

**多地点の計測情報に基づく配電系統電圧調整装置の
協調制御方法**

**(Cooperative control method of
voltage regulators in the distribution system
using the information of multipoint measurements)**

2015 年 9 月

渡邊 雅浩

D105464

緒言

太陽光発電等の小規模分散形電源の系統連系対策や、力率改善用コンデンサに起因するフェランチ現象の対策など、配電系統の電圧管理が複雑になってきている。一方で、配電系統の電圧、電流等を計測可能なセンサの普及が進みつつある。このような状況において、配電系統の電圧調整を担う、配電用変電所の負荷時タップ切換え変圧器（LRT：Load Ratio control Transformer）や自動電圧調整器（SVR：Step Voltage Regulator）の役割が重要となり、近年計測情報に基づいた整定や制御による効果的な電圧制御を可能とする検討がなされている。例えば、リアルタイムの計測情報に基づき、SVRやLRT（load ratio control transformer）のタップ値を最適に決定する手法が検討されている。しかしながら、配電系統の通信網を、リアルタイムの制御に活用するためには、信頼性のある高速通信網の設備投資が必要となる課題がある。また、計測・通信環境の整備が進む過程において、インフラ性能に対応した適切な制御方法の選択が重要となる。

そこで、本研究では上記の課題を解決するために、配電系統の電圧調整装置の最適整定手法、自律分散制御手法を提案する。具体的には、1) 配電系統の計測値を元にSVRの制御パラメータを整定する方法、2) 複数のSVRを自端情報によって協調的に動作可能とする制御手法、3) マルチエージェントによって複数のSVRを自律分散的に協調制御する手法、を提案する。また、各手法について、例題系統を対象とした計算機シミュレーションによって有効性を検証した。その結果、限られた計測、通信性能の環境下でも、電圧変動抑制、電圧維持制御性能を向上可能である結果が得られた。

本論文は、これらの研究内容を、以下のように5章から構成されている。

第1章では、研究の背景として、分散型電源の普及拡大時の配電系統の電圧制御の課題、計測通信環境の整備を想定した制御構成のロードマップについて概説し、次に本研究の目的と位置付けについて述べる。第2章では、過去の蓄積された計測情報を活用し、SVRの制御パラメータを適切に整定するアルゴリズムおよび実系統計測値とシミュレーションを活用した有効性評価について述べる。第3章では、過去の蓄積された計測情報から得られた制御パラメータと、SVRの制御時定数を適応的に変更することで、複数台のSVRを協調的に制御可能とするアルゴリズムおよびシミュレーション検証結果について述べる。第4章では、マルチエージェントシステムを用い、共有メモリを活用することで、限られた性能の通信環境においても、電圧制御機器の自律分散制御を可能とするアルゴリズムおよびシミュレーション検証結果について述べる。第5章では、本研究を総括するとともに、残された問題点について言及する。

第 1 章 序論	4
1.1 研究の背景	4
1.1.1 配電系統の電圧制御の課題	4
1.1.2 ローカル制御から自律分散制御へ	11
1.2 本論文の目的と各章の構成	12
第 2 章 計測情報に基づく SVR の LDC 整定および制御アルゴリズム[15]	13
2.1 緒言	13
2.2 従来の SVR 整定手法	13
2.2.1 SVR の電圧制御方法	13
2.2.2 従来の LDC 整定値算出方法	14
2.3 LDC 整定アルゴリズムの概要	16
2.4 シミュレーションによる評価	18
2.4.1 計算条件	18
2.4.2 評価指標	21
2.4.3 SVR 動作シミュレーション	21
2.4.4 結果と考察	24
2.5 結言	25
第 3 章 自端計測情報の相関関係を利用した複数台 SVR の協調制御手法[19]	26
3.1 緒言	26
3.2 複数台 SVR の協調アルゴリズム	26
3.2.1 SVR 制御応答の概要	26
3.2.2 自端計測情報による協調制御手法案	27
3.2.3 制御アルゴリズム	27
3.3 シミュレーション検証	31
3.3.1 計算条件	31
3.3.2 計算手順	33
3.3.3 結果と考察	37

3.4 結言	39
第4章 マルチエージェントシステムを用いた電圧制御機器の自律分散制御[63]	40
4.1 緒言	40
4.2 マルチエージェントシステム	41
4.2.1 マルチエージェントシステムの概要	41
4.3 制御手法	42
4.3.1 最適自律分散制御の概要	42
4.3.2 最適制御手法の定式化	43
4.3.3 指標 S の計算方法	45
4.4 配電システムの電圧制御への適用	46
4.4.1 多点電圧監視	46
4.4.2 制御処理手順	48
4.4.3 信頼性フラグ	50
4.5 シミュレーションによる評価	51
4.5.1 計算条件	51
4.5.2 結果と考察	53
4.6 結言	56
第5章 結論	57
参考文献	59
謝辞	65
引用既発表文献	66

第1章 序論

1.1 研究の背景

近年、太陽光発電や風力発電等の小規模分散型電源の普及が進み、配電系統へ連系される分散型電源の数も年々増加している。また、太陽光発電については、2005年度の実績で約140万kWの設備が導入されているが、2008年7月に閣議決定された「低炭素社会づくり行動計画」では、2020年度にその約10倍の約1400万kW、2030年度にはその約40倍の約5,300万kWが目標として掲げられた。更に、2009年4月10日に政府・与党会議、経済対策閣僚会議合同会議が公表した「経済危機対策」においては、国として2020年頃に20倍程度の約2,800万kWの導入を目指すとの方針が示された(図1.1)[1][2]。これに伴い、配電系統の電圧維持も今後より複雑となって行くことが考えられる。

このような太陽光発電導入量の増大に対し、どの時点でどのような対策が必要となるのかを把握し、準備をすすめておくことが重要となる。

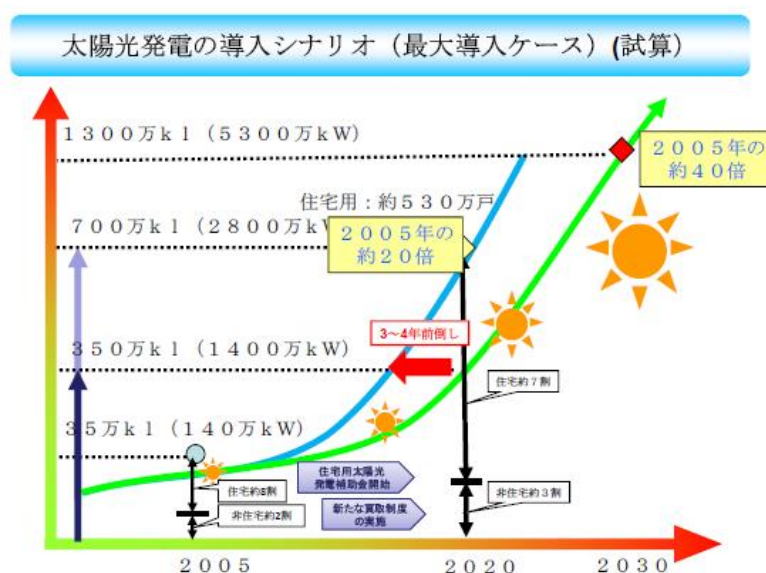


図 1.1 太陽光発電の導入シナリオ[2]

1.1.1 配電系統の電圧制御の課題

太陽光発電を含む分散電源の系統への接続に対して、配電系統の電力品質や保安の面から特に考慮すべき課題は、電圧変動および保護協調と考えられている[3][4]。これに、分散電源からの逆潮流が配電設備の許容電流を超過する課題を加えて、本検討では課題と対策案の整理、太陽光普及シナリオに対する対策必要時期の検討を進める。以下、各課題について簡単に概要を示す。

(1) 電圧変動

一般的に、配電系統の電圧は低圧側の電圧が電気事業法に定められた「 $101 \pm 6V$ 、 $202 \pm 20V$ 」を維持するように管理されている。電圧の維持は、図 1.2 に示すように、配電用変電所（以下配変）のバンク変圧器（load ratio control transformer: LRT）の電圧制御、線路に設置した自動電圧調整器（Step Voltage Regulator: SVR）の動作、柱上変圧器の1次、2次側の変圧比（タップ）の適正な設定、力率調整用コ

ンデンサなどの調相機器によって調整されている。また、将来は、無効電力補償装置(Static Var Compensator: SVC)による無効電力制御によって維持されることが検討されている。一般に、国内各電力会社では配電系統の高圧系統(6kV)と低圧系統(100/200V)に電圧分担の基準を設けており、配電系統の設計の目安としている。電圧分担の概要を図3に示す。低圧系統の電圧は、 $101 \pm 6V$ 内に維持する必要があるが、電圧は12Vまでは(瞬間的でなければ)変動してもよいことを意味している。これより、系統内のもっとも高い電圧が107Vで、もっとも低い電圧が95Vであれば、系統内の電圧は規定範囲に維持されるとみなすことができる。東北電力では、この電圧変化幅を高圧系統で低圧換算値で4V(高圧電圧換算で約260V)、低圧系統で8V(柱上変圧器2V、低圧線4V、引込線2V)を目安としている。高圧系統の電圧は、柱上変圧器を介して低圧系統の電圧に反映されるが、柱上変圧器の変圧比は東北電力では次の3種類が用いられている。

- ・ 6750 タップ：1次電圧：2次電圧=6750：6600
- ・ 6600 タップ：1次電圧：2次電圧=6600：6600
- ・ 6450 タップ：1次電圧：2次電圧=6450：6600

このタップを、系統の電圧分布に応じて適切に設定することで、低圧電圧(の送出し点)は図1.3のようにのこぎり状に維持される。このように高圧系統電圧が4V以内に維持されることで、低圧系統は8Vの電圧変化が許容されることになる。ここで、例えば電圧対策によって低圧換算で1V分の電圧余裕が増加すると、電圧面では高圧系統の1/4($1V/4V=25\%$)に相当する設備容量の増加と同等の効果があるといえる。

太陽光発電普及時の系統への影響としては、(1)通常と逆向きの電力の流れ(逆潮流)により、末端電圧が上昇(図1.4、1.5参照)、(2)日射変化に伴う太陽光出力変動により電圧変動が発生(図1.5参照)、が懸念される。逆潮流による電圧上昇の課題について、低圧系統を例に図6で詳しく説明する。図1.6(a)は太陽光発電の導入がないこれまでの系統の例を示す。軽負荷時、重負荷時とも、低圧系統の電圧変動幅8Vの範囲内に電圧が維持されている。図1.6(b)は太陽光発電が導入された事例を示す。夜間の重負荷時には太陽光導入前と同様に電圧が8V低下する地点がありうる。一方で昼間の軽負荷時は、太陽光発電による逆潮流で、柱上変圧器地点よりも電圧が上昇する地点がありうる。この場合、軽負荷時と重負荷時の電圧幅が8V以上となり、低圧系統の電圧変動幅を超過する状況となり、電圧を $101 \pm 6V$ の範囲に維持することが保証できなくなる。この場合、図1.6(c)に示すように、柱上変圧器タップを(高圧系統電圧との兼ね合いで問題ない場合に)変更するか、柱上変圧器を分割して低圧系統の負荷量を低減することで低圧電圧低下を低減するか、低圧線を太い(インピーダンスの小さい)線に張り替えることで電圧低下を低減する、などの対策が必要となる。

次に、日射変化の実測事例を図1.7に示す。図1.7(a)は、2009年12月の日研内での日射の時間変化を示したものである。曇りの日に日射が大きく変化していることが伺える。この曇りの日の日射の4秒間の変化量を図1.7(b)に示す。4秒以内に快晴時の最大出力の80%の日射変化が発生していることがわかる。このように、太陽光発電の出力変化は、LRTやSVRの時定数(通常45秒以上)よりも短時間で発生するため、LRTやSVR動作までの期間に電圧維持が困難となる恐れがある。

また、分散型電源が多数連系される場合、図1.8(a)に示すように、分散型電源出力によってSVR端の電流が減少するような場合には、SVRのLDC制御によってSVR端電圧は低下する。この場合、分散型電源の設置されない分岐線路では電圧が下限を逸脱することが懸念される。この場合、図1.8(b)に示すよ

うに、まず末端の電圧を計測などにより把握し、SVRのタップを調整するか、系統内の無効電力を調整して、電圧を適正に維持することが必要となる。

(2) 保護協調

太陽光等の分散電源が連系された配電系統で事故が発生し、系統のある区間が切り離されることで停電した際に、その区間内の分散電源が切り離されず（解列されず）に運転が継続されれば、停電区間内に電気が供給され続けてしまう恐れがある。これは単独運転と呼ばれている。単独運転時には、系統に電圧が印加されたままとなり、保守時に感電等の危険が発生してしまうため、公衆の安全確保、停電復旧作業に支障を与えてしまう。単独運転は、発電量と負荷量がバランスすることで発生が懸念されるため、各開閉器区間、フィーダ全体、バンク全体での発電量と負荷量が一致しないように注意しておく必要がある。現在、発電量と負荷量がバランスした状態でも、単独運転を検出して確実に太陽光発電を停止するための保護装置（単独運転防止装置）の規格化が電機工業会等を中心にすすめられているが、本検討では発電量と負荷量がバランスする状態となった場合に単独運転の懸念があるとして評価を進めた。

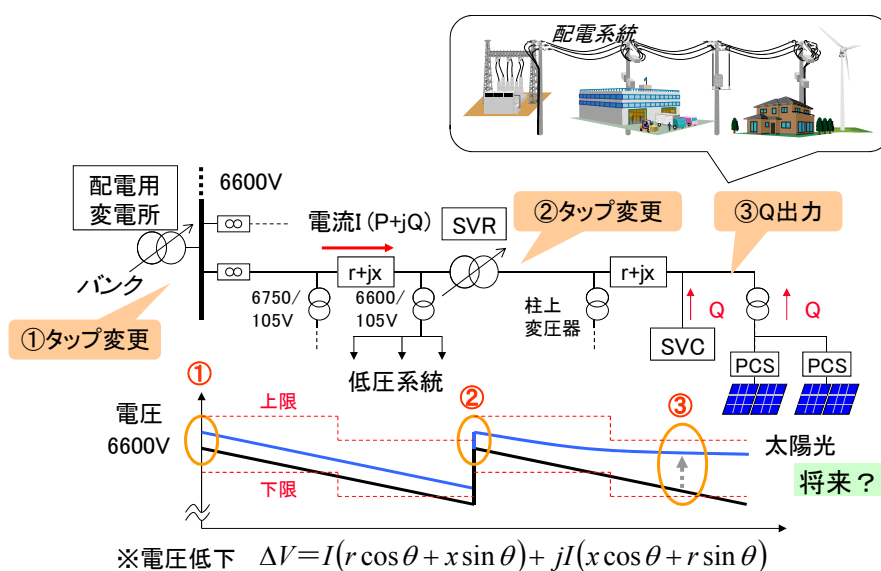


図 1.2 配電系統の電圧制御の概要

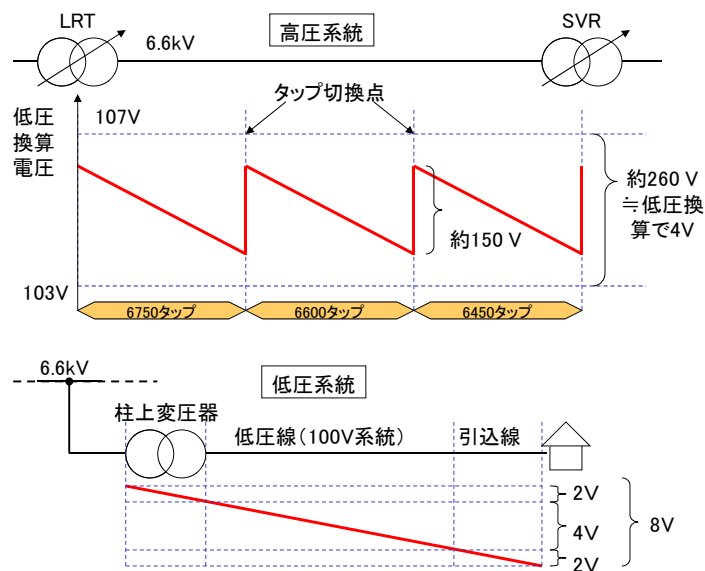


図 1.3 配電系統の高低圧電圧分担のイメージ

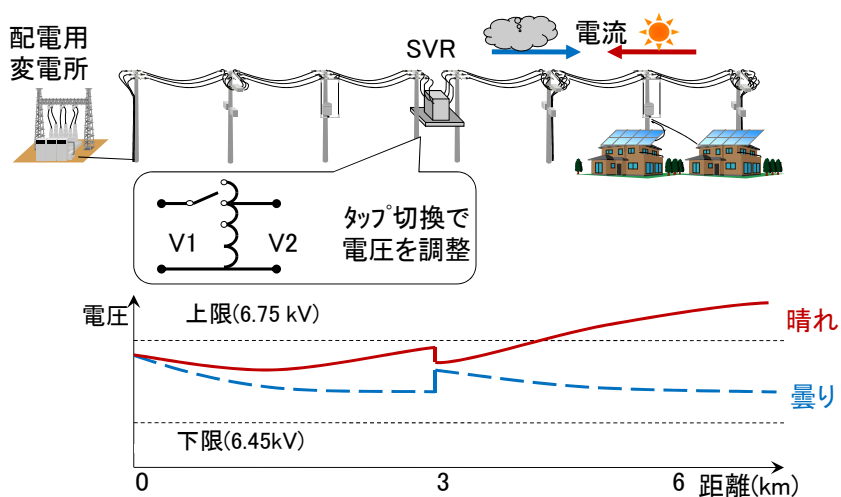


図 1.4 太陽光発電に起因する配電系統の電圧上昇のイメージ（高圧系統）

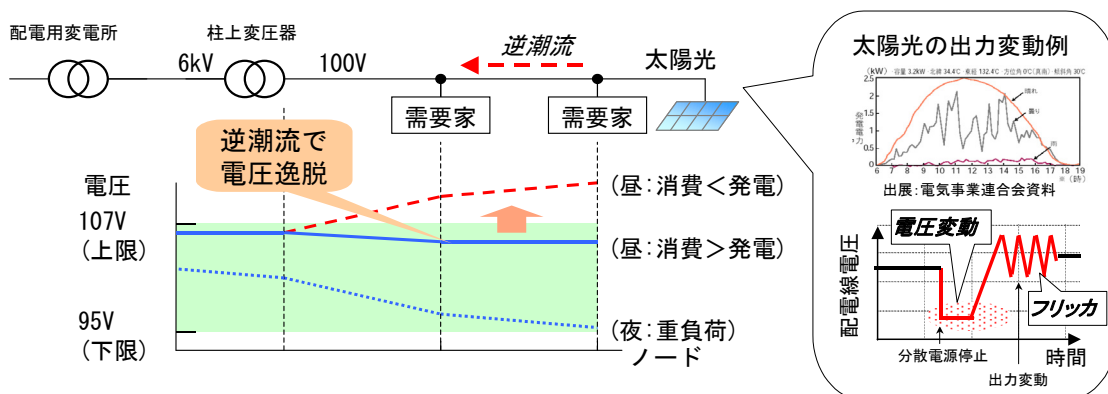
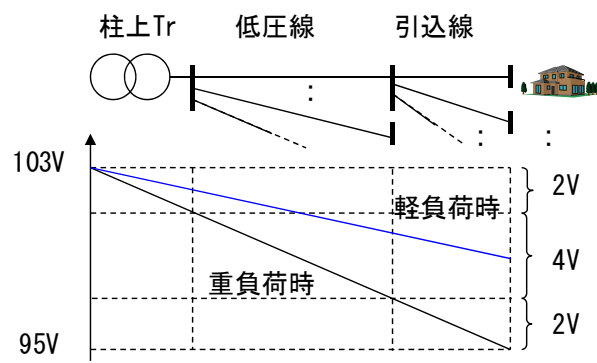
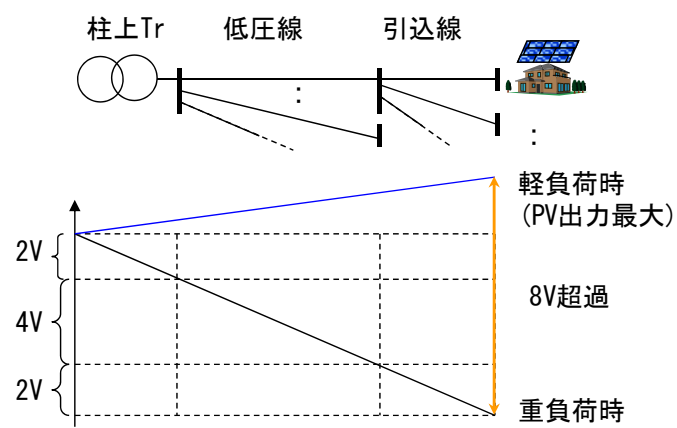


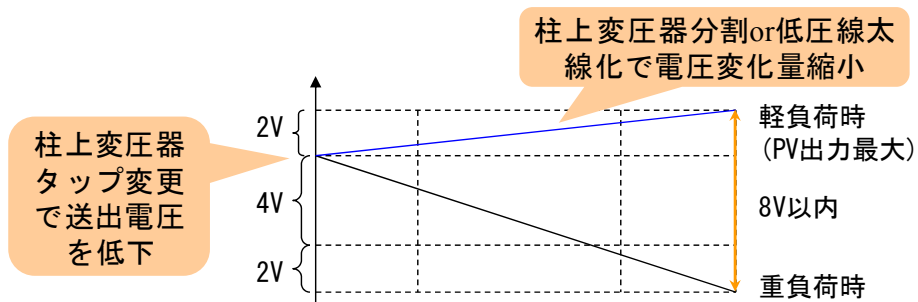
図 1.5 太陽光発電に起因する配電系統の電圧上昇，電圧変動のイメージ（低圧系統）



(a) 太陽光導入なし

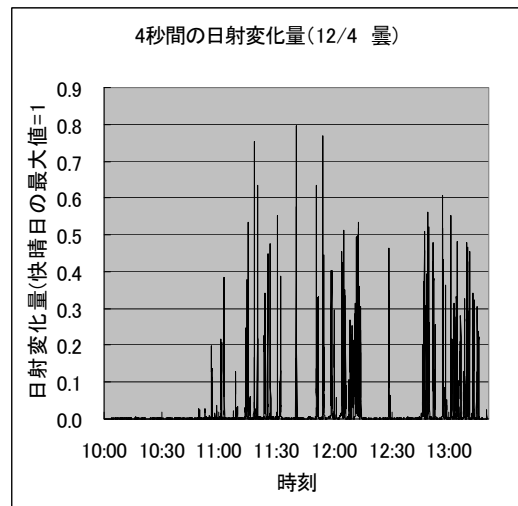
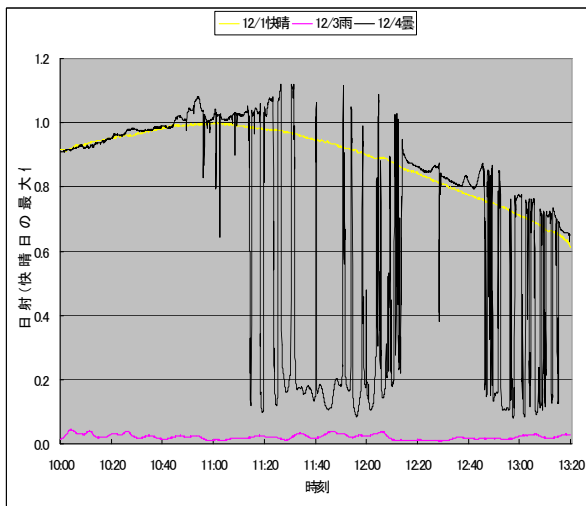


(b) 太陽光導入時，対策前



(c) 太陽光導入時，対策後

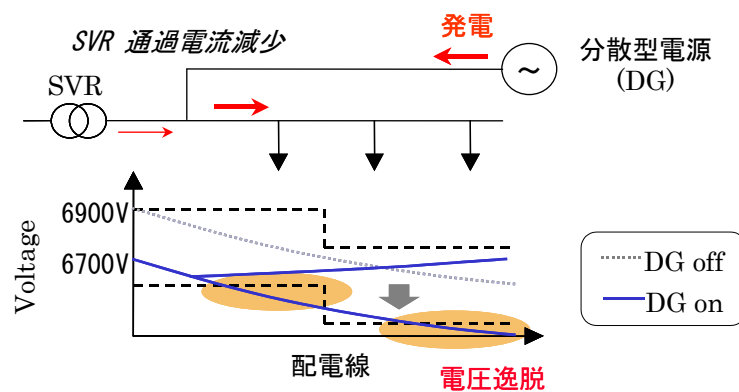
図 1.6 逆潮流による低圧系統電圧上昇の課題



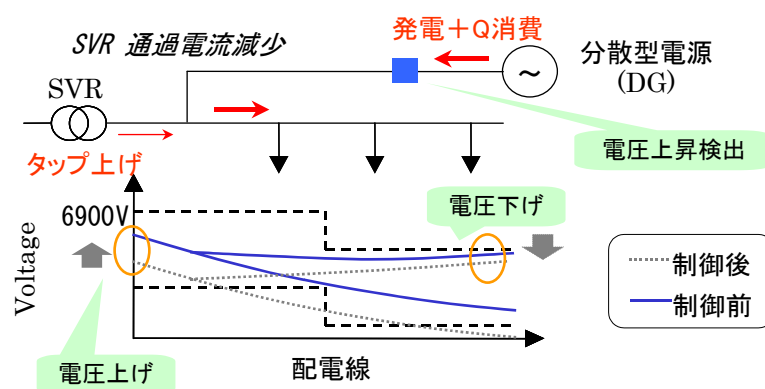
(a) 日射変化

(b) 4秒間の日射変化量

図 1.7 日射変化計測事例



(a) 電圧逸脱が懸念される状況



(b) 適正電圧への調整

図 1.8 分散型電源による電圧への影響例

(3) 太陽光発電普及時の対策

前節に示した課題に対して、これまで様々な対策が検討されている。主な対策と、課題への有効性を表 1.1 に示す。電圧変動の課題に対しては、低圧系統、高圧系統毎に、常時電圧、瞬時電圧、バンク電圧について、対応する対策をまとめた。また、保護協調は、単独運転に加えて、「もらい事故／不動作」と呼ばれる配電用変電所の保護リレー動作の課題や、バンク電圧制御装置等の改修が必要となる「バンク逆潮流」についてまとめた。表中の数値が大きいほど、効果が大きいと考えられることを示している。

表 1.1 太陽光発電普及時の課題と対策

対策		電圧変動					保護協調				電流
		低圧末端電圧上昇	低圧線電圧変動	高圧線電圧上昇	高圧線電圧変動	バンク電圧上昇	単独運転(開閉器区間内)	単独運転(バンク単位)	もらい事故／不動作	バンク逆潮流	線路容量超過
既存対策	1 低圧線太物化	5	3								5
	2 柱上変圧器分割	5	3								5
	3 柱上変圧器タップ変更	5	3	5	3	1					
	4 高圧線太物化			5	3	1			3		5
	5 フィーダへのSVR増設			5	3	1					
	6 太陽光発電総量抑制						3	3	3		
	7 バンク電圧プロコン制御			3	3	5					
	8 フィーダ引出地点へのSVR設置			5	3	5					
	9 フィーダ分割			5	3			5	5		5
新規対策	10 SVR整定最適化			5	3	3					
	11 柱上変圧器タップ最適化	5	3								
	12 フィーダへのSVC設置		3	3	5						
	13 柱上変圧器の電圧制御機能付加	5	5								
	14 太陽光発電無効電力制御	5	5	3	3	3					
	15 高圧状態推定による電圧余裕把握			5	3						
	16 低圧状態推定による電圧余裕把握	5	3								
	17 DSMによる昼間負荷増大	5	1	3	1					3	3
	18 ループ化(LBC導入など)			3	3						3
	19 電圧制御高度化(集中制御など)			5	3						
	20 不平衡解消(電圧余裕拡大)	3	1	3	1						
	21 フィーダ、需要家への蓄電池導入	5	5	5	5					5	5
	22 変電所への蓄電池導入										
	23 高低圧電圧分担変更、低圧ボトルネック強化	3	1	5	1	1					
	24 単独運転検出装置改良、転送遮断						5	3			
	25 単独運転遮断装置						5	3			
	26 太陽光発電量推定	1	1	1	1	1			3		
	27 バンクLRT制御改良			5	1	5				5	

5: 効果大, 3: 効果中, 1: 効果小, 空白: 効果なし

※DSM: Demand Side Management, LBC: Loop Balance Controller

1.1.2 ローカル制御から自律分散制御へ

また、2030 年 5300 万 kW の太陽光導入シナリオに対応する配電監視制御技術開発ロードマップ例を図 1.9 に示す。(a) 系統制御のトレンドとして、自端情報によるローカル制御から、計測情報と高速ネットワークを活用した自律分散／集中制御への移行、(b) 低速な変電所 LRT, SVR による離散的制御から、SVC/PV/EV 制御による連続かつ高速な制御への展開、がポイントとなる。本研究では、第 2 章が「計測データを活用した機器整定高度化」のステップ、第 3 章、第 4 章が「機器自律分散・適応制御」に位置付けられる。

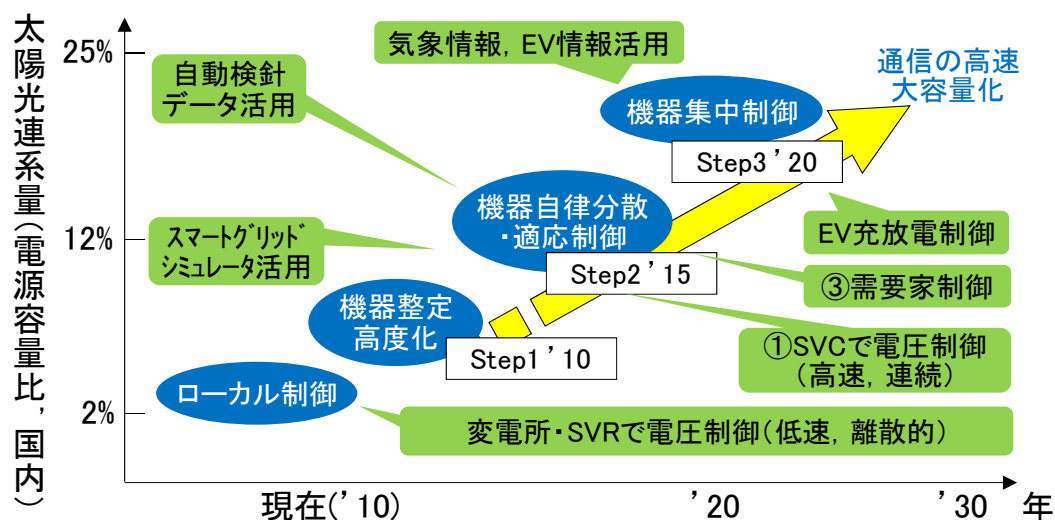


図 1.9 配電監視制御技術開発ロードマップ

1.2 本論文の目的と各章の構成

本論文では前述の配電系統電圧制御の課題を解決するために、配電系統の電圧調整装置の最適整定手法、自律分散制御手法を提案する。具体的には、1) 配電系統の計測値を元に SVR の制御パラメータを整定する方法、2) 複数の SVR を自端情報によって協調的に動作可能とする制御手法、3) マルチエージェントによって複数の SVR を自律分散的に協調制御する手法、を提案する。また、各手法について、例題系統を対象とした計算機シミュレーションによって有効性を検証した。その結果、限られた計測、通信性能の環境下でも、電圧変動抑制、電圧維持制御性能を向上可能である結果が得られた。

本論文は、これらの研究内容を、以下のように 5 章から構成されている。

第 1 章では、研究の背景として、分散型電源の普及拡大時の配電系統の電圧制御の課題、計測通信環境の整備を想定した制御構成のロードマップについて概説し、次に本研究の目的と位置付けについて述べる。

第 2 章では、過去の蓄積された計測情報を活用し、SVR の制御パラメータを適切に整定するアルゴリズムおよび実系統計測値とシミュレーションを活用した有効性評価について述べる。

第 3 章では、過去の蓄積された計測情報から得られた制御パラメータと、SVR の制御時定数を適応的に変更することで、複数台の SVR を協調的に制御可能とするアルゴリズムおよびシミュレーション検証結果について述べる。

第 4 章では、マルチエージェントシステムを用い、共有メモリを活用することで、限られた性能の通信環境においても、電圧制御機器の自律分散制御を可能とするアルゴリズムおよびシミュレーション検証結果について述べる。

第 5 章では、本研究を総括するとともに、残された問題点について言及する。

第2章 計測情報に基づく SVR の LDC 整定および制御アルゴリズム[15]

2.1 緒言

太陽光発電等の小規模分散形電源の系統連系対策や、力率改善用コンデンサに起因するフェランチ現象の対策など、配電系統の電圧管理が複雑になってきている。一方で、配電系統の電圧、電流等を計測可能なセンサの普及が進みつつある。このような状況において、配電系統の電圧調整を担う SVR (Step Voltage Regulator) の役割が重要となり、近年計測情報に基づいた整定や制御による効果的な電圧制御を可能とする検討がなされている[5][6]。例えば、リアルタイムの計測情報に基づき、SVR や LRT (load ratio control transformer) のタップ値を最適に決定する手法[7]や、電圧制御装置間の情報通信によって複数の機器を協調的に動作させる手法[8]が検討されている。一方で、配電系統の通信網を、リアルタイムの制御に活用するためには、信頼性のある高速通信網の設備投資が必要となる。そのため、現在得られるモニタリング計測情報を活用し、自端計測情報で制御可能な従来の電圧制御機器を有効に動作させることが重要となる。SVR については、LDC (Line Drop Compensation) 等の制御パラメータの値によって電圧制御効果が異なるが、この整定には従来からの手法[9]が長らく用いられているのが実態である。従来手法では、負荷の力率が1に近い場合は適切に制御可能であるが、フェランチ現象発生時のように力率が1から大きく外れる場合や、SVR 末端側に分散電源が偏在するような場合は、適切に電圧を制御できない可能性がある[10]。そこで、本研究では、現在定期的に取得、蓄積されている開閉器内蔵センサの過去の計測情報を活用し、SVR の LDC パラメータを適切に設定することを考えた[11]-[15]。これにより、自端計測情報のみを使った制御でも、従来よりも電圧制御効果の改善が可能となると考える。

本報告では、提案する SVR の LDC パラメータ整定アルゴリズムの概要、実際の配電系統の計測データを用いたパラメータ整定例と、SVR 動作シミュレーションによる整定の有効性評価結果について示す。提案手法により、SVR を通過する有効、無効電力と、配電系統の電圧の関係を分析することで、SVR の電圧制御機能を効果的に動作させることが可能となる見通しが得られた。

2.2 従来の SVR 整定手法

2.2.1 SVR の電圧制御方法

SVR は配電線路に直列に設置されるタップ付き変圧器で、タップを自動的に切り換えて二次側電圧を調整する。電圧制御方法として、線路電圧降下を補償する LDC が広く採用されている。図 2-1 に SVR の LDC 制御の基本的回路を示す。負荷中心点 V_L の電圧を一定に保つためには、負荷電流 I_{SVR} の増減に応じて SVR の二次側電圧 V_S を増減させる必要がある。以下、LDC の電圧降下補償方法を説明する。電圧調整リレー 90 に直列に挿入された LDC の抵抗 R , X を、線路の負荷中心点までのインピーダンスに相当するように設定する。ここで、線路の負荷中心点までの電圧降下 ($V_S - V_L$) に相当する電圧降下が、LDC 回路に $V_{PT} - V_{90}$ としてあらわれる。これにより、 V_{PT} に対応する SVR 二次側電圧 V_S は、90 リレー基準電圧設定値に線路電圧降下分 ($V_S - V_L$) を加えた値に制御されることになり、電圧降下が補償される。

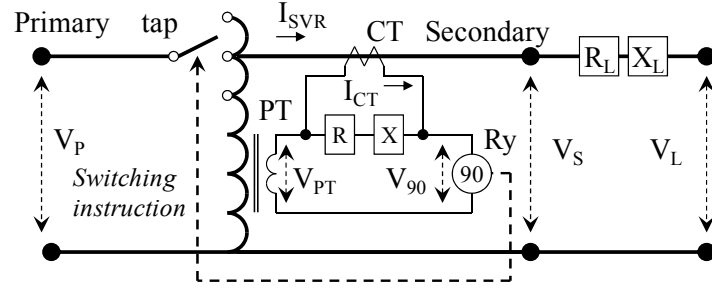


図 2-1 SVR の LDC 制御の基本的回路

2.2.2 従来の LDC 整定値算出方法

LDC の整定値算出方法の一例を示す。SVR 設置点の重・軽負荷時の電流 I_1 , I_2 が把握されており, 各々の SVR 二次側電圧 V_1 , V_2 が適切に設定されるものとする (例えば, $V_1=6900\text{V}$, $V_2=6600\text{V}$)。この場合, LDC の整定値 R および X は近似的に次のように計算される [9]。

$$R = \frac{C}{P} \cdot \frac{V_1 - V_2}{\sqrt{3}(I_1 - I_2)} \cos \phi \quad (\Omega) \quad (2-1)$$

$$X = \frac{C}{P} \cdot \frac{V_1 - V_2}{\sqrt{3}(I_1 - I_2)} \sin \phi \quad (\Omega) \quad (2-2)$$

ここで, $\cos \phi$ は重負荷時の力率, P は PT の変圧比, C は CT の変流比を表す。また, 基準電圧整定値 V_{ref} は

$$V_{\text{ref}} = \frac{1}{P} \cdot \frac{I_1 V_2 - I_2 V_1}{I_1 - I_2} \quad (V) \quad (2-3)$$

となる^⑤。このように整定することで, 重負荷, 軽負荷時とも負荷中心点の電圧が基準電圧値となるように, SVR 二次側電圧は制御される (図 2-2, 図 2-3 参照)。

ところで, (2-1)式, (2-2)式は R , X を求めるために SVR の通過電力の力率を用いている。 R , X は, LDC で線路の電圧降下を補償するために用いられる。電圧降下の補償量を $\Delta V(\text{pu})$ とすると, ΔV は整定値 R , $X(\text{pu})$ と SVR 通過電流 $I(\text{pu})$ で次式のように表される。

$$\Delta V = R \cdot I \cdot \cos \phi + X \cdot I \cdot \sin \phi \quad (2-4)$$

ここで, $\cos \phi$ は(2-1)式と同じく重負荷時の力率である。また, Z をインピーダンスに相当する値として, (2-5)式で定義すると, R と X は (2-1), (2-2)式から(2-6)式のように記述できる。この時, 電圧降下 ΔV は, (2-4)(2-6)式から(2-7)式で表される。

このように, 電圧降下は, 電流にインピーダンスを掛けたものとして計算される。(2-7)式から, 電圧降下 ΔV は, 力率によらず, 通過電流の大きさに応じて計算されることがわかる。このことは, SVR 二次側電圧は, 力率が変わっても通過電流が同じであれば, 同じ値に制御されることを意味している。

以上のような LDC 整定値算出方法では、SVR 通過電流力率が一定であること、または電圧が最も降下する重負荷時の力率を用いることが想定されている。そのため、フェランチ現象発生時など、軽負荷時に進み力率が原因でフィード電圧が上昇するような場合には、SVR で適切な電圧制御ができない可能性がある。

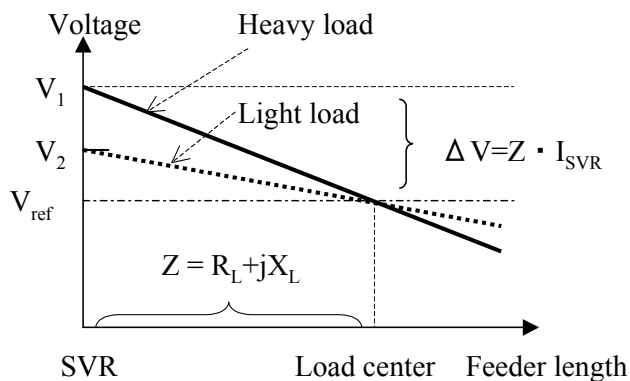


図 2-2 LDC 制御による電圧分布

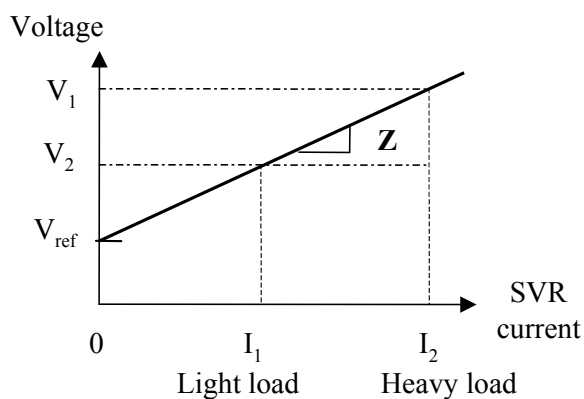


図 2-3 LDC パラメータの求め方

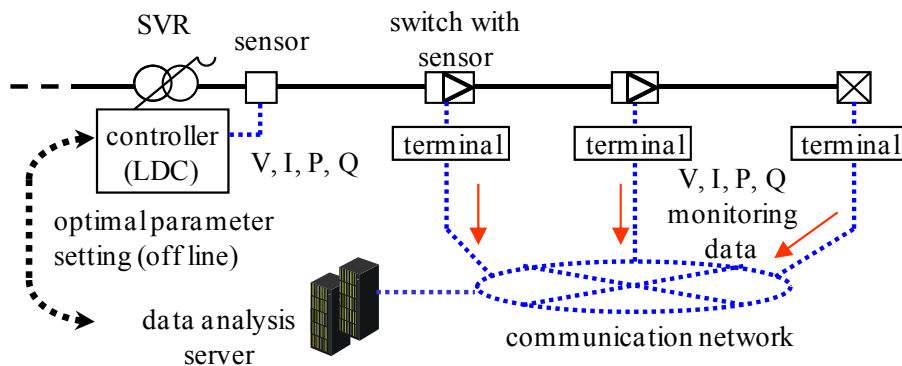


図 2-4 提案手法のコンセプト

2.3 LDC 整定アルゴリズムの概要

前述の問題点を解消するために、SVR を通過する有効・無効電力の計測データ (P_{svr} , Q_{svr}) の情報を活用した、LDC 整定値算出手法を検討した。まず、提案手法のコンセプトを図 2-4 に示す。SVR のタップ値を、系統内の計測情報に基づいてリアルタイムに制御することは、通信速度面から難しい場合が多いと考えられる。提案手法では、現在定期的に取得、蓄積されている開閉器内蔵センサの過去の計測情報から、オフラインで SVR の LDC パラメータを適切に求め、適宜 SVR の設定を変更することを考えた。次に、LDC パラメータの計算処理の流れを図 2-5 で説明する[11]–[15]。

(ステップ 1) 計測データ読み込み: 分析対象期間の各時間毎の SVR 二次側電圧 V_{svr} , SVR 通過電力 (P_{svr} , Q_{svr}) を読み込む (図 2-5 (a)参照)。

(ステップ 2) SVR の理想的電圧 V_s の計算: 各ノードの電圧上下限值までの電圧余裕の最小値が最大となるような SVR 二次側電圧理想値 V_s を求める。具体的には、図 2-5 (b)に示すように (SVR の電圧調整を連続的可能であると仮定し)、対象区間内の ΔV_U (電圧最大値 V_{max} と電圧上限値 V_U の差) と ΔV_L (電圧上限値 V_L と電圧最小値 V_{min} の差) が等しくなるように V_{svr} を ΔV_{svr} ほど (SVR の電圧調整機能で) 変化させる (図中の $V_{svr} \rightarrow V_s$ に相当)。このとき V_1 , V_2 も ΔV_{svr} ほど同様に変化するとみなす。電圧調整後の SVR 二次側電圧を V_s とする。各時刻毎にこの処理を行うことで図 2-5 (c)に示すように V_s の時系列データが得られる。ここで、各時刻毎の V_s は、式(2-8)のように計算すればよい。

$$V_s = V_{svr} + \frac{V_U + V_L - V_{max} - V_{min}}{2} \quad (2-8)$$

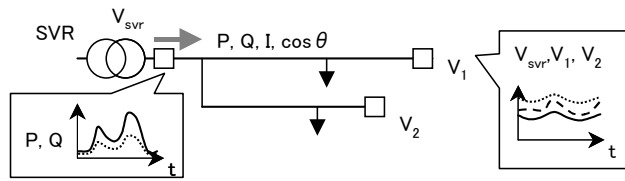
ここで、 V_U , V_L は各々ノードの電圧上限・下限値、 V_{max} , V_{min} は SVR 制御対象範囲内の電圧最大・最小値を表す。この SVR 二次側電圧理想値 V_s と図 2-5 (d)に示す P_{svr} , Q_{svr} でデータセットを作る。

(ステップ 3) LDC パラメータの算出: SVR 二次側電圧理想値 V_s と、 P_{svr} , Q_{svr} の関係を重回帰分析によって求める。具体的には V_s と、 P_{svr} , Q_{svr} の関係を式(2-9)(2-10)で定義する。ここで、式中の各値の単位は pu 値とする。前述の V_s と P_{svr} , Q_{svr} のデータセットに対し、重回帰分析を行うことで、パラメータ A_p , A_q , V_{ref} を求めることができる。重回帰分析では、 V_s と P_{svr} の相関係数として A_p が、 V_s と Q_{svr} の相関係数として A_q が、オフセットして V_{ref} が計算される。 R , X を式(2-10)のように定義することで、式(2-9)のように V_s を I の実部(I_r), 虚部(I_i)と V_{ref} で表すことができる。この R , X , V_{ref} がの単位を Ω 値、電圧値などに適宜変換することで、従来の SVR の LDC の整定パラメータとして用いることができる。

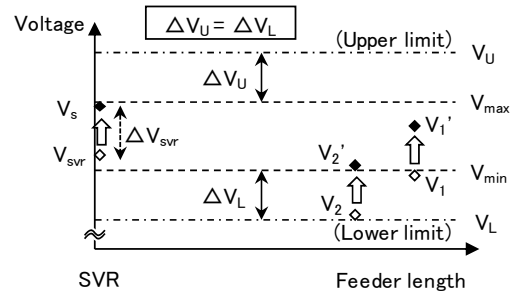
$$\begin{aligned} V_s &= A_p \cdot P_{svr} + A_q \cdot Q_{svr} + V_{ref} \quad (pu) \\ &= R \cdot I_r + X \cdot I_i + V_{ref} \quad (pu) \end{aligned} \quad (2-9)$$

$$R = \frac{A_p}{V_{svr}} \quad (pu), \quad X = \frac{A_q}{V_{svr}} \quad (pu) \quad (2-10)$$

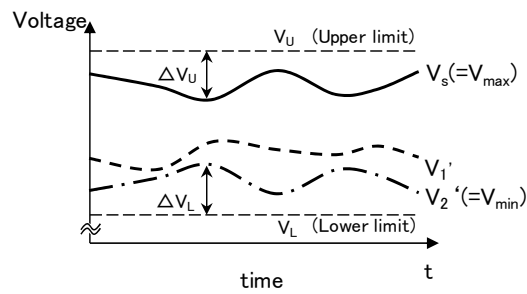
重回帰分析の結果イメージを図 2-5 (e)に示す。 V_s と P_{svr} の近似直線の傾き (相関係数) として A_p が、 V_s と Q_{svr} の近似直線の傾きとして A_q が、直線の Z 軸切片として V_{ref} が得られる。また、次章に示す実際の系統の実測データの P_{svr} , Q_{svr} と V_{ref} の関係の例を図 2-6 に示す。



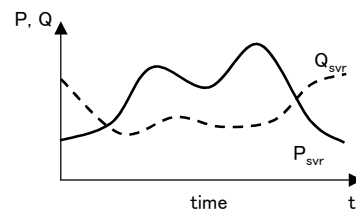
(a) 計測データ読み込み



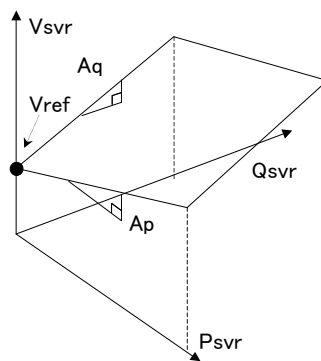
(b) SVR の理想的電圧 V_s の計算



(c) SVR の理想的電圧，系統電圧の時間変化



(d) SVR の有効，無効電力の時間変化



(e) LDC パラメータの算出

図 2-5 提案手法の計算処理イメージ

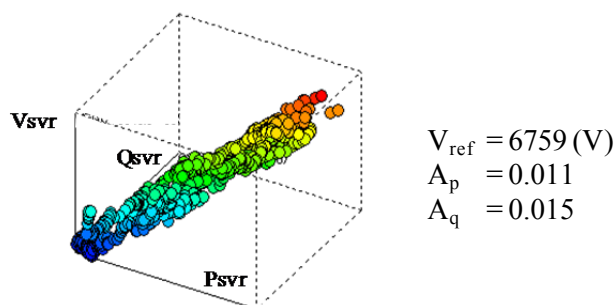


図 2-6 実際の系統の実測データの P_{svr} , Q_{svr} と V_{ref} の関係の例

2.4 シミュレーションによる評価

2.4.1 計算条件

SVR が設置された実際の配電系統を対象に、計測装置による 1 分毎の測定データと、配電自動化システムで収集した 1 時間毎の測定データを用いて、整定アルゴリズムの評価を行った。計測対象とした系統の構成を図 2-7 に、各々の計測データの概要を以下に示す。

(1) 詳細計測データ

対象とする配電線フィードに計測装置を 5 ヶ所設置し、各相の電圧・電流実効値、有効・無効・皮相電力、力率等を 1 分毎に測定した。測定個所を、図 2-7 の①～⑤に示す。なお、測定は 2009 年の 10 月～11 月にかけて実施した。

(2) 開閉器計測データ

配電自動化システムで、開閉器内蔵センサの計測情報を 1 時間毎に収集している。本検討では、詳細計測データと同時間帯のデータを評価に用いた。利用した計測データは、電圧・電流実効値、力率（一部の開閉器対象）等である。対象とした開閉器の設置個所を図 2-7 の a～f に示す。

これらのデータの平日の 1 日分の計測データを用いて評価を行った。詳細計測データを図 2-8 に示す。測定地点③の有効・無効電力、③～⑤の代表相電圧 ($V_3 \sim V_5$) を(a), (b)に示す。また、この期間の SVR のタップ動作状況を②, ③の電圧値から推定した結果を図 2-9 に示す。これより、SVR による電圧調整が行われなかった場合（素通しタップの状態）の各地点の電圧を近似的に求めた結果を、図 2-10 に示す。夜間の電圧上昇を抑制するように SVR のタップを制御することが必要であることが伺える。

次に、開閉器計測データを図 2-11 に示す。測定地点 b の有効・無効電力、c～f の代表相電圧 ($V_c \sim V_f$) を(a), (b)に示す。

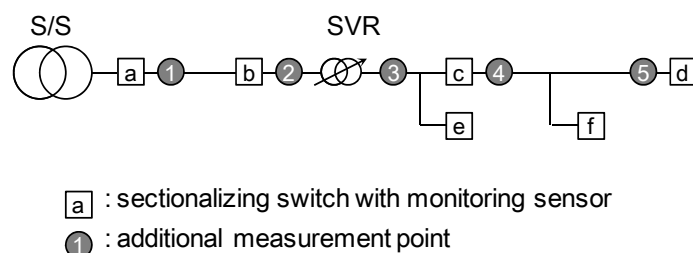
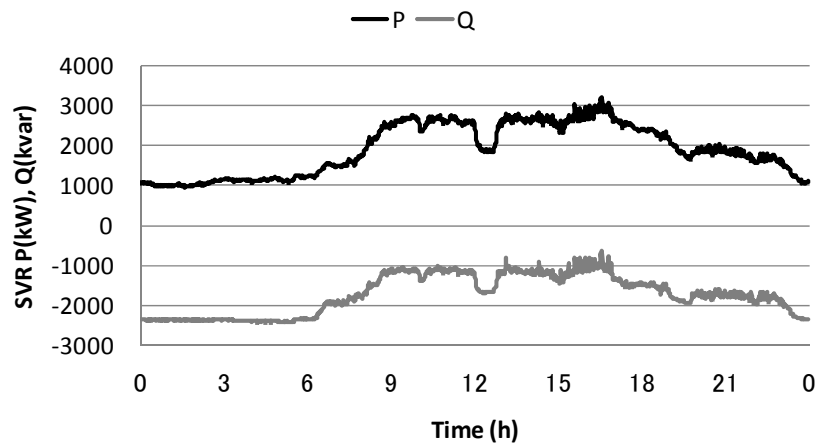
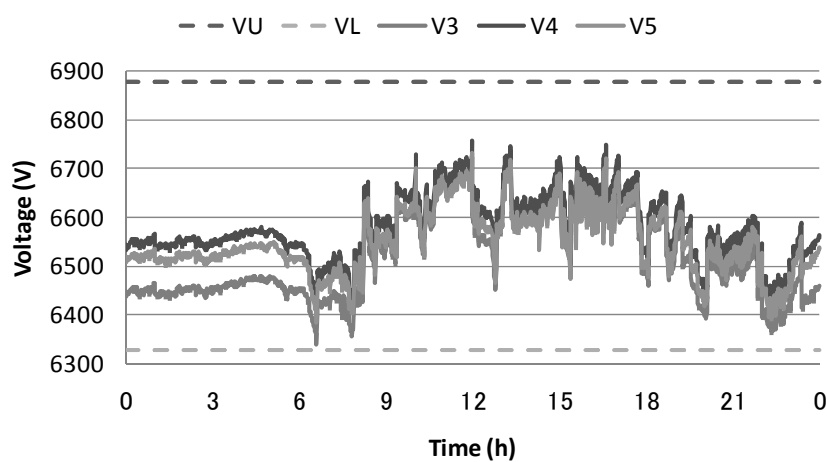


図 2.7 例題系統の構成



(a) 有効・無効電力測定値 (Q < 0: 遅れ力率を表わす)



(b) 電圧測定値の計測データ

図 2-8 詳細計測データ

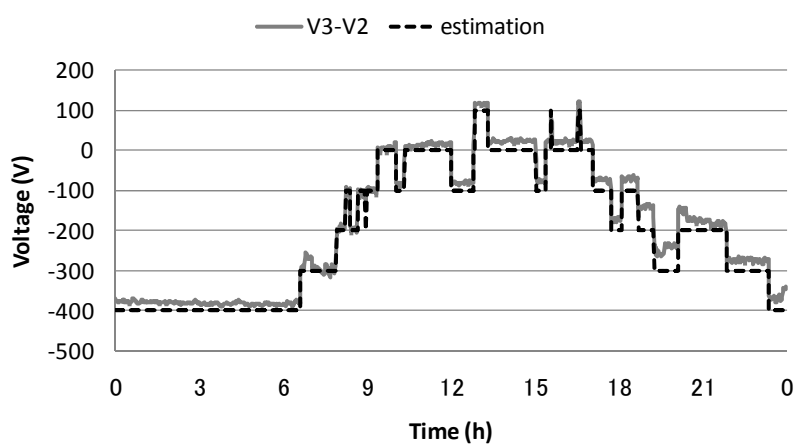


図 2-9 SVR のタップ動作推定値

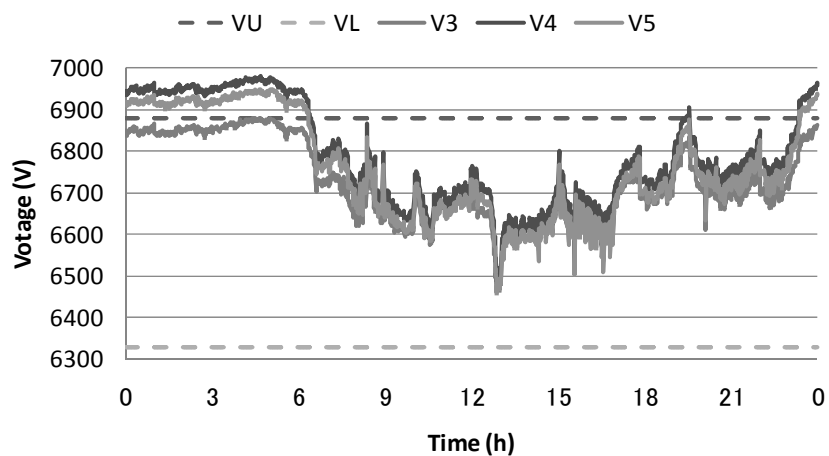
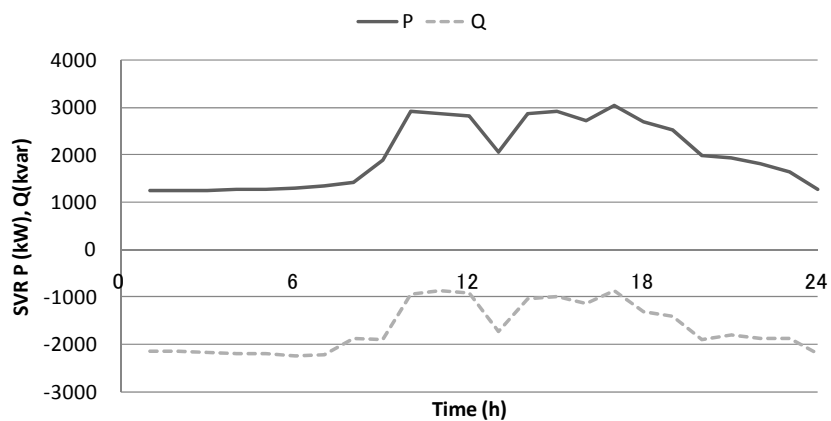
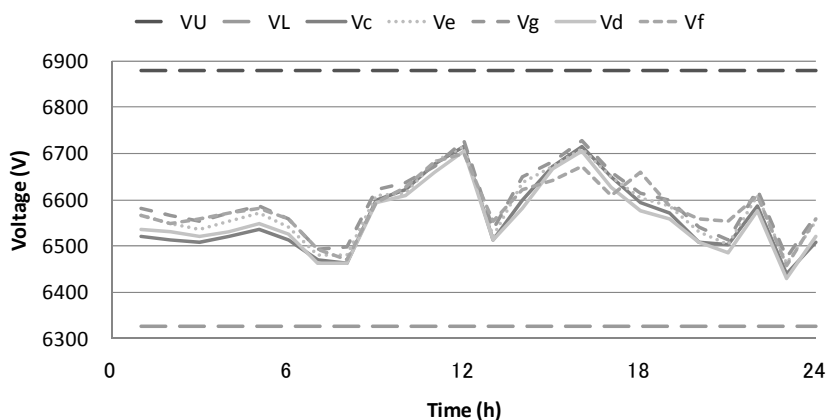


図 2-10 SVR のタップ素通し時の電圧推定値



(a) 有効・無効電力計測値 (Q は進みを負で表示)



(b) 電圧計測値

図 2-11 開閉器計測データ

2.4.2 評価指標

SVR の LDC パラメータ整定方法による電圧制御効果を比較するために、次のような評価指標を定義した。

(a) 電圧上下限值までの余裕量の平均値

$$F_1 = \frac{\sum_t \left(\min_i (\Delta V_{Uit}, \Delta V_{Lit}) \right)}{t} \quad (\text{V}) \quad (2-11)$$

(b) 電圧上下限值までの余裕量の最小値

$$F_2 = \min_{i,t} (\Delta V_{Uit}, \Delta V_{Lit}) \quad (\text{V}) \quad (2-12)$$

ここで、 i : ノード、 t : 時刻、 ΔV_{Uit} 、 ΔV_{Lit} : 時刻 t 、ノード i の電圧の、電圧上限、下限までの余裕量

F_1 、 F_2 とも評価指標の値が大きい方が、電圧余裕が大きいことを示す。各評価指標の値は、電圧余裕の大きさの目安となると考えられる。

評価に用いる電圧上下限値は、今回は次の値を用いた。

- ・電圧上限 : 6879 (V) (柱上変圧器タップ 6750 (V) で低圧電圧 107 (V) に相当)
- ・電圧下限 : 6327 (V) (柱上変圧器タップ 6450 (V) で低圧電圧 103 (V) に相当)

2.4.3 SVR 動作シミュレーション

計測データに対する SVR のタップ動作を、シミュレーションによって評価を行った。シミュレーション処理概要を図 2-12 に示す。また SVR の仕様を以下に示す。

- ・タップ : 9 タップ (6200 ~ 7000 (V), 100 (V) ステップ, 素通しタップ : 6600 (V))
- ・不感帯 : 1.5 (%)
- ・タップ動作時定数 : 45 (sec)

検討ケースおよびシミュレーション結果の一覧を表 1 に示す。case 1 は SVR を設置しない場合、case 2 は実測データに対する評価結果を示している。また、case 3 は、詳細計測データを用いて整定を行い、かつ SVR の二次側電圧が理想的な場合 (図 2-5 (c) の状態に相当し、SVR のタップ比は連続的に変化すると仮定した場合) の評価結果を示している。case 4 は詳細計測データを、case 5 は開閉器計測データを用いた場合の LDC パラメータ計算結果およびシミュレーション結果を示している。case 3, 4, 5 では、 V_{ref} 、 A_p 、 A_q の値を図 2-8、図 2-11 の P 、 Q および電圧データから、図 2-5 のアルゴリズムによって求めた。case 6 ~ 14 は、従来手法を用いたケースであり、計算時の設定項目である、SVR の通過電流の力率 (最大, 平均, 最小値の 1.0, 0.7, 0.38) と、SVR 通過皮相電力 (SVR 通過電流の代用) の最大値を変えて、各々シミュレーションを行った結果を示している。ここでは、2 章に示す手法に沿って式(13)~(15)を用いて同様にパラメータを求めた。

ここで S_1 、 S_2 は皮相電力の最大値, 最小値である (式(2-3)の I_1 、 I_2 に対応)。case 6 ~ 14 では、 S_2 をパラメータとし、皮相電力計測値の最小値, 最大値の 1/2, 最大値の 1/4 と変えて検討した。このように

求めた LDC パラメータを用いて、SVR の動作シミュレーションを行い、各ノードの電圧値から評価指標 F1, F2 を求めた。case 3～6 のシミュレーション結果波形を図 2-13～図 2-16 に示す。

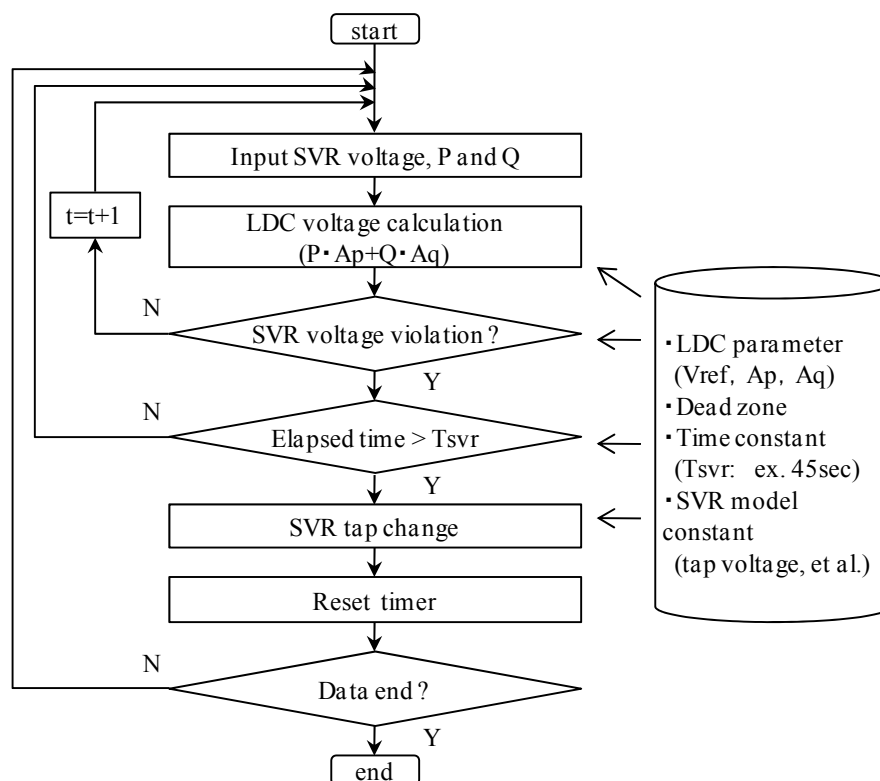


図 2-12 SVR シミュレーション処理概要

表 2-1 SVR シミュレーションケース

case	Evalatiton index		LDC parameter			Calculation condition for conventional method					Remarks
	F1(V)	F2(V)	Vref(V)	Ap	Aq	Power factor	V1 (V)	V2 (V)	S1 (kVA)	S2 (kVA)	
1	89.6	−100.4									without SVR
2	166.1	10.9									Actual operation
3	245.1	221.2	6579	0.011	0.015						Ideal conditon
4	191.6	77.6	6579	0.011	0.015						Proposed method (Setting with detailed data)
5	182.7	77.6	6649	−0.010	0.030						Proposed method (Setting with intermittent data)
6	127.8	−53.7	5937	0.279	0.000	1.00	6850	6600	3275	2378	Conventional method (S2=Smin)
7	1.8	−216.5		0.273	0.055	0.70					
8	−6.3	−254.2		0.106	0.258	0.38					
9	144.4	−53.7	6350	0.153	0.000	1.00				1638	Conventional method (S2=Smax/2)
10	118.0	−71.3		0.107	0.109	0.70					
11	31.2	−152.4		0.058	0.141	0.38					
12	84.3	−90.4	6517	0.102	0.000	1.00				819	Conventional method (S2=Smax/4)
13	165.8	42.8		0.071	0.073	0.70					
14	139.0	−21.3		0.039	0.094	0.38					

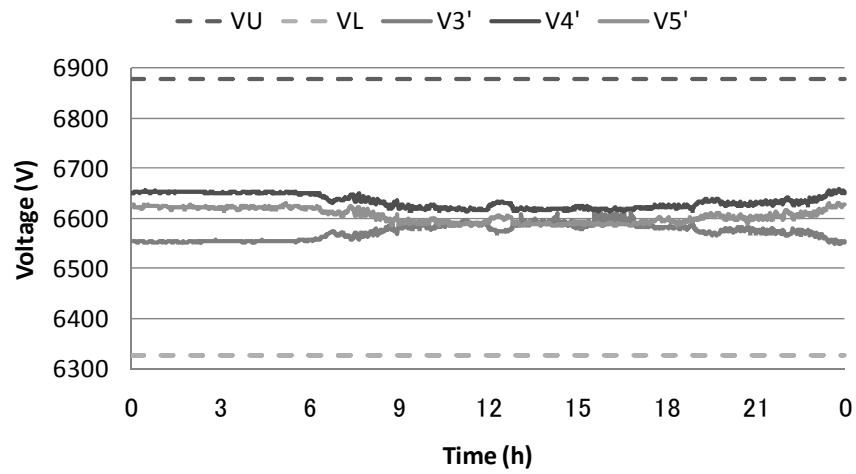
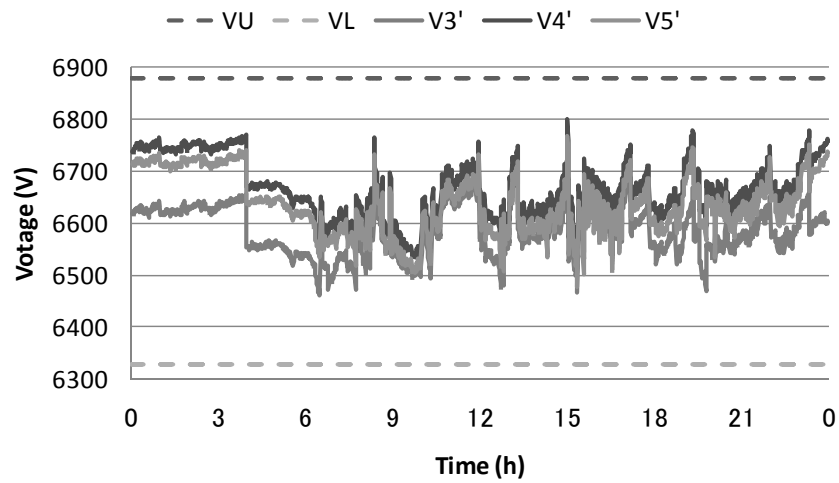
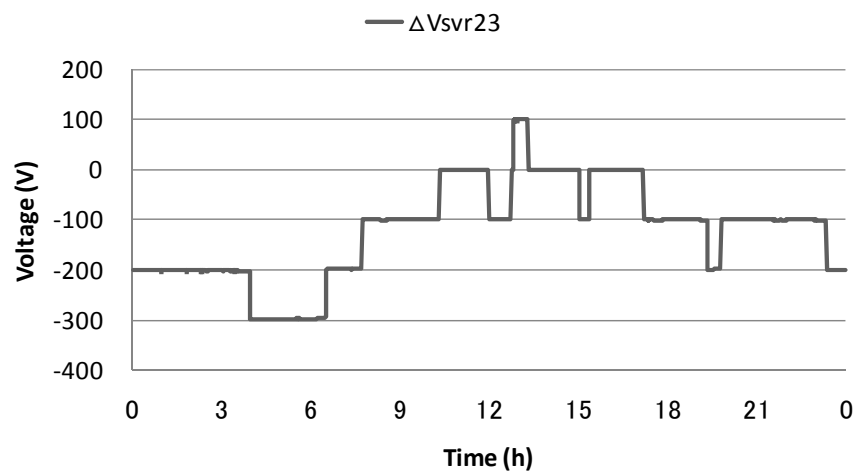


図 2-13 シミュレーション結果：case3

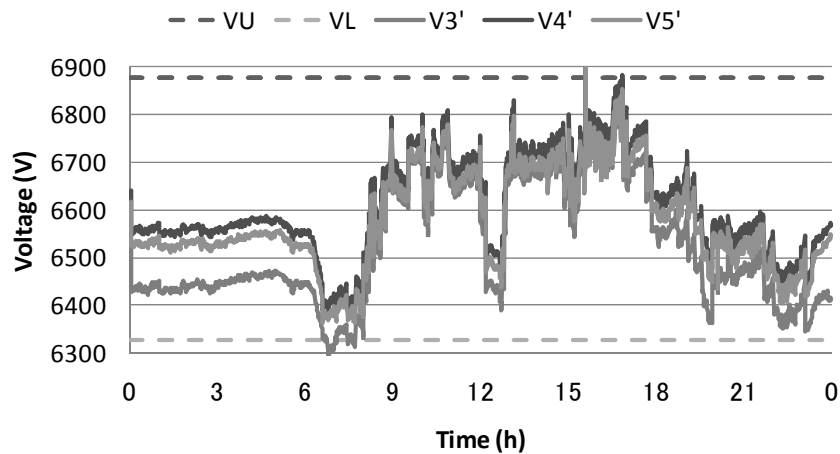


(a) 電圧値

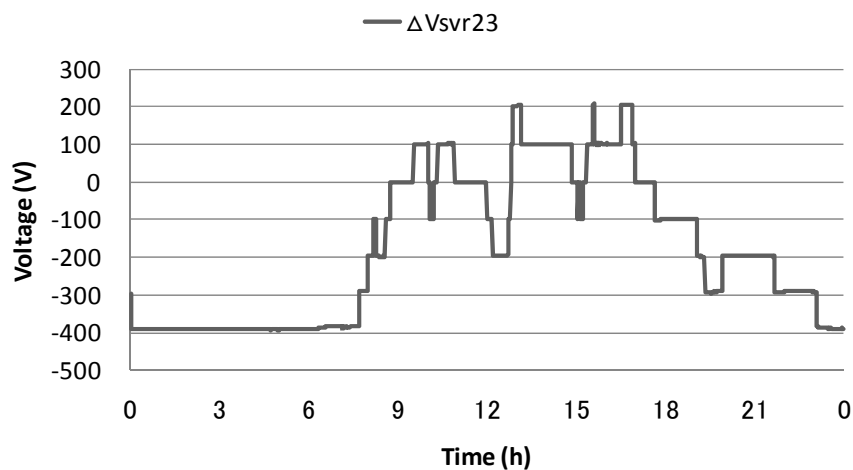


(b) SVR tap 動作

図 2-15 シミュレーション結果：case5



(a) 電圧値



(b) SVR tap 動作

図 2-16 シミュレーション結果：case6

2.4.4 結果と考察

シミュレーションおよび評価指標から、次のことが考えられる。

- ・ case 3 の提案手法による理想状態では、各評価指標とも全ケース中最もよい結果となっている。理想状態では、SVR のタップの電圧調整ステップを考慮していない（連続的に制御可能な状況）。タップの電圧調整幅を考慮する場合は、このケースより評価指標は悪くなると考えられる。
- ・ case 4 の提案手法では、case 3 よりは劣るものの、電圧を上下限範囲に制御されており、評価指標も case 3 以外で最もよい値となっている。
- ・ case 5 は、配電自動化システムで収集した 1 時間毎の測定データを元に提案手法で SVR の整定を行ったケースで、詳細計測データを用いた場合と同様に電圧は規定範囲に収まっている。また、評価指標も case 4 に近い結果が得られている。1 時間毎の開閉器計測データを活用することで、SVR の効率的整定が可能になる見通しが得られたと考える。
- ・ case 6～14 では、case 13 をのぞいて電圧を規定範囲に収めることができていない。従来手法は、時間

によって力率（ P 、 Q の比率）が大きく異なる場合には、力率設定、最小電流設定を適切に選択することが課題と考えられる。

2.5 結言

本報告では、SVR 自端情報を含む系統内の計測実績値を基に、SVR の LDC パラメータを整定する手法を提案した。また、実際の配電系統の計測データを用いた SVR 動作シミュレーションによって、LDC パラメータ決定アルゴリズムの評価結果について示した。提案手法により、SVR を通過する有効、無効電力と、配電系統の電圧の関係を分析することで、SVR の電圧制御機能を効果的に動作させることが可能となる見通しが得られた。

第3章 自端計測情報の相関関係を利用した複数台 SVR の協調制御手法[19]

3.1 緒言

太陽光発電等の小規模分散形電源の系統連系対策や、力率改善用コンデンサに起因するフェランチ現象の対策など、配電系統の電圧管理が複雑になってきている。一方で、配電系統の電圧、電流等を計測可能なセンサの普及が進みつつある。このような状況において、配電系統の電圧調整を担う、配電用変電所の負荷時タップ切換え変圧器（LRT：Load Ratio control Transformer）や自動電圧調整器（SVR：Step Voltage Regulator）の役割が重要となり、近年計測情報に基づいた整定や制御による効果的な電圧制御を可能とする検討がなされている[5]-[9], [15]-[17]。例えば、リアルタイムの計測情報に基づき、SVR や LRT（load ratio control transformer）のタップ値を最適に決定する手法[7]や、電圧制御装置間の情報通信によって複数の機器を協調的に動作させる手法[8]が検討されている。一方で、配電系統の通信網を、リアルタイムの制御に活用するためには、信頼性のある高速通信網の設備投資が必要となる。そのため、現在得られるモニタリング計測情報を活用し、自端計測情報で制御可能な従来の電圧制御機器を有効に動作させることが重要となる。

ここで、SVR 等のタップ切換え式の制御機器が、同一フィーダに複数台設置され、その末端側に太陽光発電が連系される場合を考える。一般にフィーダ末端側に設置される SVR は、送出し側（変電所側）に設置される機器よりも応答時定数を遅く設定することで、SVR の不要なタップ動作を低減する協調動作が可能となる。このような状況で、フィーダ末端の太陽光発電出力の急変に起因する電圧変動が発生し、末端側の SVR のみが動作すればよいケースでは、フィーダ末端の電圧変動解消まで時間がかかる課題があった。

本章では、配電系統に設置された複数の SVR を協調して動作させるアルゴリズムを提案する。本手法は、配電変電所側の SVR が動作しなくてよい場合にのみ、フィーダ末端側の SVR を動作させる方式であり、（１）過去の計測データから求めた相関モデルを用いて他の SVR の動作を推測すること、（２）自端の電圧・電流のみを制御に用いることで動作時の SVR 間の通信が不要となること、が特徴である。これにより、不要なタップ動作を回避しつつ、SVR の動作時間遅れを低減することが可能となる。開発したアルゴリズムを、実系統の計測データを用いてシミュレーションで検証したところ、従来に比べて配電系統の電圧余裕を最大で10%程度拡大することが可能となった。

3.2 複数台 SVR の協調アルゴリズム

3.2.1 SVR 制御応答の概要

SVR の電圧調整は、入力電圧（二次側電圧+LDC（Line Drop Compensation）による補正電圧の合計）が基準電圧に対し偏差を生じた場合、電圧が不感帯を超えるほど高くなった場合にはタップを下げ、低くなった場合にはタップを上げることで行われる[9]。電圧が逸脱してからタップ動作までの時間の決定方式はいくつかあり、例えば定限時動作の場合は電圧逸脱開始から一定時間経過した場合にタップ動作を行う方式となる。この動作時間の整定は例えば、「45, 60, 90, 120・・・180 秒」のような整定値から選択される。SVR が同一のフィーダに直列に複数台設置される場合、通常は送出し側に近い SVR ほど動作時間が短くなるように整定される。

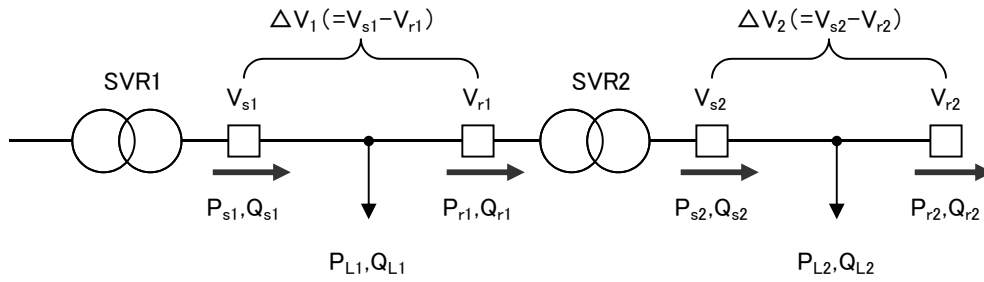


図 3-1 相関を持つと考えられるフィード計測値

3.2.2 自端計測情報による協調制御手法案

図 3-1 に示すように、送出し側に SVR1、末端側に SVR2 が設置されるフィードを考える。SVR1, SVR2 は同じフィードの幹線に設置されていることを想定すると、これら二つの SVR の通過電流（もしくは P, Q）と電圧は、互いに何らかの相関関係があると考えられる。例えば、末端の負荷が大きくなった場合、各々の線路の電流は増加し、また電圧は低下することになる。SVR2 の電流が大きくなれば、SVR1 の電流も大きくなり、SVR1 端の電圧も低下する、というような相関関係があると考えられる。SVR 付近で、あらかじめ測定された計測実績データを重回帰分析などによって分析することで、これらの相関関係を明らかにすることが可能と思われる。この相関関係から、末端側の SVR は、送り出し側の SVR が動作する条件にあるか、そうでないかを推定し、SVR 制御動作を決定することが考えられる。

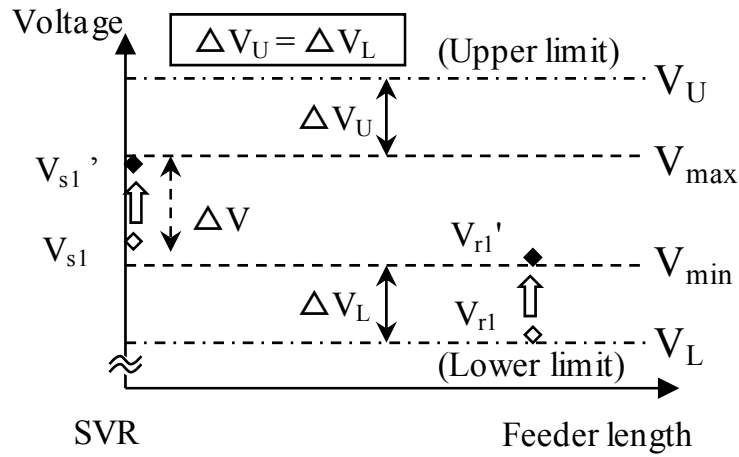
3.2.3 制御アルゴリズム

前述のように、フィード末端側に設置される SVR は動作時間が長く設定されるため、末端での電圧変動に対して SVR の動作が遅れ、電圧逸脱が懸念される。これに対し、末端側の SVR のみの動作で電圧維持が可能な場合は、末端側の SVR の動作時間を短くする

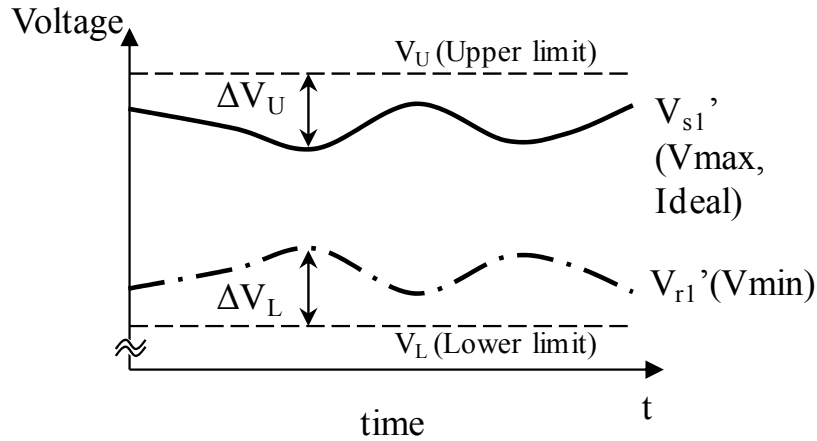
方法が考えられる。すなわち、送出し側の SVR のタップが変更されそうにない（不感帯内にある）場合、末端側の SVR が速やかに動作可能な方法を考えることとする。

図 3-1 のような複数台の SVR が設置された系統を考える。ここで、SVR2 は、SVR1 の動作を把握する必要があるが、通常 SVR2 は自端の 1 次側及び 2 次側の電圧、電流（P, Q）のみ計測可能である。この条件で、SVR1 の動作状況把握とそれに伴う SVR2 制御のアルゴリズムを以下に示す。

（ステップ 1）計測実績値から、SVR2 の一次側電圧値 V_{r1} と、SVR1 の理想的な電圧値 V_{s1}' の関係を求める。ここで、SVR の理想的な電圧は、「SVR から末端側の SVR またはフィード末端までの区間のノード電圧が、電圧上限値までの余裕量と電圧下限値までの余裕量が等しい」状態となるような、SVR 電圧値として定義する[15]。具体的には、図 3-2 (a) に示すように（SVR の電圧調整を連続的可能であると仮定し）、対象区間内の ΔV_U （電圧最大値 V_{max} と電圧上限値 V_U の差）と ΔV_L （電圧下限値 V_L と電圧最小値 V_{min} の差）が等しくなるように V_{s1}' を ΔV ほど（SVR の電圧調整機能で）変化させる（図中の $V_{s1} \rightarrow V_{s1}'$ に相当）。このとき V_{r1} も ΔV ほど同様に变化するとみなす。電圧調整後の SVR 二次側電圧を V_{s1}' とする。各時刻でこの処理を行うことで図 3-2 (b) に示すように V_{s1}' の時系列データが得られる。ここで、各時刻の V_{s1}' は、式(3-1)のように計算すればよい。



(a) SVR の理想電圧 V_{s1}' の計算方法



(b) SVR およびノード電圧の時間変化イメージ

図 3-2 SVR の理想電圧の計算概要

$$V_{s1}' = V_{s1} + \frac{V_U + V_L - V_{\max} - V_{\min}}{2} \quad (3-1)$$

ここで、 V_U 、 V_L は各々ノードの電圧上限・下限値、 V_{\max} 、 V_{\min} はSVR制御対象範囲内の電圧最大・最小値を表す。実際の（測定された） V_{r1} とFig. 2(a)に示すように計算された V_{r1}' の差が、SVR1の不感帯より小さければ、実際の V_{s1} と式(3-1)で示す理想値 V_{s1}' の差も、SVR1の不感帯より小さいと推測される。このときSVR1のタップは動作する条件にない（不感帯内にある）と考えられる。

（ステップ2）SVR2で計測可能な値の相関を求める。理想的にSVR1が制御された場合、すなわちSVR1の二次側電圧 V_{s1} と式(3-1)の V_{s1}' の差がSVR1の不感帯より小さくなるようにSVR1電圧が制御される場合を仮定する。この前提条件で、 V_{r1} の滞在範囲（領域 α ）を求める。具体的には、図3-3に示すように、重回帰分析によって、 P_{r1} 、 Q_{r1} と V_{r1} の相関を求める。相関係数は、 P_{r1} 、 Q_{r1} に対応するものを A_p 、

A_q , 切片を V_{ref} と定義する。これにより, V_{r1} の推定値 V_{r1}' は, (3-2)式で表すことができる。また, 領域” α ” は, 回帰分析で求めた平面にばらつきの範囲を加えた領域と定義できる。 $SVR2$ の P_{r1} , Q_{r1} に対し, V_{r1} が領域 α 内にあるかで, $SVR1$ のタップが変更されるかを予測する。不感帯を $\pm V_d$ とすると, α の領域は式(3-3)で表される。

$$V_{r1}' = V_{ref} + A_p \cdot P_{r1} + A_q \cdot Q_{r1} \quad (3-2)$$

$$V_{r1}' - V_d < V_{r1} < V_{r1}' + V_d \quad (3-3)$$

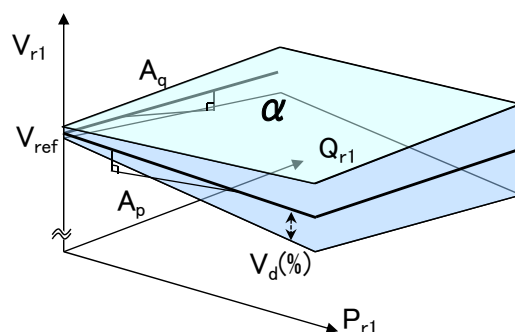


図 3-3 V_{r1} の滞在範囲（領域 α ）

(ステップ 3) $SVR2$ の動作時間を変更する。 $SVR1$ が不感帯内（式(3-3)を満たす, 領域 α 内にある）にあれば, $SVR1$ の動作を待たずに次のように $SVR2$ を動作させる。

- (i) V_{r1} が領域 α の内部 : $SVR2$ の応答時定数低減 (例えば 90 秒→45 秒)
- (ii) V_{r1} が領域 α の外部 : $SVR2$ の応答時定数変更なし (例えば 90 秒)

このように, P_{r1} , Q_{r1} , V_{r1} に応じて, 動的に応答時定数を変更するような制御を行えばよい。応答時定数は, 例えば送出し側の SVR と同じ時定数に設定すると, SVR が複数台設置されることによる動作遅れは回避されることが考えられる。

(ステップ 3)の具体的処理フローを図 3-4 に, 制御効果のイメージを図 3-5 に示す。このような制御により, 電圧逸脱の可能性を小さくでき, また早い周期の電圧変動を抑制するために必要となる SVC などの高速応答可能な電圧制御機器の必要容量を削減できる。

このような協調制御が必要となる条件について補足する。例えば, 多数の太陽光発電がフィードに設置されている晴天時に, フィード末端側から曇ってくるようなケースが考えられる (図 3-6 参照)。この他にも, 末端にオール電化住宅が集中したり, 末端に出力変化を伴う誘導機のような負荷が設置されたり, 電気自動車の急速充電器が設置されるようなケースも同様の現象となることが考えられる。

また, $SVR1$ の上位側の電圧 (例えば, 配電用変電所のバンク送り出し電圧) の変動によって, V_{s1} や V_{r1} が変動することが考えられる。この場合, 提案手法では, $SVR1$ がまず動作することになり, 従来手法と同様に SVR のハンチングを起こすことなく電圧調整が可能である。

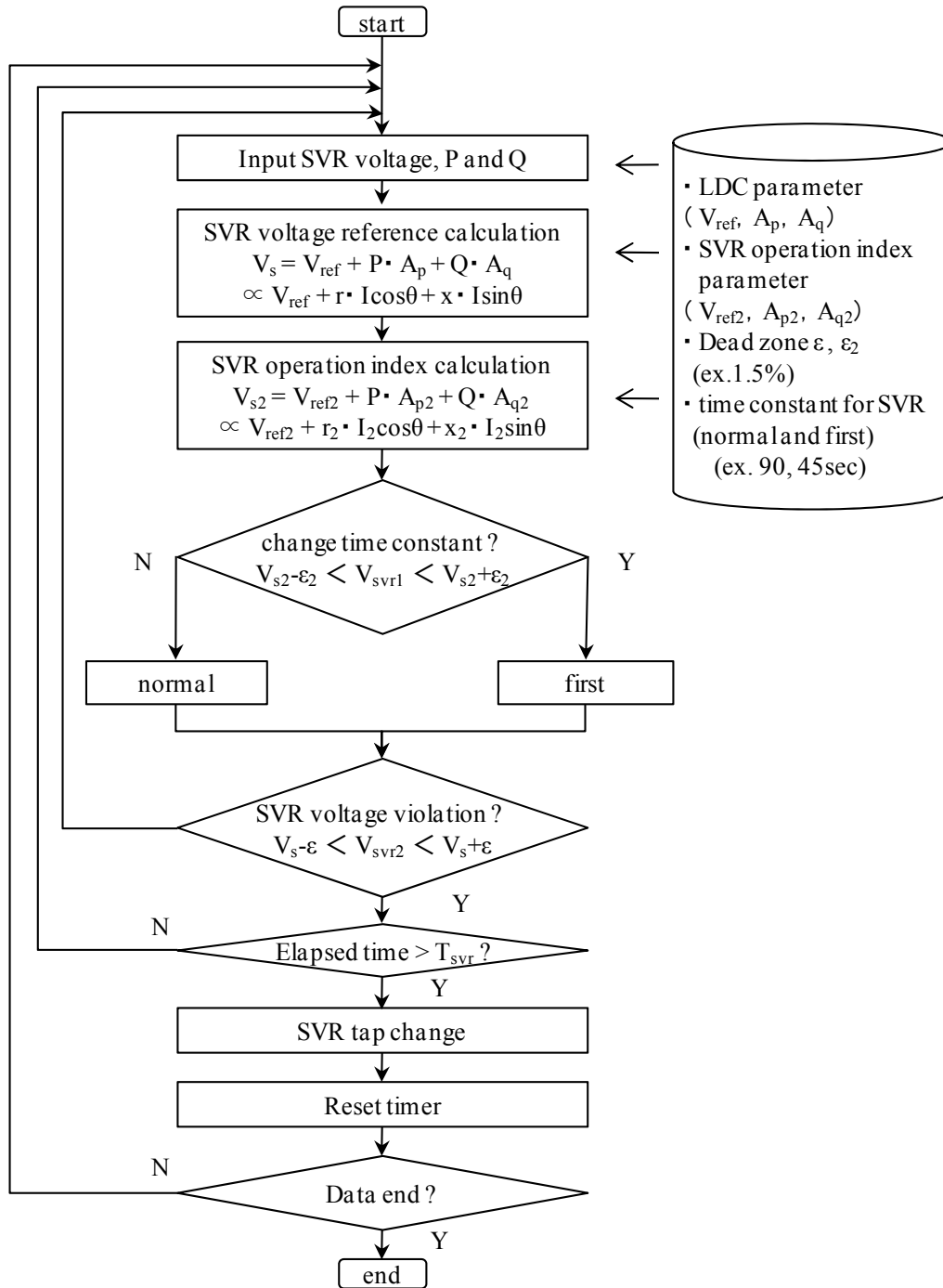
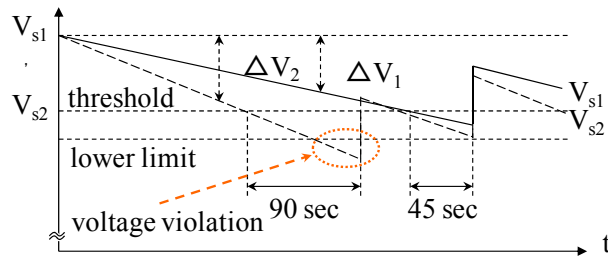
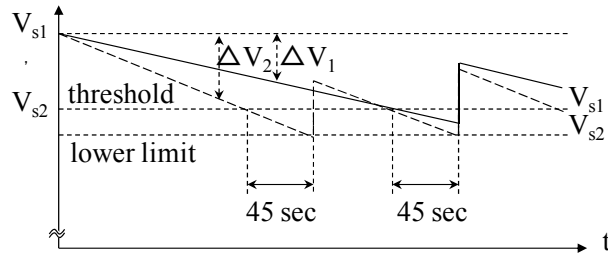


図 3-4 SVR 協調制御の処理フロー



(a) 協調制御なし



(b) 協調制御あり

図 3-5 SVR 協調制御による電圧制御イメージ

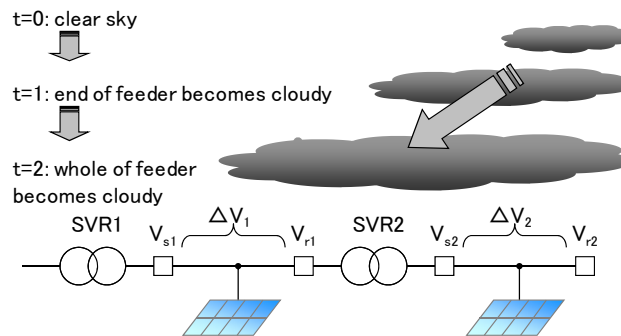


図 3-6 雲の移動で太陽光発電出力が変化する事例

3.3 シミュレーション検証

3.3.1 計算条件

前述の手法を，実測データを用いたシミュレーションによって評価を進めた。まず，実測データについて説明する。図 3-7 に概略を示すような実際の配電線フィーダに計測装置を 5 ヶ所設置し，各相の電圧・電流実効値，有効・無効・皮相電力，力率等を，1 分毎に測定した[5]。測定は 2009 年の 10 月～11 月にかけて実施した。測定点 3 の有効・無効電力を図 3-8 に示す。また，この期間の SVR のタップ動作状況を測定点 2，3 の電圧値から推定した結果を図 3-9 に示す。これより，SVR による電圧調整が行われなかった場合（素通しタップの状態）の各地点の電圧を近似的に求めた結果を，図 3-10 に示す。

次にシミュレーション条件を示す。図 3-11 に示すモデルシステムを検討対象とした。図 3-7 の系統の変電所と SVR 設置点に，各々 SVR を設置（図中の SVR1，SVR2）したシステムモデルとした。SVR1 の 1 次側電圧は測定値が存在しないため，ここでは地点 2 の電圧データを用いて変動を仮定した。SVR の 2 次側電

圧（地点 1, 3 に相当）が SVR のタップ制御によって変化するため、各時刻の地点 1, 2 間、地点 3, 4 間、地点 3, 5 間の電圧差分値を計測値からもとめて、SVR 2 次側電圧に加えることによって、各地点の電圧を計算した。

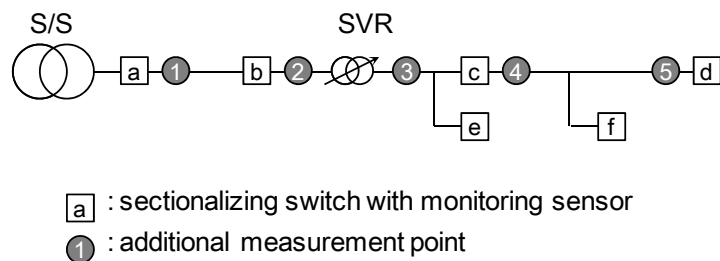


図 3-7 例題系統構成と計測ポイント

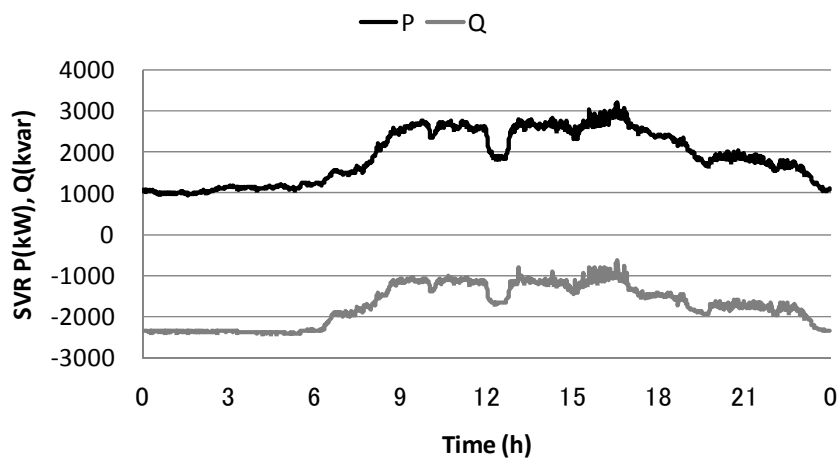


図 3-8 有効・無効電力計測値（Q は進みを負で表示）

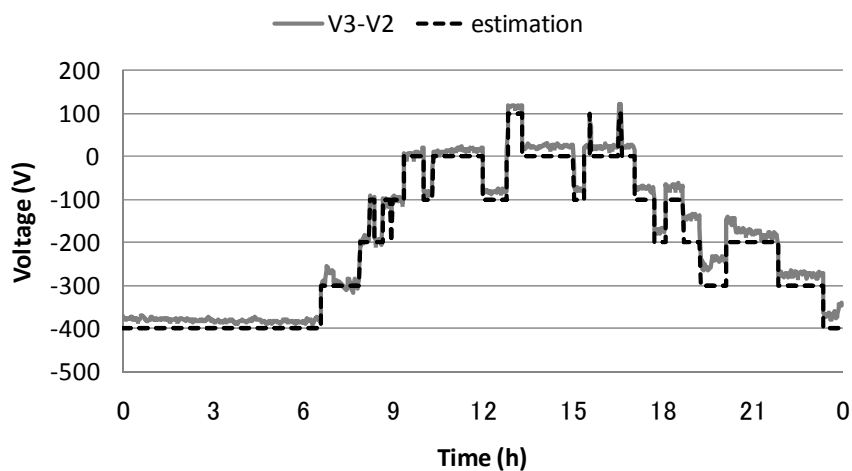


図 3-9 SVR のタップ動作

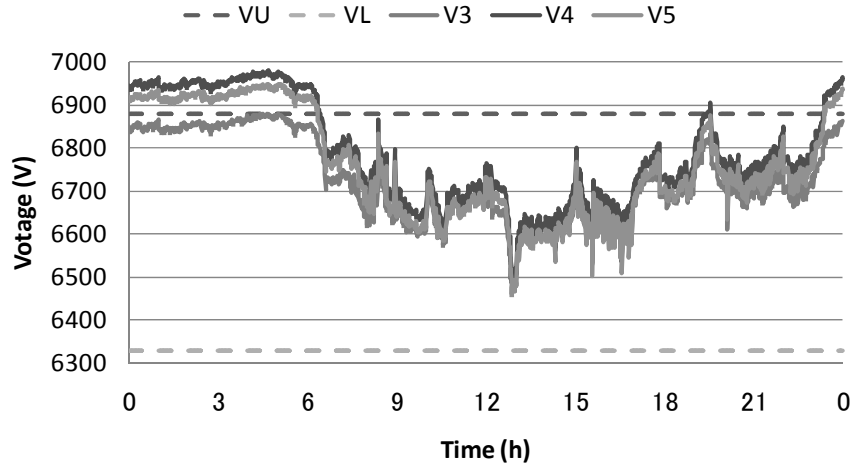


図 3-10 SVR のタップ素通し時の電圧推定値

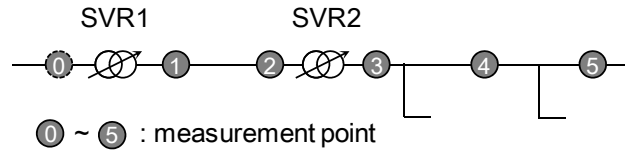


図 3-11 例題系統

3.3.2 計算手順

シミュレーション検討の流れを以下に示す。

(i) SVR2 が素通しタップの場合の地点 3 の電圧値の把握

(ii) 地点 1, 2 間, 地点 3, 4 間, 地点 3, 5 間の電圧差分値 ΔV_{12} , ΔV_{34} , ΔV_{35} を計算 ((3-4)~(3-6) 式参照)

$$\Delta V_{12} = V_1 - V_2 \quad (3-4)$$

$$\Delta V_{34} = V_3 - V_4 \quad (3-5)$$

$$\Delta V_{35} = V_3 - V_5 \quad (3-6)$$

(iii) SVR1, SVR2 の LDC パラメータの決定

計測値から, 各 SVR の LDC パラメータを, 文献[15]に示す重回帰分析によって計算する。

SVR1 : V_1 , V_2 , P_1 , Q_1 から V_{ref1} , A_{p1} , A_{q1} を決定

SVR2 : $V_3 \sim V_5$, P_3 , Q_3 から V_{ref2} , A_{p2} , A_{q2} を決定

(iv) 領域 α を表すパラメータの計算

計測値から, 領域 α を表すパラメータを, 重回帰分析によって計算

α : V_2 , P_3 , Q_3 から V_{ref} , A_p , A_q を決定

(v) SVR 動作シミュレーションで SVR 2 次側電圧を計算。SVR 2 次側電圧と ΔV_{12} , ΔV_{34} , ΔV_{35} から各地点の電圧値を決定。

(vi) 電圧余裕を表す評価指標 F_1 , F_2 を計算

次に、(iii)の SVR1, SVR2 の LDC パラメータ，領域 α を表すパラメータの決定について説明する。計測値から，各 SVR の LDC パラメータを，文献[15]に示す重回帰分析によって計算した。領域 α も同様に重回帰分析によって計算した。各々の整定パラメータを表 1 に示す。

評価指標 F1, F2 は，文献[15]と同じく(3-7)(3-8)式で定義した。

(a) 電圧上下限值までの余裕量の平均値

$$F_1 = \frac{\sum_t \left(\min_i (\Delta V_{Uit}, \Delta V_{Lit}) \right)}{t} \quad (V) \quad (3-7)$$

(b) 電圧上下限值までの余裕量の最小値

$$F_2 = \min_{i,t} (\Delta V_{Uit}, \Delta V_{Lit}) \quad (V) \quad (3-7)$$

ここで， i ：ノード， t ：時刻， ΔV_{Uit} ， ΔV_{Lit} ：時刻 t ，ノード i の電圧の上限，下限までの各余裕量

F_1 ， F_2 とも評価指標の値が大きい方が，電圧余裕が大きいことを示す。各評価指標の値は，各時刻の電圧余裕の目安となると考えられる。

次に，例題システムを対象としたシミュレーション条件を示す。評価に用いる電圧上下限値は，以下に示すように，低圧系統の変圧器直下の電圧が 103～107V の範囲となるような範囲を想定した。ここで，柱上変圧器のタップは，電圧が高い部分は 6750V に，低い部分は 6450V に設定されると仮定した。

- ・電圧上限：6879 (V) （柱上変圧器タップ 6750 (V) で低圧電圧 107 (V)に相当）
- ・電圧下限：6327 (V) （柱上変圧器タップ 6450 (V) で低圧電圧 103 (V)に相当）

また，不感帯は各ケース，いずれの SVR も 1.5(%)とした。

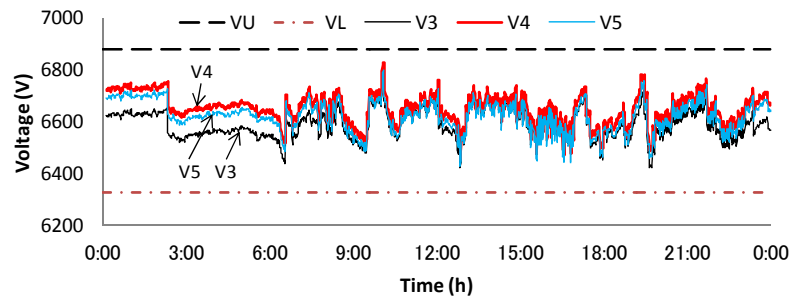
SVR1, SVR2 の LDC パラメータ，領域 α を表すパラメータは，前述の手順 (iii)，(iv) に従って決定した。各整定パラメータを表 3-1 に示す。また，シミュレーション条件を表 3-2 に示す。なお，今回の検討では，計測データが 1 分周期のため，SVR の動作時定数を長めに設定して検討した。例えば，通常は 45 秒で動作する場合は SVR が瞬時に動作する場合と同じ評価結果となるために，例えば，2 分と長めに設定して検討を行った。

表 3-1 SVR 整定パラメータ

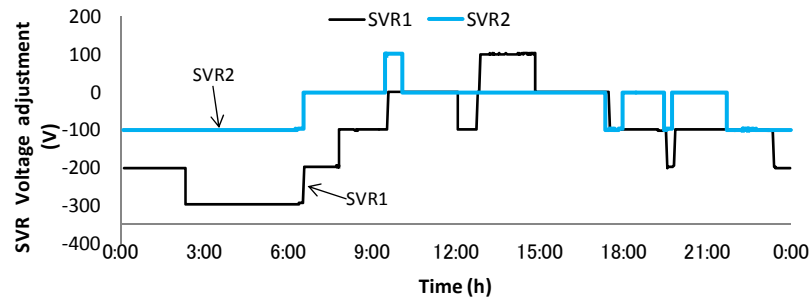
	Vref	Ap	Aq
SVR1	6509.8	0.037	0.004
SVR2	6578.9	0.011	0.015
α	6689.3	-0.039	-0.002

表 3-2 SVR シミュレーション結果

case	Time constant (min)		SVR2 modified time constant (min)	Evalatiton index(V)				number of tap action		remarks
				V1,V2		V3-V5				
	SVR1	SVR2		F1	F2	F1	F2	SVR1	SVR2	
1	∞	∞	---	115	-104	62	-201	0	0	SVR tap fixed
2	2.0	6.0	---	206	98	199	50	12	8	SVR1 operates in first
3	2.0	2.0	---	206	98	183	50	12	10	Time constant of SVR1 and SVR2 are the same
4	2.0	0.5	---	206	98	212	98	14	21	SVR2 operates in first
5	0.5	6.0	---	211	129	203	50	14	8	SVR1 operates in a moment
6	0.5	0.5	---	211	129	212	98	14	19	both SVRs operate in a moment
7	2.0	6.0	0.5	206	98	206	98	12	22	SVR2 operates in first (cf. case 2)
8	2.0	6.0	2.0	206	98	201	97	12	16	SVR2 operates in first (cf. case 2)
9	0.5	6.0	0.5	211	129	210	98	14	18	SVR2 operates in first (cf. case 6)

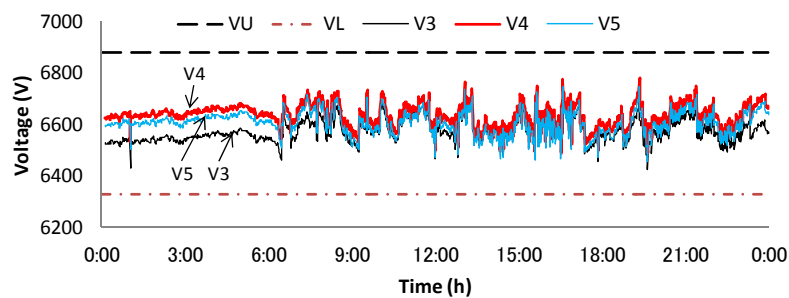


(a) ノード電圧

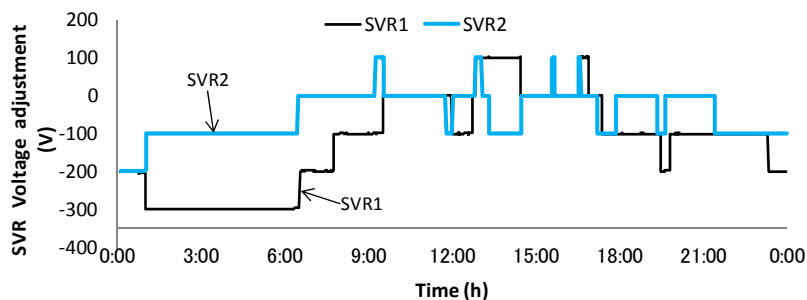


(b) SVR 電圧調整量

図 3-12 シミュレーション結果 (case2)

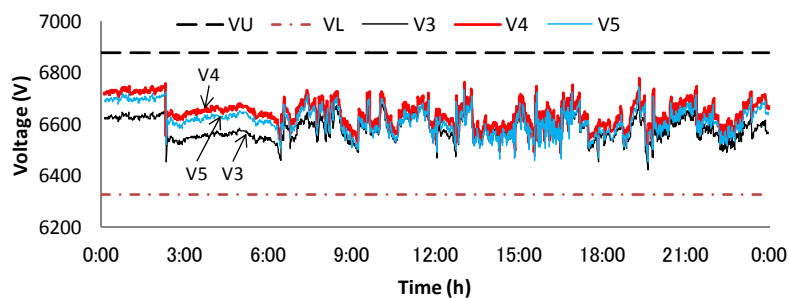


(a) ノード電圧

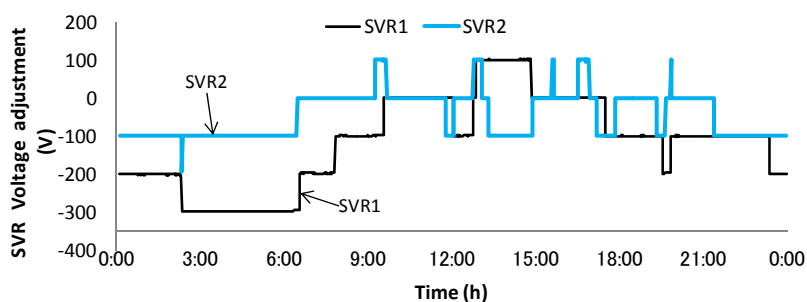


(b) SVR 電圧調整量

図 3-13 シミュレーション結果 (case7)

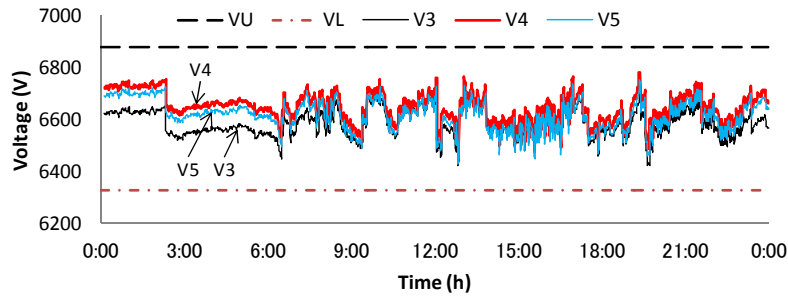


(a) ノード電圧

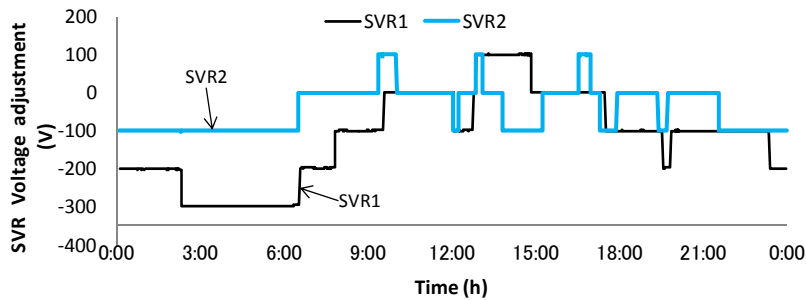


(b) SVR 電圧調整量

図 3-14 シミュレーション結果 (case8)



(a) ノード電圧



(b) SVR 電圧調整量

図 3-15 シミュレーション結果 (case9)

3.3.3 結果と考察

まず、式(3-2)(3-3)に基づく時定数切換え制御をおこなう前段階として、SVR1、SVR2 の時定数をパラメータとした場合の電圧余裕評価指標を求めた（ケース 1~6）。次に、時定数切換え制御を行った場合のシミュレーションを行い、電圧余裕評価指標を求めた。シミュレーション評価指標計算結果を Table 2 に、動作波形を図 3-12~図 3-15 に示す。

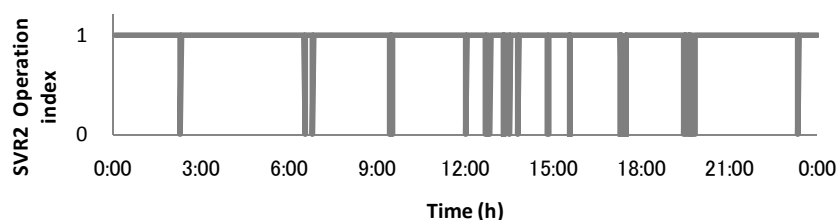
シミュレーション結果より、次のことがわかる。

- ・SVR が動作しない場合は、SVR1、SVR2 の担当区間の電圧が逸脱するような条件となっている。(case1)
- ・送出し側の SVR1 が早く動作する場合は、SVR1 の担当区間の評価指標は SVR1 の時定数に応じて大きい値となっているが、SVR2 の担当区間の評価指標は変化なく改善されない。(ケース 2, 5)
- ・末端側の SVR2 が早く動作する場合は、末端側の評価指標が改善される。(ケース 3, 4)
- ・両 SVR とともに瞬時に動作する場合の評価指標は、今回の検討ケースで最良の結果となっている（ケース 6)
- ・協調制御を行ったケース 7~9 では、時定数が等しい協調制御を行わないケースに比べて、タップ動作が増加し、評価指標が改善されている。また、SVR2 の時定数を高速に固定したケースに比べて、SVR 2 台のタップ動作合計回数が減少している。また評価指標も、例えばケース 7 とケース 4 の比較では 5V 程度の低下に収まっている。
- ・V3-V5 区間の電圧余裕評価指標 F2 は従来方式のケース 2 では 50V であるが、提案手法のケース 8 では 97V に拡大している。高圧配電システムでは、重負荷時に約 500V 電圧が低下すると SVR を設置するよう

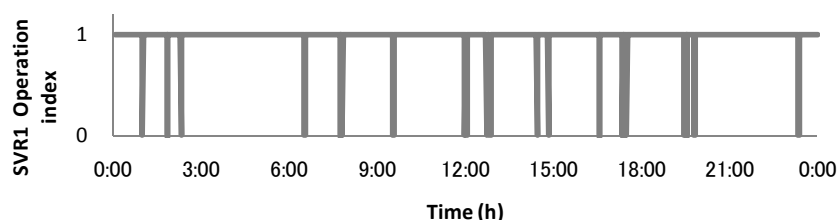
な運用がなされており、これより高圧系統の電圧管理幅は約 500V が目安となる。今回のケース 2 からケース 8 への電圧余裕拡大量は 47V であり、これは高圧配電系統の電圧余裕を約 10 % 拡大することに相当する。

以上より、末端側に設置された SVR 動作が早ければ、評価指標が改善する（電圧余裕が拡大する）ことが伺える。また、末端側の SVR2 の自端情報から、SVR1 のタップ動作を推定し、時定数を変更することで、電圧余裕指標を改善する、適応的制御が可能となると考えられる。実際には、SVR のハンチング動作の防止を考えて、変更する時定数を適切に設定する必要がある。

また、図 3-16 に case7 の SVR2 の動作時間短縮判定結果を示した。(a)は SVR2 が SVR1 の動作を推定した値を、(b)は SVR1 の動作の値を示している。各々、値が 0 の場合は SVR1 で電圧調整の可能性がある時間帯、値が 1 の場合は SVR1 で電圧調整の可能性がない時間帯を示す。SVR1 が動作する時間帯を、SVR2 でもある程度推測できているように伺える。詳細には、SVR2 の自端情報から SVR1 の電圧逸脱を約 95 % の時間帯で推定できていることがわかった。



(a) SVR2 が SVR1 の動作を推定した値



(b) SVR1 の動作の値

図 3-16 SVR2 の動作時間短縮判定結果

3.4 結言

本報告では、複数の SVR を自端情報によって協調的に動作可能な制御アルゴリズムを提案し、系統の測定データを用いたシミュレーションで有効性を確認した。同一フィーダに複数台の SVR が設置される場合に、SVR の動作遅れが発生することを、SVR の自端情報によって協調的に制御するアルゴリズムを提案した。あらかじめ計測したデータの相関関係を把握することで、SVR が他の SVR の動作を推測し、適応的な制御を可能とした。また、実系統の計測データを用いたシミュレーションによって、有効性の検討を行った。例題系統を対象に、フィーダ末端側の SVR の時定数を適応的に変更することで、電圧余裕を拡大できる見通しを得た。

今後は、時定数の適切な決定方法、SVR 等の電圧調整装置コントローラの機能検証、制御パラメータ決定支援システム等の検討を進める予定である。

第4章 マルチエージェントシステムを用いた電圧制御機器の自律分散制御[63]

4.1 緒言

近年、再生可能エネルギーの普及拡大によって、電力系統の信頼性低下が問題になっている。日本では、2030年までに太陽光発電（Photovoltaic, PV）が導入されることが予想されており、これは軽負荷期の最大需要の40%に達する容量である。このような変動をともしう PV の大量連系に対し、電力系統の信頼性を確保可能な新しい手法の開発が必要となる。これまでに、ロバストな電力系統の信頼性の課題について、文献[10]-[24]で検討されている。ルーフトップ型の PV や、数 MW 以下のメガソーラは、主に配電系統のフィーダに連系される。これにより、配電系統の電圧制御が重要な課題となっている。電圧制御の課題は、これまでに主として基幹系統の電圧無効電力制御や電圧安定化問題として検討がなされている[25]-[28]。一方で、近年は分散電源（Distributed renewable energy generation, DG）の出力変動にともなう、配電系統の電圧の規定範囲逸脱や、電圧変動の課題が顕在化しつつある。これに対し、力率改善用キャパシタ（Shunt capacitor, SC）、静止型無効電力補償装置（Static var compensator, SVC, STATCOM）、配電用変電所の負荷時タップ切換変圧器（on-load tap changing transformer in distribution substation, OLTC）、線路電圧調整装置（Step voltage regulator, SVR）のような電圧調整機器の活用や、分散電源の制御による対策が検討されている[29]-[60]。これらの研究は、いくつかの分野に分類できる。

まず、配電系統のフィーダに設置された開閉器の開閉操作によって、配電系統の損失を最小化するような、系統構成の最適スケジュール問題が検討されている[29]-[38]。損失が最小化されるような配電系統の状態は、フィーダや分岐線の電流の大きさが均等化されている状態であり、これは電圧の極端な上昇や低下が避けられている状態といえる。フィーダの負荷の容量に対して分散電源の容量が小さい場合、最適スケジュール手法は有効に働くと考えられる。

次に、自端情報に基づいてリアルタイム制御を行う「ローカル制御方式」が開発されている。具体的には、OLTC の最適パラメータ設定[39][40]、OLTC の不感帯制御[41]、OLTC と STATCOM の協調制御[42]、複数フィーダを考慮した OLTC のオンライン最適制御[43][44]、などが検討されている。これらの手法は、最適スケジューリング[45][46]、分散電源による電圧制御[47]-[49]、分散電源の出力抑制[50]と組合せて用いられる場合もある。ローカル制御手法は、複数機器の協調的な制御は限定されるが、各機器が独立して動作するシンプルな制御方式であり、また他の機器や監視制御装置との通信も不要であるなど、信頼性の高い方式と言える。

集中制御手法[51]-[55]は、制御性能を最大化する直接的な手法である。集中制御手法では、状態推定と最適潮流計算を用いることで、配電系統全体を逐次最適に制御することが可能である。一方で、この手法は、配電系統のセンサや電圧制御装置と、配電系統のコントロールセンタとの間に、信頼性の高い通信ネットワークが必要である。また、このような制御システムはより複雑となることで、トータルシステムの信頼性維持が難しくなる側面もある。例えば、これらのシステムでは、状態推定機能のために同期した計測データが必要とされるが、データ欠損やシステム故障などの障害に対応するための設備構成が必要となる。

一方で、分散制御方式は、制御システムの最適性、自律性、信頼性を適度に満足させる手法である[55]-[60]。分散制御手法は、マルチエージェントによってローカル制御間の情報交換を行うことで、制御

性能を向上させるものである。例えば、文献[55]では、分散電源の出力配分決定問題に、マルチエージェントを活用した制御手法が提案されている。また、文献[56]では、OLTCの協調制御手法が提案されているが、その遠隔端末装置（Remote terminal units, RTU）はマルチエージェントとして扱われている。文献[57][58]には、電圧調整装置と分散電源の協調制御方式が提案されている。このような分散制御手法では、エージェント間の情報交換、協調などの調整処理アルゴリズムに、制御性能が大きく依存することになる。

本研究では、これまでの研究[59][60]を拡張し、配電系統のOLTCの新しい電圧制御手法を提案する。本研究の新しい提案機能は、以下の(a)～(c)の通りである。

- (a) 最適制御問題は、マルチエージェントシステムに適した最適な条件（指標 S ）を導出する問題として、定式化される。これにより、集中制御手法を使うことなく、シンプルな方式で制御の最適性が保証される。
- (b) 自律分散制御システムは、各コントローラが自端の計測情報と共有メモリ（以下、黒板メモリ（Blackboard memory, BM）と呼ぶ）の情報に基づいて独立に動作するように構成される。この制御モデルは、単純かつ信頼性のある制御構成で、個々のコントローラの自律性を保証できる利点がある。
- (c) 通信システムに障害があった場合でも、残されたデータに基づく範囲でシステムの最適運用が可能となる。この手法は、最適制御性能をある程度維持しつつ、集中制御手法の弱点を改善したものといえる。本手法の有効性は、太陽光発電の導入された厳しい配電系統条件を対象としたシミュレーションで検証された。

4.2 マルチエージェントシステム

4.2.1 マルチエージェントシステムの概要

エージェントとは環境の状態を知覚し、自身の意思決定によって行動を起こし、環境に影響を与えることのできる自律的主体である。多数の自律的に行動するエージェントから構成されるシステムがマルチエージェントシステムである。マルチエージェントではエージェント間の協調が重要であり、この協調行為において各エージェントの間の通信が必要となる。そこで、本稿では、多種のエージェントの情報を共通して知覚できる黒板を用いてエージェントが協調して問題を解決するような枠組みを考える

4.2.2 制御システムの構成

本研究では、エージェント同士の通信形態として、間接通信である黒板モデルを考えている。まず、黒板モデルについて説明する。黒板モデルとは、複数のエージェントから参照可能な共通のメモリ（黒板）を介して情報交換を行うモデルである。各エージェントは解くべき問題やその処理結果などの書込みや読出しを非同期に行い、各自が独立に処理を進めていく。黒板モデルでは、種類や構造の異なるエージェントであっても、黒板とのやりとりが可能であればエージェント相互間での通信が可能である。本稿では、この黒板モデルにおいて、エージェントの各種情報などを保存しておくメモリを黒板メモリと呼ぶ。

次に、制御システムの構成について説明する。本研究では、系統全体を監視する上位エージェントと、電圧制御を行う制御器エージェント（以下、エージェントと呼ぶ）を用いている。各エージェントは機能として入出力、知識、最適計算部を持つ。各概念を以下にまとめる。

【上位エージェント(Management agent)】

- ・ 分散電源の追加/離脱や、エージェントー黒板メモリ間の通信機能喪失を含む系統構成全体を監視する。そして、状況に応じて電圧/タップ感度行列を算出する。

【黒板メモリ (Blackboard memory)】

- 各制御器の電圧値や変圧比，信憑性フラグ，タイマー値，値だけでなく，上位エージェントで算出された電圧/タップ感度行列を保持する。

【エージェント (Agent)】

- 入出力部(Interface)

エージェント自身が取得可能な情報（電圧値や変圧比など）と、黒板から取得可能な他のエージェントの情報（電圧値や信憑性フラグなど）を知覚する。最適計算部によって求められた制御指令を出すことや、求められたデータを黒板に書き込むことも担当する。

- 知識部(Knowledge)

入出力部が取得した情報や、最適計算部により求められた情報、電圧/タップ感度行列の情報を保持する。

- 最適計算部(Optimized calculation)

入出力，知識部の情報を用い，電圧加重平均と指標 を計算し，タップ動作指令を決定する最適化計算を行う。

各エージェントは、入出力部で自身の環境の知覚、環境の状況分析・蓄積を行えるだけでなく、黒板メモリを用いることによって、他のエージェントの状況を知覚でき、協調の取れた自身の制御指令を出すことができる。また、知識部で蓄積された情報を用いることで、他のエージェントの情報が取得できない状況（信憑性フラグが 0 の場合など）や系統構成の変更に対しても柔軟に対応することができる。

図 4.1 に提案システムの概念図を示す。

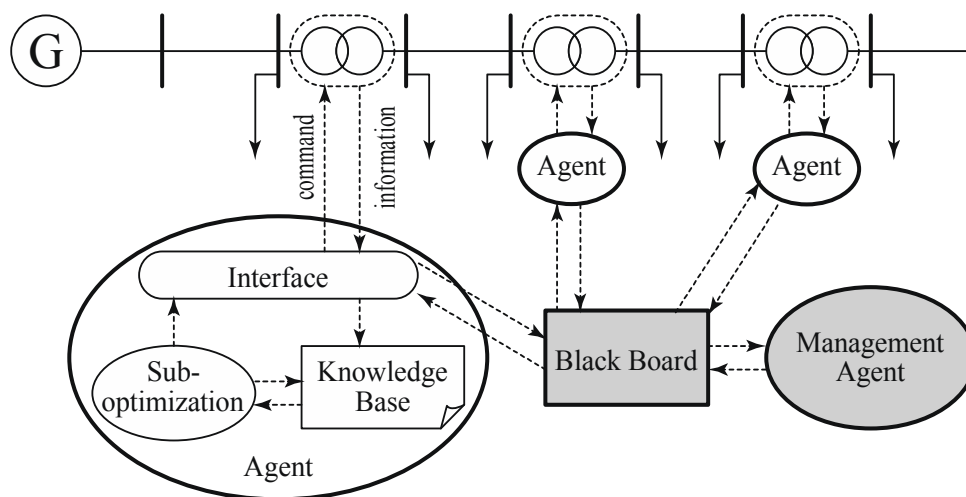


図 4.1 提案するマルチエージェントシステム

4.3 制御手法

4.3.1 最適自律分散制御の概要

提案手法のもっとも大きい特徴は、全体制御の最適性が保証されている間は、すべての制御装置が独

立にローカルな最適制御動作を行えばよい，ということである。この特性は，文献[59][60]で検討された最適制御指標「指標 S」を用いることで可能となり，本研究ではマルチエージェントシステムに適合するように改良を加えた。最適制御規範に基づく指標 S を利用することで，エージェント間の不要な調整処理を回避し，対象系統内の電圧違反量と電圧調整装置のタップ動作回数の最適な協調制御が可能となる。

4.3.2 最適制御手法の定式化

提案手法の目的は，以下の(4.1)式の関数を最小にすることである。

$$\min_n \int_0^\infty V(\mathbf{v}) dt, \quad V: \mathbb{R}^M \rightarrow \mathbb{R}^1 \quad (4.1)$$

ここで，電圧逸脱を定義する $V(\mathbf{v})$ は(4.2)式であらわされる。

$$\begin{aligned} V(\mathbf{v}) &= \frac{1}{2} (\mathbf{v} - \mathbf{v}_R)^T \cdot \mathbf{m} \cdot (\mathbf{v} - \mathbf{v}_R) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M m_i \cdot (v_i - v_{Ri})^2 \geq 0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

ここで， $\mathbf{v} = [v_1, \dots, v_M]^T \in \mathbb{R}^M$ は M 次元の観測点の電圧ベクトル， $\mathbf{v}_R \in \mathbb{R}^M$ は電圧目標値， $\mathbf{m} = \text{diag}[m_1, \dots, m_M]$ は重み係数を表す。また，不感帯 d は電圧目標値周辺の平衡領域 E と見なすことができ，式(4.3)で表わされる。

$$V(\mathbf{v}) = 0 \quad \text{for} \quad \mathbf{v} \in E = \{ \mathbf{v} \mid v_{ref} - d < v < v_{ref} + d \} \quad (4.3)$$

一般に，電圧は電力潮流方程式によって規定され，以下の式であらわされる。

$$\mathbf{v} = \mathbf{h}(\mathbf{L}, \mathbf{n}), \quad \mathbf{h}: \mathbb{R}^{P \times N} \rightarrow \mathbb{R}^M \quad (4.4)$$

ここで， \mathbf{n} ， \mathbf{L} は，

$\mathbf{n} = [n_1, \dots, n_N]^T \in \mathbb{R}^N$: 変圧器のタップポジションを表すベクトル (N 次元)

$\mathbf{L} = [L_1, \dots, L_P]^T \in \mathbb{R}^P$: 負荷等の変動パラメータベクトル (P 次元)

である。ここで， \mathbf{n} は電圧制御機器のタップ値を表す離散変数であり，(4.5)式のように動作が定義される。

$$\begin{aligned} n_k(t+1) &= n_k(t) + \Delta n_k(t) \\ \Delta n_k(t) &= r_k f_k(t) : \text{control at time } t \\ f_k(t) &= \begin{cases} +1 & (\text{unit increase}) \\ 0 & (\text{no change}) \\ -1 & (\text{unit decrease}) \end{cases} \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$k = 1, 2, \dots, N$$

次に、上記を次式としてベクトル表現する。

$$\begin{aligned} \mathbf{n}(t+1) &= \mathbf{n}(t) + \Delta \mathbf{n}(t) \\ \Delta \mathbf{n}(t) &= \mathbf{R} \cdot \mathbf{f}(t), \quad \mathbf{R} = \text{diag}[r_1 \cdots r_N], \\ \mathbf{f}(t) &= [f_1(t) \cdots f_N(t)]^T \end{aligned} \quad (4.6)$$

ここで、(4.5)(4.6)式に従ってタップを動作させるとすると、目的関数 $\Delta V(\mathbf{d})$ は以下の式で表わされる。

$$V(\mathbf{v}(t+1)) = V(\mathbf{v}(t)) + \Delta V(t) \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} \Delta V(t) &= \frac{\partial V}{\partial \mathbf{v}} \cdot \left[\frac{d\mathbf{v}}{d\mathbf{n}} \right] \cdot \Delta \mathbf{n}(t) \\ &= \mathbf{S}(t) \cdot \mathbf{f}(t) = \sum_{k=1}^N S_k(t) f_k(t) \end{aligned} \quad (4.8)$$

ここで、

$$\mathbf{S}(t) = \left[\frac{\partial V}{\partial \mathbf{v}} \right] \cdot \left[\frac{d\mathbf{v}}{d\mathbf{n}} \right] \cdot \mathbf{R} = [S_1(t) \cdots S_N(t)] \quad (4.9)$$

である。ここで、 $\mathbf{A} = [d\mathbf{v}/d\mathbf{n}]$ は、式(4.4)の潮流方程式から定義される電圧タップ感度行列である。この方程式から、もっとも効果的に V を減少させる方法が $S_k(\mathbf{d})$ の値で定義されることがわかる。以下、これを指標 \mathbf{S} とする。

【最適制御規範】

ここで、時刻 t において、あるタップが単位ステップほど制御されると仮定する。以下の近似式に従って、各時刻 t において V を最小化することが、(4.1)式を最小化することになる。

$$\min_{\mathbf{n}} \int_0^\infty V(\mathbf{v}) dt \approx \sum_{t=0}^\infty \left\{ \min_{\mathbf{n}(t)} V(\mathbf{v}(t)) \right\} \quad (4.10)$$

式(4.10)の各項から、式(4.8)が導出される。式(4.8)によって、タップ選択のシンプルな制御規範によって、最小化が可能になる。指標 \mathbf{S} の大きさが最大となるようなタップは、式(4.11)の条件を満足するように求められる。また、最適制御規範は式(4.12)で与えられる。

$$\min_{\mathbf{n}(t)} V(\mathbf{v}(t+1)) = V(\mathbf{v}(t)) + \min_{\mathbf{f}(t)} \{ \mathbf{S}(t) \cdot \mathbf{f}(t) \} \quad (4.11)$$

$$\begin{cases} f_k(t) = 1 & \text{if } |S_k(t)| = \max_i |S_i(t)| \text{ and } S_k(t) < 0 \\ f_k(t) = -1 & \text{if } |S_k(t)| = \max_i |S_i(t)| \text{ and } S_k(t) > 0 \\ f_k(t) = 0 & \text{if } |S_k(t)| \neq \max_i |S_i(t)| \end{cases} \quad (4.12)$$

この最適制御規範では、各エージェントで計算される指標 S から最大のものを選ぶ処理が必要となる。

【準最適制御規範】

系統全体での閾値を導入することで、エージェント間の指標 S の最大値を探す処理が避けられる。この場合、タップ制御ルールは以下様に定義される。

$$\begin{cases} f_k(t)=1 & \text{if } S_k(t) < -\alpha_0 \quad [\text{up}] \text{ for all } k \\ f_k(t)=-1 & \text{if } S_k(t) > \alpha_0 \quad [\text{down}] \text{ for all } k \\ f_k(t)=0 & \text{if } |S_k(t)| < \alpha_0 \quad \text{no operation} \end{cases} \quad (4.13)$$

ここで、 α は系統共通のタップ動作閾値を表わす。この制御規範に従うと、制御性能の低下を許容すれば、各コントローラ k は各々の指標に従って制御動作を決定できる。提案手法では、この準最適化制御規範を採用する。

指標 S に基づく制御の最適性は、これまでの研究の[59][60]で評価されており、また α は、電圧逸脱量とタップ動作回数のバランスを決める最適制御パラメータとして調整される。

4.3.3 指標 S の計算方法

最適制御規範は、集中制御型のシステムとして構築されることが有用であり、指標 S は最適計算手順の状態推定の結果から算出されることになる。しかし、ここでは、よりシンプルで信頼性の高い自律分散システムの構築を目指して検討を行った。この場合、重要となる制約は、次式で表わされる指標 S の計算である。

$$S_k(t) = r_k \cdot \sum_{i=1}^M \frac{\partial V}{\partial v_i} \frac{dv_i}{dn_k} = r_k \cdot \sum_{i=1}^M m_i (v_i - v_{Ri}) \cdot \frac{dv_i}{dn_k} \quad (4.14)$$

ここで、必要となるデータは、電圧変化ベクトル $\mathbf{u}(t) = \mathbf{v}(t) - \mathbf{v}_R$ と電圧/タップ感度行列の $[d\mathbf{v}/d\mathbf{n}]$ である。電圧/タップ感度行列は、配電系統の場合ではないが、電圧安定性の上で重要な意味を持つことが示されている[27]。配電系統においても、実際に $[d\mathbf{v}/d\mathbf{n}]$ は同様に活用できることが各種解析で確認されている。また、図 4.2 に示すような、日本の配電系統構成である、放射状系統を対象に考えると、感度行列は次の特徴を持つ。

$$\begin{cases} \frac{\partial v_i}{\partial n_k} \approx \frac{\partial v_{p_k}}{\partial n_k} & \forall i \in U_k \\ \frac{\partial v_i}{\partial n_k} \approx \frac{\partial v_{q_k}}{\partial n_k} & \forall i \in L_k \\ \frac{\partial v_i}{\partial n_k} \approx 0 & \forall i \in N_k \cup M_k \end{cases} \quad (4.15)$$

ここで,

p_k : 対象とするタップ k の一次側の母線番号

q_k : 対象とするタップ k の二次側の母線番号

L_k : 対象タップ k の二次側母線 (q_k) よりも下位の母線番号の集合

U_k : 対象タップ k の一次側母線 (p_k) よりも下位の母線であり, q_k および L_k を除く母線番号の集合

N_k : 対象タップ k の一次側母線 (p_k) より上位の母線番号の集合

M_k : U_k , L_k , N_k に属さない母線番号の集合

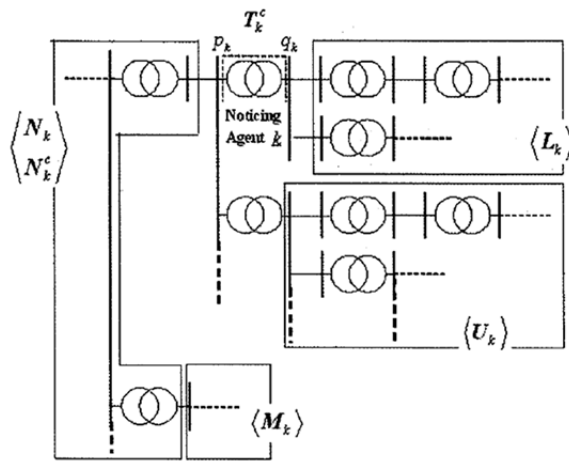


図 4.2 配電系統構成の例

また, ここで各変圧器は漏れ磁束や銅損の無い理想変圧器と仮定する。この仮定により式(4.14)において以下のように近似できる。

$$\frac{\partial v_{p_k}}{\partial n_k} = 0, \quad \frac{\partial v_{q_k}}{\partial n_k} = 1 \quad (4.16)$$

これは, 配電系統が放射状系統構成で運用されており, また本検討では電圧制御装置として変圧器タップを想定していることより, 変圧器タップの動作の影響がその変圧器の下位の系統にのみ影響を及ぼすとした仮定に相当する。これにより, 評価指標 S の計算が簡単化可能となる。

4.4 配電系統の電圧制御への適用

4.4.1 多点電圧監視

近年, 配電系統の電圧は, PV の導入拡大と天候変化に依存して急速に変化する傾向がある。そのため, PV の出力変化に対応し, 系統内の電圧を許容範囲に収めるための電圧管理, 制御手法が必要となる。これに対し, 高速制御が可能な SVC の導入で対応する方法もあるが, ここでは既存の OLTC などのタップ

調整機器の活用を考える。例えば、図 4.3 に示されるような直列接続の SVR の制御が難しいことが示されているが、提案手法ではこのような直列配置の機器のより有効な制御動作が可能となる。

配電系統のフィーダの電圧制御の目的は、電圧変動を規定範囲の上下限内に制御することである。複数の SVR によってフィーダ電圧を制御する場合、個々の SVR が考慮する電圧制御対象範囲は、図 4.3 に示すように、各 SVR の末端側かつ末端側の SVR の 1 次側母線までの範囲となる。各制御対象範囲 (k) では、複数地点の電圧が計測され、それらはタップ k の制御によって、次式の範囲に制御される。

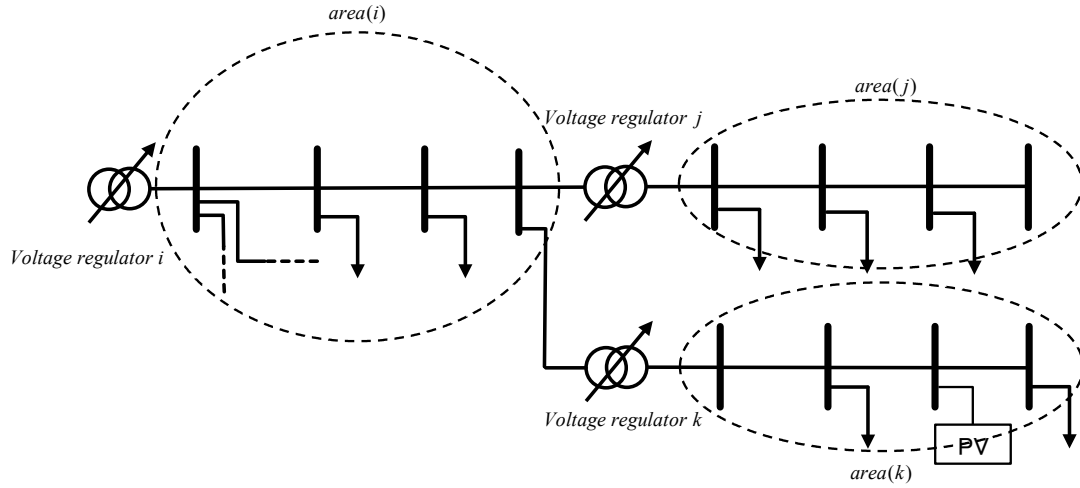


図 4.3 電圧調整装置の制御対象範囲

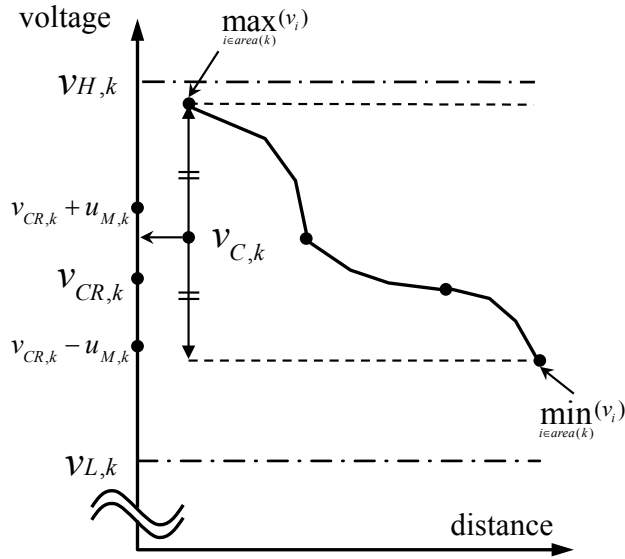


図 4.4 制御エリア k における電圧調整イメージ

$$v_{L,k} \leq v_i \leq v_{H,k} \quad , \quad i \in \text{area}(k) \quad (4.17)$$

ここで、制御対象区域 k 内の電圧は、制御装置 k だけでなく他の制御装置によっても制御されることに注意が必要である。また、各制御装置の電圧感度がほぼ等しくなる区域の電圧は、各制御装置が独立

して制御することができない。そこで、式(4.17)を満たすために、区域内の複数の電圧の最大値と最小値の平均値 $\mathbf{v}_{C,k}$ を電圧上下限の中心 $\mathbf{v}_{CR,k}$ に近付けるような制御を行うことを考える。概念図を図 4.4 に示す。

$$\mathbf{v}_{C,k} = \frac{\max_{i \in \text{area}(k)} (v_i) + \min_{i \in \text{area}(k)} (v_i)}{2} \quad (4.18)$$

$$\mathbf{v}_{CR,k} = \frac{v_{H,k} + v_{L,k}}{2} \quad (4.19)$$

ここで、 $\mathbf{v}_{C,k}$ が $\mathbf{v}_{CR,k}$ に等しくなる場合が理想状態である。ここで、電圧余裕 $\mathbf{u}_{M,k}$ を式(4.20)のように定義する。この電圧余裕が正である場合、式(4.17)を満たすように制御可能となる。

$$\mathbf{u}_{M,k} = \frac{v_{H,k} - v_{L,k}}{2} - \frac{\max_{i \in \text{area}(k)} (v_i) - \min_{i \in \text{area}(k)} (v_i)}{2} > 0 \quad (4.20)$$

また、式(4.20)において、第2項の値が増加し、電圧余裕 $\mathbf{u}_{M,k}$ が負となる場合がある。この場合は、式(4.17)を満たすような制御は難しくなる。しかし、電圧上下限に対する違反量が等しくなることから、この場合も理想的な状態は、 $\mathbf{v}_{C,k}$ が $\mathbf{v}_{CR,k}$ に等しくなる状況である。そこで、式(4.21)を制御対象とすることとした。

$$v_{CR,k} - \max(\varepsilon, \mathbf{u}_{M,k}) \leq v_{C,k} \leq v_{CR,k} + \max(\varepsilon, \mathbf{u}_{M,k}) \quad (4.21)$$

ここで、 ε は微小な正の数を示す。

以上より、提案制御手法は式(4.22)(4.23)のように目的関数を設定することによって実現可能となる。

$$V(\mathbf{v}_c) = \mathbf{u}(\mathbf{v}_c)^T \cdot \mathbf{m} \cdot \mathbf{u}(\mathbf{v}_c) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N m_k \cdot u_k(v_{C,k})^2 \quad (4.22)$$

$$u_k(v_{C,k}) = \text{sign}(v_{C,k} - v_{CR,k}) \cdot (|v_{C,k} - v_{CR,k}| - \max(\varepsilon, \mathbf{u}_{M,k})) \quad (4.23)$$

また、 $V(\mathbf{v}_c) = 0$ のとき、すべての \mathbf{v}_c は式(4.21)を満たす。タップの変化に対する目的関数の変化量である指標 \mathbf{S} は、上記目的関数から計算される。

$$\mathbf{S}(t) = \mathbf{u}(\mathbf{v}_c(t))^T \cdot \mathbf{m} \cdot \mathbf{A}(t) \cdot \mathbf{R} \quad (4.24)$$

4.4.2 制御処理手順

マルチエージェントシステムと指標 \mathbf{S} をベースとした提案制御手法のアルゴリズムについて示す。従来の制御手法における課題は以下の2点であった。

- (i) 短時間の不適切な動作：タップ機器自身の無駄動作や複数機器間の干渉動作
- (ii) 複数の制御器が常に同期している状態を前提としていたため、非同期動作時には、黒板メモリのデータの信頼性(最新性・正確性)が保証されていなかった。

そこで、これらの課題に対応するため、電圧制御装置に、動作タイマー、動作時限、信憑性フラグを加えた。図 4.5 に、各電圧制御装置と共有の黒板メモリ（BM）の制御装置を示す。

Step1：エリア k のノード電圧を計測する。

Step2：黒板メモリに現在の系統状態（電圧、タップ位置、重み係数）を書き込み、対応する信憑性フラグを 1 に更新する。

Step3：他のエリアの情報で、信憑性フラグが 1 のものを読み込む。

Step4：電圧偏差 u_k と指標 S を計算する。

Step5：指標 S の時系列データの移動平均 ($S_{ave,k}$) を(4.25)式で計算し、BM に記憶する。

$$S_{ave,k} = \sum_{t=1}^T m_t S_k^{(t)}, \quad \sum_{t=1}^T m_t = 1 \quad (4.25)$$

Step6： $S_{ave,k}$ が閾値 α より大きい場合、タイマーの更新を開始する。そうでない場合、タイマーをリセットし、Step1 へ戻る。

Step7：BM を参照し、 $S_{ave,k}$ が最大で、タイマーが規定時間を超えており、電圧が式(4.21)の条件を逸脱している場合、タップ値を変更する。

Step8：タップ変更を確認し、信憑性フラグをリセットし、Step1 へ戻る。

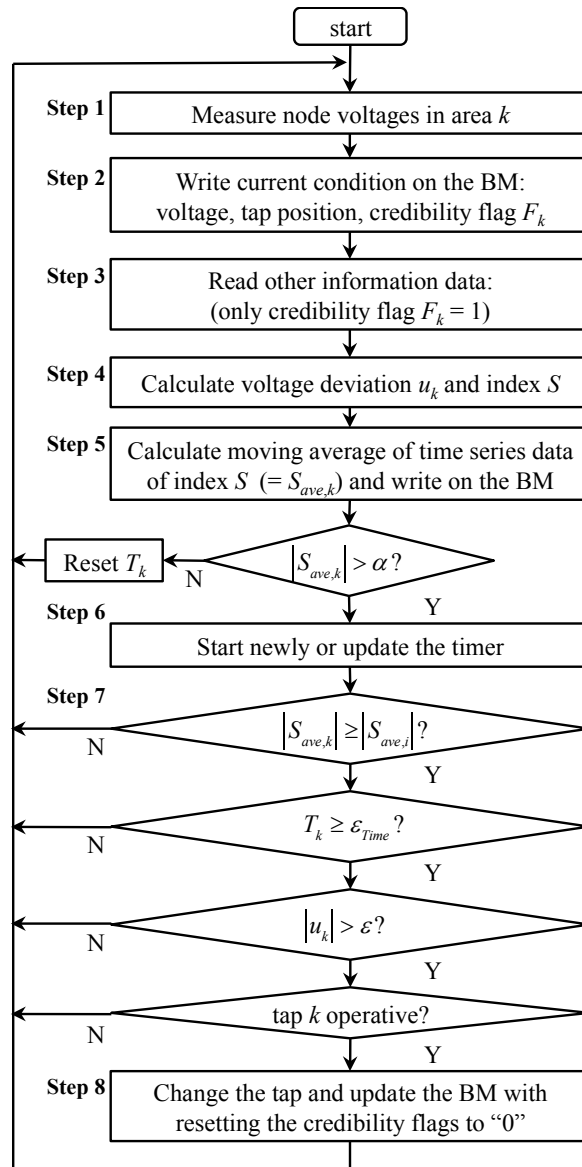


図 4.5 提案制御手法の処理アルゴリズム

4.4.3 信頼性フラグ

黒板メモリの電圧計測値やタップ位置のような計測データの信頼性を示す「信憑性フラグ」を導入する。信憑性フラグが「1」の場合、メモリの情報は最新であり、タップ動作直後のデータであることを表す。信憑性フラグが「0」の場合、メモリの情報は古く、正確でない可能性がある。各エージェントは黒板メモリに情報を書き込む際に信憑性フラグを「1」に変更する。また、いずれかのタップが動作するか、系統の構成が変更された場合には、信憑性フラグは「0」に変更される。これにより、エージェントは黒板メモリの情報の信憑性を把握することができるようになる。信憑性フラグが「0」であるデータをエージェントが扱う場合には、例えば(a)データを使用しない、(b)データの重み係数を小さくして利用する、などの対応策が考えられる。

4.5 シミュレーションによる評価

4.5.1 計算条件

提案手法の最適自立分散制御方式の有効性を、シミュレーションを用いた従来手法との比較によって検証した。図 4.6 に例題系統を示す。母線数は 8 で、OLTC1 台と、タップを持つ電圧調整装置が 3 台設置されている。フィーダ末端のノード 8 に、大規模な PV が設置されている。負荷はノード 4～8 に、最大であるおよそ 150 V の電圧降下が発生するように設置されている。トータルの有効、無効電力と、PV の出力パターンを図 4.7 に示す。PV の出力変化パターンは、実際の測定波形データを用いた。PV の最大出力は 1500kW とした。OLTC、SVR1、SVR2 の各電圧調整装置の制御パラメータを表 4.1 に示す。手法毎に制御パラメータを最適に設定した。従来手法では SVR は自端の測定値のみを用いて電圧制御を行う。提案手法では、定常状態を仮定し、信憑性フラグはすべて 1 とし、またシミュレーション期間では事故の発生はないものと仮定した。フィーダの電圧上限および電圧下限は、各々 1.02pu と 0.96pu とした。シミュレーションケースとして、以下の 6 ケースを考えた。

Case1：従来手法，PV なし（図 4.8）

Case2：提案手法，PV なし（図 4.9）

Case3：従来手法，PV あり（図 4.10）

Case4：提案手法，PV あり（図 4.11）

Case5：提案手法，PV なし，SVR2 のエージェント停止

Case5：提案手法，PV あり，SVR2 のエージェント停止

各 Case のシミュレーション結果を評価するために、次の 2 種類の指標を用いた。

Index1：電圧中央値からの加重平均電圧偏差

各ノードの電圧平均値の電圧中央値 (0.99pu) からの偏差量。毎秒・1 制御器あたりの電圧中央値(0.99 (pu))からの各加重平均値 (3-4,5-6,7-8 番母線電圧からそれぞれ算出) の偏差量を用いる。データは 1 (s) 間隔で算出し、その総和をタップ数と総時間数で割る。

Index2：トータル電圧違反量

電圧規定範囲を逸脱した電圧逸脱量。3～8 番母線の電圧違反データを対象に、1 秒毎の違反量の総和を指標とする。

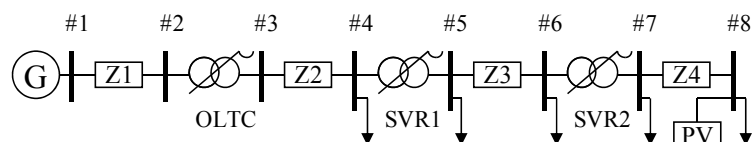


図 4.6 例題系統

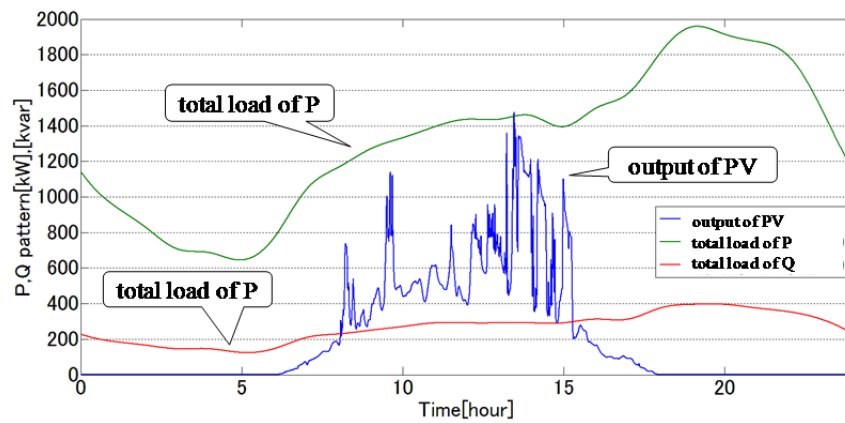


図 4.7 負荷の有効，無効電力，PV の発電電力の日変化パターン

表 4.1 OLTC，SVR1，SVR2 の各電圧調整装置の制御パラメータ

(a) 従来手法の制御パラメータ

	OLTC	SVR1	SVR2
Reference voltage (pu)	1.00	0.98	0.98
Tap step width (pu)	0.015	0.015	0.015
Dead band (pu)	0.015	0.015	0.015
Control target nodes	3	6	8
Timer setting of tap change (s)	45	60	90

(b) 提案手法の制御パラメータ

	OLTC	SVR1	SVR2
Reference voltage (pu)	0.99	0.99	0.99
Tap step width (pu)	0.015	0.015	0.015
Dead band (pu)	0.015	0.015	0.015
Control target nodes	3, 4	5, 6	7, 8
Weight coefficient	1	1	1
Timer setting of tap change (s)	60	60	60
Threshold α	7.0×10^{-5}		

表 4.2 シミュレーション結果

Case #	Tap changes	Index 1	Index 2
Case 1	23	0.0105	0.5701
Case 2	15	0.0103	0.0
Case 3	29	0.0103	1.2849
Case 4	15	0.0095	0.0
Case 5	14	0.0113	0.4642
Case 6	14	0.0106	0.4691

4.5.2 結果と考察

シミュレーション Case 1～6 の結果を表 4.2 示す。表 4.2 には、評価指標 Index 1 および Index 2 と、タップ動作回数を示す。波形の代表例として、Case1～4 の各ノードの電圧と電圧制御装置のタップ値の 24 時間の変化を図 4.8～図 4.11 に示す。

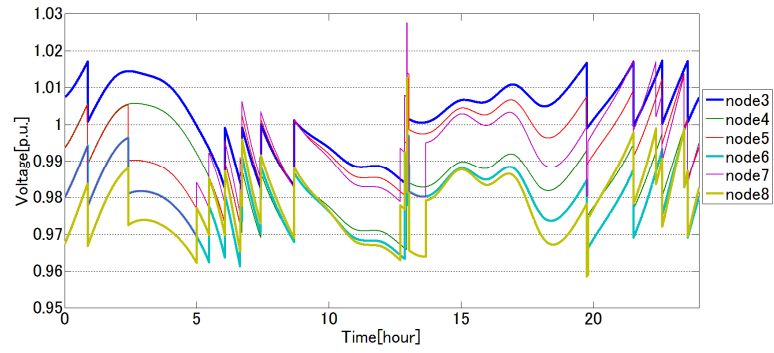
- ・Case1 : SVR1 と SVR2 のタップ動作によるタップ振動（ハンチング）と電圧変動が 13:00 付近に見られる。この現象が頻繁に発生することは文献[61]でも解析されている。図 4.8 では、SVR が 13:00 頃に初めて動作していることがわかる。この時間は、SVR2 の制御対象であるノード 8 の電圧は、指令値の 0.98 (pu)から外れ、不感帯を超えており、タップが動作している。同様に SVR1 の制御対象であるノード 6 の電圧も、指令値の 0.98 (pu)から外れてきている。これにより、SVR1 はタップを上げ、二次側電圧を上昇させている。OLTC も同様に動作するが、この動作により、ノード 7 の電圧が電圧上限を逸脱してしまい、その結果 SVR1 および SVR2 がタップを下げている。これは、複数の電圧機器がハンチングを起こしている状態であり、好ましくない制御といえる。表 4.2 からは、Case1 は、タップ動作回数は多いが、電圧逸脱も発生している状況であることがわかる。

- ・Case2 : シミュレーションからはタップのハンチングは見られない。適切な制御によって、タップ動作回数も少なくなっていることがわかる。図 4.9 では、13:00 付近で SVR1 のみのタップが変更されていることがわかる。これは、指標 S によって最も効果的なタップ変更が選択されたことによって、電圧制御装置間のハンチング現象が回避されたためと考えられる。Case2 では、Case1 に比べて評価指標は小さく、また電圧逸脱が回避されていることがわかる。

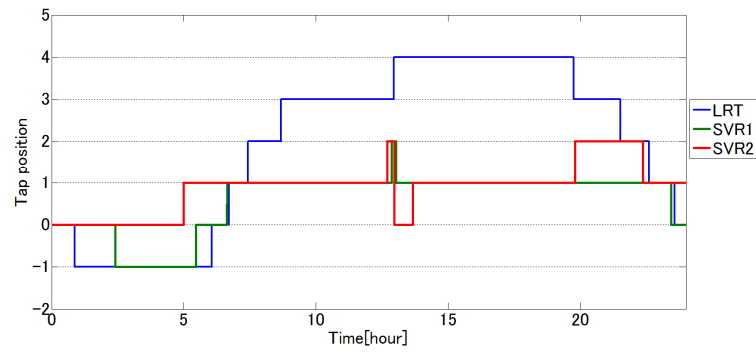
- ・Case3 : PV の変動によって、タップ動作回数と評価指標が Case1 より増加していくことがわかる。

- ・Case4 : PV の変動が加わっているが、タップ動作回数と評価指標は Case2 と同レベルに維持できていることがわかる。また、タップのハンチングも見られない。シミュレーション結果から、提案手法が有効に働いていることがわかる。

- ・Case5 および Case6 : エージェントが停止した状態のシミュレーション結果である。Case2 および 4 に対して、電圧逸脱が発生していることがわかる。しかしながら、Case1 および Case3 と比較すると、タップ動作回数および電圧逸脱量ともに小さいことがわかる。また、Case5 および Case6 は、提案手法が部分的に導入された状態にも相当する。これは、本手法は状況に応じて段階的に導入される場合でも、電圧制御性能を改善することができることを示している。

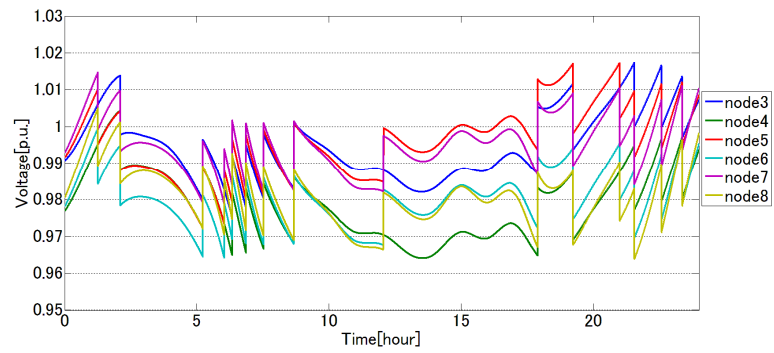


(a) 電圧

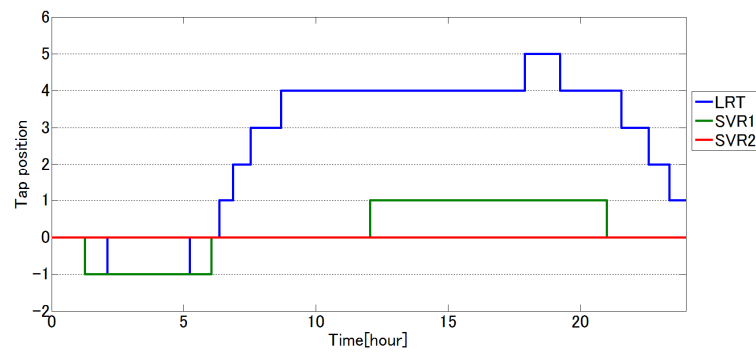


(b) 電圧制御装置タップ

図 4.8 シミュレーション結果 (Case1) : 従来手法, PV なし

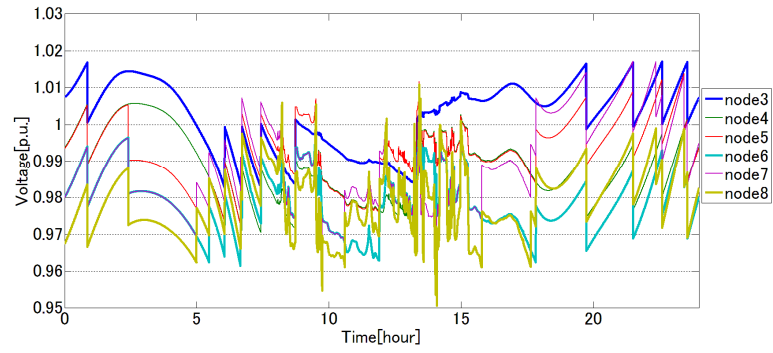


(a) 電圧

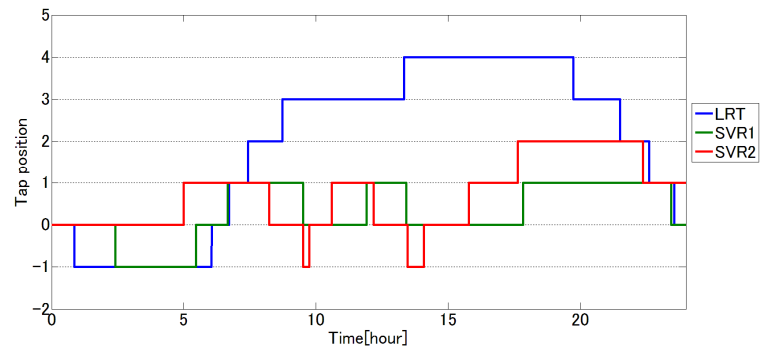


(b) 電圧制御装置タップ

図 4.9 シミュレーション結果 (Case2) : 提案手法, PV なし

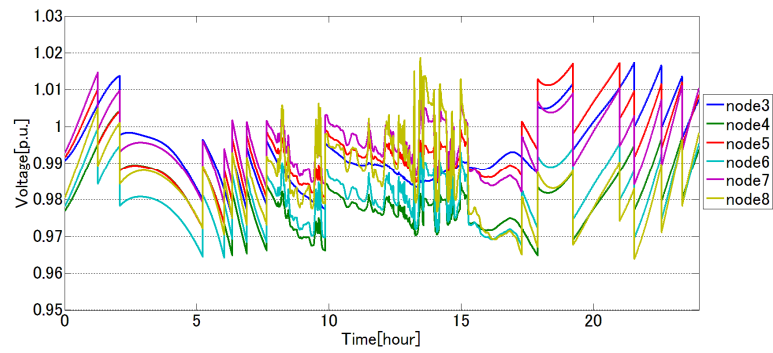


(a) 電圧

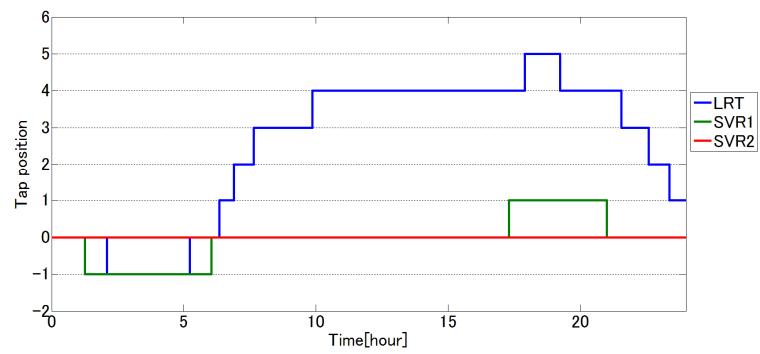


(b) 電圧制御装置タップ

図 4.10 シミュレーション結果 (Case3) : 従来手法, PV あり



(a) 電圧



(b) 電圧制御装置タップ

図 4.11 シミュレーション結果 (Case4) : 提案手法, PV あり

4.6 結言

本章では、配電システムの新しい電圧制御手法を提案した。再生可能エネルギーの増加に対応するために、最適制御問題をマルチエージェント制御システムに適した形に定式化し、自律性と最適性の両立を可能とした。「黒板メモリ」のデータを活用する制御構成とすることで、エージェント間の不要な情報交換の削減や、データ通信量の削減が可能となった。

提案手法の特徴には、OLTC や SVR などの既存の電圧調整装置を有効に活用できることがある。各機器のコントローラが、黒板メモリと通信可能となることで、提案手法が実現可能となる。

このような制御構成とすることによって、通信経路の停止などの故障時にも、残されたコントローラとエージェント構成で電圧制御性能を確保することが可能となる。通信経路がすべて消失した場合でも、各コントローラによるローカル制御に縮退することで、従来制御と同様の制御が可能となる。

シミュレーション結果から、PV の増加によって、従来手法では電圧変動や電圧制御機器の不要動作が拡大する危険性があることがわかった。タップ動作を増加しても、電圧逸脱が解消されないケースが示された。提案手法では、このようなケースでも、各コントローラの自律分散機能によって、適切に電圧制御が可能となることを確認した。

第5章 結論

本論文では前述の配電系統電圧制御の課題を解決するために、配電系統の電圧調整装置の最適整定手法、自律分散制御手法を提案する。具体的には、1) 配電系統の計測値を元に SVR の制御パラメータを整定する方法、2) 複数の SVR を自端情報によって協調的に動作可能とする制御手法、3) マルチエージェントによって複数の SVR を自律分散的に協調制御する手法、を提案した。その結果、以下の結論を得た

(1) 計測情報に基づく SVR の LDC 整定および制御アルゴリズム

SVR 自端情報を含む系統内の計測実績値を基に、SVR の LDC パラメータを整定する手法を提案した。また、実際の配電系統の計測データを用いた SVR 動作シミュレーションによって、LDC パラメータ決定アルゴリズムの評価結果について示した。提案手法により、SVR を通過する有効、無効電力と、配電系統の電圧の関係を分析することで、SVR の電圧制御機能を効果的に動作させることが可能となる見通しが得られた。

(2) 自端計測情報の相関関係を利用した複数台 SVR の協調制御手法

複数の SVR を自端情報によって協調的に動作可能な制御アルゴリズムを提案し、系統の測定データを用いたシミュレーションで有効性を確認した。同一フィーダに複数台の SVR が設置される場合に、SVR の動作遅れが発生することを、SVR の自端情報によって協調的に制御するアルゴリズムを提案した。あらかじめ計測したデータの相関関係を把握することで、SVR が他の SVR の動作を推測し、適応的な制御を可能とした。また、実系統の計測データを用いたシミュレーションによって、有効性の検討を行った。例題系統を対象に、フィーダ末端側の SVR の時定数を適応的に変更することで、電圧余裕を拡大できる見通しを得た。

今後は、時定数の適切な決定方法、SVR 等の電圧調整装置コントローラの機能検証、制御パラメータ決定支援システム等の検討を進める予定である。

(3) マルチエージェントシステムを用いた電圧制御機器の自律分散制御

最適制御問題をマルチエージェント制御システムに適した形に定式化し、自律性と最適性の両立を可能とする制御手法を提案した。「黒板メモリ」のデータを活用する制御構成とすることで、エージェント間の不要な情報交換の削減や、データ通信量の削減が可能となった。

提案手法の特徴には、OLTC や SVR などの既存の電圧調整装置を有効に活用できることがある。各機器のコントローラが、黒板メモリと通信可能となることで、提案手法が実現可能となる。

このような制御構成とすることによって、通信経路の停止などの故障時にも、残されたコントローラとエージェント構成で電圧制御性能を確保することが可能となる。通信経路がすべて消失した場合でも、各コントローラによるローカル制御に縮退することで、従来制御と同様の制御が可能となる。

シミュレーション結果から、PV の増加によって、従来手法では電圧変動や電圧制御機器の不要動作が拡大する危険性があることがわかった。タップ動作を増加しても、電圧逸脱が解消されないケースが示された。提案手法では、このようなケースでも、各コントローラの自律分散機能によって、適切に電圧

制御が可能となることを確認した。

今後の課題として、実規模システムでのシミュレーションによる検証、実証設備による検証があげられる。

参考文献

- [1]経済産業省，資源エネルギー庁，低炭素電力供給システムに関する研究会「低炭素電力供給システムの構築に向けて 低炭素電力供給システムに関する研究会報告書」(2009-7)
- [2]経済産業省HP
<http://www.chugoku.meti.go.jp/info/densikoho/21fy/h2108/taiyoukou/taiyoukou.html>
- [3]平井崇夫，他：「分散型電源導入拡大に伴う諸課題」，電学誌，Vol.125，No.3(2005)
- [4]小田切司朗：「分散型電源の系統連系における現状」，電気評論，2001.9，pp.32-36
- [5] Y. Nechito, Y. Hirai, J. Murakoshi, Y. Tsuboe and M. Watanabe: "Parameter Decision Method for SVR Controller Considering Distributed Resources", The Papers of Technical Meeting on Power Protective Realy, IEE Japan, PPR-06-01, pp.1-6(2006) (in Japanese)
根地戸嘉雄・平井義浩・村越潤・坪江康弘・渡辺雅浩：「分散型電源に対応した SVR 整定計算手法の開発」，電気学会保護リレー研資，PPR-06-01，pp.1-6(2006)
- [6] Y. Hayashi: "Trend and Future View of Voltage Control for Distribution Systems with Distributed Generators", T.IEE Japan, Vol. 129-B, No. 4, pp.491-494 (2009) (in Japanese)
林 泰弘：「分散型電源の導入拡大に対応した配電系統電圧制御の動向と展望」，電学論 B, Vol. 129, No. 4, pp.491-494 (2009) .
- [7] Y. Hayashi, J. Matsuki, R. Suzuki and E. Muto: "Determination Method for Optimal Sending Voltage Profile in Distribution System with Distributed Generators", T.IEE Japan, Vol. 125-B, No.9 ,pp.846-854 (2005-9) (in Japanese)
林泰弘・松木純也・鈴木良治・武藤英司：「分散型電源が連系された配電系統における最適送出し電圧の決定手法」，電学論 B, 125, 9, pp.846-854 (2005-9)
- [8] N. Yorino, M. Nishimoto, T. Shutou, H. Sasaki, H. Sugihara and Y. Nakanishi: " An Optimal Control Problem for TCUL Transformers And Its Suboptimal Control Law for Autonomous Distributed Systems", The Papers of Joint Technical Meeting on Power Engineering and Power Systems Engineering, IEE Japan, PE-98-173, PSE-98-163, 1998 (in Japanese)
餘利野直人・西本正臣・首藤隆徳・佐々木博司・杉原弘章・中西要祐：「変圧器タップの最適制御問題および準最適な自律分散形の制御則」，H10 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料，PE-98-173, PSE-98-163, 1998
- [9] 西村武：「線路電圧調整器の進歩と適用」，現代の配電技術，電気書院 pp.128-134 (1972)
- [10] 小田切司朗：「分散型電源の系統連系における現状」，電気評論，2001.9，pp.32-36
- [11] K. Matsuda, K. Horikoshi, M. Watanabe, J. Murakoshi, R. Takahashi and S. Yamazaki: " A Decision Method for LDC Parameters of a SVR using Measurement Data of a Distribution System ",2009 National Convention Record IEE Japan,No.6-018(2009) (in Japanese)
松田勝弘・堀越和宏・渡辺雅浩・村越潤・高橋玲児・山崎信：「計測情報を活用した SVR の LDC 整定手法の一検討」，平成 21 年電気学会全国大会，No.6-018(2009)
- [12] K. Matsuda, K. Horikoshi, M. Watanabe, J. Murakoshi, R. Takahashi and S. Yamazaki: " A Decision Method for LDC Parameters of a SVR considering System Switching of a Distribution

System ",Proc. of the twenty Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan, No.152 (2009) (in Japanese)

松田勝弘・堀越和宏・渡辺雅浩・村越潤・高橋玲児・山崎信：「系統変更を考慮した SVR の LDC 整定手法の一検討」，平成 21 年電気学会電力・エネルギー部門大会，No.152 (2009)

[13] K. Matsuda, K. Horikoshi, M. Watanabe, J. Murakoshi, R. Takahashi and S. Yamazaki: " A Decision Method for LDC Parameters of a SVR and Voltage Control Algorithm using Measurement Data of a Distribution System", The Papers of Joint Technical Meeting on Power Engineering and Power Systems Engineering, IEE Japan, PE-09-89, PSE-09-97, 2009 (in Japanese)

松田勝弘・堀越和宏・渡辺雅浩・村越潤・高橋玲児・山崎信：「計測情報に基づく SVR の LDC 整定および制御アルゴリズムの検討」，H21 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料，PE-09-89, PSE-09-97, 2009

[14] K. Matsuda, K. Horikoshi, T. Seto, M. Watanabe, J. Murakoshi and R. Takahashi: " Evaluation of a setting algorithm for control parameters of a line drop compensator (LDC) using measurement data of distribution networks", The Papers of Joint Technical Meeting on Power Engineering and Power Systems Engineering, IEE Japan, PE-10-145, PSE-10-144, 2010 (in Japanese)

松田勝弘・堀越和宏・瀬戸寿之・渡辺雅浩・村越潤・高橋玲児：「SVR の LDC 整定手法の計測データを用いた有効性評価」，H22 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料，PE-10-145, PSE-10-144, 2010

[15] K. Matsuda, T. Futakami, K. Horikoshi, T. Seto, M. Watanabe, J. Murakoshi and R. Takahashi: " A Decision Method for LDC Parameters of a SVR and Voltage Control Algorithm using Measurement Data of a Distribution System", T.IEE Japan, Vol. 132, No. 8, pp.701-708 (2012) (in Japanese)

松田勝弘・二上貴文・堀越和宏・瀬戸寿之・渡辺雅浩・村越潤・高橋玲児：「計測情報に基づく SVR の LDC 整定および制御アルゴリズムの検討」，電気学会論文誌 B, Vol. 132, No. 8, pp.701-708 (2012)

[16] N. Yorino, T. Fujimura, K. Uena, H. Sugihara, K. Sugiyama and Y Nakanishi : " On Autonomous Decentralized Control of On-Load Tap-Changers ", T.IEE Japan, Vol. 118-B, No.6, pp.658-664 (1998) (in Japanese)

餘利野直人・藤村勉・上名克尚・杉原弘章・杉山勝範・中西要祐：「変圧器タップ群の自律分散制御に関する検討」，電学論 B, Vol. 118, No.6, pp.658-664 (1998)

[17] 松田勝弘・二上貴文・瀬戸寿之：「配電用電圧制御機器の最適協調制御技術の検討」，電気評論，2012.10 (2012)

[18] K. Matsuda, K. Horikoshi, T. Seto, M. Watanabe, J. Murakoshi and R. Takahashi: " Cooperative Control Algorithm for Multiple SVR on Distribution Line using Adaptive Modification of Tap Change Time ",2011 National Convention Record IEE Japan,No.6-150 (2011) (in Japanese)

松田勝弘・堀越和宏・瀬戸寿之・渡辺雅浩・村越潤・高橋玲児：「タップ切換え動作時間変更による複数台 SVR の協調制御手法の検討」，平成 23 年電気学会全国大会，No.6-150 (2011)

[19] M. Watanabe, R. Takahashi, K. Matsuda and T. Seto: " A Cooperative Control Algorithm for Multiple SVR using Correlation of Measurement Data of Distribution Line ", T.IEE Japan, Vol. 135-B, No.10 (2015) (in Japanese)

渡辺雅浩・高橋玲児・松田勝弘・瀬戸寿之：「自端計測情報の相関関係を利用した複数台 SVR の協調制御手法の検討」, 電学論 B, Vol. 135, No. 10 (2015)

- [20]J. A. P. Lopes, "Integration of dispersed generation on distribution networks-impact studies," Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting 2002, vol. 1, pp. 323-328, 2002.
- [21]H. Jiayi, J. Chuanwen, and X. Rong, "A review on distributed energy resources and microgrid," Renewable & Sustainable Energy Reviews, vol. 12, pp. 2472-2483, 2008.
- [22]R. A. Reigh, R. Saint, R. C. Dugan, J. Burke, and L. A. Kojovic, "Summary of distributed resources impact on power delivery systems," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 23, no. 3, pp. 1636-1644, Jul. 2008.
- [23]G. T. Heydt, "The next generation of power distribution systems," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 1, no. 3, pp. 225-235, Nov. 2010.
- [24]N. Yorino, Y. Sasaki, E. Popov Hristov, Y. Zoka, Y. Okumoto, "Dynamic Load Dispatch for Power System Robust Security Against Uncertainties", IREP 2013 Bulk Power System Dynamics and Control Symposium, Aug. 2013.
- [25]B. M. Weedy, "Voltage stability of radial power links," Proc. IEE, vol. 115, pp. 528, 1964.
- [26]T. Van Cutsem, Costas Vournus, Voltage Stability of Electric Power Systems, Springer Science, 1998.
- [27]N. Yorino, H. Sasaki, Y. Masuda, Y. Tamura, M. Kitagawa, A. Oshimo, "An Investigation of Voltage Instability Problems," IEEE Trans. Power Systems, vol. 7, no. 2, pp. 600-611, 1992.
- [28]C. Vournas and M. Karystianos, "Load tap changers in emergency and preventive voltage stability control", IEEE Trans. Power Systems, vol.19, no.1, pp. 492-498, 2004.
- [29]Yuan-Yih Hsu and Feng-Chang Lu, "A combined artificial neural network-fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation," IEEE Trans. Power Systems, vol.13, no.4, pp. 1265-1271, 1998.
- [30]M. E. Baran and Ming-Yung Hsu, "Volt/VAr control at distribution substations," IEEE Trans. Power Systems, vol.14, no.1, pp. 312-318, 1999.
- [31]R. H. Liang and C. K. Cheng, "Dispatch of main transformer ULTC and capacitors in a distribution system," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 16, no. 4, pp. 625-630, Oct. 2001.
- [32]Y. Deng, X. Ren, C. Zhao and D. Zhao, "A Heuristic and Algorithmic Combined Approach for Reactive Power Optimization with Time-Varying Load Demand in Distribution Systems," IEEE Trans Power Systems, vol. 17, no.4, pp. 1068-1072, 2002.
- [33]A. Augugliaro, L. Dusanochet, S. Favuzza and E. R. Sanseverino, "Voltage regulation and power losses minimization in automated distribution networks by an evolutionary multiobjective approach," IEEE Trans. Power Systems, vol.19, no.3, pp. 1516-1527, 2004.
- [34]Jong-young Park, Soon-ryul Nam and Jong-keun Park, "Control of a ULTC Considering the Dispatch Schedule of Capacitors in a Distribution System," IEEE Trans. Power Systems, vol.22, no.2, pp. 755-761, 2007.

- [35]M. B. Liu, C. A. Canizares and W. Huang, "Reactive Power and Voltage Control in Distribution Systems With Limited Switching Operations," IEEE Trans. Power Systems, vol.24, no.2, pp. 889-899, 2009.
- [36]A. Borghetti, M. Bosetti, S. Grillo, S. Massucco, C. Alberto, M. Paolone, and F. Silvestro, "Short-term scheduling and control of active distribution systems with high penetration of renewable resources," IEEE Systems Journal, vol. 4, no. 3, pp. 313-322, Sep. 2010.
- [37]S. Paudyal, C. A. Canizares and K. Bhattacharya, "Optimal operation of distribution feeders in smart grids," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 58, no. 10, pp. 4495-4503, Oct. 2011.
- [38]Young-Jin Kim, Seon-Ju Ahn, Pyeong-Ik Hwang, Gi-Chan Pyo and Seung-II Moon, "Coordinated Control of a DG and Voltage Control Devices Using a Dynamic Programming Algorithm," IEEE Trans. Power Systems, vol. 28, no. 1, pp. 42-51, 2013.
- [39]D. L. Bassett, "Control of Tap Change under Transformers through the Use of Programmable Logic Controllers," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, no. 4, 1993.
- [40]Miyong Kim, R. Hara and H. Kita, "Design of the Optimal ULTC Parameters in Distribution System With Distributed Generations," IEEE Trans. Power Systems, vol. 24, no.1, pp. 297-305, 2009.
- [41]Joon-Ho Choi and Seung-II Moon, "The Dead Band Control of LTC Transformer at Distribution Substation," IEEE Trans. Power Systems, vol.24, no.1, pp. 319-326, 2009.
- [42]Gwang Won Kim and K. Y. Lee, "Coordination control of ULTC transformer and STATCOM based on an artificial neural network," IEEE Trans. Power Systems, vol. 20, no.2, pp. 580-586, 2005.
- [43]J.-H. Choi and J.-C. Kim, "The online voltage control of ULTC transformer for distribution voltage regulation," Electrical Power and Energy Systems, vol. 23, pp. 91-98, 2001.
- [44]M. E. Elkhatib, R. El Shatshat, and M. M. A. Salama, "Optimal control of voltage regulators for multiple feeders," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 25, no. 4, pp. 2670-2675, Oct. 2010.
- [45]F. A. Viawan and D. Karlsson, "Combined local and remote voltage and reactive power control in the presence of induction machine distributed generation," IEEE Trans. Power Systems, vol. 22, no. 4, pp. 2003-2012, Nov. 2007.
- [46]F. A. Viawan and D. Karlsson, "Voltage and reactive power control in systems with synchronous machine-based distributed generation," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 23, no. 2, pp. 1079-1087, Apr. 2008.
- [47]A. E. Kiprakis and A. R. Wallace, "Maximizing energy capture from distributed generators in weak networks," IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution, vol. 151, no. 5, pp. 611-618, Sep. 2004.
- [48]M. A. Kashem and G. Ledwich, "Multiple distributed generators for distribution feeder voltage support," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 20, no. 3, pp. 676-684, Sep. 2005.
- [49]P. M. S. Carvalho, P. F. Correia, and L. A. F. M. Ferreira, "Distributed reactive power generation control for voltage rise mitigation in distribution networks," IEEE Trans. Power Systems, vol. 23, no. 2, pp. 766-772, May 2008.

- [50]R. Tonkoski, L. A. C. Lopes, and T. H. M. El-Fouly, "Coordinated active power curtailment of grid connected PV inverters for overvoltage prevention," *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 2, no. 2, pp. 139-147, Apr. 2011.
- [51]J.-H. Choi and J.-C. Kim, "Advanced voltage regulation method of power distribution systems interconnected with dispersed storage and generation systems," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 16, no. 2, pp. 329-334, Apr. 2001.
- [52]H. Hatta and H. Kobayashi, "A Study of Centralized Voltage Control Method for Distribution System with Distributed Generation," *Proc. Intl. Conf. Electricity Distribution (CIRED2007)*, paper 0330, May 2007.
- [53]H. Li, F. Li, Y. Xu, D. T. Rizy, and J. D. Kueck, "Adaptive voltage control with distributed energy resources: Algorithm, theoretical analysis, simulation, and field test verification," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 25, no. 3, pp. 1638-1647, Aug. 2010.
- [54]S. Grenard, C. Brolly, O. Devaux and O. Carre, "Implementation of a centralised voltage control experiment in presence of distributed generation in ERDF's MV network," *CIGRE 2012*, C6-109, 2012.
- [55]M. E. Baran and I. M. El-Markabi, "A multiagent-based dispatching scheme for distributed generators for voltage support on distribution feeders," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 52-59, Feb. 2007.
- [56]M. E. Elkhatab, R. El Shatshat, and M. M. A. Salama, "Novel coordinated voltage control for smart distribution networks with DG," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 4, pp. 598-605, Dec. 2011.
- [57]H. E. Farag, E. F. El-Saadany, and R. Seethapathy, "A two ways communication-based distributed control for voltage regulation in smart distribution feeders," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 271-281, Mar. 2012.
- [58]Hany E. Z. Farag, Ehab F. El-Saadany, "A Novel Cooperative Protocol for Distributed Voltage Control in Active Distribution Systems," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1645-1656, 2013.
- [59]Y. Zoka, N. Yorino, N. Toga and H. Sugihara, "An effective voltage control scheme for distribution systems by means of multi-agents," *Proc. IEEE/PES Power Systems Conf. and Expo., 2009 (PSCE'09)*, pp. 1-8, 2009.
- [60]Yorino, M. Nishimoto, H. Sasaki, H. Sugihara, "An Optimal Control Problem for Voltage Controllers in Power Systems," *Proc. 13th Annual Conf. of Power & Energy Society, IEE of Japan*, pp. 69-74, 2002 (in Japanese).
- [61]N. Yorino, M. Danyoshi, M. Kitagawa, "Interaction among Multiple Controls in Tap Change Under Load Transformers," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 12, no. 1, pp. 430-436, 1997.
- [62]Y. Zoka, N. Yorino, M. Watanabe, T. Kurushima: "An optimal decentralized control for voltage control devices by means of a multi-agent system," *Proceedings of 18th Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Session PS32.4, Wroclaw, Poland, August 2014, available at IEEE Xplore

[63]N. Yorino, Y. Zoka, M. Watanabe, T. Kurushima: "An Optimal Autonomous Decentralized Control Method for Voltage Control Devices by Using a Multi-Agent System," to be published in IEEE Transactions on Power Systems 2015, available at IEEE Xplore: Digital Object Identifier 10.1109/TPWRS.2014.2364193, Volume: PP , Issue: 99, 2014.

謝辞

末筆ではありますが、本研究を進め、まとめるにあたってお世話になった方々に御礼を述べさせていただきます。

本研究は、広島大学大学院工学研究科 餘利野直人教授のご指導のもとに進めたものであり、長年にわたり数々の御教示、御鞭撻をいただきました先生に、厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行中、大変お忙しい中で、御助言、御意見をいただきました、広島大学大学院工学研究科 高橋勝彦教授、西崎一郎教授に、厚く御礼申し上げます。

広島大学大学院工学研究科 造賀芳文准教授、佐々木豊助教、広島工業大学 久保川淳司教授、川原耕治教授の各先生方には、様々な面で御指導いただき、厚く御礼申し上げます。

筆者が本研究中に、広島大学大学院生であった、大西貴裕氏（現・中国電力株式会社勤務）、久留島智博氏（現・三菱電機株式会社勤務）、井上幸志郎氏（現・九州電力株式会社勤務）、また広島大学工学研究科 電力・エネルギー工学研究室の細田尚吾氏には、多大な御指導、ご協力をいただきました。また、電力・エネルギー工学研究室の方々にも、多大なご協力をいただきました。深く感謝いたします。

また、本研究では、東北電力株式会社、東北電機製造株式会社、株式会社日立製作所の共同研究の成果についてもまとめております。研究の推進と成果をまとめるにあたり、東北電力株式会社の松田勝弘氏、二上貴文氏、堀越和宏氏、瀬戸寿之氏、東北電機製造株式会社の村越潤氏、坪江康弘氏、松本拓也氏、株式会社日立製作所の大西司氏、小西裕一氏、高橋玲児氏、足立昌宏氏、古川健太氏、江頭諒氏には、多大なご協力と御助言をいただきました。深く感謝いたします。

また、社会人博士課程での研究推進を支援いただいた、株式会社日立製作所研究開発グループの井出一正氏、森田歩氏、原田泰志氏、佐藤康生氏、山根憲一郎氏をはじめ、関係各位に深く感謝いたします。また、長年に渡りご指導いただいた、株式会社日立製作所の諸先輩方、同僚各位に深く感謝いたします。

また、筆者に電力系統の研究に携わる機会を与えていただき、また電力の基礎をご教授いただいた、広島大学 佐々木博司名誉教授に深く感謝いたします。

そして、最後に、研究推進を陰ながらも心温かく支えてくれた妻 堀田都に感謝いたします。

平成27年9月
渡 邊 雅 浩

引用既発表文献

I. 学術論文誌等掲載論文

1. 松田勝弘・二上貴文・堀越和宏・瀬戸寿之・渡辺雅浩・村越潤・高橋玲児：「計測情報に基づく SVR の LDC 整定および制御アルゴリズムの検討」, 電気学会論文誌 B, Vol. 132, No. 8, pp.701-708, 2012.
2. N. Yorino, Y. Zoka, M. Watanabe, T. Kurushima: “An Optimal Autonomous Decentralized Control Method for Voltage Control Devices by Using a Multi-Agent System,” to be published in IEEE Transactions on Power Systems 2015, available at IEEE Xplore: Digital Object Identifier 10.1109/TPWRS.2014.2364193, Volume: PP , Issue: 99, 2014.
3. 渡辺雅浩・高橋玲児・松田勝弘・瀬戸寿之：「端計測情報の相関関係を利用した複数台 SVR の協調制御手法の検討」, 電気学会論文誌 B, Vol. 135, No. 10, 2015 (2015 年 10 月 1 日 発行予定)

II. 国際学会講演論文

1. Y. Zoka, N. Yorino, M. Watanabe, T. Kurushima: “An optimal decentralized control for voltage control devices by means of a multi-agent system,” Proceedings of 18th Power Systems Computation Conference (PSCC), Session PS32.4, Wroclaw, Poland, August 2014, available at IEEE Xplore: Digital Object Identifier 10.1109/PSCC.2014.7038469, 2014.