

平成 29 年度 広島工業大学博士論文

再生可能エネルギー源の大量導入に対応した
配電系統電圧管理技術の高度化に関する研究

工学系研究科 知的機能科学専攻

栗 栖 慎 也

目次

第1章 序論	4
1.1 本研究の背景	4
1.1.1 再生可能エネルギーの導入拡大	4
1.1.2 再生可能エネルギー大量導入時の課題	6
1.2 研究目的	12
1.3 本論文の構成	15
第2章 柱上変圧器タップの自律制御による 配電線フィーダ電圧制御方式	17
2.1 緒言	18
2.2 提案する電圧制御方式	18
2.2.1 提案方式の概要	19
2.2.2 柱上変圧器の自律制御	21
2.2.3 タップ戻し制御	22
2.2.4 タップ戻し制御の事前検証	24
2.3 シミュレーション	24
2.3.1 シミュレーション条件	24
2.3.2 ケーススタディ	27
2.3.3 考察	30
2.4 結言	33
第3章 分散電源の力率制御による配電線フィーダ電圧制御方式	34
3.1 緒言	35

目次

3.2	提案する電圧制御方式	35
3.2.1	提案方式の概要	37
3.2.2	電圧推定計算	38
3.2.3	マルチエージェントでの実装	39
3.2.4	制御戦略モジュール適用順の事前検証	41
3.2.5	電圧制御方式	43
3.3	シミュレーション	45
3.3.1	シングルフィーダを対象とした基本機能の確認	45
3.3.1.1	シミュレーション条件	45
3.3.1.2	ケーススタディ	47
3.3.1.3	考察	50
3.3.2	マルチフィーダ制御への拡張	52
3.3.2.1	シミュレーション条件	52
3.3.2.2	ケーススタディ	54
3.3.2.3	考察	57
3.4	結言	59
第4章 分散電源の力率制御とLRTのタップ制御による		
	配電線フィーダ電圧制御方式	60
4.1	緒言	61
4.2	提案する電圧制御方式	61
4.2.1	提案方式の概要	61
4.2.2	マルチエージェントでの実装	62
4.2.3	電圧制御方式	65

目次

4.3 シミュレーション	68
4.3.1 シミュレーション条件.....	68
4.3.2 ケーススタディ.....	69
4.3.3 考察.....	71
4.4 結言	74
第5章 分散電源の力率制御とフィーダ間連系開閉器制御の 組み合わせによる配電線フィーダ電圧制御方式	75
5.1 緒言	76
5.2 提案する電圧制御方式.....	76
5.2.1 提案方式の概要.....	76
5.2.2 マルチエージェントでの実装.....	78
5.2.3 電圧制御方式.....	81
5.3 シミュレーション	83
5.3.1 シミュレーション条件.....	83
5.3.2 ケーススタディ.....	85
5.3.3 考察.....	87
5.4 結言	90
第6章 結論.....	91
謝辞	95
参考文献	96
付録	101
研究業績	103

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の導入拡大

現在、低炭素社会の実現に向けて再生可能エネルギーの導入が世界的に進んでいる。再生可能エネルギーとは、国際エネルギー機関（IEA: International Energy Agency）によると、「絶えず補充される自然のプロセスに由来するエネルギー」と定義されている。日本では、「エネルギー供給事業者による非化石エネルギー源の利用及び化石エネルギー原料の有効な利用の促進に関する法律」で「エネルギー源として永続的に利用することができる」と認められるものとして『太陽光発電，風力発電，バイオマス（燃料製造，熱利用，発電），太陽熱利用，地熱発電，地中熱利用，温度差エネルギー，雪氷熱利用，水力発電（揚水は除く），海洋エネルギー（波力発電，潮流発電，海洋温度差発電）』が規定されている。再生可能エネルギーは、枯渇資源である石油や石炭などの化石燃料とは異なり、エネルギー源とする太陽光や風力は枯渇することがなく、発電時に CO₂ を発生させないため、環境負荷が小さくクリーンなエネルギーであるが、天候や季節，時間帯等の条件に左右されるため出力が不安定であるという特徴を持つ。

図 1.1 に示すように、IEA によると、2015 年末時点で全世界の PV 累計導入量は 228 [GW] となっており、1 年間で 51 [GW] 導入されたことになる^[1,2]。

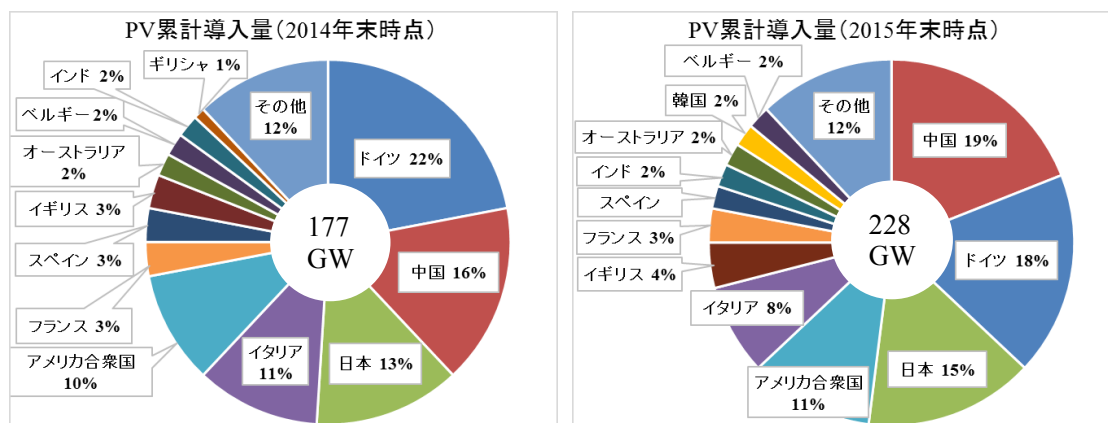


図 1.1 PV 累計導入量 (左: 2014 年末時点, 右: 2015 年末時点)

(出典: IEA PVPS “Trends 2015 in Photovoltaic Applications”^[1],

“Trends 2016 in Photovoltaic Applications”^[2] より作成)

第1章 序論

日本においても、2011年3月11日に発生した東日本大震災以降、再生可能エネルギーへの関心が高まったことや、2012年7月に「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」によりFIT（Feed-in Tariff：固定価格買取制度）が施行される等、エネルギーセキュリティ（供給量に影響する偶発的・突発的なリスクに対し、安定的な燃料調達ができているかの実現度合い）やCO₂排出量削減による地球温暖化対策の観点から国家として再生可能エネルギーの導入を推進していることを背景として、とりわけPV（Photovoltaic：太陽光発電）システムの導入が急増している。日本における、2016年12月末現在のPV累計導入量は34.15 [GW]で、2015年12月末時点の23.41 [GW]から1年間で10.74 [GW]の増加であった。表1.1に示すように、環境省では、今後のPV導入について、2020年までに約63 [GW]、2030年までに約102 [GW]、2050年までに約248 [GW]という累計設置容量を見込んでいる^[3]。

表 1.1 再生可能エネルギー電気の発電設備容量の推計値

（出典：環境省「平成26年度 2050年再生可能エネルギー等分散型エネルギー普及可能性検証検討委託業務報告書」^[3] より作成）

単位：万kW	2020年			2030年			2050年		
	低位	中位	高位	低位	中位	高位	低位	中位	高位
太陽光発電【小計】	6,029	6,311	6,311	6,778	10,197	10,874	22,132	24,844	27,249
太陽光発電（戸建住宅）	1,681	1,702	1,702	2,780	3,060	3,060	12,609	14,779	16,950
太陽光発電（非住宅等）	4,348	4,610	4,610	3,999	7,137	7,814	9,523	10,065	10,300
風力発電【小計】	1,113	1,179	1,323	2,157	2,880	3,250	2,157	5,000	7,000
風力発電（陸上）	1,059	1,070	1,100	1,647	2,170	2,370	1,647	2,700	3,500
風力発電（着床）	53	56	140	240	300	320	240	650	800
風力発電（浮体）	2	54	83	270	410	560	270	1,650	2,700
大規模水力発電	1,146	1,146	1,146	1,146	1,146	1,146	1,251	1,251	1,251
中小水力発電	1,006	1,097	1,188	1,056	1,238	1,420	1,157	1,520	1,884
地熱発電	82	82	82	219	228	241	493	632	792
バイオマス発電【小計】	508	579	651	508	595	682	508	623	738
黒液・廃材	409	409	409	409	409	409	409	409	409
その他バイオマス	99	170	242	99	186	273	99	214	329
海洋エネルギー発電	0	0	0	150	207	349	536	823	1,395
合計	9,884	10,395	10,700	12,014	16,491	17,962	28,233	34,693	40,308

1.1.2 再生可能エネルギー大量導入時の課題

PV や風力発電等の再生可能エネルギーの系統への大量連系を可能にするには、スマートグリッドの技術開発が必要であると言われている。スマートグリッドとは、最新の IT を活用して電力供給、需要に係る課題に対応する次世代電力系統とされる概念である。一般に、再生可能エネルギー等の分散型電源の大規模導入に向けて、従来からの大規模電源と送配電網との一体運用に加え、高速通信ネットワーク技術等を活用し、分散型電源、蓄電池や需要側の情報を統合活用して、高効率・高品質・高信頼度の電力供給システムの実現を目指すものとされる。図 1.2 はスマートグリッドの概念図の一例である^[4]。

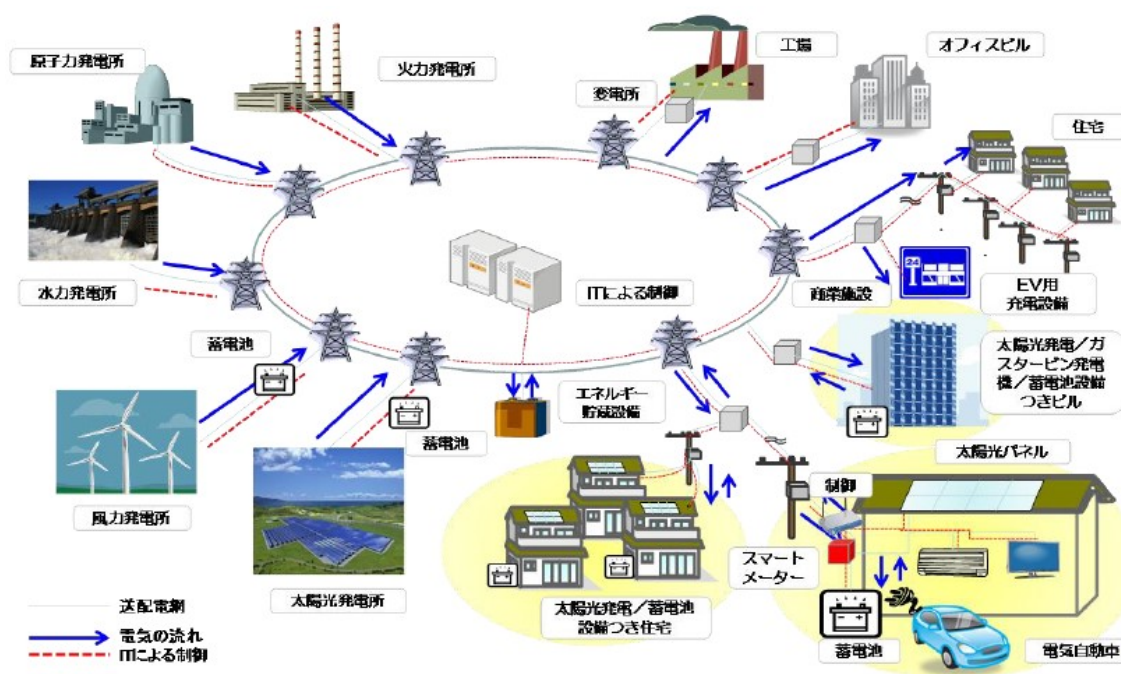


図1.2 スマートグリッドの概念図

(出典：経済産業省「次世代エネルギーシステムに係る国際標準化に向けて」^[4])

スマートグリッド実現のために、日本国内で「次世代エネルギー・社会システム実証事業」がスタートしている。これは、エネルギーマネジメントシステムの実証にとどまらず、交通システムやライフスタイルの変革等の各種実証項目を含む国内実証事業で、全国 19 地域からの応募があり、2010 年 4 月に実証地域として、横浜市（神奈川県）・豊田市（愛知県）・けいはんな学研都市（京都府）・北九州市（福岡県）が選定され、実証が行われている。しかしながら、スマートグリッド実現のためには多くの技術課題が残されている。これらのう

第1章 序論

ち主要なものとして、①余剰電力、②発電電力の不確実性、③周波数調整力の低下、④電圧管理の複雑化、⑤供給信頼性の確保、⑥通信セキュリティの6つが挙げられる。

以下では、それぞれの課題について概説する。

課題①：余剰電力

出力制御が困難な再生可能エネルギー電源が増加すると、需要が少ない季節や時間帯に、PV発電電力とベース電力（原子力・水力・火力最低出力）の合計が総需要を上回り、需給バランスが保てない状況となり、いわゆる余剰電力が発生する可能性がある。図1.3は余剰電力発生イメージを示したものである。

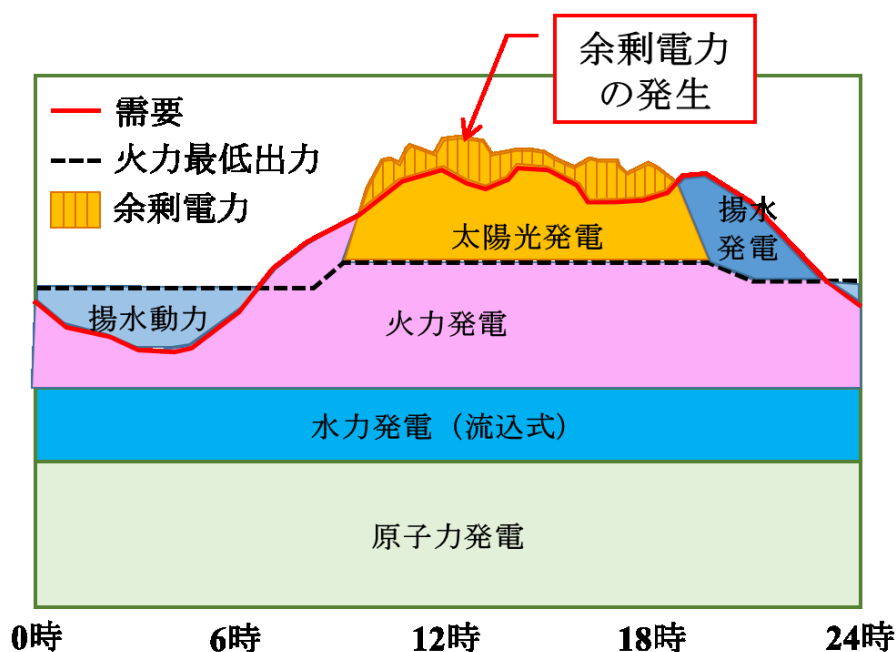


図1.3 太陽光発電の大量導入時における余剰電力発生イメージ

この余剰電力対策としては、電力系統における蓄電池の設置や揚水発電の新増設、また、余剰電力を発生させない、あるいは余剰電力の発生量を軽減するための太陽光発電の出力抑制などの対策が必要である。しかしながら、これらの対策を実施する上でも多くの課題がある。たとえば、蓄電池を設置する場合には、系統状況に合わせた充放電制御方法の確立が必要であるし、揚水発電を新設するためには適地の確保や建設に掛かる期間の問題もある。また、太陽光発電の出力抑制を行う場合には、まず通信インフラ等の仕組みを整備することは必須であり、出力抑制に対するインセンティブをどのように決定するかなどの課題が挙げられる。

第1章 序論

課題②：発電電力の不確実性

PV や風力発電の発電出力は、気象条件の影響で大きく変動する。図 1.4 は広島工業大学図書館屋上に設置された PV の発電電力の 1 分毎の時間変化の一例を示したものである。同図の 2015 年 7 月 30 日のデータに着目すると、雲の掛かり具合によって 1 分後に出力 40% 程度に落ち込むことが何度もあったことが確認できた。現状の電力系統は、需給バランスを保つために総需要電力を予測し、総発電電力をそれに合わせるよう出力調整を行っている。総発電電力には、図 1.4 に示したような PV 発電電力も含まれているため、系統全体で捉えた場合には急峻な変化の打ち消し合いによる平滑化、いわゆる「ならし効果」があるとはいえ、このような再生可能エネルギーの不確実性を見込んだ運用計画が必要になる。

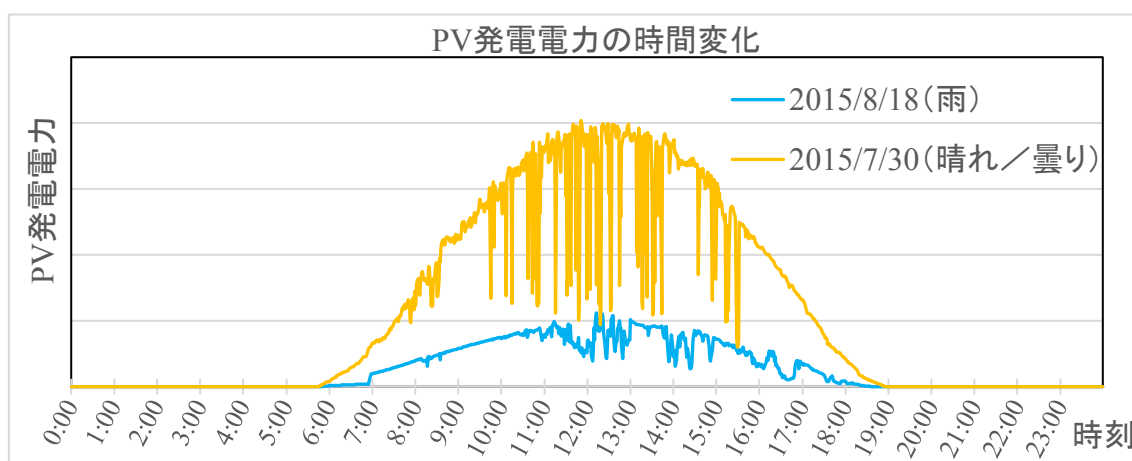


図 1.4 PV 発電電力の時間変化の一例（広島工業大学）

課題③：周波数調整力の低下

安定した電力供給のためには、時々刻々と変動する需要に対して各発電所の出力を制御し、常に需要と発電を一致させる必要があり、これによって周波数を一定に維持している。もし、このバランスが崩れると、周波数が変動し、需要家側の電気機器の運転に影響を与える可能性があるだけでなく、一定値以上に周波数が変動すると、発電機の保護機能が働き、系統から次々と発電機が解列（発電機が電力系統から切り離されること）することにより大停電を引き起こす。周波数は図 1.5 に示すように、需要よりも発電が小さい場合には電気が不足して周波数が低下し、需要よりも発電が大きい場合には電気が余って周波数が上昇する^[5]。

第1章 序論

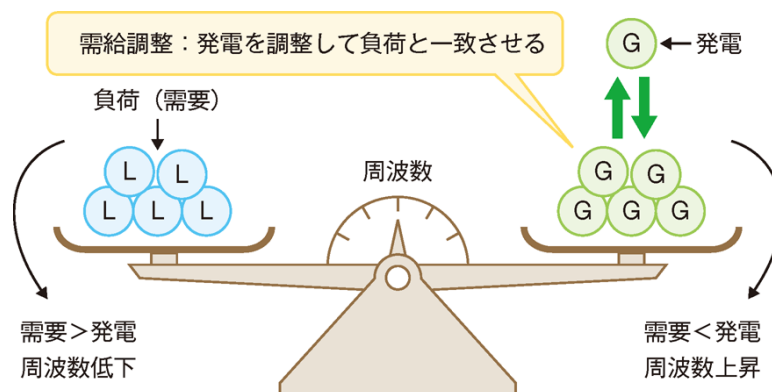


図 1.5 需要と発電の調整イメージ

(出典：新エネルギー・産業技術総合開発機構「再生可能エネルギー技術白書第2版」^[5])

課題②，③の対策として，太陽光発電の出力変動に対応する短期的な需給バランス・周波数調整力の確保のため，揚水発電の新增設や電力系統における蓄電池の設置，火力・水力発電との協調制御に向けた蓄電池の制御技術の開発が必要である。

課題④：電圧管理の複雑化

配電系統に連系される再生可能エネルギー，特に住宅などに設置される太陽光発電が増加すると，配電系統において電力が逆潮流することによって，連系点の電圧が電気事業法第26条に基づく適正值（ $101\pm 6V$ ）を逸脱する，いわゆる電圧上昇の問題が生じる可能性がある。図 1.6 は配電系統における電圧上昇のイメージを示したものである^[6]。電圧を適正值に維持することは，需要家側の電気機器の正常使用や寿命等への影響，系統側の機器保護の観点から必要とされており，電圧が適正值を超えないよう太陽光発電の出力を抑制するなどの対策が求められる。

加えて，配電系統に接続される再生可能エネルギーによる逆潮流がさらに増加すると，配電用変電所においても逆潮流が発生する。これをバンク逆潮流といい，以前は電気設備の技術基準により禁止されていたが，2013年の法改正によって容認された。しかしながら，配電用変電所に設置されている制御装置は，配電用変電所の電圧が高く，系統末端の電圧が低いこと，すなわち潮流方向は配電用変電所から系統末端へ向かう一方向であることを前提に設計されており，バンク逆潮流を可能にするためには保護装置の追加設置や既設装置の更新が必要となる。

第1章 序論

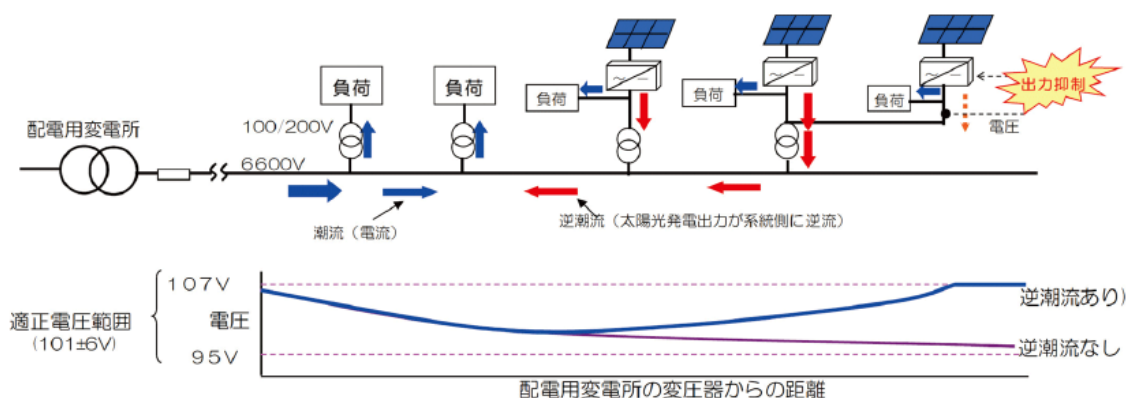


図 1.6 配電系統における電圧上昇のイメージ

(出典：経済産業省「低炭素社会実現のための次世代送配電ネットワークの構築に向けて」^[6])

課題⑤：供給信頼性の確保

電力系統を構成する送電線や変圧器などの設備は定期的に停止して保守作業が行われている。保守作業中は送電ルートが変更されており、電力の安定供給の観点から事前検討後に実施されているが、PV等再生可能エネルギーの発電出力の急変により保守作業が困難な状況も発生している。

また、緊急停止事故を含む系統事故時に想定されるものとして、再生可能エネルギー電源の単独運転と不要解列の問題がある。

単独運転とは、落雷等による系統事故時や緊急停止時に、本来通電を停止すべき電力系統において、太陽光発電等の分散型電源の運転(単独運転)により通電が継続されることで、この単独運転が継続された場合、公衆感電、機器損傷の発生、消防活動への影響、作業員の感電のおそれがある。現在、低圧・高圧配電系統に連系される太陽光発電設置者には、配電系統の事故時等に系統から切り離す単独運転防止装置の設置が電気設備の技術基準の解釈(第276条)に基づき義務づけられているが、現行の単独運転防止装置では、太陽光発電が集中的に導入された場合、単独運転防止装置の相互干渉等により単独運転を検出できないおそれがある。さらに、日本の配電系統では最短で15秒後には送電が再開される場合があり、この時に解列していなければ、インバータの焼損などの機器故障リスクもある。

一方、不要解列とは、本来解列すべきでない程度の電力系統の周波数や電圧の乱れが生じた時に、動作する必要のない単独運転防止装置が動作する、瞬間的に電圧低下の影響を受ける等の理由により、太陽光発電が解列することをいう。この不要解列が一斉に発生すると、需給バランスが崩れる等の恐れがある。

第1章 序論

課題⑥：通信セキュリティ

経済産業省が発表したエネルギー基本計画⁷⁾では、「2020年代早期に、スマートメーターを全世帯・全事業所に導入するとともに、電力システム改革による小売事業の自由化によって、より効果のある多様な電気料金設定が行われることで、ピーク時間帯の電力需要を有意に抑制することが可能となる環境を実現する。」との方針が示された。現在、この方針に従って、各電力会社ではスマートメーターの導入が進んでいる⁸⁾。2016年11月末時点での電力会社別スマートメーターの普及状況を表1.2に示す。このスマートメーターの双方向通信により、需要家の電力等使用情報や遠隔開閉用の制御信号が通信ネットワーク上に流通するため、個人情報の漏えいやサイバーテロ等、情報セキュリティの脅威が増大することが予想されている。

表1.2 電力会社別スマートメーターの普及状況（2016年11月末時点）
（出典：経済産業省「電力及びガスの小売全面自由化について」⁸⁾より作成）

電力会社	導入実績 (万台)	低圧メーター数 (万台)	導入実績割合	設置完了時期
北海道電力	60.2	370	16.3%	2023年度末
東北電力	121.9	666	18.3%	2023年度末
東京電力	863.1	2,700	32.0%	2020年度末
中部電力	229.5	950	24.2%	2022年度末
北陸電力	30.8	182	16.9%	2023年度末
関西電力	683.6	1,300	52.6%	2022年度末
中国電力	67.2	495	13.6%	2023年度末
四国電力	32.9	265	12.4%	2023年度末
九州電力	224	810	27.7%	2023年度末
沖縄電力	6.8	85	8.0%	2024年度末
全国	2,320	7,823	29.7%	2024年度末

1.2 研究目的

前項で示したように、再生可能エネルギーが系統に大量連系することによって電圧分布や電力潮流は複雑化するため、様々な問題を引き起こす恐れがあり、これらの問題を解決するためには、多くの技術課題が残されている。このため、今後さらに増加する再生可能エネルギーの系統への連系に対応できる新たな系統管理・運用システムが求められている。

本研究では、前項で示した6つの主要な課題のうち『電圧管理問題』に焦点を当て、PV大量導入時の複雑な電圧プロファイルに対して、適正範囲内に電圧を維持することが可能な配電系統電圧制御方式を提案することを主目的とする。

これまでも、配電線フィーダの電圧制御について数多くの研究が実施されている^[9-57]。図1.7は配電系統の電圧制御機器を示したものである。これまでの研究を制御機器に着目して分類すると4種類に大別できる。

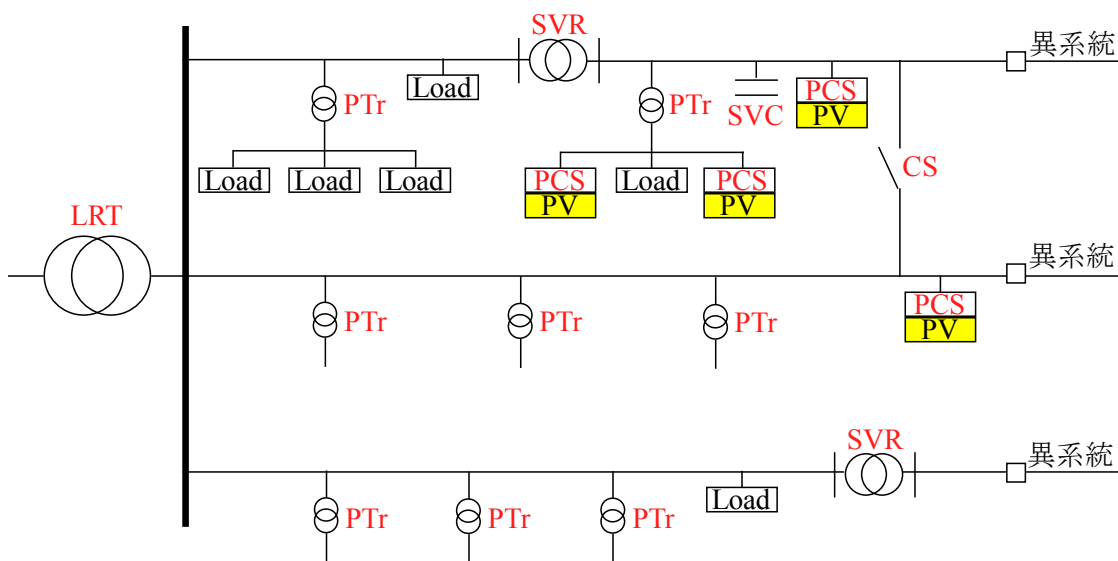


図 1.7 配電系統の電圧制御機器

まず、第1の方法は従来機器であるLRT（Load Ratio Transformer：負荷時タップ切換変圧器）とSVR（Step Voltage Regulator：電圧調整器）の高度な利用および両者を協調した方法^[9-13]である。しかし、基本的にLRTとSVRは潮流方向が電源側から負荷側への一方向であった時代に考案された機器であるため、逆潮流が発生する複雑な電圧プロファイル有する配電線フィーダに対して、これらの機器のみを用いた電圧制御には限界があると考えられる。PVが大量導入された状況を考えてみると、その出力変動に伴う電圧変動が各所で発生し、

第1章 序論

配電線フィーダの電圧プロファイルに与える影響は、非常に複雑になることが予想される。すなわち、配電用変電所の同一バンクに連系する複数のフィーダの内、フィーダ1では上限電圧逸脱、フィーダ2では下限電圧逸脱が同時に発生する可能性がある。このような状況では、送り出し電圧を一律に上下するLRTでの対策は取れなくなる。また、線路途中に導入されているSVRのタップ管理の複雑化と共に、SVRの新設なども必要になることが予想される。

第2の方法は、SVC（Static Var Compensator：静止型無効電力補償装置）などの機器を導入した方法^[14-17]である。これらの方法は、装置を新設するため、機器の導入コストの問題や設置箇所・容量の選定などが課題となり、様々な手法が提案されている。さらに、今後も系統状況が頻繁に変更されることが予想される現在の状況では、設置箇所・容量をどのタイミングで決定するべきかという問題もある。

第3の方法は、太陽光発電装置に併設されるPCS（Power Conditioning System：パワーコンディショナ）を用いた方法^[18-39]である。これらの方法は、PCSの機能によりPV発電電力の有効電力と無効電力を変更することで電圧制御するもので、様々な手法が提案されている。たとえば、文献[20]では、無効電力発生機能を追加したPCSを試作し、実証試験によりPCS容量を増加させることなく電圧変動を抑制できることが実用レベルで示されている。しかし、配電線フィーダ内に複数箇所に設置されるPCSに対する協調方式の検討が残されている。

第4の方法は、PTr（Pole mounted Transformer：柱上変圧器）のタップ制御を用いた方法^[40-42]である。たとえば、文献[40]では、電圧制御問題を幾つかの負荷断面での電圧余裕の最大化問題として定式化し、例題システムでその性能が評価されている。柱上変圧器タップ・SVR配置・送出し電圧を総合的に考慮した実用的な系統条件での最適解の探索への見通しが示されている。しかし、どのようなシステム構成にして実用化するかについての検討が残されている。文献[41]は、電圧補償用の直列変圧器を具備した新しい柱上変圧器を開発し、フィールド試験により実システムへの適用の見通しが示されている。しかし、追加した制御箱内の中に、あらかじめ負荷の平等分布や末端集中分布等の係数を制御パラメータとして格納しておく必要があるため、負荷分布が変更された場合（系統構成や平日・休日負荷、および時間帯での負荷変動など）の対応が課題となっている。

一方、システムの構成方法に着目してこれらの研究を分類すると、“集中型システム^[43-50]”と“分散型システム^[51-58]”の2種類に大別することができる。

集中型システムは、数理計画法やメタヒューリスティックなどを用いて調相設備や負荷

第1章 序論

時タップ切替変圧器のタップ操作を最適化問題として解く方法である。この方法は、基本的に制御対象の全ての情報を収集した上で最適化問題を解く必要がある。しかし、住宅団地、オフィスビル、工場などに設置される分散電源の新設や撤去を伴う情報を収集し、管理することは極めて困難であると言える。したがって、今後さらに進む再生可能エネルギーの大量導入に対応した配電線フィーダの電圧制御には、集中型システムでの対応は難しいと考えられる。

これに対して分散型システムは、隣接する変電所のデータを局所的に交換することによって自律的な制御を行うものである。たとえば、文献[51]は LRT と SVC との組み合わせの方法が提案されているが、この分野の初期の論文であり再生可能エネルギーが導入された場合の評価は実施されていない。文献[54]は配電システムの電圧制御に初めてエージェントを用いた方式の提案であるが、ある時間断面の負荷状況から算出される電圧感度を用いた概念的な提案に留まっている。エージェントを用いて、文献[55]では従来の VQC に機能を追加する方式や、文献[56]では変電所の1次側母線の適正化のために移動エージェントを用いて2次側母線の調相設備を制御する方式や、文献[57]では LRT による電圧制御と調相設備による無効電力制御を組み合わせる方式が提案されている。しかし、これらの提案方式は本論文で対象とする配電システムを扱うものではない。

このように、再生可能エネルギーの大量導入をきっかけとして、電圧制御についての研究は盛んに行われている。この状況は、電力システムの長い歴史からすると最近の事象の一つであると言える。現在は、新しい環境における電圧制御に関する研究の黎明期であり、電力品質を確保した上で保守性、経済性等が優れた手法の開発が期待されている。

本論文では、配電システムの電圧管理問題に対して、前述の制御機器に着目した分類において、第3と第4の方法をベースとした配電線フィーダの電圧制御方式を提案する。本論文で提案するシステムは、情報のある程度集約し全体的な意思決定をする集中型システムの考え方と、分散電源や系統構成の頻繁な変化を許容できる分散型システムの考え方を融合した“ハイブリッド型システム”を目指すものである。

1.3 本論文の構成

本論文は、全6章で構成される。

第1章では、序論として本研究の背景と目的を述べる。

第2章では、柱上変圧器タップの自律制御による配電線フィーダ電圧制御方式を提案する。この方法は、前節で示した制御機器に着目した分類において、第4の方法に着目したものである。まず、PTrの機能と役割を概説した後、PTrに自身の電圧と電力のセンシングとタップ制御機能を新たに実装すると仮定し、このセンシング結果から、自律的にタップを制御することで母線電圧を適正範囲内に保つ電圧制御方式を提案する。提案する制御則を実装したPTrを含んだ簡単な配電線フィーダモデルを作成し、シミュレーションにより提案方式の有効性を示す。

第3章では、分散電源の力率制御による配電線フィーダ電圧制御方式を提案する。この方法は、前節で示した制御機器に着目した分類において、第3の方法に着目したものである。まず、PVに併設されるPCSの機能と役割を概説した後、複数の分散型電源の力率制御を協調させ、フィーダ内完結型の電圧制御方式を提案する。簡単な配電線フィーダモデルを作成し、配電線フィーダに対応する“フィーダエージェント(F_AG)”と、連系する需要家や太陽光発電所の母線に対応する“母線エージェント(B_AG)”の2種類のエージェントから構成されるマルチエージェントシステムを用いて計算機シミュレーションを実施して、その有効性を示す。また、対象を複数フィーダ制御に拡張する第一歩として2つのフィーダの電圧制御を実施し、提案手法の有効性を示すと共に、マルチエージェントシステムを採用したことによる系統状況の変更に対する拡張性を確認する。

第4章では、分散電源の力率制御と配電用変電所LRTのタップ制御による配電線フィーダ電圧制御方式を提案する。この方法は、前節で示した制御機器に着目した分類において、第3の方法をベースに、既存の代表的な電圧制御機器である配電用変電所LRTのタップ制御との協調制御方式を提案するものである。まず、LRTの機能と役割を概説した後、第3章で有効性を示した分散電源の力率制御と配電用変電所LRTのタップ制御を組み合わせた方式を提案する。配電用変電所LRTに対応する“変電所エージェント(SS_AG)”と、配電線フィーダに対応する“フィーダエージェント(F_AG)”と、連系する需要家や太陽光発電所の母線に対応する“母線エージェント(B_AG)”の3種類のエージェントから構成されるマルチエージェントシステムを用いて計算機シミュレーションを実施して、その有効性を示す。

第1章 序論

第5章では、分散電源の力率制御とフィーダ間連系開閉器制御の組み合わせによる配電線フィーダ電圧制御方式を提案する。この方法は、前節で示した制御機器に着目した分類において、第3の方法をベースに、別フィーダとの連系を制御するフィーダ間連系開閉器との協調制御を提案するものである。まず、フィーダ間連系開閉器の機能と役割を概説した後、第3章で有効性を示した分散電源の力率制御とフィーダ間連系開閉器制御を組み合わせた方式を提案する。配電線フィーダに対応する“フィーダエージェント(F_AG)”と複数のF_AG間の連系を管理する“フィーダグループエージェント(FG_AG)”，配電線に連系する需要家や太陽光発電所の母線に対応する“母線エージェント (B_AG)”の3種類のエージェントから構成されるマルチエージェントシステムを用いて計算機シミュレーションを実施して、その有効性を示す。

最後に、第6章では、本研究で得られた成果をまとめると共に、今後の課題及び展望について述べる。

第2章 柱上変圧器タップの自律制御による

配電線フィーダ電圧制御方式

配電系統の電圧制御に係る機器の中で、柱上変圧器（PTr: Pole mounted Transformer）は、一つの鉄心と巻数の異なる2つのコイルで構成され、この巻数比によって6,600[V]級の入力（1次側）電圧を105/210[V]級の出力（2次側）電圧に変圧するもので、電力会社等の電気事業者が管理する電圧制御機器の中では需要家に最も近い位置にある。したがって、電気事業法施行規則第44条で規定されている「電気の供給場所での電圧」は、同図に示すPTrの2次側電圧にほぼ等しい。すなわち、電気事業法の規定を満足するためにはPTrの2次側電圧を管理すれば良いと言える。

そこで本章では、図2.1の配電系統モデルに示すように、需要家に最も近い場所にある電圧調整機器であるPTrに着目し、系統構成の変化や平日・休日負荷パターンの変化、および時間帯での負荷変動などに対応できるリアルタイム制御を考慮し、制御パラメータの変更が不要である新しい電圧制御方式を提案する。

なお、本章の内容は、一連の研究成果をまとめた論文[42]に基づいたものである。

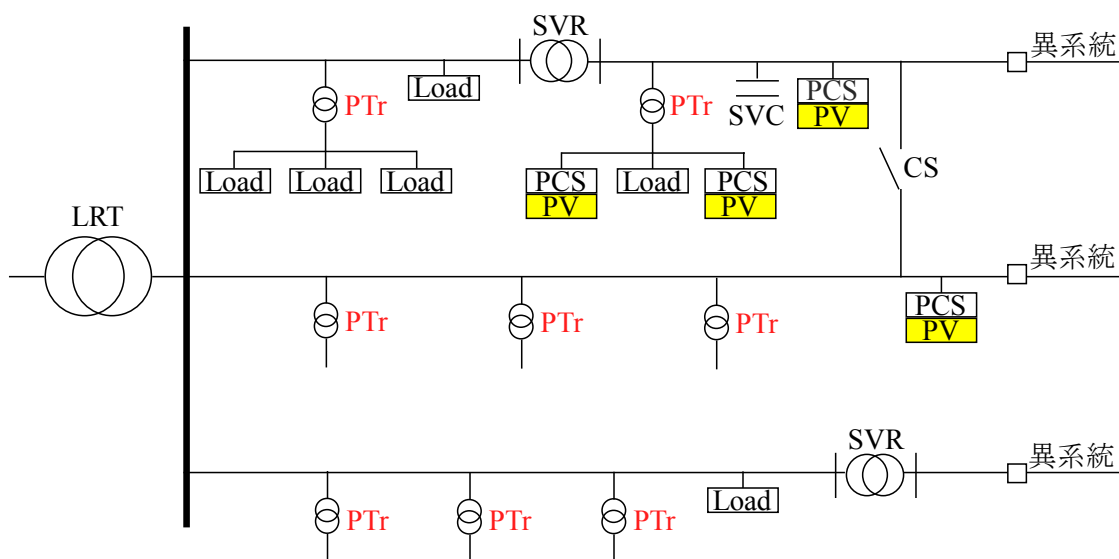


図 2.1 配電系統の柱上変圧器による電圧制御方式

2.1 緒言

本章で制御対象とする PTr は、一般に、巻数比の違いによって 4 つ程度のタップ数を有している。このタップ値は頻繁に変更することを想定していないため、設置されている PTr の大部分は、自動もしくは遠隔操作によってタップ値を変更できる機能を有していない。このため、新たに住居等に小規模 PV システムが連系するなどの理由で電圧プロファイルが変化して、タップ変更の必要が生じた場合には当該 PTr の設置場所まで行ってタップ変更作業を行わなければならない。

そこで本章では、PTr には自身の電圧と電力のセンシングとタップ制御機能を新たに実装すると仮定し、このセンシング結果から、PTr に実装した制御用ソフトウェアの自律動作により、タップ値を制御し、厳しい需給バランスの変動に対応できる電圧制御方式を提案する^[42]。なお、PTr の変圧比（タップ値）を制御可能なりミットまで使用しても電圧違反が残る場合には、たとえば、LRT 制御との協調が必要となるが、本章では PTr の自律制御方式の開発に焦点を当てるため、LRT との協調は対象外とする。

2.2 提案する電圧制御方式

本方式は、配電用変電所に接続された 1 つの配電線フィーダを対象とする。なお、フィーダの各相電流は平衡しているものと仮定する。

本提案方式の特徴を以下に示す。

- (1) 本方式は、PTr が電圧と通過電力（皮相電力）を計測し、自律的にタップを制御し、電圧プロファイルを適切に管理する方式である。
- (2) 2 次側電圧は、あらかじめ設定された電圧上下限電圧（後述の運用目標電圧）を逸脱した場合の「タップ制御」に利用する。一方、通過電力は、当該 PTr のローディング値（皮相電力／定格容量）を考慮した「タップの戻し制御」に利用する。
- (3) 現状、PTr のタップ値の変更はオンラインで実施されていないため、PV は連系規定により、85%以上の固定力率での連系になっている。しかし、提案方式では力率 100% で連系できる可能性が高まり、需要家のメリットに成り得る方式である。
- (4) また、「タップ戻し制御」の際には、制御後の電圧の推定計算を行っているため、タップ制御のハンチング現象を防止した方式である。

本システムの有効性を確認するためにシミュレータを開発し、モデル系統上で計算機シミュレーションを行った。その結果、柔軟な配電フィーダの電圧制御が実現できることを確認した。

2.2.1 提案方式の概要

図 2.2 の簡単な配電線フィーダを用いて、提案方式の基本的な考え方を説明する。同図において、SS は配電用変電所、Feeder #1 は配電線フィーダ、PTr1～PTr7 は柱上変圧器である。PTr の 2 次側母線の黒の矢印は負荷需要、白の矢印は PV などの分散電源の発電出力を示している。

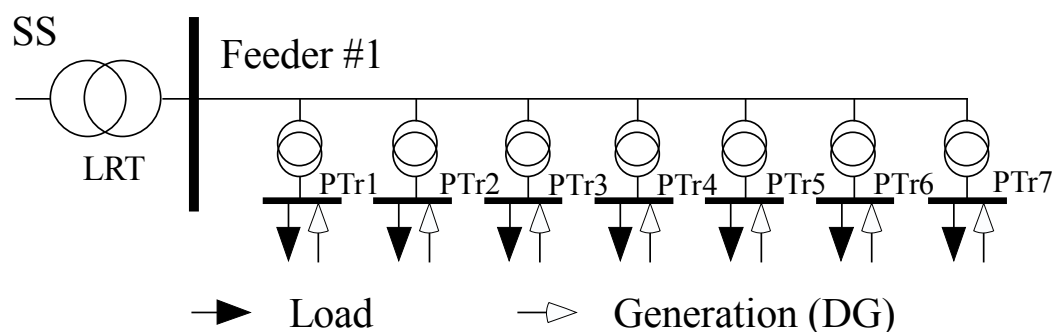


図 2.2 簡単な配電線フィーダモデル

図 2.3 は制御対象の柱上変圧器のモデルである。同図において、PTr は一次側電圧 V_P と二次側電圧 V_S と変圧器の通過電力として有効電力 P_T と無効電力 Q_T を計測する。そして後述の自律制御により PTr のタップ値を制御する。

2 次母線電圧の評価には以下の 2 つの電圧を用いる。

- (1) 運用目標電圧 ($V_{H-Target}$, $V_{L-Target}$) :

$$V_{H-Target} = 106 \text{ [V]}$$

$$V_{L-Target} = 98 \text{ [V]}$$

- (2) 許容電圧 ($V_{H-Limit}$, $V_{L-Limit}$) :

$$V_{H-Limit} = 107 \text{ [V]}$$

$$V_{L-Limit} = 95 \text{ [V]}$$

ここで、運用目標電圧は PV 発電電力の急激な低下による電圧低下が問題になるため、上限を 106 [V] (許容電圧上限まで 1[V]の余裕)、下限を 98 [V] (許容電圧下限まで 3[V]の余裕) としている。

第2章 柱上変圧器タップの自律制御による配電線フィーダ電圧制御方式

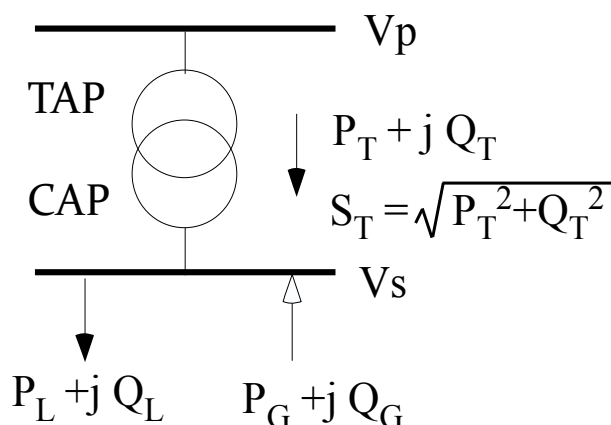


図 2.3 柱上変圧器モデル

本システムでは、タップ戻し制御を導入している。連続的な運用を考えると、タップ戻しが不要であるとの考え方もある。翌日の負荷と発電電力は平日・休日の違いや天候の違いにより変化するため、タップ戻しによるタップ操作回数の変化は不明である。本システムでは、シミュレーション用の負荷 (P_L, Q_L) と発電電力 (P_G, Q_G) は、初期値と最終値がほぼ同一であるので、本システムではタップを初期値に戻している。

タップの戻し制御には、柱上変圧器の容量 CAP と通過電力の皮相電力 S_T から算出される (2.1) 式のローディング値 (Loading) を使用する。

$$Loading = \frac{S_T}{CAP} = \frac{\sqrt{P_T^2 + Q_T^2}}{CAP} \dots\dots\dots(2.1)$$

本システムでは、2次側電圧が上述の運用目標電圧 (98[V]~106[V]) を逸脱した場合が「タップ制御」のトリガーとなる。しかし、タップ値を変更した状況において、2次側電圧が運用目標電圧幅内に含まれる場合は、タップ値を制御前の値に戻すことが可能な状況にもかかわらず、「タップ戻し制御」のトリガーを生成することが出来ない。このような状況に対応するために本システムでは、(2.1) 式で示したローディング値を用いている。

ローディング値があらかじめ指定された値以下になった場合を「タップ戻し制御」のトリガーとする。すなわち、 P_{Tr} の通過電力が十分小さくなった場合に、「タップ戻し制御」の可能性を検討し、可能であれば制御を行わせている。本システムでは、通過電力が十分小さくなった値として P_{Tr} の CAP の 20% の値としている。

「タップ戻し制御」の可否判定は、図 2.3 に対応した仮想系統上で V_p に計測値をセットした潮流計算を実施して、 V_s を求めることにより実施する。 V_s が運用目標電圧を逸脱する場合には、タップ戻しの制御は不可と判定する。

2.2.2 柱上変圧器の自律制御

図 2.4 に提案方式の自律制御の処理フローを示す。以下、同図内に付した処理番号[1]～[7]を用いて処理内容について説明する。

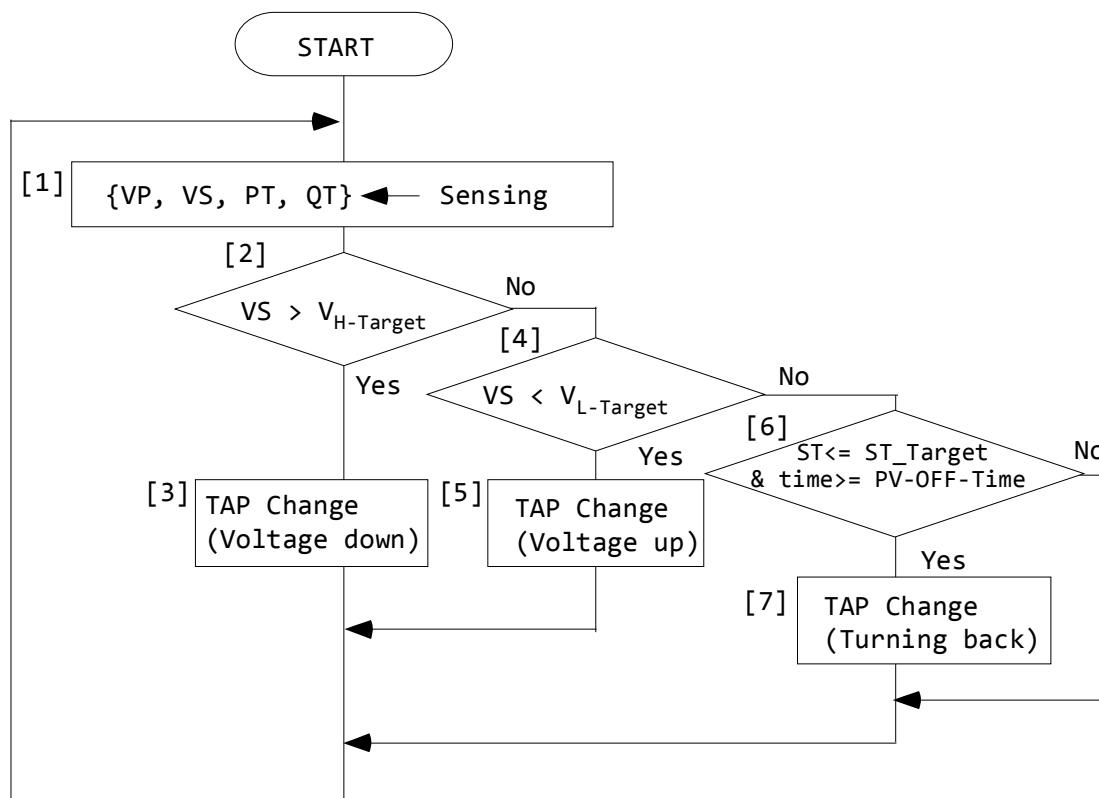


図 2.4 自律制御の処理フロー

- [1] センシング：まず、センサーにより、 V_P 、 V_S 、 P_T 、 Q_T を計測する。
- [2] 運用目標電圧上限の違反判定：2次側電圧 V_S が運用目標電圧上限 $V_{H-Target}$ を逸脱するかどうかを判定し、逸脱があれば[3]へ、なければ[4]へ移る。
- [3] 電圧下げ制御：電圧下げ制御を実施するために、タップ値を変更する。
- [4] 運用目標電圧下限の違反判定：2次側電圧 V_S が運用目標電圧下限 $V_{L-Target}$ を逸脱するかどうかを判定し、逸脱があれば[5]へ、なければ[6]へ移る。
- [5] 電圧上げ制御：電圧上げ制御を実施するために、タップ値を変更する。

第2章 柱上変圧器タップの自律制御による配電線フィーダ電圧制御方式

[6] タップ戻しのトリガーの判定：ローディング値があらかじめ指定された値以下で、かつ PV が発電を停止する PV 出力 OFF 時刻以降であれば[7]へ移り、そうでなければ何もしない。PV 出力 OFF 時刻は、PTr が設置されている地区の日没時刻から設定する。たとえば、広島地区の日没時刻は、17:00～19:27 であるので 19:30 を使用している。

[7] タップ戻し制御：「タップ戻し制御」が可能か否かを仮想系統上の潮流計算で判定し、可であればタップ値を変更し、否であれば何もしない。

本システムは、以上の処理により自身で得られる情報のみを用いた自律制御を実現している。この自律制御は、定周期（たとえば、60 秒）で動作する。

2.2.3 タップ戻し制御

ここでは、前述した「タップ戻し制御」について説明する。図 2.5 は「タップ戻し制御」を行わなかった場合の 2 次側電圧の変化の一例である。同図に示すようにシミュレーション終了時において、PTr6 と PTr7 のタップ値がシミュレーション開始時のタップ値の 1.00 に戻されていないため、電圧も 98.9 [V]と低い電圧となっている。しかし、98.9 [V]は運用目標電圧の範囲内であるため、前述のように「タップ戻し制御」のトリガーが生成されない。このトリガーの生成方法には、さまざまな方法が考えられるが、本提案システムでは、簡単化のためにローディング値と時刻を用いている。

図 2.6 は、同一の条件で、ローディング値が 0.2 以下で、PV 出力 OFF 時刻以降の場合をトリガーとしたものである。同図に示すようにシミュレーションの後半において「タップ戻し制御」が実施され、シミュレーション終了時の電圧もシミュレーション開始時とほぼ同じ電圧となっている。

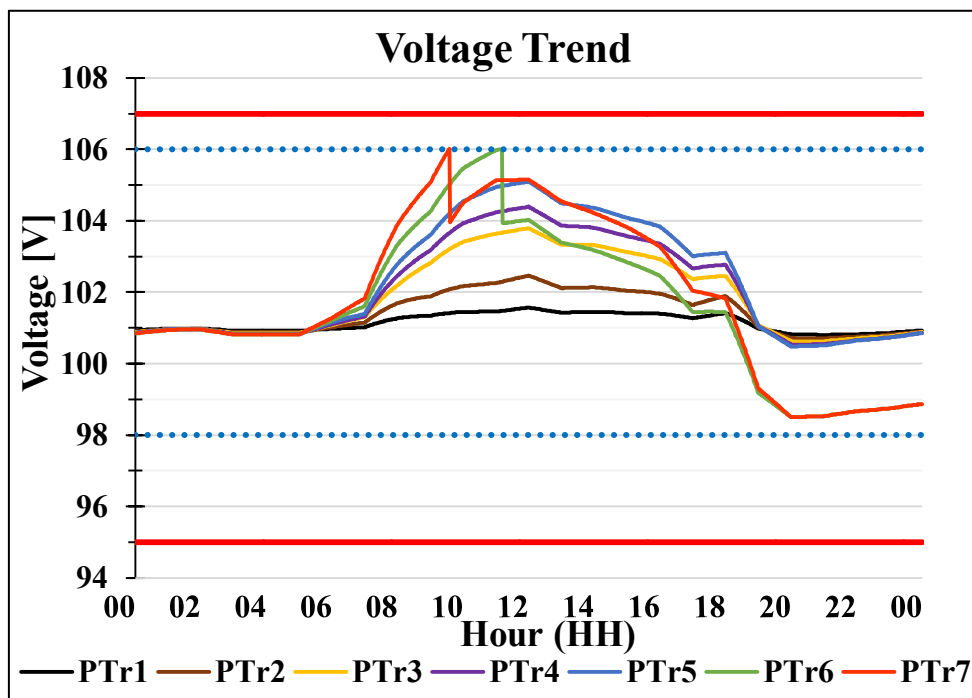


図 2.5 2次側電圧の変化の一例（タップ戻し制御なし）

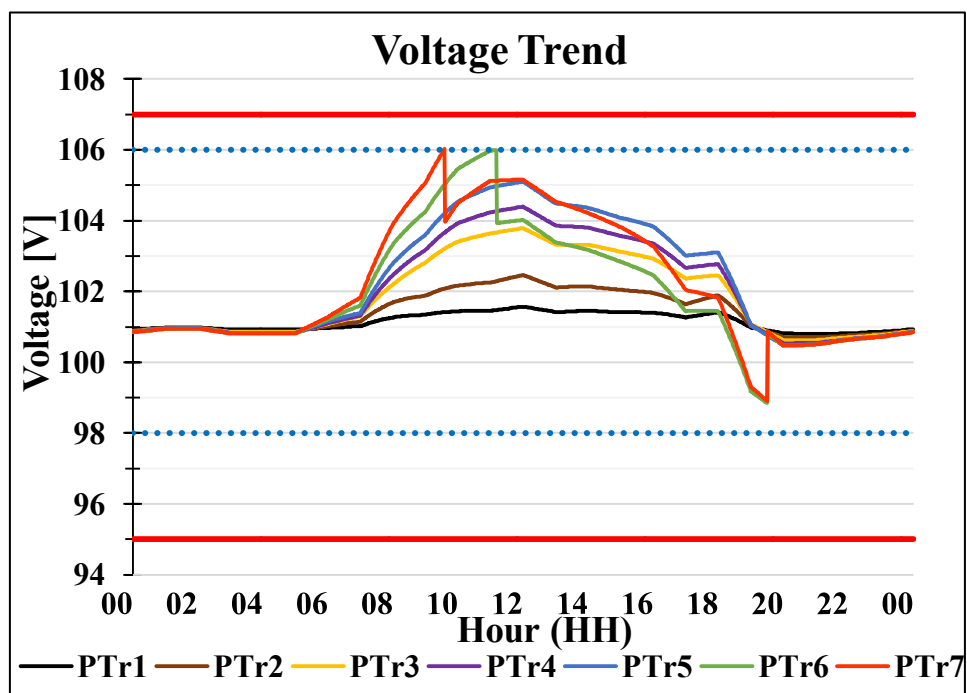


図 2.6 2次側電圧の変化の一例（タップ戻し制御あり）

第2章 柱上変圧器タップの自律制御による配電線フィーダ電圧制御方式

2.2.4 タップ戻し制御の事前検証

「タップ戻し制御」では注意すべきことがある。電圧の現在値が運用目標幅内にある場合でも、「タップ戻し制御」でタップ値が変更されると運用目標幅を逸脱する場合がある。このような場合には、タップ制御が実施され、再度、「タップ戻し制御」が可能な状況が発生する。すなわち、タップ制御と戻し制御が交互に発生するハンチング状態になることが容易に推測できる。したがって、提案システムでは以下のような「タップ戻し制御」の事前検証を実施している。

PTr に実装した制御用ソフトウェア上には、図 2.3 に示した仮想系統オブジェクトを実装している。したがって、この仮想系統オブジェクト上でタップ値を変更した状態での潮流計算を実施する。その際、潮流計算のスラック電圧の値には計測した V_p をセットする。計算の結果得られる V_s は、タップ制御後の値と考えられるため、この値が運用目標電圧内にあるか否かで「タップ戻し制御」の事前検証を行うことができる。

2.3 シミュレーション

本システムの有効性を確認するため、シミュレータを開発し、シミュレーションを行った。

2.3.1 シミュレーション条件

本シミュレーションでは、図 2.2 に示した配電系統モデルを用いた。このモデルは 6,600[V] 配電線で、線路インピーダンスは $(0.14 + j 0.35)$ [Ω/km]、各区間長は 1.5[km]、全亘長は 10.5[km] を想定している。また、PTr は 1 台の容量 40 [kVA] の柱上変圧器を 100 台まとめて 1 つの PTr に縮約している (100 m 当たり約 38 [kVA])。すなわち、CAP = 4,000 [kVA] である。また、タップ戻しのローディング値は 0.2 とした。同図の PTr1, PTr4 は居住地区で、朝と夕方以降の需要が大きく、深夜に少量の発電があるとした。PTr2, PTr5, PTr6 はオフィスで、昼間の需要が大きく、その間にはガスエンジン発電機も出力があるとした。これらの発電電力も大学のガスエンジン発電機の運用パターンを加工して作成したものである。PTr3, PTr7 は PV 発電地区で、需要はなく ($P_L=0.0$)、昼間に PV 発電出力があるとした。

シミュレーションに用いた各 PTr の負荷と発電電力の値を図 2.7~2.9 に示す。

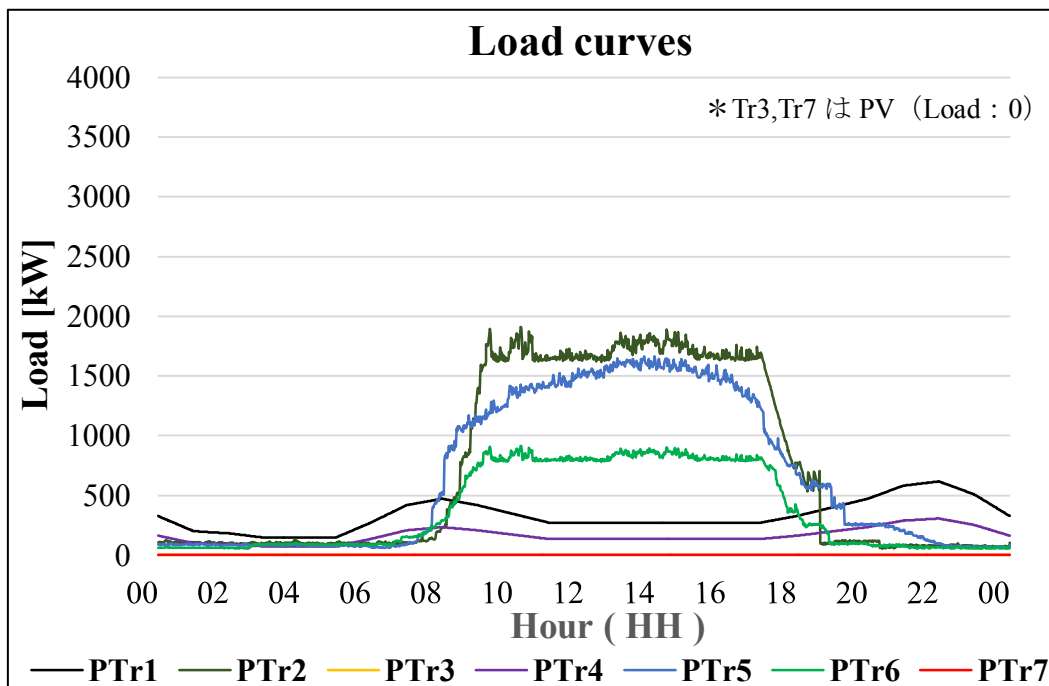


図 2.7 負荷の時間変化

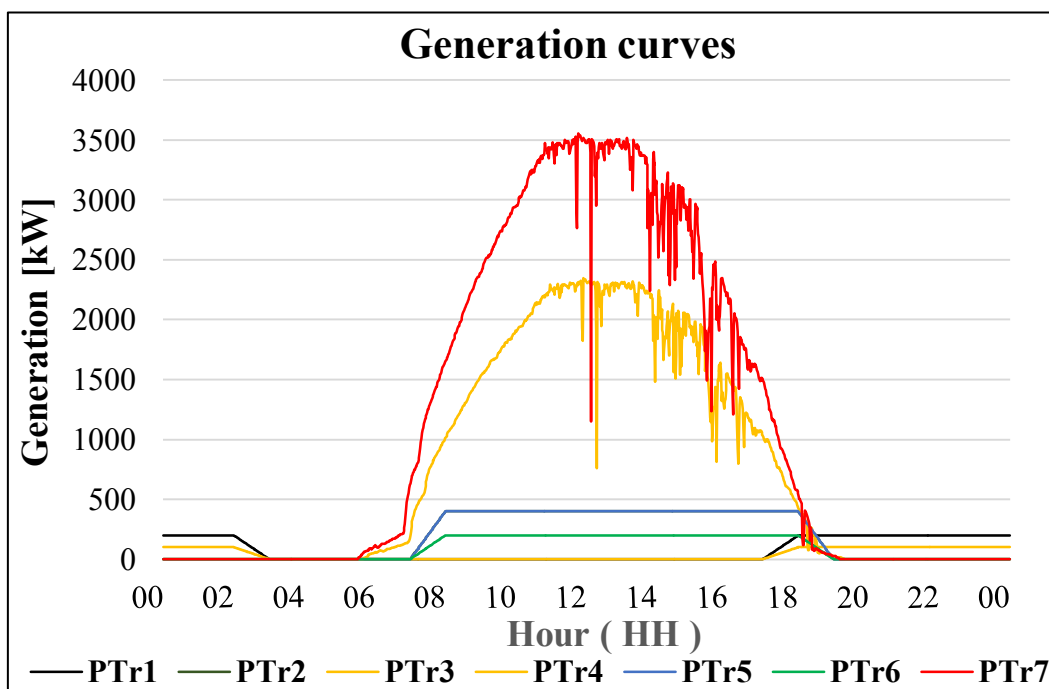


図 2.8 発電電力の時間変化 (晴れ)

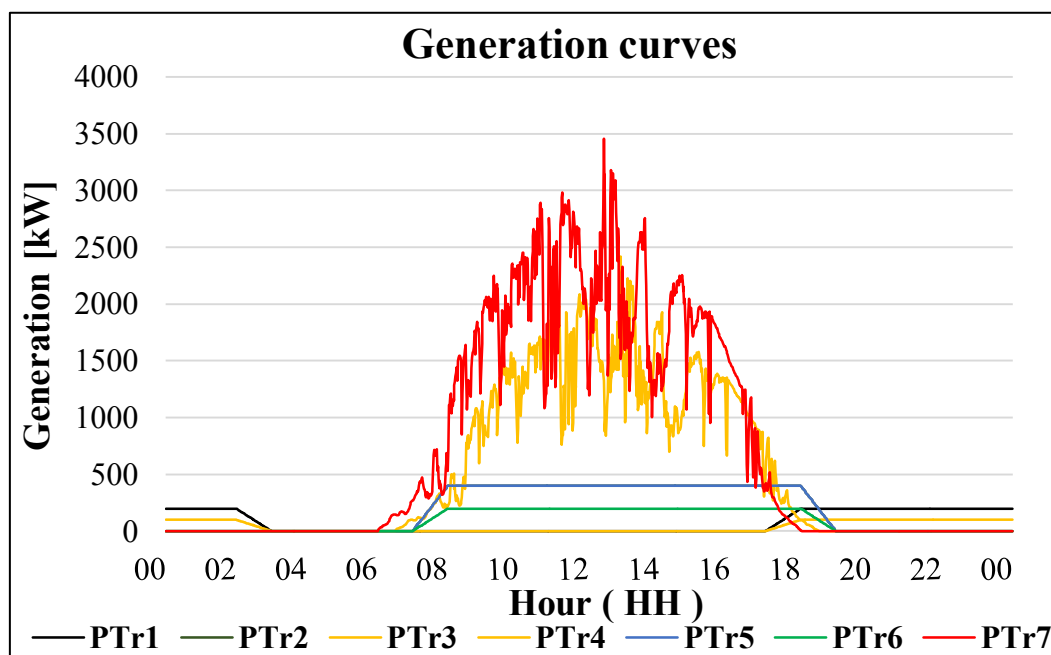


図 2.9 発電電力の時間変化（曇り）

これらのデータは、広島工業大学図書館屋上に設置された PV の 1 分毎データの実測値を加工（ベース電圧の変更と倍率の乗算）して作成したものである。

まず、PV 発電電力は出力変動が大きい場合があるため、その様相の異なる 2 種類を準備した。PV の発電出力を図 2.8～2.9 に示しているが、雲の影響で大きく変動していることに注目されたい。また、10 km 程度の配電線フィーダを想定しているために、連系している PV の発電出力は同様な振舞いをするとして、2 つの PV 発電電力（PTr3 と PTr7 に接続）をほぼ同期させている。

次に、分散型発電電力として大学で平日の昼間に複数稼働しているガスエンジン発電機（単機定格出力：220 KW）の出力も用いている（PTr2, PTr5, PTr6）。ガスエンジン発電機は、スケジュール運転により午前中に起動し、一定出力で運転され夕方に停止している。

PTr の変圧比（タップ値）は、シミュレーション開始時に 1.0 とし、自律制御により 0.02 毎に制御可能限界値の 0.96～1.04 まで 5 段階の制御ができるものと仮定した。また、負荷の力率は 0.98, 発電電力の力率は 1.0 で一定とし、シミュレーションの制御時間間隔は 60[秒]とした。

2.3.2 ケーススタディ

以下では、4つのケースについて説明する。ケース1～2は上限逸脱、ケース3～4は下限逸脱が発生するケースである。

(1) ケース1 (上限逸脱；制御なし)

まず、休日を想定し、図2.7の負荷電力を5分の1とし、発電電力は図2.8のものを与えてシミュレーションを行った。そのPV発電電力の変動量は1分間で60[%]も低下している部分もある。図2.10(a)はタップ制御を行わなかった場合のPTrの2次側電圧の変化である。同図に示すように、太陽光発電所の発電出力が増加するにつれ、電圧上昇が発生し許容電圧幅を逸脱している。

(2) ケース2 (上限逸脱；制御あり)

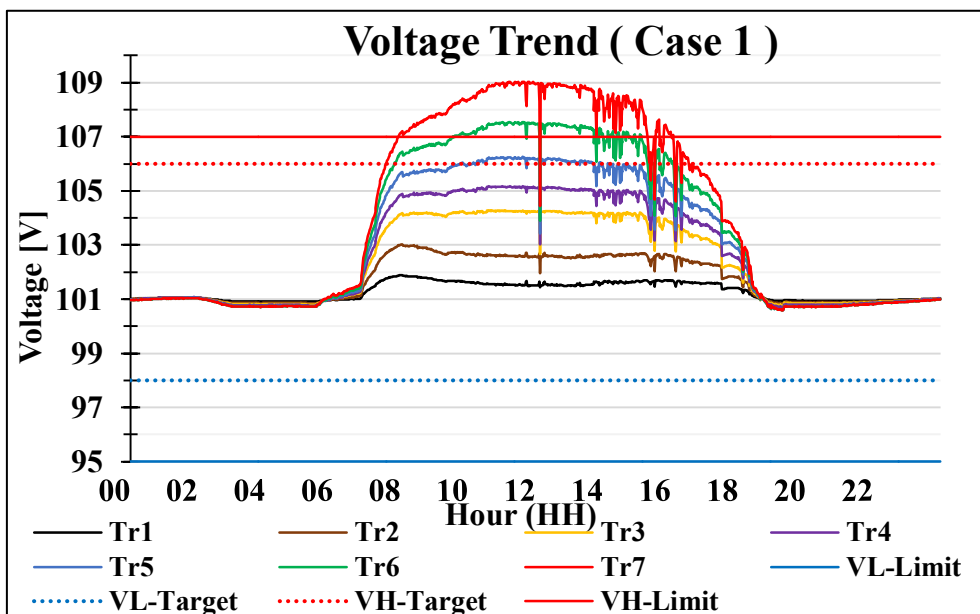
このケースは、ケース1と同条件で制御を行った場合である。PTrの2次側電圧の変化を図2.10(b)に示す。同図に示すように、全ての2次側電圧は運用目標電圧幅以内に収まっている。

(3) ケース3 (下限逸脱；制御なし)

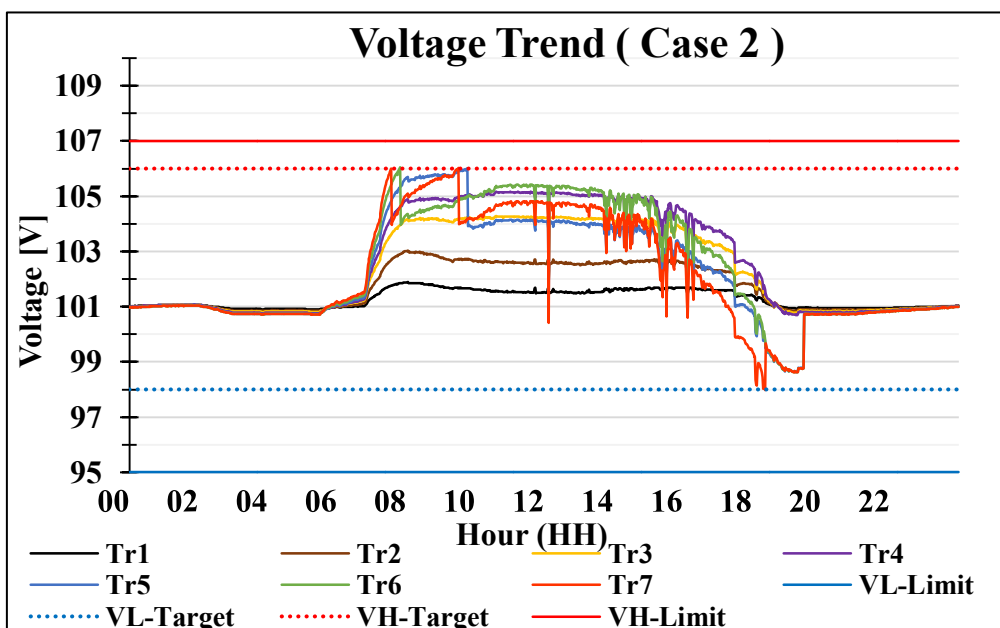
次に、平日を想定し負荷が大きい場合のシミュレーション結果を示す。負荷データは図2.7、発電電力は図2.9のものを使用した。図2.9に示すように、ケース1～2のPV発電電力に比較して、発電を行っている時間帯において大幅に変動している。図2.11(a)はタップ制御を行わなかった場合のPTrの2次側電圧の変化である。同図に示すように、負荷電力が増加するにつれ、電圧の降下が発生し、多くの時間で許容電圧幅を逸脱している。

(4) ケース4 (下限逸脱；制御あり)

このケースは、ケース3と同条件で制御を行った場合である。PTrの2次側電圧の変化を図2.11(b)に示す。同図に示すように、厳しい需給バランスの変動に対しても、全ての2次側電圧が許容電圧幅以内に収まっている。

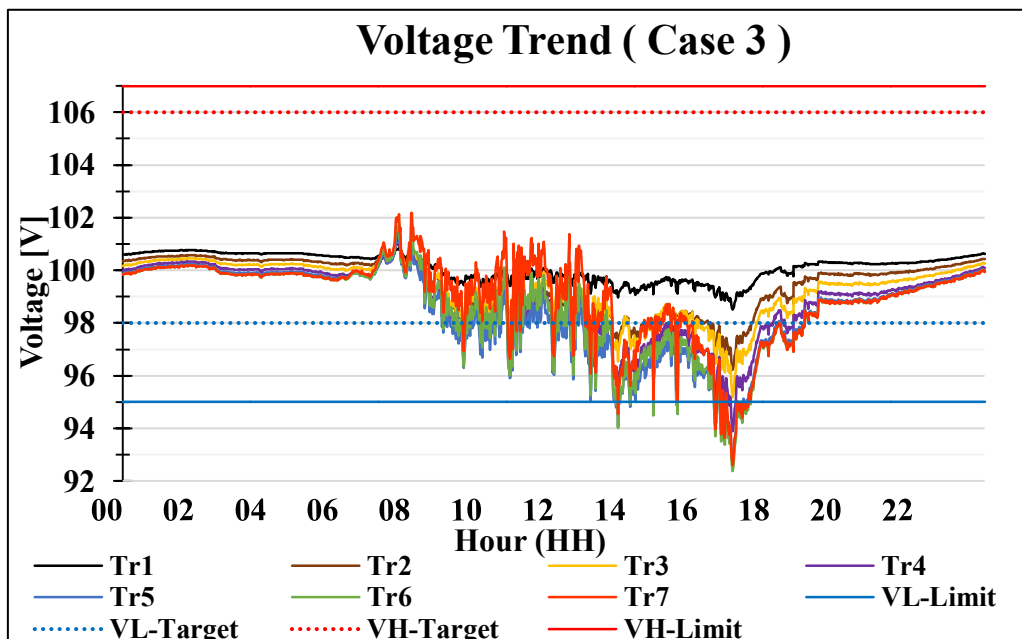


(a) 制御なし (ケース 1).

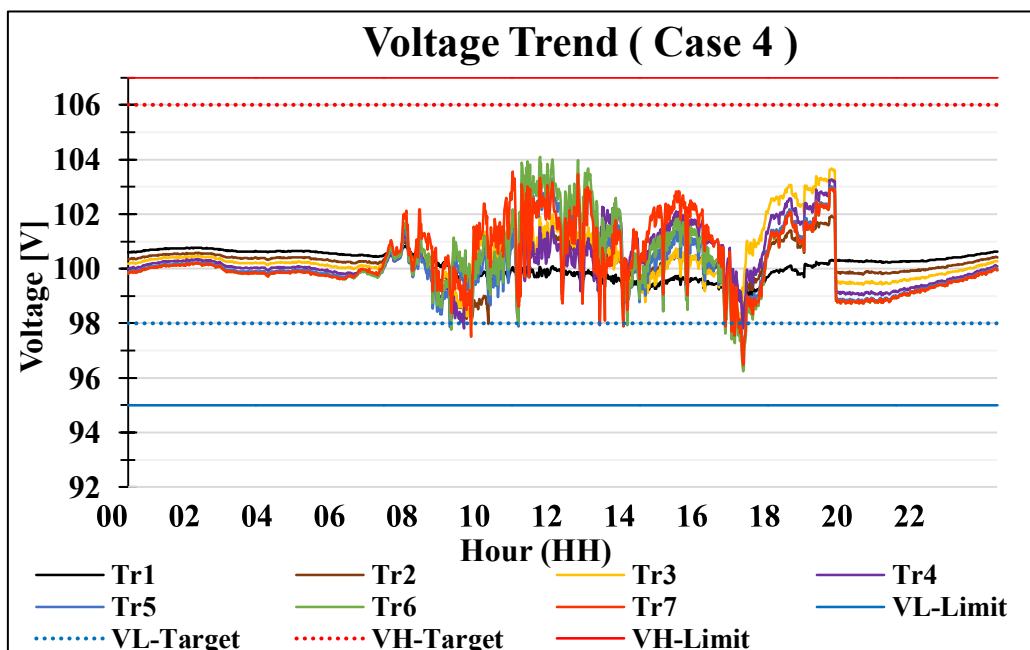


(b) 制御あり (ケース 2)

図 2.10 シミュレーション結果



(a) 制御なし (ケース 3)



(b) 制御あり (ケース 4)

図 2.11 シミュレーション結果

2.3.3 考察

制御ありのケースであるケース2およびケース4の結果から明らかなように、提案方式は PTr のタップを自律制御させることによる電圧の制御の可能性を示している。

各ケースの許容電圧の上下限を逸脱した時間（分）を表2.1に示す。同表より、ケース1における電圧逸脱が発生している時間は、PTr6で286分、PTr7で467分であり、ケース3ではPTr3で9分、PTr4で86分、PTr5で195分、PTr6で175分、PTr7で106分であるが、提案方式では全ての時間で許容電圧の違反が発生していないことがわかる。

ケース4（下限逸脱・制御あり）において注目すべきことがある。図2.11(b)のシミュレーション結果において、運用目標電圧 ($V_{L-Target}$) を逸脱している時間帯が見られる。この原因は、PTRの制御可能タップ値（5段階）をリミットまで使い切っていることを示している。したがって、この時間帯で負荷が非常に大きくなれば、許容電圧 ($V_{L-Limit}$) を逸脱してしまう可能性がある。このような場合にはLRTなどの他の電圧制御機器との協調が必要になる。

また、タップ制御回数を表2.2に示した。ケース毎の各PTrの上側の数字が電圧上げ制御の回数、下側の数字が電圧下げ制御の回数である。両者の回数が等しいのは、「タップ戻し制御」が機能しているためである。PTr毎に見てみると、ケース2で最大2回の制御、ケース4で最大4回の制御が行われていることがわかる。

表2.1 許容電圧の上下限を逸脱した時間（分）

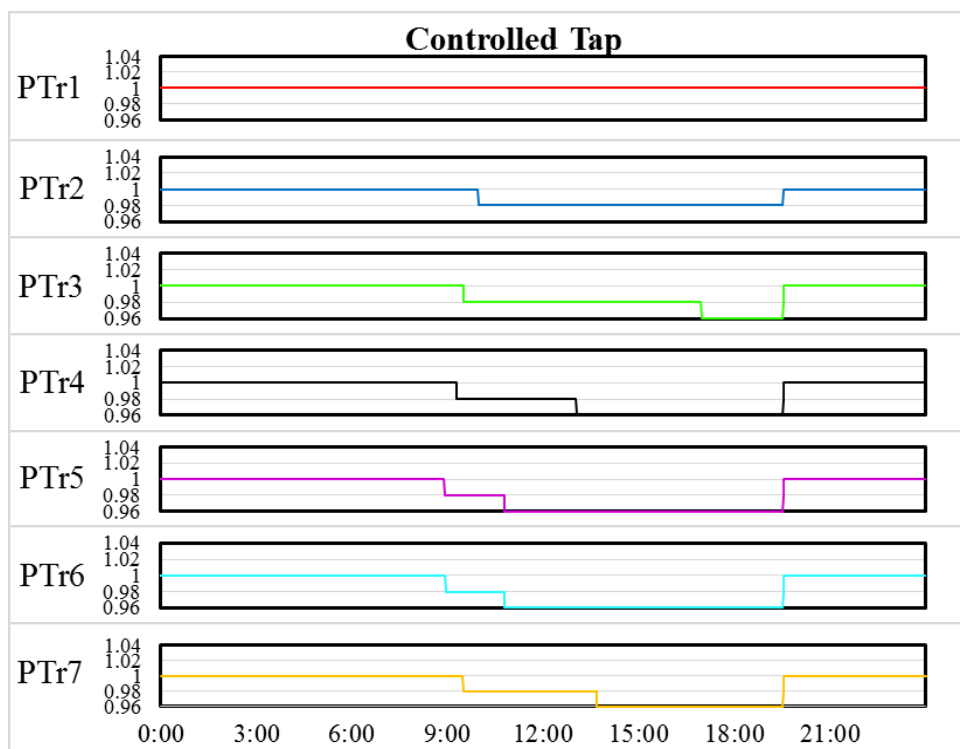
	PTr1	PTr2	PTr3	PTr4	PTr5	PTr6	PTr7
Case 1（制御なし）	0	0	0	0	0	286	467
Case 2（制御あり）	0	0	0	0	0	0	0
Case 3（制御なし）	0	0	9	86	195	175	106
Case 4（制御あり）	0	0	0	0	0	0	0

以上の検討では、2.3.1項のシミュレーション条件に示したようにPTrは5段階の制御が可能であるとしていた。このタップ値を{0.96, 1.0, 1.04}の3段階に変更して、同一のシミュレーションを実施したが両ケースともに許容電圧の違反は発生しなかった。また、期待したようにタップ制御回数は減少している。減少したPTrの制御回数を表2.2の括弧内に記載した。図2.12にケース4のタップ動作状況を示す。同図(a)は5段階タップの場合、(b)は3段階タップの場合である。

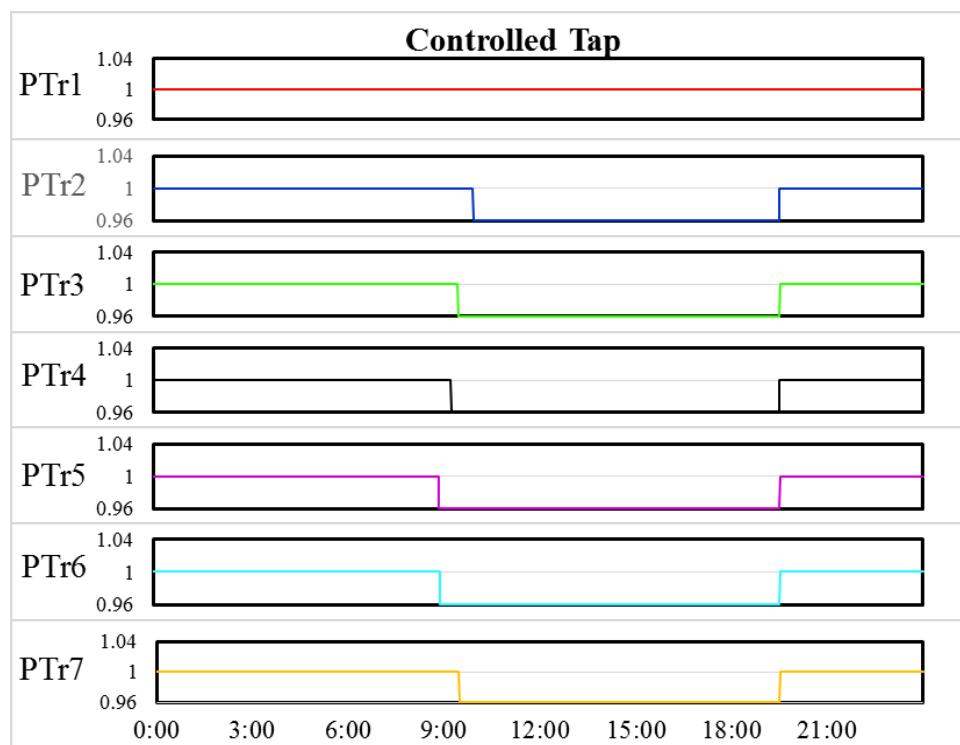
第2章 柱上変圧器タップの自律制御による配電線フィーダ電圧制御方式

表 2.2 タップ制御回数（上段：電圧上げ制御，下段：電圧下げ制御）

	PTr1	PTr2	PTr3	PTr4	PTr5	PTr6	PTr7
Case 2	0	0	0	0	1	1	1
	0	0	0	0	1	1	1
Case 4	0	1	2 (1)	2	2	2(1)	2 (1)
	0	1	2 (1)	2	2	2 (1)	2 (1)



(a) 5段階タップの場合



(b) 3段階タップの場合

図 2.12 タップ動作状況 (ケース 4)

2.4 結言

本章では、柱上変圧器の自律制御による配電線フィーダの新しい電圧制御方式を提案した。柱上変圧器にセンシングとタップ制御機能が追加されているものと仮定し、タップ制御アルゴリズムを実装することによる電圧制御の可能性を示した。シミュレーションの結果から、本方式は厳しい需給バランスの変動に対応できる可能性のある方式であると言える。

本方式では、PTrを100台集約して1つのPTrとして扱い、制御を実施している。実システムへの導入については、本章で前提としたセンシングとタップ制御機能を持ったPTrは、従来のものより価格が高いと考えられるため、全てのPTrを本章で仮定したものに変更することは考えにくい。しかしながら、より詳細にモデル化し、特に条件の厳しい箇所や需給バランスの変動が大きな箇所を対象として、部分的に導入する方法であれば実現可能な方法であるとする。

今後の電力システムでは、配電線フィーダに連系する負荷や分散型電源、そして柱上変圧器などの要素をインテリジェント化する新しい考え方が必要になると考えられる。負荷はピークシフトやピークカットなどの負荷平準化、分散型電源は無効電力の応援、柱上変圧器はタップ制御などのインテリジェント化が考えられる。本方式は、その中で、柱上変圧器のタップ制御に着目した方法であり、今後の新しい電力システムを構築する、すなわち電圧管理技術を高度化する上での選択肢の1つであるとする。

今後の課題としては、タップ戻しの要否や必要なタップ段数、夜間のDG出力の急変、LRTなどの他の装置との協調、三相不平衡システムへの拡張など実用レベルの検討が挙げられる。

第3章 分散電源の力率制御による配電線フィーダ電圧制御方式

電圧制御方式

配電系統の電圧制御機器の中で、PVに併設されるPCS（Power Conditioning System：パワーコンディショナ）は、直流の電気を交流に変換する機器で、インバータの一種である。PVの発電出力は直流であり、これを交流に変換することで、家庭内での利用や蓄電池への充電、系統への連系などに適した、安定した出力に整える役割を担っている。また、系統連系規程に定められている通り、電力会社と事前協議の上決定される固定力率での連系に対応することと、PCSの出力端（連系点）での電圧を設定値以下にすることを目的として、有効電力と無効電力制御、すなわち力率を制御する機能を有している。

そこで本章では、図3.1の配電系統モデルに示すように、PCSを電圧制御機器と捉え、系統状況に応じて力率を制御することで可能な限り力率を悪化させることなく電圧を適正範囲内に保つ電圧制御方式を提案する。

なお、本章の内容は、一連の研究成果をまとめた論文[30, 31, 36]に基づいたものである。

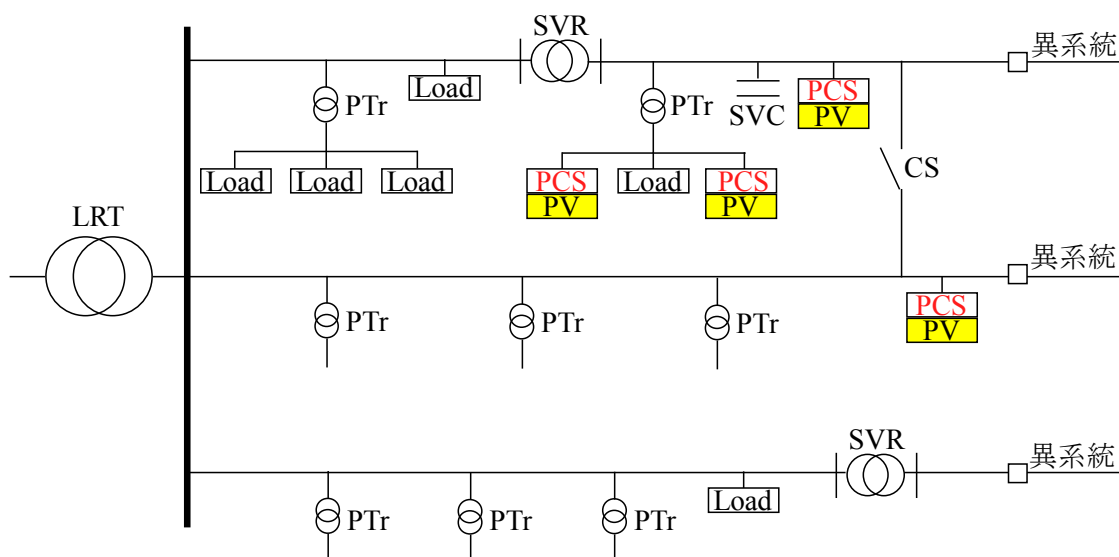


図 3.1 配電系統の PCS による電圧制御方式

3.1 緒言

一般に、電圧調整は、配電用変電所の LRT (Load Ratio Transformer : 負荷時タップ切換変圧器) や、線路途中に設置される SVR (Step Voltage Regulator : 電圧調整器) のタップ制御で行われている。基本的に、LRT は配電用変電所の変圧器のタップ操作により 2 次母線の電圧を制御し、当該母線に接続されている複数の配電線フィーダの送り出し電圧を一律に上下する装置である。また、SVR は配電線フィーダの途中に設置されタップ操作により下流側の電圧を上下させる装置である。

しかし、PV が大量導入された状況を考えると、その出力変動に伴う電圧変動が各所で発生し、その結果、配電線フィーダに与える電圧プロファイルの影響は、非常に複雑になることが予想される。すなわち、PV がどの配電線フィーダに接続されるのか、どの場所に設置されるのか、また、容量はどのくらいかによって、その状況は大きく異なってくる。したがって、これまでのように、全ての配電線フィーダの電圧プロファイルが下流側で低いといった状況ではなくなり、逆に、PV が大量導入されたフィーダの電圧プロファイルは下流側が高いという状況が発生することもある。すなわち、フィーダ 1 では上限電圧逸脱、フィーダ 2 では下限電圧逸脱といった状況が同時に発生することも予想される。このような状況になると、送り出し電圧を一律に上下する LRT での対策は取れなくなる。また、線路途中に導入されている SVR のタップ管理の複雑化とともに、SVR の新設なども必要になることが予想される。

以上のように、PV が大量導入された状況では、既存の LRT や SVR での対処が困難になることが予想される。したがって、配電線フィーダへ無効電力を効果的に注入（もしくは吸収）し電圧プロファイルを適正化する新たな方式の開発が望まれている。

このような現状で、本章では配電線フィーダ電圧制御の一手法として、時々刻々と変化する系統状況に応じて、PV に併設される PCS で発電電力の力率を変更し、系統の電圧を適正範囲内に保つ電圧制御方式を提案する^[30, 31, 36]。

3.2 提案する電圧制御方式

本章では、マルチエージェントを用いて複数の分散型電源の力率制御を協調させ、制御パラメータのチューニングが不要である電圧制御方式を提案する。この方式は、できる限りフィーダ内の分散型電源の無効電力供給量を調整して、厳しい需給バランスの変動に対応できる自己完結型（1 つのフィーダ内で完結する）の電圧制御方式である。ここで、フィーダ内の全ての分散型電源を活用しても電圧違反が残る場合には、たとえば文献[21]のような

第3章 分散電源の力率制御による配電線フィーダ電圧制御方式

LRT 制御との協調が必要となるが、本章では 1 つのフィーダ内で完結する方式の開発を目指し、LRT との協調方式は、第 4 章で述べる。

本システムは、配電線フィーダに対応する“フィーダエージェント(F_AG)”に、連系する需要家や太陽光発電所の母線に対応する“母線エージェント (B_AG)”からの情報を集約し、できる限りフィーダ内の分散型電源の無効電力供給量（力率）を調整して、分散型電源の連系点の電圧を目標範囲内に維持させる方式である。

図 3.2 は分散電源の力率制御による電圧制御の概念を示したものである。同図に示すように、力率を変更すると系統に対して無効電力を注入（もしくは吸収）することが出来るため、無効電力制御による電圧制御の研究も数多く実施されている^[9,11,12,14-39,43,44,46,47,51-58]。

しかしながら、現状の系統連系規程では、一定力率での連系が規定されているため、系統電圧上昇対策のため、力率 1.0 以外の固定値で連系した場合は、力率 1.0 で連系可能な期間、すなわち出力抑制なしで連系しても電圧上昇の問題が発生しない期間においても一定となっており、売電側からみるとこの期間は不必要に無効電力を発生させ、有効電力（売電量）を減らす機会が増えることになる。

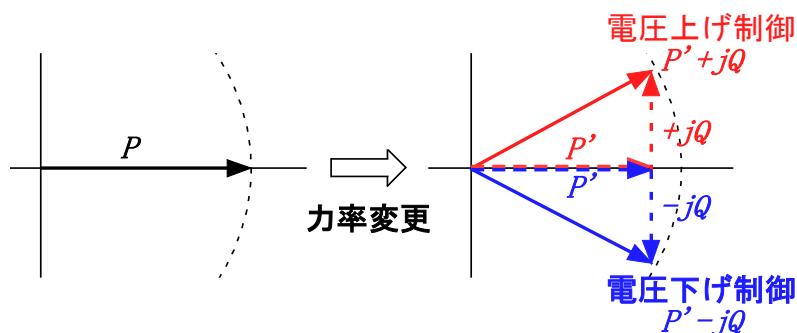


図 3.2 力率制御による電圧制御の概念

本方式の特長を以下に示す。

(1) 本方式は、F_AG が配電線フィーダに連系する B_AG の分散型電源の力率を制御し、無効電力配分を協調させ母線の電圧プロファイルを運用目標電圧幅以内に保つ自己完結型の方式である。

(2) F_AG には、電圧プロファイルを適正化するためのアルゴリズムを知識モジュールの形式で複数実装している。すなわち、需要家や PV 母線の電圧制御をするための「電圧改善モジュール」と分散型電源の力率を改善するための「力率改善モジュール」を用いて、分散型電源の有効電力と無効電力の制御量を決定している。

第3章 分散電源の力率制御による配電線フィーダ電圧制御方式

(3) 各知識モジュールは、制御実施後の系統状況を“仮想系統”上で電力潮流問題を繰り返し解くことにより制御量を決定している。したがって、時々刻々と変化する配電線フィーダ内の厳しい需給バランスの変動に対応することが可能な方式となっている。この電力潮流問題を解くことを本論文では以後“電圧推定計算”と呼ぶ。

(4) 本方式における制御量(力率)は、複数回この電圧推定計算を試行して決定するため、複雑な制御則の実装や制御パラメータのチューニングが不要である。また、本方式は、同時に複数個所の制御が可能な方式となっている。

(5) マルチエージェントシステムを採用することで、各エージェントの複製が容易に行えるため、配電線フィーダが増設されれば F_AG を、連系する需要家や太陽光発電所が増設されれば B_AG を複製することで対応可能なため、系統状況の変化に対して柔軟なシステムである。

3.2.1 提案方式の概要

図3.3の簡単な配電線フィーダを用いて、本方式の基本的な考え方を説明する。同図において、SSは配電用変電所、R1~R2は住宅団地などの居住地区、F1~F2は工場、O1はオフィス、PV1~PV2は大規模な太陽光発電所である。居住地区、工場、オフィスにもPVやガスエンジンなどの分散型電源が接続しているとする。本方式は、これらの発電電力の力率を調整し、無効電力配分を協調させることにより、配電線フィーダの電圧分布を適正な範囲に収めようとするものである。

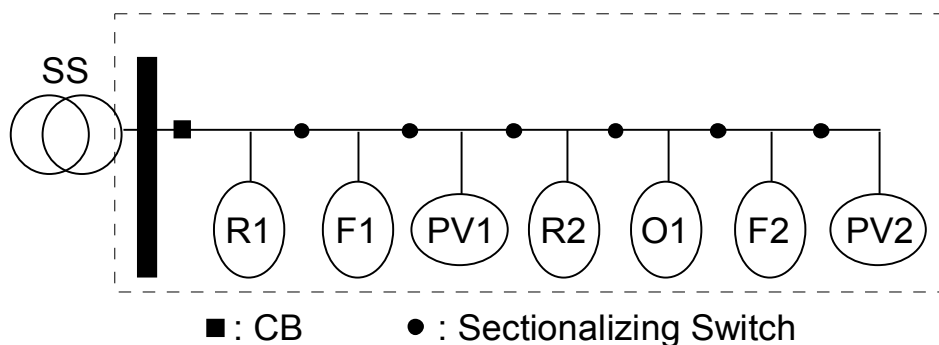


図3.3 配電線フィーダモデル

F_AGには情報を集中させ配電線フィーダの状況を確認しながら電圧制御の意思決定(分散型電源の力率の決定)を行わせる。この際、制御後の電圧分布は、後述の電圧推定計算により求める。仮想系統上でこの電圧推定計算を繰り返すことにより、各母線の無効電力配分を決定させるのが、本方式の特徴である。

第3章 分散電源の力率制御による配電線フィーダ電圧制御方式

本章では配電系統全体から見て局所的に電圧異常が発生しているフィーダ内での自己完結型の自律分散制御の実現を目指している。このような自己完結型の制御が実現できれば、今後配電系統の各所でばらばらに発生することが予想される電圧の上限逸脱や下限逸脱を抑え込むことが可能であると考えられるからである。

3.2.2 電圧推定計算

制御方針が決定されたら、制御後の母線電圧プロファイルを評価するために、配電用変電所の2次側母線をスラックとした潮流計算を実施する。提案システムはニュートン・ラフソン法による潮流計算を用いている。そのアルゴリズムの概要を以下に示す。

(ステップ1) 配電線フィーダのパラメータ（インピーダンスなど）を用いてY行列を作成する。

(ステップ2) 反復回数を $k=0$ とし、配電用変電所2次母線電圧の p.u 値をスラック母線の電圧にセットする。

(ステップ3) ミスマッチを計算する。

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= P_i^{sp} - P_i(\delta^k, V^k) \\ \Delta Q &= Q_i^{sp} - Q_i(\delta^k, V^k) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3.1)$$

ここで、 P_i^{sp} 、 Q_i^{sp} はノード i の有効電力と無効電力の指定値である。本方式の力率の制御とは、太陽光発電所と分散電源に対応する P_i^{sp} と Q_i^{sp} の値を更新することである。また、(1)式の第2項の電力方程式は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} P_i(\delta^k, V^k) &= V_i^k \sum_{j=1}^N V_j^k Y_{ij} \cos(\delta_i^k - \delta_j^k - \theta_{ij}) \\ Q_i(\delta^k, V^k) &= V_i^k \sum_{j=1}^N V_j^k Y_{ij} \sin(\delta_i^k - \delta_j^k - \theta_{ij}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(3.2)$$

ここで、 $V_i \angle \delta_i$: ノード i の複素電圧、 $Y_{ij} \angle \theta_{ij}$: Y行列の (i, j) 要素である。

(ステップ4) ヤコビ行列を計算する。

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.3)$$

ここで、 $J_1 \sim J_4$: たとえば文献[59]参照。

(ステップ5) 修正方程式を解く。

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta^k \\ \Delta V^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta P^k \\ \Delta Q^k \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots(3.4)$$

(ステップ6) 解を更新する。

$$\left. \begin{aligned} \delta^{k+1} &= \delta^k + \Delta\delta^k \\ V^{k+1} &= V^k + \Delta V^k \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(3.5)$$

(ステップ7) 収束判定をし、収束ならば終了する。それ以外であれば、 $k=k+1$ として (ステップ3) へ戻る。

3.2.3 マルチエージェントでの実装

ここでは3.2.1項で述べた電圧制御方式をマルチエージェントにより実現する方法について説明する。図3.4は提案するマルチエージェントシステムの構成図である。同図は図3.3に対応したもので、網掛けの部分のエージェントである。同図に示すように、本システムは1つのフィーダエージェント (F_AG) と複数の母線エージェント (B_AG) の2種類のエージェントから構成されている。B_AGは、メガソーラなどの大規模な太陽光発電所、住宅団地などの居住地区、工場、オフィスに対応している。また、B_AGは負荷と分散型電源を保持することが可能になっている。

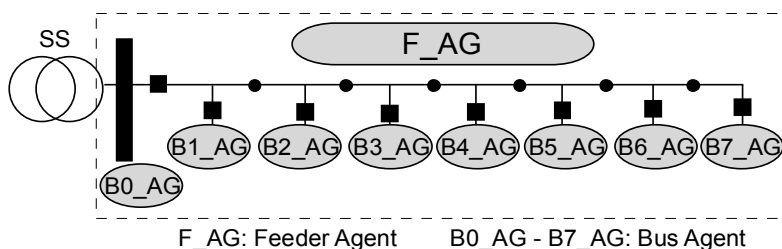


図3.4 提案するマルチエージェントシステム

以下、各エージェントの機能と動作について説明する。

(1) フィーダエージェント (F_AG)

F_AGは、連系する母線電圧の電圧改善と力率改善を行う。このために、連系するB_AGの分散型電源の力率の下限を0.85として協調させる。この力率の下限值は系統連系規程に定められた値であり、本方式でもこの値を制御可能限界値としている。

まず、電圧改善では連系する母線電圧が許容範囲を逸脱した場合に電圧制御方針を決定する。各連系母線電圧の評価には、“許容電圧幅 (V-Limit)”と“運用目標電圧幅 (V-Target)”

第3章 分散電源の力率制御による配電線フィーダ電圧制御方式

を用いる。運用目標電圧幅は、この値を逸脱すると提案システムの電圧制御機能が活性化するための閾値として利用している。

- ・許容電圧幅 ($V-Limit$) : 0.95~1.05 [p.u]
- ・運用目標電圧幅 ($V-Target$) : 0.96~1.04[p.u]

次に、力率改善では上記の電圧改善で実施された力率下げ操作に対して力率改善が可能か否かを検討する。これは、時々刻々と変化する需給状況によっては力率を改善できる可能性が出てくるためである。

(2) 母線エージェント (B_AG)

B_AG は F_AG から の要求に基づいて、現時刻の母線電圧と需要電力と発電電力(有効電力と無効電力)を F_AG へ返答する。また、F_AG から の指令値(力率)に基づき分散型電源の出力を変更する。

(3) エージェントの処理

図 3.5 にエージェントの状態遷移図を示す。エージェントは、状態遷移マシンとして実装している。同図の丸印が状態を表している。F0~F3 が F_AG の状態、S0~S3 が B_AG の状態である。マルチエージェントシステムを構築する上で重要なことは、エージェントの構造を簡単にするることである。このようにすることによってオブジェクトのサイズを小さくし、高性能な計算機を用いることなく多数のエージェントをシステム内に実装させることが可能になる。本方式では各エージェントを図 3.5 に示すように 4 つの状態から構成させている。状態 0 (F0 や S0 に対応) は起動時の初期化、状態 1 (F1 や S1) は環境の知覚、状態 2 (F2 や S2) は意思決定、および状態 3 (F3 や S3) は環境への行為に対応している。

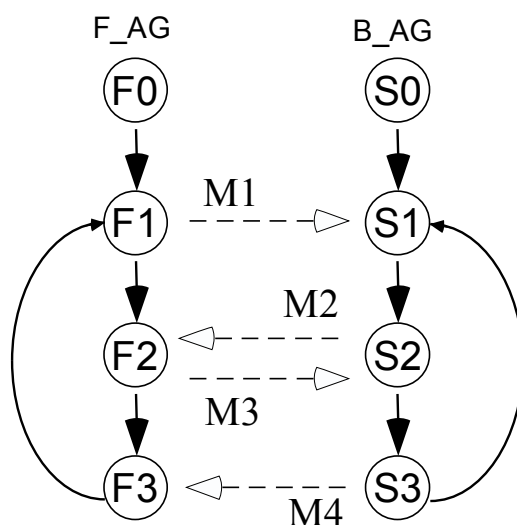


図3.5 エージェントの状態遷移図

第3章 分散電源の力率制御による配電線フィーダ電圧制御方式

一方、同図の M1~M4 はエージェント間で交換されるメッセージである。以下、簡単にメッセージの内容について説明する。

- (1) タスク告示 (M1) : F_AG から各 B_AG へ制御処理の開始を通知する。
- (2) 情報収集 (M2) : B_AG は自身の母線電圧値と需要電力と発電電力を送信する。
- (3) 意思決定 (M3) : F_AG は電圧異常があれば電圧改善モジュール, 電圧異常がなければ力率改善モジュールを用いて各 B_AG の分散型電源の力率を決定し, その結果を B_AG に指示する。
- (4) 結果報告 (M4) : B_AG は F_AG からの指示 (力率) にしたがって分散型電源の出力を変更したことを報告する。

3.2.4 制御戦略モジュール適用順の事前検証

地方供給系統レベルで実施されている調相設備 (SC/ShR) の制御方法は、まず、電圧が悪化した SS の SC/ShR を制御し、次に下流側、そして上流側 SS の SC/ShR を制御する方法が実施されている。これは、この順序で制御することが電圧改善に効果的に作用する (無効電力に対する電圧の感度が大きい) ためである。文献[57]は、そのような順番で制御する方式が示されている。この方法が配電線フィーダでも有効であるか否かを簡単な配電線フィーダのテスト系統で検証を実施した。

図 3.6 に示す簡単な配電線フィーダのテスト系統上で制御位置の変化による電圧制御の効果について確認する。同図において、ノード 0 は SS の 2 次側母線, ノード 3 が制御対象ノードである。ブランチのインピーダンスは、6,600 [V] 配電線のデータ (後述の 3.3.1.1 シミュレーション条件参照) を使用した。

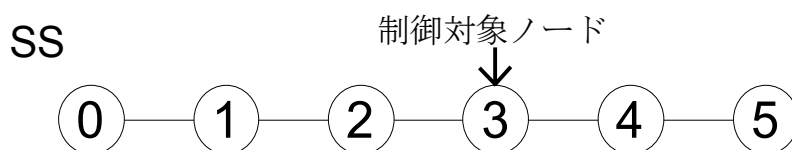


図3.6 事前検証用モデル

まず、制御対象ノードが他のノードより電圧が高くなる状況を設定し、各ノードの力率を独立に 1.0 から 0.9 に変化させて、制御対象ノードの電圧がどのように変化するかをシミュレーションした。この場合、制御対象ノードの上流側ノード (ノード 1, 2) と下流側ノード (ノード 4, 5) の分散型電源の出力 (PG) を同一にするケース A と、異なるケース B~E (PG1 < PG2, PG1 > PG2, PG4 < PG5, PG4 > PG5) 計 5 つのケースについてシミュレーション

第3章 分散電源の力率制御による配電線フィーダ電圧制御方式

し、制御対象ノードの電圧制御効果の大きさについて比較した。表 3.1 がその結果をまとめたものである。網掛けの部分为上流側および下流側で電圧制御効果の大きいものを示している。

同表の A の結果 (ΔV_3) は、制御対象ノードに対する制御効果が上流側より下流側が大きいことを示している。B~E の結果は、上流側では近接ノードが、下流側では出力の大きいノードの制御効果が大きいことを示している。

表 3.1 事前検証結果のまとめ

Node No.		1	2	3	4	5
PG [kW]	A	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
	B	1,000	2,000	2,000	1,000	2,000
	C	2,000	1,000	2,000	1,000	2,000
	D	1,000	2,000	2,000	2,000	1,000
	E	2,000	1,000	2,000	2,000	1,000
$\Delta V_3 = V_3 - V_{30} $ [$10^3 \times$ p.u.]	A	0.03	10.36	20.78	21.04	21.30
	B	0.02	10.35	20.75	10.33	21.25
	C	0.03	5.15	20.73	10.31	21.19
	D	0.02	10.34	20.73	20.96	10.36
	E	0.03	5.15	20.73	20.96	10.36

V_3 : 制御実施後電圧, V_{30} : 制御なし電圧

また、制御対象ノードが他のノードより電圧が低くなる状況でも同一の結果が得られている。したがって、文献[57]で示した地方供給系統での SC/ShR の制御順序が、配電線フィーダでの力率制御の順番にも採用できることがわかる。

なお、分岐の存在する一般的な配電線フィーダにおいては、シミュレーションの結果、制御対象ノードより下流側での分岐の場合は下流側ノードとして扱えばよいという結果が出ている。しかし、上流側での分岐の場合は制御効果が大きいノードが制御対象ノードの近接ノードではないという結果が出ている。したがって、上流側のどのノードを制御するかについては今後の検討が必要である。

この検証結果により、分岐のない配電線フィーダでも有効である結果が得られた。したがって、本研究でもその知見に基づいて配電線フィーダに連系する分散型電源の力率を制御する。すなわち、電圧改善は、まず自身の自律制御、次に他律制御（下流側、上流側の順番）を実施するように構成する。一方、力率改善は力率の悪化を素早く抑制するために電圧改善

とは逆順として、まず他律制御（上流側，下流側の順番），次に自身の自律制御を実施するように構成する。

3.2.5 電圧制御方式

F_AG は B_AG の母線電圧が許容範囲を逸脱した場合に分散型電源の力率を制御する。本方式の電圧制御は，知識モジュールを用いて実現している。知識モジュールは Java のクラスで定義され，図 3.7 に示すように 6 つのモジュール（F2_1～F2_6）を実装している。

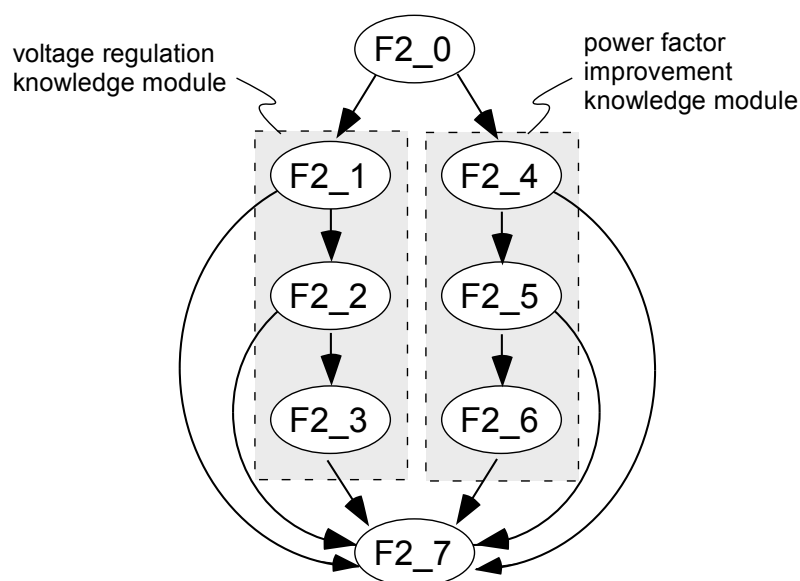


図3.7 制御戦略モジュールの状態遷移図

同図は，図 3.5 の状態 F2 の内部がこのような知識モジュールの状態遷移により実現していることを示している。F2_1～F2_3 が電圧改善モジュール，F2_4～F2_6 が力率改善モジュールである。以下，各モジュールについて説明する。

(1) 電圧改善・自律制御モジュール（F2_1）

電圧異常があった場合に最初に適用される知識モジュールである。このモジュールは，最大の電圧異常が発生している B_AG に対して，当該 B_AG の分散型電源のみで電圧異常の解消を試みる。すなわち，自身の分散型電源の力率を順次下げて電圧推定計算を行う。その結果，力率を下限まで下げても電圧異常が解消されない場合は F2_2 へ遷移し，解消された場合は以降のモジュールの適用をやめ F2_7 へ遷移する。

(2) 電圧改善・下流側制御モジュール（F2_2）

このモジュールは，電圧異常の B_AG より下流側の B_AG の分散型電源の力率を順次下

第3章 分散電源の力率制御による配電線フィーダ電圧制御方式

げて電圧異常の解消を試みる。この場合、下流側の分散型電源の設備容量の大きい順に B_AG を選択し、その分散型電源の力率を順次下げて電圧推定計算を行い、制御量を決定する。その結果、下流側の全 B_AG の分散型電源の制御でも電圧異常が解消されない場合は F2_3 へ遷移し、解消された場合は F2_7 へ遷移する。

(3) 電圧改善・上流側制御モジュール (F2_3)

このモジュールは、電圧異常の B_AG より上流側の B_AG の分散型電源の力率を順次下げて電圧異常の解消を試みる。この場合、上流側の分散型電源の近接の順に B_AG を選択し、その分散型電源の力率を順次下げて電圧推定計算を行い、制御量を決定する。通常はこの3つのモジュールの適用により電圧異常は解消される。なお、この時点でも電圧異常が解消されない場合は、配電線フィーダ内の分散型電源のみでは適正な解が存在しないことを意味している。その場合は、SS の LRT を制御し2次側母線電圧を変更し電圧異常を解消することができるが、本論文ではフィーダ内での自己完結型のシステムの実現を目指しているため範囲外とする。

(4) 力率改善・上流側制御モジュール (F2_4)

時々刻々と変化する電力需要や分散型電源の出力に応じて、各 B_AG の分散型電源の力率は変更されている。したがって、その時点の電圧プロファイルの状況では力率を改善させることが可能な場合があるため力率改善を試みる。力率改善は電圧改善と逆の順序で適用する。したがって、電圧異常がない場合に最初に適用される知識モジュールは上流側を対象とするこの知識モジュールである。適用の順番は最後に電圧適正化の対象となった B_AG から上流側の遠い B_AG から順次行う。力率改善の電圧推定計算の試行過程で電圧逸脱が発生した場合は、その最後の制御を取消し、以降のモジュールの適用をやめ F2_7 へ遷移する。上流側の全 B_AG の力率を 1.0 まで改善しても電圧逸脱が発生しなかった場合は、さらに力率改善をするために F2_5 へ遷移する。

(5) 力率改善・下流側制御モジュール (F2_5)

次に、下流側で上流側と同様な力率改善を試みる。この場合は分散型電源の設備容量の小さい順に B_AG を選択する。

(6) 力率改善・自律制御モジュール (F2_6)

最後は自身の力率改善である。

以上のように、力率改善は最後に電圧改善が行われた B_AG を基点として、電圧改善とは逆順に処理を行わせている。このようにすることにより、自身のために協力してもらった B_AG を優先して力率改善を行う仕組みを実現している。

3.3 シミュレーション

本システムの有効性を確認するため、Java 言語を用いてマルチエージェントシステムを開発し、シミュレーションを行った。以下では、3.3.1 項で、シングルフィーダを対象として本方式を適用した場合のシミュレーション、3.3.2 項で、制御対象をマルチフィーダへ制御対象を拡張する第一歩として 2 本のフィーダを対象として本方式を適用した場合のシミュレーションについてそれぞれ述べる。

3.3.1 シングルフィーダを対象とした基本機能の確認

本項のシミュレーションでは、1つのフィーダを対象とする。

3.3.1.1 シミュレーション条件

本項のシミュレーションでは、図 3.3 に示した配電系統モデルを用いた。このモデルは 6,600 [V] 配電線で、配電用変電所の各フィーダへの送り出し電圧は 6,600 [V] 一定とした。線路インピーダンスは $(0.14 + j0.35)$ [Ω/km]、各区間長は 1.5 [km]、全亘長は 10.5 [km] を想定している。また、同図に示す SS は配電用変電所、R1 は 200 戸程度（最大需要電力 680 [kW]）、R2 は 100 戸程度（最大需要電力 340 [kW]）の住宅団地などの居住地区、F1 は最大需要電力 2,200 [kW]、F2 は最大需要電力 1,100 [kW] の工場、O1 は最大需要電力 1,900 [kW] のオフィス、PV1 は最大発電電力 2,370 [kW]、PV2 は最大発電電力 3,550 [kW] の大規模な太陽光発電所である。シミュレーションに用いた各 AG の負荷と発電電力の値を図 3.8~3.9 に示す。これらの内、PV 発電出力のデータは、広島工業大学図書館屋上に設置された PV の 1 分毎データの実測値を 10 秒毎に加工（補完と倍率の乗算）して作成したものである。図 3.9 に示されているように太陽光発電所の発電出力は、雲の影響で大きく変動している。その変動量は 1 分間で 60 [%]（12:07 の 2,898[kW] から 12:08 の 1,152[kW] まで）も低下している部分もある。また、10 [km] 程度の配電線フィーダを想定しているため、連系している太陽光発電所の発電出力は同様な振舞いをするとして、2 つの太陽光発電所 (B3_AG と B7_AG) の発電電力を同期させている。これは、制御に利用できる無効電力量も同期して小さくなることを意味しているため、制御側からすると厳しい条件を設定していることになる。

分散型電源の力率は、シミュレーション開始時に 1.0 とし、F_AG からの要求に基づいて力率を 0.001 毎に制御可能限界値の 0.85 まで制御できるものと仮定した。なお、この値は連系規定に定められている力率の下限である。また、負荷の力率は 0.98 で一定とし、シミュレーションの制御時間間隔は 10 秒とした。なお、本シミュレーションでは電圧改善モジ

第3章 分散電源の力率制御による配電線フィーダ電圧制御方式

ユーラが動作するまでの時間遅れやモジュールの状態遷移の時間遅れはシミュレーションの制御時間間隔の10秒に比べて短い時間であるとして無視している。

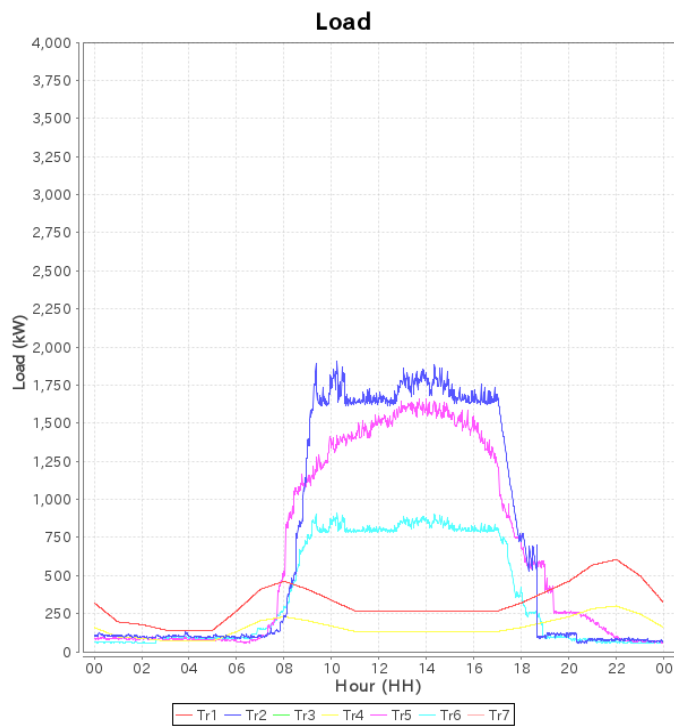


図3.8 負荷曲線

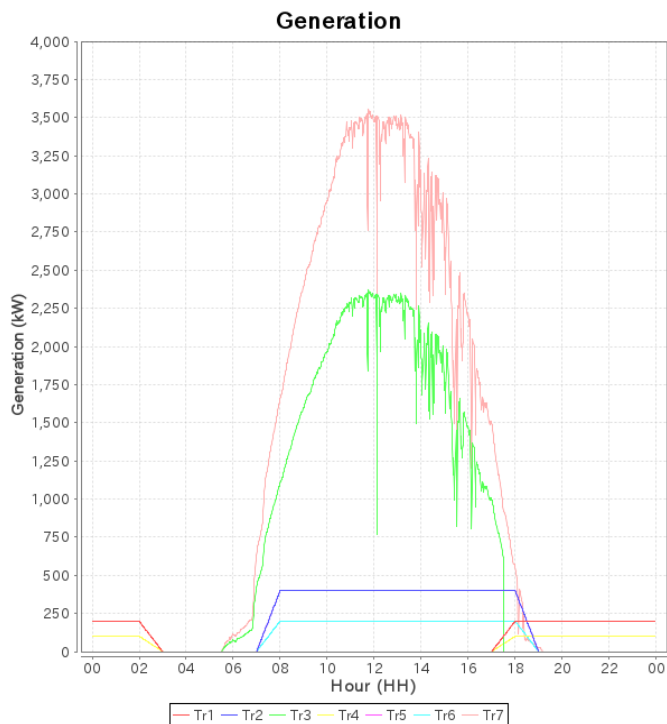


図3.9 発電電力曲線

3.3.1.2 ケーススタディ

以下では、4つのケースについて説明する。ケース1～2は上限逸脱、ケース3～4は下限逸脱のケースである。

(1) ケース1 (上限逸脱, 制御なし)

まず、休日を想定し、図3.8の負荷を半分にしてシミュレーションを行った。図3.10は力率制御を行わなかった場合の各母線電圧の変化である。同図に示すように、太陽光発電所の発電出力が増加するにつれ、電圧上昇が発生しB7_AGで許容電圧幅を逸脱している。

(2) ケース2 (上限逸脱, 制御あり)

このケースは、ケース1と同一条件で制御を行った場合である。各母線電圧の変化を図3.11に示す。同図に示すように、全ての母線電圧は運用目標電圧幅以内に収まっている。これは、配電線フィーダに連系する分散型電源の無効電力を調整して得られた結果である。

(3) ケース3 (下限逸脱・制御なし)

次に、平日を想定し、図3.8～3.9の負荷と発電データを用いてシミュレーションを行った。図3.12は力率制御を行わなかった場合の各母線電圧の変化である。制御が実施されていないため、多くの時間で許容電圧幅を逸脱している。

(4) ケース4 (下限逸脱・制御あり)

このケースは、ケース3と同一条件で制御を行った場合である。各母線電圧の変化を図3.13に示す。同図に示すように、全ての母線電圧は運用目標電圧幅以内に収まっている。

第3章 分散電源の力率制御による配電線フィーダ電圧制御方式

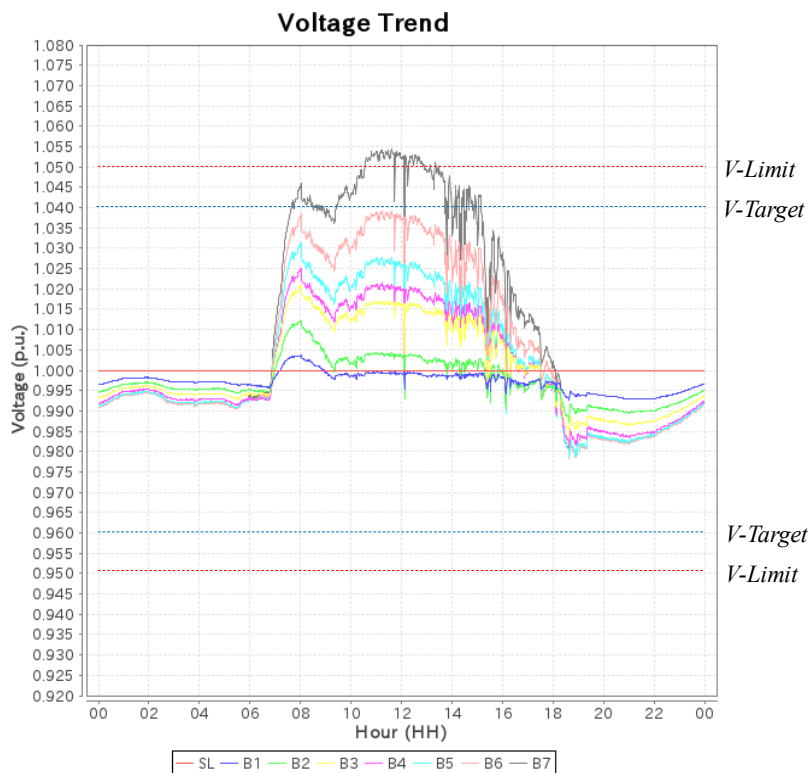


図3.10 ケース 1 (上限逸脱, 制御なし)

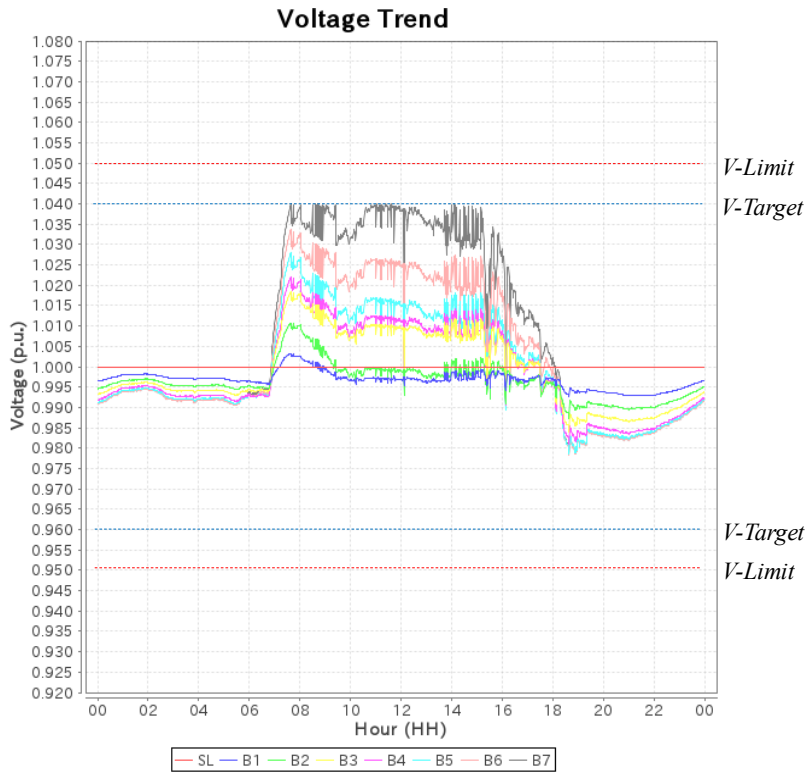


図3.11 ケース 2 (上限逸脱, 制御あり)

第3章 分散電源の力率制御による配電線フィーダ電圧制御方式

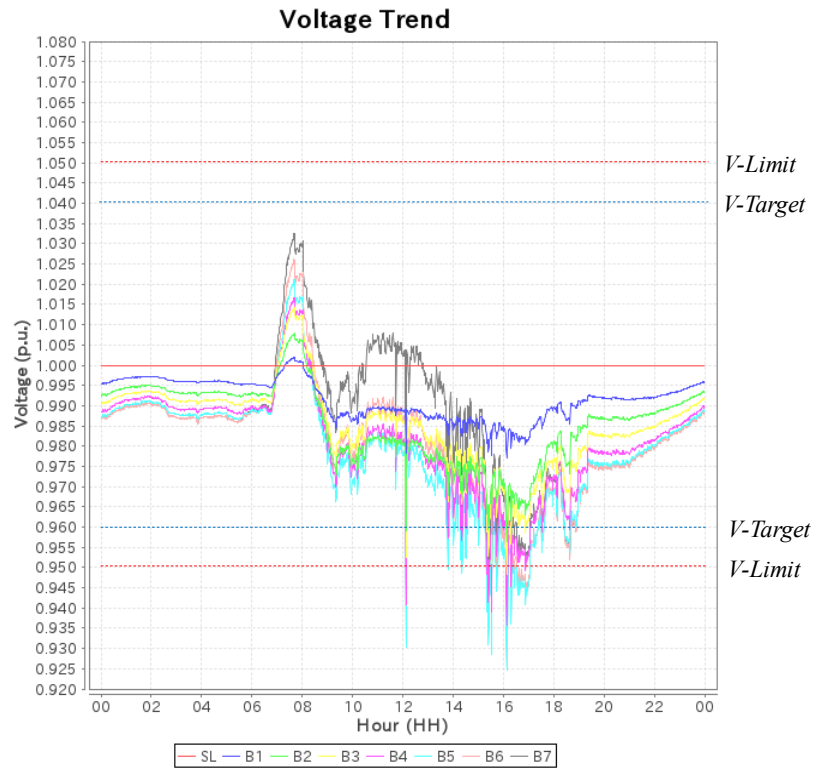


図3.12 ケース3 (下限逸脱・制御なし)

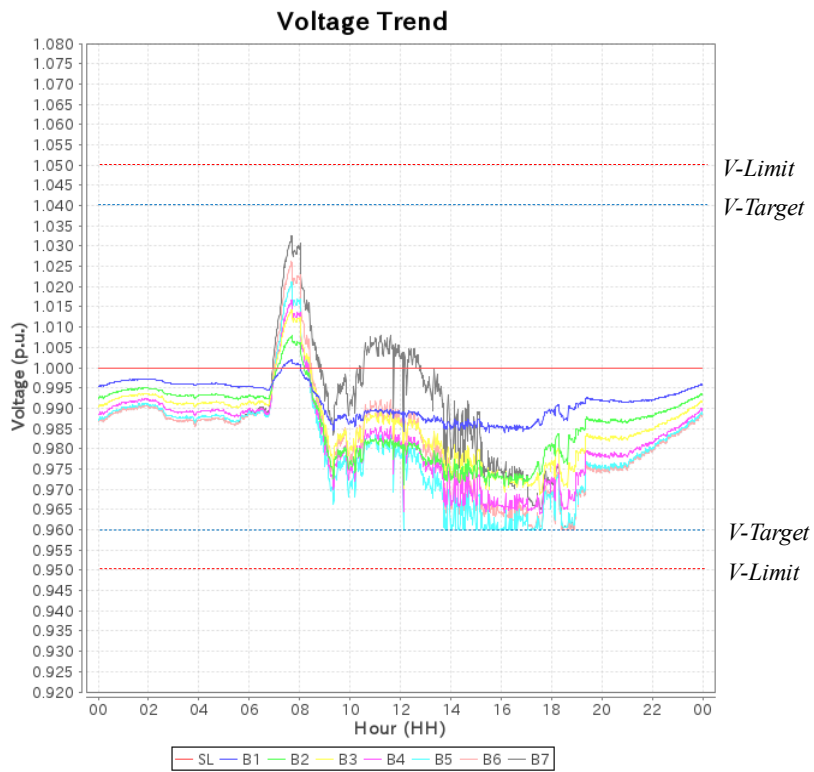


図3.13 ケース4 (下限逸脱・制御あり)

3.3.1.3 考察

制御ありのケースであるケース2とケース4の結果から明らかなように、本方式は配電線フィーダに連系している分散型電源の力率を調整することによる電圧制御の可能性を示している。

本方式は分散型電源の力率を制御しているので、ケース4において、動作したエージェントの力率の変化の一部を図3.14に示した（横軸：時間、縦軸：力率）。同図は電圧改善モジュールと力率改善モジュールがすべて適用された時間帯である18:25～18:45の20分間の結果を示したものである。以下、同図内に付した(i)～(iv)に対応させて簡単に説明する。

- (i) 最初に、B6_AGが運用目標電圧幅を逸脱したため、「電圧改善・自律制御モジュール(F2_1)」が動作し、無効電力の必要量に応じて、制御可能限界値0.85まで力率を制御している。
- (ii) 次に、時間の経過に伴って無効電力がさらに不足したため、「電圧改善・下流側制御モジュール(F2_2)」が動作し、B7_AGの力率を制御している。
- (iii) その後、無効電力がさらに不足したため、「電圧改善・上流側制御モジュール(F2_3)」が動作し、B5_AGの力率を制御している。
- (iv) 最後に、需給バランスの変化により、これまでに制御したB6_AG(自律)、B7_AG(下流)、B5_AG(上流)の順番とは逆順に力率改善モジュールが動作し、力率の改善が行われている。

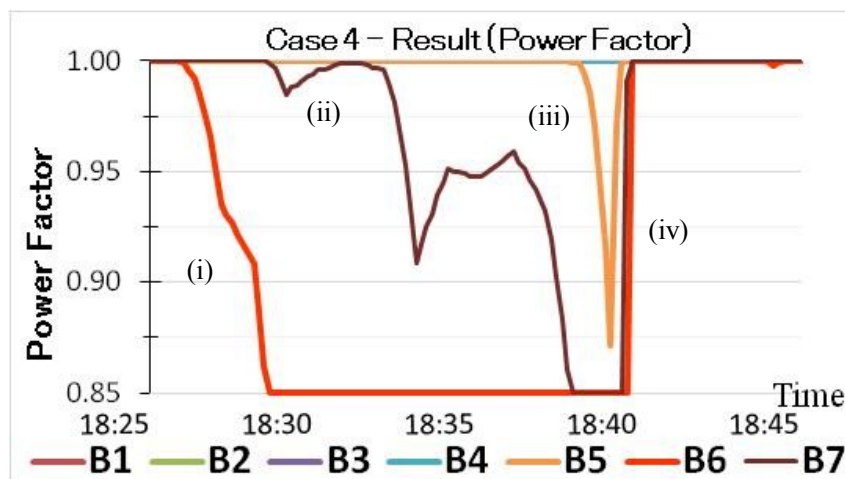


図 3.14 力率の変化 (ケース 4)

第3章 分散電源の力率制御による配電線フィーダ電圧制御方式

表 3.2 は、ケース 4 のシミュレーション結果のまとめである。同表には、「制御された B_AG」および「平均力率」を示している。母線 i の平均力率は、(3.6)式で算出したものである。

$$I_i = \frac{1}{T_i} \sum_{t \in T_i} PFi(t) \dots\dots\dots(3.6)$$

ここで、 t : 時刻インデックス、 T_i : 母線 i に接続する分散型電源の発電出力がある期間、 $PFi(t)$: 母線 i に接続する分散型電源の力率である。

平均力率は、制御なしの場合に運用目標電圧幅を逸脱する期間が最も長い B5_AG の力率が最も低くなっている。しかし、その他の AG の力率は 99%程度となっており、平均力率の悪化が抑えられている結果が示されている。これは電圧改善モジュールと力率改善モジュールが有効に働き、まず自身の自律制御が実施され、次に他律制御として無効電力の不足分を下流側、上流側の順番で注入したためである。

表 3.2 シミュレーション結果のまとめ (ケース 4)

	Controlled B_AG	Average power factor (%)
Case 4 (proposed)	B5_AG	98.52
	B6_AG	99.71
	B7_AG	99.90

3.3.2 マルチフィーダ制御への拡張

本項のシミュレーションでは、2つのフィーダを対象とする。

3.3.2.1 シミュレーション条件

本項のシミュレーションでは、図 3.15 に示した配電系統モデルを用いた。このモデルは 6,600[V] 配電線で、配電用変電所の各フィーダへの送り出し電圧は 6,600[V] 一定とした。線路インピーダンスは $(0.14 + j0.35)$ [Ω/km]、各区間長は 1.5 [km]、全亘長は 10.5 [km] を想定している。同図において、SS は配電用変電所、R1~R4 は住宅団地などの居住地区、F1~F2 は工場、O1 はオフィス、PV1~PV6 は太陽光発電所である。居住地区、工場、オフィスにも PV やガスエンジンなどの分散型電源が接続しているとする。また、配電線フィーダには分岐がなく、フィーダ内に7つのノードが直列に接続されているものとした。

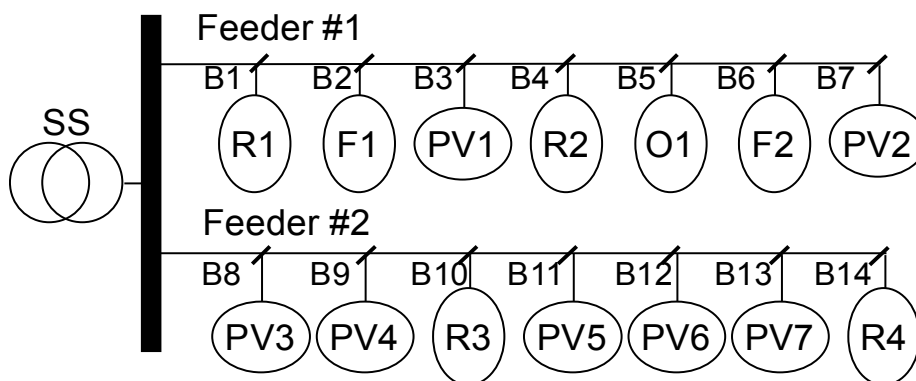


図 3.15 配電線フィーダモデル (2 フィーダ)

電圧の許容値は以下の値を用いた。

- ・許容電圧幅 ($V\text{-Limit}$) : 0.941~1.059 [p.u]
- ・運用目標電圧幅 ($V\text{-Target}$) : 0.970~1.030 [p.u]

シミュレーションに用いた各 AG の 60 秒毎の負荷と発電電力のフィーダ毎の値を図 3.16~3.18 に示す (図 3.16~3.17 : Feeder #1 ; 図 3.18 : Feeder #2)。同図の横軸は時間を示し、縦軸の上側は発電電力容量 [kW]、下側は負荷電力容量 [kW] を示している。図 3.16 は PV 発電電力の変動が少ない日、図 3.17 は日中に晴れたり曇ったりを繰り返し PV 発電電力の変動が大きい日を想定している。図 3.18 は Feeder #2 の負荷と発電電力を示している。ケース 1~2 とともに同一の PV 発電電力としている。この理由は、後述のように Feeder #2 は電圧の上限逸脱の場合を想定しているため、図 3.17 (Feeder #1) のような PV 発電電力の変動 (急

第3章 分散電源の力率制御による配電線フィーダ電圧制御方式

激な出力の低下)は、制御面からすると有利に働くことになるからである。

また、負荷の力率は 0.98 で一定とした。分散電源の力率は、シミュレーション開始時に 1.0 とし、F_AG からの要求により力率を 0.001 毎に制御可能限界値の 0.900 まで制御できるものと仮定した。シミュレーションの制御時間間隔は 60 秒とし、24 時間分 (1,440 ステップ) 実施した。

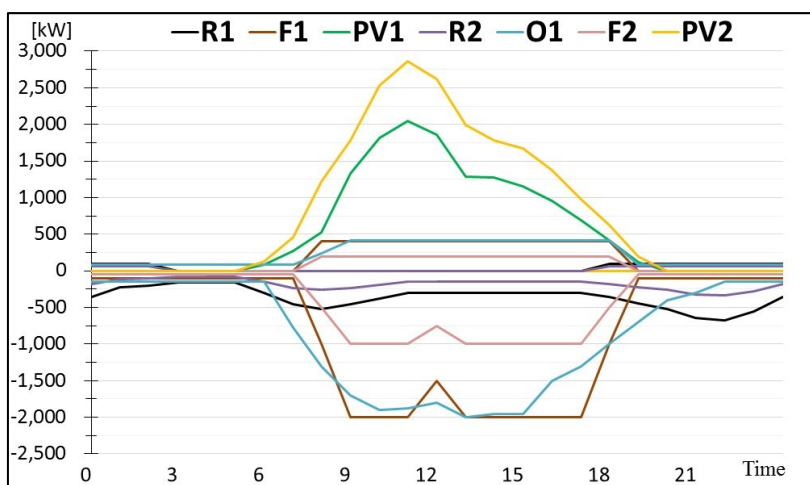


図 3.16 負荷・発電電力曲線 (ケース 1-Feeder #1)

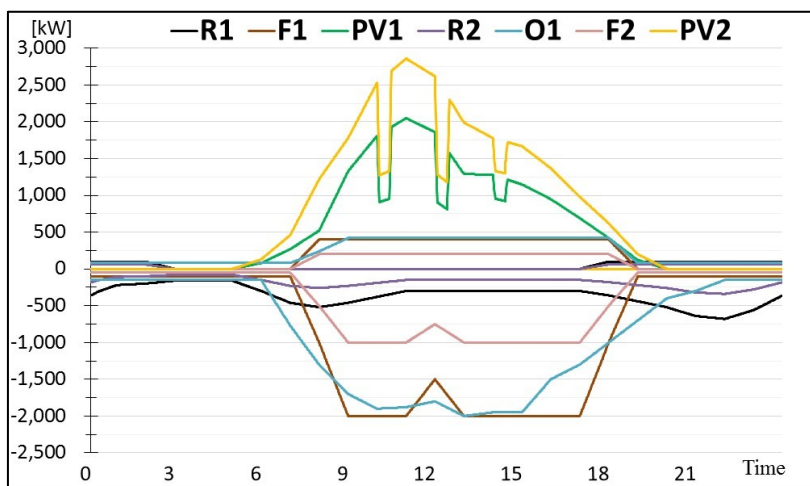


図 3.17 負荷・発電電力曲線 (ケース 2-Feeder #1)

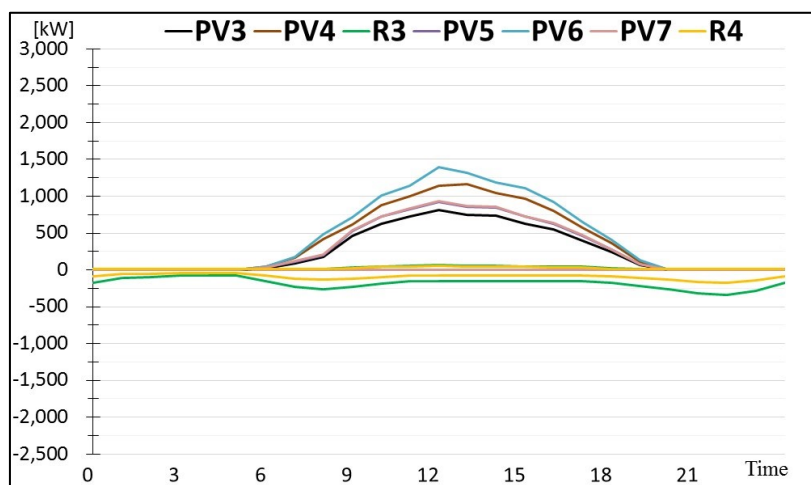


図 3.18 負荷・発電電力曲線（ケース 1，2-Feeder #2）

3.3.2.2 ケーススタディ

以下では、4つのケースについて説明する。ケース1～2はPV発電電力の変動が小さい日の制御なしと制御あり，ケース3～4はPV発電電力の変動が大きい日の制御なしと制御ありの場合である。

(1) ケース1（制御なし）

まず，PV発電電力の変動が小さい日に対して，力率制御を行わなかった場合の各需要家母線電圧の変化を図3.19に示す。同図に示すように，B1_AG～B7_AGが属するFeeder #1では，朝の急激な負荷の立ち上がりがある時間帯と，PVの発電電力不足によって午後にも電圧低下が発生し許容電圧幅の下限を逸脱している。また，B8_AG～B14_AGが属するFeeder #2では，PVの発電電力が過大になったため許容電圧幅の上限を逸脱している。

(2) ケース2（制御あり）

このケースは，ケース1と同一条件で制御を行った場合である。各需要家母線電圧の変化を図3.20に示す。同図に示すように，全ての時間で全ての需要家母線電圧は運用目標電圧幅以内に収まっている。

(3) ケース3（制御なし）

次に，図3.17のようにPV発電電力の変動が大きい場合の各需要家母線電圧の変化を図3.21に示す。同図に示すように，PV発電電力低下時に許容電圧幅の下限を大きく逸脱している。

(4) ケース4（制御あり）

このケースは，ケース3と同一条件で制御を行った場合である。各需要家母線電圧の変化

第3章 分散電源の力率制御による配電線フィーダ電圧制御方式

を図 3.22 に示す。同図に示すように、厳しい需要や発電電力の変動に対しても全ての時間で全ての需要家母線電圧は運用目標電圧幅以内に収まっている。

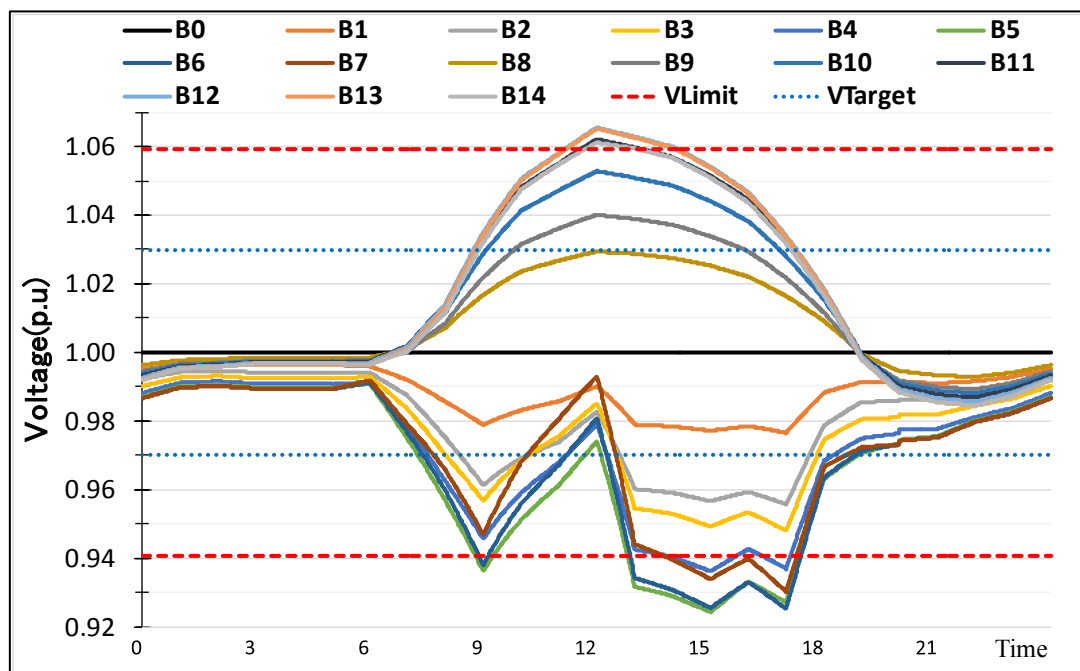


図 3.19 ケース 1 (制御なし)

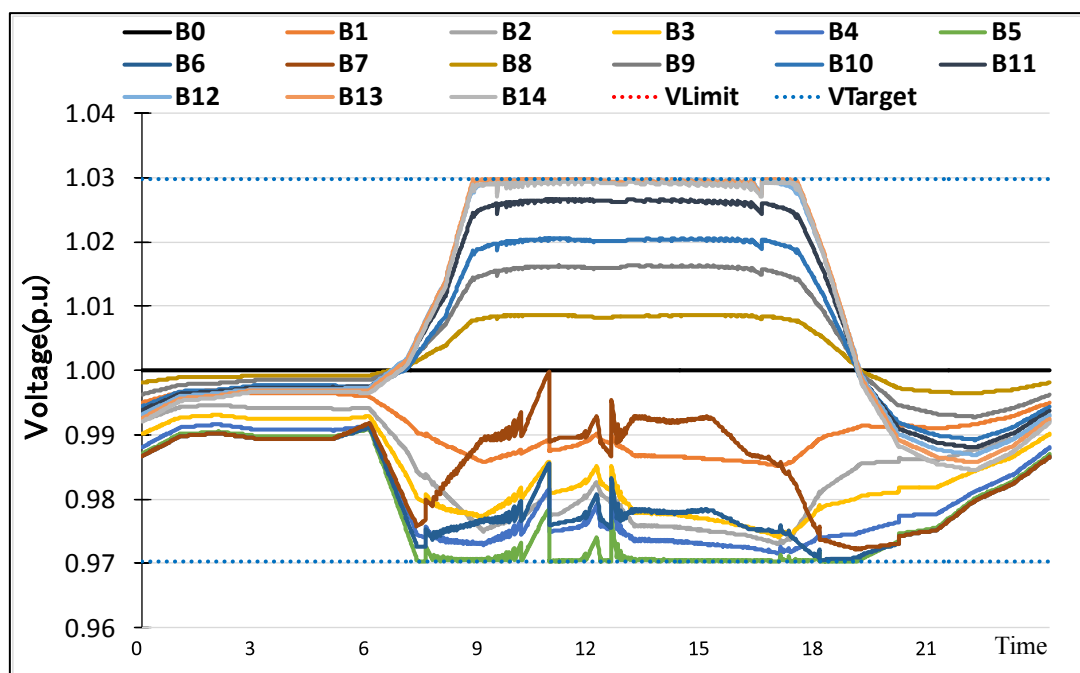


図 3.20 ケース 2 (制御あり)

第3章 分散電源の力率制御による配電線フィーダ電圧制御方式

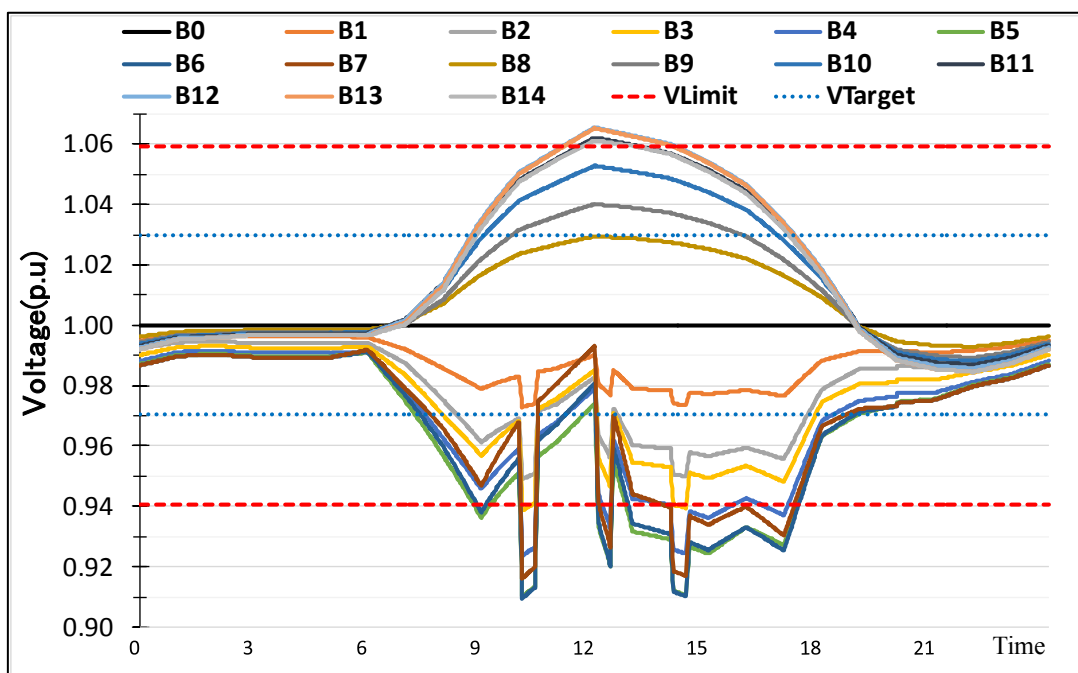


図 3.21 ケース 3 (制御なし)

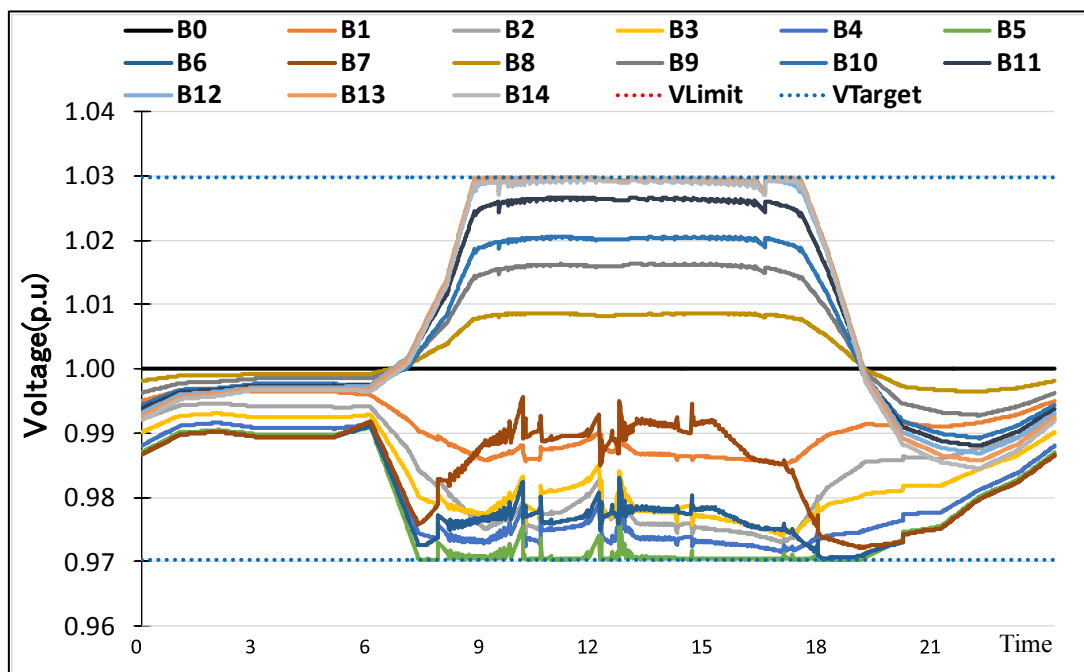


図 3.22 ケース 4 (制御あり)

なお、使用した計算機は、Toshiba dynabook R63/PS16E (intel Core i5, 2.4GHz; RAM 4GB)である。シミュレーション時間は、途中結果のファイル出力を含んで約 440 秒、1 ステップあたり約 300 ミリ秒であった。

3.3.2.3 考察

制御ありのケースであるケース2と4の結果から明らかなように、本方式は配電線フィーダに連系している分散電源の力率を調整することによるフィーダ毎の自己完結型電圧制御の可能性を示している。

本方式では力率を制御しているため、ケース2において、複雑な制御となった Feeder #1 に連系する AG の分散電源の力率の変化を図 3.23 に示した。同図において、横軸は時間、縦軸は力率を示す。同図の(i)~(iii)は、下記の力率制御が実施されたことを示している。

(i) 最初に、B5_AG が運用目標電圧幅を逸脱したため、電圧改善・自律制御モジュール (F2_1) が動作し、制御可能限界値の 0.900 まで力率を制御している。

(ii) 次に、時間の経過に伴って無効電力がさらに不足したため、電圧改善・下流制御モジュール (F2_2) が動作し、B7_AG の力率を制御している。

(iii) その後、需要や発電電力の変化により、先ほど制御した B7_AG の力率改善が可能な状況になり、力率改善・下流側制御モジュール (F2_5) が動作し、力率の改善が行われている。以下、同様な制御が実施されているが、省略する。

また、表 3.3 はケース2の制御結果のまとめである。同表に示すように、制御した B_AG に対して、電圧改善と力率改善モジュールが必ず対になって適用されていることに注目されたい。まず、Feeder #1 について、制御対象となった B_AG の平均力率は、最初に運用目標電圧幅を逸脱した B5_AG の力率が最も低くなっているが、その他の AG の力率は 99%程度となっており、平均力率の悪化が抑えられている結果が示されている。B7_AG, B6_AG が下流側制御、B3_AG が上流側制御に対応している。次に、上限逸脱が発生している Feeder #2 でも、同様な制御が実施され、表 3.3 に示すように B13_AG と B12_AG が制御対象になっている。平均力率は 98%以上であり、平均力率の悪化が抑えられている。

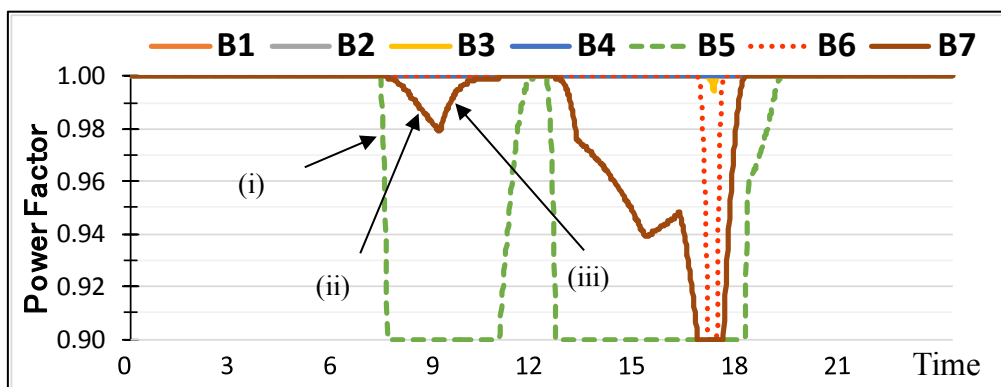


図 3.23 力率の変化 (ケース2-Feeder #1)

第3章 分散電源の力率制御による配電線フィーダ電圧制御方式

表 3.3 シミュレーション結果のまとめ (ケース 2)

	Controlled B_AG	Applied modules	Average power factor (%)
Feeder #1	B5_AG	F2_1, F2_6	96.0
	B7_AG	F2_2, F2_5	98.8
	B6_AG	F2_2, F2_5	99.8
	B3_AG	F2_3, F2_6	99.9
Feeder #2	B13_AG	F2_1, F2_5, F2_6	98.2
	B12_AG	F2_1, F2_6	99.7

本シミュレーションで用いたモデル系統は、簡単化のために配電線フィーダの 1.5 [km] 毎に、事業所や住宅用の PV を集約している。したがって、連系台数の非常に多い低圧配電系統の分散電源の実用レベルの評価においては、柱上変圧器を含むより詳細なモデルを用いる必要があると考えられる。

3.4 結言

本章では、厳しい需給バランスの変動に対応できる配電線フィーダの自己完結型の電圧制御方式を提案した。本システムは簡単な機構によるマルチエージェントシステムではあるが、シミュレーションの結果からフィーダ内での自己完結型の自律分散制御の可能性を示すことができた。また、現状の連系規程に則った固定力率での連系と比較して、平均して高い力率で系統に連系することができ、需要家にとって売電量が増加する可能性があることを示した。さらに、実用規模への拡張の第一歩として、2つのフィーダを制御対象としたシミュレーションを行った。複数フィーダ制御においても、シミュレーションにより有効性を確認すると共に、マルチエージェントシステムを採用したことで、容易に複数フィーダへの拡張が可能であることも確認できた。

本方式では、分散電源の力率を動的に変更し、系統側に無効電力を注入もしくは吸収することで配電線フィーダの電圧を適正範囲内に保つ制御を実施している。本方式を実系統へ導入した場合、需要家にとっては、不必要な低力率での系統連系の削減による売電量の増加が見込まれる。また、系統運用者側にとっては、本来制御することができない需要家の分散電源を電圧制御機器と捉えることができ、従来型機器の新設や既設電圧制御機器の制御回数削減などの効果が見込まれるため、双方にメリットがあると考えられる。

今後の電力システムは、系統に連系する分散型電源を有効に活用する新たな考え方が必要になると考えられる。本方式は、そのような方式の実現方式の1つであり、電圧管理技術を高度化する上での選択肢の1つである。

今後の課題は、LRTなどの他機器との協調制御など実用レベルの検討などが挙げられる。

第4章 分散電源の力率制御と LRT のタップ制御による配電線フィーダ電圧制御方式

配電系統の電圧制御機器の中で、配電用変電所の LRT (Load Ratio Transformer : 負荷時タップ切換変圧器) は、変圧器のタップ操作により母線の電圧を制御し、当該母線に接続されている複数の配電線フィーダの送り出し電圧を一律に上下する機器である。LRT の一般的な制御方法として、目標とする電圧を負荷電流に応じて調整する LDC (Line Drop Compensation) 方式と、あらかじめ決められた時間帯ごとのパターンに応じて制御されるプログラムコントロール方式がある。

第3章では分散電源の力率を制御することによって連系する配電線フィーダの電圧制御を行う方式を提案し、シミュレーションにより提案方式の有効性を示したが、他の電圧制御機器との協調制御などを課題として残していた。たとえば、他の電圧制御機器として、LRT を選択すれば、フィーダ全体の広域的な電圧問題に対しては送り出し電圧を調整することで対処し、フィーダの一部分の局所的な電圧問題に対しては分散電源の力率制御で対処するといった方法も考えられる。

そこで本章では、図4.1の配電系統モデルに示すように、第3章で提案した分散電源の力率制御による電圧制御方式を基盤として、配電用変電所に設置される LRT との協調制御方式を提案する。

なお、本章の内容は、一連の研究成果をまとめた論文[33, 39]に基づいたものである。

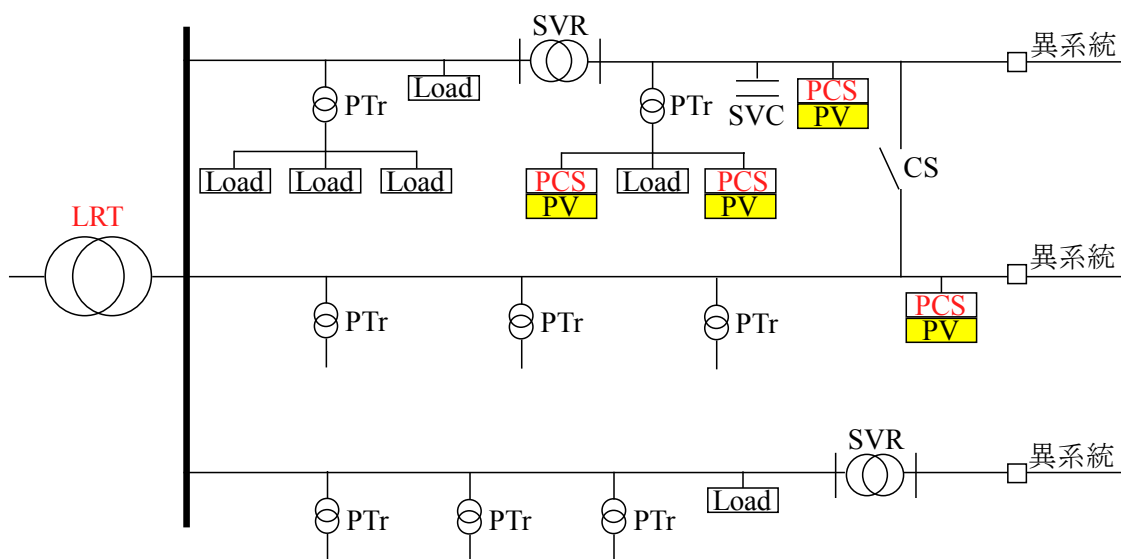


図4.1 配電系統の PCS と LRT の協調による電圧制御方式

第4章 分散電源の力率制御と LRT のタップ制御による配電線フィーダ電圧制御方式

4.1 緒言

第3章では、フィーダ単位での自己完結型電圧制御方式を提案し、シミュレーションにより提案方式の有効性を示したが、フィーダ内の全ての分散電源の力率を制御可能限界値まで制御しても電圧違反が解決しない場合には、他の電圧制御機器との協調制御が必要になる。図4.1に示す配電系統の電圧制御機器の中で配電用変電所に設置される LRT は、変圧器のタップ操作により2次母線の電圧を制御し、当該母線に接続されている複数の配電線フィーダの送り出し電圧を一律に上下する装置である。この LRT との協調制御が可能になれば、第3章で示した方式によりフィーダ単位での電圧制御が可能であるため、連系する B_AG の状況により、フィーダ毎に管理目標電圧を別々に設定した上で、LRT のタップ操作で一律に電圧を調整するといった運用が考えられる。

そこで、本章では、第3章で示した分散電源の力率制御による電圧制御方式を基盤として、フィーダに連系する複数の分散電源の力率制御と配電用変電所の LRT のタップ制御の協調制御による電圧制御方式を提案する^[33, 39]。本提案システムは、配電用変電所 LRT に対応する“変電所エージェント (SS_AG)”と、配電線フィーダに対応する“フィーダエージェント (F_AG)”と、連系する需要家や太陽光発電所の母線に対応する“母線エージェント (B_AG)”を実装した3階層のマルチエージェントシステムであり、これらのエージェントの協調動作により、母線の電圧プロファイルを適切に保つ電圧制御方式である。

4.2 提案する電圧制御方式

本章の提案方式は、配電用変電所に接続された1つの配電線フィーダを対象とする。

4.2.1 提案方式の概要

図4.2の簡単な配電線フィーダを用いて、提案方式の基本的な考え方を説明する。同図において、SSは配電用変電所、R1～R2は住宅団地などの居住地区、F1～F2は工場、O1はオフィス、PV1～PV2は大規模な太陽光発電所である。居住地区、工場、オフィスにもPVやガスエンジンなどの分散型電源が接続しているとする。本システムは、これらの分散電源の力率制御と、SSの2次側電圧を一律に上げ/下げできる LRT のタップ制御を協調させることにより、配電線フィーダの電圧分布を運用目標電圧幅内に収めようとするものである。

本方式の特徴を以下に示す。

(1) F_AG はフィーダ内完結型制御を実施し、フィーダ内に解が存在しない場合には SS_AG が LRT のタップを操作し、電圧制御を実施するという2階層の制御方式を実装して

第4章 分散電源の力率制御とLRTのタップ制御による配電線フィーダ電圧制御方式

いる。

(2) F_AGには、電圧プロファイルを適正化するためのアルゴリズムを知識モジュールの形式で複数実装している。すなわち、需要家やPV母線の電圧制御をするための「電圧改善モジュール」と分散型電源の力率を改善するための「力率改善モジュール」を用いて、分散型電源の有効電力と無効電力の制御量を決定している。

(3) 各知識モジュールは、制御実施後の系統状況を“仮想系統”上で電力潮流問題を繰り返し解くこと（電圧推定計算）により制御量を決定している。したがって、時々刻々と変化する配電線フィーダ内の厳しい需給バランスの変動に対応することが可能な方式となっている。

(4) 本方式における制御量（力率）は、複数回この電圧推定計算を試行して決定するため、複雑な制御則の実装や制御パラメータのチューニングが不要である。また、本方式は、同時に複数個所の制御が可能な方式となっている。

(5) 各知識モジュールはモジュール化しているため、適用順を変更することが容易である。

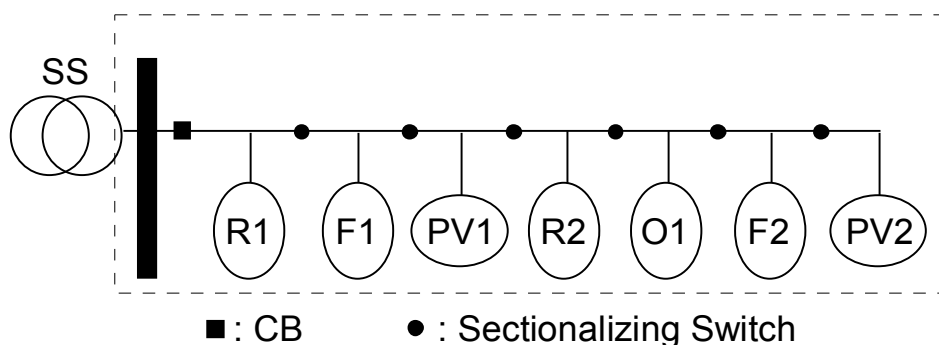
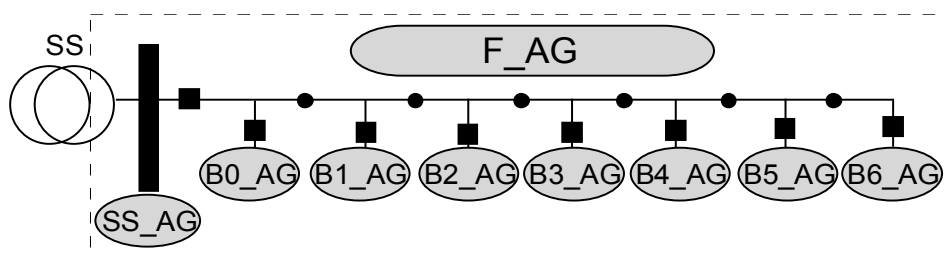


図4.2 配電線フィーダモデル

4.2.2 マルチエージェントでの実装

ここでは、前項で述べた電圧制御方式をマルチエージェントにより実現する方法について説明する。図4.3は提案するマルチエージェントシステムの構成図である。同図は図4.2に対応したもので、網掛けの部分のエージェントである。同図に示すように、本システムは1つのフィーダエージェント（F_AG）と1つの変電所エージェント（SS_AG）と複数の母線エージェント（B_AG）の2種類のエージェントから構成されている。B_AGは、メガソーラなどの大規模な太陽光発電所、住宅団地などの居住地区、工場、オフィスに対応している。また、B_AGは負荷と分散型電源を保持することが可能になっている。



SS AG: SubStation Agent, F AG: Feeder Agent, B0 AG - B6 AG: Bus Agent

図4.3 提案するマルチエージェントシステム

以下、各エージェントの機能と動作について説明する。

(1) フィーダエージェント (F_AG)

F_AG は、連系する母線電圧の電圧改善と力率改善を行う。このために、連系する B_AG の分散電源の力率の下限を 0.900 として協調させる。まず、電圧改善では連系する母線電圧が許容範囲を逸脱した場合に電圧制御方針を決定する。各連系母線電圧の評価には、電気事業法で定められた値である 101 ± 6 [V] に対応する“許容電圧幅 (*V-Limit*)”と“運用目標電圧幅 (*V-Target*)”を用いる。なお、力率を 0.900 まで制御しても電圧が *V-Target* 内に無いときは、フィーダ内の無効電力が不足していることを意味する。この場合は SS_AG に LRT の送り出し電圧調整を要請する。

次に、力率改善では上記の電圧改善で実施された力率下げ操作に対して力率改善が可能か否かを検討する。これは、時々刻々と変化する需給状況によっては力率を改善できる可能性が出てくるためである。

(2) 変電所エージェント (SS_AG)

SS_AG は、F_AG から LRT の送り出し電圧調整要請を受けると、LRT のタップを調整し、送り出し電圧を変更する。

(3) 母線エージェント (B_AG)

B_AG は F_AG からの要求に基づいて、現在時刻の母線電圧と次の制御時刻の需要電力と発電電力の計算値 (有効電力と無効電力) を F_AG へ返答する。ここで、発電電力の有効電力と無効電力は現在の力率から算出した値である。また、F_AG からの指令値 (力率) に基づき分散電源の出力を変更する。

(4) エージェントの処理

図 4.4 にエージェントの処理を示す。エージェントは、状態遷移マシンとして実装している。同図の丸印が状態を表している。マルチエージェントシステムを構築する上で重要なことは、エージェントの構造を簡単にすることである。このようにすることによってオブジェ

第4章 分散電源の力率制御とLRTのタップ制御による配電線フィーダ電圧制御方式

クトのサイズを小さくし、高性能な計算機を用いることなく多数のエージェントをシステム内に実装させることが可能になる。状態0 (S0) は起動時の初期化、状態1 (S1) は環境の知覚、状態2 (S2) は意思決定、および状態3 (S3) は環境への行為に対応している。本方式では全てのエージェントを同図に示すように4つの状態から構成させている。

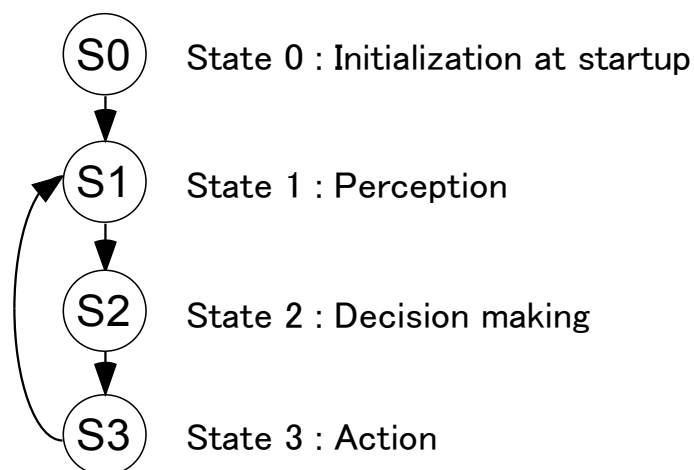


図 4.4 エージェントの処理 (状態遷移図)

図 4.5 は、提案するマルチエージェントシステムの構成とエージェント間で交換されるメッセージを示したものである。同図の M1~M5 はそれぞれの AG 間で交換されるメッセージである。以下、簡単にメッセージの内容について説明する。

[M1] タスク告示 : F_AG から SS_AG と各 B_AG へ制御処理の開始を通知する。

[M2] 情報収集 : B_AG は自身の母線電圧値と次の制御時刻の需要電力と発電電力の計算値を、SS_AG は現状のタップ値を送信する。

[M3] 意思決定 : F_AG は電圧異常があれば電圧改善モジュール、電圧異常がなく力率改善が可能であれば力率改善モジュールを用いて各 B_AG の分散電源の力率を決定し、指示する。

[M4] 送り出し電圧調整依頼 : F_AG は仮想システム上の電圧推定計算で、全ての分散電源の力率を制御可能限界値まで制御しても電圧違反が解消しない場合に、SS_AG に LRT の送り出し電圧調整を要請する。

[M5] 結果報告 : B_AG は F_AG からの指示 (力率) にしたがって分散電源の出力を変更し、SS_AG は F_AG からの要請にしたがって送り出し電圧を調整し、報告する。

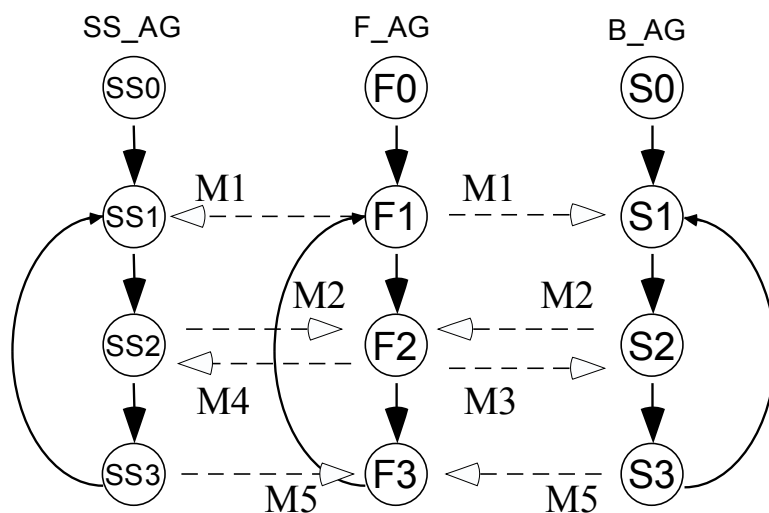


図4.5 エージェントの状態遷移図

4.2.3 電圧制御方式

F_AG は B_AG の母線電圧が許容範囲を逸脱した場合に分散型電源の力率を制御する。本方式の電圧制御は、知識モジュールを用いて実現している。知識モジュールは Java のクラスで定義され、図 4.6 に示すように 6 つのモジュール (F2_1~F2_6) を実装している。同図は、図 4.5 の状態 F2 の内部がこのような知識モジュールの状態遷移により実現していることを示している。F2_1~F2_3 が電圧改善モジュール、F2_4~F2_6 が力率改善モジュールである。

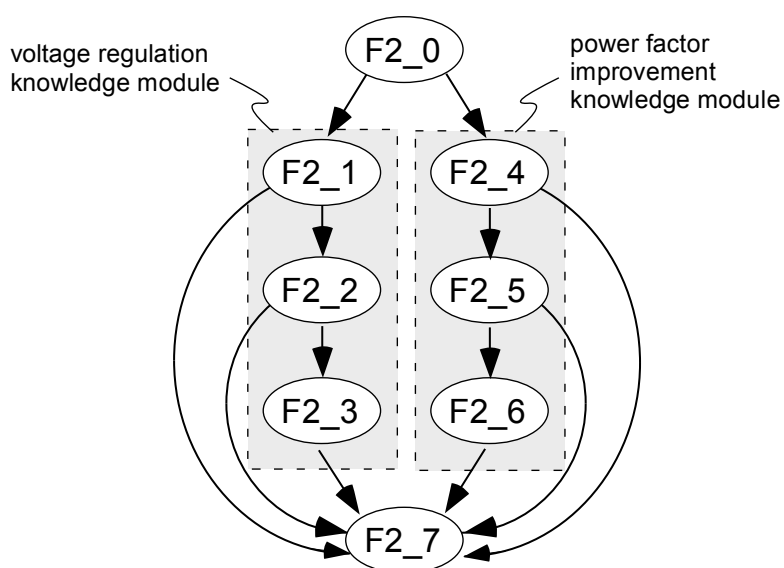


図4.6 制御戦略モジュールの状態遷移図 (F_AG)

第4章 分散電源の力率制御とLRTのタップ制御による配電線フィード電圧制御方式

以下、各モジュールについて説明する。

(1) 電圧改善・自律制御モジュール (F2_1)

電圧異常があった場合に最初に適用される知識モジュールである。このモジュールは、最大の電圧異常が発生している B_AG に対して、当該 B_AG の分散型電源のみで電圧異常の解消を試みる。すなわち、自身の分散型電源の力率を順次下げて電圧推定計算を行う。その結果、力率を下限まで下げても電圧異常が解消されない場合は F2_2 へ遷移し、解消された場合は以降のモジュールの適用をやめ F2_7 へ遷移する。

(2) 電圧改善・下流側制御モジュール (F2_2)

このモジュールは、電圧異常の B_AG より下流側の B_AG の分散型電源の力率を順次下げて電圧異常の解消を試みる。この場合、下流側の分散型電源の設備容量の大きい順に B_AG を選択し、その分散型電源の力率を順次下げて電圧推定計算を行い、制御量を決定する。その結果、下流側の全 B_AG の分散型電源の制御でも電圧異常が解消されない場合は F2_3 へ遷移し、解消された場合は F2_7 へ遷移する。

(3) 電圧改善・上流側制御モジュール (F2_3)

このモジュールは、電圧異常の B_AG より上流側の B_AG の分散型電源の力率を順次下げて電圧異常の解消を試みる。この場合、上流側の分散型電源の近接の順に B_AG を選択し、その分散型電源の力率を順次下げて電圧推定計算を行い、制御量を決定する。この時点でも電圧異常が解消されない場合は、SS_AG に LRT の送り出し電圧調整を要請する。

(4) 力率改善・上流側制御モジュール (F2_4)

時々刻々と変化する電力需要や分散型電源の出力に応じて、各 B_AG の分散型電源の力率は変更されている。したがって、その時点の電圧プロファイルの状況では力率を改善させることが可能な場合があるため力率改善を試みる。力率改善は電圧改善と逆の順序で適用する。したがって、電圧異常がない場合に最初に適用される知識モジュールは上流側を対象とするこの知識モジュールである。適用の順番は最後に電圧適正化の対象となった B_AG から上流側の遠い B_AG から順次行う。力率改善の電圧推定計算の試行過程で電圧逸脱が発生した場合は、その最後の制御を取消し、以降のモジュールの適用をやめ F2_7 へ遷移する。上流側の全 B_AG の力率を 1.0 まで改善しても電圧逸脱が発生しなかった場合は、さらに力率改善をするために F2_5 へ遷移する。

(5) 力率改善・下流側制御モジュール (F2_5)

次に、下流側で上流側と同様な力率改善を試みる。この場合は分散型電源の設備容量の小さい順に B_AG を選択する。

第4章 分散電源の力率制御とLRTのタップ制御による配電線フィーダ電圧制御方式

(6) 力率改善・自律制御モジュール (F2_6)

最後は自身の力率改善である。

以上のように、力率改善は最後に電圧改善が行われた B_AG を基点として、電圧改善とは逆順に処理を行わせている。このようにすることにより、自身のために協力してもらった B_AG を優先して力率改善を行う仕組みを実現している。

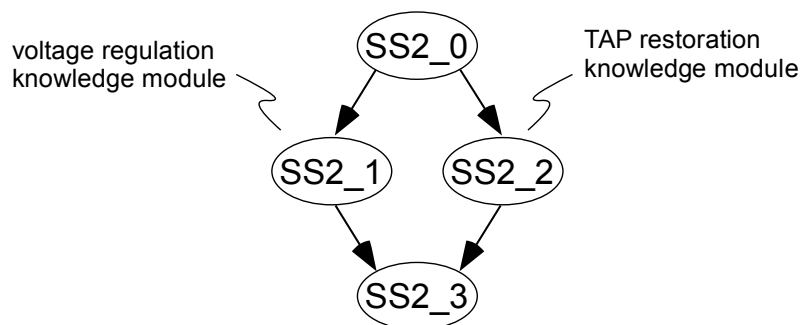


図 4.7 知識モジュールの状態遷移図 (SS_AG)

次に、SS_AG は F_AG から送り出し電圧調整依頼を受けた場合に、LRT のタップを制御する。本方式のタップ制御は力率制御と同様に、知識モジュールを用いて実現している。知識モジュールは、図 4.7 に示すように 2 つのモジュール (SS2_1, SS2_2) を実装している。同図は、図 4.5 の状態 SS2 がこのような知識モジュールの状態遷移により実現されていることを示している。SS2_1 が電圧改善モジュール、SS2_2 がタップ戻しモジュールである。

以下、各モジュールについて説明する。

(7) 電圧改善モジュール (SS2_1)

このモジュールは、連系する全ての分散電源の力率制御可能限界値まで制御しても電圧異常が解消されなかった場合に適用される知識モジュールである。F_AG から送り出し電圧調整依頼を受けた場合に、 $V\text{-Target}$ 下限を逸脱していればタップ上げ制御を実施し、反対に $V\text{-Target}$ 上限を逸脱していればタップ下げ制御を実施し、SS2_3 へ遷移する。通常は、F2_1 ~ F2_3 とこのモジュールの適用により電圧異常は解消されるが、この時点でも電圧異常が解消されない場合は、配電線フィーダ内の分散型電源の力率制御と LRT のタップ値制御のみでは適正な解が存在しないことを意味している。その場合は、さらに別の電圧制御機器との協調が考えられるが、本章の範囲外とする。

(8) タップ戻しモジュール (SS2_2)

このモジュールは、F2_4 モジュールと同様に、刻々と変化する電力需要や分散電源の出

第4章 分散電源の力率制御と LRT のタップ制御による配電線フィーダ電圧制御方式

力に応じて、その時点の電圧プロファイルの状況では LRT のタップを戻すことが可能な場合があるため適用を試みる。仮想系統上の電圧推定計算でタップ戻しが可能であればこのモジュールが適用され、SS2_3 へ遷移する。

4.3 シミュレーション

本システムの有効性を確認するため、Java 言語を用いてマルチエージェントシステムを開発し、シミュレーションを行った。

4.3.1 シミュレーション条件

本シミュレーションでは、図 4.2 に示した配電系統モデルを用いた。このモデルは 6,600[V] 配電線で、線路インピーダンスは $(0.14 + j 0.35)$ [Ω/km]、各区間長は 1.5[km]、全亘長は 10.5[km] を想定している。同図において、SS は配電用変電所、R1~R4 は住宅団地などの居住地区、F1~F2 は工場、O1 はオフィス、PV1~PV2 は大規模な太陽光発電所である。

電圧許容値は以下の値を用いた。

- ・許容電圧幅 (V-Limit) : 0.941~1.059 [p.u]
- ・運用目標電圧幅 (V-Target) : 0.980~1.020 [p.u]

シミュレーションに用いた各 AG の 60 秒毎の負荷と発電電力のフィーダ毎の値を図 4.8 に示す。同図の横軸は時間を示し、縦軸の上側は発電電力量[kW]、下側は負荷電力量[kW] を示している。また、負荷の力率は 0.98 で一定とした。分散電源の力率は、シミュレーション開始時に 1.0 とし、F_AG からの要求に基づいて力率を 0.001 毎に 0.900 まで制御できるものと仮定した。LRT のタップ値は、シミュレーション開始時に 1.0 とし、0.01 毎に 0.98 ~1.02 まで制御できるものと仮定した。シミュレーションの制御時間間隔は 60 [秒]とし、24 時間分 (1,440 ステップ) 実施した。

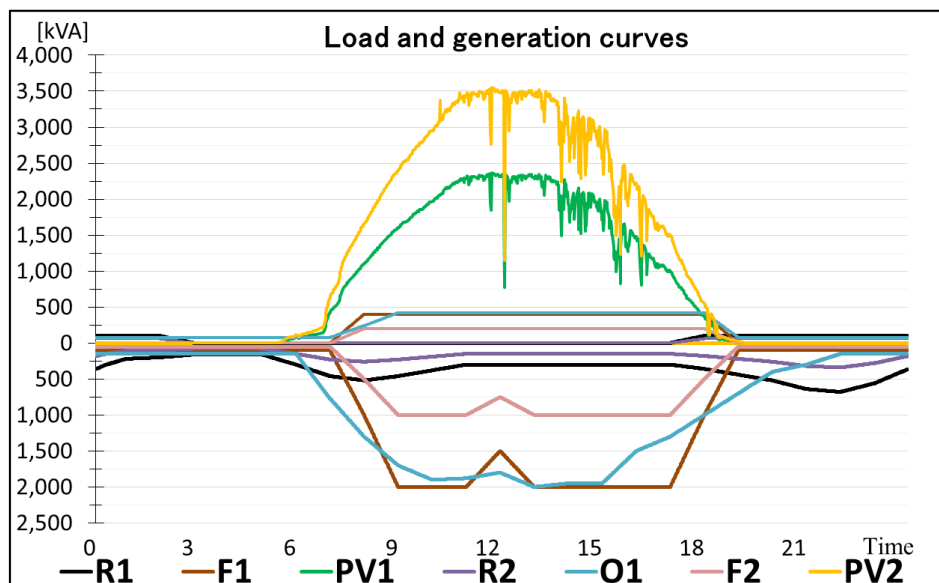


図 4.8 負荷・発電電力曲線

4.3.2 ケーススタディ

以下では、3つのケースについて説明する。ケース1は制御を行わなかった場合、ケース2は力率制御ありでLRT制御なしの場合、ケース3は力率制御ありでLRT制御ありの場合である。

(1) ケース1 (制御なし)

まず、力率制御を行わなかった場合の各母線電圧の変化を図4.9に示す。同図の横軸は時間、縦軸は電圧[p.u.]である。同図に示すように、制御が実施されていないため、多くの時間で運用目標電圧幅の下限を逸脱している。また、許容電圧幅の下限を逸脱している時間帯もある。

(2) ケース2 (力率制御あり-LRT制御なし)

このケースは、ケース1と同一条件で分散電源の力率制御のみを行った場合である。各母線電圧の変化を図4.10に示す。同図に示すように、全ての時間で全ての母線電圧は許容電圧幅内に収まっているが、一部の時間帯で運用目標電圧幅の下限を逸脱している。

(3) ケース3 (力率制御あり-LRT制御あり)

このケースは、ケース2と同一条件でLRT制御を行った場合である。各母線電圧の変化を図4.11に示す。同図に示すように、全ての時間で全ての母線電圧は運用目標電圧幅内に収まっている。

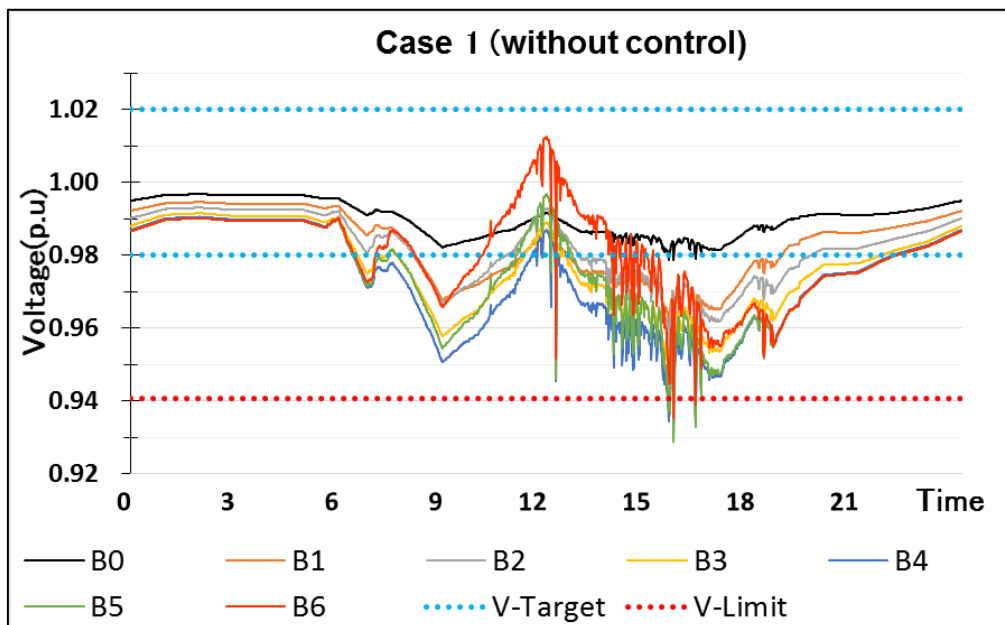


図 4.9 各母線電圧の変化—ケース 1 (制御なし)

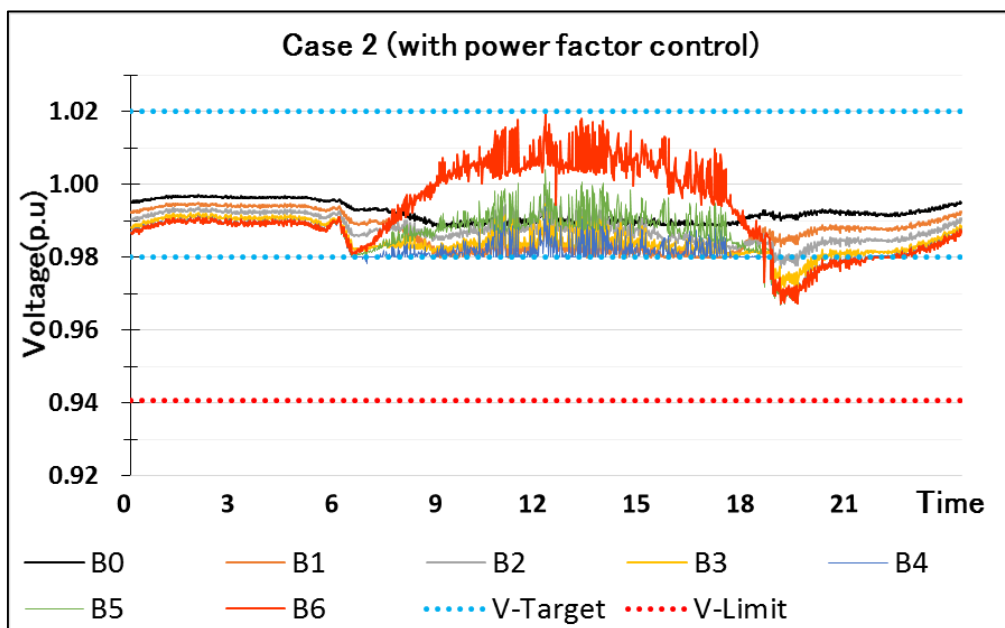


図 4.10 各母線電圧の変化—ケース 2 (力率制御あり—LRT 制御なし)

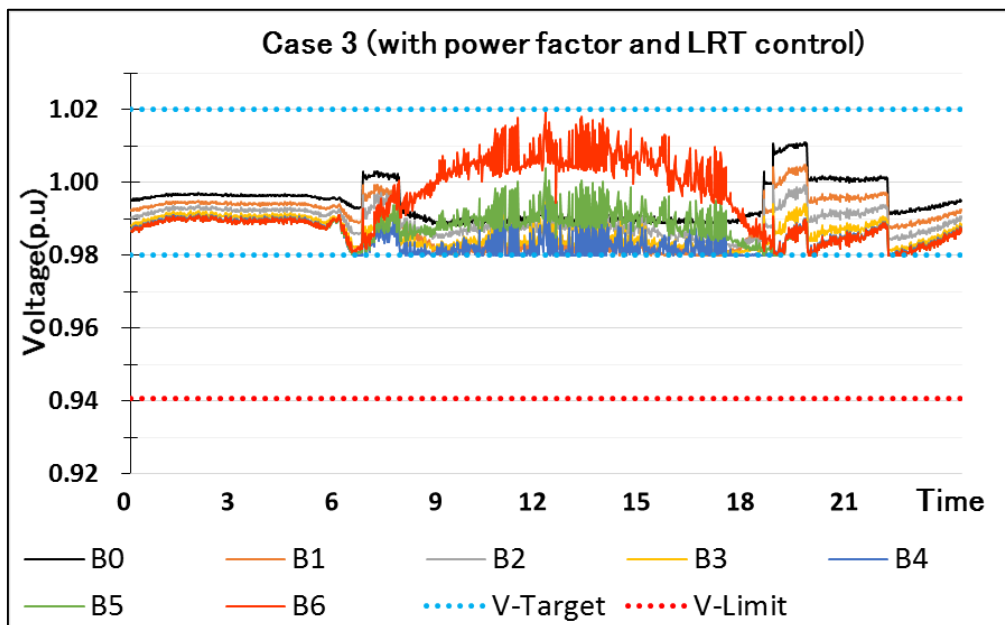


図 4.11 各母線電圧の変化—ケース 3（力率制御あり—LRT 制御あり）

4.3.3 考察

ケース 2 と 3 の結果から明らかなように、本方式は分散電源の力率制御と LRT 制御の組み合わせによる電圧制御の可能性を示している。

本方式では分散電源の力率を制御しているので、ケース 2 と 3 の力率の変化を図 4.12～4.13 に示す。同図において、横軸は時間、縦軸は力率を示す。また、ケース 3 では LRT のタップ制御も実施しているので、タップ値の変化を図 4.14 に示す。

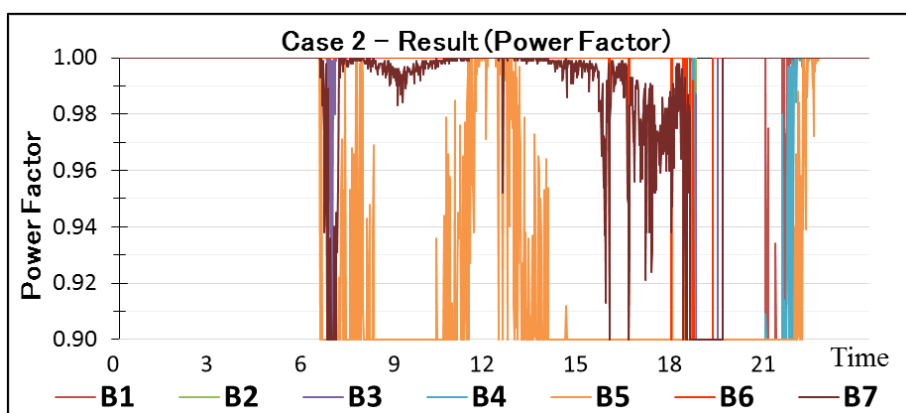


図 4.12 力率の変化（ケース 2）

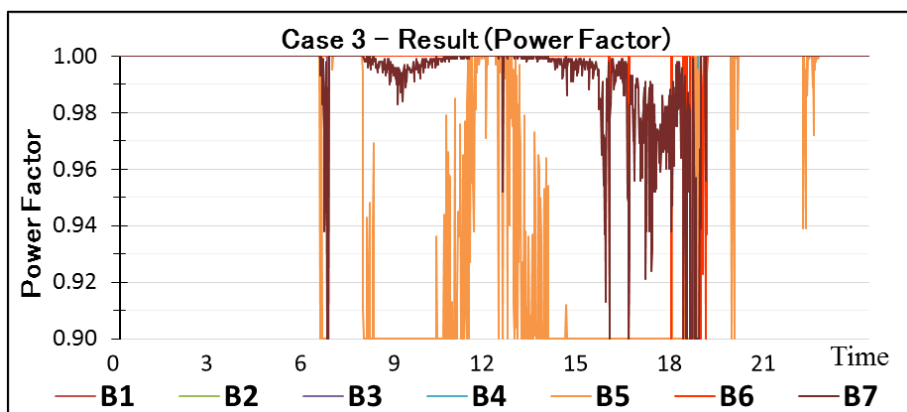


図 4.13 力率の変化 (ケース 3)

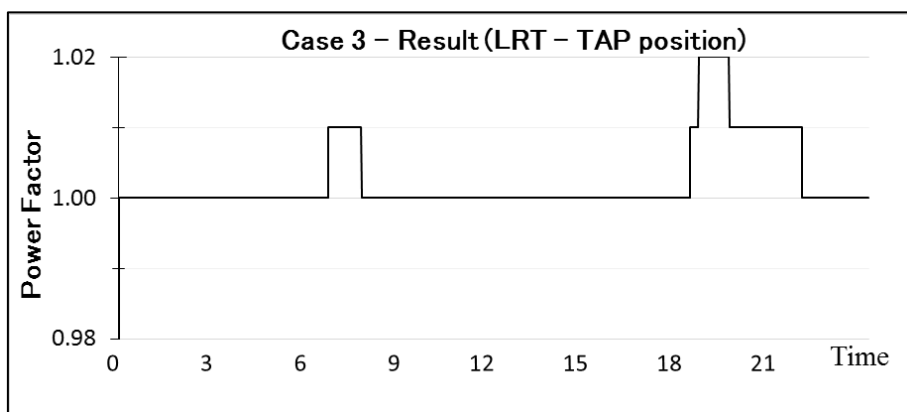


図 4.14 LRT タップ値の変化 (ケース 3)

また、表 4.1 は制御された B_AG と全時間の平均力率を示している。ここで、括弧内の数字は、発電出力がある時間帯のみの平均力率である。

ケース 2, ケース 3 共に、全ての B_AG の力率が制御されている。これは、図 4.10 に示す通り、全ての分散電源の力率を 0.900 まで制御しても運用目標電圧幅を逸脱する時間があるためである。また、どちらのケースも制御対象ノードとなる時間が最も長かった B4_AG の平均力率が一番悪化している結果となった。

次に、ケース 2 とケース 3 を比較すると、ケース 3 の方が平均力率の悪化が抑えられている結果が示されている。実際の売電量に関する括弧内の数字に着目すると、ケース 2 では全 B_AG の平均は 97.892% で、ケース 3 では 99.235% である。このことは、需要家にとっては、より多くの売電量が得られることを示している。

表 4.1 制御された B_AG と全時間の平均力率

Case No.	Controlled B_AG	Average power factor [%]
Case 2 (力率制御あり, LRT 制御なし)	B0_AG	98.812 (97.145)
	B1_AG	99.754 (99.561)
	B2_AG	99.630 (99.348)
	B3_AG	98.702 (96.879)
	B4_AG	94.453 (94.453)
	B5_AG	99.665 (99.329)
	B6_AG	99.042 (98.528)
	全 B_AG	98.580 (97.892)
Case 3 (力率制御あり, LRT 制御あり)	B0_AG	99.986 (99.967)
	B1_AG	99.985 (99.973)
	B2_AG	99.957 (99.924)
	B3_AG	99.960 (99.904)
	B4_AG	96.192 (96.192)
	B5_AG	99.808 (99.614)
	B6_AG	99.480 (99.074)
	全 B_AG	99.338 (99.235)

4.4 結言

本章では、分散電源の力率制御と配電用変電所LRTのタップ制御を組み合わせた配電線フィーダの電圧制御方式を検討した。本方式は、まずフィーダ内での自己完結型電圧制御を実施し、配電用変電所LRTのタップ制御を実施する2階層の制御方式である。3種類のエージェントによるシミュレーションの結果から、分散電源の有効活用に加えて、既存の電圧制御機器である配電用変電所LRTのタップを制御し、さらに、送り出し電圧を変更することによって、連系する母線電圧を適正範囲内に保つことが出来ることを示した。また、第3章で示した方式と比較して、力率制御量低減化、すなわち売電量増加の可能性を示した。

本方式は、マルチエージェントシステムにより実現しており、各エージェントの電圧制御制御戦略はモジュール化している。このため、適用順を変更することが容易であり、たとえば、LRTのタップ制御を先に実施し、ある一定の限界値まで制御してもなお電圧違反が残る場合に分散電源の力率制御を実施するといった運用も考えられる。

今後の電力システムは、配電線フィーダに連系する負荷や分散型電源、そして既設電圧制御機器をインテリジェント化する新しい考え方が必要になると考えられる。本方式は、そのような方式の実現方式の1つであり、電圧管理技術を高度化する上での選択肢の1つである。

今後の課題は、より変化の激しい実データを用いた実用規模の配電システムでの評価、他方式との組み合わせ方式の検討などが挙げられる。

第5章 分散電源の力率制御とフィーダ間連系開閉器 制御の組み合わせによる配電線フィーダ電圧 制御方式

配電系統の電圧制御機器の中で、CS (Connection Switch : 連系開閉器) は、フィーダ間の連系を制御する機器である。第4章では、第3章で提案した方式において、課題としていた他の電圧制御機器との協調制御方式として、配電用変電所の LRT との協調制御方式を提案した。さらに、他の方式としては、CS の開閉状態を制御し、系統構成を変更する方法でも配電線フィーダの電圧分布を変更することが考えられる。

そこで本章では、図 5.1 の配電系統モデルに示すように、分散電源の力率制御による電圧制御方式を基盤として、他フィーダとの連系を制御するフィーダ間連系開閉器制御との協調制御方式を提案する。

なお、本章の内容は、一連の研究成果をまとめた論文[37]に基づいたものである。

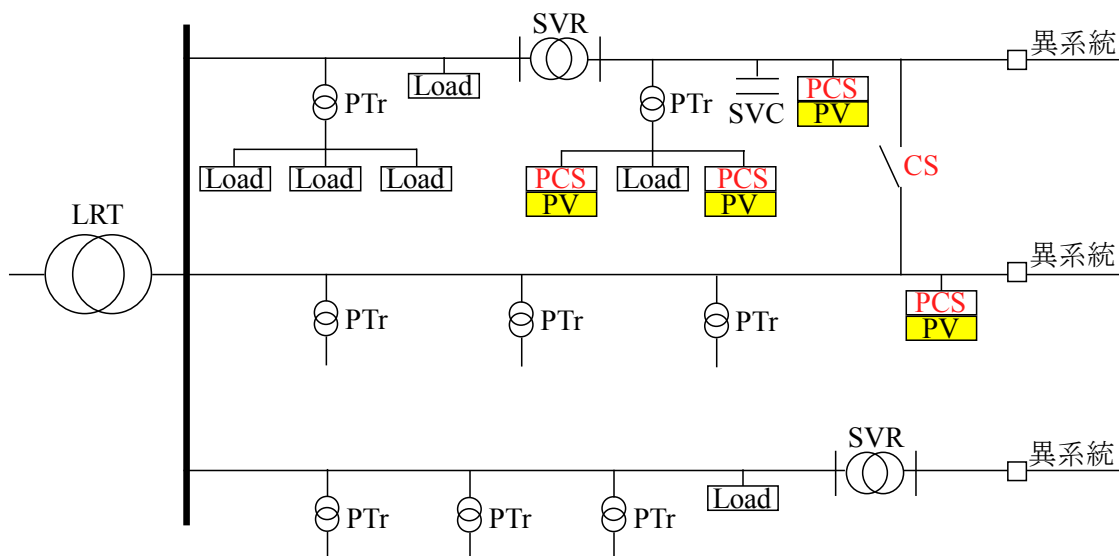


図 5.1 配電系統の PCS と連系開閉器の協調による電圧制御方式

第5章 分散電源の力率制御とフィーダ間連系開閉器制御の組み合わせによる配電線フィーダ電圧制御方式

5.1 緒言

本章では、第3章で示した電圧制御方式を基盤として、フィーダに連系する複数の分散電源の力率制御とフィーダ間連系開閉器（CS）制御の組合せによる電圧制御方式を提案する^[37]。本提案システムは、配電線フィーダに対応する“フィーダエージェント(F_AG)”と複数のF_AG間の連系を管理する“フィーダグループエージェント(FG_AG)”，配電線に連系する需要家や太陽光発電所の母線に対応する“母線エージェント (B_AG)”を実装した3階層のマルチエージェントシステムであり、これらのエージェントの協調動作により、母線の電圧プロファイルを適切に保つ電圧制御方式である。

5.2 提案する電圧制御方式

本章の提案方式は、配電用変電所に接続された2つの配電線フィーダを対象とする。

5.2.1 提案方式の概要

図5.2の簡単な配電線フィーダを用いて、提案方式の基本的な考え方を説明する。同図において、SSは配電用変電所、Feeder #1～#2は配電線フィーダ、B1～B14は居住地区、工場、オフィスなどに対応する母線、CS1～CS3はフィーダ間連系開閉器、黒の矢印は負荷需要、白の矢印は分散電源の発電出力を示している。

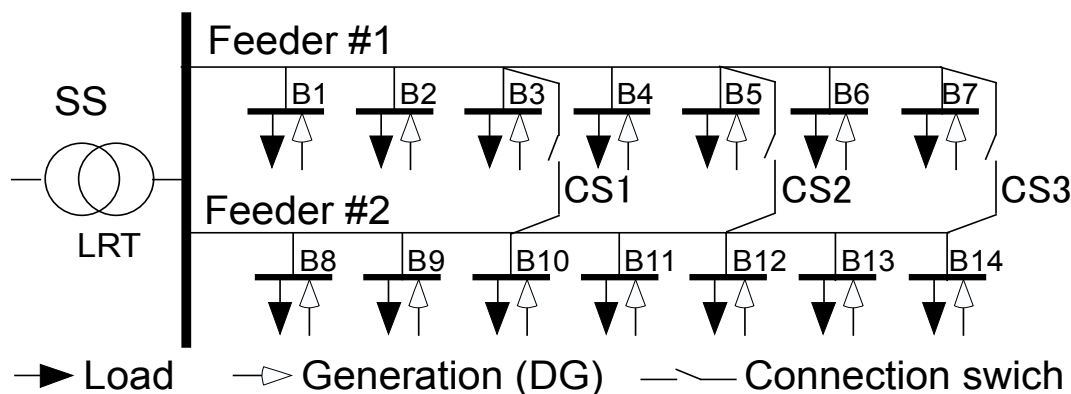


図 5.2 簡単な配電線フィーダ

第5章 分散電源の力率制御とフィーダ間連系開閉器制御の組み合わせによる 配電線フィーダ電圧制御方式

本方式は、図 5.2 の白の矢印で示した分散電源の力率を変更することにより、連系するフィーダの電圧プロファイルを適切に保つ方式である。本方式では、電圧が下限逸脱している場合には、分散電源の力率を制御し、電源から電力系統側に遅れ無効電力を供給することにより逸脱解消を試みる。一方、電圧が上限逸脱している場合には、分散電源の力率を制御し、電源から電力系統側に進み無効電力を供給することにより逸脱解消を試みる。

本方式の特徴を以下に示す。

(1) F_AG はフィーダ内完結型制御を実施し、フィーダ内に解が存在しない場合には FG_AG が CS (連系開閉器) を操作し、電圧制御を実施するという 2 階層の制御方式を実装している。

(2) F_AG と FG_AG には、電圧プロファイルを適正化するためのアルゴリズムを知識モジュールの形式で複数実装している。すなわち、需要家や PV 母線の電圧制御をするための「電圧改善モジュール」と分散電源の力率を改善するための「力率改善モジュール」を用いて、分散電源の有効電力と無効電力の制御量を決定している。

(3) FG_AG は、フィーダ内の無効電力が不足した場合には、F_AG からの接続申請を受信し、指定の CS を ON にすることで他フィーダから電力を融通する制御を実施している。

(4) 各知識モジュールは、制御実施後の系統状況を“仮想系統”上で電力潮流問題を繰り返し解くことにより適切な制御量を決定している。この電力潮流問題を解くことを本章では以後“電圧推定計算”と呼ぶ。本方式における制御量(力率)は、複数回この電圧推定計算を試行して決定するため、複雑な制御則の実装や制御パラメータのチューニングが不要である。また、本方式は、同時に複数個所の制御が可能な方式となっている。

(5) 現状の連系規程では、0.85 以上の固定力率での連系となっているが、本方式は管理目標電圧からの逸脱が発生した場合に、動的にこの力率を変化させている。この結果、本方式は固定力率で連系した場合と比べ需要家のメリットになり得る方式である。

一般に、配電方式は放射状方式とループ状方式に大別され、放射状方式が広く採用されている。両者を比較した場合、ループ状方式の方が電圧降下は少なく、信頼度が高くなるが、保護が複雑になるなどの課題が指摘されている。本方式では、複数フィーダの制御方式の初期の検討として CS 操作ではループ状方式を採用している。そのため、今後放射状方式との比較検討が必要である。

第5章 分散電源の力率制御とフィーダ間連系開閉器制御の組み合わせによる 配電線フィーダ電圧制御方式

5.2.2 マルチエージェントでの実装

ここでは、前項で述べた電圧制御方式をマルチエージェントにより実現する方法について説明する。図 5.3 は提案するマルチエージェントシステムの構成図である。同図は図 5.2 に対応したもので、網掛けの部分が一エージェントである。同図に示すように、提案システムは1つのフィーダグループエージェント (FG_AG) と2つのフィーダエージェント (Fk_AG) (k はフィーダ番号) と複数の母線エージェント (Bi_AG) (i は Bus 番号) の3種類のエージェントから構成されている。B_AG は、メガソーラなどの大規模な太陽光発電所、住宅団地などの居住地区、工場、オフィスに対応している。また、B_AG は負荷と分散電源の両方を保持することが可能になっている。

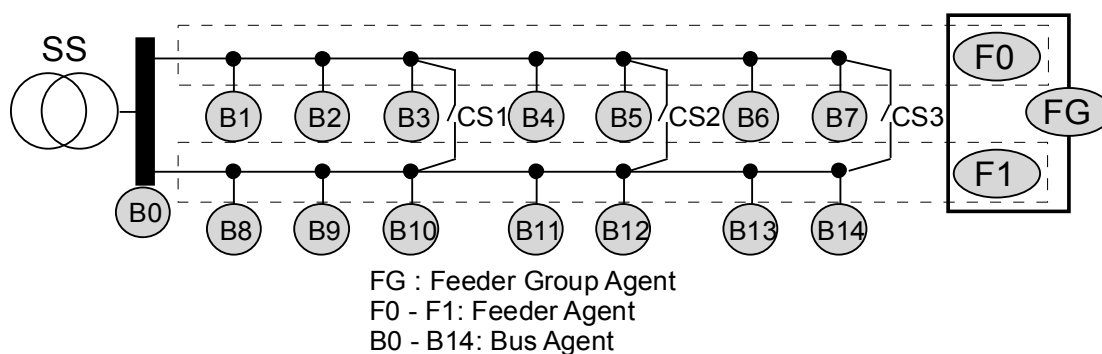


図 5.3 提案するマルチエージェントシステムの構成図

以下、各エージェントの機能と動作について説明する。

(1) フィーダエージェント (F_AG)

F_AG は、連系する母線電圧の電圧改善と力率改善を行う。このために、連系する B_AG の分散電源の力率の下限を 0.900 として協調させる。まず、電圧改善では連系する母線電圧が許容範囲を逸脱した場合に電圧制御方針を決定する。各連系母線電圧の評価には、電気事業法で定められた値である 101 ± 6 [V] に対応する“許容電圧幅 ($V-Limit$)”と“運用目標電圧幅 ($V-Target$)”を用いる。なお、力率を 0.900 まで制御しても電圧が運用目標電圧幅内に無いときは、フィーダ内の無効電力が不足していることを意味する。この場合は FG_AG に他フィーダとの接続申請を送信する機能を有している。

次に、力率改善では上記の電圧改善で実施された力率下げ操作に対して力率改善が可能か否かを検討する。これは、時々刻々と変化する需給状況によっては力率を改善できる可能性が出てくるためである。

第5章 分散電源の力率制御とフィーダ間連系開閉器制御の組み合わせによる 配電線フィーダ電圧制御方式

(2) フィーダグループエージェント (FG_AG)

FG_AG は、F_AG から 1 つでも接続申請を受けると、図 5.3 中の CS1~CS3 の 1 か所を ON にする。連系する場所は電圧推定計算により決定している。具体的には、仮想系統上で 1 か所のみ CS を ON にした電圧推定計算を 3 回実施し、フィーダ内で電圧違反が解消できない B_AG (Target-Bus) の電圧を最も大きく改善することができる CS 1 つを選択する。

(3) 母線エージェント (B_AG)

B_AG は F_AG からの要求に基づいて、現在時刻の母線電圧と次の制御時刻の需要電力と発電電力の計算値 (有効電力と無効電力) を F_AG へ返答する。ここで、発電電力の有効電力と無効電力は現在の力率から算出した値である。また、F_AG からの指令値 (力率) に基づき分散電源の出力を変更する。

(4) エージェントの処理

図 5.4 にエージェントの処理を示す。エージェントは、状態遷移マシンとして実装している。同図の丸印が状態を表している。マルチエージェントシステムを構築する上で重要なことは、エージェントの構造を簡単にすることである。このようにすることによってオブジェクトのサイズを小さくし、高性能な計算機を用いることなく多数のエージェントをシステム内に実装させることが可能になる。状態 0 (S0) は起動時の初期化、状態 1 (S1) は環境の知覚、状態 2 (S2) は意思決定、および状態 3 (S3) は環境への行為に対応している。本方式では全てのエージェントを同図に示すように 4 つの状態から構成させている。

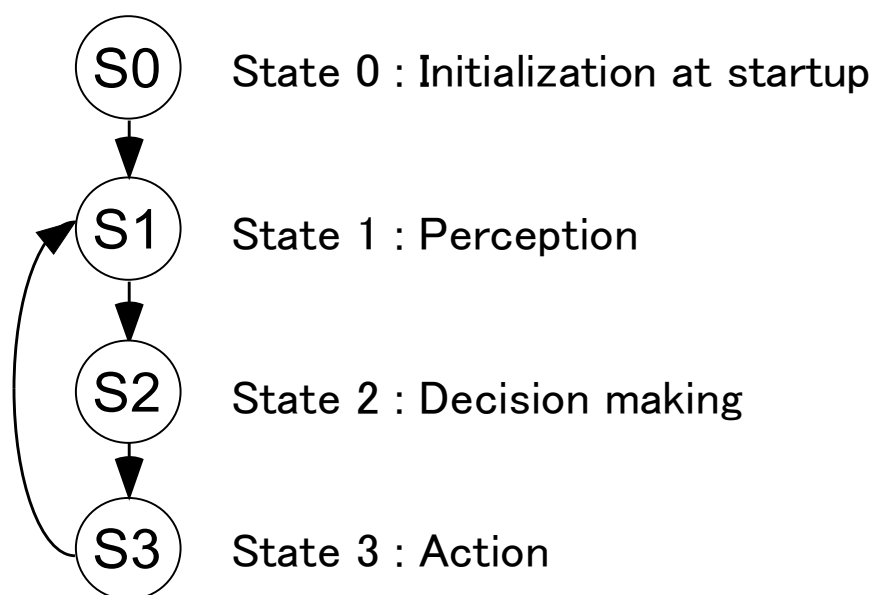


図 5.4 エージェントの処理 (状態遷移図)

第5章 分散電源の力率制御とフィーダ間連系開閉器制御の組み合わせによる 配電線フィーダ電圧制御方式

図 5.5 は、提案するマルチエージェントシステムの構成とエージェント間で交換されるメッセージを示したものである。同図の[1]~[4]は F_AG と B_AG 間、[5]~[8]は FG_AG と F_AG 間で交換されるメッセージである。以下、簡単にメッセージの内容について説明する。

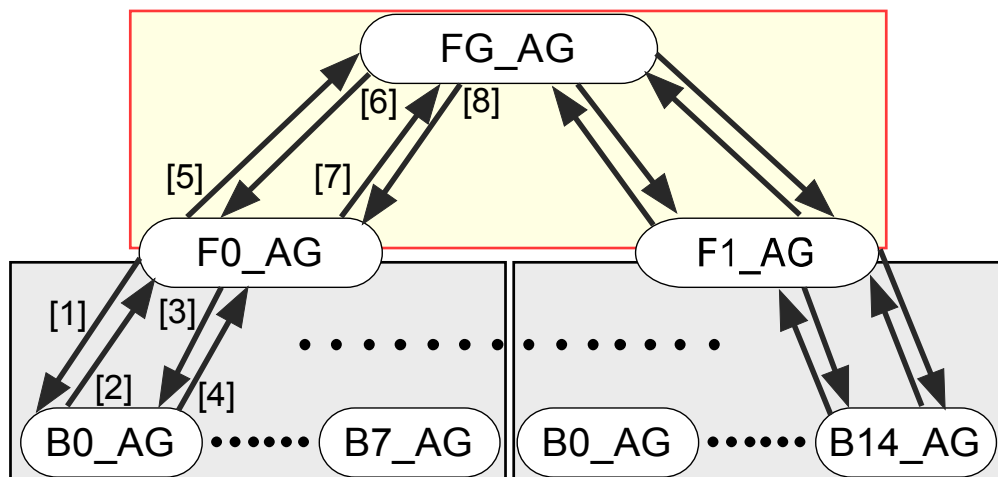


図 5.5 提案するマルチエージェントシステムの構成とエージェント間メッセージ

- [1] タスク告示：F_AG から各 B_AG へ制御処理の開始を通知する。
- [2] 情報収集：B_AG は自身の母線電圧値と次の制御時刻の需要電力と発電電力の計算値を送信する。
- [3] 意思決定：F_AG は電圧異常があれば電圧改善モジュール，電圧異常がなく力率改善が可能であれば力率改善モジュールを用いて各 B_AG の分散電源の力率を決定し，指示する。
- [4] 結果報告：B_AG は F_AG からの指示（力率）にしたがって分散電源の出力を変更し，報告する。
- [5] 接続申請：フィーダ内の無効電力が不足した場合に F_AG から FG_AG へ接続申請を送信する。なお，接続後 F_AG は FG_AG からの指示を連系する B_AG に送信する。
- [6] 接続通知：FG_AG は仮想系統上で電圧推定計算を実施し，当該時刻において適する CS を ON にするとともに，各 B_AG の力率を F_AG に通知する。
- [7] 切断申請：接続後，F_AG は FG_AG の指示を B_AG に送信するが，自身でも他フィーダと連系する前の系統を仮想系統上に保持し，電圧推定計算を継続して実施している。この電圧推定計算で全ての分散電源の力率が 1.0 の状態で全ての母線電圧が許容電圧幅内であれば FG_AG に切断申請を送信する。

第5章 分散電源の力率制御とフィーダ間連系開閉器制御の組み合わせによる 配電線フィーダ電圧制御方式

[8] 切断通知

FG_AG は接続申請を送信した全ての F_AG から切断申請があった場合に CS を切断し、F_AG に CS を切断したことを通知する。なお、CS 切断操作に関しては、積分制御等のハンチング防止対策が必要であるが、本方式では実装していない。これは、CS の切断後は全ての分散電源の力率が 1.0 であるため、F_AG の機能によりある程度電圧制御が可能だからである。

5.2.3 電圧制御方式

F_AG は B_AG の母線電圧が許容電圧幅を逸脱した場合に分散電源の力率を制御する。本方式の電圧制御は、知識モジュールを用いて実現している。知識モジュールは Java のクラスで定義され、図 5.6 に示すように 6 つのモジュール (S2_V1~S2_V3, S2_R1~S2_R3) を実装している。同図は、図 5.5 の FG_AG, F_AG がこのような知識モジュールの状態遷移により実現されていることを示している。S2_V1~S2_V3 が電圧改善モジュール、S2_R1~S2_R3 が力率改善モジュールである。以下、各モジュールについて説明する。

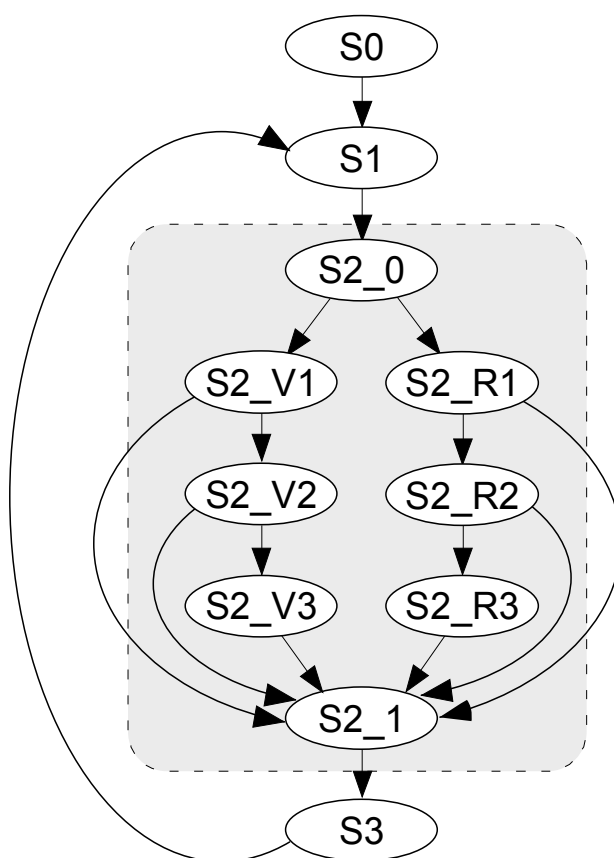


図 5.6 知識モジュールの状態遷移図

第5章 分散電源の力率制御とフィード間連系開閉器制御の組み合わせによる 配電線フィード電圧制御方式

(1) 電圧改善・自律制御モジュール (S2_V1)

電圧異常があった場合に最初に適用される知識モジュールである。このモジュールは、最大の電圧異常が発生している B_AG に対して、当該 B_AG の分散電源のみで電圧異常の解消を試みる。すなわち、自身の分散電源の力率を順次下げて電圧推定計算を行う。その結果、力率を 0.900 まで下げても電圧異常が解消されない場合は S2_V2 へ遷移し、解消された場合は以降のモジュールの適用をやめ S2_1 へ遷移する。

(2) 電圧改善・下流側制御モジュール (S2_V2)

このモジュールは、電圧異常の B_AG より下流側の B_AG の分散電源の力率を順次下げて電圧異常の解消を試みる。この場合、下流側の分散電源の設備容量の大きい順に B_AG を選択し、その分散電源の力率を順次下げて電圧推定計算を行い、制御量を決定する。その結果、下流側の全 B_AG の分散電源の制御でも電圧異常が解消されない場合は S2_V3 へ遷移し、解消された場合は S2_1 へ遷移する。

(3) 電圧改善・上流側制御モジュール (S2_V3)

このモジュールは、電圧異常の B_AG より上流側の B_AG の分散電源の力率を順次下げて電圧異常の解消を試みる。この場合、上流側の分散電源の近接の順に B_AG を選択し、その分散電源の力率を順次下げて電圧推定計算を行い、制御量を決定する。なお、この時点でも電圧異常が解消されない場合は、FG_AG に接続申請を送信し、以降のモジュールの適用をやめ S2_1 へ遷移する。

(4) 力率改善・上流側制御モジュール (S2_R1)

時々刻々と変化する電力需要や分散電源の出力に応じて、その時点の電圧プロファイルの状況では力率を改善させることが可能な場合があるため力率改善を試みる。力率改善は電圧改善と逆の順序で適用する。したがって、電圧異常がない場合に最初に適用を試みる知識モジュールはこのモジュールである。適用の順番は最後に電圧適性化の対象となった B_AG から上流側の遠い B_AG から順次行う。力率改善の電圧推定計算の試行過程で電圧逸脱が発生した場合は、以降のモジュールの適用をやめ S2_1 へ遷移する。上流側の全 B_AG で電圧逸脱が発生しなかった場合は、更に力率改善をするために S2_R2 へ遷移する。

(5) 力率改善・下流側制御モジュール (S2_R2)

次に、下流側で上流側と同様な力率改善を試みる。この場合は分散電源の設備容量の小さい順に B_AG を選択する。

(6) 力率改善・自律制御モジュール (S2_R3)

最後は自身の力率改善である。

第5章 分散電源の力率制御とフィーダ間連系開閉器制御の組み合わせによる 配電線フィーダ電圧制御方式

以上のように、電圧改善モジュール (S2_V1~S2_V3) は電圧異常が発生している B_AG の電圧を調整する能力が高い B_AG から順に力率を調整している。また、力率改善モジュール (S2_R1~S2_R3) は最後に電圧改善の対象となった B_AG を基点として、電圧改善とは逆順に処理を行わせている。このようにすることにより、電圧改善のために力率を悪化させる分散電源の数になるべく少なくなる仕組みを実現している。

5.3 シミュレーション

本システムの有効性を確認するため、Java 言語を用いてマルチエージェントシステムを開発し、シミュレーションを行った。

5.3.1 シミュレーション条件

本シミュレーションでは、図 5.7 に示した配電システムモデルを用いた。このモデルは 6,600[V] 配電線で、線路インピーダンスは $(0.14 + j 0.35)$ [Ω/km]、各区間長は 1.5[km]、全亘長は 10.5[km]を想定している。同図において、SS は配電用変電所、R1~R4 は住宅団地などの居住地区、F1~F2 は工場、O1 はオフィス、PV1~PV7 は大規模な太陽光発電所である。

電圧許容値は以下の値を用いた。

- ・許容電圧幅 ($V\text{-Limit}$) : 0.941~1.059 [p.u]
- ・運用目標電圧幅 ($V\text{-Target}$) : 0.980~1.020 [p.u]

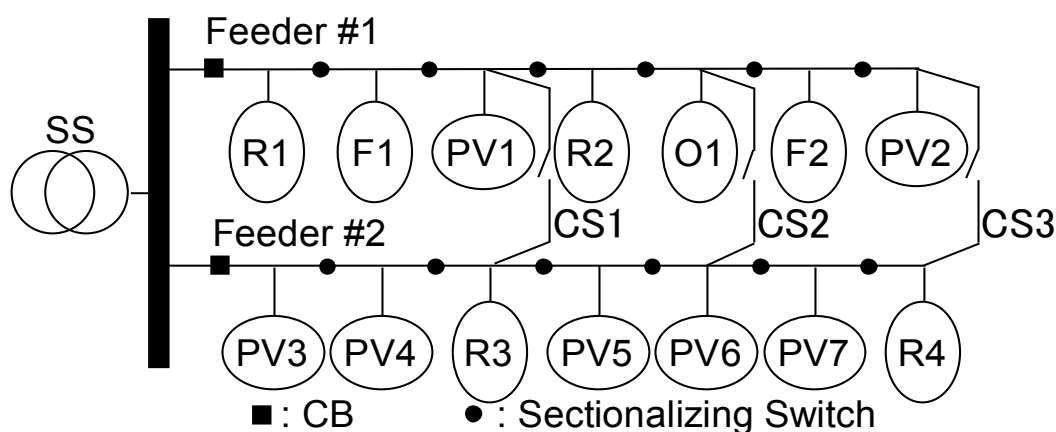


図 5.7 配電システムモデル

シミュレーションに用いた各 AG の 60 秒毎の負荷と発電電力のフィーダ毎の値を図 5.8 ~5.9 に示す。同図の横軸は時間を示し、縦軸の上側は発電電力量[kW]、下側は負荷電力量[kW]を示している。また、負荷の力率は 0.98 で一定とした。分散電源の力率は、シミュレ

第5章 分散電源の力率制御とフィーダ間連系開閉器制御の組み合わせによる 配電線フィーダ電圧制御方式

ーション開始時に 1.0 とし、F_AG からの要求に基づいて力率を 0.001 毎に 0.900 まで制御できるものと仮定した。シミュレーションの制御時間間隔は 60 [秒]とし、24 時間分 (1,440 ステップ) 実施した。

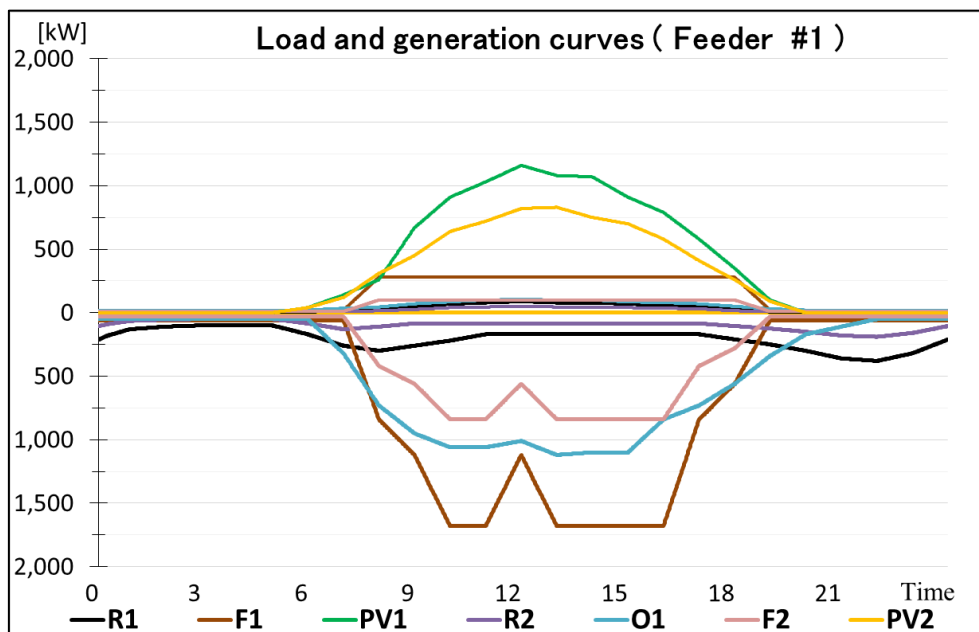


図 5.8 負荷・発電電力曲線 (フィーダ#1)

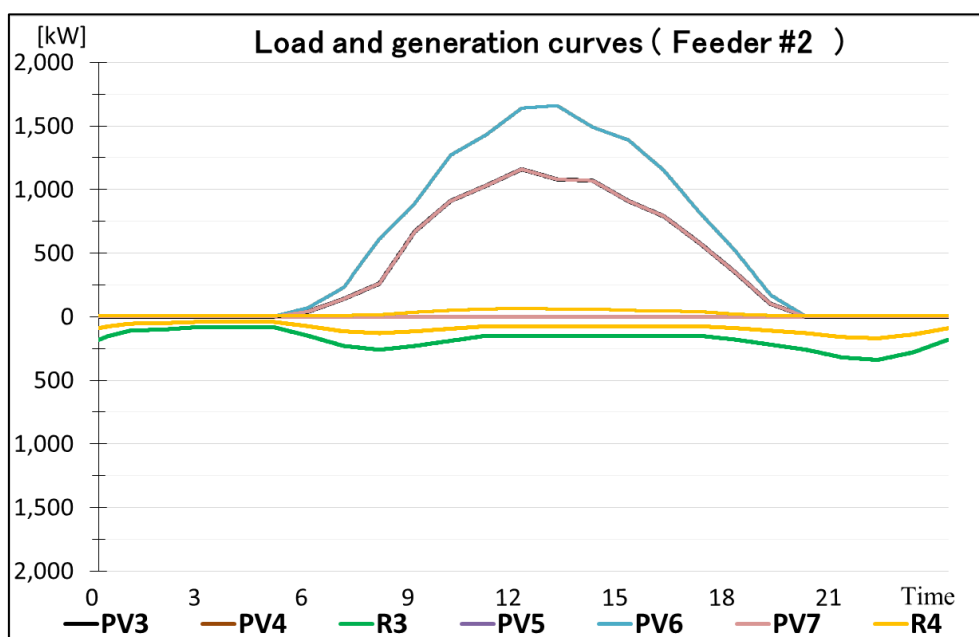


図 5.9 負荷・発電電力曲線 (フィーダ#2)

第5章 分散電源の力率制御とフィーダ間連系開閉器制御の組み合わせによる 配電線フィーダ電圧制御方式

5.3.2 ケーススタディ

以下では、3つのケースについて説明する。ケース1は制御を行わなかった場合、ケース2は力率制御ありでCS制御なしの場合、ケース3は力率制御ありでCS制御ありの場合である。

(1) ケース1 (制御なし)

まず、力率制御を行わなかった場合の各母線電圧の変化を図5.10に示す。同図の横軸は時間、縦軸は電圧[p.u]である。同図に示すように、B1_AG~B7_AGが属するFeeder #1では、多くの時間でV-Limit下限を逸脱している。また、B8_AG~B14_AGが属するFeeder #2では、PVの発電電力が過大になったため多くの時間でV-Limit上限を逸脱している。

(2) ケース2 (力率制御あり-CS制御なし)

このケースは、ケース1と同一条件でCSを使用しないで制御を行った場合である。各母線電圧の変化を図5.11に示す。同図に示すように、全ての時間で全ての母線電圧はV-Limit内に収まっているが、Feeder #1では、一部の時間帯でV-Target下限を逸脱している。

(3) ケース3 (力率制御あり-CS制御あり)

このケースは、ケース2と同一条件でCSを使用して制御を行った場合である。各母線電圧の変化を図5.12に示す。同図に示すように、全ての時間で全ての母線電圧はV-Target内に収まっている。このケースでは、FG_AGが7:23にFeeder #1から接続申請を受けCS2をONにして、系統は図5.13のように変更された。その後、18:33にFeeder #1から切断申請を受けCS2をOFFにしている。

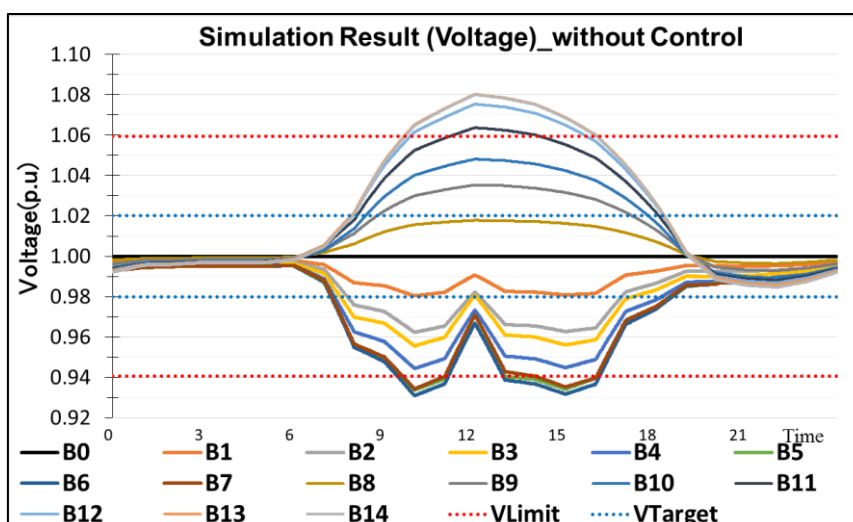


図 5.10 各母線電圧の変化—ケース1 (制御なし)

第5章 分散電源の力率制御とフィーダ間連系開閉器制御の組み合わせによる
配電線フィーダ電圧制御方式

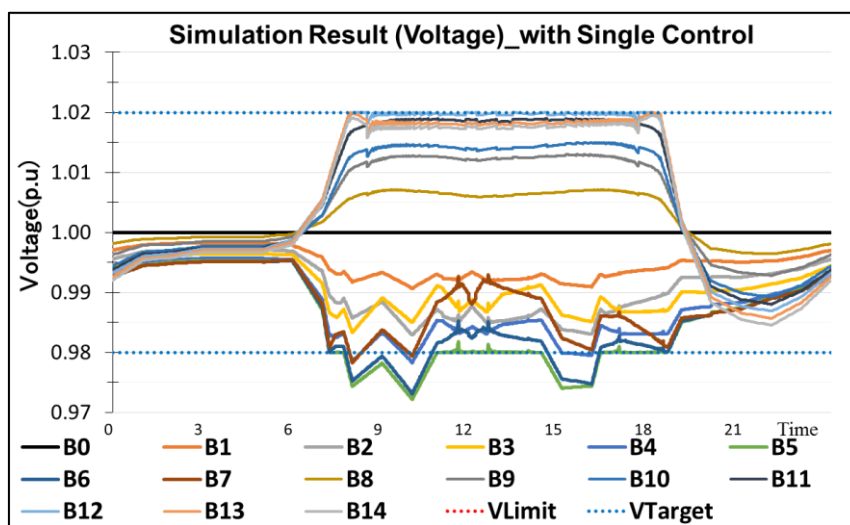


図 5.11 各母線電圧の変化—ケース 2 (力率制御あり—CS 制御なし)

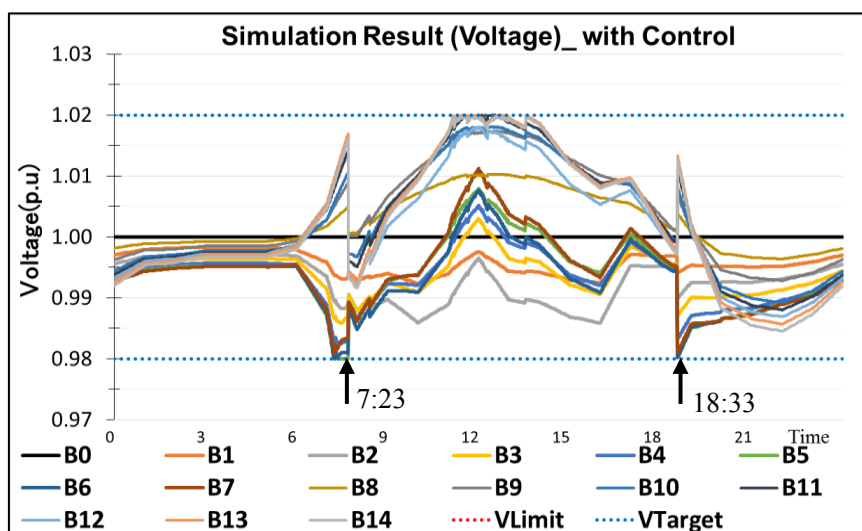


図 5.12 各母線電圧の変化—ケース 3 (力率制御あり—CS 制御あり)

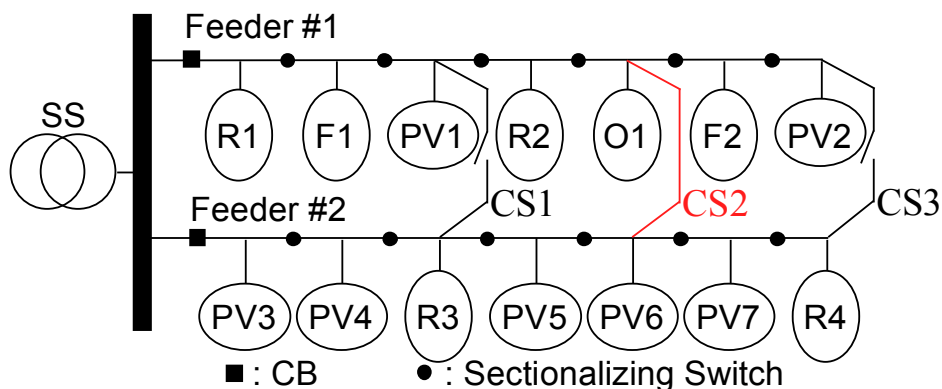


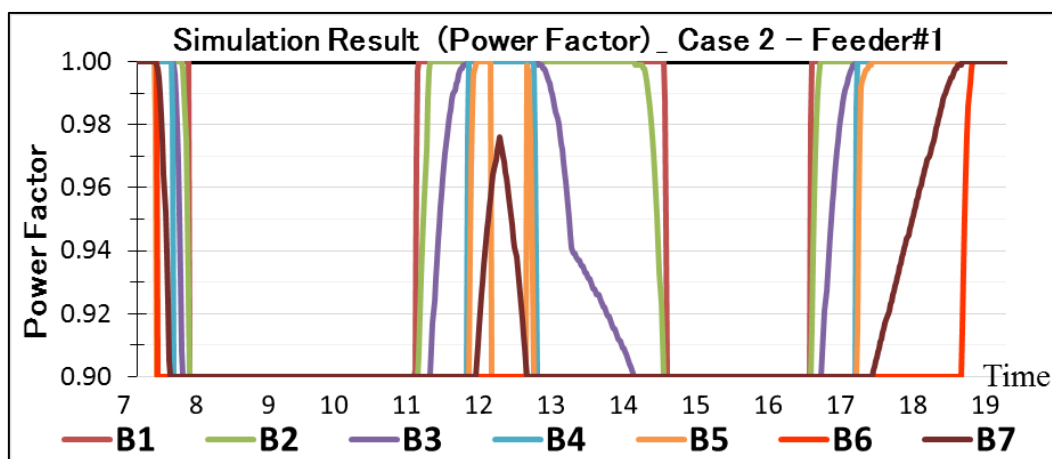
図 5.13 制御実施後の系統状況 (ケース 3)

第5章 分散電源の力率制御とフィーダ間連系開閉器制御の組み合わせによる 配電線フィーダ電圧制御方式

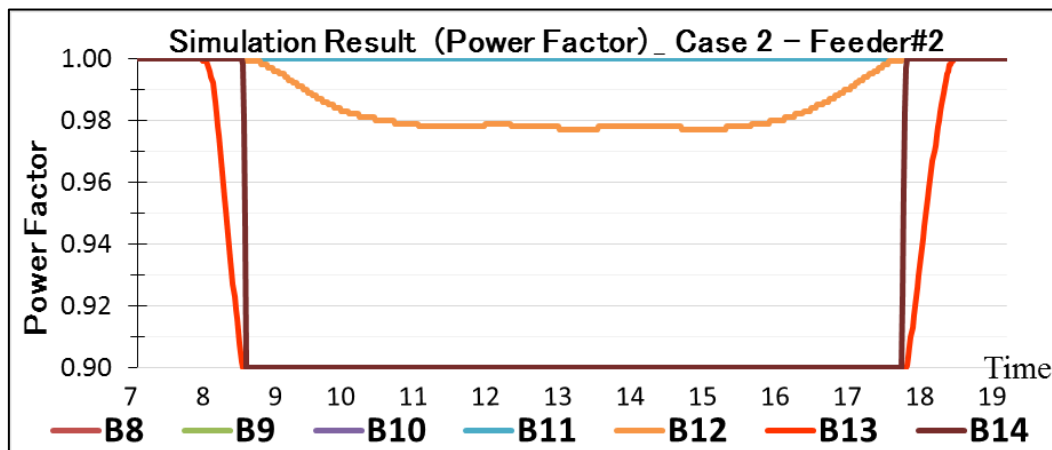
5.3.3 考察

ケース2と3の結果から明らかなように、本方式は分散電源の力率制御とCS制御の組み合わせによる電圧制御の可能性を示している。

本方式では分散電源の力率を制御しているので、ケース2と3の7時～19時の力率の変化を図5.14～5.15に示した。同図において、横軸は時間、縦軸は力率を示す。



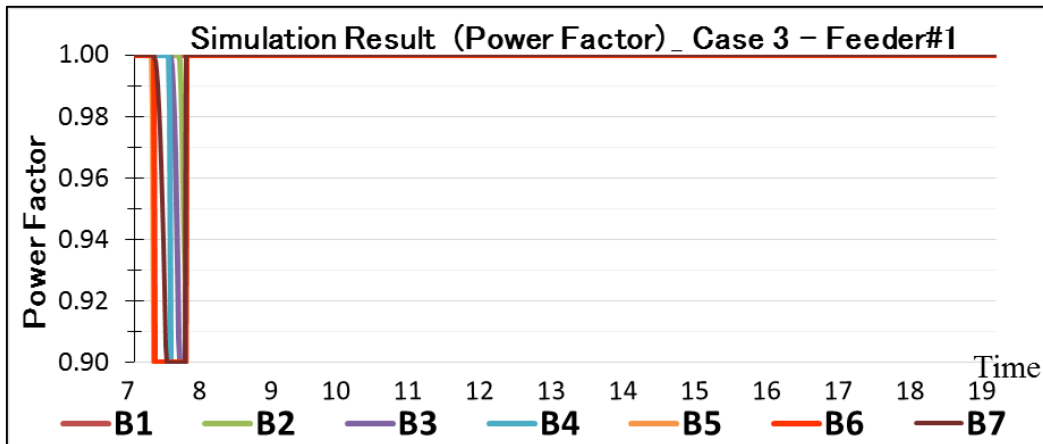
(a) フィーダ#1



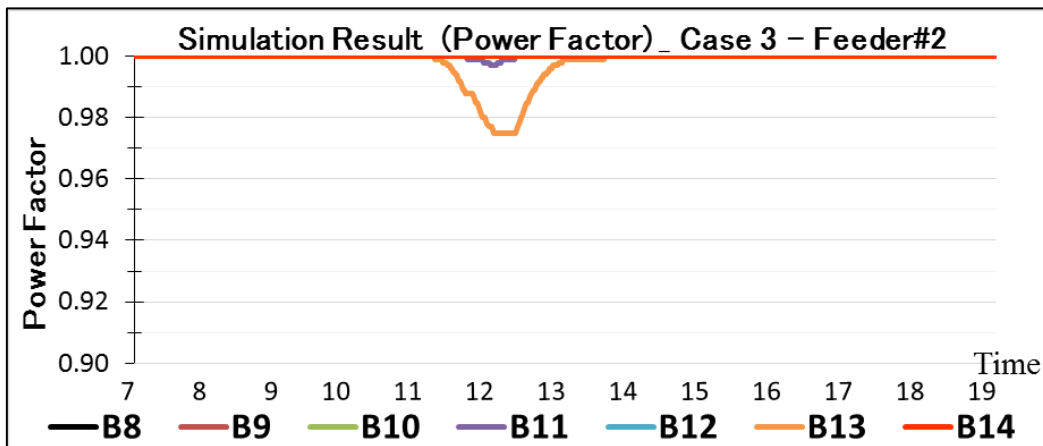
(b) フィーダ#2

図 5.14 力率の変化 (ケース2)

第5章 分散電源の力率制御とフィーダ間連系開閉器制御の組み合わせによる
配電線フィーダ電圧制御方式



(a) フィーダ#1



(b) フィーダ#2

図 5.15 力率の変化 (ケース 3)

第5章 分散電源の力率制御とフィーダ間連系開閉器制御の組み合わせによる 配電線フィーダ電圧制御方式

また、表 5.1 は制御された B_AG と全時間の平均力率を示している。ここで、括弧内の数字は PV の発電出力がある時間帯のみの平均力率である。

まず、ケース 2 は、フィーダ#1 で全ての B_AG の力率が制御されている。これは、図 5.11 に示す通り、全ての分散電源の力率を 0.900 まで制御しても *V-Target* を逸脱する時間があるためである。このため、同ケースのフィーダ#2 と比べて平均力率が低くなっている。しかし、力率改善モジュールが有効に働き、平均力率が最も低い B6_AG で 95.3%となっており、力率の悪化が抑制された結果が示されている。

次に、ケース 3 は、平均力率は全ての B_AG で 99%以上となっており、CS を使用したことにより平均力率の悪化が抑えられている結果が示されている。括弧内の数字に着目すると、ケース 2 では 93.31~98.93%で、ケース 3 では全て 99%以上である。このことは、需要家にとってはより多くの売電量が得られることを示している。

表 5.1 制御された B_AG と全時間の平均力率

Case No.	Feeder No.	Controlled B_AG	Average power factor [%]
Case 2 (力率制御あり, CS 制御なし)	Feeder #1	B6_AG	95.349
		B7_AG	95.825 (93.313)
		B5_AG	96.099
		B4_AG	96.460
		B3_AG	97.031 (95.244)
		B2_AG	97.727
		B1_AG	97.860
	Feeder #2	B13_AG	95.965 (93.537)
		B14_AG	96.207
B12_AG		99.336 (98.937)	
Case 3 (力率制御あり, CS 制御あり)	Feeder #1	B5_AG	99.819
		B7_AG	99.863 (99.780)
		B6_AG	99.811
		B4_AG	99.909
		B3_AG	99.946 (99.914)
		B2_AG	99.989
	Feeder #2	B13_AG	99.902 (99.843)
		B11_AG	99.996 (99.993)

第5章 分散電源の力率制御とフィーダ間連系開閉器制御の組み合わせによる 配電線フィーダ電圧制御方式

5.4 結言

本章では、分散電源の力率制御とCS制御を組み合わせた配電線フィーダの電圧制御方式を検討した。本方式は、まずフィーダ内での自己完結型電圧制御を実施し、次にフィーダ間連系制御を実施する2階層の制御方式である。3種類のエージェントによるシミュレーションの結果から、分散電源の有効活用に加えて、系統構成を変更することにより、力率制御量の低減化の可能性を示した。

今後の電力システムは、配電線フィーダに連系する負荷や分散型電源、そして既設電圧制御機器をインテリジェント化する新しい考え方が必要になると考えられる。本方式は、そのような方式の実現方式の1つであり、電圧管理技術を高度化する上での選択肢の1つである。

今後の課題は、放射状方式との比較検討、実データを用いた実用規模の配電系統での評価、他方式との組み合わせ方式の検討などが挙げられる。

第6章 結論

本研究は、新時代の電力システムを構築する上で、いくつか存在する課題の中で、配電線フィーダの電圧管理問題に焦点を当て、環境に合った新たな電圧制御方式を提案することを目的に遂行してきた。配電系統内の電圧制御機器に着目し、これらでセンシングされた結果を基に、仮想系統上で制御戦略を決定した後に制御を実施することで、配電線フィーダの電圧プロファイルを適正範囲内に保つ方式を提案した。本論文は、これらの研究成果をまとめたものである。

以下、各章の内容と得られた結果を要約する。

(第2章) 柱上変圧器タップの自律制御による配電線フィーダ電圧制御方式

需要家に最も近い場所にある電圧調整機器である柱上変圧器 (PTr: Pole mounted Transformer) に着目し、系統構成の変化や平日・休日負荷パターンの変化、および時間帯での負荷変動などに対応できるリアルタイム制御を考慮し、制御パラメータの変更が不要である新しい電圧制御方式を提案した。本方式は、PTr に自身の電圧と電力のセンシングとタップ制御機能を新たに実装すると仮定し、このセンシング結果から、PTr に実装した制御用ソフトウェアの自律動作により、タップ値を制御し、厳しい需給バランスの変動に対応できる電圧制御方式である。まず、PTr の機能を概説し、本方式を実装した PTr を含む配電線フィーダモデルを作成し、シミュレーションにより本方式の有効性を確認した。

実系統への導入については、本方式をより詳細にモデル化し、特に条件の厳しい箇所や需給バランスの変動が大きな箇所を対象として、部分的に導入する方法であれば実現可能な方法であると考えます。

(第3章) 分散電源の力率制御による配電線フィーダ電圧制御方式

パワーコンディショナ (PCS : Power Conditioning System) を電圧制御機器と捉え、系統状況に応じて力率を制御することで可能な限り力率を悪化させることなく電圧を適正範囲内に保つ電圧制御方式を提案した。まず、PV に併設される PCS の機能と役割を概説した後、簡単な配電線フィーダモデルを作成し、配電線フィーダに対応する“フィーダエージェント

第 6 章 結論

(F_AG)”と、連系する需要家や太陽光発電所の母線に対応する“母線エージェント(B_AG)”の 2 種類のエージェントから構成されるマルチエージェントシステムを用いて計算機シミュレーションを実施し、その有効性を示した。また、対象を複数フィード制御に拡張する第一歩として 2 つのフィードの電圧制御を実施し、本方式の有効性を示すと共に、マルチエージェントシステムを採用したことによる系統状況の変更に対する拡張性も確認した。

本方式を実系統へ導入した場合、需要家にとっては、不必要な低力率での系統連系の削減による売電量の増加が見込まれる。また、系統運用者側にとっては、本来制御することができない需要家の分散電源を電圧制御機器と捉えることができ、従来型機器の新設や既設電圧制御機器の制御回数削減などの効果が見込まれる。そのため、双方にメリットがある方式であると考えられる。

(第 4 章) 分散電源の力率制御と配電用変電所 LRT のタップ制御による配電線フィード電圧制御方式

第 3 章で有効性を示した分散電源の力率制御による電圧制御方式を基盤として、配電用変電所 LRT (Load Ratio Transformer : 負荷時タップ切換変圧器) のタップ制御を組み合わせた配電線フィード電圧制御方式を提案した。まず、LRT の機能と役割を概説した後、簡単な配電線フィードモデルを作成し、配電用変電所 LRT に対応する“変電所エージェント(SS_AG)”と、配電線フィードに対応する“フィードエージェント(F_AG)”と、連系する需要家や太陽光発電所の母線に対応する“母線エージェント(B_AG)”の 3 種類のエージェントから構成されるマルチエージェントシステムを用いて計算機シミュレーションを実施して、その有効性を示した。配電用変電所 LRT のタップを制御し、送り出し電圧を変更することによって、連系する母線電圧を適正範囲内に保つと共に、力率制御量の低減化(売電量増加)の可能性を示した。

本方式は、マルチエージェントシステムにより実現しており、各エージェントの電圧制御戦略はモジュール化している。このため、適用順を変更することが容易であり、たとえば、LRT のタップ制御を先に実施し、ある一定の限界値まで制御してもなお電圧違反が残る場合に分散電源の力率制御を実施するといった運用も考えられる。

第 6 章 結論

(第 5 章) 分散電源の力率制御とフィーダ間連系開閉器制御の組み合わせによる配電線 フィーダ電圧制御方式

第 3 章の提案方式を基盤として、フィーダ間連系開閉器制御との組み合わせによる配電線フィーダ電圧制御方式を提案した。まず、フィーダ間連系開閉器の機能と役割を概説した後、簡単な配電線フィーダモデルを作成し、配電線フィーダに対応する“フィーダエージェント(F_AG)”と複数の F_AG 間の連系を管理する“フィーダグループエージェント(FG_AG)”, 配電線に連系する需要家や太陽光発電所の母線に対応する“母線エージェント (B_AG)”の 3 種類のエージェントから構成されるマルチエージェントシステムを用いて計算機シミュレーションを実施して、その有効性を示した。また、シミュレーション結果から、分散電源の有効活用に加えて、系統構成を変更することにより、力率制御量の低減化の可能性を示した。

第 4 章では、第 3 章で有効性を示した分散電源の力率制御による電圧制御方式を基盤として、配電用変電所 LRT のタップ制御を組み合わせた配電線フィーダ電圧制御方式を提案した。第 3 章と第 4 章の提案は、フィーダ内の要素を活用する方式であるのに対して、本章では、系統構成を変更し、他フィーダの要素まで活用して電圧を適正範囲内に保つ方式であるため、前者とは別の手法であると言える。

第6章 結論

本論文では、機器でのセンシング結果に基づいて、調整可能なタップ値や力率を自律的に制御することによる電圧制御方式を提案した。シミュレーションにより有効性を示し、複数の方式を提案できたことで、ある程度の成果を収めたと考えているが、不十分あるいは継続した研究が必要であると考えられる部分もある。

今後の課題として、さらに研究が必要と考えられる事項を以下に示す。

(1) 下流側需要家の不公平解消

本論文では、事前検証により制御戦略モジュールの適用順を決定している。しかしながら、本方式では、電圧改善モジュール適用の場合、自所→下流側→上流側としているため、立地による不公平が生じていると見ることが出来る。すなわち、下流側ほど力率を悪化させる機会が多く発生するため、売電量を減少させる機会が多いことになる。このため、一般の需要家を想定した場合には、この不公平を解消することを検討する必要がある。

(2) 実用化のための検討

本論文では、柱上変圧器、PV に併設されるパワーコンディショナ、配電用変電所のLRT、フィーダ間連系開閉器を制御対象機器として選択しているが、この他にもSVRやSVC、蓄電池、EVなども存在している。配電系統の電圧制御は、様々な機器と制御アルゴリズムが複雑に絡み合っている。これらを的確に連携し協調動作させることが重要であると考えられる。このため、今後は、様々な機器と制御アルゴリズムを実装した、より詳細な配電系統モデルを作成し、時々刻々と変化する系統状況に合わせて、制御を実施する方式の開発が必要であると考えられる。また、このような方式を実現するには、タップ操作回数制約などを考慮した経済性や保守性の検討も必要である。

以上、本論文で示した「再生可能エネルギー源の大量導入に対応した配電系統電圧管理技術の高度化に関する研究」では、新しい環境における新しい電圧制御方式を提案することができたと考えている。本論文の内容は、電力系統全体から見ると、一部分の範囲を対象としたものに過ぎないが、今後のこの分野の研究発展の一助となれば幸いである。

謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、終始懇切丁寧な御指導と御鞭撻に加え、御激励を賜りました、広島工業大学情報学部 永田 武 教授に心より深く感謝の意を表します。

本研究の遂行にあたり、適切な御指導と御助言を賜りました、広島国際学院大学工学部 歌谷 昌弘 教授に心より御礼申し上げます。

著者の広島工業大学大学院工学系研究科博士後期課程進学に対し、当時そのきっかけを与えて下さると共に、広い御理解と多大なる御支援を賜りました、株式会社中電工代表取締役 細田 順弘 元相談役、代表取締役 神出 亨 会長、代表取締役 小畑 博文 社長、佐々木 茂 元技術センター長に心より深く感謝の意を表します。

また、就学するにあたり、広い御理解と多大なる御支援を頂いた、門野内 幸晴 前技術センター長、白石 俊之 技術センター長をはじめとする株式会社中電工の皆様心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] International Energy Agency. Photovoltaic Power Systems “Trends 2015 in Photovoltaic Applications”
- [2] International Energy Agency. Photovoltaic Power Systems “Trends 2016 in Photovoltaic Applications”
- [3] 環境省：「平成26年度 2050年再生可能エネルギー等分散型エネルギー普及可能性検証検討委託業務報告書」（<http://www.env.go.jp/earth/report/h27-01/>）,株式会社三菱総合研究所 (2014)
- [4] 経済産業省：「次世代エネルギーシステムに係る国際標準化に向けて」（<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g100129d01j.pdf>）, 次世代エネルギーシステムに係る国際標準化に関する研究会 (2010)
- [5] 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：「再生可能エネルギー技術白書第2版」（http://www.nedo.go.jp/library/ne_hakusyo_index.html）
- [6] 経済産業省：「低炭素社会実現のための次世代送配電ネットワークの構築に向けて」（<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g100426a02j.pdf>）, 次世代送配電ネットワーク研究会 (2010)
- [7] 経済産業省：「エネルギー基本計画」（http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf）, (2014)
- [8] 経済産業省：「電力及びガスの小売全面自由化について」（<http://www.pref.kyoto.jp/energy/news/documents/siry01.pdf>）, 経済産業省 電力・ガス取引監視等委員会, (2017)
- [9] Y. Liu and X. Qui: “Optimal Reactive Power and Voltage Control for Radial Distribution System”, in Proc. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, pp 85-90 (2000)
- [10] 壁村克樹, 米倉和彦, 塚本孝徳, 橋本圭一郎, 原雅則：「自律分散型電圧調整装置の実高圧配電線路への適用」, 電気学会論文誌B, Vol. 122, No. 12, pp. 1252-1261 (2002)
- [11] 中地芳紀, 加藤敦司, 鶴飼裕之：「経済性とセキュリティを考慮したタブサーチによる電圧・無効電力制御の最適化」, 電気学会論文誌 B, Vol. 128, No. 1, pp. 305-311 (2008)
- [12] 大城将人, 千住智信, 與那篤史, 浦崎直光, 船橋俊久：「無効電力出力分担を考慮した配電系統の電圧制御法」, 電気学会論文誌 B, Vol. 130, No. 11, pp. 972-980 (2010)

参考文献

- [13] 芳澤信哉, 山本裕也, 林泰弘, 佐々木俊介, 重藤貴也, 野村英生:「多段設置された次世代 SVR の最適整定値の動的更新手法」, 電気学会論文誌 B, Vol. 135, No. 9, pp. 972-980 (2010)
- [14] 飯岡大輔, 榊原邦明, 横水康神, 松村年郎, 出原範久:「太陽光発電装置が集中導入された配電系統の電圧上昇と SVC による抑制」, 電気学会論文誌 B, Vol. 126, No. 2, pp. 153-158 (2006)
- [15] J-young Park, S. Nam, and J-keun Park: “Control of a ULTC Considering the Dispatch Schedule of Capacitors in a Distribution System”, IEEE Trans. on Power Systems Vol. 22, No. 2, pp. 755-761 (2007)
- [16] 川崎章司, 林泰弘, 松木純也, 山口益弘:「LRT との制御分担を考慮した SVC の協調型電圧制御法および SVC の定格容量と制御パラメータの決定手法」, 電気学会論文誌 B Vol. 130-B, No. 11, pp. 963-971 (2010)
- [17] G. W. Kim and K. Y. Lee: “Coordination Control of ULTC Transformer and STATCOM Based on an Artificial Neural Network”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 20, No. 2, pp. 550-558 (2015)
- [18] 辻隆男, 会田忠弘, 池田一成, 丹下誠視:「経済性を考慮した将来型配電系統の自律分散型電圧分布制御方式」, 電気学会論文誌 B Vol. 128-B, No. 1, pp. 174-185 (2008)
- [19] 辻隆男, 橋口卓平, 合田忠弘, 進士誉夫, 辻田伸介:「優先度を考慮した将来型配電系統の自律分散型電圧分布制御方式」, 電気学会論文誌 B, Vol. 129, No. 12, pp. 1533-1544 (2009)
- [20] 内山倫行, 宮田博昭, 伊藤智道, 小西博雄:「大規模太陽光発電システムの無効電力制御による電圧変動抑制」, 電気学会論文誌 B, Vol. 130, No. 3, pp. 297-303 (2010)
- [21] 川崎章司, 金本憲明, 田岡久雄, 松木純也, 林泰弘:「太陽光発電システム群の力率制御と LRT による協調型電圧制御法」, 電気学会論文誌 B, Vol. 132, No. 4, pp. 309-316 (2012)
- [22] 栗栖慎也, 百合野拓, 歌谷昌弘, 永田武:「分散電源の無効電力融通を用いた配電系統電圧制御方法の検討 1」, 平成 26 年度 (第 65 回) 電気・情報関連学会中国支部連合大会論文集, pp. 53-54 (2014)
- [23] 栗栖慎也, 岡本和也, 永田武:「マルチエージェントによる配電線フィーダの電圧制御」, 平成 27 年電気学会全国大会論文集 (第 6 分冊), pp. 401-402 (2015)

参考文献

- [24] 栗栖慎也, 永田武:「分散電源の力率制御による配電線フィーダの電圧制御方式」, 2015年(第33回)電気設備学会全国大会論文集, pp. 497-500 (2015)
- [25] Shinya Kurisu, Takeshi Nagata: “Voltage Control for a Distributed Line Feeder by a Multi-agent Approach”, *2015 Intelligent System Applications to Power Systems (ISAP2015)*, CDR1-003, pp. 1-6 (2015)
- [26] 栗栖慎也, 永田武:「分散電源の力率制御による配電線フィーダ電圧制御方式」, 平成27年度(第66回)電気・情報関連学会中国支部連合大会論文集, 講演番号 6-4 (2015)
- [27] Shinya Kurisu, Takeshi Nagata: “Multi-agent based Voltage Control for Distributed Network by Power Factor Coordination of Distributed Generators”, *2015 IEEE International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC 2015)*
- [28] Shinya Kurisu, Takeshi Nagata: “A Multi-agent System for Voltage Control of Distribution Networks by Coordination Power Factors of Distributed Generators”, *2016 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC 2016)*, pp. 2300-2304 (2016)
- [29] Shinya Kurisu, Hikaru Kamigaichi, Takeshi Nagata: “A Coordinated Voltage Control of LRT and DG Power Factors in Distribution Networks”, *The IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies 2016 Asian Conference (ISGT-Asia 2016)*, pp. 1089-1093 (2016)
- [30] 栗栖慎也, 永田武:「分散電源の力率制御による配電系統の電圧制御マルチエージェントシステム」, 電気設備学会誌, Vol. 36, No. 9, pp. 673-679 (2016)
- [31] 栗栖慎也, 永田武:「マルチエージェントによる配電線フィーダの電圧制御方式」, 電気学会論文誌 B, Vol. 136, No. 12, pp. 876-882 (2016)
- [32] 栗栖慎也, 永田武:「分散電源の力率制御による電圧制御方式」, 2016年(第34回)電気設備学会全国大会論文集, pp. 124-125 (2016)
- [33] 栗栖慎也, 上垣内光, 歌谷昌弘, 永田武:「発電機会の損失を抑制する配電系統電圧制御方式—LRT 制御と分散電源の力率制御の協調—」, 平成28年電力・エネルギー部門大会論文集, pp. 3-2-5 ~ 3-2-6 (2016)
- [34] 栗栖慎也, 永田武:「配電線フィーダの自己完結型電圧制御方式」, 平成28年電力・エネルギー部門大会論文集, pp. 3-6-1 ~ 3-6-6 (2016)
- [35] 栗栖慎也, 永田武:「分散電源の力率制御とフィーダ間連系の組み合わせによる配電線フィーダ電圧制御方式の一検討」, 平成28年電力・エネルギー部門大会論文集, pp. 3-3-7 ~ 3-3-12 (2016)

参考文献

- [36] 栗栖慎也, 永田武:「配電線フィーダの自己完結型電圧制御方式」, 電気学会論文誌 B, Vol. 137, No. 1, pp. 27-33 (2017)
- [37] 栗栖慎也, 永田武:「分散電源の力率制御とフィーダ間連系の組み合わせによる配電線フィーダ電圧制御方式の一検討」, 電気学会論文誌 B, Vol. 137, No. 5, pp. 349-355 (2017)
- [38] 栗栖慎也, 永田武:「力率制御と連系開閉器制御による電圧制御方式」, 平成 29 年電気学会全国大会論文集 (第 6 分冊), pp. 536-537 (2017)
- [39] 上垣内光, 栗栖慎也, 永田武:「LRT 制御と分散電源の協調による配電線電圧制御方式」, 平成 29 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, pp. 5-2-5 ~ 5-2-6 (2017)
- [40] 松田勝宏, 和田勝, 渡部雅浩, 高橋怜児:「分散型電源導入に対応した配電系統の柱上変圧器タップ最適設定手法の検討」, 電気学会論文誌 B, Vol. 127, No. 1, pp. 137-144 (2007)
- [41] 松田勝宏, 堀越和宏, 瀬戸寿之, 井山治, 小林広武:「低圧系統用自動電圧調整機器の開発」, 電気学会論文誌 B, Vol. 132, No. 5, pp. 436-444 (2012)
- [42] 栗栖慎也, 永田武:「柱上変圧器の自律制御による配電線フィーダの電圧制御方式」, 電気学会論文誌 B, Vol. 136, No. 8, pp. 705-711 (2016)
- [43] S. K. Chang, G. Marks, and K. Kato: “Optimal Real Time Voltage Control”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, No. 3, pp. 750-758 (1990)
- [44] N. I. Santoso and O. T. Tan: “Neural-net Based Real-time Control of Capacitors Installed on Distribution Systems”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, pp. 266-272 (1990)
- [45] C. J. Bridenbaugh, D. A. DiMascio, R. D’Aquila: “Voltage Control Improvement Through Capacitor and Transformer Tap Optimization”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 1, pp. 222-227 (1992)
- [46] Y. Y. Hsu and C. C. Yang: “A Hybrid Artificial Neural Network-dynamic Programming Approach for Feeder Capacitor Scheduling”, IEEE Trans. on Power Systems Vol. 9, No. 2, pp. 1069-1075 (1994)
- [47] S. Corsi, P. Marannino, N. Losignore, G. Moreschini, and G. Piccini: “Coordination Between the Reactive Power Scheduling Function and the Hierarchical Voltage Control of the EHV ENEL System”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, No. 2, pp. 686-694 (1995)

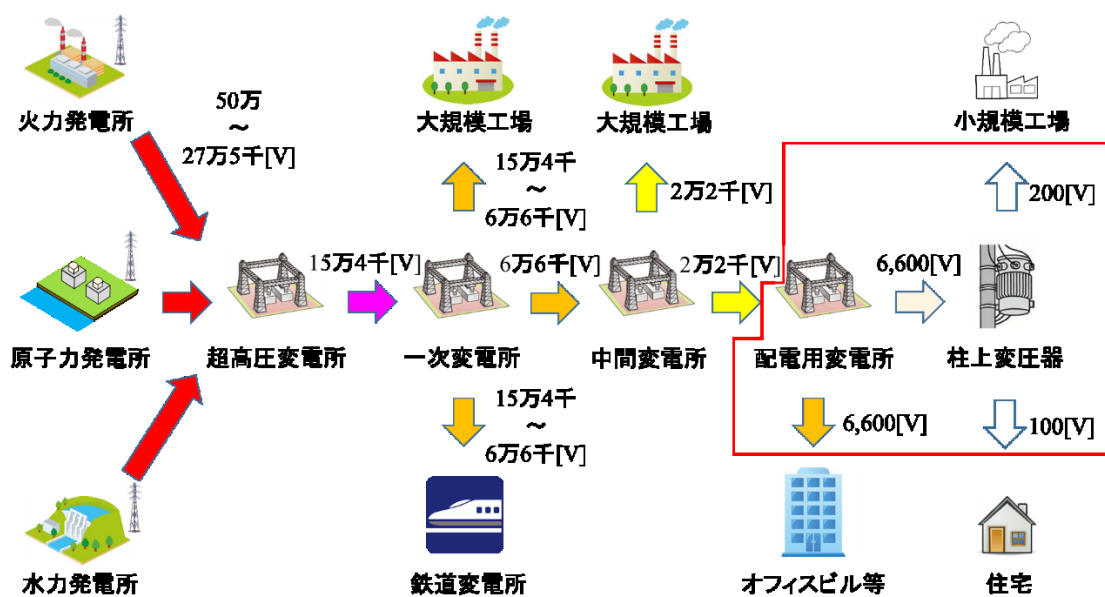
参考文献

- [48] N. Yorino, M. Daiyoshi, and M. Kitagawa: "Interaction Among Multiple Controls in Tap Change Under Load Transformers", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 430-436 (1997)
- [49] H. Vu, P. Pruvolt, C. Launnary, and Y. Harmand: "Improved Voltage Control on Large-scale Power System", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 2, pp. 1295-1303 (1996)
- [50] J. E. Mendoza, D. A. Morales, R. A. Lopez, E. A. Lopez, J-C Vannier, and C. A. Coello: "Multiobjective Location of Automatic Voltage Regulators in a Radial Distribution Network Using a Macro Genetic Algorithm", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 22, No. 1, pp. 404-412 (2007)
- [51] J. J. Paserba, D. J. Leonard, N. W. Miller, S. T. Naumann, M. G. Lauby and F. P. Sener: "Coordination of a Distribution Level Continuously Controller Compensation with Existing Substation Equipment for Long Term VAR Management", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 1, pp. 1034-1040 (1994)
- [52] C. Rehtanz: "Autonomous Systems and Intelligent Agents in Power System Control and Operation", Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2003)
- [53] 永田武:「マルチエージェント技術の電力システムへの適用事例」, 電気学会論文誌 B, Vol. 125, No. 3, pp. 225-258 (2005)
- [54] M. E. Baran, and I. M. El-Markabi: "A Multiagent-Based Dispatching Scheme for Distributed Generators for Voltage Support on Distribution Feeders", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 22, No. 1, pp. 52-59 (2007)
- [55] 永田武, 佐伯礼吏, 歌谷昌弘, 中地芳紀, 波多野亮介:「マルチエージェントによる協調的な電圧・無効電力制御方式」, 電学論 B, Vol.128, No.11, pp.1313-1319 (2008)
- [56] T. Nagata, R. Hatano and H. Saiki: "A Multi-agent Based Distributed Reactive Power Control Method", IEEE Power & Engineering Society General Meeting, PES'09 (2009)
- [57] 石田雅人, 永田武, 佐伯礼吏, 島田育彦, 波多野亮介:「マルチエージェントによる電圧・無効電力協調制御方式」, 電気学会論文誌 B, Vol. 131, No. 8, pp. 647-653 (2011)
- [58] 岡本和也, 栗栖慎也, 歌谷昌弘, 永田武:「マルチエージェントによるマイクログリッド間電力融通方式」, 電気学会論文誌 B, Vol. 135, No. 3, pp. 153-159 (2015)
- [59] H. Saadat, "Power System Analysis", McGraw-Hill Primis Custom Publishing (2002)

付録

付.1 本研究で対象とする範囲

本研究では、付図1に示した電力系統全体の中で、赤線で囲んだ部分を対象としている。これは、1.1.2項で述べたスマートグリッド実現のための6つの主要な課題のうち『電圧管理問題』に焦点を当て、配電線フィーダや配電用変電所よりも下流側を1つのグリッドとして捉え、グリッド内の要素を活用して電圧管理問題の解消を試みるものである。

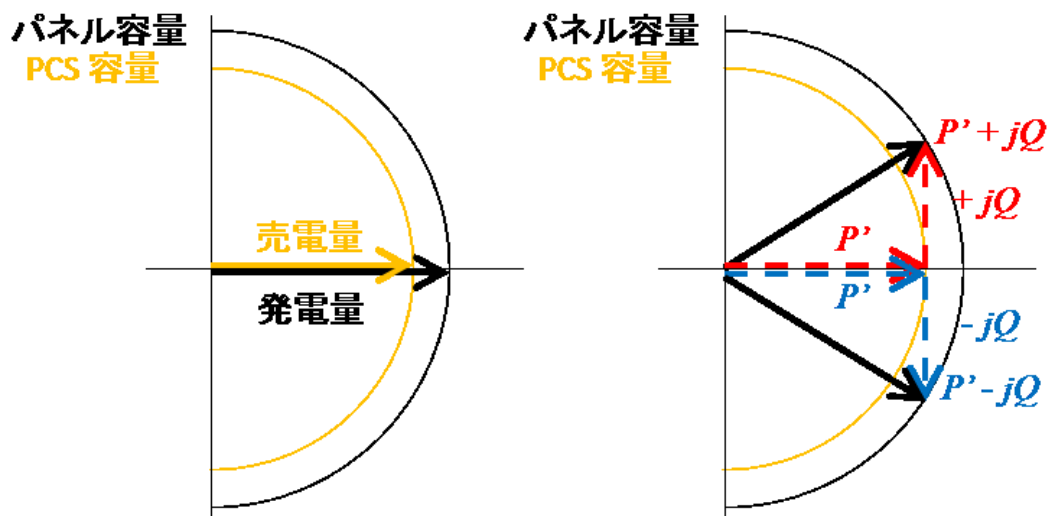


付図1 電力系統（送配電ネットワーク）の概略

付.2 売電量の比較

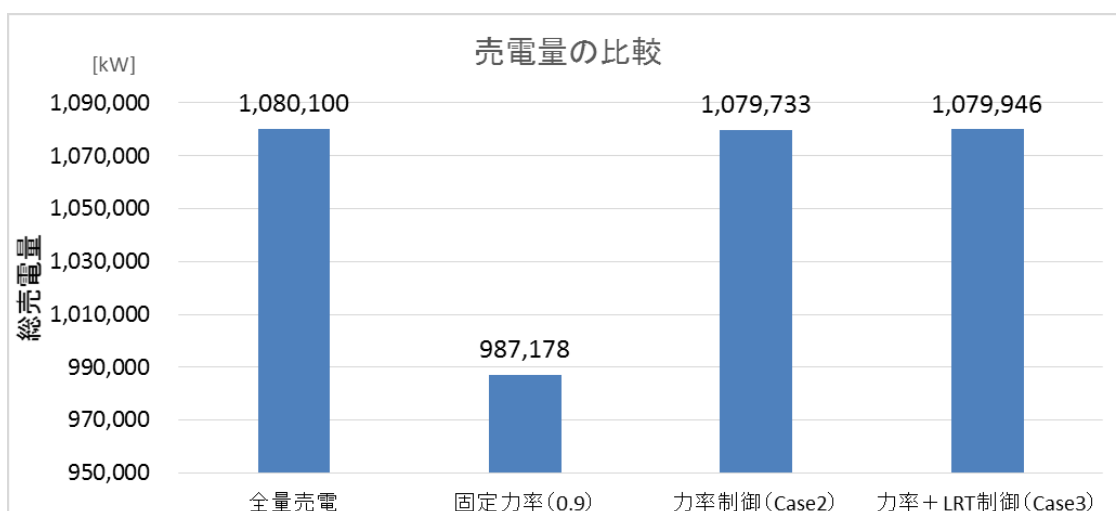
第3章以降の提案方式では、連系規程に定められた固定力率での連系と比較して、平均力率の悪化を低減することで売電量が増加する可能性があることを示した。ここでは、第4章で示した力率制御とLRT制御による電圧制御方式を採用した場合を例に、売電量の変化がどの程度であるか比較する。

一般に、雲の影響による出力低下や太陽光パネルの不具合発生等を考慮して、大規模太陽光発電設備に併設されるPCSの容量は、太陽光パネルの総発電容量よりも小さい場合が多い。付図2左は発電量と売電量の関係を示したものである。同図に示すように、PCS容量<発電量となった場合は、PCS容量=売電量となる。



付図2 発電量と売電量の関係

付図3に示す売電量の比較では、4.3.2項に示した結果を用い、PV1（最大発電電力：2,370[kW]）のPCS容量を2,200[kW]とし、付図2右に示すように、PCS容量よりも発電量が多い場合にはPCS容量分の有効電力（＝売電量 P' ）と無効電力 $\pm jQ$ を出力できるものとした。同図は、24時間分の積算電力量を示したもので、左から全量売電の場合、0.9の固定力率で連系した場合、提案方式の力率制御のみ行った場合、力率+LRT制御を行った場合である。4.3.3項での力率に着目した考察と同様に、固定力率での連系と比較して提案方式は、売電量が多いことが確認できた。



付図3 売電量の比較

研究業績

1. 学会誌等学術研究論文

(1)	栗栖慎也, 永田武:「柱上変圧器の自律制御による配電線フィーダの電圧制御方式」, 電気学会論文誌 B, Vol. 136, No. 8, pp. 705-711 (2016)
(2)	栗栖慎也, 永田武:「分散電源の力率制御による配電系統の電圧制御マルチエージェントシステム」, 電気設備学会誌, Vol. 36, No. 9, pp. 673-679 (2016)
(3)	栗栖慎也, 永田武:「マルチエージェントによる配電線フィーダの電圧制御方式」, 電気学会論文誌 B, Vol. 136, No. 12, pp. 876-882 (2016)
(4)	栗栖慎也, 永田武:「配電線フィーダの自己完結型電圧制御方式」, 電気学会論文誌 B, Vol. 137, No. 1, pp. 27-33 (2017)
(5)	栗栖慎也, 永田武:「分散電源の力率制御とフィーダ間連系の組み合わせによる配電線フィーダ電圧制御方式の一検討」, 電気学会論文誌 B, Vol. 137, No. 5, pp. 349-355 (2017)
(6)	岡本和也, 栗栖慎也, 歌谷昌弘, 永田武:「マルチエージェントによるマイクログリッド間電力融通方式」, 電気学会論文誌 B, Vol. 135, No. 3, pp. 153-159 (2015)

2. 国際会議研究発表

(1)	<u>Shinya Kurisu</u> , Takeshi Nagata: “Voltage Control for a Distributed Line Feeder by a Multi-agent Approach”, <i>2015 Intelligent System Applications to Power Systems (ISAP2015)</i> , 11 September -17 September 2015, Porto, Portugal (2015)
(2)	<u>Shinya Kurisu</u> , Takeshi Nagata: “Multi-agent based Voltage Control for Distributed Network by Power Factor Coordination of Distributed Generators”, <i>2015 IEEE International Future Energy Electronics Conference(IFEEC 2015)</i> , 1 November -4 November 2015, Taipei, Taiwan (2015)
(3)	<u>Shinya Kurisu</u> , Takeshi Nagata: “A Multi-agent System for Voltage Control of Distribution Networks by Coordination Power Factors of Distributed Generators”, <i>2016 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC 2016)</i> , 6 June -8 June 2016, Florence, Italy (2016)

研究業績

(4)	<u>Shinya Kurisu</u> , Ryuhei Yamamoto, Takeshi Nagata: “A Load Leveling Method for Micro-grids by Virtual Electricity Price Signal”, <i>2016 The International Conference on Electrical Engineering (ICEE 2016)</i> , 3 July -7 July 2016, Okinawa, Japan (2016)
(5)	<u>Shinya Kurisu</u> , Hikaru Kamigaichi, Takeshi Nagata: “A Coordinated Voltage Control of LRT and DG Power Factors in Distribution Networks”, <i>The IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies 2016 Asian Conference (ISGT-Asia 2016)</i> , 28 November -1 December 2016, Melbourne, Australia (2016)

3. 国内学会・技術研究会等研究発表

(1)	<u>栗栖慎也</u> , 岡本和也, 山本竜平, 歌谷昌弘, 永田武: 「マルチエージェントによるマイクログリッド間電力融通方式」, 2014年(第32回)電気設備学会全国大会, 2014.8.28 - 8.29, 東北文化学園大学 (2014)
(2)	岡本和也, <u>栗栖慎也</u> , 山本竜平, 歌谷昌弘, 永田武: 「負荷率改善を目的とした価格シグナルによるマイクログリッドの最適運転方式」, 2014年(第32回)電気設備学会全国大会, 2014.8.28 - 8.29, 東北文化学園大学 (2014)
(3)	山本竜平, 岡本和也, <u>栗栖慎也</u> , 歌谷昌弘, 永田武: 「マイクログリッドにおけるバッテリー充放電制御方式」, 2014年(第32回)電気設備学会全国大会, 2014.8.28 - 8.29, 東北文化学園大学 (2014)
(4)	<u>栗栖慎也</u> , 百合野拓, 歌谷昌弘, 永田武: 「分散電源の無効電力融通を用いた配電系統電圧制御方法の検討1」, 平成26年度(第65回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2014.10.25, 福山大学 (2014)
(5)	<u>栗栖慎也</u> , 岡本和也, 永田武: 「マルチエージェントによる配電線フィーダの電圧制御」, 平成27年電気学会全国大会, 2015.3.24 - 3.26, 東京都市大学 (2015)
(6)	<u>栗栖慎也</u> , 永田武: 「分散電源の力率制御による配電線フィーダの電圧制御方式」, 2015年(第33回)電気設備学会全国大会, 2015.9.1 - 9.2, 北海道大学 (2015)
(7)	上垣内光, <u>栗栖慎也</u> , 歌谷昌弘, 山本竜平, 玖村大紀, 永田武: 「スマートグリッドの孤立モードにおける事故復旧方式の開発」, 2015年(第33回)電気設備学会全国大会, 2015.9.1 - 9.2, 北海道大学 (2015)

研究業績

(8)	山本竜平, <u>栗栖慎也</u> , 歌谷昌弘, 永田武:「エージェントを用いた仮想価格シグナルによるマイクログリッド内の負荷平準化方式」, 2015年(第33回)電気設備学会全国大会, 2015.9.1-9.2, 北海道大学(2015)
(9)	<u>栗栖慎也</u> , 永田武:「分散電源の力率制御による配電線フィーダ電圧制御方式」, 平成27年度(第66回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2015.10.17, 山口大学(2015)
(10)	<u>栗栖慎也</u> , 永田武:「分散電源の力率制御による電圧制御方式」, 2016年(第34回)電気設備学会全国大会, 2016.9.6-9.7, 岡山大学(2016)
(11)	<u>栗栖慎也</u> , 上垣内光, 歌谷昌弘, 永田武:「発電機会の損失を抑制する配電系統電圧制御方式—LRT制御と分散電源の力率制御の協調—」, 平成28年電力・エネルギー部門大会, 2016.9.7-9.9, 九州工業大学(2016)
(12)	<u>栗栖慎也</u> , 歌谷昌弘, 永田武:「マイクログリッドの孤立モードにおける事故復旧方式」, 平成28年電力・エネルギー部門大会, 2016.9.7-9.9, 九州工業大学(2016)
(13)	<u>栗栖慎也</u> , 永田武:「配電線フィーダの自己完結型電圧制御方式」, 平成28年電力・エネルギー部門大会, 2016.9.7-9.9, 九州工業大学(2016)
(14)	<u>栗栖慎也</u> , 永田武:「分散電源の力率制御とフィーダ間連系の組み合わせによる配電線フィーダ電圧制御方式の一検討」, 平成28年電力・エネルギー部門大会, 2016.9.7-9.9, 九州工業大学(2016)
(15)	<u>栗栖慎也</u> , 永田武:「力率制御と連系開閉器制御による電圧制御方式」, 平成29年電気学会全国大会, 2017.3.15-3.17, 富山大学(2017)
(16)	上垣内光, <u>栗栖慎也</u> , 永田武:「LRT制御と分散電源の協調による配電線電圧制御方式」, 平成29年電気学会電力・エネルギー部門大会, 2017.9.5-9.7, 明治大学(2017)