

博士論文

再生可能エネルギーを含む電力系統の
確率論的運用手法

-Probabilistic operation methods in power systems
with renewable energy sources-

指導教官 辻 隆男 准教授

平成 28 年 3 月

横浜国立大学大学院工学府物理情報工学専攻

電気電子ネットワークコース

学籍番号 13SD101

小出 明

要約

本論文では、再生可能エネルギーが大量導入された際に懸念される配電系統内の電圧上昇問題、さらに送電系統における N-1 基準制約に基づく運用について、確率論的アプローチに基づいて運用手法の高度化を検討する。

前者については高圧系統で用いられている既存の区分開閉器を、電圧・電流・力率が測定可能なセンサ付区分開閉器（SSS: Section Switchgear with Sensor）に更新することが進められていることに注目し、LRT 等のタップ切替判断に活用できるよう、その計測情報を活用した PCS 無効電力制御状態の推定手法を提案した。一般に、SSS の数と比べて推定対象である PCS の数は極めて多く、全ての PCS の制御状態を一意に推定することは難しい。しかし LRT のタップ切替の制御判断を考える際には、タップ制御により PCS の無効電力制御量を低減できるかどうかの判断が重要であり、必ずしも精緻な推定は必要とはならない。そこで本論文では LRT のタップ切替位置を適切に調整するために、PCS の無効電力制御量の“確率分布”の推定手法を検討した。具体的には、高圧系統の電圧変動や低圧系統の負荷変動に対する PCS の無効電力制御動作を定式化し、これを潮流計算に組み込んで擬似逆行列で求解する手続きを繰り返すことで、モンテカルロ法による確率分布の導出を行った。本論文において計算精度を SSS の計測値と比較することで評価したが、数値計算を通じて擬似逆行列の導入することで推定精度の向上を確認した。また、PCS の制御が LRT 等のタップ制御よりも先に動作すると想定することで、PV 有効電力出力抑制のリスクの存在を評価することができ、併せて推定結果に基づくタップ制御を提案することで、統計的な観点から、出力抑制低減などを目的とした協調制御の実現に寄与することを示した。

一方で後者については、再生可能エネルギーの「出力の不確実性」と「系統事故の発生」双方を考慮した需給制御手法を検討した。具体的には、まず、これまで提案されてきた確率的経済負荷配分手法に対してより大規模な系統モデルにおける有効性の検討を行い、次に市場メカニズムによる需給制御モデルの構築を行った。

両手法において数値計算を実施することで、燃料費の増加や社会余剰の減少量の最小化を実現しつつ、風力発電出力変動による N-1 基準制約違反リスクの制御を実現しその有効性を示した。

目次

要約.	1
序章.	4

第一部

「太陽光発電を含む配電系統における電圧制御の高度化を目的とした 確率的状態推定手法」

要約.	7
第 1 章 序論	8
第 2 章 配電系統における電圧問題と電圧調整手法.	10
2.1 分散型電源大量導入による電圧上昇問題.	10
2.2 タップ切替による電圧調整.	11
2.3 無効電力による電圧調整.	14
第 3 章 無効電力状態推定手法.	15
3.1 分散型電源系統連系インバータによる電圧無効電力制御.	15
3.2 推定手法の概要	18
3.3 負荷と PV 出力の決定(Step1,Step2).	26
3.4 PCS の無効電力制御量の決定 (Step3).	27
3.5 擬似逆行列を活用した潮流計算 (Step4).	31
3.6 解の妥当性評価.	33
3.7 数値計算例.	34
第 4 章 無効電力制御量の確率密度分布に基づくタップ切替手法.	48
4.1 タップ切替による無効電力制御量削減効果の推定.	48
4.2 無効電力制御解消を目的としたタップ位置の決定.	50
4.3 数値計算例.	51
第 5 章まとめと今後の課題.	55

第二部

「風力発電を含む電力系統の確率的需給制御手法」

要約.	57
第 1 章 序論.	58
第 2 章 大規模系統モデルにおける確率的系統運用手法の有効性の検討.	60
2.1 確率的経済負荷配分手法による需給制御.	61
2.2 数値計算.	65
2.3 数値計算結果.	68
2.4 計算結果のまとめ.	71
第 3 章 市場メカニズムに基づく需給制御手法.	72
3.1 市場モデルの概要.	72
3.2 市場参加者の入札行動.	73
3.3 約定処理.	75
3.4 数値計算例.	79
3.5 まとめと今後の課題.	84
結論.	85
謝辞.	86
参考文献.	88
研究業績一覧.	94

付録

付録 A PCS の電圧上昇抑制機能.	97
付録 B 低圧系統における PCS の運転状態	98
付録 C 集約した低圧系統の負荷変動.	101
付録 D 擬似逆行列による連立方程式の解法.	103
付録 E 風力発電機の発電電力と確率モデル.	104
付録 F 正規乱数の生成方法.	106
付録 G JNT 法による相関のある風速変動の生成.	109
付録 H 確率的経済負荷配分手法.	112
付録 I 粒子群最適化手法.	115

序章

持続可能なエネルギー社会を目指して我が国においても2012年7月より再生可能エネルギー（RE）の固定価格買取制度が始まり^[1]その導入が年々拡大している。2030年度の電源構成においても総発電電力量の22～24%を再生可能エネルギーによって賄い、そのうち約40%を風力発電および太陽光発電で発電することが期待されている^[2]。電力は性質上貯蔵することが難しいため常に発電した電力は一瞬で消費しなければならない。しかし、風力発電や太陽光発電等の自然エネルギーはその出力は気象条件に左右されるため、変動しやすく間欠性のある電源であるため電力系統の運用に影響を及ぼすことが懸念されており、その大量導入によって電力系統の信頼度基準であるN-1基準を満たされない運用がなされたことも報告されている^[3]。このような状況下において系統事故が起きた場合、電力系統に深刻な影響を及ぼすことは想像に難くない。ゆえに、変動しやすく間欠性という再生可能エネルギーの特徴と系統事故の双方に対応した運用手法が必要である。このような状況に対しこれまで先行する確率的経済負荷配分手法^[4]が提案され、系統運用手法の高度化が検討されていた。上記の状況に加えて電力システム改革の一環として卸電力市場活性化が期待されており^[5]、1時間前市場や、リアルタイム市場の新設が検討されている^[6]。現状市場を介し流通する電力量はわずかではあるが、電力自由化の進展により需給制御において重要な役割を果たすと考えられる。故に将来的に卸電力市場による取引が需給制御に大きな役割を果たすと考えた場合、先述したような再生可能エネルギーによるリスクについて検討が必要である。そこで本論文では先行する研究で提案されてきた確率的経済負荷配分手法の考えを取り入れた市場モデルの構築および有効性を検討する。

上記に述べた需給制御は対象とする電力系統の全体需要と供給の関係についてであるが、ローカルな電力系統においても再生可能エネルギーの影響について検討する必要がある。太陽光発電を中心とした分散型電源の多くはローカルな電力系統に当たる配電系統に導入されるため、その出力が逆流することにより電圧を適正に維持することが困難になることが懸念されている^{[7][8]}。配電系統には負荷時タップ切替変圧器（LRT）や自動電圧調整器（SVR）などの電圧制御機器が存在しており、これらの制御機器を対象とした研究が多くなされている^{[9]~[13]}。一方で、太陽光発電は系統連系インバータであるパワーコンディショナ（PCS）を通じて配電系統に連系している。PCSは通常MPPT制御によって力率1で連系しているものの力率を調整し無効電力を系統側に供給もしくは消費することで電圧制御機能を有しておりに系統の電圧管理に貢献することが可能となる^{[14]~[15]}。PCSを通じた電圧制御の利点として、太陽光発電を中心とし

た分散型電源の普及とともに PCS が導入されていくため、系統運用者側にとって新たな設備投資をせずに済むことである。この PCS による電圧 - 無効電力制御を対象とした研究として、力率一定制御の有効性や複数の PCS による協調制御の有効性を提案・検証した報告が多数なされている^{[16]~[20]}。一方で PCS による制御ではインバータの空き容量が十分で無い場合には、PV の有効電力の出力抑制が必要となる場合があり、PV 所有者にとって経済的な損失が発生する可能性がある。また、無効電力制御によって配電系統内の無効電力潮流が増加し、配電損失の増加する恐れもある。したがって、配電系統の運用者は制御状態を監視しつつ、出力抑制を伴う過度な無効電力制御が実施されている場合には、制御の解消ために適切に自らの電圧制御機器を運用する必要があると考えられる。制御状態を把握するためには、スマートメータの活用が考えられるが、現行の仕様では情報収集の周期は比較的長く、リアルタイムに近い運用の実現には必ずしも寄与するものではないと考えられる。一方で、高圧系統で用いられている既存の区分開閉器を、電圧・電流・力率が測定可能なセンサ付区分開閉器 (SSS: Section Switchgear with Sensor) に更新することが進められており、その計測情報を活用した系統の監視手法^{[21]~[23]}や運用手法^{[24]~[26]}が研究されている。しかし、これらの文献では PCS による電圧—無効電力制御の実施までは考慮されていない。そのため報告者らは確率論的アプローチを用いて SSS の計測情報を活用した PCS 電圧—無効電力制御状態の推定を提案してきた^{[27]~[28]}。本論文ではさらに推定精度の向上を検討した報告と推定を活用した既存の電圧制御器である LRT の運用手法の検討結果を報告する。

以下に本論文の構成を示す。まず、全体に関する序論を述べ、その後、第一部として本論文でメインの要素となる PCS 電圧—無効電力制御状態の推定手法について報告する。次に第二部として大規模系統における経済負荷配分手法の有効性やその考えを採り入れた市場モデルの構築に関する検討結果とその有効性について報告する。最後に第一部、第二部をまとめた結論を示す。

第一部

太陽光発電を含む配電系統における
電圧制御の高度化を目的とした
確率的状態推定手法

要約

エネルギー・環境問題の解決に向けて、PVを中心とした含む分散型電源(DG)の電力系統への導入が進展している。大量のPVが配電系統へと連系すると、逆潮流の増加によりフィーダ末端側の電圧が規定値から逸脱する問題が懸念されている。このような問題の対策として、これまでPCSの電圧-無効無効電力制御に着目してきた。しかしPCSによる電圧-無効電力制御は、系統内の無効電力潮流の増加に伴い配電損失の増加をもたらす場合がある。さらに、インバータの空き容量が十分で無い場合には、PVの有効電力の出力抑制が必要となる場合があり、PV所有者にとって経済的な損失が発生する可能性がある。したがって過度な無効電力を制御する場合には系統運用者はPCSの制御状態を常時モニタリングし出力抑制を伴う無効電力制御制御が行われている場合には積極的に系統内の電圧制御器(LRT,SVR等)を運用し、解消する必要があると考えられる。

そこで、本論文では、高圧系統で用いられている既存の区分開閉器を、電圧・電流・力率が測定可能なセンサ付区分開閉器(SSS: Section Switchgear with Sensor)に更新することが進められていることに注目し、LRT等のタップ切替判断に活用できるよう、その計測情報を活用したPCS無効電力制御状態の推定手法を提案した。一般に、SSSの数と比べて推定対象であるPCSの数は極めて多く、全てのPCSの制御状態を一意に推定することは難しい。しかしLRTのタップ切替の制御判断を考える際には、タップ制御によりPCSの無効電力制御量を低減できるかどうかの判断が重要であり、必ずしも精緻な推定は必要とはならない。そこで本論文ではLRTのタップ切替位置を適切に調整するために、PCSの無効電力制御量の“確率分布”の推定手法を検討した。具体的には、高圧系統の電圧変動や低圧系統の負荷変動に対するPCSの無効電力制御動作を定式化し、これを潮流計算に組み込んで擬似逆行列で求解する手続きを繰り返すことで、モンテカルロ法による確率分布の導出を行った。

数値計算例を通じて確定論的な解析ではPV出力が発生しないものの、提案手法により得られた制御状態の確率密度分布によりPV有効電力出力抑制のリスクの存在を評価できていた。また、確率密度分布の推定結果に基づくタップ制御を提案すし、無効電力制御の緩和を図ることで統計的な観点から、提案した確率密度分布の推定手法は出力抑制低減などを目的とした協調制御の実現に寄与することを示した。

第1章 序論

エネルギー・環境問題の解決に向けて、太陽光発電 (PV) や風力発電などの再生可能エネルギーを含む分散型電源 (DG) の電力系統への導入が進展している。大量の PV が配電系統へと連系すると、逆潮流の増加によりフィーダ末端側の電圧が規定値から逸脱する問題が懸念されている。また、PV の偏在に伴う電力潮流の複雑化も、電圧管理を困難にする要因となり得る^[8]。ここで、PV の系統連系に用いるパワーコンディショナ (PCS) は、通常は MPPT (Maximum Power Point Tracking) 制御により力率 1 となるように運転されている。しかし、連系点の電圧が規定値を超えた場合には、無効電力制御により電圧上昇を抑制する機能を備えた PCS も存在する^{[14]~[15]}。電圧上昇対策としては様々なアプローチが検討されているが、電圧制御機能を有する PCS の普及を進めて電圧管理に貢献させることで、系統側の電圧制御設備への投資負担を軽減することも有効と考えられる。そこで本論文では、電圧制御機能を有する PCS が低圧配電系統に広く普及したことを想定する。著者らはこれまでに、複数の PCS の協調的な無効電力制御に基づいた、PV 大量導入時の電圧管理手法の検討を進めてきた^{[16]~[20]}。しかし PCS による電圧-無効電力制御は、系統内の無効電力潮流の増加に伴い配電損失の増加をもたらす場合がある。さらに、インバータの空き容量が十分で無い場合には、PV の有効電力の出力抑制が必要となる場合があり、PV 所有者にとって経済的な損失が発生する可能性がある。

一方で、配電系統には負荷時タップ切替変圧器 (LRT) や自動電圧調整器 (SVR) などの電圧制御機器が存在する。これらの機器の制御動作はタップ切替に基づくが、機械式のスイッチング操作を伴うため動作には遅れが生じると共に、頻繁な切替は摩耗により機器の寿命を縮める結果となる。そのため配電系統の実運用においては、制御対象となる電圧が不感帯幅を超過した際に逸脱量を積算し、これが動作時限を超えた時点で動作させる方式が多く採用されている。一方で、PCS の無効電力制御はパワーエレクトロニクス機器に基づくため制御動作が速く、さらに本論文で後述するように自端電圧維持を目的とする場合には制御指令の通信も不要である。このため、意図的に制御動作に遅れを持たせるタップ制御機器よりも、PCS の無効電力制御の方が先に機能すると考えられる。その結果、先行して動作した PCS の無効電力制御のみにより電圧適正化が達成されると、PV 出力が抑制された状態が継続する可能性があり、望ましくない。ここで、配電系統の運用者が分散型電源の無効電力制御の発生を早期に検出し、適切なタップ運用によって PCS の無効電力制御効果を代替できれば、PV 所有者の出力抑制を早期に解消できると期待される。

一般的に日本の配電系統は、高圧系統（MVS）と低圧系統（LVS）から成る階層的な構造を有している。LRT や SVR などの電圧制御機器の多くは高圧系統に導入されているが、PV は住宅用として低圧系統に多く連系されることが想定できる。このように分散的に導入された PV の制御状態を把握するためには、スマートメータの活用が考えられるが、現行の仕様では情報収集の周期は比較的長く、リアルタイムに近い運用の実現には必ずしも寄与するものではないと考えられる。一方で、高圧系統で用いられている既存の区分開閉器を、電圧・電流・力率が測定可能なセンサ付区分開閉器（SSS: Section Switchgear with Sensor）に更新することが進められており、その計測情報を活用した系統の監視手法^{[21]~[23]}や運用手法^{[24]~[26]}が研究されている。例えば文献(21)では、配電系統の事故復旧操作において必要となる実負荷を把握するために、SSS で囲まれた地域内に存在する PV 出力および負荷を対象に、センサによる計測情報を用いたオンライン推定手法が提案されている。また文献(24)~(26)ではセンサでの計測情報を活用した電圧管理手法が提案されており、特に文献(24)ではセンサでの計測情報を活用し系統内の電圧分布をメタヒューリスティクス手法の一つである粒子群最適化（PSO）により推定し、その結果をもとに LRT のタップ位置を制御する手法が提案されている。このように SSS の計測情報の活用は、配電系統の状態推定を高度化する有用なアプローチの一つと言える。

しかし、これまでに提案されてきた状態推定手法では分散型電源は力率 1 で連系していると想定され、PCS による無効電力制御が考慮されていない。そこで本論文では、SSS の計測情報を活用した PCS の無効電力制御量の推定手法を提案する。一般に、SSS の数と比べて推定対象である PCS の数は極めて多く、全ての PCS の制御状態を一意に推定することは難しい。しかし LRT のタップ切替の制御判断を考える際には、タップ制御により PCS の無効電力制御量を低減できるかどうかの判断が重要であり、必ずしも精緻な推定は必要とはならない。そこで本論文では LRT のタップ切替位置を適切に調整するために、PCS の無効電力制御量の“確率分布”の推定手法を検討した。具体的には、高圧系統の電圧変動や低圧系統の負荷変動に対する PCS の無効電力制御動作を定式化し、これを潮流計算に組み込んで擬似逆行列で求解する手続きを繰り返すことで、モンテカルロ法による確率分布の導出を行う。

以下に本論文の構成を示す。まず第 2 章では、配電系統の電圧維持・制御手法について触れて、第 3 章にて推定対象である PCS の制御論理を示してから SSS の計測情報を活用した PCS の無効電力制御量の確率密度分布の推定手法を示す。次に第 4 章にて推定した確率密度分布に基づく新しいタップ切替手法を提案し、最後に結論を述べる。

第2章 配電系統における電圧問題と電圧調整手法

2.1 分散型電源大量導入による電圧上昇問題^[8]

近年、再生可能エネルギーの大量導入が国策として進められており、その多くが配電系統への導入が検討されている。序論で述べた電圧面では、これらの出力が需要を上回った場合逆潮流が発生し系統電圧が上昇する。特に太陽光発電については2030年には64GW^[29]の導入が期待されており、発電量の多い日中の逆潮流が増大し、図2.1に示すように連系点の電圧が適正値を逸脱することが懸念されている^[8]。なお、日本においては100V/200V 低圧配電線の適正電圧範囲は、電気事業法の施行規則により $101\pm 6V$ 、 $202\pm 20V$ と定められており^[30]、系統内で電圧制御器を用いて解消を検討することが必要である。

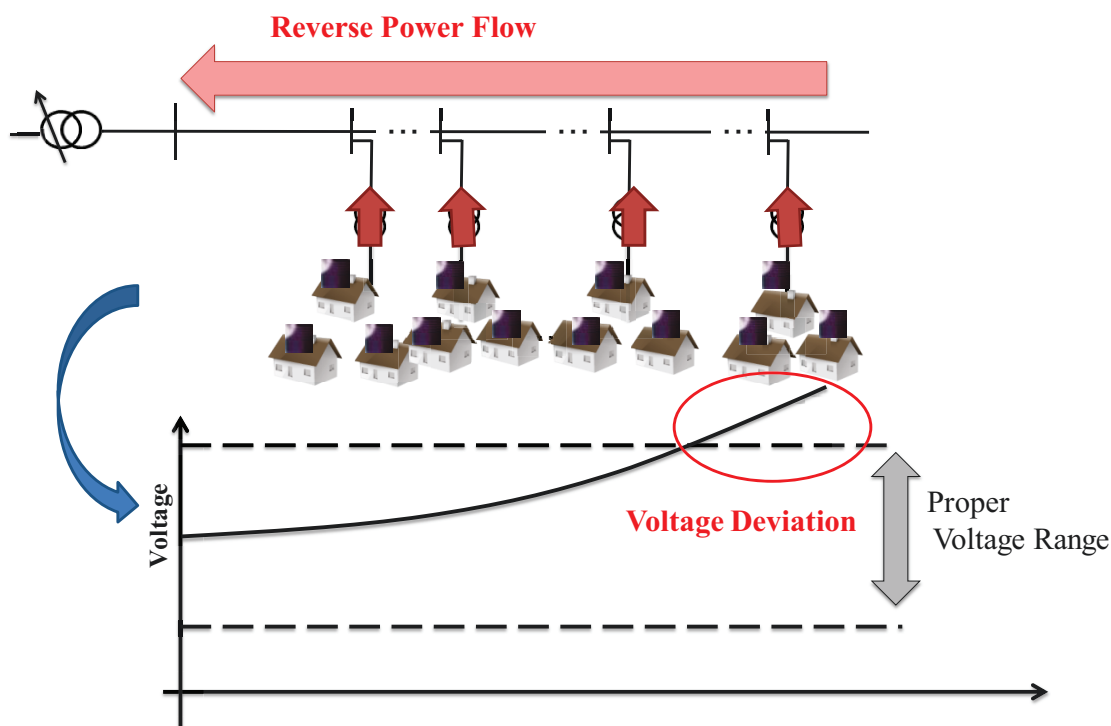


図 2.1 配電系統における電圧上昇問題

2.2 タップ切替による電圧調整

2.2.1 タップ切替手法

タップ切替による電圧調整を行う電圧制御器には変電所の送出電圧を調整する負荷時タップ切替変圧器（LRT：Load Ratio Transformer）および負荷時電圧調整器（LRA：Load Ratio Adjuster），配電線路途中に施設されるステップ式自動電圧調整器（SVR：Step Voltage Regulator）がある^[29]。これらの制御器は一般的にはプログラムコントロール方式とLDC（Line Drop Compensator）方式によって自動的に電圧調整を行う。プログラムコントロール方式では，図2.2のように予め決めた時間帯に電圧調整^[7]を行うものであり，変電所の送出電圧調整手法に採用されている。次に，LDC方式は図2.2のように変電所を通過するバンク電流から負荷中心点電圧を推定し，この電圧が配電系統内の電圧適正範囲内に収まるような不感帯（Dead Band）に電圧制御器のタップ位置を切替電圧調整する方式^[31]であり，LRTとSVR双方に採用されている。なおタップ切替は機械式のスイッチング操作を伴うため動作には遅れが生じると共に，頻繁な切替は摩耗により機器の寿命を縮める結果となる。そのため配電系統の実運用においては，45sec・%，90sec・%，120sec・%のように制御対象となる電圧が不感帯幅を超過した際に逸脱量を積算し，これが動作時限を超えた時点で動作させる方式が多く採用されている。

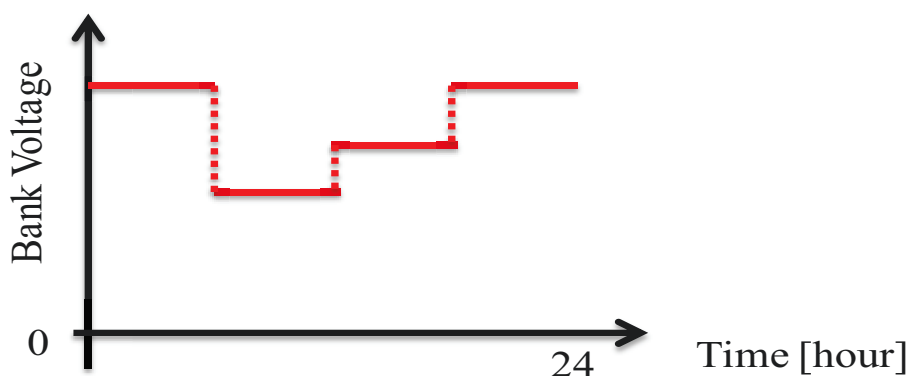


図 2.2 プログラムコントロール方式による電圧調整

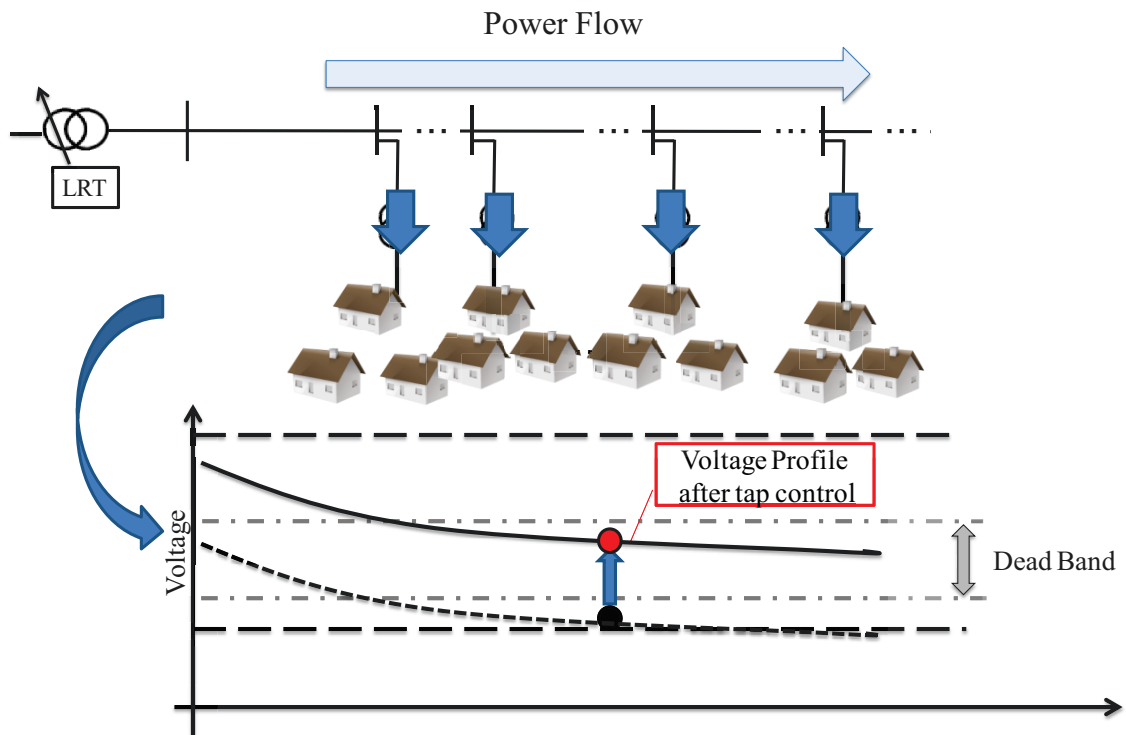


図 2.3 LDC 方式の基本原則 (文献 (61) をもとに作成)

2.2.2 LDC 方式の問題点

分散型電源導入拡大に対して、既存の LDC 方式ではフィーダ内の潮流分布が一様であると想定し負荷中心点電圧を推定しているため、図 2.4 のように配電系統内において分散型電源の導入が偏り、負荷が多く逆潮流が生じない地域と分散型電源が集中し逆潮流が生じやすい地域に別れた場合等、系統内の潮流が複雑化した場合に誤って動作することが考えられる^[31]。したがって、分散型電源大量導入による電圧上昇問題を解消するにはタップ切替手法を高度化することが求められる。

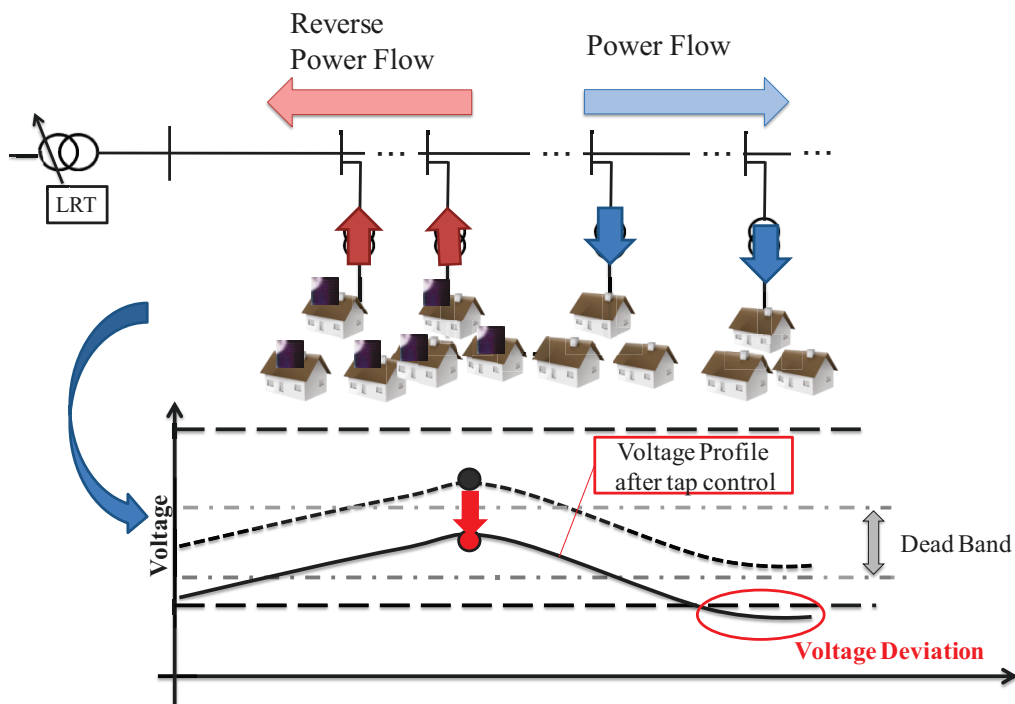


図 2.4 LDC 方式の問題点

2.2.3 電圧管理におけるセンサ付区分開閉器の計測情報の活用

近年の配電設備計画から図 2.5 のように系統内の設置個所の電圧・電流・力率が測定可能なセンサ付区分開閉器の導入し、系統内の監視制御への活用が進められている。^{[32]~[34]}。例えば、文献(31)ではセンサ付区分開閉器をもとに制御区間を2つに分けて負荷中心点電圧を算出しその平均値を取ることで負荷中心点電圧の推定を高度化し上記のLDC方式の問題点の課題解消を実現している。また、文献(32)~(34)では電圧管理への応用を目的にセンサの計測情報を活用し電圧分布を推定する手法をそれぞれ提案し、その有効性が報告されている。このように系統内の計測情報をもとに適切に系統状態を推定することでタップ切替手法の高度化を実現可能になると考えられる。

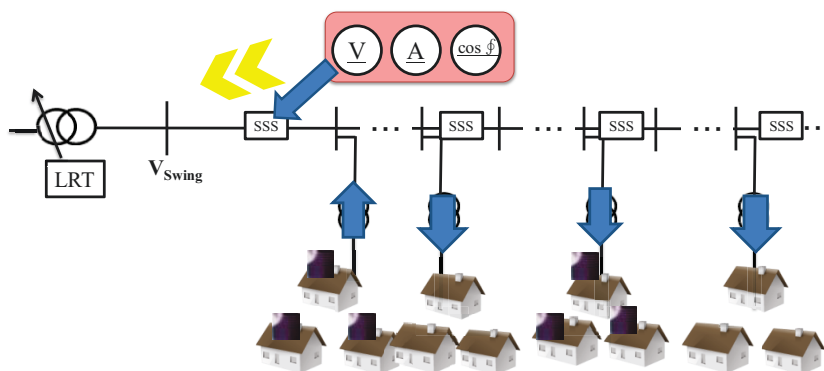


図 2.5 SSS の設置

2.3 無効電力による電圧調整

進相コンデンサ (SC : Static Condensor) や静止型無効電力補償装置 (SVC : Static Var Compensator) 等を用いて、配電線に流れる無効電力を調整することにより電圧調整を行うことができる^[30]。特に SVC は、パワーエレクトロニクス技術を活用した FACTS 機器の一種であるため^[7]、前述した LDC 方式によるタップ切替によりも高速に動作し、機器の寿命も縮めることもなく、文献(35)、～(36)にて急峻な電圧変動^[35]や電圧上昇対策として^[36]の有効性が報告されており、前述した配電系統への分散型電源大量導入に伴う電圧問題に対しても導入が期待されている^[37]。序論で述べたように系統連系インバータである PCS を通じて連系する分散型電源によって無効電力を調節できるため、PCS 所有者の協力が得られれば配電系統の電圧管理に貢献可能である。

第3章 無効電力状態推定手法^{[27]~[28]}

PCS を通じて連系する分散型電源は通常最大電力点追従 (MPPT : Maximum Power Point Tracking) 制御によって力率 1 で連系している。しかし、力率を調整し無効電力を系統側に供給もしくは消費することができれば、PCS は電圧管理に貢献可能となる。PCS による制御は、電圧を速やかに制御することが可能であり^{[14]~[15]}、太陽光発電を中心とした分散型電源の普及とともに制御容量が増加するため、新たな設備投資をせずに済む利点があり、その有用性について多くの検討がなされている。一方で、PCS による制御ではインバータの空き容量が十分で無い場合には、PV の有効電力の出力抑制を行いつつ無効電力制御量を増加させるため、PV 所有者にとって経済的な損失が発生する。また、系統内の無効電力潮流増加によって配電損失の増加に寄与することも考えられる。このように過剰な無効電力が制御されていると判断された場合には PCS による制御を解消するよう系統運用者は電圧制御器を活用することが重要であると考えられる。

本論文では、配電系統内の電圧維持に PCS による電圧-無効電力制御が活用されていると想定し、系統内の電圧制御器を活用判断をするために無効電力制御の監視手法を開発することを目的としている。具体的には近年配電系統の設備計画の一環として、既存の区分開閉器 (SS: Section Switchgear) の一部が電圧・電流・力率が測定可能なセンサ付区分開閉器 (SSS: Section Switchgear with Sensor) に更新されたと想定し、その計測情報を活用した状態推定手法について検討する。

3.1 分散型電源系統連系インバータによる電圧無効電力制御

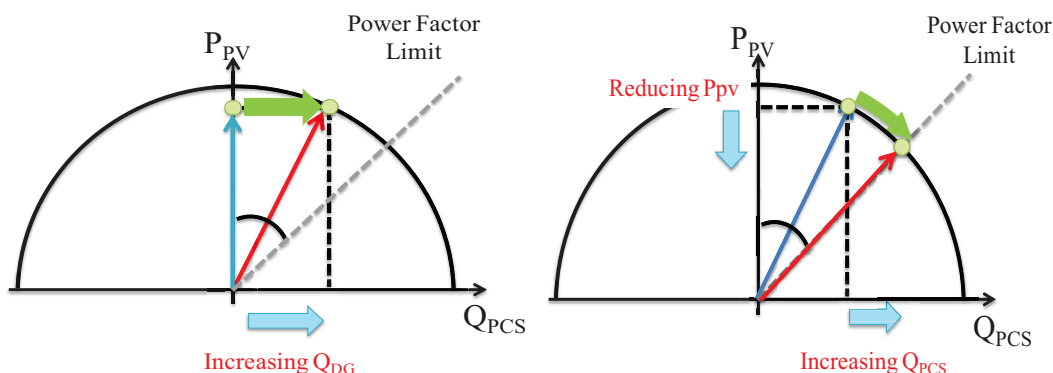
3.1.1 PCS による電圧無効電力制御の想定

分散型電源の系統連技術要件技術ガイドラインでは、低圧系統内に連系する分散型電源に対して、常時電圧変動では $101\text{V} \pm 6\text{V}$ (標準電圧 100V の場合)、 $202\text{V} \pm 20\text{V}$ (標準電圧 200V の場合)、受電力率は系統から見て進み力率 85% 以上とで連系するよう定められている^[38]。本論文では PCS の電圧管理要件をこの規定より厳しい表 3.1 のように定め、各 PCS は電圧上昇抑制機能のうち、一部の PCS の出力抑制量が課題にならないよう進相無効電力制御のみ行うと想定した。進相無効電力制御を有効電力、無効電力の観点から見ると、図 3.2(a) のようにまずインバータ制約を超えないように有効電力出力を維持したまま無効電力の制御量を増加させる。その後、自端電圧が未だ適正範囲を逸脱している場合は、図 3.2(b) のように有効電力出力を抑制しながら力率制約に到達する際の無効電力制御量を上限に自端電圧の適正化を図る。なお、電圧が適正化された場合

には無効電力制御量を削減し、有効電力出力が抑制されている場合は抑制量を削減する。

表 3.1 本論文における PCS の電圧管理要件

常時電圧変動 (電圧上下限制約)	標準電圧±3%
PCS の力率制約	85%



(a)インバータ容量制約範囲内 (b)インバータ容量制約を超える場合

図 3.1 PCS による電圧 - 無効電力制御の概要図

3.1.2 PCS による電圧-無効電力制御の定式化

各 PCS は、連系点電圧を観測してこれを適正化する自端制御型の電圧-無効電力制御を行うことを想定し、その挙動を式 (3.1) ~ (3.4) によりモデル化する。まず電圧が適正範囲から逸脱した場合には、式 (3.1) により電圧適正化を目的として無効電力制御量を増加させる。一方で、連系点の電圧が適正範囲内に維持されている場合には、過度に発電出力の力率が低下することを避けるために、式(3.2)にしたがって無効電力制御量を減少させる。ここで無効電力制御の目標値は Q_{ref} として与え、力率 1.0 を目指す場合には 0 と設定する。常時から進み力率とすることで電圧上昇の緩和を目指す場合など、力率の設定値に合わせて Q_{ref} を別途指定することもできるが、本論文では 0 として議論を進める。なお式 (3.1) および (3.2) による制御は、式 (3.3) および (3.4) で表される力率制約およびインバータ容量制約を満たさなければならず、PCS の無効電力制御量には上限がある。ここで、インバータの空き容量以上に無効電力制御が必要な場合は、式 (3.4) が満足されるように有効電力出力を抑制しながら、無効電力制御量が増加することとした。なお、日射量がゼロとなる夜間の時間帯には PCS は停止するものと考え、検討の対象外とした。

- 電圧－無効電力制御

$V_i > V_{upper}$ or $V_i < V_{lower}$ の場合

$$\dot{Q}_{PCSi} = \frac{K_a}{T_a} (V_i - V_{ref}) \dots\dots\dots (3.1)$$

$V_{lower} < V_i < V_{upper}$ の場合

$$\dot{Q}_{PCSi} = \frac{K_b}{T_b} (Q_{ref} - Q_{PCSi}) \dots\dots\dots (3.2)$$

- 力率制約

$$Q_{PCSi} = \begin{cases} S_i \sin \theta_{max} & (P_{PV_i} > S_i \cos \theta_{max}) \\ P_{PV_i} \tan \theta_{max} & (P_{PV_i} < S_i \cos \theta_{max}) \end{cases} \dots\dots\dots (3.3)$$

- インバータ容量制約

$$\sqrt{P_{PV_i}^2 + Q_{PCSi}^2} \leq S_i \dots\dots\dots (3.4)$$

ただし,

V_i : ノード i の電圧

V_{upper}, V_{lower} : 電圧の適正範囲の上下限值

Q_{PCSi} : ノード i の PCS の無効電力制御量

K_a, K_b : 制御ゲイン

T_a, T_b : 制御の時定数

V_{ref} : 電圧基準値 (1.0[p.u.])

Q_{ref} : 無効電力制御の目標値

$Q_{PCSi,max}$: ノード i の PCS の無効電力制御量の最大値

S_i : ノード i の PCS 容量

θ_{max} : PCS の力率制約 ($\cos \theta_{max} = 0.85$)

P_{PV_i} : ノード i の PV 出力

3.2 推定手法の概要^{[27][28]}

3.2.1 利用可能な系統情報

本章では図 3.2 の配電系統モデルを例として提案手法の概要を示す。図 3.2 に示されているように本論文で状態推定の対象とした PCS の台数は、一般的に非常に多いことに対して、SSS の数は限定的である。このため、状態推定問題における未知変数は既知の情報に比べて非常に多く、全ての PCS の無効電力出力を精緻に推定することは現実的では無い。特に本論文の提案手法は、高压系統内に設置された SSS の計測情報を状態推定に活用するものであり、低压系統内部の詳細な状態を推定することは困難である。そこで本論文では、以下の想定に基づいて低压配電系統内の PV や負荷の挙動を簡略的に取り扱うと共に、ネットワーク構成を縮約することで、未知変数の数を大きく削減する。

- 低压系統内の全ての負荷および PV の容量と接続箇所は既知である。また、インピーダンスマップ、および負荷の力率も既知である。
- その結果、高压系統における各ノード（低压系統との連系点）の負荷および PV 出力の値が与えられると、低压系統内の全ての負荷および PV 出力の大きさはその容量案分により定めることができる。

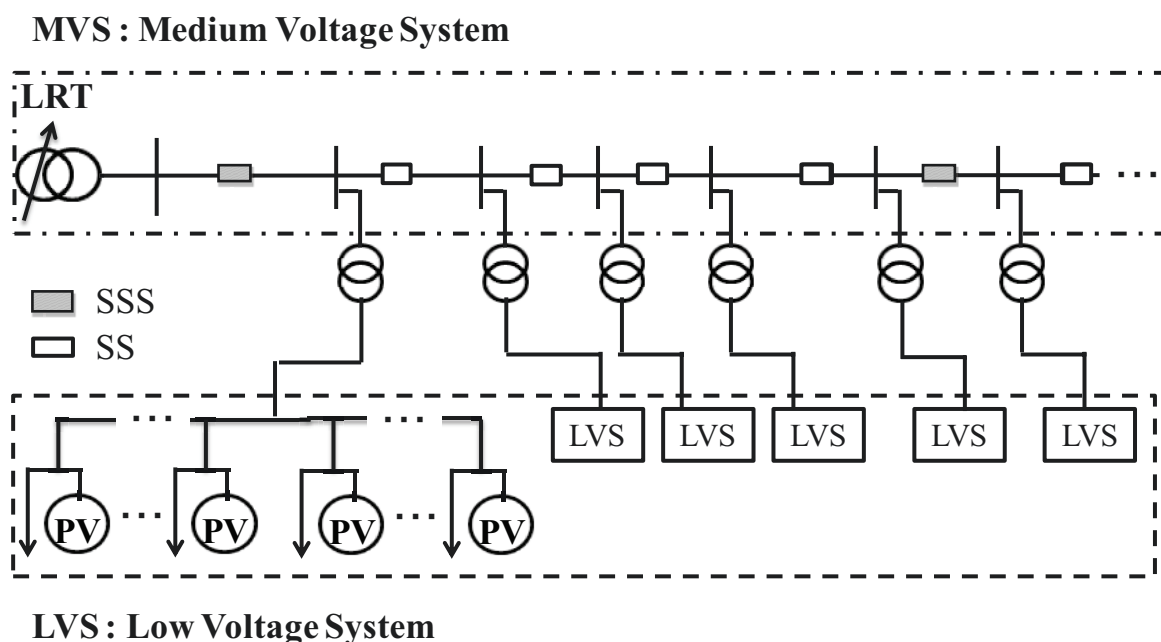


図 3.2 階層型配電系統モデル

現実には、各負荷や PV 出力の大きさは容量案分した値から大きく異なる場合もあるため、上記の仮定は必ずしも正確な推定結果を与えるものではないが、設備数が莫大な低圧配電系統内の PCS 制御量を限られた計測情報から推定するためには、容量案分の想定はやむを得ないものと考えた。これらの想定下では、低圧系統の構成は等価的に縮約することが可能である。すなわち、低圧系統全体での負荷および PV 出力に対する配電線末端電圧の感度が、容量案分の仮定、および既知の情報であるインピーダンスマップにより導出できるため、低圧系統内のネットワークを図 3.3 のように縮約して表現できる。なお、この詳細は 3.4.1 および 3.4.2 において詳述する。この縮約されたモデルにおいて、低圧系統内の PV の無効電力制御の応答を考慮しながら、高圧系統内の各ノードの負荷および PV 出力を推定することが本提案手法の目的となる。ここで、高圧系統内において以下の想定を考える。

- 本提案手法による状態推定結果は、LRT などのタップ運用へ応用することが主目的となる。前述の通りタップ制御の動作間隔が主に分オーダーになることから、状態推定の実施間隔も、これに合わせて数分～十数分程度で十分であると考えられる。センサ開閉器での計測周期はより短いと考えられるが、本提案手法ではこれを状態推定周期に合わせた移動平均値として利用する想定とした。同様に、本提案手法における PV 出力や負荷などの時間変動するデータは、全て同じ周期での移動平均値と考える。なお、状態推定の実施間隔は上記の通り幅があると考えられるが、具体的な周期は各配電系統の様態に応じて個別に決定されると考えられるため、本論文では明確な規定はしないこととした。
- 配電系統内の異なる地点で天候に差異がある場合、同時刻での日射量は異なる可能性がある。しかし上記のような推定周期を想定すると、この間に雲は十分に遠方に移動すると想定できる。後述の通り本提案手法が推定対象とするエリアは“推定対象区間”として定義されるが、センサ開閉器の導入数に応じてフィーダを複数区間に分割したものとなる。したがって適用対象のエリアは概ね 1km に満たない程度であり、雲の移動速度を数 m/sec 程度と考えた場合でも、分オーダーの解析においては十分に平滑化効果の働くことが期待できる。以上より、推定周期に合わせた移動平均値としての PV 出力は、概ね全地点で一様と想定できる。
- 高圧系統の各ノードにおける負荷の大きさは、前述の通り低圧系統内の負荷の合計値であるが、この変動の特性は、確率密度関数として経験的に既知であると想定する。
- 高圧系統のインピーダンスマップも既知である。

以上より、図 3.3 の高圧配電系統モデルにおいて、系統運用者が観測可能な情報を以下にまとめる。

- SSS の計測値である電圧値，通過電流と力率（すなわち有効電力潮流および無効電力潮流）
- 各ノードの負荷容量および PV 導入容量
- 全ノードでの負荷変動の確率密度関数
- インピーダンスマップ

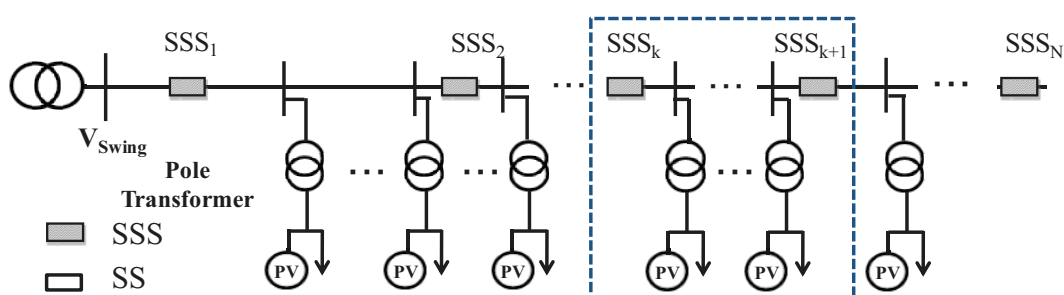


図 3.3 縮約モデルにおける推定対象

3.2.2 推定対象区間

配電系統内に複数の SSS が含まれる場合，SSS で囲まれた区間ごとに，その出入りの潮流から区間内の見かけの電力需要の総和が導出できるため，推定問題はこの区間ごとに実施することが妥当と考えられる。そこで本論文では，図 3.3 において点線で囲まれた地域内のように，2つの SSS で囲まれた区間を“推定対象区間”と定義する。なお，本論文では2つの SSS を SSS_k と SSS_{k+1} とし， SSS_k は推定地域内で最も配電用変電所に近い位置に設置された SSS とし， SSS_{k+1} は推定地域内で配電用変電所から遠方側に設置された SSS とする。具体的な推定対象は，各推定対象区間内に含まれる PCS の無効電力制御量となる。この場合，推定対象区間の外にあるノード群は集約して取扱うこととする。この例では，フィーダ末端側に設置されている SSS (SSS_{k+1}) よりもさらに末端側の地域は，図 3.4 のように 1 ノードに集約される。なお，集約されたこのノードでは，電圧，有効電力および無効電力は当該の SSS における計測値で表現できる。なお，図 3.4 中で記載されている各変数の定義は以下の通りである。

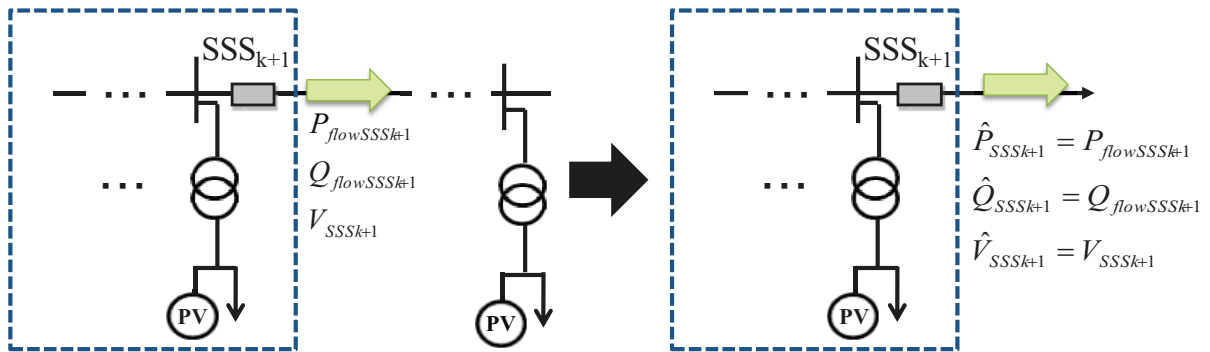


図 3.4 推定対象の外側に位置する地域の取り扱い

ただし、

- $P_{flowSSSk}$: ノード SSS_k を通過する有効電力潮流 (計測値)
- $Q_{flowSSSk}$: ノード SSS_k を通過する無効電力潮流 (計測値)
- V_{SSSk+1} : ノード SSS_{k+1} での電圧値 (計測値)
- P_{SSSk+1} : ノード SSS_{k+1} での有効電力指定値
- Q_{SSSk+1} : ノード SSS_{k+1} での無効電力指定値

3.2.3 電力潮流計算

電力系統における電圧および潮流の解析手法として、広く“電力潮流計算”が用いられている。具体的には、式 (3.5) で示される連立非線形方程式を、Newton-Raphson 法により求解する解析となる。Swing bus を除き N 個のノードから成る電力系統の解析では、一般に $2N$ 本の方程式が成立し、かつノード毎に 4 つの変数 (P, Q, V, θ) が含まれることにより、連立方程式全体としては $4N$ 個の変数が存在する。したがってノードごとに 4 つの未知変数の内の 2 つの値を指定することで条件式と未知数の数が一致し、電力方程式の解を一意に求めることが通常の実算手法である。

配電系統の解析においては、配電用変電所の送り出し点のノードを Swing bus と指定すると共に、それ以外のノードに関しては電圧を一定値に維持するような制御機器が入っていないことを想定して、有効および無効電力を指定する (PQ 指定ノード) 場合が多い。このとき、PV 出力ならびに負荷は定電力の電圧特性でモデル化される。結果的に、主に各ノードの P, Q を指定した潮流計算により、各ノードの V, θ を得る計算となる。

$$P_i + jQ_i = V_i \sum_{j=1}^N \overline{Y_{ij}} V_j \dots\dots\dots (3.5)$$

ただし,

P_i : ノード i に注入される有効電力

Q_i : ノード i に注入される無効電力

V_i : ノード i の電圧値

θ_i : ノード i の電圧位相角

Y_{ij} : アドミタンス行列の i 行 j 列成分

N : ノード総数

以上が通常の潮流計算の概要となるが、本論文の検討対象である PCS の制御状態の推定に関しても、同様に定常状態の解析であるため、この潮流計算に基づいた方式として提案を進める。詳細を次節以降に示す。

3.2.4 潮流計算の推定手法への適用

本論文では以下に示す二つの視点により、潮流計算に基づいた無効電力制御量の推定手法を提案する。

- (1) PCS の無効電力制御手法を、高圧ノードの電圧と関連付けて潮流計算に組み込むことで、PCS の制御効果を考慮した潮流計算を定式化する。
- (2) 変動する負荷パターンを乱数に基づいて生成し、これに基づいて (1) の潮流計算を多数回実施し、可観測な SSS での計測値が潮流計算結果と一致する場合を実現し得る解として抽出する。十分な数の解における無効電力制御量を集約して確率分布を提示する。

上記の (1) については詳細の説明は 3.4 節で述べることとし、本節では上記 (2) について、複数のセンサを含む推定対象区間における潮流計算について、未知数や条件式に関する定義をまとめる。

まず、SSS の内の 1 つを **Swing bus** と定める。同ノードでは電圧および位相を指定値として与える必要があるが、SSS での計測値を電圧指定値とし、位相に関しては従来と同様に基準と考えて 0 と定義する。さらに、**Swing bus** から供給される有効電力および無効電力は、通常は送電損失を含めた系統全体の電力バランスから定まるが、本方式ではこれを SSS での計測値に一致させるように以下の 2 つの方程式を電力方程式に追加する。同式は、配電用変電所に近い上流側に位置する SSS (SSS_k) を **Swing bus** と定義し、同ノードが推定対象区間内のただ一つのノードとのみ接続する場合の記載である。いずれも右辺は隣接ノードの電圧および位相角が与えられた場合に **Swing bus** から供給される電力値であり、左辺はその目標値を SSS での計測値として与えたものである。

$$P_{flowSSSk} = G_{SSSkj} (V_{SSSk}^2 - V_{SSSk} V_j \cos(\theta_{SSSk} - \theta_j)) + B_{SSSkj} V_{SSSk} V_j \sin(\theta_{SSSk} - \theta_j) \quad \dots\dots\dots(3.6)$$

$$Q_{flowSSSk} = B_{SSSkj} (V_{SSSk}^2 - V_{SSSk} V_j \cos(\theta_{SSSk} - \theta_j)) - G_{SSSkj} V_{SSSk} V_j \sin(\theta_{SSSk} - \theta_j) \quad \dots\dots\dots(3.7)$$

ただし、

G_{SSSkj}, B_{SSSkj} : SSS_kと隣接するノードj間のコンダクタンスおよびサセプタンス

Swing busと定めたもの以外のSSS (SSS_{k+1}) に関しては、基本的には他のPQ指定ノードと同様に取り扱うが、電圧が計測値として得られているため既知である。そのため、未知変数のベクトルから、当該ノードの電圧を差し引くことができる。

SSS以外のノードに関しては、全てPQ指定ノードとして扱い、負荷およびPVの接続が無い場合は有効電力および無効電力の双方を0と定める。一方、負荷およびPVを含むノードに関しては、負荷の確率密度関数が所与であるため、乱数に基づいて仮に生成し、これを指定値として与える。乱数で生成した負荷パターンは、実現され得る無数の負荷パターンの内の1つを表すに過ぎないが、最終的には後述の通り、モンテカルロ法の枠組みの中で統計的な処理を行う。

以上の議論を整理すると、本推定問題を取り扱う潮流計算表現は、通常の潮流計算に比較すると以下の点で異なる。

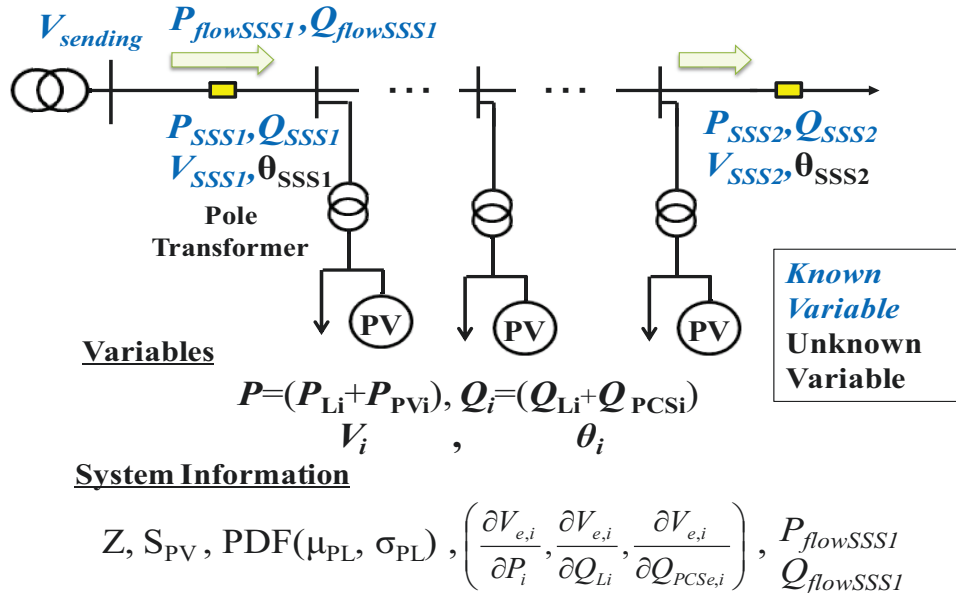
- Swing bus (SSS 設置ノードの内の一つ) の有効電力および無効電力に対して指定値が存在し、この条件を示す数式 2 本が追加される。
- 残りの SSS ノードは PQ 指定ノードとして扱うが、電圧が既知である。

以上より、通常の潮流計算に比較すると数式が 2 本多く、未知数が“SSS ノードの数 - 1”だけ少ない問題となる。このため、条件式の余る分だけ乱数で生成する負荷の数を減らして未知数を増やす方法も考えられるが、SSS ノード以外は対等に取り扱うことが作為的な計算結果を回避するためには効果的である。このため、本論文では条件式が未知数よりも多い問題を、そのまま求解する手法をとる。このような問題に対して全条件式がバランスよく満足されるように未知数を定める手法として“擬似逆行列”による連立一次方程式の解法がある。本論文ではこの計算手法に沿い、乱数に基づいて与えられた各負荷パターンに対する潮流計算を実行する。

3.2.5 モンテカルロ法による確率分布の導出

擬似逆行列を用いた解法では、全ての条件式がバランスよく満たされるように未知数が決定されるため、結果として PQ 指定ノード、および Swing bus における有効電力および無効電力は、元の指定値から多少外れる結果となる。そこで、SSS 設置ノードに着目して、解の良好さを“SSS での計測値と計算結果”との差分から評価して、良好な解のみを残す処理を行う。以上のプロセスをモンテカルロ法の枠組みに乗せて繰り返すことで、良好な解の集合における PCS の無効電力制御量を集合として確率分布の導出を行う。提案手法全体のフローを図 3.5 に示す。各 step の詳細は次節以降に示す。

Available Information and Unknown Variables



Step1: Specify the magnitude of load at each node temporarily based on probabilistic density function and random numbers.

State of Variables after this step

$$P_L = PDF(\mu_{PL}, \sigma_{PL}) \quad \Rightarrow \quad P = (P_{Li} + P_{PVi}), Q = (Q_{Li} + Q_{PCSi})$$

$$V_i, \theta_i$$

Step2: Determinant of Active power by PVs using measured value on SSS and specified load in Step1

State of Variables after this step

$$P_{flowSSS1}, S_{PVi}, P_{Li} \quad \Rightarrow \quad P = (P_{Li} + P_{PVi}), Q = (Q_{Li} + Q_{PCSi})$$

$$V_i, \theta_i$$

(a) Step1, Step2

Iterative computation on power flow calculation

Step3: Calculation of Reactive power controlled by PCS in LVS considering the voltage drop from the connecting point with MVS.

State of Variables after this step

$$\left(\frac{\partial V_{e,i}}{\partial P_i}, \frac{\partial V_{e,i}}{\partial Q_{Li}}, \frac{\partial V_{e,i}}{\partial Q_{PCSe,i}} \right), \begin{matrix} P_{Li}, P_{PVi} \\ Q_{Li}, Q_{PCSi} \\ V_i \end{matrix} \Rightarrow \mathbf{P}=(P_{Li}+P_{PVi}), \mathbf{Q}=(Q_{Li}+Q_{PCSi}), \theta_i$$

Step4: Power flow calculation using Pseudo Inverse Matrix is performed considering the voltage-reactive power control sensitivity of PCS

State of Variables after this step

$$\begin{matrix} P_{flowSSSI} \\ Q_{flowSSSI} \end{matrix} \Rightarrow \mathbf{P}=(P_{Li}+P_{PVi}), \mathbf{Q}=(Q_{Li}+Q_{PCSi}), \theta_i$$

Iteration Calculation Variable

Step5: The validity of the calculated power flow is evaluated with comparing to the measured values.

State of Variables after this step

$$\begin{matrix} P_{flowSSSI} \\ Q_{flowSSSI} \end{matrix} \Rightarrow \mathbf{P}=(P_{Li}+P_{PVi}), \mathbf{Q}=(Q_{Li}+Q_{PCSi}), \theta_i$$

Step6: Above step1-5 are repeatedly applied and based on the obtained sufficient numerous solutions, the probabilistic density functions are derived.

(b) Step 3, 4,5,6

図 3.5 提案手法のフロー

3.3 負荷と PV 出力の決定 (Step1, Step2)

3.3.1 ノードの有効電力

各推定対象区間内に流入し消費される電力の大きさは、負荷から PV 出力を差し引いたものであり、これらの総和は配電損失を無視すると推定対象区間を取り囲む SSS の各計測値の差分に等しい。したがって、SSS_k と SSS_{k+1} から構成される推定対象区間について、有効電力に着目すると式 (3.8) が成立する。ここで、3.2.1 で述べたように負荷の確率密度関数を既知と考えて、乱数を用いて各ノードの有効電力負荷を個別に生成する。その合計値を推定対象区間内の負荷の総和とすると、式 (3.9) より PV 出力の総和を導出できる。配電系統内のどの地点においても日射量が等しく、PV 出力は設備容量に比例する想定の下、各ノードの PV 出力は次式で表される。

以上により、各ノードの有効電力指定値は PV 出力と負荷の差分として与えることができる。

$$\left(\sum_i^{N_{LVS}} P_{PV_i} + \sum_i^{N_{LVS}} P_{Li} \right) = |P_{flowSSSk} - P_{flowSSSk+1}| \dots \dots \dots (3.8)$$

ただし、

N_{LVS} : 推定対象区間に含まれる全ノード数

P_{Li} : ノード i の有効電力負荷

$$P_{PV_i} = \frac{- \sum_j^{N_{LVS}} P_{Lj} + |P_{flowSSSk} - P_{flowSSSk+1}|}{\sum_j^{N_{LVS}} S_{PVj}} \dots \dots \dots (3.9)$$

ただし、

S_{PV_i} : ノード i の PV 容量

3.3.2 ノードの無効電力負荷

負荷力率は負荷の大きさによらず一様（遅れ力率）であると想定すると、各低圧系統の無効電力負荷は、前節で与えた有効電力負荷を用いて式(3.10)のように計算できる。

$$Q_{Li} = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \theta_{Li}}}{\cos \theta_{Li}} P_{Li} \dots \dots \dots (3.10)$$

ただし、

Q_{Li} : ノード i の無効電力負荷

$\cos \theta_{Li}$: ノード i の負荷力率

3.4 PCS の無効電力制御量の決定 (Step3)

縮約された低圧系統内における負荷と PV の一様な連系を想定すると、高圧系統における各ノード(該当する低圧系統全体)の PV 出力と負荷が与えられると、低圧系統内の潮流が定まるため、配電線末端電圧を計算できる。この電圧値が適正範囲から逸脱する場合には、PCS の無効電力制御が働くものとする。以下に具体的な制御状態の計算方法を示す。

3.4.1 低圧系統末端の電圧逸脱量(Step3-1)

まず、低圧系統内に PV および負荷が一様に連系していると想定する。PV 出力が大きくて逆潮流が生じる場合、配電線末端での電圧上限逸脱が生じる場合がある。ここで低圧配電線末端に連系する PCS が、前章で示した無効電力制御 2 を実施すると考えて、その制御量を以下の通り計算する。低圧系統内の電圧変動の要因を有効電力および無効電力潮流と考えると、その電圧感度を線形近似で表すと、式 (3.11)、適正範囲からの逸脱量 $\Delta V_{dev,i}$ (上限逸脱時は負、下限逸脱時は正の値) は式 (3.12) で、それぞれ定式化できる (図 3.6(a))。なお、PCS の無効電力制御量の増加に対して PCS の容量が不足する場合は有効電力の出力抑制が必要となるが、ここではその影響は相対的に小さいと考えて考慮していない。

$$V_{LVS_i,e} = V_i + \frac{\partial V_{LVS_i,e}}{\partial P_i} P_i + \frac{\partial V_{LVS_i,e}}{\partial Q_{Li}} (Q_i - Q_{PCSi}) + \frac{\partial V_{LVS_i,e}}{\partial Q_{PCSi}} Q_{PCSi} \dots\dots\dots (3.11)$$

$$\Delta V_{dev,i} = \begin{cases} V_{upper} - V_{LVS_i,e} & (V_{LVS_i,e} > V_{upper}) \\ V_{lower} - V_{LVS_i,e} & (V_{LVS_i,e} < V_{lower}) \end{cases} \dots\dots\dots (3.12)$$

ただし、

$V_{LVS_i,e}$: ノード i に連系する低圧系統の配電線末端電圧

$\frac{\partial V_{LVS_i,e}}{\partial P_i}$: 有効電力負荷および PV 出力に対する電圧感度

$\frac{\partial V_{LVS_i,e}}{\partial Q_{Li}}$: 無効電力負荷に対する電圧感度

$\frac{\partial V_{LVS_i,e}}{\partial Q_{PCSi}}$: PCS の無効電力制御に対する電圧感度

3.4.2 PCS による無効電力制御量 (Step3-2)

PCS の無効電力制御量は、配電線末端の電圧値を適正值に維持するための必要量として決定できる。各低圧系統の PCS は自らの連系点の電圧値のみを制御

対象にすると想定して、本論文では配電線末端に位置する PCS のみが無効電力制御を実施すると考える。電圧逸脱が生じた場合、電圧適正化に必要な無効電力制御量は、前述の電圧逸脱量を用いて式(3.13)により表される (図 3.6(b))。一方で、電圧が適正範囲内に維持されている場合、PCS は式(3.2)に示される制御を実施することで過剰な制御量を削減する。電圧が適正範囲の上下限值に到達する、あるいは無効電力が 0 となるまで無効電力を減少させることを想定して、線形近似の下での制御量を式 (3.14) により表す。

$V_{LVSi,e} > V_{upper}$ or $V_{LVSi,e} < V_{lower}$ の場合

$$\Delta Q_{PCSi} = \frac{\partial Q_{PCSi}}{\partial V_{LVSi,e}} \Delta V_{dev,i} \dots\dots\dots$$

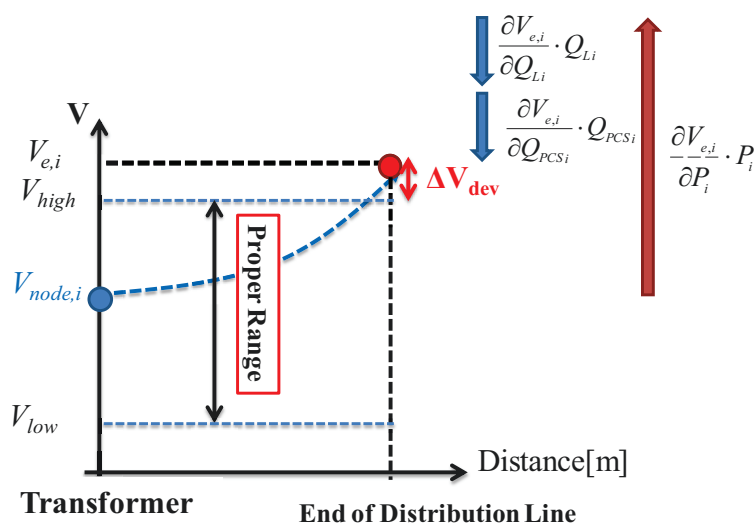
(3.13)

$V_{lower} < V_{LVSi,e} < V_{upper}$ の場合

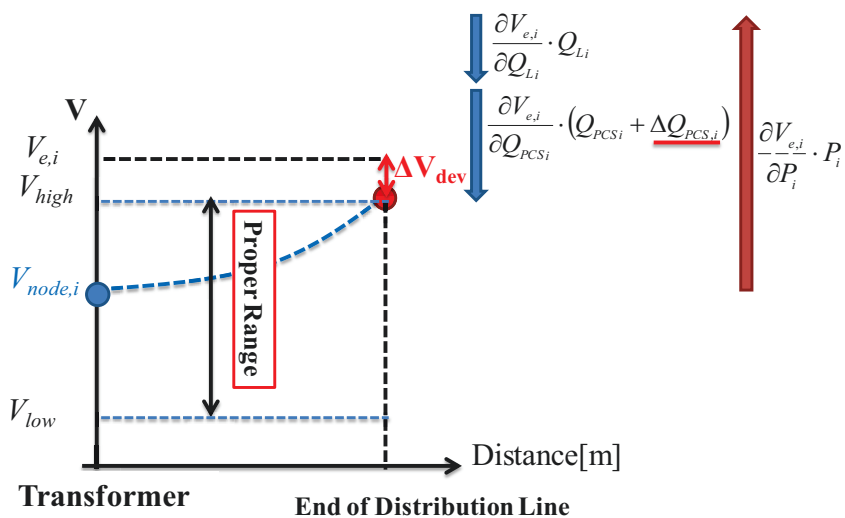
$$\Delta Q_{PCSi} = \begin{cases} \max \left(\frac{\partial Q_{PCSi}}{\partial V_{LVSi,e}} (V_{upper} - V_{LVSi,e}), -Q_{PCSi} \right) & (Q_{PCSi} \leq 0) \\ \min \left(\frac{\partial Q_{PCSi}}{\partial V_{LVSi,e}} (V_{LVSi,e} - V_{lower}), -Q_{PCSi} \right) & (Q_{PCSi} > 0) \end{cases} \dots\dots\dots (3.14)$$

ただし、

ΔQ_{PCSi} : 電圧維持に必要な無効電力制御量



(a) 推定電圧が逸脱している場合 (Step3-1)



(b) 推定電圧が適正範囲内の場合 (Step3-2)

図 3.6 低圧配電線末端電圧の推定(Step3)

3.4.3 潮流計算への組み込み

各ノードの電力指定値と電圧が定まると、前節に示した方法により、低圧系統の配電線末端電圧を基にして PCS の無効電力制御量が定まる。この関係を潮流計算に組み込むことで、PCS の無効電力制御を考慮した潮流計算が可能となる。具体的には、Newton-Raphson 法による潮流計算の各繰り返し毎に、各ノードの電力指定値と電圧を用いて式(3.10)～式(3.14)から導出した PCS の無効電力制御量を、式(3.15)の通り当該ノードの無効電力指定値に反映させることとした。また、無効電力指定値の調整を踏まえて、収束性改善のためにヤコビアン行列の該当する要素を式(3.16)もしくは式(3.17)の通り修正する。

なお、各繰り返し毎に有効電力の配電損失が導出できる。式(3.8)で PV 出力を決定した際には配電損失は考慮していなかったが、この損失分は各繰り返し毎に PV 出力に容量比で案分して上乘せする。配電損失はある程度小さく、系統電圧への影響が PCS の無効電力制御と比較して小さいと考えられるため、ヤコビアン行列の修正は行わないこととした。

$$\hat{Q}_i = Q_i + \Delta Q_{PCSi} \dots\dots\dots (3.15)$$

ただし、

\hat{Q}_i : ノード i の無効電力指定値

$V_{LVSi,e} > V_{upper}$ or $V_{LVSi,e} < V_{lower}$ の場合

$$\begin{aligned} \frac{\partial \widehat{Q}_i}{\partial V_i} &= \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} + \frac{\partial}{\partial V_i} \left(\frac{\partial Q_{PCSi}}{\partial V_{LVSi,e}} \Delta V_{dev} \right) \\ &= \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} - \left(1 + \frac{\partial V_{LVSi,e}}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial V_i} + \frac{\partial V_{LVSi,e}}{\partial Q_{Li}} \left(\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} - \frac{\partial Q_{PCSi}}{\partial V_i} \right) + \frac{\partial V_{LVSi,e}}{\partial Q_{PCSi}} \frac{\partial Q_{PCSi}}{\partial V_i} \right) \end{aligned} \quad (3.16)$$

$V_{lower} < V_{LVSi,e} < V_{upper}$ の場合

$$\frac{\partial \widehat{Q}_i}{\partial V_i} = \begin{cases} \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} + \left(1 + \frac{\partial V_{LVSi,e}}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial V_i} + \frac{\partial V_{LVSi,e}}{\partial Q_{Li}} \left(\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} - \frac{\partial Q_{PCSi}}{\partial V_i} \right) + \frac{\partial V_{LVSi,e}}{\partial Q_{PCSi}} \frac{\partial Q_{PCSi}}{\partial V_i} \right) & (V_{upper} - V_{LVSi,e}) > (V_{lower} - V_{LVSi,e}) \\ \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} - \left(1 + \frac{\partial V_{LVSi,e}}{\partial P_i} \frac{\partial P_i}{\partial V_i} + \frac{\partial V_{LVSi,e}}{\partial Q_{Li}} \left(\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} - \frac{\partial Q_{PCSi}}{\partial V_i} \right) + \frac{\partial V_{LVSi,e}}{\partial Q_{PCSi}} \frac{\partial Q_{PCSi}}{\partial V_i} \right) & (V_{upper} - V_{LVSi,e}) < (V_{lower} - V_{LVSi,e}) \end{cases} \quad (3.17)$$

3.5 擬似逆行列を活用した潮流計算 (Step4)

3.2.4 節で示した通り、本論文の潮流計算では Swing bus からの有効電力および無効電力に関して、式 (3.6) および式 (3.7) の条件式を追加する。この両式に対応するヤコビアン行列の要素は式 (3.18) で与えられる。

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial P_{flowSSSi}}{\partial V_j} &= -G_{SSSi} V_{SSSi} \cos(\theta_{SSSi} - \theta_j) + B_{SSSi} V_{SSSi} \sin(\theta_{SSSi} - \theta_j) \\
 \frac{\partial Q_{flowSSSi}}{\partial V_j} &= -B_{SSSi} V_{SSSi} \cos(\theta_{SSSi} - \theta_j) + G_{SSSi} V_{SSSi} \sin(\theta_{SSSi} - \theta_j) \\
 \frac{\partial P_{flowSSSi}}{\partial \theta_j} &= G_{SSSi} V_{SSSi} V_j \sin(\theta_{SSSi} - \theta_j) + B_{SSSi} V_{SSSi} V_j \cos(\theta_{SSSi} - \theta_j) \\
 \frac{\partial Q_{flowSSSi}}{\partial \theta_j} &= -B_{SSSi} V_{SSSi} V_j \cos(\theta_{SSSi} - \theta_j) + G_{SSSi} V_{SSSi} V_j \sin(\theta_{SSSi} - \theta_j)
 \end{aligned}
 \tag{3.18}$$

Newton-Raphson 法による潮流計算では各反復計算において式 (3.19) に示す線形計算で修正量ベクトル x を計算しなければならない。

$$Jx = b \tag{3.19}$$

ただし、

$$\begin{aligned}
 x^T &= [\Delta V_1, \Delta \theta_1, \Delta V_2, \Delta \theta_2, \dots, \Delta V_N, \Delta \theta_N, \Delta \theta_{SSSi}, \Delta \theta_{SSSj}] \\
 b^T &= [\hat{P}_1 - P_1, \hat{Q}_1 - Q_1, \dots, \hat{P}_N - P_N, \hat{Q}_N - Q_N, \hat{P}_{flowSSSi} - P_{flowSSSi}, \hat{Q}_{flowSSSi} - Q_{flowSSSi}]
 \end{aligned}$$

しかし前述の通り、SSS の計測情報を追加したヤコビアン行列は正則行列ではなくなり、逆行列が存在しない。そこで、式(3.20)を解くために以下に示す擬似逆行列を活用する。^[49]

$$J^T Jx = J^T b \tag{3.20}$$

なお、擬似逆行列を活用し方程式の解を得ることは式 (3.21) に示すように編

差ベクトルの最小二乗和を満たす解を求めることと同義である。

$$\begin{aligned} x^T J^T J x &= \sum_i (\hat{P}_i - P_i)^2 + \sum_i (\hat{Q}_i - Q_i)^2 \\ &+ \sum_k (\hat{P}_{flow_{SSSk}} - P_{flow_{SSSk}})^2 + \sum_i (\hat{Q}_{flow_{SSSk}} - Q_{flow_{SSSk}})^2 \rightarrow \min . \end{aligned}$$

..... (3.21)

3.6 解の妥当性の評価 (Step5)

以上のように SSS の計測情報を潮流計算に組み込むことで、Step1 で乱数により与えられた各ノード負荷に対して、推定精度が最も高い収束解を得ることが可能となる。しかし、擬似逆行列を適用したことで潮流方程式は厳密には満足されず、各ノード電力は少しずつ指定値から外れる結果となる。そのため Swing bus での有効電力および無効電力、ならびに他の SSS におけるノード電圧について、それぞれセンサでの計測値として与えられた指定値との差分を式 (3.22) により評価し、これがしきい値以下となるものを良好な解候補として抽出する。以上のプロセスをモンテカルロ法の考え方に従い、十分な個数の解候補が得られるまで反復する。最終的に蓄積された解候補を確率分布の形式に整理し、これを推定結果とする。

$$\left(\hat{P}_{flow_{SSSk}} - P_{flow_{SSSk}}\right)^2 + \left(\hat{Q}_{flow_{SSSk}} - Q_{flow_{SSSk}}\right)^2 + \left(\hat{V}_{SSSk} - V_{SSSk}\right)^2 < T_h \quad \dots\dots\dots (3.22)$$

ただし、

T_h : しきい値

3.7 数値計算例

3.7.1 配電系統モデルの詳細

住宅地域を想定した図 3.7 の配電系統モデルから、推定対象区間のみを抜き出した図 3.8 のモデルを用いて数値計算を行った。同モデルでは低圧系統内のすべての PCS には電圧上昇抑制機能が組み込まれ、第 3 章で示した電圧-無効電力制御を実施可能であると想定した。なお、系統定数は系統縮約前は表 3.1 に、系統縮約後は表 3.2 に示す通りである。日負荷曲線および PV 出力曲線は図 3.9 のように変化するとした。なお、本論文ではタップ切替によって PCS の無効電力制御量の低減を目的としているため、タップ切替の判断を行う時間間隔、すなわち推定実施間隔においてどれだけの無効電力が PCS に制御されるかを推定することが重要となる。したがって、この実施間隔よりも短い周期の日射変動は重要ではないため、ここでは移動平均値を取ることで短周期の変動を取り除いた場合を想定して、滑らかな PV 出力曲線を描いている。負荷変動についても同様である。なお図 3.8 の SSS2 よりも末端側には、推定対象区間外の配電系統が続いているが、本シミュレーションでは省略し SSS2 の計測値を持つ P,Q,V 指定ノードとして扱った。

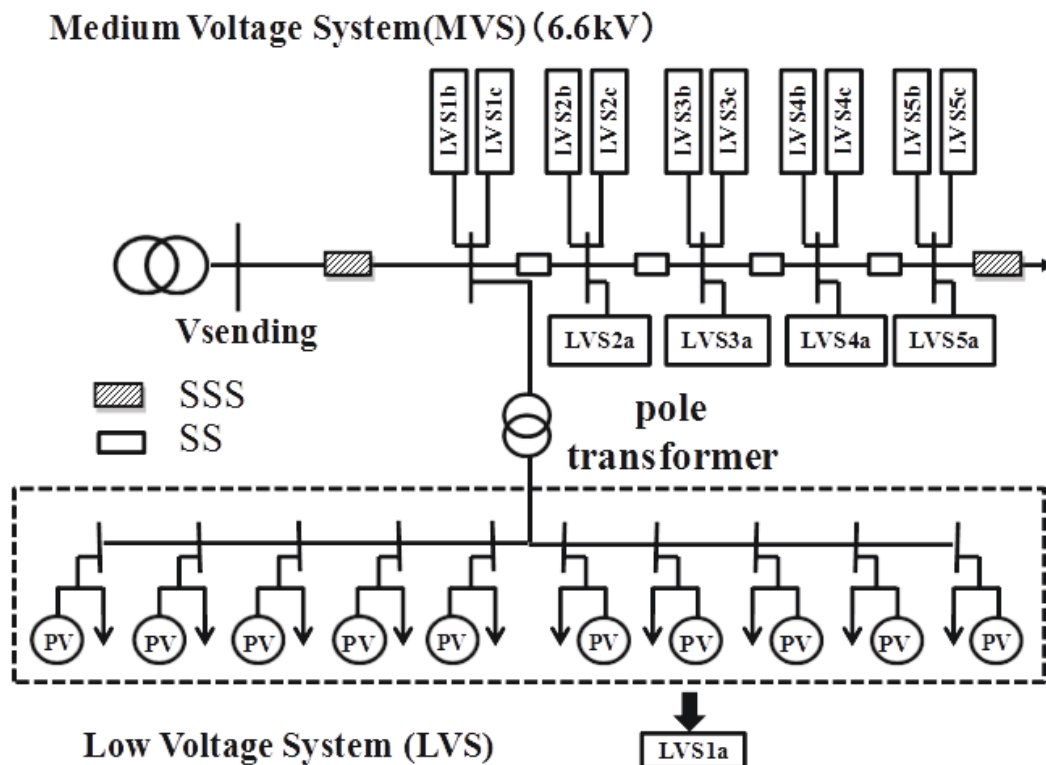


図 3.7 階層型配電系統モデル

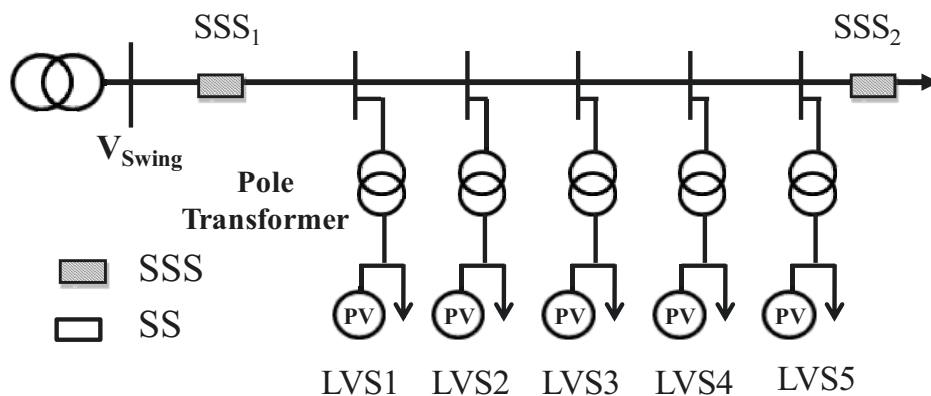


図 3.8 縮約後の配電系統モデル

表 3.1 階層型配電系統モデル（縮約前モデル）の系統定数

ベース容量	10[MVA]
ベース電圧 (MVS/LVS)	6600[V]/210[V]
電圧適正範囲	0.97[p.u.]~1.03[p.u.]
線路インピーダンス(MVS)	0.036578 + j 0.06260[p.u.]
線路インピーダンス(LVS)	1.24901 + j1.13642 [p.u.]
柱上変圧器	j3[p.u.]
各低圧系統内の PCS の容量	0.005[p.u./node](LVS 1a~1c)
	0.0033[p.u./node](LVS 2a~2c,5a~5c)
	0.00167[p.u./node](LVS 3a~3c,4a~4c)
負荷容量 (cosθ=lag 85[%])	0.0011 [p.u./node]

表 3.2 系統定数

ベース容量	10[MVA]
ベース電圧 (MVS/LVS)	6600[V]/210[V]
線路インピーダンス(MVS)	0.036578 + j 0.06260[p.u.]
柱上変圧器	j1[p.u.]
各ノードにおける PCS の容量	0.15[p.u.] (LVS 1)
	0.1 [p.u.] (LVS 2, LVS 5)
	0.05 [p.u.] (LVS 3,LVS 4)
負荷容量 (cosθ=lag 85[%])	0.033[p.u.]
負荷変動	平均値：日負荷曲線 標準偏差：平均値の 30%)

3.7.2 系統状態

図 3.7 の配電系統モデルおよび表 3.1 の状態で潮流計算を実施した結果、各低圧系統このときの SSS 設置個所での有効電力潮流、無効電力潮流、電圧値がセンサ計測情報として取得できていると想定した。なお、この時の各 LVS での PV の有効電力出力、無効電力制御量、出力抑制量は図 3.10 に示すとおりである。状態推定時に想定する負荷変動の確率密度関数は正規分布に従うものと仮定した。なお、状態推定を行うに当たってこれらに対応する各ノードの負荷や PV 出力の組み合わせは無数に存在するため、その組み合わせを網羅的に生成した結果、PCS の無効電力制御量の確率密度分布を得ることが本提案手法の目的となる。また、配電系統毎に負荷変動が異なると考えられるためどの系統に対しても共通な分布を定めることは難しいが、本論文では正規分布の平均値を日負荷曲線から、標準偏差を期待値の 30%と設定した。実運用を想定する場合には付録に示すように対象とする配電系統において十分な実データを解析し変動を決定することが望ましい。

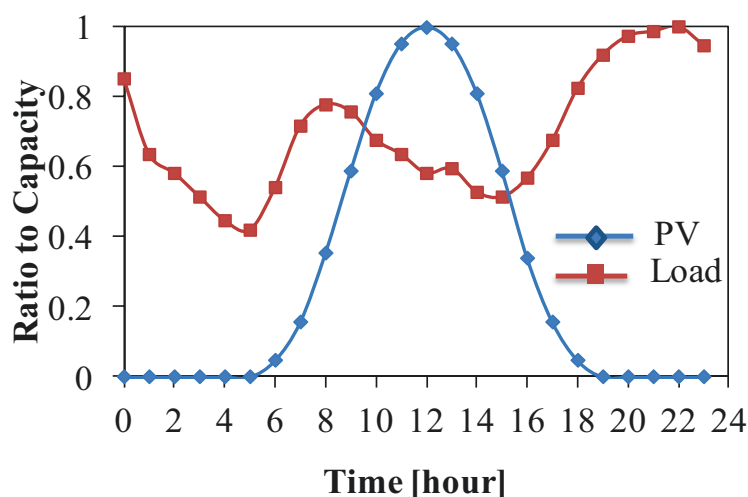
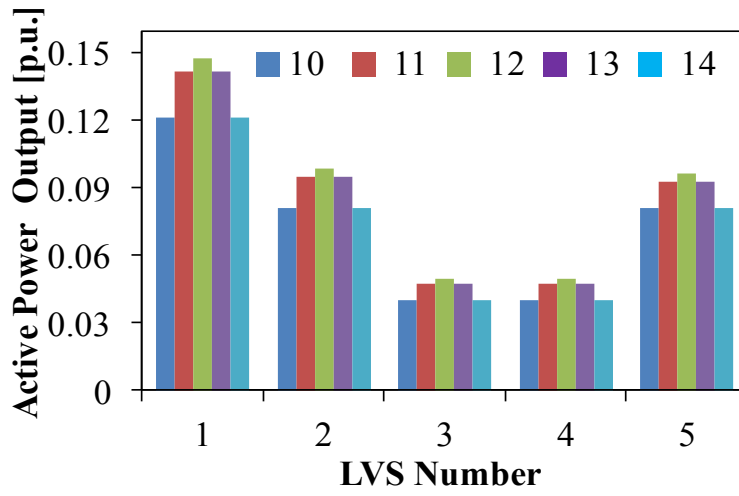
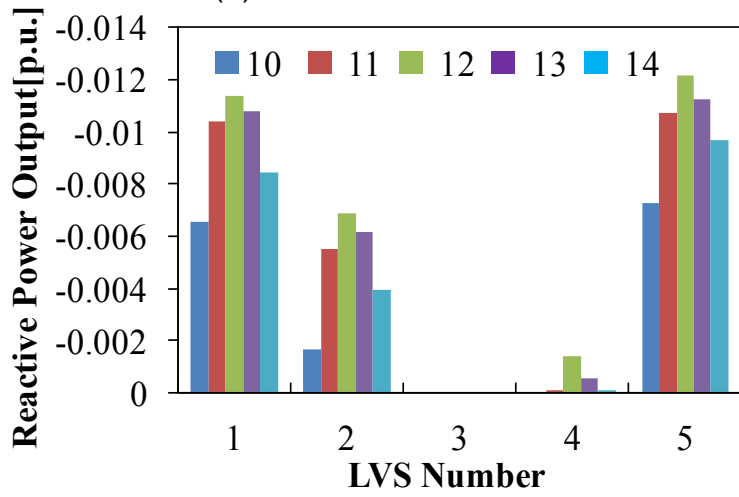


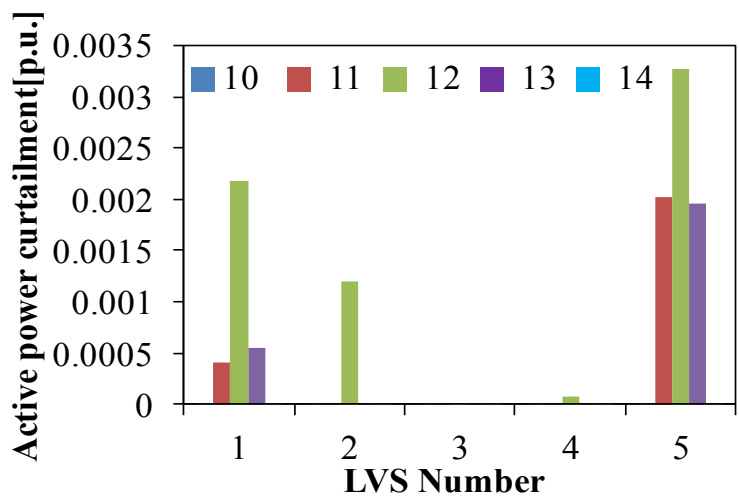
図 3.9 PV 出力曲線および日負荷曲線



(a) PV の有効電力出力



(b) PCS による無効電力制御量



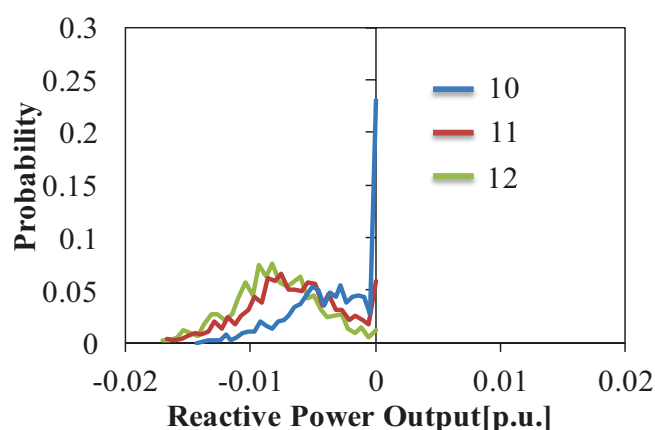
(c) 有効電力出力抑制量

図 3.10 PCS の制御状態

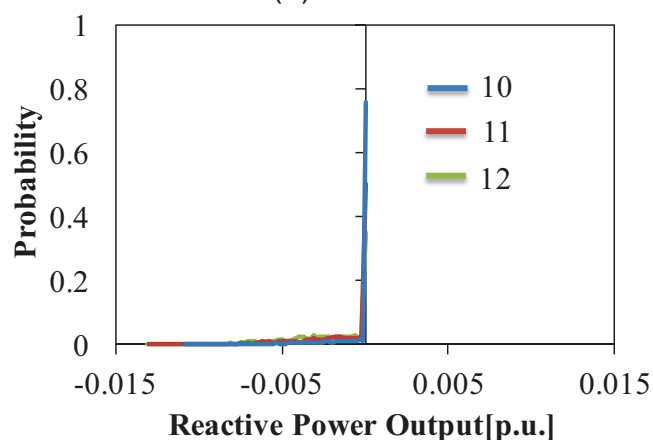
3.7.3 数値計算結果

a)無効電力制御推定結果

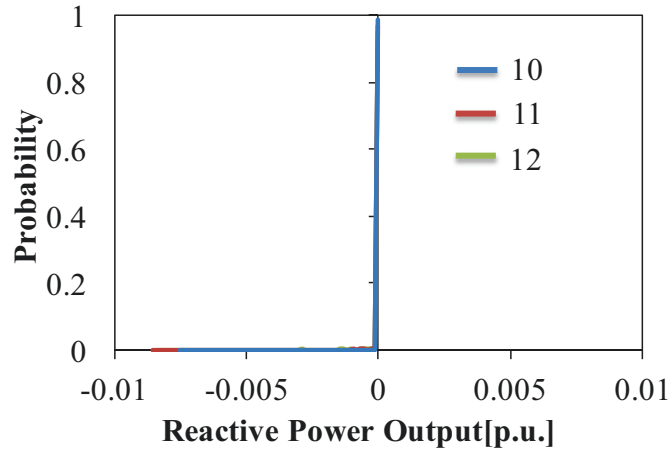
負荷および PV 出力を容量案分し、かつ無効電力制御を実施しない場合、低圧系統内で電圧逸脱が生じた時間帯は 10 時～14 時であったが、ここでは提案手法を適用し、無効電力制御量が比較的少ない 10 時、LVS1 および LVS5 において出力抑制が生じた 11 時、日間で最も大きな無効電力制御量が必要となる 12 時のそれぞれについて、PCS 無効電力制御量の確率分布の導出結果を図 3.11 に示した。同図より、PV 容量の大きい LVS1 や、系統末端側に位置して電圧上昇が大きいと予想される LVS5 において、確率分布が図の左側に位置している。これは様々な負荷と PV 出力の組み合わせの中で、低圧系統末端で電圧上限逸脱が生じることで、無効電力の進相制御がなされた頻度の大きいことを意味している。一方で LVS3 では電圧上限逸脱となるケースは少なく、確率分布は無効電力制御の無いことを表す 0 [p.u.]に集中した分布となっている。なお、LVS4 の確率分布は LVS3 と類似の傾向であったため省略した。



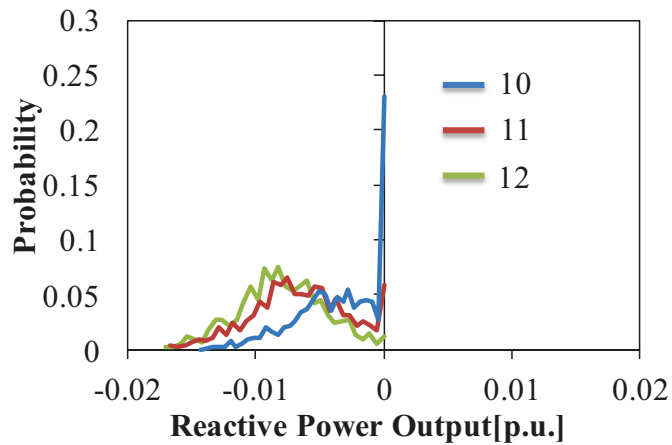
(a) LVS1



(b) LVS2



(c) LVS3



(d) LVS5

図 3.11 PCS 無効電力制御量の確率密度分布推定結果

b)出力抑制の発生確率の評価

確率密度関数を作成する際に、式(3.4)で示した PCS のインバータ容量の制約を考慮すると、合わせて有効電力の出力抑制が必要となる確率を導出できる。その結果を図 3.12 に示す。図 3.11 に示したように大きな無効電力制御の発生しやすい LVS1 および LVS5 で大きな出力抑制の発生確率が現れていることが分かる。

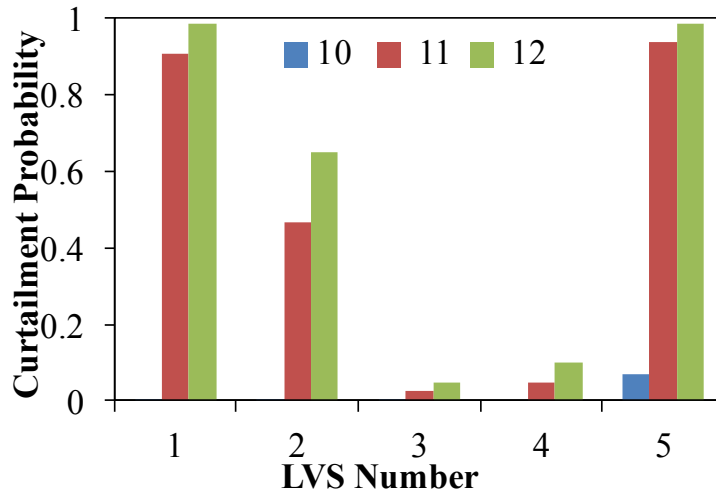


図 3.12 各低圧系統における出力抑制発生確率

c) 推定精度の確認および計算時間の比較

本論文では、確率密度関数にしたがって全ての負荷の指定値を与えると共に、センサでの計測値を最大限に活用することで、条件式が未知数より多い定式化を用いた。この解法に擬似逆行列の手法を用いてるが、擬似逆行列を活用したことによる精度の向上を検証する。サンプル数 (4000 個) の内、擬似逆行列を用いた場合と用いない場合とで、Step5 におけるしきい値以内^{[28][39]}という解の条件を満たす候補の数を図 3.13 に示した。同図より、擬似逆行列を活用することにより Step5 を満たす有効な解候補の数が大幅に増加していることが分かる。また、図 3.14 に Step5 における評価値の分布も示すが、こちらも数値が 10 分の 1~100 分の 1 まで小さくなっていることが分かる。このように擬似逆行列を用いることで、Swing bus からの潮流が指定値 (センサでの計測値) に近づくような調整が働き、モンテカルロシミュレーションの効率が大きく改善される。なお、センサ設置箇所を調整するために、逆に乱数で定めた各ノード負荷の値は当初の指定値から少し外れるが、もともと乱数で定めた指定値であるため必ず指定値に合わせる必要性は低く、影響は限定的である。

一方で、擬似逆行列を活用することにより潮流計算に要する時間は図 3.15 に示すように増加し、計算負荷は増加することになる。しかし、擬似逆行列活用前では、5000 個のサンプルに対してしきい値 0.00025 を満たす解は 255 個であり、十分な数の解候補を得るには図 3.16 に示すようにおおよそ 3000 個程度であるため、この条件を満たすには活用後よりも約 12 倍程度のサンプルを増やす必要があり、結果として計算負荷が増加することになる。また、解候補の数を、サンプル数を変えずに増やすにはしきい値を高くする必要があり、これは推定精度を悪くすることと同義である。したがって、推定に求められる計算精度が

高い場合は少ないサンプル数で十分な数の解候補を算出することが可能となるため、提案手法では、潮流計算による計算負荷は増加しつつもより精度が高く計算負荷も小さくなることが示している。

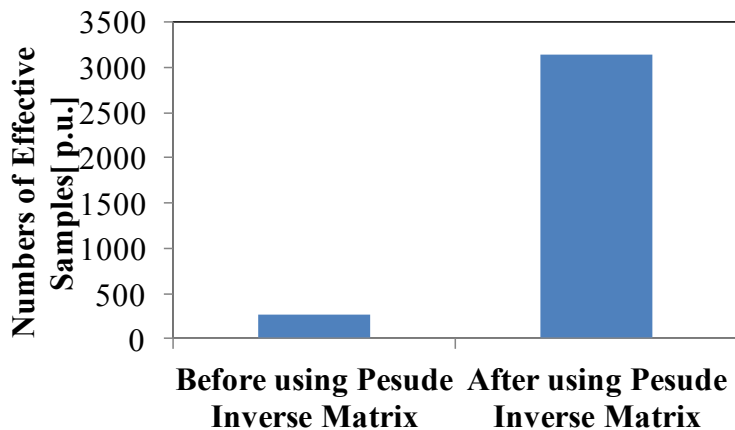


図 3.13 擬似逆行列適用前後の解候補の数の比較

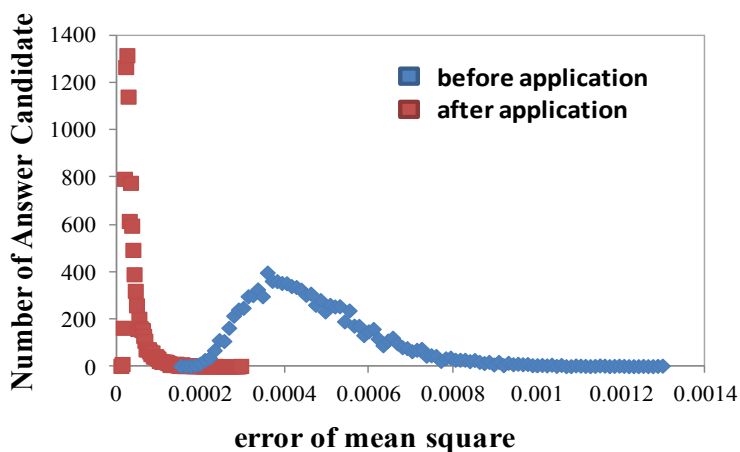


図 3.14 擬似逆行列適用前後の評価値の比較

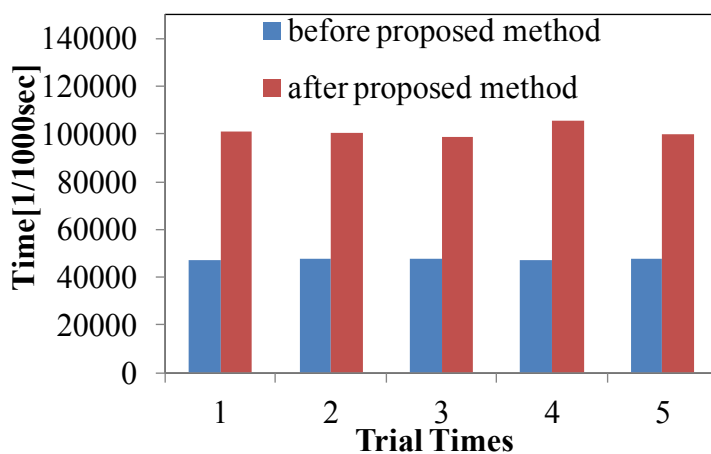


図 3.15 擬似逆行列適用前後の計算時間 (サンプル数 5000 個)

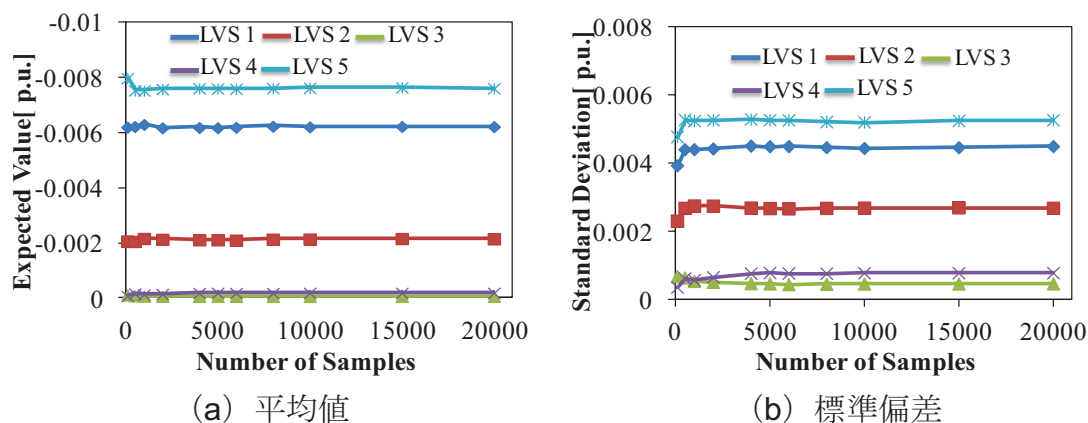


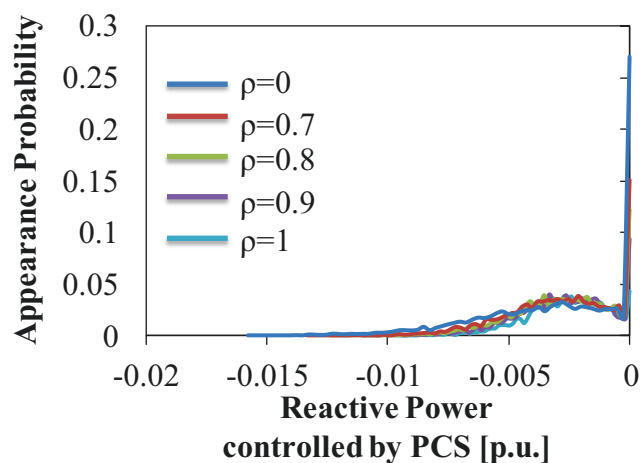
図 3.16 サンプル数と解候補の平均値，標準偏差の関係

3.7.4 負荷の相関性の考慮

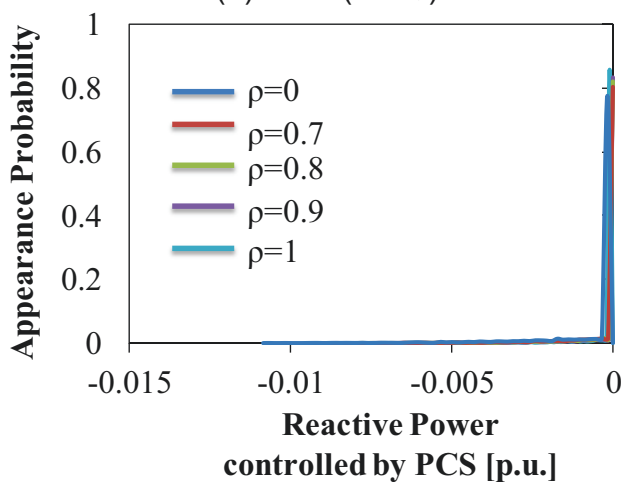
前節までは各低圧系統の負荷は互いに独立であると想定していたが，本論文では住宅地域を想定しているため実際には負荷同士に相関関係があると考えられる。そこで，本節では付録に示した方法で相関関係にある負荷変動を生成し，無効電力制御量の確率密度分布の推定結果にどのような影響を及ぼすかを検討した。なお，どの LVS の組み合わせにおける相関係数は等しいと想定し，0.7,0.8,0.9,1.0 の 4 ケース考慮した。

図 3.17～図 3.19 に推定結果を示す。なお，LVS3,4 についてはほとんど制御が発生しなかったため結果を割愛する。まず，図 3.17 より 10 時においては無効電力制御量が少ないため，相関係数による分布の違いはわずかであった。一方で，図 3.18 および図 3.19 より 11 時および 12 時では多くの無効電力を制御している LVS1,LVS5 では負荷の相関性が強くなるほど推定結果の幅が小さくなっていることが分かる。これは負荷の相関性が小さい場合，負荷変動による各低圧系統内の電圧変動の傾向が異なり，それに伴う無効電力制御量の発生確率も広範囲に及ぶのに対し，分布がならされる傾向があるのに対し，相関性が大きい場合，各低圧系統内の電圧変動が同様に生じ，電圧変動幅も小さくなり，発生する無効電力制御量の分布も相関性が小さい場合よりも幅が狭くなるためと考えられる。

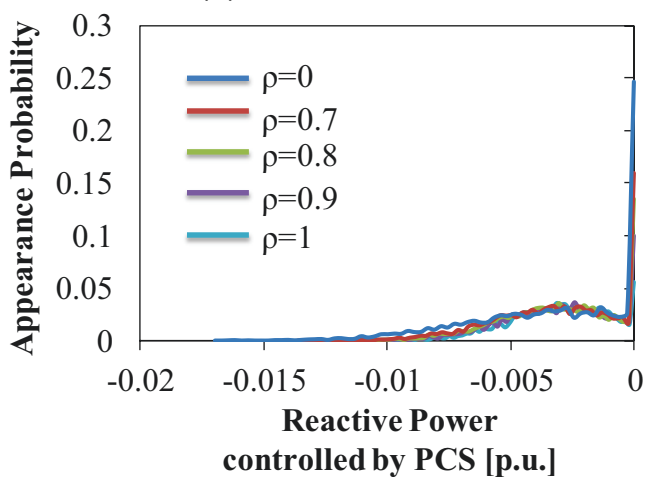
次に，出力抑制発生確率の推定結果を図 3.20 に示す。同図より 10 時における発生確率は相関によってはあまり発生確率の変化は起こらなかった。一方で，11 時，12 時における LVS5 および 11 時における LVS1 については出力抑制発生確率が増加していたが，これは図 3.18,図 3.19 において無効電力制御量の幅が狭まった影響で，出力抑制を伴う解候補の割合が増加した目と考えられる。なお，LVS2 では 11 時，12 時において異なる傾向の結果が得られたが，確率密度分布の差は小さいため，差は少ないと考えられる。



(a)LVS1 (10時)

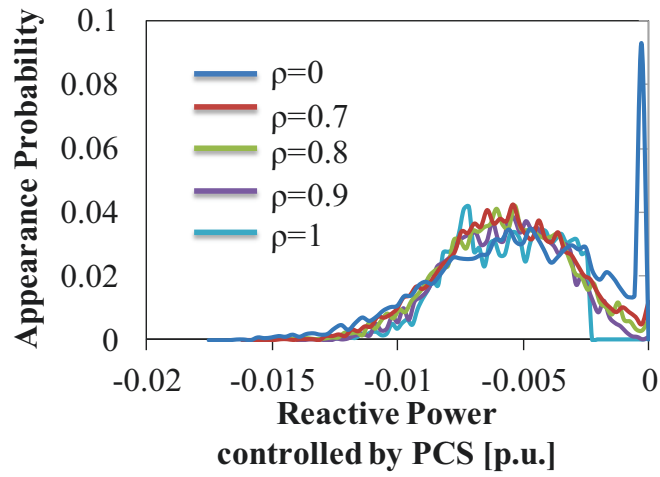


(b)LVS2 (10時)

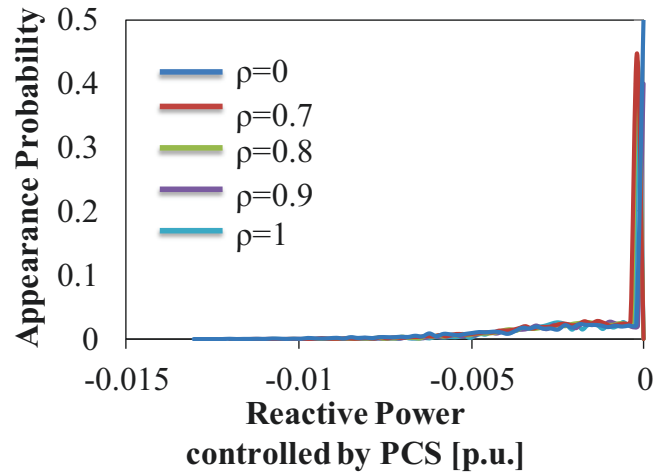


(c) LVS5 (10時)

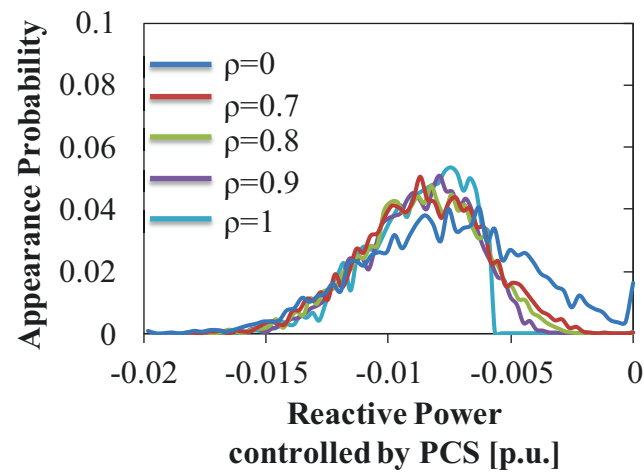
図 3.17 負荷の相関性を考慮した
無効電力制御量の確率密度分布推定結果 (10時)



(a)LVS1 (11 時)

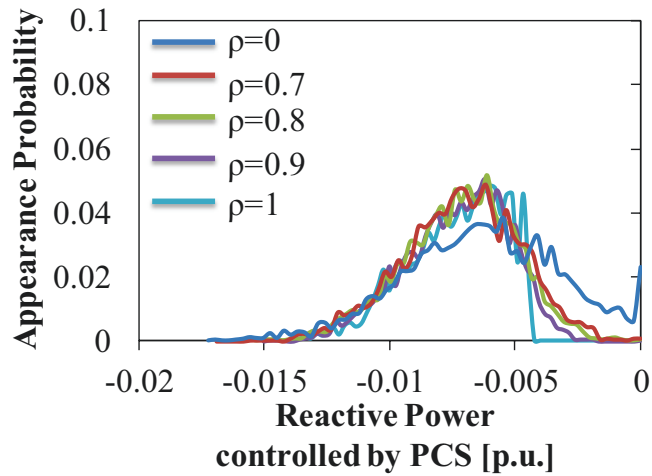


(b)LVS2(11 時)

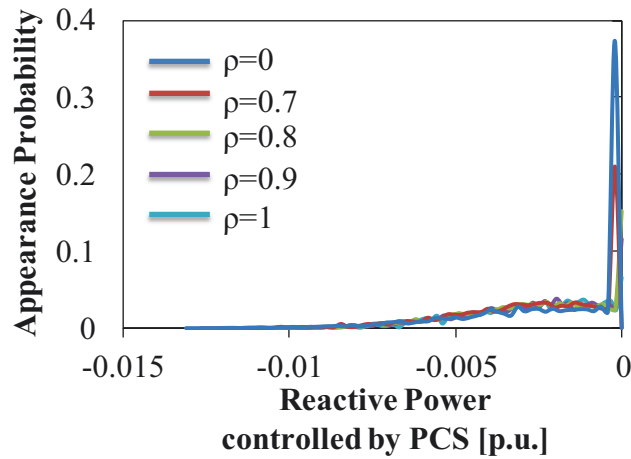


(c)LVS5 (11 時)

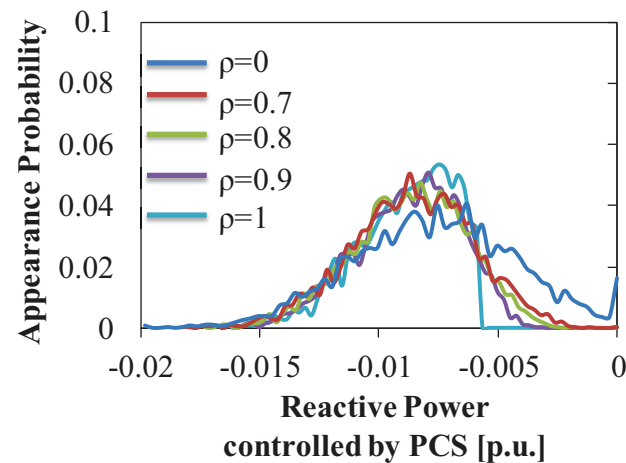
図 3.18 負荷の相関性を考慮した
無効電力制御量の確率密度分布推定結果 (11 時)



(a)LVS1

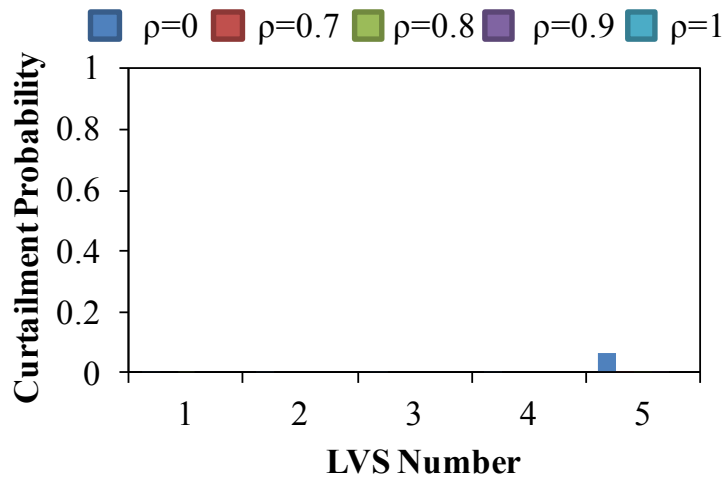


(b)LVS2

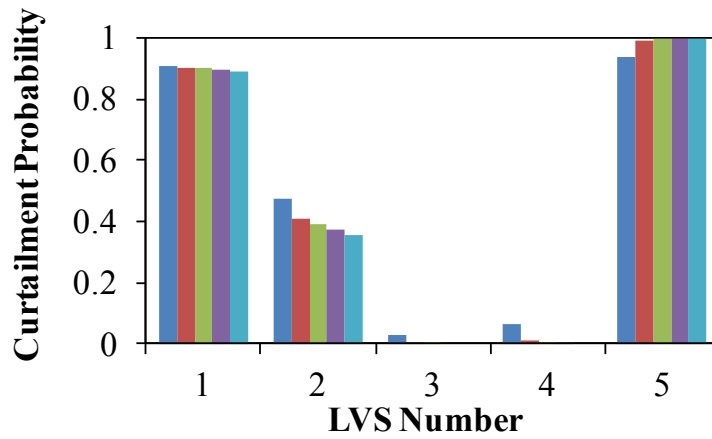


(c)LVS5

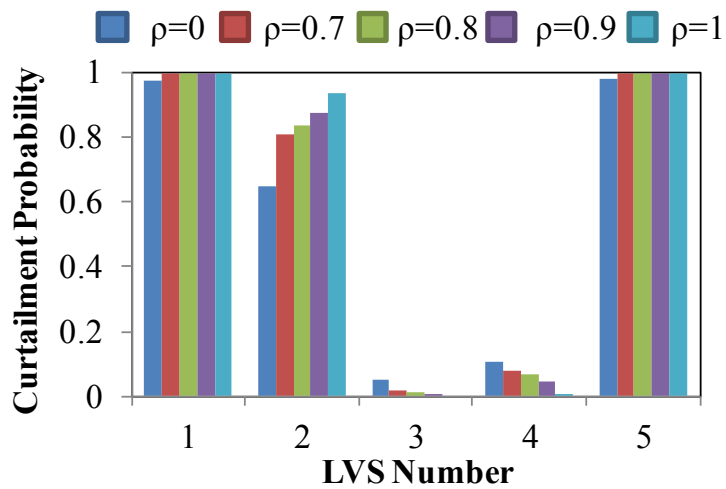
図 3.19 負荷の相関性を考慮した
無効電力制御量の確率密度分布推定結果 (12 時)



(a) 10 時における出力抑制発生確率



(b) 11 時における出力抑制発生確率



(c) 12 時における出力発生確率

図 3.20 負荷の相関性を考慮した出力抑制発生確率

3.7.5 推定結果の考察

本論文ではセンサ開閉器の計測情報を活用してPCSの電圧-無効電力制御の確率密度分布の推定手法を提案し、本章にてその有効性を数値計算により検討した。提案手法により推定結果は確率密度分布として得られるため必ずしも精緻な解とはならないが、考察を通じて以下の知見が得られた。

- 10時におけるLVS1では、期待値で考えると図3.10(b)に示す通りの無効電力制御量が生じるが、期待値周辺の確率分布の形状まで確認すると、図3.11のように無効電力制御量が0となる確率も高いことが分かる。また図3.19より、負荷の相関性を考慮したばあには相関が強くなるほど推定結果の幅が狭まる傾向があった。このようにより正確に期待値やばらつきの様子を把握することは、効率的な系統運用の実現に寄与するものと考えられる。
- 期待値に基づいた解析による図3.10(c)では、11時におけるLVS2では出力抑制は発生しない結果が得られている。しかし本提案手法を適用すると、確率的に生成した各負荷パターンごとに出力抑制の有無を確認することで、図3.12に示すように出力抑制の発生確率が評価できる。この結果11時におけるLVS2では、40%以上もの出力抑制発生確率が得られた。また、負荷の相関性を考慮した場合には図3.20に示すように推定する時間帯によって異なる傾向が得られた。このように期待値に基づいた分析では抽出しづらい事象を効率よく把握できる。
- LRTなどの系統側が備えている電圧制御機器が動作する前に、PCSの機能により電圧が適正範囲内に維持されることを想定している。そのため、この確率分布がより0に近い方にシフトするように電圧制御機器を制御することができれば、図3.12のような出力抑制の発生頻度を低減、あるいは一時的な抑制のみに限定できる可能性がある。このように、本提案手法は無効電力制御の確率的な傾向を推定することで、統計的な観点から、出力抑制低減などを目的とした協調制御の実現に寄与すると考えられる。

第4章 無効電力制御量の確率密度分布に基づくタップ切替手法

前章では、SSSの計測情報に基づいて低圧系統内のPCS無効電力制御量の確率密度分布を推定した。しかし、配電系統の運用者が系統内の電圧制御器を活用し過剰なPCSによる制御を解消・緩和するには前章で提案した推定に基づく電圧制御手法を検討する必要がある。本論文ではLRTによるタップ切替によってPCS制御の解消を検討する。これまでに提案された手法^[39]では、しきい値を満たす解候補の系統状態を解候補について各タップ切替位置毎に再度潮流計算を行い得られた分布をタップ切替後の推定結果として評価している。しかし、同手法では多数回の潮流計算に基づいており、本論文での提案手法について適用すると、タップ切替位置の候補に比例して計算負荷の増加が見込まれる。さらにこれまでの手法では潮流計算に対しSSSの計測情報が組み込まれていなかったため、タップ切替によりSSSの計測情報が変化しても適用可能であったが、提案手法に対して適用することは難しい。そこで、本章ではしきい値を満たす状態に対し提案手法を行うのではなく、得られた確率密度分布を活用したタップ切替手法を提案する。

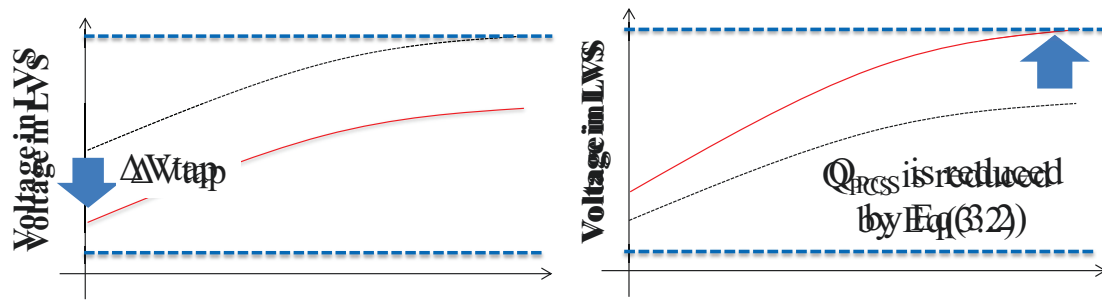
4.1 タップ切替による無効電力制御量削減効果の推定

電圧制御目標値の設定に当たり、本論文ではLRT（もしくはSVR）によって推定対象区間の電圧を調整することを考える。タップ切替により送り出し電圧を下げた瞬間には、図4.1(a)のように電圧はタップ切替による電圧変化分だけ低圧系統内の電圧分布が下にシフトし、その後式(3.2)による無効電力制御量の削減が行われ系統内の電圧分布が上限値を超えない範囲で上昇し、図4.1(b)のように変化すると考えられる。この時、タップ切替による電圧変化分だけ無効電力制御負担が減少したと考えると、両者の関係は式(3.13)をもとに式(4.1)で推定することができる。

$$\Delta Q_{PCSReduce,i} = \frac{\partial Q_{PCS,i}}{\partial V_{LV,i}} \Delta V_{tap} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

ただし、

- $\Delta Q_{PCSReduce,i}$: タップ切替により減少する無効電力制御量
- ΔV_{tap} : タップ切替による電圧調整量



(a) タップ切替を実施した瞬間 (b) タップ切替後の定常状態

図 4.1 タップ切替実施後の低圧系統内の電圧分布

4.2 無効電力制御解消を目的としたタップ切替位置の決定

式 (4.1) では、削減すべき無効電力制御量が定まれば、式 (4.2) により削減に要する低圧系統の電圧制御量を算出することが可能である。

$$\Delta V_{control,i} = \left(\frac{\partial V_{LVS_i,e}}{\partial Q_{PCSi}} \right) \Delta Q_{PCS Reduced,i} \dots\dots\dots (4.2)$$

ただし、

$\Delta V_{control,i}$: 無効電力制御量解消に必要な電圧制御量

各低圧系統毎に必要な電圧制御量を算出した場合、式 (4.3) のようにその最大値を制御すると全ての低圧系統で無効電力制御量の削減量を目標とする量以上に削減可能になると考えられる。

$$\Delta V_{tap} = \max \left(\frac{\partial V_{LVS_1,e}}{\partial Q_{PCSi}} \Delta Q_{PCS Reduced,1}, \dots, \frac{\partial V_{LVS_{N_{LVS}},e}}{\partial Q_{PCSN_{LVS}}} \Delta Q_{PCS Reduced,N_{LVS}} \right) \dots\dots\dots (4.3)$$

なお、タップ位置は離散的な値であるため、本論文では、式 (4.3) よりも大きいタップ位置を切替候補とする。

4.3 数値計算例

前章での数値計算例と同じ系統モデルにて送り出し電圧を 1.00p.u.とした際に電圧—無効電力制御が行われた時間帯のうち、10時,11時,12時の3時間帯に対して過剰な無効電力制御解消を目的としたタップ切替位置（LRTによる送り出し電圧）の算出を行った。なお、タップ位置は離散的な数値であり本論文では100V(高圧系統換算)単位で電圧調整が行われると想定した。したがって、タップ切替位置（LRTによる送り出し電圧）はp.u.値表記では表4.1のとおりである。

表 4.1 タップ切替候補

0.97	0.985	1	1.015	1.03
------	-------	---	-------	------

4.3.1 無効電力削減目標値の算出およびタップ切替位置の算出

本論文では、力率制約を超えて無効電力制御が行われている確率を0とすることを目標としてタップ切替を検討する。これは本論文ではPCSの制御方式は進相無効電力制御のみを想定したが、この場合推定結果として得られた確率密度分布の力率制約を超えて無効電力を制御する確率は付録に示した現行方式の電圧上昇抑制機能では出力制御が行われる確率と同義であり、この解消を試みることによって自端電圧の適正化のために大幅な出力抑制を避けることが可能になると考えられるためである。

各時間帯における力率制約値に当たる無効電力制御量は配電線末端のPVの有効電力出力の大きさによって式(4.4)もしくは(4.5)によって決定できる。なお、配電線末端に位置するPVの有効電力出力量は、前章にて算出された解候補のPV出力の平均値より以下式(4.6)より算出する。以上より、無効電力制御量の削減目標値は式(4.7)によって算出することができる。

a) $P_{PV,LVSi,e} > S_{maxLVSi,e}$

$$Q_{PCS,pf\,limit,LVSi} = -S_{maxLVSi,e} \cos \theta_{ma} \dots\dots\dots (4.4)$$

b) $P_{PV,LVSi,e} < S_{maxLVSi,e}$

$$Q_{PCS,pf\,limit,LVSi} = -P_{PV,LVSi,e} \tan \theta_{max} \dots\dots\dots (4.5)$$

$$P_{PV,LVSi,e} = Average(P_{PV,LVSi}) / N_{Li} \dots\dots\dots (4.6)$$

$$\Delta Q_{PCS\,Reduce,LVSi,e} = Q_{max\,LVSi,e} - Q_{PCS,pf\,limit,LVSi,e} \dots\dots\dots (4.7)$$

ただし、

$P_{PV,LVSi,e}$: 配電線末端の PV 出力

$\Delta Q_{PCSReduced,LVSi,e}$: 力率制約解消に要する無効電力削減量

$Q_{maxLVSi,e}$: 推定した確率密度分布における最大値

$Q_{PCS,pflimit,LVSi,e}$: 力率制約に当たる無効電力制御量

以上に示した数式を用いて各時間帯における無効電力制御の削減目標量と電圧制御量を算出すると表 4.2～表 4.4 のようになった。これらの表より高圧系統の下流側に位置する LVS5 が最も多くの無効電力削減量が必要となり電圧調整量が多いことが分かる。また、LVS3,4 では、PCS の制御量こそ少ないが、PCS 容量も小さいため力率制約値に対して多くの無効電力削減量が必要となり、その調整に要する電圧制御量が大きくなっていることが分かる。一方で、LVS1 では、PCS 容量が大きいため力率制約値に対して余裕があるため必要な電圧制御量は小さくなっている。さらに、次に推定結果に基づいて算出されるタップ切替位置は表 4.5 のようになり、LVS5 を対象としたタップ切替を行えばよいことが分かる。

表 4.2 無効電力制御の削減目標量と電圧制御量 (10 時)

	LVS1	LVS2	LVS3	LVS4	LVS5
$\Delta Q_{Reduced}$	-0.00022	-0.0006	-0.002395	-0.004346	-0.006755
$\Delta V_{control}$	0.000412	0.00117	0.004889	0.009143	0.014636

表 4.3 無効電力制御の削減目標量と電圧制御量 (11 時)

	LVS1	LVS2	LVS3	LVS4	LVS5
$\Delta Q_{Reduced}$	-0.00263	-0.003	-0.003253	-0.005344	-0.0096
$\Delta V_{control}$	0.005032	0.00603	0.00664	0.011244	0.020801

表 4.4 無効電力制御の削減目標量と電圧制御量 (12 時)

	LVS1	LVS2	LVS3	LVS4	LVS5
$\Delta Q_{Reduced}$	-0.00251	-0.0031	-0.00349	-0.005607	-0.009711
$\Delta V_{control}$	0.004802	0.00604	0.007123	0.011797	0.021042

表 4.5 LRT 送り出し電圧算出結果

時間帯	10時	11時	12時
送り出し電圧[p.u.]	0.985	0.97	0.97

4.3.2 推定結果に基づくタップ切替結果

表 4.5 によってタップ切替を実施した結果、力率制約違反は図 4.2 から図 4.3 のようになった。推定結果に基づくタップ切替により LVS5 を中心に大幅に制約違反確率が低下していることが分かる。また、タップ切替により無効電力制御量が低減した結果、出力抑制発生確率も低減したことを確認した。

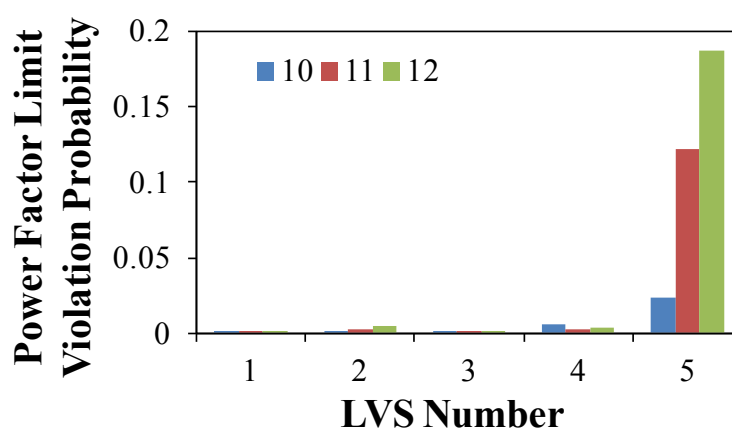


図 4.2 力率制約違反確率（制御前）

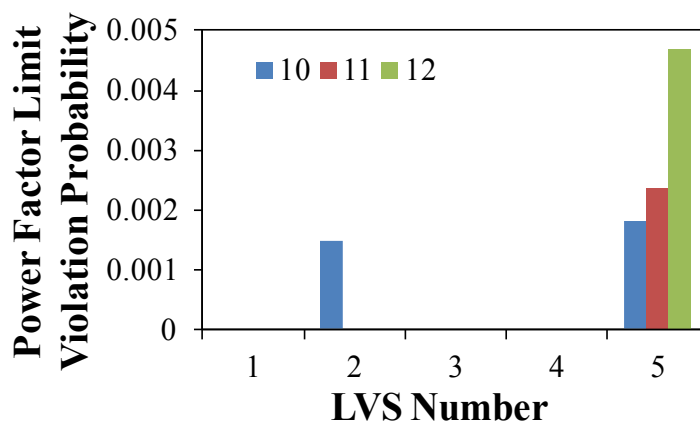


図 4.3 タップ切替後の力率制約違反確率

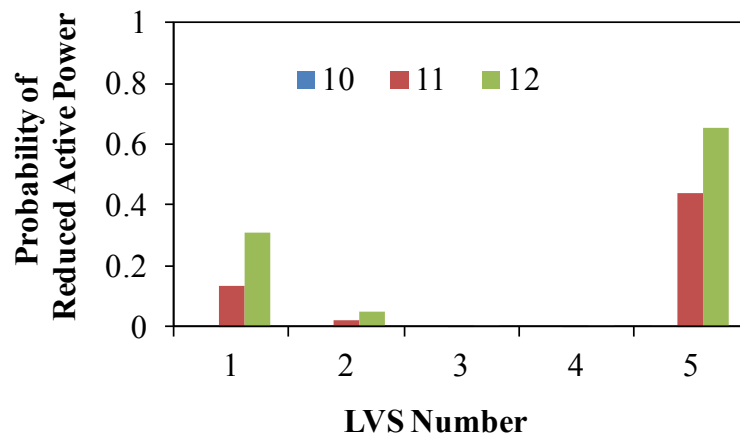


図 4.4 タップ切替後の出力抑制発生確率

第5章 まとめと今後の課題

第一部では、高圧系統で用いられている既存の区分開閉器を、電圧・電流・力率が測定可能なセンサ付区分開閉器（SSS: Section Switchgear with Sensor）に更新することが進められていることに注目し、LRT等のタップ切替判断に活用できるよう、その計測情報を活用したPCS無効電力制御状態の推定手法を提案した。一般に、SSSの数と比べて推定対象であるPCSの数は極めて多く、全てのPCSの制御状態を一意に推定することは難しい。しかしLRTのタップ切替の制御判断を考える際には、タップ制御によりPCSの無効電力制御量を低減できるかどうかの判断が重要であり、必ずしも精緻な推定は必要とはならない。そこで本論文ではLRTのタップ切替位置を適切に調整するために、PCSの無効電力制御量の“確率分布”の推定手法を検討した。具体的には、高圧系統の電圧変動や低圧系統の負荷変動に対するPCSの無効電力制御動作を定式化し、これを潮流計算に組み込んで擬似逆行列で求解する手続きを繰り返すことで、モンテカルロ法による確率分布の導出を行った。

数値計算例を通じて確定論的な解析ではPV出力が発生しないものの、提案手法により得られた制御状態の確率密度分布によりPV有効電力出力抑制のリスクの存在を評価可能となる。また、新たに推定した確率密度分布および感度計算を活用したタップ切替制御を提案した。この手法では、これまでに報告者が提案してきたタップ切替手法よりも計算負荷が少なく、上記に示した推定手法が適用可能であることから、数値計算例を通じてタップ切替による無効電力制御の緩和によってより統計的リスクの低い電圧制御を実現した。

今後の課題としてはPVの日射変動の周期の解析を通じて適切な推定間隔およびタップ切替制御を行う周期を決定することが挙げられる。

第二部

風力発電を含む電力系統の 確率的需給制御手法

要約

持続可能なエネルギー社会を目指して我が国においても 2012 年 7 月より再生可能エネルギー (RE) の固定価格買取制度が始まり^[1] その導入が年々拡大している。2030 年度の電源構成においても総発電電力量の 22~24%を再生可能エネルギーによって賄い、そのうち約 40%を風力発電および太陽光発電で発電することが期待されている^[2]。電力は性質上貯蔵することが難しいため常に発電した電力は一瞬で消費しなければならない。しかし、風力発電や太陽光発電等の自然エネルギーはその出力は気象条件に左右されるため、変動しやすく間欠性のある電源であるため電力系統の運用に影響を及ぼすことが懸念されている。このような背景から、再生可能エネルギー大量導入を想定した系統運用手法が検討されている^{[40]~[46]}。従来の電力系統での需給運用は安定運用維持のため N-1 基準を満たすことが求められている。N-1 基準とは想定しうる全ての単一故障に対し、電力潮流の熱容量制約 (送電線の潮流制約)、電圧安定制約、周波数維持制約、同期安定度制約の 4 つの安定制約を全てを満たすよう要求する確定論的な信頼度基準である。風力発電導入の拡大により需給運用における不確実性が拡大し、従来の N-1 基準による確定論的な想定だけでは不十分となると考えられるため、「事故の発生」および「再生可能エネルギーの出力変動」の双方を考慮した系統運用手法が求められている。本論文では、その出力の不確実性と系統事故の発生双方を考慮した需給制御手法を検討した。具体的には、これまで提案されてきた確率的経済負荷配分手法に対してより大規模な系統モデルにおいての有効性の検討、および、市場メカニズムによる需給制御モデルの構築を行った。

両手法において数値計算を実施することで、燃料費の増加や社会余剰の減少量の最小化を実現しつつ、風力発電出力変動による N-1 基準制約違反リスクの制御を実現しその有効性を示した。

第一章 序論

持続可能なエネルギー社会を目指して我が国においても2012年7月より再生可能エネルギー（RE）の固定価格買取制度が始まり^[1]その導入が年々拡大している。2030年度の電源構成においても総発電電力量の22～24%を再生可能エネルギーによって賄い、そのうち約40%を風力発電および太陽光発電で発電することが期待されている^[2]。電力は性質上貯蔵することが難しいため、時々刻々と変動する需要に対し、常に供給力を確保して需要と供給力の均衡を図り、水力発電、火力発電、原子力発電などの供給力を総合的に組み合わせて信頼性および経済性の高い運用^[30]が行われている。この一連の業務は需給運用と呼ばれているが、風力発電や太陽光発電といった再生可能エネルギーの出力は気象条件に左右されるため、変動しやすく間欠性のある電源であるため、その増加に伴い電力系統の需給運用に影響を及ぼすことが懸念されている。このような背景から、再生可能エネルギー大量導入を想定した系統運用手法が検討されている^{[40]~[46]}。従来の電力系統での需給運用は安定運用維持のためN-1基準を満たすことが求められている。N-1基準とは想定しうる全ての単一故障に対し、電力潮流の熱容量制約（送電線の潮流制約）、電圧安定制約、周波数維持制約、同期安定度制約の4つの安定制約を全てを満たすよう要求する確定論的な信頼度基準である。風力発電導入の拡大により需給運用における不確実性が拡大し、従来のN-1基準による確定論的な想定だけでは不十分となると考えられるため、「事故の発生」および「再生可能エネルギーの出力変動」の双方を考慮した系統運用手法が求められている。このような背景からこれまでにN-1基準の安定制約（特に熱容量制約）を確率論的に考慮した確率的経済負荷配分手法を提案し、比較的長周期の変動成分に対する系統運用手法の高度化を検討を行ってきた。しかし、2016年4月より全国大での需給調整機能を強化する目的として電力広域的運営推進機関が発足した。これまでの研究では小規模での解析を中心としていたため、大規模な電力系統モデルにおいても同手法の有効性を確認できれば、今後の広域系統運用の高度化を実現できる。したがって、本論文では、まず、電気学会標準モデルEAST30系統にて数値計算を実施して確率的系統運用手法の有効性を行う。

一方で、近年の電力システム改革の流れから電力卸市場の活性化のために1時間前市場や広域市場の創設が検討されている。これらの市場創設により広域的な発電の最適化（広域メリットオーダー）やこれまで以上に発電計画の最適化の実現が期待され、将来的には欧州のように電力市場が需給管理において一定のシェアを持つことが期待できる。しかし、市場メカニズムによる需給管理を実現するためには、先述したように「事故の発生」および「再生可能エネルギー

の出力変動」の双方のリスクを考慮することが求められる。そこで本論文では、さらに、先行する研究で提案されており、大規模システムモデルにて有効性の検討を行った確率的経済負荷配分手法の考えを取り入れた市場モデルの構築および有効性を検討する。具体的には、社会余剰最大化を目的としたシングルプライスオークションを構築し、 $N-1$ 基準制約を違反するリスクが生じた場合、社会余剰の減少量が最小になるよう取引を調整する市場を構築を提案した。

以下に本論文の構成を示す。まず、第 2 章にて大規模システムモデルにおいて確率的経済負荷配分手法の有効性を検討する。第 3 章にて本論文で提案する市場モデルによる需給制御を示し、第 4 章にて結論を述べた。

第2章 大規模システムモデルにおける確率的システム運用手法の有効性の検討

需給運用では電力システムの周波数変化を起こす負荷変動はいくつかの成分に切り分けてその変動周期ごとに需給制御手法を確立し需要と供給の均衡を図っている。具体的には周期が数分までの微小変動分、数分から10分までの短周期変動分、および十数分以上の長周期変動成分に分けられている^[29]。このような変動に対し、長周期変動は経済性を考慮した経済負荷配分(ELD : Economic Load Dispatch)、周波数偏差を検知して発電機の出力を調整する負荷周波数制御

(LFC : Load Frequency Control) を組み合わせて需要と供給のバランスを取る。なお、微小変動分のような速い負荷変動に対しては発電機の調速機運転 (GF : Governor Free) およびシステムの自己制御性によって吸収される。

文献(4)では風力発電が導入された電力システムにおいて上記の制御のうち風力発電出力の変動を図2.1のように短周期変動と想定し、その確率的な変動を考慮した確率的経済負荷配分手法を提案した。同文献では小規模モデルにおいての想定であったが、今後より広域運用への適用を視野に入れた場合、大規模電力システムモデルにおいて確率的経済負荷配分手法が有効になるかを検証する必要がある。ゆえに本論文では、電気学会標準モデルである EAST30 モデル^[47]において、同手法を適用し、その有効性と計算負荷について検討した。

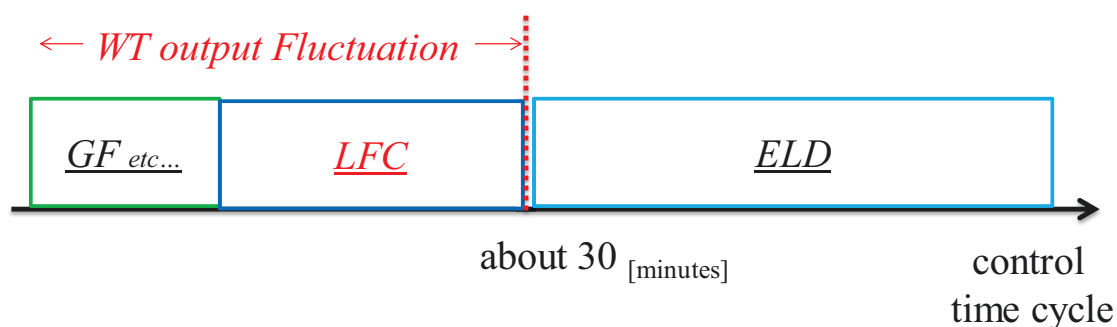


図 2.1 制御周期と風力発電出力変動

2.1 確率的経済負荷配分手法^[4]

2.1.1 運用制約の設定

電力品質を維持し、安定に電力を供給するために、電気的には熱容量、電圧、周波数、電圧安定性、短絡容量が考慮される^[30]。これらは系統運用上の制約として扱われるが、運用制約としてはこれらのうち最も厳しいもの（制約値として最小なものが）が運用上の扱われる。これらのうち本論文は文献（4）と同じく電力設備を通過する電流の上限に相当^[30]する熱容量制約について検討する。系統事故については線路のみに限定し、N-1 基準における運用制約は送電線の熱容量が半減される場合を想定した。

2.1.2 経済負荷配分問題の定式化

文献（4）の手法では、電圧安定性制約の評価も行うため系統内の潮流計算は交流法^[37]が用いられていたが、本論文では系統規模が大きく交流法の潮流計算に多大な時間を要すること、また、N-1 基準のうち潮流量の制約を対象とすることから、潮流計算は直流法^[37]で行った。したがって直流法に基づく火力発電機の経済負荷配分は以下のように定式化することができる。なお、目的関数である火力発電機の燃料費関数は 2 次関数とした。

【目的関数】

$$C_{ELD} = \sum_{i=1}^{N_G} F(P_{Gi}) \rightarrow \min \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

ただし、

$$F(P_{Gi}) = a + bP_{Gi} + cP_{Gi}^2 \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

【制約条件】

・ 需給制約

$$\sum_{m=1}^{N_D} P_{Dm} = \sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi} + \sum_{m=1}^{N_{WT}} P_{WTm} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

・ 潮流方程式

$$P_k = \sum_{j=1(k \neq j)}^n \frac{\delta_k - \delta_j}{x_{kj}} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

・ 有効電力潮流制約（熱容量制約）

$$-P_{flow,tm,limk-j} < P_{flowk-j} = \frac{\delta_k - \delta_j}{x_{kj}} < P_{flow,tm,limk-j} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

・ 発電機上下限制約

$$P_{Gi\min} < P_{Gi} \leq P_{Gi\max} \dots\dots\dots (2.6)$$

ただし,

C_{ELD} : 発電機の総燃料費コスト

$F(P_{Gi})$: 火力発電機の燃料費,

P_{Gi} : 発電機 i の有効電力出力,

a, b, c : 発電機燃料費係数

P_{Dm} : ノード m の負荷

P_{WTn} : ノード n の風力発電出力

N_D : 負荷ノード数

N_{WT} : 風力発電ノード数

P_k : ノード k の有効電力指定値

δ_k : ノード k の位相

x_{kj} : ノード $k - j$ 間のリアクタンス

$P_{flowk-j}$: ノード $k - j$ 間を流れる有効電力潮流

$P_{flow,tm,limit}$: 熱容量制約

P_{Gimin}, P_{Gimax} : 発電機上下限出力

なお、確率的経済負荷配分手法^[4]のフローチャートは図 2.2 を示す。各 Step の詳細は付録に記載するため本章では省略する。なお、本論文では ELD 計算はメタヒューリスティクス手法の 1 つである PSO を用いた。

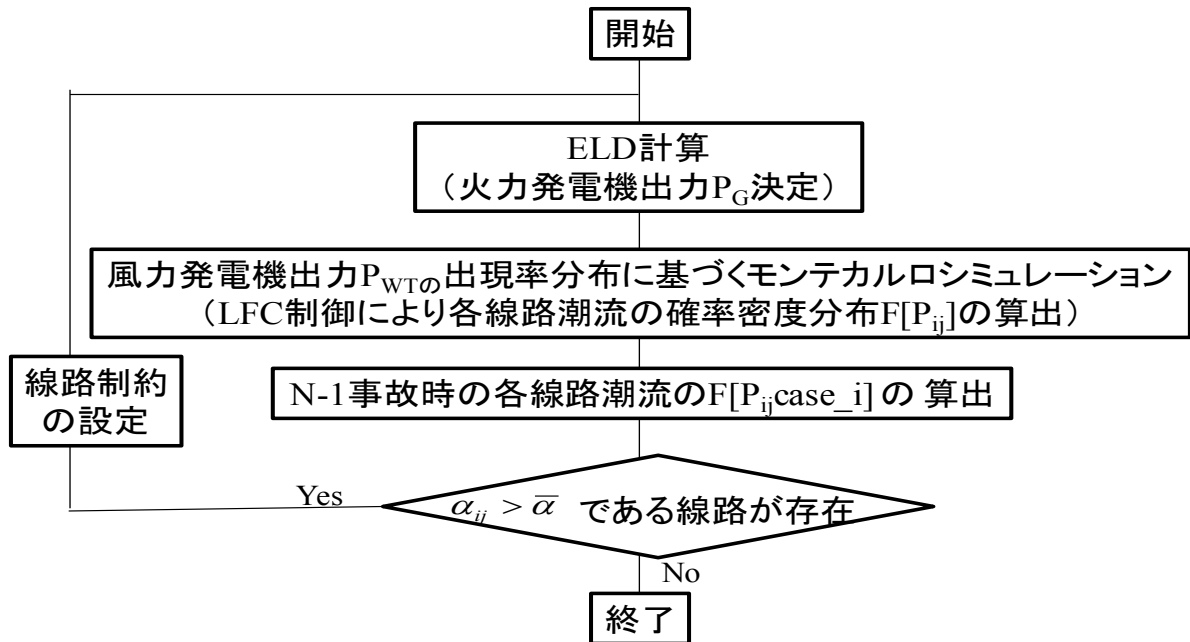


図 2.2 確率的経済負荷配分手法のフローチャート

ただし、

$F[P_{ij}]$: 線路事故時における各線路潮流の確率密度分布

α_{ij} : 線路 $i-j$ における $N-1$ 制約違反確率

$\bar{\alpha}$: 線路制約違反確率の許容値

2.1.3 風速の出現率分布と風力発電機出力の確率密度分布の算出

本論文では風速発電機出力は付録で示すように下式のレイリー分布に従うと想定した。

$$f(V) = \frac{\pi V}{2 \bar{V}^2} \exp\left\{-\frac{\pi V^2}{4 \bar{V}^2}\right\} \dots\dots\dots (2.7)$$

ただし、

V : 風速, \bar{V} : 平均風速

また、風力発電所の発電電力は風速と関連がありその出力は下式のように風速の 3 乗に比例する。なお、本論文では、風車の具体的な想定はせず、式 (2.8) 中の係数は比例定数として式 (2.9) で求める。

$$P_{WT} = \frac{1}{2} C_p \beta A V^3 \dots\dots\dots (2.8)$$

$$k_{WT} = C_p \beta A = \frac{2S_{WT}}{V_{RatingSpeed}^3} \dots\dots\dots (2.9)$$

ただし

C_p : 出力係数

β : 空気の密度

A : 風車の回転断面積

V : 風速

K_{wt} : 風速と風力発電機出力に関する 比例定数

2.2 数値計算

2.2.1 解析モデル

本論文では図 2.3 に示す EAST30 モデルの夜間断面を対象に解析を実施する。発電機の種類および燃料費係数は表 3.1 であり，時間断面は PV 出力を考慮しないため，夜間断面を想定し負荷は 85% に調整した。風力発電機は Tohoku Area のみ定格容量にて 6GW 連系し，負荷の大きさに応じて各ノードに連系しているとした。1 回線あたりの熱容量制約は 500kV 送電線では 3.35GW，275kV 送電線で 1.5GW とした。また，本論文ではベース電源が連系している箇所と 2109-3104 ノード間は地域関連系統と定め，これらの線路では潮流量制約は考慮しない。PSO パラメータは表 3.2 に示す。なお，モンテカルロ法におけるサンプル数は 10000 とした。

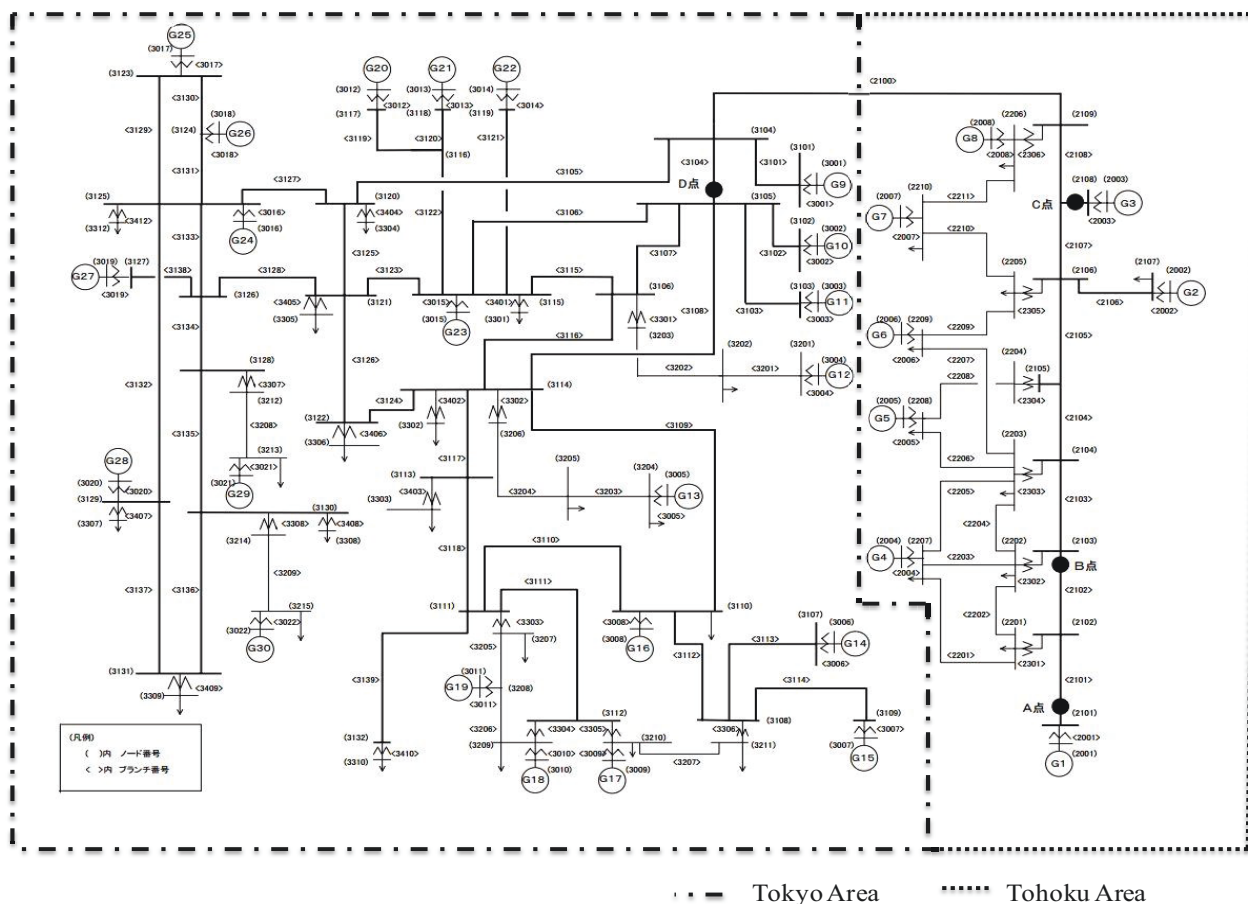


図 2.3 電気学会標準モデル EAST30 モデル^[47]

表 2.1 発電機の種類及び燃料費係数

	Generator Capacity	Generator kind	a [10 ³ yen]	b [10 ³ yen/GW]	c [10 ³ yen/GW ²]
G1	4.00	Nuclear	-	-	-
G2	2.50	LNG	468	2400	100
G3	2.00	LNG	351	2400	133.3
G4	3.00	LNG	585	2400	80
G5	2.00	Nuclear	-	-	-
G6	0.50	Coal	-	-	-
G7	0.50	Coal	-	-	-
G8	1.00	LNG	234	2400	200
G9	2.76	Nuclear	-	-	-
G10	8.31	Nuclear	-	-	-
G11	4.50	LNG	819	2400	57.1
G12	3.70	LNG	702	2400	66.7
G13	2.40	LNG	468	2400	100
G14	3.70	LNG	702	2400	66.7
G15	5.00	LNG	936	2400	50
G16	3.40	LNG	585	2400	80
G17	2.40	LNG	468	2400	100
G18	2.43	LNG	468	2400	100
G19	2.88	LNG	585	2400	80
G20	1.05	Hydro	-	-	-
G21	1.00	Hydro	-	-	-
G22	0.90	Hydro	-	-	-
G23	0.68	Hydro	-	-	-
G24	1.20	Hydro	-	-	-
G25	7.11	Nuclear	-	-	-
G26	1.60	Hydro	-	-	-
G27	2.15	Hydro	-	-	-
G28	2.50	Hydro	-	-	-
G29	5.00	LNG	936	2400	50
G30	2.00	LNG	351	2400	133.3

表 2.2 PSO パラメータ

ω	c1	c2	M	m
0.6	2	2	200	25

2.2.2 風速の出現率分布と風力発電出力

平均風速を 6m/s ，各地点間の風速が完全相関と設定すると，系統内の風速の出現率分布は図 2.4 のようになる。地域内の風力発電機出力合計値の出力分布は図 2.5 のようになった。この時の合計値の分布の期待値は 1.27GW となった。以上の条件により数値計算を行った結果を次節に示す。

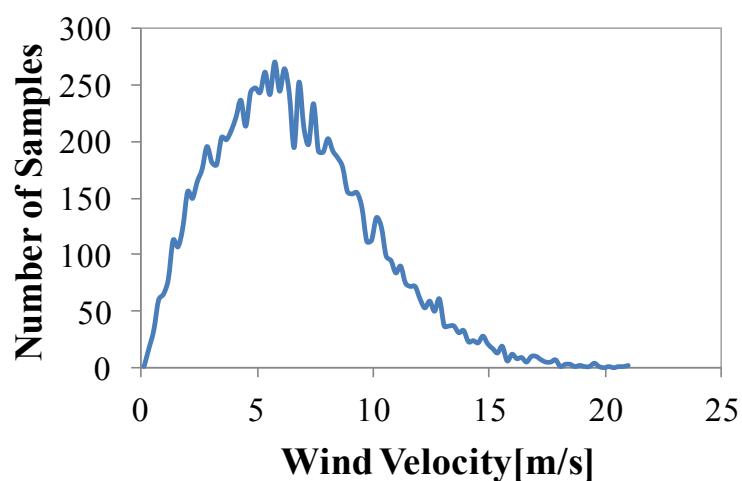


図 2.4 風速出現分布

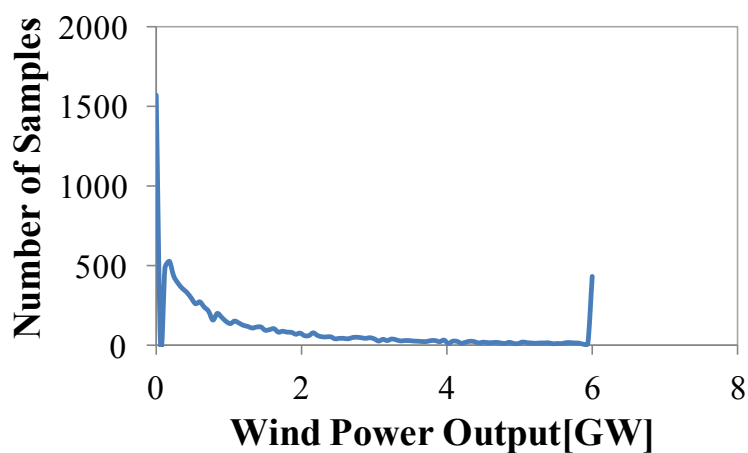


図 2.5 風力発電機出力分布

2.3 数値計算結果

2.3.1 ELD 計算結果および N-1 基準違反確率の評価

従来の ELD 計算結果を図 2.6 に示す。総燃料費コストは 58131 千円であった。図 3.5 において、Tohoku Area の発電機が出力が 0 であるのはエリア内の発電機の燃料費コストが高い経済性の面と、連系線付近に大きな潮流が発生し熱容量制約を違反しやすくなる制約面の双方が原因と考えられる。図 2.6 の火力発電機出力結果に対し、風力発電機の確率的変動及び、送電線事故ケース 67 件（地域関連系線を除く）を考慮し、モンテカルロ法にて熱容量制約をサンプル数をパラメータとして制約違反確率を計算した結果を図 2.7 に示す。熱容量制約違反が発生するブランチは 2105-2106 ノード間事故時の 2105-2106, 3201-3202 ノード事故時の 3201-3202 の 2 箇所であった。なお、計算時間は PSO による ELD 算出に約 30[sec], その後モンテカルロ法による違反確率の算出に約 60[sec]の合計約 90[sec]であった。

また、事故時の熱容量制約違反が発生した線路の電力潮流を Fig.6 および Fig.7 に示す。図 2.7 では風力発電機出力の変動による潮流変動が大きく、違反したと考えられる。また、図 2.8 に示した 3201-3202 ノード間の制約違反確率は、G12 は 3201-3202 に連系していること、風力発電がこの地域内で連系されていないことから LFC 制御が原因と考えられる。

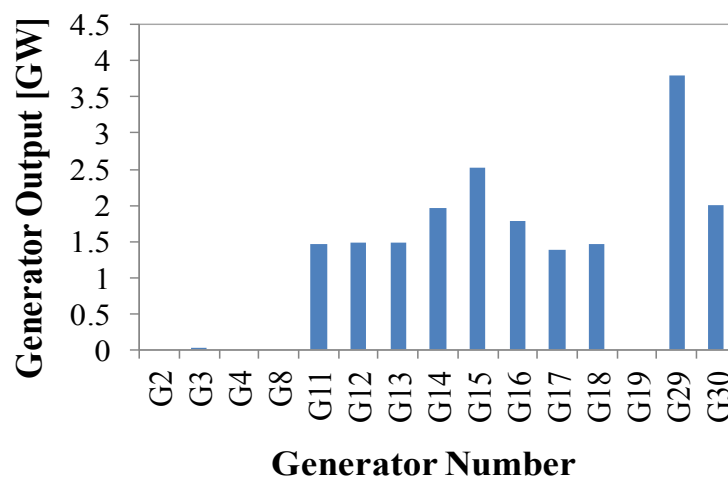


図 2.6 ELD 計算結果

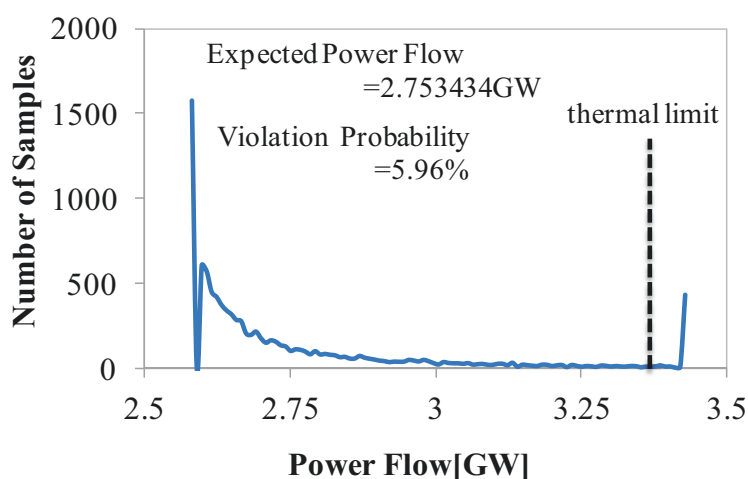


図 2.7 2105-2106 線路事故時の電力潮流分布

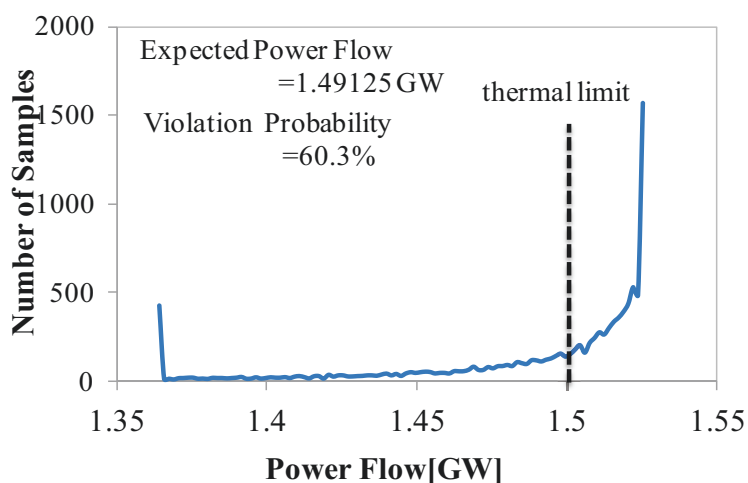


図 2.8 3201-3202 線路事故時の電力潮流分布

2.3.2 ELD 再計算結果

違反許容確率を 10% と設定し、潮流制約を表 3.3 のように設定し、ELD 再計算を行った。計算結果は図 2.9 に示す通りであり、総燃料費コストは 58255 千円であった。また、再計算後の 3201-3202 ノード間の潮流出現分布は図 2.10 となり、同図では、期待値を調整した分だけ潮流分布が潮流量が減少する方向に移動したことで許容値以下となり、LFC 制御に起因する潮流違反確率は解消された。ゆえに EAST30 モデルにおいても確率的経済負荷配分手法によって N-1 制約違反確率を制御できたと考えられる。

表 3.3 新しい運用制約

2105-2106	3201-3202
2.997GW	1.466GW

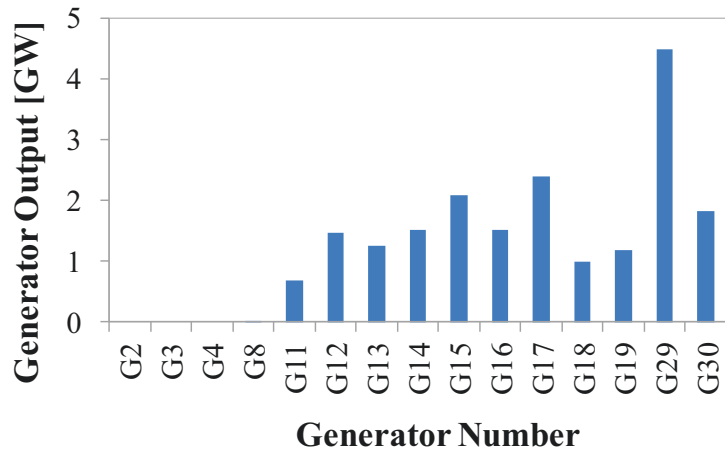


図 2.9 ELD 再計算結果

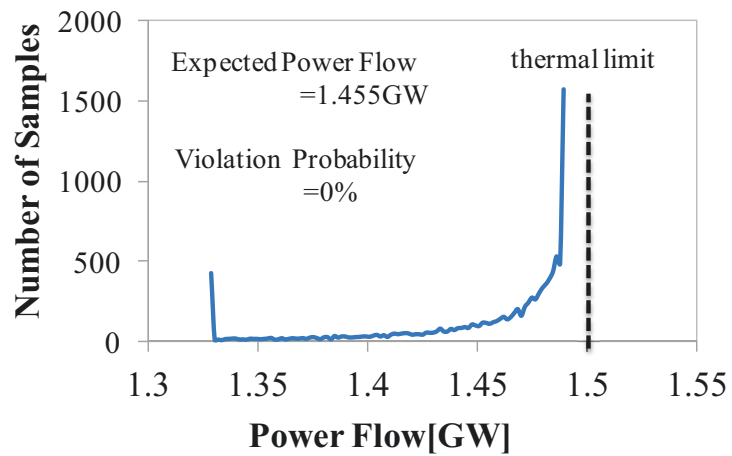


図 2.10 ELD 再計算後の 3201-3202 電力潮流分布

2.4 計算結果のまとめ

本章では、文献(4)で提案された確率的系統運用手法が大規模な電力系統においても有効かどうかを検証するために EAST30 モデルに適用し、数値計算を実施した。計算結果では、新しい潮流制約を設定し、再度経済負荷配分を実施することで LFC 制御に起因する制約違反確率を許容値以下にすることを実現でき、確率的経済負荷配分手法は有効であったと考えられる。数値計算を通じて得られた課題として以下の 3 点が挙げられる。

- ・本章では簡単のためエリア内の風速はどの地点においても完全相関であると想定したが、実際には地点間の相関性はある程度存在すると考えられる。今後は地点間の相関性を考慮した解析を検討することが課題としてあげられる。

- ・本論文でテストケースとして用いた EAST30 モデルは放射状系統に近く、ループ潮流発生個所が少なく、熱容量制約のみで経済負荷配分を実行したとしても潮流制約違反が発生しにくい。今後はループ潮流がしやすい他の送電系統モデルでの検討を行う必要がある。

- ・本論文では、N-1 基準制約違反確率が制約条件として考慮せずに ELD 計算を行ったため、適切な運用制約を設定できなければ経済負荷配分の再計算を繰り返し行う必要があり、計算負荷がさらに増大する。故に、今後は経済負荷配分の計算時に違反確率を制約条件として考慮する手法が求められる。しかし、モンテカルロ法に基づいて確率を算出する手法では膨大な計算負荷が生じるため、現実的ではない。従って、今後は確率的変動を解析ベースで扱い、確率的経済運用手法の効率化を検討する。

第3章 市場メカニズムに基づく需給制御手法

電力システム改革の一環として、卸電力市場に新たな取引市場を新設の検討など市場の活性化に向けた取り組みがなされている^{[5], [6]}。特に時間前市場やリアルタイム市場など実需給に近い領域での取引が新設されることで卸売電力市場でより経済性の高い電源調達の実現が期待できる。本論文では、このような背景から将来需給制御における市場のシェアが大部分を占めたと想定すると、序論および第3章で述べたように再生可能エネルギーの変動を考慮したうえでN-1基準を満たす運用を実現する必要があると考えられる。そこで、本章では、比較的長周期の負荷変動を対象とした確率的経済負荷配分手法をベースとした市場モデルを構築し、市場メカニズムによる需給制御手法を検討する。

3.1 市場モデルの概要

本論文で構築するモデルでは、長周期成分を対象とした取引について検討する。以下に留意してモデルを構築していく。

- N-1基準のうち熱容量制約を対象とする。
- N-1基準制約のうち熱容量制約を確定論的な制約としてではなく確率論的な視点に基づいて決定される安定制約として扱う。
- 市場参加者の社会余剰（生産余剰と消費余剰の）の和を最大化するよう市場運用者は約定量および約定価格を決定する。
- 約定時にN-1基準制約違反確率寄与するものについては社会余剰の減少量の最小化を考慮しつつ取引の制限を実施する（再約定の実施）

3.2 市場参加者の入札行動

市場の運用者は市場参加する消費者，発電事業者の社会余剰が最大化するように取引量および価格を決定するものとした。以下に各参加者の入札行動を示す。

3.2.1 消費者の入札行動

各消費者が自らの限界効用曲線をもとに入札を行うと想定する。電力を消費し得られる効用を式 (3.1) のように二次関数に近似する^[48]と，各消費者の限界効用関数は図 3.1(a)のように線形になり，式 (3.2) で示すことができる。

$$U_j(q_{dj}) = \alpha_{dj}q_{dj}^2 + \beta_{dj}q_{dj} + \gamma_{dj} \dots\dots\dots (3.1)$$

$$MU_j(q_{dj}) = 2\alpha_{dj}q_{dj} + \beta_{dj} \dots\dots\dots (3.2)$$

ただし，

- MU_j : 消費者 j の限界効用関数
- U_j : 消費者 j の効用関数
- q_{dj} : 消費者 j の買い入札量

3.2.2 発電事業者および風力発電事業者の入札行動

消費者と同様に式(3.3)のように燃料費関数を二次関数に近似する^[48]と，入札曲線と想定する限界費用曲線は図 3.1(b)に示すようになり，式(3.4)となる。

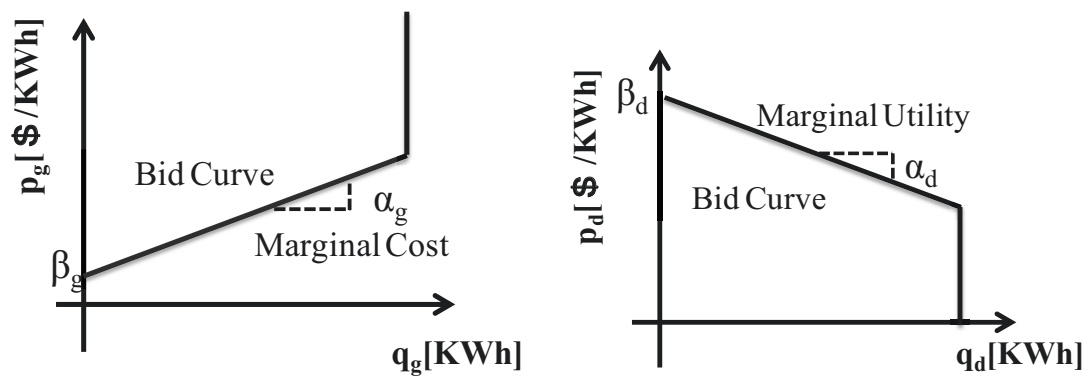
$$C_i(q_{gi}) = \alpha_{gi}q_{gi}^2 + \beta_{gi}q_{gi} + \gamma_{gi} \dots\dots\dots (3.3)$$

$$MC_i(q_{gi}) = 2\alpha_{gi}q_{gi} + \beta_{gi} \dots\dots\dots (3.4)$$

ただし，

- MC_i : 発電事業者 i の限界費用関数
- C_i : 発電事業者の燃料費関数
- s : 発電事業者 i の売り入札量

一方で，風力発電事業者の入札行動については再生可能エネルギーが優先的に取引されると想定し，本論文では全量を約定させるため，価格 0 で入札するものとした。また，その入札量については出力変動による需給アンバランスへの影響が最も少なくなるように風力発電出力の期待値で入札を行うものとした。



(a) 限界効用曲線

(b) 限界費用曲線

図 3.1 消費者および発電事業者の入札曲線

3.3 約定処理

3.3.1 約定量の算出

社会余剰は消費者余剰および供給余剰の和より求めることができる。この社会余剰は図 3.2 のように売り入札を安い順に並べて作られる供給曲線と買い入札を高い順に並べて作成できる需要曲線で囲まれた面積によりもとめることができる。需要曲線および供給曲線は式 (3.2) および (3.4) に基づいて計算されるため、社会余剰は式 (3.5) のように各余剰の和で表すことができる^[49]。したがって社会余剰を最大化する約定量は式 (3.6) ~ 式 (3.8) の最適化問題を解くことで算出することができる。

$$\begin{aligned}
 SW &= \int_0^Q (-P_g(Q) + P_d(Q)) dq \\
 &= -\sum_{i=1}^{NG} \int_0^{q_{gi}} p_{gi}(q_{gi}) dq_{gi} + \sum_{j=1}^{ND} \int_0^{q_{dj}} p_{dj}(q_{dj}) dq_{dj} + \sum_j^{NWg} (E[P_{WT_i}] p^*) \\
 &= \sum_i^{NG} (q_{gi} p^* - (\alpha_{gi} q_{gi}^2 + \beta_{gi} q_{gi} + \gamma_{gi})) + \sum_j^{ND} (\alpha_{dj} q_{dj}^2 + \beta_{dj} q_{dj} + \gamma_{dj} - q_{dj} p^*) \\
 &= \sum_i^{NG} (-C_i(q_{gi})) + \sum_j^{ND} (U_j(q_{dj}))
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

ただし、

p^*, q^* : 約定価格および約定量

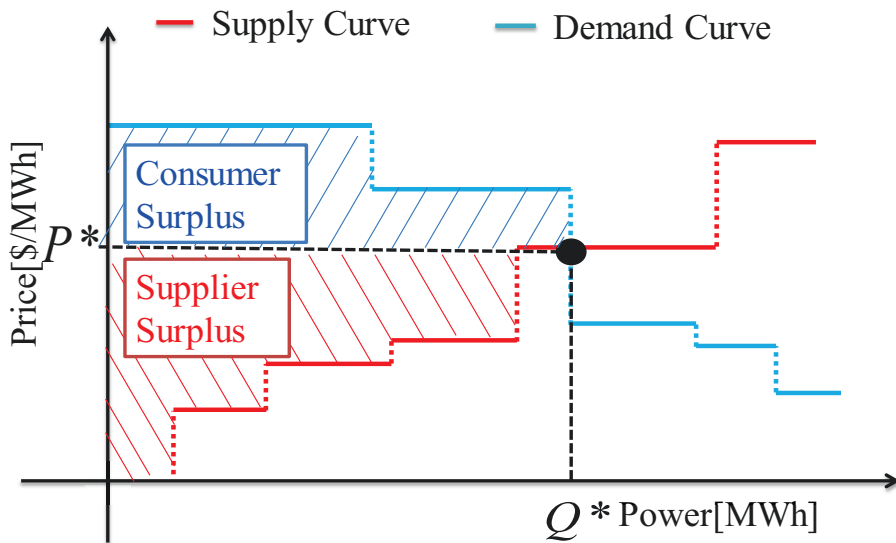


図 3.2 社会余剰

[提案手法による約定]

・目的関数

$$\sum_i^{NG} (-C_i(q_{gi})) + \sum_j^{ND} U_j(q_{dj}) \rightarrow \max \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

・制約条件

(潮流方程式)

$$E[P_{WTn}] - q_{gn} - q_{dn} - \sum_{k=1(k \neq n)}^N \frac{\delta_n - \delta_k}{x_{nk}} = 0 \quad (n=1,2,\dots,N) \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

(需給制約)

$$\sum_j^{ND} q_{dj} = \sum_i^{NG} q_{gi} + \sum_n^{NWT} P_{WTn} \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

(潮流制約)

$$-P_{flow_{max}}^{N-1} \leq \frac{\delta_i - \delta_j}{x_{ij}} \leq P_{flow_{max}}^{N-1} \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

(容量制約)

$$0 \leq q_{gi} \leq q_{g_{max i}}, \quad 0 \leq q_{dj} \leq q_{d_{max j}} \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

3.3.2 約定価格の算出

図 3.2 の場合は供給曲線と需要曲線の交点が存在する場合であるが、式 (3.7) ~ (3.10) の制約条件によっては 2 曲線の交点が存在しない場合がある。このような場合、図 3.3 のように価格が変化してもより社会余剰が変化しないため、価格が一意に定まらない。シングルプライスオークションを実施する場合には別途価格を決定する必要がある。本論文では消費者の余剰が最大限になるよう式 (3.11) のように約定時の限界費用がもっとも高い発電事業者を約定価格とした。

$$p = \max_g P_g(Q_g) \quad (0 < Q < Q^* \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

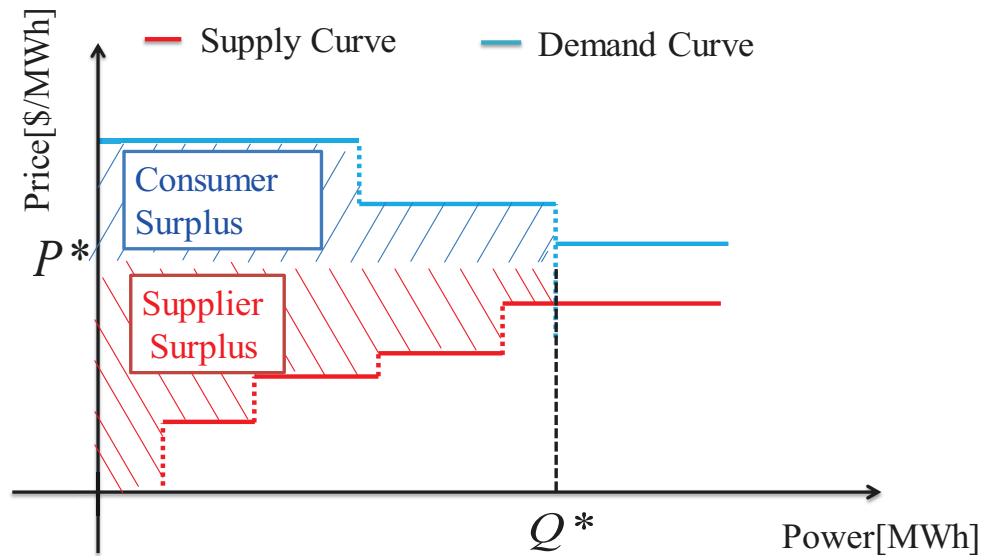


図 3.3 ネットワーク制約のある場合の社会余剰

3.3.3 N-1 基準違反確率の評価および再約定処理

前章に引きつづき、本章においても付録に示した評価手法に基づき N-1 基準制約違反確率の評価を行う。評価の結果、熱量制約違反を違反する可能性があり系統運用者が設定する許容値を超えた場合の線路制約を式 (H.5) に更新し、取引を制限する。一方で制約違反確率が許容値以下の線路についても他の線路潮流を制限したことで潮流が増加し N-1 基準制約違反確率が増加する恐れがある。したがってこのような場合は式 (H.6) に従い潮流量の増加に上限を設定することで違反確率の増加を許容値以内に収めることを実現する。

以上によって算出された新しい取引制約に基づき、再度式 (3.6) ~ (3.10) の最適化計算を行い約定処理を行うことで N-1 基準制約違反確率が低減することが期待できる。本論文で提案した市場モデルでは図 3.4 に示すように全線路の N-1 基準違反確率が許容値以内になるまで行うことで市場メカニズムによる需給管理を実現する。

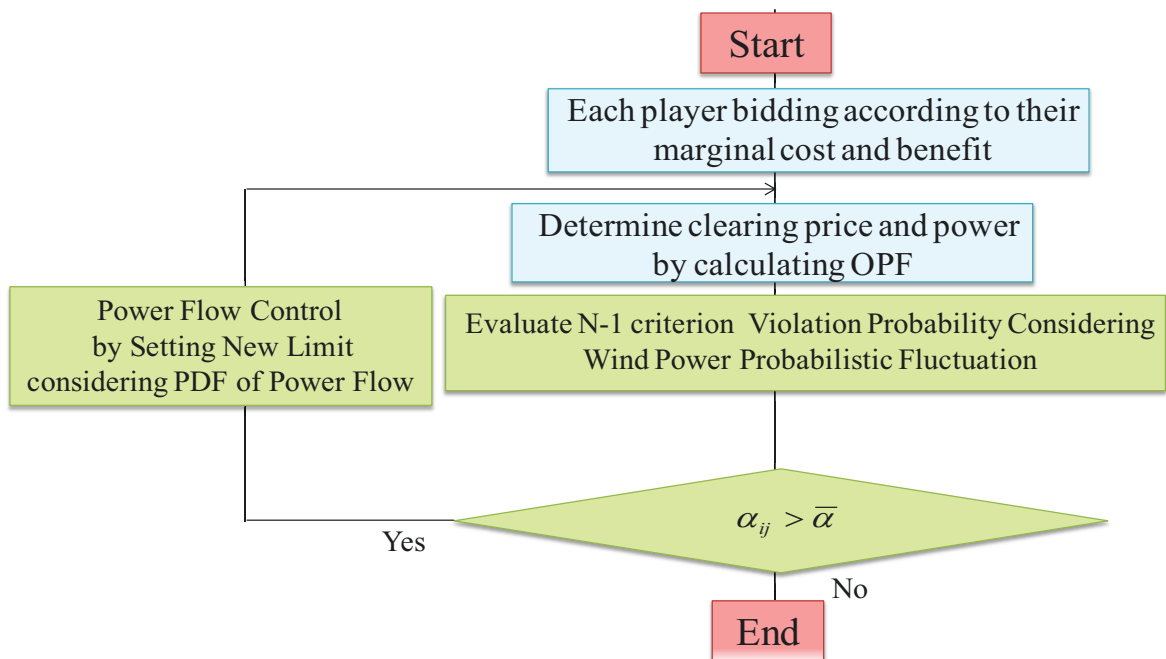


図 3.4 構築した市場モデルのフローチャート

3.4 数値計算例

構築した市場モデルの有効性を確認するために数値計算を実施した。

3.4.1 数値計算モデル

本章では図 3.5 に示す IEEE-39bus New England System モデルを用いる。なお、風力発電の導入箇所およびその容量は表 3.1 に、風速間の相関関係は表 3.2 に示す。また、発電事業者の限界費用関数および限界効用関数の係数はそれぞれ表 3.3, 3.4 に示す^[50]。N-1 基準違反確率の許容値は 5%として設定した。

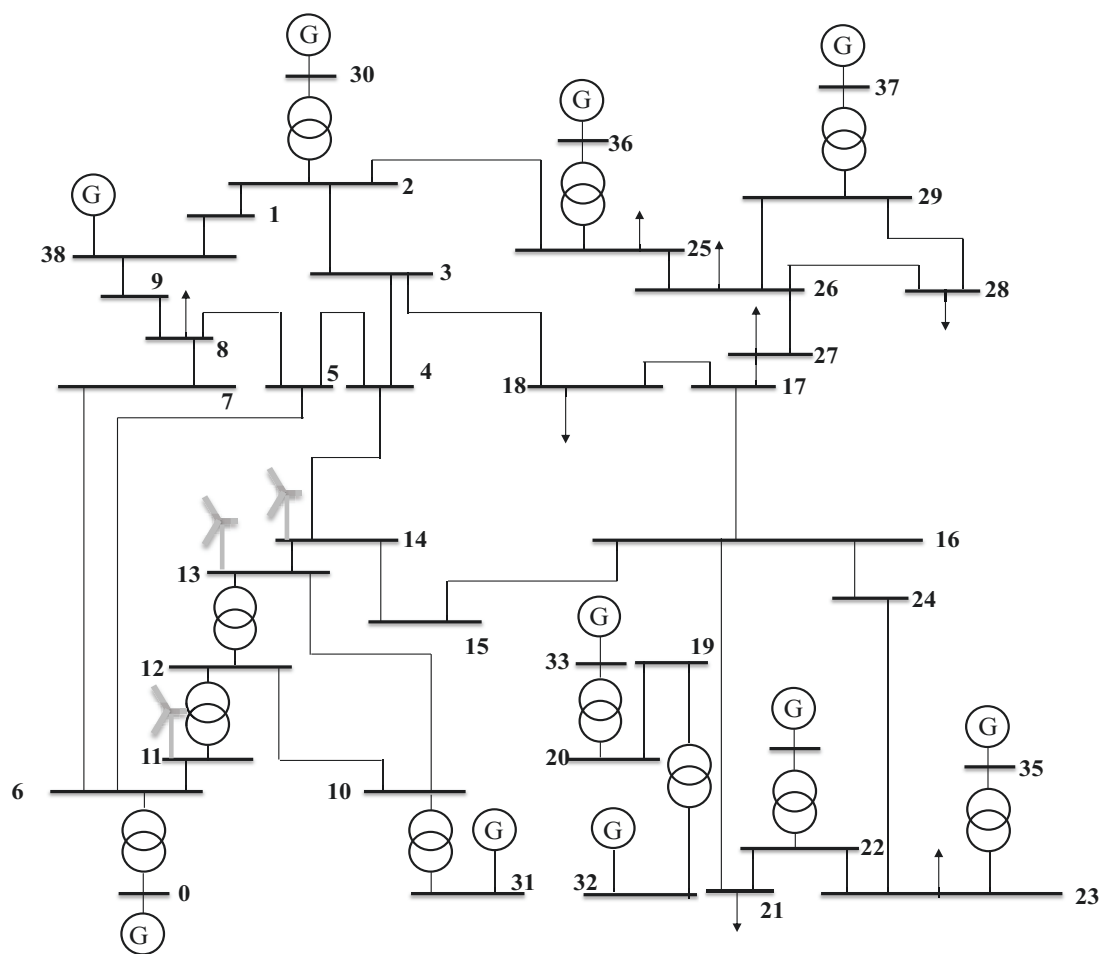


図 3.5 IEEE 39 bus system model (100MVA, 365kV base)

表 3.1 風力発電の容量, 平均風速, 出力の期待値

	node11	node13	node14
Capacity[MVA]	600	600	600
Average Wind Speed[m/sec]	6.0	6.5	7.0
Expected Output[MWh]	106.7112	130.907	156.0456

表 3.2 各地点の風速の相関関係

	node13	node14	node11
node13	1	0.7	0.6
node14	0.7	1	0.9
node11	0.6	0.9	1

表 3.3 限界費用の係数^[50]

	Node	α_g [100\$/100MWh ²]	β_g [100\$/100MWh]
supplier1	30	0.8	30
supplier2	31	0.7	35.99
supplier3	32	0.7	35.45
supplier4	33	0.8	34.94
supplier5	34	0.8	35.94
supplier6	35	0.8	34.8
supplier7	36	1	34.4
supplier8	37	0.8	35.68
supplier9	38	0.8	33.36
supplier10	0	0.6	34

表 3.4 限界効用関数の係数

	Node	α_d [100 \$/100MWh ²]	β_d [100 \$/100MWh]
consumer 1	3	-0.8	42.58
consumer 2	4	-0.7	43.5
consumer 3	7	-0.6	41.4
consumer 4	8	-0.6	43.13
consumer 5	15	-0.8	42.56
consumer 6	16	-0.7	42.31
consumer 7	18	-0.6	40.95
consumer 8	20	-0.8	45.44
consumer 9	21	-0.7	41.92
consumer 10	23	-0.7	41.73
consumer 11	24	-0.6	41.85
consumer 12	25	-0.6	41.34

consumer 13	26	-0.7	40.97
consumer 14	27	-0.7	41.97
consumer 15	28	-0.8	41.65
consumer 16	29	-0.7	41.98

3.4.2 数値計算結果

a) 約定結果の評価

図 3.6 に発電事業者の約定量を，図 3.7 に消費者の約定量を示す。また，この時の社会余剰は 456775.2 \$/h，約定価格は 39.736\$/MWh であった。さらにこの約定時の潮流分布を図 3.8 に示す。この約定時の状態に対して N-1 基準制約違反確率の評価を行った結果，制約を違反した線路は線路 5-6 のみであり，N-1 事故時の潮流分布を図 3.9 に示す。

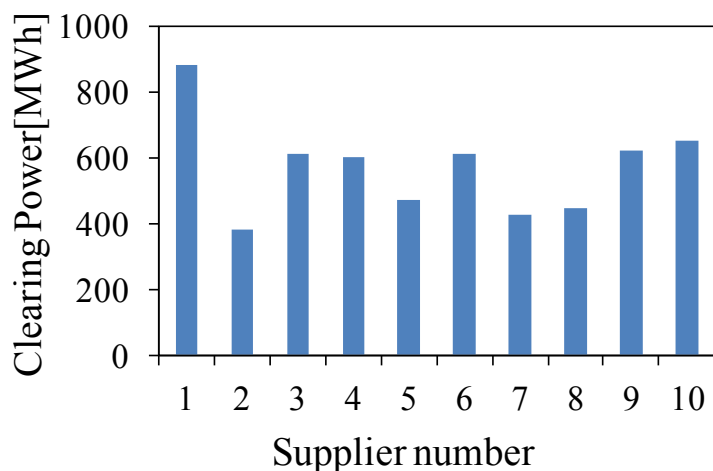


図 3.7 Clearing Power of Each Supplier

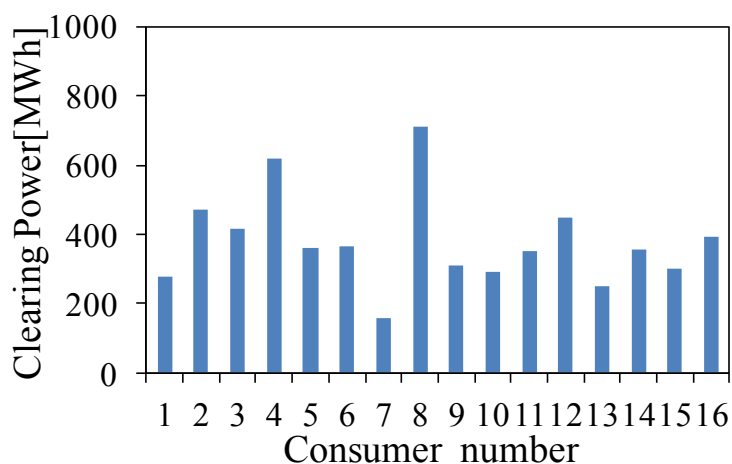


図 3.8 Clearing Power of Each Consumer

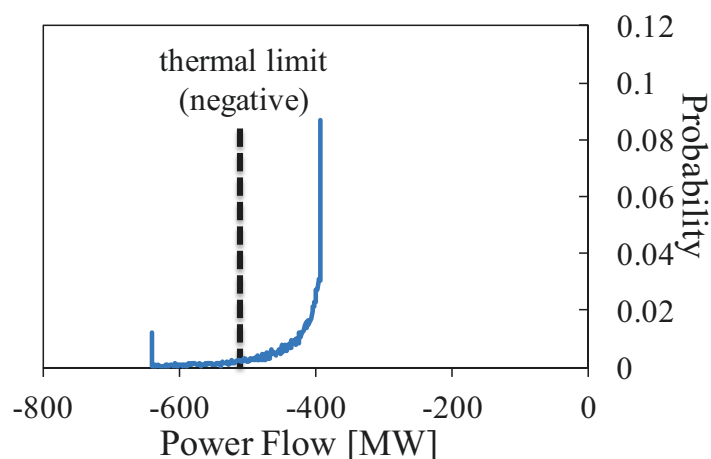


図 3.9 PDF of power flow on line 5-6 in case of N-1 accident

b) 違反確率の制御

図 3.9 をもとにこの分布と事故が起こっていない場合の潮流, すなわち約定時の潮流分布を比較することで, 新しい制約値は表 4.5 のように算出することができる。制約更新後に約定した結果を図 3.10 および図 3.11 に示す。1 度目の約定と比較すると, まず, 風力発電導入個所に近い発電事業者である **Suplier 2** (ノード 31), **Suplier 9** (ノード 38), **Suplier 10** (ノード 0) を中心に約定量が減少していることが分かる。一方で, **Suplier 1** (ノード 30) 等, 風力発電導入個所から離れているノードの発電事業者の約定量は増加している。一方で, 消費者の約定量については, その多くが減少していた。

次に, 再約定後の線路 5-6 の N-1 事故時の潮流分布では, 図 3.12 に示すように線路制約確率を許容値以内に制御された。この時, 社会余剰および約定価格についてはそれぞれ, 445230.9\$/h, 39.739 \$/MWh であり, 社会余剰の減少分を最小限にとどめるよう, これは図 3.10 および図 3.11 のように N-1 基準制約違反確率の増加に寄与した取引を制限しつつ, 違反確率の増加へ影響が少ない取引を促されたためと考えられる。以上より, 市場メカニズムにより適切に需給管理を実現できていると考えられる。

表 3.5 線路 5-6 の熱容量制約の更新

	Before	After
Power Flow Constraint[MW]	-500	-421.36

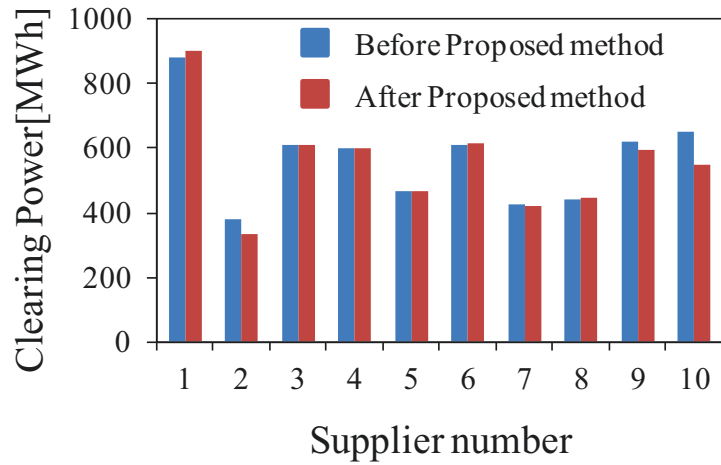


図 3.10 提案手法適用後の発電事業者の約定量

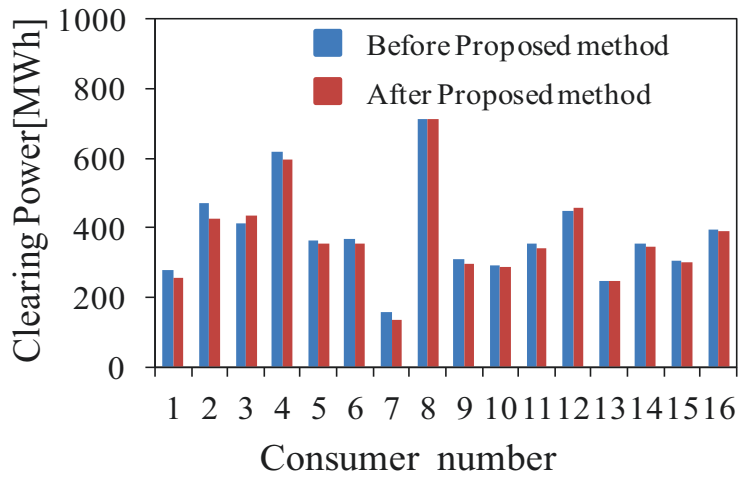


図 3.11 提案手法適用後の消費者の約定量

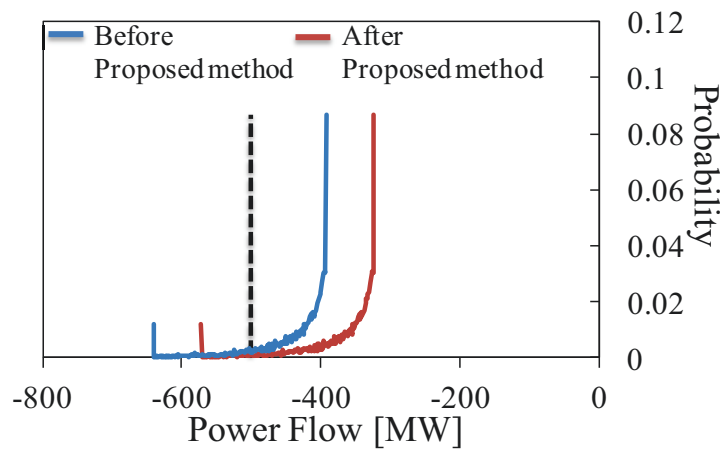


図 3.12 潮流制御実施後の線路 5-6 の N-1 事故時の潮流分布

3.5 まとめと今後の課題

本章では、比較的長周期の負荷変動を対象とした確率的経済負荷配分手法をベースとした市場モデルを構築し、市場メカニズムによる需給制御手法を検討した。数値計算例を通じて、提案手法により **N-1** 基準制約違反確率発生時において、違反確率の増加に寄与した取引を制限しつつ、他の取引を促すことで、潮流制御による社会余剰の減少を最小限にとどめる約定が行われたことからその有効性が示された。なお、潮流混雑の解消に当たって現実的には市場分断方式や **LMP**(Location Marginal Price: 地点別価格)方式が採用される。シングルプライスによる解消ではリスクの解消為のコスト負担を約定量に基づいて一律に求めるため不公平になる場合があるが、市場分断方式や **LMP** 方式ではこれらの負担をより公平的に配分されると考えられる。特に **LMP** 方式の考えを活用したノーダルプライスによる再約定する場合には、限界費用および制約のコストも評価^{[51]~[52]}することが可能であるため、より潮流リスクを解消する上で公平な負担を実現できると考えられる。

課題としては潮流制御と市場運用について以下が挙げられる。

[潮流制御]

風力発電の出力変動時において、たとえば出力が入札量よりも増加することを抑制することができれば **N-1** 基準制約違反確率を抑えることができると考えられる。その結果、制限対象となる取引を減らすことができるため、より社会余剰が大きくなると考えられる。したがって、短時間変動に対する風力発電の出力抑制制御の有効性や、経済的なインセンティブ付与の検討が課題となる。

[市場の運用面]

本論文ではシングルプライスにて約定価格の算出を行ったが、線路制約違反があった場合、まとめに述べたように現実的には地点別価格の採用や市場の分断処理が行われている。したがって、**N-1** 基準制約確率の許容値を超えた場合には、違反リスクを考慮したより現実的な市場の運用も考慮し制約違反の解消を行うことで、潮流リスク解消にかかるコスト負担をより公平にする手法を検討する必要がある。

結論

本論文では、再生可能エネルギーが大量導入された際に懸念される配電系統内の電圧上昇問題、さらに送電系統における N-1 基準制約に基づく運用について、確率論的アプローチに基づいて運用手法の高度化を検討した。

前者については高圧系統で用いられている既存の区分開閉器を、電圧・電流・力率が測定可能なセンサ付区分開閉器 (SSS: Section Switchgear with Sensor) に更新することが進められていることに注目し、LRT 等のタップ切替判断に活用できるよう、その計測情報を活用した PCS 無効電力制御状態の推定手法を提案した。一般に、SSS の数と比べて推定対象である PCS の数は極めて多く、全ての PCS の制御状態を一意に推定することは難しい。しかし LRT のタップ切替の制御判断を考える際には、タップ制御により PCS の無効電力制御量を低減できるかどうかの判断が重要であり、必ずしも精緻な推定は必要とはならない。そこで本論文では LRT のタップ切替位置を適切に調整するために、PCS の無効電力制御量の“確率分布”の推定手法を検討した。具体的には、高圧系統の電圧変動や低圧系統の負荷変動に対する PCS の無効電力制御動作を定式化し、これを潮流計算に組み込んで擬似逆行列で求解する手続きを繰り返すことで、モンテカルロ法による確率分布の導出を行った。本論文において計算精度を SSS の計測値と比較することで評価したが、数値計算を通じて擬似逆行列の導入することで推定精度の向上を確認した。また、PCS の制御が LRT 等のタップ制御よりも先に動作すると想定することで、PV 有効電力出力抑制のリスクの存在を評価することができ、統計的な観点から、出力抑制低減などを目的とした協調制御の実現に寄与することを示した。

一方で後者については、再生可能エネルギーの「出力の不確実性」と「系統事故の発生」双方を考慮した需給制御手法を検討した。具体的には、これまで提案されてきた確率的経済負荷配分手法に対してより大規模な系統モデルにおける有効性の検討を行い、次に市場メカニズムによる需給制御モデルの構築を行った。両手法において数値計算を実施することで、燃料費の増加や社会余剰の減少量の最小化を実現しつつ、風力発電出力変動による N-1 基準制約違反リスクの制御を実現しその有効性を示した。

終わりに本論文では全体を通して確率的な視点に基づいて配電系統、送電系統それぞれの運用手法の高度化を目的に新たな手法を検討した。今後の電力の全面自由化、再生可能エネルギーのさらなる導入等、不確実な要素の増加が見込まれる中で、よりリスクを最小限に抑えるための系統運用が求められると考えている。

謝辞

本研究を進めるにあたって、多大なご指導、ご助言を下さった辻隆男准教授、大山力教授に深く感謝いたします。辻先生には博士課程に進学後は新しい研究テーマとして何を進めていくか、自分で考えて模索し進めることで何度か挫折を経験しなかなか成果が出ないなか、親身に相談に乗ってくださったりしました。また、就職に関しても大変にお世話になり感謝の念が絶えません。このたび本論文を書き上げることができましたのは辻先生の存在なくしてはなしえなかったと思います。帰宅の車内での小粋なトークいつも楽しませていただきました。深く感謝いたしております。そして、大山先生には輪講中鋭い指摘をたくさんいただき、自分の考えが至らぬところをたくさん気付かせていただきました。また、飲み会の場でも楽しいお話をたくさんしていただき辻研究室の学生だけでなく大山研の学生達と仲良く過ごせる良い雰囲気があるのはお二人のおかげだと考えています。大山研究室技官の佐藤敏之様にも深く感謝いたします。私の行ってきた研究の多くは佐藤様に管理していただいた計算機サーバを通じて実行され、お助けしていただきました。また一緒に行った尾瀬山でお見せ頂いた登山道具大変興味深かったです。

大山研究室秘書の赤木悦子様にも深く感謝いたします。おかげ様でお世話になった5年間、問題なく過ごすことができました。また、辻研究室秘書の柳田富有子様、GCOE時代からお世話になっておりましたが、辻研究室に来ていただいてから何度も窮地を救っていただきありがとうございます。深く感謝いたします。

また、在学中に数多くのご助言や励ましをいただきました辻研究室、大山研究室の皆様にも深く感謝いたします。研究室の皆様にはこれまでサークル活動やアルバイトを全くしてこなかった私にとってかけがえのない経験をたくさんさせていただきました。共に研究活動の楽しさ、辛さを感じ合うことができた同期の皆様にも感謝いたします。独特の感性が溢れ出ていた1学年上の先輩方にも深く感謝いたします。潮干狩りに行きたいとのことで先輩方が始めて下さったBBQは今でも研究室の学生たちとの親睦を深める毎年の恒例行事となっております。初めての研究室配属からとても尊敬して止まない2学年上の先輩方とドクターの先輩方にも感謝いたします。特にM井先輩には公私ともにお世話になりました。多くのことを教え気付けてくれた後輩たちにも深く感謝いたします。特にS原君には研究についての議論とても楽しませていただき、充実とした時間を送らせていただきました。私とともに研究を進展させてくれたM井君、A間君、F、O君にも深く感謝いたします。いろんな初めての経験をすることが出来た卒業旅行に誘ってくれたM脇君を始めとした学生たちにも深く感謝

いたします。今後研究室残る学生に対しても深く感謝いたします。今までの価値観を覆され、**Revolution** させていただきました K 君達や Y 君など、長い長い付き合いになりました B 様等大変お世話になりました。特に B 様につきましてはお酒の場の数々のことはこれからも忘れないと思います。今後の辻研究室のことを良く知る博士として、学生達をまとめてくだされば何よりです。がんばってください。

最後に私のわがままで博士課程に進学することになりましたが笑顔で背中を押してくれて、生活を支えてくれた両親と時には厳しい言葉を投げかけながらも応援してくれた兄たちに深く感謝いたします。これからは実家を離れて自立いたしますが、余計な心配をかけないよう心がけます。

参考文献

- [1]再生可能エネルギー固定価格買取制度ガイドブック 2015 年度版,
http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/data/kaitori/2015_fit.pdf 資源エネルギー庁,2015
- [2]長期エネルギー需給見通し 2015,
http://www.meti.go.jp/press/2015/07/20150716004/20150716004_2.pdf
経済産業省, 2015 年 7 月
- [3]低炭素電力供給システムに関する研究会 (第 7 回) -配付資料
参考資料 3 新エネルギー大量導入と系統安定化に向けた取り組みに関する欧州
現地調査報告
付録 4 : 訪問議事録, 2009 年 4 月
- [4]Tran Nguyen, Takao Tsuji ,Tutomu Oyama,"A study on economic load
dispatch based on power flow constraint with the N-1 criterion considering
correlation among wind farms", IEEJ Transactions on Electrical and Electronic
Engineering, Vol.8, No.6, pp.557-566 (2013)
- [5] 電力システム改革専門委員会報告書, 経済産業省,2013 年 3 月
- [6]総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 電力システム改革小委員会
制度設計ワーキンググループ (第 3 回) - 配布資料
経済産業省, 2014 年 10 月
- [7]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 Vol129 No4,(2009)
- [8]次世代送配電ネットワーク研究会報告書, 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,2010,
[http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/electric_power_industry_subco
mmittee/001_038/pdf/038_009.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/electric_power_industry_subcommittee/001_038/pdf/038_009.pdf)
- [9]渡辺 雅浩, 高橋 玲児,松田 勝弘, 瀬戸 敏之,"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,
pp.598-604 (2015)
- [10] 関崎 真也,青木 睦,鵜飼 裕之,佐々木俊介, 重藤 貴也,"太陽光発電が大量連
系された配電系統における電圧センサを活用した多段 SVR の制御",電学論 B,
Vol. 133, No. 1, pp.45-55 (2013)
- [11] 芳澤 信哉, 山本 祐也, 林 泰弘, 佐々木俊介, 重藤 貴也,野村 秀生,"多段
設置された次世代 SVR の最適調整値の動的更新手法",電学論 B, Vol. 132, No. 8,
pp.550-558 (2015)

- [12] 松田 勝弘, 二上 貴文,堀越 和宏, 瀬戸 敏之, 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",電学論 B, Vol. 132, No. 8, pp.701-708 (2012)
- [13]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方法",電学論 B, Vol. 130, No. 8, pp.963-971 (2010)
- [14]平原 義輝,八太 啓行,小林 広武,「太陽光発電システムにおける配電線電圧制御方式の開発－電圧上昇抑制のための新しい無効電力制御手法－」,電力中央研究所報告, R06012 (2007)
- [15]八太 啓行,小林 広武,「適正電圧維持制御に起因する分散型電源出力低下の抑制手法－遠隔情報による無効電力分担手法－」,電力中央研究所報告, R06011(2007)
- [16] 辻 隆男, 合田 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」, 電学論 B, Vol. 128, No. 1, pp.174-185 (2008)
- [17]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」, 電学論 B, Vol. 129, No. 12, pp.1533-1544 (2009)
- [18]辻 隆男, 大山 力, 橋口 卓平, 合田 忠弘, 進士 誉夫, 辻田 伸介 : 「配電損失低減を目的とした将来型配電系統の自律分散型電圧分布制御方式」, 電学論 B, Vol. 130, No. 11, pp.941-954 (2010)
- [19]辻 隆男, 戸村 康佑, 大山 力, 橋口 卓平, 合田 忠弘, 丹下 誠視, 野村 俊夫 : 「分散型電源の動特性を考慮した将来型配電系統の集中型電圧分布制御方式の検討」, 電学論 B, Vol. 129, No. 4, pp.507-516 (2009)
- [20]辻 隆男, 古舘 優, 大山 力, 橋口 卓平, 合田 忠弘, 進士 誉夫, 辻田 伸介 : 「分散型電源を含む配電系統の階層的電圧分布制御方式の検討」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研資, PE-10-192 pp133-138 (2010)
- [21]田能村 顕一, 荻田 能弘, 兼重 由美子, 石井 淳之, 荒井 純一 : 「計測情報を利用した配電系統の電圧・潮流分布状態計算手法」, 電学論 B, Vol.125, No.10 pp.948-956 (2005)
- [22]安永 章人, 原 亮一, 北 裕幸, 田中 英一 : 「配電系統における潮流情報を用いた負荷量と PV 出力のオンライン推定手法」, 電学論 B, Vol.132, No.12, pp.942-951 (2012)
- [23] Pathom Attaviriyapap, 平田 飛仙, 小島 康弘, Marta Marmiroli : 「日射量, 統計モデルと配電線潮流を用いた太陽光発電出力推定に関する研究」, 電学論 B, Vol.134, No.6, pp.484-493 (2014)

- [24]花井 悠二, 林 泰弘, 松木 純也, 栗原 雅典: 「センサ開閉器から得られる計測情報を活用した配電系統の電圧推定・制御手法の提案と実験的検証」, 電学論 B, Vol.130, No.10 pp.859-869 (2010)
- [25]宇田川 剛, 林 泰弘, 高橋 尚之, 松浦 康雄, 森田 智比古, 南 雅弘: 「センサ開閉器情報の取得周期が配電系統電圧制御に与える影響の評価」, 電学論 B, Vol.133, No.4, pp324-332 (2013)
- [26]芳澤 信哉, 林 泰弘, 辻 祐毅, 神谷 英志: 「バンク事故復旧対応型 LRT・SVR 協調電圧制御手法」, 電学論 B, Vol.133, No.4, pp.333-342 (2013)
- [27] A. Koide, T. Tsuji, T. Oyama, T. Hashiguchi, T. Goda, K. Horiuchi, Y. Kojima, T. Shinji, and S. Tsujita: "A Study on Estimation Method of Reactive Power Control of DGs in Distribution Systems with a Large Amount of PVs", Proc. of the International Conference on Power Plant & Power System Control, Power System I – 1 (2012)
- [28] A. Koide, T. Tsuji, T. Oyama, F. Magoulès and K. Uchida : "A State Estimation Method for Reactive Power Control by DGs in distribution Systems Based on Pseude Inverse Matrix", Proc. of CIGRE SC COLLOQUIUM Yokohama 2013, S1-7, pp.31-36 (2013)
- [29] 総合資源エネルギー調査会 長期エネルギー需給見通し小委員会 (第 8 回会合) 資料 4 (2015)
- [30] 電気学会 「電力工学ハンドブック」, オーム社
- [31]能勢 陽太郎, 辻 隆男, 大山 力, 松浦 康雄, 森田 智比古, 南 雅弘, 神谷 英志, "大量の PV/EV 大量導入時におけるセンサ情報を活用した LRT 制御の検討", 電力系統技術研究会, PSE-12-013, pp73-80(2012)
- [32] 南 雅弘, 森田智比古, 松浦康雄, 山本 修: "低炭素社会実現に向けた配電技術の確立に関する研究—高精度な高低圧系統電圧推定技術の研究—", 電気学会 B 部門大会, pp19-20,(2011)
- [33] 松浦 康雄, 森田 智比古, 南 雅弘, 山根 憲一郎, 石田 隆張, 足立昌宏: "配電系統におけるセンサ開閉器の効果的な配置に関する検討", 電力系統技術研究会, PSE-11-78, pp25-30(2011)
- [34] 田中 将, 上村 敏, 小林 広武"センサー開閉器情報に基づく配電系統の電圧推定法", 電力中央研究所報告, R04011(2005)
- [35]高橋 尚之, 林 泰弘: "不感帯制御 SVC による配電系統の動的電圧制御手法", 電学論 B, Vol133, No4, pp396-403 (2013)
- [36] 飯岡 大輔, 榊原 邦晃, 横水 康伸, 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", 電学論 B, Vol126, No2, pp153-158 (2006)

- [37] NEDO, 分散型エネルギー一次世代電力網構築実証事業,
http://www.nedo.go.jp/koubo/AT522_100040.html
- [38] 甲斐 孝明 , 徹底図解 系統連系—分散型電源を高低圧配電線に—, オーム社(2015)
- [39] A.Koide, T.Tsuji, T.Oyama, T.Hashiguchi, T.Goda, K.Horiuchi, Y.Kojima, T.Shinji, and S.Tsujita , "A Study on Voltage Control Method in Hierarchical Distribution System using Estimation of Reactive Power Control by Distributed Generators" The International Conference on Electrical Engineering(ICEE) (2012)
- [40] J.Kiviuoma, M.O'Malley, A.Tuohy, M.Milligan, B.Lange, H.Holttinen, M.Gibescu, P.Meibom, A.Vigueras-Rodriguez, E. Gomez-Lazaro, "Impact of Wind Power on the Unit Commitment and Power System Operations", Wind Integration Workshop 2010 , pp.399-406
- [41] A. Botterud, Z.Zhou, J. Wang, J. Valenzuela, J. Sumaili, R.J. Bessa, H. Keko, V. Miranda, "Unit Commitment and Operating Reserves with Probabilistic Wind Power Forecasts", Paper accepted for presentation at the 2011 IEEE Trondheim PowerTech
- [42] A. Estanqueiro, A. Årdal, C. O'Dwyer, D. Flynn, D. Huertas-Hernando, D. Lew, E. Gómez-Lázaro, E. Carlini, E. Solvang, E. Ela, J. Kiviluoma, L. Rodrigues, M. Amelin , " Contribution of Energy Storage for Large-scale Integration of Variable Generation", Wind Integration Workshop 2012 , pp.399-406
- [43] J.E.S. de Haan, M. Aliano, J. Frunt, W. Kling "Consideration of the Load-Frequency Control and Performance of the Continental European Power System during Large Imbalances", Wind Integration Workshop 2012
- [44] H. Bae, T. Tsuji, T. Oyama, " Supply and Demand Balance Control of Power Systems with Wind Turbines Considering Aggregation Effect by Introducing Congestion Management", Wind Integration Workshop 2015
- [45] H.Holttinen, J. Kiviluoma, A.Estanqueiro , E. Gomez Lazaro, B.Rawn , J. Dobschinski, P. Meibom, E. Lannoye, T. Aigner, Y. H. Wan, M. Milligan , "Variability of Load and Net Load in Case of Large Scale Distributed Wind Power ", Wind Integration Workshop 2011
- [46] W. de Boer, M. Duvoort, G. Dekker, "Controlling Imbalance Risk of Wind Power with a Dynamic Spinning Reserve Margin", Wind Integration Workshop 2011
- [47] 電力技術委員会 : 「電気学会標準モデルの拡充システムモデル報告書」 ,(2001)

- [48]下村 貴裕,最所 祐一,藤井 康正,山地 憲治,「マルチエージェントモデルを用いた電力市場における価格形成過程の分析」,電学論 B,Vol124,No.2,pp281-290 (2004)
- [49]Alvarado, F.L Meng, J. DeMarco, C.L, Mota, W.S.,"Stability analysis of interconnected power systems coupled with market dynamics", IEEE Trans Power Syst,Vol.16 , No.4,pp 695 - 701 (2002)
- [50]J.D.Weber and T.J Overbye "An individual Welfare Maximization Algorithm for Electricity Market " IEEE Trans. Power Syst,Vol17,No.3 pp (2002)
- [51] 陳 洛南,鈴木 秀樹,和地 恒久,新村 幸宏:「電力系統におけるノーダグループライスの構成要素の色分け」, 電学論 B ,Vol120,No5. pp686-693(2000)
- [52] 和地 恒久,福留 潔,陳 洛南,牧野 芳範:「電力市場における約定価格要因分析方法」, 電学論 B ,Vol126,No3. pp297-307(2006)
- [53] 集中連系型太陽光発電システム実証研究(群馬県太田市 Pal Town 城西の杜), 計測データ仕様書,NEDO
- [54] 平成 20 年度～平成 21 年度成果報告書 集中連系型太陽光発電システム成果普及事業, NEDO 2010
- [55] 平野拓一, 数値計算法 (連立一次方程式の解法) (2004/05/19)
http://www-antenna.ee.titech.ac.jp/~hira/hobby/edu/em/mom/linear_system/lin_eqs.pdf
- [56]T.Ackerman,日本風力エネルギー学会翻訳,"風力発電導入のための電力系統工学",オーム社,2014
- [57]七原 俊也,"風力発電の系統影響対策技術の開発動向" 電学論 B,Vol129,No.5,pp568-571 (2009)
- [58]池上 貴志,片岡 和人,荻元 和彦,斉藤 哲夫,"電力需給解析のための風力発電データの整備と風力発電の長周期出力変動の分析" 電学論 B,Vol134,No.5,pp236-247 (2014)
- [59] George Papaefthymiou, Dorota Kurowicka, " Using Copulas for Modeling Stochastic Dependence in Power System Uncertainty Analysis", IEEE Trans Power Syst, Vol. 24, NO. 1, pp40~49 (2009)
- [60]Ning Zhang, Chongqing Kang, Qing Xia, Ji Liang. "Modeling Conditional Forecast Error for Wind Power in Generation Scheduling", IEEE Trans. Power Syst, Vol. 29, No. 3, pp1316~1324, (2014)
- [61]Hamed Valizadeh Haghi, M. Tavakoli Bina, Masoud Aliakbar Golkar " Nonlinear Modeling of Temporal Wind Power Variations" , IEEE TranS Sustainable Energy , Vol. 4, No. 4,pp838~848 (2013)
- [62] 三根 久:「モンテカルロシミュレーション」コロナ社 (1994)

- [63]宮武 修, 脇本 和昌 : 「乱数とモンテカルロ法」, 森北出版 (1978)
- [64]G. Papeefthymiou, "Integration of Stochastic Generation in Power System ", Ph.D. dissertation, Delft Univ. Technol., Delft, The Netherlands, 2007
- [65]相吉英太郎, 安田恵一郎, "メタヒューリスティクスと応用", 電気学会

研究業績一覧

学術論文誌

- [1] 小出 明,辻 隆男,大山 力,橋口 卓平,合田 忠弘,進士 誉夫,辻田 伸介"将来型配電系統の電圧分布制御方式における無効電力のリアルタイムプライシング手法の検討",電気学会論文誌 B, Vol. 132, No. 4, pp359-370
- [2] 向 佑樹, 小出 明, 辻 隆男, 大山 力, 内田 健康,"電圧制御問題における経済合理性を考慮した無効電力買取制度のリアルタイム運用手法",電気学会論文誌 B, Vol. 135, No. 7,pp437-445
- [3] 古林 薫, 小出 明, 辻 隆男, 大山 力, 内田 健康," スマートメータの通信機能を考慮した配電系統の無効電力プライシング方式",電気学会論文誌 B, Vol. 136, No. 4(掲載予定)
- [4] 小出 明, 辻 隆男, 大山 力,合田忠弘 小島泰弘, 進士 誉夫,内田健康,Frederic Magoules,"センサ付区分開閉器の計測情報を活用した PCS の無効電力制御量の確率的推定手法", 電気学会論文誌 B, Vol. 136, No. 4(掲載予定)

国際会議発表

- [1]A.Koide,T.Tsuji,T.Oyama,T.Hashiguchi,T.Goda,K.Horiuchi,Y.Kojima,T.Shinji, and S.Tsujita ,"A Study on Voltage Control Method in Hierarchical Distribution System using Estimation of Reactive Power Control by Distributed Generators"The International Conference on Electrical Engineering(ICEE) (2012)
- [2] A.Koide,T.Tsuji,T.Oyama,T.Hashiguchi,T.Goda, K.Horiuchi,Y.Kojima,T.Shinji, and S.Tsujita ,"A Study on Estimation Method of Reactive Power Control of DGs in Distribution Systems with a large amount of PVs", Power Plant and Power System Control(PP&PSC) symposium(2012)
- [3] Akira Koide, Takao Tsuji, Tsutomu Oyama, Frédéric Magoulès, Kenko Uchida ,"A State Estimation Method for Reactive Power Control by DGs in Distribution Systems Based on Pseudo Inverse Matrix" , CIGRE SC C6 COLLOQUIUM - Distribution Systems and Dispersed Generation - S1-7(2013)
- [4] Akira Koide ,Tran Nguyen , Takao Tsuji ,"Probabilistic Operation of Power Systems with a large number of Wind Farms considering Calculation Accuracy ", Macro Trend Conference on Energy and Sustainability: Paris(2013)
- [5] A. Koide, T. Tsuji,T. Oyama, K. Uchida," Supply and Demand Balance Control based on Electricity Market considering Probabilistic Wind Power Output and Probabilistic Operation Constraint ", Wind Integration Workshop 2015

国内会議

- [1] 小出 明,辻 隆男,大山 力,橋口 卓平,合田 忠弘,進士 誉夫,辻田 伸介,“将来型配電系統の電圧分布制御方式における無効電力のリアルタイムプライシング手法の検討”,電気学会 B 部門大会(2011)
- [2] 小出 明,辻 隆男,大山 力, 橋口 卓平,合田 忠弘, 堀内 謙二,小島 康弘,進士 誉夫, 辻田 伸介,“階層型配電系統における分散型電源の状態推定手法の検討” , 電気学会電力技術・電力系統技術・半導体電力変換技術合同研資,PE-12-10 (2012)
- [3]小出 明, 辻 隆男, 大山 力, 内田 健康 “配電損失を考慮した分散型電源の無効電力出力推定手法の検討” , 第 13 回制御部門大会 SICE 制御部門 社会基盤システムにおける分散意思決定のためのシステム制御調査研究会 (2013)
- [4]小出 明,辻 隆男,大山 力,“風力発電導入時の広域系統における N-1 基準を考慮した確率的経済負荷配分手法の検討”,新エネルギー・環境・高電圧合同研究会 : FTE-14-024,HV-14-079 (2014)
- [5] 小出 明, 疋田 裕幸, 辻 隆男, 大山 力, 伊藤 隆治,阿部勝也,南 雅弘,石橋 一成,“ センサ開閉器の計測情報を考慮したメタヒューリスティクスによる配電系統構成決定手法の検討” , 電気学会電力技術・電力系統技術合同研資, PE-15-162,PSE-15-184(2015)
- [6] 向 佑樹, 小出 明, 辻 隆男, 大山 力: “配電系統の電圧管理における動的挙動を考慮した無効電力のリアルタイムプライシング手法の検討”, 電気学会電力技術電力系統技術合同研究会, PSE12-053, pp.1-6 (2012)
- [7] 向 佑樹, 小出 明, 辻 隆男, 大山 力, 内田 健康: “配電系統の電圧制御問題におけるリアルタイム性を考慮した無効電力プライシング手法の検討”, 電気学会電力技術電力系統技術合同研究会, PSE13-167, pp.53-58 (2013)
- [8] 赤間俊哉・小出明・辻隆男・大山力: 「負荷周波数制御を考慮した EV および PV の協調的電圧分布制御方式」,平成 26 年電気学会全国大会(CD-ROM), 6-111(2013)
- [9] 赤間俊哉,小出明.辻隆男,大山 力: 「負荷周波数制御への貢献を目的とした電圧制約下での EV および PV の協調制御方式」, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-14-088, PSE-14-088(2013)
- [10]古林 薫, 小出 明, 辻 隆男, 大山 力, : 「スマートメータの通信間隔を考慮した配電系統の無効電力プライシング方式」,電気学会 B 部門大会(2015)
- [11]大森智貴, 小出 明, 辻 隆男, 大山 力, : 「スマートメータの通信間隔を考慮した配電系統の自律分散型電圧分布制御方式」, 電気学会 B 部門大会 (2015)

[12] 後藤隆太,白戸陽一郎,辻 隆男,大山 力,伊藤隆治,阿部勝也,南 雅弘,石橋一成,小出 明"太陽光発電出力の平滑化効果を考慮した LRT および SVR 制御の整定手法",電気学会電力技術・電力系統技術合同研資, PE-15-165,PSE-15-187(2015)

付録 A PCS の電圧上昇抑制機能^{[14] ~ [15]}

逆潮流により系統内電圧が適正電圧値を超えることを避けるために、太陽光発電システムでは、PCS に電圧上昇抑制機能を持たせている。この機能は後述する進相無効電力制御と出力制御の 2 種類の制御によって構成され、図 A.1 のフロー図によって制御がなされる。本論文では電圧上昇抑制機能を有する PCS が容量に関係なく広く普及していると想定し推定対象とした。

A.1 進相無効電力制御

系統に連系する PCS は、系統電圧と出力電流の位相を同相とし、常時は力率 1 で運転している。自端電圧が上昇し進相無効電力制御の設定電圧以上になると、力率 1 の制御を解除し、インバータの電流位相を系統電圧より進める。それに伴い系統側から流入する電流が遅れ電流となり、配電線路インピーダンスとの作用により連系点の電圧を下げる方向に作用する。

A.1.2 出力制御

進相無効電力制御による電圧制御が限界に達し、それでも系統電圧が上昇する場合には、太陽光発電システムの出力そのものを制限して連系点の電圧の上昇を防止するように動作する^[27]。

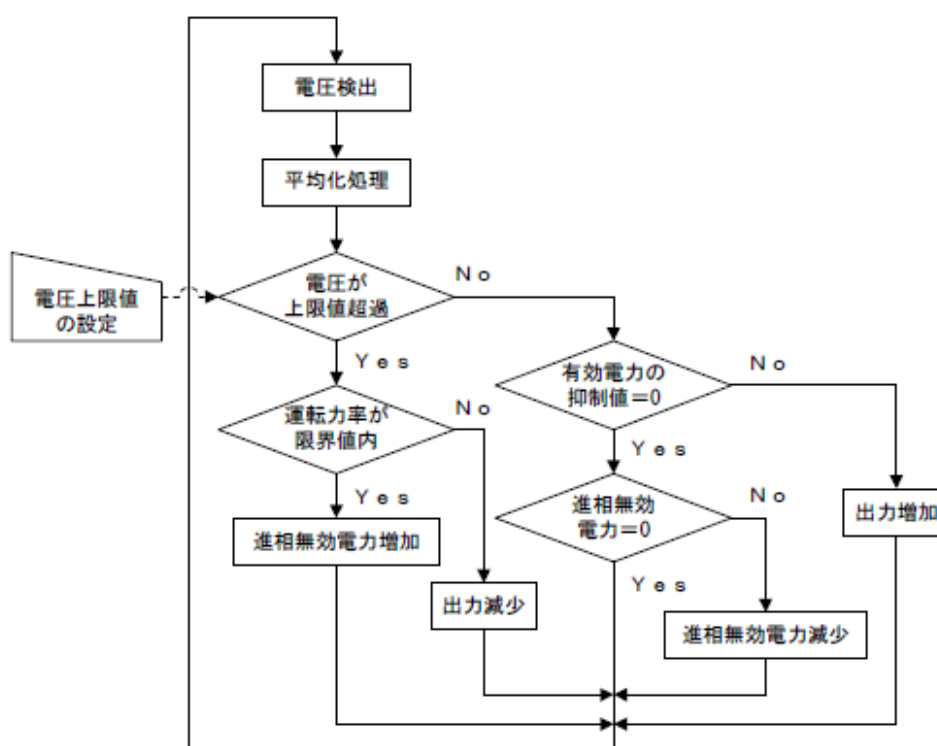


図 A.1 電圧上昇抑制制御のフロー図^[14]

付録 B PCS の電圧上昇抑制機能

本論文では、進相無効電力制御をベースとした PCS の電圧上昇抑制機能を想定した。本節では図 3.7 のモデルにおいて電圧-無効電力制御の運転状態を示す。

電圧逸脱が大きい時間帯である 10 時~12 時についての結果のみを示す。また、LVsb, LVSc については LVsa と同一の構成であるため LVsa についてのみ結果を報告する。まず、制御前後の電圧分布の結果を図 B.1 に示す。同図(a)より PV の逆潮流を起因とした電圧上昇によって各低圧系統内の電圧は適正範囲が大きく逸脱しているが、同図(b)を見ると PCS による電圧-無効電力制御によって電圧が適正範囲内に維持されていることが分かる。またこの時の PCS の状態を図 B.2~図 B.4 に示すが、無効電力制御量の大きかった LVS1 と LVS5 についてより詳細に注目すると配電線末端に位置するノード 1 とノード 10 が最も無効電力を制御し負担が大きかったことが分かる。この結果として図 3.8 に示されているように LVS1 および LVS5 の配電線末端に位置する PV は出力抑制を余儀なくされていることが分かる。

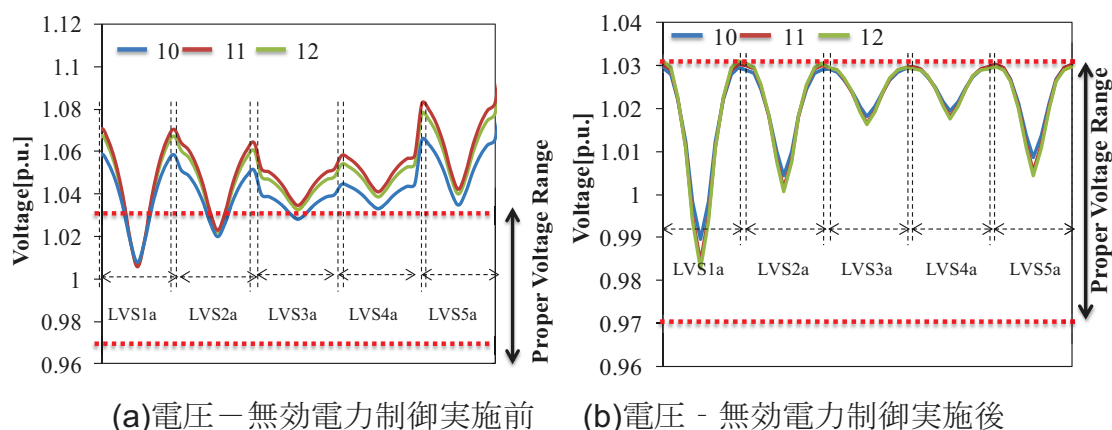
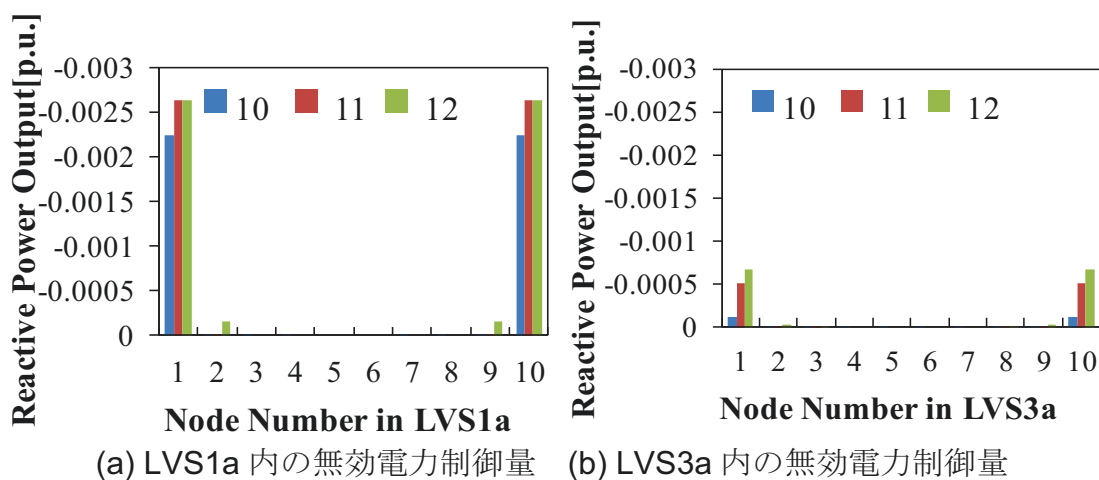
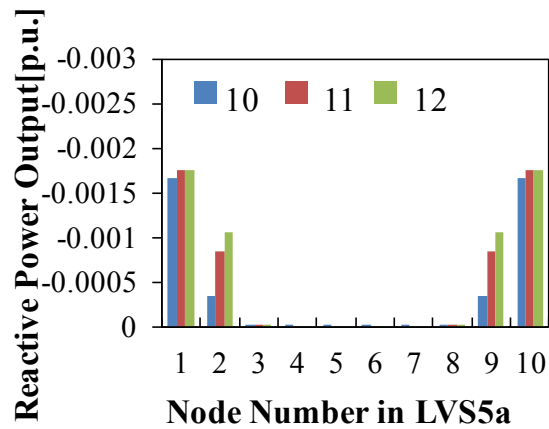


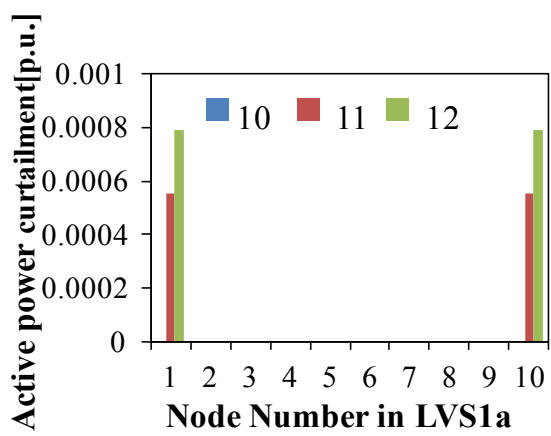
図 B.1 各低圧系統における電圧分布



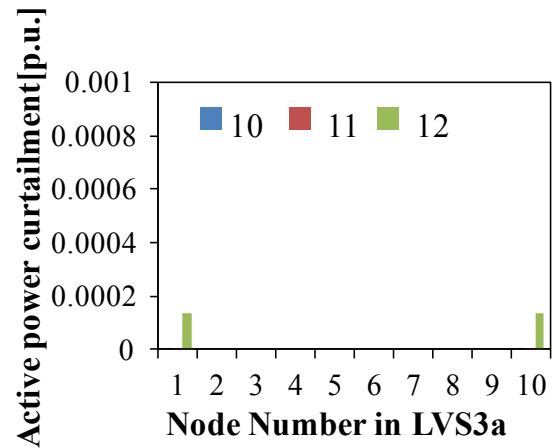


(c) LVS5a 内の無効電力制御量

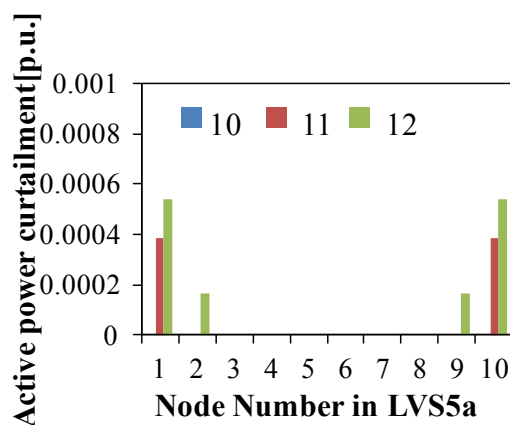
図 B.2 各低圧系統内の無効電力制御量



(a) LVS1a 内の出力抑制量

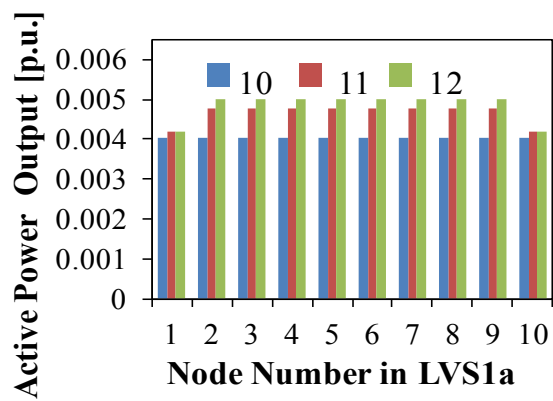


(b) LVS3a 内の出力抑制量

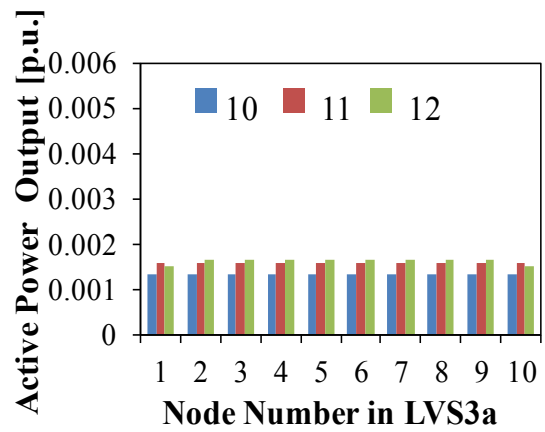


(b) LVS5a 内の出力抑制量

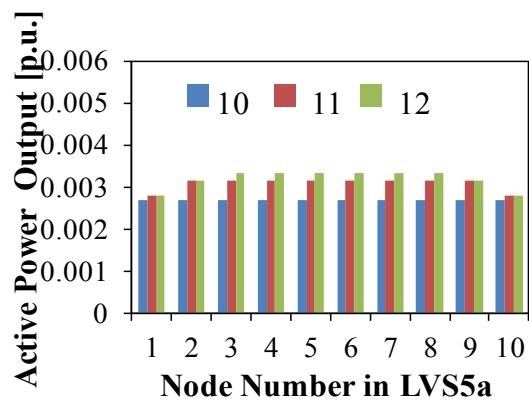
図 B.3 各低圧系統内の有効電力出力抑制量



(a) LVS1a における有効電力出力



(b) LVS3a における有効電力出力



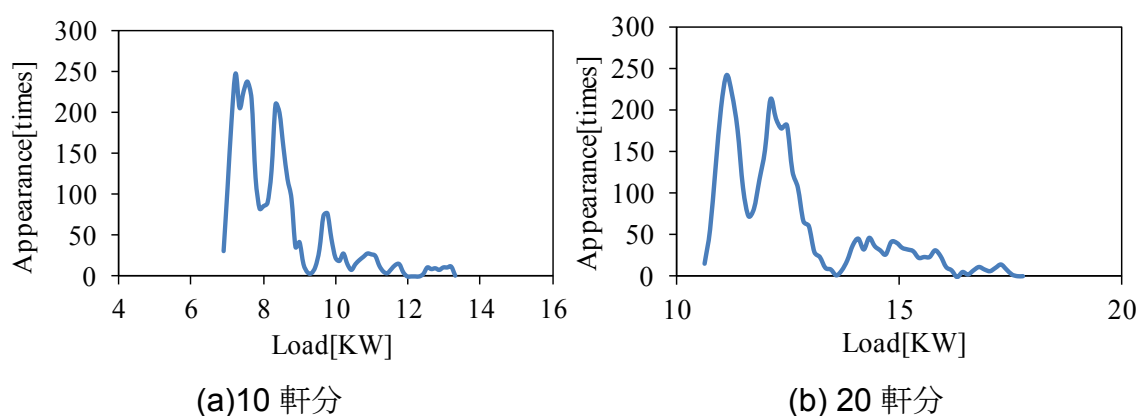
(c) LVS5a における有効電力出力

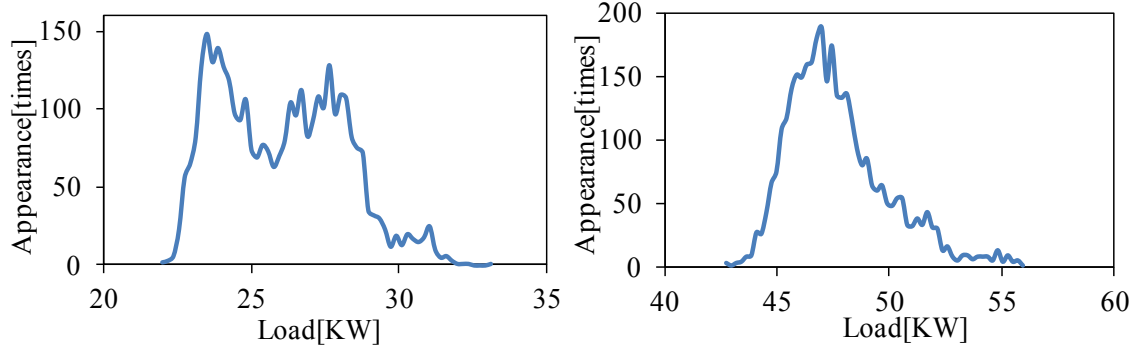
図 B.4 各低圧系統内の無効電力制御後の有効電力出力

付録 C 集約した低圧系統の負荷変動

需要家 1 件ずつの負荷変動は不規則であり、確率モデルの作成は困難だと考えられるが、ある程度数が集約された場合、負荷変動の急峻な成分がならされ特定の確率密度関数に近似可能になると考えられる。本論文では集約された負荷が正規分布に従うと想定したが、本章では NEDO プロジェクトで得られたデータ^{[57][58]}の一部を活用し想定の妥当性を検証した。同事業は群馬県太田市 Pal Town 城西の杜にて PV システムが導入された住宅について消費電力と PV 出力を計測したデータを一般公開している^{[51][52]}。同データでは 2004 年 2 月 2 日から 2008 年 2 月 19 にまでの期間において 1 秒毎のデータを、553 軒分保存されている。本論文での負荷変動は 1 時間の間にどれだけ負荷が変動するかをモデル化するため、負荷データのうち、2007 年 5 月 10 日の 12 時～13 時の負荷データ 3600 個、地点数 100 までの集約し変動分布の形状について評価を行った。

図 C.1 に集約した負荷の頻度分布を示す。集約される負荷の数が大きくなるほど変動分布の谷間が減少し、数値計算例と同等のピーク負荷容量となる 100 軒分を集約した場合は、正規分布の形状に近づくことが分かり、負荷変動を正規分布に仮定することはある程度妥当であると考えられる。しかし負荷変動のパラメータ、特に標準偏差については数値計算で想定した期待値の 30%より小さくなっている。しかし、第一部の図 3.9 の日負荷曲線の各点において、正規分布になるかを検証するには多くの解析、また、554 軒の住宅データからの膨大な組み合わせが必要となるため、本論文では負荷変動の確率密度分布を詳細には決めず、形状を正規分布と仮定し、期待値を日負荷曲線、標準偏差を期待値の 30%に決定した。





(c) 50 軒分

(d) 100 軒分

図 C.1 負荷の集合化と頻度分布

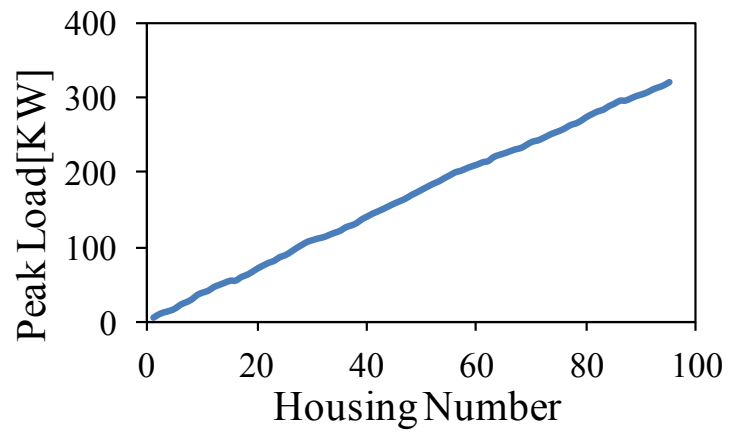


図.C.2 集約した住宅数とピーク負荷の関係

付録 D 擬似逆行列による連立方程式の解法^[53]

本論文では, 第一部 3 章で述べたようにセンサ付区分開閉器の計測情報を潮流方程式を導出し, 潮流計算を行うことを検討した。センサの計測情報を追加した場合, 条件式が未知数より多くなり, 通常 of 逆行列計算にて解くことはできないため, 本論文では擬似逆行列を活用した。本付録では擬似逆行列二関しての概要を示す。

擬似逆行列とは未知数の数(n)≠条件の数(m)である場合に近似的に連立一次方程式を解く手法の一つである。具体的には式 1 で示される連立 1 次方程式に対して式 2 のように誤差ノルム $\|Ax-b\|$ を最小化する \bar{x} を算出するための行列である。

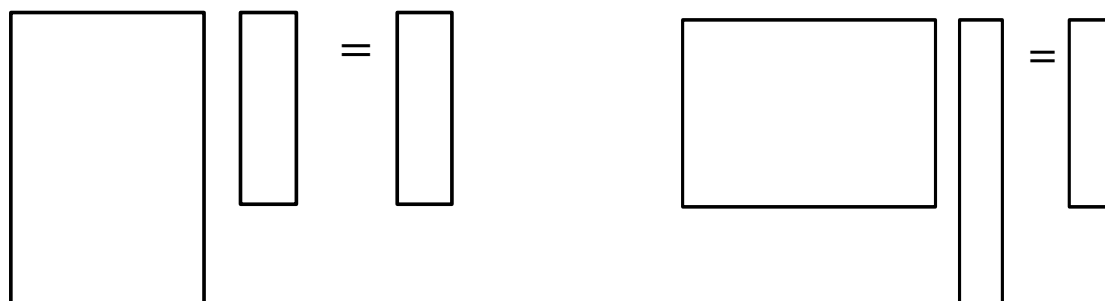
$$Ax = b \quad \text{..... (D.1)}$$

$$\bar{x} = A^+ b \quad \text{..... (D.2)}$$

$m > n$ の場合 (図 D.1(a)) はいわゆる最小 2 乗法のことであり, 両辺に A の転置行列をかけて正則の行列 ($A^T A$) を作成し, その逆行列を算出することで最適解 \bar{x} を求めることができる。

$m < n$ の場合 (図 D.1(b)) は A に対し特異値分解 ($A^T A$ の固有値を扱う問題, 正方行列の対角化に対応する) を施すことで誤差ノルムを最小化する最適解 \bar{x} を求める。

本論文では条件式の方が変数よりも多いため $m > n$ の場合に該当する。解法としては式 (3.20) の両辺に左から J^T を掛け, 生成される連立方程式は正則の正方行列となるため, 式 (3.21) を解くことで修正量ベクトルを算出することができる。



(a) 未知数(m) < 条件の数(n) (b) 未知数(m) > 条件の数(n)

図 D.1 擬似逆行列を適用する連立方程式

付録 E 風力発電機の発電電力と確率モデル

E.1 出力曲線^[54]

風車の出力曲線は、図 E.1 のようにカットイン風速（風車が運転を始める風速）と定格容量との関係にほぼ従う。風車の出力は、通常、おのこの風車の設計によって 12~16m/s の間で定格容量に達する。定格を超える風速では、最大発電電力は制限される。言い換えると、得られる風のエネルギーの一部を「取りこぼす」ことと成る。出力制御は、ピッチ制御か、ストール制御により行うことができる。したがって風車は、上限をカットアウト風速とするある風速の幅において、最大電力を出力する。カットアウト風速とは、風車が発電を停止し主風向からフェザーリングさせる風速である。典型的なカットアウト風速は 20~25m/s の範囲である。本論文においては定格出力に到達する

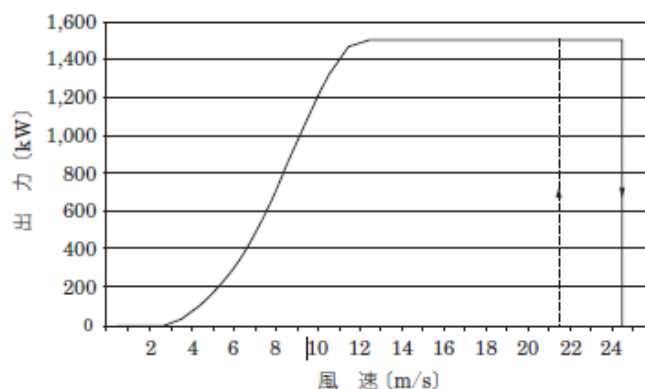


図 E.1 カットアウト風速が 25m/s の 1500kW ピッチ制御風車の典型的な出力曲線 (破線はヒステリシス効果を示す) ^[54]

E.2 風速出現率分布

本論文においては比較的長周期の風力発電の出力変動を対象とした需給制御について検討を行う。このような周期を対象とした風力発電の確率モデルとして式 C.1 で示される Weibull 分布が用いることができる^[54]。Weibull 分布ではその分布の期待値が平均値と等しく尺度定数と形状定数の 2 つがパラメータとなっており、本論文では風速の分布に良く使われているレイリー分布 ($k=2, c=2\bar{V}/\sqrt{\pi}$) を用いた。

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{k}{c} \right)^{k-1} \exp \left\{ - \left(\frac{V}{c} \right)^k \right\} \dots \dots \dots (E.1)$$

ここで,

\bar{V} 平均風速 :

$f(V)$: 風速 V の出現確率

c : 尺度定数

k : 形状定数

E.3 複数地点間の相関関係の確率モデル

式 E.1 は 1 地点における風速の出現率分布であるが, 複数地点に風力発電が導入されている場合, 各地点の風速は互いに相関関係があるため^{[55]~[56]}, 式 E.2 の確率モデルを適用する際には各地点の相関性を考慮する必要がある。しかし, weibull 分布のような複雑な分布では確率密度分布関数を導出することは難しい。そこで, 近似的に精度良く複数地点間の相関性を考慮した確率密度分布を作成するために正規分布に基づく結合分布関数 (コピュラ) を用いた手法が提案されている^{[57]~[59]}。本論文においても風速の相関性を考慮するために同手法を用いた。

同手法の詳細は付録 F に示す通りである。

付録 F 正規乱数の生成手法 ^{[60] [61]}

第一部では、負荷変動を正規乱数で、第二章では相関関係にある地点毎の風速を Copula を用いて生成している。本章では両者を作成する上で基礎となる正規乱数の生成技術にを述べる。

F.1 単一の正規乱数の生成方法

本節では平均値 0, 標準偏差 1 の正規分布である式 F.1 に従う乱数を生成する場合を例として生成する手法を述べる。

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} \dots\dots\dots (F.1)$$

正規乱数の生成手法としてはボックスミュラー法が良く用いられてる^[52]。以下に手順を示す。

[手順 1] 2つの一様乱数 μ_1, μ_2 をを生成する。ただし, $0 < \mu_1, \mu_2 < 1$ とする。

[手順 2] 以下の式に従い, μ_1, μ_2 を変換することで, 正規分布に従う乱数を生成することが出来る。

$$z_1 = \sqrt{(-2 \log_e \mu_1)} \cos(2\pi\mu_2) \dots\dots\dots(F.2)$$

F.2 相関のある正規乱数の生成方法 (多変量正規乱数の生成方法)

F.2.1 コレスキー分解に基づく乱数の生成方法

k 個の変数を持つ正規分布 (k 変量正規分布) は共分散行列 Σ を用いて f.3 式で表すことができる。

$$f(Y) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{k}{2}} |\Sigma|^{\frac{1}{2}}} \exp\left(-\frac{1}{2}(Y - \mu)^T \Sigma^{-1}(Y - \mu)\right) \dots\dots\dots(F.3)$$

ただし,

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1k} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \cdots & \sigma_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{k1} & \sigma_{k2} & \cdots & \sigma_{kk} \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_k \end{bmatrix}, \quad \mu = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \vdots \\ \mu_k \end{bmatrix}$$

前節と同様に平均値 0 、分散 1 を持つ、かつ、互いに相関な乱数の集合 Y を対象とする。式 F.1 に従う正規乱数 Z を、以下の式 F.4 のよって変換することで算出することができる。なお、 C 行列は式(F.5)に示されているように共分散行列を式 (F.6) ~ (F.9) に基づきコレスキー分解（もしくは固有値分解）することで得られる。この共分散行列は平均値 0 、分散 1 の集合を対象とすると相関係数行列と等しくなる。この操作で得られる行列に対し、式 (F.10) のように対象とする負荷の確率密度分布の平均値および標準偏差を与え変換することで、負荷の相関性を考慮した負荷変動の分布が得られる。

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_k \end{bmatrix} \in Z = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1k} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{k1} & c_{k2} & \cdots & c_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_k \end{bmatrix} \dots\dots\dots(F.4)$$

$$\left. \begin{array}{l} CC' = \Sigma \\ C^T = C'' \end{array} \right\} \dots\dots\dots(F.5)$$

$$c_{i1} = \sigma_{i1} (\sigma_{11})^{-\frac{1}{2}} \quad (i=1,2,\dots,k) \dots(F.6)$$

$$c_{ii} = \left(\sigma_{ii} - \sum_{l=1}^{i-1} c_{il}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (i=2,3,\dots,k) \dots(F.7)$$

$$c_{ij} = \frac{\left(\sigma_{ij} - \sum_{l=1}^{i-1} c_{il} c_{jl} \right)}{c_{jj}} \quad (1 < j < i \leq k) \dots(F.8)$$

$$c_{ij} = 0 \quad (i < j \leq k) \quad (F.9)$$

$$P_{Li} = \sigma_{PLi} y_{PLi} + \mu_{PLi} \quad (F.10)$$

F.2.2 スペクトル分解に基づく乱数生成手法^[62]

コレスキー分解を適用する場合、共分散行列（もしくは相関係数行列）が正定値行列（固有値が全て正の値（0 を含まない））である必要がある。なお、共分散行列が正定値行列ではない場合、文献（62）では、コレスキー分解によらず、C 行列を計算する手法が紹介されている。以下にその詳細を述べる。

手順 1：共分散行列 Σ の固有値を算出し、式 (F.11) を満たすよう、固有ベクトルで構成される行列 S を算出する。なお、 Λ は対角成分に Σ の固有値を持つ行列である。

$$\Sigma \cdot S = \Lambda \cdot S \quad \text{..... (F.11)}$$

手順 2：式 (F.11) に対して両辺に右側から S^{-1} をかけ合わせることで、共分散行列は式 (F.12) のように分解することができる。従って、C は式 (F.13) によって算出することができる。

$$\Sigma \Rightarrow S^{-1} \Lambda S \quad \text{..... (F.12)}$$

$$\therefore C = S^{-1} T \quad \text{..... (F.13)}$$

ただし、

$$\Lambda = T \cdot T$$

手順 3：算出された C 行列と F.2.1 に従い、乱数を生成する。なお、固有値に負の成分があった場合は、該当する Λ の成分を 0 とした Λ' および Σ' を算出し、近似的な C 行列の算出し、乱数を生成する。

付録 G JNT (Joint Normal Transform Method) 法による相関のある風速変動の生成^[62]

本章では、相関のある風速変動の生成手法として、Copula と呼ばれる手法のうち、正規分布の累積密度関数に基づいた JNT 手法による風速変動の生成手法を述べる。

G.1 累積密度分布を用いた一様乱数による周辺分布の生成

前章ではボックスミュラー法によって正規乱数を発生させたが、累積密度分布(cdf : cumulative distribution function)を用いて周辺分布を得ることもできる。 $f(x)$ のcdfである $F_X(X)$ をそに対して、式 G.1 によって一様乱数 U を用いて $f(x)$ に従う乱数 X を生成することができる。

$$X = F_X^{-1}(U) \Leftrightarrow U = F_X(X) \dots\dots\dots (G.1)$$

G.2 Copula

G2.1 概要

Copula とは 1 次元周辺分布を合成 (join) , もしくは組み合わせた(couple) して得られる多変量周辺分布である。言い換えれば, Copula とは, $[0,1]$ 区間からなる 1 次元周辺分布を持つ多次元分布であるともいえる。Copula の例として, 累積密度分布 F_X, F_Y に従う, 変数 X, Y について考える。この場合, 両関数の Copula は下記のように表すことができる。

$$C_{XY}(u, v) = F_{XY}(F_X^{-1}(u), F_Y^{-1}(v)) \dots\dots\dots (G.2)$$

なお, F_X, F_Y が連続的な関数の場合, C は一意に定まる。

ここで, 式 (G.1) にあるように 2 つの一様乱数 $u \in U, v \in V$ に基づいて, $u = F_X(x), v = F_Y(y)$ とすると, 式 (G.2) は式 (G.3) となる。

$$C_{XY}(u, v) = F_{XY}(F_X^{-1}(u), F_Y^{-1}(v)) \dots\dots\dots (G.3)$$

この式 (G.3) はそれぞれの多変量分布関数から, Copula 関数を算出するために用いられる。

G2.2 Copula による相関な乱数生成手法

乱数の生成手法としては, 式 G.1 を正規分布などの特定の累積密度分布の合成関数に対応させ, 図 F.1 のような手順で行われる。これは, F_{XY} の確率密度関数の Copula 関数が既知でない場合, 特に, 本論文のようにワイブル分布のように複雑な関数である場合は, Copula 関数を得ることが困難なためである。

以下に Copula 関数を正規分布と仮定した JNT 法のアルゴリズムのフローチャートを図 G.2 に示す。なお、手順は以下のとおりである。

手順 1：互いに独立な N 次元の正規乱数 Z を生成 (F.1 節) する。

手順 2：相関係数行列 R をコレスキー分解し、 Z をもとに相関のある N 次元正規乱数 Y を生成 (F.2 節)

手順 3：相関な N 次元正規乱数 Y を、それぞれ累積密度分布関数 Φ_c に従う u_c 変換する。

手順 4： u_c を式 G.1 によって、確率密度関数 f に従う乱数 x に変換する。

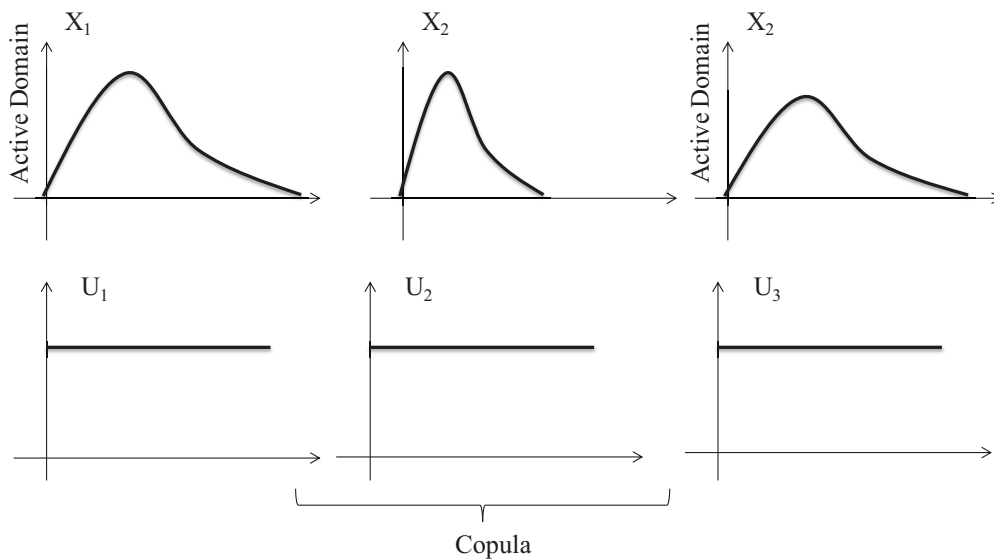


図 G.1 Copula の概要

なお、本論文で風速変動を生成する場合のフローチャートを以下に示す。

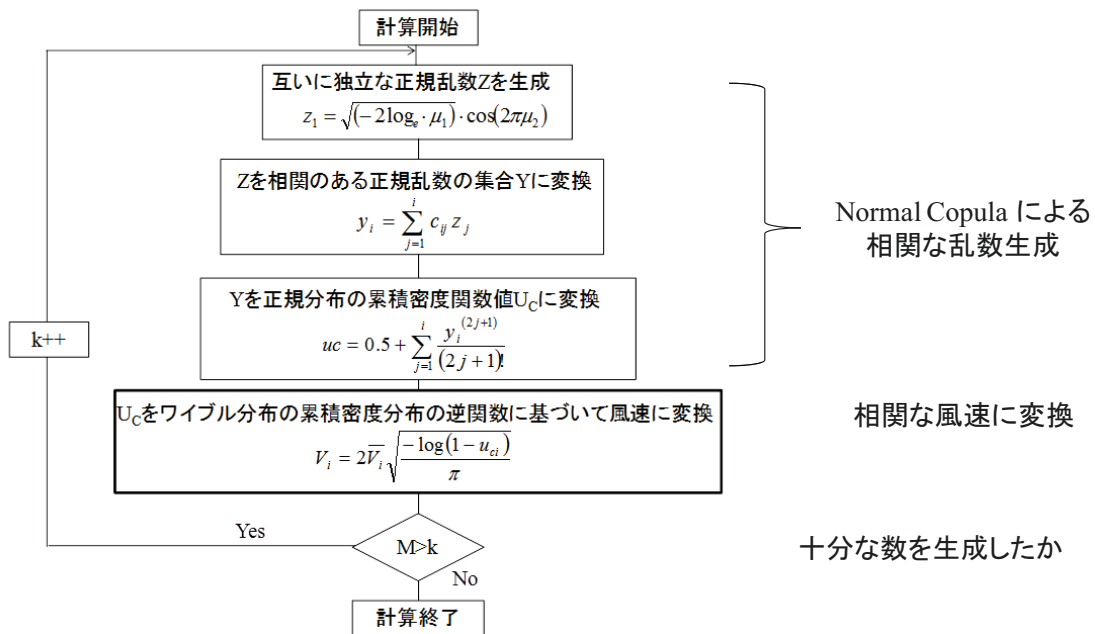


図 G.2 Copula による相関のある風速データの生成方法

付録 H 確率的経済負荷配分手法^[4]

H.1 N-1 基準違反確率の算出 (リスク評価)

H.1.1 風力発電機出力変動時の潮流分布の算出 (図 H.1 (a))

手順を図 H.1 に示す。まず、風力発電機出力が予測値よりも変動した場合、需給アンバランスが生じる。需給アンバランスが生じた場合、系統周波数を一定値以内に維持するために、系統内の出力可能な発電機を制御する必要がある。風力発電機出力の変動成分に応じて、約 20~30 分以上の変動成分は負荷周波数制御 (LFC : Load Frequency Control) によって需給制御が行われる。文献 (4) では簡単のため過渡的な状態は考慮せず定常状態における各発電機出力および潮流分布のみを対象とするため、LFC による発電機の調整量は式 (H.1), (H.2) で模擬した。以上の想定のもと風力発電機出力の変動を確率的に与えることで、各線路潮流の確率密度分布を算出することができる。

$$\Delta P_{LFC,i} = UB \cdot \left(\frac{S_{P_{G,i}}}{\sum_k^{N_G} S_{P_{G,k}}} \right) \dots\dots\dots (H.1)$$

$$UB = \sum_i^{N_{WT}} (\overline{P_{WTi}} - P_{WTi}) \dots\dots\dots (H.2)$$

ただし、

- UB: 需給アンバランス
- $\Delta P_{LFC,i}$: 発電事業者 *i* の LFC 出力
- S_{PGi} : 発電機事業者 *i* の LFC 容量

H.1.2 N-1 事故時の潮流分布および制約違反確率の算出 (図 H.1(b))

本論文では、N-1 基準における想定事故は、変圧器故障および電源脱落は想定せず、送電線 1 回線 3 相地絡事故のみを想定する。この時、事故ケース *l* での潮流量は事故ケース毎の潮流変化量を用いて以下の式 (H.3) により算出できる。なお、事故時の潮流に風力発電機出力の変動を考慮した場合でも式 H.3 と同様に潮流変化分シフトする。

$$P_{flow_{k-j}}^{(N-1),l} = P_{flow_{k-j}}^{(N)} + \Delta P_{flow_{k-j},l} \dots\dots\dots (H.3)$$

ただし、

- $P_{flow_{k-j}}^{(N-1),l}$: 事故ケース *l* のノード *k-j* 間の潮流量
- $P_{flow_{k-j}}^{(N)}$: ノード *k-j* 間の潮流量
- $\Delta P_{flow_{k-j},l}$: 事故ケース *l* のノード *k-j* 間の潮流変化量

以上のように算出された、事故時線路潮流の確率密度分布に対し、次式のように熱容量制約と比較することで事故時の N-1 基準制約違反確率を算出する。

$$\alpha_{k-j} = PDF(P_{flowk-j} > P_{flowlim_{i,k-j}}) \dots\dots\dots (H.4)$$

ただし、

α_{k-j} : 線路 k-j での熱容量制約違反確率

H.2 安定制約の設定 (図 H.1 (c))

制約違反確率の許容値を線路毎に系統運用者が設定するとし、ある線路が許容値を越えた場合、本研究では式 (H.5) の潮流制約を更新し、線路違反確率が許容値以下になるように再度約定処理を行う。線路制約の更新は、線路潮流の確率密度分布は再度の約定処理前後においてその形状は変化しないと想定のもと、以下の式 (H.5) によって更新する。この時、線路の潮流を制限した場合制約違反確率が解消されるが同時に図 H.2 のように他の線路では潮流量が増加し、違反確率の増加が懸念される。ゆえに式(H.5)に加えて違反確率が許容値以下の線路に対しても、その増加を許容値以内にするために式 (H.6) のように設定する。その後、式 (H.5) と式 (H.6) を用いて再度経済負荷配分を実施し、制約違反を解消する。

a) $\alpha_{k-j} > \bar{\alpha}$

$$P_{flowmax,k-j,renewed} = \overline{P_{flowk-j}} - (P_{flowlim,k-j} - P_{flow,tlimit_{k-j}}) \dots\dots\dots (H.5)$$

b) $\alpha_{k-j} \leq \bar{\alpha}$

$$P_{flowmax,k-j,renewed} = \overline{P_{flowk-j}} + (P_{flow,tlimit_{k-j}} - P_{flowlim,k-j}) \dots\dots\dots(H.6)$$

ただし、

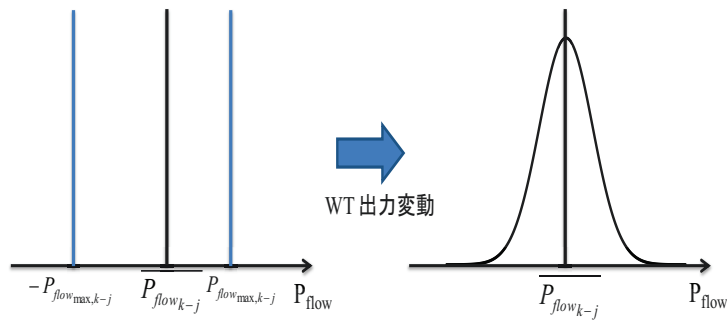
$P_{flowmax,k-j,renewed}$: 線路 k-j 間の潮流制約値 (更新値)

$P_{flow,tlimit_{k-j}}$: 線路 k-j 間の熱容量制約値

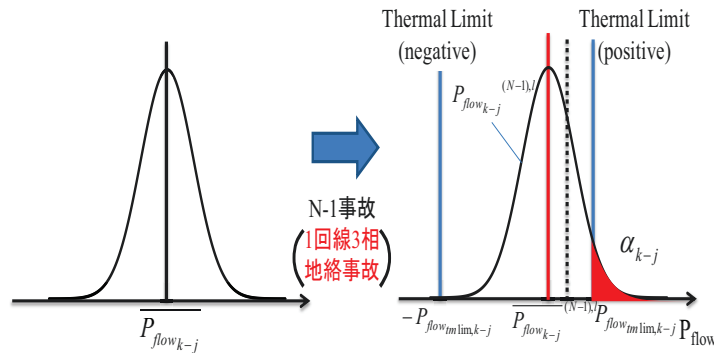
$\overline{P_{flowk-j}}$: 線路 k-j 間の潮流量 (期待値)

$\bar{\alpha}$: 熱容量制約違反確率の許容値

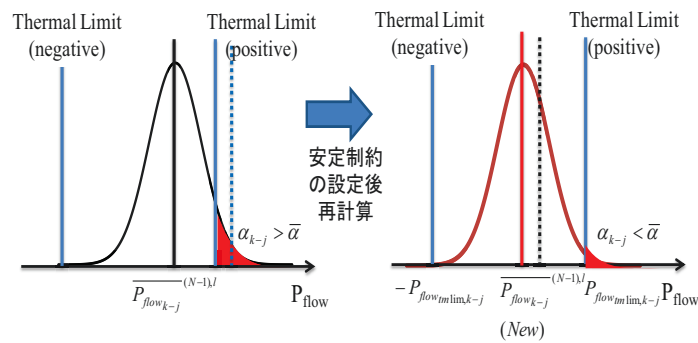
$P_{flowlim,k-j}$: 線路潮流量の許容値($\alpha_{k-j} = \bar{\alpha}$ となる潮流量)



(a) WT 変動時の潮流分布の算出



(b) 制約違反確率の算出



(c) 安定制約の再設定 (左: 安定制約設定前, 右: 安定制約設定後)

図 H.1 N-1 事故時の制約違反解消手法のフロー

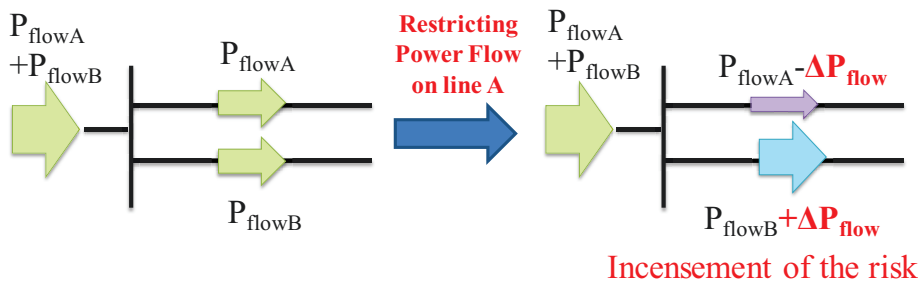


図 H.2 他の線路における制約違反確率増加

付録 I 粒子群最適化手法 (Particle Swarm Optimization) ^[65]

I.1 概要

Particle Swarm Optimization (PSO)は単純化された社会モデルのシミュレーションを通じて 1995 年に J.Kennedy と R.Eberhart により開発された発見的最適化手法(メタヒューリスティクス)の一つである。"Particle Swarm"は、速度の概念をもつ探索点を表現した「Particle (微小粒子)」と、人工生命の研究における Swarm Intelligence で用いられている「Swarm (群れ)」とを合わせて作られた言葉である。

PSO の全体的な概念は、鳥の群れが餌を探す行動研究によって導かれた「情報を群れ全体で共有している」という仮定に基づいている。すなわち、群を構成する個体が独立に行動するのではなく、群を構成する個体の個別情報と、群全体の共通情報を組み合わせ、一定の規則に従って行動するという概念である。

最適化アルゴリズムとしての PSO の特徴は、①探索点が複数個体存在する多点探索アルゴリズムであること、②多点間で互いに最良解に関する情報を共有し、それに基づいて解空間を探索する、ことがあげられる。また非常に簡単なアルゴリズムで構成され、基本的な算術演算しか用いていない点も特徴としてあげられる。具体的には図 I.1 に示すように現在地 x に対して、これまで自分が探索してきた最良解と群としての最良解に近づくよう速度ベクトルを決定し、移動することで解空間の探索を行い最適解の算出を検討している。

これまでの PSO に関する解析的・数値実験的研究を通じて、多峰性の大域的最適化問題の最適解もしくは準最適解を実用的な計算時間内に求めることが可能なことが明らかにされてきた。さらに PSO は、ニューラルネットの学習アルゴリズムへの適用、電力システムの電圧無効電力制御への適用、制御系設計問題への適用をはじめ、さまざまな問題に対してその有効性が確認されており、将来の発展が期待されている。

I.2 アルゴリズム

PSO は、もともとは二次元空間上で群れの動きをシミュレーションする過程から開発された手法であるが、最適化手法としての PSO は多次元空間に拡張することができる。 n 次元空間における一つの Particle(探索点)の位置は n 次元ベクトルによって式は以下のようにあらわすことができる。

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{in}) \dots\dots\dots (I.1)$$

ここで、 i は Particle の番号であり、 x_{ij} は i 番目の Particle の位置ベクトルの j 次元成分を意味する。また、各 Particle は位置ベクトルのほかに式 であらわされる移動ベクトルも持っている。

$$v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ij}, \dots, v_{in}) \dots\dots\dots (1.2)$$

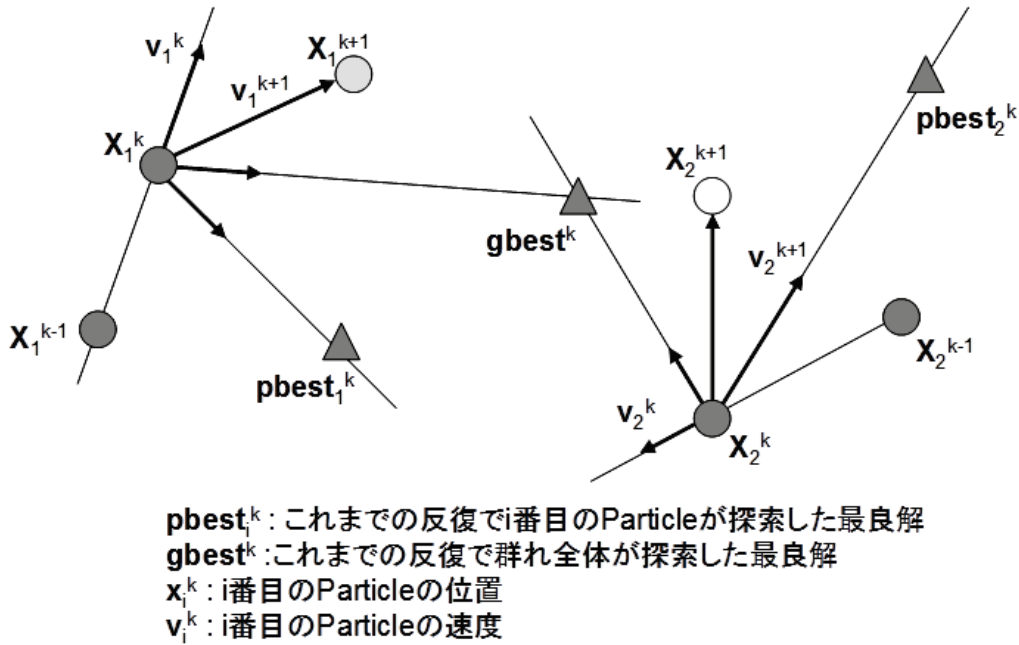


図 1.1 粒子群最適化法のご概念図^[48]

<Step 0>準備

Particle の数 m , 次元 n , Particle のパラメータ w , c_1 , c_2 および最大反復回数 T_{max} を与え, $k=0$ とおく。

<Step 1>初期化

各 Particle の初期位置 x_i^0 と初期速度 v_i^0 を与える。初期位置 x_i^0 は実行可能領域内にランダムに初期速度 v_i^0 はランダムに与える。ただし, $pbest_i^0$ と $gbest_0$ は以下のように与える。

$$pbest_i^0 = x_i^0 \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1.3)$$

$$gbest^0 = pbest_{i_g}^0 \quad (1.4)$$

$$\text{ただし, } i_g = \arg \min f(pbest_i^0) \quad (1.5)$$

<Step 2> v_i, x_i の更新

下式に基づき、速度ベクトル v を更新し、位置ベクトル x を更新する。

$$v_{ij}^{k+1} = \omega * v_{ij}^k + c_1 * \text{rand}_1()_{ij} * (pbest_{ij}^k - x_{ij}^k) + c_2 * \text{rand}_2()_{ij} * (gbest_j^k - x_{ij}^k) \dots\dots\dots (1.6)$$

ただし、

$$x_{ij}^{k+1} = x_{ij}^k + v_{ij}^{k+1} \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

<Step 3 > $pbest_i$ と $gbest$ の更新

位置ベクトル x_{ij} に対して、これまでに探索してきた最良解よりも評価値が良かった場合、式 (1.7) , 式 (1.8) によって $pbest_i$ を更新する。さらにこれまで群の中での最適解よりも良い評価値が得られた場合、式 (1.9) によって $gbest$ を更新する。

$$pbest_i^{k+1} = x_i^{k+1} \quad i \in I \dots\dots\dots (1.7)$$

$$pbest_i^{k+1} = pbest_i^k \quad i \notin I \dots\dots\dots (1.8)$$

$$gbest_i^{k+1} = pbest_{i_g}^{k+1} \dots\dots\dots (1.9)$$

ただし、

$$I = \{ i \mid f(x_i^{k+1}) < f(pbest_i^k), i = 1, 2, \dots, m \} , i_g = \arg \min f(pbest_i^{k+1}) \dots\dots\dots (1.10)$$

<Step 4 > 終了判定

$k = T_{max}$ ならば終了。さまなければ $k = k + 1$ として Step2 へ行く。

1.3 経済負荷配分問題への適用

本論文での経済負荷配分において適用する場合、制約違反の評価をペナルティとして式 (1.11) で評価した。この式に燃料費に加え、目的関数を最小化するよう、火力発電機出力を調整することで最適解の算出を行った。ゆえに第 2 章では実際には下式の式 (1.12) を PSO の目的関数として、変数を発電機の出力とすることで制約付きの経済負荷配分問題を解いている。

$$\begin{aligned}
Penalty = & \left\{ \sum_m^{N_D} P_{Dm} - \left(\sum_i^{N_G} P_{Gi} + \sum_n^{N_{WT}} P_{WT_n} \right) \right\}^2 + \left(P_k - \sum_{j=1}^n \frac{\delta_k - \delta_j}{x_{kj}} \right)^2 \\
& + \left[\min \left\{ 0, P_{flow, tm} \lim_{k-j} - \left| \frac{\delta_k - \delta_j}{x_{kj}} \right| \right\} \right]^2 + [\min \{0, P_{Gi \max} - P_{Gi}\}]^2 + [\min \{0, P_{Gi} - P_{Gi \min}\}]^2 \\
& \dots\dots\dots (I.11)
\end{aligned}$$

$$f(x) = f(P_{G1}, \dots, P_{GN}) = \sum_i^{N_G} F(P_{Gi}) + Penalty \rightarrow \min \dots\dots\dots (I.12)$$