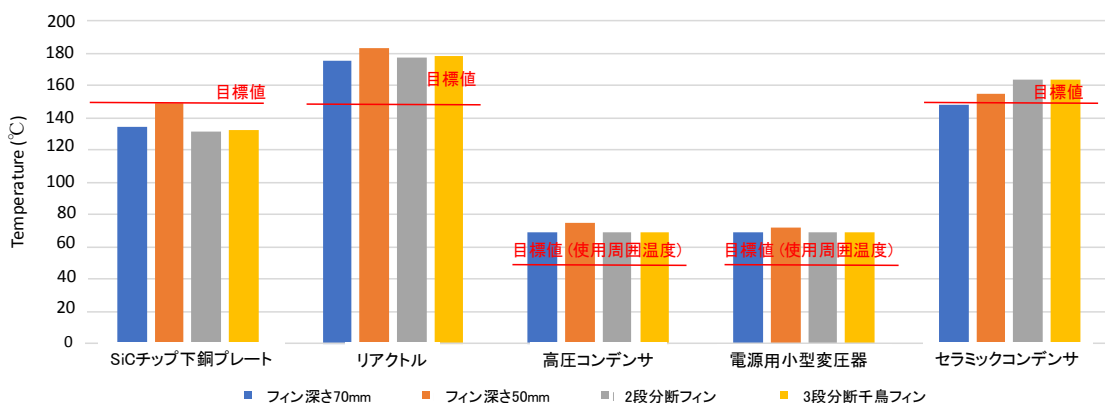


図 4.4.1.4 さまざまなフィン形状に対する各部品の最高温度

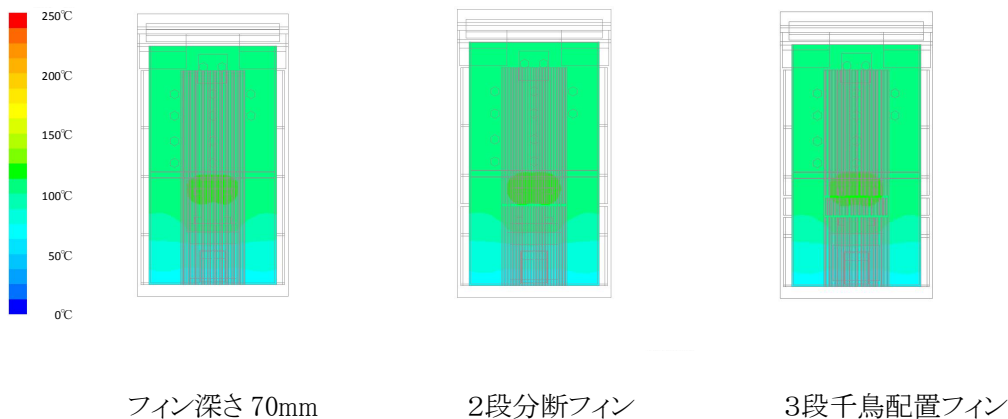


図 4.4.1.5 SVC 内筐体のアルミヒートシンク背面の表面温度分布

一方で、フィン形状等のヒートシンク構造の工夫以外に別の観点から冷却効果を高める方法を考えると、(1)内筐体内部の空気をファン等で強制的に換気する方法、(2)部品配置や部品取付け方法の工夫、(3)空気以外の冷却媒体の利用、(4)筐体構造そのものの工夫等が考えられる。

(1)ファン等の強制冷却装置については、現在での装置耐久性を考えると使用し難い点は否めないが、より耐久性のあるファンが開発されれば十分内蔵可能である。しかしながら、本解析で問題点となっているリアクトル、セラミックコンデンサ等の部品の冷却については、部品周囲の空気温度の低下を図ることが必ずしも大きな冷却効果を生み出すとは考えられないことから、本解析では検討を行わなかった。

(2)についてはリアクトル等の上部にある部品を下部に移動すること等は十分に考えられる。これまでの解析結果によれば、下部は比較的低温となっていることから、この部分に全ての部品を集積し、もっとも発熱の多いパワーモジュールを一番上部に持ってくることは熱設計的には効果があると思われる。しかし、図 4.3.2.1 に示す SVC 基本回路からわかるように電気の流れから見るとより複雑な配線となり、そこはデメリットとなる。他方で内筐体内部に熱がこもる理由としてパワーモジュールが設置されたヒートシンクプレートからの熱伝達、すなわちモジュール部で空気が暖められ、内筐体内部の気温を上昇させている可能性がある。ここではパワーモジュールで発生した熱が内筐体内部に拡散しないようにするための図 4.4.1.6 に示すようなヒートシンクプレート断熱カバーの効果を検討した。解析ではこの材料の熱伝導率をゼロとして計算を行った。

(3)については例えばリアクトル等の温度の高い部品を絶縁液体で封入してその外をエポキシ樹脂などで覆うモールド化が考えられる。あるいは 4.3.2 節で検討した高熱伝導碍子で支持することが考えられる。これまでの解析で、1.5m 長のフィンを 3 つ取り付ければヒートシンクに直接設置される SiC チップを冷却でき、かつ各フィンの平均熱伝達率も一般の自然対流の熱伝達率に比べて小さいことから、4.35kW の総内部発熱量を単純に筐体外に放熱するだけで考えれば、本筐体はその能力を十分保有していると言える。問題は内部アルミ筐体に設置されずに浮いた状態となっているリアクトル等が問題であり、いかに放熱余力のある内筐体に空気を介さずに熱を伝達するかが一番の課題である。絶縁オイル封入等のモールド化は一般的に可能であるが、ここでは 4.3.2 節で検討した高熱伝導碍子で支持する場合について解析を行った。

(4)については内筐体に窓を多く取り付けることは埃対策を考えると適切ではないと考え、外筐体の背面の中段付近に窓を取り付け外筐体の下部のみならず、中段からも新鮮な空気を取り込めるようにした。

図 4.4.1.7 に断熱カバー、高熱伝導碍子、外筐体窓取付け時の各部品の最高温度を示す。ここで、高熱伝導碍子はアルミと同等の熱伝導率を持つ材料で碍子を製作したとした。外筐体背面の窓の位置は高さでいうとパワーモジュールヒートシンクプレートのやや上方とし、横幅全体に高さ 50mm の通気口を設けた。

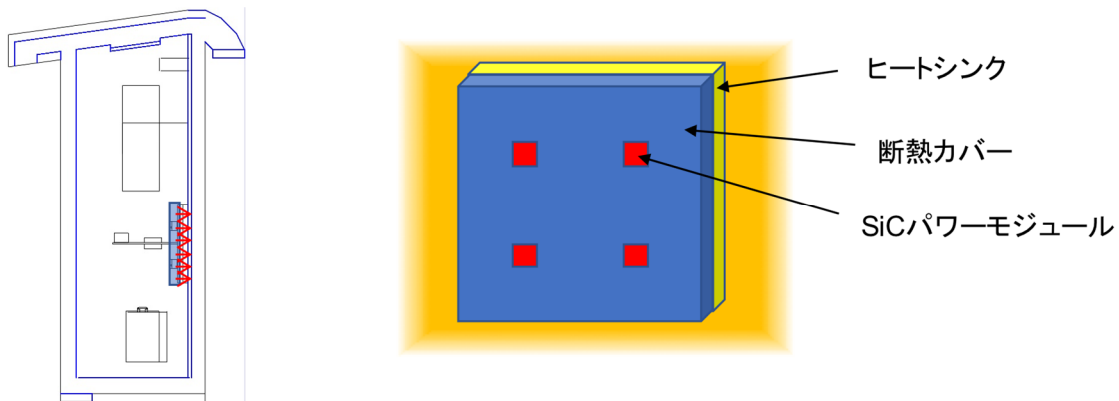


図 4.4.1.6 ヒートシンクプレートカバーの概念図

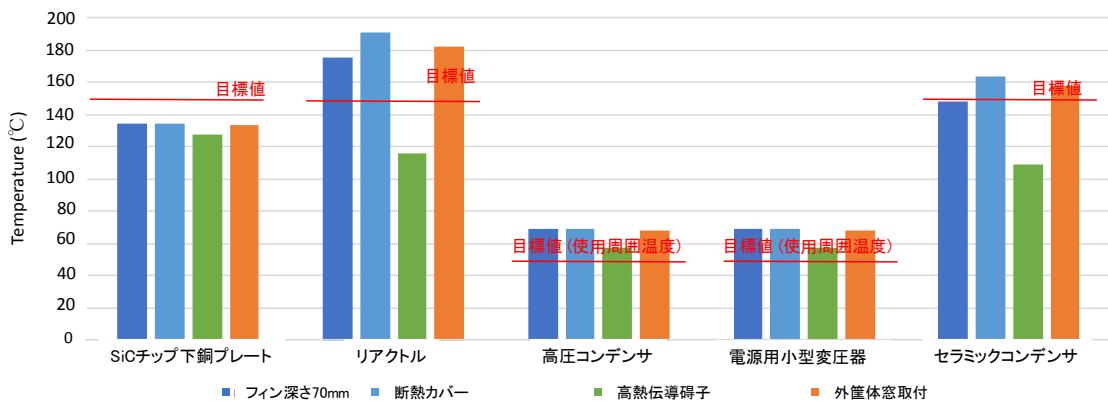


図 4.4.1.7 断熱カバー、高熱伝導碍子、外筐体窓取付時の各部品の最高温度

断熱カバーの効果については半導体チップ下銅プレートの温度にほとんど変化はない。一方で、リアクトルやセラミックコンデンサの温度は 15°C 程度上昇しており、むしろ逆効果となっている。図 4.4.1.8 にそれぞれの場合の背面から見たヒートシンクの温度分布を示す。図より、断熱シートで覆われるとパワーモジュールヒートシンクプレート付近の温度が上昇し、その結果としてヒートシンク上部の温度が上昇していることがわかる。図 4.4.1.9 に断熱カバーありの場合の SVC 中心を通る断面における温度分布と空気の流れベクトルを示す。図 4.4.1.1c と比較するとわかるように内筐体上部の空気温度が断熱カバーの効果で上昇していることがわかる。結果的に断熱カバーがない場合には筐体内部の空気に適度に熱が伝達し、内筐体上部の温度上昇を抑えることができたと考えられる。密閉空間の場合には局所で熱の伝達を抑えることは、他の場所に逆効果となって跳ね返ってくる場合があるので注意を要する。

次に高熱伝導碍子でリアクトル等を支持した場合であるが、碍子で取り付けられていない SiC チップや高圧コンデンサ等に対しての効果はほとんどないが、直接取り付けられているリアクトルやセラミックコンデンサに対して非常に効果が大きく、いかにアルミ内筐体に素早く熱を流すことが重要

であるかが理解できる。本解析では碍子を高熱伝導化したが、重量は増えるが絶縁オイル等によってモールド化することも同等の効果が期待できる。一方、外筐体の背面に設置した通気口の効果であるが、ほとんど効果がないことがわかる。

以上、フィン深さ、フィン構造、断熱カバー、高熱伝導碍子、通気口の設置等の冷却促進対策を検討したが、これまでも指摘したようにアルミ内筐体に伝達された熱を放熱する余力は十分にあることから、外筐体の構造を変化させても大きな冷却効果はあげられないことがわかる。効果が大きいのはアルミ内筐体への熱伝導あるいは熱伝達をあげることであり、これは絶縁オイルによるモールド化や熱伝導率の高い碍子の活用によってもたらされ、結果的に全ての部品の運転温度範囲がメーカー推奨の温度範囲に収まることとなり、製品寿命においても十分な運転時間を確保できると推論できる。

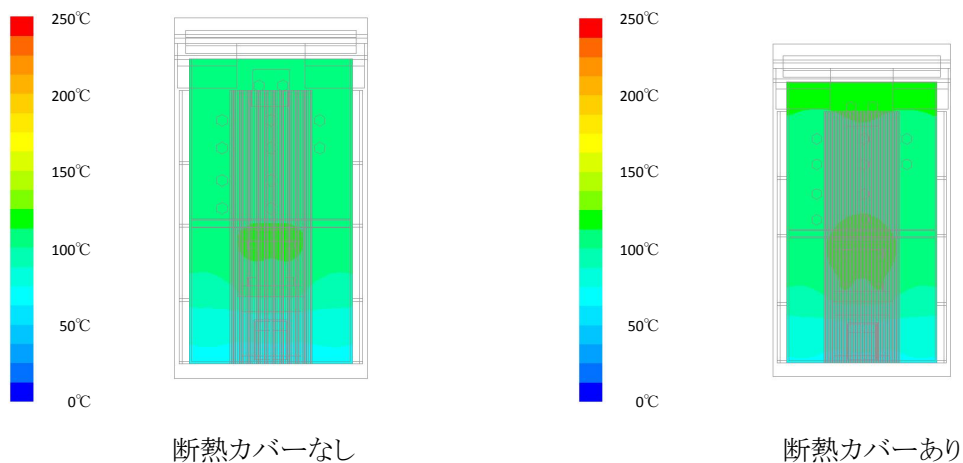


図 4.4.1.8 SVC 内筐体のアルミヒートシンク背面の表面温度分布

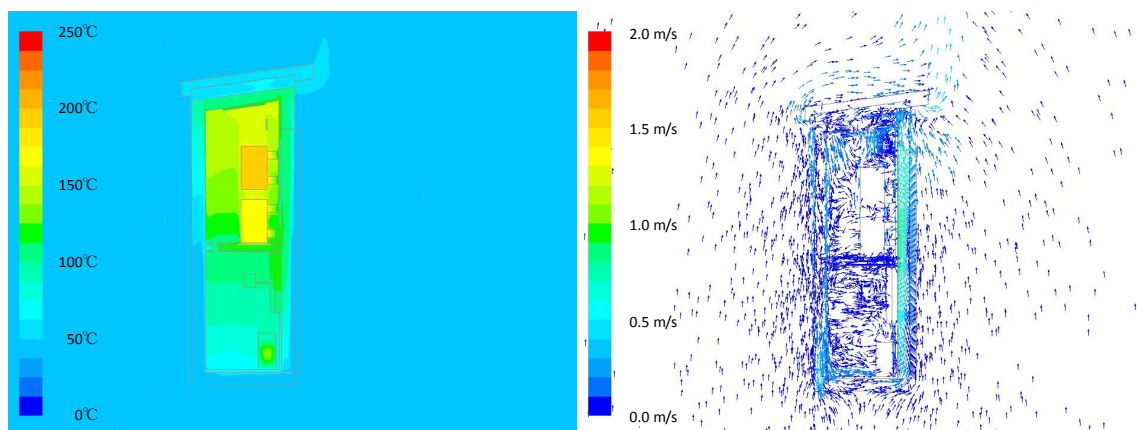


図 4.4.1.9 SVC 中心を通る断面における温度分布と空気の流れベクトル (断熱カバーあり)

4.4.2 SVC 内部部品の損失低減の影響

前節の検討結果により、フィン構造や断熱カバーの設置による対策だけでは十分な冷却性能が得られず、SVC を定格出力で長時間運転するには厳しい状態となる場合がある。ここでは、SiC パワー半導体や周辺部品の効率向上が図られることを想定し、損失による発熱量が減少した場合について検討する。

損失の低減については簡単に二つの場合を検討した。一つ目は専ら技術開発が集中的に実施されている SiC パワー半導体の効率向上が大幅に図られた場合を想定した。このときリアクトルや高圧コンデンサ等については現状のままの部品を使用する。パワーモジュールの損失低減量はこれまでの計算で設定した発熱量(321W/個)の発熱を 1 とし、それに対して 2/3、1/2、1/3 まで損失が低減した場合と、極端な例として 0 の場合について計算を行った。

二つ目はリアクトル等の他の部品についても損失低減が図られた場合である。表 4.3.2.4 に示すようにパワー半導体の次に発熱量が大きいのはリアクトルであり、これらについては積極的に開発が行われているパワー半導体とは異なり、大きな技術的な進歩は難しいと思われるが、それでも鉄心コア損失のより少ない新たな磁性材料が開発されるなどその技術進展は弛まなく進んでいる⁹。例えば、JFE スチール株式会社が製品化しているスーパーコア[®]のうち、電源周波数の 50Hz でも SiC パワー半導体のスイッチング周波数である 20kHz レベルの高周波領域でも鉄芯損失(鉄損)を小さくする JNEX コアについては、当該社のカタログ¹⁰ 記載の測定データによれば、0.1mm 厚の方向性ケイ素鋼板と比べて鉄損が約半分となっている。さらに同カタログ記載の比較データによれば、板厚を薄くすることでも効果があり、薄板(0.05mm 厚)であれば約 4 割となっている。また、アモルファス材料であれば約 1/4 とすることができる。巻線損失(いわゆる銅損)は低減しないが、仮に鉄損と銅損が同等であったとすれば、リアクトルの全体の損失を 25~40%程度削減することは可能と思われる。ここでは全体の損失発熱量 4347W を 1 とし、それに対して発熱量を 2/3、1/2、1/3 とした場合について検討した。ここで、計算を簡単にするために各部品で均等に損失が低減するとした。

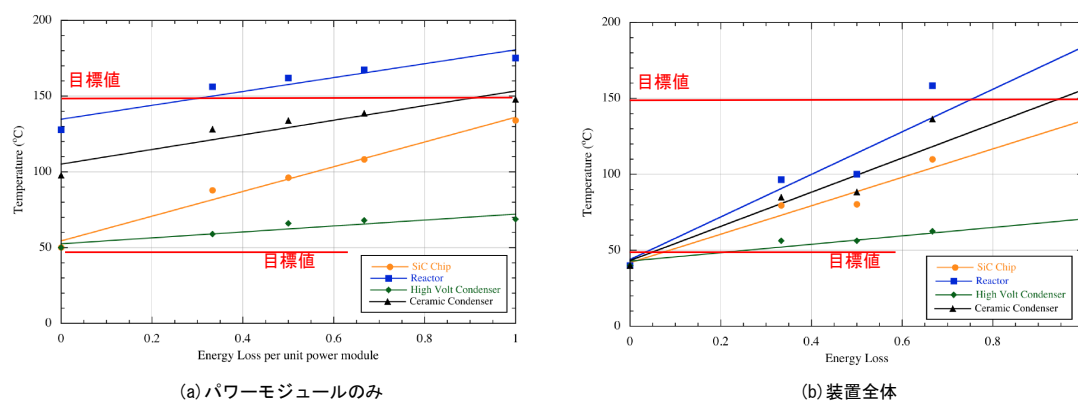


図 4.4.2.1 最高温度に対する各部品の損失低減の影響

図4.4.2.1に最高温度に対する各部品の損失低減の影響を示す。図4.4.2.1(a)はパワーモジュールのみの損失が低減した場合、図4.4.2.1(b)は装置全体の損失が低減した場合の結果である。パワーモジュールのみの損失が低減した場合における横軸ゼロはパワー半導体を除く各部品が表4.3.2.4に示す発熱量で発熱した場合の結果である。図からわかるようにパワーモジュールの損失低減割合に対しての各部品の温度は、半導体の発熱量が0と1の場合の点を結んだ直線から容易に推定できることがわかる。例えば、リアクトルについてはパワーモジュールの損失を現状の4割程度にまで引き下げる必要がある。高圧コンデンサについても同程度にまで損失を削減すれば推奨動作温度範囲に収まる。

次に装置全体の損失が低減した場合であるが、図4.4.2.1(b)からわかるように横軸ゼロは発熱ゼロを示しており、すべての部品の温度は周囲環境温度と同じ40℃となっている。全体損失の低減割合に対しての各部品の温度は、発熱量が0と1の場合の点を結んだ直線からやや外れている場合もあるが、おおよそこの直線上に乗っている。図よりリアクトルについては目標値に達する削減効果は当然であるがパワーモジュールのみの発熱量を削減した場合よりも削減割合が小さく、現状の7割程度で良い。

ここで、リアクトルの耐熱温度の目標を達成するための条件を考える。パワーモジュールのみの発熱量を削減する場合には6割の削減、すなわち $321\text{W} \times 0.6 \times 12 \text{個} = 2311\text{W}$ の発熱損失を低減する必要があるが、全体を均一に低減する場合には $4347\text{W} \times 0.3 = 1304\text{W}$ の発熱損失の削減で済むことになる。この場合でもパワーモジュールの発熱損失を3割程度削減しなくてはならないが、部品も含めて損失低減を図る方が、パワーモジュールだけで削減を図るよりもかなり少ない発熱量の削減で済むことになる。したがって、今後10kV級SiCパワー半導体を活用したSVCの開発には、SiCパワー半導体の損失低減が重要であるが、リアクトルも含めた他の部品についても損失低減に向けた研究開発が重要である。

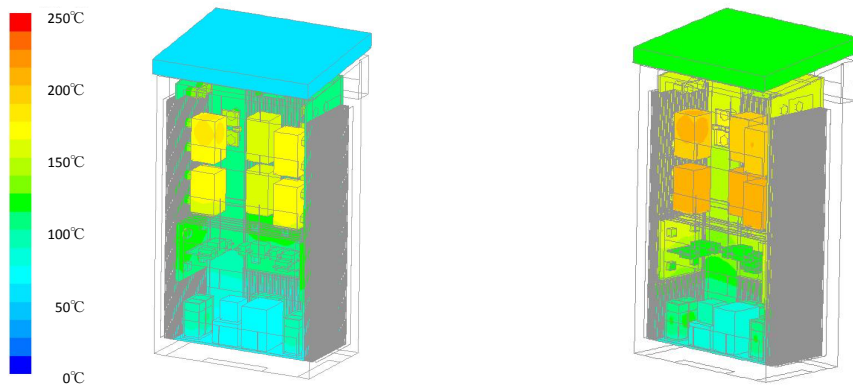
4.4.3 日射の影響

SVCは屋外に設置することから日射を直接受けることになる。ここでは、日射によって装置全体の温度がどの程度影響を受けるかについて検討する。解析はANSYS/FLUENTに付属している太陽負荷モデルSolar Ray Tracing法を使用した。この方法は入射角と日射量を決めると、入射する光が計算領域内の面にどのように当たるかを影も含めて計算し、光が当たった面の吸収率と反射率に応じて壁に熱輻射として伝達される熱エネルギーを熱流束として計算する。入射角と日射量は緯度、経度、日時を決めることで太陽カリキュレータを使用して設定できる。本計算では、つくば市(北緯36.058度、東経140.1374度)を代表点にとり、日時はもっとも一年で暑いと想定される8月13日の午後12時とし、SVCの正面が真南を向くように設置した。

図4.4.3.1にSVCの内筐体内部品およびヒートシンクの表面温度分布を示す。図よりわかるように日射を受けることでSVC上面にある日よけ板の温度が60℃程度から120℃近くまで60℃ほど上昇していることがわかる。この影響は内筐体内部の部品にも現れており、リアクトルを筆頭に大きな温度上昇が見られる。図4.4.3.2のSVC内筐体のアルミヒートシンク背面の表面温度分布に示されるように日射がない場合に比べて25℃程度上部の温度が上昇し、結果的に図4.4.3.3のSVC中心を通る断面における温度分布と空気の流れベクトルに示されるように筐体上部に強い陽炎が形成され、ヒートシンクフィンを流れる空気の流れも日射なしに比べて明らかに速くなっている。

もう少し定量的に各部品の温度を見ると、上部の日よけ板ほどではないがパワー半導体、リアクトル、セミックコンデンサ等の比較的上部にある部品の温度は日射の影響を強く受けており、底面近くにある高圧コンデンサと絶縁トランスはその影響が小さいことがわかる。

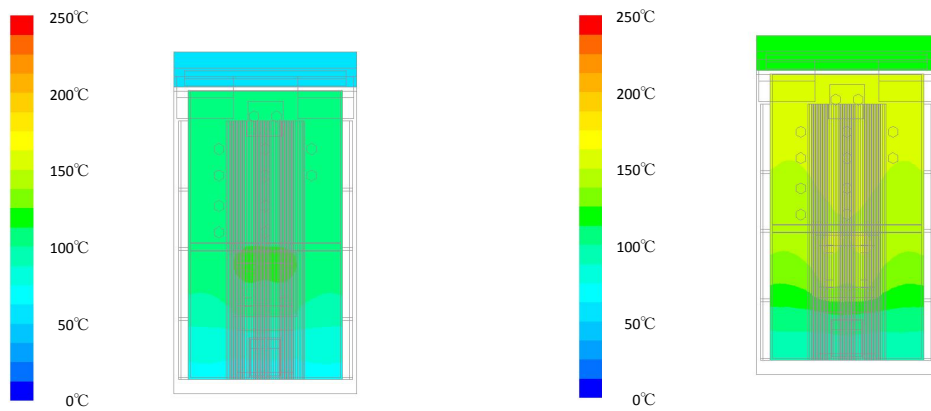
以上より、日射の影響は大きくその影響は無視できないことがわかる。次節で示すようにSVC装置本体は大きな熱容量を持っていることから、実際にはこれほどの温度上昇を示す結果にはならないと想定されるが、日よけ対策等は必要であることがわかる。



日射なし

日射あり

図 4.4.3.1 SVC の内筐体内部品およびヒートシンクの表面温度分布



日射なし

日射あり

図 4.4.3.2 SVC 内筐体のアルミヒートシンク背面の表面温度分布

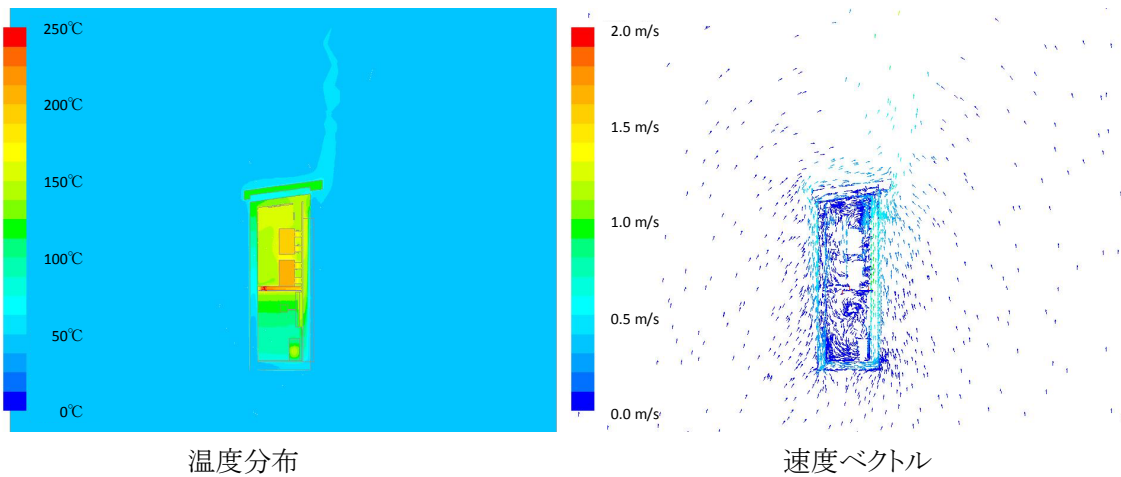


図 4.4.3.3 SVC 中心を通る断面における温度分布と空気の流れの速度ベクトル(日射あり)

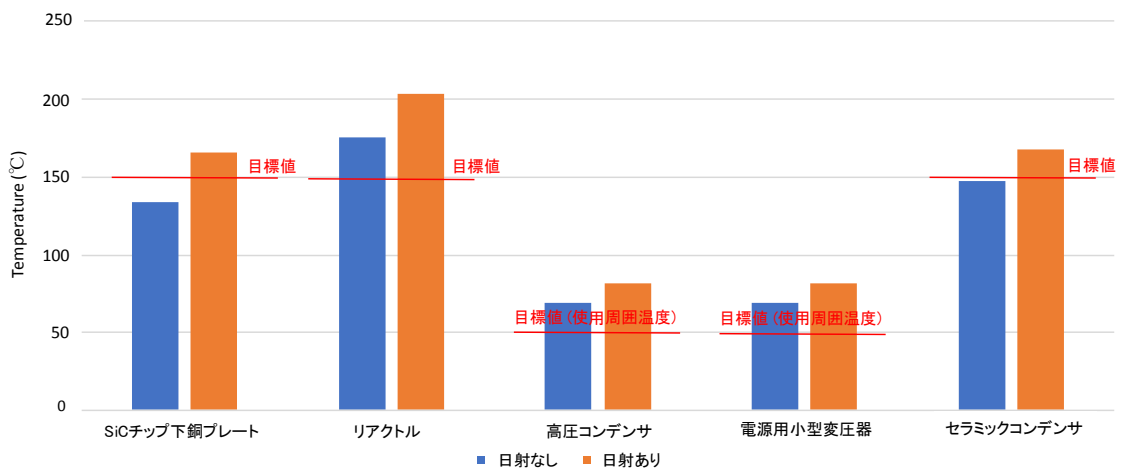


図 4.4.3.4 日射有無に対する各部品の最高温度

4.4.4 非定常性の影響

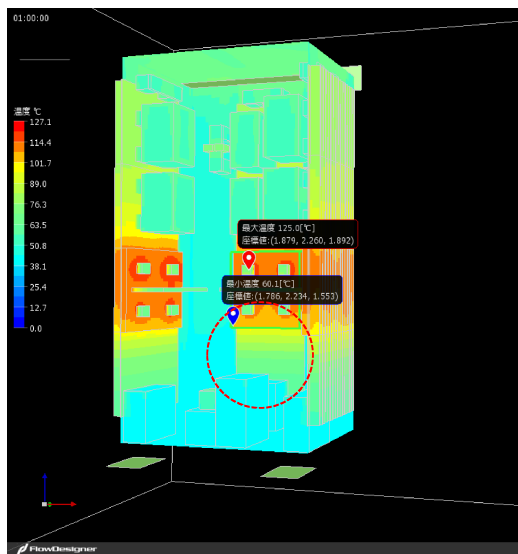
SVC の外筐体は約 310kg の鋼板、内筐体もヒートシンクと合わせて約 310kg のアルミ、その他に 200kg の鉄や銅で構成されており、全体の熱容量は大きい。ここでは、4.3.2.2 節で用いた FlowDesigner を用いて非定常の計算を行った。ANSYS/FLUENT ではなく FlowDesigner を用いたのは単なる計算時間の問題であり、詳細なメッシュを持つ ANSYS/FLUENT の計算では非定常解析に膨大な時間がかかることから、比較的簡易計算が可能な FlowDesigner を用いた。

周囲温度および機器全体の初期温度 40℃、部品等からの発熱はステップ状に変化し、その後一定という条件で非定常気流解析を行った。乱流解析には高レイノルズ数型/ $k-\epsilon$ 乱流モデルを採用し、完全な無風状態での不安定性を避けるために外気風速を右側面側より風速 0.1m/s で与えた。筐体は内筐体の天面を開口し、外筐体の底面を最適位置で開口した状態で、背面と側面に放熱フィンを取り付けた構造とし、他の物性値等の条件は 4.3.2.2 節と同様である。本計算では周囲温度を 40℃としており、実際にはより低い温度範囲で動作が開始すると想定されるが、より厳しい条件を課してその影響を検討することとした。

図 4.4.4.1 に発熱開始から 1 時間経過時の温度分布とパワーモジュール部の温度変化を示す。温度変化については実温度と定常温度(本計算では 134.7℃)との対数温度差をプロットした。対数温度差のグラフは時間の線形式で近似し、その傾きから温度変化の特性時間を求めた。図よりパワーモジュールの特性時間は約 30 分であり、実温度プロットとの比較をすると定常状態に対して約 75%程度の温度差まで近づいた状態であり、定常に至るまでの時間オーダーを表している。同様にリアクトル、高圧コンデンサ、絶縁トランスおよびセラミックコンデンサについても特性時間の計算を行い、その結果を表 4.4.4.1 に示す。

ここで求めた特性時間の意味について実際の温度変化と比べることで確かめる。図 4.4.4.2 に初期状態から 12 時間後までの各部品の温度変化を示す。パワー半導体のベースプレートの温度は 100 分程度でほぼ定常になっており、ステップ応答に対して特性時間の約 3 倍程度で定常に至る。リアクトルについては熱容量が大きく、特性時間が 8 時間程度と長いところ、グラフではやや挙動に不安定性が見られるが 12 時間程度では定常に至らないことがわかる。セラミックコンデンサ、高圧コンデンサ、絶縁トランスについてはそれぞれ特性時間が 113 分、300 分、205 分のところ、400 分、800 分、600 分程度で定常に至っており、おおよそこれらについても特性時間の 3 倍程度の時間で定常に至ることがわかる。

以上のことを実際の運転状況と照らし合わせてみると、朝方の気温が低い状況で運転がスタートし、仮に午前 9 時あたりから定格出力で運転しても熱容量の大きいリアクトル、高圧コンデンサ、絶縁トランスについては定常解に至ることなく日没を迎えることになり、特に 4.4.3 節にて最大日射下では放熱対策が厳しいと指摘したリアクトルについても、実運用上は大きな問題とならない可能性もある。



1時間経過時の温度分布

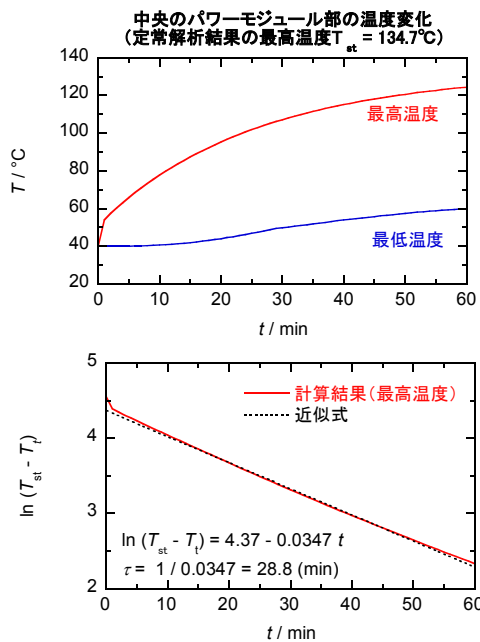


図 4.4.4.1 発熱開始から 1 時間経過時の温度分布とパワーモジュール部の温度変化

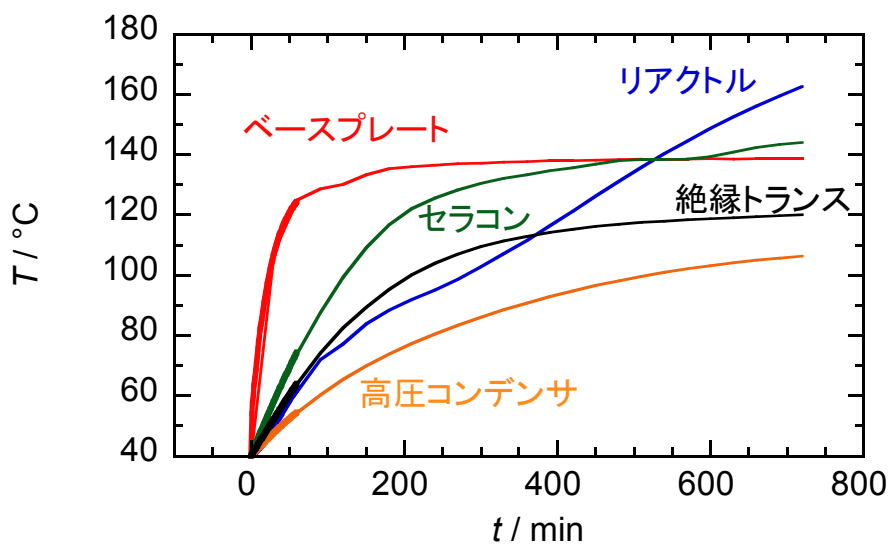


図 4.4.4.2 初期状態から 12 時間後までの各部品温度変化

表 4.4.4.1 各部品の特性時間

	パワー半導体	リアクトル	高圧 コンデンサ	絶縁トランス	セラミック コンデンサ
定常温度(°C)	134.7	159.6	121.3	137.3	128.9
特性時間(分)	30	500	300	205	113

4.4.5 まとめ

4.4 節では SVC のハード面における小型化や軽量化への熱的課題について、解決策の提示も含めて共通基盤的な設計指針を作成するための検討を行った。

まず、小型 SVC の冷却構造対策の影響を検討するにあたってベースケース(フィン深さ:70mm、間隔:10mm、厚さ:3mm、長さ:1500mm、上部に一箇所の通気口)を設定した上で、フィン深さ、フィン構造、断熱カバーの設置等の冷却促進対策を施し。ベースケースとの比較によりその効果を検討した。その結果として、フィン深さが 50mm 程度では十分ではないが 70mm 程度取れば放熱のための伝熱面積は十分確保されており、2 段分断フィン、3 段分断の千鳥配置フィンの等の効果はほとんど現れない。

さらにパワーモジュールプレートを断熱カバーで覆う、高熱伝導碍子でリアクトルとセラミックコンデンサを支持する、外筐体に通気口を設置する等の冷却促進対策を検討したが、この中で効果が大きいのはアルミ内筐体への熱伝達率を上げることであった。これは絶縁オイルによるモールド化や熱伝導率の高い碍子の活用によってもたらされ、結果的に全ての部品の運転温度範囲がメーカー推奨の温度範囲に収まることとなった。

一方でパワー半導体やその他部品の熱損失の低減効果を検証した。損失低減については SiC パワー半導体のみの特性向上が図られた場合を想定し、その発熱量が低減した場合と、各部品全てで均等に損失が低減するとした場合について検討を行った。結果として、厳しい条件のリアクトルの耐熱温度の目標を達成するためには、パワーモジュールのみの発熱量を削減する場合に比べて部品も含めて損失低減を図る方が、かなり少ない発熱量の削減で済むことになることがわかり、今後はリアクトルも含めた他の部品についても損失低減に向けた研究開発が重要であることが示された。

さらに屋外設置を想定していることから、日射の影響についても使用した汎用熱流体解析ソフトに付属している太陽負荷モデル Solar Ray Tracing 法を用いて検討した。周囲温度 40℃で炎天下で長時間放置という厳しい条件の下では機器上部は数十℃の温度上昇が見られ、その影響を無視できず日よけ対策等が必要であることがわかった。一方で SVC の全体の熱容量は大きく、非定常解析の結果によれば、定常状態に至るまでに時間を要する。各部品の定常に至るまでの時間と実際の運転状況と照らし合わせてみると、朝方の気温が低い状況で運転がスタートし、仮に午前 9 時あたりから定格出力で運転しても熱容量の大きいリアクトル、高圧コンデンサ、絶縁トランスについては定常温度に至ることなく日没を迎えることになり、最大日射下では放熱対策が厳しいと指摘したリアクトルについても、実運用上は大きな問題とならない可能性もあることがわかった。

4.5 次世代電圧制御器の信頼性評価に向けて

本研究では、次世代電圧制御器に対する信頼性評価法について調査および検討し、その結果を踏まえた上で評価を試みた。

信頼性評価の基本的考え方として、その目的が電圧制御機器の実質的な使用期間を予測することであるとすれば、それはメーカーによる信頼設計のためだけではなく、利用者側にとっても運用面等を含めた導入のメリット・デメリットを判断できる評価手法となる必要がある。一方で、次世代電圧制御器のように現存しない場合、その機器の信頼性を実機により評価することは難しい。メーカーにとっては仕様を変更するごとに機器を製作し、そのつど劣化試験等を実施することはコスト的にも避けたいところである。最終的に実機を用いた試験は必要であるとの認識ではあるが、可能な限り設計段階で信頼性を高めておきたいところである。

これまでの既存の信頼性試験法の調査等の結果によれば、次世代電圧制御器に対する信頼性試験法として活用できそうな方法として、レファレンス機器との比較試験による信頼性評価法と数値熱解析による信頼性評価法があることがわかった。それぞれの特徴として、レファレンス機器との比較試験による信頼性評価法は、類似とはいえ実物を用いた規格に則った試験を行うことから、想定される実機との部品構成やシステム構成が大幅に異なる限り、試験結果に対する信頼性は高い。

しかしながら、レファレンス機器の選定には被評価機と機能が同じものであるという制約上、ある程度の数の実機を用意する必要があることから、メーカー側としてはよりコストメリットのある方法を選択したいところである。その点、数値熱解析による信頼性評価は、さまざまな運転条件や自然環境条件に対する結果を速やかに得ることができるだけでなく、新たな冷却構造の改善方法や熱応力の低減方法等についても容易に試すことができ、機器メーカーにとっては効率的な設計を可能とする手段になりうる。実物による試験を最小限とすることから、信頼性という点ではやや不安が残る部分もあるが、実機との検証実験等を行うことによって精度向上を図ることが十分可能である。さらには機器利用者側にとっても、数値解析による信頼性評価によっていくつかの信頼性評価試験を省くことができる、あるいは特殊な条件下での結果について設計段階において情報を得られるといったメリットがある。本研究では特に現存しない電力機器の信頼性評価に対して数値熱解析による方法はコスト等のメリットが大きいと考え、本手法を次世代電圧制御器の信頼性評価に適用し、その適用可能性を検討した。

数値熱解析による SVC 次世代電圧制御器の信頼性評価を実施する前段階として、数値解析結果の精度検証を行った。4kW 級太陽光発電用パワーコンディショナ(PCS)を用いた実験結果との比較から数値解析モデルが妥当であることを確認した。

屋外設置を前提とし、電柱一本に搭載可能で、かつ 10kV 級耐圧の SiC デバイスを搭載することで変圧器無しに AC 6.6kV 系統へ連系することを想定した 300kVA の自然空冷式 SVC は現存し

ないことから、回路設計と構造設計を行い、その構造に合わせた熱流体解析を行った。小型化に伴ってコンデンサのモールド化や機器内部空間の減少による放熱の困難さに対して、まずは各 부품の耐熱温度やその部品が設置される場所の周囲温度が部品の仕様を満たさなくてはならないとの認識のもと、パワーモジュールに取り付けるヒートシンクフィンの長さや深さ、外気取入れ口の位置等をいくつかの数値解析ソフトを駆使して検討した。その結果として、フィンの長さや深さを十分に取ることで内筐体からの放熱面積は十分確保できるが、絶縁体で支持されるリアクトルやセラミックコンデンサについてはアルミ内筐体へ熱伝達率を上げる等のさらなる冷却促進対策が必要であった。これは部品を絶縁液体で封入してその外をエポキシ樹脂などで覆うモールド化や熱伝導率の高い碍子の活用によってもたらされ、結果的に全ての部品の運転温度範囲がメーカ推奨の耐熱温度範囲に収まることとなった。さらにパワー半導体やその他部品の熱損失の低減効果を検証し、パワー半導体の損失だけでなく、リアクトルも含めた他の部品についても損失低減に向けた研究開発が重要であることを提言した。

また、日射の影響についてもその重要性を指摘した。ただし、SVC の全体の熱容量は大きく定常状態に至るまでに時間がかかることから、装置の運転状況を考えると実用的にはより緩和した条件を設定できる可能性があることを示した。

次に数値解析結果を設計段階における信頼性評価にどのように適用するかについて考察する。本信頼性評価の手法では、各部品に要求される仕様(使用される環境条件を含む)との関係において、機器寿命に最も大きな影響を与える因子である熱解析(温度分布)の結果に基づいて信頼性評価を行う方法を適用している。機器全体の状態把握からの弱点抽出を進め、その弱点の解決を図る解析を試み、運転状態における各部品が置かれる状態が明らかとなった上で、引き続いて部品レベルでの信頼性評価を行うことになる。

部品レベルでの信頼性評価は基本的には部品ごとにメーカが提示している温度寿命曲線に則って実施される。他方で、部品が単体ではなく複合した場合には、必ずしもメーカが温度寿命曲線を提示していないことから、熱応力解析等を活用して複合部品の信頼性評価を行うことも想定される。一例として、パワー半導体モジュールの熱応力解析について考察する。

温度の上昇によってモジュールの構成部材に物理的な歪みが生じた場合、SiC チップの基板からの剥離、ワイヤボンディングの剥離、ダイアタッチ(接合材)のボイド発生等の構造的な欠陥を招く可能性があり、これらによりモジュールの信頼性が急激に低下することが危惧される。図 4.5.1 に一般的なパワーモジュールの構造の断面模式図を示す。半導体回路に応じて導電性のアルミニウム製のボンディングワイヤで結線がなされており、モジュールの外部導出端子は回路パターンに直接あるいはアルミニウムワイヤを介してはんだで接続されている。またセラミック基板はヒートシンクを兼ねた金属製のベースプレートにサーマルグリース等の熱伝導材料(Thermal Interface Material: TIM)を介して接合されている。この実装基板を樹脂製の筐体内に搭載し、更にチップや

ワイヤ等の保護のため、絶縁性の樹脂が充填された封止構造となっている。このように、パワーモジュールのパッケージ材料には金属(配線パターン、ワイヤボンディング、ベースプレート、ヒートシンク、はんだ等)、セラミック(チップ、絶縁基板等)、プラスチック(ケース、絶縁封止材等)という物性の大きく異なる材料が接合した形で使用されている。接合部の材料間の熱膨張率が大きく異なると、モジュールが発熱して温度が上昇した時に熱膨張率の差に起因して熱応力が発生し、ダイアタッチに歪みが生じる。長時間高温状況におかれたり、急激な温度上昇があったりしてはんだに過大な歪みが生じた場合は亀裂が発生する可能性があり、さらにモジュールの使用・停止の連続で温度上昇と下降が繰り返されることにより亀裂が進展すると、導電性の低下によりモジュールの性能が低下する。加えて熱抵抗の増加も招くことになり、放熱性が低下してチップの作動温度が想定よりも高くなってしまいう可能性もある。

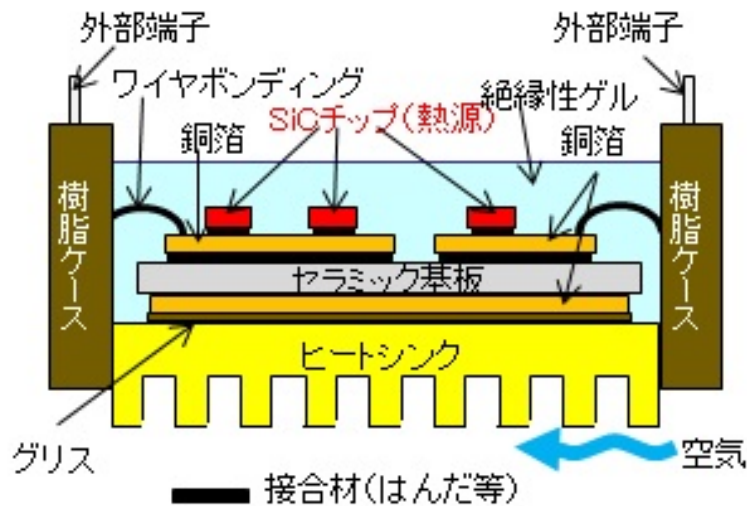


図 4.5.1 一般的な SiC パワーモジュールの構造の断面模式図

変動幅の大きい温度サイクルがかけられた時のはんだの疲労寿命サイクル数 N_f (最初にクラックが発生するサイクル)は以下の近似式(Coffin-Manson 式)で記述できることが知られている¹¹⁾。

$$N_f = C \cdot (\Delta\varepsilon)^{-n} \quad \dots\dots(4.5.1)$$

ここで、 $\Delta\varepsilon$ は1回の温度サイクル中に発生する接合部の非線形振幅幅であり、塑性ひずみとクリープひずみの和として扱われる。また、 C と n は材料固有のパラメータであり、接合部の疲労強度特性により実験的に決定される。したがって、事前に温度サイクル試験を実施して疲労寿命サイクル N_f を求め、 $\Delta\varepsilon$ との関係を調べて(4.5.1)式により C と n を導出しておけば、次に、実装時の形状を考慮したモデルを作成し、非定常数値解析を行って応力分布を求め、最も応力のかかる部分について $\Delta\varepsilon$ を算出することで、クラックが発生するまでの温度サイクル寿命を予測することが可能となる。

本研究で想定している 10 kV 超耐压の SiC パワーモジュールは実際にはまだ市場に普及しているわけではなく、温度サイクル試験を実施して N_f と $\Delta\epsilon$ との関係を評価し、寿命予測をすることまで実施するのは不可能であることから、熱応力数値解析を通してこの関係を導き出すことになる。

ところで熱応力解析では材料の熱物性値や力学特性にかかるパラメータの正確さが重要である。表 4.5.1 に、このパワーモジュールで使用されている主要な部材をまとめた。また、各材質の諸物性値を表 4.5.2 に示す。銅や金属等の一般的な材料についてはデータベースや文献値が充実しており、SiC や Si_3N_4 などのセラミック、シリコーンゲル等の樹脂等についてもある程度の情報は得ることができる。しかし、これらは一般的にはバルクでの値であり、実装時のような薄膜形状でも同様の値になると断言することはできない。また、室温以外のデータについては情報が少なく、温度依存性が大きい場合は、室温でのデータをそのまま使用すると解析結果が大きく異なってしまう可能性もある。また、樹脂材料においては、重合度や配向性の制御、添加材の使用等の工夫により、用途に応じて様々な機能を付与することができるため、同じ化学式のものであっても市場品は全く異なる物性値を示すこともある。従って厳密には数値解析する際には実際に使用する材料の物性値を調べて用いることが望ましい。ここでは、参考として比熱容量をとりあげ、SiC と Si_3N_4 、Au-12%Ge 共晶はんだ、および銅について、70°C～280°C の温度範囲における値を、示差走査熱量計 (DSC) を用いて測定し、温度依存性を評価した結果を付録 D に記す。このような実測値を用いれば、信頼度の高い熱解析を実施することができる。

以上のように数値解析はさまざまな条件に対して、各部品の温度分布を求めることが可能であり、本例の場合、設計上の注意点がリアクトル等の抜熱方式と日射による筐体への入熱対策の部分にあることを明らかにした上で、これに対しての数値解析的に解決策の検討も可能であった。また、部品温度上昇の時間応答挙動や、部品類の性能が向上した際の効果を明確化することができる。さらに場合によっては部品レベルまで細かい熱応力解析も可能となる等、まさに表 4.2.7 で示した柔軟性、低コスト、短時間という利点をもつ優れた解析法となっている。実機による最終確認をする必要は残るが、数値解析の適用は、設計段階における信頼性の評価に十分に対応可能である。

表 4.5.1 SiC パワーモジュールの主要な部材

部材	材質
チップ	SiC
セラミック基板	Si ₃ N ₄
金属ベースプレート	Cu 1020 鋼板
はんだ	Au-12%Ge 共晶はんだ
ボンディングワイヤ	Al
外部端子	Cu
絶縁樹脂	シリコーンゲル
樹脂ケース	PPS (ポリフェニレンサルファイド)
ヒートシンク(放熱フィンを含む)	Al
サーマルグリース	分散材:Al 等 ベース材:シリコーン等

表 4.5.2 主要な材質の諸物性値

材質	密度	熱伝導率	比熱容量	線膨張率	ヤング率
	×10 ³ kg m ⁻³	W m ⁻¹ K ⁻¹	×10 ³ J kg ⁻¹ K ⁻¹	×10 ⁻⁶ K ⁻¹	GPa
SiC	3.1	200	0.69	6.6, 4.4, 3.7	390~400
Si ₃ N ₄	3.2	27	0.68	2.6, 2.8	280~300
Cu	8.92	394	0.385	16.8	129.8
Au-12%Ge	14.67	44.4		12.0	
Al	2.70	240	0.913	23.6	70.3
PPS	1.35	0.29	0.32	49, 55, 18-21	0.085
シリコーン	2.2	0.15	1.55		

参考文献

1. エネルギー総合工学研究所、「新電力ネットワーク実証研究 新電力ネットワーク技術に係る総合調査」(経過報告)【第一部】電力ネットワーク技術実証研究に係わる調査(経過報告)、平成18年3月。
2. 四変テック(株),H26年度電気安全セミナー資料「受変電設備の管理と診断」,平成26年7月。
3. 現場の評価技術者による 実践! 電子部品の信頼性評価・解析ガイドブック, 今井康雄・味岡恒夫監修, 沖エンジニアリング株式会社(2014)。
4. <http://www.ansys.com/ja-JP>
5. <https://www.comsol.jp>
6. http://www.engineering-eye.com/FINAS_CFD/
7. K. Koseki et al., Dynamic Behavior of a Medium-Voltage N-channel SiC-IGBT with Ultra-Fast Switching Performance of 300 kV/us, presented at ICEMS 2016 (The 19th International Conference on Electrical Machines and Systems), DS4G-2-4 (2016)。
8. SiC/GaN パワー半導体の実装と信頼性評価技術, 菅沼克昭, 日刊工業新聞社(2014)。
9. 特集 よくわかる磁性材料, 特殊鋼, Vol. 63, No. 5 (2014)。
10. <http://www.jfe-steel.co.jp/products/denji/catalog/flj-002.pdf>
11. 疲労設計便覧, 日本材料学会編, 養賢堂 (1995).
于強, 白鳥正樹, 「BGA はんだ接合部の形状を考慮した 疲労寿命評価」, エレクトロニクス実装学会誌, Vol.1 No.4, pp.278-283(1998)。
12. 新編熱物性ハンドブック, 日本熱物性学会編, 養賢堂 (2008)。

【付録 A】パワーデバイスの信頼性評価試験法

1. パワーデバイスの課題と評価法

1.1 課題

パワーデバイスの課題を表 1 に示す。パワーデバイスで要求される特性は、より高耐圧で、高応答速度、低損失であり、構造もこの要求に応じて、横型、縦型、縦型トレンチ・ゲート型と変化してきた。さらにスーパージャンクションと呼ばれる新構造も開発されている。また、半導体内の拡散層の深さ、濃度やライフタイムキラーとなる欠陥量など、様々な最適化が行われている。

また、LSI と同様な問題がパワーデバイスにおいても生じている。特に IGBT では数千 V という高電圧をエミッター-ベース間に印可するため、エミッター-ベース間の接合耐圧や高電界での接合リークが問題になる。また、間接的にゲート-コレクタ間も高電界になり、ゲート破壊も起こりやすい。さらにホットエレクトロン(高電界)、外来ノイズの問題もある。

パワーデバイスはスイッチング素子であるため、ON-OFFを繰り返すが、ON時の発熱が大きく、常に温度急変ストレスを受けている状況である。このため、チップだけでなく、接続部の故障にも関連する。最近では熱的に優位性の高いSiC基板を用いた素子も開発されている。

1.2 評価法

表 2 にパワーデバイスの評価法を示す。電気特性に関しては、スイッチング特性と損失の評価以外はLSIに準じた評価である。ただし、高電圧対応の評価が必要である。故障解析と良品解析もLSIに準じたものであるが、詳細はかなり異なっている(表 2 を参照)。スクリーニングや信頼性試験もLSIに準じているが、パワーサイクル試験のようなパワーデバイス特有な試験もある。環境試験はパワーデバイスを実装したユニットや製品で実施することを想定している。

表 A-1 パワーデバイスの課題

項目	課題
特性	応答速度、損失、絶縁耐圧
素子不良モード	ゲートリーク、接合リーク、絶縁耐圧
構造上の不具合	ゲート形状、結晶欠陥・応力、拡散層(深さ、形状)、剥離、ダメージ(ワイヤリング)
外来ノイズ	ガードリング、(耐ESD、EOS)
外部への影響	発熱(放熱)、ノイズ
信頼性	ゲート絶縁膜耐圧、剥離、ホットエレクトロン
環境	環境試験(電力、車載)、振動試験(車載)

表 A-2 パワーデバイスの評価法

項目	評価法
電気特性	スイッチング特性・損失 トランジスタ特性(ON電流、OFF電流、閾値電圧) I-V特性(接合耐圧、接合リーク、ゲートリーク)
故障解析	LSIの故障解析(外観、電気特性、非破壊、開封、観察、故障箇所特定、断面観察、エッチバック)に準ずるが高電圧、3次元、連続的構造(詳細な箇所特定が困難)などの違いがある
良品解析	LSIの良品解析(LSIプロセス診断)に準ずる。ただし、3次元構造のため内部断面欠陥解析や裏面の電極や電極・半導体海面の解析を含む
スクリーニング	バーンイン(ゲート不良除外)
信頼性試験	高温(動作)、低温、温湿度、熱衝撃、温度サイクル、ホットエレクトロン、TDDB、ESD、パワーサイクル試験
環境試験	システムにおいて、屋外環境、振動試験、EMC試験
分析	形状観察:SEM、TEM 結晶欠陥:TEM、選択エッチング、カソードルミネッセンス 応力:ラマン分光法 拡散層:SCM,SIMS,広がり抵抗法、選択エッチング

2. 信頼性(加速)試験

信頼性試験では市場で起こる故障要因を推定し、それに即した試験を実施する必要がある。また、寿命は理論や経験からなる式や数値を用いて求める。

信頼性試験では故障の要因に合わせた加速試験が必要になる。表 3 に代表的な故障要因とその加速法に関して示す。

表 A-3 故障要因と加速法

故障要因	加速法
腐食	温度・湿度
剥離	温度サイクル、熱衝撃
吸湿性(樹脂)	温度・湿度
絶縁破壊	電圧、温度
クラック	温度サイクル、熱衝撃
イオンマイグレーション	電圧、温度
エレクトロマイグレーション	電流、温度
ストレスマイグレーション	温度
ウイスカ	温度
破損(耐性)	振動、落下

3. 環境試験

3.1 環境試験とは

環境試験とは、機器や部品の実際の使用時を想定して行われる。すなわち、周囲の条件によって影響を受けることを考慮し、これを未然に解明するために行われる。高品位の製品に対しては、使用を満たしているかの確認をするために、必ず各種の環境試験を行う。環境試験には表4のように様々な試験がある。

試験条件は、輸送条件、季節変化、海岸地域、熱帯地域、移動装置などの条件を想定したものである。

3.2 環境試験の順序

環境試験には、単独で行う場合、複合、または組み合わせて行う場合、及び一連の順序で行う場合がある。

(1)単独で行う環境試験

1つのサンプルに対して、1方法1条件のみの試験を実施する。複数の試験法や条件で実施する場合には別々のサンプルを用いる。(単独の試験で故障が発生しない場合でも、組み合わせ試験や複合試験で発生する場合がある。)

(2)複合試験

温度と振動など異種の環境条件を同時に加え、故障発生を促進させる試験である。この場合、組み合わせの種類が重要になる。

(3)組み合わせ試験

温度急変試験や温湿度サイクル試験のように試験条件を変化させる試験である。同じ資料に対し、複数の試験条件で実施する試験で、例えば、温度急変試験の場合、 -40°C (30分間)と 125°C (30分間)を交互にさらす試験が「組み合わせ試験」に当たる。

(4)一連の順序で行う試験

同一試料でいくつかの試験を、順々に行う試験で、故障メカニズムを考慮した順序で実施することが重要である。

3.3 主な環境試験項目と目的

表4に環境試験の目的、及び規格を示す。なお、試験によっては連続バイアス印可、断続バイアス印可、逆バイアス印加、応力などのストレスを印可する場合がある。

表 A-4 主な環境試験の目的、及び規格

項目	目的	規格
熱衝撃試験	急激な温度変化に対する耐性	JIS C 60068-2-14、MIL-STD-883、EIAJ ED-4701/300
温度サイクル試験	温度変化に対する耐性	MIL-STD-883、EIAJ ED-4701/100
温湿度サイクル試験	温湿度変化に対する耐性	JIS C 60068-2-38、MIL-STD-883、EIAJ ED-4701/200
高温保存試験	長期間、高温下で保存した場合の耐性	JIS C 60068-2-38、MIL-STD-883、EIAJ ED-4701/200
低温保存試験	長期間、低温下で保存した場合の耐性	JIS C 60068-2-1、MIL-STD-883、EIAJ ED-4701/200
高温高湿保存試験	長期間、高温高湿下で保存した場合の耐性	JIS C 60068-2-3、EIAJ ED-4701/100
結露サイクル試験	高温・高湿雰囲気での繰り返し環境下で生じる結露の影響	JPCA ET-09
衝撃試験	輸送または使用時に受ける耐衝撃性の確認	JIS C 60068-2-27、MIL-STD-883、EIAJ ED-4701/400
振動試験	輸送または使用時に受ける耐振動性の確認	JIS C 60068-2-6、MIL-STD-883、EIAJ ED-4701/400
複合振動試験	温度・湿度さらに振動が複合的に加えられた環境での耐久試験	JIS C 60068-2-50、JIS C 60068-2-51、JIS C 60068-2-53、
自然落下試験	搬送・使用時における製品の耐落下衝撃	JIS C 60068-2-32、JIS Z 0202、JEITA ET-7409
塩水噴霧試験	塩水雰囲気に対する耐食性	JIS C 60068-2-11、MIL-STD-883、EIAJ ED-4701/200
ガス腐食試験	硫化水素・亜硫酸ガス雰囲気に対する耐食性	JIS C 60068-2-42、JIS C 60068-2-43
ばっき(暴気)試験	アンモニア・硝酸・シリコン雰囲気に対する耐食性	JIS H 3250、JIS H 8620
薬品浸漬試験	各種薬品に対する耐食性	JIS K 7114
オゾン試験	空気中に存在するオゾンに対する耐性	JIS K 6259、JIS K 6301 JIS D 0205
耐候性試験	太陽光・温度・湿度・降雨などの屋内外の条件を人工的に再現し、劣化を促進	JIS D 0205
減圧試験	航空機中、山上、高層ビルなど、低圧環境での耐性	JIS C 60068-2-13、JIS C 60068-2-40、JIS C 60068-2-41
塵埃試験	塵埃に対する耐塵性能を評価	JIS D 0207、JIS C J60068-2-68、JIS C 0920
防水・散水試験	風雨、水しぶきなどを受けた場合の耐水性、防水性を評価	JIS D 0203、SAE J 575、JIS C 0920、IEC60529、ISO 20653、DIN 400
IP 等級試験	電気機械器具の外郭への異物、ホコリや水に対する保護等級への耐性性能を評価	JIS C 0920、IEC60529

4. 温度試験

4.1 温度ストレス試験

温度(熱ストレス)の影響を調査するための試験法。高温・低温試験とは、高温環境下、または低温環境下で数時間～数日保存した後に確認を行う。温度や保存時間は JIS 規格などを参考に決定している。

4.1.1 高温試験(放置・通電)

- ①名称: 高温温度試験 (High Temperature Test) と呼ぶ。これに用いる装置は恒温試験槽 (Temperature Testing Chamber) である。
- ②目的: 半導体、電子部品及び電気製品の高温環境下における耐性を評価する。
- ③方法: 恒温槽を使用し、半導体、電子部品及び電気製品など保存・使用環境条件に合わせて温度を設定する。槽内の温度を一定に保つため、送風機 (FAN) が付いているものがあるが、風により、試料や槽内に静電気が発生することがあるので、注意を要す。
- ④用途: 信頼性試験の用途は寿命や使用期間に発生する故障率を推定すること以外に、初期故障を除外するスクリーニングがある。
- ⑤高温による劣化現象: 一般の反応などで用いられる温度と時間の関係はアレニウス(Arrhenius)のモデルが基になっている。

$$K=A [\exp(-E_a/\kappa T)]$$

ここで、Kは速度定数、Aは頻度因子と呼ばれる定数、 E_a は活性化エネルギー、 κ はボルツマン定数 (1.38×10^{-23} J/K)、Tは絶対温度である。室温付近では“10°C 2倍速”といわれるように一般に温度が 10°C上がると寿命は1/2になるといわれており、簡易的にこれを用いることが多い。

また、多くの半導体デバイスで、高温保存時に以下のような故障傾向があり、これらが寿命を決める主要因である。

- A) パッドとワイヤの断線: パッドに用いられる Al (アルミ)とワイヤに用いられる Au(金)の接合、Au-Al接合は高温で長期間保存すると接触抵抗が増加して、最終的には断線してしまう。
- B) 電荷の漏れ(リーク): EPROM 等の不揮発性メモリの多くは高温時に保持期間が短くなる。
- C) Cu(銅)配線の Cu イオンマイグレーション: 高温時に成長が早くなり、端子がショートしてしまう。
- D) クラック: 水分蒸発量の増加によりクラックが発生する。
- E) ホットキャリア劣化: 温度により加速する。
- F) 輸送時の劣化: 輸送時に遭遇する温度環境が製品に影響を及ぼす。

- G) 表面処理(めっき・塗膜など)の密着性:高温により低下する。
- H) 実装部の特特性劣化:樹脂成型品の熱膨張の影響で特性が低下する。
- I) エアリーク:気密性の高い製品に対する温度試験後のエアリークが起こる。

⑥通電試験:代表的な通電試験は以下の通りである。

(1)高温連続通電試験

【目的】長時間、高温下での動作状態に対する耐性を評価する。

【試験条件例】電圧／電流＝規定の動作条件、 $T_a=125^{\circ}\text{C}$ ($T_j=175^{\circ}\text{C}$)

【対応範囲】個別半導体、モジュール、レギュレータ IC、その他 IC

* 試験サンプルの大きさ、形状によって制限を受ける。

(2)断続通電試験

【目的】長時間、電氣的な ON/OFF を繰り返すことによる電氣的及び熱的ストレスの変化に対する耐性を評価する。

【試験条件例】電圧／電流＝規定の動作条件、 $\Delta T_c=75^{\circ}\text{C}$ ($30\sim 105^{\circ}\text{C}$)

【対応範囲】個別半導体、モジュール、レギュレータIC、その他IC

* 試験サンプルの大きさ、形状によって制限を受ける。

(3)パワーサイクル試験

【目的】長時間、安定した温度下でスイッチのON/OFF動作を繰り返すことによる電氣的及び熱的ストレスの変化に対する耐性を評価する。

【試験条件例】電圧／電流＝規定の動作条件、 $T_c=50^{\circ}\text{C}$ 、 $\Delta T_j=100^{\circ}\text{C}$ ($50\sim 150^{\circ}\text{C}$)

【対応範囲】MOSFET、IGBT、その他IC

* 試験サンプルの大きさ、形状によって制限を受ける。

4.1.2 低温試験(放置・通電)

①名称:低温試験(Low Temperature Test)と呼ぶ。これに用いる装置は低温槽(低温恒温槽: Low Temperature Testing Chamber)である。

②目的:半導体、電子部品及び電気製品の低温環境下における耐性を評価する。

③方法:低温槽を使用し、半導体、電子部品及び電気製品など保存・使用環境条件に合わせて温度を設定する。

④用途:低温による熱の影響を調べる試験で、検体を長期間低温下の環境に放置し、その後正常に動作するかどうかを評価する。高温時の厳しい条件を満たしていれば問題ないとの判断から、低温保存は行われていないことが多い。製品別に保証が必要な場合に実施する。当然、低温の収縮による断線等も起こるが、信頼性試験としてではなく、パッケージの評価や低温動作試験で行う。

⑤低温による劣化現象:半導体素子の故障要因の大部分は、温度が高くなるほど故障要因が加

速されるが、ホットキャリア劣化は温度が低くなるほど故障要因が加速される性質がある。すなわち、低温条件下にてMOSFETにストレスの印加を行うと(製品の場合には内部MOSFETにストレスが印加されるよう動作させると)、Si(シリコン)基板中を流れる電子は、高温条件下に比較し原子の熱的振動が小さくなるために、裕子に衝突する確率が減少する。このため電子の平均走行距離が長くなり、より高いエネルギーを持つことになる。したがって、高いエネルギーを持つホットキャリアの数は増加し、キャリアが酸化膜中に注入される確率は大きくなる。しかしながら、微細化に伴う電源電圧の低下によって、衝突電離のモードが変化してきており、必ずしも低温が厳しいとは限らなくなってくる。

4.1.3 水分・湿度ストレス試験

最近の半導体デバイスのパッケージはほとんどがプラスチック樹脂である。これらの信頼度は耐湿性に依存するところが大きく、またこれを早期に評価するために数多くの耐湿性評価が考えられている。最近の半導体デバイスは面実装デバイス(SMD:Surface Mounted Device)が主流であり、小型化、薄型化が一段と加速している。このような半導体デバイスの場合、実装時における熱ストレス及び保管時の樹脂の吸湿が無視できない状況となってきている。

実使用状況を正しくシミュレートするために実装ストレスの印加を前処理として行い、上記に示した各種の耐湿性試験を実施している。

4.1.4 恒温恒湿試験 (Temperature and humidity test)

- ①名称:高温高湿試験と呼ばれる場合もある。試験条件を明確にした85℃-85%試験という場合もある。これに用いる装置は温湿度試験槽 (Temperature and humidity testing chamber) である。
- ②目的:製品が湿った空気中に長時間置かれた場合の状態を調べる。
- ③方法:比較的高い湿度を100℃以下の恒温で樹脂などの内部に水蒸気を拡散し、内部の部品の剥離(水蒸気爆発)、腐食、イオンマイグレーションなどの問題に対する耐性を評価する。
- ④用途:樹脂などで封止された部品の水分に対する耐性試験で最も広く用いられる評価方法である。モールド樹脂や、プリント基板表面にコーティングされているレジストの水蒸気の浸透性の評価としても用いられる。

4.1.5 恒温恒湿バイアス(THB)試験

- ①名称:THBは Temperature and humidity bias test の略称で、和名は恒温恒湿バイアス試験(高温高湿バイアス試験)。
- ②目的・用途:イオンマイグレーション、ウイスカや電気化学的な腐食など、バイアスが必要な試験を水分の拡散と同時に行う方法。

③方法:恒温恒湿試験法で試料にバイアスを印加。

4.1.6 恒温恒湿室

①名称:Built-in chamber ともいい、部屋そのものが恒温恒湿槽。一般的な恒温恒湿槽の内法寸法が W 1100 xH1000 xD1000 mm とすれば、恒温恒湿室は2畳～6畳程度の広さを有し、高さも～5m程度まで各容積がある。

②目的・用途:製品そのものを稼働させた時の温度・湿度の影響を調査する時に用いる。

③方法:恒温恒湿試験と同じ。

4.1.7 プレッシャークッカ(PCT)試験

①名称:PCT (Pressure Cocker Test)、和名は飽和加圧蒸気試験であるが、プレッシャークッカ試験と呼ばれていることが多い。

②目的:恒温恒湿試験では試験時間が長く、短時間で評価できる方法として使われる。ただし、市場の故障メカニズムを再現しない場合があるため、信頼性の保証として用いる場合には注意が必要である。

③方法:100℃以上の高温で、加圧し、飽和水蒸気により試料内部への水分の浸入を時間的に短縮する方法。HAST以上に厳しい試験条件設定が可能。

④用途:恒温恒湿試験と同じ用途。開発時に短時間で簡易的に評価するためには有効な方法である。

4.1.8 HAST (Highly Accelerated Stress Test)

①名称:Highly-Accelerated Temperature and Humidity Stress Test とする場合もある。和名は超加速寿命試験。

②目的:恒温恒湿試験と PCT の中間的な試験で、PCT の問題を回避し、短時間で試験ができる。バイアスを印加するが多い。

③方法:PCT に近いが、不飽和加圧蒸気で実施される。

④用途:恒温恒湿試験、または THB と同じ。

4.1.9 温湿度サイクル試験 (Temperature/Humidity Cyclic Test)

①名称:装置は温湿度サイクル試験槽 (Composite Temperature/ Humidity Cyclic Testing Chamber) と呼ぶ。

②目的:温度・湿度やその変化に起因する故障に関する信頼性試験である。部品にボイドや剥離などの欠陥がある、または熱ストレスにより欠陥が発生する場合には多くの水分がそこに集積され

るため、実用的な方法である。

③方法:所定の湿度にし、温度サイクル試験を行う。

④用途:恒温恒湿試験と本質的には同じであるが、熱ストレスを考慮しており、より現実的な方法である。この試験の後、耐寒試験や減圧試験によって不具合をさらに強調することができる。

4.1.10 結露サイクル試験

①名称:結露サイクル試験、湿度冷熱衝撃試験と呼ぶ場合もある。

②目的:表面に付着した水分に対する耐性の試験。

③方法:温湿度条件を急激に変化させ、結露の生成と乾燥を繰り返す。

④用途:プリント基板のイオンマイグレーション評価や腐食評価に有効である。

5. 温度急変ストレス試験

5.1 温度急変試験

5.1.1 温度急変試験の重要性

熱ストレスは、湿度ストレスとともに環境ストレスとしては最もポピュラーなものであり、多くの製品の故障現象に深く関わっている。熱ストレスが単独で故障を生じさせる単純な物理現象としては、自らの発熱や製品外部から熱が流入することによって製品内部の構成部品の温度が上昇、逆に外部から熱を奪われて温度が異常に降下することで機能が低下するといったものである。

一方、温度上昇と降下が繰り返される場合には、膨張と収縮現象が繰り返されることになり、製品の固定部分や材料そのものに応力が発生し、ついには破壊に至る可能性も生じるようになる(熱疲労現象)。

このような加熱の特質から、電気・電子製品の設計にあっては、熱設計がすこぶる重要になる。今日の低電力タイプの家電製品においてさえ、構成部品の集積度が高いことから、自己発熱する製品からの放熱は大変重要な対応項目である。

5.1.2 温度急変試験の種類

温度サイクル試験と熱衝撃試験の相違が判然としない場合が多く見受けられる。これは、一般に両者の定義を明瞭に区別しないまま用いているためで、通常、熱媒体として気体(例えば、空気)で行う試験を温度サイクル試験と呼び、液体で行うものを熱衝撃試験(Thermal shock test)と呼んでいる場合もある。実際には冷却、昇温速度の温度勾配の相違であり、温度サイクル試験では平均が10~15℃/分であるのに対し、熱衝撃試験は急冷・急加熱である。

このようにいくつかの方法があり、目的により適切な試験を選択し、正しい手順で実施することが肝要である。手順を間違えると別の試験になってしまう場合がある。

5.2 温度サイクル試験

- ①名称:温度サイクル試験 (Temperature cycling test) 、または Heat cycle test と呼ぶ。
- ②目的:半導体、電子部品及び製品が温度変化または温度変化の繰り返しを受けた場合の耐性を評価する。
- ③方法:一般的に1つの槽に入れ、温度と時間の条件に合わせて槽の温度を上昇(下降)させる。
- ④用途:製品のはんだ接続部や接触部などに温度上昇と降下が繰り返される場合には、膨張と収縮現象が繰り返されることになり、製品の固定部分や材料そのものに応力が発生し、ついには破壊に至る可能性も生じるようになる(熱疲労現象)。例えば、日中と夜間、アジアからアラスカへ飛行機で製品を移動させるなど、仕様条件に対する耐久試験の場合が多い。

5.3 熱衝撃試験(気槽・液槽) (Thermal Shock Test (Air, Liquid))

- ①名称:Heat and cool shock test と呼ぶ場合もある。
- ②目的:電子部品・半導体及び製品に高温と低温を短時間で交互に繰り返すストレスを与え、供試品の信頼性を評価する。
- ③方法:以下の2つの方法がある。

(A) 気槽による試験方法

低温、常温、高温の 3 つの恒温チャンバーを用い、あるチャンバーで所定の時間放置した後、急速に次のチャンバーに移動させる。代表的な試験条件は、

- ・温度: $-60 \pm 2^{\circ}\text{C}$ (30分) \rightarrow 常温 (5分) \rightarrow $+150 \pm 2^{\circ}\text{C}$ (30分)
- ・サイクル数: 50、200、500、1000、3000サイクル

である。温度サイクルに比較して冷却、昇温時間が短い。

(B) 液槽による試験方法

液体を媒体とした熱衝撃試験で、高温と低温の液体に交互に浸漬する。代表的な試験条件は、

- ・温度: $-60 \pm 2^{\circ}\text{C}$ (5分) \leftrightarrow $+150 \pm 2^{\circ}\text{C}$ (5分)
- ・サイクル数: 50、200、500、1000、3000サイクル
- ・媒体: 不活性液(フッ素系・シリコン系など)

ここで、不活性液には、[1]優れた電気絶縁性と熱特性を有する、[2]高温、低温を問わずほとんどの溶剤に溶解しない、[3]熱的・化学的に安定性が高い、[4]不活性で金属、プラスチック、ゴム等の構成材料を侵さない、[5]低表面張力 ($12\text{--}18\text{mN/m}$ @ 25°C)、低粘度であり、浸透性に優れている、[6]不燃性、無毒、無臭で安全性が高い、[7]オゾン破壊係数がゼロである、等が要求される。

- ④用途:熱衝撃試験は温度サイクル試験よりも厳しく、仕様に則した加速試験というよりも弱点検出型の試験の傾向が強い。また、熱伝導効率の関係から液槽の方が厳しい試験になる。実際には、

A) はんだクラック・はんだ割れなどの市場不良の再現試験

- B) 鉛フリーはんだなどの接続材料の変更に伴う基板実装信頼性評価
- C) BGA、CSP など実装形状の変更に伴う信頼性評価
- D) 各種コネクタの温度変化による接続抵抗評価、樹脂成型品の熱歪みによるワレの確認
- E) 接合材料のひび割れ・剥離
- F) シール漏れの確認、製品出荷前のスクリーニング処理などに用いられている。

6. 電氣的ストレス試験

6.1 電氣的ストレスを用いた試験法

信頼性試験では電氣的なストレスを加えた試験が多く行われている。特に高温動作試験、高温高湿動作試験、HAST (Highly Accelerated Stress Test)などはその代表的なものである。一方、電氣的ストレスが主要な加速要因である故障モードも少なくない。エレクトロマイグレーション、イオンマイグレーション、絶縁耐圧などがそれである。また、電氣的な外来ノイズをシミュレーション的に印加し、耐性を測定する ESD/ラッチアップ試験や雷サージ試験のもその 1 つである。また最近ではパワー半導体に関連するパワーサイクル試験も行われるようになった。

6.2 電氣的ストレスの記載

電氣的ストレスに関する試験は多岐にわたるが、電圧・電流を印加するだけの試験、他の試験との複合的な試験、評価を含めた試験等が多い。表 5 には電氣的ストレスに関する評価法を示す。

表 A-5 電氣的ストレスに関する試験法

試験法	ストレス
高温動作試験	温度+電圧
高温高湿動作試験	温湿度+電圧
HAST	温湿度+電圧
エレクトロマイグレーション	電流+(温度)
イオンマイグレーション	電流
絶縁耐圧	電圧
ESD/ラッチアップ	高電圧
雷サージ	高電圧
パワーサイクル試験	パルス
パワー温度サイクル試験	温度+パルス

6.3 エレクトロマイグレーション(EM)試験

①名称:エレクトロマイグレーション試験

②目的:集積回路の配線の信頼性評価。主に製造メーカが配線の最適化や保証のためにTEGを用いて測定する。

③エレクトロマイグレーション現象:エレクトロマイグレーション現象とは、配線に電流を流すことにより金属原子が移動する現象で、LSIのような電流密度が高い場合($10^4 \sim 10^5 \text{A/cm}^2$)に起こる。LSIに用いられるアルミ(Al)配線では高速で移動する電子がAl原子と衝突し、空裕子を作り、電子の流れる方向にAl原子が移動する。これにより陰極側の特定箇所ポイドが形成され、やがてはオープン故障になり、陽極側ではヒロックやウィスカが成長し、最終的にはショート故障に至る。

6.4 高温通電試験

①名称:高温試験(動作)、高温通電試験、高温バイアス試験

②目的:通電によるトランジスタ等の接合劣化に関連する試験。

③方法:恒温槽を用いて高温試験を通電しながら実施する。

6.5 絶縁耐圧試験

①名称:一般には破壊電圧を求める方法が行われ、絶縁耐圧試験と呼ぶが、TZDB (Time Zero Dielectric Breakdown)ということもある。信頼性試験として、時間による劣化を評価する試験も行われる。この方法はTDDB (Time Dependence Dielectric Breakdown) 試験といい、酸化膜経時破壊試験と呼ばれることもある。

②目的:半導体デバイスのゲート絶縁膜などの耐性の測定や信頼性の保証に用いる。絶縁膜に欠陥があると低電圧で破壊するため、開発時の構造要因の問題や製造上の問題を把握し、改善することに用いられる。

③方法:以下の2つの方法がある。

(A) 絶縁耐圧(TZDB)

対象となる絶縁膜に接続する電極(ゲート絶縁膜の場合にはゲート電極と基板)に電圧を印加してI-V (電流-電圧)特性を測定する。所定の電流に達した時の電界、または破壊する電界を求める。実際には保証する電圧までに破壊する“欠陥密度”で管理する。

(B) TDDB

絶縁耐圧に近い電界を絶縁膜に印加し、電流の時間変化をモニターする。所定の電流に達した時の時間分布を求め、信頼性上の故障率を評価する。

6.6 パワーサイクル試験

①名称: パワーサイクル試験

②目的: 主にパワーモジュールの電氣的ストレスや熱ストレスに対する耐性を評価する試験。

③方法: パワーデバイスをスイッチング動作(断続通電)させる方法で、通電の発熱を利用して温度急変試験(熱衝撃、温度サイクル)と同様な熱ストレスを与えると同時に断続通電による電氣的ストレスも与える。

④用途: パワーMOSFET、IGBT などのパワーデバイス、またはそれを組み込んだモジュールの実用的な評価方法として使われている。熱ストレスではワイヤ・チップ間のクラックや剥離、ダイボンドのはんだクラックなどの評価に有効である。

6.7 パワー温度サイクル試験

①名称: パワー温度サイクル試験

②目的: パワーサイクル試験に温度サイクルを加え、実際に近い環境で評価する。パワー温度サイクル試験は、デバイスを周期的に動作させながら、想定される最悪温度環境に対する耐性確認する為に実施される。

③方法: パワーデバイスなどの ON/OFF のスイッチング動作と温度環境を周期的に変化させる方法で、パワーサイクル試験と温度サイクル試験を組み合わせた方法である。

④用途: パワーサイクル試験と同じであるが、パワー温度サイクル試験は AEC-Q100 (オートモーティブ集積回路 (IC) のための各種信頼性試験の規格)の1つになっている(JECD22 A105)。

【付録 B】パワーコンディショナの定格仕様

1. 共通

- ・ 定格入力電圧：DC330V
- ・ 入力電圧範囲：DC70～450V

2. 系統連系運転時

- ・ 定格出力：4.0kW
- ・ 動作電圧範囲：DC90～435V
- ・ 最大許容入力電圧：450V
- ・ 定格出力電圧：AC202V（単相 2 線式、ただし連系は単相 3 線式）
- ・ 定格出力周波数：50Hz または 60Hz
- ・ 最大入力電流：25A（温度抑制あり）
- ・ 最大出力電流：20Arms
- ・ 定格時電力変換効率：96.0%（JIS C8961 による）
(95.5% (参考値)：入力電圧 DC250V 時)
- ・ 出力基本波力率：0.95%以上（定格出力時）
- ・ 高調波電流含有率：総合 5%以下、各次 3%以下（定格出力時）
- ・ 連系運転範囲：連系点電圧 OVR、UVR 設定値による
系統周波数 OFR、UFR 設定値による
- ・ 雑音端子電圧(準尖頭値)：VCCI クラス B
- ・ 突入電流：なし
- ・ 騒音：定格出力時 34dB 以下 ※測定方法は JIS C 8980 11.9 騒音測定による

3. 自立運転時

- ・ 定格出力電力：1.5kVA
- ・ 定格出力電圧：AC101V
- ・ 出力電圧範囲：AC101V±6V
- ・ 出力電気方式：単相 2 線式
- ・ 定格出力周波数：50 または 60Hz
- ・ 出力周波数精度：定格周波数に対し±1Hz 以内
- ・ 最低入力電圧：DC70V
- ・ 最大出力電流：15A（実効値）
- ・ 電力変換効率：92%以上（定格入力、定格出力時、R 負荷、力率 0.97 以上）

4. 主回路方式

- ・変換方式：連系運転時 電圧型電流制御方式
自立運転時 電圧型電圧制御方式
- ・スイッチング方式：正弦波 PWM 方式
- ・絶縁方式：トランスレス方式
- ・接地方式：直流回路側は非接地方式、交流出力の中性線が配電線の柱上変圧器側で接地される方式とする。(但し、自立運転時は非接地)

5. 制御方式

- ・電力制御方式：最大電力追尾制御
- ・補助制御機能：自動電圧調整（有効電力制御：107V 以上）
- ・運転制御方式：自動起動・停止（起動時ソフトスタート）
- ・起動電圧：DC90V±3V 以上 150 秒以上継続または、DC150V±3V 以上 10 秒以上継続
- ・停止電圧：DC70V±2V

6. 電気的特性

- ・絶縁抵抗：1MΩ 以上
- ・耐電圧：AC1500V 1 分間

7. 直流開閉器

- ・定格入力電圧：DC330V
- ・最大入力電圧：DC495V
- ・最大入力電流：40A

8. その他

- ・多数台連系対応型単独運転防止機能（ステップ注入付周波数フィードバック方式）搭載
- ・FRT(系統事故時運転継続)要件対応
- ・自立運転用の端子台搭載
- ・製品寸法：W490×H270×D156 (mm)
- ・製品質量：16kg

【付録 C】

定格 300kVA の SVC 用 SiC パワーモジュールの損失は以下のように見積もった。

(1)導通損失

AC6.6kV 系統に定格 (300kVA) を出力する際の SVC の出力電流は、各相ともに $26.2A_{rms}$ (= $37.1A_{peak}$) である。各モジュールに流れる電流もこれにほぼ等しいので、5.3mm 角の IGBT チップ (これまでの試作評価で最大 20A の通電実績がある) 2 並列で 1 モジュールを構成する設計とする。

この場合、定格 (300kVA) 出力時の 1 チップ当たりの電流は、 $13.1 A_{rms}$ (= $18.6A_{peak}$) であり、導通損失は $70.6W/chip$ となる。すなわち、 $141W/モジュール$ となる。(ここで、オン電圧は文献 7 における $I_{CE}=5\sim 35A$ の実測の室温静特性から得た $V_{CE}=0.139 \times I_{CE}+3.57$ (V) を使用。) なお、 $25^{\circ}C$ を基準にした IGBT のオン抵抗の温度依存性が、 $25^{\circ}C \sim +250^{\circ}C$ で $-9.2\% \sim +3\%$ (実測の静特性) のため、室温で代表させて計算している。

(2)スイッチング損失

文献 7 におけるスイッチング損失評価の実績を基に、300kVA 出力時の電圧電流条件におけるスイッチングエネルギーを推定すると $4.50mJ/chip/回$ になる見込みである。このモジュールをキャリア周波数 20kHz で運転する場合を考えると、 $4.50mJ/chip/回 \times 20,000 回 = 90.0W/chip$ 、すなわち、 $180W/モジュール$ の損失となる。

(3)全損失

定格 (300kVA) 出力時のモジュール損失は、上記(1)と(2)の結果より、 $141W$ (導通損) + $180W$ (スイッチング損) = $321W/モジュール$ となる。本例の SVC では、全体で計 12 モジュールを使用する回路構成であるので、合計の損失は $3.85kW$ (= $321W/モジュール \times 12 モジュール$) となる。

【付録 D】

パワーモジュールを構成する主要な部材のうち、SiC と Si₃N₄、Au-12%Ge 共晶はんだ、および参考として銅について、70°C～280°Cの温度範囲における比熱容量を、示差走査熱量計(DSC)を用いて測定し、温度依存性を評価した。測定した試料のサイズと重量を表 C-1 に記す。

装置はTA インストルメントの Q-100 DSC を用いた。試料容器は標準アルミニウムパンを使用した。昇温速度は 10 °C min⁻¹ とし、昇温前後にはそれぞれ 10 分間の等温保持期間を設けた。ベースラインの時間変動の影響を抑えるため、測定は 50～140°C、120～210°C、190～280°C の 3 つの温度域にわけて行った。また、再現性の確認のため、各温度域について 3 回ずつ測定を実施した。なお、昇温開始後 2 分以内のデータは定常状態ではないと思われるので削除した。比熱容量の標準試料には、NIST の合成サファイア (α -Al₂O₃) の粒子を厚さ 0.25 mm のディスク状に加工したものをを用いた。測定は空容器、標準試料を密封した容器、試料を密封した容器の順で行い、以下の関係式から試料の比熱容量を算出した。

$$c_p = \frac{h}{H} \cdot \frac{M}{m} \cdot c_{p,ref} \quad (D.1)$$

ここで、 $c_{p,ref}$ は標準試料の比熱容量、 M と m はそれぞれ標準試料と目的試料の重量、 H と h は DSC 曲線における評価する温度での標準試料および目的試料と空容器との差である。図 C-1 に結果を示す。金属の(c)Au-12%Ge はんだと(d)銅の比熱容量は温度依存性が小さく、ほぼ一定の値を示した。したがって、これらの材料については室温での文献値をそのまま使用しても大きな問題はないと言える。それに対して(a) SiC と(b) Si₃N₄ については顕著な温度依存性が確認されており、熱応力解析でも温度によって異なる物性値を使用する必要があることが確認された。なお、(d)には文献値もあわせてプロットしており、測定結果とほぼ一致していることから、多少のばらつきは認められるものの、精度の高い結果が得られていることがわかる。

表 D-1 比熱容量を測定した部材

試料	メーカー	サイズ	重量
SiC 単結晶板(4H-N, 4°off)	タンケブルー	4 mm × 4 mm × t0.43mm	21.43 mg
Si ₃ N ₄ セラミックス板(熱伝導率 90W/mK 品)	デンカ	4 mm × 4 mm × t0.32 mm	16.08 mg
Au-12Ge 共晶はんだ	住友金属鉱山	4 mm × 4 mm × t0.2mm	44.06 mg
Cu(C1020 鋼板)(調質 1/2H)	(一般材料)	4 mm × 4 mm × t0.2mm	55.09 mg

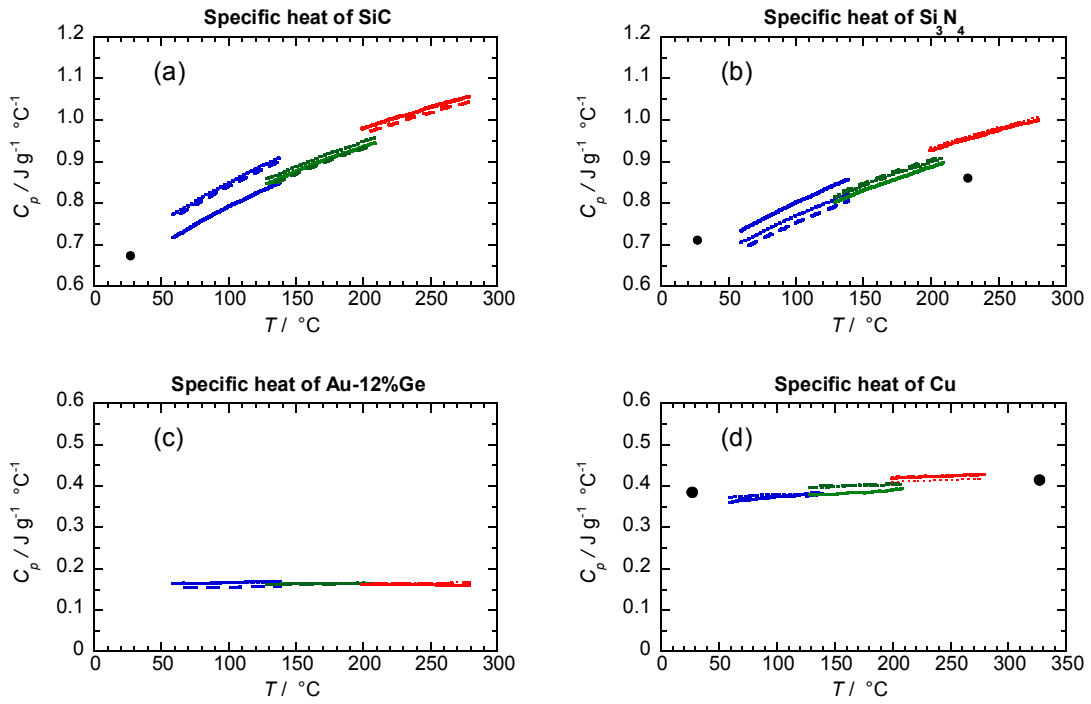


図 D-1 主要なパワーモジュール部材の比熱容量
 (a) SiC, (b) Si_3N_4 , (c) Au-12%Ge, (d) Cu (●は文献値¹²⁾)

契約管理番号 14101448-0