

PV出力変動に伴うSVR動作増加を低減する
Volt-var制御を適用した配電線電圧制御の最適化に関する研究

Studies on Optimization of Voltage Control by Applying Volt-var
Control Focusing on Decreasing SVR Operation Repetition
with PV Output Fluctuations

2023年7月

山下 裕輔
Yusuke YAMASHITA

PV出力変動に伴うSVR動作増加を低減する
Volt-var制御を適用した配電線電圧制御の最適化に関する研究

Studies on Optimization of Voltage Control by Applying Volt-var
Control Focusing on Decreasing SVR Operation Repetition
with PV Output Fluctuations

2023年7月

早稲田大学大学院 先進理工学研究科
電気・情報生命専攻 先進電気エネルギーシステム研究

山下 裕輔
Yusuke YAMASHITA

目次

第 1 章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.1.1 再生可能エネルギー電源の導入状況と見通し	1
1.1.2 再生可能エネルギーの導入拡大による系統課題	3
1.2 本研究の目的および論文構成	8
第 2 章 SVR タップ切換制御と PV インバータ無効電力出力による 配電線の電圧制御	11
2.1 配電系統の電圧管理	11
2.1.1 分散化電源増加に伴う逆潮流による電圧上昇・電圧変動 ^[33]	11
2.1.2 配電線の電圧制御方式	15
2.2 スマートインバータ Volt-var 制御と SVR タップ制御	20
2.2.1 スマートインバータの Volt-var 制御機能	20
2.2.2 Volt-var 制御適用により想定される SVR タップ切換動作に与える 影響	22
第 3 章 PV 出力変動に伴う SVR 動作と配電損失増加を低減する Volt-var 曲線決定手法	24
3.1 提案する Volt-var 制御システムの構成	25
3.2 Volt-var 曲線決定方法	26
3.2.1 選択する Volt-var 曲線候補	26
3.2.2 提案手法の目的関数	27
3.2.3 提案手法の処理手順	29
第 4 章 Volt-var 曲線決定手法の適用効果 -配電線縮約モデルを用いた提案手法の確立-	32
4.1 数値計算条件	32

4.2	高頻度タップ切替発生日における提案手法の確立と有効性の確認	34
4.3	長期間連続日条件における確認	42
第 5 章 Volt-var 曲線決定手法の適用効果		
	-実際の配電線運用に即した提案手法適用効果-	45
5.1	数値計算条件	45
5.2	タップ動作最多日における時系列結果比較	49
5.3	各ケース間の比較	64
第 6 章 結論		
6.1	本研究の成果	68
6.2	提案 Volt-var 制御手法の実適用・事業性に関する展望	69
6.3	今後の課題	70
文献	.....	72
謝辞	.....	76
研究業績一覧	.....	77

図表目次

図 1-1	日本国内の再生可能エネルギー導入設備容量の推移 ^[2]	1
図 1-2	2030 年度における電源構成の見通し ^[2]	2
図 1-3	軽負荷時の余剰電力の発生イメージ ^[8]	4
図 1-4	需給バランスと周波数変動イメージ ^[8]	4
図 1-5	太陽光発電の逆潮流による電圧変動イメージ	5
図 1-6	送電線容量の混雑イメージ ^[9]	5
図 1-7	各国の変動性電源比率と導入フェーズ（2017 年の状況） ^[10]	6
図 2-1	送配電線路の潮流と電圧	13
図 2-2	P-V カーブ	14
図 2-3	SVR によるタップ切換と PCS による無効電力(var)制御	15
図 2-4	SVR の主回路構成	16
図 2-5	SVR のタップ切換制御モデル	17
図 2-6	電圧調整リレー（90Ry）の積分動作特性	18
図 2-7	電圧調整リレー（90Ry）の動作例	18
図 2-8	力率一定制御と Volt-var 制御の動作比較イメージ	20
図 2-9	Volt-var 制御モデル	21
図 2-10	無効電力出力感度の変更による SVR 動作イメージ	22
図 3-1	提案 Volt-var 制御システムの構成	25
図 3-2	Volt-var 制御設定の更新周期と PV 計測情報参照時間	25
図 3-3	提案手法における Volt-var 曲線設定ポイント	27
図 3-4	提案 Volt-var 曲線決定手法の処理手順	31
図 4-1	1 フィーダ配電線縮約モデル	33
図 4-2	提案 Volt-var 曲線決定手法適用時の高頻度タップ動作発生日時 系列結果	35

図 4-3	SVR のみによる電圧制御時の高頻度タップ動作発生日時系列結果	36
図 4-4	Volt-var 曲線の電圧上昇側不感帯決定における計算値一例	38
図 4-5	目的関数最小となる Volt-var 曲線選択の計算例	39
図 4-6	1 日当たり SVR タップ動作回数のデュレーション (タップ動作顕著日)	40
図 4-7	1 日当たり配電損失のデュレーション (タップ動作顕著日)	41
図 4-8	1 日当たり SVR 動作回数のデュレーション (長期間連続期間比較)	43
図 4-9	各ケース間の損失電力量とタップ動作回数 (長期連続期間の合計比較)	43
図 5-1	高低圧 PV 混在実配電線モデル (農山村地区モデル)	46
図 5-2	1 日当たりタップ動作回数のデュレーション (年間比較)	49
図 5-3	タップ動作回数最多日の PV 発電出力時系列データ	50
図 5-4	電圧変動の時系列結果 (高圧 PV 導入比率 80%)	53
図 5-5	電圧変動の時系列結果 (高圧 PV 導入比率 25%)	54
図 5-6	無効電力出力の時系列結果 (高圧 PV 導入比率 80%)	55
図 5-7	無効電力出力の時系列結果 (高圧 PV 導入比率 25%)	56
図 5-8	SVR タップ動作と LDC 電圧値の時系列結果 (高圧 PV 導入比率 80%)	57
図 5-9	SVR タップ動作と LDC 電圧値の時系列結果 (高圧 PV 導入比率 25%)	58
図 5-10	配電損失の時系列結果 (高圧 PV 導入比率 80%)	59
図 5-11	配電損失の時系列結果 (高圧 PV 導入比率 25%)	60
図 5-12	Volt-var 曲線不感帯の更新結果 (高圧 PV 導入比率 80%)	62
図 5-13	Volt-var 曲線不感帯の更新結果 (高圧 PV 導入比率 25%)	63
図 5-14	評価対象期間の合計 SVR タップ削減回数 (CASE 0 に対する増加)	65
図 5-15	評価対象期間の合計配電損失増加量 (CASE 0 に対する増加)	66
図 5-16	評価対象期間の合計無効電力出力量	66

図 5-17	各ケースの電圧制御効果比較	67
図 6-1	系統側と需要家側の電圧制御負担コストイメージ	70
表 1-1	2030 年度における再生可能エネルギー導入目標 ^[4]	2
表 1-2	変動性電源拡大の導入段階別特徴と必要な対策の目安 ^[11]	7
表 2-1	調整方法別の電圧制御機器分類 ^[31]	12
表 4-1	各種シミュレーション共通条件	33
表 4-2	タップ動作回数の上位ピックアップ日	40
表 5-1	高圧 PV および低圧 PV の導入容量条件	48
表 5-2	各比較ケースの PV 運転条件	48
表 5-3	各種シミュレーション条件	48
表 5-4	タップ動作回数の上位ピックアップ日	49
表 5-5	時系列結果グラフ図番号一覧	50

第1章 序論

1.1 本研究の背景

1.1.1 再生可能エネルギー電源の導入状況と見通し

太陽光発電や風力発電をはじめとする再生可能エネルギー電源は、有限な資源である化石燃料のように枯渇の恐れや海外からの輸入に依存する必要がなく、また、発電時に温室効果ガスである二酸化炭素を発生しない特長を持つ。これらのメリットがあることから、エネルギー自給率の向上、気候変動問題への対応のため、再生可能エネルギー電源の導入は将来的に飛躍的かつ継続的に拡大することが求められる。日本のエネルギー政策においても、主力電源として位置づけられており、再生可能エネルギー電源の積極的な普及促進が進められている^[1]。図 1-1 に、近年の日本国内における再生可能エネルギーの導入容量の推移を示す。2012年7月に開始された「再生可能エネルギーの固定価格買取制度（FIT：Feed-in Tariff）」の導入以降、特に太陽光発電の導



図 1-1 日本国内の再生可能エネルギー導入設備容量の推移^[2]

入が顕著な伸び率で導入拡大した結果、最近の 2022 年度末時点では、太陽光発電が占める割合が再生可能エネルギーの中で最も多い状況にある。FIT 制度は、再生可能エネルギーで発電した電気を、電力会社が一定価格で一定期間買い取ることを約束する制度で、この電力会社が再生可能エネルギー電気の買い取りに要した費用は、再エネ賦課金という形で電気の使用を契約するすべての者が支払う毎月の電気料金の一部からまかなわれている。再生可能エネルギーの発電事業者は、FIT 制度によって発電設備導入コストの回収見込みが立てやすくなり、普及促進につながっている^[3]。

図 1-2 と表 1-1 は、日本における 2030 年度エネルギー需給の見通し（エネルギーミックス）目標である電源構成比（発電電力量比）と導入容量（設備容量）である。2050 年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする「2050 年カーボンニュートラル」宣言を反映して 2021 年 10 月に閣議決定された第 6 次エネルギー基本計画では、再生可能エネルギーの電源構成比率を 2019 年度の 18%程度から 2030 年に 36~38%程度へ

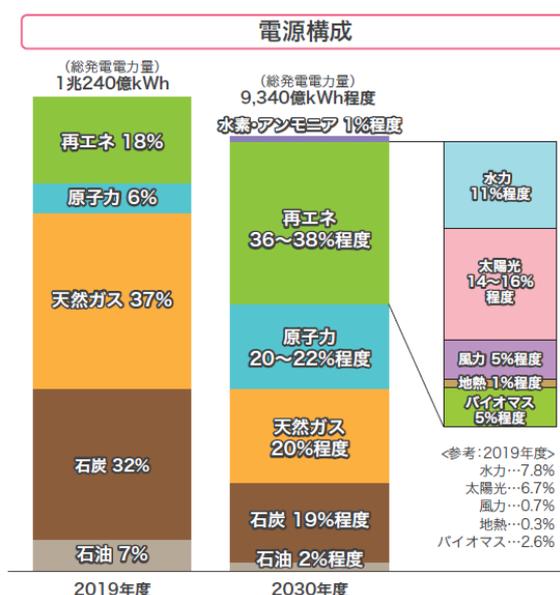


図 1-2 2030 年度における電源構成の見通し^[2]

表 1-1 2030 年度における再生可能エネルギー導入目標^[4]

	導入水準 (22 年 3 月)	FIT 前導入量 +FIT 認定量 (22 年 3 月)	(GW)	
			2030 年度 エネルギーミックス	ミックスへの 導入進捗率
太陽光	66.1	82.7	103.5~117.6	約 60%
風力 (上段: 陸上 下段: 洋上)	4.8 -	14.3 0.7	17.9 5.7	約 20%
地熱	0.6	0.7	1.5	約 41%
中小水力	9.8	10.2	10.4	約 95%
バイオマス	5.6	10.6	8.0	約 70%

拡大する野心的目標が掲げられている^[1]。特に、再生可能エネルギーのうち最も普及が進む太陽光発電が占める割合は現行2020年度の7.9%から2030年度の目標14~16%、導入容量では2020年度の60GW程度から2030年度の目標104~118GW程度と、現状からさらに倍増させる見通しである。また、FIT制度による固定価格買取の対象となる事業計画認定の情報として、認定容量（FIT認定量）の状況を表1-1内に示す。すでに買い取りが開始されている太陽光導入容量（63.8GW）に加えて運転開始前の計画容量を含む認定容量が81.6GWであることをはじめとして、電源種別によって差があるものの、更なる導入拡大が控えていることが読み取れる。さらに、2030年よりも先の2050年太陽光発電普及シナリオとして、カーボンニュートラル達成のためには約260GW~360GWの太陽光発電導入量が必要との試算や提言^{[5][6][7]}があり、今後将来の太陽光発電導入拡大の加速が必須となっている。

1.1.2 再生可能エネルギーの導入拡大による系統課題

2050年カーボンニュートラル宣言を実現すべく、最大限の再生可能エネルギーの導入が求められるが、一方で、太陽光発電や風力発電など気象条件によって発電出力が変動する変動性電源の大量導入に伴って、電力系統へ接続可能な容量を制限する技術的課題が存在する。場合によっては、送配電事業者から接続の新規受け入れ停止や保留の可能性がある。以下項目別に、変動性電源の大量導入に伴って電力の安定供給・電力の品質に及ぼす影響が問題視される代表的な課題について説明する。

(1) 余剰電力の発生

電力系統においては、系統管理者が各発電所の出力を制御し、系統全体の電気の需要と供給が常に一致（同時同量）となるように、需給調整の運用がされている。しかし、例えば太陽光発電の大量導入が進むと、需要が少ない春や秋の休日の日中時間帯を中心に、需要を上回る分の太陽光発電出力を抑制しなければならない、余剰電力が発生する。

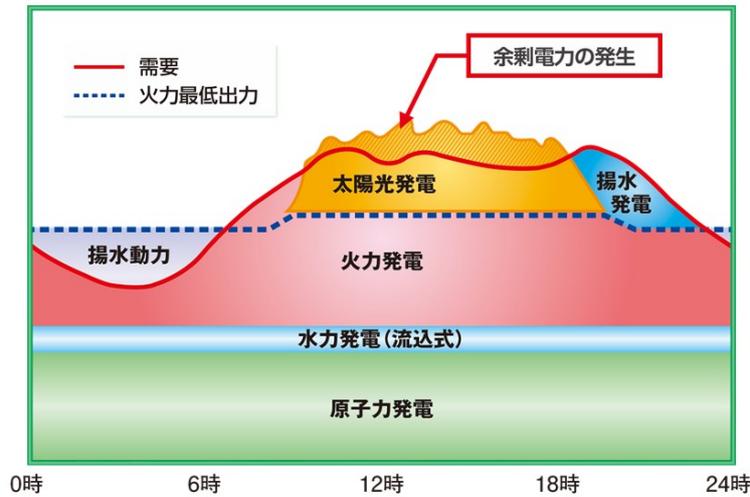


図 1-3 軽負荷時の余剰電力の発生イメージ^[8]

(2) 周波数変動

電力系統の周波数は、送配電事業者と発電事業者が連携して、火力発電や水力、揚水などの時間領域に応じた出力調整により、瞬時瞬時の需給をバランスさせることで 50Hz もしくは 60Hz へ周波数が維持されている。太陽光発電や風力発電の大量導入により、従来の需要のみの変動分に加えて変動性電源の変動が加わることで、周波数調整力が不足する恐れがある。

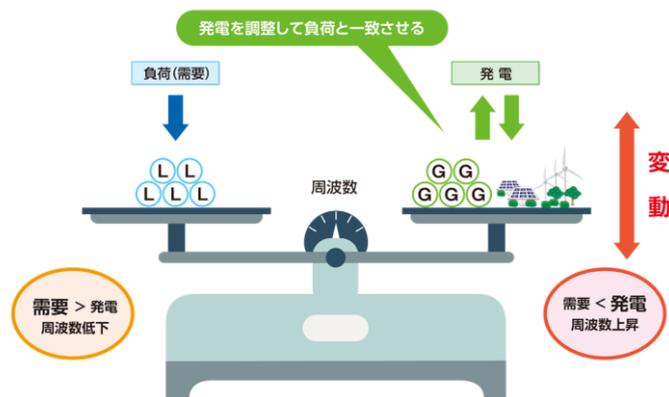


図 1-4 需給バランスと周波数変動イメージ^[8]

(3) 電圧変動

従来は需要家のみが接続されていた配電系統において、太陽光発電を主とする分散型電源が普及し、順潮流（系統側電源→需要家）のみであった電気の流れに、逆潮流（分散型電源→系統側）が発生することで電圧の上昇変動が加わり、電気事業法第 26 条および電気事業法施行規則第 38 条で定められている低圧受電点の適正電圧値 101 ±6V（標準電圧 100V）、202 ±20V（標準電圧 200V）に維持するよう努めなければな

らない電圧管理が困難となる。

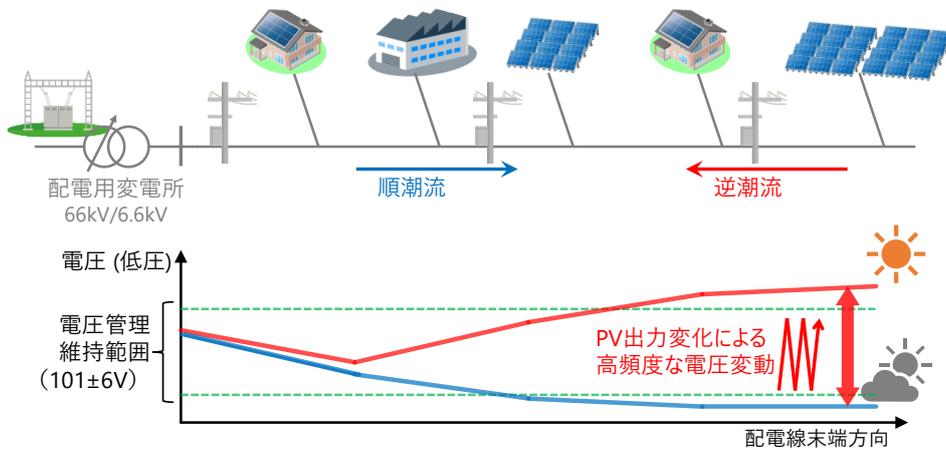


図 1-5 太陽光発電の逆潮流による電圧変動イメージ

(4) 送電線の空き容量不足

大規模発電所から電気を消費する需要が集中する都市部は一般的に離れており，送電線路を通して電気が送られる。ここに太陽光や風力など分散型電源が新規に接続されると，送電線や変圧器の設備容量を超過し，分散型電源の接続が制限されてしまう状況が発生する。送電線では，単一設備故障（N-1 故障）と呼ばれる 1 回線が故障や事故等で送電不可となった場合のバックアップとして，複数回線の構成が一般であり，事故発生の際には他方の回線の容量を 1 回線で受け入れられるよう，50%の回線容量を常に確保する必要がある。このように，実際の設備定格容量の半分しか回線の運用容量として使用できないことが，空き容量不足につながりやすい一因となっている。

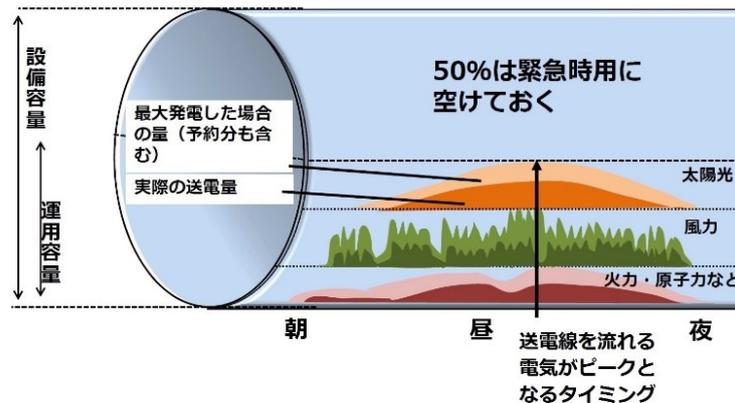


図 1-6 送電線容量の混雑イメージ^[9]

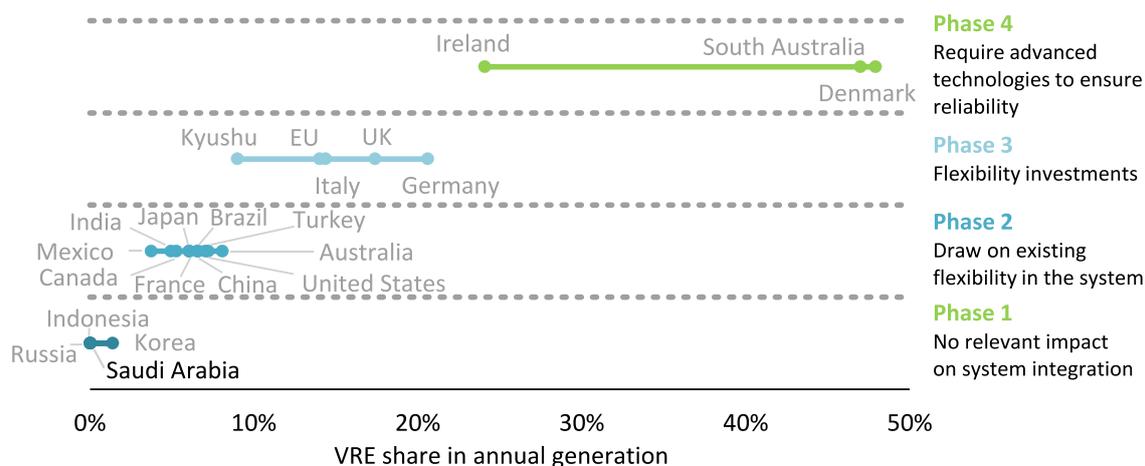


図 1-7 各国の変動性電源比率と導入フェーズ（2017 年の状況）^[10]

国際エネルギー機関（IEA : International Energy Agency）により，図 1-7 に示す形で，各国の系統容量に対する変動性電源の導入比率の拡大状況を導入段階（フェーズ）別に分類して整理されており，各フェーズで顕在化する系統運用上の課題，必要な対策が示されている（表 1-2）。この分類によると，日本はフェーズ 2（PV 導入が進んでいる九州はフェーズ 3）に該当し，欧州各国（ドイツ，スペイン，イギリス等）はフェーズ 3，変動性電源普及段階が最も高いアイルランド，デンマーク，南オーストラリアがフェーズ 4 に位置している。表 1-2 に記載しているそれぞれの導入段階における必要な対策は目安であり，あるフェーズから次のフェーズへ明確に移行するものではない。そのため，今後の各国各地域の電力系統や変動性電源普及の特性に応じて，次もしくはさらに上位のフェーズを見据えて各種調整力の確保や，グリッドコードなど規定の要件化などを先行して行っていく必要がある。

表 1-2 では，本論文で対象としている電圧制御への対策が，フェーズ 1~2 の導入が早期の段階からの必要性に位置付けられており，その先のフェーズ 3,4 に移行した後においても，電圧調整方法のより一層の高度化，柔軟な制御が必要になると考えられる。

表 1-2 変動性電源拡大の導入段階別特徴と必要な対策の目安^[1]

導入段階	特徴	必要となる対策
フェーズ 1	系統へ顕著な影響なし	-周波数上昇時の出力低減 -電圧制御 -大規模分散型電源の FRT 機能
フェーズ 2	オペレーターが認識できる影響が発生	-変動性電源の必要数のオンライン監視・出力制御 -変動制電源の出力予測の導入と発電所の運転計画への活用 -ローカル系統混雑の管理 ・送電線運用容量の拡大, 最大限活用 -配電網の逆潮流(双方向潮流)対応 ・電圧調整 ・実負荷の推定把握 ・順潮流のみ対応仕様の機器, 保護システム更新 -小規模分散型電源の FRT 機能
フェーズ 3	需給の大幅な変動に対応できる調整力の柔軟性が重要になる	-発電所の柔軟性(火力機の起動停止, 出力変化速度, 最低運転出力など運転能力向上) -事故波及防止リレーシステム(転送遮断, 高速ランバックなど)
フェーズ 4	特定の時間帯に再エネの割合が必要と同程度となり安定性が問題となる	-変動性電源の系統サポート機能(スマートインバータ) ・周波数/有効電力制御および電圧/無効電力制御(自立制御)の機能付加 -疑似慣性
フェーズ 5	再エネの供給が頻繁に需要を上回る	-交通や熱の電化など需要調整による柔軟性確保
フェーズ 6	再エネの余剰・不足がより長い時間軸で発生	-水素や合成燃料, 揚水発電などによる季節間の大規模電力貯蔵

1.2 本研究の目的および論文構成

1.1.2 項で述べたとおり，カーボンニュートラル実現を目指して再生可能エネルギーの主力電源化のために最大限の導入拡大を進めるためには，電力系統に及ぼす余剰電力発生や周波数調整力不足，電圧調整力不足といった電力の安定供給と電力の品質に影響する課題への対応が求められる。特に，配電系統における電圧変動に関する課題は，PV が配電線末端付近に集中して局所的かつ大規模に接続されたローカル系統で顕在化しやすく，電力系統全体に占める分散型電源普及割合が少ない導入拡大の早期の段階から電圧調整面の対策が必要となりやすい。そして，現在よりも更に多くの PV が導入拡大される動向^[1]を踏まえると，図 1-5 のイメージ図のように，雲の通過による PV 出力急変で高頻度に発生する電圧変動が顕著になり，法定の電圧維持範囲内に調整することが困難になると想定される。

配電系統における電圧制御は主に，負荷時タップ切換器(LTC: on-Load Tap Changer)を搭載する変圧器のタップ切換制御が用いられる。タップ切換制御は，変圧器巻き線にタップを設けて変更できる変圧比を負荷電流が流れたまま無停電で切り換えることで，変圧器二次側の送出し電圧を段階的に調整する。配電用変電所に設置される負荷時タップ切換変圧器(LRT: Load Ratio control Transformer)と，亘長が長く電圧変動幅が大きくなりやすい線路の途中に設置される配電用自動電圧調整器(SVR: Step Voltage Regulator)がある。これらの従来型の電圧調整機器のタップ切換制御では，PV 出力変動による短周期かつ高頻度に発生する電圧変動の抑制維持が難しくなっており，連続的な無効電力調整により電圧を安定化させる PV 用パワーコンディショナ(PCS)の力率一定制御運転の一律採用されている状況にある^[12]。2030年そして2050年に向けて現在よりも更に PV 導入量が増え，電圧変動の程度が大きくなると，PV の力率一定制御により出力される無効電力の総量が過剰になる場合や，発電する有効電力出力の制限(発電機会損失)が想定される。現行の力率一定制御は，PV 出力の逆潮流に起因する電圧上昇を防止する目的で，一律の力率設定値が適用されているが，電圧上昇が問題にならないような PV 出力が小さい時間帯においても，発電出力に比例した無効電力が常に出力されるため，PV 導入量が大いほど無効電力出力に伴う線路電流が増加し，結果として配電系統全体の線路損失増加の影響が大きくなると想定される。また，PV 出力が PCS 容量×力率値を上回る場合に，本来得られるはずの有効電力出力を抑制する動作が発生して発電機会損失につながる可能性が存在する。このような観点から，再エネの主力電源化に向けて将来的に PV 連系量が増加していくことを想定すると，力率一定制御のような一律設定値の運用ではなく，効率的な電圧制御方式や電圧管理の高度化が求められると考える。今後将来，出力制御やデマンドレスポンス等の需給調整用途で普及が想定される PCS の通信制御機能を活用した有効電力制

御とともに、電圧管理のための柔軟な無効電力の調整用途が期待される。

そこで本論文では、再エネ主力電源化を想定した配電系統の電圧管理方法として、力率一定制御に比べより柔軟な PCS の無効電力制御が可能となるスマートインバータ (S-INV : Smart Inverter) による Volt-var 制御に着目する。S-INV は、制御指令や計測値情報を受け渡し可能な双方向通信機能ならびに系統周波数や電圧の安定化などに貢献するための系統サポート機能を有し、近年では、日本国内で通信システムを含む実用に向けた実証^[13]や、Power Hardware-In-the-Loop (PHIL) によるテスト環境構築と 500kW 実機による検証^[14]が行われている。そして、Volt-var 制御は S-INV の系統サポート機能のうち電圧維持のための主な制御要素であり、連系点電圧入力に対する無効電力出力の特性曲線の形式で設定を定義することで、系統条件に応じて任意の無効電力出力制御特性を持たせることができる。そのため、設定可能な特性の自由度が高い反面、適用先の配電線の状況に応じてどのようにして適切な制御パラメータを設定するかが重要になる。また、制御対象の S-INV の数が多い場合には、それら制御パラメータの管理が煩雑になり得ることが課題である。

S-INV 機能を活用した系統安定化制御について、Volt-var 機能や Volt-Watt 機能のパラメータ設定手法^{[15][16]}、Frequency-Watt 機能を含む複数系統サポート機能を併用した際の効果検証^{[17][18][19]}、多数台の S-INV や複数系統サポート機能併用による効果を解析検証するためのシミュレーション手法^{[20][21]}などが報告されている。本論文に関連する Volt-var 機能とタップ制御の制御手法や運用方法については、LRT の選択タップ毎に最適な Volt-var 曲線を設定する手法^[22]、急峻な電圧変動を抑制するインバータの無効電力出力と緩やかな電圧変動を調整するタップ機器やコンデンサの離散制御を対象に、異なる制御時間スケールで並行分離して最適化計算を行う複数階層別の制御方式に関する提案^{[23][24][25][26]}が多く、その他 PV 出力の変動様相に応じた三つの制御運転モードを動的に切り替えつつ決定した無効電力指令に追従する形でタップ値を遠隔制御する方式^[27]、PV 出力と負荷の計測データの不確実性を考慮した確率モデルによる Volt-var 制御^[28]が提案されている。これら研究では、Volt-var 制御出力とタップ制御の設定更新の頻度が両者異なっており、別々の処理タイミングで決定される。そのため、Volt-var 制御設定を最適化する個々の計算ブロック内では、LRT や SVR のタップ位置が固定である条件下で、配電損失最小化を主な目的としてパラメータ決定する Volt-var 制御の最適化計算が行われており、タップ切換動作を制御する 90Ry (90 リレー : 電圧調整リレー) の要素が含まれておらず、SVR のタップ切換による段階的な電圧調整動作と Volt-var 制御による無効電力出力との電圧制御動作の対応付けに関しては、十分な検討がなされていない。対して本研究では、両者の電圧制御は互いに影響を及ぼし合うと考え、積分方式の 90Ry が時間によって段階的に変化する電圧調整動作する要素

を考慮し、Volt-var 制御による無効電力出力との対応付けを検討する。文献[29][30]では、PV インバータの無効電力制御が、LRT の切換動作回数に対して大きく影響する可能性が指摘されている。

上記を踏まえて、本論文では、Volt-var 制御を適用した配電線電圧制御を最適化する一手法として、Volt-var 制御による無効電力出力とタップ切換制御の双方の動作を考慮した曲線パラメータ決定手法を提案する。提案手法では配電損失の他、タップ切換回数を目的関数に加えることで Volt-var 制御と SVR 動作との協調を図る。提案手法を適用した長期間の PV 出力実測値を用いたシミュレーション検討により、PV 出力変動に起因して高頻度に発生するタップ動作回数削減と、Volt-var 制御の無効電力出力に伴う損失増加削減の両方を満たせることを確認する。

本論文の構成は、第 2 章において、PV をはじめとする分散電源の拡大、PV の短時間かつ急峻な出力変動が配電系統の電圧管理に及ぼす課題、ならびに SVR によるタップ切換と S-INV の Volt-var 制御による無効電力出力の動作に関して言及する。そして、本研究で考えるこれら双方の動作の最適化を図ることの意義を説明する。

第 3 章においては、PV 出力変動にともなう SVR 動作と配電損失増加を低減する Volt-var 制御曲線決定手法を提案する。本提案手法は、配電損失の他、タップ切換回数を目的関数に加えることで Volt-var 制御と SVR 動作との協調を図る。潮流計算により、Volt-var 制御の無効電力出力に伴う損失増加とタップ動作回数を推定し、1 回あたりのタップ切換削減とともに生じる損失増加分を最小化する Volt-var 曲線を最適パラメータとして決定する。

第 4 章においては、第 3 章で提案の Volt-var 制御手法の確立のため、S-INV と SVR が導入される基礎的な配電線モデル上で、提案手法を適用した際の動作を検証する。数値シミュレーションにより、複数の PV 変動パターンおよび Volt-var 制御提案手法とその他電圧維持対策とを比較することで、提案手法の有効性を確認する。

第 5 章においては、第 4 章で反映されていない詳細な低圧需要家各軒の電力実測値を反映した実配電線に近い高圧および低圧 PV の両方が接続される詳細な配電システムモデル上で、低圧データを参照できない不確実性の影響など、より実際の配電線運用に即した提案手法の実現可能性の評価を行う。

第 6 章においては、本研究をまとめるとともに、提案手法の実適用や事業性に関連した展望および今後の課題を記載する。

第2章

SVR タップ切換制御と PV インバータ 無効電力出力による配電線の電圧制御

2.1 配電系統の電圧管理

電力系統の電圧は、発電機の励磁制御、変圧器タップの調整、電力用コンデンサや分路リアクトルといった調相設備の投入・開放などによって、調整されている。表 2-1 に、電圧の調整原理別にまとめた調整機器の種類を示す。従来の配電系統においては、線路構成が分岐状であり、需要家負荷および変電所送り出し箇所の方率がほとんど 1 程度とみなせることが通常であるため、一般的に変圧器の電圧変成比を変更するタップ切換制御による電圧調整が主体となる。配電用変電所の LRT によるタップ切換制御を基本に、各フィーダ個別の電圧調整力の必要に応じて、同じくタップ切換動作する SVR や、無効電力を調整する分路リアクトル、電力用コンデンサ、SVC といった電圧制御機器が追加で設置され、常に規程の適正電圧範囲に収まるように維持される。

2.1.1 分散化電源増加に伴う逆潮流による電圧上昇・電圧変動^[33]

特別高圧である送電系統の線路インピーダンスは大部分がリアクタンス成分であることから、抵抗成分をゼロと近似して考えることができ、電圧降下の大きさは無効電力潮流によって大きく変化すると説明される。一方、電圧階級の低い配電系統の線路インピーダンスは、リアクタンス成分に対する抵抗成分の比 (R/X 比) が無視できない大きさであることから、無効電力潮流のみでなく有効電力潮流が電圧変動に与える影響が大きい。そのため、ここでは配電線路を抵抗成分 R 、リアクタンス成分 X で表現した図 2-1 に示す回路モデルにて、配電系統の潮流変化に伴う電圧変動について述べる。送電端 (変電所側) の線間電圧を \dot{V}_s 、受電端 (需要家側) の線間電圧を \dot{V}_r 、受電端の電力潮流を $P_r + jQ_r$ (有効電力 P_r 、無効電力 Q_r) で示す。

表 2-1 調整方法別の電圧制御機器分類^[31]

分類 (制御量)	調整対象	調整設備	調整機能	主要設置箇所
系統に供給する無効電力を調整する方法	供給無効電力 (容量性)	電力用コンデンサ (SC : Static Condenser)	SC バンクを遮断器で開閉し、系統に供給する無効電力を段階的に調整 系統電圧が下がると無効電力減少 ($Q \propto V^2$: 定インピーダンス特性)	変電所 (変圧器, 送電線の無効電力損失および誘導性負荷の無効電力を供給) 高圧需要家 (誘導性負荷の力率改善)
	消費無効電力 (誘導性)	分路リアクトル (ShR : Shunt Reactor)	ShR バンクを遮断器で開閉し、系統から消費する無効電力を段階的に調整 系統電圧が下がると無効電力減少 ($Q \propto V^2$: 定インピーダンス特性)	変電所 (超高压送電線および地中送電線(地中ケーブル)の充電容量を吸収)
	電圧	同期調相機 (RC : Rotary Condenser)	無負荷のまま系統に並列し、励磁制御により無効電力を供給から吸収まで広範囲かつ連続的に調整 系統電圧の変動に左右されることなく無効電力を調整可能	変電所 (国内採用例は稀少。50 万 V 変電所の採用報告あり ^[32] 。)
電圧変成比 (変圧比) を調整する方法	電圧	負荷時タップ切替変圧器 (LRT : Load Ratio control Transformer)	タップを切り換えて電圧変成比を段階的に調整	変電所 (ほとんどの変電所)
		配電用自動電圧調整器 (SVR : Step Voltage Regulator)		配電線の線路途中

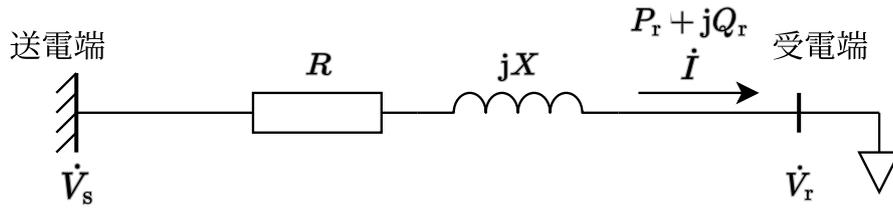


図 2-1 送配電線路の潮流と電圧

このとき、 \dot{V}_r を基準ベクトル $\dot{V}_r = V_r \angle 0$ とすると、線路電流 i は(2.1)式と(2.2)式により表される。

$$P_r + jQ_r = \dot{V}_r \bar{i} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$i = \frac{\overline{P_r + jQ_r}}{\dot{V}_r} = \frac{P_r - jQ_r}{V_r} \dots\dots\dots (2.2)$$

(2.1)式の線路電流 i により、受電端電圧は(2.3)式で表される。

$$\begin{aligned} \dot{V}_s &= \dot{V}_r + (R + jX)i \\ &= V_r + (R + jX) \left(\frac{P_r - jQ_r}{V_r} \right) \\ &= V_r + \frac{RP_r + XQ_r}{V_r} + j \frac{XP_r - RQ_r}{V_r} \dots\dots\dots (2.3) \end{aligned}$$

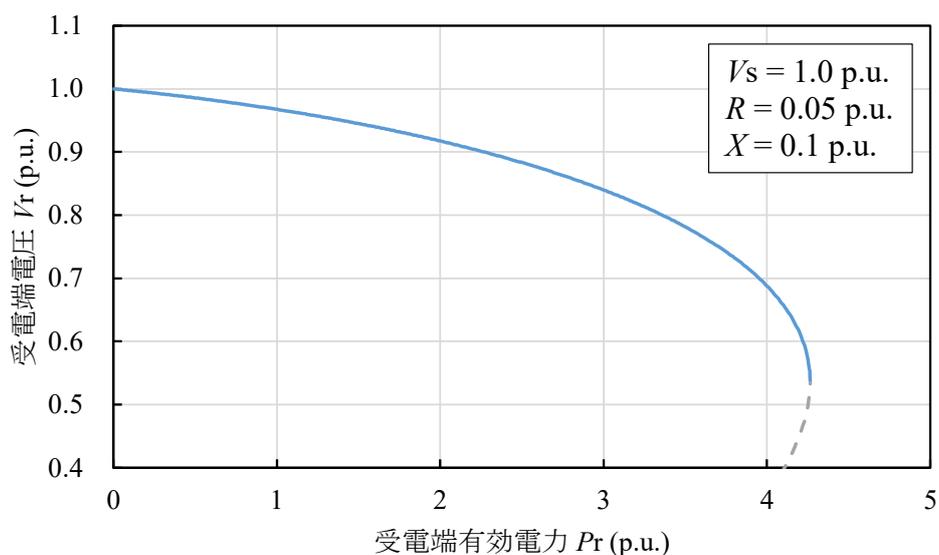
ここで、送電端電圧 \dot{V}_s をスカラー値 $V_s = |\dot{V}_s|$ の形で表すと(2.4)式となる。

$$V_s = \sqrt{\left(V_r + \frac{RP_r + XQ_r}{V_r} \right)^2 + \left(\frac{XP_r - RQ_r}{V_r} \right)^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

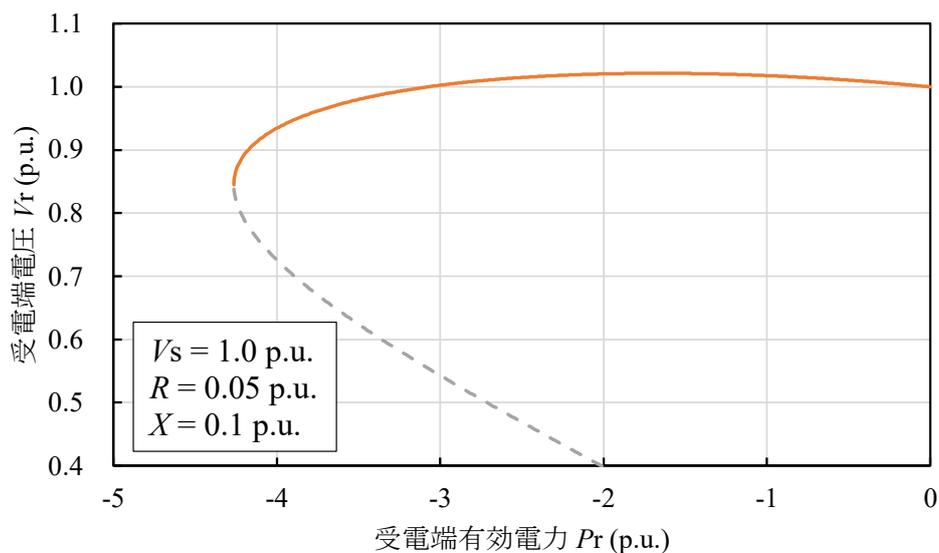
(2.4)式を V_r について整理すると、次のように求められる。

$$\begin{aligned} V_s^2 V_r^2 &= V_r^4 + 2(RP_r + XQ_r)V_r^2 + (RP_r + XQ_r)^2 + (XP_r - RQ_r)^2 \\ V_r^4 + \{2(RP_r + XQ_r) - V_s^2\}V_r^2 + (R^2 + X^2)(P_r^2 + Q_r^2) &= 0 \\ V_r &= \sqrt{\frac{(V_s^2 - 2(RP_r + XQ_r)) \pm \sqrt{(V_s^2 - 2(RP_r + XQ_r))^2 - 4(R^2 + X^2)(P_r^2 + Q_r^2)}}{2}} \dots\dots\dots (2.5) \end{aligned}$$

(2.5)式は、一つの有効電力 P_r と無効電力 Q_r の条件に対して、理論上は二つの値が得られ、実際の運用電圧になる高め解と、電圧不安定側の低め解に分けられる。(2.5)式より、 $P_r + jQ_r = 0$ の場合に電圧変化ゼロ ($V_r = V_s$) を示し、 R, X は固定値であるから、有効電力 P_r および無効電力 Q_r の変化により、電圧が変動することとなる。また、線路抵抗分 R が大きいと有効電力 P_r 変化時の電圧変動に与える影響が大きく、線路リアクタンス分 X には無効電力 Q_r 変化時の電圧変動への影響が大きくなる。



(a) 順潮流 ($P_r > 0$)



(b) 逆潮流 ($P_r < 0$)

図 2-2 P-V カーブ

送電端電圧 $V_s = 1.0$ p.u. 一定として、有効電力 P_r の変化に対する V_r を(2.5)式によってグラフ化すると図 2-2 の示す特性となり、P-V カーブ（あるいはノーズカーブ）と呼ばれる。ここで、電圧低め解は破線で示している。この系統特性曲線に従う形で、潮流変化に対する電圧変動の大きさが説明できる。 $P_r > 0$ （順潮流）の場合は電圧が降下、 $P_r < 0$ （逆潮流）の場合は電圧が上昇する。また、逆潮流電力が増え続けると電圧は上昇から降下に転じるが、P-V カーブ右端の送電限界点（ノーズ端）に近づく電圧安定性が悪化する領域であるため、常時このノーズ端付近で電圧制御運用される状況は望ましくない。

2.1.2 配電線の電圧制御方式

電圧を適正範囲内（電気事業法第 26 条および電気事業法施行規則第 38 条で定められている低圧受電点の適正電圧範囲 $101 \pm 6V$, $202 \pm 20V$ ）に維持するための手段として、表 2-1 に示したとおり、タップ切換による方法と無効電力による方法に分類される。双方の電圧調整原理の違いを図 2-3 のイメージで示す。タップ切換による電圧制御は、配電線に直列接続する変圧器の変圧比を接点切り換えることで「二次側送り出し電圧を変更」する。変圧器巻線から所望の電圧変成比箇所別に引き出された接点を切り換えるため、1 段毎に段階的に変更する機械的な調整である。送り出し電圧自体を変更するため、変圧器二次側につながる範囲全体の電圧を一括で押し上げ、もしくは押し下げる調整が可能である。一方、無効電力による電圧制御は、連続的な電圧調整が可能で、配電線に並列して接続する消費または供給無効電力を変更し、線路に流

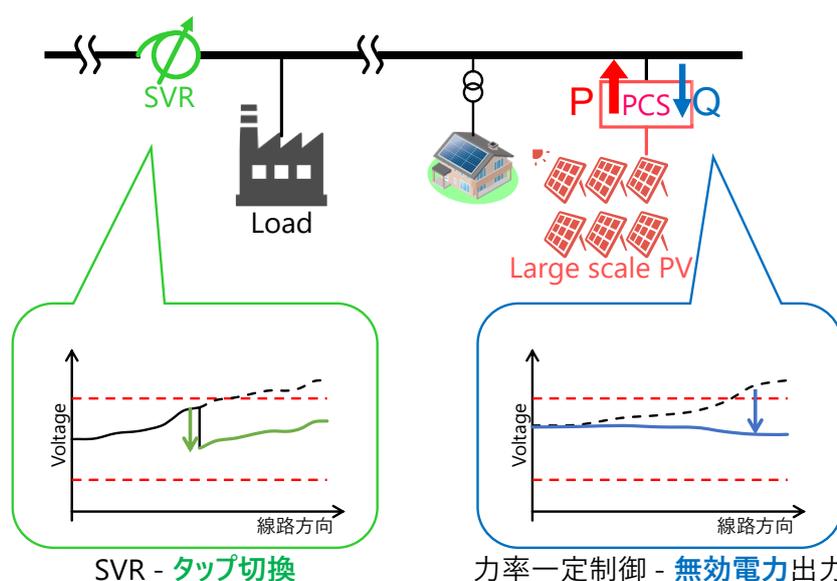


図 2-3 SVR によるタップ切換と PCS による無効電力(var)制御

れる無効電力潮流と線路リアクタンスで生じる「電圧降下の傾きを変化」させることで、電圧を補償調整する。

以下、SVR タップ切換による電圧制御と無効電力による電圧制御に関してそれぞれ個別に概略を説明する。

(1) SVR タップ切換による電圧制御

配電用変電所の LRT タップ切換による送り出し母線電圧の一括調整では規定値内の電圧維持が困難となる長距離配電線などの電圧降下対策として、配電線路途中に SVR が柱上設置される。LRT は配電用変電所から分岐する複数配電線（フィーダ）範囲の電圧を一括で調整するのに対して、SVR は単一フィーダ内の SVR 二次側以降範囲の電圧を調整することができる。

SVR は、三相 Y 接続の単巻変圧器と負荷時タップ切換装置、電圧調整継電器 (90Ry) や線路電圧降下補償器 (LDC : Line Drop Compensation) の制御部から構成されており、その回路構成は図 2-4 のとおりである。タップ選択器と切換開閉器は一次側に設けられ、限流抵抗器を介したスイッチの ON-OFF 動作により、負荷電流を流したまま無停電でタップを切り換える。切り換え開閉スイッチは、真空バルブ内で接点を開閉する真空バルブ方式、もしくは絶縁油中で接点を切り換える油中切換方式が用いられる。

タップ切換指令は、LDC と 90Ry によって出力される。LDC は、直接ローカル計測する二次側端子電圧・通過電流値に基づいて負荷状況により変動するフィーダ負荷中

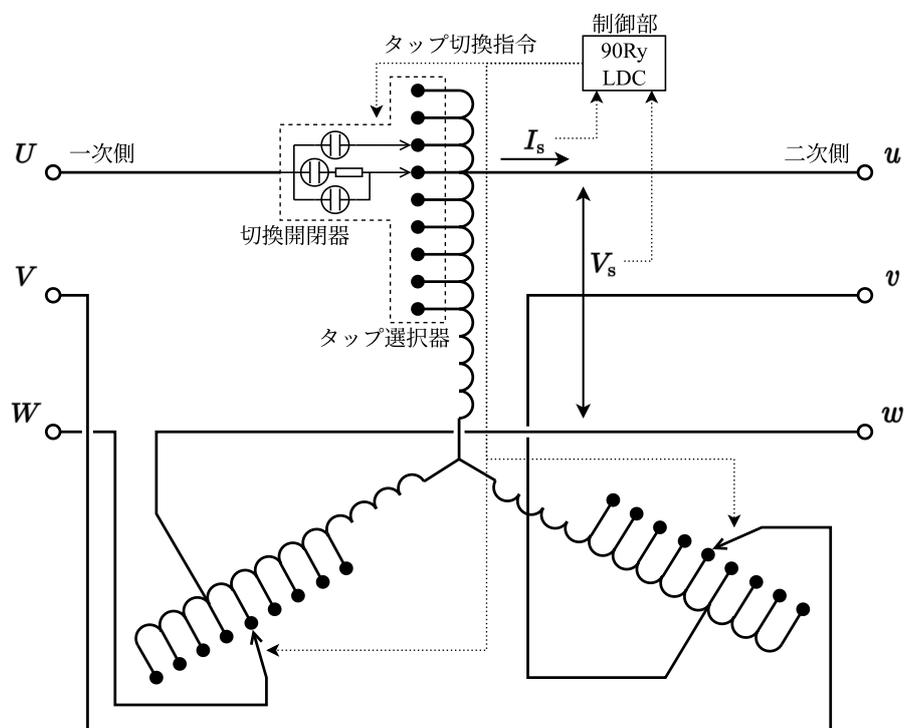


図 2-4 SVR の主回路構成

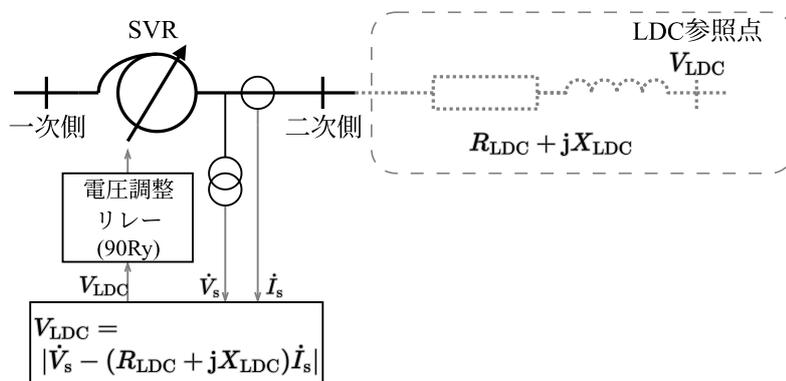
心点電圧を推定演算し，90Ry では，LDC による推定電圧が目標の基準電圧値に安定維持されるよう不感帯逸脱からタップ動作までの反時限特性を与える。LDC 方式には，ベクトル LDC 方式とスカラーLDC 方式が存在するが，現在一般となっている逆潮流に対応可能なベクトル LDC 方式を図 2-5(a)に示す。ベクトル LDC で推定する線路インピーダンス整定値相当地点の電圧計算式は，(2.6)式のとおり演算される。

$$V_{LDC} = |\dot{V}_s - (R_{LDC} + jX_{LDC})\dot{I}_s| \dots\dots\dots (2.6)$$

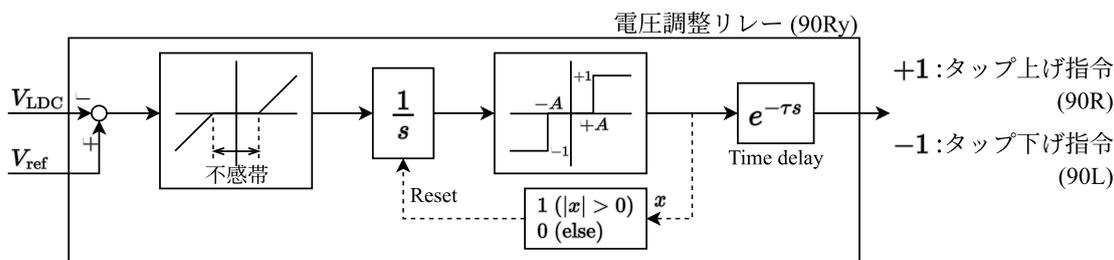
ここで，LDC 参照点推定電圧 V_{LDC} ，二次側送り出し電圧 \dot{V}_s ，通過電流 \dot{I}_s ，線路インピーダンス整定値 $R_{LDC} + jX_{LDC}$ である。

現在は一般的でないスカラーLDC 方式は，二次側通過電流値が方向と位相情報を含まない大きさ（RMS 値）のみで演算される点が異なり，一次側から二次側への順方向の潮流のみを前提としている。

90Ry においては， V_{LDC} と目標基準電圧 V_{ref} との差分を監視し，不感帯逸脱時にタップ切換指令を出力する。図 2-5(b)は 90Ry の制御系のブロック図であり，積分形の電圧調整リレーが国内で最も一般的に用いられる。図 2-6 および図 2-7 に示す積分形リレーの動作例と反時限特性のように，不感帯を超過した電圧偏差（%）を積分した逸脱



(a) ベクトル LDC



(b) 90Ry 制御ブロック図

図 2-5 SVR のタップ切換制御モデル

量 (%s) が整定値 (動作時間) に達するとタップ切換信号 (90R, 90L) を出力し, その後の機械駆動などの時間遅れをもってタップが切り換わる。

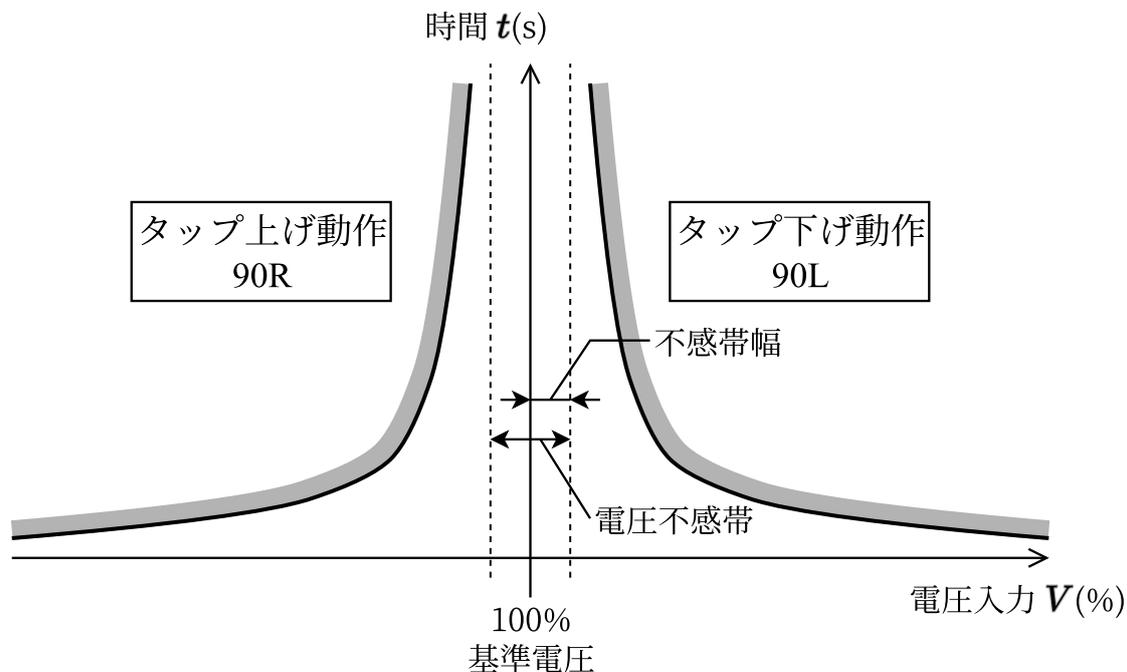


図 2-6 電圧調整リレー (90Ry) の積分動作特性

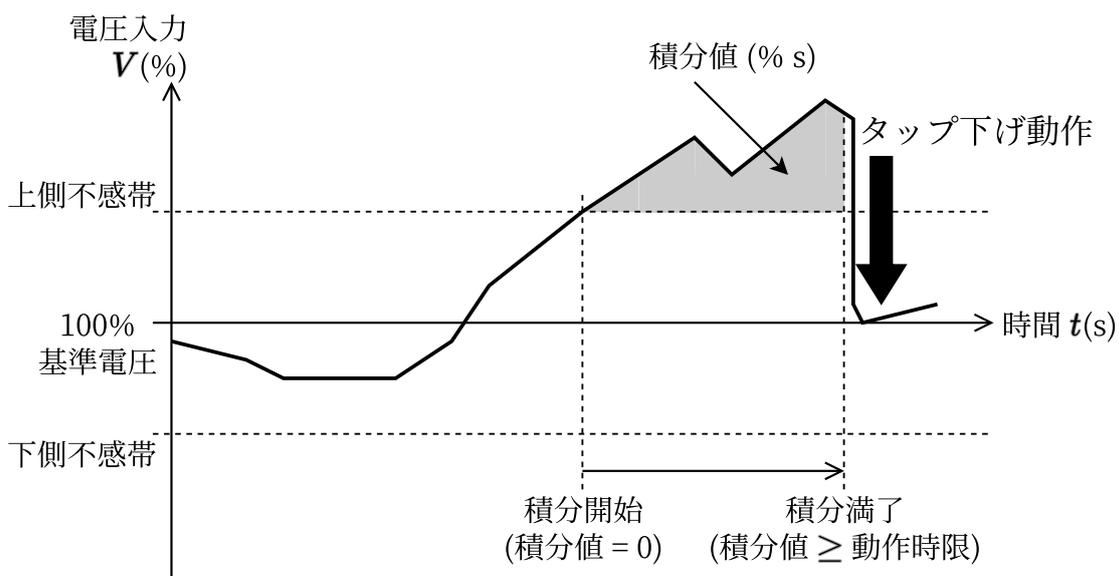


図 2-7 電圧調整リレー (90Ry) の動作例

(2) 無効電力による電圧制御

SVR タップ切り換えは送り出し電圧を直接的に変化させているのに対し、無効電力による電圧制御は、無効電力の消費または供給を制御して線路の電圧降下を変化させることで間接的に電圧を制御する。配電系統において無効電力による電圧調整方法には、電力用コンデンサ (SC) や分路リアクトル (ShR) の投入・解放による段階的な制御、SVC (Static Var Compensator)、PV - PCS の力率制御運転による連続的な制御がある。

特にインバータのスイッチング制御による SVC や PCS の無効電力制御は、電圧調整に要する時間がタップ切り換えよりも早く、かつ連続的な精度の高い電圧制御が期待できる。SVC は、100 ms 以内の高速制御が可能であるが、一般に SVR よりも高価であるため、費用面で電力会社が導入を進める妨げの一因となっている状況にある。

他方、PCS による無効電力制御は、有効電力出力を制御するメインの機能に加える形で、PCS 余力の範囲内で任意の無効電力を制御することが可能であることから、今後の PV や蓄電池、その他分散型電源の拡大による活用可能性が十分期待できる。現状では、PV の一定力率制御運転が電圧上昇への対策として、住宅用 PV と事業用 PV の違いを問わず採用されている。PV が発電する際は、有効電力出力に比例する進相無効電力を出力することで常に力率を一定に保つ機能である。高压連系の力率設定は、一般送配電事業者との連系協議の際に決定される。低压連系の力率制御は、2017 年の系統連系規定の改定に盛り込まれ、一律に進み力率 95% (新規連系の場合を対象) となっている^[12]。PV の力率一定制御は、発電時は常に有効電力に比例して無効電力が出力されているため、無効電力の出力が継続している総計時間が長くなりやすい。電圧上昇の抑制があまり必要とならない低出力発電時においても無効電力が出力され続けるため、PCS が出力する無効電力量の増加や、力率悪化による配電損失電力量の増加につながると想定される。将来的に分散型電源の大量導入が進んで配電線潮流変化の複雑化が拡大すると、現行の力率一定制御のような常時一律の無効電力制御でなく、制御対象である需要家端の連系点電圧を直接計測参照して無効電力出力を変更できる Volt-var 制御が考えられる。力率一定制御と Volt-var 制御の動作比較イメージを図 2-8 に示す。

スマートインバータ (S-INV : Smart Inverter) の双方向通信機能によって、系統運用者が管理する制御サーバーにて系統状況をオンライン監視しつつ、Volt-var 制御の設定変更指令を与えることで、PV の出力状況によって適切な無効電力出力感度へと変更する柔軟な電圧制御が期待できる。

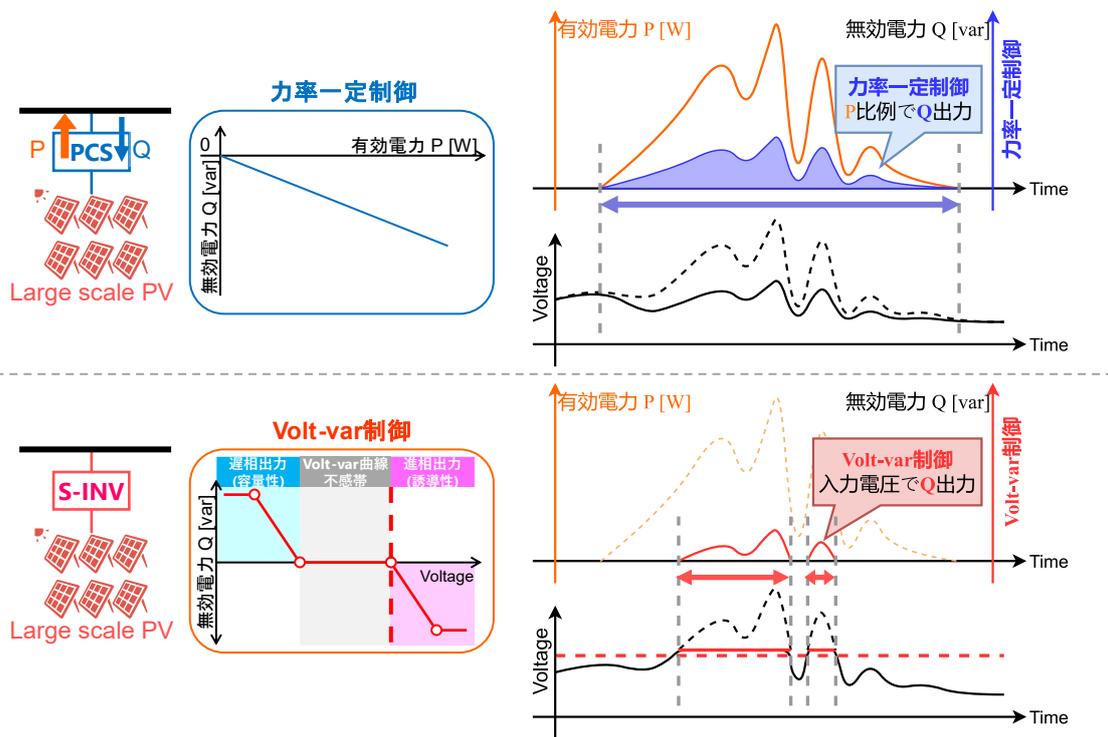


図 2-8 力率一定制御と Volt-var 制御の動作比較イメージ

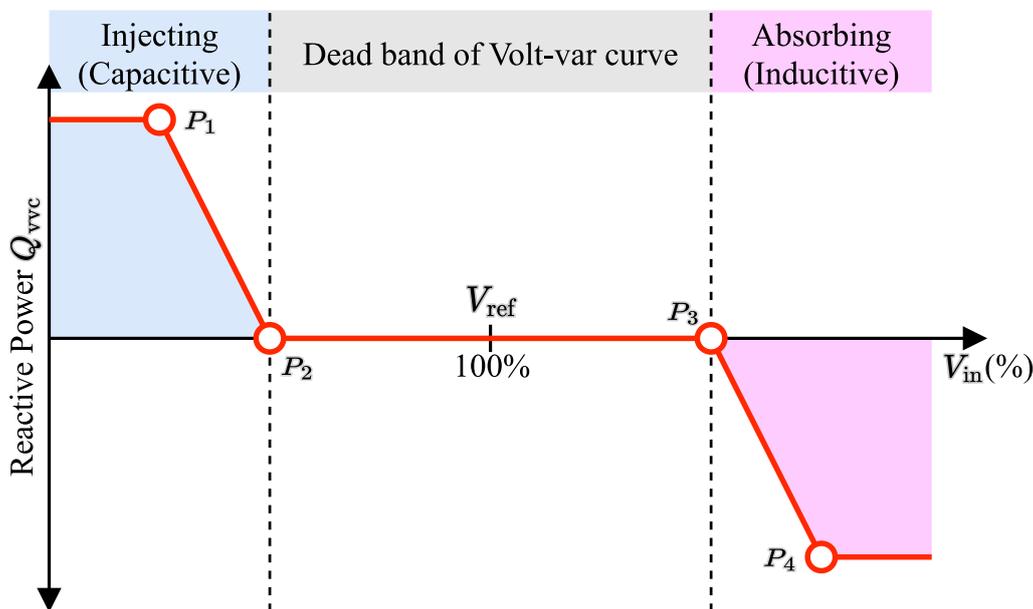
2.2 スマートインバータ Volt-var 制御と SVR タップ制御

本節では、S-INV の Volt-var 制御について詳細を説明し、SVR のタップ切換制御の動作との違いや影響、本研究で考えるこれら双方の動作の組み合わせを考慮した電圧制御について考え方を述べる。

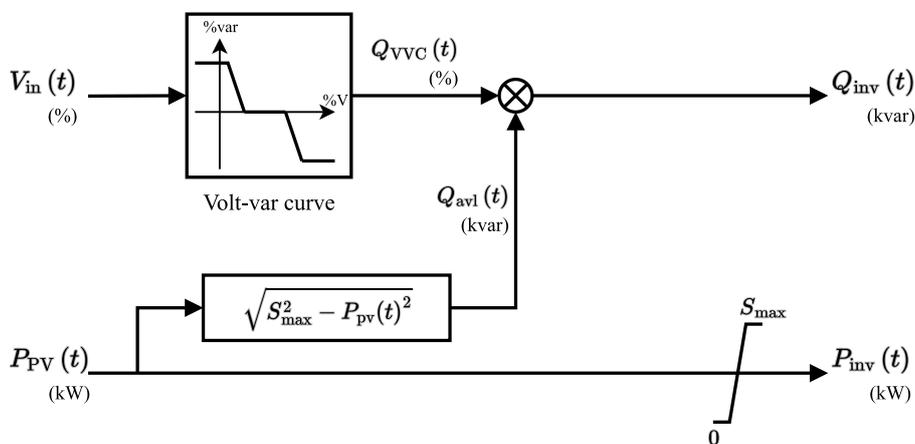
2.2.1 スマートインバータの Volt-var 制御機能

本研究で扱う S-INV の Volt-var 制御および SVR のタップ切換制御について、一般的に用いられる以下に基づく動作とする。

S-INV の各種制御機能および設定項目等について、文献^{[34][35][36]}に準じた仕様を用いる。Volt-var 制御は、横軸：電圧(Volt) - 縦軸：無効電力(var)特性で表される Volt-var 曲線の設定に基づいて、PCS 連系点の電圧の変動に応じた無効電力出力により電圧制御



(a) Volt-var 曲線



$V_{in}(t)$	: 連系点電圧入力実効値 (%)
$P_{PV}(t)$	: PV発電出力 (kW)
$Q_{vvc}(t)$	: Volt-var曲線 Y軸値 (%)
$Q_{avl}(t)$	: 利用可能無効電力 (kvar)
S_{max}	: PCS定格容量 (kVA)
$P_{inv}(t)$	: 有効電力出力 (kW)
$Q_{inv}(t)$	: 無効電力出力 (kvar)

(b) 制御ブロック図

図 2-9 Volt-var 制御モデル

を行う機能である。図 2-9 (a)は、不感帯を持つ Volt-var 曲線設定であり、図中の 4 つのポイント $P_1 \sim P_4$ の選び方によって無効電力の出力特性が定義される。電圧が高い場合は無効電力を消費（誘導性）、電圧が低い場合は無効電力を発生（容量性）する特性により、電圧変動を抑制する。ここで、横軸は基準電圧 V_{ref} に対する%値、縦軸は Available Reactive Power 基準 Q_{avl} （利用可能無効電力：PCS の VA 容量内で有効電力に影響を与えずに出力可能な最大の無効電力値）に対する%値としての定義を、本研究で採用する。図 2-9 (b)は無効電力制御量の演算ブロック図を示しており、PCS 容量 S_{max} と PV 発電出力 P_{PV} から求められる Q_{avl} と Volt-var 曲線出力 Q_{VVC} の積が、Volt-var 制御の無効電力出力値 Q_{inv} となる。

2.2.2 Volt-var 制御適用により想定される SVR タップ切換動作に与える影響

SVR タップ切換制御は、変圧比を調整原理とする機械的な切換動作による 1 段ずつの段階的な電圧調整、Volt-var 制御および力率一定制御は、PCS からの無効電力出力を調整原理とする連続的な電圧調整を行う。ここで、PCS から出力される無効電力の制御感度の大小によって、タップ動作と無効電力制御のどちらが優先して動作するか双方の電圧制御負担の傾向を考える。

図 2-10 は、力率一定制御ならびに Volt-var 制御の適用により、PCS 無効電力出力の大きさが変わった際に、SVR タップ切換の頻度が変化するイメージ図である。力率一

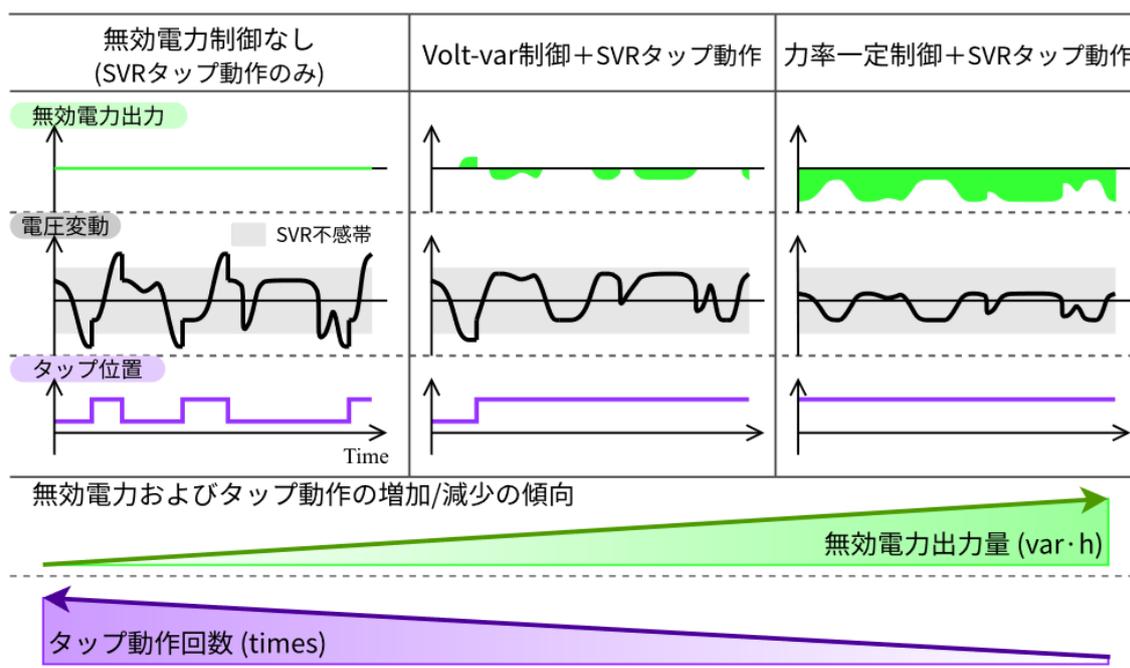


図 2-10 無効電力出力感度の変更による SVR 動作イメージ

定制御では、PV 発電出力時は常に有効電力出力に比例した無効電力が出力される。そのため、タップ動作に先行して無効電力による電圧変動抑制が効くことにより、タップ動作回数が抑制されるとともに無効電力が継続して出力され続け、結果として線路損失の増加につながりやすい状況が想定できる。一方、Volt-var 制御の電圧変動に対する無効電力出力の感度を調整してタップ動作発生の最適化を図ることで、SVR 電圧調整力を活用しつつ無効電力出力量と線路損失を減らす効果が期待できる。ただし、不要動作を繰り返すハンチングの恐れもあることから、この無効電力出力量とタップ切り換え頻度の大小傾向がすべての配電線状況において常に成り立つとは限らないことに注意が必要である。

SVR と Volt-var 制御は、それぞれに設定された電圧不感帯を超えた際に、タップ切換もしくは無効電力出力が動作する自律調整制御である点は共通しているが、下記に示す動作特性の違いが考えられる。

(1) 動作時間の違い：

SVR タップ切換制御は機械的な切換動作による 1 段ずつの段階的な電圧調整、Volt-var 制御は無効電力出力による連続的な電圧調整を行うため、電圧変動検出から動作までの時間が異なる。仮に、Volt-var 制御による電圧変動抑制のみが先行して動作し、SVR のタップ切換が動作しなかった場合、無効電力が継続して出力され続け、結果として線路損失の増加につながる状況が、望ましくない電圧制御例として考えられる。

(2) 参照電圧値の違い：

Volt-var 制御は個々の連系点電圧に基づいて動作、SVR は送出電圧と通過電流から推定する LDC 電圧に基づいて動作するため、SVR および個々の S-INV は、それぞれ異なる電圧を参照していることになる。

上記(1)(2)を踏まえると、単一時間断面の定常条件を対象に最適な Volt-var 曲線設定を決めた場合、タップ切換制御と Volt-var 制御の協調を図るのは困難であると想定される。そのため、第 3 章の提案手法では、時々刻々と変化する PV 出力の変動要素を考慮できるよう、逐次設定を更新することを前提にした Volt-var 曲線決定手法を考えることにする。

第3章

PV 出力変動に伴う SVR 動作と配電損失増加を低減する Volt-var 曲線決定手法

本章で説明する提案手法は、第2章で述べた Volt-var 制御の無効電力出力感度を調整して SVR 電圧調整力を活用しつつ無効電力出力量と線路損失を減らす効果への期待に基づいて、PV 出力変動に伴う SVR 動作と配電損失増加を低減する Volt-var 制御曲線決定手法を提案する。また、配電線内で大きな電圧制御効果が得られる運用として、高圧配電線に連系された容量の大きいメガソーラー規模の PCS が S-INV 機能に対応した場合を想定し、この大規模な高圧連系 PV (高圧 PV) の調整力を活用した Volt-var 制御を対象にする。住宅用を含む 50kW 定格出力未満である低圧連系の PV (低圧 PV) まで Volt-var 制御対象に拡大すると処理計算量やシステム構築コストが膨らむこと、低圧 PV は自家消費を差し引いた発電余剰分を売電するが高圧 PV は全量売電かつ出力規模が大きいことから、高圧 PV を主体とする Volt-var 制御の積極活用を考える。提案手法では、S-INV のモニタリング機能によって得られるメガソーラーの PV 出力情報を基に、Volt-var 曲線を逐次更新する。これは、雲の通過頻度など時間帯により変化する PV 出力変化と電圧変動の様相に合わせるためである。

提案手法は、配電損失の最小化の他、タップ切戻回数を目的関数に加えることで Volt-var 制御と SVR 動作との協調を図る。各 S-INV に割り当てる Volt-var 曲線設定の組み合わせ別に、Volt-var 制御の無効電力出力に伴う損失増加とタップ動作回数を潮流計算により推定し、1 回あたりのタップ切戻削減とともに生じる損失増加分を最小化する Volt-var 曲線を最適パラメータとして決定する。

3.1 提案する Volt-var 制御システムの構成

本提案手法では、図 3-1 の制御システム構成を想定する。このシステムでは、配電系統内に連系している S-INV 機能を持つメガソーラーPCS と制御サーバーの間において、

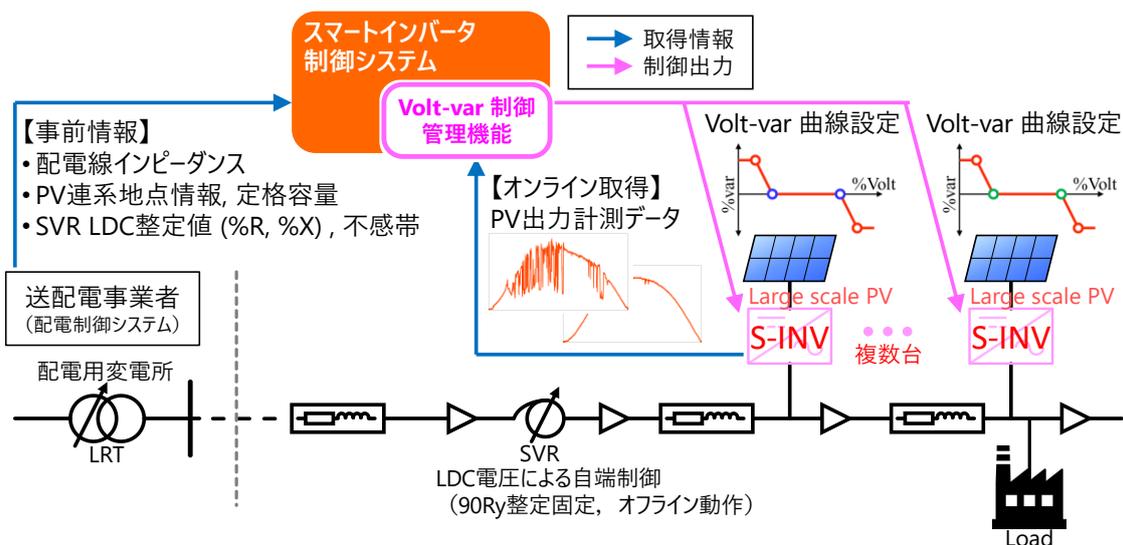
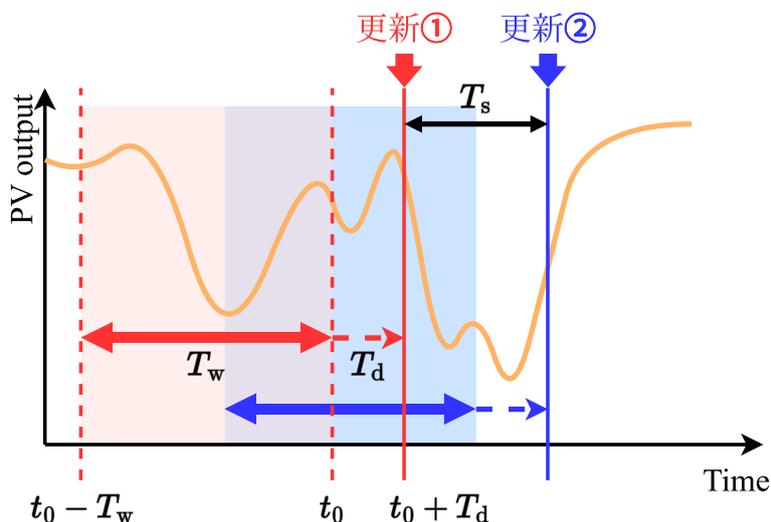


図 3-1 提案 Volt-var 制御システムの構成



T_w : 直近 PV 実測値 (スマートインバータ計測機能より取得) の参照時間長

T_s : Volt-var 曲線設定の更新周期

T_d : 通信時間, 処理時間遅れ

図 3-2 Volt-var 制御設定の更新周期と PV 計測情報参照時間

通信により双方向に情報を受渡し可能であり、S-INV に対して個別の設定を適用する。送配電事業者から事前に提供される線路インピーダンスや SVR 整定の系統定数等の情報に加え、各 S-INV との通信により収集する PV 発電出力(kW)値に基づき、一定時間ごとに Volt-var 曲線を決定し更新する。ただし、SVR の 90 リレーおよび LDC 整定値に関しては、S-INV のような通信による遠隔制御を考えず、固定整定値に基づいたタップ切換制御動作を行うものとする。また、Volt-var 曲線を一定周期にて更新する際、各 S-INV からの情報取得から Volt-var 曲線の反映までに通信遅れ等が発生することが懸念される。そこで本研究では、曲線更新周期を T_s 、直近 PV 実測値参照時間長を T_w 、 T_w 区間の最新時刻を T_0 、 T_0 から T_s までの処理時間遅れを T_d として定義し、図 3-2 に示すように、直近の PV 出力実績値から時間遅れ等を考慮して Volt-var 曲線を一定時間ごとに更新する制御システムとした。本論文では、1 日の時間帯によって変化する大まかな PV 出力変動に伴う電圧変動に追従できれば効果があると想定し、更新周期 $T_s = 3600s$ としている。

3.2 Volt-var 曲線決定方法

本手法では、Volt-var 制御による無効電力量と SVR タップ切換回数の関係に対応付けた曲線設定の最適判断指標として、『Volt-var 制御の電圧感度を高める（＝不感帯幅を狭める）ことによる【(損失増加分) / (タップ切換削減回数)】』を数値化する。

3.2.1 選択する Volt-var 曲線候補

図 2-9 (a)に示すように、Volt-var 曲線は曲線ポイントの与え方によって任意の特性を設定することが可能であるが、曲線設定候補の組み合わせパターン数が多くなるほど制御パラメータ管理のための負荷や計算量が増大する。そのため、実用性を考えて本論文では図 3-3 に示すように極力少ない曲線パラメータの選択手法を採用する。具体的には、縦軸の無効電力出力上限および下限に位置する両端 2 つのポイント (P_1 と P_4) を電圧管理上限および下限にあわせて固定、残りの不感帯両端を定義する 2 つのポイント (P_2 と P_3) を可変とし、さらに電圧上限側不感帯と下限側不感帯の 2 つのポイントを別々の処理に分けて決定する。ここで、 P_2 と P_3 の位置が逆順になることがないように、互いの選択範囲の重複がないようにする必要がある。ただし、不感帯幅 0 のドループ特性となる P_2 と P_3 の位置が同一の場合は選択可能である。また、複数 S-INV に対して異なる曲線設定の組み合わせを含めて候補を定義する。

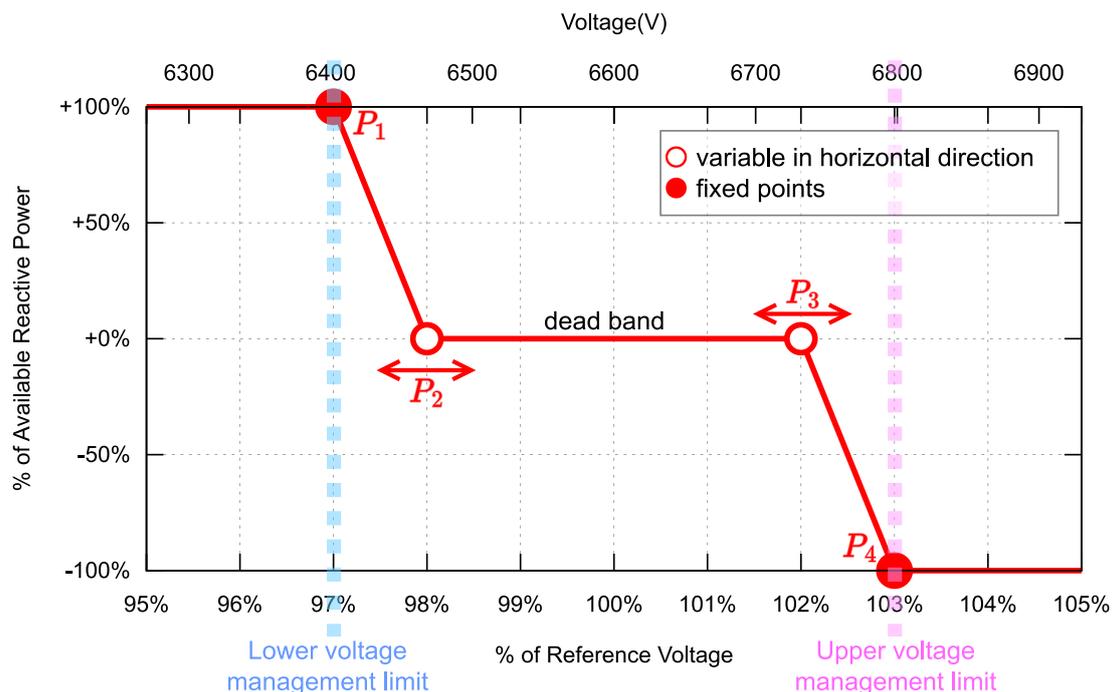


図 3-3 提案手法における Volt-var 曲線設定ポイント

3.2.2 提案手法の目的関数

Volt-var 制御と SVR タップ切換制御との間の関係性を考えると、Volt-var 曲線の不感帯の選び方によって、Volt-var 制御の電圧感度が増減し、無効電力制御量が増減する。同時に Volt-var 制御による無効電力出力によってタップ切換動作感度にも影響を及ぼす。Volt-var 制御の電圧感度が高い場合は、無効電力が積極的に出力されることで電圧変動が抑えられ、タップ切換動作が減少するが、無効電力出力増加に伴う配電損失が増加する。一方、Volt-var 制御の電圧感度が低い場合は、無効電力出力が抑えられて配電損失の増加が抑制されるが、タップ切換の動作回数が増加するものと想定できる。このように、Volt-var 制御による配電損失増加量とタップ切換動作回数の間には、トレードオフの関係が想定でき、SVR と Volt-var 制御のどちらの動作を優先して電圧制御を行うべきかという電圧制御負担割合の考え方によって、一概に最適条件を決めることは困難である。

そこで本提案手法では、Volt-var 制御による無効電力量と SVR タップ切換回数との関係性を対応付けた曲線設定の最適判断指標の一案として、『Volt-var 制御の電圧感度を高める(=不感帯を狭める)ことによる(損失増加分)/(タップ切換削減回数)』を数値化する。Volt-var 制御の無効電力出力に伴う損失増加とタップ切換削減回数を潮流計算で推定し、1 回あたりのタップ切換削減とともに生じる損失増加分を最小化する Volt-var 曲線を最適パラメータとして決定する。SVR の機器寿命は機械的動作による接点の消耗が大き

く関係し、タップ切戻回数削減は機器交換までの時期目安を延ばすことになるため、本指標は SVR 機器コストと Volt-var 制御に伴う損失とを比較する指標として活用することもできる。

提案手法において、電圧上限側不感帯の決定で使用する目的関数および制約条件を(3.1)式以降に定義する。 ΔW_{LOSS} (kWh) は、Volt-var 曲線不感帯設定 D_{base} を基準に、 D_{OVS} へ不感帯を変更したときの配電線損失の増加量、 ΔC_{TAP} は、Volt-var 曲線不感帯設定 D_{base} を基準に、 D_{OVS} へ不感帯を変更したときの SVR タップ切戻の削減回数である。 D_{base} は、選択する不感帯候補のうち最大幅(=Volt-var 曲線の電圧感度が最も低い設定)を基準とすることを想定している。また、 ΔW_{LOSS} (kWh) と ΔC_{TAP} は必ずしも正の値とならない場合が考えられるため、その場合は単に損失 ΔW_{LOSS} の最小化を指標として用いる。

(目的関数)

$$\left. \begin{array}{l} \min_{d_{\text{OVS}} \in D_{\text{OVS}}^*} \frac{\Delta W_{\text{LOSS}}(d_{\text{OVS}})}{\Delta C_{\text{TAP}}(d_{\text{OVS}})} \quad (\Delta W_{\text{LOSS}} > 0 \text{ and } \Delta C_{\text{TAP}} > 0) \\ \min_{d_{\text{OVS}} \in D_{\text{OVS}}^*} \Delta W_{\text{LOSS}}(d_{\text{OVS}}) \quad (\Delta W_{\text{LOSS}} \leq 0 \text{ or } \Delta C_{\text{TAP}} \leq 0) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3.1)$$

$$\Delta W_{\text{LOSS}}(d_{\text{OVS}}) = \sum_{t=t_0-T_w}^{t_0} P_{\text{LOSS}}(t, d_{\text{OVS}}) / 3600 - \sum_{t=t_0-T_w}^{t_0} P_{\text{LOSS}}(t, d_{\text{base}}) / 3600 \dots\dots\dots (3.2)$$

$$\begin{aligned} \Delta C_{\text{TAP}}(d_{\text{OVS}}) = & \sum_{t=t_0-T_w}^{t_0} |n_{\text{TAP}}(t, d_{\text{base}}) - n_{\text{TAP}}(t-1, d_{\text{base}})| \\ & - \sum_{t=t_0-T_w}^{t_0} |n_{\text{TAP}}(t, d_{\text{OVS}}) - n_{\text{TAP}}(t-1, d_{\text{OVS}})| \dots\dots\dots (3.3) \end{aligned}$$

$$D_{\text{OVS}}^* = \{d_1, d_2, \dots, d_p\} \dots\dots\dots (3.4)$$

ここで、 T_w は PV 実測値参照時間長、 ΔW_{LOSS} (kWh) は Volt-var 曲線不感帯 d_{base} を基準に d_{OVS} へ不感帯を変更したときの配電線損失の増加量、 ΔC_{TAP} は Volt-var 曲線不感帯 d_{base} を基準に d_{OVS} へ不感帯を変更したときの SVR タップ切戻の削減回数、 D_{OVS}^* は 1~ p 番目の S-INV に設定する Volt-var 曲線の電圧上限側不感帯 $d_1 \sim d_p$ (%) の組み合わせである。 ΔC_{TAP} の値がゼロの場合はタッ

プ動作の増減なし、負値はタップ回数の増加となる。 d_{base} は選択する不感帯候補のうち最大幅 (=Volt-var 曲線の電圧感度が最も低い設定) を基準とすることを想定している。また、 ΔW_{LOSS} (kW·h)と ΔC_{TAP} は必ずしも正の値とならない場合が考えられるため、その場合は単に損失 ΔW_{LOSS} (kW·h)の最小化を指標として用いる。 ΔW_{LOSS} (kW·h)と ΔC_{TAP} はともに、 D_{OVS}^* 条件別に時刻 $t = t_0 - T_w$ から t_0 の潮流計算を実行し、配電線損失 P_{LOSS} (kW)の積算値、タップ位置 n_{TAP} の変化回数の和から求めた値を使用する。

(制約条件)

$$\max\{V_n(t, d_{\text{OVS}})\} \leq V_{\text{maxlim}} \dots\dots\dots (3.5)$$

$$\min\{V_n(t, d_{\text{OVS}})\} \geq V_{\text{minlim}} \dots\dots\dots (3.6)$$

$$\begin{aligned} \max \frac{|Q_{\text{inv}}(t, d_{\text{OVS}})|}{Q_{\text{avl}}(t, d_{\text{OVS}})} &= \max \frac{|Q_{\text{inv}}(t, d_{\text{OVS}})|}{\sqrt{S_{\text{max}}^2 - (P_{\text{PV}}(t, d_{\text{OVS}}))^2}} \\ &\leq 100\% \dots\dots\dots (3.7) \end{aligned}$$

(3.5)(3.6)式は電圧管理範囲の逸脱を除外する条件式で、 V_n :各ノードの電圧値、 V_{maxlim} :電圧管理上限値、 V_{minlim} :電圧管理下限値、(3.7)式は2.2.1項で述べた Available Reactive Power 基準設定において、PCS 容量内で PV 出力を抑制せずに出力可能な無効電力の上限到達を除外する式で、 Q_{inv} : Volt-var 制御による無効電力出力(kvar)、 Q_{avl} : PCS の利用可能無効電力(kvar)、 S_{max} : PCS の定格容量(kVA)、 P_{pv} : PV 有効電力出力(kW)である。

3.2.3 提案手法の処理手順

提案する Volt-var 曲線決定手法において、S-INV 計測情報の取得から Volt-var 設定値の更新までの一連の処理フローを図 3-4 に示す。本手法では、Volt-var 曲線の不感帯候補別に、網羅的に潮流計算を実行し、最適候補を探索している。具体的手順を、以下項目順序別に示す。

- (1) 初期条件入力
線路インピーダンス、SVR 整定値、PV 連系点、Volt-var 曲線不感帯候補を与える。

- (2) 直近時刻区間 T_w の PV 出力実測データを参照
- (3-1) Volt-var 曲線の電圧上限側不感帯候補条件別に、潮流計算により PV 出力変動に伴う電圧変動、SVR タップ切換、Volt-var 制御動作を推定。
- (3-2) Volt-var 曲線の電圧下限側不感帯候補条件別に、潮流計算により PV 出力変動に伴う電圧変動、SVR タップ切換、Volt-var 制御動作を推定。
- (4-1) (3-1) の潮流計算結果から(3.1)式の目的関数により電圧上限側不感帯を選択する。
- (4-2) (3-2) の潮流計算結果から(3.1)式の目的関数により電圧下限側不感帯を選択する。
- (5) (4-1) と (4-2) で選択した Volt-var 曲線設定を更新値として適用する。
- (6) 更新周期時刻毎に、(2) から (5) の処理を繰り返す。

上記項目の (3-*) と (4-*) 番号部分は、不感帯候補の電圧上限側ポイントと電圧下限側ポイントに分けた並列処理部分を示している。

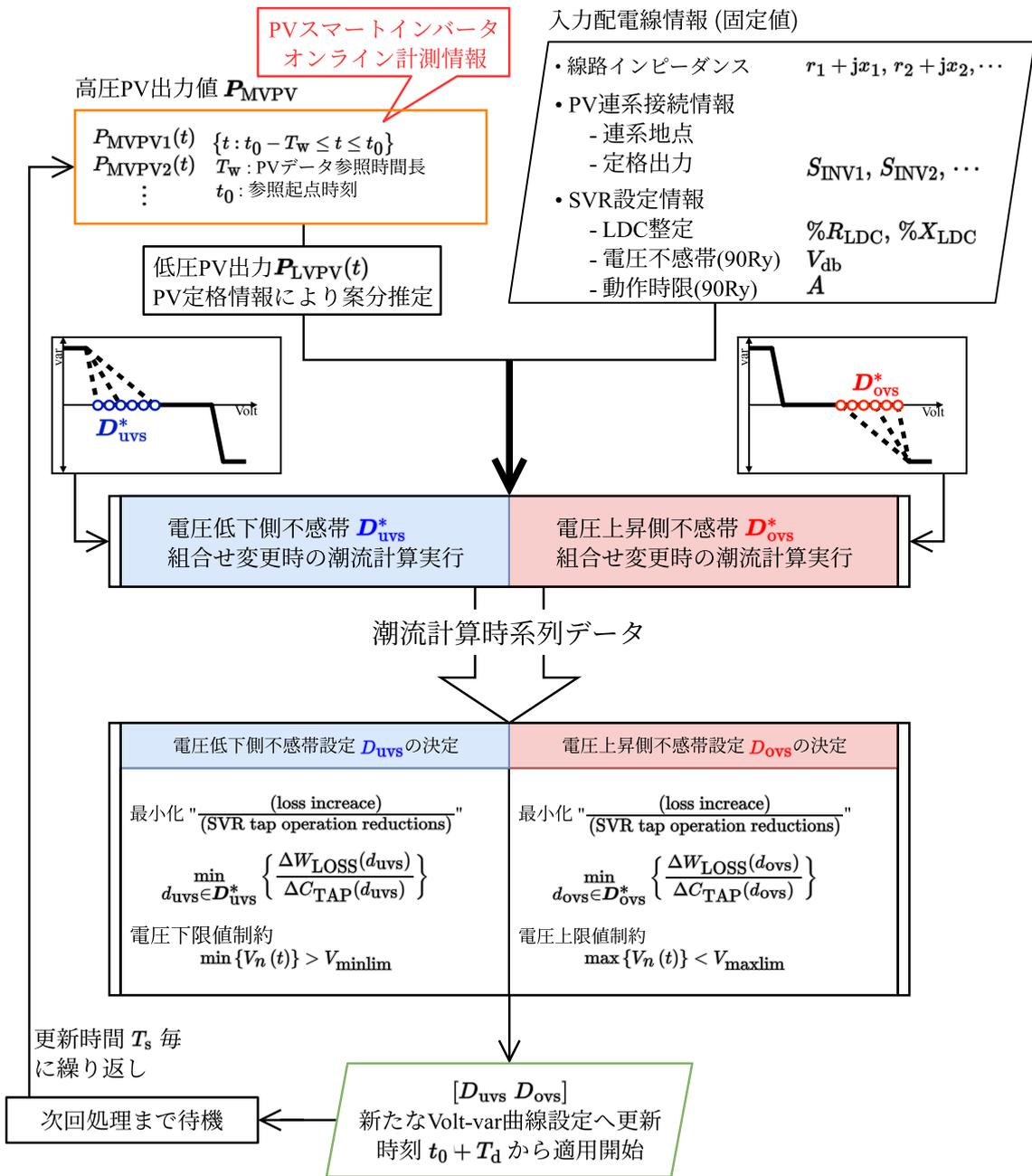


図 3-4 提案 Volt-var 曲線決定手法の処理手順

第4章

Volt-var 曲線決定手法の適用効果

- 配電線縮約モデルを用いた提案手法の確立 -

第2章および第3章では、SVRのタップ切換制御とPCSの無効電力制御について、両者の電圧制御負担バランスの適正化を目的に、SVRの寿命に直接的に関わるタップ動作回数の抑制と、過剰な無効電力出力に起因する配電線損失増加の低減の両者を同時に達成する考え方と、本論文で提案するVolt-var制御パラメータ決定手法を説明した。

本章では、第3章で説明した提案するVolt-var曲線決定手法について、手法の確立ならびに有効性を数値計算により確認するため、S-INVとSVRが導入される基礎的な配電線縮約モデル上で、提案手法を適用したケースとその他電圧制御ケースを比較検証する。過去3年間のPV出力実測データを基に、その中からSVRタップ切換回数が多い上位日付をピックアップして、PV出力変動に伴い高頻度に発生するタップ切換を提案手法の適用で効果的に抑えられることを4.2項にて確認する。そして4.3項では、数か月間の連続期間にわたるシミュレーションを実施し、提案手法とその他電圧維持対策とを比較することで、長期間連続日条件で提案手法の効果を評価する。

4.1 数値計算条件

提案手法を検証するため、図4-1に示す1フィーダ配電システムモデルを用いて、SVR二次側から需要家側範囲の電圧変動を模擬する。本検討では、MW規模の事業用PV設備へS-INV導入を想定し、Volt-var制御機能が適用された場合を対象に検討する。負荷およびPVを縮約した簡易モデルを用い、配電線の間と末端の2箇所に連系されたS-INVのVolt-var制御をシミュレーションする。負荷およびPV発電データには、(株)東光高岳小山事業所内で計測された1秒周期実測データから容量換算処理により生成した値を使用し、PV波形は出力変動が顕著な日と快晴日の2パターンを選択している。PV連系量は合計6MW、ピーク負荷は3.2MWで、ノード#3と#4地点で均等に配分する。

その他、シミュレーションで共通の条件を表 4-1 に示す。SVR は、二次側と配電線末端の中間箇所を電圧推定点としたベクトル LDC による自端制御方式で、推定電圧値が基準電圧 6600V、電圧不感帯 $\pm 1.2\%$ を逸脱する積算量（動作時限）が $60\% \cdot s$ に到達した場合にタップ切換動作を行う積分方式とする。

Volt-var 曲線の電圧上限側不感帯は $100.0 \sim 102.5\%$ の 0.5% 刻み、電圧下限側不感帯は $97.5 \sim 100.0\%$ の 0.5% 刻みの範囲から選択し、曲線更新周期 $T_s = 3600s$ 、PV 出力値参照時間長 $T_w = 5400s$ 、PV 計測情報取得から更新までの時間遅れ $T_d = 600s$ とする。

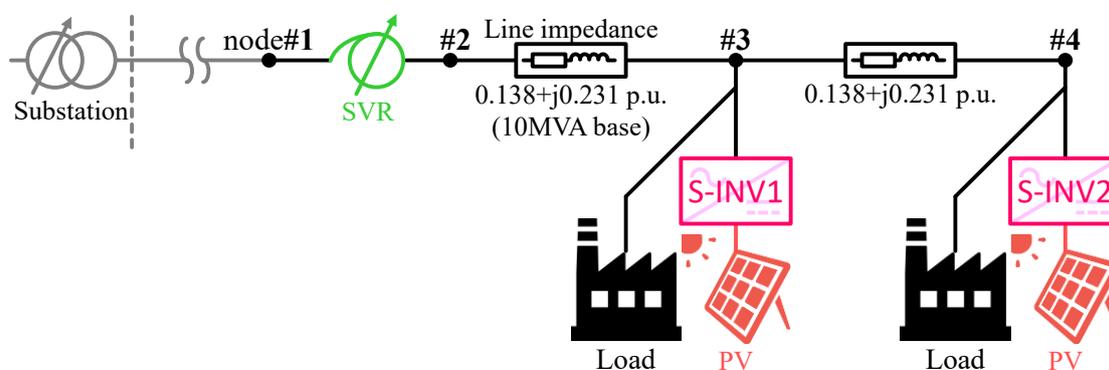


図 4-1 1 フィーダ配電線縮約モデル

表 4-1 各種シミュレーション共通条件

シミュレーション時間刻み		1.0s
SVR	1 タップあたりの電圧調整幅	100V
	タップ段数	9 段
	電圧不感帯幅 (90Ry 整定)	6600V $\pm 1.2\%$
	動作時限 (90Ry 整定)	60% $\cdot s$
	%R, %X (LDC 整定)	%R = 13.3% %X = 23.3% (10MVA 基準)

4.2 高頻度タップ切換発生日における提案手法の確立と有効性の確認

ここでは、Volt-var 曲線決定提案手法の動作確立と有効性を確認するため、SVR のタップ切換が高頻度となる PV 出力変動日を対象にシミュレーションを実施する。まず、(株)東光高岳小山事業所内で実測された PV 出力データ 3 年間分（2015 年~2017 年）について潮流計算を実施し、1 日の SVR タップ切換回数が多い日付を抽出する。次に、ピックアップした PV 出力変動日を対象に、Volt-var 曲線決定提案手法を適用した場合の電圧制御結果を確認する。この計算では、負荷電力をゼロとした PV 出力のみの電力値を負荷母線に指定しているので、SVR タップ切換は PV 出力変動分によって発生する結果である。

図 4-2 にタップ切換回数が最多の日付について、提案手法を適用した場合の時系列グラフを示す。図 4-3 は、比較の参考として、同日付条件にて仮に SVR のみ（インバータからの無効電力出力ゼロ）により電圧調整を行った場合の結果である。上から、(a) 配電線中間位置 (node#3) の S-INV1 の出力、(b) 連系点電圧、(c) 配電線末端位置 (node#4) の S-INV2 の出力、(d) 連系点電圧、(e) SVR の LDC 電圧値およびタップ位置である。図 4-2 (b)と(d)では、S-INV 連系点電圧に重ねる形で、Volt-var 曲線設定の変更結果を表示している。Volt-var 曲線は毎正時のタイミングで更新されており、Volt-var 曲線の電圧軸 (x 軸) において、不感帯領域 (図 3-3 の P_2 - P_3 間) を灰色、不感帯を外れて無効電力が出力される領域 (図 3-3 の P_1 - P_2 間と P_3 - P_4 間) を赤色、y 軸値が 100%に到達する領域 (図 3-3 の P_1 以下と P_4 以上) を緑色で表示している。

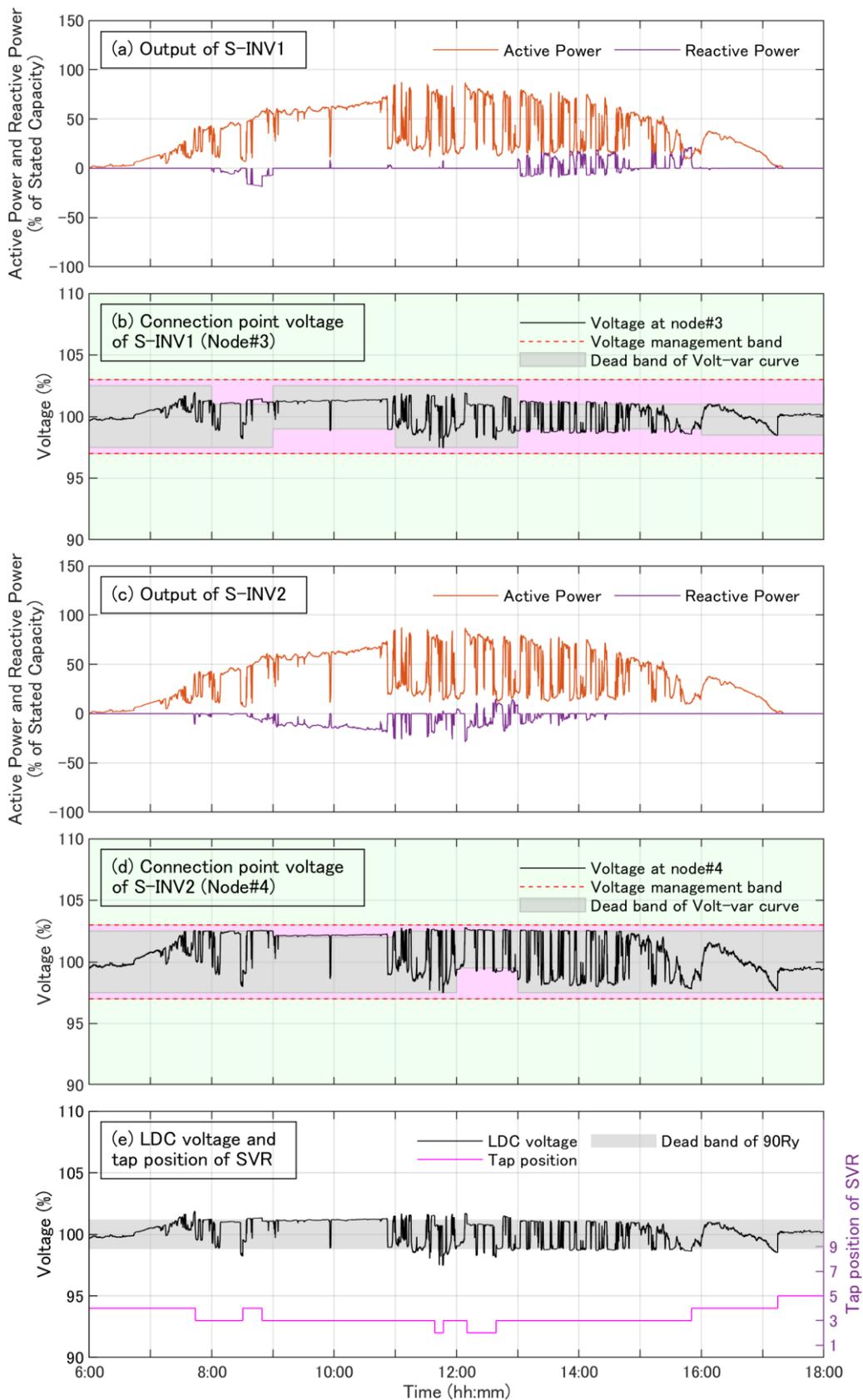


図 4-2 提案 Volt-var 曲線決定手法適用時の高頻度タップ動作発生日時系列結果

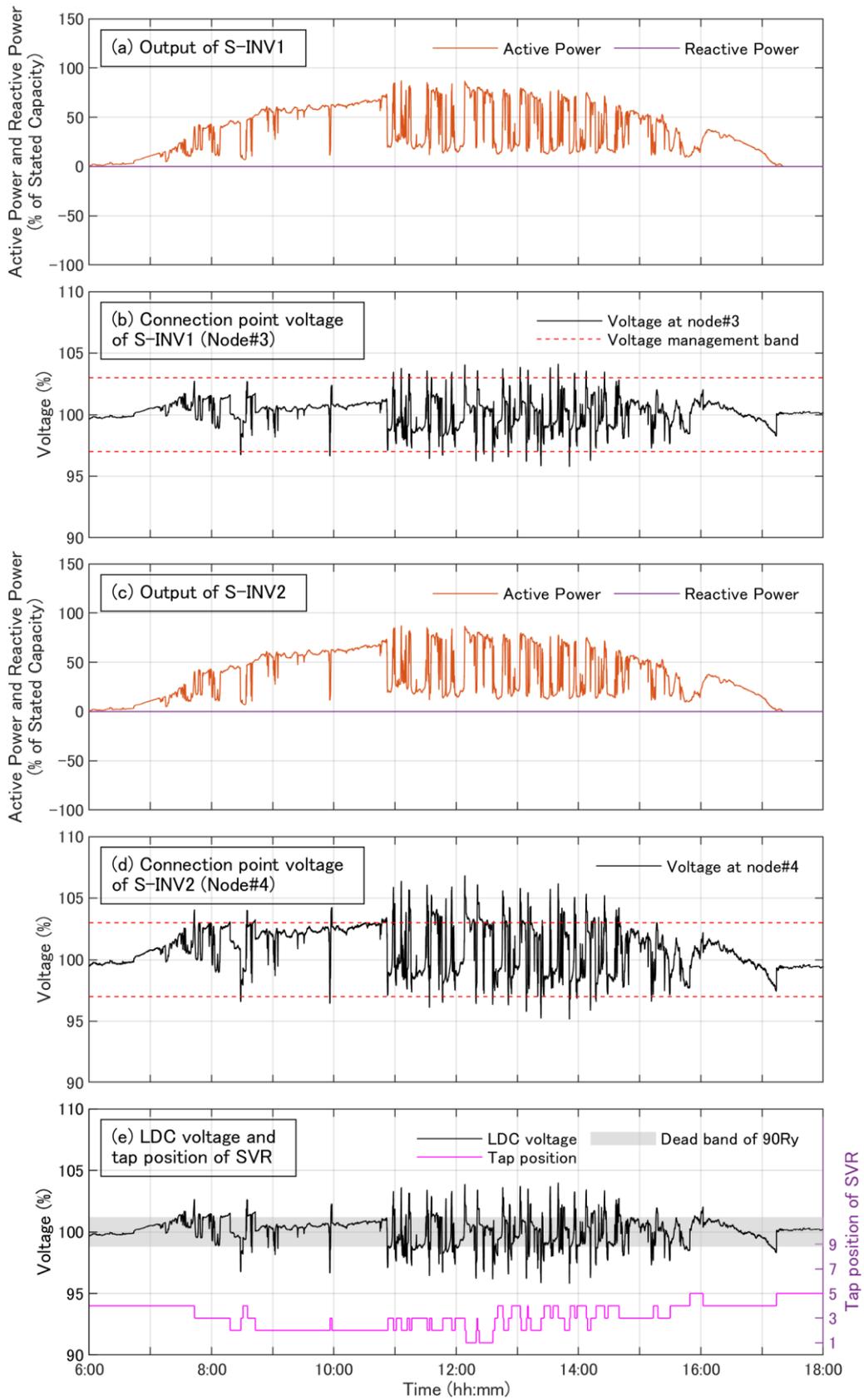
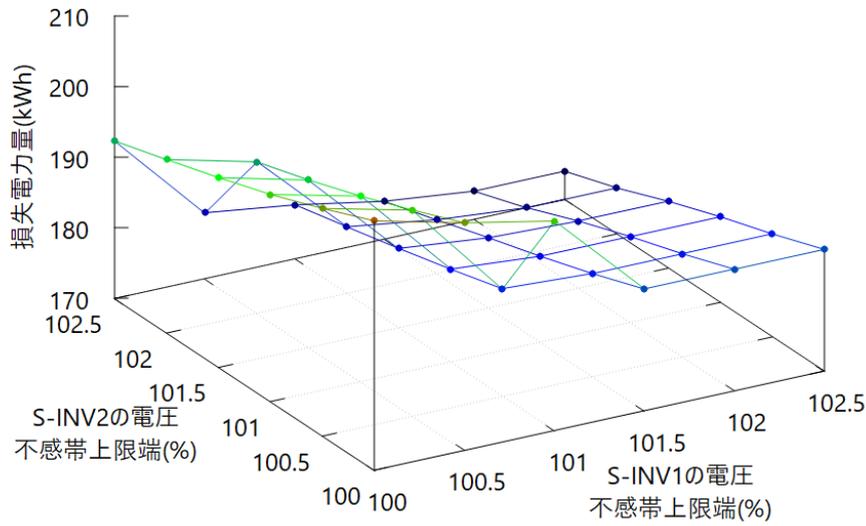


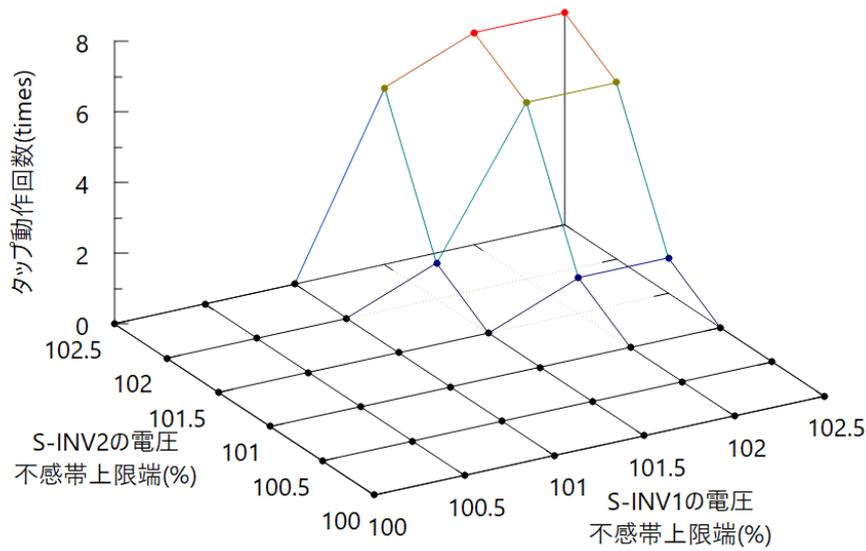
図 4-3 SVR のみによる電圧制御時の高頻度タップ動作発生日時系列結果

Volt-var 曲線不感帯決定の一例として、図 4-2 の 15 時のタイミングで更新される電圧上限側不感帯 D_{ovs} を選択するまでの潮流計算による推定値を、図 4-4 と図 4-5 に示す。図 4-4 (a)と(b)は、設定更新時刻 15 時の直近 90 分間 (13:20~14:50) について、 D_{ovs} の設定組み合わせ候補別の (a) 配電線損失と (b) タップ切換回数の値を比較した図である。x 軸および y 軸の電圧上限側不感帯 D_{ovs} の値が小さいほど Volt-var 制御が積極的に無効電力を出力する特性により損失が増加し (図 4-4 (a)), 一方、 D_{ovs} の値が大きいほど SVR のタップ切換動作回数が増加する (図 4-4 (b)) 値になっており、Volt-var 制御による配電損失増加量とタップ切換動作回数の間にトレードオフの傾向が確認できる。図 4-5 は、図 4-4 (a)と(b)の数値から(3.1)式に従って算出した目的関数の値であり、指標が最小となる $D_{ovs} = \{101.0\%, 102.5\%$ を選択している。

図 4-2 と図 4-3 の最下段にある SVR タップ切換を比較すると、Volt-var 制御の無効電力が出力されていることで、タップ切換回数が 58 回から 10 回に削減される効果が確認できる。図 4-2 の 1-2 段目と 3-4 段目では、PV 出力変動に伴う電圧変動が大きい時間帯に Volt-var 曲線の不感帯領域が狭くなるように曲線設定が更新され、連系点電圧値が緑色背景部分で示す不感帯領域を越えて、赤色背景部分まで電圧が上昇または降下したときに無効電力が出力される基本的な制御動作が確認できる。また、Volt-var 曲線の電圧下限側不感帯が狭くなることで、遅相無効電力が出力されている時間帯が存在する。この遅相無効電力は、PV 出力が雲の通過等により急減したとき、SVR の LDC 電圧を高め認識させるように作用し、結果として SVR の昇圧/降圧動作の繰り返しを抑えることにつながっている。さらに、中間位置の S-INV2 の方が、配電線末端位置の S-INV1 よりも優先して不感帯が狭められる曲線設定が選択されている傾向が見られるが、これは、SVR に近い位置で無効電力を出力することで、より少ない配電線損失で SVR の LDC 電圧に影響を与えようとしているためである。なお、通信や計算処理の遅れを含む 1 時間ごとの曲線更新であるため、PV 出力および電圧の変動から遅れて選択した Volt-var 曲線が適用されている。また、PV 出力値を取得参照する直近時刻区間 T_w と実際の制御が適用する時間帯との間には PV 出力および負荷に不確実性が伴う。Volt-var 曲線を更新する時間間隔が、1 日の間で変化する PV 出力変動の様相に追従できないほど長時間に及ぶと問題であるが、本提案手法で考える PV 出力変動による高頻度タップ切換動作を低減する目的のためには、1 時間程度の更新周期で対応できるものと考えられる。



(a) Volt-var 曲線変更による配電損失推定値



(b) Volt-var 曲線変更によるタップ動作回数推定値

図 4-4 Volt-var 曲線の電圧上昇側不感帯決定における計算値一例

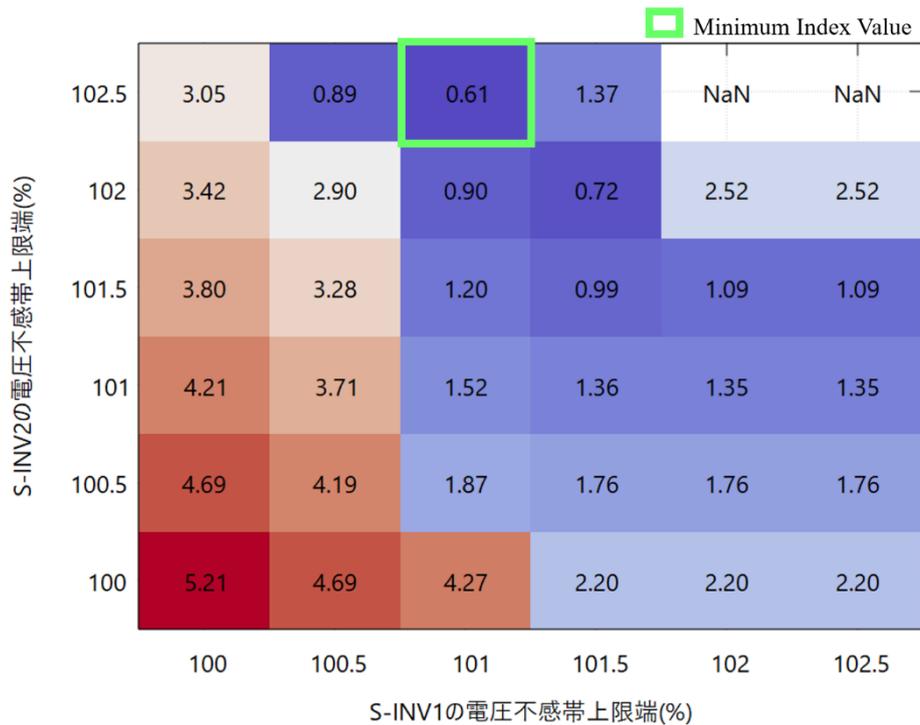


図 4-5 目的関数最小となる Volt-var 曲線選択の計算例

その他の SVR 切戻回数が多い日付を対象にした提案手法確認のため、日間のタップ切戻回数が 30 回以上（タップ切戻器の機器寿命目安（約 20 万回/20 年）を考慮^[37]）になる上位 59 日分をピックアップした。表 4-2 にピックアップした上位日付の一部を示す。表 4-2 の日付は、特定の時期や季節に限定しておらず、タップ動作の高頻度日は年間を通じて生じる可能性があるといえる。この傾向は、第 5 章の検討においても同様である（表 5-4）。図 4-6 は、ピックアップした日数に関して、1 日あたりのタップ切戻回数の結果をデューレーションで示した図である。同様に、日間の配電損失量について図 4-7 に示す。SVR のみの動作が破線、Volt-var 制御を加えた提案手法適用の場合を実線で示している。図 4-6 では、ピックアップ日付の全てにおいてタップ切戻回数が削減できおり、Volt-var 曲線決定提案手法の効果として、PV 出力変動に起因する高頻度のタップ切戻が抑制できている。同時に、Volt-var 制御が動作することによる損失増加は、SVR のみ動作の場合と比べて大きく増加することなく分布していることが図 4-7 から確認できる。

表 4-2 タップ動作回数の上位ピックアップ日

順位	日付	タップ動作回数	順位	日付	タップ動作回数
1	2016/08/26	58	8	2016/02/25	50
2	2016/09/05	58	9	2016/07/31	50
3	2015/08/09	54	10	2017/05/28	48
4	2016/06/27	54	11	2016/08/19	46
5	2015/05/04	52	12	2016/08/01	44
6	2015/08/16	52	13	2017/04/28	44
7	2015/08/15	50	14	2017/06/15	44

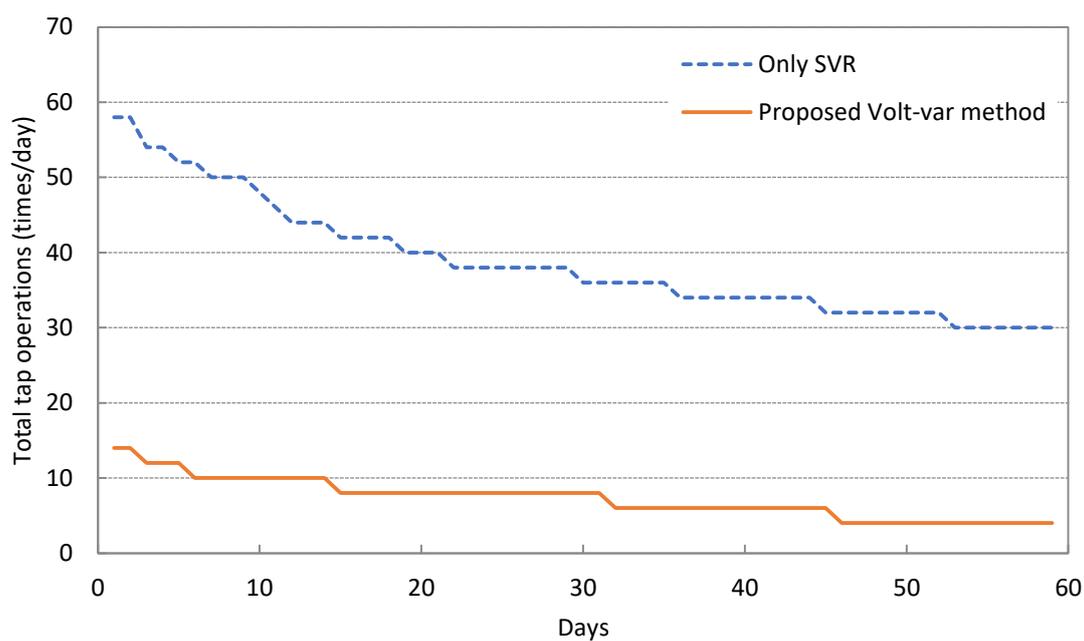


図 4-6 1日当たり SVR タップ動作回数のデュレーション
(タップ動作顕著日)

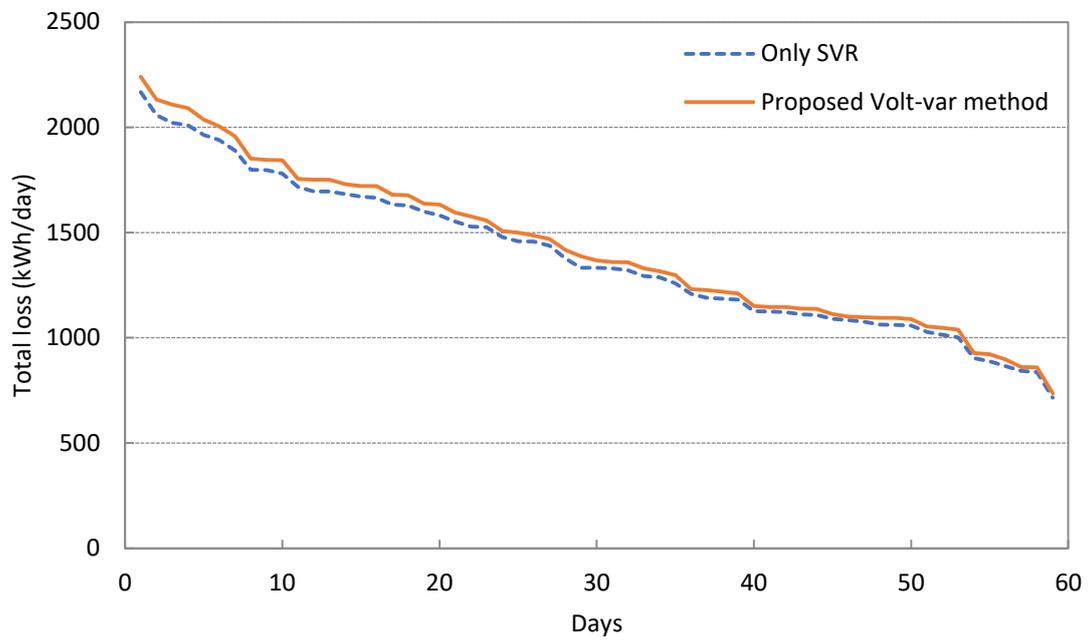


図 4-7 1日当たり配電損失のデュレーション
(タップ動作顕著日)

4.3 長期間連続日条件における確認

4.2 節ではおよびタップ切替が多く発生する PV 出力変動条件に絞って Volt-var 制御提案手法の動作を確認した。本節では、天候によって日々さまざまに変化する PV 出力変動パターンを含む評価を目的に、9 か月間の長期連続日条件にわたってシミュレーションを実施する。そして、評価期間中の SVR タップ切替回数および配電損失量の総和を算出し、提案手法の効果を検証する。なお、9 か月の連続期間は、(株)東光高岳小山事業所内で計測された 2018 年 1 月 1 日～9 月 30 日 (272 日間) のデータに対応する。

下記 CASE 1～CASE 4 の条件にて、提案手法とその他の電圧対策ケースを比較する。

(CASE 1) : SVR のみ

基本ケースとして、PV-PCS の運転力率を常に 1 とした条件

(CASE 2) : SVR + Volt-var 制御提案手法

提案手法を適用し、S-INV 計測情報から PV 出力に伴う電圧変動ならびに SVR 動作低減効果の高い Volt-var 曲線設定を推定して逐次更新する

(CASE 3) : SVR + Volt-var 制御曲線固定

Volt-var 制御設定の遠隔制御を採用せず固定設定で運用する場合で、CASE 2 の条件のうち Volt-var 曲線不感帯を常に $100 \pm 2.5\%$ で固定とした条件

(CASE 4) : SVR + 力率一定制御

現在採用されている PCS 力率一定制御 (力率値 95%) を適用した条件

各ケースで1日あたりのタップ切戻回数のデューレーションを比較した結果を図4-8、配電線損失量(MWh)とタップ切戻回数の総和について比較した結果を図4-9に示す。なお、電圧変動結果に関しては、2.2.1項に記載した Available Reactive Power 基準による有

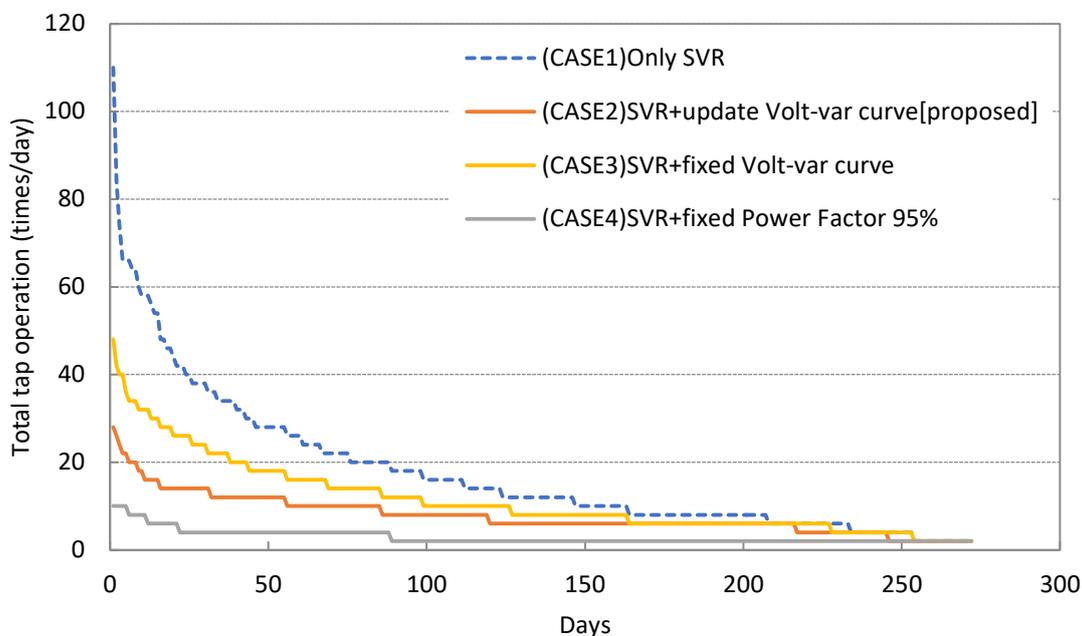


図4-8 1日あたり SVR 動作回数のデューレーション (長期間連続期間比較)

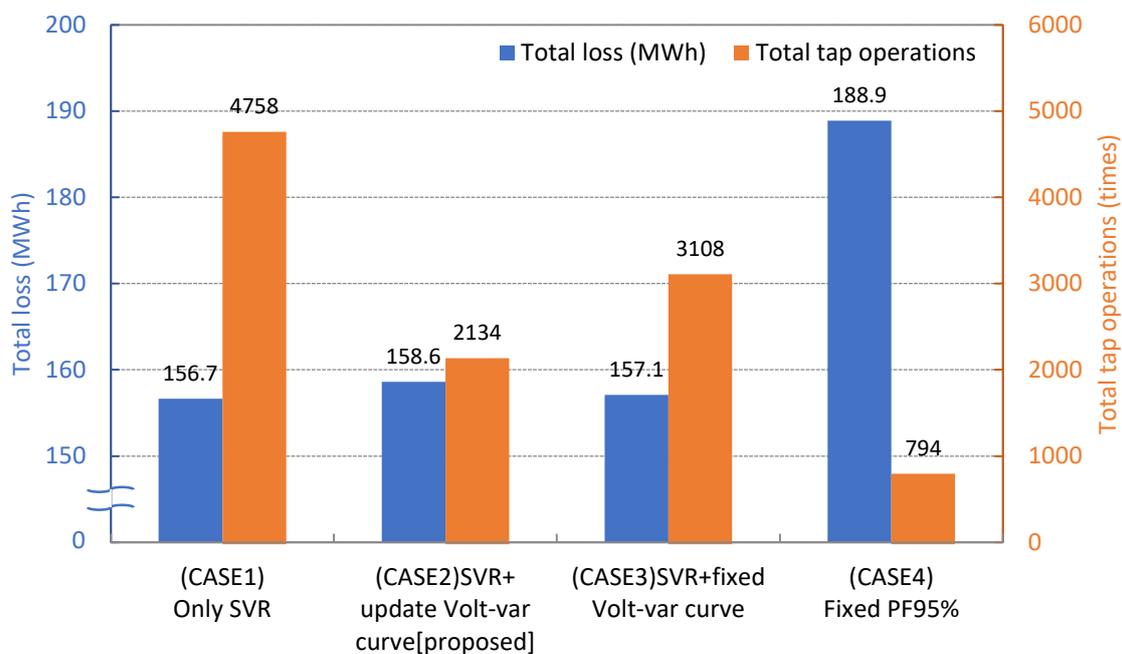


図4-9 各ケース間の損失電力量とタップ動作回数 (長期連続期間の合計比較)

効電力出力を優先して無効電力上限制約が働く時間（全シミュレーション評価期間 272 日のうちの 300 秒程度）を除き、すべてのノード電圧値が $100 \pm 3\%$ の範囲内に収まっていることを確認している。

図 4-8 より、CASE 1（SVR のみで電圧調整）と比較して CASE 2～CASE 4 は、いずれも S-INV から無効電力が出力されていることにより横軸の全期間でタップ切戻回数が減っていることがわかる。

図 4-9 において配電損失を比較すると、CASE 2 と CASE 3 の Volt-var 制御適用ケースは CASE 1 を基準に 1% 程度以内の損失増加に留まっているのに対して、CASE 4 の力率一定制御は 20% 以上の損失増加が確認できる。力率一定制御に比した Volt-var 制御を適用する効果として、損失増加を抑えつつタップ回数が削減される結果となっており、PV の発電時は常に有効電力に比例した無効電力が出力される力率一定制御に対して、連系点電圧が不感帯設定範囲逸脱時のみ無効電力を出力する Volt-var 制御の特徴が表れている。タップ動作回数については、CASE 1 を基準に Volt-var 制御ケースの CASE 2 は 55% 減、CASE 3 は 53% 減、力率一定制御（CASE 4）は 83% 減であり、いずれの無効電力出力制御ケースにおいても半分以上のタップ動作抑制が確認できる。また、CASE 4 の力率一定制御は、無効電力出力に起因する配電線損失増加の影響の一方、図 4-8 横軸の 272 日の全評価期間にわたってタップ切戻回数を大幅に抑えている。これは、無効電力とタップ動作の両者の電圧制御負担バランスの観点においては、出力する無効電力が過剰であり必要以上にタップ動作を抑制している判断ができる。

図 4-9 の Volt-var 曲線を更新する提案手法（CASE 2）では、SVR のみによる電圧制御ケース（CASE 1）基準で 1% 程度の少ない損失増加量に対してタップ動作回数が 55% 削減される効果が得られている。Volt-var 曲線固定ケース（CASE 3）に比べても、同程度の損失増加でタップ切戻回数をより多く抑えられている（3108 回 → 2134 回の削減）。現在適用されている力率一定制御ケース（CASE 4）と比較しても、提案手法（CASE 2）は約 16% 損失電力量が低減され（189MWh → 159MWh）、CASE 1 を基準に比較して SVR タップ動作回数が半分以下になる。以上の結果から、Volt-var 曲線を逐次更新する提案手法により、配電線損失増加を抑制しつつ、タップ切戻回数削減を大きくする効果が得られることがわかり、提案手法の有効性を確認できた。

第5章

Volt-var 曲線決定手法の適用効果

- 実際の配電線運用に即した提案手法適用効果 -

第4章では、提案する Volt-var 制御の曲線設定更新手法の確立を目的としていたため、低圧連系 PV（低圧 PV）が存在しない高圧連系（高圧 PV）のみ接続されていた検討条件であった。この第5章では、提案する高圧連系 PV を対象とした S-INV の Volt-var 制御の適用手法が、実際の配電線電圧制御運用に適用可能なのか実用性を確かめることを目的に、各個別の低圧需要家電力計測データを反映した実規模の配電線モデルを使用して、高圧 PV 以外の低圧需要家による不確実性の影響を加味した評価を実施する。そして、提案手法を適用することで、PV 出力変動に伴って高頻度に発生するタップ切換を効果的に抑えられるかどうかを確認する。そのためにまず、1年間にわたる PV および負荷の実測データから、電圧変動および SVR タップ切換頻度の多い日付をピックアップし、次に Volt-var 制御提案手法と現行適用されている力率一定制御条件とをケース比較することで、提案手法の効果を評価する。

5.1 数値計算条件

本章では高圧連系と低圧連系の双方に PV が普及する将来断面を想定している。配電線内の高圧および低圧の合計 PV 連系容量（4MW 一定）に対して、高圧 PV と低圧 PV の導入割合が異なる複数 PV 導入状況を想定し、これら各 PV 導入割合別に PCS の無効電力制御ケースを変えてシミュレーション評価する。具体的な条件は、以下(1)～(3)のとおりである。

(1) 配電線モデル

図 5-1 に示す 1 フィーダ配電システムモデルを用いて、配電用変電所送り出しから需要家側範囲の電圧変動を模擬する。本配電線モデルは、文献^[38]において代表モデルで分類されている「繁華街」、「住宅」、「工場」、「農山村」の配電線区分のうち、電圧変動が特に顕著である農山村地区を想定したモデルを利用している。SVR のみで電圧調整が困難となる 4MW を合計の PV 導入量とし、高压連系 PV は 3 箇所、低压連系 PV は 1106 軒の低压需要家とともに均等分散して接続されるものとする。高压 PV と低压 PV ともに、PV パネル容量と PCS 容量は等しく、過積載はないものとする。

(2) PV 発電出力および負荷データ

負荷および PV 発電データには、NEDO「集中連系型太陽光発電システム実証研究」事業^[39]で計測された低压 553 軒、1 年間の 10 秒周期実測データを利用している。低压需要家の負荷電力には、1106 軒分（低压 553 軒×2）に対して各軒個別の実測値を割り当てる。高压 PV および低压 PV 出力には、後述の PV 導入量条件（表 5-1）に合わせて実測元データを容量換算処理により生成した値を使用し、電圧変動および SVR タップ切換の発生が顕著な条件日をピックアップしてシミュレーションに用いる。

(3) 比較条件

PV 合計連系量 4MW のうちの高压 PV と低压 PV の導入容量比（表 5-1 参照）、ならびに高低压 PV の無効電力制御方法（表 5-2 参照）の各条件の組み合わせについて、時系列計算を実施し、ピックアップ対象日中の SVR タップ切換回数および PCS の無効電力出力量 (var·h)、配電損失量 (W·h) を比較し、提案手法の効果を検証する。

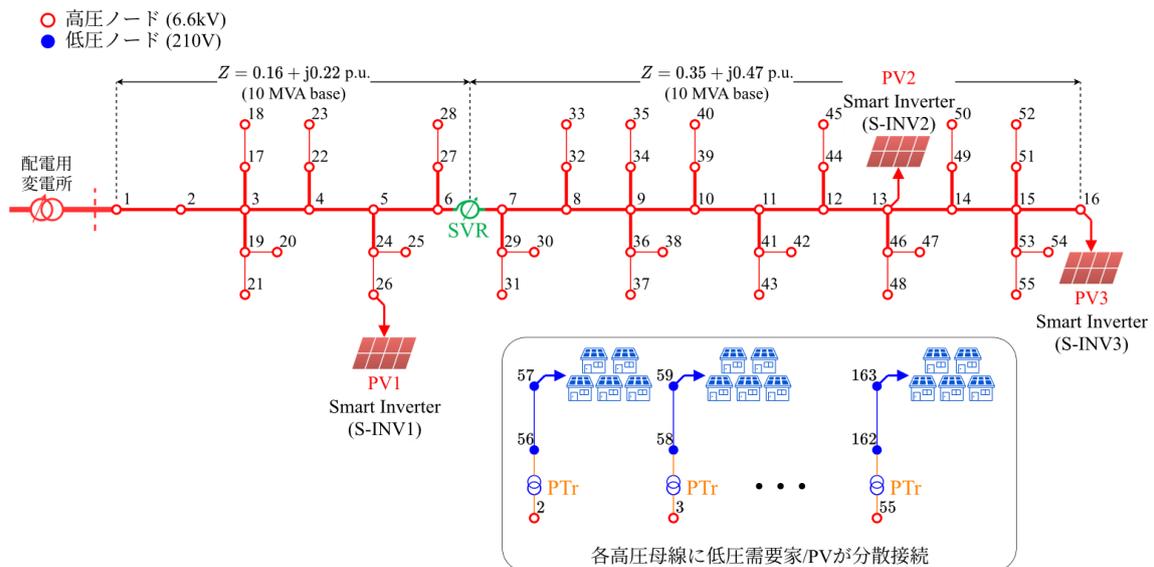


図 5-1 高低压 PV 混在実配電線モデル（農山村地区モデル）

CASE 0 の SVR のみによる電圧制御ケースをベースケースとして、他の無効電力制御あり条件の CASE 1 ~ CASE 4 を比較する。

(CASE 0) : SVR のみ

基本ケースとして、PV-PCS の運転力率を常に 1 とした条件

(CASE 1) : SVR + 力率一定制御

現在日本国内で採用されている PCS 力率一定制御の代表値として低圧 PV 力率値 95%、高圧 PV 力率値 90%を適用した条件

(CASE 2) : SVR + 高圧 PV のみ力率一定制御

CASE 2 の力率一定制御を高圧 PV のみに限定した条件（低圧 PV は力率 1）

(CASE 3) : SVR + 高圧 PV : Volt-var 制御 + 低圧 PV : 力率一定制御

高圧 PV に Volt-var 曲線決定提案手法を適用するとともに、低圧 PV は力率 95% 一定制御で運転

(CASE 4) : SVR + 高圧 PV のみ Volt-var 制御（提案手法）

高圧 PV に Volt-var 制御提案手法を適用し、かつ無効電力制御負担は高圧 PV のみによる条件（低圧 PV は力率 1）

その他共通の条件を表 5-3 にまとめて示す。SVR は二次側と配電線末端の中間位置を電圧推定点としたベクトル LDC による自端制御方式で、推定電圧値が基準電圧 6600V、電圧不感帯 $\pm 1.5\%$ を逸脱する積算量（動作時限）が $60\% \cdot s$ に到達した場合に、1 タップ幅 100V、タップ数 9 の範囲でタップ切換動作を行う。Volt-var 曲線の電圧上限側不感帯は 100.0~102.5%の 0.5%刻み、電圧下限側不感帯は 97.5~100.0%の 0.5%刻みの範囲から選択し、曲線更新周期 $T_s=3600s$ 、PV 出力値参照時間長 $T_w=5400s$ 、PV 計測情報取得から更新までの時間遅れ $T_d=600s$ とする。

表 5-1 高圧 PV および低圧 PV の導入容量条件

高圧 PV 連系割合		高圧 PV 容量 (kW)			低圧 PV 容量 (kW)	
高圧 PV	低圧 PV	PV1	PV2	PV3	Total	1 軒あたり
80%	20%	800	800	1600	800	1.4
75%	25%	750	750	1500	1000	1.8
50%	50%	500	500	1000	2000	3.6
25%	75%	250	250	500	3000	5.4

表 5-2 各比較ケースの PV 運転条件

CASE No.	高圧 (6.6kV) PV	低圧 PV
CASE 0	PF 1.0	PF 1.0
CASE 1	PF 0.90	PF 0.95
CASE 2	PF 0.90	PF 1.0
CASE 3	VVC	PF 0.95
CASE 4	VVC	PF 1.0

VVC : Volt-var 制御 (提案手法適用)

PF : 力率一定制御

表 5-3 各種シミュレーション条件

シミュレーション時間刻み		10s
SVR	1 タップあたりの電圧調整幅	100V
	タップ段数	9 段
	電圧不感帯幅 (90Ry 整定)	6600V ± 1.5%
	動作時限 (90Ry 整定)	60%・s
	%R, %X (LDC 整定)	%R = 16.7% %X = 23.3% (10MVA 基準)
配電線	幹線亘長	7.73km
	分岐線亘長	14.8km
	需要家軒数	1106 軒

5.2 タップ動作最多日における時系列結果比較

電圧変動および SVR タップ切換の発生が顕著な条件日のピックアップのため、高圧 PV 導入比率 80%、SVR のみによる電圧調整 (CASE 0) において、5.1 項 (2) の実測データ 1 年間の各日付で、1 日あたりのタップ切換回数順の結果を図 5-2 と表 5-4 に示す。1 日間の最多切換回数は 58 回、365 日間の総切換回数は 4280 回であった。日間のタップ切換回数が 25 回以上 (タップ切換器の機器寿命目安：切換動作上限回数約

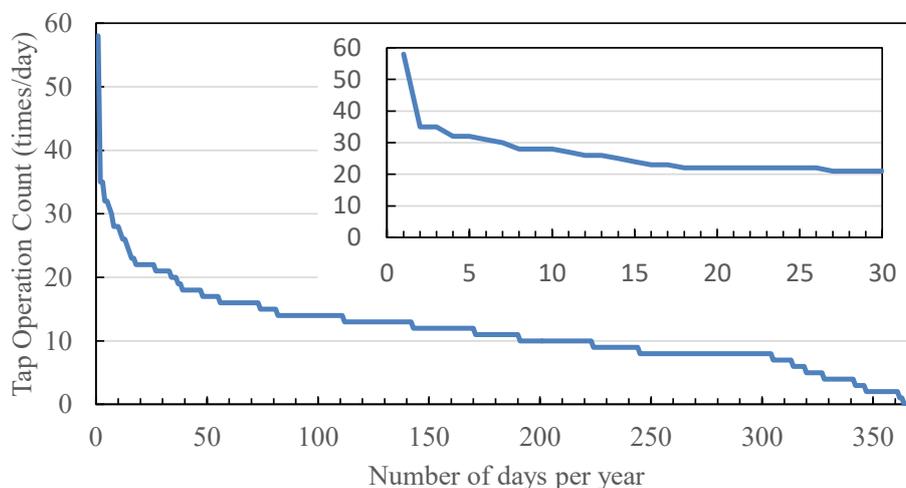


図 5-2 1 日当たりタップ動作回数のデュレーション (年間比較)

表 5-4 タップ動作回数の上位ピックアップ日

順位	日付	タップ動作回数	順位	日付	タップ動作回数
1	2007/02/15	58	9	2007/05/28	28
2	2007/01/04	35	10	2007/07/16	28
3	2007/09/05	35	11	2007/08/14	27
4	2007/03/12	32	12	2007/06/01	26
5	2007/11/22	32	13	2007/10/12	26
6	2007/11/26	31	14	2007/09/16	25
7	2007/08/12	30	15	2007/02/01	24
8	2007/03/20	28			

20万回を考慮^[37])を目安に、上位15日分の変動データを対象として、以降詳細比較していく。

表5-3にてタップ切換回数が最多であった2月15日について、CASE0～CASE4の各ケースの時系列計算結果を図5-3～図5-11に示す。図5-3は配電線内の全PVインバータの有効電力合計出力(kW)で、各ケースとも出力抑制がなく同様の波形である。図5-4と図5-5は高圧ノードの電圧変動、図5-6と図5-7はPVインバータの無効電力合計出力(kvar)およびその積算値(Mvar·h)、図5-8と図5-9はSVRのLDC電圧値およびタップ位置、図5-10と図5-11は配電線損失(kW)とその積算値(kW·h)である。図5-4、図5-6、図5-8、図5-10は、高圧PV80% (高圧PV比率が多いケース)、図5-5、図5-7、図5-9、図5-11は、高圧PV25% (低圧PV比率が多いケース)の導入比率条件の結果で、それぞれ上から(I)CASE0, (II)CASE1, (III)CASE2, (IV)CASE3, (V)CASE4の順となっている。時系列グラフ図番号の一覧を表5-5にまとめる。

表5-5 時系列結果グラフ図番号一覧

時系列結果項目	高圧PV80%, 低圧PV20% (高圧PV比率が多いケース)	高圧PV25%, 低圧PV75% (低圧PV比率が多いケース)
電圧変動 (高圧各ノード値)	図5-4	図5-5
無効電力出力	図5-6	図5-7
SVRタップ位置 LDC電圧	図5-8	図5-9
配電損失	図5-10	図5-11
Volt-var曲線 更新結果	図5-12	図5-13

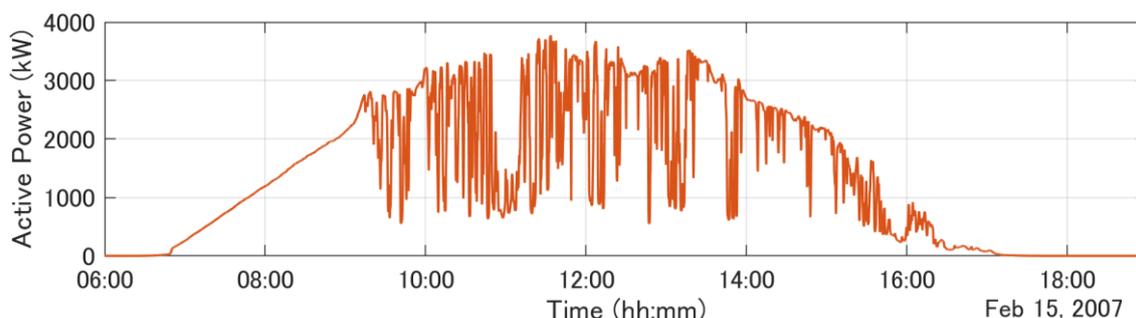


図5-3 タップ動作回数最多日のPV発電出力時系列データ

電圧変動時系列結果の図 5-4 および図 5-5 一段目の CASE 0 では、ともに PCS からの無効電力出力がゼロ（無効電力時系列結果 図 5-6 および図 5-7 の一段目 CASE 0）であるため、日中の PV 出力変動に伴う高頻度の電圧変動が確認できる。そして、SVR のタップ切り換えも日中の電圧変動時間帯で昇降圧動作を繰り返している（SVR 動作時系列結果図 5-8 および図 5-9 の一段目 CASE 0）。ここで、電圧変動結果を示す図 5-4 および図 5-5 の (I) CASE 0 では、高低圧 PV の導入総量が同じであるのに、図 5-4（高圧 PV 比率 80%）の電圧変動が図 5-5（高圧 PV 比率 25%）よりも大きくなっている。これは PV の導入分布によるもので、図 5-5 の低圧 PV の導入割合が多い分散配置に近い条件に対して、図 5-4 は高圧 PV メインの集中配置条件となっているためである。逆に、電圧変動結果時系列図 5-4 および図 5-5 の二段目以下 CASE 1～CASE 4 範囲にて無効電力制御が実施されているケース（図 5-6 および図 5-7 の CASE 1～CASE 4）では、低圧 PV よりも高圧 PV の無効電力制御効果が大きいため、図 5-4 の電圧変動が図 5-5 よりも抑制されている。このような高低圧 PV 導入条件による違いがあるものの、CASE 1～CASE 4 では、いずれも図中赤点線で目安として示している電圧基準 $6600 \pm 300V$ の範囲内に収まっている。このように、すべてのケースで電圧変動が基準範囲内に収まっている前提で、以降は CASE 1～CASE 4 間に存在する無効電力出力の大きさ（図 5-6 と図 5-7 の CASE 1～CASE 4）と SVR タップ切回数（図 5-8 と図 5-9 の CASE 1～CASE 4）の双方の変化を比較していく。

無効電力時系列結果の高圧 PV 比率 80%条件である図 5-6 では、CASE 1 > CASE 2 > CASE 3 > CASE 4 の順に PCS からの無効電力出力量が大きく、高圧 PV への力率一定制御適用ケース (CASE 1 と CASE 2) よりも Volt-var 制御適用ケース (CASE 3 と CASE 4) の方が無効電力出力量が削減されている。CASE 1 と CASE 2 の力率一定制御適用ケースでは、PV の有効発電出力に比例した無効電力を継続的に出力し続けているため、無効電力出力積算量が増えやすい傾向となっている。また、図 5-8 の SVR 動作時系列結果をみると、CASE 1 と CASE 2 では無効電力出力による電圧変動抑制が先行して日中の SVR 切換え動作が発生していなかったものが、CASE 3 と CASE 4 では数回のタップ動作と先述の Volt-var 制御手法による無効電力出力減少が確認できる。

無効電力時系列結果の高圧 PV 比率 25%条件である図 5-7 では、無効電力出力量が CASE 1 > CASE 3 > CASE 2 > CASE 4 の順となっている。CASE 3 では、高圧 PV へ Volt-var 制御を適用しているが、合計の無効電力出力量が他ケースよりも大きい。これは、PV 導入比率が低圧 PV > 高圧 PV の条件であるため、低圧 PV からの力率一定制御による無効電力出力が他ケースよりも大きくなる影響のためである。同様に高圧 PV 導入容量が少ない理由から、高圧 PV から出力できる無効電力調整能力が低いことが影響し、SVR 動作結果の図 5-9(高圧 PV 比率 25%)の CASE 2 と CASE 4 では、図 5-8(高

圧 PV 比率 80%)よりも SVR タップ動作回数の減少効果が小さくなっている。図 5-10 と図 5-11 に示す配電損失積算値については、いずれのケースも無効電力量の結果（図 5-6 と図 5-7）と大小傾向が一致している。

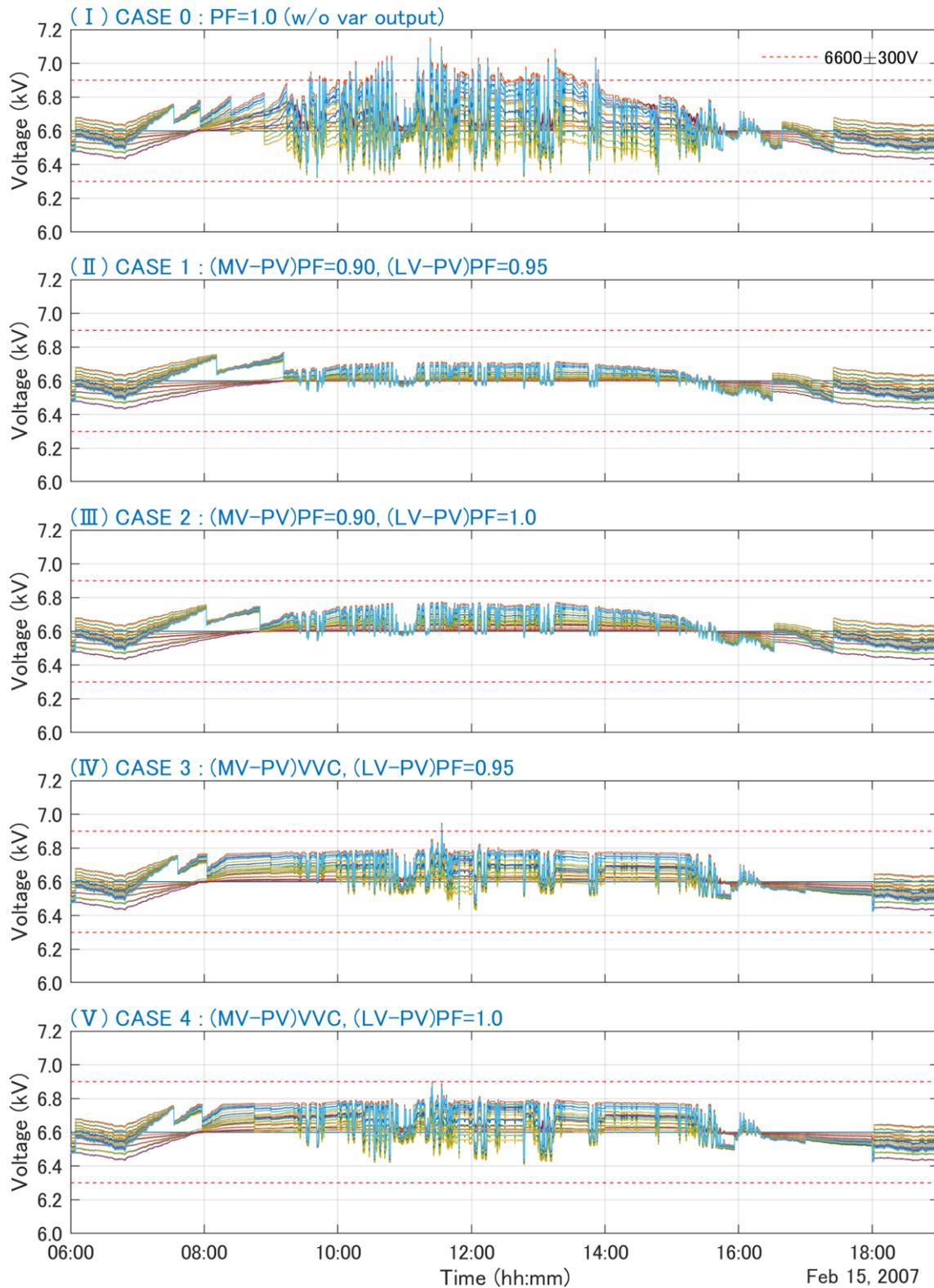


図 5-4 電圧変動の時系列結果 (高压 PV 導入比率 80%)

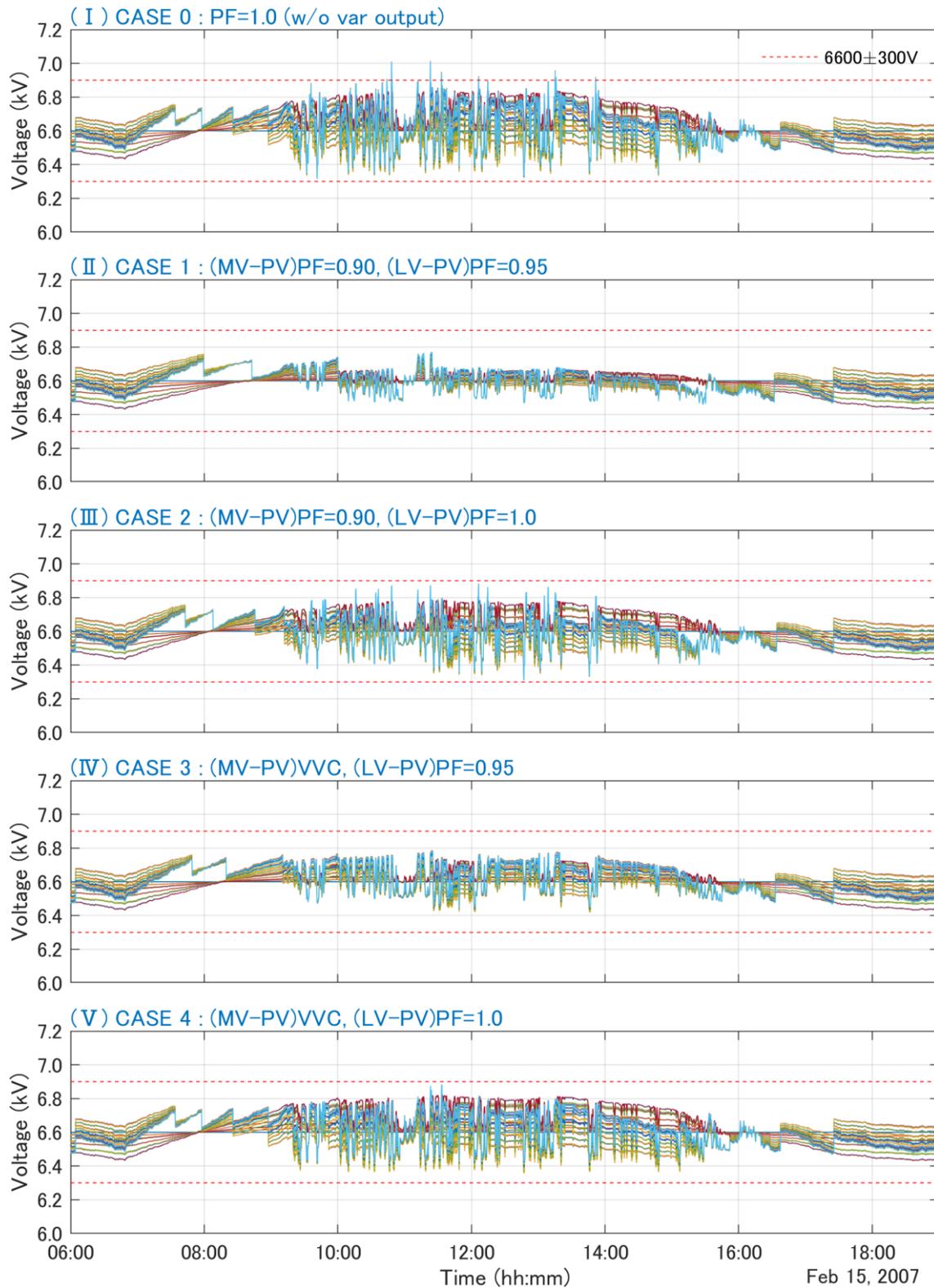


図 5-5 電圧変動の時系列結果 (高压 PV 導入比率 25%)

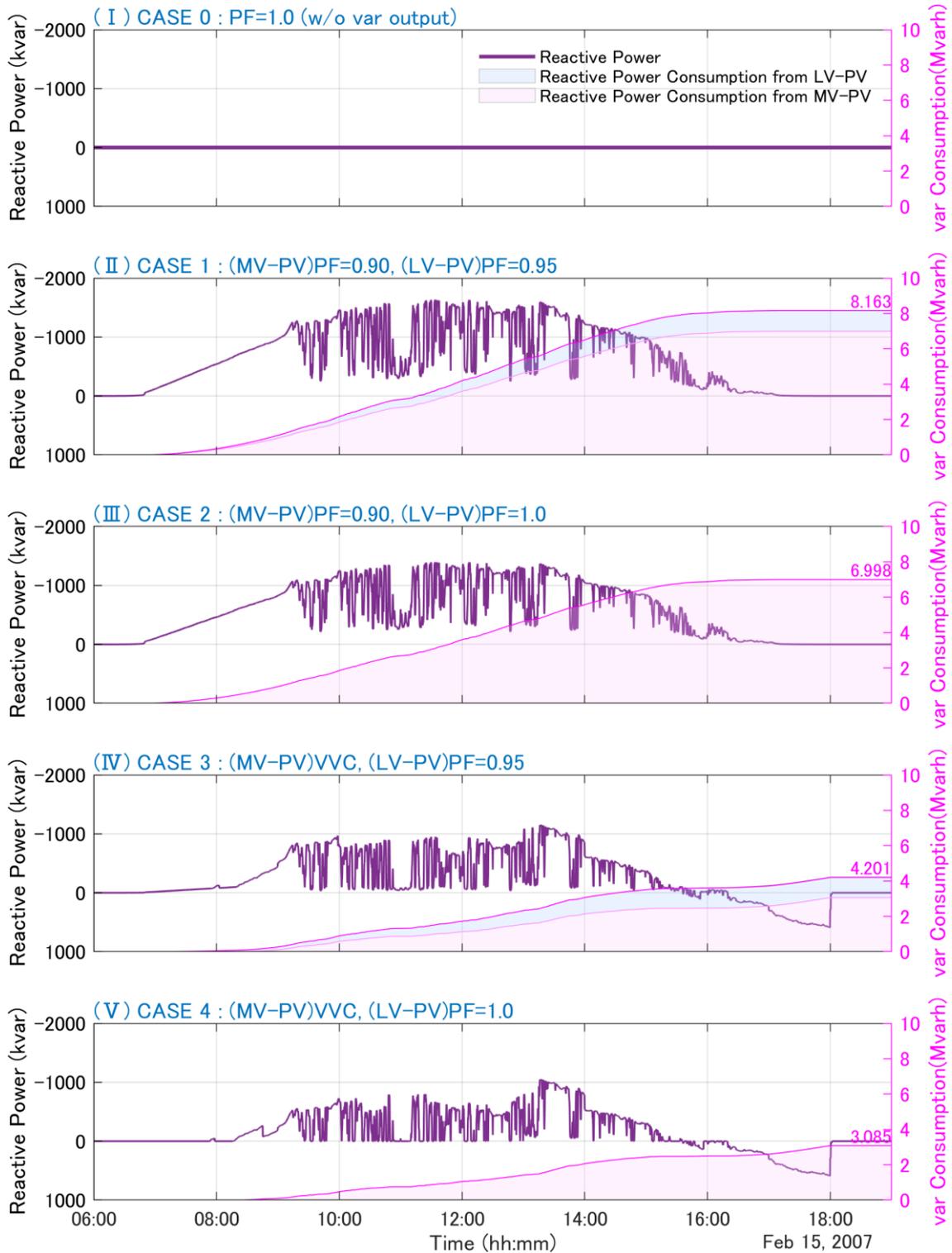


図 5-6 無効電力出力の時系列結果 (高圧 PV 導入比率 80%)

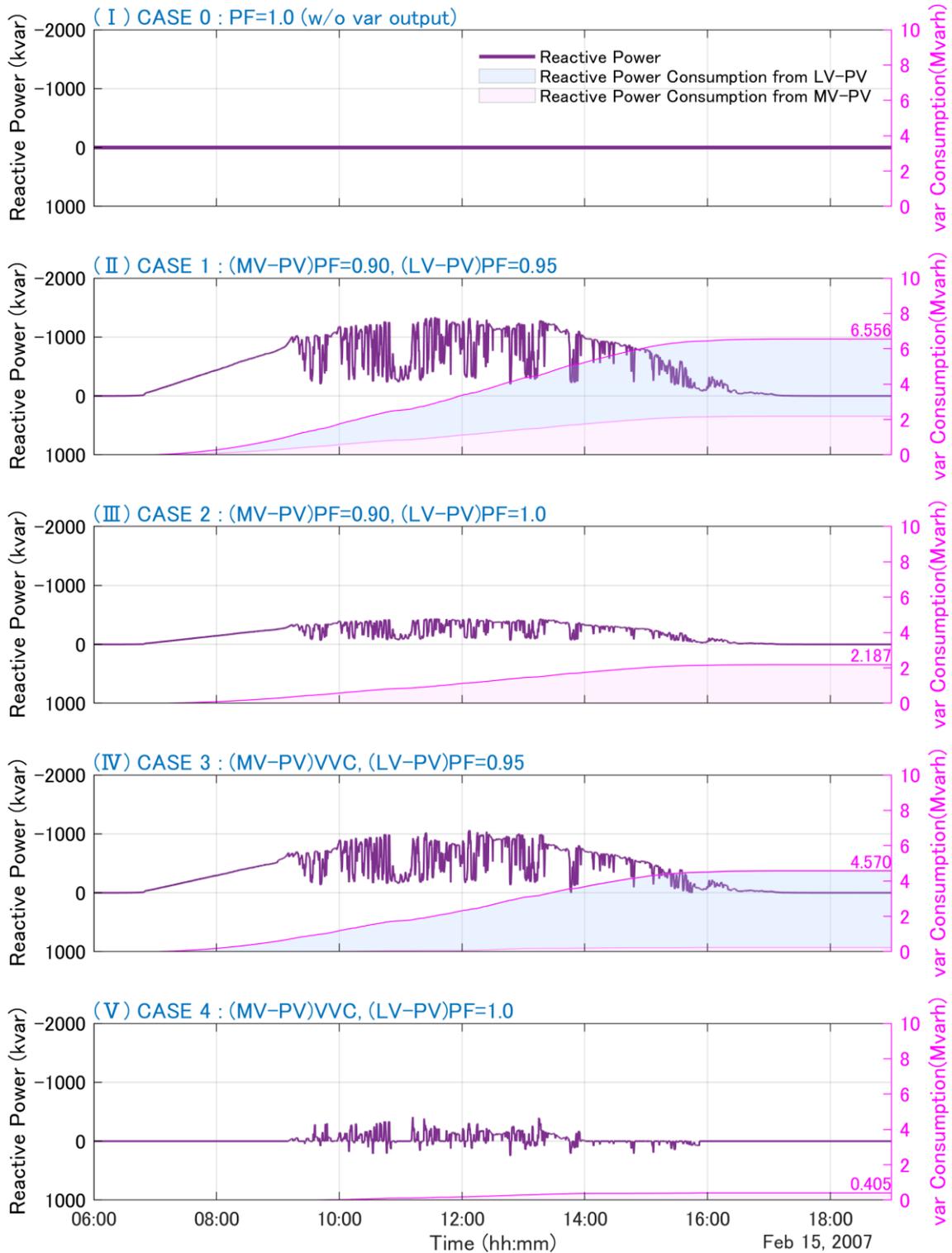


図 5-7 無効電力出力の時系列結果 (高圧 PV 導入比率 25%)

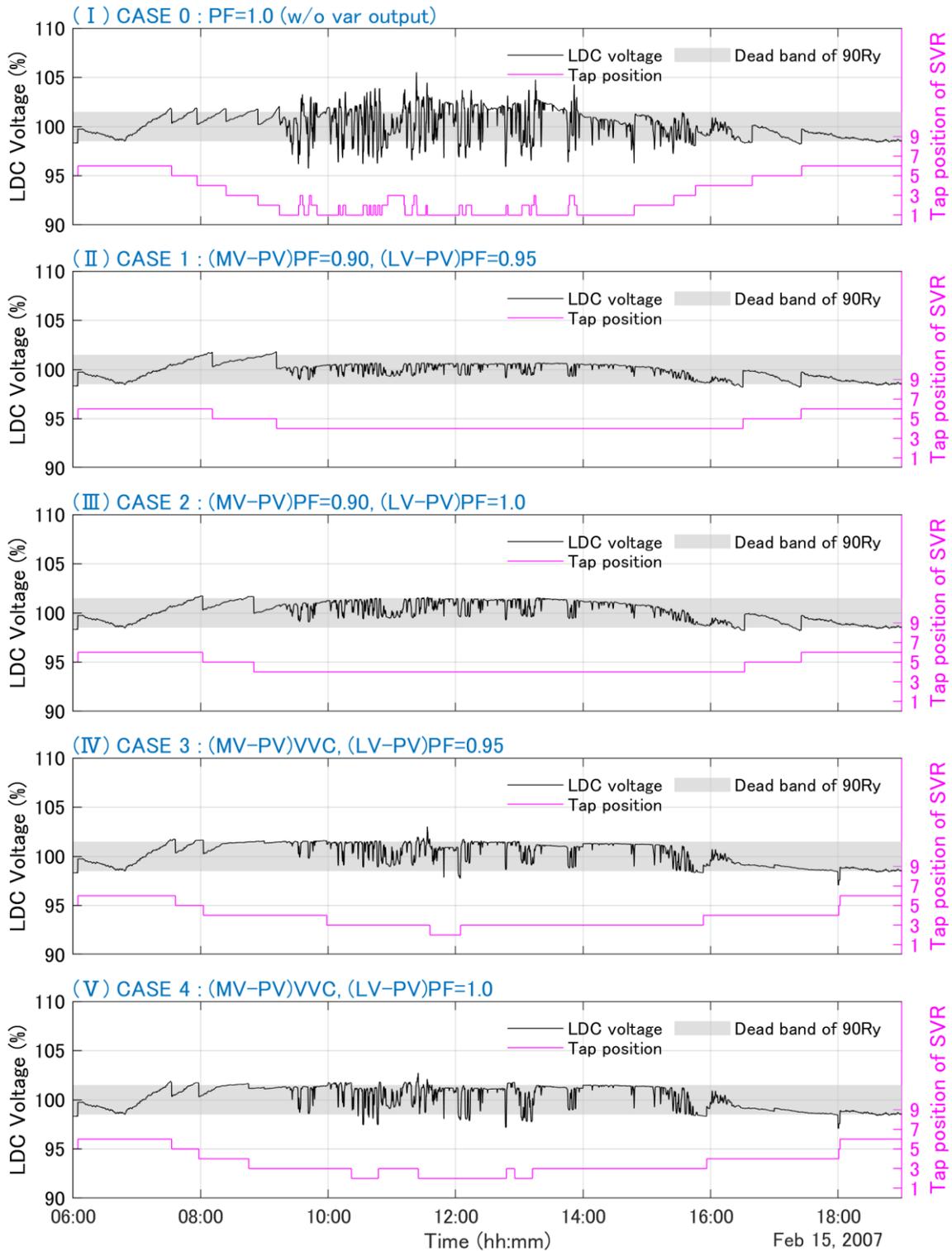


図 5-8 SVR タップ動作と LDC 電圧値の時系列結果 (高圧 PV 導入比率 80%)

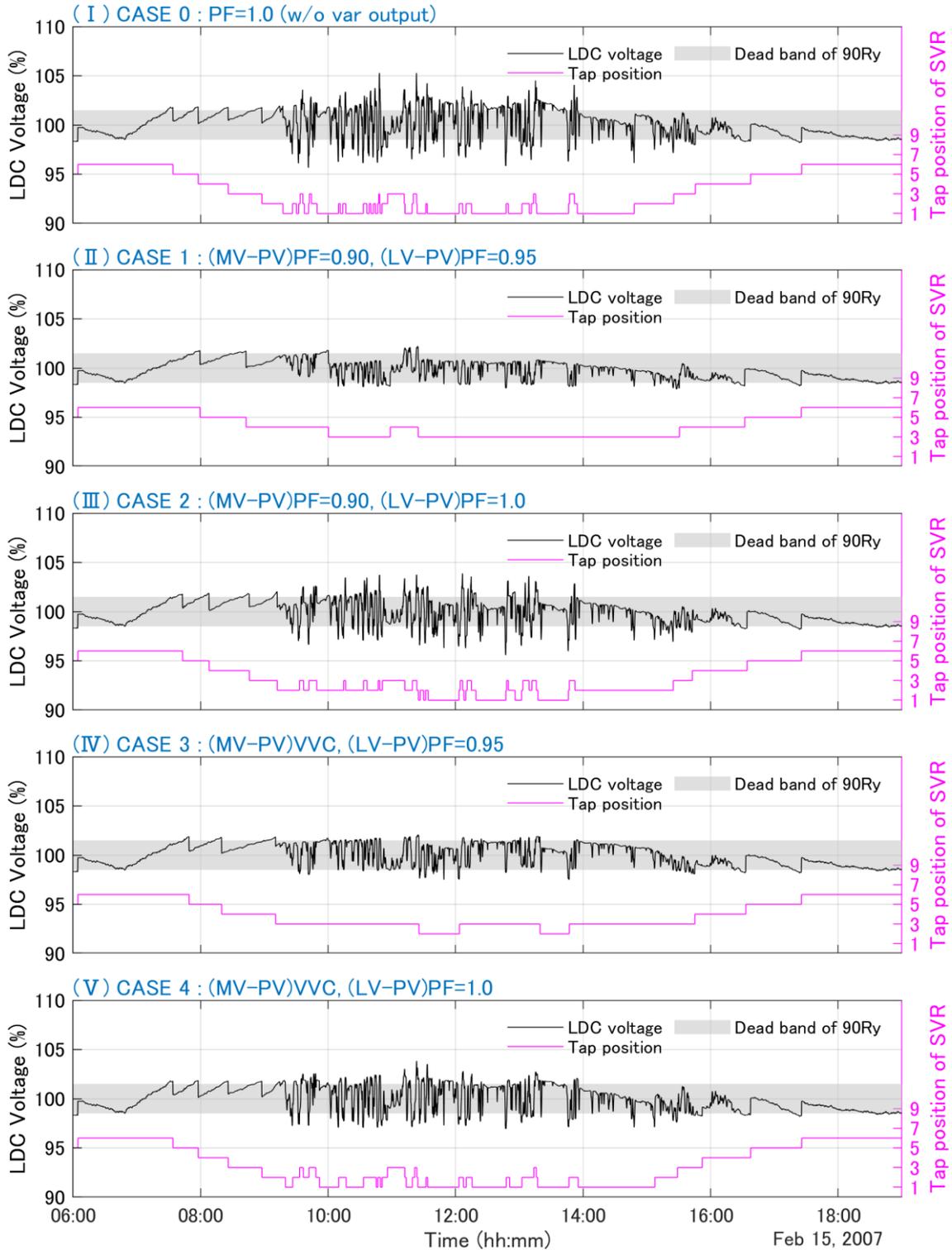


図 5-9 SVR タップ動作と LDC 電圧値の時系列結果 (高圧 PV 導入比率 25%)

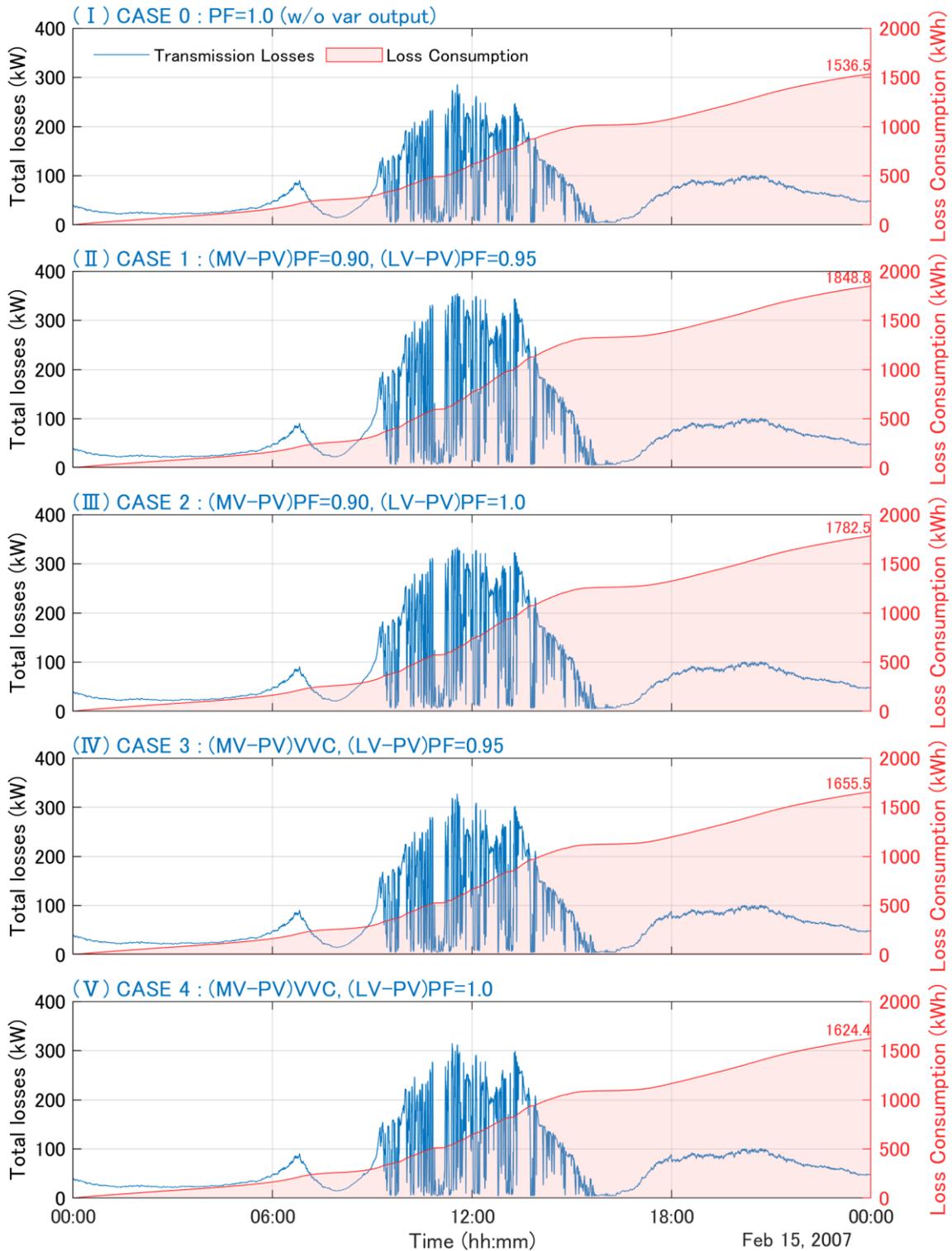


図 5-10 配電損失の時系列結果 (高圧 PV 導入比率 80%)

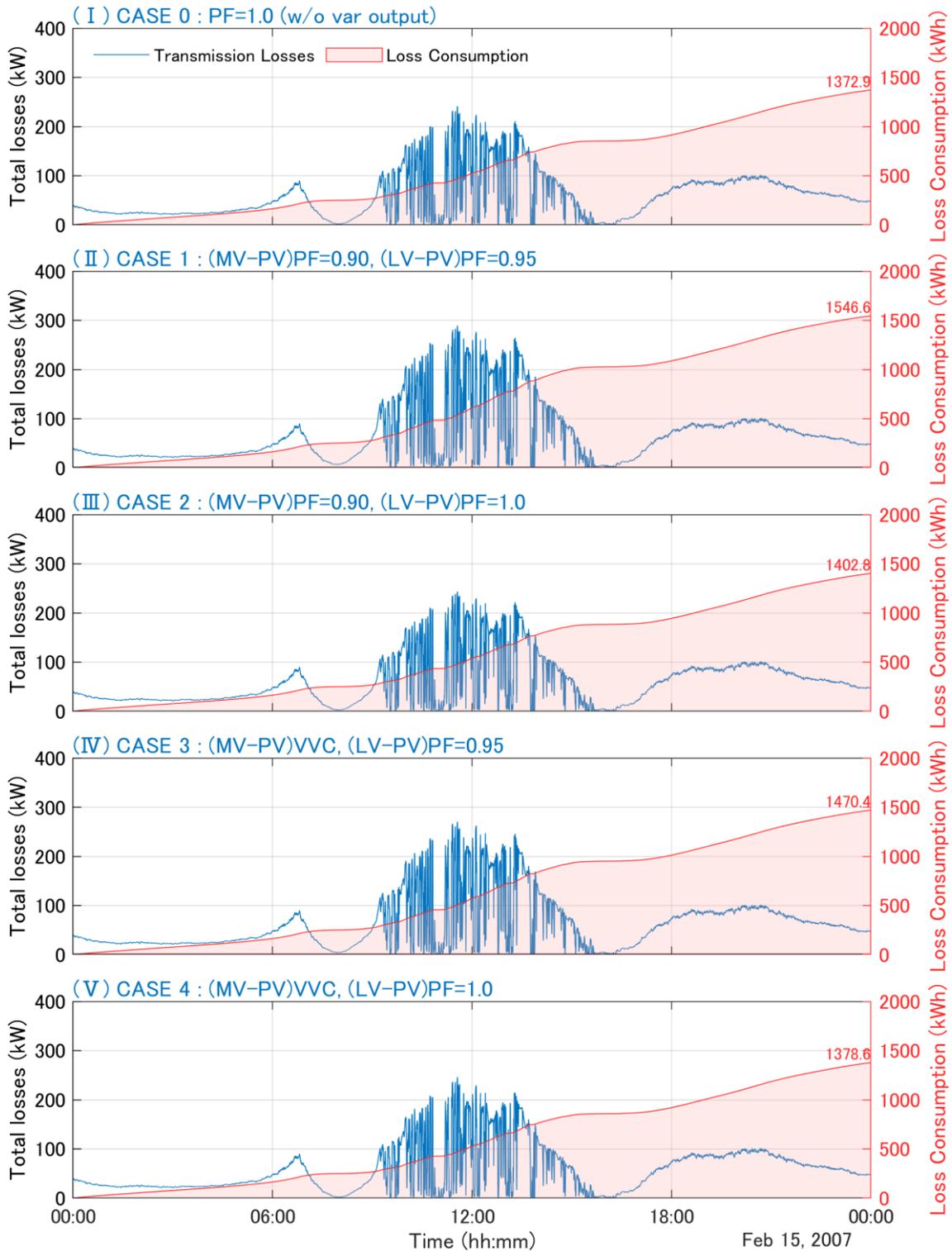


図 5-11 配電損失の時系列結果 (高压 PV 導入比率 25%)

以上の結果から、CASE 1～CASE 4 の無効電力出力と SVR タップ切換動作との間には、次の傾向が確認できる。

- (1) CASE 1 および CASE 2 の力率一定制御ケースでは、無効電力出力による電圧変動抑制が先行して、タップ切換による電圧調整が働かない場合が存在する。
- (2) CASE 3 および CASE 4 の Volt-var 制御では、上記(1)と比較して、日中動作していなかった SVR タップ切換が発生しつつ無効電力出力量が減少している。
- (3) 高圧よりも低圧 PV 導入比率が大きく占める場合では、CASE 4 のような高圧 PV のみによる Volt-var 制御の電圧調整能力が限定されるため、タップ動作回数が増加する。

このように、Volt-var 制御提案手法では、無効電力出力量を抑えられる効果が期待できるが、SVR タップ回数の増加を伴う。このようなタップ切換回数増加は、SVR の機器寿命を最優先としてタップ切換回数のみ最小化を考えると望ましくないが、SVR 機器寿命に影響のない範囲（図 5-2 のように年間を通じた PV 出力変動によるタップ回数の顕著日は限られているため、約 20 万回という SVR 機器仕様上限^[37]に到達するまでの時間軸期間を考慮した影響）であれば、PCS の無効電力出力量を削減できる効果が見込め、結果として、SVR の電圧調整能力の最大限活用につながると思われる。

加えて図 5-12 と図 5-13 には、 $T_s=3600s$ 毎に逐次更新される Volt-var 曲線不感帯設定の変化傾向について、Volt-var 制御提案手法を適用した CASE 4 の結果を示す。各高圧 PV 別のグラフで、連系点電圧を黒色、Volt-var 曲線の不感帯領域を灰色、不感帯の下限側を青色、上限側を赤色で表示している。連系点電圧値が不感帯領域を越えて上昇または降下したときに無効電力が出力される制御動作となる。図 5-12 高圧 PV80% よりも図 5-13 高圧 PV25%の導入比率のほうが、不感帯領域が狭くなる時間帯があるが、これは図 5-13 の少ない高圧 PV 導入量の限られた容量から、不感帯をより狭くしないと無効電力調整力を得られないためである。また、末端の PV3 よりも PV2 の不感帯が狭いのは、PV3 の定格容量が PV1 および PV2 の 2 倍と差があることと、末端の PV3 よりも SVR に近い PV2 から無効電力を出力することで、より少ない配電線損失で SVR の LDC 電圧を不感帯内に留めて不要なタップ動作を抑えようとしていることが影響している。

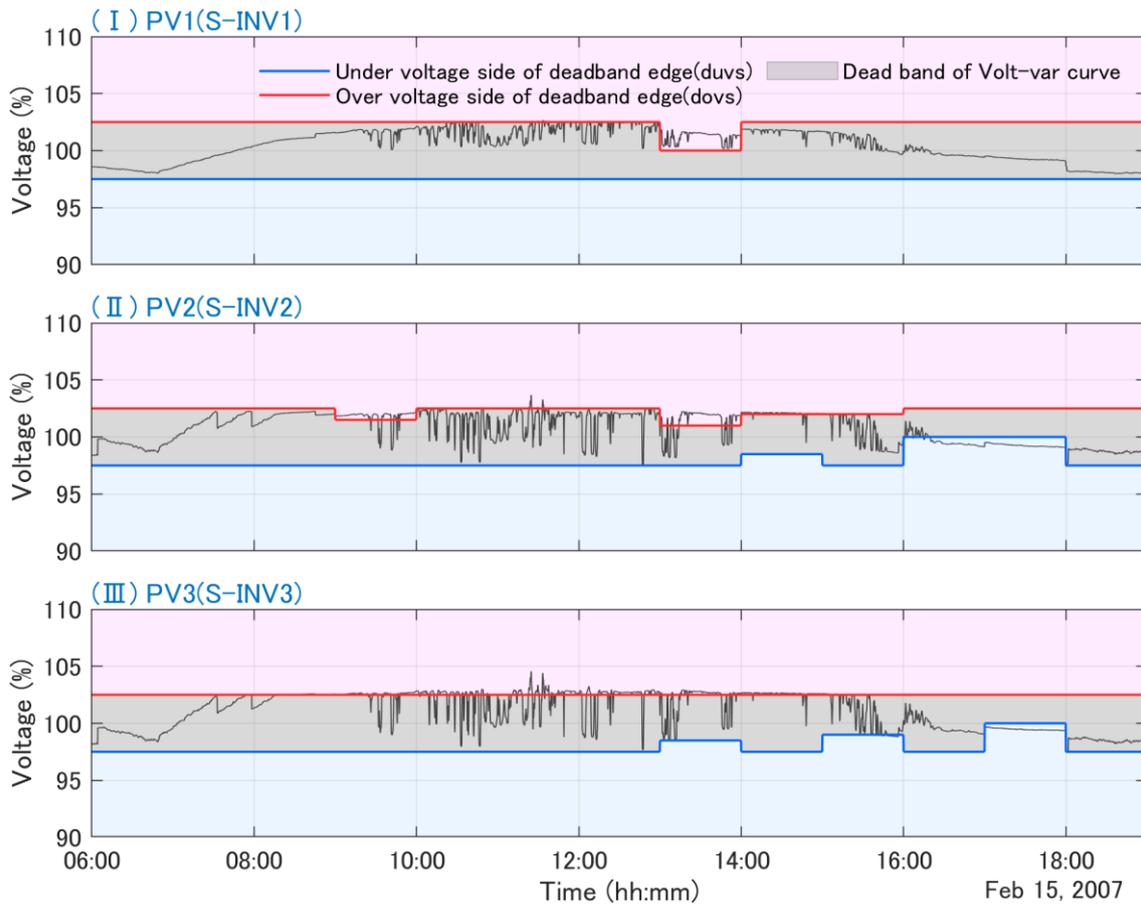


図 5-12 Volt-var 曲線不感帯の更新結果 (高圧 PV 導入比率 80%)

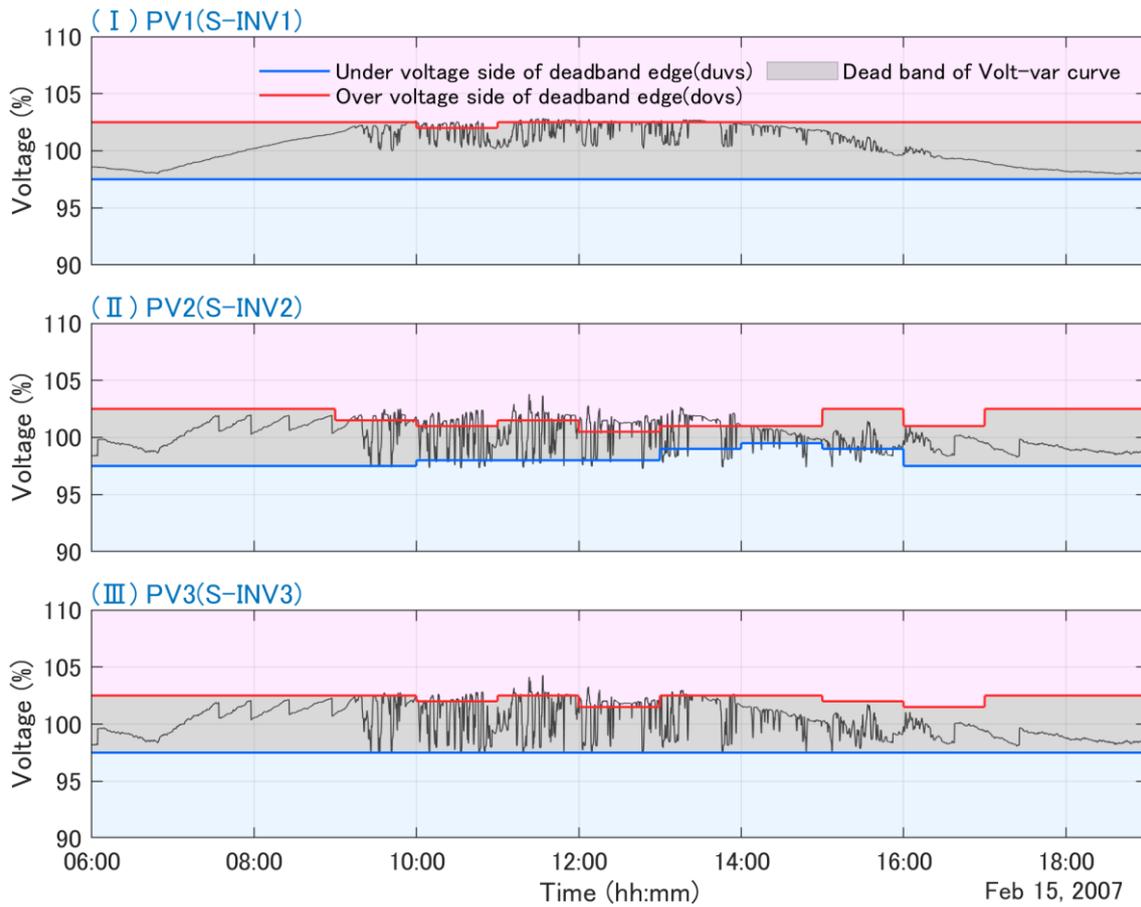


図 5-13 Volt-var 曲線不感帯の更新結果 (高圧 PV 導入比率 25%)

5.3 各ケース間の比較

5.2 節の図 5-4～図 5-11 では代表日の時系列結果を示していたのに対し、ここでは、ピックアップ対象日付の 15 日間すべてについて、SVR タップ切換回数および無効電力出力量、配電損失量の総和を算出し、高低圧 PV 導入比率別に CASE 1～CASE 4 を比較し、提案 Volt-var 制御の適用効果を確認する。図 5-14 の SVR 動作の削減回数 $\Delta C_{TAP}^{CASE i}$ と図 5-15 の損失の増加量 $\Delta W_{LOSS}^{CASE i}$ (kW·h) は、(5.1)式と(5.2)式で算出しており、比較を目的に CASE 0 (SVR のみによる電圧調整、無効電力制御なし) を基準とした差分値で示している。図 5-16 は、(5.3)式の無効電力出力の積算値 $\Delta W_{var}^{CASE i}$ (Mvar·h) で、CASE 0 の無効電力はゼロのため直接の値として示す。

$$\Delta C_{TAP}^{CASE i} = C_{TAP}^{CASE 0} - C_{TAP}^{CASE i}$$

$$C_{TAP}^{CASE i} = \sum_t |n_{TAP}^{CASE i}(t) - n_{TAP}^{CASE i}(t-1)| \dots\dots\dots (5.1)$$

$$\Delta W_{LOSS}^{CASE i} = W_{LOSS}^{CASE i} - W_{LOSS}^{CASE 0}$$

$$W_{LOSS}^{CASE i} = \sum_t P_{LOSS}^{CASE i}(t) / 3600 \dots\dots\dots (5.2)$$

$$\Delta W_{var}^{CASE i} = W_{var}^{CASE i} \quad (W_{var}^{CASE 0} = 0)$$

$$W_{var}^{CASE i} = \sum_t Q_{inv}^{CASE i}(t) / 3600 \dots\dots\dots (5.3)$$

ここで、 i : CASE 番号、 $C_{TAP}^{CASE i}$: CASE i のタップ動作総回数、 $n_{TAP}^{CASE i}(t)$: CASE i , 時刻 t のタップ位置、 $W_{LOSS}^{CASE i}$: CASE i の合計損失電力量(W·h)、 $P_{LOSS}^{CASE i}(t)$: CASE i , 時刻 t の配電損失(W)、 $W_{var}^{CASE i}$: CASE i のインバータ無効電力量 (var·h)、 $Q_{inv}^{CASE i}(t)$: CASE i , 時刻 t のインバータ無効電力出力(var)である。

図 5-14 ~ 図 5-16 より、横軸の高圧 PV 導入割合 75%までの場合では、CASE 1 > CASE 2 > CASE 3 > CASE 4 の並び順で(a)~(c)の各値の大小が同様の傾向にある。CASE 1 (高低圧 PV 両方への力率一定制御ケース) から CASE 4 (高圧 PV のみ Volt-var 制御適用ケース) に移ると、SVR 動作回数は増えるが無効電力量と損失増加は大きく削減できる傾向が 5.2 項の時系列結果と同様に確認できる。高圧 PV 比率が 50%、25%の範囲になると、CASE 3 (高圧 PV : Volt-var 制御, 低圧 PV : 力率 95%) のみタップ回数, 損失電力, 無効電力量それぞれが悪化している。これは、低圧連系 PV が大半である PV 導入条件が影響しており、低圧よりも少ない高圧 PV で限られた PCS 容量で Volt-var 制御効果が薄れているのに対して、導入量の多い低圧 PV からは力率 95%制御による無効電力が多く出力されているためである。

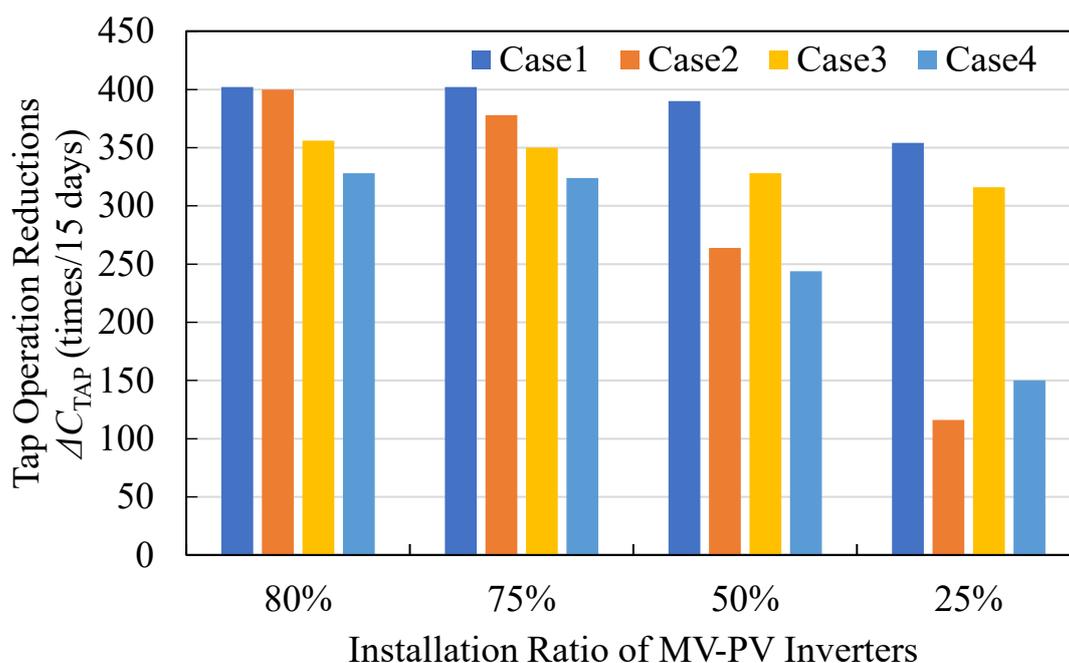


図 5-14 評価対象期間の合計 SVR タップ削減回数 (CASE 0 に対する増加)

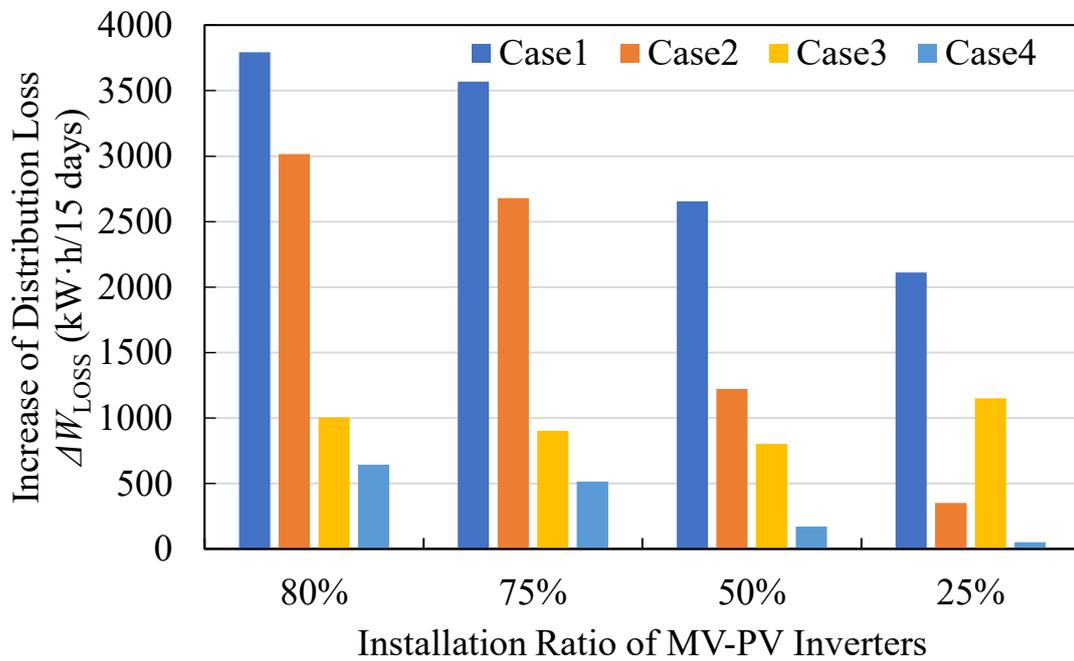


図 5-15 評価対象期間の合計配電損失増加量 (CASE 0 に対する増加)

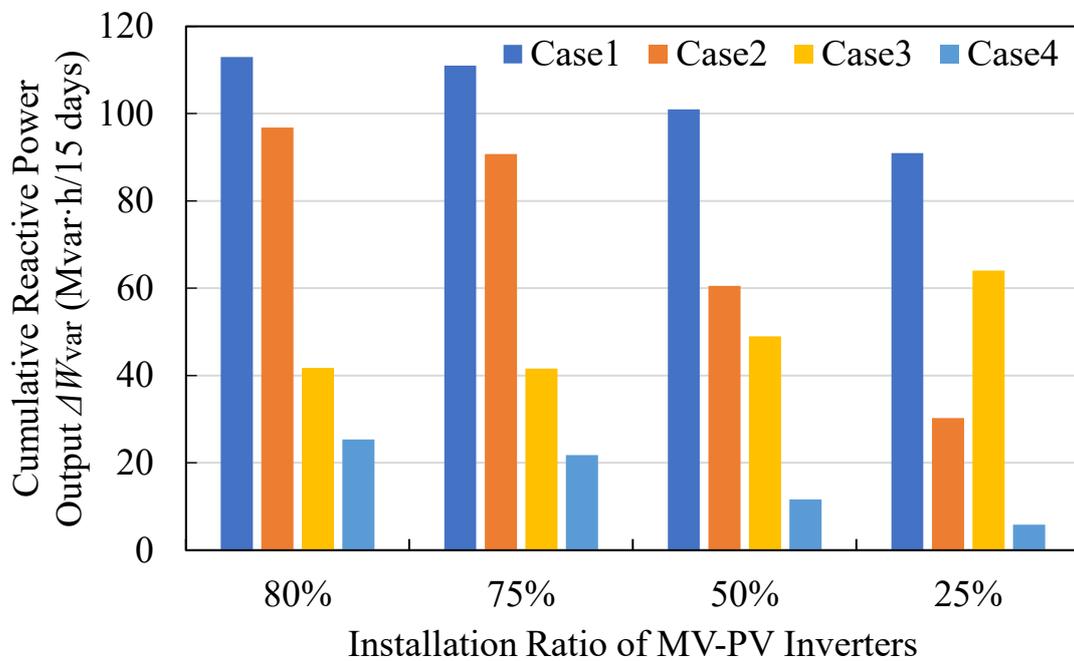


図 5-16 評価対象期間の合計無効電力出力量

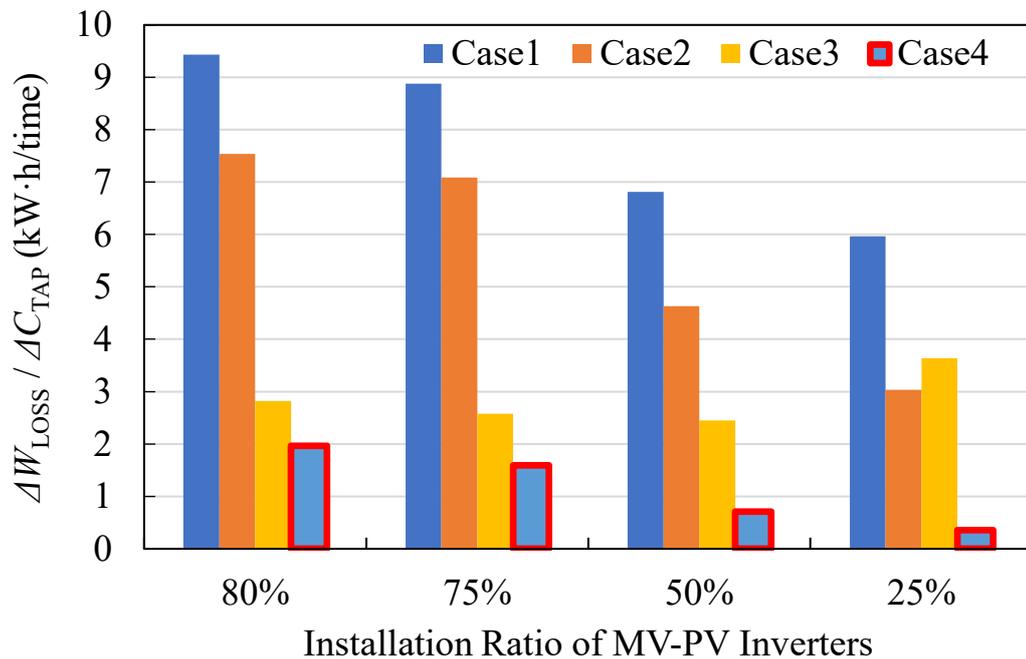


図 5-17 各ケースの電圧制御効果比較

図 5-17 では、各検討ケースで提案する Volt-var 曲線決定手法の効果が表れているのかを確認するため、提案手法以外の力率一定制御ケースも含めたすべてのケースについて、無効電力による損失増加と SVR タップ動作回数の変化を定量的に比較している。図 5-14～図 5-16 の評価対象全 15 日間の結果値を用いて $\Delta W_{\text{LOSS}}^{\text{CASE } i} / \Delta C_{\text{TAP}}^{\text{CASE } i}$ (= 損失増加/タップ動作削減回数) を縦軸値としており、この評価値が小さいほど、タップ動作による損失低減効果が大きく表れていることを意味する。評価値が最も大きい CASE 1 (力率一定制御適用ケース) では、タップ削減回数が各ケースの中で最大 (図 5-14) である反面、損失電力量と無効電力出力量も最大 (図 5-15 と図 5-16) であり、このタップ削減効果よりも無効電力出力量に伴う損失増加の影響のほうが大きい。対して CASE 4 (Volt-var 制御提案手法適用ケース) では、CASE 1~3 と比較して、1 回のタップ動作を削減するための損失増加が最小となっている。いずれの高圧 PV 導入割合についても CASE 4 の値が小さい結果となっており、提案 Volt-var 制御適用ケースの効果が確認できる。

第6章 結論

6.1 本研究の成果

本研究では、再生可能エネルギーの主力電源化に向けて PV の導入拡大が継続して進むことで生じる配電系統の電圧上昇・変動課題への対策として、従来電圧調整手段である SVR のタップ切換制御に加えて、PV 用 PCS の無効電力出力を通信機能を介して柔軟に調整できるスマートインバータによる Volt-var 制御の適用方法を検討した(第1章および第2章)。そして、SVR タップ切換制御と Volt-var 制御の双方が互いの動作に影響することを考慮した Volt-var 曲線パラメータ決定手法を提案した(第3章)。この提案手法は、特に PV の短時間かつ高頻度な出力変動により発生が顕著となる電圧変動と、これに起因して生じ得る SVR の繰り返し動作回数の増加を効果的に抑制することを特徴としている。具体的には、Volt-var 制御による無効電力量と SVR タップ切換回数の関係に対応づけた曲線設定の最適判断指標として、Volt-var 制御の電圧感度を高める(=不感帯幅を狭める)ことによる【(損失増加分)/(タップ切換削減回数)】を数値化する。潮流計算により、Volt-var 制御の無効電力制御感度を変更した際、すなわち Volt-var 曲線の不感帯を変更したときの、無効電力出力変化に伴う損失増加とタップ動作回数を推定し、1回あたりのタップ切換動作削減とともに生じる損失増加分を最小化する Volt-var 曲線を最適パラメータとして決定している。

第4章では、提案する Volt-var 制御の曲線決定手法の確立と基本動作としての有効性確認のため、PV スマートインバータと SVR が導入される基礎的な配電線モデル上で、Volt-var 提案手法を適用した際の動作を検証した。提案の SVR の繰り返し動作を抑制する Volt-var 曲線設定の逐次更新手法に対して、力率一定制御などのその他電圧制御運用ケースを比較することで、提案手法の有効性を確認した。その結果、現在適用されている力率一定制御ならびに Volt-var 制御の固定設定運用と比較して、Volt-var 曲線設定を逐次更新する提案手法においては、無効電力出力に伴う損失増を抑えつつ、より大きなタップ切換回数削減効果が得られることが確認できた。

第5章では、第4章にて高圧 PV のみ連系されていた検討条件に対して、実際の配

電線における電圧制御運用への Volt-var 制御提案手法の実現可能性を評価した。低圧需要家各軒の電力需要と PV 発電出力の計測実測データを反映した高圧および低圧 PV の両方が接続される詳細モデルを利用し、力率一定制御などのその他電圧制御運用ケースと、高圧 PV と低圧 PV の導入割合が異なる複数ケースの両面で詳細な数値計算比較を行った。配電線モデルは、電圧変動が特に顕著である農山村地区モデルを利用しており、低圧データを直接取得できない不確実性の影響など、より実際の配電線運用に即した条件想定において提案手法の適用効果を確認した。その結果、PV 導入割合によって高圧 PV 全体で出力可能な無効電力最大値が制限されるケースがあるものの、提案 Volt-var 制御手法を用いることで、タップ切り換え動作による無効電力出力量および損失の低減に寄与できることがわかった。加えて、低圧 PV の力率一定制御を行わないケースにおいても、高圧 PV の Volt-var 制御を主体とすることで、適正電圧を確保できる優位性が確認できた。

6.2 提案 Volt-var 制御手法の実適用・事業性に関する展望

最後に、本研究で提案するスマートインバータによる Volt-var 制御手法の実適用および事業性に関する展望を述べる。

本研究の提案では、SVR のタップ切換制御とスマートインバータの Volt-var 制御の双方の電圧調整能力の活用を対象にしているが、前者の SVR は系統管理者である一般送配電事業者、後者は個別の需要家や発電事業者が管理維持運用する設備である。そのため、SVR のタップ切換制御は電力系統側で負担、スマートインバータの Volt-var 制御は需要家側で負担する電圧制御のために負担するコストになる。

従来から、電圧などの電気の品質維持は、系統管理者である一般送配電事業者の義務として、一貫して担うことがなされているが、今後、分散型電源が拡大していくことで想定されるスマートインバータの普及によって、需要家側から提供可能な電圧調整能力が拡大する。

スマートインバータは、直流と交流の有効電力を変換する主機能に加えて、監視制御機能と系統サポート機能を具備するため、電力変換の主機能はそのままに、余力の範囲で、電圧維持に貢献することができる。これに対して、系統管理者が電圧変動対策のために導入する SVR は、電圧制御のみの用途で設置されるため、コストが高くなりやすいという側面を持つ。

以上のように、PV の導入が進むことで拡大する電圧変動を、系統管理者のみの負担

で抑制し適正電圧範囲を維持しようとするすると、必要な対策コストの増大につながる。そこで、本研究で提案するスマートインバータの Volt-var 制御のような需要家側負担の電圧調整を柔軟に組み合わせ、系統側と需要家側で負担を配分することで、トータルで見たコストを少なくする方向にすることが期待できる。イメージを図 6-1 に示す。このような社会的コストの合理性を踏まえると、系統管理者が負担する設備コストの削減目的だけでなく、需要家や発電事業者が提供する電圧制御能力に価値が付加され、PV をはじめとする分散型電源からの系統調整能力提供へ参画する機会の促進に貢献すると考える。

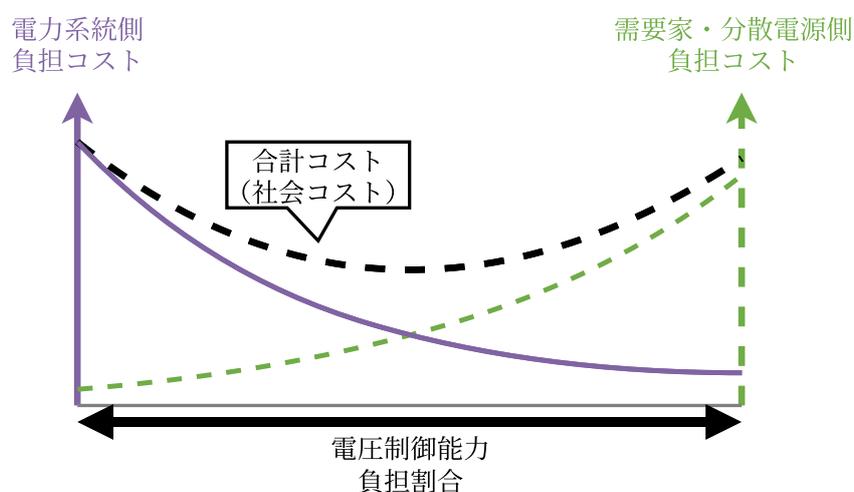


図 6-1 系統側と需要家側の電圧制御負担コストイメージ

6.3 今後の課題

本研究では、配電線に接続される PV 導入容量が今後も継続して増加していくことで、より顕著となることが想定される電圧変動課題に対し、オンラインで監視と制御が可能な双方向通信機能を備える高圧連系 PV 用スマートインバータを活用し、無効電力出力に伴う損失増加と SVR 動作回数増加の双方を抑制する Volt-var 制御の曲線更新手法を提案した。提案手法の適用範囲として、SVR 2 次側のタップ動作による電圧調整範囲内に制御可能なスマートインバータが位置していることを対象に検討した。提案手法の有効性評価のための数値計算では、SVR とスマートインバータの両方が同一の配電線に存在する単一フィーダでの評価を実施したが、複数フィーダにおける配電用変圧器のタップ動作の推定を加えるといった手法の拡張や、タップ切換の遠隔制

御が可能になった状況での制御等，提案手法の更なる高度化が考えられる。また，提案手法では，大きな電圧調整力が期待できる大容量のメガソーラー規模の PV を対象とすることで，スマートインバータの制御管理台数を少なく抑える実用性を考慮した Volt-var 制御を検討したが，スマートインバータが多数台に及ぶ場合について，本提案手法の適用範囲拡張による計算負荷増加が課題としてあげられる。加えて，本研究の数値計算による検討では，提案手法で用いるオンライン計測値など入力データに含まれる誤差や欠測が考慮されていない条件であるため，実際には，提案手法内部の潮流計算で推定している配電損失やタップ動作回数の推定結果のズレの恐れがある。そのため，不確実な入力データやパラメータに対する値の補正や，状態推定計算を組み合わせによって，信頼性向上の可能性が見込める。

このような，数値シミュレーション上では影響の把握が困難な課題が存在する中で，提案手法の実現性を明確にするためには，制御サーバー，通信システム，およびスマートインバータ実機を活用した検証を行うことが，最終的に本手法が実用可能であることを結論付けるために必要とされると考える。

文献

- [1] 経済産業省：「第6次エネルギー基本計画」(2021)
https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/
- [2] 経済産業省 資源エネルギー庁：「2021-日本が抱えているエネルギー問題（前編）」(2022)
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energyissue2021_1.html
- [3] 経済産業省 資源エネルギー庁：「FIT・FIP制度」
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/surcharge.html
- [4] 経済産業省：第78回 調達価格等算定委員会 資料1「国内外の再生可能エネルギーの現状と今年度の調達価格等算定委員会の論点案」(2022)
<https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/078.html>
- [5] 太陽光発電協会(JPEA)：「2050年カーボンニュートラル実現に向けて～太陽光発電の最大限導入をめざして～」(2021)
<https://www.jpea.gr.jp/wp-content/uploads/t210329.pdf>
- [6] 地球環境産業技術研究機構(RITE)：「2050年カーボンニュートラルのシナリオ分析」(2021)
<https://www.rite.or.jp/system/latestanalysis/2021/06/2050carbonneutrality.html>
- [7] WWF ジャパン：「脱炭素社会に向けた2050年ゼロシナリオ」(2021)
<https://www.wwf.or.jp/activities/basicinfo/1576.html>
- [8] 日本電機工業会(JEMA)：「分散型電源とは」
<http://jema-net.or.jp/Japanese/res/dispersed/010.html>
- [9] 経済産業省 資源エネルギー庁：「送電線「空き容量ゼロ」は本当に「ゼロ」なのか？～再エネ大量導入に向けた取り組み」(2017)
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/akiyouryou.html>
- [10] International Energy Agency (IEA)：“World Energy Outlook 2018” (2018)
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>
- [11] International Energy Agency (IEA)：“System Integration of Renewables” (2018), NEDOによる日本語和訳版
https://www.nedo.go.jp/library/system_integration_of_renewables.html

- [12] 日本電気協会：「系統連系規程」， JEAC 9701-2019 (2019)
- [13] 前田 亮・福岡建志・吉岡康哉・原田 慈：「電力系統課題に対するスマートインバータへの期待」， 電学論 B, Vol.138, No.6, pp.412-415 (2018)
- [14] H. Kikusato, T. S. Ustun, J. Hashimoto, K. Otani, T. Nagakura, Y. Yoshioka, R. Maeda, and K. Mori : “Developing Power Hardware-in-the-Loop Based Testing Environment for Volt-Var and Frequency-Watt Functions of 500 kW Photovoltaic Smart Inverter”, IEEE Access, Vol.8, pp.224135-224144 (2020)
- [15] 山根啓介・織原 大・飯岡大輔・青砥由貴・橋本 潤・合田忠弘：「インバータごとの有効・無効電力の出力配分最適化を応用したスマートインバータの Volt-Var, Volt-Watt 曲線の決定手法」， 電学論 B, Vol.139, No.8, pp.513-521 (2019)
- [16] S. Yoshizawa, Y. Yanagiya, H. Ishii, Y. Hayashi, T. Matsuura, H. Hamada, and K. Mori : “Voltage-Sensitivity-Based Volt-VAR-Watt Settings of Smart Inverters for Mitigating Voltage Rise in Distribution Systems”, IEEE Open Access Journal of Power and Energy, Vol.8, pp.584-595 (2021)
- [17] 加藤亘輝・岩根佑治・大野聖汰・合田忠弘・雪田和人・松村年郎・後藤泰之：「スマートインバータに搭載される系統安定化制御機能の効果的な選定方式」， 令和 2 年電気学会全国大会， 6-194 (2020)
- [18] 國分海斗・飯岡大輔・玉井昌彦・小松貴彦・青砥由貴・織原 大・喜久里浩之・橋本 潤・合田忠弘・大谷謙仁：「スマートインバータの導入箇所に応じた制御機能の選択が電圧および周波数に与える影響の解析」， 電学論 B, Vol.141, No.5, pp.358-365 (2021)
- [19] 岩崎日なる・飯岡大輔・玉井昌彦・小松貴彦・織原大・喜久里浩之：「Frequency-Watt 特性が電力系統の周波数及び電圧に与える影響の評価」， 電力技術/電力系統技術合同研資, PE-21-109/PSE-21-122 (2021)
- [20] 玉井昌彦・小松貴彦・山根啓介・織原 大・飯岡大輔・青砥由貴・橋本潤・合田忠弘・大谷謙仁：「周波数変動を考慮した潮流計算によるスマートインバータの周波数・有効電力制御方式モデルの開発」， 電学論 B, Vol.139, No.2, pp.99-105 (2019)
- [21] 川島伸明・原 亮一・北 裕幸：「周波数・有効電力制御機能を有するスマートインバータ群の縮約手法」， 電学論 B, Vol.141, No.4, pp.307-315 (2021)
- [22] 草野謙一・飯岡大輔・松浦隆祥・濱田 拓・森 健二郎：「配電用変電所 LRT のタップ切替を考慮したスマートインバータの Volt-Var 曲線決定手法」， 令和 2 年電気学会全国大会， 6-165 (2020)

- [23] R. Zafar, J. Ravishankar, J. E. Fletcher, and H. R. Pota : “Multi-Timescale Model Predictive Control of Battery Energy Storage System Using Conic Relaxation in Smart Distribution Grids”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol.33, No.6, pp.7152-7161 (2018)
- [24] C. Zhang, Y. Xu, Z. Dong, and J. Ravishankar : “Three-Stage Robust Inverter-Based Voltage/Var Control for Distribution Networks With High-Level PV”, IEEE Trans. on Smart Grid, Vol.10, No.1, pp.782-793 (2019)
- [25] Y. Guo, Q. Wu, H. Gao, S. Huang, B. Zhou, and C. Li : “Double-Time-Scale Coordinated Voltage Control in Active Distribution Networks Based on MPC”, IEEE Trans. on Sustainable Energy, Vol.11, No.1, pp.294-303 (2020)
- [26] K. Mahmoud, and M. Lehtonen : “Three-level control strategy for minimizing voltage deviation and flicker in PV-rich distribution systems”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol.120, p.105997 (2020)
- [27] A. Reza Malekpour, and A. Pahwa : “A Dynamic Operational Scheme for Residential PV Smart Inverters”, IEEE Trans. on Smart Grid, Vol.8, No.5, pp.2258-2267 (2017)
- [28] C. Zhang and Y. Xu : “Hierarchically-Coordinated Voltage/VAR Control of Distribution Networks Using PV Inverters”, IEEE Trans. on Smart Grid, Vol.11, No.4, pp.2942-2953 (2020)
- [29] 草野謙一・飯岡大輔・松浦隆祥・濱田 拓・森 健二郎 : 「スマートインバータの Volt-Var 制御機能が配電用変電所 LRT のタップ制御と配電損失に及ぼす影響」, 令和 3 年電気学会全国大会, 6-158 (2021)
- [30] M. Kraiczky, T. Stetz, and M. Braun : “Parallel Operation of Transformers With on Load Tap Changer and Photovoltaic Systems With Reactive Power Control”, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol.9, No.6, pp.6419-6428 (2018)
- [31] 新田目 倅造 : 「電力系統技術計算の基礎」, 電気書院 (1980)
- [32] 東芝レビュー 3 月号, Vol.54, No.3 (1999)
<https://www.global.toshiba/jp/technology/corporate/review/1999/03.html>
- [33] 電気学会 : 「電力系統の電圧運用・制御技術」, 電気学会技術報告, 第 1467 号 (2019)
- [34] Electric Power Research Institute (EPRI) : “Common Functions for Smart Inverters 4th Edition”, 3002008217 (2016)
<https://www.epri.com/research/products/000000003002008217>

- [35] “Communication networks and systems for power utility automation - Part 7-420: Basic communication structure - Distributed energy resources and distribution automation logical nodes”, IEC 61850-7-420 (2021)
- [36] “IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces”, IEEE Std 1547-2018 (2018)
- [37] エネルギー総合工学研究所：「新電力ネットワーク技術に係る総合調査 経過報告」(2006) http://www.iae.or.jp/report/list/renewable_energy/network/
- [38] 電気協同研究会：「配電系統の高調波障害防止対策」，電気協同研究，Vol.37，No.3 (1981)
- [39] 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：「集中連系型太陽光発電システム実証研究」(事業期間:2002～2009 年度)
https://www.nedo.go.jp/activities/ZZ_00229.html

謝辞

本研究を行う上で、一貫して多大なるご指導・ご鞭撻を賜りました早稲田大学 理工学術院 林 泰弘 教授に深く感謝の意を表します。

また、本研究をまとめるにあたり、有益なご指導・ご助言を賜りました早稲田大学 理工学術院 石山 敦士 教授，若尾 真治 教授，近藤 圭一郎 教授，早稲田大学 研究院 石井 英雄 教授，北海道大学 情報科学研究院 原 亮一 准教授に心より感謝いたします。

早稲田大学 スマート社会技術融合研究機構 児玉 安広 先生（国立研究開発法人産業技術総合研究所），芳澤 信哉 先生（大阪大学大学院特任講師），東京電力ホールディングス 宮崎 輝 氏，東光高岳 村下 直久 氏には，本研究の全般にわたりご指導・ご助言・ご協力を数多くいただきましたこと，心より御礼申し上げます。

早稲田大学 林研究室 金子 曜久 先生，金子 奈々恵 先生，研究室博士課程学生，研究室秘書の皆さま，PEP 卓越大学院プログラム事務局の皆さまには多大なご協力をいただきましたこと，厚く御礼申し上げます。

最後に，今日に至るまでの博士後期課程 社会人学生としての学生生活を温かく見守り，支えていただいた職場の皆さま，そして家族に感謝の意を表します。

2023年7月
山下 裕輔

研究業績一覧

査読付き学術論文

- [1] 山下裕輔, 児玉安広, 林 泰弘, 村下直久, 「高低圧 PV 混在配電線の Volt-var 制御による無効電力出力と SVR 動作の適正化」, 電気学会論文誌 B, Vol.143, No.5, pp.270-281, 2023 年 5 月
- [2] 山下裕輔, 芳澤信哉, 児玉安広, 林 泰弘, 村下直久, 「PV 出力変動に伴う SVR 動作と配電損失増加を低減する Volt-var 曲線決定手法」, 電気学会論文誌 B, Vol.141, No.12, pp.763-772, 2021 年 12 月

査読付き国際会議

- [3] Y. Yamashita, Y. Kodama, Y. Hayashi and N. Murashita, "Effective Reactive Power Reduction of Low-Voltage PV Inverters by Applying Volt-var Control Method to High-Voltage PV Smart Inverters," Proc. 10th IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference Asia (ISGT-Asia), December 2021.

国内会議

- [4] 山下裕輔, 宮崎輝, 芳澤信哉, 林 泰弘, 村下直久, 「Volt-var 制御の時間変化率設定にともなう電圧逸脱量の低減効果」, 令和 2 年 電気学会 電力・エネルギー部門大会, オンライン, 2020 年 9 月
- [5] 山下裕輔, 宮崎輝, 芳澤信哉, 林 泰弘, 村下直久, 「SVR 設置配電系統への Volt-var 制御適用に関する基礎検討」, 令和元年 電気学会 電力・エネルギー部門大会, 広島, 2019 年 9 月
- [6] 山下裕輔, 村下直久, 芳澤信哉, 宮崎輝, 林 泰弘, 「Volt-var 制御の時間変化率変更による電圧制御効果への影響評価」, 平成 31 年 電気学会 全国大会, 北海道, 2019 年 3 月