

博士論文

大規模電力系統の
供給信頼性向上対策手法に関する研究

橋本博幸

目次

1. 序論.....	1
1.1. 研究の背景.....	1
1.2. 大規模電力系統の供給信頼性に関する諸課題.....	5
1.3. 本研究の目的.....	10
1.4. 本論文の構成.....	13
参考文献.....	17
2. 負荷変化に対する系統安定性の系統安定化機器による向上効果評価手法	19
2.1. 緒言.....	19
2.2. エネルギー関数の定式化.....	21
2.2.1. 系統モデル.....	21
2.2.2. エネルギー関数の定式化.....	23
2.3. エネルギーマージンの評価手法.....	26
2.3.1. Second-kick 法.....	26
2.3.2. Second-kick 法によるエネルギーマージンの評価.....	26
2.4. 提案手法.....	29
2.4.1. 提案手法.....	29
2.4.2. 提案手法における Second-kick 適用タイミング.....	31
2.5. シミュレーションによる有効性検証.....	37
2.5.1. シミュレーション条件.....	37
2.5.2. Second-kick 適用タイミングの違いによる不安定現象の確認.....	39
2.5.3. エネルギーマージンによる SVC 導入効果の定量的評価.....	44
2.6. 結言.....	47
参考文献.....	49
3. オンライン周波数安定化における負荷脱落量推定手法.....	51
3.1. 緒言.....	51
3.2. 動特性を考慮した負荷モデル.....	55
3.3. 負荷過渡特性に関する分析と検証.....	59
3.3.1. 実績データの分析.....	59
3.3.2. 動特性パラメータ分析結果の考察.....	61
3.3.3. 電圧低下率と動特性パラメータ.....	62
3.4. 負荷脱落量推定手法の提案.....	64
3.4.1. 提案手法.....	64

3.4.2.	動特性パラメータの推定.....	67
3.4.3.	過渡特性の低減処理.....	68
3.4.4.	負荷脱落量の推定.....	68
3.5.	故障実績データによる提案手法の有効性検証.....	69
3.5.1.	検証条件の設定.....	69
3.5.2.	検証結果.....	71
3.5.3.	他の実績データによる基本性能検証.....	73
3.6.	考察.....	76
3.7.	結言.....	77
	参考文献.....	79
4.	大規模計画問題に対する高速・安定な連続系最適化手法.....	80
4.1.	緒言.....	80
4.2.	一般二次計画問題と最適化手法.....	83
4.2.1.	一般二次計画問題.....	83
4.2.2.	内点法.....	84
4.2.3.	有効制約法.....	85
4.3.	提案手法.....	86
4.3.1.	提案手法の概要.....	86
4.3.2.	アルゴリズム詳細.....	87
4.4.	ベンチマーク問題による有効性の検証.....	96
4.4.1.	ベンチマーク問題.....	96
4.4.2.	検証条件および実験環境.....	97
4.4.3.	検証結果.....	98
4.4.4.	求解安定性に関する考察.....	108
4.5.	需給計画問題への適用.....	111
4.5.1.	経済負荷配分問題.....	111
4.5.2.	検証用問題と検証条件.....	112
4.5.3.	検証結果と考察.....	113
4.6.	結言.....	115
	参考文献.....	117
5.	起動停止可能回数を考慮した年間需給計画手法.....	118
5.1.	緒言.....	118
5.2.	年間需給計画問題.....	122
5.2.1.	起動停止回数制約と燃料消費量制約.....	122
5.2.2.	起動停止回数制約と燃料消費量制約を考慮した需給計画問題.....	123
5.3.	起動停止回数制約と燃料消費量制約を考慮した年間需給計画手法の提案.....	127

5.3.1. 提案手法の全体構成.....	127
5.3.2. 前処理と本計算処理.....	128
5.3.3. 起動停止回数の違反解消.....	131
5.3.4. 燃料消費量の違反解消.....	134
5.4. シミュレーションによる有効性検証.....	138
5.4.1. シミュレーション条件.....	138
5.4.2. シミュレーション結果と考察.....	140
5.5. 結言.....	148
参考文献.....	149
6. 結論.....	151
6.1. 研究の成果.....	151
6.2. 今後の課題.....	155
謝辞.....	157
業績目録.....	159

1. 序論

1.1. 研究の背景

電力系統は、発電所・変電所といった供給側設備および受電設備・電気利用設備などの負荷側設備が、送電線や配電線の流通設備によって電氣的に結合されたエネルギーネットワーク・システムとして有機的に機能している^{[1][2][3]}。電力系統の各構成要素は次のような具体的な役割を担っている。発電所はさまざまなエネルギーを電気エネルギーに変換する一連の設備である。大規模集中型の系統側発電所では、原子力エネルギー、水の位置エネルギーおよび化石燃料の燃焼による熱エネルギーから得た運動エネルギーを電気エネルギーに変換している。それぞれのエネルギーの特性に応じて、原子力発電は一定の定格出力によるベースロード運転、火力発電は燃料種別による発電コストの違いを常に考慮しながら負荷の要求に見合うように経済的的な負荷配分運転を行っている。水力発電は火力発電との相補的な関係にあり、季節の出水量に応じて需給調整を補うように運転する。発電された電気エネルギーは変電所で配分／集約して電圧の大きさを変換し、適正な電圧を維持しながら負荷側設備に供給される。日本では、発電所で発電された電力は超高压（500kV/275kV）に昇圧されて基幹系統送電線により需要地近郊まで送電され、いくつかの変電所を経由しながら徐々に降圧し、最終的には特高需要家に 66kV/22kV、高压需要家に 6.6kV、一般需要家に 200V/100V で供給される。また、電気エネルギーは、実証試験が進められている系統用大型蓄電池や国内 46 カ所の揚水発電所による貯蔵が行われているものの、電気エネルギーのままでの貯蔵が実運用上は困難であるため、発生と消費は同時にバランスが取れている必要があり、かつ、発生から消費に至るまでの電力流通を司る電力系統に関わる機構は迅速に協調して機能しなければならない。需要家に対して安定した電力を供給するための、電力潮流や周波数を制御する有効電力制御、無効電力を合理的に配分し電圧を維持する無効電力制御、系統の故障などの異常事態に停電範囲/時間を極小化する信頼度制御を総称して系統制御と呼ぶ^[4]。信頼度制御には、大きく分類して運用対策と設備対策がある。運用対策とは、現在の系統状況に対して想定故障が発生した場合に備えて予防的な運用操作を実行するものである。一方、設備対策には、送変電機

器の多重化，遮断機器の高速化，SVC（Static Var Compensator）や直列コンデンサなど直／並列機器の導入などの主回路機器による対策や実際に故障が発生した場合に対処する保護リレー制御，故障の影響が波及することを防止する系統安定化制御などの制御装置がある^{[5][6]}。

上述のように電力系統は大規模なシステムであり，それらを構成する設備の多くは広域に屋外設置されていて過酷な自然現象を含む外的事象，すなわち系統故障の直接的な影響を受けることになる。したがって，電力系統には安定供給を阻害するリスクが常に内在していることになる^[5]。実際，世界中で見ると，2000年以降も，数年に1回程度の頻度で大規模な故障停電が発生している。電力系統の供給信頼性とは，広義には政治的・社会的不確実性や燃料調達リスク等まで含むが，本論文では工学的な視点から電力系統に限定して，システムを構成する要素の不具合（設備の故障や発電機の停止など）による電力の安定供給・調整力発揮に生じる潜在的リスクへの対応能力を指すものとする^[7]。一般に供給信頼性は電力系統の固有の性質より，2つの視点から議論される^[8]。

- (1) 動的な供給信頼性： 稀頻度の過酷故障など突発的な事象発生に耐えうる電力系統の能力
- (2) 静的な供給信頼性： 系統構成要素の計画的な停止および頻度の高い故障停止を前提に，需要に見合う合計電力（kW）および合計電力量（kWh）を安定に供給できる電力系統の能力

上記2つの供給信頼性の確保は，基本的に電力需給における運用段階と計画段階における課題となる。上記項目(1)は，需給運用時の突発的な故障発生で故障様相が特に厳しいとき，安定度問題や周波数異常の広域への波及を防止し，電力系統の安定運転を維持できる対応策を準備する必要がある。具体的には，故障発生時に早期に故障設備の除去を行う電力系統保護リレーシステムのバックアップとなる系統安定化システム（事故波及防止リレーシステム^[9]）の設置が挙げられる。また，項目(2)は，需給運用に入る前の計画業務において，前提条件に従って電力の安定供給を阻害する要因を取り除く予防的な対応策として検討する。例えば，補修作業による流通設備停止時に潮流過負荷発生を回避する系統操作や，発電設備の定期点検による計画停止時に系統電圧の低下が発生し

ないように発電設備の持ち替えなどを検討する。検討対象は広範に及び、検討対象に関連する計画業務の遂行主体、たとえば火力部門、系統運用部門、配電部門など個別の部門が実施する。

都市化の進展・情報通信社会への移行に伴いあらゆる場面で高度に電化が進み、電気に対する依存度が大きい近代社会において、社会インフラを支える基盤として途絶えることなく高品質な電気エネルギーを安定供給するため、系統制御技術や需給制御技術を含む電力流通制御技術の開発が着実に進められてきた。日本では戦後の急速な経済発展を支える電力需要に応じて、需要地域からの遠隔地に大規模電源を開発し、大電力を需要地域に送電するための長距離の基幹送電系統の整備を行い、同時に様々な課題を解決しながら信頼性の高い電力系統をこれまでに構築してきた。2011年3月の東日本大震災を機に社会全体で安全・安心に対する関心が高まり、原子力発電を含むエネルギー基本政策が見直され、太陽光発電や風力発電といった自然エネルギーによる分散型電源の電力系統への導入が加速度的に増加している。これらの分散型電源はその名の由来通り自然まかせの発電であるため、出力が不安定でコントロールできないという基本的な問題がある。大規模集中電源と需要家を結合する形態として構築されてきた従来の電力系統では想定していなかった、このような出力不安定なローカル発電機器が系統内に増加することになるため、これまでは負荷側にあるとしてきた不確定要因に加えて、電源側の不確定要因として安定供給を脅かす新たな潜在的リスクが増大することになる。社会状況の変化や技術の進化と共に出現する新たな課題に対して、電力流通制御技術の研究開発では電力系統が常に協調・受容していくための解決策を模索し続ける必要がある。

さらに、電力自由化の進展^[10]は、近年の電力系統システムにおける大きな変化のひとつである。我が国では、10電力体制による地域ごとに発電から送配電までを一貫して提供する体制が構築されている。これにより高品質・安定な電力供給が実現され、日本経済の飛躍的な発展を支えてきた。その一方で、電気事業者間の競争がないため電気料金が海外に比べて割高という指摘があった。まず1995年の電気事業法改正で発電分野と小売分野が部分的に自由化された。発電分野では卸供給入札制度が導入され、IPP（Independent Power Producer、独立発電事業者）が一般電気事業者（いわゆる電力会社）に対して長期契約に基づく電力の卸供給ができるようになった。また、特定地域に限って自社の発電

設備と送配電システムを使用して電力を小売できる特定電気事業者の制度も認められた。次に2000年の改正電気事業法では、電力会社との契約電力が最大であった2000kW以上の特別高圧の大口需要家（大規模工場、大規模オフィスビル、デパート、ビルなど）に対する電力小売事業が開放され、電力会社以外の事業者が電力販売可能となった。このときPPS（Power Producer and Supplier、特定規模電気事業者）という事業者区分が認可され、その役割が大いに期待された。その後、2004年は自由化対象が500kW以上の高圧大口（中規模工場、中規模ビル、スーパーなど）に、翌2005年には50kW以上の高圧小口（小規模工場、小規模ビル）に拡大された。同年、国内初の卸電力取引所が設立され、一般電気事業者ならびにPPSによる電力の前日スポット取引および先渡し取引を開始した。さらに2014年以降、一般電気事業者による独占体制を抜本的に改革するために、政府は電力システムの構造を改革する予定である。具体的には、2016年に地域を越えて全国レベルの需給調整を行う広域系統運用機関の運用開始、続いて2017年小売全面自由化、最後に2018年の発送電分離の実施である。この改革により事業者間の一層の競争を促し、低廉な電力供給を実現することを目指している。

以上のような分散型電源の導入増加、電力自由化の進展や将来の電力システムの構造変化は、従来の電力の流れと異なる電力の流れを発生させることから、系統構成や潮流状態に大きく依存する系統の周波数、電圧、安定度に対する制御に影響を与えることが想定される。将来の電力系統において安定・高品質な電力供給を提供するためには、電源の多様性や市場化による経済性の追求を支える供給信頼性を向上するための系統運用・需給運用がますます重要となる。

1.2. 大規模電力系統の供給信頼性に関する諸課題

前節で述べたように従来の電力系統は、急速な近代化の途上で様々な技術課題を解決し、供給信頼性を維持向上しながら発展してきた。今後の自然エネルギーに基づく分散型電源の導入拡大、電力自由化の進展や電力システム構造の変革により、社会インフラ基盤としての大規模電力系統の供給信頼性維持は困難になると予想される。そのような将来の電力系統を取り巻く環境において供給信頼性の維持向上に資する電力流通制御技術は要の技術であり、今後ますますその重要性が高まっていく。本節では、大規模電力系統の供給信頼性における課題について、前節で述べた2つの視点、すなわち「動的な供給信頼性」および「静的な供給信頼性」からそれぞれ概観する。

【動的な供給信頼性に関する課題】

(a) 新たな系統不安定現象への対応

これまで系統側電源の建設が立地困難な状況から需要地域からの遠隔化、および、発電所の大規模集中化が進んだ。これに合わせて電力系統の巨大化・複雑化とそこを流れる大電力の長距離送電が余儀なくされてきた。そのため需要地域周辺までの基幹系統は、通常、送電電力方向が一定で重潮流であることが多かった。このような系統状況において、いくつかの大規模停電の経験とその課題の解決を経て、系統制御技術、特に信頼度制御に関する技術は発展してきた。しかし、昨今の遠隔大規模電源である原子力発電所休止に加え、一層の電気料金の低廉化を目指す電力自由化に伴う電力事業者による電源建設と市場取引による卸電力の増加により、電力系統を流れる電力潮流変動が増大する。このため、従来の系統制御装置では想定しなかった新たな系統不安定現象（過渡安定度、電圧、周波数における不安定や異常、またそれらの複合的な現象^[11]）が顕在化し、大規模停電に至る可能性がある。

今後、出力が不安定な自然エネルギーによる分散型電源増大によって電力系統上の電力潮流変動が大きくなり不安定現象が助長される可能性がある。特に、広域に低圧需要家への設置が進む太陽光発電の不安定な出力変動により負荷変

化が大きくなる懸念がある。太陽光発電は、電力系統の一次的な擾乱に対して不要な一斉解列を引き起こし、系統安定度に大きな影響を与える可能性がある。これは急激な負荷変化を引き起こすため、電力系統の運用/保護の点から対策が必要である。

(b) 安定化制御における負荷脱落量の推定

周波数安定性 (frequency stability) とは、過酷故障として大規模電源脱落や、連系線開放による単独分離系統が発生したとき、瞬動予備力や他社緊急融通限度以上の大幅な需給アンバランスが自系統内に発生した後に周波数が許容内一定値に収束するかどうかを指す。過酷故障時の周波数安定性の維持に対しては、通常、設備対策として制御装置 (周波数安定化システム) が導入される^{[12][13]}。周波数安定化システムは、故障除去後数百 ms 以内に需給アンバランスの状況に応じて適切な安定化制御 (負荷制限/電源制限) を実行する。しかし、故障発生時に需要家負荷の一部が系統から自律的に離脱する現象 (負荷脱落) が発生するため、安定化制御時の不確定要因となり制御結果に大きな影響を与える。これまでに負荷脱落量の推定手法が開発されているが、いずれも精度は低く実用的でない。現状の実システムを見ると、ある特定の他電力系統の古い計測データから統計処理した簡易モデルを流用して負荷脱落量の推定処理を行っている。

また、将来、出力が不安定な自然エネルギーによる分散型電源の大量導入が進むと予想される。広域に普及が見込まれる太陽光発電など大量の分散型電源は良好な気象条件の際には大きな出力となり、見かけ上の需要を押し下げるため、供給側から見た系統容量が小さくなる。このとき周波数安定性の維持に重要な役割を果たす瞬動予備力の低下が懸念される。元々系統容量の小さい単独分離系統ではさらに系統容量が小さくなり負荷脱落による安定化制御誤差が相対的に大きくなることから、制御量算出時に考慮する負荷脱落量の推定値にはさらに高い精度が求められる。

(c) 送電インフラ活用のための安定度限界高速算定

大規模電源の偏在化による長距離送電に加えて、近年のインバータ機器の普及に伴う定電力負荷の増加は、電力システムの安定度を悪化させる要因となっている。さらに、電力自由化に伴う新規電力事業者による電力市場参入は、従来の一般電気事業者による信頼性を担保した電源/系統設備計画と異なり収益目的の事業となるため、電力システムの安定度を脆弱化する可能性が高い。今後、電力システム改革を経てますます拡大すると予想される電力取引や小売自由化において、中立的な送配電事業者は競争的な電力市場の機能を十分に発揮させる電力託送を実現するために各送電線の空き容量(利用可能な送電能力, ATC: Available Transfer Capability)を系統状況に応じて把握する必要がある。ATCは送電線の熱容量だけでなく、時々刻々と変化する電力潮流で変化する安定度限界に制約されるため、多数の取引参加者が参加する電力市場において動的な供給信頼性を担保するために重要な公開情報となる。従来、季時別の代表潮流断面による事前解析により安定度限界を与えていたが、今後、実需給タイミングの1時間前に行われる電力取引市場など迅速な取引約定が要求される市場で系統能力を十分に活用するために、オンライン系統状態を収集し安定度限界を高速に算定する系統解析技術が必要である。

(d) 系統同期化力低下への対応

太陽光や風力による分散型電源はインバータを介して系統に連系することが多い(風力発電は誘導発電機を介して連系するものもある)。系統内のインバータ型電源が増加し、需給バランス上で同期発電機を主体とする系統側電源を代替する場合、同期発電機が持つ同期化力が減少することになる。同期化力の不足は電力システムの過渡安定度の維持能力を低下させ、電力システムに擾乱が発生した場合に運転中の各発電機が同期速度を維持することが困難になり脱調を引き起こしやすくなる。これに対して、風力発電の巻線型誘導発電機の二次励磁制御で疑似的な同期化トルクを発生させることが検討されている^[14]。また、系統運用面からの対応としては、経済性向上を目的とする運用ではなく、同期化力の低下を補強する、動的な供給信頼性の向上を目的とした可変速揚水発電の揚水運用計画/制御などが課題である。

【静的な供給信頼性に関する課題】

(e) 系統側電源の設備故障リスクの低減

系統運用者は、通常、電源設備の N-1 故障や需要の変動に対応するために、適切な調整力を保有するように全設備の運用計画を策定し供給信頼性の確保に努める。さらに、電源設備は設備の故障リスクを低減して万全な健全運用を実現するために、次回定期検査のための設備停止までの期間（1年間程度）は起動停止回数に制限を設けて供給信頼性の確保を図っている。そのため、年間を対象期間とする年間需給計画では起動停止回数制限まで適切に考慮して、年間を通じた供給能力の適切な管理が必要である。昨今、原子力発電の休止により需要ピーク期間を中心に供給能力の余裕がない需給状態では、火力発電の健全運用を維持することが必須である。また、将来、自然エネルギーに基づく分散型電源の導入拡大による不確定要因の増大を電力系統で受容するために、系統側電源による継続的な調整力発揮が必要となる。

(f) 需給ギャップへの対応

自然エネルギーに基づく分散型電源は基本的に不随意的な制御の変動電源であるため、これまでの電力需給運用のように需要変動に合わせて系統側電源の出力制御を行う方式では、需要の小さい期間を中心に系統側電源（主として火力・水力）の下げ代不足が生じ、分散型電源出力が余剰電力となる不可避の需給ギャップが発生する恐れがある。これは、従来の電源停止を前提として供給不足に対する安定供給を検討する議論と異なり、今後、新たに検討対象とする必要がある静的な供給信頼性の課題である。この課題に対しては、経済性を目的とした揚水発電所の運用ではなく、需給ギャップを解消するための供給信頼性維持に資する運用方法や、分散型電源の実用的な出力抑制方法を検討する必要がある。また、系統電源側と需要家側が協調して柔軟に制御可能な仕組みを構築し、デマンドレスポンスに代表されるような需要家側に需給調整機能を持たせる検討が急務である。

(g) 出力変動増大に対する最適運用

自然エネルギーに基づく分散型電源の出力は気象条件による変動が大きく、分散型電源の導入量が増加すると、低圧需要家に広く普及する太陽光発電について均し効果を考えても、供給エリア全体の需給運用における短周期の変動成分が増大する。従来、導入量が限定的であった場合には、導入容量を最大値とする出力変動幅を吸収する予備力・調整力を確保して静的な供給信頼性を維持していた。しかし、上記項目(f)と同様に、導入量が需給運用に大きな影響を与えるレベルに達すると、自然エネルギーの短時間領域における予測値の不確実性を明示的に捉えて、分散型電源の出力抑制とも組み合わせた上で、静的な供給信頼性の維持と系統側電源の経済的な運用を両立する最適な需給運用を実現する必要がある。気象予測に基づくさまざまな出力予測技術の研究開発が精力的に進められているが、予測精度の向上と共に実運用における予測誤差の累積的な評価とその需給運用へのフィードバックも欠かせない。

(h) 新しい需給運用体制への対応

電力システムの構造改革により低廉で安定な電力供給の実現に向けて、広域メリットオーダを実現するために、卸電力取引市場を通じた全国レベルの電力取引の一層の活性化や広域系統運用機関による予備力・調整力の需給調整の仕組み構築が進んでいる。今後、一層の電力自由化の進展を受けて、発送電分離後の発電事業者および新電力は自社電源のコストではなく、電力取引市場の価格をベースとした経済性を追求する需給計画を策定する必要がある。このとき、需要家側との協調も考慮した柔軟な計画策定の方式が必要であろう。一方、送配電事業者は、予備力・調整力の確保を第一に考えた静的な供給信頼性を維持する計画策定が必要になると考えられる。このように新しい電力システムにおいて、静的な供給信頼性が全体としてどのような形で確保され、それを担保する運用システムのあり方が課題である。

1.3. 本研究の目的

前節では、社会インフラとしての電力システムを取り巻く環境の変化から、動的な供給信頼性と静的な供給信頼性の2つの視点から電力流通制御技術に関する課題を概観した。

本研究では、電力システムの変化・改革に向けた大規模システムの供給信頼性向上を目的として、前節で抽出した課題からそれぞれ次の研究・開発項目を研究課題として設定した。1つ目の研究・開発項目は、動的な供給信頼性の視点から故障発生時に電力システムの安定運用を実現するために必要な系統運用に関する対策手法である。そして、2つ目は、静的な供給信頼性の視点から系統側電源運用の健全性を維持するために必要な需給運用に関する対策手法である。いずれも大規模システムの恒常的な安定運用を目指す電力事業者を対象にした供給信頼性向上対策手法を研究課題として取り上げた。

以下では、それぞれの項目について技術的課題の設定およびその解決策の提案を行う。

(1) (動的な供給信頼性) 故障発生時の安定運用のための系統運用対策手法

(1-1) 負荷変化に対する系統安定性の系統安定化機器導入による向上効果評価手法 (1.2節の課題 (a) に対応)

新たな不安定現象の防止策としては、電力系統の送電線流通設備の増強による系統体質の強化が抜本的な対策であるが、建設用地の確保・莫大なコストの制約や建設リードタイムの問題から適宜に対応できない場合が多く、系統制御面の対策が補完的に検討される。系統制御面の具体的方策として、近年、技術発展が目覚ましい大容量パワーエレクトロニクスを応用した系統安定化機器の設置が考えられる。系統安定化機器は有効電力や無効電力を能動的に高速制御することにより電力系統の安定化に寄与する。基幹系統における地絡故障や送電線開放など大規模擾乱に対しては、その高速制御性を活かした有効な信頼度制御が期待できる。機器設置による安定化効果の検証方法としては、一般に時間領域シミュレーションを使用して安定性を解析することが多いが、その解析結果から安定性の程度を定量的に評価することはでき

ない。同期面における系統故障発生時の過渡(位相角)安定性(transient stability)には定量的評価手法に関する先行研究があるが、負荷変化により駆動される電圧変動が影響する不安定現象については検討されておらず、定量的な指標の導入と評価方法の研究が必要である。これを本研究の第1の課題とする。

(1-2) オンライン周波数安定化における負荷脱落量推定手法

(1.2節の課題 (b) に対応)

現行の周波数安定化システムでも、簡易モデルによる負荷脱落量の推定処理を行っており、負荷脱落量の推定精度向上のための実用的な対策方法の検討が必須である。その上、将来、出力が不安定な自然エネルギーによる分散型電源の大量導入が進むと見かけ上の需要を押し下げるため、供給側から見た単独分離系統容量が小さくなり負荷脱落による安定化制御誤差が相対的に大きくなることから、制御量算出時に考慮する負荷脱落量の推定値にはさらに高い精度が求められる。周波数安定化の制御精度向上には、従来よりも正確かつ高速に負荷脱落量をオンラインで推定する実用的な手法が望まれる。これを本研究の第2の課題とする。

(2) (静的な供給信頼性) 系統側電源の健全性維持のための需給運用対策手法

(2-1) 起動停止可能回数を考慮した年間需給計画手法

(1.2節の課題 (e) に対応)

1.1節で述べたように、需給運用に入る前の計画業務では需要に見合うだけの電力を確保し、安定な供給を実現するための需給計画が検討される。供給信頼性を確保するために必要な系統操作や発電機運用条件は、最終的に電力需給計画立案時の制約条件として与えられる。電力需給計画は、電力の安定供給と発電コストの低減を目的として、想定需要に対する効率的な電力設備の形成・運用を図るために、電力需給の見通しを明らかにする業務である^[15]。設備形成・運用計画の基本となるほか、燃料調達計画や発電機定期点検計画などをはじめとする各種事業計画と密接な関連を持つ。

需給計画は、運用制約条件のもとでの燃料コスト最小化問題として定式化できる^[3]。需給計画問題の構成は、各発電機の起動停止を決定する離散系最適化問題と、運転している発電機の出力値を決定する連続系最適化問題が組み合わさった混合整数計画問題となっている。離散系最適化問題に対する求解アルゴリズムには様々な手法^{[16][17]}の適用が検討されている。一方、発電機出力を決定する連続系計画問題は、等増分燃料費法といった簡便な手法が提案されているが、近年の計算機能力の飛躍的な増大と最適化技術の理論面・実装面における発展に伴って内点法に代表される数理最適化手法を適用し業務の効率化を図る動きが顕著になっている。しかし、実用的な需給計画システムへの適用に際しては、計画期間の長さや発電機数との積に主として依存する問題規模が大きくなるにつれて、計算の不安定化と演算時間の増大が大きな課題となっている。供給信頼性の確保を担保する各需給計画を立案するため、発電機出力決定問題も含む汎用性の高い二次計画問題（Quadratic Programming Problem）について、大規模問題に対しても安定・高速な演算アルゴリズムの構築が必要である。これを本研究の第3の課題とする。

電源設備の設備故障リスク低減のために、年間需給計画では起動停止回数制限まで適切に考慮して、年間を通じた供給能力の適切な管理が必要である。自然エネルギーに基づく分散型電源の導入拡大による不確定要因の増大を電力システムで受容するために、系統側電源による継続的な調整力発揮が必要となる。主として調整力を担う火力発電機については、電源設備の N-1 故障や需要の変動に対応するために適切な調整力を確保する運用状態を計画するとともに、さらに電源設備故障の未然防止を目指して年間レベルの需給計画から起動停止回数の制限を考慮した計画立案が従来にも増して重要であり、これを本研究の第4の課題とする。

1.4. 本論文の構成

本論文は、先に述べた研究背景と技術的課題に対する研究成果についてまとめたものであり、6章で構成される。序論である本章と、結論である第6章を除くと、大きく2つに分類できる。動的な供給信頼性の視点から、第2章では系統安定化機器による安定性向上効果評価手法について、第3章ではオンライン系統安定化における不確定要因への対応方法について論じる。一方、静的な供給信頼性の視点から、第4章と第5章は需給計画手法に関する研究をまとめている。第4章では大規模計画問題に対する連続系最適化手法について論じる。第5章では、第4章の最適化手法の適用を前提に、起動停止可能回数を考慮した年間需給計画を策定する実用的な手法について論じる。

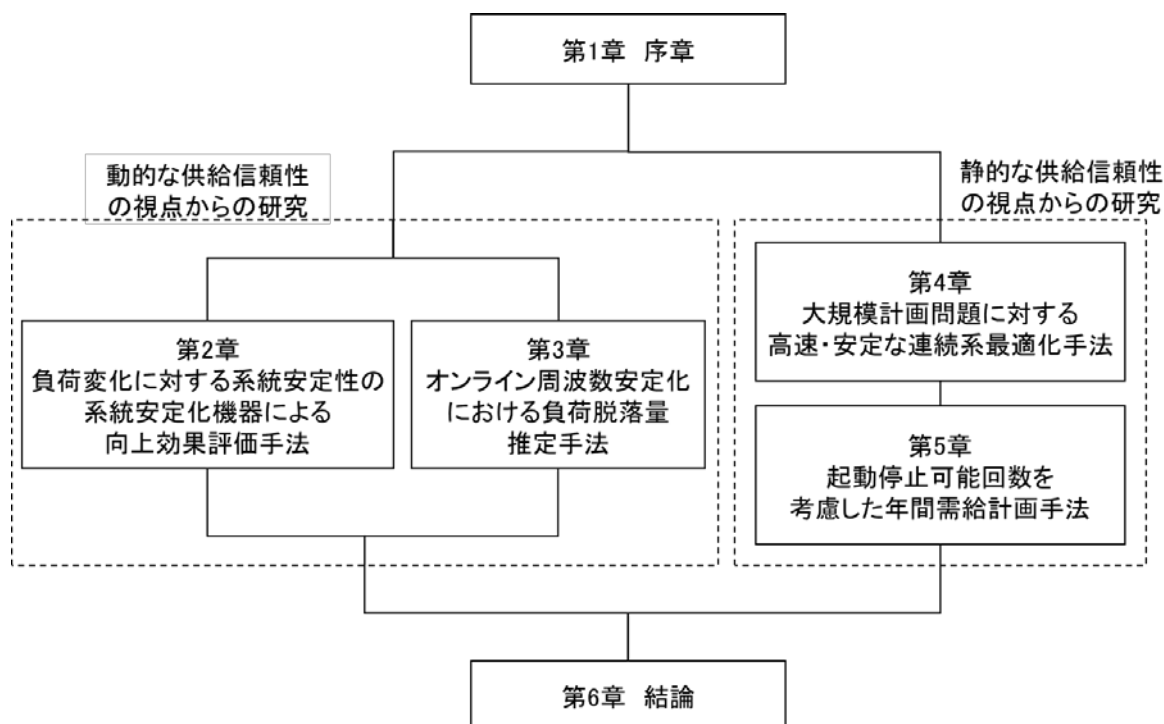


図 1-1 本論文の構成

以下、第2章から第6章までの概要について述べる。

第2章では、電力系統で外乱が発生した場合の短時間領域の系統安定性について、エネルギー関数を使用した second-kick 法によりエネルギーマージンという指標で定量的に評価する手法について検討する。Second-kick 法は、電力系統の時間領域シミュレーションで初期外乱 (first-kick) を与えた後のポテンシャルエネルギーの値を参照して仮想的な二度目の外乱 (second-kick) を系統に挿入することによって、不安定平衡点の近似値を求めるユニークな手法である。しかし、従来の second-kick 法の設計は初期外乱が故障で与えられる同期面から見た過渡 (位相角) 安定度を評価対象としたものであり、負荷変化により駆動される不安定現象の評価方法として適していないという課題があった。そこで本研究では、従来の second-kick 法の設計と異なり、初期外乱が負荷変化で駆動され短時間領域で電圧変動が影響する不安定現象に焦点を当てた評価方法として second-kick 法の新しいアプローチを提案する。ポテンシャルエネルギーの記述式を構成する要素項の中で、系統の無効電力と発電機運動エネルギーに関する2つの項に着目して、外乱後のエネルギー変化の違いを明らかにし、従来手法と提案手法が対象とする異なる不安定メカニズムに対して適した項の値を参照して second-kick 適用タイミングを決定する方法を検討する。系統安定化機器の代表例として SVC (Static Var Compensator) を導入したモデル系統を用いた時間領域シミュレーションにより、second-kick 法の新しい設計として有用であることを検証する。

第3章では、過酷故障発生時に故障波及を未然防止する系統安定化システムのうち送電線ルート断故障により発生する単独分離システムの周波数安定化システムにおいて、発電機制御/負荷制御といった制御の仕上がり精度に不確定要因として大きな影響を与える負荷脱落量を推定する手法を検討する。電力系統では系統故障発生時の電圧低下に伴い負荷構成機器の一部が自律的に系統から離脱する負荷脱落が観測される。オンライン周波数安定化システムは故障除去後の数百 ms 内で動作する。しかし、その時間領域では有効電力計測データに負荷動特性に起因した過渡特性が重畳した観測波形となり容易に負荷脱落量を把握することができないため、オンラインシステムへの適用には動特性の処理が課題

である。また、現行システムは全く異なる系統で計測された負荷脱落量実績データを使用して統計的に簡易処理した結果をそのまま流用しており、制御対象とする系統の特性を考慮せず実用性に欠けていた。本研究では、故障時の実測データにより負荷動特性の分析を行って有用な特性情報を整理し、実際の故障発生時に特性情報を利用して故障除去直後の短時間領域における電圧と有効電力計測波形に基づいて負荷脱落量をオンライン推定する手法を提案する。オンラインシステムへの適用を前提に、複数の変電所実測データを使用して提案推定方法の推定精度を評価し有効性の検証を行う。

第 4 章では、静的な供給信頼性の確保のために需給運用業務の中で実施される経済負荷配分問題も記述可能な一般二次計画問題（General Quadratic Programming Problem）形式の大規模問題を、高速・安定に求解する手法について検討する。近年の計算機能力の飛躍的な増大ならびに最適化技術の理論面における発展に伴って、需給計画をはじめ電力システム分野へも最適化技術の導入が進んでいる。しかし、実用システムへの最適化技術の適用に際しては、対象問題の規模に起因する計算の不安定化と演算時間の増大が課題となっている。本研究では、大規模な一般二次計画問題に対する両課題の克服を目指し、実用性の観点から現在最も有力な最適化手法として知られる内点法（Interior-Point Method）と有効制約法（Active-Set Method）に着目し、内点法に有効制約法の求解戦略を取り入れた「変数の有効制約に関する推定機構を持つ内点法」を提案する。Web で入手可能な一般的なベンチマーク問題を使用して従来の内点法と提案手法の比較評価を行い、汎用的な手法として有効性があることを検証する。さらに、第 5 章で検討する需給計画問題において発電機出力を決定する経済負荷配分問題（Economic Load Dispatching）についても検証を行い、需給計画策定技術にとって重要な技術であることを示す。

第 5 章では、静的な供給信頼性を確保する一つ的手段として、電源設備の N-1 故障や需要の変動に対応するために適切な調整力を確保しつつ、さらに電源設備故障の未然防止を目的に起動停止可能回数を考慮した年間需給計画問題を、安定して効率的に求解するための実用的な手法を検討する。電源設備は需要カーブに合わせて全体として高効率な運転を行えるように発電ユニットの起動停

止を行うが、ユニットの起動停止時にタービン温度変化による熱疲労が加わる。設備故障リスクを低減するために、次回定期検査までの期間（1年間程度）は起動停止回数に制限を設けて静的な供給信頼性の確保を図っている。そのため、起動停止回数制限まで適切に考慮して、年間を通じた供給能力の適切な管理が重要であるが、起動停止可能回数を考慮した需給計画手法はこれまでに開発されていない。また、年間計画では、別に燃料管理の観点から LNG 火力発電機を対象に期間内に消費される燃料総量が指定されるため、起動停止可能回数と燃料消費量の協調を考慮した供給信頼性と経済性を確保する実用的な年間需給計画策定が課題である。本研究では、起動停止回数制約および燃料消費量制約の両制約を除外した問題の求解結果を初期状態とし、両者の制約違反解消による相互影響と運転コスト増分を考慮して逐次解消を図る実用的な手法を提案する。実系統規模の年間需給計画問題を用いて、提案手法の有効性を検証した結果を述べる。

第 6 章では、本研究から得られた成果を総括するとともに、大規模電力システムの供給信頼性向上に関する今後の課題について述べる。

なお、本論文の第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 5 章は、それぞれ電気学会論文誌 B および論文誌 C に掲載された論文^{[18][19][20][21]}をそれぞれ引用転載したものである。

参考文献

- [1] 関根泰次：「電力系統工学」，電気書院, 1985
- [2] 電気事業講座編集委員会 編纂：「電力系統」，エネルギーフォーラム, 2007
- [3] 関根泰次, 林宗明, 芹澤康夫, 豊田淳一, 長谷川淳：「電力系統工学」，コロナ社, 1979
- [4] 電気学会：「電気専門用語集 No.5 給電」，コロナ社, 1966
- [5] 太田宏次 他：「電力系統安定化システム工学」，電気学会, 2014
- [6] 電気学会 電力・エネルギー部門 系統脱調・事故波及防止リレー技術調査専門委員会：「系統脱調・事故波及防止リレー技術」，電気学会技術報告, 第 801 号, 2000
- [7] 栗原郁夫, 田中和幸, “電力系統の新しい信頼度評価手法”，電中研レビュー, No.39, pp.45-52, 2000
- [8] 栗原郁夫, “我が国の電力供給系統の信頼性”，日本信頼性学会誌：信頼性, 30(4), pp.308-316, 2006
- [9] 大浦好文 他：「保護リレーシステム工学」，電気学会, 2002
- [10] 電気事業連合会, 電気事業について（電力自由化）
<<https://www.fepc.or.jp/enterprise/jiyuuka/index.html>>
- [11] 安齋邦顕, 下村公彦, 吉山総志, 田口広幸, 武石勝, 佐々木孝志, “長距離大電力送電系統に適応したオンライン統合型系統安定化システム (ISC) の開発”，電気学会論文誌 B, Vol.133, No.4, pp.313-323, 2013
- [12] 電気学会 電力・エネルギー部門 周波数リレーシステムによる事故波及防止技術調査専門委員会：「周波数リレーシステムによる事故波及防止技術」，電気学会技術報告, 第 1127 号, 2008
- [13] 押田秀治, 小和田靖之, 黒瀬健, 前田徹, 京本寿美恵, “大規模系統安定化システム”，三菱電機技報, Vol.86, No.9, pp.484-489, 2012
- [14] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構：「NEDO 再生可能エネルギー技術白書 第 2 版」，2014
- [15] 田村康男：「電力システムの計画と運用」，オーム社, 1991

- [16] H. Y. Yamin : “Review on method of generation scheduling in electric power systems”, *Electric Power Systems Reserch*, Vol.69, Issues 2-3, pp.227-248, May 2004
- [17] Subir Sen, D. P. Kothari : “Optimal thermal generating unit commitment: a review”, *International Journal of Electric Power & Energy Systems*, Vol.20, Issue 7, pp.443-451, October 1998
- [18] 橋本博幸, 田岡久雄, Madeline Gibescu, Chen-Ching Liu, “Second-kick 改善法を適用したエネルギーベース指標による SVC の安定度向上効果の検証”, 電気学会論文誌 B, Vol.122, No.1, pp.103-112, 2002
- [19] 橋本博幸, 小和田靖之, 尾上幸浩, 斎藤宣俊, 伊藤久徳, “動特性負荷モデルによる実故障データの特性分析を利用した負荷脱落量推定手法”, 電気学会論文誌 B, Vol.126, No.9, pp.869-877, 2006
- [20] 橋本博幸, 高口雄介, 中村静香, “有効制約の推定機構を持つ内点法に基づく二次計画アルゴリズムの開発”, 電気学会論文誌 C, Vol.130, No.6, pp.1061-1071, 2010
- [21] 橋本博幸, 平野秀明, 広瀬公一, 伊佐治圭介, 高橋順一, “起動停止回数と燃料消費量に対する制約を考慮した年間需給計画手法の開発”, 電気学会論文誌 B, Vol.132, No.10, pp.844-852, 2012

2. 負荷変化に対する系統安定性の系統安定化機器による向上効果評価手法

2.1. 緒言

経済の発展とともに電源は遠隔化・大規模集中化が進み、電力系統は巨大化し大電力の長距離送電が行われるようになった。このような電力系統を取り巻く環境のもと大規模停電の経験を経て、動的な供給信頼性を維持するための電流通制技術は改良を重ね発展してきた。原子力発電所の休止や電力自由化の更なる進展など社会状況の変化、および、分散型電源の導入など新規技術の発展に伴い、今後、電力系統の負荷変動や電力潮流変動が大きくなり、従来想定しなかった系統不安定現象が顕在化する可能性がある。特に、広域に低圧需要家への設置が進む太陽光発電の不安定な出力変動により従来に増して負荷変化が大きくなると予想される。その具体的な対応策の一つとして、近年、大きな技術進展を遂げている大容量パワーエレクトロニクスを応用した系統安定化機器の設置が検討される。パワーエレクトロニクスを応用した系統安定化機器は FACTS (Flexible AC Transmission System) 機器とも呼ばれる。

安定度を評価するために広く使用されている解析手法の一つである時間領域シミュレーション (time domain simulation) は、あらかじめ指定された故障シーケンスに対する系統の応答を調べるために使用される。電力系統を記述する変数 (発電機の電氣的出力, 母線電圧, 位相角, 負荷の有効・無効電力など) をステップ・バイ・ステップに演算することにより、系統応答に関する十分な情報を得ることができる。しかし、その結果から不安定領域までの近接程度を直接に判断することはできない。そこで、同期面の過渡安定度を対象とした解析手法として、時間領域の解析に依らずに安定度を直接評価する直接法 (direct method) が提案されている。直接法には、例えば系統内の複数発電機の加速／減速グループへの分類により等価一機無限大系統に変換し、安定度を評価する拡張等面積法 (EEAC; Extended Equal Area Criterion) ^{[1][2]} などがある。また、不安定状態までの近接程度をエネルギー関数により測定する手法も研究されており、直接法と時間領域シミュレーションを組み合わせたハイブリッド手法

(hybrid method) も提案されている。初期のハイブリッド手法^[3]は、古典的な発電機モデル (X_d' 背後電圧一定) を適用した縮約系統モデルと定インピーダンス負荷モデルを前提に、故障除去後の第一波までの時間領域シミュレーション結果と過渡エネルギー関数により評価している。その後、さまざまなエネルギー関数の定式化が提案^{[4][5]}され、詳細な系統モデルや負荷モデルに拡張されている。詳細な時間領域シミュレーション情報に基づき各時刻のエネルギー関数を計算するハイブリッド手法により安定度余裕を評価する second-kick 法^{[6] [7]}などの方法が研究されている。過渡安定度評価は故障除去後において発電機内部位相角が安定平衡点に到達する系統能力を評価するものである。それらの多くは故障発生・除去後の過渡領域における発電機の回転体としてのダイナミクスを主に対象とした解析法である。一方、負荷変化により引き起こされる不安定現象を対象とした手法は、外乱発生時に安定平衡点に落ち着くまでの長時間領域における電圧安定性に対するものが多い。たとえば、系統の代数モデルをもとに潮流多根を用いる手法や分岐理論 (bifurcation theory) による手法などが研究されている。

本研究では、まず系統安定性を定量的に評価する手法として系統の詳細な微分-代数モデルのもとでエネルギー関数を定式化する。次に、エネルギー関数をベースに second-kick 法によりエネルギーマージンを計算する方法を述べる。従来の second-kick 法のアプローチは、系統故障時の発電機ダイナミクスによる不安定メカニズム (過渡安定度) を対象とした設計である。本研究では、負荷変化により駆動される短時間領域における電圧変動が影響する不安定メカニズム^[8]を対象にした系統安定性を評価することを目的とした新しい second-kick アプローチを提案する。系統安定性の喪失時に系統軌跡が不安定平衡点の近傍にある境界点を通過し外乱後の安定平衡点のアトラクション領域から脱離するという事実に基づいて、系統故障時と負荷変化によるそれぞれの系統安定性を同じ微分-代数モデルのもとでの系統ダイナミクスに起因するという観点から捉える。そこでは両者は互いに分離した現象ではなく、相互に関連し作用を及ぼし合う現象となる。そして、従来手法に加えて本提案手法も利用して、系統安定化機器による系統安定性の向上効果を定量的に評価する。ここでは、代表的な系統安定化機器として SVC (Static Var Compensator) を取り上げて具体的に検討する。SVC の基本的な機能は、対象母線における高速な無効電力供給と電圧制

御である。発散傾向を示す送電線の電流や電力を入力信号として用いて発散性の不安定現象を抑制することも可能である。SVC の設置により、電圧面から系統安定性の向上を期待できる。SVC を電力注入モデルによりモデル化^[9]してエネルギー関数に組み込み、系統安定性の改善効果を評価する。

本章の構成は以下の通りである。2.2 節では、まず提案手法の基本となるエネルギー関数の定式化について説明する。次に 2.3 節では、定量的な評価指標としてエネルギーマージンの評価手法について述べる。続いて 2.4 節では、負荷変化により駆動される不安定メカニズムに対するエネルギーマージンの評価方法を提案し、2.5 節で標準系統モデル^[13]を用いた数値シミュレーションにより有効性を明らかにする。

2.2. エネルギー関数の定式化

本節では、系統モデルとエネルギー関数の定式化について説明する。

2.2.1. 系統モデル

発電機は、AVR (Automatic Voltage Regulator) を持つ詳細モデル (Park の 2 軸モデル) でモデル化する。負荷の有効電力 P_L と無効電力 Q_L は、次式で示すような非線形モデルにより表現する。

$$\begin{aligned}
 P_L &= x_{zp} G_{SS} V^2 + x_p P_{SS} + x_{ip} \left(\frac{P}{V} \right)_{SS} V + x_{pf} \left(\frac{P}{V} \right)_{SS} V^a (1 + k_{pf} \Delta f) \\
 &= x_{pf} \left(\frac{P}{V} \right)_{SS} V^a k_{pf} \Delta f + P(t) \\
 &= k'_{pf} (V) \dot{\theta} + P(t)
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

$$\begin{aligned}
 Q_L &= x_{zq} B_{SS} V^2 + x_q Q_{SS} + x_{iq} \left(\frac{Q}{V} \right)_{SS} V + x_{qf} \left(\frac{Q}{V} \right)_{SS} V^b (1 + k_{qf} \Delta f) \\
 &= Q(t)
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

ただし,

$x_{zp}, x_p, x_{ip}, x_{pf}$: 有効電力における定インピーダンス, 定電力, 定電流,
電圧・周波数依存負荷の割合を表すパラメータ,

$x_{zq}, x_q, x_{iq}, x_{qf}$: 無効電力における定インピーダンス, 定電力, 定電流,
電圧・周波数依存負荷の割合を表すパラメータ,

a, b : 有効/無効電力における電圧・周波数依存負荷の電圧特性を表す定数,

k_{pf}, k_{qf} : 有効/無効電力における電圧・周波数依存負荷の周波数特性定数,

G, B : 負荷のコンダクタンスとサセプタンス,

“SS” : 初期定常状態を表す添え字,

V : 負荷母線電圧,

Δf ($= \dot{\theta}/2\pi$) : 基準周波数からの周波数偏差 (θ : 母線電圧角)

以降の式において, ある変数 x に対する記述 \dot{x} は時間に関する
微分を表すものとする

系統に設置された SVC は, 母線に並列接続される電圧依存無効負荷¹⁹⁾として
見なすことができる。図 2-1 に示すように SVC が母線 i に設置される場合, そ
の等価な無効負荷 Q_i は次式で与えられる。

$$Q_i(V_i) = -uV_i^2 \quad (-Q_i^{\max} \leq Q_i \leq Q_i^{\max}) \quad (2.3)$$

ただし,

$u(t)$ ($= B_e(t)$) : SVC の等価サセプタンス (SVC 制御ブロックは後述) ,

Q_i^{\max} : SVC による等価無効負荷の最大値

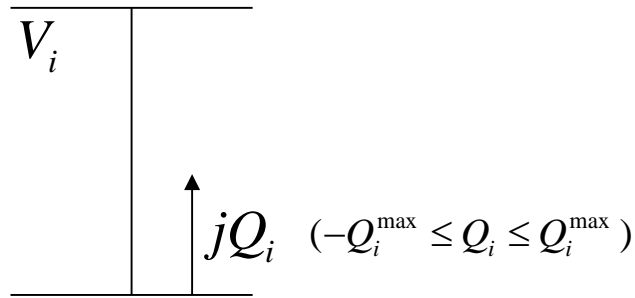


図 2-1 SVC モデル

2.2.2. エネルギー関数の定式化

系統安定性を評価する有効な手段としてエネルギー関数に関する多くの研究が行われている。縮約した系統における古典的な発電機モデルの使用に始まり、発電機の過渡リアクタンスを考慮したモデル、励磁装置モデルや動的負荷を考慮した系統モデルへと拡張され、近年では直列補償器モデルを含む^[4]さまざまなエネルギー関数の定式化が提案されている。これらのエネルギー関数は、研究初期には計算負荷の高い時間領域シミュレーションを実行せずに過渡安定度を直接評価する目的で適用されたために、その関数は解析的な形で与えられる必要があった。しかし、系統故障後における定常状態の平衡点を含めて時間領域の軌跡を使用できる場合は、シミュレーション中の各時刻のエネルギー関数を計算することができる^{[6][10]}。

ここではエネルギー関数 W を一般的に以下のように与える。

$$W = W_{PE} + W_{KE} \quad (2.4)$$

ただし、 W_{PE}, W_{KE} : ポテンシャルエネルギー, 運動エネルギー

運動エネルギーは以下の式 (2.5) で定義される関数である。

$$W_{KE} = \frac{1}{2} \sum_{i \in G} M_i \omega_i^2 \quad (2.5)$$

ただし、

M_i : 発電機 i の慣性定数、

ω_i : 発電機 i の慣性中心系における角速度、

“G” : 全発電機を表す集合

一方、ポテンシャルエネルギーは、ネットワークのトポロジーを維持した関数^[5]を用い SVC を組み込んで定式化する。ただし、ここでは送電損失のない系統を仮定する。

$$W_{PE} = \left[-\frac{1}{2} \sum_{i \in LUJG} V_i^2 B_{ii} - \frac{1}{2} \sum_{i \in LUJG} \sum_{j \neq i} B_{ij} V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j) \right]_{(V^s, \theta^s)}^{(V, \theta)} \quad (2.6)$$

$$- \sum_{i \in G} \int_{\delta_i^s}^{\delta_i(t)} (P_{mi} - P_{ei}) d\delta + \sum_{i \in LUJG} \int_{t^s}^t P_i(t) \dot{\theta} dt + \sum_{\substack{i \in LUJG \\ i \in \{SVC\}}} \int_{t^s}^t \frac{Q_i(t)}{V_i} \dot{V}_i dt$$

ただし、

δ_i : 発電機 i の慣性中心に対する位相角、

“S” : 故障除去後の最終的な安定平衡点を表す添え字、

“L” : 系統内の全負荷を表す集合、

“SVC” : 系統に設置されている全 SVC を表す集合

式 (2.6) において、負荷モデルに関する項を式 (2.1) と式 (2.2) を用いて展開すると以下の式 (2.7) となる。定インピーダンスの無効負荷はアドミタンス行列に直接組み込まれているため式中には表れていない。ここで、負荷の有効電力 (式 (2.1)) で $\dot{\theta}$ に関する項をポテンシャルエネルギーに含まないのは、エネルギー関数の時間に関する微分が負であることを保証するためである^[5]。

$$\begin{aligned}
W_{PE} = & \cdots + \sum_L \left\{ x_{zp} \cdot \int G_{SS} V^2 \dot{\theta} dt + x_p \cdot P_{SS} (\theta - \theta_{SS}) \right. \\
& + x_{ip} \left(\frac{P}{V} \right)_{SS} \cdot \int V \dot{\theta} dt + x_{pf} \left(\frac{P}{V} \right)_{SS} \cdot \int V^a \dot{\theta} dt \\
& + x_q Q_{SS} \cdot \ln \left(\frac{V}{V_S} \right) + x_{iq} \left(\frac{Q}{V} \right)_{SS} \cdot (V - V_S) \\
& \left. + x_{qf} \left(\frac{Q}{V} \right)_{SS} \cdot \left(\frac{1}{b} V^b + \frac{k_{qf}}{2\pi} \int \dot{\theta} V^{b-1} \dot{V} dt \right) \right\} \quad (2.7)
\end{aligned}$$

エネルギー関数 W の時間に関する微分をとり、一般的な発電機運動方程式と併せて整理すると、以下の式 (2.8) が得られる。

$$\dot{W} = \frac{\partial W}{\partial t} = - \sum_{i \in G} D_i \omega_i^2 - \sum_{i \in L} x_{pf,i} \left(\frac{P_i}{V_i} \right)_{SS} k_{pf,i} V_i^a \left(\frac{\dot{\theta}_i}{2\pi} \right)^2 \leq 0 \quad (2.8)$$

ただし、 D_i : 発電機ダンピング定数

上式より、故障除去後に系統が平衡点へ近づくと、系統に対するエネルギー関数は減少していくことが分かる。したがって、式 (2.6) をポテンシャルエネルギーとして時間領域シミュレーションの結果に基づいて計算することができる。

2.3. エネルギーマージンの評価手法

2.3.1. Second-kick 法

安定領域の境界は不安定平衡点の座標が既知である場合には，その不安定平衡点を通る一定のポテンシャルエネルギー平面により局所的に近似することができる。Second-kick 法^[6]は，初期外乱（first-kick）後のポテンシャルエネルギーの値を参照して仮想的な二度目の外乱（second-kick）を系統に挿入することによって，支配的不安定平衡点の近似値を求める手法である。時間領域シミュレーションで求めた軌跡を用いて，式 (2.6) における経路依存の項を計算することができるため，経路依存のエネルギー関数を近似することなく取り扱うことができる。Second-kick 法については，いくつかの改良例が文献で報告されており，sustained fault^[6]，intermittent fault^{[6][10]}，marginally unstable injection^[7]を利用した手法がある。

2.3.2. Second-kick 法によるエネルギーマージンの評価

Second-kick を適用したエネルギーマージン計算手法を説明するための概念図を図 2-2 に示す。図に示す空間は，系統モデルを記述する変数（発電機内部位相角，負荷母線相差角，発電機内部電圧，母線電圧など）により与えられる多次元状態空間の中のある二変数で切りとられた平面上の概念図である。故障前の系統は，系統を記述する方程式により定義される安定領域内にある安定平衡点（s.e.p.; stable equilibrium point）に存在する。不安定平衡点（u.e.p.; unstable equilibrium point）はその安定領域の境界に存在する。ポテンシャルエネルギーは安定平衡点で最小となり，安定領域境界で最大となる。故障中に系統は運動エネルギーとポテンシャルエネルギーを与えられ，安定平衡点から移動する。そして，故障除去後に全体のエネルギーは，系統軌跡に沿って運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの両者間で変換を行ないながら減少し，故障後の系統における安定平衡点に向かって遷移していく。

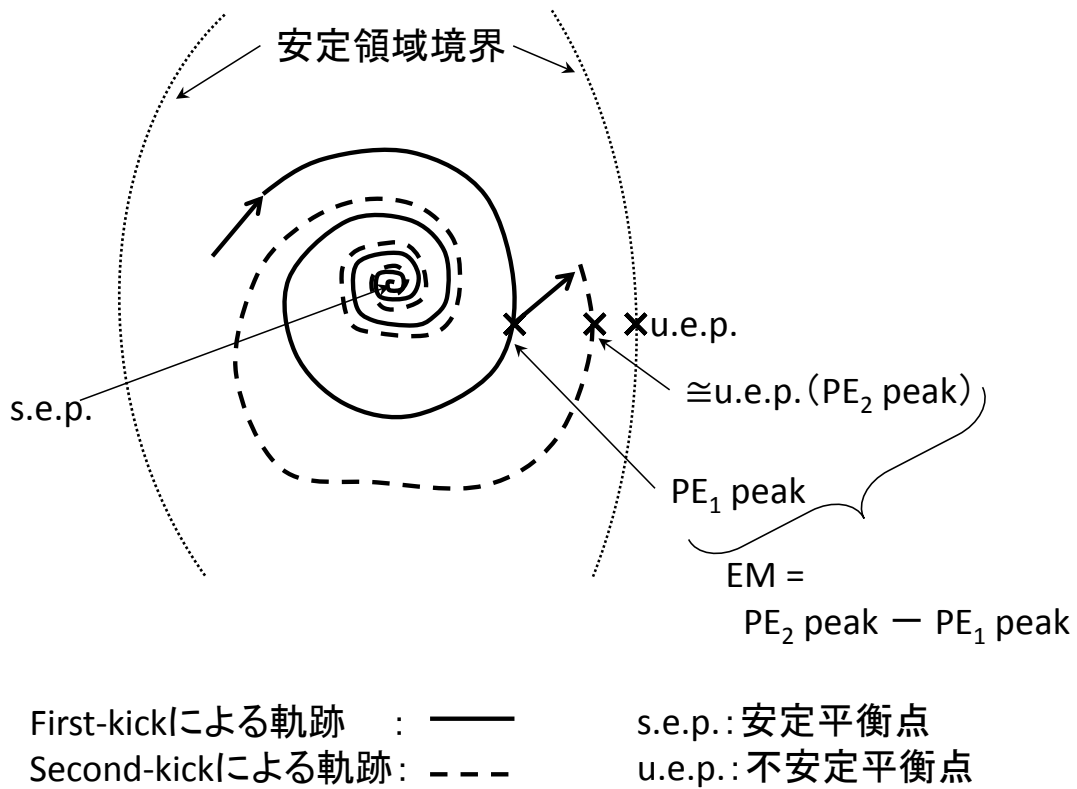


図 2-2 Second-kick 法によるエネルギーマージン計算の概念図

エネルギーマージンは、一般的に故障によって系統に注入されたエネルギーと支配的不安定平衡点のエネルギーの差として定義される^[11]。その物理的な意味を同じ図 2-2 を用いて説明する。故障による軌跡に沿って運動エネルギーがほぼ 0 でポテンシャルエネルギーが最大となる点 PE_{1peak} に時刻 t_{1peak} に達するものとする。 PE_{1peak} はエネルギー平面において系統状態が安定領域の境界にもっとも近づいた地点となる。ここで、系統が不安定状態になるために注入した必要なエネルギーがエネルギーマージンとなる。このように系統安定性の程度を評価するために、もっとも控え目な見積りをした場合の値は系統セキュリティを考える上で重要な指標となる。そこで、 PE_{1peak} で second kick を系統に与え、不安定平衡点の近似値 PE_{2peak} に時刻 t_{2peak} に到達するものとする（挿入される second kick は不安定平衡点を精度良く近似するために安定限界に近い安定軌跡を与える必要がある）。 PE_{1peak} と PE_{2peak} の差をエネルギー値で計測する。ポテンシャルエネルギーが関数として明示的に与えられている場合、2つのピークの差をエネルギーマージン EM として以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned}
 EM &= [PE(t_{2peak}) - PE(t_{SS})] - [PE(t_{1peak}) - PE(t_{SS})] \\
 &= PE(t_{2peak}) - PE(t_{1peak})
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$

ただし、 t_{SS} : 故障後定常状態における平衡点への到達時刻

演算アルゴリズムは以下のステップ (1) ~ (8) により実行する。

演算アルゴリズム

- (1) 初期外乱 (first-kick) 後の系統軌跡をシミュレーションにより求める
- (2) 最終的な安定平衡点を使用して経路依存でない項を計算する
- (3) 注入モデルを使用してトラペゾイダル法により安定平衡点から逆向きに経路依存項を計算する
- (4) ポテンシャルエネルギーが最大値 (PE_{1peak}) を与える時刻 t_{1peak} を見つける
- (5) 初期条件として時刻 t_{1peak} の系統状態を使用して二度目の外乱 (second-kick) を適用しその後の軌跡をシミュレーションにより求める
- (6) Second-kick の軌跡に沿ってポテンシャルエネルギーを計算する
- (7) Second-kick の軌跡に沿ってポテンシャルエネルギーの最大値 (PE_{2peak}) を見つける (最大値の座標は、支配的不安定平衡点の近似となる)
- (8) 上記で求めた二つのポテンシャルエネルギー最大値の差を計算しエネルギーマージン EM を求める

2.4. 提案手法

2.4.1. 提案手法

従来の second-kick 法における first-kick と second-kick に相当する外乱は、系統の同じ地点、同じ種別の故障で与えられる。このようなアプローチは、一つの発電機群がそれ以外の残りの発電機群に対して同期を喪失するという過渡（位相角）安定度に対するエネルギーマージンの計算を目的としたものである。特に、第一波で脱調する過渡安定度メカニズムに適しており良好な結果を与える。これは、外乱の与え方がその不安定メカニズムに着目して設計されているからである。つまり、評価対象となる不安定現象を誘発するメカニズムを考慮して、その現象に適した外乱の与え方を決定しなければならない。よって、負荷変化により駆動される不安定現象を評価する場合は、その不安定メカニズムに適した外乱の与え方を使用する必要がある。

故障発生を想定した過渡安定度の評価では、時間領域シミュレーションの解析に依らずに安定度を評価する直接法やそれらを組み合わせたハイブリッド手法が提案されている。一方、負荷変化に対する系統安定性の評価では、系統電圧の観点から長時間領域に対する電圧の安定性として外乱後の定常状態に着目した手法がある。そのような手法としては、例えば代数モデルをもとに潮流多根計算により電圧高め解と低め解の距離を用いる方法がある。これは系統のダイナミクスに基づく不安定メカニズムを考慮していない定常状態に基づいた手法であり、その定常状態の平衡点に到達する系統軌跡が存在しない可能性がある。この場合に得られる安定度評価は楽観的な評価となる。また分岐理論による評価では、系統モデルを線形化しヤコビ行列の固有値解析を行なう。系統の応答は大きな外乱に対しては非線形性を強く示すために、線形化したダイナミクスによる解析では正確な評価を得ることはできない。

本研究では、安定性の喪失時に系統軌跡が不安定平衡点の近傍にある境界点を通り外乱後の安定平衡点のアトラクション領域から脱離するという事実に基づいて、負荷変化に対する短時間領域の系統安定性を時間領域シミュレーションに基づくエネルギーマージン EM (式(2.9)) により評価する。この観点から負荷変化により駆動される不安定メカニズムを考慮した **second-kick** の新しい適用法を提案する。提案手法は、すなわち負荷変化と故障との組み合わせから構成される **second-kick** シナリオである。基本的な考え方は以下の通りである。

- (1) 初期外乱(**first-kick**) として負荷をステップ状に増大させ、負荷変化を模擬する。(これは系統にとって重負荷となる方向であり、電圧面で見ると電圧の高め解と低め解がより近接する方向へ系統にストレスが与えられている)
- (2) 系統に仮想的な故障(**second-kick**)を与えることにより、軌跡を安定境界の方向に向かわせ支配的不安定平衡点を求める。
- (3) 式 (2.9)によりエネルギーマージンを計算する。

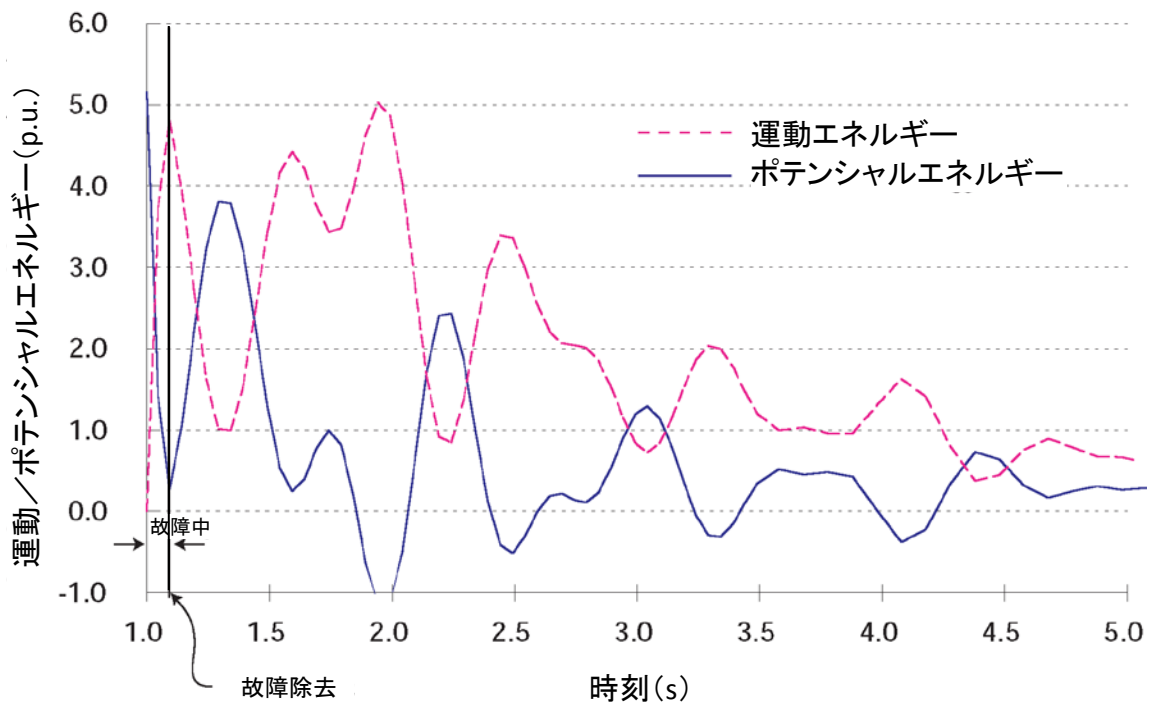
このように外乱を与えることにより、負荷変化が発生した場合に通過すると考えられるエネルギー平面における不安定平衡点を近似することができる。演算アルゴリズムは上記 2.3.2 節で示したものを使用し、ステップ 1 における **first-kick** を負荷ステップ変化に置き替える。

2.4.2. 提案手法における Second-kick 適用タイミング

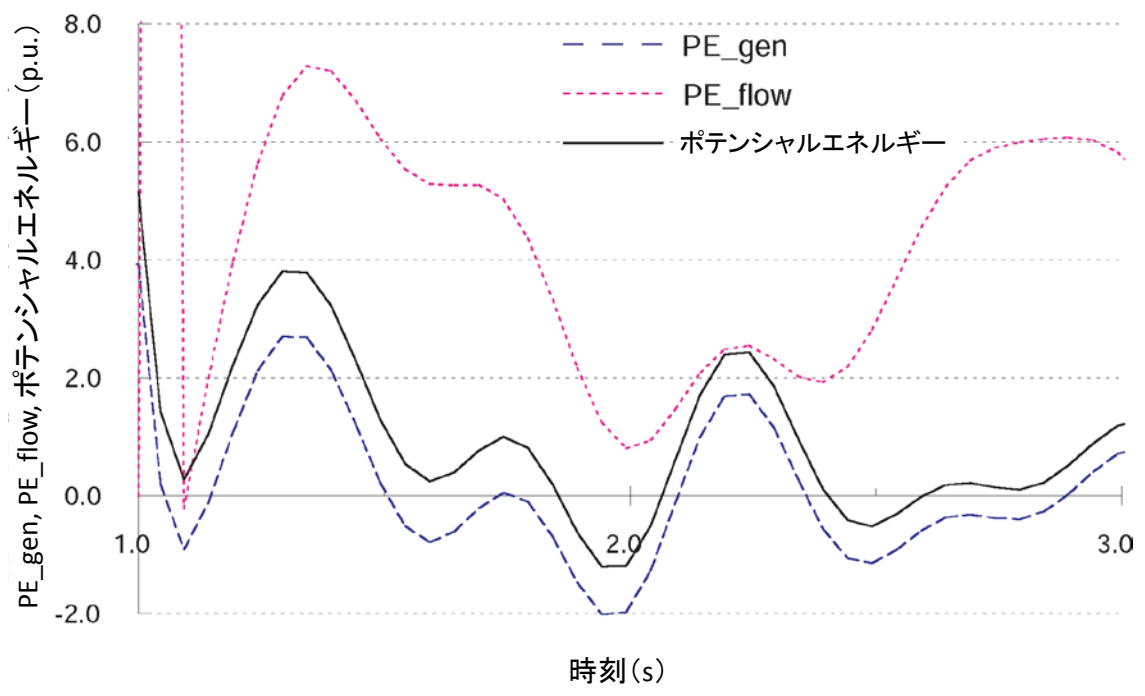
(1) エネルギー変化から見た適用タイミングの分析

従来の second-kick 法では、故障除去後（first-kick 終了後）においてポテンシャルエネルギーが最大値を示す時刻で second-kick を適用していた。図 2-3 (a)に従来法のポテンシャルエネルギーと運動エネルギーの変化を示す。故障中に発電機の機械的入力と電氣的出力の偏差により発電機が加速するために運動エネルギーは増大することがわかる。故障除去後から運動エネルギーは減少し始め、ポテンシャルエネルギーは増大し最初のピーク値をとる。その後ポテンシャルエネルギーは漸減し、大域的な最大値は故障除去直後の最初のピークとなる。

適用タイミングを詳細に分析するために、ポテンシャルエネルギーを与える式 (2.6) の右辺第一項と右辺第二項の変化に注目する。これら2つの項は、それぞれ系統内の無効電力と発電機の加速エネルギーに関わる項である。簡単のために、第一項を“PE_flow”，第二項を“PE_gen”と呼ぶ。図 2-3 (b)に PE_flow と PE_gen の変化をポテンシャルエネルギーの変化と合わせて示す。図より PE_flow と PE_gen の各ピークがほぼ一致し、ポテンシャルエネルギーの最大値を与えていることが分かる。



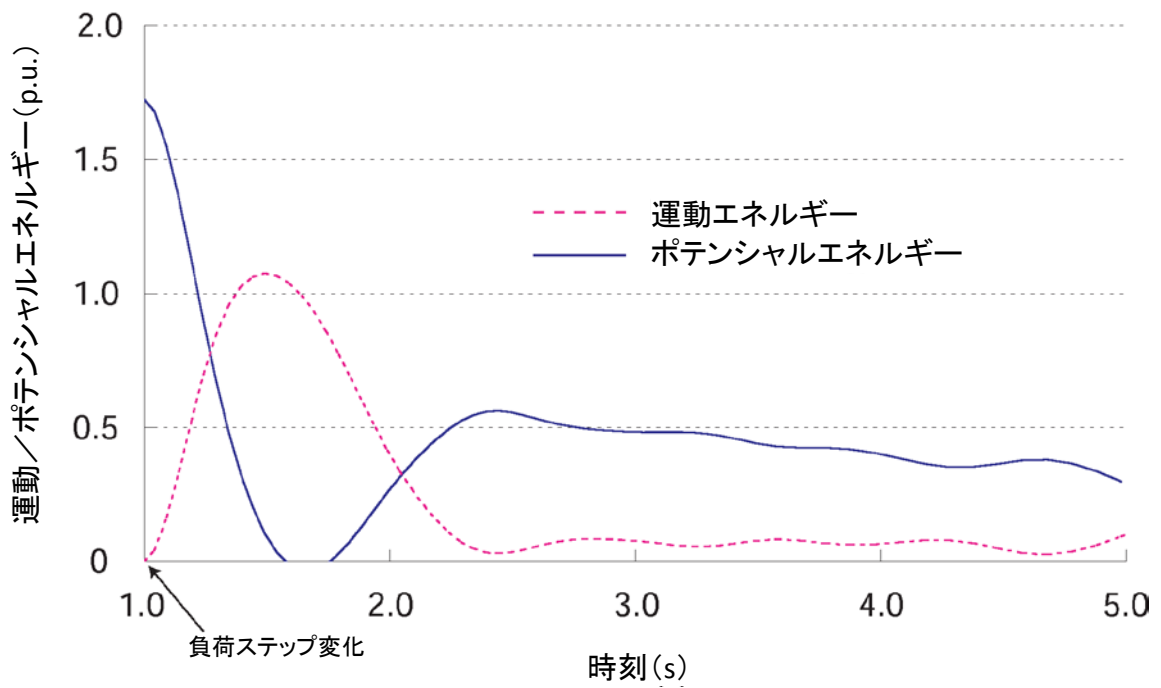
(a) ポテンシャルエネルギーと運動エネルギーの変化



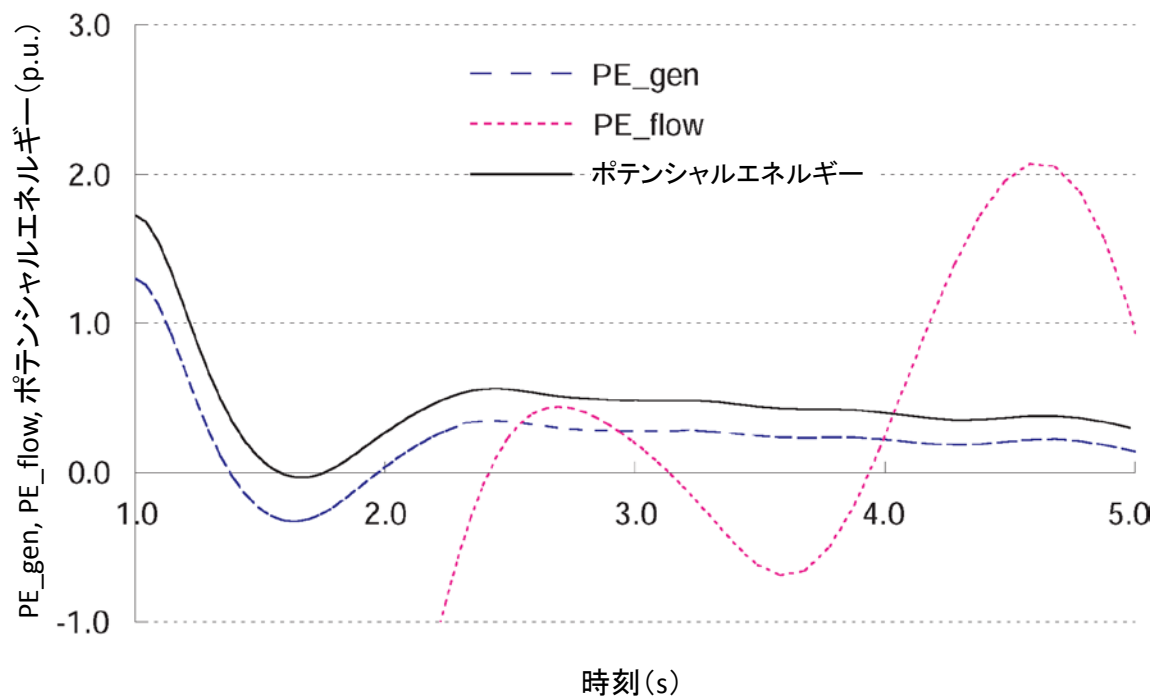
(b) PE_gen と PE_flow とポテンシャルエネルギーの変化

図 2-3 従来法におけるエネルギーの時間変化

一方、図 2-4 (a)に提案手法による first-kick 後のポテンシャルエネルギーと運動エネルギーの変化と、(b)に PE_gen と PE_flow の変化を示す。1.0(s)に与えられた負荷変化 (first-kick) では、負荷変化直後にポテンシャルエネルギーの最大値が現れる。その後、発電機出力と負荷量の不均衡によりポテンシャルエネルギーは減少し運動エネルギーは増大する。また、図 2-4 (b)より PE_gen と PE_flow の示すピークは一致しないことが観察される。PE_flow は約 4.6(s)に最大のピーク値を示し、ポテンシャルエネルギーの大域的ピークより遅い時刻に局所的ピークを与えていることがわかる。これらの観測結果は、両手法において故障と負荷変化という異なる性質を持った first-kick により、系統に与えられる動的変化が違うことを示している。



(a) ポテンシャルエネルギーと運動エネルギーの変化



(b) PE_gen と PE_flow とポテンシャルエネルギーの変化

図 2-4 提案手法におけるエネルギーの時間変化

(2) Second-kick 適用タイミングの提案

以上のエネルギーの時間変化の分析を踏まえて、提案手法に適した second-kick 適用タイミングを考察する。

図 2-3 と図 2-4 から、first-kick による軌跡は複数の局所的ピークを持つポテンシャルエネルギー曲線となることがわかる。複数のピークのうち異なるピークに相当する時刻において second-kick を適用する場合、系統は異なる不安定平衡点に向かう。図 2-5 は異なる 2 つの異なるピークで適用された second-kick による系統軌跡 a と b を模式的に示している。各軌跡はそれぞれの支配的不安定平衡点、ポテンシャルエネルギー・ピークを持ち、結果として異なるエネルギーマージンを生じることになる。

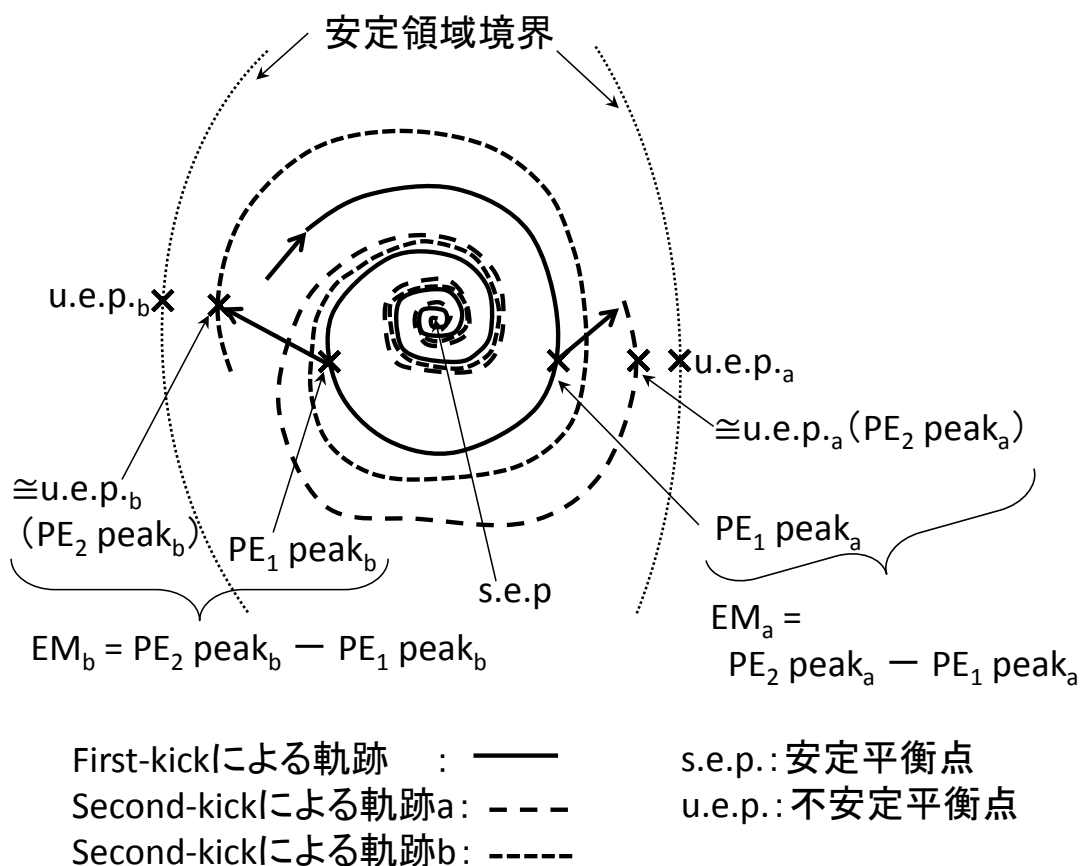


図 2-5 異なるタイミングで Second-kick を適用した場合のエネルギーマージン計算の概念図

前節における観測結果を考慮すると、PE_gen の変化はポテンシャルエネルギーの変化とその様相が一致することから、過渡（位相角）安定度を主に対象とした従来法ではポテンシャルエネルギーを構成する項の中で発電機の加速エネルギーに関する PE_gen の変化を second-kick 適用タイミングとして参照することが可能である。

提案手法における second-kick 適用タイミングとしては、first-kick の負荷変化 (1.0(s)) 後の PE_gen と PE_flow の変化に着目すると、以下の 2 つの時刻がある。

- (1) 負荷変化と同時刻の PE_gen ピーク (1.0(s))
- (2) 大域的ポテンシャルエネルギー最大値を与える時刻（負荷変化発生時点）から遅れたタイミングに PE_flow ピーク (4.6(s))

上記(1)の PE_gen ピークでの second-kick 適用は、前述のように不安定メカニズムの主要因を発電機加速エネルギーとする従来手法と同じ考え方に基づくものである。一方、上記(2)は次のように考えられる。PE_flow はシステムのすべての母線で系統に注入される無効電力の合計の 1/2 を表す。最終的な安定平衡点における値は一定であることを考慮すると、PE_flow が最大となるとき、その時点の無効ロス分が最大となり、負荷端での電圧が低くなる。PE_flow ピークを second_kick 適用タイミングとするシナリオは、系統電圧に最もストレスがかかる方向の不安定メカニズムに対する不安定平衡点を評価することになると考えられる。本研究では負荷変化により駆動される不安定メカニズムに対して SVC の電圧面からの系統安定性の向上効果を評価する目的から、提案手法では上記(2)の PE_flow ピークに着目して second-kick 適用タイミングとして使用する。

2.5. シミュレーションによる有効性検証

2.5.1. シミュレーション条件

提案手法を用いて SVC の導入効果を評価するために、図 2-6 に示す電気学会 WEST10 系統^[13]を用いて検証する。

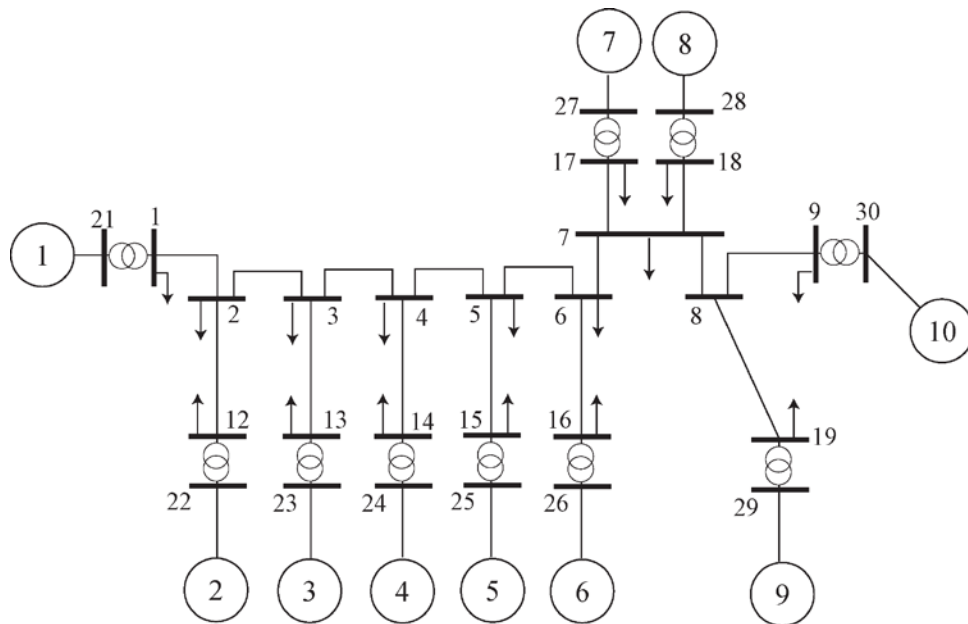


図 2-6 電気学会 WEST10 系統

シミュレーション系統の系統諸量は文献[13]と同じである。ただし、送電損失のない系統を仮定するため送電線抵抗を 0 とし、発電機 1 と発電機 10 にダンピング定数 7.0 を付加した。有効電力負荷は電圧と周波数依存特性モデルで、無効電力負荷は定インピーダンス特性モデルで表現されている。つまり、式(2.1)と式(2.2)で表される負荷モデルにおいて $x_{pf}=1.0$, $a=1.0$, $k_{pf}=0.033$, $x_{zq}=1.0$ の定数を使用しており、下記のようになる。

$$P_L = \left(\frac{P}{V} \right)_{SS} V (1 + 0.033 \Delta f) \quad (2.10)$$

$$Q_L = B_{SS} V^2 \quad (2.11)$$

導入する SVC の制御ブロックを図 2-7 に示す。図中の B_c は固定キャパシタのサセプタンス分を、 B_v は TCR (Thyristor Controlled Reactor) ブロックにより制御される可変インダクタのサセプタンス分を表す。 B_e は B_c と B_v の組み合わせからなる並列等価分である。電圧調整に対する入力は、母線電圧と母線電圧設定値の偏差 $V_{bus} - V_{ref}$ と、SVC 設置母線につながる線路を流れる有効電力 P_{line} をもとに生成されるダンピング信号 V_d である。SVC (制御回路は図 2-7 と同じ) は母線 5 と母線 7 への設置を想定する。このとき P_{line} は母線 5 設置の SVC に対して送電線 15-5 を流れる有効電力を、母線 7 設置の SVC に対して送電線 17-7 に流れる有効電力をそれぞれ使用する。SVC 制御範囲は $\pm 2000\text{Mvar}$ の範囲とする。

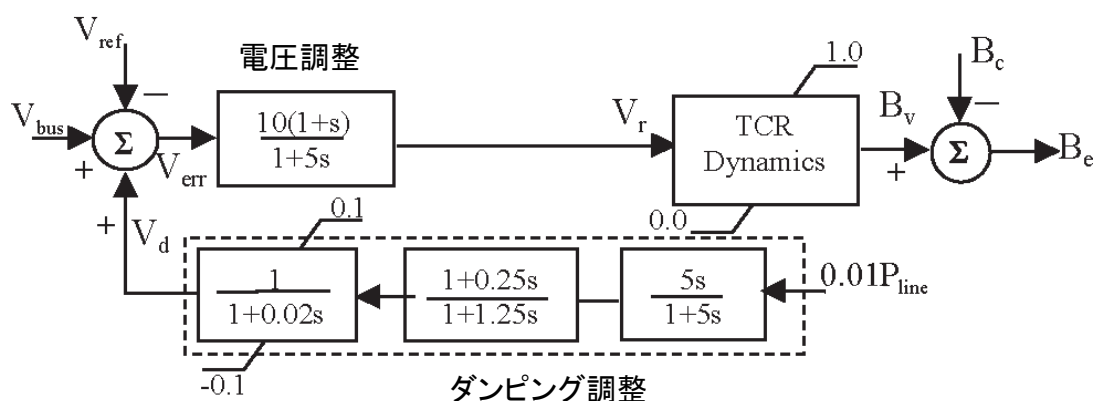


図 2-7 SVC 制御ブロック図

また、過渡（位相角）安定度を評価対象とする従来手法に対する評価シナリオ（First-kick および Second-kick の与え方）と、負荷変化により駆動される不安定現象を評価対象とする提案手法の評価シナリオをそれぞれ次のように与える。

- 従来手法：
 - (First-kick) 時刻 1.0(s)に母線 16 で三相故障発生（故障継続時間 50ms）
 - (Second-kick) 母線 16 で三相故障挿入（故障継続時間 50ms）
- 提案手法：
 - (First-kick) 時刻 1.0(s)に母線 6, 9 で 10%の負荷増加
 - (Second-kick) 母線 16 で三相故障挿入（故障継続時間 50ms）

2.5.2. Second-kick 適用タイミングの違いによる不安定現象の確認

従来手法と提案手法を適用した場合に、それぞれ異なる不安定メカニズム、すなわち系統故障時の位相角不安定現象および負荷変化により駆動される不安定現象、を与えるかどうかを検証する。ここでは SVC を設置していない系統シミュレーションで、両手法により近似される不安定平衡点を通過するときに観測される不安定現象時の系統振舞いを分析する。シミュレーションは、両手法が不安定平衡点を近似する場合の安定限界軌跡を与える second-kick 継続時間を延長する方法で実施した。適用した second-kick 継続時間は以下の通りである。

表 2.1 Second-kick 継続時間の延長

従来手法	0.110 (s) (安定限界軌跡を与える場合 0.105 (s))
提案手法	0.115 (s) (安定限界軌跡を与える場合 0.110 (s))

シミュレーション結果を図 2-8～図 2-13 に示す。図 2-8 は従来手法適用時の発電機内部位相角の変化を示す。一方、提案手法適用時の発電機内部位相角の変化を図 2-9 に、発電機端子電圧の変化を図 2-10 に示す。また、提案手法適用時の発電機 6 と 9 の発電機無効電力の変化を図 2-11 に、界磁電圧の変化を図 2-12 に示す。図 2-13 は提案手法適用時の負荷母線 6 と 9 の電圧の変化である。

まず、図 2-8 より、従来手法が評価する不安定平衡点で系統は第一波脱調による位相角不安定現象であることが分かる。これに対して、提案手法が評価する不安定平衡点で系統は第二波脱調の不安定現象であることが分かる。シミュレーション結果から、この不安定現象のメカニズムは次のように考えられる。

- 時刻 1.0(s) に与える初期外乱 (first-kick : 負荷変化) により負荷電力が増大し無効ロス分が増大するため、図 2-11 から分かるようにそれに見合う量の無効電力が発電機から供給される。
- 時刻 4.62 (s) に与える Second-kick の後、図 2-12 から発電機 6 と 9 の界磁電圧がそれぞれ飽和に達する。図 2-13 より、このとき負荷端の電圧が低下する。これに伴って負荷消費電力が小さくなるために、位相角安定度に対して

は安定化効果を有することになる。その後、約 6.72(s) まで電圧回復の期間があり、その間に発電機 6 と 9 の界磁電圧がリミッタから離れることがわかる。（その後、再び発電機電圧が上昇し、それに伴って発電機の有効電力と無効電力も増大し再び系統にストレスがかかる状態になる。）

- 時刻 6.72(s) より後に発電機の無効電力が大きく増大し（図 2-11）、負荷母線電圧が急激に低下して最終的に電圧が崩壊し（図 2-13）、発電機も同期を喪失することが分かる。

以上の観測結果から、提案手法が評価する不安定平衡点における系統の振舞いは、負荷変化後の系統状態で電圧振動により系統が不安定状態に至る **multiple-swing instability** であり、最終的には発電機は同期を喪失している。しかし、本現象が同期外れに至る過程には、従来手法が対象としている不安定メカニズムと異なり、系統電圧が大きく影響している。これは負荷変化という外乱を **first-kick** として与えることにより系統状態に重負荷方向へのストレスをかけた結果であると考えられる。したがって、提案手法は負荷変化により駆動される不安定メカニズムを考慮した **second-kick** の新しい適用法として有効であることが分かる。

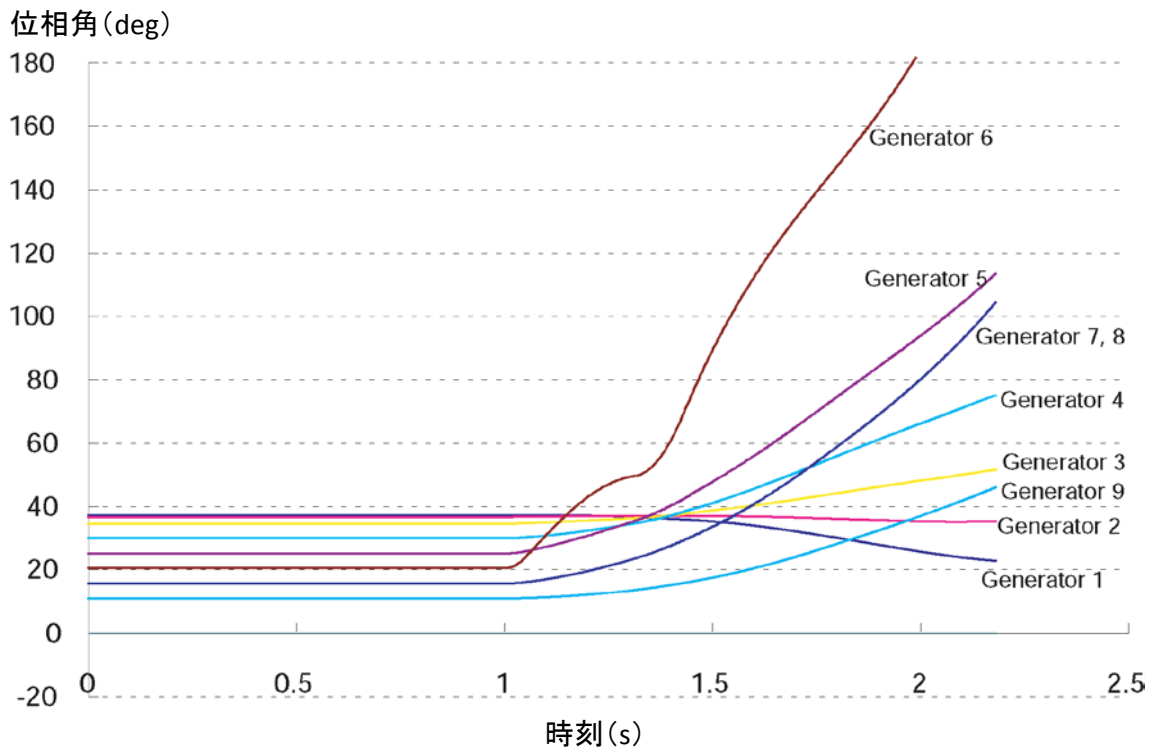


図 2-8 (従来手法で second-kick 継続時間を延長した場合) 発電機内部位相角

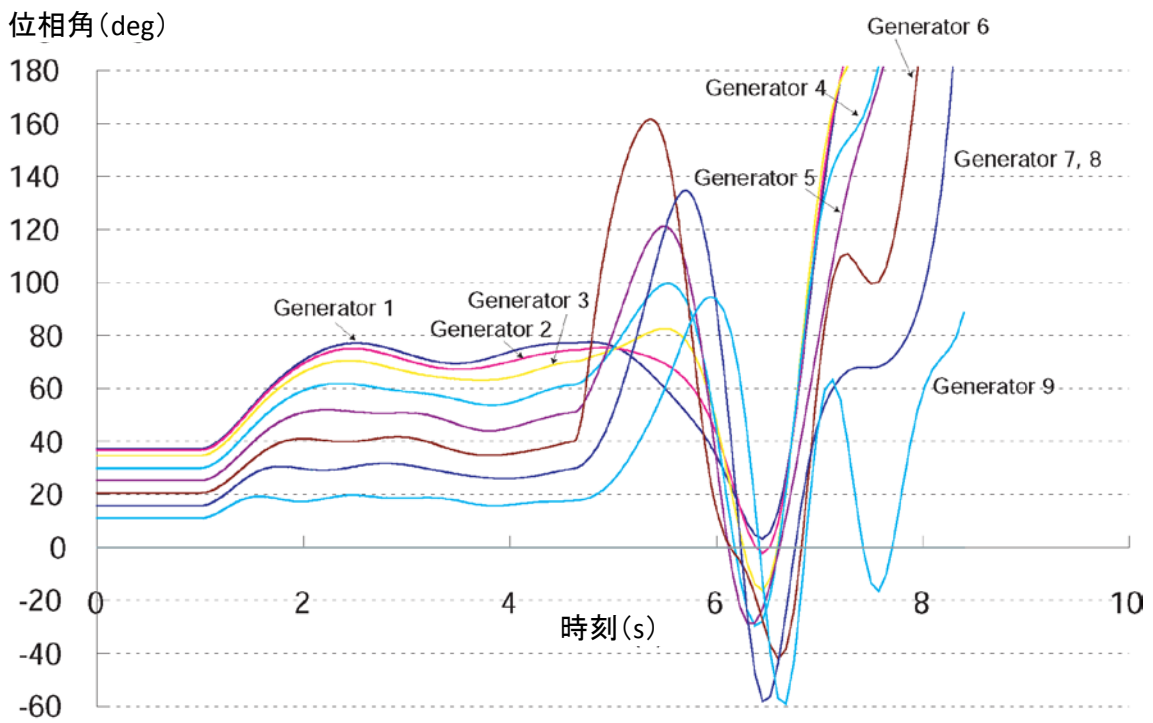


図 2-9 (提案手法で second-kick 継続時間を延長した場合) 発電機内部位相角

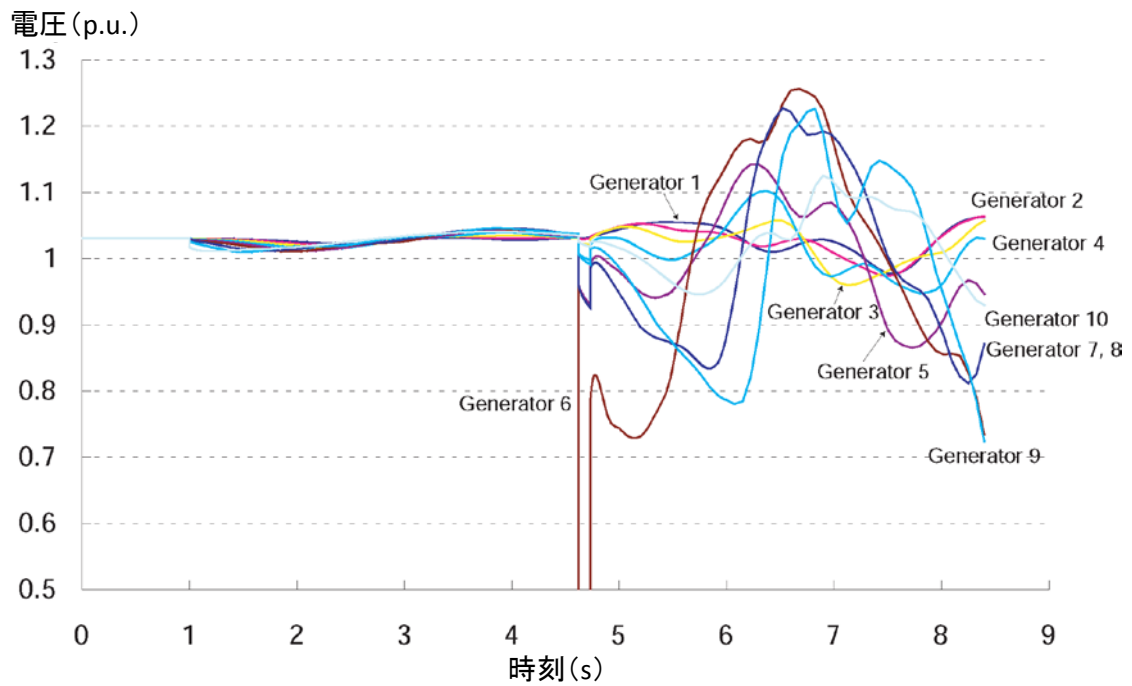


図 2-10 (提案手法で second-kick 継続時間を延長した場合) 発電機端子電圧

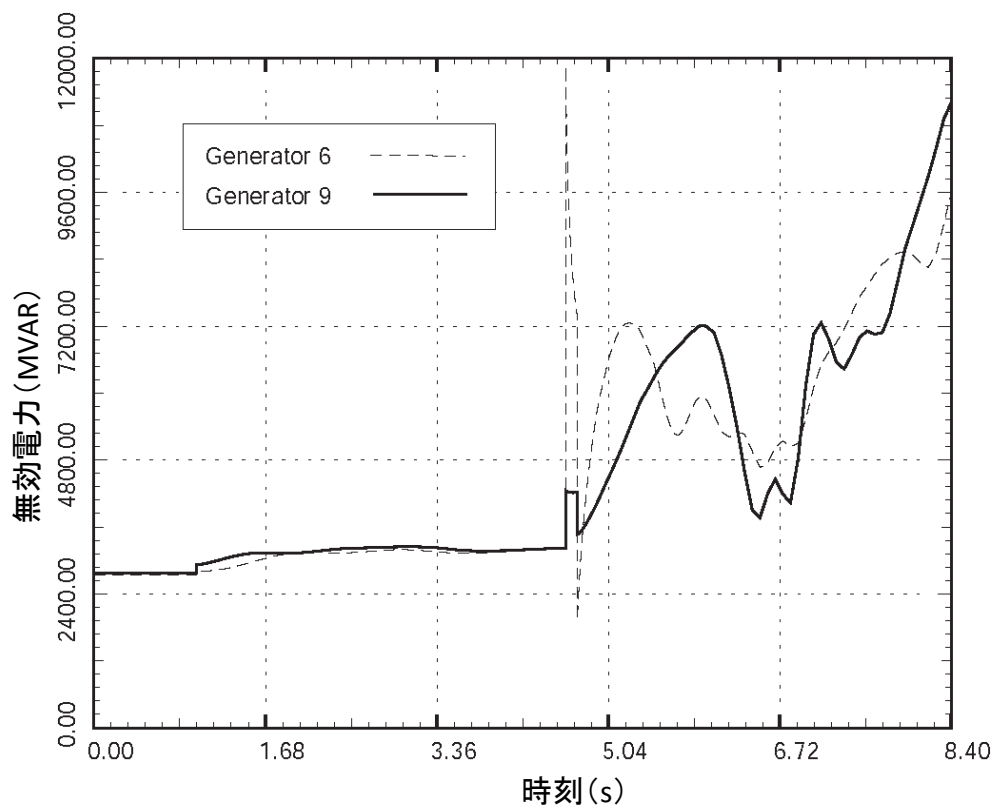


図 2-11 (提案手法で second-kick 継続時間を延長した場合) 発電機無効電力

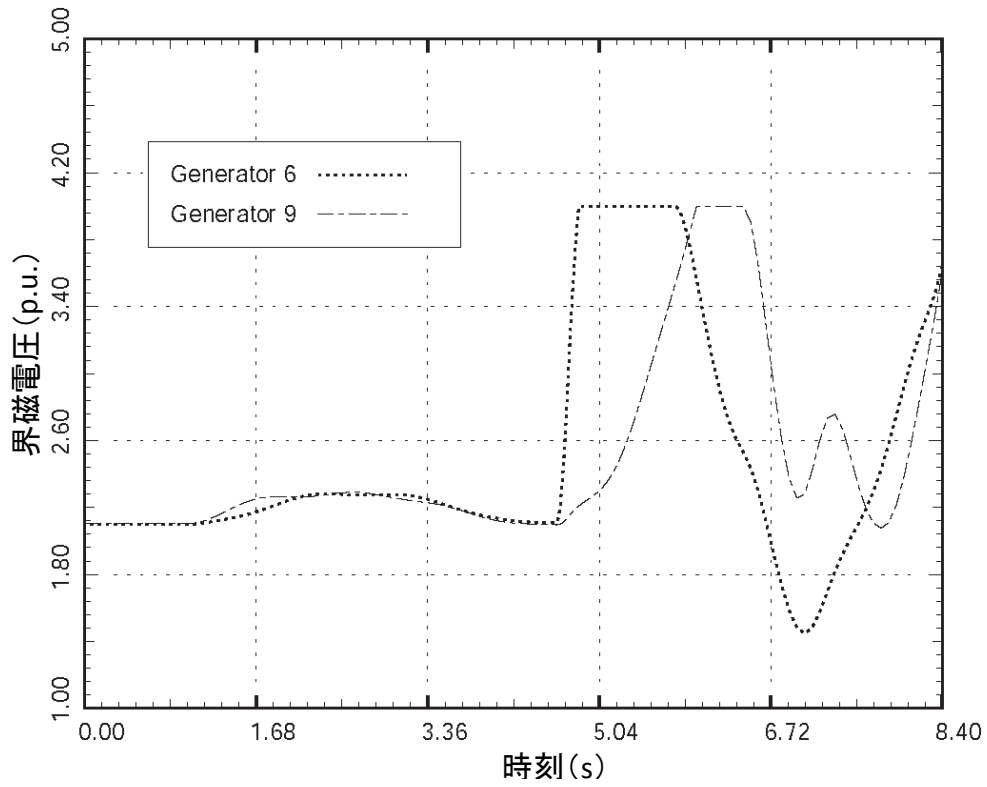


図 2-12 (提案手法で second-kick 継続時間を延長した場合) 発電機界磁電圧

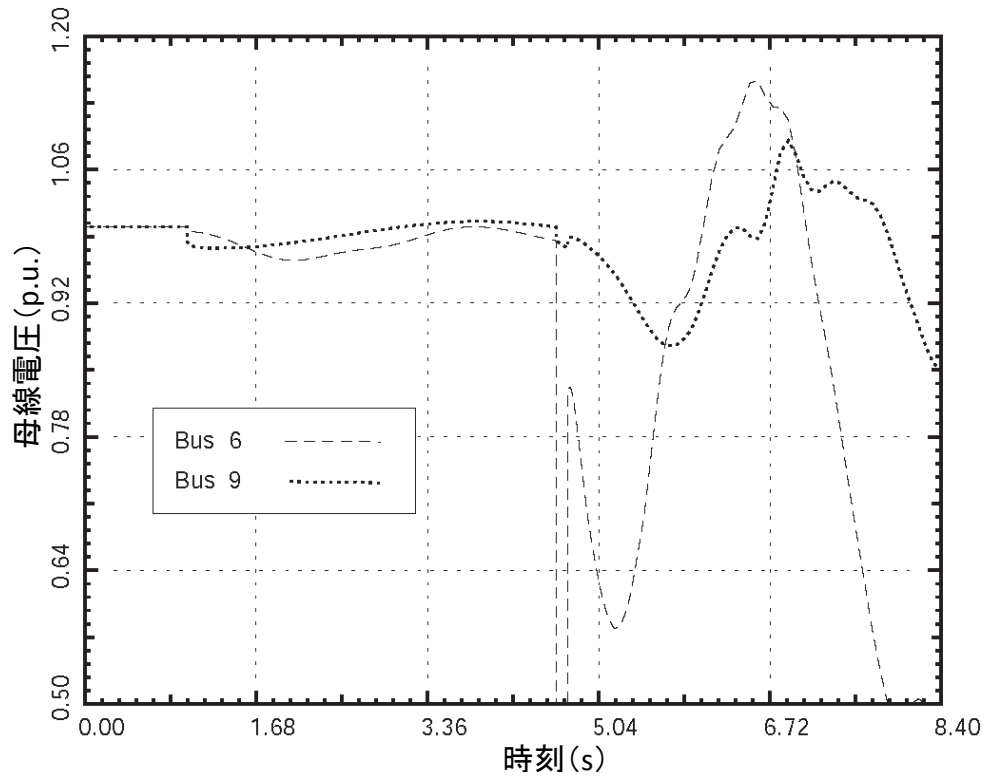


図 2-13 (提案手法で second-kick 継続時間を延長した場合) 負荷母線電圧

2.5.3. エネルギーマージンによる SVC 導入効果の定量的評価

SVC のない場合と SVC を導入する場合において、それぞれ従来法と提案手法による 4 つのエネルギーマージン計算結果を表 2.2 にまとめる。「Second-kick 継続時間」は、故障継続時間をパラメータとして安定／不安定を判別する二分探索により求めた臨界軌跡を与える時間である。最後の列は、各シナリオに対する不安定平衡点近似値の座標を代表的に母線 6 の(δ_6 (deg), V_6 (p.u.))により示している。

表 2.2 エネルギーマージン計算結果

ケース No	SVC 有無	適用手法	First-kick PE ピーク値	Second-kick 適用時刻(s)	Second-kick 継続時間(s)	エネルギーマージン	不安定平衡点近似値 (δ_6 (deg), V_6 (p.u.))
1	SVC なし	従来手法	3.8686	1.315	0.105	75.38 (EM_1)	(-107, 0.57)
2		提案手法	0.3790	4.620	0.110	52.49 (EM_2)	(73, 0.65)
3	SVC あり	従来手法	3.0017	1.308	0.108	84.61 (EM_3)	(-134, 0.50)
4		提案手法	0.2447	4.660	0.119	152.84 (EM_4)	(49, 0.54)

また、図 2-14、図 2-15 は各ケースに対する second-kick によるポテンシャルエネルギーの変化を示している。図中の下方に示す水平な線は、各シナリオに対する first-kick に対するポテンシャルエネルギーのピーク値（すなわち、式(2.9)における右辺第二項）を便宜的に挿入している。それらの値は、エネルギーマージンを測定するために使用した臨界軌跡のピーク値に比べて非常に小さい。正確な値は表 2.2 の「First-kick PE ピーク値」に示している。式(2.9)により計算されるエネルギーマージンを図中に矢印で示しており、矢印に付した記号 $EM_1 \sim EM_4$ は各シナリオに対するエネルギーマージンの大きさをそれぞれ表す。

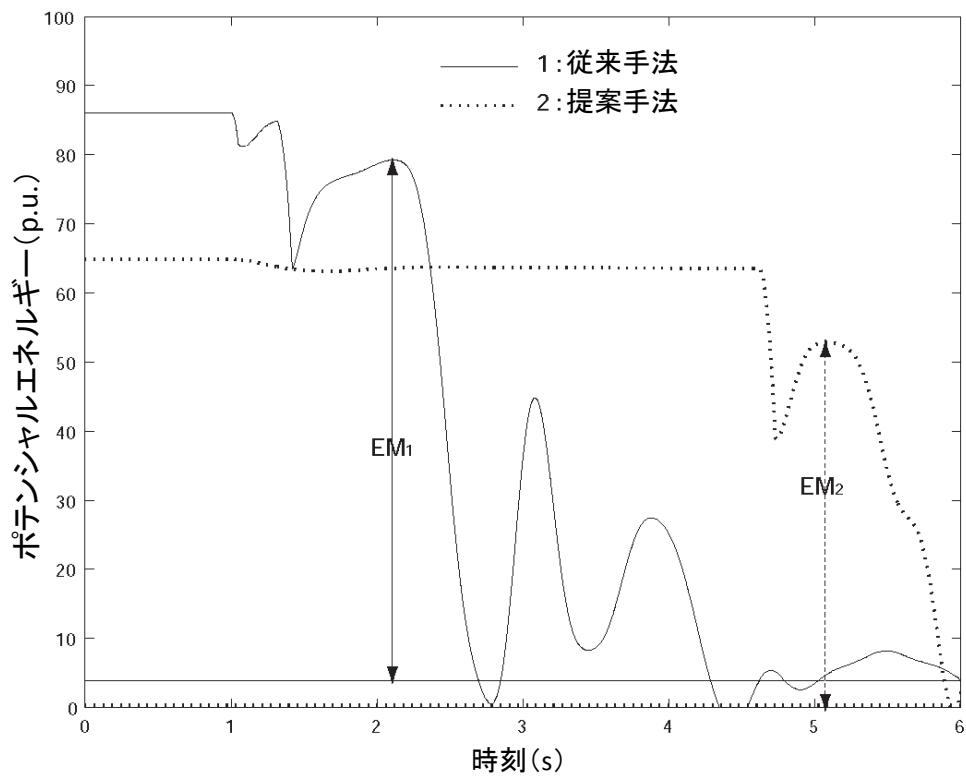


図 2-14 Second-kick によるポテンシャルエネルギーの変化 (SVC なし)

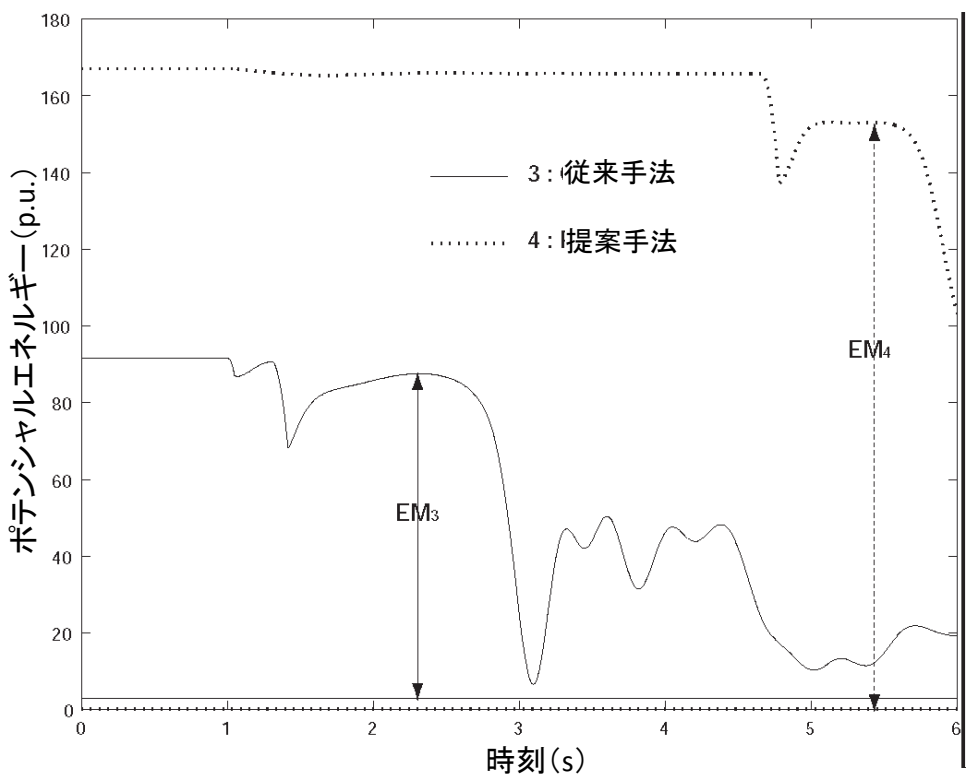


図 2-15 Second-kick によるポテンシャルエネルギーの変化 (SVC あり)

シミュレーション結果から以下の知見が得られる。

- SVC のない場合とある場合の両者において second-kick 適用時刻が異なる。また、従来手法と提案手法に対する不安定平衡点近似値の座標、特に位相角 δ_6 の符号が異なる。このことから、両手法による初期外乱 (first-kick) により系統はそれぞれ異なる不安定平衡点へ向かったことがわかる。
- 母線 5 と 7 への SVC 導入効果を評価すると、従来手法および提案手法のどちらを適用しても、エネルギーマージン EM は増大していることが分かる (従来手法：ケース 1→ケース 3, 提案手法：ケース 2→ケース 4)。つまり、系統故障による過渡 (位相角) 安定度と負荷変化により引き起こされる電圧面で厳しい系統安定度の両方の点で系統の安定度が向上したことがわかる。
- SVC を導入した場合のケース 4 に対する EM_4 は、ケース 2 (SVC 導入なし) と比べると約 2~3 倍に大きくなっている。これは、一般的に重負荷になるほど動揺ダンピングは悪くなり安定度が悪くなるが、図 2-7 に示すようにダンピングを抑える制御機構を持つ SVC 導入による安定化効果を顕著に示している。
- SVC のない系統では、提案手法で評価したとき (ケース 2) に最小の EM が得られる。ケース 1 (SVC なし, 従来手法で評価) のエネルギーマージンと比較すると、系統が過渡 (位相角) 安定度よりも負荷変化により駆動される不安定メカニズムに対して弱いことを示していると考えられる。
- SVC を導入した系統では、提案手法で評価したとき (ケース 4) のエネルギーマージンは従来手法で評価したとき (ケース 3) に比べて大きい。これは、SVC のない系統における負荷変化により駆動される不安定メカニズムへの弱さが SVC の導入により補強されることを示している。エネルギーマージンの客観的な比較から、SVC を導入した系統では過渡 (位相角) 安定度の方が脆弱であることが分かる。

2.6. 結言

本章では、SVC を電力注入モデルとして組み込んだエネルギー関数を使用して、エネルギーベース指標を用いて SVC 導入による安定度向上効果を定量的に評価する手法を示した。エネルギーマージン評価手法として second-kick 法を採用した。この手法は外乱時の系統応答に関する完全な情報を時間領域シミュレーションにより獲得するため、精度の高い評価が可能である。Second-kick 法による評価アプローチという同じ枠組みで、過渡（位相角）安定度を評価対象とした従来手法と異なる負荷変化により駆動される不安定現象の検討に適した second-kick アプローチを提案した。そして、ポテンシャルエネルギーを記述する式を構成する要素項の中で、系統の無効電力と発電機の運動エネルギーに関係する 2 つの項に着目し、従来手法と提案手法におけるエネルギー変化の違いを明らかにした。その考察結果に基づき、不安定メカニズムに対して適切な項のピーク値を参照して second-kick 適用タイミングを決定する新しい手法を提案した。モデル系統を用いたシミュレーションにより以下のことが明らかになった。

- 提案手法は短時間領域における負荷変化により駆動される電圧変動が影響する不安定メカニズムを考慮した second-kick 法として有効である。
- 系統に SVC を導入した結果、エネルギーマージンの増大が観測され定量的に安定度向上効果を確認した。
- 従来手法と提案手法を使用して両者から求めたエネルギーマージンを比較すれば、どの不安定メカニズムに対して系統が脆弱であるのかを判断することができる。

ここでは代表的な系統安定化機器の例として SVC を取り上げたが、例えば TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitors) など他の系統安定化機器も同様に電力注入モデルとしてエネルギー関数に組み込みエネルギーマージンを評価することができる。

本研究に関する今後の課題としては、送電損失を考慮したエネルギー関数への拡張が挙げられる。また、長時間の電圧不安定現象において主要な役割を担う系統要素（変圧器タップなど）をエネルギー関数の中にモデル化していないため、より長時間の電圧不安定現象に対応するために離散的な変圧器タップ動作のエネルギー関数での定式化などが挙げられる。

参考文献

- [1] Y. Xue, L. Wehenkel, R. Belhomme, P. Rousseaux, M. Pavella, E. Euxibie, B. Helibronn and J.F. Lesigne : “ Extended Equal Area Criterion Revisited” , *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 1012-1022, Aug. 1992
- [2] M. Pavella, D. Ruiz-Vega, J. Giri and R. Avila-Rosales : “An Integrated Scheme for On-Line Static and Transient Stability Constrained ATC Calculations” , Power Engineering Society Summer Meeting, Vol.1, pp. 273 –276, 1999
- [3] G. A. Maria, C. Tang and J. Kim : “Hybrid Transient Stability Analysis”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 5, No.2, pp. 384-393, May 1990
- [4] M. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandhari and G. Andersson : “Improving Power System Dynamics by Series Connected FACTS Devices”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No. 4, pp. 1635-1641, Oct. 1997
- [5] N.A. Tsoias, A. Arapostathis and P.P. Varaiya : “A Structure Preserving Energy Function for Power System Transient Stability Analysis”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Vol. CAS-32, No. 7, pp. 1041-1049, 1985
- [6] E. Vaahedi, Y. Mansour, A. Y. Chang, B. R. Corns, E. K. Tse : “Enhanced Second-Kick Methods for On-Line Dynamic Security Assessment”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.11, No.4, pp.1976-1982, Nov. 1996
- [7] K.W. Cheung : “A New Hybrid Method for On-Line Dynamic Security Assessment”, *Control Engineering Practice*, Vol. 6, pp. 1373-1380, 1998
- [8] T. Van Cutsem, C. Vournas : Voltage Stability of Electric Power Systems, Kluwer Academic Publishers, 1998
- [9] I. A. Hiskens, D. J. Hill : “Incorporation of SVCs into Energy Function Methods”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 133-140, Feb. 1992
- [10] C.K. Tang, C.E. Graham, M. El-Kady and R.T.H. Alden : “Transient Stability Index from Conventional Time Domain Simulation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 3, pp. 1524-1530, Aug. 1994
- [11] H.D. Chiang, G. Cauley : “Direct Stability Analysis of Electric Power Systems Using Energy Functions: Theory, Applications and Perspective”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 83, No. 11, pp. 1497-1529, Nov. 1995

- [12] I. A. Hiskens, D. J. Hill : “Energy Functions, Transient Stability and Voltage Behaviour in Power Systems with Nonlinear Loads”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 4, No. 4, pp. 1525-1533, Oct. 1989
- [13] 電気学会 電力系統モデル標準化調査専門委員会 : 「電力系統の標準モデル」, 電気学会技術報告, 第 754 号, 1999

3. オンライン周波数安定化における負荷脱落差推定手法

3.1. 緒言

電力系統の需給制御は、負荷変動の短周期成分から長周期成分まで時間領域ごとに対応する複数の制御機能（数十秒～二十数分の短周期成分は AFC（Automatic Frequency Control）、数分～数時間以上の長周期成分は EDC（Economic Dispatching Control）や ELD（Economic Load Dispatching）で対応）から構成されており、平常時の周波数を規定値に維持する。これに加えて、運転中の最大容量発電機の脱落や連系線開放などの故障が発生しても周波数が許容値以内に収まるように適正量の瞬動予備力（Spinning Reserve）を確保しながら平常時の需給運用が行われている。瞬動予備力は、発電機のガバナ・フリー運転分、他社緊急融通分、揚水運転遮断などにより確保する。瞬動予備力の確保量を超える、電源脱落や電源系送電線の故障による単独分離系統発生などの過酷故障が発生したときに動的な供給信頼性を維持するため、系統安定化装置である周波数安定化システムが設置される。特に、大規模市街地など重要系統が発電機を有したまま単独分離系統になるときに備えて、高精度な周波数安定化を実現するために中央演算方式の安定化システムを設置することが多い。

周波数安定化システムは、故障前後の需給バランスの変化から周波数変動を予測して必要最小限の制御量（電源制限量/負荷制限量）を算出して制御する。電力系統の過酷故障発生時には電圧低下に伴って負荷構成機器の一部が自律的に系統から離脱する現象（負荷脱落）が観測されることが多い^[1]。負荷脱落発生時に計測点で観測した負荷量（有効電力）と負荷母線電圧の波形を図 3-1 に模式的に示す。故障除去後の定常状態に復帰したあとの負荷量は脱落により故障発生前の初期負荷量に比べて小さくなる。連系系統の故障により単独系統が発生するとき、実際に周波数安定化システムによる制御は故障除去後数百 ms 内に実行されるが、このような負荷脱落差は制御量決定時における不確定要因となり制御結果に大きな影響を与える。したがって制御精度の向上には負荷脱落差を正確かつ高速に推定することが重要となる。

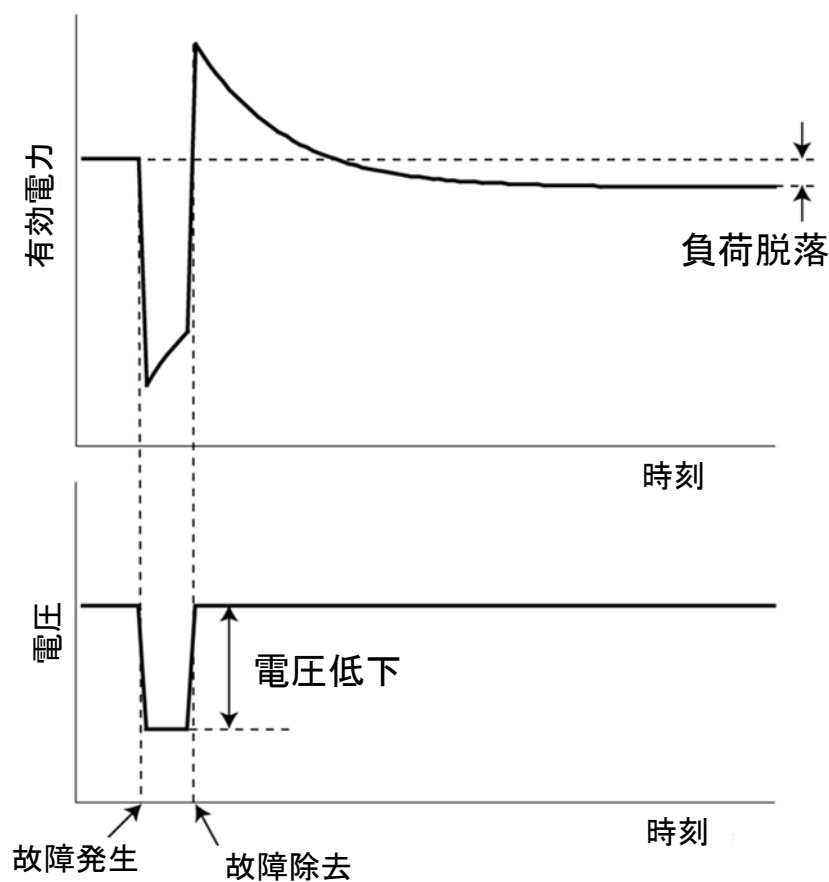


図 3-1 負荷脱落発生時の電力・電圧計測波形

また、大量の分散型電源は良好な気象条件の際には大きな出力となり見かけ上の需要を押し下げるため、供給側から見た系統容量が小さくなる。このとき周波数安定性の維持に重要な役割を果たす瞬動予備力の低下が懸念される。元々系統容量の小さい単独分離系統ではさらに系統容量が小さくなり負荷脱落による制御誤差が相対的に大きくなる。周波数低下断面では負荷フィーダ線単位に負荷制御（負制）が実施されるものの、負荷脱落量分の誤差があると結果的に負荷の過剰制御となり供給力過剰の需給アンバランスが発生し発電機の遮断制御（電制）に至ることになる。電制は1台あたりの制御量単位が大きいことから需給偏差が避けられずに再び負制が必要となる悪循環に陥り分離系統全体の停電を招く。したがって、単独分離系統の周波数安定化では制御量算出時に考慮する負荷脱落量の推定値にはさらに高い精度が求められる。周波数安定化の制御精度向上には、従来よりも正確かつ高速に負荷脱落量をオンラインで推定する実用的な手法が望まれる。

国内では、いくつかの負荷脱流量推定手法がこれまでに研究開発^{[2][3]}されている。これらの手法には、負荷脱落に起因した需給アンバランスの結果として観測される周波数偏差から負荷脱落特性を捉えて制御量を算定する方法や、制御対象ではない他の系統の統計的な調査結果から故障時電圧低下率と負荷脱流量の関係を単純なモデルで捉える方法などがある。前者の手法では故障直後の系統周波数に故障中の発電機加速の影響が残るために 1.0s 程度以降の周波数偏差しか利用できない。一方、後者の手法では故障時に対象系統全体の脱流量を捉えることを主眼として、精度は高くないものの統計的に簡素化した二段ステップ状モデルを実績データから構築し迅速な制御を実現するために使用されている。海外では、国内の放射状系統構成と異なりメッシュ状に連系した系統構成が多く単一故障では単独分離系統が発生しないことから、負荷脱流量推定の研究ではなく、負荷モデルを構築する手法に関する研究が主として報告されている。負荷モデル構築手法は大きく以下の 2 つのタイプに分けられる。1 つは実際の電気機器の組み合わせで負荷モデルの構成を目指す手法^[4]である。負荷モデルの中に各電気機器のモデルを保持することができるが、全体に占める各電気機器の構成比率を特定することが困難である。もう 1 つは事前に検討・構築した負荷の数学モデルに基づき観測データからそのパラメータを同定する手法^[5]である。観測データを表現可能なモデルとなるが、物理的な解釈を与えることが難しい。また、これら 2 つの手法を組み合わせたアプローチで、負荷の物理的な特性を有するモデルを作成し、モデル・パラメータを観測データから同定する研究も行われている。

本研究では、周波数安定化システムにより故障除去後 200ms 以内にオンライン負荷脱落量推定結果を反映した制御実施を目指し、上述の従来方式と異なるアプローチとして、制御対象システム内の各計測点における故障前後の負荷量・電圧波形からオンラインで負荷脱落量を推定する方式を提案する。本方式は従来方式と対比すると次の特徴を持つ。

- (1) 変電所既設の計測装置によるローカル負荷システムの計測波形データに基づいて各計測点の負荷脱落量を推定する。曜日、季節といった周期性や地域性を考慮することにより負荷のローカルな特性を捉えやすいため、制御対象システム全体を対象とするより推定精度の向上が期待できる。
- (2) 故障除去後の短時間領域（例えば 200ms 以内）の計測データを使用して負荷脱落量を推定する。これにより故障除去後からの推定完了時間の短縮を図り高速な制御仕上りが期待できる。

上記の特徴 (1) については、負荷動特性に起因した過渡特性が重畳した計測波形となるため、オンラインで負荷脱落量を精度良く推定するには負荷動特性を考慮する必要がある。そこで提案方式は、まず動特性を考慮した負荷モデルを準備し、適切に分類した故障実績データより分析獲得した動特性パラメータの特性（特徴 (1)）を活用して故障直後の計測波形データから動特性の影響を低減する。そして主として負荷の静特性分から構成される低減後のデータに対して、静特性負荷モデルにより推定した故障除去後の負荷量と初期値との偏差として負荷脱落量を算出する。なお、実際にシステムで生じる故障はほとんどが不平衡故障であるが、周波数安定化システムへの適用を想定し、提案方式では故障時計測データの正相分の電気量をもとにすべての推定演算を実施する。

本章の構成は以下の通りである。最初に 3.2 節では、提案方式で使用する動特性を考慮した負荷モデルについて説明する。次に 3.3 節では、電力会社管内の主要変電所の故障実績データに基づいた負荷モデルのパラメータ分析より、動特性パラメータの特性について論ずる。3.4 節では、故障除去後の短時間領域における計測データから負荷脱落量を推定する新しい手法を提案する。最後に提案手法の有効性について実績データを使用して数値検証した結果について 3.5 節で述べる。

3.2. 動特性を考慮した負荷モデル

計測点から下位負荷系統を観測したときに、合成負荷特性の動特性に関わる部分は主としてモーター負荷（誘導機）に起因すると仮定する。誘導機は系統故障除去後に電圧が回復すると、すべり s を回復するために有効電力を一時的に大きく消費する。その結果、負荷の有効電力が故障除去後に過渡的に跳ね上がった後に、急激に減衰する現象が観測される。

Hill は一般的な誘導機の特性格式から動特性を考慮した負荷モデル式を導出している^{[6][7]}。負荷モデルの動特性模擬については、合成負荷の動特性部分を一機の誘導機としてモデル化する。誘導機の運動方程式は以下で与えられる。

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{I\omega_0^2} \left(\frac{P_m}{1-s} - P_d \right) \quad (3.1)$$

ただし、

I : 誘導機の慣性定数, $\omega_0 (= 2\pi f_0)$: 基準角速度 (f_0 は基準周波数),

s : すべり, P_m : 機械的出力, P_d : 電氣的入力 (負荷有効電力)

図 3-2 に示す等価回路から有効電力に関する式を導出し、励磁インダクタンスが非常に大きいと仮定すると負荷有効電力は以下のようなになる。

$$P_d = \frac{V^2 R_m s}{R_m^2 + X_m^2 s^2} \quad (3.2)$$

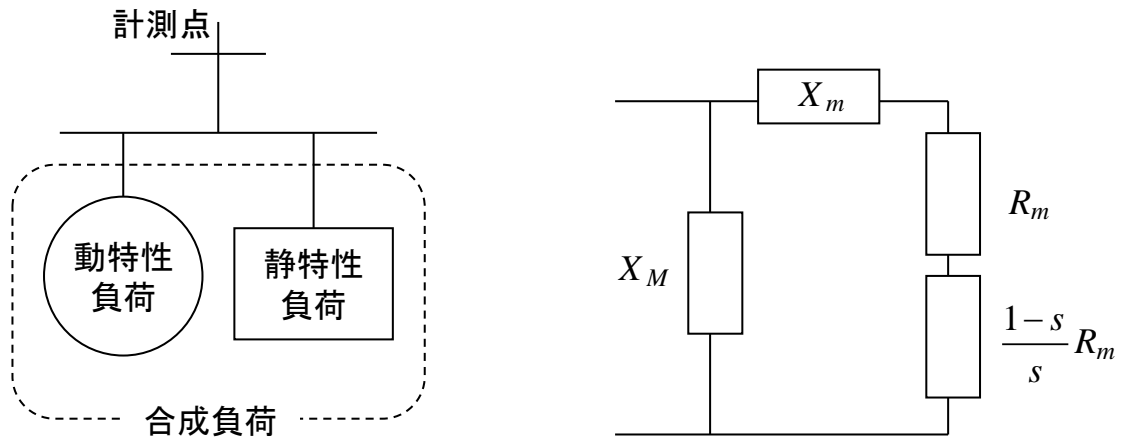


図 3-2 合成負荷と誘導機の等価回路

式(3.2)を微分し運動方程式を代入して整理すると、動特性負荷について次式が得られる。以降の式では、ある変数 x に対する記述 \dot{x} は時間に関する微分を表すものとする。

$$\frac{I\omega_0^2}{V^2} \cdot \frac{1}{A(s)} \cdot \dot{P}_d + P_d = \frac{P_m}{1-s} + \frac{I\omega_0^2}{V^2} \cdot \frac{B(s)}{A(s)} \cdot V \cdot \dot{V} \quad (3.3)$$

ここで、 $A(s)$ と $B(s)$ はすべり s の関数である。

$$A(s) = \frac{R_m(R_m^2 - s^2 X_m^2)}{(R_m^2 + X_m^2 s^2)^2} \quad (3.4)$$

$$B(s) = \frac{2R_m s}{R_m^2 + X_m^2 s^2}$$

式(3.3)の右辺第一項は動特性負荷の定常状態における有効電力を表している。左辺第一項と右辺第二項は計測点から見た負荷の動特性を表現している。そこで計測点から見た静特性負荷を P_{st} として式(3.3)の両辺に加えると以下の式(3.5)になる。

$$\frac{I\omega_0^2}{V^2} \cdot \frac{1}{A(s)} \cdot \dot{P}_d + (P_d + P_{st}) = \left(\frac{P_m}{1-s} + P_{st} \right) + \frac{I\omega_0^2}{V^2} \cdot \frac{B(s)}{A(s)} \cdot V \cdot \dot{V} \quad (3.5)$$

式(3.5)において、新たに次のように変数を定義する。

$$\begin{aligned} P_d + P_{st} &= P \\ \frac{P_m}{1-s} + P_{st} &= P_S \end{aligned} \quad (3.6)$$

P は計測点から見て動特性負荷と静特性負荷を統合した合成負荷を、 P_S はその合成負荷の静特性分を表す。合成負荷全体の動特性分はモーター負荷に起因するという前述の仮定において、式(3.5)を整理すると全体の負荷のモデル式は以下になる。

$$T_d \cdot \dot{P} + P = P_S + K_d \cdot V \cdot \dot{V} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} T_d &= \frac{I\omega_0^2}{V^2} \cdot \frac{1}{A(s)} \\ K_d &= \frac{I\omega_0^2}{V^2} \cdot \frac{B(s)}{A(s)} \end{aligned} \quad (3.8)$$

式(3.7)では K_d と T_d は電圧変動に対する過渡応答の大きさや応答の長さを決定するパラメータになる。本負荷モデルでは、動特性負荷の定常有効電力は P_S に統合して取り扱われている。故障除去後に時間が経過すると動特性の影響が小さくなり、合成負荷は $P = P_S$ となり静特性分のみとなる。また合成負荷の静特性分 P_S を次式で与える。

$$P_S = P_0 \cdot (K_p + K_z V^2) \quad (3.9)$$

ただし、

K_p, K_z : 負荷の電圧静特性 (それぞれ定電力, 定インピーダンス特性を表す。
ただし、 $K_p + K_z = 1$),

P_0 : 初期負荷量

負荷脱落が発生した場合には故障除去後の負荷の静特性分のパラメータが変化する。すなわち式(3.9)は次式となる。

$$P_s = P'_0 \cdot (K'_p + K'_z V^2) \quad (3.10)$$

ただし,

P'_0 : 故障除去後の負荷量,

K'_p, K'_z : 故障除去後の電圧静特性 (ただし, $K'_p + K'_z = 1$)

故障除去後の電圧が定常状態に復帰し $P'_0 < P_0$ であるとき, 負荷脱落量 ΔP_0 は故障発生前後の負荷量の差として計算できる。

$$\Delta P_0 = P_0 - P'_0 \quad (3.11)$$

3.3. 負荷過渡特性に関する分析と検証

3.3.1. 実績データの分析

主要変電所において過去に計測された故障実績データの分析を行った。各実績データについて、最小二乗法により動特性負荷モデル (式(3.7)) のパラメータを推定した。故障実績データの分析に関する諸元は以下の通りである。

- 計測期間 :
1998年～2000年
- 計測点と計測データ :
77kV 変電所 (5箇所) の変圧器二次側で計測した有効電力および電圧データ (正相分)
- 故障種別 :
系統側 (一次側) で発生した故障ケース (自回線故障, 多重故障ケースは除外)
- 分析方法 :
計測データに対して動特性負荷モデルのパラメータを最小二乗法により推定
- 分析データ区間 :
故障除去前 10ms から故障除去後 500ms 間のデータを使用

図 3-3 は, 計測点 A と計測点 B で計測された負荷脱落のない系統故障ケースの実績データの中で夏季昼間 (5～9 月, 8:00～19:00) におけるデータを分析して K_d-T_d の関係をそれぞれ示したものである。また図中に示す R^2 は決定係数であり, 回帰式により説明できた変数の変動割合を示している。すなわち, R^2 は 1 に近いほど回帰式の精度が良いことを示す。図より以下のことがわかる。

- 計測データを季節や時間帯、計測地点により分類すれば、本負荷モデルの動特性パラメータ K_d と T_d に強い線形相関がある。
- K_d と T_d の近似直線の傾きは、計測データの分類条件により異なり、負荷のローカルな特性を示している。
- 負荷脱落による影響を見るために脱落ケースの点 (K_d , T_d) を白抜きの点で図に重ねて示したところ、計測点 A と B の両者とも脱落のないケースによる近似直線に近い位置にある。負荷脱落により K_d と T_d はそれぞれ影響を受けるが、両者の比は負荷脱落の影響をほとんど受けないと考えられる。

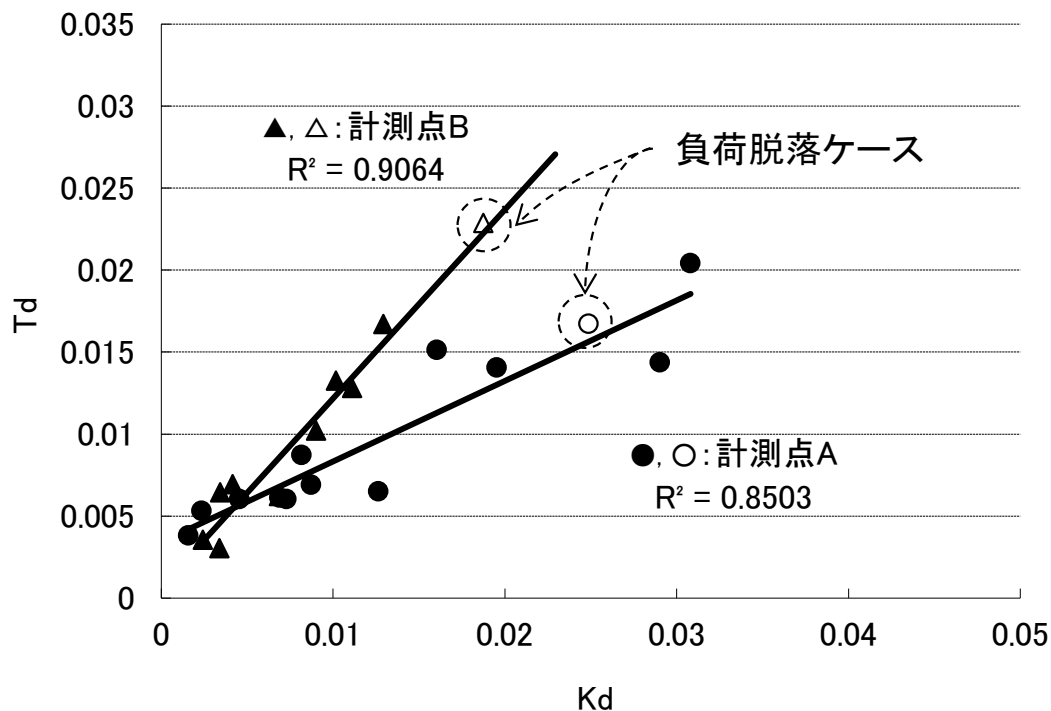


図 3-3 実績データにおける動特性パラメータ K_d と T_d の特性
(計測点 A, B : 夏季 5~9 月, 平日昼間 8:00~19:00)

3.3.2. 動特性パラメータ分析結果の考察

動特性パラメータ K_d と T_d (式(3.8)) の比をとり式(3.4)を代入して整理すると以下になる。

$$\frac{T_d}{K_d} = \frac{1}{B(s)} = \frac{R_m^2 + X_m^2 s^2}{2R_m s} \quad (3.12)$$

これは、 T_d/K_d の値は動特性負荷の回路定数 R_m 、 X_m とすべり s により決定することを示している。3.3.1 節の分析結果によれば T_d/K_d 比はほぼ一定になる。これは以下の理由によると考えられる。

- (ア) 回路定数は計測点から見た負荷の構成に依存する。ある計測点において負荷特性の周期性を考慮して、たとえば季節、曜日、時間帯等により計測データを分類して扱えば、各データに対して負荷構成は大きく変わらず回路定数はほぼ同じである。
- (イ) 一般的な誘導機ではすべり s は 0 に近い領域で運転されている。また、大容量機ではトルク-すべりの関係を示す速度特性曲線の傾きは大きく、また慣性定数が大きいため電圧低下に対するすべりの変化は小さいと考えられる。つまり、故障発生後に運転を継続している誘導機のすべり s は大きく変化しない。

3.3.3. 電圧低下率と動特性パラメータ

K_d は式(3.8)にしたがって以下の式で与えられる。

$$K_d = \frac{I\omega_0^2}{V^2} \cdot \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{I\omega_0^2}{V^2} \cdot \frac{2s \left(1 + \left(s \cdot \frac{X_m}{R_m} \right)^2 \right)}{1 - \left(s \cdot \frac{X_m}{R_m} \right)^2} \quad (3.13)$$

I と ω_0 は定数であることから 3.3.2 節の考察結果を踏まえると、 K_d は主として故障発生時に電圧の二乗の逆数に関係すると考えられる。ここで、故障発生時に初期電圧 V (1.0 p.u. とする) から ΔV ($\Delta V \geq 0$) の電圧低下が発生するものとする。故障除去後の有効電力の変動については、故障発生により低下した電圧が回復する場合の電圧変化分に依存する。故障除去後の電圧はほぼ初期電圧に戻るため、電圧変化分は故障発生時の電圧低下分と同じとする。このとき K_d は $(1 - \Delta V)^2$ の逆数に依存するので、これらを展開して二次までの項をモデル化すると次式となる。ただし、物理的な観点から定数項は 0 とする。

$$K_d = a_1 \Delta V + a_2 \Delta V^2 \quad (3.14)$$

図 3-4 と図 3-5 は 3.3.1 節と同じデータを使用して、変電所 A と変電所 B における $\Delta V - K_d$ の関係をそれぞれ示したものである。また図 3-3 と同様に負荷脱落発生ケースを白抜きの点で図に重ねて表す。これらの図より以下のことがわかる。

- K_d は電圧低下率に対して強い依存性を持つ。モデル式(3.14)はその特性をよく近似している。
- 負荷脱落の影響により K_d はモデル式(3.14)から推定される値と異なり小さい値となる。

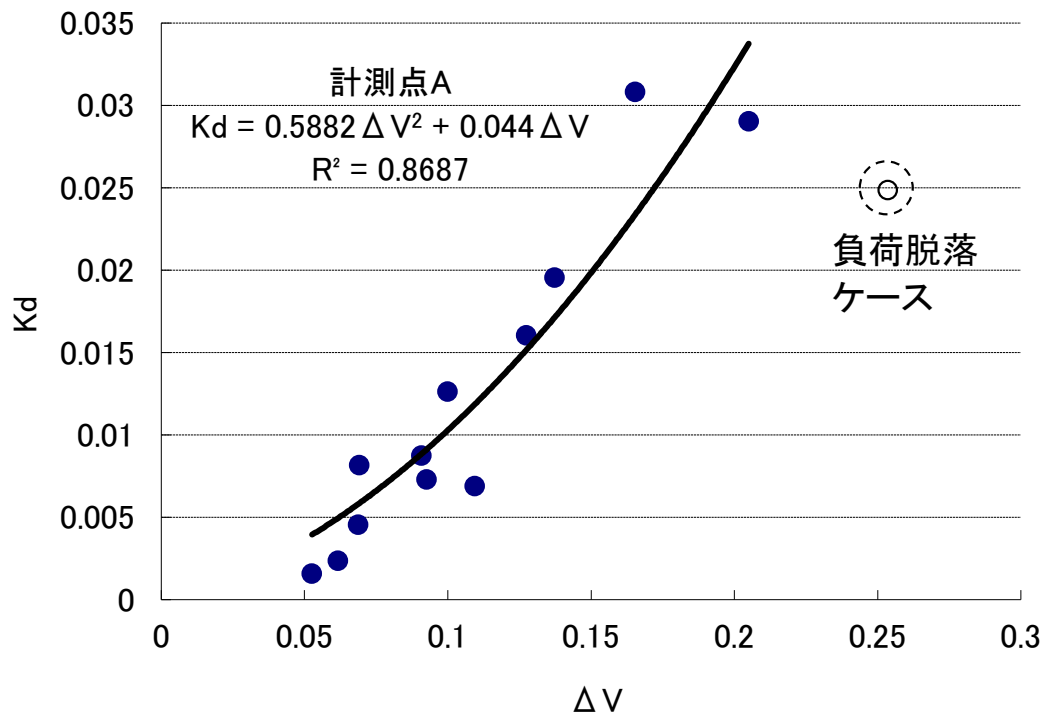


図 3-4 実績データにおける K_d と電圧低下率 (計測点 A)

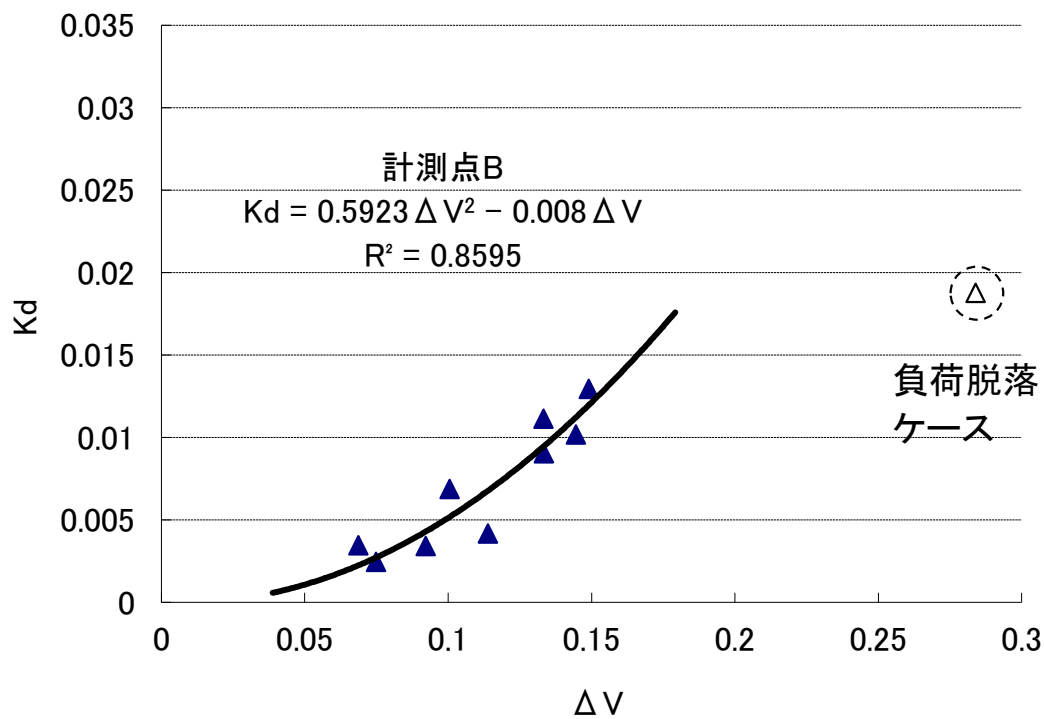


図 3-5 実績データにおける K_d と電圧低下率 (計測点 B)

3.4. 負荷脱着量推定手法の提案

3.4.1. 提案手法

故障除去後の短時間領域の計測データに基づいて負荷脱着量を推定するために、動的負荷モデルをベースに過去の実績データから得られる分析情報を活用した新しい推定手法を提案する。提案手法は変電所既設の計測装置によるローカル負荷系統の計測波形データを利用して各計測点の負荷脱着量を推定するものである。ここで分析情報とは 3.3.2 節と 3.3.3 節でそれぞれ明らかになった負荷モデルの動特性パラメータに関する特性である。提案手法を実際の周波数安定化システムに適用することを考えると、制御仕上がり時間は約 200ms であるため負荷脱着量推定演算に要する時間は 100ms 程度が望ましい。したがって、推定演算に使用する計測波形データは故障除去後 100ms 分とする。また、今回検討に用いた故障実績データでは、故障除去後の短時間領域において周波数変動による負荷変化が電圧変動による変化に対して小さいため、本研究では簡単化のため負荷の周波数特性を無視している。

提案手法は図 3-6 に示すフローチャートにしたがった手順で構成される。

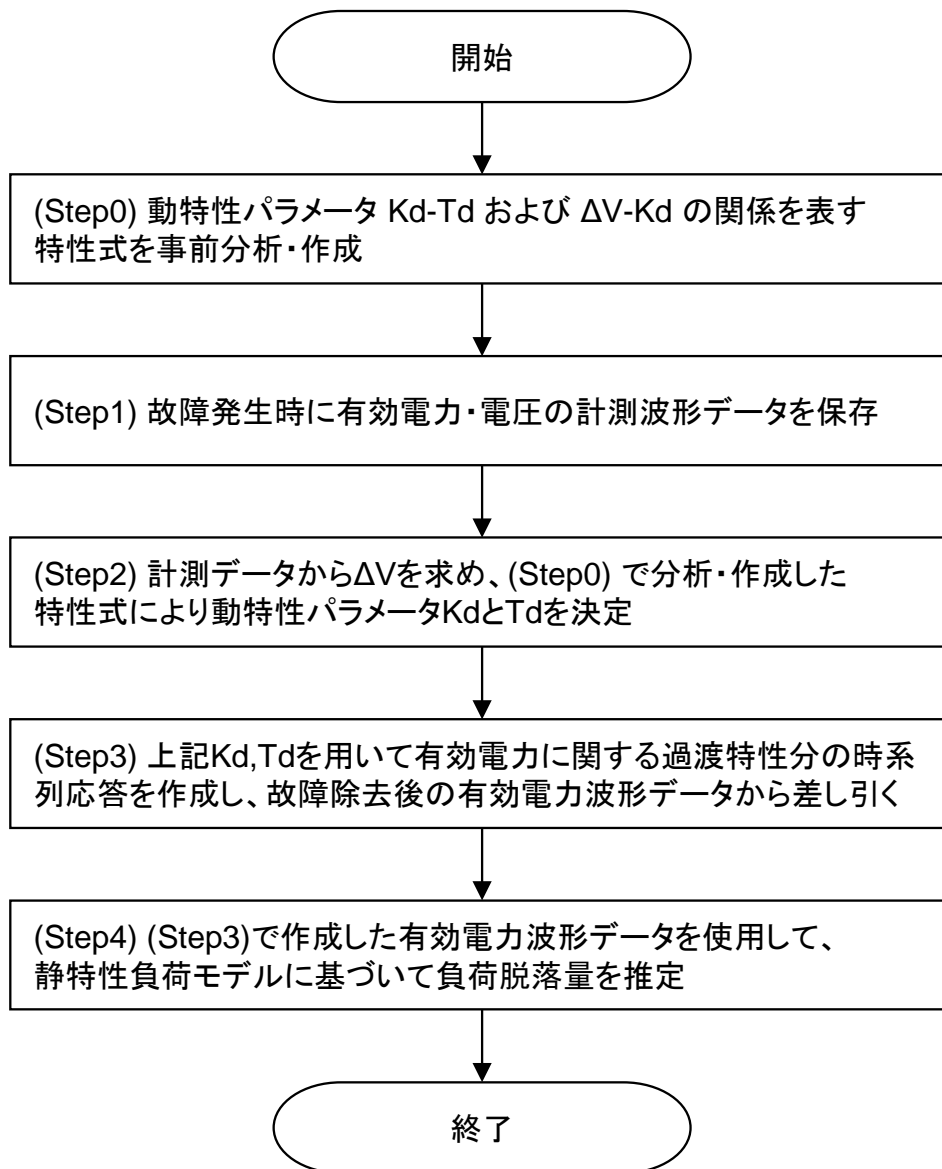


図 3-6 提案手法のフローチャート

各手順の内容について説明する。

(Step 0) は動特性パラメータに関する特性式を分析するために、系統故障発生前にあらかじめ実行するオフライン処理である。(Step0)では過去に計測保存された故障実績データから負荷脱落のない故障ケースを計測条件(季節, 時間帯, 計測地点など)により分類して負荷モデル式(3.7)に基づいて分析し, 動特性パラメータ K_d-T_d , また電圧低下率 $\Delta V-K_d$ の関係を統計的に処理して特性式 (K_d-T_d の近似直線, $\Delta V-K_d$ の近似曲線式(3.14)) を作成する。実際に故障が発生した場合には, (Step1)以降の手順によりオンライン処理を実行し負荷脱落量を算出する。(Step1)では故障発生時に故障前数十 ms から故障除去後 100ms 間の有効電力・電圧の波形データを計測する。次に(Step2)では計測データから電圧低下率 ΔV を求め, 事前に(Step 0)で分析した特性モデルを使用して動特性パラメータを決定する。そして(Step3)では(Step 2)で求めた動特性パラメータを用いて過渡特性分の時系列応答を作成する。故障除去後の有効電力計測波形(100ms 分) から作成済み時系列応答を差し引いて負荷の過渡特性を低減し, 静特性の影響のみを含む波形データを作成する。最後に(Step4)では求めた波形データを使用し静特性モデルに基づいて負荷脱落量を推定する。

ここで, 物理的な観点から, 動特性パラメータ K_d の推定時に使用する電圧低下率 ΔV と K_d の関係を表す二次近似式を原点が通るように 3.3 節でモデル化している。この近似式に基づいて ΔV から K_d を推定して, その推定結果である K_d から T_d を求める手順となる。物理的な観点から, K_d と T_d の関係を表す近似直線も原点を通るようにモデル化することが考えられる。しかし, 本論文では K_d-T_d のモデル化は実測データとの誤差が最小となることを優先することとし, その結果として K_d-T_d の近似直線は必ずしも原点を通る近似直線として扱わない。

3.4.2. 動特性パラメータの推定

提案手法では負荷脱落がない故障ケースから分析した $\Delta V - K_d$ の特性モデル式(3.14)を利用して動特性パラメータを推定する。そのため提案手法は負荷脱落の発生時に K_d の推定に誤差を含む。これは動特性パラメータが負荷脱落の影響を受けていることが原因である。3.3.3 節の実績データ分析結果において、負荷脱落発生ケースは特性モデル式(3.14)から推定される値よりも小さい値をとることからも分かる。

一方、3.3.1 節で述べたように $K_d - T_d$ の特性モデル式は負荷脱落の有無による影響を受けないため、本手法では主として特性モデル式(3.14)による K_d 推定時に誤差が含まれることになる。

ここで K_d の推定誤差について定性的な考察を加える。故障時の電圧低下による負荷脱落には合成負荷の動特性分を構成する機器の一部脱落が含まれている。電圧低下が増大するに伴い、動特性分を構成する機器の負荷脱落量も増大すると推察される。このとき故障除去直後の過渡特性を引き起こす要因は小さくなることになる。このことから大幅な電圧低下が発生する場合には真値からの誤差は増大するが、有効電力計測波形データに重畳する過渡特性分は縮小すると予想される。この場合、提案手法は K_d を過大に見積もり脱落量推定精度の低下の原因になる可能性がある。また、大幅な電圧低下時には負荷脱落量の飽和が観測されることがある。提案手法は動特性パラメータを電圧低下率に基づいて推定し計測波形データにしたがって適応的に脱落量を推定するため、脱落量の飽和は推定精度に直接的に影響するものではなく、この場合にも K_d の推定誤差が本質的に影響する。

3.4.3. 過渡特性の低減処理

電圧低下に起因する故障除去後の過渡特性部分 P_{dyn} の時系列応答は以下の式により求める。演算にあたっては、故障時に計測された電圧 V の時系列データと(Step 2)で決定した動特性パラメータ K_d , T_d を用いる。

$$T_d \cdot \dot{P}_{dyn} + P_{dyn} = K_d \cdot V \cdot \dot{V} \quad (3.15)$$

上記演算により求められた時系列応答データ P_{dyn} を有効電力計測波形から除去することにより負荷の過渡特性を低減する処理を実現する。3.4.2 節で述べたように負荷脱落の発生時には動特性パラメータに推定誤差があるため、過渡特性の低減処理後の有効電力波形に時間とともに減衰する誤差分が残ることになる。

$$\hat{P}_s = P_s + \varepsilon_{pd} \quad (3.16)$$

ただし、 ε_{pd} : 低減処理後の動特性誤差分

3.4.4. 負荷脱落量の推定

処理後の波形 \hat{P}_s に対して静特性モデル (式(3.10)) のパラメータ推定を行い故障除去後の負荷量 P'_0 を求める。式(3.11)にしたがって、算出した P'_0 と初期負荷量 P_0 の差として負荷脱落量 ΔP_0 を計算する。

3.5. 故障実績データによる提案手法の有効性検証

3.5.1. 検証条件の設定

過去に計測された故障実績データを使用して提案手法の有効性を検証する。検証条件を以下のように設定する。

- (1) 3.3.1 節に示した故障ケースの中から、変電所 A で計測された故障実績データを対象とし（夏季，昼間）のデータを抽出
- (2) 抽出データを負荷脱落が観測された故障ケース（1 ケース）と負荷脱落のない故障ケース（13 ケース）に分類
- (3) 負荷脱落のない故障ケースを「過去に観測された実績ケース」として (Step 0) で使用
- (4) 負荷脱落が観測された故障ケースを「発生故障ケース」として (Step 1)～(Step 4) で使用

発生故障ケースの電圧，有効電力の実測波形をそれぞれ図 3-7 と図 3-8 に示す。図 3-8 から故障除去直後に過渡応動が約 200ms 続いていることが分かる。また，本ケースについて，故障除去後 500ms 分のデータを用いてあらかじめ分析した負荷モデルのパラメータを表 3.1 に示す。

表 3.1 発生故障ケースの負荷モデル・パラメータ

P_0 (p.u.)	0.317
P'_0 (p.u.)	0.304
負荷脱落量 (p.u.) (負荷脱落率)	0.013 (4.1 %)
K_d	0.0249
T_d	0.0167

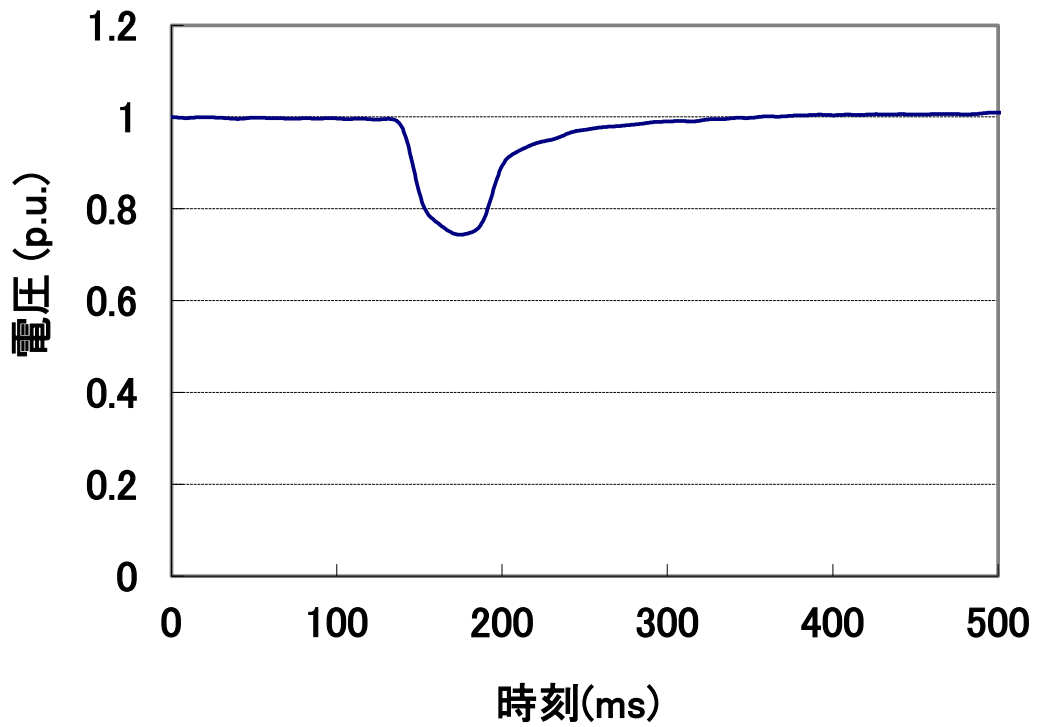


図 3-7 発生故障ケースにおける電圧計測波形

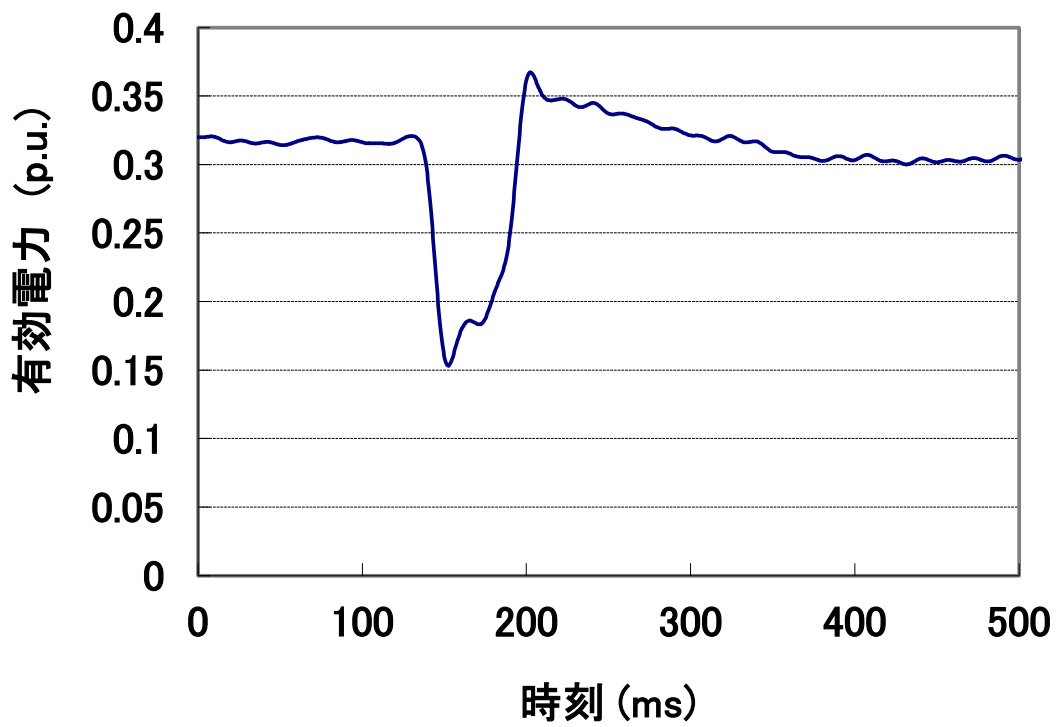


図 3-8 発生故障ケースにおける有効電力計測波形

3.5.2. 検証結果

提案手法の(Step 0)に基づき，動特性パラメータの特性モデル式を求めると以下のようなになる。

$$\begin{aligned} K_d &= 0.5882 \cdot \Delta V^2 + 0.044 \Delta V \\ T_d &= 0.5018 \cdot K_d + 0.0034 \end{aligned} \quad (3.17)$$

計測波形から求めた $\Delta V = 0.25$ を式(3.17)に代入して $K_d = 0.0478$ ， $T_d = 0.0274$ を得る。これらを用いて式(3.15)より故障除去後 100ms 間（計測可能時間）の電圧計測波形に沿って求めた動特性部分の時系列波形 P_{dyn} を図 3-9 に示す。

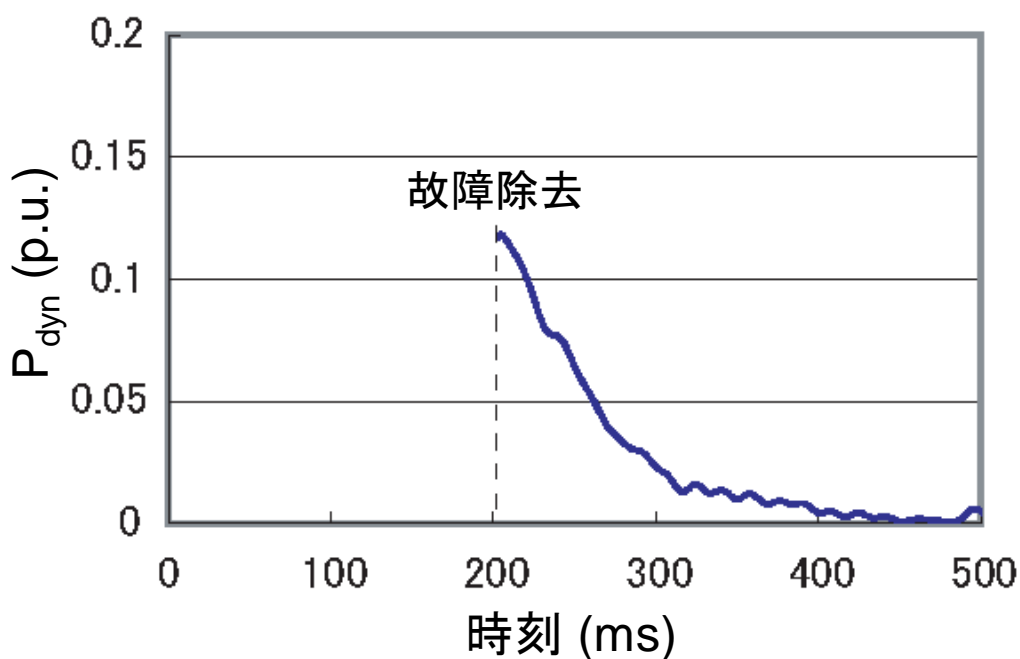


図 3-9 動特性部分の時系列応答 P_{dyn}

そして有効電力計測波形（図 3-8）から P_{dyn} を除去した故障除去後の波形を図 3-10 に示す。過渡特性分の低減処理後の波形 \hat{P}_s (100ms 分) に基づいて式(3.10) を用いてパラメータを推定すると故障後負荷量 $\hat{P}'_0 = 0.306$ となり、負荷脱落量は $\Delta P_0 = 0.011$ (負荷脱落率 3.5%) である。本結果より故障除去直後の短時間領域の計測波形から真値 ($P'_0 = 0.304$, 真値に対する誤差率 0.6% (P_0 ベース)) に近い良好な結果が得られたことがわかる。(このとき推定された電圧静特性係数は $K'_p = -0.81$, $K'_z = 1.81$ であった)

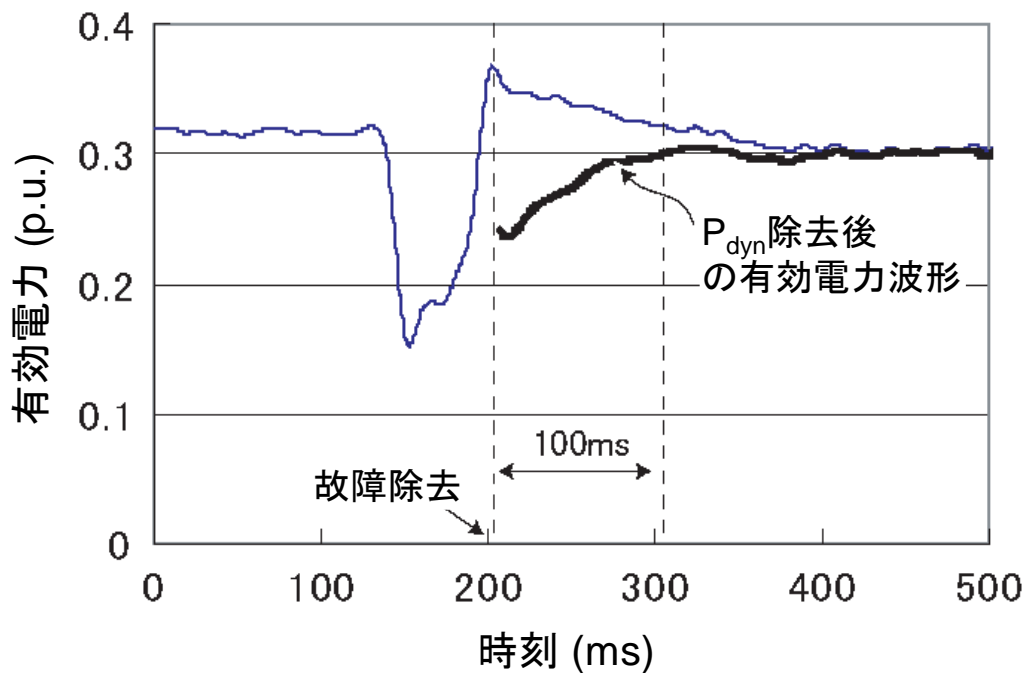


図 3-10 提案手法適用後の有効電力波形

比較データとして、図 3-7 と図 3-8 に示す観測原波形の故障除去直後 100ms 分のデータを直接用いて故障除去後負荷量を推定する。具体的には、負荷モデル式(3.7)の全パラメータを最小二乗法により推定する。このとき故障除去後の負荷量は $P'_0 = 0.338$ となり、負荷脱落量は $\Delta P_0 = -0.022$ である。故障除去直後の短時間領域の計測波形に基づいて単純なパラメータ推定を行う場合、過渡特性分は正確な負荷脱落量推定を阻害することがわかる。提案手法による上記結果と比較すると、提案手法により過渡特性分を低減した有効性が確認できる。

3.5.3. 他の実績データによる基本性能検証

計測地点や観測時期といった変電所計測データの分類条件の違いによる推定精度への影響を検証する。3.5.2 節で使用した検証データと異なる 4 つの計測点 (B, C, D, E) で観測時期の異なる実績データに対して、同様な検証条件を設定し負荷脱落発生ケースを用いて提案手法の基本性能を検証した。検証結果のまとめを表 3.2 に示す。そして計測点 B, C, D, E に対して有効電力計測波形から P_{dyn} を除去した故障除去後の波形をそれぞれ図 3-11～図 3-14 に示す。

検証した全てのケースにおいて、故障後負荷量の真値に対する誤差率は 1% 台であった。したがって、各計測点で季節や時間帯といった負荷構成に影響を与える周期性を考慮して実績データを分類し提案手法を適用すれば、良好な結果が得られることがわかる。

表 3.2 他の計測点における検証結果

計測点	ケース数 (計測条件)	P_0	P'_0	\hat{P}'_0	誤差率 (P_0 を基準)
B	10 ケース (夏季, 昼間)	0.220	0.178	0.174	- 1.8%
C	13 ケース (夏季, 夜間)	0.453	0.429	0.422	- 1.5 %
D	5 ケース (夏季以外, 昼間)	0.513	0.495	0.500	1.0%
E	14 ケース (夏季, 昼間)	0.163	0.158	0.156	- 1.2%

(P'_0 : 故障後負荷量の真値, \hat{P}'_0 : 推定した負荷量)

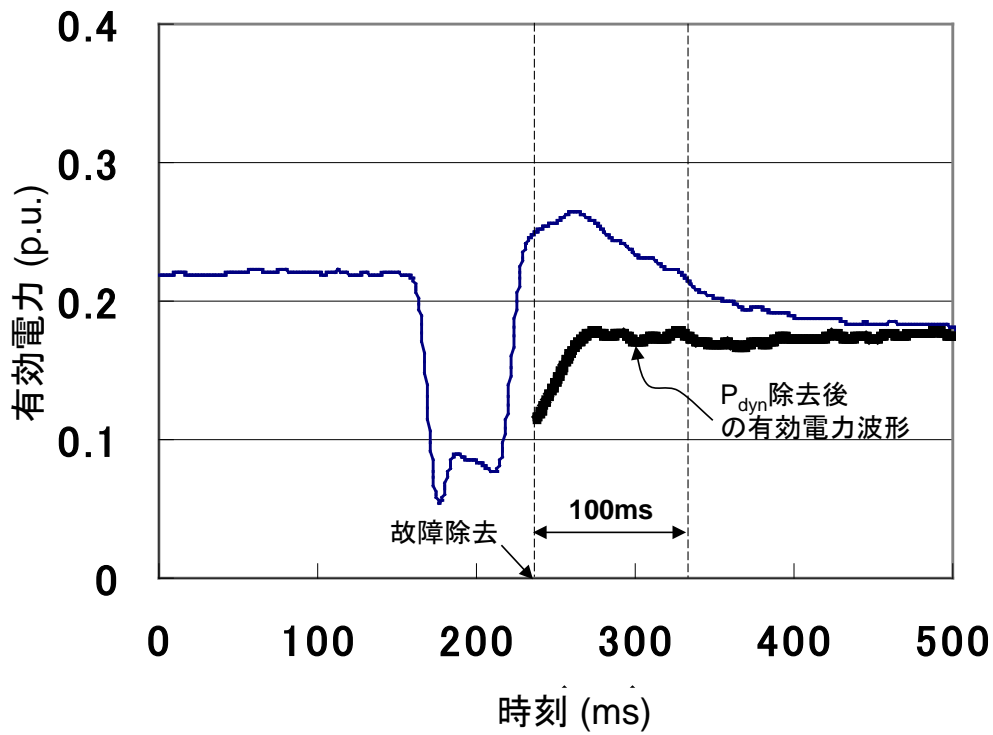


図 3-11 計測点 B における提案手法適用後の有効電力波形

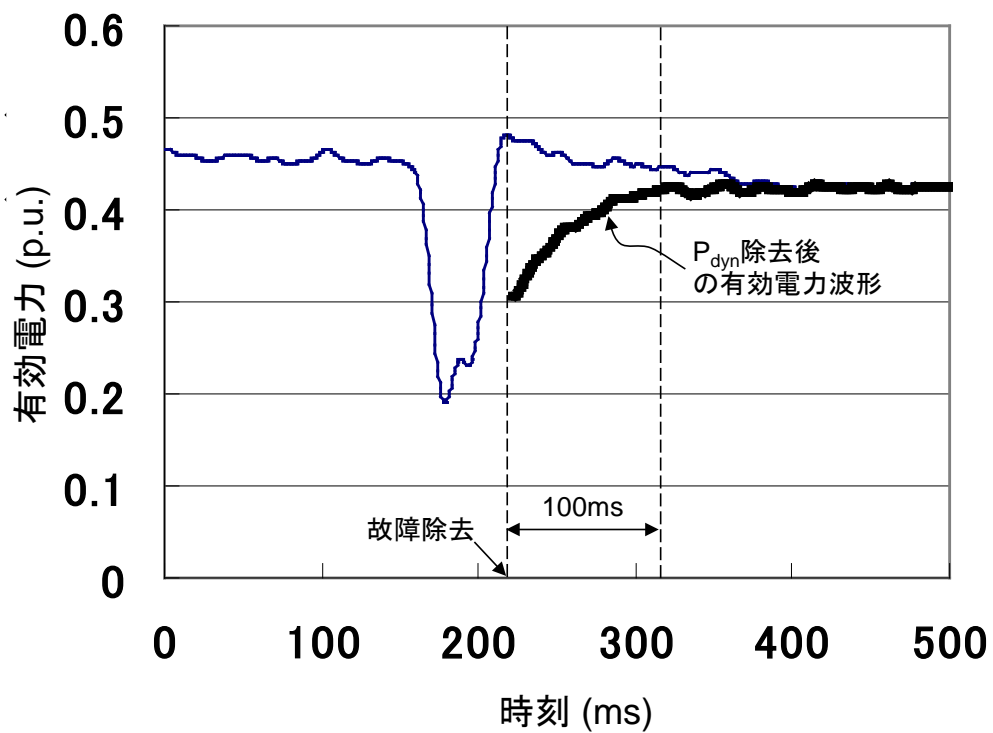


図 3-12 計測点 C における提案手法適用後の有効電力波形

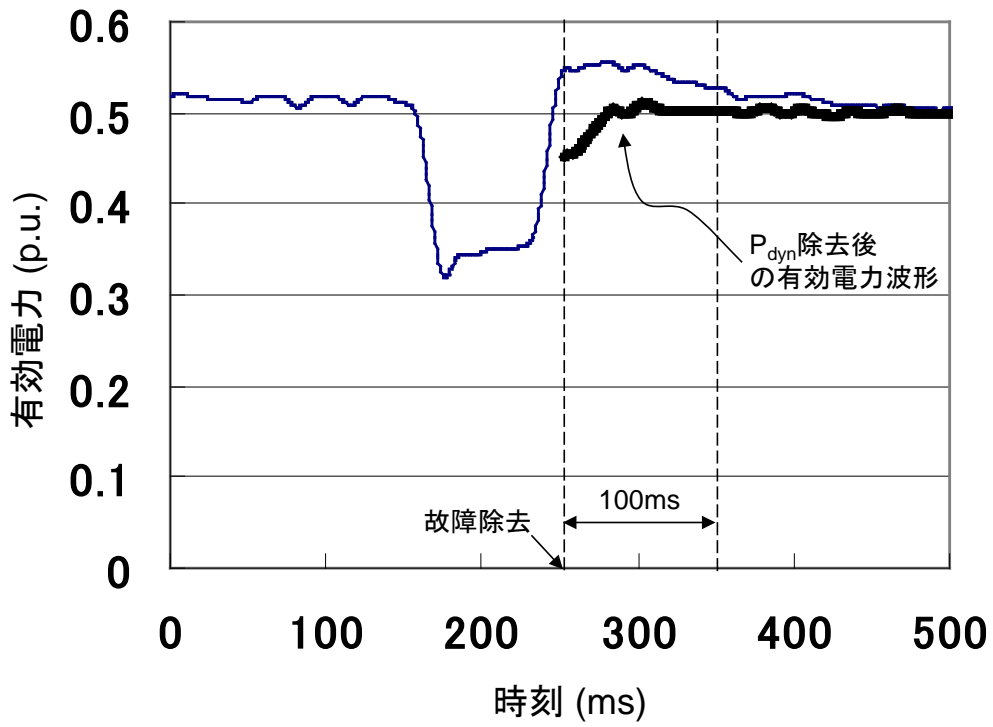


図 3-13 計測点 D における提案手法適用後の有効電力波形

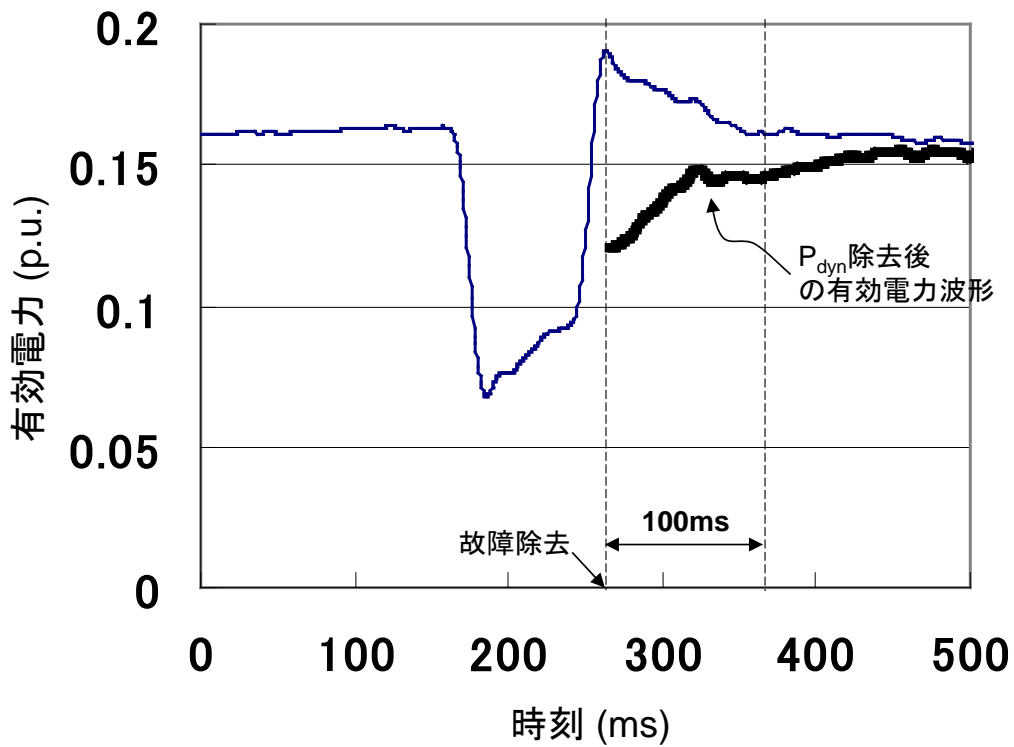


図 3-14 計測点 E における提案手法適用後の有効電力波形

3.6. 考察

提案方式では観測原波形から過渡特性分を低減することにより、故障除去後の定常状態の負荷量を計測可能時間（100ms）に近い時間領域で捉えることができるように原波形を整形する。これは図 3-10 から低減後の有効電力波形が計測期間中にほぼ故障除去後の定常状態に近い負荷量に達していることから確認できる。 K_d に推定誤差が明示的に含まれるが、計測点に固有の K_d - T_d 特性に基づいて K_d に有意に対応する T_d を使用することにより、提案方式では誤差量に関わらず過渡特性分を有効に低減するように作用し、原波形に比べて故障除去後の定常状態の負荷量を早い時間に観測する効果を与える。故障除去後の負荷量は式(3.10)(合成負荷の静特性分)において全体の比例係数として与えられるため、最小二乗法による推定時に負荷量推定の精度向上に有効に寄与すると考えられる。また、 K_d の誤差により過渡特性分の低減処理時に故障除去直後に回復する有効電力波形に誤差分が重畳する(式(3.16)参照)。式(3.10)では電圧静特性係数(K'_p , K'_z)は負荷量に比べて推定時の自由度が高いため、上述のように故障除去後の定常状態の負荷量を計測可能時間に近い時間領域で観測できるとき、定常状態の負荷量に合わせるように推定が行われ、回復波形に重畳した誤差分の影響から電圧静特性係数は真値と異なる結果となる。(本研究の主眼である負荷脱落量推定という点では、その推定結果はここでは特に問題ではない)

以上の検証結果から、計測実績データの分類条件を適切に設定し、分類実績ケースから推定した動特性モデル・パラメータを活用することにより故障除去後の有効電力計測波形から過渡特性分を低減する提案手法は、周波数安定化システムが観測利用可能な故障除去直後の短時間領域における負荷量の推定に有効性があることを確認した。なお、一般的なデジタルリレーの性能から推測すると、本手法のオンライン演算処理(提案処理フローの処理手順(Step 0)に相当するオフライン処理を除く)そのものに要する時間は10ms以内と考えられる。この推測値に基づいて安定化システムへの実装を考えた場合に、データ計測時間(100ms)を含め、伝送時間や制御実施時間などの最良の場合を考慮すると制御仕上がり時間200ms程度に収まると予想される。しかし、実適用を考えると、安定化システムの対象範囲に複数変電所が含まれる場合には、複数変電所からのデータ通信の伝送時間がネックになると考えられる。

3.7. 結言

本章では、周波数安定化システムにおける適用を想定して、過去に計測された故障実績データの特性分析情報を用いた新しい負荷脱落量推定方法について述べた。本章で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 提案手法のベースとなる、動特性を考慮した負荷モデルの動特性パラメータ (K_d , T_d) に着目して、主要変電所で計測された故障実績データを使用して特性を分析した。その結果、 K_d と T_d は強い線形相関を示すという特質を確認した。また、 K_d は故障発生時の電圧低下に依存することを理論的に考察し、特性モデル式の妥当性を実績データにより確認した。
- (2) ただし、故障実績データの特性を分析するには、季節や時間帯、計測地点といった条件にしたがいあらかじめ実績データを分類し取り扱う必要がある。
- (3) 過去に計測された故障実績データの特性分析による情報を活用することにより故障除去直後の短時間領域における電圧と有効電力計測波形に基づいて負荷脱落量をオンライン推定する手法を提案した。提案手法は、特性情報の利用により故障除去直後の負荷の過渡特性分を効率的に低減することを特徴とする。
- (4) 提案手法を複数の故障実績データを用いて検証を行った。その結果、故障除去直後 100ms 間の計測波形データに基づいて 1% 台の誤差 (故障前負荷量ベース) で負荷脱落量をオンライン推定することができ、提案手法の有効性を確認するとともに安定化システムでの適用可能性を示した。

今後の課題は、大幅電圧低下時の脱落量飽和による影響の更なる検証、計測点の下位に電源がある場合など故障除去後の周波数変動の影響分析が挙げられる。また、将来、広域にわたって大量に普及が見込まれる太陽光発電等の分散型電源には、電力システムにおける擾乱発生時に一斉解列や一斉出力低下継続により周波数安定性に大きな影響を与えないように故障時運転継続 (Fault Ride Through) 要件が定められている。この要件により、太陽光発電等の分散型電源を含む系統負荷は電圧復帰後から 0.5~1 秒後に 80% 以上の出力に復帰するが、制御仕上り時間 200ms を目指す周波数安定化システムに対する本提案手法に対

しては太陽光発電出力の低下中となるため推定精度低下の要因となる。今後、太陽光発電等の分散型電源に対する擾乱発生時の挙動を含む負荷脱落の実測データ収集・分析および推定精度向上対策の基本技術として太陽光発電のオンライン出力推定手法の確立が必要である。

参考文献

- [1] 系統脱調・事故波及防止リレー技術調査専門委員会：「系統脱調・事故波及防止リレー技術」，電気学会技術報告，第 801 号，2002
- [2] 福田朋悟，村元俊昭，押田秀治，合田忠弘，中村正則，成田利春，“事故中の負荷脱落を考慮した新型 SSC の開発と実用化”，電気学会電力技術研究会資料，PE-87，No.138-159，pp.131-139，1987
- [3] 谷口治人，植田清隆，加藤龍義，大野博孝，“緊急時周波数安定化制御”，電力技術研究会資料，PE-86，No.111-129，pp.51-60，1986
- [4] B.C. Lesieutre, P.W. Sauer and M.A. Pai, “Development and Comparative Study of Induction Machine Based Dynamic P,Q Load Models”, *IEEE Trans. Power Systems*, Vol.10, No.1, pp.182-191, February, 1995
- [5] W. Xu and Y. Mansour, “Voltage Stability Analysis Using Generic Dynamic Load Models”, *IEEE Trans. Power Systems*, Vol.9, No.1, pp.479-493, February, 1994
- [6] David J. Hill, ”Nonlinear Dynamic Mode Load Models with Recovery for Voltage Stability Studies”, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.8, No.1, pp.166-176, February, 1993
- [7] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, ”Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation”, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.10, No.3, pp.1302-1313, August, 1995
- [8] 尾上幸浩，斎藤宣俊，田畑康人，横井浩一，伊藤久徳，橋本博幸，吉備和仁，小和田靖之，“負荷脱落量推定手法に関する一検討”，平成 14 年電気学会全国大会，Vol.6，pp.464-465，2002
- [9] P. Kundur : *Power System Stability and Control*, Mcgraw-Hill, 1993

4. 大規模計画問題に対する高速・安定な連続系最適化手法

4.1. 緒言

静的な供給信頼性は、系統構成要素の計画停止や比較的発生頻度の高い故障停止を前提として、需要を満たすために必要な電力を複数発電機の合計出力により安定に供給できる能力である。需給計画は、想定需要に対して電力の安定供給と発電コストの低減、すなわち、静的な供給信頼性と発電機の運用経済性の両立を目的として、発電機の運用計画を立案する業務である。需給計画には、翌日・週間・月間・年間を計画対象期間として、与えられた電源構成の中で供給信頼性を満たした上で最経済となるよう火力・水力・原子力・電力融通などの各供給力を組み合わせて運用計画を作成し需給バランスを把握する「短中期計画」と、10年程度を対象期間として将来電源構成で供給信頼性を確保しトータル経費が最小となるような供給力の見通しを明らかにする「長期計画」がある。特に、年間～翌日までの各需給計画は、年間計画の結果を月間計画へ、月間計画の結果を週間計画へというように、翌日計画まで順次引き継ぎながら、同じ電源構成でそれぞれの対象期間で考慮すべき制約条件を反映した計画を立案して、連携して供給信頼性を確実に確保した当日需給運用を実現する。

これらの需給計画は、運用制約条件のもとでの燃料コスト最小化を目的とする最適化問題として定式化できる。需給計画問題の構成は、各発電機の起動時間・停止時間を決定する起動停止計画（Unit Commitment）の離散系最適化問題（Discrete Optimization Problem）と、負荷に対して運転している発電機の出力値を決定する経済負荷配分の連続系最適化問題（Continuous Optimization Problem）が組み合わさった混合整数計画問題（Mixed Integer Programming）となっている。離散系最適化問題に対する求解アルゴリズムには様々な手法の適用が検討されている^[1]。一方、経済負荷配分問題については、単一時刻断面の需給バランス制約を満足する経済的な出力配分を実現する等増分燃料費法といった簡便な手法が提案されているが、内点法（Interior Point Method）に代表される数値最適化手法が適用されて、複数時刻に亘る複雑な制約（たとえば、発電機の燃料消費制

約など)を持つ出力配分問題を取り扱うようになってきている。経済負荷配分の問題規模を決定する制御変数の総数は、通常、計画対象の発電機に関わる出力や予備力といった決定すべき変数の数と、計画対象期間を計画単位時間で割ったコマ数との積により与えられる。電力自由化の流れにより、新電力は30分同時同量の需給運用が求められ、また電力取引の前日スポット市場は翌日に受け渡す電気を30分単位で取り扱っている。電力需給運用の環境変化から、従来は計画単位時間を1時間としていたところを30分とすることも多くなっており、発電機数が多い場合には週間需給計画の段階から問題規模が大きくなるにしがたが、最適化計算の不安定化と演算時間の増大が観測されるようになる。

近年の計算機能力の飛躍的な増大ならびに最適化技術の理論面・実装面における発展に伴い、最適化技術を適用して業務の合理化・効率化を図る動きが顕著になっている。その適用分野は、上述の電力需給計画などの電力システムをはじめとする各種工業システムの計画・設計・運用・制御といった幅広い領域に及び、さらに金融工学への適用、情報公開・規制緩和に伴う公平性・公正性の立証ツールへの適用と、新たな展開も見せている^{[2][3]}。しかし、実用システムへの最適化技術の適用に際しては、対象問題の規模に起因する「計算の不安定化」や「演算時間の増大」が大きな課題となっている。

本研究では、以上のような背景から、変数が連続値のみで構成される連続系最適化問題のうち、実用面から最も汎用性の高い一般二次計画問題 (General Quadratic Programming Problem) を対象として、大規模問題に対しても安定・高速な演算アルゴリズムの提案を行う。提案手法では、実用性の観点から現在最も有力な最適化手法と考えられている内点法(Interior-Point Method)と有効制約法(Active-Set Method)とを求解アルゴリズムの中で緊密に融合し、各手法の難点を補いそれぞれの特長を最大限に生かすことにより、求解の安定性と高速性の向上とを達成している。

内点法^[6]は問題領域の内部を經由して問題の解に収束する探索のための点列を生成する方法の総称であり、1984年にN. Karmarkarにより提案された線形計画問題に対する射影変換法^[4] (Projection Transformation Method) に端を発している。その後、非線形計画問題への適用が進められ、さまざまな研究が国

内外で行われている。点列の生成方法から見ると、アフィン変換法、中心パス追跡法、ポテンシャル減少法、予測子修正子法などがある。有効制約法^[5]は最適解で活性となる変数の上下限制約をあらかじめ仮定した解を求め、仮定した全変数が最適性条件を満足するまで変数の仮定を見直す手法である。線形計画問題に対しては単体法として広く知られている。内点法と有効制約法を組み合わせる研究も行われており、両者の特長を生かして効率的な求解を追求する方式として、それぞれの方式を互いに独立に直列に組み合わせるクロスオーバーがある^[3]。これは、内点法により得られた近似解を用いて活性な制約式の組を取り出し、これを有効制約法の初期解として与えることにより、効率的に最適解を求めようとする演算方式である。しかし、この内点法と有効制約法の切替え戦略は単純で、広範な問題に対して有効な効率的な手法とは言えない。また、内点法が良い近似解を初期探索点として利用できない弱点の改善を目指して、外点を点列として許容する外点法（Exterior Point Method）の研究も行われている^[6]。

本章の構成は以下の通りである。4.2 節では、対象とする最適化問題を定義し、その有力な解法として内点法と有効制約法について概説する。次に 4.3 節では、内点法と有効制約法とを融合した求解アルゴリズムを提案する。4.4 節では、公開されている著名なベンチマーク問題 136 問を使用して提案手法の有効性について論ずる。また、4.5 節では、電力需給計画で使用される経済負荷配分問題（ELD : Economic Load Dispatching）への適用について述べる。

4.2. 一般二次計画問題と最適化手法

本節では，一般二次計画問題の標準形式について説明した後，実用性の観点から現在最も有力な最適化手法として知られる内点法と有効制約法を概説する。

4.2.1. 一般二次計画問題

一般二次計画問題の標準形式は式(4.1)のように定式化される。なお，関数 f と h は凸関数であり，変数ならびに係数の右肩の \mathbf{T} はベクトルや行列の転置を表す。下記の定式化には関数型不等式制約が含まれないが，スラック変数 (slack variable) を導入することにより，不等式制約は等式制約とスラック変数の上下限制約に変換可能であり，この定式化は一般性を失わない。

$$\left. \begin{array}{l} \text{目的} \quad f(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{b}^T \mathbf{x} \quad \rightarrow \text{最小化} \\ \text{制約条件} \quad h_l(\mathbf{x}) = 0 \quad (l = 1, \dots, M) \\ \quad \quad \quad (h_l(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{C}_l \mathbf{x} + \mathbf{d}_l^T \mathbf{x} + e_l) \\ \quad \quad \quad x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} \quad (i = 1, \dots, N) \end{array} \right\} \quad (4.1)$$

ただし，

\mathbf{x} : 連続変数 x_i を要素とする列ベクトル $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T$ ，

x_i^{\min}, x_i^{\max} : 変数 x_i の下限値と上限値，

\mathbf{A}, \mathbf{C}_l : 目的関数と等式制約の二次の係数を表す $N \times N$ 半正定値実対称行列，

\mathbf{b}, \mathbf{d}_l : 目的関数と等式制約の一次の係数を表す列ベクトル，

e_l : 等式制約の定数項を表すスカラ

さらに上式において変数の原点シフトを行い，各変数の下限値を 0 とすると共に，スラック変数を導入して上限制約を等式制約で表現することにより，対象問題は一般性を失うことなく下記となる。本研究では，以下，この形式の問題を扱う。なお，以下で用いる数値実験用プログラムの実装にあたっては， $\omega = 1$

とすると共に、 f, h_i を構成する要素の係数の絶対値の最大値が1となるよう規格化を行っている。

$$\left. \begin{array}{l}
 \text{目的 } f(\mathbf{x}) \rightarrow \text{最小化} \\
 \text{制約条件 } h_i(\mathbf{x}) = 0 \\
 \quad x_i + s_i - \omega_i = 0 \\
 \quad x_i \geq 0, \quad s_i \geq 0
 \end{array} \right\} \quad (4.2)$$

ただし、

s_i : x_i の上限制約を扱うために導入するスラック変数、

ω_i : x_i の上限値を示す正の定数

4.2.2. 内点法

内点法は、変数が常に実行可能領域の内部に留まりながら、目的関数が減少する方向へ向かう探索点を繰り返し生成して最適解を求める手法である^[6]。1984年にN. Karmarkarが発表した射影変換法を契機に、内点法は世界中で広く研究が行われ、線形計画分野では単体法を凌ぐ大規模問題を高速に求解する手法として知られている。線形計画分野の成功をもとに、非線形計画分野へ適用範囲を広げる研究が進んでおり、現在ではさまざまなバリエーションが提案されている。その代表的なものとして、上述の射影変換法の他に、アフィン変換法、ポテンシャル減少法、中心パス追跡法、予測子修正子法などがある。

内点法は、問題の規模に関わらず数十回の収束演算で解が得られることから、大規模問題に対する最も実用的な解法の一つとなっている。一方、最適解が変数の上下限制約に近い場合に演算処理が不安定になる場合がある、変数が上下限値を厳密に取ることができないために解の精度が低下する懸念がある、最適解の良い近似解を初期探索点として利用(warm start)できない、等の課題を残している。

4.2.3. 有効制約法

有効制約法は、式(4.2)の最適解で活性 (active, 不等式において等号条件が成立すること) となる変数の上下限制約をあらかじめ有効制約 (active constraint) と仮定して解を求め、活性と仮定した全ての変数が最適性条件 (全てのラグランジュ乗数が非負) を満たすまで活性となる変数の仮定の見直しを反復する手法である¹⁴⁾。線形計画問題に対する有効制約法は単体法としてよく知られている。非線形計画問題に対しては、逐次二次計画法 (SQP : Sequential Quadratic Programming method) における探索途中の局所最適化問題を解くために利用されることが多い。

有効制約法は、対象問題に対してわずかに条件の異なる類似問題の最適解が求まっている場合など、かなり正確に活性となる制約の予測が可能であるときに有効な手法であり、類似問題の解を初期値として利用 (warm start) することにより、高速に最適解を求めることが可能となる場合が多い。なお、有効制約法では、変数は上下限值を取ることができるため高精度な解が期待できる。一方、上下限值を取る変数の選択によっては求解時に退化 (degeneracy) が発生し選択の巡回 (cycling) を引き起こす可能性があり、最適解への到達に時間を要する場合がある。

4.3. 提案手法

本節では、一般二次計画問題を対象として、大規模問題に対しても安定・高速な演算アルゴリズムの提案を行う。

4.3.1. 提案手法の概要

上述したように内点法ならびに有効制約法にはそれぞれの求解戦略に伴う固有の特長と課題がある。以下では、上記の認識に基づき、それぞれの手法の特長を生かし、大規模な連続系最適化問題に対する計算の不安定化と演算時間の増大との克服を目指す内点法に有効制約法の求解戦略を取り入れた「有効制約に関する推定機構を持つ内点法」を提案する。提案手法の主な基本戦略は以下の通りである。

- (1) 内点法の基本アルゴリズムを採用する。
- (2) 内点法の繰返し演算ステップで生成される探索点で上下限值に近づく変数があれば、これを活性と推定して当該変数を上下限值に固定して、次の探索点を生成するための修正対象の変数から除外する。
- (3) 固定した変数に関しては、対応するラグランジュ乗数が満足すべき条件を満たさなくなった場合に、固定を解除し内点（不等式制約を満たす領域）に戻る。

上記の構造を持つ提案手法は次のような特徴を持つ。

- 変数の固定化処理により、内点法の持つ演算処理の不安定性が回避され、解精度の向上が見込める。
- 従来の内点法と同様に、演算開始時に活性となる変数を推定する必要がない。
- 内点法の繰返し演算ステップの中に、制約が活性となる変数を推定する機構を組込むことにより、退化に起因する選択の巡回の回避が見込める。
- 変数の固定化が進むと、修正対象の変数が減少し、繰返し演算処理の各ステップにおける演算量が減少すると共に、計算誤差も減少する。

4.3.2. アルゴリズム詳細

(1) 内点法における最適性条件の扱い

式(4.2)に対する最適性必要条件を表す KKT 条件(Karush-Kuhn-Tucker condition)を求め整理すると式(4.3)となり、これを満足する解が最適解となる。第 1 番目の式は最適解における停留条件である。第 4, 第 5 番目の式は不等式制約の活性・不活性と対応するラグランジュ乗数との関係を表す相補性条件(complementarity condition)である。相補性条件により、不等式制約が不活性化変数に対するラグランジュ乗数は 0, 不等式制約が活性化変数に対するラグランジュ乗数は非負となる。これは連続系最適化問題における組合せ最適化的な要求を表している。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x_i} + \left\{ \sum_{l=1}^M \frac{\partial h_l}{\partial x_i} \mu_l \right\} - \lambda_{x_i} + \lambda_{s_i} &= 0 \\ h_l(\mathbf{x}) &= 0 \\ x_i + s_i - \omega_i &= 0 \\ x_i \lambda_{x_i} &= 0 \\ s_i \lambda_{s_i} &= 0 \\ x_i \geq 0, \quad s_i \geq 0, \quad \lambda_{x_i} \geq 0, \quad \lambda_{s_i} \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

ただし,

μ_l : 等式制約に対するラグランジュ乗数,

$\lambda_{x_i}, \lambda_{s_i}$: 変数 x_i, s_i の下限制約に対するラグランジュ乗数

一般的に内点法では、順次 0 に近付ける正のパラメータ α (バリアパラメータ) を導入して式(4.4)に示すように相補性条件を緩和し、この非線形連立方程式を解くことにより探索方向を求め、この探索方向を用いて内点に留まるよう探索点の更新を行うことを繰り返すことにより、最終的に KKT 条件を満たす最適解へと誘導して行く。

$$\left. \begin{aligned}
& \frac{\partial f}{\partial x_i} + \left\{ \sum_{l=1}^M \frac{\partial h_l}{\partial x_i} \mu_l \right\} - \lambda_{x_i} + \lambda_{s_i} = 0 \\
& h_l(\mathbf{x}) = 0 \\
& x_i + s_i - \omega_i = 0 \\
& x_i \lambda_{x_i} = \alpha \\
& s_i \lambda_{s_i} = \alpha \\
& x_i > 0, \quad s_i > 0, \quad \lambda_{x_i} > 0, \quad \lambda_{s_i} > 0
\end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

(2) 提案手法における最適性条件の扱い

提案手法では、非線形計画の分野でよく用いられる障壁関数を評価関数に導入して最適化問題を定式化する (式(4.5))。なお、式(4.5)のパラメータ α は導入する対数障壁関数の重みであり、 α を順次小さくして行くことにより、原問題を解く。

$$\left. \begin{aligned}
& \text{目的} \quad f(\mathbf{x}) - \alpha \sum_{i \in I_{NA}} \log x_i - \alpha \sum_{i \in I_{NA}} \log s_i \rightarrow \text{最小化} \\
& \text{制約条件} \quad h_l(\mathbf{x}) = 0 \\
& \quad \quad \quad x_i + s_i - \omega_i = 0 \\
& \quad \quad \quad x_i > 0, \quad s_i > 0
\end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

ただし、

α : 正の重み付けパラメータ、

$\log x_i, \log s_i$: x_i, s_i が下限値に近付くと負の無限大に発散する対数障壁関数

障壁関数の導入により、最適解において上下限制約が活性となる変数はなくなるため、上式(4.5)の KKT 条件は式(4.6)となる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x_i} + \left\{ \sum_{l=1}^M \frac{\partial h_l}{\partial x_i} \mu_l \right\} - \frac{\alpha}{x_i} + \frac{\alpha}{s_i} &= 0 \\ h_l(\mathbf{x}) &= 0 \\ x_i + s_i - \omega_i &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

式(4.6)は、式(4.4)に比べて相補性条件ならびに不等式条件がなく、連立方程式としての問題サイズが小さい。

ここで式(4.4)と式(4.6)の関係を考えてみる。式(4.4)において緩和した相補性条件： $x_i \lambda_{xi} = \alpha$, $s_i \lambda_{si} = \alpha$ ($\alpha > 0$) より、

$$\lambda_{xi} = \alpha/x_i, \quad \lambda_{si} = \alpha/s_i \quad (x_i > 0, s_i > 0) \quad (4.7)$$

となり、これを式(4.4)の 1 番目の式に代入することにより、式(4.4)は式(4.6)と同一となる。つまり、式(4.4)のバリエーションパラメータは式(4.6)の重みパラメータに相当する役割を担っており、式(4.6)の解は $\alpha \rightarrow 0$ のとき式(4.2)の最適解に収束する。

(3) 探索方向と探索点の更新

ニュートン法を適用して、式(4.6)の KKT 条件を満たす解を求める。ある探索点 $(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}, \mathbf{s})$ における式(4.6)の各式の残差 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ はそれぞれ下記となる。ここで $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ はそれぞれ e_{1i}, e_{2l}, e_{3i} を要素とする列ベクトルである。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x_i} + \left\{ \sum_{l=1}^M \frac{\partial h_l}{\partial x_i} \mu_l \right\} - \frac{\alpha}{x_i} + \frac{\alpha}{s_i} &= e_{1i} \\ h_l(\mathbf{x}) &= e_{2l} \\ x_i + s_i - \omega_i &= e_{3i} \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

よって、提案手法の繰り返し演算の各ステップにおいて、変数の修正量 $(\Delta \mathbf{x}, \Delta \boldsymbol{\mu}, \Delta \mathbf{s})^T$ は式(4.9)に示す修正方程式を解くことにより求まることとなる。

$$\left[\begin{array}{ccc|c} \nabla^2 f + \alpha \mathbf{X}^{-2} & \nabla h_l & -\alpha \mathbf{S}^{-2} & \Delta \mathbf{x} \\ + \sum \mu_l \nabla^2 h_l & & & \dots \\ \hline \nabla h_l^T & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \Delta \boldsymbol{\mu} \\ \hline \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{1} & \Delta \mathbf{s} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \boldsymbol{\mu} \\ \Delta \mathbf{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{e}_1 \\ -\mathbf{e}_2 \\ -\mathbf{e}_3 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

ただし、

∇, ∇^2 : x に関するスカラ関数の勾配ベクトルとヘッセ行列を表す演算子、

$\boldsymbol{\mu}$: 等式制約に対するラグランジュ乗数 μ_l を要素とする列ベクトル、

\mathbf{s} : スラック変数 s を要素とする列ベクトル、

$\mathbf{X}, \mathbf{X}^{-2}$: x_i, x_i^{-2} を対角要素とする対角行列、

$\mathbf{S}, \mathbf{S}^{-2}$: s_i, s_i^{-2} を対角要素とする対角行列、

$\mathbf{1}$: 単位行列、

$\mathbf{0}$: 零行列

さらに、 $\mathbf{e}_3 = \mathbf{0}$ が成立するように x_i, s_i を初期設定すると共に $\Delta \mathbf{s} = -\Delta \mathbf{x}$ とすることにより、式(4.9)の $\Delta \mathbf{s}$ は消去可能となり、修正方程式は式(4.10)と簡略化される。

$$\left[\begin{array}{c|c} \nabla^2 f + \sum \mu_l \nabla^2 h_l & \nabla h_l \\ + \alpha \mathbf{X}^{-2} + \alpha \mathbf{S}^{-2} & \\ \hline \nabla h_l^T & \mathbf{0} \end{array} \right] \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \dots \\ \Delta \boldsymbol{\mu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{e}_1 \\ \dots \\ -\mathbf{e}_2 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

現在の探索点における変数を ${}_k x_i, {}_k \boldsymbol{\mu}_l, {}_k s_i$ とすると、次の探索点における変数 ${}_{k+1} x_i, {}_{k+1} \boldsymbol{\mu}_l, {}_{k+1} s_i$ は次式で与えられる。ただし、左下の添字 k は演算ステップの反復回数を表す。

$$\left. \begin{array}{l} {}_{k+1} x_i = {}_k x_i + {}_k \beta_i \cdot \Delta x_i \\ {}_{k+1} \boldsymbol{\mu}_l = {}_k \boldsymbol{\mu}_l + \Delta \boldsymbol{\mu}_l \\ {}_{k+1} s_i = {}_k s_i + {}_k \beta_i \cdot \Delta s_i \end{array} \right\} \quad (4.11)$$

ただし、 β_i : 変数 x_i, s_i の修正量 $\Delta x_i, \Delta s_i$ (上述の通り $\Delta x_i = -\Delta s_i$ である) に対する修正倍率 ($\beta_i \in (0, 1]$)

上記の修正倍率 ${}_k \beta_i$ は次式で設定する。

$${}_k \beta_i = \min \left\{ 1, \max \left\{ -\gamma \frac{{}_k x_i}{\Delta x_i}, -\gamma \frac{{}_k s_i}{\Delta s_i} \right\} \right\} \quad (4.12)$$

ただし、

γ : 次の探索点における変数 $x_i,$

s_i を内点に留めるためのパラメータ ($\gamma \in (0, 1)$)

一般的な内点法では、全ての変数ならびに全ての不等式制約に関するラグランジュ乗数の最小の修正倍率を、共通の修正倍率として採用し、中心パス (center path) を正確に追跡しようとするものが多い。これに対して、提案手法では、各変数 x_i , s_i に対して内点に留まる範囲で最大の修正倍率を個別に与えて実用上の計算効率化を図っている。

(4) 変数の固定／解除処理

提案手法では、以下に記述する「制約が活性な変数 (有効制約) の推定機構」を導入することにより、各演算ステップにおいて、変数の固定／解除処理を行っている。以下の説明では、変数 x_i, s_i の添字 i の全体集合を I とし、演算ステップの途中で x_i, s_i のいずれかが下限値 0 に固定される場合 (変数の上下限制約が活性な場合)、添字 i は集合 I_A に所属し、その他の場合には、添字 i は集合 I_{NA} に所属するとする。 $I = I_A \cup I_{NA}$, $I_A \cap I_{NA} = \emptyset$ (空集合) である。

演算の初期設定として I_A を空集合に、 I_{NA} を I と等しくする。各演算ステップにおいて x_i (s_i) が閾値 θ を越えて下限値に近付くとき、 x_i (s_i) を下限値 0 に固定し、同時に s_i (x_i) を 1 に固定した上で、当該変数の添字 i を I_{NA} から除外し I_A に加える。一方、固定された変数に対して式(4.13)の値 ξ を使用した下記判定条件により固定の解除を行うと共に、当該変数の添字 i を I_A から除外し I_{NA} に加える。

- x_i が下限値 0 に固定されており $\xi_i < 0$ のとき、 x_i の固定を解除し内点 (閾値 θ) に戻すと共に、 s_i の固定も解除し $1 - \theta$ に戻す
- s_i が下限値 0 に固定されており $\xi_i > 0$ のとき、 s_i の固定を解除し内点 (閾値 θ) に戻すと共に、 x_i の固定も解除し $1 - \theta$ に戻す

$$\xi_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} + \left\{ \sum_{l=1}^M \frac{\partial h_l}{\partial x_i} \mu_l \right\} \quad (4.13)$$

ここで ξ の意味を説明する。式(4.3)の第1番目の式でラグランジュ乗数を右辺に移項すると下記となる。

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} + \left\{ \sum_{l=1}^M \frac{\partial h_l}{\partial x_i} \mu_l \right\} = \lambda_{xi} - \lambda_{si} \quad (4.14)$$

変数の上下限制約が同時に活性になることはなく、 λ_{xi} と λ_{si} が同時に非0にならないことに注目すると、上式の左辺は λ_{xi} または $-\lambda_{si}$ と一致することが分かる。つまり ξ_i は、各演算ステップにおける変数の下限制約に対するラグランジュ乗数 λ_{xi} 、 $-\lambda_{si}$ の近似値を表しており、 $\alpha \rightarrow 0$ のとき、正しい λ_{xi} 、 $-\lambda_{si}$ に収束する。提案手法では、こうして求まるラグランジュ乗数が、制約が活性な変数に関して非負でなければならない性質(式(4.3)参照)を利用して、これが満たされない場合に、下限値に固定された変数の解除を行う。なお、前述の式(4.10)～式(4.12)に示した変数の更新は I_{NA} に所属する変数のみを対象とする。

式(4.10)から分かるように、最適解を探索する過程で変数 x_i または s_i が0に近付くとき、左辺の行列の対角項には $\alpha \mathbf{X}^{-2}$ または $\alpha \mathbf{S}^{-2}$ に起因する非常に大きな値が現れ、一次方程式の性質が悪化することから、修正量の演算に大きな誤差が生じ、計算の不安定化を引き起こすこととなる。変数の固定処理は、その要因となる変数を演算処理対象から除外するため、計算の安定化に寄与することとなる。提案手法による計算の安定化効果については4.4.4節で検証する。

(5) 終了条件

提案手法の繰り返し演算は、下記の終了条件の全てが満たされたとき正常終了となる。

- 重み付けパラメータ α が十分小さい値となり式(4.15)を満たす。なお、 $\varepsilon_1 (> 0)$ は収束判定閾値である。

$$\alpha \leq \varepsilon_1 \quad (4.15)$$

- 全ての変数 x_i , s_i について変数の固定／解除の判断が変化しない。
- 固定されていない変数 x_i , s_i に対応する全ての i ($i \in I_{NA}$) について式(4.16)を満たす。 $\varepsilon_2 (> 0)$ は収束判定閾値である。

$$\left| \frac{\partial f}{\partial x_i} + \left\{ \sum_{l=1}^M \frac{\partial h_l}{\partial x_i} \mu_l \right\} - \frac{\alpha}{x_i} + \frac{\alpha}{s_i} \right| \leq \varepsilon_2 \quad (4.16)$$

ここで、記号 $| \quad |$ は絶対値を表す。

- 全ての等式制約 h_l について式(4.17)を満たす。

$$|h_l(\mathbf{x})| \leq \varepsilon_2 \quad (4.17)$$

(6) 求解手順

提案手法では、一般的な内点法と同様に、重み付けパラメータ α を初期値から十分に小さくなるまで減少させながら、探索点 $(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}, \mathbf{s})$ を最適解に収束させて行く。ここでは、提案アルゴリズムの本質的な有効性を明らかにするため、 α を線形比例で減少させる単純なスケジューリングを採用する。

$${}_k \alpha = {}_0 \alpha \cdot \delta^k \quad (4.18)$$

ただし,

${}_0\alpha$: α の初期値, δ : α のスケジューリング・パラメータ ($0 < \delta < 1$)

提案手法の具体的な求解手順を以下に示す。実用上の観点から演算の繰返し回数に上限値 K^{\max} を設け, 上限値を超えると未収束 (異常終了) とする。

Step1 (初期化处理)

探索点の初期値 (${}_0\mathbf{x}, {}_0\boldsymbol{\mu}, {}_0\mathbf{s}$) と ${}_0\alpha$ を与え, $k = 0$ とする。

Step2 (解除処理)

固定された変数 x_i, s_i ($i \in I_A$) について, ξ (式(4.13)) を使用して固定解除処理を行う。

Step3 (終了判定)

終了条件を満たすとき, 演算を終了する。満たさないとき, Step4 に移動する。

Step4 (探索方向の計算)

探索点 (${}_k\mathbf{x}, {}_k\boldsymbol{\mu}, {}_k\mathbf{s}$) において, 固定されていない変数 x_i, s_i ($i \in I_{NA}$) に関する探索方向 ($\Delta\mathbf{x}, \Delta\boldsymbol{\mu}, \Delta\mathbf{s}$)^T を求める (式(4.10))。

Step5 (探索点の更新)

探索方向に沿って固定されていない変数 x_i, s_i ($i \in I_{NA}$) に対する修正倍率を求め (式(4.12)), 次の探索点 (${}_{k+1}\mathbf{x}, {}_{k+1}\boldsymbol{\mu}, {}_{k+1}\mathbf{s}$) を求める (式(4.11))。

Step6 (固定処理)

探索点 (${}_{k+1}\mathbf{x}, {}_{k+1}\boldsymbol{\mu}, {}_{k+1}\mathbf{s}$) の変数 x_i, s_i のうち, 固定されていない変数 ($i \in I_{NA}$) で閾値 θ を越えて下限値に近付いているものがあれば, 固定処理を行う。

Step7 (パラメータ更新)

$k = k + 1$ とし, α を更新する (式(4.18))。

$k \leq K^{\max}$ であれば Step2 へ戻る。

$k > K^{\max}$ であれば未収束として演算を終了する。

4.4. ベンチマーク問題による有効性の検証

4.4.1. ベンチマーク問題

ここでは、最適化ソフトウェアのテスト環境として web サイトで入手可能な標準ベンチマーク問題集 CUTEr (Constrained and Unconstrained Testing Environment, revisited) ^{[7][8]}を使用して数値実験を行い、提案手法の性能を検証する。CUTEr 問題は線形計画問題ならびに非線形計画問題を対象とし、小規模から大規模に至る様々なサイズの問題を含み、問題の難易度に関しても一般的な問題から難度の高い問題までを含んでいる。

実験では、CUTEr 問題の凸二次計画問題 138 問から、同一問題と考えられる 2 つの問題 (問題 S268 と問題 HS268) のうちの問題 S268 を、また実行可能解がないと判断した問題 QPILOTNO を、取り除いた 136 問を使用した。対象問題は全て目的関数が二次式、制約式が一次式となっている。また、変数の数は最小 2 ~ 最大 9 万個、制約式の数は最小 0 ~ 最大 9 万個の範囲に及んでいる。

以下の検証では、原問題の変数の数を基準としてサイズ別に次の 5 グループに CUTEr 問題を分類して評価する。

- Group1 (29 問) : 変数 100 以下
- Group2 (21 問) : 変数 101 以上, 400 以下
- Group3 (22 問) : 変数 401 以上, 1,000 以下
- Group4 (39 問) : 変数 1,001 以上, 10,000 以下
- Group5 (25 問) : 変数 10,001 以上

4.4.2. 検証条件および実験環境

(1) 比較対象手法

提案手法の有効性を検証するために、提案手法以外に 2 つの手法を実装して比較評価を行った。以下では各手法を次のように呼ぶこととする。

- Method1 : 式(4.4)の定式化に基づく内点法
- Method2 : 提案手法 (式(4.6)の定式化) で変数の固定/解除処理なし
- Method3 : 提案手法

Method1 は、式(4.4)の定式化に基づき、4.3.2(6)節の手順から固定/解除処理に関する演算ステップ (Step2 ならびに Step6) を除いた求解手順を採用し、実行可能領域内での探索点 $(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}, \mathbf{s}, \boldsymbol{\lambda}_x, \boldsymbol{\lambda}_s)$ の更新を繰り返しながら最適解を求める収束演算として実装した。

(2) 初期値とパラメータの設定

変数の初期値は、各変数に対して全て同じ値を与える。

$${}_0x_i = 0.5, \quad {}_0s_i = 0.5, \quad {}_0\mu_l = 0.0$$

数値実験で使用したパラメータを表 4.1 に示す。Method1~Method3 における α 更新スケジュールならびに修正倍率の取り方は、全て同一方法を採用した。

表 4.1 パラメータと初期値

パラメータ	初期値
α	1.0
δ	0.4
ε_1	1.0×10^{-16}
ε_2	1.0×10^{-6}
γ	0.96
θ	8.0×10^{-10}
K^{\max}	200

(3) 実験環境

実験は下記の環境において、倍精度計算で実行した。

- OS : Windows XP SP3
- CPU : Core 2 duo 2.4GHz
- メモリ : 4GB
- コンパイラ : Visual C++ 2008

4.4.3. 検証結果

(1) 求解結果の比較

CUTEr 問題に対する 3 手法の求解性能の比較結果を表 4.2 にまとめる。表 4.2 では、スケジューリング・パラメータ δ の変化に伴う各手法の求解性能の変化を確認するため、 $\delta = 0.4$ を基準に、 δ を 1/2 倍、1/4 倍した $\delta = 0.2$ 、 $\delta = 0.1$ の結果も併せて示している。なお、求解結果の正誤判定は、CUTEr 問題の最適解が公開されていないため、公開情報である最適解における目的関数値と各手法の収束解における目的関数値とをそれぞれ規格化して比較することにより行った。この規格化は、全ての問題を公平に評価するため、最適解の目的関数値

の大小・正負に関わらず規格化後の目的関数値が全て1となるよう式(4.19)に示す形で行い、解が収束条件を満たし規格化後の目的関数値が1から±0.5%以内にあるときに正解と判定することとした。正解が得られなかった問題に関しては、その求解状況を「誤差大」（解は終了条件を満たすが誤差が大きく正解と判定されなかった）と「未収束」に分別することとした。

$$\left. \begin{aligned}
 F' &= \frac{F+1}{F^{OPT}+1} && (\text{if } F^{OPT} \geq 0) \\
 F' &= \frac{F-1}{F^{OPT}-1} && (\text{otherwise})
 \end{aligned} \right\} \quad (4.19)$$

ただし、 F', F, F^{OPT} : 規格化された目的関数値, 対象問題の目的関数値, 最適解における目的関数値 (公開情報)

表 4.2 CUTeR の求解結果

問題グループ	問題数	適用手法	$\delta=0.4$			$\delta=0.2$			$\delta=0.1$					
			正解数 (平均収束回数)	求解に失敗した問題数		正解数 (平均収束回数)	求解に失敗した問題数		正解数 (平均収束回数)	求解に失敗した問題数				
				誤差大	未収束		誤差大	未収束		誤差大	未収束			
Group1	29	Method1	28 (42.1)	1	1	28 (24.2)	1	1	26 (20.3)	2	1	3		
		Method2	29 (46.2)		0	28 (31.5)		1	28 (27.2)		1	1		
		Method3	29 (42.7)		0	29 (25.0)		0	29 (22.4)			0		
Group2	21	Method1	20 (42.0)	1	1	16 (28.9)	4	1	5	18 (35.1)	1	2	3	
		Method2	21 (47.1)		0	18 (53.2)		3	3	16 (54.2)	1	4	5	
		Method3	21 (42.0)		0	18 (33.7)		3	3	17 (26.6)		4	4	
Group3	22	Method1	20 (42.3)	1	1	20 (41.0)		2	2	14 (35.8)	3	5	8	
		Method2	21 (48.2)		1	16 (48.4)		6	6	16 (47.3)	1	6	7	
		Method3	22 (42.1)		0	18 (28.7)		4	4	16 (28.7)		6	6	
Group4	39	Method1	28 (42.0)	4	7	11	22 (29.4)	6	11	17	17 (26.9)	4	18	22
		Method2	28 (53.0)	2	9	11	28 (51.6)	1	10	11	25 (50.1)	3	11	14
		Method3	34 (42.5)	4	1	5	28 (27.8)	3	8	11	23 (22.9)	5	11	16
Group5	25	Method1	7 (42.0)		18	18	7 (24.1)		18	18	7 (19.7)		18	18
		Method2	10 (45.2)		15	15	10 (40.1)	1	14	15	9 (23.9)	1	15	16
		Method3	16 (42.0)	6	3	9	15 (24.0)	7	3	10	15 (18.5)	6	4	10
合計	136	Method1	103	7	26	33	93	11	32	43	82	10	44	54
		Method2	109	2	25	27	100	2	34	36	93	6	37	43
		Method3	122	10	4	14	107	10	19	29	100	11	25	36

表 4.2 の $\delta = 0.4$ の結果を見ると、問題数 136 に対する Method1 の正解数は 103, Method2 は 109, Method3 は 122 であることから、Method3 は Method1, Method2 に比べて安定な求解性能を持つことが分かる。また、Method3 は求解に失敗した場合でも誤差大（解は終了条件を満たすが誤差が大きい）となる場合が多く、Method1, Method2 に比べて、終了条件を満たす解の求解能力に優れていることが分かる。なお、誤差大と判定される問題とは、精度高く解くことが難しい問題ということであり、CUTEr 問題には、このような難問が少なからず含まれていることが分かる。

Method3 の優位性は大規模問題（Group4, Group5）においてより顕著であり、変数の固定／解除処理が求解能力の向上に大きく貢献していると考えられる（変数の固定／解除処理の効果に関しては 4.4.4 節で論ずる）。

次に、 δ を 0.2, 0.1 と小さな値に変化させた場合の結果を見ると、各手法とも、 δ の減少に伴い収束回数の減少が見られるものの、正答率も低下して行くことが分かる。このことから、より洗練された δ あるいは α の自動調整法の導入が望まれることが分かる。

続いて、各手法の $\delta = 0.4$ における解の精度比較の結果を表 4.3 にまとめる。精度比較は、問題グループ毎に、各手法で正解と判定した問題に対する規格化後の目的関数値の 1 からの差に対する標準偏差を求める形で行った。

表 4.3 より、Method3 は Group1～Group4 に対して、Method1, Method2 と同等以上の十分に高い精度を与えていることが分かる。Group5 に対する Method3 の標準偏差は、Method1, Method2 に比べて悪化しているが、これは、Method1, Method2 で正解が得られなかったより難しい問題を解いている結果であり、Method1 あるいは Method2 で正解が得られた問題の範囲に限定すれば標準偏差は 0.0000 となっている。このことから、Method3 は大規模問題に対しても、Method1, Method2 と同等以上の高い精度を与えていることが分かる。

表 4.3 各手法の解の精度比較 ($\delta = 0.4$)

問題グループ	問題数	適用手法	正解数	標準偏差
Group1	29	Method1	28	0.0000
		Method2	29	0.0000
		Method3	29	0.0000
Group2	21	Method1	20	0.0004
		Method2	21	0.0004
		Method3	21	0.0004
Group3	22	Method1	20	0.0000
		Method2	21	0.0000
		Method3	22	0.0000
Group4	39	Method1	28	0.0004
		Method2	28	0.0008
		Method3	35	0.0004
Group5	25	Method1	7	0.0000
		Method2	10	0.0000
		Method3	18	0.0011

(2) 収束状況に関する考察

3つの手法に対して、演算中の相補性条件 $x_i \lambda_i$, $s_i \lambda_i$ (またはその近似値 $x_i \xi_i$, $-s_i \xi_i$) の値の動きを観測することにより、提案手法で取り扱う KKT 条件 (式(4.6)) と元の KKT 条件 (式(4.4)) の収束状況について考察する。数値実験には、問題 QFFFFFF80 (変数の数 (式(1)の \mathbf{x} の次元) : 1028 (原問題の変数 854 + 関数型不等式制約を等式制約に変換するためのスラック変数 174), 関数型制約式の数 (式(1)の \mathbf{h} の数) : 524) を使用した。なお、上記の問題は、 $\delta=0.4$ において「未収束」の結果を示す問題の中で変数の数が最小の問題となっている。Method1,2,3 の各演算ステップにおける値の度数分布を図 4-1, 図 4-2, 図 4-3 にそれぞれ示す。なお、図の縦軸は繰返し演算のステップ回数、横軸は $x_i \lambda_i$, $s_i \lambda_i$ (または $x_i \xi_i$, $-s_i \xi_i$) の絶対値のオーダー単位での値を示す。右欄に各演算ステップでの度数の総和と固定化された変数 x_i の数を記した。

図 4-1 と図 4-2 はそれぞれ Method1 と Method2 で未収束の場合であり、実際の演算ステップは 200 回まで継続するが、本図では 55 回目までを切り出して表示している。両手法とも演算初期には $x_i \lambda_i$, $s_i \lambda_i$ ならびに $x_i \xi_i$, $-s_i \xi_i$ の値の分布は小さな値に向かって推移するが、その後分布は拡大し、一部は 0 に近付くことなく収束には至らない。一方、図 4-3 は正常に収束する Method3 における度数分布を示しており、演算が進むに従って $x_i \xi_i$, $-s_i \xi_i$ の値の分布が全体として小さな値に向かって漸次推移し、最終演算ステップでは、固定化されていない全ての変数に関する値が十分に小さくなっていることが分かる (10^{-14} 以下)。このことから、Method3 においても、収束する問題に関しては、式(4.4)の相補性条件が間接的に満たされることが分かる。

		xλ, sλ の値															合計	固定化された 変数の数	
		~10 ⁻⁰	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²	10 ⁻¹³	10 ⁻¹⁴			10 ⁻¹⁵ ~
1	2056																	2056	
2	2006	50																2056	
3	2018	38																2056	
4	2056																	2056	
5	1993	63																2056	
6	6	149	1900	1														2056	
7	2	29	1978	47														2056	
8	1	5	1906	144														2056	
9		3	2	2034	17													2056	
10		3	14	1914	125													2056	
11		3	1	12	2029	11												2056	
12		2	9	14	1942	89												2056	
13	2	1	2	18	135	1897	1											2056	
14		1		6	23	1992	34											2056	
15			2	3	19	1904	128											2056	
16			1	1	7	44	1990	13										2056	
17				4	4	42	1901	105										2056	
18				2	5	17	73	1957	2									2056	
19				1	4	20	77	1902	52									2056	
20				2	11	15	54	1783	191									2056	
21					17	25	62	1931	21									2056	
22				1	4	14	57	77	1796	107								2056	
23					4	5	19	66	108	1851	3							2056	
24					1	8	10	30	70	1884	53							2056	
25					1		12	19	34	87	1903							2056	
26				1	5	8	13	23	33	45	1885	43						2056	
27					4	6	9	17	43	60	1783	134						2056	
28				1	10	5	14	16	42	44	92	1817	15					2056	
29					4	4	15	17	25	62	60	1773	96					2056	
30					3	5	10	10	19	42	48	90	1827	2				2056	
31					1	3	4	20	17	19	52	64	1805	71				2056	
32					1	5	12	7	15	30	33	53	120	1780				2056	
33						3	8	21	12	20	29	36	48	1862	17			2056	
34							10	21	14	10	24	33	52	1818	74			2056	
35					1	3	2	19	10	18	24	27	48	58	1846			2056	
36						1	11	15	18	13	21	30	37	65	1845			2056	
37							8	14	13	16	16	32	43	42	1872			2056	
38							1	12	17	17	15	25	39	50	1880			2056	
39							1	9	18	12	15	18	43	46	1894			2056	
40						1	4	4	13	20	21	22	32	40	1899			2056	
41						2	3	8	10	16	14	23	24	32	1924			2056	
42					1		3	12	24	18	12	22	25	31	1908			2056	
43					1	3	1	14	7	16	15	17	28	46	1908			2056	
44					2	5	6	11	14	13	17	29	36	46	1877			2056	
45					2	4	10	14	22	10	15	27	28	34	1890			2056	
46					1	4	2	4	15	10	15	10	14	37	1912			2056	
47				3	2	1	8	9	13	14	15	17	26	32	1916			2056	
48				3	2	3	5	2	8	13	15	17	16	26	21	1925		2056	
49				3	1		5	7	7	20	7	16	21	15	28	1926		2056	
50					3	1	1	4	9	18	13	3	17	26	20	1941		2056	
51					1	3	1	1	4	11	15	12	5	16	26	1961		2056	
52						3	1	2	3	12	15	9	12	9	41	1949		2056	
53						3	4	4	6	8	6	13	6	19	22	1965		2056	
54				1	1		3	4	8	6	9	13	6	21	19	1965		2056	
55					2		2	7	16	4	6	5	16	18	24	1956		2056	

図 4-1 Method1 による $x_i\lambda_i, s_i\lambda_i$ の度数分布 (問題 : QFFFF80)

		x _i ξ _i , -s _i ξ _i の絶対値															合計	固定化された変数の数		
		~10 ⁻⁰	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²	10 ⁻¹³	10 ⁻¹⁴			10 ⁻¹⁵ ~	
演算ステップ回数	1	1288	768															2056	0	
	2	918	1136	2														2056	0	
	3	6	794	1232	24													2056	0	
	4	2	20	1364	666	4												2056	0	
	5	2	8	1438	602	4	2											2056	0	
	6		8	344	1376	322	6											2056	0	
	7	2	2	58	1330	660	4											2056	0	
	8		4	10	994	1026	18	4										2056	0	
	9		2	14	74	1576	366	24		2								2058	0	
	10		2	26	42	1244	686	56		2								2058	0	
	11			4	6	806	1096	136	8									2056	0	
	12				8	30	1888	130										2056	0	
	13			2	6	28	1374	642	4									2056	0	
	14				46	174	958	826	44	8								2056	0	
	15				2	8	68	1408	536	30	4							2056	0	
	16				2		8	1252	694	90	6	4						2056	0	
	17						12	86	1812	140	6							2056	0	
	18						10	32	1756	246	12							2056	0	
	19						10	1670	358	16	2							2056	0	
	20						2	8	2	1992	52							2056	0	
	21					2				1918	136							2056	0	
	22						6		1788	254	6	2						2056	0	
	23						4	2	6	1988	56							2056	0	
	24							2	2	1880	172							2056	0	
	25					2		2			1978	74						2056	0	
	26									4	1992	60						2056	0	
	27									2	2	1528	524					2056	0	
	28										6	28	1866	154	2			2056	0	
	29										2	32	1860	160	2			2056	0	
	30								2	2		2	1406	638	6			2056	0	
	31						2		2		2		2	1846	198	4		2056	0	
	32						2					2	18	1636	398			2056	0	
	33											6	10	56	1738	246		2056	0	
	34												16	2	1766	272		2056	0	
	35													2	1548	496		2056	0	
	36								4	6					32	1648	366	2056	0	
	37														2	1630	424	2056	0	
	38														10	1464	582	2056	0	
	39										10					28	2018	2056	0	
	40									10						2	2044	2056	0	
	41															2	2054	2056	0	
	42														2	2	2052	2056	0	
	43											2				6	2048	2056	0	
	44								2			4			12	20	2018	2056	0	
	45						4								2	12	30	2008	2056	0
	46														2	12	20	2022	2056	0
	47											4	2		12	30	2008	2056	0	
	48													2	6	18	2030	2056	0	
	49														2		6	2048	2056	0
	50						2									4	2050	2056	0	
	51														2	4	2	2048	2056	0
	52								2		2					42	2010	2056	0	
	53								2	6	2	4				4	6	2032	2056	0
	54												8	4		16	2028	2056	0	
	55														2	2	18	2034	2056	0

図 4-2 Method2 による $x_i\xi_i$, $-s_i\xi_i$ の度数分布 (問題 : QFFFF80)

		x _i ξ _i , -s _i ξ _i の絶対値															合計	固定化された変数の数	
		~10 ⁻⁰	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²	10 ⁻¹³	10 ⁻¹⁴			10 ⁻¹⁵ ~
1	1288	768																2056	0
2	918	1136	2															2056	0
3	6	794	1232	24														2056	0
4	2	20	1364	666	4													2056	0
5	2	8	1438	602	4	2												2056	0
6	8	344	1376	322	6													2056	0
7	2	2	58	1330	660	4												2056	0
8	4	10	994	1026	18	4												2056	0
9	2	14	74	1576	366	24												2056	0
10	2	26	42	1244	686	56												2056	0
11		4	6	806	1096	136	8											2056	0
12			4	32	1758	226	8	4										2032	12
13			4	10	1634	368	16											2032	12
14					46	1896	80	2										2024	16
15					4	1748	258	8	6									2024	16
16					28	1552	390	28										1998	29
17				6	16	22	1712	102										1858	99
18			2	16	26	60	1682	80										1866	95
19					8	18	1822	18	4									1870	93
20						2	1816	42	8									1868	94
21							1738	114	10									1862	97
22								1846	6									1852	102
23								1832	20	4								1856	100
24								4	1852	4								1860	98
25							2		1856	2								1860	98
26								4	1104	752								1860	98
27								4	32	1720	98				2			1856	100
28								8	16	1516	308	12						1860	98
29								4	6	14	1730	106						1860	98
30								4		6	1558	278	6					1852	102
31								8	2	4	1256	588	2					1860	98
32								4		14	1660	180						1858	99
33								4		4	1460	322						1790	133
34								4		2	40	1610	94					1750	153
35												1494	120					1614	221
36												2	1142	286				1430	313
37												16		18	10	1312		1356	350
38												2			18	1240		1260	398
39												14		2	18	1192		1226	415
40												2		6	48	1108		1164	446
41													12	2	8	1136		1158	449
42															6	1152		1158	449
43															6	1152		1158	449

図 4-3 Method3 による $x_i\xi_i$, $-s_i\xi_i$ の度数分布 (問題 : QFFFF80)

(3) 収束回数および計算時間に関する考察

表 4.2 から、 δ の大きさに関わらず、ほとんどの問題グループで Method2 は Method1 に比べて平均収束回数が多いことが分かる。これは、式(4.6)への障壁関数の導入により、探索点を変数の下限制約に近付くときに、探索点の更新幅が小さく抑えられ、終了条件を満たすまでの収束回数が増大するためと考えられる。また、Method2 は Method3 よりも平均収束回数が多い。ただし、図 4-2, 図 4-3 から分かる通り、固定化される変数が現れるまでの両者の分布状況は同一の推移を示している。このことから、変数の固定／解除処理が障壁関数の持つ収束回数増大作用を抑制していると考えられる。この結果、変数の固定／解除処理を持つ Method3 は、Method1 と同等の収束性能を発揮し、より優れた演算安定性を示すと考えられる。

次に、各手法の $\delta = 0.4$ における計算時間の比較結果を、表 4.4, 表 4.5 に示す。なお、表 4.4 は Method3 と Method1 の比較結果であり、表 4.5 は Method3 と Method2 の比較結果である。計算時間の比較は、問題グループ毎に、各手法で共に正解と判定した問題に対して、両手法での計算時間の比を求め、これを平均することで行った。また、参考値として、上記の比の標準偏差、各手法における計算時間の平均値を記載した。

表 4.4 Method1 に対する Method3 の平均計算時間の比と標準偏差 ($\delta = 0.4$)

問題グループ	平均計算時間の比 (Method3 平均計算時間 (ms) / Method1 平均計算時間 (ms))	平均計算時間の比の 標準偏差
Group1	0.76 (60.5/72.4)	0.30
Group2	0.82 (73.4/88.4)	0.15
Group3	0.92 (421.7/495.3)	0.11
Group4	0.97 (170709.5/211051.7)	0.11
Group5	0.98 (48892.9/121195.3)	0.33

表 4.5 Method2 に対する Method3 の平均計算時間の比と標準偏差 ($\delta = 0.4$)

問題グループ	平均計算時間の比 (Method3 平均計算時間 (ms) / Method2 平均計算時間 (ms))	平均計算時間の比の 標準偏差
Group1	1.06 (60.5/53.5)	0.21
Group2	0.94 (73.4/79.2)	0.11
Group3	0.93 (421.7/525.2)	0.14
Group4	0.87 (170709.5/221060.8)	0.15
Group5	0.96 (48892.9/50035.6)	0.03

表 4.4 に示される計算時間の比から, CUTEr 問題に関して Method3 は Method1 より全体的に高速であることが分かる。なお, この数値は, 両者が正解を得た問題 (比較的解き易い問題) に対するものであることから, 実質的にはこの数値以上に Method3 は高速であると考えられる。ちなみに, Group5 の Method1 の計算時間の平均値が非常に大きくなっているが, これは少数の問題で非常に大きな計算時間を要したことを示している。

表 4.5 に示される計算時間の比から, CUTEr 問題に関して Method3 は Method2 と全体的に同等の処理性能を示すことが分かる。このことは, Method3 の変数の固定/解除に伴う処理時間の増加要素 (固定/解除の判定や修正方程式の行列の再構築など) と処理時間の減少要素 (行列の次元の減少) とが, ほぼ同程度に作用していることを示している。なお, この計算時間の比は, 上記と同様に, 両者が正解を得た問題 (比較的解き易い問題) に対するものであることから, 実質的には Method3 が高速と考えられる。また, 対象問題が密な問題 (上記の行列の要素が密な問題) になるに従って, 一次方程式を解くために要する処理時間は行列次元の 3 乗オーダーに近付いて行くため, 変数の固定に伴う行列次元の減少効果はより大きくなり, 計算時間の点で Method3 が優位になって行く。

4.4.4. 求解安定性に関する考察

提案手法のポイントである変数の固定／解除処理が数値計算の安定性に与える効果を，Method2 と Method3 の条件数（condition number）により検証する。

(1) 条件数

修正方程式を解くことにより得られる内点列が最適解に近づくにつれて，修正方向を計算する行列は悪条件（ill-condition）となることが知られている。ここでは，行列の悪条件の程度を条件数により評価する。正則行列 A の条件数 $\kappa(A)$ は次のように定義される。

$$\kappa(A) = \|A\| \cdot \|A^{-1}\| \quad (4.20)$$

ただし，記号 $\|\cdot\|$ は行列のノルムを表す。

特に， A が実対称行列のとき 2 ノルム（ユークリッドノルム）の条件数は以下の式で与えられる。

$$\kappa_2(A) = \frac{\max_i |\lambda_i(A)|}{\min_i |\lambda_i(A)|} \quad (4.21)$$

ただし， $\lambda_i(A)$ ($i = 1, 2, \dots, n$) は A の固有値である。

$\kappa(A)$ が大きい行列 A を悪条件と呼ぶ。有限桁の数しか扱うことのできない計算機では計算誤差を生じ，内点法の演算ステップで発生した丸め誤差は条件数倍されて数値解に影響を与えることになる。よって，悪条件となる行列を修正方程式に含んだ演算ステップがあると，繰返し演算の中で精度の高い修正方向を得ることが難しくなる。ここでは，修正方程式（式(4.10)）の左辺の行列に対する条件数を求める。

(2) 条件数による検証結果

前節の選択問題 QFFFFF80 について、Method2 と Method3 を適用したときの条件数の変化と固定化される変数の推移を図 4-4 に示す。各演算ステップを横軸にとり、式(4.21)で与えられる条件数を折れ線で、新たに固定化された変数 x_i の数（正方向で示す）、固定を解除された変数 x_i の数（負方向で示す）、その時点で固定化されている変数 x_i の数、をそれぞれ棒グラフで示す。

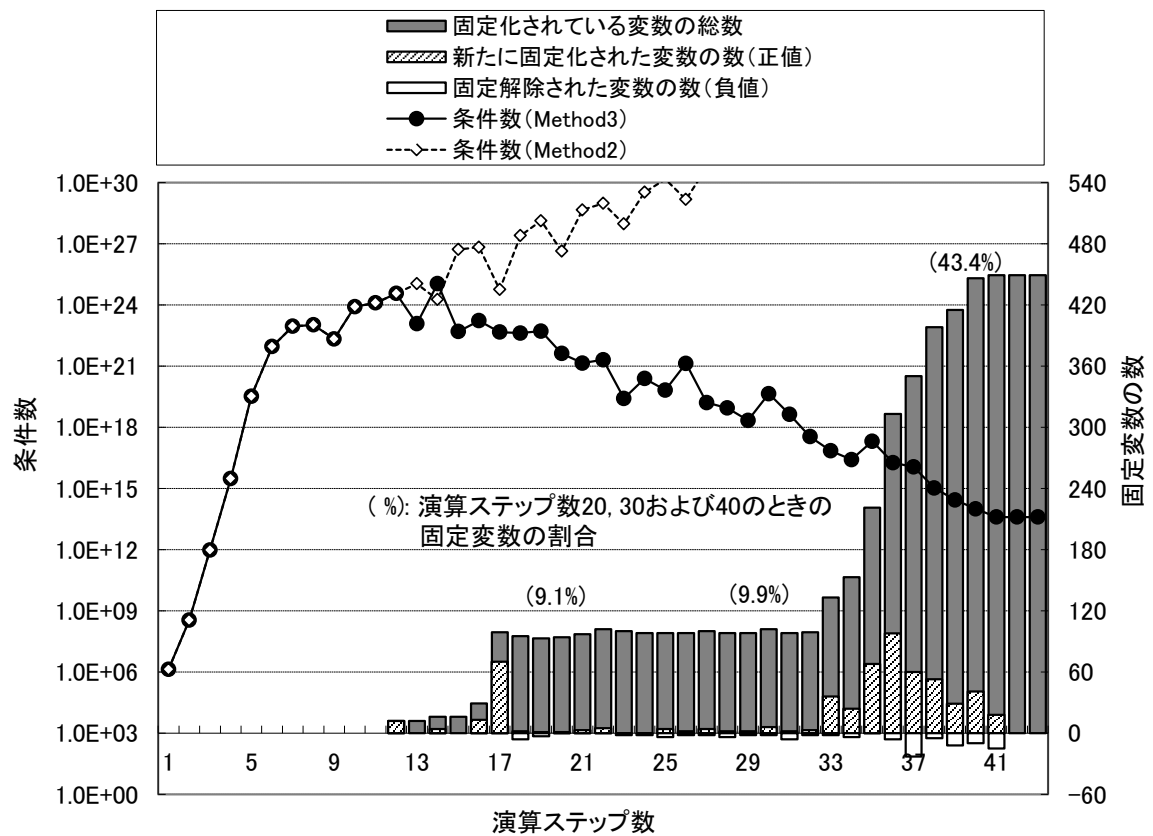


図 4-4 条件数と固定化された変数の数（問題：QFFFFF80）

本グラフから次のことが分かる。

- 固定化される変数が発生する前の演算ステップでは、変数の固定／解除処理の有無に関わらずに条件数の変化は同一である。
- Method3（変数の固定／解除処理あり）では、固定化される変数の増加と共に、条件数が Method2（固定／解除処理なし）に比べて低減される。
- Method2 の条件数は演算ステップと共に増加し、未収束となる。これは条件数の増大により、修正方程式の解（修正方向）を高精度で求めることが困難になることが原因と考えられる。

また、本グラフから提案手法（Method3）の特徴について次のことを確認できる。

- 繰り返し演算の途中で固定化された変数が後に解除される動作が確認できる。固定変数の推定を誤った場合でも、求解プロセスの中で ξ （式(4.13)）を使用して変数の固定化を自動的に解除する処理が発生し、演算状況に合わせた固定変数の調整が行われる。
- 最後の数ステップに固定変数の変化はない。これは、固定変数の確定後、数回の収束演算で全ての収束条件が満たされることを示している（なお、このような状況は他の問題でも観測される）。

4.5. 需給計画問題への適用

本節では、電力需給計画における経済負荷配分問題を使用して、Method1（式(4.4)の定式化による内点法）とMethod3（提案手法）の比較実験により、提案手法の有効性と性能検証を行う。

4.5.1. 経済負荷配分問題

経済負荷配分^[9]とは、各種の制約を満たし、種々の性能を持つ火力発電機の総燃料コストを最小化するように、並列運転中の各火力機が請け負うべき需要量を決定する処理であり、電力事業者の収益を左右する重要な問題となっている。

経済負荷配分問題は並列発電機の単位時間あたりの発電量（連続値）を主に決定するものである。このとき、発電機の出力上下限や各時刻の需給バランス維持を制約条件として考慮する必要がある。さらに、計画期間に使用可能な燃料の量に制約（燃料消費量制約）がある場合には、多時刻にわたる出力を一括して決定する必要性が生じる。その問題形式は、燃料消費量が出力の二次式で定義されることから、目的関数・制約式に二次式を含む式(4.22)で定義される大規模な一般二次計画問題となる。

$$\text{目的 } f(p_T) = \sum_t \sum_i (a_i \cdot p_{Ti,t}^2 + b_i \cdot p_{Ti,t} + c_i) \rightarrow \text{最小化}$$

制約条件

$$\begin{aligned} p_{Ti}^{\min} &\leq p_{Ti,t} \leq p_{Ti}^{\max} && \text{(出力上下限制約)} \\ \sum_i p_{Ti,t} &= D_t && \text{(需給バランス制約)} \\ \sum_i r_{Ti,t} &\geq R_t && \text{(運転予備力制約)} \\ fl_{fb}^{\min} &\leq \sum_t \sum_{i(i \in fb)} (h_i^a \cdot p_{Ti,t}^2 + h_i^b \cdot p_{Ti,t} + h_i^c) \leq fl_{fb}^{\max} && \text{(燃料消費量制約)} \end{aligned} \tag{4.22}$$

ただし,

p_{Tii}, r_{Tii} : 時刻 t の火力発電機 i の発電量, 運転予備力 (決定変数)
($p_{Tii} + r_{Tii} \leq p_{Ti}^{\max}$),

$p_{Ti}^{\max}, p_{Ti}^{\min}$: 発電機 i の最大出力値, 最小出力値,

D_t : 時刻 t の需要量,

R_t : 時刻 t に必要な運転予備力,

a_i, b_i, c_i : 発電機 i の燃料コスト曲線の係数,

h_i^a, h_i^b, h_i^c : 発電機 i の熱消費量曲線の係数,

$fl_{fb}^{\min}, fl_{fb}^{\max}$: 燃料基地 fb における使用可能燃料の下限值, 上限値

4.5.2. 検証用問題と検証条件

使用した経済負荷配分問題は最大 60 台の発電機を対象とし, 1 時間毎・発電機毎の発電量を決定変数とする。燃料消費量制約の有無 (非線形制約条件の有無) と計画期間 (1 週間, 1 ヶ月) の組合せにより 4 種類の問題 (a)~(d)を用意した。各問題の概要を表 4.6 に示す。問題(a), (b)については一年間にわたる全ての週をそれぞれ抽出して問題としている。各発電機の定期点検による停止に加え, 燃料コストを最小化のために必要な並列発電機台数は需要状況により異なるため, 決定変数ならびに制約式の数が各問題により異なっている。また, 燃料消費量制約の設定内容により制約条件を経済的に満たすための並列発電機台数や制約対象となる発電機の運転予備力の扱いが異なることから, 決定変数ならびに制約式の数は変化する。なお, 問題(b), (d)は二次の制約条件である燃料消費量制約を含むため, 問題(a), (c)に比べ難しい問題となっている。また, 問題(c), (d)は問題規模が大きく, 問題(a), (b) に比べ難しい問題となっている。

実験は 4.4.2(3)節と同じ環境で, 4.4.2(2)節と同じパラメータを使用して実施した。その他の初期値とパラメータは全て表 4.1 と同じである。

表 4.6 経済負荷配分問題の概要

問題グループ	計画期間	燃料消費量制約の有無	問題数	変数の数*	制約の数**
問題 (a)	1 週間	なし	53	12,039 ~20,889	7,906 ~13,806
問題 (b)	1 週間	あり	53	11,637 ~20,862	7,641 ~13,791
問題 (c)	1 カ月	なし	1	50,956	20,893
問題 (d)	1 カ月	あり	1	50,973	20,754

*スラック変数“s”を除く

**変数の上下限制約を除く

4.5.3. 検証結果と考察

Method1 と Method3 の比較実験の結果を表 4.7 にまとめる。なお、この比較は両手法で共に収束解を得た問題に対し行っている。経済負荷配分問題では最適解が既知ではないため、収束の成否により正誤判定を行った。また、この正誤判定の妥当性を検討するため、両手法で正解と判定した問題に関して、より小さな目的関数値を与える手法の目的関数値を最適解とした場合の、各手法の規格化後の目的関数値(式(4.19)参照)の1からの差に対する標準偏差を求めた。その結果、表 4.7 に示す通り、各手法の標準偏差は十分に小さく、両手法が同一の収束解を与えていることが確認された。これは、収束解が最適解であることの傍証であり、正誤判定の妥当性が示されている。

表 4.7 経済負荷配分問題の検証結果

問題 グループ	問題数	適用 手法	正解数 (平均収 束回数)	規格化後の 目的関数値 の 1 からの 差に対する 標準偏差	正解した問題の 平均計算時間 (ms)	固定化された 変数の割合(%)
					標準偏差 (ms)	
問題 (a)	53	Method1	35 (42.9)	2.37×10^{-12}	435.6	82.9
		Method3	53 (42.0)	1.94×10^{-12}	658.8 150.2	
問題 (b)	53	Method1	29 (44.8)	9.03×10^{-11}	603.4	78.1
		Method3	53 (42.0)	0.00	718.9 164.4	
問題 (c)	1	Method1	0	—	—	72.6
		Method3	1 (42.0)	—	3404.0 —	
問題 (d)	1	Method1	0	—	—	66.3
		Method3	1 (42.0)	—	4213.0 —	

表 4.7 に示す通り Method1 は週間レベルの問題(a),(b)のそれぞれ 18 問と 24 問で求解に失敗（未収束）し、問題サイズの大きい月間レベルの問題(c),(d)の求解にも失敗（未収束）している。一方, Method3 では全問題の求解に成功しており, 安定して最適解を得ている。

演算終了時の解において, 問題(a),(b)では平均 80%程度の変数が, 問題(c),(d)では約 70%の変数が固定化されているが, 4.4 節の結果を踏まえると, 大規模な経済負荷配分問題においては, この変数の固定／解除処理の作用により, 求解の安定性が実現されていると考えられる。燃料消費量制約の有無に着目すると, 問題(b), (d)（燃料消費量制約あり）の方が固定変数の比率が小さい。これは, 燃料消費量制約を持つ発電機には使用燃料量に制約があるため, 単一時刻にのみ着目して高効率な発電機を優先して最大出力で運転することができなくなるためである。また, 問題(b), (d)（燃料消費量制約あり）では, 燃料消費量制約は制約式が二次式となり式(4.10)においてラグランジュ乗数 μ_l が負となる場合が考えられるが, 修正方程式の行列の正定値性が損なわれることはなく安定して求解に成功した。

問題(a),(b)の計算時間の平均値には, Method3 の優位性が見られない。これは, 経済負荷配分問題が疎性の高い典型的な問題（行列次元の減少が処理時間の減少に結びつき難い問題）になっているためと考えられる。

4.6. 結言

本章では, 大規模な一般二次計画問題に対する計算の不安定化と演算時間の増大との克服を目指し, 内点法に有効制約法の求解戦略を取り入れた「変数の有効制約に関する推定機構を持つ内点法」を提案した。提案手法の特徴は, 対数障壁関数を導入した上で, 各演算ステップで上下限制約に接近する変数があればこれを制約が活性な変数と推定して上下限值に固定し, ラグランジュ乗数の近似値を用いて「制約が活性な変数のラグランジュ乗数は非負である」という条件が満たされない場合には固定変数の解除を行う, という動的な制御を行う点にある。

提案手法の有効性を確認するため、ベンチマーク問題ならびに実用問題を用いて従来手法との比較評価を行った。この比較評価で得られた知見は下記の通りである。

- (1) 提案手法では、相補性条件を明示的な形では含まない定式化を採用しているが、正常に収束する問題では、対数障壁関数の重み付けパラメータ α の減少スケジュールに応じて、相補性条件に相当する式の値の分布が十分小さい値まで収束することが確認できることから、相補性条件を含む一般的な定式化と間接的に同じ条件を満たす解を得ていることが確認できた。
- (2) 最適解への探索過程における求解プロセスの中でラグランジュ乗数の近似値を参照することにより、変数の固定／解除が動的に的確に行われることを確認した。
- (3) 変数の固定化により、修正方程式の左辺の行列の条件数が低減することを示した。これにより、求解演算の安定化が実現されていると考えられる。
- (4) ベンチマーク問題に対する数値実験により、提案手法が、一般的な内点法と同等以上の処理速度を持ち、より高い正答率を示すことを示した。特に、大規模問題に対してより高い求解性能を持つことを明らかにした。
- (5) 実用問題としての電力需給システムの経済負荷配分問題に適用し、二次の非線形制約を持つ数万変数の大規模問題に対しても安定した求解性能を持つこと示し、提案手法の実用性の高さを示した。

今後の課題として、対数障壁関数の重み付けパラメータの実用的なスケジューリング方法の検討を進めると共に、さらに広い実用問題への適用を通して、求解アルゴリズムのさらなる性能向上が挙げられる。

参考文献

- [1] Padhy, N.P : “Unit Commitment – a bibliographical survey”, *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol.19, No.2, pp.1196-1205, 2004
- [2] H. Wei, H. Sasaki, and R. Yokoyama : “An Application of Interior Point Quadratic Programming Algorithm to Power System Optimization Problems”, *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol.11, No.1, pp.260-266, 1996
- [3] 枇々木規雄, 田辺隆人 : 「ポートフォリオ最適化と数理計画法」, 朝倉書店, 2005
- [4] Karmarkar, N. : “A New Polynomial-Time Algorithm for Linear Programming”, *Combinatorica*, 4, pp.373-395, 1984
- [5] 山下浩, “大規模最適化問題へのアプローチ —有効制約法, 内点法, 外点法”, システム制御情報学会, Vol. 50, No.9, pp.332-337, 2006
- [6] 小島政和, 土谷隆, 水野眞治, 矢部博 : 「内点法」, 朝倉書店, 2001
- [7] CUTEr HP, <<http://cuter.rl.ac.uk/cuter-www/index.html>>
- [8] I. Maros, C. Mészáros : “A Repository of Convex Quadratic Programming Problems”, *Optimization Methods and Software*, 11-12, pp.671-681, 1999
- [9] 高橋一弘 : 「電力システム工学」, コロナ社, 1977
- [10] 今野浩, 山下浩 : 「非線形計画法」, 日科技連, 1978
- [11] H. Yamashita : “A globally convergent primal-dual interior point method for constrained optimization”, *Optimization Method and Software*, 10, pp.443-469, 1998
- [12] 高口雄介, 橋本博幸, 中村静香, “経済負荷配分問題に対する高速な二次計画法の適用”, 平成 20 年電気学会電力・エネルギー部門大会 pp.26-9 - 26-10, 2008

5. 起動停止可能回数を考慮した年間需給計画手法

5.1. 緒言

オンライン需給制御前に実行する需給計画業務では、需要に見合うだけの電力を確保し、安定な供給を実現するための需給計画が検討される。静的な供給信頼性を確保するために必要な系統操作や発電機運用条件は、最終的に電力需給計画立案時の遵守すべき制約条件として与えられることになる。電源設備は設備故障リスクを低減するために、次回定期検査のための設備停止までの期間（1年間程度）は起動停止回数に制限を設けて供給信頼性の確保を図っている。そのため、年間を対象期間とする年間需給計画では起動停止回数制限まで適切に考慮して、年間を通じた供給能力の適切な管理が必要である。昨今、原子力発電の休止により需要ピーク期間を中心に供給能力の余裕がない需給状態では、火力発電の健全運用を維持することが必須である。また、将来、自然エネルギーによる分散型電源の導入拡大による不確定要因の増大を電力系統で受容するために、系統側電源による継続的な調整力発揮が必要となる。特に、主として調整力を担う火力発電機については、電源設備の N-1 故障や需要の変動に対応するために適切な調整力を確保しつつ、さらに電源設備故障の未然防止を目指して年間レベルの需給計画から起動停止回数の制限を考慮した計画立案が従来にも増して重要となる。

年間需給計画は、安定供給体制の確立や燃料消費の見通し検討を目的として、発電機の実運用条件を考慮した発電計画シミュレーションをベースにして策定する業務である。設備形成・運用計画の基本となるほか、燃料調達計画や発電機定期点検計画などをはじめとする各種事業計画と密接な関連を持つ。年間需給計画に関する業務は、以下の一連の業務により構成される。

- (1) 需要想定業務
過去の需要実績データや予想気温に基づいて総需要を予測する
- (2) 固定供給力検討業務
発電計画策定業務において固定的な出力として取り扱う原子力発電や水力発電等の供給力を計算し求める
- (3) 定検調整業務
発電計画策定業務において発電ユニットの停止期間として与えられる定期検査の予定期間を調整する
- (4) 最大電力バランス計算業務
月別、週別の必要予備力を算定する
- (5) 発電計画策定業務
設定された制約条件を満たし、運転コスト最小化を実現する火力発電ユニットと揚水発電ユニットの起動停止状態および出力配分を決定する

上記業務(5)の発電計画では、業務(1)により求めた予測需要（総需要）から業務(2)による固定供給力分を差し引いた火力揚水分担負荷、および、業務(3)、(4)の結果を反映した制約条件のもとで計画を策定する。一例として実務における各業務の関係を図 5-1 に示す。異なる部門が、定検計画の作成や燃料受入計画の立案などの業務をそれぞれ担当する。発電計画策定業務は、系統運用との整合性を取るために、関連部門からの年間計画案について安定供給・運転コストの面からの精査・回答を行い、繰り返し調整しながら最終計画を導出することになる。これには、年間という長期間の検討において総量を把握しながら、燃料消費量や起動停止回数等の制約を同時に考慮することができる効率的な計画策定機能が重要となる。

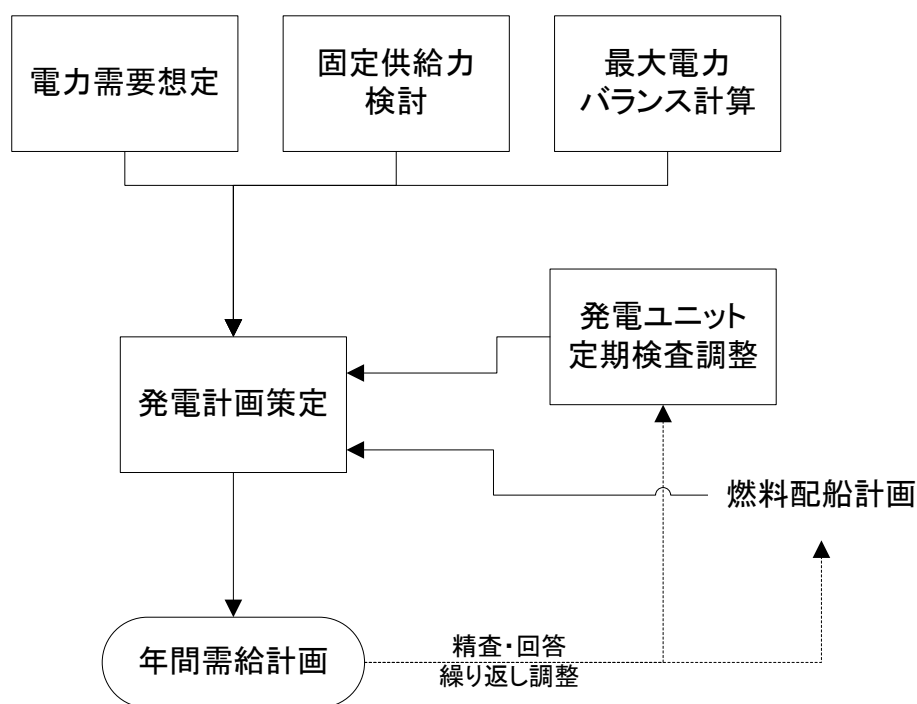


図 5-1 年間需給計画業務の業務フロー図

需給バランス維持の第一義的な条件のもと火力・揚水発電ユニットの経済的な運用を実現する発電計画では、年間にわたって全発電ユニットの毎時刻の起動停止および出力配分を決定する。このとき、静的な供給信頼性を確保するために、発電ユニットの機器制約や予備力の確保などの運転制約となる各種の制約条件に加えて、上述した起動停止回数制限や燃料消費量といった計画期間総量の形式で管理されて多時刻にわたる制約条件が火力発電ユニットに存在する。これらを満足する火力発電ユニットの運転計画は、揚水発電ユニットの運用にも大きな影響を与えるため、経済性を追求する発電計画策定には起動停止回数制限や燃料消費量の適切な考慮が重要である。

年間需給計画問題では揚水発電所を除く水力発電（ダム式水力を含む）を固定供給力分として扱い、あらかじめ総需要から固定供給力分を差し引いた残余分を火力揚水分担負荷（火力機と揚水機により電力供給すべき負荷）として入力データとし、火力機・揚水機を対象にした計画問題を論じる。ただし、上記の水力発電の取り扱い方は各電力会社により異なり、水力発電量が全供給力に占める割合が高い電力会社では年間需給計画問題に水力発電を加えて計画する必要がある、提案手法の拡張が必要となる。

年間需給計画の対象問題は、発電ユニット数の増大に伴い求解安定性や業務システムとしての現実的な処理時間の点から、大規模な問題サイズと考慮すべき制約条件の複雑さにより、年間一括で計画結果を求めることが困難となる。需給計画手法に関しては、これまでに主として燃料消費量制約を含む問題に対する求解アルゴリズムの研究が国内^{[1][2]}および国外^{[3][4]}で報告されている。年間需給計画など大規模問題に対する効率的な求解方法の研究には、計画対象となる原問題を部分問題に分割して取り扱う **Decomposition approach**^{[5] [6]}があるが、求解安定性に乏しく燃料消費量制約を持つ火力発電ユニットがある場合など実用的な計画問題の研究結果はない。さらに、年間需給計画において火力発電ユニットの起動停止回数を明示的に取り扱い、燃料消費量制約との相互影響まで考慮した計画手法に関する研究はまだ報告されていない。本研究では、起動停止回数および燃料消費量に対する制約条件を考慮した年間需給計画問題を、安定して効率的に求解するための実用的な手法を提案する。また、需給計画に関する新しい動向として、ここ約 10 年間、特に電力自由化により電力会社の発送電分離が進んだ海外の国で、燃料購入価格、電力販売価格やアンシラリーサービス販売価格といった価格シグナルを重視した価格（利益）ベース需給計画（**price(profit)-based unit commitment**）に関する研究^[7]が活発である。さらに、さまざまな価格変動に負荷も含めた不確実性の下で、需給計画は利益を最大化しつつ運用制約を満足する計画を策定する確率的な最適化モデルとして扱う研究^{[8][9]}も多く報告されている。

本章の構成は以下の通りである。5.2 節では、計画策定に必要な制約条件である起動停止回数制約と燃料消費量制約について説明し、両者を考慮した年間需給計画問題の定式化について述べる。次に 5.3 節では、大規模かつ複雑な年間需給計画問題に対する実用的な求解アルゴリズムを提案する。5.4 節では、実規模条件でシミュレーションによる提案アルゴリズムの検証結果を示し、有効性について論ずる。

5.2. 年間需給計画問題

5.2.1. 起動停止回数制約と燃料消費量制約

(1) 起動停止回数制約

深夜軽負荷時には火力発電ユニットの出力が全体的に絞られるため、昼間帯と同じ起動体制のまま運用を行うと運転単価の上昇を招く。そのため、一般的には増分単価の高い運転ユニットをオフピーク帯に停止して、残りのユニットを高効率で運転する DSS (Daily Start-Stop) 運転を実施している。しかし、発電機の起動停止時にはタービン温度の変化により大きな熱疲労が加わるため、ユニットにより年間の総起動停止回数に上限値を与えて機器保全の面から管理している。これを起動停止回数制約 (constrained number of unit commitment) と呼ぶ。需給計画の観点から見ると、発電機の起動停止状態が電力量バランスに影響するだけでなく、夜間の揚水動力量にも影響するため、全体の運転コストに密接な関係を持つ。

(2) 燃料消費量制約

燃料の調達見通しやユニット利用率による制約により、必ずしも需給運用上は効率的でない火力発電ユニットの並列や出力配分が必要になることがある。本研究では、ある期間内に消費される燃料の総量を燃料基地単位で管理するものとし、燃料消費量制約 (fuel constraint) と呼ぶ。

長期購入契約や配船計画といった実用条件から、燃料消費量制約は主として LNG (Liquid Natural Gas) ユニットに対して与えられ、結果的に石油ユニットの追加並列や石炭ユニットの出力抑制など非経済的な運転体制が強いられる場合がある。そのため、年間需給計画策定時には、経済性を考慮した燃料消費量配分および静的供給信頼性の維持の視点からの需給バランス策定が重要であり、複数の時刻断面にわたる対応処理が必要となる。運転コストの面から考えると、制約対象ユニットの出力変更だけでなく、燃料消費量制約を持つ複数ユニットの起動停止状態の変更も検討することが必要になることから、起動停止回数制約と協調の取れた処理が必須となる。

5.2.2. 起動停止回数制約と燃料消費量制約を考慮した需給計画問題

静的供給信頼性の確保のため、必要な運転予備力確保の制約のもと、電源設備故障の未然防止の点から起動停止回数制約を明示的に取り扱い、燃料消費量制約との協調を考慮した需給計画問題は、以下のように定式化される。ここで、計画時間刻みは1時間とする。揚水発電所を除く水力発電（ダム式水力を含む）は固定供給力分として扱い、あらかじめ総需要から固定供給力分を差し引いた残余分を火力揚水分担負荷（火力機と揚水機により電力供給すべき負荷）として入力データとして与える。水力発電量が全供給力に占める割合が高い場合は水力発電を加えて計画する必要がある、下記計画問題の拡張が必要となる。

目的

$$f = \sum_t \sum_i \{C_i(p_{Ti,t}) \cdot u_{i,t} + S_i \cdot u_{i,t} \cdot (1 - u_{i,t-1})\} \rightarrow \text{最小化} \quad (5.1)$$

制約条件

- 需給バランス制約

$$\sum_i p_{Ti,t} \cdot u_{i,t} + \sum_j (ps_{Gj,t} - ps_{Mj,t}) = D_t \quad (5.2)$$

揚水発電ユニットは純揚水として扱い、揚水／揚発運転時に連続的な任意の出力値を取る可変速型モデルとして扱う。

- 火力発電ユニット出力上下限制約

$$p_{Ti}^{\min} \leq p_{Ti,t} \leq p_{Ti}^{\max} \quad (5.3)$$

- 揚水発電ユニット出力上下限制約

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq ps_{Gj,t} \leq ps_{Gj}^{\max} \\ 0 \leq ps_{Mj,t} \leq ps_{Mj}^{\max} \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

- 運転予備力制約

$$\left. \begin{aligned} \sum_i r_{Ti,t} \cdot u_{i,t} + \sum_j r_{PSj,t} &\geq R_t \\ p_{Ti,t} + r_{Ti,t} &\leq p_{Ti}^{\max} \\ ps_{Gj,t} + r_{PSj,t} &\leq ps_{Gj}^{\max} \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

- 火力発電ユニット最小運転／最小停止時間制約 (minimum up/down time)

$$\left. \begin{aligned} (T_{i,t-1}^{On} - MTU_i) \cdot (u_{i,t-1} - u_{i,t}) &\geq 0 \\ (T_{i,t-1}^{Off} - MTD_i) \cdot (u_{i,t-1} - u_{i,t}) &\leq 0 \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

- 貯水電力量制約

$$\left. \begin{aligned} W_k^{\min} \leq W_{k,t} \leq W_k^{\max} \\ W_{k,t} = W_{k,t-1} + \sum_{j \in RSV(k)} \left(\frac{\eta_j}{100} \cdot ps_{Mj,t} - ps_{Gj,t} \right) \end{aligned} \right\} \quad (5.7)$$

貯水池 k に1つ以上の純揚水発電ユニットが存在し、それら揚水発電ユニットからなるグループを $RSV(k)$ とする。

- 起動停止回数制約

$$\sum_t u_{i,t} \cdot (u_{i,t} - u_{i,t-1}) \leq NSS_i \quad (5.8)$$

計画対象期間における起動回数の最大回数 NSS_i で管理するものとする。

- 燃料消費量制約

$$FL_m^{\min} \leq \sum_t \sum_{i \in FG(m)} FC_i(p_{Ti,t}) \leq FL_m^{\max} \quad (5.9)$$

燃料基地 m に属する 1 つ以上の火力発電ユニットが存在するものとし、それらからなる燃料消費量制約グループ（燃料基地に相当する）を $FG(m)$ とする。

表 5.1 変数と定数の意味

記号	意味
$C_i(\cdot)$	火力発電ユニット i の燃料コストを表す関数 具体的には次の二次多項式で与えられる。 $C_i(p_{Ti,t}) = a_i \cdot p_{Ti,t}^2 + b_i \cdot p_{Ti,t} + c_i$ ($a_i(\geq 0), b_i, c_i$: ユニ ット i の燃料コスト曲線の係数)
$u_{i,t}$	時刻 t の火力発電ユニット i の起動停止状態を表す変数 ($u_{i,t} = 1$: 起動状態, $u_{i,t} = 0$: 停止状態)
S_i	ユニット i の起動コスト
$p_{Ti,t}(> 0)$	時刻 t の火力発電ユニット i の発電量
$r_{Ti,t}(> 0)$	時刻 t の火力発電ユニット i の運転予備力
$ps_{Gj,t}(> 0)$	時刻 t の揚水発電ユニット j の発電量

$ps_{Mj,t} (> 0)$	時刻 t の揚水発電ユニット j の動力量
$r_{PSj,t} (> 0)$	時刻 t の揚水発電ユニット j の運転予備力
$p_{Ti}^{\max}, p_{Ti}^{\min}$	火力発電ユニット i の最大出力値と最小出力値
$ps_{Gj}^{\max}, ps_{Mj}^{\max}$	揚水発電ユニット j の揚発最大出力値と揚水最大動力量
D_t	時刻 t の予測需要 (ただし, 火力揚水分担負荷 (火力機と揚水機により電力供給すべき負荷) とする)
R_t	時刻 t の必要運転予備力
$T_{i,t}^{On}, T_{i,t}^{Off}$	火力発電ユニット i が前回起動時から時刻 t までに運転していた時間と停止していた時間
MUT_i, MDT_i	火力発電ユニット i の最小運転時間制約値と最小停止時間制約値
$W_{k,t}$	時刻 t の貯水池 k における貯水電力量
W_k^{\min}, W_k^{\max}	時刻 t の貯水池 k における最小貯水電力量および最大貯水電力量
η_j	揚水発電ユニット j の揚水効率(%)
$FC_i(\cdot)$	火力発電ユニット i の燃料消費量を表す関数

具体的には次の二次多項式で与えられる。

$$FC_i(p_{Ti,t}) = h_i^a \cdot p_{Ti,t}^2 + h_i^b \cdot p_{Ti,t} + h_i^c$$

($h_i^a (\geq 0), h_i^b, h_i^c$: ユニット i の熱消費量曲線係数)

FL_m^{\min}, FL_m^{\max} 燃料基地 m における使用可能燃料の下限値, 上限値

5.3. 起動停止回数制約と燃料消費量制約を考慮した年間需給計画手法の提案

5.3.1. 提案手法の全体構成

年間需給計画問題（式(5.1)～式(5.9)）には起動停止回数制約と燃料消費量制約が存在するため、制約条件のもと年間一括で起動停止状態と出力値を決定する必要がある。しかし、対象問題の規模（主に対象ユニット数と対象期間の長さ）に依拠）が大きく一括での求解が困難なため、提案手法では計画対象期間の長さを分割して取り扱う。このような求解戦略としては、Decomposition approach^[5]が知られている。原問題の一部の変数およびそれに対応する制約を有する複数の下位問題と、それらの調整を行うための上位問題に、原問題を分割する。上位問題とすべての下位問題の間で必要情報を双方向にやり取りしながら収束閾値を満たすまで繰り返し演算を実行する。しかし、この手法は、問題分割の設計により必ずしも収束が保証されず求解安定性に乏しいこと、繰り返し回数の増大により演算時間の増加を招くことがあり、実用性を重視する計画業務システムには向かない。

提案手法^{[10][11]}の概略フローを図 5-2 に示す。提案手法は 2 つの主要な計算処理から構成される。年間需給計画問題に対して、最初に簡略的な火力／揚水発電計画を高速に実施し、その結果に基づき起動停止回数および燃料消費量に関する制約条件の週間単位への分割を行う「前処理部」(preparative processing)を実行する。次に、制約分割された週間単位の問題に対して詳細な運転コスト最小化を目的とする「本計算処理部」(detailed optimization processing)を実行する。

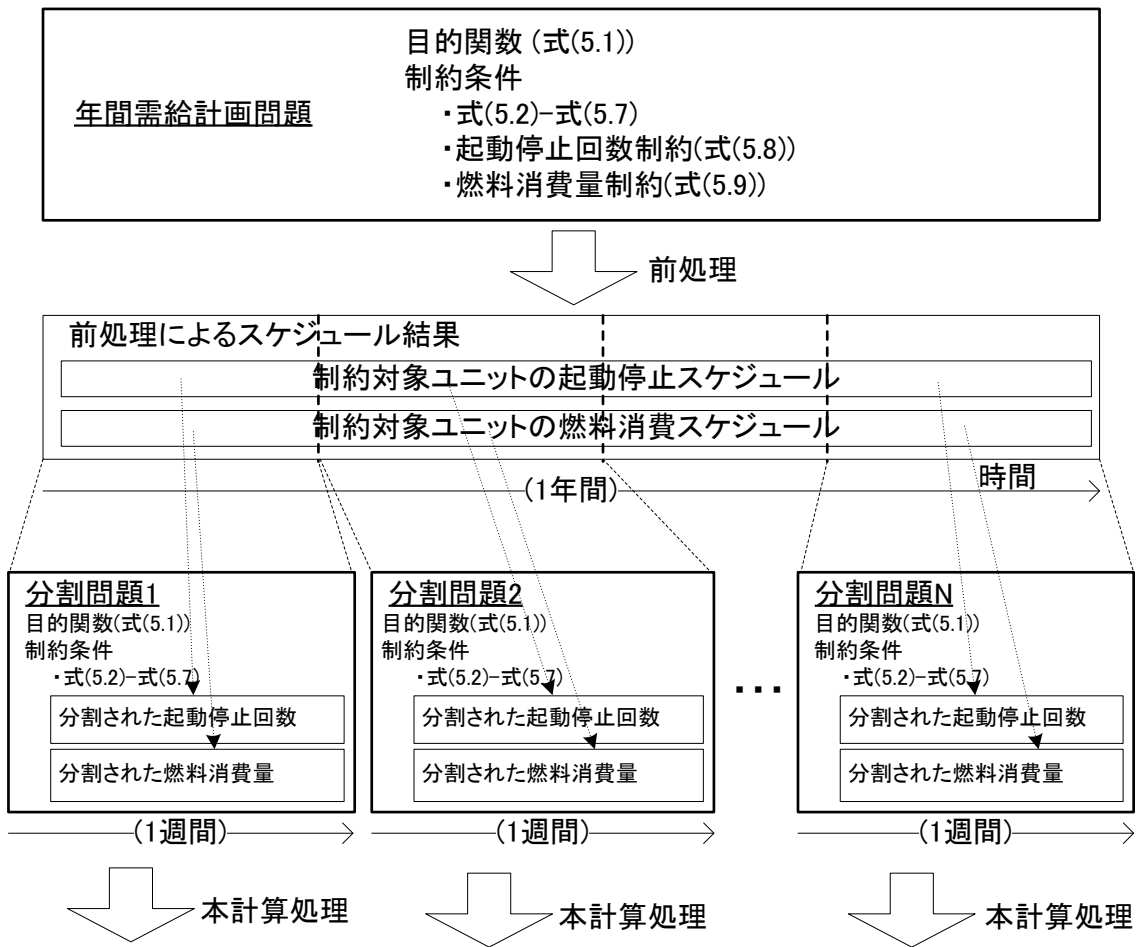


図 5-2 提案手法の演算構成 概略図

5.3.2. 前処理と本計算処理

前処理部と本計算処理部の内部処理フローを図 5-3 に示す。内部処理フローの構成は、前処理部と本計算処理部に共通である。

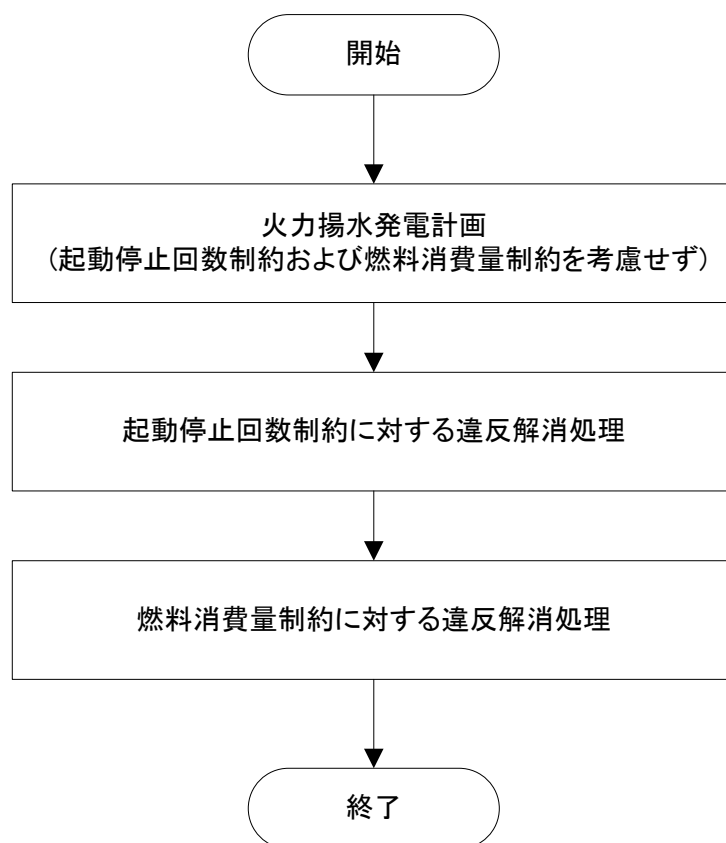


図 5-3 提案手法の内部処理フロー図

最初の処理ステップでは、起動停止回数制約と燃料消費量制約の両条件を考慮しない火力揚水発電計画（以降、この計画結果を“最経済ケース結果”と呼ぶ）を実施する。このステップでは、それぞれの処理の計画対象期間や目的に応じて、以下のように異なる火力計画手法を適用する。なお、揚水発電は全揚水ユニットを 1 ユニットの純揚水としてモデル化し、両処理部とも週間単位を基本とした経済揚水運転として計画する。具体的には、週単位で最も運転コストの高い火力ユニットの昼間ピーク帯を中心とした DSS 運転状態を候補に、運転停止・揚水発電代替および必要水量の夜間揚水を検討し、経済性を判断して運用決定する手順を繰り返す。本研究では、需給バランス維持のための需給対応揚水運転や、予備力/調整力が不足する場合に対応する系統保安揚水運転は考慮していないが、今後、自然エネルギーに基づく分散型電源の導入が進んだ場合には検討が必須となる。

- (1) 前処理 : 優先順位法^[12] (Priority List method) により年間 (8760 時間) を対象に火力発電計画を実行する。火力発電ユニット i の最大出力時の平均発電単価 UGP_i (式(5.10)参照) を経済性指標として UGP_i の昇順にユニット起動優先順位を決定する簡略的な計画手法により, 年間発電計画を高速実行する。

$$UGP_i = \frac{a_i \cdot p_{Ti}^{\max 2} + b_i \cdot p_{Ti}^{\max} + c_i}{p_{Ti}^{\max}} \quad (5.10)$$

このとき, 日単位に昼間・夕方の需要ピーク時間を 2 点抽出し, 抽出時間を中心にユニット起動を優先順位に従って最小運転時間以上で計画する。その前後で最小停止運転時間の違反があれば運転状態を繋ぐ処理を実行して最小運転/停止時間制約に対応する。前処理結果に基づいて, 起動停止回数および燃料消費量を週単位に集計して, 起動停止回数制約および燃料消費量制約の週別制約量として分割する。

- (2) 本計算処理 : Unit Decommitment 法^{[13] [14]}に基づき火力発電ユニットの起動停止計画を, 本論文の第 4 章で述べた大規模問題に対しても高速・安定な求解を実現する二次計画法^[15] (Quadratic Programming) を使用して 1 週間の全時刻断面の出力配分を一括で行い, より詳細な運転コストの最適化処理を実行する。ここでは, Unit Decommitment 法により演算プロセスの中で分割された各ユニットの部分計画問題で最小運転/停止時間制約を考慮した動的計画法 (Dynamic Programming) による起動停止計画の策定を行う。

図 5-3 に示す後段の 2 つの処理ステップには, 起動停止回数制約および燃料消費量制約の違反を解消する個別処理を順に配置する。最経済ケース結果で制約違反が存在すれば, 制約違反を解消する操作を実行すると基本的にコストは増加する。違反解消処理ロジックでは, 違反解消処理に伴うコスト増加を最小に抑制するように設計し, 違反解消処理を繰り返し実行して制約条件を満足する。

5.3.3. 起動停止回数の違反解消

(1) 違反状態の定義と違反解消方策

火力揚水発電計画結果において、ある火力発電ユニットの起動停止回数と燃料消費量で定義される状態を考える。起動停止回数と燃料消費量をそれぞれ横軸と縦軸に取り、両制約を満足する可能解領域と制約違反状態を図示すると図5-4となる。ここでは、起動停止回数の違反状態に着目して4つの状態（状態1～状態4）に分類した。

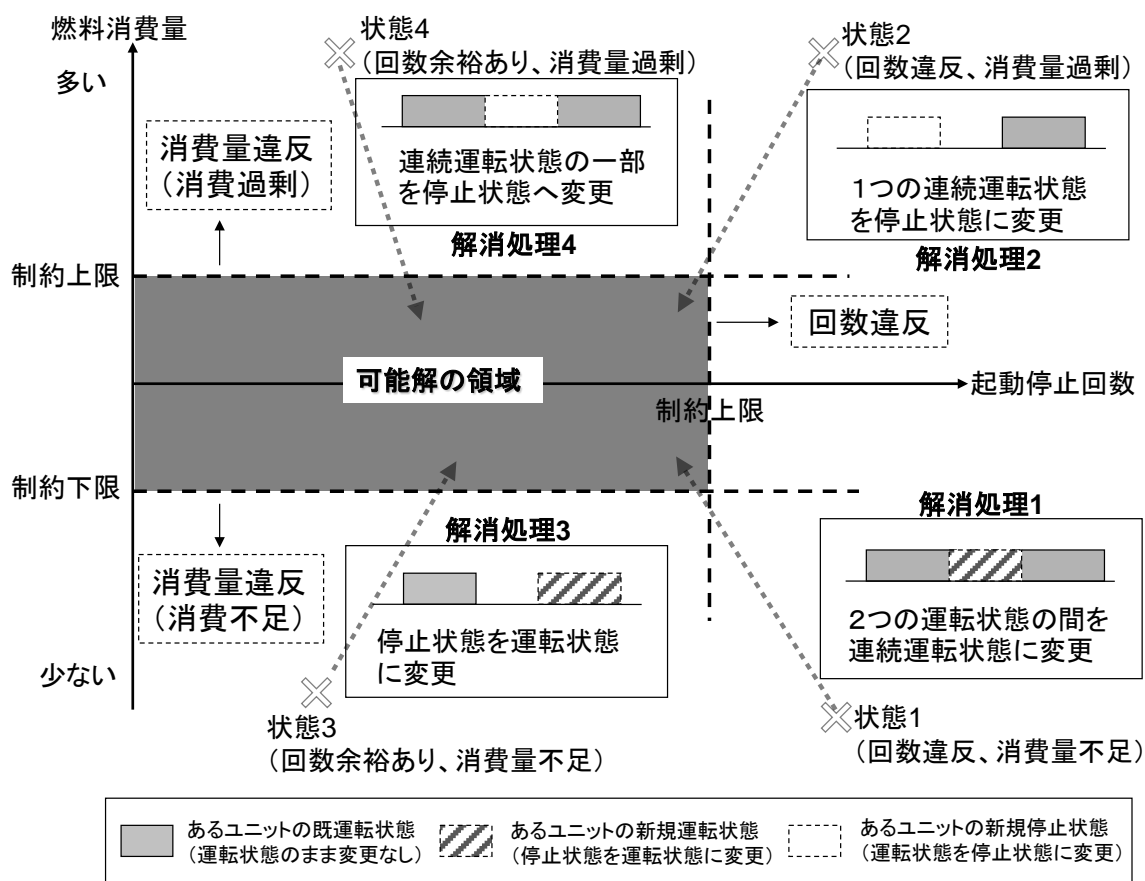


図 5-4 起動停止回数と燃料消費量の制約違反状態とその解消方策

図に示すように、両制約に対する違反解消の相互影響を考慮すると、ある火力発電ユニットについて制約違反状態から可能解領域に向かう状態変更を実現する協調的な解消方策は 4 つ考えられる。その中から起動停止回数の違反状態を解消する方策について説明する。

- 方策 1 :
状態 1 (回数違反, 消費量不足) のとき, 時間軸上で連続する 2 つの火力発電ユニットの運転状態の間の停止状態を運転に変更することにより, 起動停止回数を 1 回低減し, 燃料消費量を増加させる
- 方策 2 :
状態 2 (回数違反, 消費量過剰) のとき, 1 つの運転状態を停止に変更することにより, 回数を 1 回低減するとともに消費量を減少させる

(2) 違反解消に伴うコスト

あるユニットに対して方策 1,2 の実行に伴い発生する変更コスト増分は式 (5.11), 式(5.12)で与えられる。ここで, λ_t は時刻 t のシステムラムダ値である。対象ユニットの運転 (停止) により増加 (減少) する運転コストと, λ_t を利用して対象ユニットの運転状態の変更により他ユニットで出力を代替するための近似的な運転コストとを, それぞれ求めて, その差分により変更コスト増分を求める。なお, 方策 1 の右辺第一項 (運転によるコスト増) の出力は, 燃料消費量不足であることを考慮して, 運転時に最大出力 p_T^{\max} を想定する。

(方策 1 の変更コスト増分 RC_i^1)

$$\begin{aligned}
 RC_i^1 &= (\text{運転によるコスト増}) \\
 &\quad - (\text{代替出力によるコスト減}) \\
 &= \left(\sum_{\tau} (C_i(p_{Ti}^{\max})) - S_i \right) - \sum_{\tau} (\lambda_{\tau} \times p_{Ti}^{\max})
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

(方策 2 の変更コスト増分 RC^2)

$$\begin{aligned} RC_i^2 &= (\text{代替出力によるコスト増}) \\ &\quad - (\text{停止によるコスト減}) \\ &= \sum_{\tau'} (\lambda_{\tau'} \times p_{Ti, \tau'}) - \left(\sum_{\tau'} (C_i(p_{Ti, \tau'})) + S_i \right) \end{aligned} \tag{5.12}$$

ただし,

τ : 方策 1 により運転状態に変更される時間帯,

τ' : 方策 2 により停止状態に変更される時間帯

(3) 違反解消の考え方と処理手順

方策 1, 2 を利用した起動停止回数の違反解消処理の基本的な考え方を次の通りとする。

- 対象となるユニットが, 最経済ケース結果に対して, 起動停止回数制約に違反する場合にのみ違反状態の解消処理を実行する
- 対象となるユニットが燃料消費量制約を持つ場合, 起動停止回数の違反解消を利用して, 燃料消費量違反の緩和を図るように協調をとる
- 対象となるユニットで, 違反解消方策は解消に伴い発生する変更コスト増分 (RC^1, RC^2) が最小となるものから順に適用する

以上から, 最経済ケース結果に対する起動停止回数の違反解消処理手順は次のようになる。

- Step1 制約違反を発生している起動停止回数制約対象ユニットを選択。
- Step2 選択ユニットが燃料消費量制約対象の場合、消費量過剰（不足）ならば、すべての適用可能な時間帯に対して、方策 2（方策 1）を検討し変更コスト増分を求める。燃料消費量制約に違反していなければ、両方策を検討。
- Step3 検討した時間帯の中から、変更コスト増分が最小となる時間帯を選択し、その方策を適用。
- Step4 選択ユニットの制約違反が解消していない場合は Step2 へ戻る。解消した場合には Step5 へ移動。
- Step5 制約違反を発生している起動停止回数制約対象ユニットがあれば、Step1 へ戻る。制約違反を発生している対象ユニットがなくなれば終了。

5.3.4. 燃料消費量の違反解消

(1) 違反解消方策

起動停止回数違反を解消した計画結果において、燃料消費量制約の違反状態が発生しているとき、運転状態変更パターンとユニット出力変更パターンを燃料消費量違反の解消方策として設定する。

各方策の一覧を図 5-5 に示す。燃料消費量制約の違反状態により解消方向が異なり、不足の場合は運転と出力増加を、過剰の場合は停止と出力減少を基本パターン（方策 A±～D±，P±）とする。各パターン適用による起動停止回数の変化は明確に定義される。また、違反解消の検討範囲は、着目する処理日とその前日からなる連続日に限定し、検討した複数パターンの中から最もコスト抑制効果のあるパターンを繰り返し選択適用し、細やかな違反状態の解消を図る。

(燃料消費量不足の場合: 運転(起動), もしくは, 出力増加)

	起動停止状態変更イメージ	起動停止回数 の変化
方策 A+		+1
方策 B+		±0
方策 C+		±0
方策 D+		-1
方策 P+	運転ユニットの発電出力増加	±0

(燃料消費量過剰の場合: 停止, もしくは, 出力減少)

	起動停止状態変更イメージ	起動停止回数 の変化
方策 A-		+1
方策 B-		±0
方策 C-		±0
方策 D-		-1
方策 P-	運転ユニットの発電出力減少	±0

図 5-5 燃料消費量制約違反に対する違反解消方策

(2) 違反解消に伴うコスト単価

すべての変更パターンを共通な評価指標で比較選択するために、以下で定義される「変更コスト単価」を利用する。5.3.3 (2)項の変更コスト増分の算出と同様に、代替出力によるコスト変化を近似計算する。変更コスト増分と燃料消費量制約の違反状態の解消量の比を取り、単位解消量あたりの変更コスト増分を求める。

(燃料消費量不足の場合の変更コスト単価 UC^s)

$$UC^s = \frac{\left\{ \begin{array}{l} \text{(運転/出力変更によるコスト増)} \\ \text{-(代替出力によるコスト減)} \end{array} \right\}}{\text{燃料消費量増加量}} \quad (5.13)$$

(燃料消費量過剰の場合の変更コスト単価 UC^e)

$$UC^e = \frac{\left\{ \begin{array}{l} \text{(代替出力によるコスト増)} \\ \text{-(運転/出力変更によるコスト減)} \end{array} \right\}}{\text{燃料消費量増加量}} \quad (5.14)$$

燃料消費量過剰（不足）の場合、燃料消費量制約グループ（同一燃料基地から燃料供給を受ける全火力ユニットの集合）内で最大（最小）の発電単価を持つユニットが最小の変更コスト単価を与えると想定し優先的に選択して、各日の変更コスト単価として設定する。パターン適用による最小停止（運転）時間制約の違反発生などパターンが適用できない場合には、次に大きい（小さい）発電単価を持つユニットを選択する。各日について、これを変更コスト単価が設定できるまで繰り返す。

(3) 違反解消の考え方と処理手順

各方策を利用した燃料消費量制約の違反解消処理の基本的な考え方を次の通りとする。

- 対象とする燃料基地が、起動停止回数違反を解消した計画結果に対して、燃料消費量制約に違反する場合にのみ解消処理を実行する
- 違反解消方策の適用により変化する起動停止回数を管理し、起動停止回数制約違反を新たに発生させないようにする
- 対象とする燃料基地で、違反解消方策は解消に伴い発生する変更コスト単価 (UC^s, UC^e) が最小となるものから順に適用する

起動停止回数違反を解消した結果に対する燃料消費量制約の違反解消処理手順は次のようになる。

- Step1 制約違反を発生している燃料消費量制約グループを選択。
- Step2 燃料消費量過剰（不足）の場合、グループ内で最大（最小）の発電単価を持つユニットを選択。
- Step3 選択ユニットに対して、各日で最小運転／停止時間の制約を考慮して制約違反を発生させない適用可能な全方策の変更コスト単価を求める。
- Step4 変更コスト単価が最小となる方策を1つ採用。
- Step5 選択グループの制約違反が解消していない場合は Step3 へ戻る。解消した場合には Step6 へ遷移。
- Step6 制約違反を発生している燃料消費量制約グループがあれば、Step1 へ戻る。制約違反を発生しているグループがなくなれば終了。

5.4. シミュレーションによる有効性検証

5.4.1. シミュレーション条件

提案手法の有効性を検証するために、実系統規模の条件でシミュレーションを行った。

- 計画対象期間と想定需要：

計画期間を1年間（4/1～3/31）とし、時刻別火力揚水分担負荷を与える。（図 5-6 参照。図は横軸に週の開始日を取り、週別総負荷量として示す。当該年の1週目と53週目は4日間のため負荷が小さく見える。）

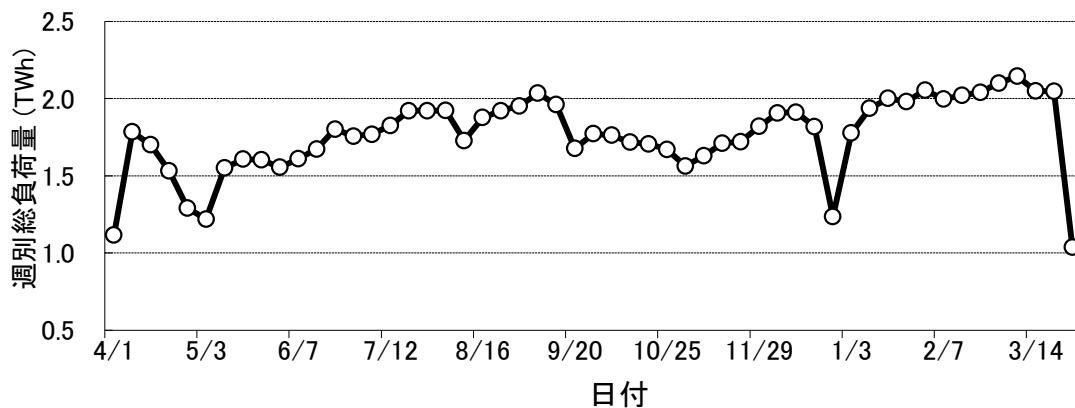


図 5-6 週別総火力・揚水分担負荷グラフ

- 計画対象発電機：

火力機 50 機（石油機 7，LNG 機 38，石炭機 5），揚水機 1 機

- LNG 燃料基地：

3 基地（基地 A，基地 B，基地 C）

- 運転予備力：

総需要の 8% 以上

- 発電機の定期検査スケジュール：

当該計画期間の実績データに基づいて対象発電機に停止スケジュールを設定

- 燃料消費量制約：

各 LNG 燃料基地とも最経済ケースの消費量の 0.80 倍とし，燃料消費量の抑制が必要な場合を想定（表 5.2 参照）
- 起動停止回数制約：

3 つの燃料基地のうち基地 A に属する一部の LNG 発電ユニット，および基地 C に属する全ユニットに対して表 5.2 に示す回数の範囲で起動停止回数制約を設定（ただし，基地 B のユニットは起動停止回数制約を持たない）。各ユニットに対する回数制約も最経済ケースのときより回数低減が必要となる場合を想定。

表 5.2 起動停止回数と燃料消費量のシミュレーション条件

発電所種別	ユニット数	LNG 燃料基地 (ユニット数)	燃料消費量制約 (設定比率*)	起動停止回数制約 ⁺ (対象ユニット数)
石油火力	7		—	—
LNG 火力	38	基地 A (14)	0.80	25～60 (12)
		基地 B (10)		—
		基地 C (14)		45～60 (14)
石炭火力	5		—	—

* 最経済ケースの燃料消費量に対する比率で設定（燃料消費量制約および起動停止回数制約を考慮しない場合）→比率が 1.0 未満のとき，燃料消費量の抑制が必要となる

+ 各ユニットに対して与えられる回数が異なる

5.4.2. シミュレーション結果と考察

(1) シミュレーション結果の検証

燃料消費量制約と起動停止回数制約の両者を持つ LNG 発電ユニットが属する基地 C と燃料消費量制約のみを持つユニットが属する基地 B について、本計算処理の各処理段階における週別燃料 (LNG) 消費量を図 5-7 に示す。図 5-7 では、3 種の棒グラフにより、

最経済結果 (薄い灰色網掛け) →

起動停止回数制約違反解消処理結果 (赤枠透明) →

燃料消費量制約違反解消処理結果 (濃い青色塗潰し)

の変化を確認できる。黒色折れ線グラフは、前処理結果により分割された週別燃料 (LNG) 制約量を示す。なお、基地 B には起動停止回数制約を持つユニットがないため当該処理結果 (赤枠透明) の棒グラフが存在しない。

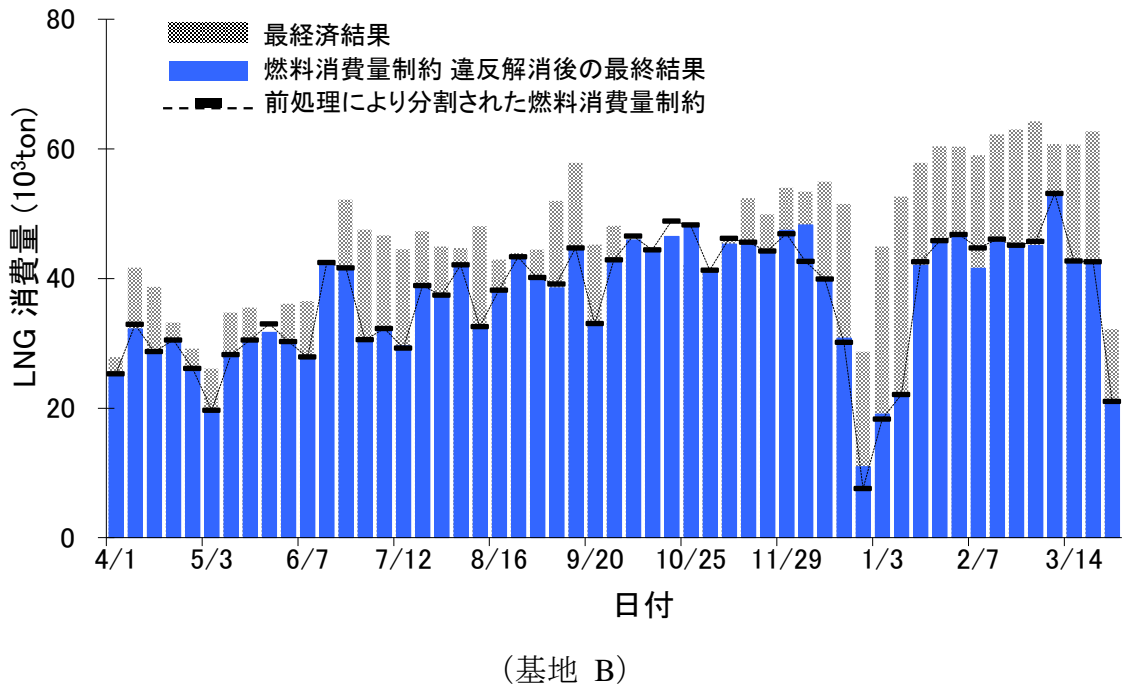
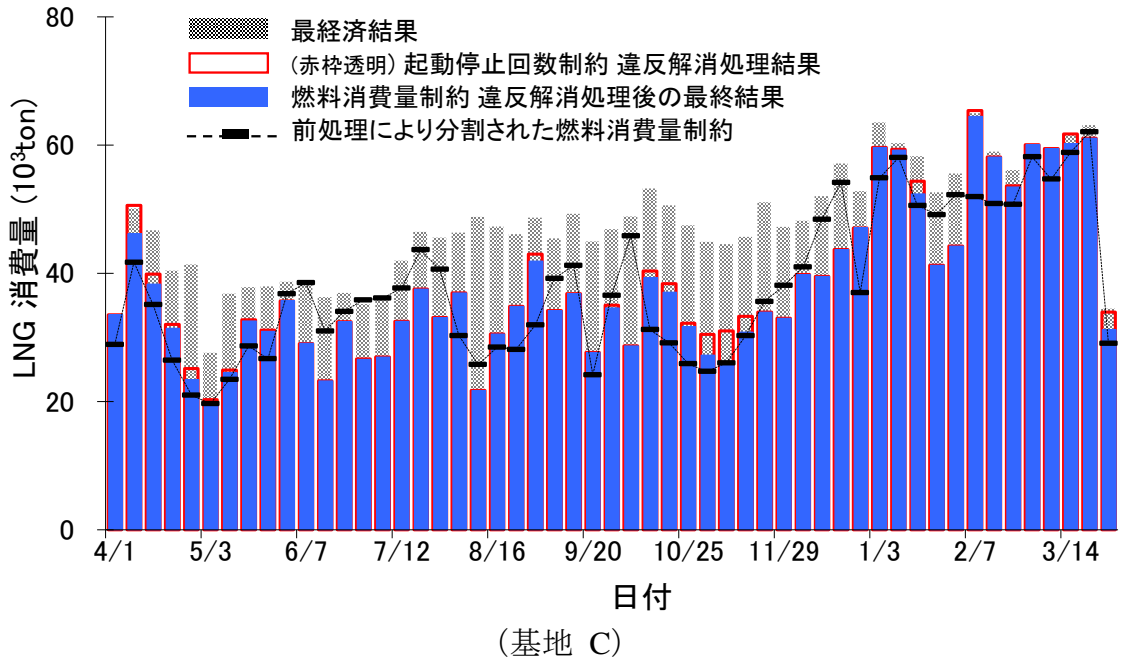


図 5-7 本計算処理の各処理段階における週別燃料 (LNG) 消費量
 (基地 C と基地 B)

また、起動停止回数制約違反解消処理の状況を確認するため、基地 C に属するあるユニット（回数制約 60 回）における週別起動停止回数の変化を図 5-8 に示す。図 5-8 でも図 5-7 と同様に 3 種の棒グラフにより結果を表示する。基地 C, B に属するあるユニット（基地 C のユニットは図 5-8 と同一）の燃料消費量違反解消処理における各解消方策の適用回数を図 5-9 に示す。

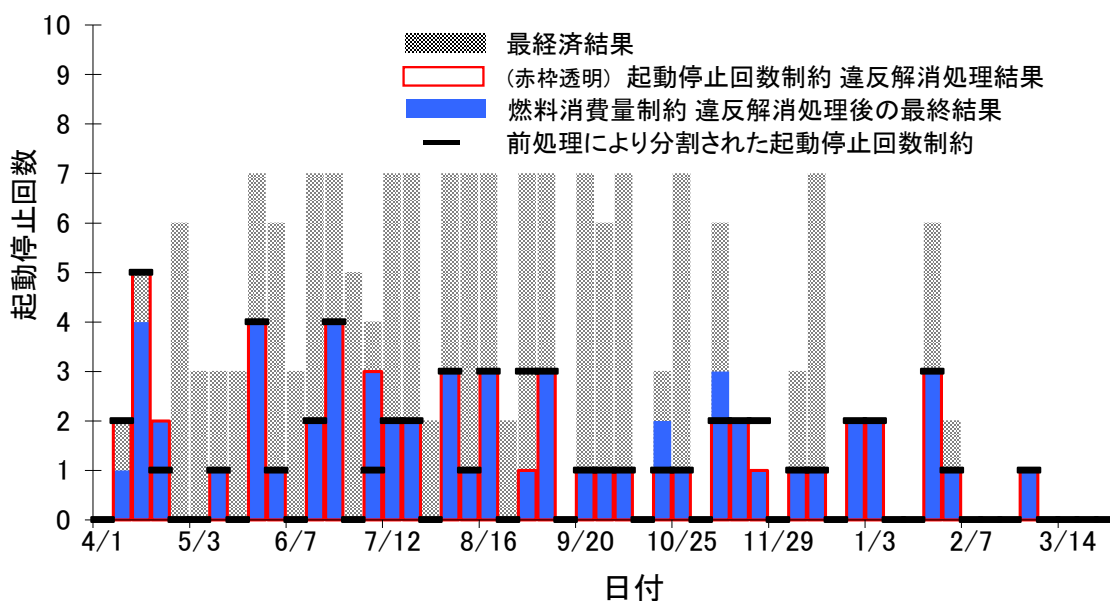
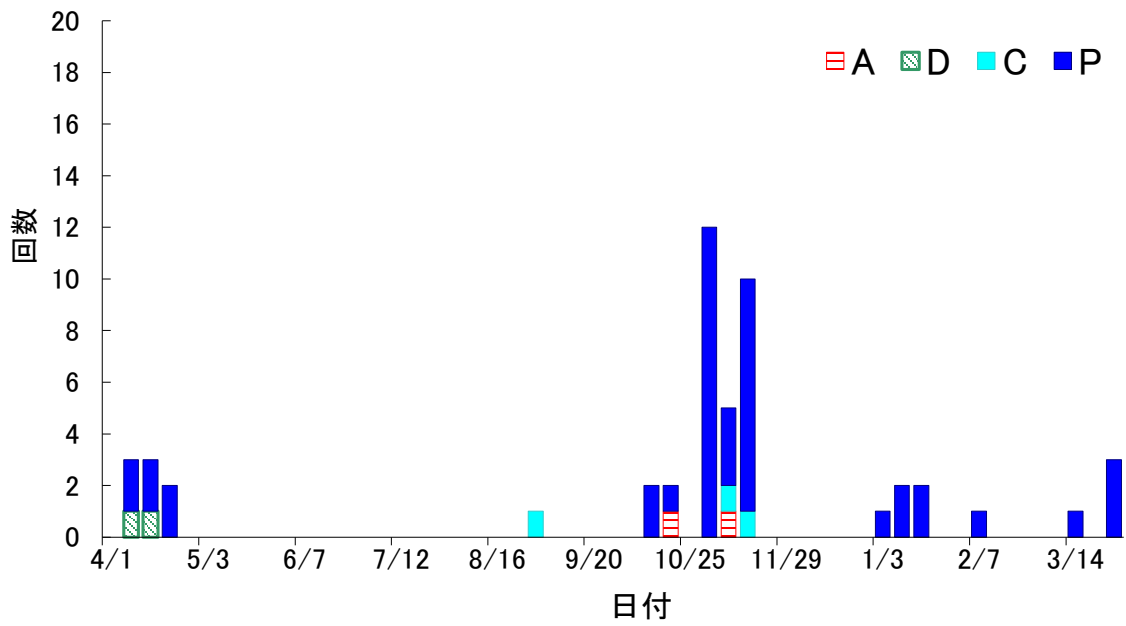
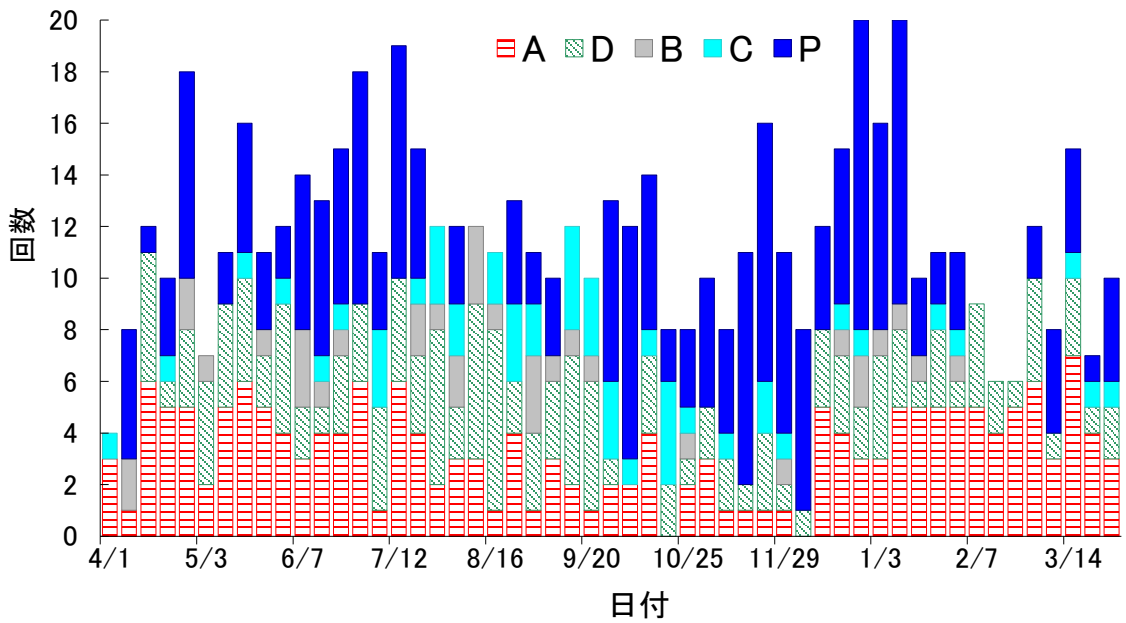


図 5-8 本計算処理の各処理段階における週別起動停止回数
(基地 C に属するある火力ユニット)



(基地 C)



(基地 B)

図 5-9 燃料消費量違反解消処理における各解消方策の適用回数
(基地 C と基地 B)

計画手法のアルゴリズムフローにしたがって、まず起動停止回数制約違反解消処理の結果を検証する。図 5-7 より、基地 C では、最経済結果（薄い灰色網掛け棒グラフ）の燃料（LNG）消費量が主に 4 月～12 月に掛けて（赤枠透明棒グラフ）で表される起動停止回数制約違反解消処理後の燃料（LNG）消費量へと抑制されている（両グラフの偏差として薄い灰色網掛け棒グラフが透けて確認できる）ことから、まず起動停止回数制約違反解消処理により最経済結果の違反回数の低減を図ると同時に、燃料（LNG）消費量を効果的に抑制していることが分かる。このとき、図 5-8 のユニットの起動停止回数制約違反解消は、赤枠透明棒グラフが示す通り、前処理による制約量（週単位の配分回数：横線でグラフ中に表示）を基本的に満足するように実行される。このとき、起動停止回数は主に冬季重負荷期以外の期間（4 月～12 月）に多く抑制されることが分かる。これは、方策 2 による停止状態への変更に対して低コストユニットによる代替が可能な期間やピーク時間が短い時間を選択している結果であり、冬季はピーク時間が長く代替機出力によるコスト増分が大きくなり選択されにくいからである。なお、4 週目（4/19～）と 15 週目（7/5～）では、違反解消処理により制約回数を満足することができず、23 週目（8/30～）にその分を抑制している。4、15 週目は、定期検査のため停止している複数ユニットの影響で、運転予備力確保の点から当該ユニットの起動停止状態の変更により起動停止回数を低減できない。前処理と本計算処理で採用した計画アルゴリズムの違いにより、前処理結果に基づく制約量と本計算処理結果にこのような差異を生じる場合があった。一部のこのような違反量が残存する場合に対応するため、後続週で速やかに解消するように提案手法を実装した。

次に、燃料消費量制約違反解消処理の結果について検証する。基地 B では違反解消処理により週単位の制約量にほぼ一致する形で燃料（LNG）消費量が抑制されていることが分かる（図 5-7 参照、制約量との一部の差異は前述と同じ理由に依る）。図 5-9 から、起動停止回数に制限がないため回数変化を伴う方策 A や D を含めて、状態に応じたさまざまな方策を適用することで実現されている。一方、基地 C では、必ずしも週単位で制約量を満足していない。この理由は下記の通りである。

- 起動停止回数制約違反解消処理で週単位の制約回数を必ずしも満足する状態にならない
- 起動停止回数制約違反解消処理が優先実行され、方策 2 の停止状態への変更が燃料消費量に離散的な変化を与える
- 燃料消費量制約違反解消処理では起動停止回数の制限により主に方策 P の適用となり、解消方策の多様性に欠ける（図 5-9 参照）

なお、図 5-9 では、第 2 週目（4/5～）および第 3 週目（4/12～）で選択された方策 D（起動停止回数：-1 回）により、第 30 週目（10/18～）および第 33 週目（11/8～）で方策 A（+1 回）が選択されている（起動停止回数制約の違反解消と同様に、本手法の実装において、各週の消費量違反が残存する一部の場合に後続週と過不足を解消するようにした）。全体的に見ると、基地 C に属するユニットの発電コストが安価なため、燃料（LNG）消費量も代替ユニット出力によるコスト増分が小さい期間に消費量が抑制されており、適切に燃料配分が計画されている。

本検証問題の求解に要した演算時間は 606 秒（前処理：176 秒，本計算処理：430 秒）であった（演算環境 CPU：Core i7 2.7GHz×2，メモリ：8GB，OS：Windows7 Pro 64bit）。提案手法は、年間計画を一括で実行する前処理結果に基づき燃料消費量制約および起動停止回数制約を週単位の配分して、本計算処理にて詳細な週間計画を順次実行する演算構造で収束処理を含まないため、安定な求解動作を示した。

一方で、その演算構造のため演算結果は厳密な最適解とはならず、制約を充足した実行可能解となる。最経済結果から制約違反を解消する処理は、5.3.3 節と 5.3.4 節で述べたように逐次処理であるが需給運用の考え方に基づく精細な修正方式である。年間需給計画では、主として LNG 発電ユニットに燃料消費量制約および起動停止回数制約が与えられることが多い。本検証問題では LNG 発電ユニット（38 台）が過半を占める火力電源構成とユニット運転コストの関係から、これらユニットの停止または出力抑制による減少分はほぼ全量を石油発電ユニット（7 台）で代替するため、代替ユニット候補が限定された解空間で演算結果は比較的良い近似になっていると推察される。

(2) 燃料制約と起動停止回数制約の協調的な違反解消の効果

燃料制約違反解消との相互影響を考慮した起動停止回数違反解消方策の効果を検証するために、燃料消費量の過不足を考慮せずに方策 1, 2 の中から方策を選択適用して起動停止回数を低減する。具体的には、解消処理手順の Step2. で消費量の情報を参照せずに、両方策を検討対象として変更コスト増分を求める。Step3. では最小のコスト増分を与える方策と時間帯を選択して適用するものとする。

シミュレーション結果から、基地 C の本計算処理の各処理段階における週別燃料消費量を図 5-10 に示す。

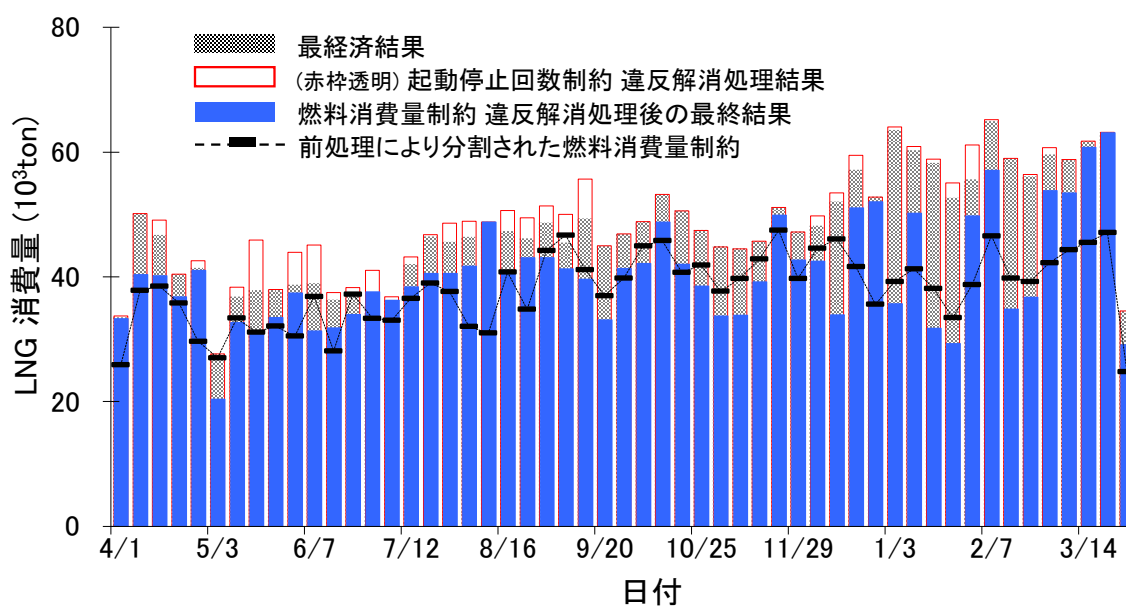


図 5-10 本計算処理の各処理段階における週別燃料 (LNG) 消費量
(基地 C)

最経済結果（薄い灰色網掛け棒グラフ）は図 5-7 と同じである。図より、発電コストが安価であるため方策 1 を優先的に選択して起動停止回数違反を解消することにより、燃料消費量を増加させており（赤枠透明棒グラフ）、結果的に最終段の燃料消費量制約違反解消時に大きな解消量が必要となる。また、全体的な燃料消費量は代替ユニット（主に石油発電ユニット）の出力によるコスト増分が大きい冬季にも抑制されており、全体運転コストの面から適切な燃料配分とは言えない。全体運転コストを比較すると、相互影響を考慮しない場合は提案手法に比べて約 0.86%（本シミュレーション条件では運転コスト数十億円に相当）大きくなる。

以上から、起動停止回数制約と燃料制約がある場合、年間計画期間において、両者の違反解消時の相互影響を考慮した起動停止状態の適切な配置は全体運転コストの低減に重要な役割を果たすことが分かる。

5.5. 結言

本章では，起動停止回数制約および燃料消費量制約が共に存在する年間需給計画問題を安定して効率的に求解するため，両制約を除外した問題の求解結果を初期状態とし，両者の制約違反解消による相互影響と運転コスト増分を考慮して逐次解消を図る実用的な手法を提案した。

提案手法の有効性を確認するため，実系統規模の年間需給計画問題を用いて評価を行った。その結果，燃料消費量制約の違反解消に対して，提案手法は起動停止回数制約を持つ発電機の起動停止状態を発電コストの観点から効果的に配置していることを，起動停止回数制約のない発電機との比較により明らかにした。また，両制約の協調的な違反解消を無視した場合の実験を行い，年間需給計画において協調的な違反解消を明示的に考慮した本アルゴリズムが運転コストを低減した計画結果作成のために重要であることを示した。

なお，本章で提案した計画アルゴリズムは電力会社の年間需給計画システムに実装されて実運用されている。図 5-1 に示したように，当該システムは関連部門との調整を行う中核機能として実業務で運用され，定検補修計画立案や燃料受入計画を担当する各部門とのスケジュール調整に際して，本機能を使用して運用計画上の年間火力コストおよび静的供給信頼性（年間を通じた供給力確保（kW 計画））を繰り返し評価・検討するために使用されている。実用システム適用の観点から，提案アルゴリズムは燃料消費量制約および起動停止可能回数制約を考慮しない状態の最経済計画結果から制約違反解消のための運転状態の変更理由を明らかにする必要がある。そのため，燃料消費量制約および起動停止可能回数制約の相互影響を外部で明確に定義して，制約違反解消のために必要なコストを制約違反解消ステップ毎に記録して参照可能なようにしている。

参考文献

- [1] 相内強, 菅原宣孝, 西谷健一, “階層構造に基づく系統内火力発電機群の運用計画決定手法”, 平成 8 年電気学会電力・エネルギー部門大会, pp.55-60, 1996
- [2] 山城迪, 今野互, 佐藤正廣, “燃料消費量制約を考慮した火力発電機群の月間起動停止計画決定手法”, 電気学会論文誌 B, Vol.115, No.11, pp.1331-1336, 1995
- [3] S. Vemuri, L. Lemonidis : “Fuel constrained unit commitment”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.7, No.1, pp.410-415, Feb. 1992
- [4] R. Baldick : “The generalized unit commitment problem”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.10, No.1, pp.465-475, Feb. 1995
- [5] L.F.B. Baptistella, J.C. Geromel : “Decomposition approach to problem of unit commitment schedule for hydrothermal systems”, *IEE Proc. D*, Vol.127, 6, pp.250-258, 1980
- [6] P.P.J.van den Bosch, G.Honderd : “A Solution of the Unit Commitment Problem via Decomposition and Dynamic Programming”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol.PAS-104, No7. pp.1684-1690, July 1985
- [7] C.W. Richter, G.B. Sheble : “A profit-based unit commitment GA for the competitive environment”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.15, No2. pp.715-721, May 2000
- [8] J. Valenzuela, M. Mazumdar : “Probabilistic Unit Commitment Under a Deregulated Market”, *The Next Generation of Unit Commitment Models*, Kluwer Academic Publishers, pp.139–152, 2000
- [9] S. Takriti, B. Krasenbrink and L.S.Y. Wu : “Incorporating fuel constraints and electricity spot prices into the stochastic unit commitment problem”, *Operations Research*, Vol.48, pp.268–280, 2000
- [10] 伊佐治圭介, 高橋順一, 橋本博幸, 平野秀明, 広瀬公一, “起動停止回数と燃料消費量に制約のある年間需給計画手法の検討”, 平成 20 年電気学会全国大会, No.6, pp.188-189, 2008

- [11] 平野秀明, 橋本博幸, 広瀬公一, 伊佐治圭介, 高橋順一, “起動停止回数と燃料消費量の制約を考慮した年間需給計画手法の開発”, 平成 20 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-08-109, PSE-08-115, pp.7-12, 2008
- [12] A.J. Wood, B.F. Wollenberg : *Power Generation, Operation, and Control*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1996
- [13] C.A. Li, R.B. Johnson, and A.J. Svoboda : “A New Unit Commitment Method”, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.12, No.1, pp.113-119, 1997
- [14] C.L. Tseng, S.S. Oren, A.J. Svoboda and R.B. Johnson : “A unit decommitment method in power system scheduling”, *Electrical Power & Energy Systems*, Vol.19, No.6, pp.357-365, 1997
- [15] 橋本博幸, 高口雄介, 中村静香, “有効制約の推定機構を持つ内点法に基づく二次計画アルゴリズムの開発”, 電気学会論文誌 C, Vol.130, No.6, pp.1061-1071, 2010

6. 結論

本研究では、大規模電力系統における供給信頼性の向上対策手法について、(1) 動的な供給信頼性の確保と、(2) 静的な供給信頼性の確保の両面から課題を抽出し、それらの解決策を検討した。具体的には、動的な供給信頼性の視点から、負荷変化により駆動される電圧変動が影響する不安定現象を計算機シミュレーションにより定量的に評価する手法と、系統擾乱発生に対処するオンライン周波数安定化システムの制御精度向上のための負荷脱落量推定手法に着目し研究を行った。次に、静的な供給信頼性の視点から、電源設備の設備故障リスクを低減するために定期検査間の起動停止回数の上限を考慮した年間需給計画手法について研究を行った。また、需給計画手法の研究に先立って、年間需給計画の求解に必要な発電機出力決定問題を含む大規模な汎用二次計画問題を高速・安定に求解する最適化演算アルゴリズムの研究を行った。

本研究で得られた研究成果の要点について、各章ごとに以下にまとめる。

6.1. 研究の成果

第 2 章では、負荷変化に対する系統の安定性に対してエネルギー関数を使用した定量的な評価手法について検討を行った。エネルギーマージンを評価指標とし、評価手法のベースとして second-kick 法を採用した。本研究では、動的な供給信頼性の確保のため系統安定化機器（代表例として SVC）を系統に導入する場合を考え、導入による安定性向上効果を定量的に評価・検証した。

Second-kick 法は、外乱発生時の系統応答に関する完全な情報を時間領域シミュレーションにより獲得するため、精度の高い評価が可能である。しかし、本手法に基づく評価アプローチは、従来、系統故障発生時の過渡（位相角）安定度を評価対象としたものであり、負荷変化により駆動される不安定現象の評価方法として適していないという課題があった。これに対して、ポテンシャルエネルギーを記述する式を構成する要素項の中で、系統の無効電力と発電機の運動エネルギーに関係する 2 つの項に着目し、従来手法と提案手法におけるエネルギー変化の違いを明らかにし、不安定メカニズムに対して適切な項のピーク値を参照して second-kick 適用タイミングを決定する新しい手法を提案した。モデルシステムを用いたシミュレーションにより、提案手法は短時間領域における負

荷変化により駆動される不安定メカニズムを考慮した新しい second-kick 法として有効であることを示した。

本研究で得られた知見は、電力系統に系統制御機器を導入したときの安定度向上効果について、同一の評価手法の枠組みを使用して異なる不安定メカニズムによる系統故障による過渡（位相角）安定度と負荷変化により駆動される系統の安定度を定量的に評価することを可能とするものであり、系統制御機器による動的な供給信頼性の維持・向上対策の総合的な検討に寄与するものである。

第 3 章では、オンライン周波数安定化システムにおいて、制御仕上りに大きな影響を与える負荷脱落量について、過去に計測された故障実績データの特性分析情報を用いた推定方法について検討を行った。

電力系統では系統故障発生時の電圧低下に伴い負荷構成機器の一部が自律的に系統から離脱する負荷脱落が観測される。負荷脱落量をオンライン推定することができれば、故障除去後数百 ms 内で動作するオンライン周波数安定化システムにおいて制御量決定時の不確定要因を回避し制御精度の向上につながる。しかし、故障除去後の短時間領域（オンライン推定結果を制御量に反映可能な時間）では負荷動特性に起因した過渡特性が重畳した観測波形となるため動特性の処理が課題である。本研究では、故障時の実測データにより負荷動特性モデルのパラメータ特性分析を行った結果、動特性分パラメータについて有用な特性を確認した。実際の故障発生時に特性情報を利用して故障除去直後の短時間領域における電圧と有効電力計測波形に基づいて負荷脱落量をオンライン推定する手法を提案した。推定手法は、特性情報の利用により故障除去直後の負荷の過渡特性分を計測データから効率的に低減することで、主に静特性分を含むデータに変換して故障除去後の負荷量を推定し負荷脱落量を算出することを特徴とする。提案推定方法を変電所の実測データに基づいて検証した結果、故障除去直後 100ms 間の計測波形データを使用して 1% 台の誤差で負荷脱落量を推定可能であることを示し、有効性を確認した。

本研究で得られた知見は、高速な制御動作が必要なオンライン系統安定化システムの制御精度向上に非常に有効である。現状は他系統の統計的な調査結果に基づいた簡素な推定のみとなっている負荷脱落量推定の性能を大きく向上させ、特に基幹系統から切り離された単独分離系統が発生する過酷な故障ケース

において周波数維持の観点から動的な供給信頼性の向上に寄与することが期待できる。

第 4 章では、静的な供給信頼性の確保のために需給運用業務の中で実施される経済負荷配分問題を含む、大規模な一般二次計画問題の求解手法について検討した。近年の計算機能力の飛躍的な増大ならびに最適化技術の理論面における発展に伴って、電力システム分野では需給計画への最適化技術の導入が進んでいる。しかし、実用システムへの最適化技術の適用に際しては、対象問題の規模に起因する計算の不安定化と演算時間の増大が課題となっている。本研究では、大規模な一般二次計画問題に対する両課題の克服を目指し、内点法に有効制約法の求解戦略を取り入れた「変数の有効制約に関する推定機構を持つ内点法」を提案した。提案手法の特徴は、対数障壁関数を導入した上で、各演算ステップで上下限制約に接近する変数があればこれを制約が活性な変数と推定して上下限值に固定し、ラグランジュ乗数の近似値を用いて「制約が活性な変数のラグランジュ乗数は非負である」という条件が満たされない場合には固定変数の解除を行う、という動的な制御を行う点にある。

提案手法の有効性を確認するため、web で入手可能な一般的なベンチマーク問題ならびに実用問題の代表例として経済負荷配分問題を用いて従来手法との比較評価を行った。その結果、最適解への探索過程における求解プロセスの中で、変数の固定／解除が動的に的確に実行されることが確認された。さらに、変数の固定化処理が求解演算における修正方程式の行列の条件数を低減し、求解演算の安定化を実現していることを明らかにした。これら比較評価の検証を通じて、提案手法が一般的な内点法と同等以上の処理速度を持ち、より高い正答率を示すことを確認した。特に、大規模問題に対してより高い求解性能を示したことから、内点法の実用的な改良手法として有用性が高いと考えられる。また、二次の非線形制約を持つ数万変数の大規模な経済負荷配分問題でも安定した求解性能を示し実用性が高いことが分かった。このことから、汎用的に一般二次計画問題として定式化される広範な実用問題に対して大きな貢献を期待できる。

本章の研究成果は、第 5 章の年間需給計画手法の実現を支える重要な技術のひとつとなっている。

第 5 章では、起動停止可能回数と燃料消費量に対する制約条件を考慮した年間需給計画問題を、安定して効率的に求解するための実用的な手法を検討した。電源設備は設備故障リスクを低減するために、次回定期検査までの期間（1 年間程度）は起動停止回数に制限を設けて静的な供給信頼性の確保を図っている。そのため、年間需給計画では起動停止回数制限まで適切に考慮して、年間を通じた供給能力の適切な管理が課題であるが、起動停止回数制限を考慮した需給計画手法はこれまでに報告されていなかった。

本研究では、起動停止回数制約および燃料消費量制約が共に存在する年間需給計画問題を安定して効率的に求解するため、両制約を除外した問題の求解結果を初期状態とし、両者の制約違反解消による相互影響と運転コスト増分を考慮して逐次解消を図る実用的な手法を提案した。提案手法の有効性を確認するため、実系統規模の年間需給計画問題を用いて評価を行った。その結果、燃料消費量制約の違反解消に対して、提案手法は起動停止回数制約を持つ発電機の起動停止状態を発電コストの観点から効果的に配置していることを明らかにした。また、両制約の協調的な違反解消を無視した場合の実験を行い、年間需給計画において協調的な違反解消を明示的に考慮した本手法が運転コストを低減した計画結果作成のために重要であることを確認した。

本研究成果である計画手法は電力会社の年間需給計画システムとして実運用に供しており、非常に有用性が高く、静的な供給信頼性を確保する実用上の役割を十分に果たしている。

6.2. 今後の課題

今後の課題としては、分散型電源の導入増加、電力自由化の進展や電力システム改革による広域運用の拡大といったさまざまな環境変化の下で電力システムの安定供給を維持するため、動的な供給信頼性と静的な供給信頼性を経済的かつ相補的に協調確保するトータルなシステム構築が重要である。本研究の成果は各供給信頼性の向上対策に資するものであるが、将来的には各供給信頼性に対して下記の課題が挙げられる。

動的な供給信頼性の確保の視点では、故障波及防止のための系統安定化システムにおける不確定要因増大への対処が課題である。上述したさまざまな環境変化により、将来系統では従来と異なる潮流状態が発生する可能性があり、出力が制御できない分散型電源も多数存在することから、系統安定化システムによる制御量算出（発電機制御量や負荷制御量）における不確定要因の更なる増大が懸念される。不確定要因の推定手法としては、本研究の第 3 章で述べた負荷脱落量の推定があるが、予測・推定が困難な系統状況の変化に適切に対応するためには故障発生タイミングで制御量演算を実行する方式の適用が実効的であると考えられる。特に過渡安定度制御に関しては、想定故障ケースに対して詳細安定度計算シミュレーションを事前に実行して制御量を算出しておく、現行系統安定化システムに適用されている安定化方式ではなく、不確定要因の影響を極力排除するために制御量算出演算の実施タイミングを故障発生時としてオンデマンドに演算を実行する方式が必要になる。さらに、将来の計算機技術と情報通信技術の発展により、故障発生後の系統現象を詳細安定度計算で実時間よりも高速に演算することが可能になると想定される。故障発生時に起動して、実時間を超える演算速度を持つ詳細安定度計算により短時間先の系統安定度を予測して的確な安定化制御を実施する、言わば“オンデマンド事後予測演算型”の方式が必要になる。この方式の実現には、高速な計算機 H/W の開発、太陽光発電など分散型電源の外乱発生時の動作を含む詳細安定度計算モデルの開発や分散型電源の広域に亘る出力推定手法の確立が課題である。

また、電源の遠隔地への設置により基幹システムまでの長距離大容量送電が行われる電源系統では、故障発生時に単一の系統異常現象（周波数、電圧、過渡安定度）の個別発生ではなく、複数の現象（過渡安定度と電圧、周波数と電圧）

が同時発現する複合問題の発生が報告されている。原子力発電の休廃止や電力自由化の進展による電源の新規建設増加が複合問題の発生を助長する懸念がある。周波数・電圧・過渡安定度の各問題は電力システム・ネットワークとして有機的に結合したシステム上で発生する相互影響を有する現象であり、このように相互影響が強く現れる系統構成や潮流状態では、従来の単一の問題に着目した安定化制御の同時実施では複合問題には対処できない。複合問題に対応した系統安定化システムの実用化は緒に付いたばかりである。複合問題の相互影響を考慮した制御方式には、系統の潮流方程式を組み込んだ最適潮流計算(OPF; Optimal Power Flow)上で各問題に対する制御量を同時に決定する必要がある。過渡安定度制約を組み込んだ最適潮流計算の研究が報告されているが、系統安定化システムへの応用は今後の課題である。

次に静的な供給信頼性の確保の視点では、将来の電力制度改革後の電力システムに適応して、年間レベルから実需給の時間前レベルまでを計画対象期間とするそれぞれの需給計画において適切な静的供給信頼性を確保し、各需給計画が整合性を取って連動するトータルな需給運用業務システムの構築が課題である。このとき、技術的には下記のような課題を検討する必要がある。本論文の第5章で述べたように、通常、需給計画段階では静的な供給信頼性を第一の課題とし、運用段階では系統の安定性の観点から動的な供給信頼性を検討する。しかし、動的な供給信頼性の確保が困難な系統構成や潮流状態となって供給能力にまで影響を及ぼす場合には、需給計画段階から動的な供給信頼性を静的な供給信頼性に組み込んでいく必要がある。これには系統側の潮流状態を制約条件に付加した需給計画問題を解く必要がある。また、自然エネルギーに基づく分散型電源を基幹系統電源と統合して需給計画を行う場合、天候に左右される出力の不安定さの取り扱い方の検討が課題である。系統側の潮流状態もその不安定な出力の影響を受けるため、上記の動的な供給信頼性を折り込んだ需給計画の考え方も検討する余地がある。実用的な観点からは、分散型電源の出力予測の確率分布などを考慮し、信頼性と経済性を両立する確率論的な需給計画手法の開発が期待される。

謝辞

本論文は、主として著者が三菱電機株式会社 先端技術総合研究所で行った研究を東京大学大学院工学系研究科 横山明彦教授のご指導のもとにまとめたものである。横山教授にはご多忙の中、本論文をまとめるにあたり懇切なご指導を賜りました。また、論文の査閲と討論を賜りました、東京大学大学院工学系研究科 谷口治人特任教授，日高邦彦教授，松橋隆治教授，藤井康正教授，東京大学大学院新領域創成科学研究科 馬場旬平准教授に謹んで厚く御礼申し上げます。

著者が所属する三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 ソリューション技術部 部長 石原鑑博士には最良の研究環境と本論文を執筆する機会を与えて頂きました。また、同社 電力流通システム部 電力システムエンジニアリング課 課長 小島康弘博士には、同氏の研究所在籍の頃より、研究遂行上の極めて有益かつ的確なご指摘とご教示を頂くとともに常に示唆にあふれるご指導を頂きました。

中部電力株式会社 伊藤久徳氏，高橋順一氏，斎藤宣俊氏，尾上幸浩氏，伊佐治圭介氏には、共同研究・実用化研究および実システム開発を通じて、保護制御・需給運用における実用上の観点から貴重なご助言とご討議を賜りました。特に需給計画手法の研究では、熱意あふれる討議を重ねて研究成果の実用化に導いて頂きました。

本論文の成果は三菱電機株式会社の諸先輩方，同僚，後輩の多大なご支援とご協力の賜物であります。保護制御分野の研究では、福井大学大学院工学研究科教授 田岡久雄博士に入社後の初期研究開発において、適切なご助言および示唆に富んだご意見をいただきました。米国 ワシントン州立大学 Chen-Ching Liu 教授とオランダ アイントホーフェン工科大学 Madeleine Gibescu 准教授には共同研究の推進にご尽力頂くとともに様々な討議をさせて頂きました。また、小和田靖之氏，押田秀治博士をはじめとする系統変電システム製作所 保護制御製造部の方々には様々なご助言を頂き，また貴重な意見交換をさせて頂きました。最適化分野の研究では，中村静香博士に賜った幾多の有益な助言から本研究成

果の重要な視点とアイデアが啓発されると共に研究活動に対するその真摯な姿勢から多くのことを学びました。また、先端技術総合研究所 ソリューション技術部 高口雄介氏には有益な実験データの提供を頂き格別のご支援を頂きました。需給計画・制御分野の研究では、系統変電システム製作所 電力流通システム部 電力流通第一課 広瀬公一氏のご助言は常に研究推進の原動力となり、これまでに積み重ねた議論は何物にも代えがたく、以降、需給関連研究に留まらず小生の研究開発活動の礎となりました。さらに、先端技術総合研究所 ソリューション技術部 平野秀明氏には、検証に必要な実験データの準備と採取に尽力して頂きました。

三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 システム部門 泉井良夫博士，系統変電システム製作所 系統変電エンジニアリング統括センター 電力系統技術課 課長 北山匡史博士には入社以来熱心にご指導いただくとともに本研究の遂行において有益なご助言とご協力をいただき、本研究を進める上で大きな力添えとなりました。さらに、ソリューション技術部 系統制御システム技術グループ およびこれまで同じ研究グループに所属していた方々には、日ごろの研究に関する貴重な議論から新規性・創造性を着想する様々なアイデアを与えていただき、また格別のご激励とご助言を頂きました。

以上の方々に対し、心より感謝を捧げます。

業績目録

学術論文誌発表論文（第一著者）

1. 橋本博幸, 田岡久雄, Madeline Gibescu, Chen-Ching Liu, “Second-kick 改善法を適用したエネルギーベース指標による SVC の安定度向上効果の検証”, 電気学会論文誌 B, Vol.122, No.1, pp.103-112, 2002
2. 橋本博幸, 小和田靖之, 尾上幸浩, 斎藤宣俊, 伊藤久徳, “動特性負荷モデルによる実故障データの特性分析を利用した負荷脱落量推定手法”, 電気学会論文誌 B, Vol.126, No.9, pp.869-877, 2006
3. 橋本博幸, 高口雄介, 中村静香, “有効制約の推定機構を持つ内点法に基づく二次計画アルゴリズムの開発”, 電気学会論文誌 C, Vol.130, No.6, pp.1061-1071, 2010
4. 橋本博幸, 平野秀明, 広瀬公一, 伊佐治圭介, 高橋順一, “起動停止回数と燃料消費量に対する制約を考慮した年間需給計画手法の開発”, 電気学会論文誌 B, Vol.132, No.10, pp.844-852, 2012

学術論文誌発表論文（第一著者以外）

1. Madeleine.Gibescu, Chen-Ching Liu, Hiroyuki Hashimoto and Hisao Taoka : “Energy-Based Stability Margin Computation Incorporating Effects of ULTCs”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.20, No.2, pp. 843-851, May, 2005

国際会議発表論文

1. Hiroyuki Hashimoto, Yiwei Zhang, Hisao Taoka and Boming Zhang : “An Efficient Method For Dynamic Security Assessment of Power System”, *ICEE (International Conference on Electrical Engineering) in HongKong*, Vol.3, pp.317-320, 1999
2. Hiroyuki Hashimoto, Hisao Taoka, Yiwei Zhang and Boming Zhang : “An Integrated Approach to Dynamic Security Assessment and Control of Power Systems”, *PowerCon2000 (International Conference on Power System Technology) in Perth*, Vol.3, pp.1269-1274, 2000

3. Y. Gu, Yiwei Zhang, Boming Zhang, Hiroyuki Hashimoto and Hisao Taoka : “A Novel Approach for On-Line Transient Stability Assessment”, *PowerCon2000 (International Conference on Power System Technology) in Perth*, Vol.1, pp.281-285, 2000
4. Madeline Gibescu, Chen-Ching Liu, Hiroyuki Hashimoto and Hisao Taoka : “Energy-Based Stability Margin Computation Incorporating Effects of ULTCs”, *Power Engineering Society General Meeting*, 2005. IEEE

国内会議発表論文

1. 橋本博幸, 田岡久雄, “ダイナミックセキュリティ監視における信頼度指標に関する一考察”, 平成 9 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, Vol.8th, No.2, pp.39-40, 1997
2. 橋本博幸, Boming Zhang, Zhi-hong Pan, “動的セキュリティ評価における事故スクリーニング手法の開発”, 平成 10 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, Vol.9th, 分冊 1, pp.253-254, 1998
3. 中地芳紀, 紅林久之, 松浦昌則, 横井浩一, 和澤良彦, 林守康, 田口保博, 白井宏昌, 菊池賢一, 山邊和也, 小和田靖之, 橋本博幸, “次世代系統安定化装置に関する基礎研究～その 1～”, 平成 12 年電気学会全国大会講演論文集, No.6, pp3003-3004, 2000
4. 中地芳紀, 小相澤政和, 横井浩一, 和澤良彦, 小和田靖之, 吉備和仁, 小島康弘, 橋本博幸, “次世代系統安定化装置に関する基礎研究～その 4～”, 平成 12 年電気学会全国大会講演論文集, No.6, pp3009-3010, 2000
5. 橋本博幸, 田岡久雄, Madeline Gibescu, Chen-Ching Liu, “エネルギー関数を用いた安定度指標による FACTS 機器の効果検証”, 電気学会電力技術研究会資料, PE-00-76, pp.31-36, 2000
6. 橋本博幸, 吉備和仁, 小和田靖之, 尾上幸浩, 斎藤宣俊, 田端康人, 横井浩一, 伊藤久徳, “負荷脱落量推定手法に関する一検討”, 平成 14 年電気学会全国大会講演論文集, No.6, pp.464-465, 2002
7. 横井浩一, 斎藤宣俊, 田端康人, 小島正道, 佐々木孝志, 吉備和仁, 橋本博幸, 小和田靖之, “新しい SSC 制御論理に関する基礎検討”, 平成 14 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, 分冊 A, pp.647-648, 2002
8. 橋本博幸, 吉備和仁, 小和田靖之, 尾上幸浩, 斎藤宣俊, 横井, 田端康人, 伊藤久徳, “動的負荷モデルによる負荷脱落量推定手法の検討”, 電気学会電力技術研究会資料, PE-02-1, pp.31-36, 2002

9. 横井浩一, 斎藤宣俊, 田端康人, 小島正道, 佐々木孝志, 吉備和仁, 橋本博幸, 小和田靖之, “新しい SSC 制御論理に関する基礎研究”, 電気学会電力技術研究会資料, PE-02-105, pp.1-6, 2002
10. 平野秀明, 橋本博幸, 広瀬公一, 塚本幸辰, “電力取引支援システムの開発”, 平成 17 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, p.GS20-3, 2005
11. 伊佐治圭介, 高橋順一, 橋本博幸, 平野秀明, 広瀬公一, “起動停止回数と燃料消費量に制約のある年間需給計画手法の検討”, 平成 20 年電気学会全国大会講演論文集, No.6, pp.188-189, 2008
12. 平野秀明, 橋本博幸, 広瀬公一, 伊佐治圭介, 高橋順一, “起動停止回数と燃料消費量の制約を考慮した年間需給計画手法の開発”, 電気学会電力技術研究会資料, PE-08-109, pp.7-12, 2008
13. 高口雄介, 橋本博幸, 中村静香, “経済負荷配分問題に対する高速な二次計画法の適用”, 平成 20 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, pp.238, 2008
14. 松原龍之介, 橋本博幸, “環境負荷低減価値を考慮したエネルギー事業運用計画支援システムの提案”, 平成 21 年電気学会全国大会講演論文集, No.6, pp76-77, 2009
15. 橋本博幸, 富田雅史, 青木正則, 柴広有, 小島康弘, “複数台パッケージエアコンの最適協調制御方式の開発”, 平成 25 年日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, pp.547-550, 2013
16. 相川翔太郎, 橋本博幸, 平田飛仙, 大岡弘和, 馬場孝幸, 平神真也, 松原貢, “系統動揺現象観測装置データを活用した系統解析”, 平成 26 年電気学会全国大会講演論文集, pp.6-048, 2014
17. 平神真也, 馬場孝幸, 松原貢, 橋本博幸, 平田飛仙, 大岡弘和, “ウェーブレット変換を用いた系統動揺現象観測装置データの分類手法について”, 平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, No.6, pp.91-92, 2014

受賞

1. 電気学会第 69 回電気学術振興賞論文賞（起動停止回数と燃料消費量に対する制約を考慮した年間需給計画手法の開発）, 2013

登録特許（本論文の主要成果に関わるもの）

1. 特許第 3836741 号, 負荷特性推定装置およびそれを用いた系統周波数安定化装置
2. 特許第 4566980 号, 供給計画策定システム, 供給計画策定プログラム及び供給計画策定方法
3. 特許第 5047014 号, 発電機需給計画装置及び発電機需給計画方法
4. 特許第 5168048 号, 2次計画問題計算装置, 2次計画問題計算装置用プログラム, 潮流計画計算装置, 発電機出力値計算装置及びポートフォリオ最適化装置

登録特許（本論文の主要成果以外）

1. 特許第 3737280 号, 電力系統監視装置及び電力系統監視方法
2. 特許第 3703970 号, 電力系統事故の選択方法およびその装置
3. 特許第 3771116 号, 電力系統安定化制御方法及び電力系統安定化制御装置
4. 特許第 3820384 号, 単独分離系統安定化方法及び単独分離系統安定化システム
5. 特許第 3820385 号, 単独分離系統安定化方法及び単独分離系統安定化システム
6. 特許第 3820386 号, 単独分離系統安定化方法及び単独分離系統安定化システム
7. 特許第 4574985 号, 電力供給計画立案支援方法
8. 特許第 4044512 号, 電力系統安定化制御装置および電力系統安定化制御方法
9. 特許第 4859852 号, 系統安定化方法及び系統安定化装置
10. 特許第 4980303 号, 発電コスト評価方法, 発電コスト評価装置, 発電コスト評価プログラム, 発電計画作成システムおよび発電設備起動/停止制御システム
11. 特許第 5312286 号, 空気調和機の制御装置, 冷凍装置の制御装置
12. 特許第 4980407 号, 空気調和機の制御装置, 冷凍装置の制御装置
13. 特許第 5404556 号, 空気調和機の制御装置および冷凍装置の制御装置
14. 特許第 5460622 号, 階層型需給制御装置および電力系統制御システム
15. 特許第 5452714 号, 発電計画作成装置

その他

1. 鈴木浩, 渡邊進 編著 : 「IT が拓く電力ビジネス革命」 (5.4 節を執筆), オーム社, 2002
2. 市田良夫, 秋吉政徳, 橋本博幸, 塚本幸辰, “エネルギーソリューション 電力市場向けリスク管理・ポートフォリオ運用システム”, 三菱電機技報, Vol.75, No.9, pp.617-620, 2001
3. 橋本博幸, 広瀬公一, 平野秀明, “電力取引支援システム "BLEnDer" Trader”, 三菱電機技報, Vol.80, No.3, pp.185-188, 2006
4. 橋本博幸, 高口雄介, 中村静香, “高速・安定な二次計画法の開発と実用問題への適用”, 三菱電機技報, Vol.83, No.5, pp.305-309, 2009