
分散型電源の最適配置
および運用に関する研究

平成14年3月

造 賀 芳 文

緒言

本論文は、これから将来に向けての役割が重要視されている分散型電源について、その最適な導入計画を策定するための基礎となる研究をまとめたものであり、全部で6章からなる。

現在までの日本における電気エネルギー供給は、電気事業者が地域独占的に営業を行うことができる代わりに供給責任を負うという形で行われてきた。これまでのスケールメリットを生かした大規模発電所で発電した電力を長距離輸送することは、大きな価格上のメリットをもたらしたものの、新規の大規模発電所や送電線建設の困難さから、新しい分散型電源が注目されるようになってきた。

分散型電源は、燃料電池やマイクロガスタービン、太陽光発電などを含み、今までのように需要地から遠く離れた場所に建設されてきた大規模集中型の電源に対して、需要地のそばに分散して導入することのできる小規模電源を指す。特に、燃料電池やマイクロガスタービンなどは電気以外に熱も同時に供給することができ、コージェネレーション（熱電併給）システムとして運用すれば、大幅な省エネルギー化が図れるため、大いに注目を集めている。また、これら分散型電源が首尾良く大量に電力系統に導入されることが出来れば、電気事業者にとっても送電損失の削減や大気汚染の防止、従来型の大規模発電所、特に原子力発電所の立地難や燃料輸送路の確保難などの問題解決につながる。さらに、需要家が独自に設置する場合、その導入が経済的に有利となれば、今までどおりの電力供給と自前の分散型電源による電源の二重化をも図れることから、さらに導入が進むと考えられている。

ただし、それら分散型電源が従来型の大規模発電システムを補完するという役割を十分に担うためには、今述べたように既存の電力系統との連系が必要となり、導入時の系統側での電圧変動や事故時のセキュリティ問題等、系統運用上の問題は慎重に考慮される必要がある。また、実際の導入において最も優先されるのは“コスト”であり、分散型電源自体の設置コスト、運用コストなどと、新たなシステムの設置によるエネルギー経費削減量との兼ね合いが最重要項目となってくる。

このような観点から本研究では、電力系統への分散型電源の導入に関し、その最適な配置を計画する際の基本的な枠組みの提案と、その配置を選定するアルゴリズムの開発を行っている。本研究で提案する枠組みに従うと、最適配置問題は組み合わせ最適化問題として定式化される。考察系統の規模を拡大していくと、探索回数がいわゆる組み合わせ爆発を起こす

ことから逃れられず、現実的な時間内での探索が困難を極める。従って、探索アルゴリズム自体の選択も問題となってくる。これに関し、本研究では大規模な考察系統に対応すべく、近似解法アルゴリズムとして遺伝的アルゴリズムを採用し、その性能の検証も併せて行っている。さらに、需要家側の観点から導入を考える場合について、ある需要家に着目した上で、その地点での最適な運用計画策定についても考える。これは「最適運用計画」として定式化され、最も効率的で有利な分散型電源の導入、運用形態の算出が可能なものであり、例として実際の需要家の負荷パターンを考慮した上での試算を行う。

本論文は、注目を浴びている分散型電源について、その最適な導入方法の枠組みを提案し、そのための効率的な解法アルゴリズムを開発すること、および実用的な最適運用計画手法の提案を目的として、以下の項目について研究した成果をまとめたものである。

- 分散型電源の導入形態、導入傾向を推定すべく、導入の際の枠組みを考察する。
- 分散型電源として燃料電池を例とし、その最適配置問題を考える。また、効率的な解法アルゴリズムを提案する。
- 上記の問題は組み合わせ爆発を伴う問題となるため、実規模問題に適用可能な近似解法として、遺伝的アルゴリズムを取り入れた高速な解法アルゴリズムを提案する。
- 分散型電源が導入されたとして、様々なシステムの協調を図りつつ、全体として最も効率的な運用計画を策定する。

第1章は、序論として現在のエネルギー情勢、地球環境問題の顕在化などを含む研究背景について述べ、本研究の最終的な目的、および研究全体の概要についてまとめる。

第2章では、分散型電源が主に導入されると思われる配電系統について述べる。また、それを取り巻く現在の技術的、制度的情勢についても言及する。次に、分散型電源として分類される現在利用可能な各種システムを挙げ、それらの具体的なモデル化について示す。そして、もう一つの重要なファクターである負荷について、本研究にてカバーすべき負荷モデルを考察する。

第3章では、前章までで示された枠組みにしたがって定式化する方法について述べ、その問題に対する分枝限定法を基本とした解法アルゴリズムを提案する。また、さらなる高速化、効率化を目指した有効な手法を提案し、モデルシステムを用いた数値計算例により実際に得られた最適配置例を示す。

前章にて定式化された問題は、混合整数計画問題となり、組み合わせ爆発という呪縛から逃れることができない。そこで第4章では、遺伝的アルゴリズムを用いた高速な近似解法を提案する。さらに、本問題に則して施した改良点についても示す。これにより、分枝限定法を基礎とする解法アルゴリズムでは解くことすら現実的でない規模の問題に対しても、近似解ながら現実的な解が得られることを示す。

第5章では、分散型電源の設置を決定した需要家の立場に立ち、いかにそれらのシステムを経済的、効率的に運用するかという命題を最適運用計画として考える。一般に電力需要、熱需要がエネルギー需要のほとんどを占めるが、これらはコージェネレーションにより効率的に供給することができる。よって、それらを有効に利用することのできる枠組みを提案し、定式化を行う。まずは運用のみに焦点をあてた問題を考え、次にその導入容量の算定までを視野に入れた定式化を行うことで、最終的に様々なケースを想定した数値シミュレーションにより、その設置容量や運用パターンの導出を試みる。

最後に第6章において、本研究で得られた主要な成果をまとめて記述し、今後の研究課題について述べる。

目次

緒言	1
目次	5
第1章 序論	9
緒言	9
1.1 研究の背景	10
1.2 研究の目的	12
1.3 本論文の概要	13
1.3.1 配電系統と分散型電源 (第2章)	13
1.3.2 分散型電源最適配置問題 (第3章)	13
1.3.3 遺伝的アルゴリズムによる解法 (第4章)	13
1.3.4 分散型電源最適運用問題 (第5章)	14
1.3.5 結論 (第6章)	15
第2章 配電系統と分散型電源	17
緒言	17
2.1 分散型電源の必要性	18
2.2 導入上の問題点	19
2.3 配電系統との連系	20
2.3.1 系統連系の意義	20
2.3.2 運用上の考慮事項	20
2.3.3 ガイドラインの概要	25
2.4 分散型電源としての燃料電池	27
2.4.1 発電原理	28
2.4.2 発電システム構成	29
2.4.3 燃料電池の種類	30
結言	31
第3章 分散型電源最適配置問題	33
緒言	33
3.1 概要	34

3.2	定式化	36
3.2.1	仮定	36
3.2.2	目的関数	37
3.2.3	不等式制約	41
3.2.4	等式制約 (潮流計算)	42
3.3	混合整数計画問題	45
3.4	解法アルゴリズム	47
3.4.1	最大設置可能台数の設定	48
3.4.2	電圧制約を考慮した限定操作	50
3.4.3	需要端信頼度 (DSR) 制約を考慮した限定操作	52
3.5	数値シミュレーション	54
3.5.1	パラメータ設定	54
3.5.2	モデル系統	54
3.5.3	探索結果	54
	結 言	57
第4章	遺伝的アルゴリズムによる解法	59
	結 言	59
4.1	遺伝的アルゴリズム (GA) とは	60
4.1.1	特徴	60
4.1.2	基本的動作	61
4.2	アルゴリズムの構造	63
4.2.1	概 略	63
4.2.2	符号化 (Coding)	64
4.2.3	評価 (Evaluation)	66
4.2.4	生殖集団 (Population)	67
4.2.5	遺伝オペレータ (Genetic Operators)	67
4.2.6	遺伝パラメータ (Genetic Parameters)	71
4.3	本アルゴリズムでの改良点	73
4.3.1	集団の初期化 (初期集団の生成法)	73
4.3.2	エリート戦略 (Elitist Strategy)	76
4.4	数値シミュレーション	78
4.4.1	適用モデル系統	78
4.4.2	シミュレーション設定	81
4.4.3	最適配置問題について	81
4.4.4	解法アルゴリズムについて	82
4.5	シミュレーション結果	84
	結 言	86

第5章 分散型電源最適運用問題	87
緒言	87
5.1 概要	88
5.2 運用費のみの最適運用問題の定式化	92
5.2.1 仮定	92
5.2.2 目的関数	93
5.2.3 制約条件	96
5.2.4 定式化のまとめ	98
5.3 設置費を考慮した最適運用問題の定式化	100
5.3.1 仮定	100
5.3.2 目的関数	100
5.3.3 制約条件	102
5.3.4 定式化のまとめ	103
5.4 線形計画問題への定式化（運用のみ）	104
5.4.1 目的関数	104
5.4.2 制約条件	106
5.5 線形計画問題への定式化（設置費考慮）	109
5.5.1 目的関数	109
5.5.2 制約条件	110
5.5.3 定式化のまとめ	111
5.6 負荷モデル	113
5.6.1 電力・熱負荷の推定	113
5.7 数値シミュレーション	122
5.7.1 シミュレーション設定	122
5.7.2 シミュレーション方法	124
5.7.3 シミュレーション結果（運用のみ）	125
5.7.4 シミュレーション結果（設置費考慮）	132
5.7.5 燃料電池，電力貯蔵装置の導入傾向	143
5.8 シミュレーションのまとめ	148
5.8.1 最適運用について	148
5.8.2 導入傾向について	148
結言	149
第6章 結論	151
緒言	151
6.1 分散電源最適配置計画（第3章）	152
6.2 遺伝的アルゴリズムによる解法（第4章）	153
6.3 分散電源最適運用計画（第5章）	154

6.4 今後の課題	155
謝辞	157
参考文献	159
付録A DistFlow法	163
A.1 DistFlow法と従来法との違い	164
A.2 定式化	165
A.2.1 メインフィーダのみの場合	165
A.2.2 ラテラルフィーダをもつ場合	170
A.3 DistFlow equationsの解法	174
A.3.1 メインフィーダのみの場合	174
A.3.2 ラテラルフィーダをもつ場合	176
研究業績一覧	177

第1章 序論

緒言： 本論文は、これからの役割が重要視されている分散型電源について、その最適な導入計画を策定するための基礎となる研究をまとめたものであり、全部で6章からなる。本章では、本研究を始める動機となった社会的背景や研究の目的などについて述べ、本論文の位置づけを明確にした後、論文全体の概要を示す。

1.1 研究の背景

近年のエネルギー利用量の急速な増加によって、エネルギー・資源問題や地球環境問題などが顕在化し、その解決が叫ばれ始めて久しい。具体的な取り組みとして我が国は、1997年末に京都で開催された気候変動枠組み条約第三回締約国会議において、2008年から2012年までの温室効果ガスの排出量を1990年比で6%削減するとの国際的な約束をするに至った。温室効果ガスには様々なものが含まれるが、地球温暖化防止のためには二酸化炭素(CO₂)の排出量を削減することが必須である。

電力分野においては、夏場の空調負荷の増大による負荷率の悪化、それに伴う設備利用率の低下によって火力機の排出するCO₂の増加が地球温暖化に寄与していることが問題となっている。また、従来の日本における電気エネルギー供給は、電気事業者が地域独占的に営業を行うことができる代わりに供給責任を負うという形で行われてきたが、ここにきて電力分野における規制緩和が進みつつあり、これが先の地球温暖化防止計画に対してマイナスの影響を与えることが懸念されている。

この時期に、長期的に見てこれからのエネルギー供給システムを考えると、最も効果的であるのは省エネルギー性の高いオプションを選択することであり、いわゆる分散型電源が注目されてきている。分散型電源とは、従来型の大規模集中型発電システムが需要地から遠く離れたところに建設されてきたのに対し、小型で需要地に直接設置できるような特性を持つものを指す。典型的な例としては太陽光発電や風力発電、マイクロガスタービンや燃料電池などが挙げられるが、特にマイクロガスタービンや燃料電池は、電力だけでなく熱も同時に供給できるコージェネレーション(熱電併給)システムとして運用することで高効率を実現でき、かつ比較的制御しやすいという利点を持つため、実質的に第四世代の発電システムになりうると大いに期待されている。

しかし、これら分散型電源や電力貯蔵装置が従来型の大規模発電システムを補完するという役割を十分に担うためには、既存の電力システムとの連系が必要となり、導入時の系統側での電圧変動や事故時のセキュリティー問題等、系統運用上の問題は慎重に考慮される必要がある。また、実際の導入において最も優先される関心事というのは実質的な“コスト”であり、分散型電源自体の設置や運用にかかるコストとエネルギー経費削減量との兼ね合いが最重要項目となってくる。よって、これらの相反するであろう要因を取り込んだ形での導入を考えていく必要がある。

現在のところ、分散型電源の導入に関して、比較的大きな電源の変電所への導入や、基幹系統への導入による評価など多くの研究が行われてきているが、これらは基本的に電力会社側が大規模発電設備の代替案（火力・原子力の代わりに分散型電源、揚水発電の代わりに貯蔵装置）として導入する際の話であり、需要家側の視点がない。

そこで本研究では、需要地に直接設置のできるような、小規模電源でかつコージェネレーション運用の可能な分散型電源として燃料電池を取り上げ、電力会社側だけではなく、需要家からの視点も取り入れた最適配置について考える。導入の際には配電系統への系統連系がなされるが、その際の問題点も考慮しつつ最適な配置を求めることを目指す。

また、一需要家のみに関しての導入を考えている研究についてはたとえば文献 [1] などがあるが、これは熱の有効利用までは考えられているが電力貯蔵装置との協調までは考えられていない。さらに、現場ですでに実際的な運用も行われており、文献 [8] ～ [10] のような資料も存在する。しかし、これはあくまでもある特定のパターン（電力追従、熱追従など）に従って運用すると決めて導入する際の指針であり、最も経済的な運用方法を目指したものではない。

そこで本研究では、ある特定のパターンにとらわれず、できるだけ経済的な運用方法を実現する方法を考える。また、分散型電源と同様に注目されている電力貯蔵装置を含めた最適運用を考える。貯蔵装置は需要のピークカットに利用でき、負荷の平準化を実現する。それにより設置者のエネルギー経費の削減はもちろん、既存の発電所から排出される CO₂ の削減にも寄与するため、普及に期待が寄せられている。ただし、電源と貯蔵装置とは基本的に性質が異なるので、協調を図りつつ運用するためには多くの制約を同時に考慮する必要がある。よって、それらをすべて考慮した上で定式化し、最適運用問題を考えることは意義のあることであると考えられる。

1.2 研究の目的

本研究は、分散型電源の導入に関し、その導入先となるであろう配電系統内での最適な配置を計画する際の基本的な枠組みの提案と、その配置を決定するアルゴリズムの開発を行うことを目的としている。ただし、本研究で提案する枠組みに従うと、最適配置問題は組み合わせ最適化問題として定式化され、考察系統の規模の拡大とともに探索回数が組み合わせ爆発を起し、現実的な時間内での探索が困難を極める。従って、大規模な考察系統に対応すべく近似解法アルゴリズムとして遺伝的アルゴリズムを採用し、その性能の検証も併せて行っている。さらに、需要家側の観点から導入を考える場合について、ある需要家に着目した上で、その地点で設置される分散型電源と電力貯蔵装置とを最も効率的に運用することができるような、最適な運用計画策定についても考える。これは「最適運用計画」として定式化され、最も有利な分散型電源および電力貯蔵装置の導入、運用形態の算出が可能なものであり、例として実際の需要家の負荷パターンを考慮した上での試算を行っている。

以上、本論文は注目を浴びる分散型電源に対し、以下の項目を目的として研究した成果をまとめたものである。

- 分散型電源の導入形態、導入傾向を推定すべく、導入の際の枠組みを考察する。
- 分散型電源として燃料電池を例とし、その最適配置問題を考える。また、効率的な解法アルゴリズムを提案する。
- 上記の問題は組み合わせ爆発を伴う問題となるため、実規模問題に適用可能な近似解法として、遺伝的アルゴリズムを取り入れた高速な解法アルゴリズムを提案する。
- ある需要家が分散型電源および電力貯蔵装置を導入するとして、それら様々なシステムの協調を図りつつ、全体として最も効率的な運用計画を策定する。

1.3 本論文の概要

以下、本論文の各章について概要を述べる。

1.3.1 配電系統と分散型電源 (第2章)

第2章では、分散型電源とその主な導入先になると思われる配電系統について述べる。また、それを取り巻く現在の技術的、制度的情勢についても言及し、分散型電源に期待が寄せられていることを示す。次に、一般に分散型電源として分類される現在利用可能な各種システムを挙げ、特に本研究にて取り上げている燃料電池について概要を示す。これらは、以下に続く各章にて共通して必要となる事柄を含む。

1.3.2 分散型電源最適配置問題 (第3章)

第3章では、分散型電源最適配置問題の定式化について述べる。これは、系統を運用する電気事業者(電力会社)側と実際に電源を導入しようとしている需要家側との双方の視点を取り入れたものである。また、電源を単独で導入するには問題ないが、通常は電源の二重化を図るために系統に連系した状態で導入、運用される。よって、電圧変動などの系統運用上の問題が表面化する可能性があり、それら問題点も制約条件として考慮することによって実用的な配置を目指す。

定式化の結果、本問題は混合整数計画問題となり、その求解には全探索が必要になる。しかしながら、大規模な問題に対して全探索を行うのは現実的ではなく、効率的な解法アルゴリズムとして分枝限定法を基本とした方法を提案する。これはある種の限定操作を用い、さらなる高速化、効率化を目指した有効な手法である。具体的には、上述の電圧変動を抑制したりするために設けられている制約条件を利用し、効率的に探索空間を削減する方法である。

最後に、モデル系統を用いた数値計算例により提案手法の性能を示す。また、実際に得られた最適配置例を示し、その配置パターンについて考察する。

1.3.3 遺伝的アルゴリズムによる解法 (第4章)

分散型電源最適配置問題は「混合整数計画問題」となるため、問題の規模に応じて探索回数が爆発的に増えてしまう「組み合わせ爆発」という呪縛から逃れることができない。そのため前章でも、限定操作を用いた分枝限定法を基礎とした解法アルゴリズムを提案している。しかしながら、やはりある程度の規模までしか対応することができず、

さらに大規模な系統に適用しようとするとならば、実際的な時間内に探索を終えることができない。

そこで第4章では、遺伝的アルゴリズムを用いた高速な近似解法を提案する。これは、最適解が必ず得られるとは限らないが、実用的な時間内に近似解を得ようとする方法である。さらに、解法アルゴリズムの性能向上のため、本問題に則して施した改良点についても述べる。一つは、一般的に用いられている遺伝的アルゴリズムに探索情報の冗長性を持たせたものであり、遺伝的アルゴリズムにおいて重要であるといわれる「遺伝的多様性」を保持しようとする方法である。もう一つは、遺伝的アルゴリズムの初期化に関する改良点であり、通常は乱数により行われることが多い初期化を本問題に即したものと改良している。これにより、無駄な初期探索点を省くことができ、収束特性の改善が見込まれる。

最後に、分枝限定法を基礎とする解法アルゴリズムでは解くことすら現実的でない規模の問題に対しても、近似解ながら現実的な解が得られることを示す。

1.3.4 分散型電源最適運用問題 (第5章)

第5章では、分散型電源の設置を決定した需要家の立場に立ち、いかにそれらのシステムを経済的、効率的に運用するかという命題を最適運用計画として考える。ただし、ある特定のパターンにとらわれず、できるだけ経済的な運用方法を目指す。また、分散型電源だけではなく、同様に注目されている電力貯蔵装置を含めたエネルギー供給システム全体の最適化を試みる。

一般にエネルギー需要は、電力需要、熱需要がそのほとんどを占めるが、これらはコージェネレーションにより効率的に供給することができる。また、貯蔵装置に夜間電力を貯めておくことによって昼間の需要のピークカットに貢献し、負荷の平準化を実現することによってエネルギー経費の削減にもなる。よって、それらを有効に利用することのできる枠組みを提案し、定式化を行う。ただし、発電を行う電源と、充電・放電を繰り返す貯蔵装置とは基本的に性質が異なるので、協調を図りつつ運用するためには多くの制約を同時に考慮する必要がある。

まずは運用のみに焦点をあてた問題を考え、次にその導入容量の算定までを視野に入れた定式化を行うことで、最終的に様々なケースを想定した数値シミュレーションにより、様々なタイプの需要家に対し、その設置容量や運用パターンの導出を試みる。さらに、それらの経済性についても考察し、導入コストを変化させた場合の解析結果についても示す。

1.3.5 結論 (第6章)

最後に第6章において、本研究で得られた主要な成果と結論について述べ、今後の研究課題に関して考察を行う。

第2章 配電系統と分散型電源

緒言：本章では、なぜ分散型電源が必要とされているのか、導入の際の問題点は何であるのかなどについて述べる。

まず第2.1節では、分散型電源の必要性について、その特徴を交えて概説する。次に第2.2節では、実際に導入するとなった場合に生じる分散型電源についての問題点を挙げる。分散型電源が従来型の大規模発電システムを補完するという役割を十分に担うためには、電力系統との連系運転が必須である。また、発電システムの規模を考えると、その配置箇所も需要地に近い配電系統になるであろうと予想される。そこで第2.3節で、配電系統への分散型電源の連系について、その必要性、従来にはなかった新しい電源の参入による電力系統の運用上に生じる問題などについて示す。最後に第2.4節で、本研究において分散型電源として採り上げている燃料電池について、その発電原理、システム構成などを説明する。

2.1 分散型電源の必要性

分散型電源とは、主な電力需要地である都市部に直接分散配置することのできる、長距離送電設備等を必要としない電源設備のことである。

石油危機以降、燃料電池、太陽光発電、風力発電、ガスタービンなどによるコージェネレーション等の分散型電源が、これらの持つ自然エネルギー利用および省エネルギーの観点から注目されていた。しかし、最近になって従来の発電システムである大規模集中型発電設備を補完する役割が重要視されその普及が期待されるようになったのは、主に以下に列挙する理由に拠るところが大きい。

- (1) 自然エネルギー利用と省エネに貢献,
- (2) 環境への調和,
- (3) 電源立地条件の緩和,
- (4) 送配電コストの低減（送配電損失の削減）,
- (5) 短期建設期間（リードタイム短縮）。

電力需給の長期的安定を確保してゆくためには、需給両面にわたる対策を抜本的に強化することが不可欠と言える。供給面の対策としては、大規模電源の開発に全力を挙げて取り組むことが基本ではあるものの、今後、上で述べた分散型電源の開発、導入を積極的に推進していくことが極めて重要となってきている。

2.2 導入上の問題点

いわゆる「自家用発電設備」は、鉄鋼業、紙・パルプ業、セメント工業等、電力を大量に消費する基礎素材産業を中心に生産コストの低減を目的としてすでに普及している。よって、自家用発電設備そのものは目新しいものではなく、産業用分野の比較的大規模な自家発電においては古くから存在していたものである。ただし、連系の技術要件は各電力会社ごとに異なっていた。

上記のような特定大規模な産業用ではなく、新たな分散型の発電システムとして燃料電池等が導入される場合には、莫大な数の中小規模の電源が既存の電力系統と連系しつつ、「逆潮流^{†1}」することを許すことが必要である。

従来の発電所が需要地から遠い所に建設された大規模なものであり、またそこから延々送電線等を通じて電力が供給されているという現状を考えると、都市部に直接小規模なものを配置する分散型電源では、全く今までの給電形態とはその趣を異にすることになり、その導入に際しては様々な問題が存在すると思われる。

分散型電源導入の際の問題としては分散型電源自体のハード的な問題ももちろん考えられるが、これにもまして問題となるのは、先に述べた既存の系統との連系に関する問題である。しかも分散型電源の発電システム構成が小規模であることを考えると、その導入箇所も需要地に近い配電系統であると考えられる。今までの発電・送電システムにおいては、配電系統に逆送電をする小規模電源が多数連系されるということが考慮されておらず、従来の大規模特定の自家発電設備のように、分散型電源に対しても系統連系に関する技術要件を策定する必要がある。

†1: 通常の方法とは逆向き、すなわち分散型電源から電力系統に向けて流される電力。

2.3 配電系統との連系

分散型電源はその規模が小規模であるため、配電系統に連系されると考えるのが自然である。実際、現在試験的に導入されている燃料電池も、その設置場所は都市部の事務所ビルやホテル等である。本節では、分散型電源の配電系統との連系について述べる。

2.3.1 系統連系の意義

系統連系とは、コージェネレーション等の発電設備から作られた電気を電力会社の送配電系統に電氣的に接続し、電圧・周波数を同期させて運転することをいう。

この系統連系が可能になると、需要家にとっては、

- (1) 過大な予備力を持つことなく電源の信頼性がはかれる。
- (2) コージェネレーションの高負荷運転が可能になり、一層の省エネルギーがはかれる。
- (3) 電気設備のシステムが単純化し、オペレーションが簡単になる。

などのメリットがある。一方電力会社にとっては、大規模電源の補完的役割を持つ分散型電源の確保が可能となる。また、通常の場合、系統連系は自分の構内の需要電力に対し発電規模を小さめに設定して、電力系統側に発電電力を送り出さないように計画するが、コージェネレーションシステム（燃料電池も含まれる）のように熱併給発電ができるものに対して、熱需要に合わせて発電電力を設定する（熱主電従運転という）と構内需要電力を超える電力すなわち余剰が生じるケースがあり、このときの余剰発電電力を電力会社の送配電系統側に送り出すこと（逆潮流）ができれば、省エネルギーや環境改善の面ばかりでなく、過密都市における電源のセキュリティ向上や分散電源の確保といった面から大きな効果をもたらすものと考えられる。

2.3.2 運用上の考慮事項

分散型電源の系統連系は前述のように大きなメリットをもたらすが、一方では、電力会社の送配電系統の運用に悪影響を及ぼす可能性をも秘めている。この影響に関しても十分配慮する必要があるが、現在の電力系統は、小規模な電源が系統の末端付近に多数連系されるという状況を考慮していない。このため、多くの分散型電源を至る所に配し、連系運転をするとなると問題がある。連系点において分散型電源からの逆潮流が無い場合には問題は比較的少ないが、逆潮流がある場合には問題点は多くなり、解決すべ

き課題も増える。しかし、分散型電源に大規模集中型電源の補完的役割を積極的に果たさせるためには、逆潮流を許容せざるを得ない。以下、逆潮流を許容した場合の具体的な問題点について述べる。

- (1) **電圧変動** 電力事業者には低圧の供給電圧を電気事業法で定められた適正範囲に維持することが義務づけられており、分散型電源が系統に導入されても、電圧がこの範囲を逸脱してはならない。現在の配電系統の電圧管理は、変電所から負荷にかけて潮流が一方向であることが前提となっている。潮流が一方向であれば、負荷変動によりフィーダに流れる電流が変化し電圧が変動しても、電圧は変電所から末端に向かって単調に下がっていくので、電圧の管理は比較的容易である。すなわち、変電所の送り電圧の制御、電圧調整器 (SVC) の設置、柱上変圧器のタップの選択により電圧の管理を行えばよい。また、負荷の時間変動があってもそのパターンはある程度予測が出来るので電圧管理も行い易い。

しかし、フィーダの途中に分散型電源からの逆潮流があると、電圧がそこで高くなり、その分布は単調ではなくなる (図 2.1: 参照)。この場合、従来の方法では対応できなくなる可能性がある。また、太陽光発電や風力発電などは発電量の変動を予め予想できないため電圧管理が難しくなる。これに対して、1 フィーダに接続される分散型電源の容量の総和を規制することによりある程度は対応できる。しかし、このような規制を強くし過ぎると分散型電源の普及を阻害しかねないので、将来的には規制を緩和できる技術の開発が必要となる。

一般に、分散型電源はインバータを持っており、インバータの電圧調整機能を積極的に利用し、配電電圧を適正な範囲に維持することも考えられる。この場合、電圧管理に関して、電力事業者と分散型電源所有者との責任分担の問題が残るが、その有効性は大いに期待できるものであり、今後検討していく必要があると思われる。

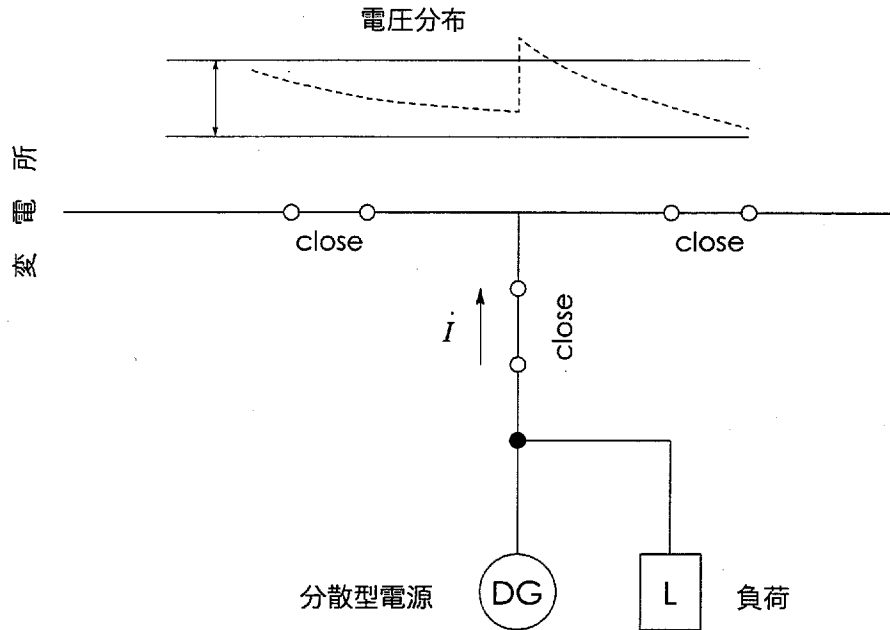


図 2.1: 逆潮流

- (2) **保護協調** 分散型電源の保護を考える場合、分散型電源そのものを保護することと、分散型電源のために生じる障害から系統を保護することとを分けて考える必要がある。ここでは、系統連系に伴って必要となる後者の場合について述べる。

系統側で故障が起きた場合、分散型電源は系統側の保護システムと同等の信頼度で故障を検出し、協調を取り保護機能を動作させる必要がある。従来の保護リレーシステムは回転型の発電機を前提として構成されたもので（風力発電でも運転制御特性を向上させるためにインバータを用いるものが開発されている）、従来のシステムをそのまま適用することは出来ない。インバータそのものには種々の保護機能を持たせることが出来るが、その信頼性がまだ実証されていない現在の段階では、リレーやコンダクタを用いた従来型の機器を用いたシステムでバックアップをする必要がある。バックアップの保護システムをどのように構成すべきかについてはまだ検討の余地がある。

例えば、短絡事故が生じた場合、回転型の発電機は内部インピーダンスが低く定電圧特性を持っているので大きな過電流が流れ、容易に検出できる。しかし、インバータが介在している場合は電流ブロック機能が動作し、バックアップの保護リレーが動作しなくなり、不足電圧リレーが必要となる。従って、バックアッ

プといえども保護リレーのコストは高くならざるを得ず、小規模分散型電源の場合は、問題となる可能性がある。小規模分散型電源の普及を考えた場合、インバータの持つ保護機能を系統連系用の保護機能の要素として出来るだけ組み入れられるような方式の検討およびインバータの動作信頼性の検証をしていく必要がある。

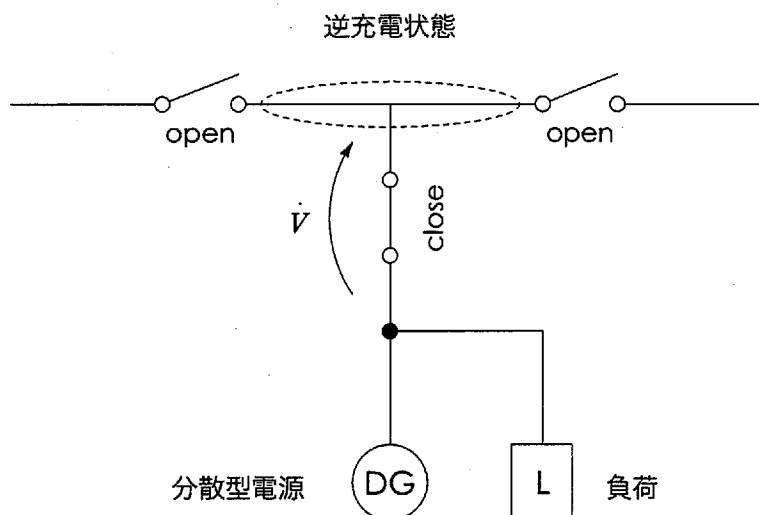


図 2.2: 逆充電

- (3) **単独運転の防止** 系統側の電力が事故等で喪失した場合に、系統側につながっている負荷と分散型電源の出力とが釣り合った場合には、分散型電源が系統側に電力を供給し続ける状態、すなわち単独運転状態が継続される可能性がある(図 2.2: 参照)。単独運転が継続されると、系統側の電力が復帰した場合に両者の電気の位相差によって短絡状態や脱調状態などの事故が起きる可能性があるばかりでなく、作業員が充電されている電線に触れて感電するなどの重大事故が起きる可能性がある。従って、確実に単独運転を防止する方法の開発が分散型電源の系統連系にあたって必須である。

従来用いられている代表的な単独運転検出方式についてその方法および問題点が表 2.1: に示してある。いずれの方法も確実性や信頼性に関して実証すべき点が残されており、現在、模擬配電線を用いた研究が行われている。一方、最も確実と思われる単独運転対策は変電所からの信号により転送遮断する方法である。転送遮断信号の伝送に専用ラインを用いるのは現実的ではなく、他のラインを共用したり、無線を用いることも考えられるが現在のところ経済性に問題がある。

また、将来的に分散型電源の数が増えたときには通信ラインの容量をかなり大きくする必要があり、やはり分散型電源側で系統の電力喪失の検出を行う方法の開発は必須である。

表 2.1: 代表的な単独運転検出方式

検出方式	方法	問題点
過不足電圧検出	出力電圧が所定の範囲を逸脱するのを検出	負荷がバランスすると単独運転の検出が困難
過電流検出	系統の負荷に電力を供給するための過電流を検出	負荷がバランスすると単独運転の検出が困難
周波数変動検出 (周波数バイアス方式)	単独運転時にインバータ固有の周波数に出力周波数が変化するのを検出	負荷がバランスすると単独運転の検出が困難
外部周波数規範型インバータ方式	インバータ内部に発振器を持たず、出力端子電圧の周波数にインバータの出力周波数を追従させる。	瞬時電圧低下・停電でも解列が起きる。また、回転器の負荷があるときには検出できない場合がある。
出力電圧変動方式	出力電圧を規則的もしくはランダムに変動させて、連系点の電圧の変動を検出。	1本のフィーダに多数の分散電源が連系した場合に問題が生じる可能性がある。

- (4) **その他の問題点** その他の系統連系上の問題点として、高調波問題と短絡容量の増大が挙げられる。

最近、テレビ、インバータエアコンなど半導体スイッチング素子を用いた機器の増加による高調波問題が出てきており、高調波発生量の規制を行う動きが出ている。分散型電源もほとんどがインバータを介して出力をしているため、高調波対策をする必要があるが、スイッチング周波数を高くすることによりこの問題は解決できる。また、短絡容量の増大に関しては、太陽光電池や燃料電池は回転型発電機に比べ内部インピーダンスが高く短絡電流はあまり大きくなりませんし、インバータの電流ブロック機能を積極的に用いれば特に問題はないと考えられる。風力発電の場合、回転機出力をそのまま系統につなぐ場合には、限流リアクトルを挿入する必要が出てくる可能性がある。

以上のような問題点について系統連系に際しては十分に留意する必要があり、実際の導入の際の技術基準である系統連系技術要件ガイドライン（たとえば文献 [6]）が整備されている。次節では、このガイドラインについて、その概要を示す。

2.3.3 ガイドラインの概要

電力系統への連系については、以下の2つの条件が満たされる場合には、技術的な支障はないものと認められる。

- (1) 自家用の分散型電源を系統と連系することによって、商用系統の供給信頼度（停電等）及び電力品質（電圧、周波数、力率、波形等）に対して悪影響を与えないこと。
- (2) 自家用の分散型電源を系統と連系することによって、公衆及び作業者の安全並びに電力供給設備又は他の需要家の電気設備の保安に対して悪影響を与えないこと。

(1) の条件を満たすためには、系統保護や電圧維持等のための保護装置の設置が必要であり、系統連系技術要件ガイドラインにおいてそれを具体的に示している。

系統連系技術要件ガイドラインにおいて明確化した、設備面での安全対策の概要は以下の通りである。

- (1) **公衆安全、作業安全、供給信頼度関係** 系統の事故や構内事故などの異常時には、以下の機能を有する保護装置を設置し、電力会社の商用系統との連系を遮断（解列）する。
 - 系統事故や作業停電に際しての感電防止
 - 逆充電の防止（負荷に応じたインバータの出力制御により受電電力が一定値以下となったときには出力を停止し、系統電圧停止時には不足電圧継電器により連系点を遮断すること等）
 - 逆潮流・単独運転の発生防止（逆電力継電器、周波数低下継電器、過電圧継電器）
 - 系統事故や作業停電に際しての感電防止
 - 短絡、地絡等の過電流の防止（過電流継電器、地絡過電流継電器、方向短絡継電器）
 - 信頼性確保のための設備の二重化等（2系列目はインバータの保護機能を活用）

(2) **電力品質関係** 商用電力系統の電圧、周波数、力率等の品質を維持するため、以下の対策を実施することとしている。

- 力率の改善（発電出力の力率を一定範囲内に維持）
- 電圧変動の抑制（契約電力を超えない負荷容量の維持、他励式インバータの過電流抑制）
- 高調波電流の抑制（総合電流歪率5%、各次電流歪率3%以下）

系統連系技術要件ガイドラインは、余剰電力購入実施の前提ともなるものであり、逆流がある状態で連系する場合についても、特に保安上の問題の解決に努め、出来るだけ早急に整備を進めていく必要がある。

今後も、既存のガイドラインの内容をより簡素なものにしていくため、技術的検地を踏まえつつ、検討、見直しがなされていく予定である。

2.4 分散型電源としての燃料電池

本節では、本研究で採り上げた、コージェネ型の分散型電源として導入が期待される燃料電池について概説する。

水力、火力、原子力に次ぐ第4の発電システムなどと期待されている燃料電池であるが、まずその特徴を列挙すると以下のようになる。

- (1) 化学反応による直接発電であり、汽力発電のようなカルノーサイクルの制約を受けないため、原理的に発電効率が高い。
- (2) 比較的小容量でも、また部分負荷運転をしても、既存最新鋭の大規模火力機並みの40%を越える高効率を維持できる。
- (3) NO_x , SO_x などの排出量が極めて少なく、環境へのインパクトが小さい。
- (4) 構造的に大型の回転機を持たないため、騒音・振動が少なく、環境性がよい。
- (5) 基本的に水素が燃料であるが、その水素を作り出すための原料として天然ガス、LPG、メタノール、ナフサ、灯油などが利用でき、また高温型燃料電池では石炭ガス化との組み合わせも可能であり、燃料の多様化が図れる。

燃料電池は、従来の火力発電が燃料の有する化学エネルギーを熱エネルギーとして取り出した後に電気エネルギーに変換する間接発電方式であったのと異なり、水素と酸素をセルと呼ばれる単電池で電気化学反応させて直接電気エネルギーを取り出す直接発電方式である。火力発電は、ボイラーで化石燃料を燃焼し発生させた水蒸気をタービンへ送り、タービンと連結した発電機を回転させて電気を起こし、仕事を終えた水蒸気を復水器で水に戻したあと再度ボイラーへ送るといった熱サイクルを利用しているために、その発電効率はカルノーサイクルの制限を受け、新鋭火力発電所でも40%程度となっている。これに対して、燃料電池は直接発電であるため、発電効率が理論的には90%にも達する。しかしこれはあくまでも理論値であって、実際の発電効率は電極に於ける抵抗、電解質のイオン電気伝導及び電極内の電子電気伝導に対する抵抗等の影響により40~60%となる。このように、燃料電池は発電効率が従来の火力発電より高いのが大きな特徴である。さらに、部分負荷運転を行っても効率は低下せず、また SO_x , NO_x などの排出が極めて少ない、大型回転機が無いために騒音、振動なども少ないなど環境保全上も有利であるなどの特徴もあわせ持つ。加えて、日本などのようなエネルギーを海外に依存している国にとって、燃料の多様化が図れるということは多くのメリットをもたらす。

2.4.1 発電原理

燃料電池の原理は水の電気分解の逆の反応である。すなわち水素と酸素が結び付いて電気と水が発生する仕組みを利用している。事実、発電と同時に生成された水は回収して利用できる。また、燃料電池の仕組みについては、普通の一次電池が内蔵する反応物の出入りが無いためやがて寿命が尽きるのに対し、燃料電池は反応物の補給と生成物の排出を連続して行うことで、電気を連続して発生させる電池であるということもできる。

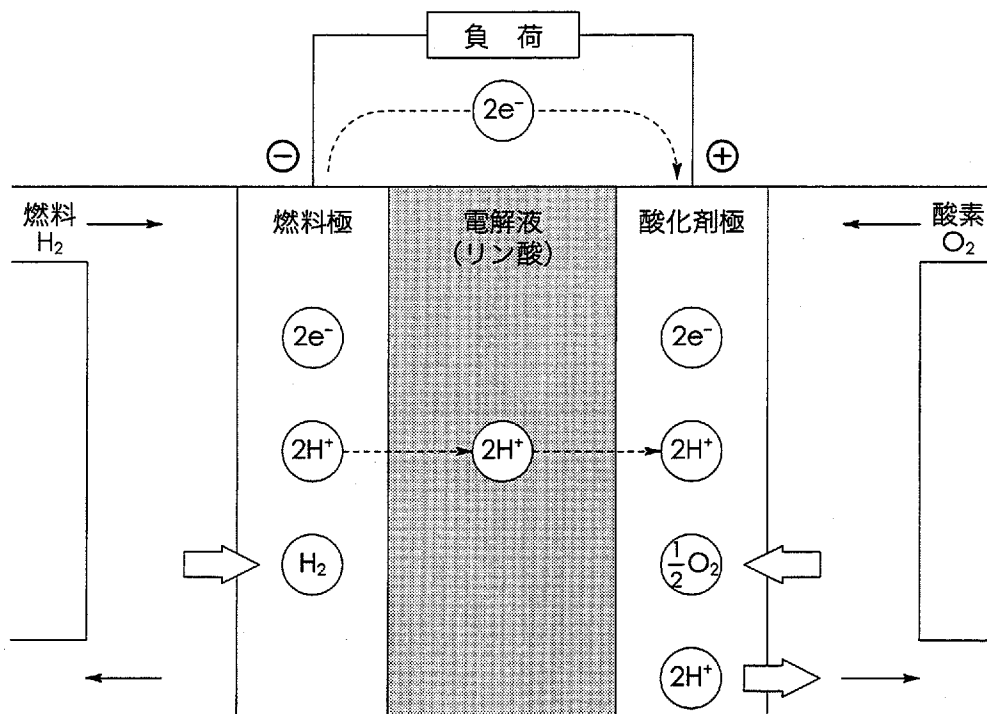


図 2.3: リン酸型燃料電池の発電原理

既に実用化のための研究段階に来ているリン酸型燃料電池を例に、その発電原理と動作を見ていく。図 2.3: に概念図を示す。この図のように、化石燃料から改質、生成された水素 (H_2) が燃料極 (-) において酸化され、電極に電子 (e^-) を与え水素イオン (H^+) となって電解質中を酸化剤極 (+) に移動する。外部回路を通った電子と水素イオンは酸化剤極において供給される空気中の酸素 (O_2) と反応し、酸素は電子を与えられて還元され、水が発生する。このとき両極間に起電力が発生し、両極を外部回路に連結すると外部回路を介して電子のやり取りがなされることにより化学エネルギーが電気エネルギーに変換され、外部へ直流電力が取り出せる。発生する起電力は理論的に

1V程度であるが、実際には電池の内部抵抗などにより1V以下となる。このままでは低すぎるので、電池を直列につないで必要な電圧まで上昇させる。この反応は水の電気分解の逆の反応である。このような原理で燃料電池は発電し、燃料電池を利用し易い装置とするために、電池を核とした発電システムを作ることが必要である。

以下、一般的な燃料電池発電システムの構成について述べる。

2.4.2 発電システム構成

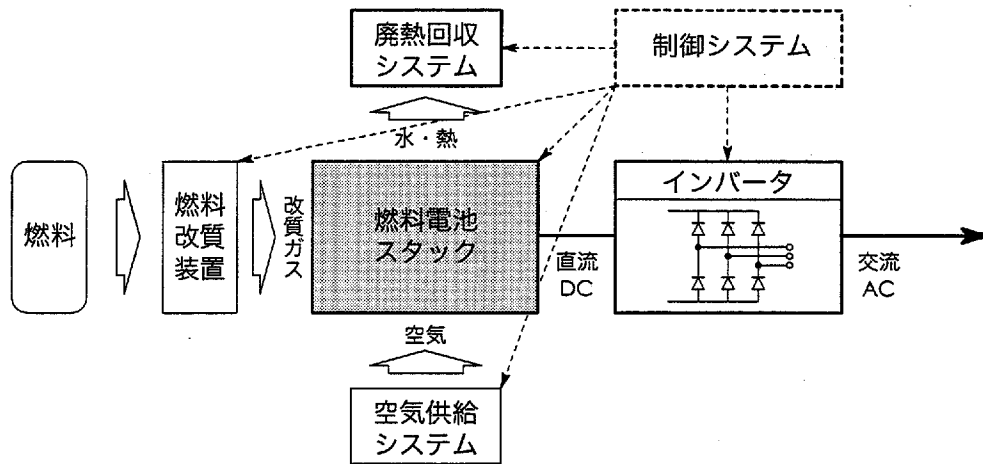


図2.4: 発電システム構成

燃料電池発電プラントは、燃料電池スタック本体のほかいくつかのサブシステムから構成されているが、その組み合わせは燃料電池本体の形式、および使用燃料や用途により異なる。主要サブシステムには燃料処理システム、空気供給システム、直交変換システム、排熱回収システム、制御システムなどがある。図2.4:にその構成例を示す。

以下、各システムの役割について述べる。

- (1) **燃料処理システム** 原燃料を燃料電池で使用できる水素を主成分とする燃料に転換するシステム。炭化水素系の気体燃料（天然ガス等）あるいは液体燃料（メタノール、ナフサ、灯油）については、水蒸気改質法による燃料改質が行われる。また、石炭利用では石炭ガス化反応により、水素と一酸化炭素を主成分とする気体燃料を製造する。これらの方式における主反応器は、それぞれ改質器と石炭ガス化炉と呼ばれている。
- (2) **空気供給システム**： 燃料電池反応空気を供給するシステム。モーター駆動の送風機あるいは空気圧縮機を使用したり、加圧プラントなどではプラント排気ガス

から動力回収する排気タービン式圧縮機（ターボコンプレッサー）利用などが一般的である。

- (3) **インバータ**： 電池本体で発生した直流電気を交流に変換する装置。直交変換システムともいう。
- (4) **排熱回収システム**： 燃料電池発電プラントにおいて発生する熱（電池排空気保有熱，燃料処理システム排熱等）を回収するシステム。
- (5) **制御システム**： 燃料電池発電プラントの起動・停止および負荷運転操作を可能にする制御装置。制御演算用コンピュータと計測・制御機器から構成される。

おおむね以上のようなシステム構成になるが、本研究で考えているような需要地直接設置をする場合、それぞれのシステムのコンパクト化，低コスト化が一層望まれる。

次に、燃料電池本体について、これまで開発されてきた様々な種類の燃料電池を紹介する。

2.4.3 燃料電池の種類

燃料電池は動作温度の違いによって低温型（常温～220℃）と高温型（600～1,000℃）に、そして電解質の種類によってアルカリ型，固体分子型，リン酸型，熔融炭酸塩型および固体電解質型に分類される。ここでは、電解質の種類による分類に従い紹介していく。ただし、この中でアルカリ型および固体高分子型については宇宙船電源や軍用など特殊な用途が多く、本研究で考えているような民生用の導入には向かないため省くことにする。

- (1) **リン酸型燃料電池**（Phosphoric Acid Fuel Cell: PAFC）： リン酸を電解質とする燃料電池は最も開発が進んでいる。多孔質の炭素板の片面に白金系の触媒を塗布した2枚の電極の間に、液体状の濃厚リン酸を含浸させた炭化ケイ素のマトリクス（リン酸を含浸保持させる基剤）を挟んだ構造となっている。これを単電池と称しており、動作温度は190～210℃程度で運転される。しかし、単電池の電圧は0.65～0.75V程度と低いため、単電池を直列に積層し、昇圧させて出力を取り出している。
- (2) **熔融炭酸塩型燃料電池**（Molten Carbonate Fuel Cell: MCFC）： 熔融炭酸塩型燃料電池は第2世代と呼ばれ、第1世代のリン酸型燃料電池に引き続いて開発が推進されている。熔融炭酸塩型の主な特徴は作動温度が650℃と高く、リン酸型のような高価な白金触媒を必要としないため、触媒被毒を心配することなく燃料の

多様化が図れること、並びにリン酸型より高い発電効率が期待されることなどが挙げられる。

- (3) **固体電解質型燃料電池** (Solid Oxide Electrolyte Fuel Cell: SOFC)： 電解質として、リン酸水溶液や溶融炭酸塩のような液体状材料の代わりに、イオン導電性を有する固体材料を用いた固体電解質型燃料電池の開発が進められている。固体電解質燃料電池は、作動温度が 1,000 °C にも達するが、電池内部の材料が全て固体(セラミックス)で構成されているため電解液による周辺材料の腐食、電極の溶出などによる性能劣化が無いという特徴がある。固体電解質型も他の燃料電池と同様に燃料極、電解質、空気極から構成されるが、これらは全てセラミックス薄膜で各要素を組み合わせている。

技術的に見てすでに実用化されつつあるのは、最初に紹介したリン酸型燃料電池である。現在、既に国家レベルの手を離れ、民間レベルでの実用化に向けての研究開発、実証試験が活発に行われている。

結 言： 以上、コージェネレーションとして利用可能な分散型電源である燃料電池について、その発電原理、発電システムとしての構成、種類などについて説明した。

次章では、燃料電池を系統に連系導入し、かつ最適に配置しようという本研究の主たる目的である最適配置問題について説明する。

第 3 章 分散型電源最適配置問題

緒 言： 本章では，本研究において提案する燃料電池の最適配置問題に関して，まず 3.1 節でその概要を述べる。続いて 3.2 節では，その枠組みに従って行った定式化について説明し，3.3 節にて非線形の目的関数を持つ組み合わせ最適化問題となることを示す。最後に 3.4 節において，解法アルゴリズムに求められる事柄について言及し，実際に本研究にて提案するアルゴリズムを示す。

3.1 概要

先の章で述べたように、燃料電池自体の主な特徴としては、原理的に高い効率で運転できるためエネルギー資源の有効利用に寄与することができること、また排出する大気汚染物質が少ないので環境性が良いこと、さらには発電の際に発生する排熱を回収・有効利用するコージェネレーションシステム (cogeneration system : 熱電併給システム) として導入すれば、総合効率のさらなるアップが実現できることなどが挙げられる。また、従来型の大規模発電システムを補完するという役割にも注目が集まっており、この期待は夏場の電力 (冷房) 需要のピークカットや供給信頼度の向上などに対して向けられているものと推測される。よって、これから新しく燃料電池を導入するにあたっては、これら特筆されるべき特徴を十分に活かし、かつ問題とされる事柄を検討した上での導入方策の枠組みが存在すれば好ましいと思われる。このような観点から、本研究では燃料電池の導入に対して考慮すべき要因を以下のように見積もり、定式化への足掛かりとした。

まず導入に際して考慮すべき要因は、経済性、電気的特性、環境へのインパクトなど多岐にわたるが、経済性に関して言えば、現在のところ燃料電池単独ではまだまだ従来型の大規模集中発電システムに比べて劣ることが多い。よって、経済性のみではなく、他の複数の要因も併せて考えることにより導入の意義付けが可能になる。すなわち、

- (1) ピークカットになるか
- (2) 熱併給 (コージェネレーション) の可能性とその評価
- (3) 導入の容易さ
- (4) 供給信頼度の向上
- (5) 環境汚染物質の排出量

などである。近年の夏場のピーク時の冷房需要は相当なものであり、そのためピークに合わせた設備投資が必要となっている。その結果、負荷率の悪化や、それに伴う設備利用率の低下を引き起こしており問題となっている。よって、燃料電池の設置によりピークをいくらかでもカットすることができ負荷の平準化に役立てば、十分に導入の意義はあると考えられる。また、熱併給の可能性を探ることにより無駄なく排熱を利用することができ、さらに将来期待される政府レベルの助成をも考えると、コスト面から見ても導入が促進される可能性があると思われる。このような観点から本研究で特に注目したのは上の (1), (2) についてである。

次に、新型の分散型電源が設置されるのは主として配電系統であり、電気特性として問題となるのは安定度ではなく、電圧プロフィールである。よって、従来の需要想定 (系統全体

としてではなく各地域別の需要想定)に従って、決められた電圧プロフィールを維持できる最適導入位置および最適容量を決定しなければならないと考えられる。

また、ごく最近まで、発電設備がもたらす環境インパクトの主役は世界的に酸性雨問題を引き起こしている NO_x, SO_xであった。しかし、地球温暖化(温室効果)が大きくクローズアップされるに伴い CO₂ 排出量の削減が待ったなしの課題として浮かび上がってきた。日本では大規模の火力発電所はほとんど大部分が脱硫・脱硝設備を備えていることと多雨のせい、欧米ほど酸性雨問題が深刻化していない。ところが、CO₂ に関しては全地球的な課題としてその排出量の削減が求められるので、排ガスからこれらの物質の排出量も当然検討要因として挙げねばならない。LNG 発電所の CO₂ 排出量は石油火力の約 60% であり、今後の情勢として LNG の使用に益々拍車がかかるであろう。当然、現在のコージェネは LNG を使用するものがほとんどであり、CO₂ 排出量の観点からは有利に働く。さらに、本研究で採り上げている燃料電池では CO₂ がほとんど排出されないの、先に述べた導入・運用にかかるコストの問題および系統連系に対する問題さえクリアされれば、相当数が導入されると思われる。

3.2 定式化

本節では、具体的な定式化について述べる。前節で述べたように、燃料電池の導入には様々なメリットと同時に問題点も存在する。メリットとしては環境に優しい電源であり、かつ需要地に分散配置できるため送電設備等の増設が必要ないこと、また効率が高いためエネルギーの効率的な利用に貢献できること、それによるエネルギー経費削減の可能性が存在することなどである。それに対して問題点は、従来存在しなかった燃料電池（分散型電源）の参入による系統運用上の障害が生じるおそれがあることなどである。

以下、これらの事柄を具体化すべく問題を定式化する。

3.2.1 仮定

まず、目的関数や制約条件の作成に先立ち、本定式化において設けている仮定について述べる。

- (1) 考察系統として放射状の配電系統が対象である。
- (2) 各ノードの電力・熱負荷は既知である。
- (3) 熱需要は全て電力により賄う。例外として、燃料電池が設置されたノードに限り、その排熱を熱需要を満たすために利用することができる。ただし、余った熱は廃棄される。
- (4) 燃料電池1台あたりの容量は一定である。
- (5) 燃料電池は常に定格で運転される。
- (6) 設置コストは単に設置台数に比例する。
- (7) 設置可能なノードは負荷ノードのみとする。

まず、今まで述べてきたように燃料電池の連系先となるのは配電系統である。また、配電系統は本来、無数のループにより構成されるが、セキュリティ関係上の理由により通常は放射状で運用されている。よって仮定(1)で、放射状の配電系統を考察系統として採用することとしている。

仮定(2)は、簡単化のために設けているものである。この負荷の値というのは現実性を持つよう考慮してあり、対象地域での需要想定後の値である。

仮定 (3) は、燃料電池の排出する熱を最大限に活用する目的で設けられているものであり、目的関数作成の際に考慮される。ただし、余剰排熱の扱いについて蓄熱設備の併設などは考慮しておらず、そのまま廃棄することとしている。

燃料電池の容量について、本来は各設置箇所について都合の良い容量を決定し、個別に設計・導入するのがエネルギーの効率的な利用の意味では最も良いと考えられる。しかし、燃料電池の普及促進と設置コストの低減の観点からすると、メーカーにより標準化・大量生産されているものを導入する方が圧倒的にコストパフォーマンスに優れていると思われるため、仮定 (4) を設けている。

燃料電池を含めて各種電源というのは、部分負荷運転ではなく定格で運転されているときが最も効率が良い。また、本問題で考えているのは電源配置の計画問題であり運用問題ではない。よって、常に燃料電池が定格で運転されるものとして計画を行い、運用問題とは区別した方が良いとの観点から仮定 (5) を設けている。

仮定 (6) に関して、設置コストというのは正確には各設置場所によって異なるはずであるが、本研究では簡単化のため1台あたりの設置コストはノードに依存しないものとしている。

本研究における燃料電池の設置者というのは需要家のみを考えているため、需要化の存在しないノード、すなわち負荷のぶら下がっていないノードは設置対象ノードから除かれる。これは仮定 (7) に述べられている。

3.2.2 目的関数

本研究で考えている燃料電池の導入というのは需要化を対象に既存の系統に連系することを前提としたものである。燃料電池の導入意義を考えると単なるエネルギー経費削減から地球環境問題への対応に至るまで様々な要因が考えられる。しかし、現実的に需要家が燃料電池を導入するか否かを決定する場合の要因は結局のところ経済性になる。従って、願わくは現在よりコスト的に有利となり、燃料電池が自発的に導入されるという状況が最も好ましい。よって、本研究では目的関数としてコスト関数を採用し、これを最小化する問題として定式化する。

しかし、系統運用者である電力会社と設置者である需要家との間に、燃料電池の導入に対する評価において隔たりが生じる可能性がある。すなわち、需要家側のいう最適配置と電力会社側の主張する最適配置が異なってくる。

電力会社にとって燃料電池を分散型電源として導入することは、環境問題や大規模発電システムの立地難など様々な問題を解決する手段のひとつとなり得る。さらに需要地(配電系統)に直接設置するため、線路損失も削減されることになり経済的に見てもメ

リットがある。一方、需要家が燃料電池をコージェネレーションシステムとして導入すると、電力の供給のみでなく排熱を有効利用することで冷・暖房、給湯などの熱需要を賄うことができ、大幅なエネルギー経費の削減が期待できる。さらに、このように一方向からではなく配電系統が網羅する地域全体から眺めると、偏った箇所に設置されるよりは地域全体としてメリットのある箇所、すなわち負荷（電力、熱とも）の規模およびそのパターンが燃料電池の導入に有利に働く箇所に設置されることが望ましいと考えられる。

以下、それぞれの場合に分けて設置によって生じると思われるメリットを簡単に列挙する。

- (1) 系統運用側（電力会社）
 - 大規模発電システムの代替エネルギー
 - 環境問題への対応
 - 送電損失の削減
- (2) 設置者側（一般の需要家）
 - エネルギー経費の削減
- (3) 配電系統の及ぶ地域全体
 - (1), (2) に挙げられた全項目

このように立場が異なるとメリットも異なるという事実が存在し、これを如何に解決するかという問題が生じるが、本研究では項目(3)を考えるとと言う立場を取り、地域全体の最適化を図ることにしている。

以上述べてきたことを考慮し、かつ前節で説明した仮定に基づいて、本研究では次式に示す目的関数を設定し、これを最小化するコスト最小化問題として本最適配置問題を考えている。

$$\begin{aligned} \text{目的関数} &= (\text{変電所の供給する全電力のコスト}) \\ &+ (\text{電力で賄っている熱需要のコスト}) \\ &+ (\text{設置コスト}) \\ &+ (\text{運用コスト}) \end{aligned}$$

各項について簡単に説明する。

第1項：変電所の供給する全電力コスト： この項の値は実際には潮流計算により求めるが、近似的には以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \text{第1項} &= (\text{考察系統の全電力需要}) \\ &\quad - (\text{連系導入した燃料電池の全発電量}) \\ &\quad + (\text{線路損失}) \end{aligned}$$

連系導入すると、燃料電池の発電量分だけの削減量のみでなく、連系導入箇所によっては線路損失も削減されることができる。

第2項：電力により賄う熱需要コスト： 3.2.1 節の仮定でも述べたように、燃料電池をコージェネレーションシステムとして導入すると、併給される熱を有効に利用することにより熱負荷を相殺することができ、大幅なエネルギー経費の削減につながる。このメリットを考慮するために第2項が設けられている。

$$\begin{aligned} \text{第2項} &= (\text{考察系統の全熱需要}) \\ &\quad - (\text{有効利用できる燃料電池の排熱}) \end{aligned}$$

第3項：設置コスト： この項は、仮定より簡単に以下のように表すことができる。

$$\text{第3項} = (\text{全設置台数}) \times (\text{1台あたりの設置コスト})$$

第4項：運用コスト： 燃料電池導入の際に現れてくるトレードオフな関係を表すために導入されている項である。

$$\begin{aligned} \text{第4項} &= (\text{電気料金}) \\ &\quad + (\text{燃料・保守・点検費などの運用費}) \end{aligned}$$

電気料金とは、需要家が電力会社に払うべき電気料金を指す。燃料電池を設置したノードではその発電量に応じた電気代が削減されることになる。また、逆に運用にかかる様々なコストが必要となるためこの項で考慮してある。

具体的には、以下(式3.1)のように表すことができる。

$$\begin{aligned} z &= K_1 \cdot \sum_{j=1}^m (T_j \cdot P_j) \\ &\quad + K_2 \cdot \sum_{j=1}^m \left[T_j \sum_{i=1}^n \max \{ C_{ij} - F_1(PG_i), 0 \} \right] \\ &\quad + K_3 \cdot m_S \cdot S \end{aligned}$$

$$+K_4 \cdot \sum_{i=1}^n \left\{ R_i - F_2(PG_i) + F_3(PG_i) \right\} \quad (\text{式 3.1})$$

ここで,

- K_L : コスト換算の係数 ($L = 1, 2, 3, 4$)
- j : 負荷時刻
- m : 全負荷パターン数
- T_j : 時刻 j における負荷持続時間
- P_j : 時刻 j に配電用変電所の供給する電力
- i : 適用系統のノード番号
- n : 全ノード数
- C_{ij} : 時刻 j , ノード i での熱需要の大きさ
- PG_i : ノード i での燃料電池の発電量
- F_1 : 燃料電池の熱供給量
- S : 燃料電池 1 台あたりの発電量 (一定)
- m_s : 全設置台数
- R_i : ノード i に燃料電池を設置しないときに需要家の払うべき電気料金
- F_2 : 燃料電池の電力供給により削減される需要家の電気料金
- F_3 : 燃料電池の保守, 点検, 運用費

である。

電力や熱の需要というのは季節や時間帯によって変動するため、燃料電池の配置パターンに対する評価はこれら時間変動を考慮しながら行う必要がある。本研究では、適用系統の各ノードについて四季の代表的な 1 日をサンプルし、これらの 1 日を 8 等分した計 32 通りの負荷パターンを 1 年間の負荷変動として用いている。従って、第 1 項は配電用変電所が考察系統に対して供給する 1 年間の電力コストに相当する。また第 2 項において、余剰排熱は廃棄することと仮定しているため、各ノードで熱供給が需要を上回った場合には値が 0 となるよう考慮してある。第 3 項の「設置コスト」は、電源 1 台あたりの容量を一定と仮定しているため単に考察系統全体に設置されている燃料電池の台数に比例する。最後の第 4 項について、この項は上述したように電気料金と運用コストの和で表されるが、燃料電池の設置されていないノードでは単に電力会社に支払うべき電気料金のみとなる。

3.2.3 不等式制約

本研究では燃料電池を配電系統に連系導入することが前提とされているため、前節で述べたコストのみにとらわれて無造作に配置すると、予想外の電圧変動などが生じる可能性があり系統運用上支障がある。現在の配電系統はセキュリティ上の理由から放射状で運用されていることは前述の通りであり、この場合、電圧は配電用変電所から系統の末端に向けて単調に減少して分布する。しかし、その系統へ新しく逆送電の可能な分散型の電源が連系されるということになると、その連系点で電圧が上昇し分布が単調でなくなり、規定されている許容範囲を逸脱する可能性がある。3.1節の概要で述べたように、電気的特性として問題となるのはこの電圧プロフィールであり、導入の際には十分に留意する必要がある。

また、放射状で運用されていることから、ある需要家の存在する地点までの電力供給経路は（系統切換を行わない限り）一意に決まってしまう、途中でボトルネックとなる経路が存在すると供給支障を生じる。よって、ある地点に実際に十分な電力が供給されているかどうかを表す指標として「需要端信頼度^[4]」なるものが提案されており、本研究ではある一定値以上の値を確保するべく制約条件として導入した。

結局、本研究では各ノードに関して（式 3.2）に表されるような電圧制約および（式 3.3）の需要端信頼度制約を設けており、これらが不等式制約となる。

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (\text{式 3.2})$$

$$DSR_{\min} \leq DSR_i \quad (\text{式 3.3})$$

ただし、

V_i : ノード i での電圧値

V_{\min} : ノード i での許容電圧下限値

V_{\max} : ノード i での許容電圧上限値

DSR_i : ノード i での需要端信頼度

DSR_{\min} : ノード i での需要端信頼度下限値

である。

これらの制約により、系統のノード電圧が電力需要の増加によって電圧低下を引き起こしているとき、適当なノードに燃料電池を設置することによりそのノード電圧を上昇させることができる。本研究で設定している負荷の値は需要増加を想定したものであり、この意味での燃料電池の導入も考えられる。同様に、ボトルネックによる供給支障に対しても電源の設置により解決する場合も十分に考えられる。

3.2.4 等式制約（潮流計算）

配電系統は、そこに所属する需要家負荷に対して過不足なく電力を供給し続ける使命を負っている。よって、先に示した不等式制約に加えて、需給バランス制約が課される必要がある。これは潮流計算によって決定される系統の運用点制約（各部の潮流、電圧プロフィールなど）であり、等式制約となる。

通常、潮流計算としてはアドミタンス行列を基本とした非線形な潮流方程式を何らかの収束法にて解くという方法が用いられる。しかし、本研究では非常に多くの潮流計算回数を必要とし、全体の計算時間がほとんど潮流計算によって占められるため、できるだけ高速な潮流計算法の使用が望まれる。

そこで本研究では、放射状系統に対して高速な潮流計算を実現する DistFlow 法 [1] を採用した。DistFlow 法は F. F. Wu 教授らによって提案されたものであり、問題を構成する方程式中に三角関数を含まず、配電系統が放射状で運用されているという性質を利用した効率的な計算法である。一般的なアドミタンス行列を利用した従来からの潮流計算法よりも高速であるとされ、さらなる高速化も可能である。本研究においても、従来法よりも高速であることを確認している。

DistFlow 法についての詳しい説明は付録 A に示すが、ここでは定式化に関連する部分のみについて簡単に述べる。

DistFlow 方程式： 図 3.1: に一般的な放射状配電系統の概略図を示す。変電所から末端に向けて芽づる式に電力が供給されており、ループが存在しない。

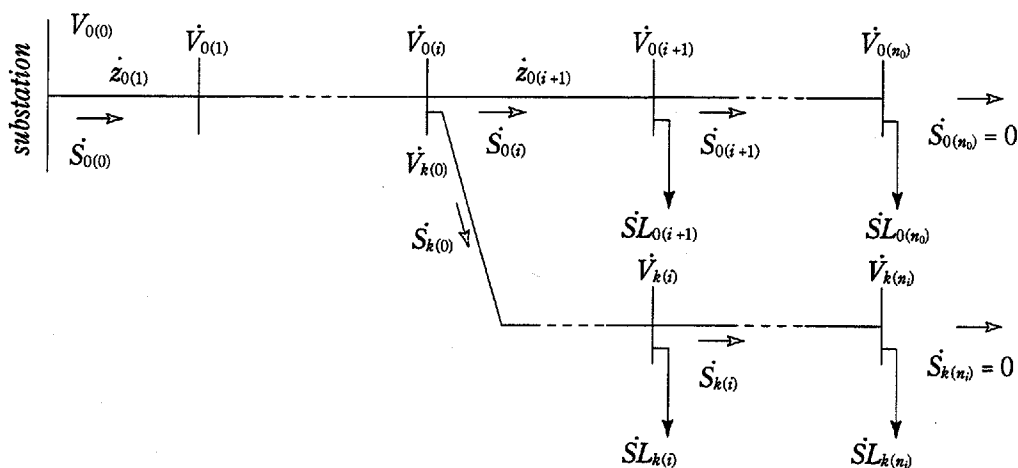


図 3.1: 放射状配電系統

ここで、

- k : フィーダ番号を示す添え字
 i : そのフィーダ中でのノード番号
 n_k : フィーダ k 中の全ノード数
 $V_{k(i)}$: フィーダ k , ノード i の電圧値
 $\dot{S}_{k(i)}$: フィーダ k , ノード i から流出する電力潮流
 (すなわち, $\dot{S}_{k(i)} = P_{k(i)} + jQ_{k(i)}$)
 $P_{k(i)}$: $\dot{S}_{k(i)}$ の有効分
 $Q_{k(i)}$: $\dot{S}_{k(i)}$ の無効分
 $SL_{k(i)}$: フィーダ k , ノード i にぶら下がる負荷
 (すなわち $SL_{k(i)} = PL_{k(i)} + jQL_{k(i)}$)
 $PL_{k(i)}$: $SL_{k(i)}$ の有効分
 $QL_{k(i)}$: $SL_{k(i)}$ の無効分
 $\dot{z}_{k(i)}$: フィーダ k , ノード $i \sim$ ノード $(i+1)$ 間の線路インピーダンス
 (すなわち $\dot{z}_{k(i)} = r_{k(i)} + jx_{k(i)}$)
 $r_{k(i)}$: $\dot{z}_{k(i)}$ の抵抗分
 $x_{k(i)}$: $\dot{z}_{k(i)}$ のリアクタンス分

である。

このような系統に対しては、各ノード間に対して以下のような線路潮流方程式が成立する。

$$P_{k(i+1)} = P_{k(i)} - r_{k(i+1)} \frac{P_{k(i)}^2 + Q_{k(i)}^2}{V_{k(i)}^2} - PL_{k(i+1)} \quad (\text{式 3.4})$$

$$Q_{k(i+1)} = Q_{k(i)} - x_{k(i+1)} \frac{P_{k(i)}^2 + Q_{k(i)}^2}{V_{k(i)}^2} - QL_{k(i+1)} \quad (\text{式 3.5})$$

$$V_{k(i+1)}^2 = V_{k(i)}^2 - 2(r_{k(i+1)}P_{k(i)} + x_{k(i+1)}Q_{k(i)}) + (r_{k(i+1)}^2 + x_{k(i+1)}^2) \frac{P_{k(i)}^2 + Q_{k(i)}^2}{V_{k(i)}^2} \quad (\text{式 3.6})$$

また、それぞれの分岐線の終端においては、そこから先の電力潮流はないので、以下の境界条件式が成立する。

$$P_{k(n_k)} = 0 \quad (\text{式 3.7})$$

$$Q_{k(n_k)} = 0 \quad (\text{式 3.8})$$

さらに、分岐点においては、分岐元のノードと分岐先の始点とか同じノードとなっているので、明らかに電圧が等しく、これが以下に示す境界条件となる。

$$V_{o(i)}^2 = V_{k(i)}^2 \quad (\text{式 3.9})$$

これら、(式 3.4) ~ (式 3.9) をまとめて DistFlow 方程式と呼び、これらが全て等式制約として課されることになる。

3.3 混合整数計画問題

ここでは、先に説明した定式化により最終的に本問題が混合整数計画問題となることを示す。

前節の結果より、本問題中の等式制約をまとめて次式とする。

$$G(x, u) = 0 \quad (\text{式 3.10})$$

ただし、

$$\begin{aligned} x &= [x_1, x_2, \dots, x_L]^T \\ x_i &= [x_{i(1)}, x_{i(2)}, \dots, x_{i(n)}]^T \\ x_{i(k)} &= [P_{i(k)}, Q_{i(k)}, \dots, V_{i(k)}^2]^T \\ u &= [PG_1, PG_2, \dots, PG_n]^T \end{aligned}$$

である。 x は運用点ベクトルを、 u は設置された分散型電源の発電量ベクトルに対応する。ここで電源はモジュール化、標準化を仮定しているので、発電容量ベクトル u を設置台数からなる整数ベクトル m に置き換えることができ、(式 3.10)を

$$G(x, m) = 0 \quad (\text{式 3.11})$$

と書き換えることが可能である。ただし、 $m = [m_1, m_2, \dots, m_n]^T$ である。

前節にて定式化した目的関数と不等式制約とは、いずれも運用点と電源の代数の関数とみなすことができるので、結局以下のようにまとめることができる。

$$\text{目的関数} \quad Z(x, m) \quad (\text{式 3.12})$$

$$\text{不等式制約} \quad F_i(x, m) < 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{式 3.13})$$

以上、まとめると次のような最適化問題として定式化されたことになる。

$$\text{目的関数} \quad Z(x, m) \quad (\text{式 3.14})$$

$$\text{不等式制約} \quad F_i(x, m) < 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{式 3.15})$$

$$\text{等式制約} \quad G(x, m) = 0 \quad (\text{式 3.16})$$

$$m \in I^n \quad (\text{式 3.17})$$

ただし、 I^n は n 次元整数ベクトル集合を示す。

よって、本問題は非線形な目的関数を持つ混合整数計画問題として定式化されることがわかる。

3.4 解法アルゴリズム

ここまで、燃料電池の最適配置問題をコスト最小化問題として定式化してきたが、本節では先の節で行った定式化を受けて、本問題を解くための解法アルゴリズムに求められる事柄を挙げる。

電源の配置パターンの評価を行うには、先の目的関数値や制約条件に関連して、各ノードの電圧の値、電力潮流の値などが必要となる。これらは各時点での潮流計算により得られるものである。しかし、この潮流計算はいわゆる反復計算であり、先に述べたように DistFlow 方を使ったとしても実行には比較的時間がかかる。また、1つの配置パターンに対して32時点という多数の負荷パターンに対して計算を実行する必要があるため、さらに実行時間は長くなる。加えて、本問題は非線形の目的関数を持つ組み合わせ最適化問題として定式化され、最適解を得るためには総当たりでの探索が必要となる。

潮流計算が必要であるが、反復計算であり実行にある程度時間がかかる。

↓

多くの負荷パターンに対して全て潮流計算を実行する必要があり、実効回数自体が多い。

↓

非線形な組み合わせ最適化問題であるので、総当たりの探索が必要である。

ここで、全探索をすると仮定した場合、仮に考察系統の全設置可能ノード数を N 、連系導入する電源の総台数を m とおくとすると、評価・探索すべき全配置パターン数は次式の重複組み合わせ数として表される。

$${}_N H_m = \frac{N(N+1)(N+2)\cdots\{N+(m-1)\}}{m!} \quad (\text{式 3.18})$$

また、設置する台数を0台から M 台までの間についても考えると、探索パターン数は、

$$\sum_{m=0}^M {}_N H_m \quad (\text{式 3.19})$$

となる。さらに、年間を通じた負荷変動を考える必要性から32通りの負荷パターンを考慮しているため、実際の潮流計算は(式3.19)の32倍だけ必要となる。よって本研究では、できるだけ効率的な解法として、分枝限定法を基礎とした解法アルゴリズムを提案している。

混合整数計画問題は、整数変数の取りうる値が有限個であり、すべての組み合わせを探索

すれば最適解を求めることができる。しかしながら、問題の規模が大きくなってくると探索回数がいわゆる「組み合わせ爆発」を起こし、現実的な時間内での求解が困難となる。

そこで本研究では、以下に示す限定操作を用いた分枝限定法を基礎とした解法アルゴリズムを用いている。限定操作は大きく分けて次の2つに分類される。

- (a) 探索領域を目的関数が改善される見込みのある解空間へと限定する。
- (b) 探索領域を実行可能領域へと限定する。

以下、これら限定操作について説明する。

3.4.1 最大設置可能台数の設定

これは、各ノードについて、電源の設置台数の最大値を予め設定しておく方法である。先に示した目的関数を見ればわかるように、1つのノードに何台もの電源を設置することは設置コストがかさみ現実的でない。また、電源の廃熱を有効利用することができなくなるため、さらに非効率的なものとなる。よって、各ノードには需要に見合った適切な台数というものが存在するはずである。

本限定操作は、各ノードにおいて、目的関数を改善する見込みのある台数（最大設置可能台数）までしか電源の設置を認めないとする操作である。もちろん、最適解を含む領域を除外することのないようにする必要がある。

図 3.2: は例として、あるノードに電源を設置したときの目的関数 Z の各項に対応する値の変化を模式的に示したものである。電源を追加すると、目的関数の第3項「設置コスト」と第4項「運用コスト」は、設置したノードの位置に関係なくそれぞれ一定量だけ増加する。反対に第1項「(変電所からの)電力供給コスト」は、電源の設置による発電量増加分と削減される送電損失分だけ減少する方向に働く。また第2項「熱需要コスト」も、電源からの廃熱を有効利用することによって削減をはかることができる。したがって、これら削減分がどの程度になるかにより、目的関数が改善されるかどうかが決まる。

ただし、第1項の削減分については、送電損失を考える必要があるため、潮流計算をしたあとでないと実際の削減量はわからない。そこで、送電損失分については最大値を予め求めておき、その値を用いることによって必ず一定量が削減されるものとしている。こうすることで、設置台数を多めに見積もり、探索空間の行き過ぎた限定を防いでいることになる。

以上のことから、あるノード位置において最終的に目的関数が改善されるかどうかは、第2項「熱需要コスト」の削減量にかかっていることになり、本限定操作はこのこ

とを利用したものである。たとえば、図3.2: の左側は1台設置したときの目的関数の各項の変化分をそれぞれ足し合わせると全体として減少しており、逆に右側では同じノードに2台設置したために、全体として増加してしまっていることを示している。

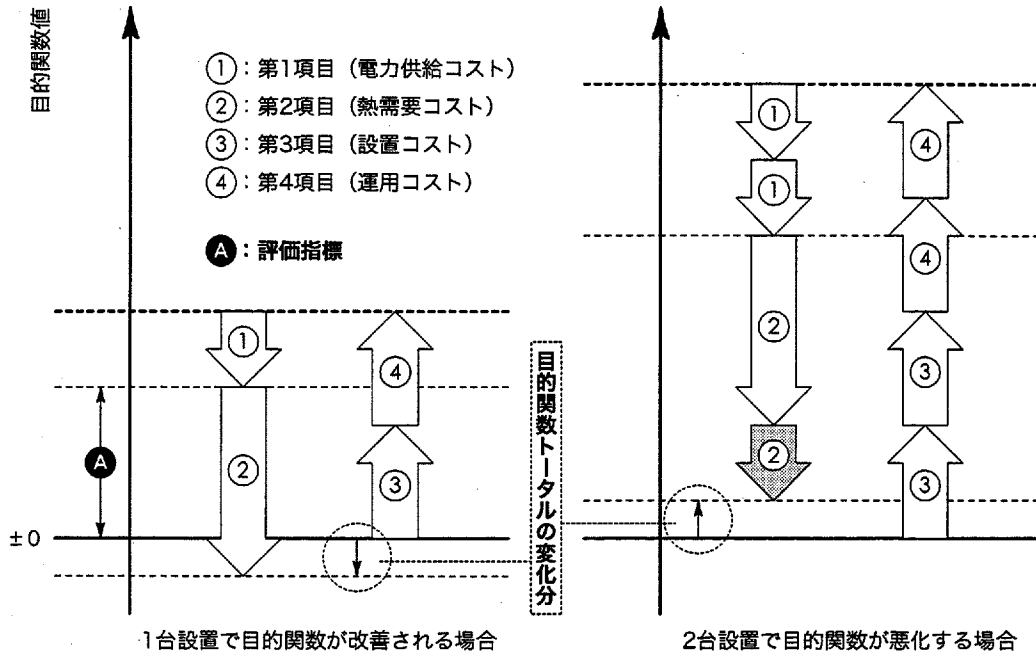


図3.2: 最大設置台数の設定

このことを判断するために本研究では、図3.2: 中の評価指標“A”を用いている。すなわち、仮にそのノードでの熱需要コストが“A”よりも大きいとき（左側）、同ノードに電源を1台設置すると目的関数を改善することができる可能性がある判断する。ここで、必ずしも改善すると言えないのは、第1項「(変電所からの) 電力供給コスト」の値を近似的に求めているために、わずかながら大きめの値を用いていること、また先に説明したとおり、この中に含まれる送電損失分は系統内の最大値を用いていることに起因する。

最終的に本研究では、評価指標“A”を用いて以下表 3.1: のように各ノードの最大設定可能台数を決定している。

表 3.1: 最大設置可能台数の決定

熱需要コストの大きさ	最大設置可能台数
熱需要コスト < A	0
$A \leq \text{熱需要コスト} < (2 \times A)$	1
$(2 \times A) \leq \text{熱需要コスト} < (3 \times A)$	2

3.4.2 電圧制約を考慮した限定操作

ここで述べる限定操作は探索領域を実行可能領域のみに限定する手法のひとつであり、電圧制約を満たす電源配置のみを効率よく探索するために設けてある。本限定操作は大きく2段階に分けることができ、以下それぞれについて説明する。

系統連系最小設置台数の設定 (第1段階): 対象系統に電圧の下限値にも満たないノードが複数存在するとき、これらのノード電圧を引き上げる必要がある。ノード電圧は電源が発生する無効電力により上昇させることができる^{†2}。すべてのノードが電圧制約を満たすために系統に連系する必要がある台数(系統連系最小設置台数)が明らかになれば、この台数未満の電源にて構成される設置パターンはすべていずれかのノードが電圧制約違反をするものと考えられ、それらを探索空間から除外することができる。系統連系最小設置台数は以下のようにして求められる。

最初に電源が全く連系されていない状態で潮流計算を行い、制約に違反しているノードを抽出する。そのノードに対して電圧感度が最も高いノードに電源を設置して、再度潮流計算を行う(図 3.3:)。さらに違反があれば、同様に電源を追加しながら潮流計算を行っていく。この操作を繰り返せば、最終的にすべてのノードが電圧制約を満たすことになる。この時点で系統に連系されているトータルの電源台数が系統連系最小設置台数となる。

†2: 本研究では、その他の方法による無効電力の供給までは考えていない。

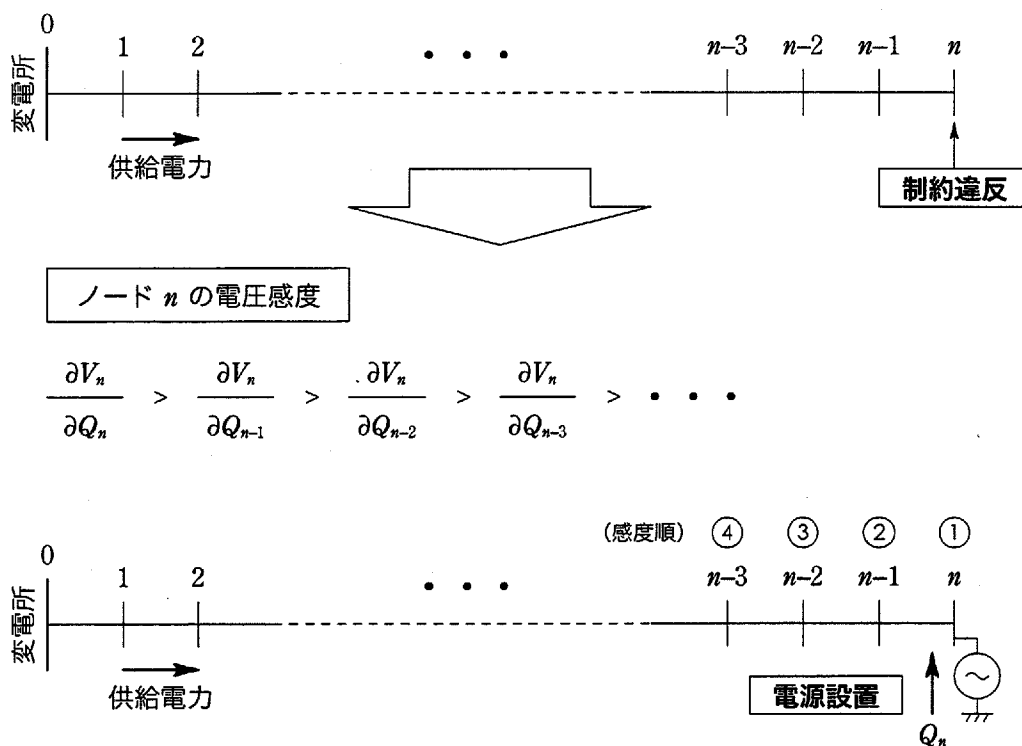


図 3.3: 電圧制約を考慮した限定操作 (第1段階)

電圧感度順の探索 (第2段階) : 第1段階が終了した時点では、制約に違反したノードに対して最も電圧感度の高いノードに電源を設定しているため、電源の位置が感度の低い位置に移るといずれ電圧制約を満たさなくなる可能性がある。第2段階では、このような系統連系最小設置台数以上の配置パターンの中で制約を満たすものだけに限定する。

まず、第1段階が終了した状態から、設置された電源の位置を1台ずつ電圧感度順に移動することで配置パターンを変化させる。そのたびに潮流計算を行い、ノード電圧値、目的関数値を求める。探索が進むにつれて設置ノードは電圧感度が低くなっていくため、ついには再び制約違反を起こしてしまう。これ以降の電源配置はすべて制約違反を起こすものと考えられ、この時点で探索をうち切ることができる。(図 3.4)。

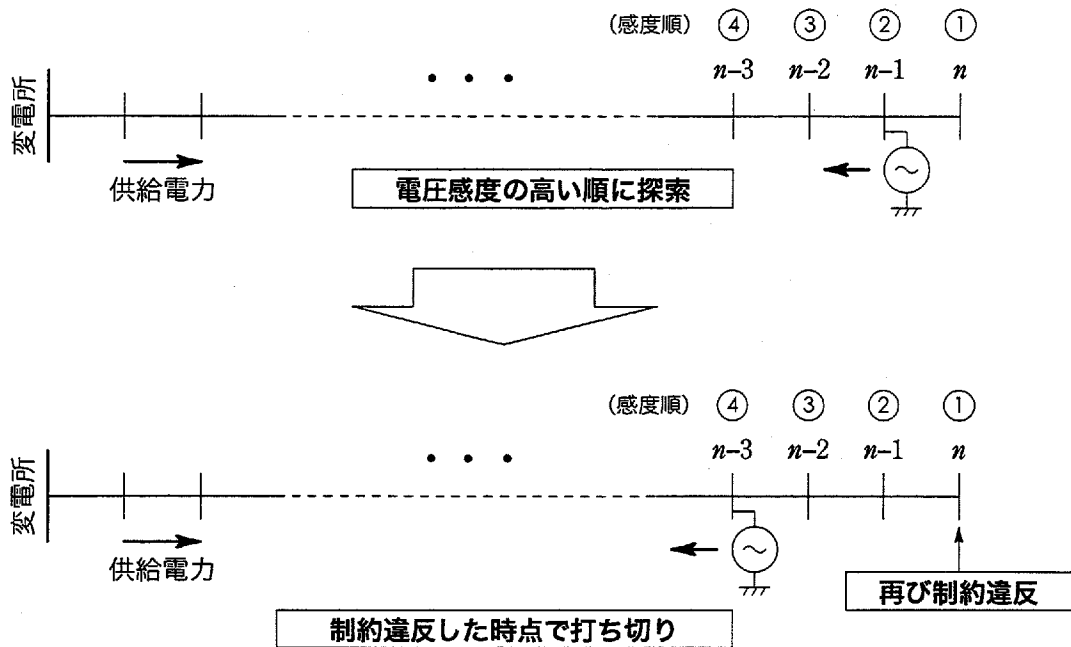


図 3.4: 電圧制約を考慮した限定操作 (第 2 段階)

3.4.3 需要端信頼度 (DSR) 制約を考慮した限定操作

図 3.5: は、左側の変電所から右側のフィーダへと電力を供給している系統の送電容量を表した模式図である。この図では、ノード 1 が需要端信頼度 (DSR) 制約に違反している状態を示している。この制約違反の原因としては、同ノードと上流の変電所間のどこかに、需要に対して容量の小さいボトルネックとなる線路が存在していることが考えられる。この場合、ノード 1 に電源を直接設置してやることで着水可能電力は増加し、需要端信頼度は改善される。

このように、電源を設置することでノード 1 の需要端信頼度を改善させることのできるノードは、ノード 1 と変電所との間に存在すると考えられる。よって、その区間に限定して需要端信頼度を改善することのできるノードを探索し、この中で最適な設置箇所を選択する。

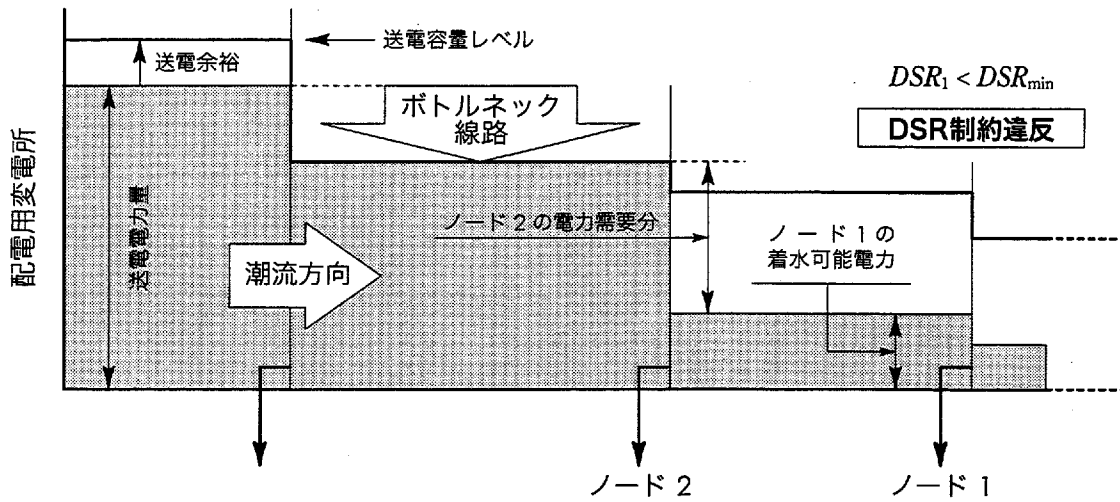


図 3.5: 需要端信頼度 (DSR) 制約を考慮した限定操作

3.5 数値シミュレーション

本節では、問題に関連するパラメータの設定値と、例題系統として用いた11母線および69母線の2つのモデル系統を示し、これらを適用して得られたシミュレーション結果を示す。

3.5.1 パラメータ設定

目的関数に関連するパラメータの設定値を、以下表3.2:に示す。

表3.2: パラメータ設定

燃料電池定格発電容量 (1台)	200 (kW)
燃料電池回収熱量 (1台)	172 (Mcal)
燃料電池設置コスト	50 (万円/kW)
発電原価 (電力会社)	10.4 (円/kWh)
商用電気料金	20 (円/kWh)

燃料電池の発電定格容量は、現在すでに設置が進められている標準的な容量とし、その回収熱量も標準値を参考にした。また、設置コストについては現在も削減に対する努力が進んでいるが、現状での妥当な値としてkWあたり50万円とした。

3.5.2 モデル系統

11母線系統: 図3.6:に11母線モデル配電系統を示す。この系統には、実際のスポーツセンター、総合病院、ホテル、事務所ビルの電力、熱負荷が割り当てられている。系統パラメータについては、実際の系統を参考に設定した架空の値である。この系統については、11母線とノード数が少ないため、全探索によって最適解を求めることが可能である。

69母線系統: 図3.7:に69母線モデル配電系統を示す。これはIEEE69母線配電系統を引用した。ただし、電力負荷、熱負荷については先の11母線系統と同様に割り当てられている。

3.5.3 探索結果

11母線のモデル系統に対しては、全探索と電圧制約による限定操作を導入したアルゴリズムの2つを適用した(系統連系可能な最大設置台数は5台)。

69母線のモデル系統については、3つの限定操作をすべて導入したアルゴリズムでな

ければ現実的な時間内での実行が不可能であることが試算によって判明した。よって、実際にシミュレーションを行ったのは3つの限定操作を導入したアルゴリズムだけである。

以下、それぞれの場合について示す。

11 母線配電系統： 全探索によって得られた最適配置と、限定操作を導入した手法により得られた解はいずれも同じ配置を示した。以下、図 3.6: にその配置を示す。

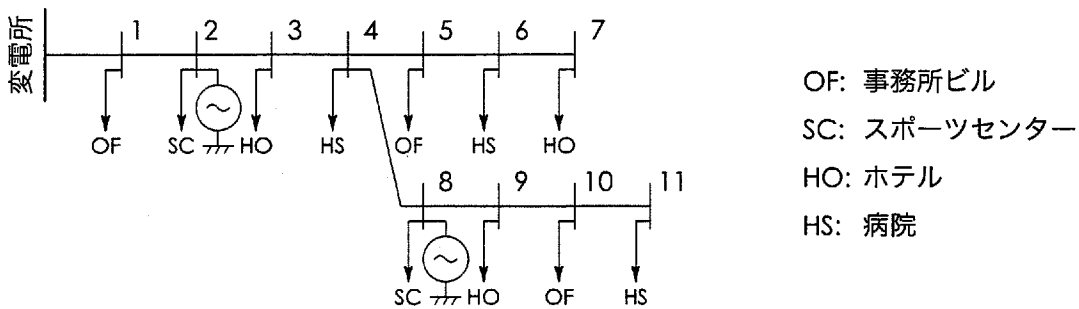


図 3.6: 11 母線配電系統モデルに対する最適配置

シミュレーションの結果、図のように最適導入台数は2台、最適配置の電源設置箇所は2台とも電力、熱需要ともに大きいスポーツセンターのノードとなった。これは、電源からの廃熱を他の施設よりも有効に利用することができ、トータルの熱需要が大幅に削減されたことに起因すると考えられる。

ここで、限定操作の効果を見るために、表 3.3: に探索方法の違いによる探索回数と計算時間の比較を示す。

表 3.3: 探索回数と計算時間 (11 母線系統)

探索方法	探索回数	計算時間 (秒)
電圧制約限定操作導入	845	178.2
全探索	3367	560.5

※ Sun IPX を使用

69 母線配電系統： すべての限定操作を導入したアルゴリズムを69母線配電系統モデルに適用した結果、図 3.7: に示す配置が得られた。

電源が分岐線の末端部分に設置される傾向があるのは、電源が設置される前の状態において、末端のノード電圧が電圧降下によって制約に違反しており、それを改善するた

めの電源設置が進んだものと考えられる。また、変電所から遠いノードに設置される方が線路損失の削減に寄与することも理由のひとつとなっていると思われる。

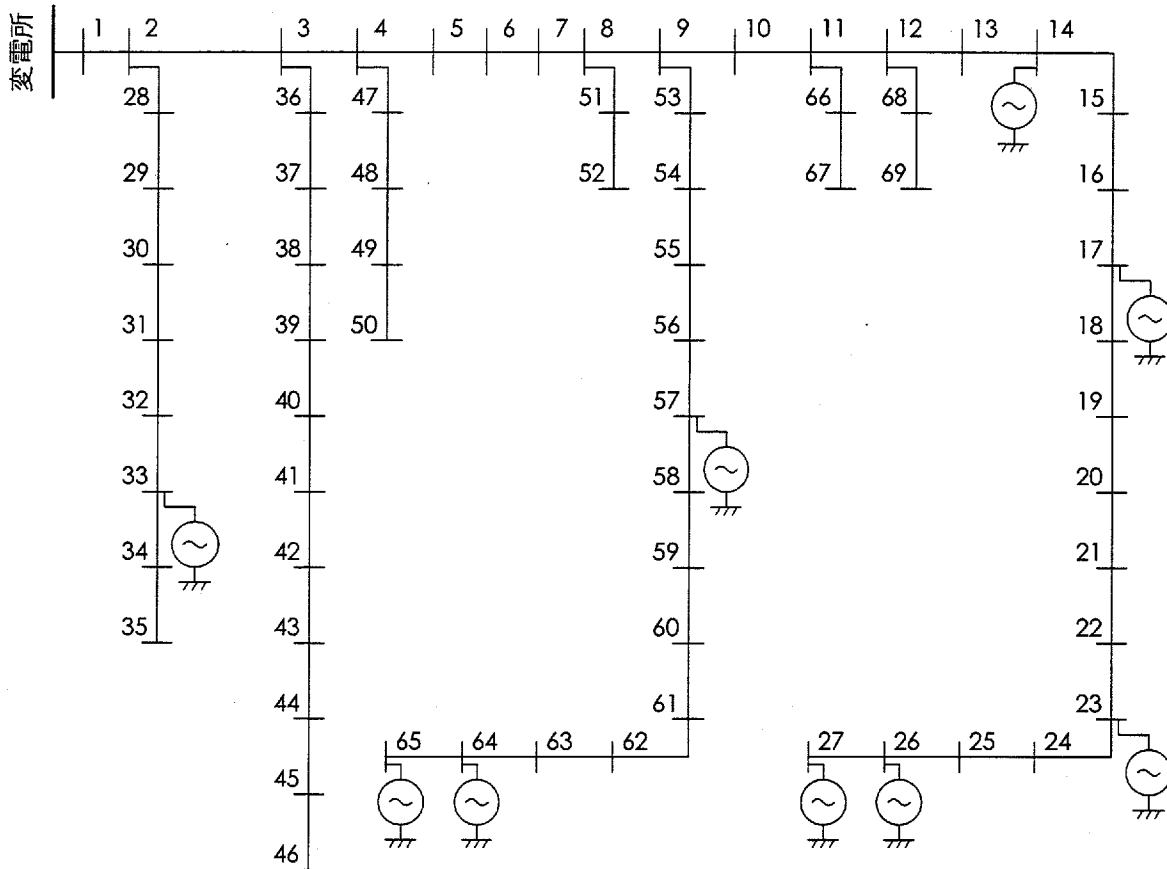


図 3.7: 69 母線配電システムモデルに対する探索結果

すべての限定操作を導入してシミュレーションを行った結果、各ノードにおける最大電源設置可能台数とそのノード数は以下表 3.4: のようになった。

表 3.4: ノード最大設置台数とノード数

最大設置台数	ノード数
0	52
1	13
2	4

また、表 3.4: の結果から、各ノードに最大設置台数を設定する限定操作だけを導入したアルゴリズムの探索回数および計算時間を算出することができる。全探索については

系統への最大連系台数を9台と仮定することで、同様に算出が可能である。これら試算結果と、実際のシミュレーション結果とをまとめて表3.5:に示す。

表 3.5: 探索回数と計算時間 (69 母線配電系統)

探索方法	探索回数	計算時間
すべての限定操作導入	1216 回	103 分 33 秒
各ノード最大設置台数設定	89,544 回	約 5 日
全探索	約 280 万回	162 日

各ノードの最大設置台数を設定する限定操作を導入した手法と全探索の試算とを比較すると、本限定操作はかなり効率的な計算を実現していることがわかる。

また、今回の結果から、69 母線配電系統に対するシミュレーションでは、探索 1 回あたりの計算時間が 11 母線配電系統のその 20 倍以上かかることが明らかとなった。これは、潮流計算時間がノード数に比例して増加することに加え、電圧感度を求める計算がノード数に対して指数関数的に増えるためであると考えられる。したがって、ノード数が増えると探索回数が増加するだけでなく 1 回あたりの計算時間も増加するため、さらに系統が大規模になるようになってくると本手法を用いても最適配置の探索がますます難しくなってくるのがわかる。

結 言： 本章では、分散電源最適配置問題について、その枠組みの考え方、それに沿った定式化、および解法アルゴリズムについて述べた。解法アルゴリズムについては、規模の大きな問題にも対応可能なものとするため、限定操作を導入した分枝限定法を基礎としたアルゴリズムを提案した。

その結果、11 母線、69 母線配電系統モデルに対する最適配置を求めることができ、導入した限定操作の効果も確認することができた。しかしながら、対象系統がこれ以上の規模になるとこの解法アルゴリズムを用いても現実的な時間内での求解が難しいことがわかった。

次章では、さらに大規模な問題に対する近似解法アルゴ

リズムとして, 遺伝的アルゴリズムを用いた解法アルゴリズムについて述べる。

第4章 遺伝的アルゴリズムによる解法

緒言：本章では、大規模なシステムにも適用可能な近似解法として遺伝的アルゴリズム（以下GAという）を用いた解法アルゴリズムを提案する。

まず4.1節では、GAの特徴やその動作等、基本的な事柄をその歴史を含めて紹介する。次に、4.2節でアルゴリズムの全体の構造に関して、その構成要素である生殖集団、遺伝オペレータや遺伝パラメータ等、またGAを適用するにあたって必要となる符号化の方法や個体評価の方法などについて見て行く。4.3節は、本研究でパフォーマンス向上のため用いている初期集団の生成法とエリート戦略の説明のためにそれぞれ設けられており、その効果は4.4節、4.5節に述べる数値シミュレーション例にて考察する。

4.1 遺伝的アルゴリズム (GA) とは

GA とは、その名の通り「自然界の生物の営んでいる生殖活動すなわち遺伝過程を模倣し、環境に良く適応した性質が次世代へと受け継がれていくというパラダイムをアルゴリズム的に構築したもの」である。以下、その誕生からの歴史、発展、その特筆すべき特徴等を見ていく。

GA という名前が最初に登場するのは 1970 年代である。アメリカ合衆国で Holland 氏が 1975 年に発表した本 “Adaptive in Natural and Artificial System” [33] の中で、一般的な応用の一部として GA に対する枠組みが示されている。近年、様々な工学問題を解くための莫大な数の研究が行われているが、それらの研究論文に必ずと言って良いほど挙げられている GA の参考文献の 1 つに Goldberg 氏の “Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning” [34] がある。同氏は前出の Holland 氏の教え子にあたる人物であり、GA と銘打って 1 冊の本にまとめられたのはこの本が最初であると言われている。

最適化計算における GA の考え方を簡単に説明する。あるシステム S があり、それを特徴づけるパラメータセット $p = \{p_i\}$ があるとする。このシステム S を最適化するという問題を考える。もし仮に、そのシステム S の評価値 F がパラメータセット p により明示的に与えられ、それも線形結合で表されるような場合には全く問題なく、わざわざ GA による必要もない。しかし、 F が非線形、微分不可能などの性質を持つ場合、さらに F の関数形がそもそも明示的に与えられないような場合が問題である。

この各パラメータ p_i を遺伝子、そのセット $p = \{p_i\}$ を染色体とみなし、その対象システム S をその染色体から発生した個体と考える。そして、そのような個体を複数個作り出し、生殖集団を構成する。この集団中の各個体に対して適応度という評価値を与え、互いに比較を行う（あくまでも集団中の相対評価）。この過程で競争力の強い（適応度の高い）個体は生き残り、弱い個体は淘汰される。生き残った者は適当な相手と交配し子孫を残す。さらに、突然変異を起し変化を被る子孫も存在するかもしれない。ここまですべてを 1 世代とし、このサイクルを何世代も繰り返す。そのうち初期段階では存在しなかった優れた個体が出現するであろう。これが GA の大まかな枠組みである。

以下、GA の特徴および上述の動作の仕組みをもう少し詳しく見ていく。

4.1.1 特徴

GA の特徴を簡単に列挙すると以下のようになる^[34]。

- (1) 変数そのものではなく、符号化された記号列 (string) を扱う (染色体: chromosome ともいう)。

- (2) 単点探索ではなく、生殖集団中に含まれる個体数だけの多点探索を行う。
- (3) 適応度 (fitness) と呼ばれる各個体の評価値のみを更新の際の判断の指標とする。
- (4) 確率的な遷移則を用いる。

GA で扱われる対象は記号列のみである (上述の特徴 (1))。この記号列に対して遺伝オペレータが作用し、いわゆる遺伝過程が進行、世代が交代して行く。そして、その世代交代により徐々に集団全体のパフォーマンスが向上していき、最終的に優秀な個体が出現することを期待するのである。そもそも GA というのは、大まかに分けると乱数探索の一種である。事実、世代交代の際には確率的な遷移則を用いている (特徴 (4))。単なる乱数探索と異なる点は、各個体の持っている情報が遺伝過程において互いに交換されるということである。このことにより、各々ばらばらの探索を行うよりも効率が良くなると考えられる。

また、単点ではなく複数の点をもって探索を行うことも特徴として挙げられる (特徴 (2))。GA での操作対象は1個体ではなくあくまでも集団であり、その集団に含まれる個体すべてに対して同時に操作が行われる。その結果多点探索となり、いわゆる多峰性の関数に対しても比較的強いと言われる。さらに、世代交代の際に判断の指標とされる評価値を適応度と言うが、この値以外の情報が用いられることは一切ない (特徴 (3))。言い換えると、探索点の更新の際、その点での目的関数の微係数などの他の情報は全く用いず、その探索点での目的関数値そのものを考える。そして、その値を今考えている全ての探索点に対して相対評価することにより次段階への遷移確率を決定し、探索点の更新を行うのである。そのため、目的関数が明示的に与えられなくとも探索を進めることができる。

本問題は非線形の目的関数を持つ組み合わせ最適化問題であり、上述の (2)、(3) の特徴から近似解法アルゴリズムとして適当であると考え、適用している。

続いて、GA の基本的な動作に関して簡単にまとめる。

4.1.2 基本的動作

アルゴリズムは基本的に以下のように進行する。

- Step1: 個体 (individual) を生成、生殖集団 (population) を構成し、集団の初期化を行う。
- Step2: 集団中の各個体を評価する (評価関数の値を求める)。

- Step3: 適当な個体間で交配を行い（交叉：crossover, 突然変異：mutation), 子を生成する。
- Step4: 新しくできた個体を各々相対評価し, 生き残るべき個体を決定する（淘汰：selection, 増殖：reproduction）。
- Step5: 世代を新しくし, Step3:へ戻る。

この反復を適当な終了基準が満足されるまで続けることにより探索を行う。

以下, 各ステップごとに詳しく述べる。

Step1: 初期集団は普通, 乱数によりなるべく均一に個体が散らばるように生成される。しかし, 問題の性質上, ある程度解の傾向が判っているような場合には, 収束を速めるために重み付けられた生成法を用いる場合もある。

Step2: 各個体の評価値を適応度 (fitness) という。通常, 最適化問題では目的関数に比例して取られる。元来, GAは最大化アルゴリズムであるので, 最小化問題を解く場合には逆数を取って最大化問題に変換するなどの対応が必要となる。さらにこの際, 問題に制約条件が含まれる場合には, 制約違反している個体の扱いが問題となる。

Step3: 遺伝オペレータである交叉オペレータ, 突然変異オペレータの適用される過程である。集団中の個体のうち適当な2個体を親とし, 交叉により情報を交換したのち子を作る。場合によっては, 突然変異により変更を強いられることもある。

Step4: Step3で生成された個体の再評価を行い, 世代交代を行う過程である。適応度の高い子供は生き残る確率が高く, 親となり, 更に次の世代へと子孫を残すことができる。ここで適用される遺伝オペレータは増殖オペレータである。

以上のようにアルゴリズムは進行するが, これが絶対的なものではない。GAに関しては様々なアルゴリズムが開発, 実行されてきており, また各オペレータの種類や個体評価の方法などにも色々な研究成果がある。さらに, 符号化の方法や交叉, 突然変異の仕方ひとつを取ってみても, その性能はかなり問題に依存することが多く, 試行錯誤しながらの適用が余儀なくされているのが現状である。

次節では, 本問題に対してGAを適用するにあたって必要と思われる事柄について述べる。

4.2 アルゴリズムの構造

4.2.1 概略

まず、本研究で用いたGAについて、説明上必要であると思われる用語をまとめておく。

生殖集団 population: 遺伝的操作の対象となる個体群。その集団を構成する個体が同等の遺伝的構成を持つものを指す。

遺伝子 gene: 個体を特徴づける形質に関与し、生殖過程を通して子孫に伝えられる遺伝情報。GAでは単にシステムを記述するコードと考えられる。

形質: 個体を特徴づけるもの(例えば目の色など)。遺伝子が関与して決定される。

ゲノム genome: 様々な形質が遺伝子、もしくは遺伝子と環境との相互作用で決められるが、これらの遺伝子を全て1セットにしたもの。

染色体 chromosome: ゲノムの集まり。各ゲノムの位置は決まっている。

遺伝子座 locus: 各遺伝子の染色体上での位置。

対立遺伝子 allele: 1つの遺伝子座に対して、その遺伝子座が異なった複数の形態を持つときのそれぞれの遺伝子のことをいう。

遺伝子型 genotype: 二倍体個体でそれぞれ2本の染色体の相同な遺伝子座位を占める対立遺伝子の組み合わせのこと。ホモ接合とヘテロ接合とがある。

ホモ接合 homozygous: 同型接合ともいう。ある遺伝子座について2つの対立遺伝子が同じ遺伝子である場合の遺伝子型。

ヘテロ接合 heterozygous: 異型接合ともいう。上と同様で、異なる場合の遺伝子型。

概念図を図4.1:に示す。

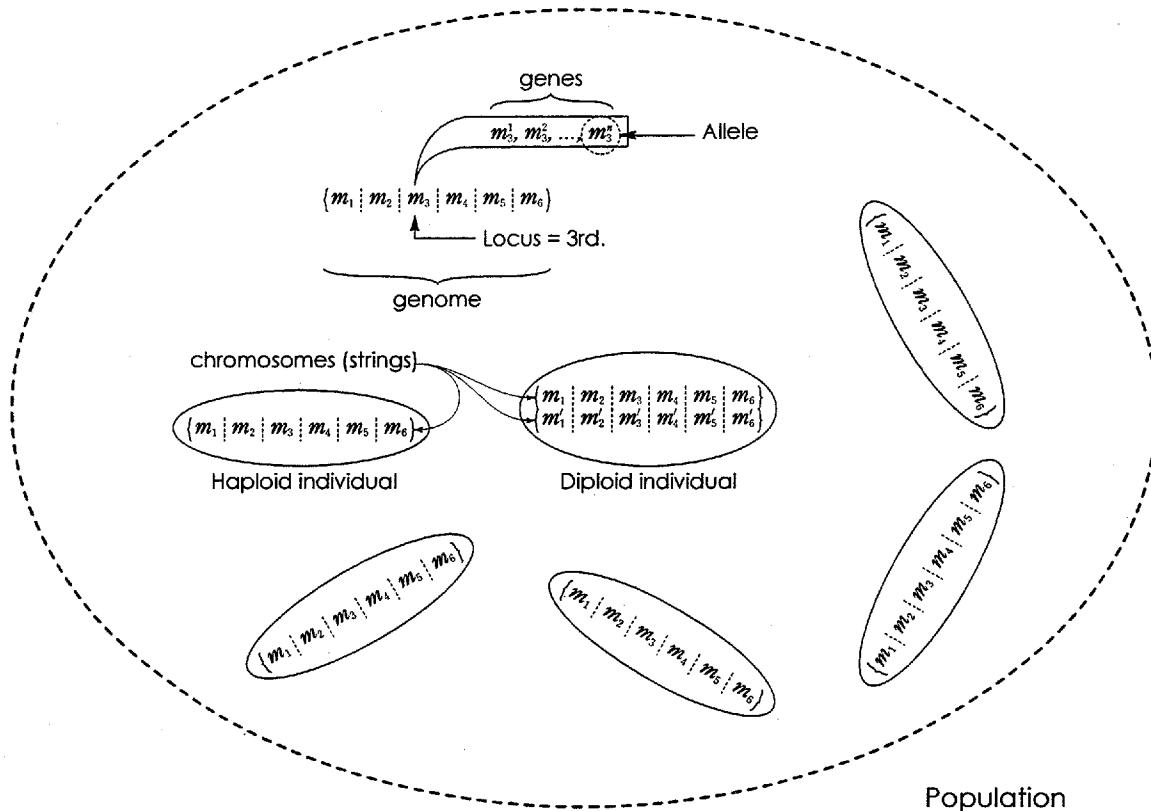


図 4.1: 概念図

前節までで説明してきたように、GA を適用するためには、まず最初に最適化の対象（ここでは燃料電池最適配置問題の目的関数）を特徴づけているパラメータ（ここでは燃料電池の配置パターン）を符合化する必要がある。そして、実際にアルゴリズムを構築する前に、各個体の評価方法（適応度の算出方法）の確立、停止条件の決定などが必要となる。

また、実際にアルゴリズムを構築する際、GA は生殖集団を対象に各遺伝オペレータを用いて操作を施し、その集団のパフォーマンスを向上させる方向に動作するため、対象とする生殖集団の種類、遺伝オペレータの種類、それを適用するか否かの確率である遺伝パラメータなどの選び方なども重要な要素となる。

以下、順にこれらの事柄について説明する。

4.2.2 符号化 (Coding)

符合化とは、ある事象（変数）を GA の扱うことのできる記号列（染色体）へと写像することである。GA では、この記号列に対して直接に操作が施される。よって、この

符合化の善し悪しによってはアルゴリズムの性能が大きく変化するため注意が必要である。

この符合化の方法は原則として自由であるが、GAの中心的な理論となっているスキーマ理論に則ってGoldbergが次のような提唱をしている^[34]。

- 可能な限り少ないアルファベットで構成すること。
- 低い次元のスキーマがその問題に関係するよう符合化すること。

アルファベットとは、対立遺伝子 (allele) すなわち遺伝子の種類のことを言っており、用いる遺伝子の種類をできるだけ少なくすべきであるということである。また、スキーマとはある意味を持つ記号列 (染色体) の一部分のことを指し、なるべく短い部分記号列で、あるひとつの意味を持つように符合化することを推奨している。

この考え方に沿い、本研究では燃料電池の配置パターンを以下の規則に従って符合化している。

- 染色体の長さが、全ての燃料電池設置可能なノード数に一致する。
- 遺伝子座が、燃料電池の設置可能なノード番号に対応する。
- 対立遺伝子は“0”と“1”の2値である。

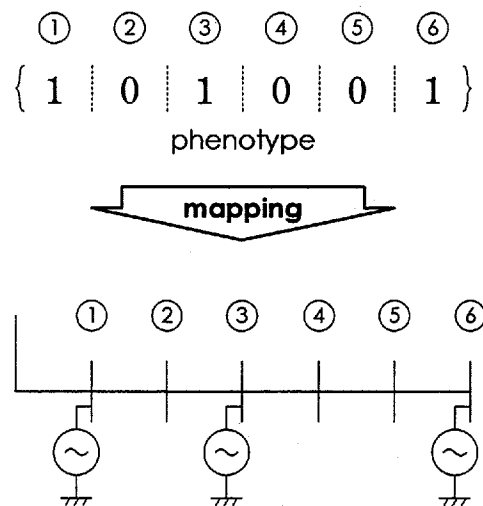


図 4.2: 符号化 (Coding)

先に述べたように、遺伝子座とは染色体上の位置のことを指す。また対立遺伝子とは、ある1つの遺伝子座の中に入り得る異なる種類の遺伝子のそれぞれをいう。本アル

ゴリズムでは“1”と“0”の2つであり，“1”は燃料電池を設置することを，“0”は設置しないことを意味する。

この符合化の概念図を図4.2:に示す。この図では、3番と5番のところが“1”で、残りは全て“0”である。よって、系統の3番ノードと5番ノードとに設置されるという配置パターンを表していることになる。

この符号化の方法を先のGoldberg氏の提唱する枠組みに当てはめてみると、まず対立遺伝子の種類は2種類であり、十分少ないアルファベットで構成されている。またひとつの遺伝子座に含まれる遺伝子がひとつのノードに燃料電池を設置するか否かという情報を“1”，“0”で表しており、どちらの条件も満たしているのではないかと考えられる。

4.2.3 評価 (Evaluation)

GAにおいて、各個体の評価を表す値を適応度 (fitness) という。GAはこの値のみを指標として世代交代 (探索点の更新) を行うため、この評価方法の決定はアルゴリズムの性能上重要な部分を占める。また、元来最大化の方向、すなわち適応度の高い個体が残って行くという方向に進化が進むため、本問題のような最小化問題では目的関数の逆数を取って適応度とし最大化問題への変換を図るなどの対応が必要となる。また、問題に制約条件が含まれることは常であるが、符号化の方法の工夫などにより各個体が必ず実行可能解を表すようにすることができる場合を除き、実行可能解を得るための何等かの対応が必要である。違反を起こしている個体を強制的に淘汰するなどの方法も考えられるが、本研究では適応度関数を次の (式 4.1) 式のように設定することにより対応している。

$$fitness = \frac{Const}{z + w \cdot err} \quad (式 4.1)$$

ただし、

- Const* : 定数
- z* : 目的関数値
- w* : 重み係数
- err* : 制約違反量

である。

この関数は、制約違反した個体に対してその違反量に応じたペナルティーを課すことにより、世代交代の際不利になるよう考慮したものである。たとえ制約違反を起こして

いる個体であっても部分的に見れば良い配置を示している可能性もあるため、強制的な淘汰は用いていない。

4.2.4 生殖集団 (Population)

GA は、複数の個体から成る集団を対象に動作する。これを生殖集団という。生殖集団には、その中に含まれる個体の違いから様々な種類が考えられる。最も簡単であり通常良く用いられるのは、1本の染色体から1個体が構成される一倍体である。これは、その1本の染色体が先の図4.2:に示した符号化の規則により具体的な事象に対応づけられるものである。これ以外に、2本の染色体から1個体が形成される二倍体や、さらに多くの染色体を含む多倍体などが考えられる。一般的に、1個体中に含まれる染色体の数の多い方が集団中の遺伝的多様性 (Genetic Variety) を維持し易く、特性が良いと言われる。これは、直接的に表に現れて来ないものの、将来良い個体を生み出すための布石として集団中に様々な種類の部分記号列を含むことができるからである。

本研究では、多くの研究で用いられている単純な一倍体に加えて、上記の理由から特性の良いとされている二倍体の生殖集団も用いている。

図 4.3: に一倍体と二倍体の個体の構造を示す。

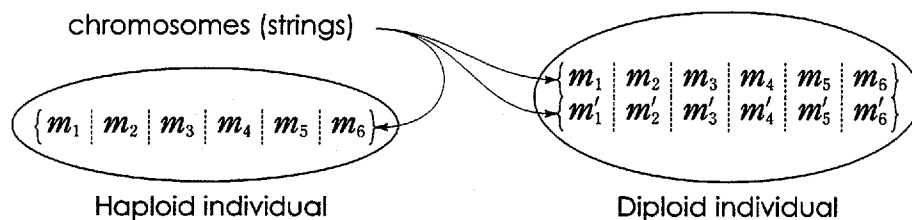


図 4.3: 生殖集団 (個体) の種類

4.2.5 遺伝オペレータ (Genetic Operators)

GA による探索過程は、遺伝オペレータによる集団の操作により進められる。各世代毎に以下に述べるオペレータを操作させて集団のパフォーマンスを向上させ、大域的な最適解を目指す。本アルゴリズムで用いている遺伝オペレータは次の通りである。

- 増殖オペレータ (Reproduction Operator)
- 交叉オペレータ (Crossover Operator)
- 突然変異オペレータ (Mutation Operator)
- 優性オペレータ (Dominance Operator)

これらのうち、最後の優性オペレータは二倍体の生殖集団を用いている場合のみ必要となる。以下、それぞれについて説明する。

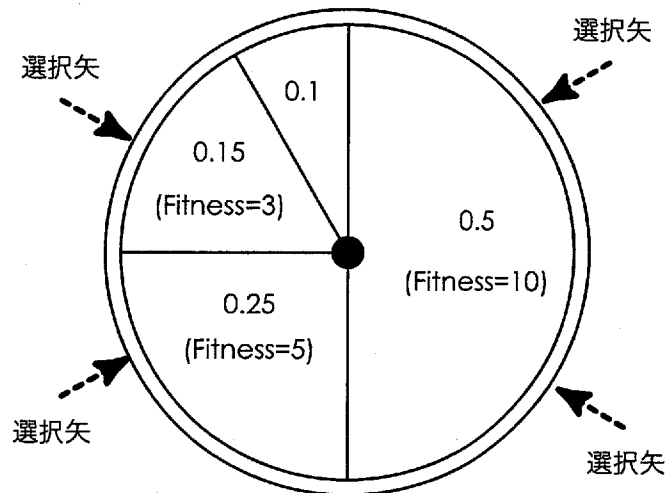


図 4.4: 増殖オペレータ

増殖オペレータ: 世代交代のために使用されるオペレータ。現世代での生き残りをかけて、各個体間での相対評価が行われ適応度が決定される。この適応度の値によって、次世代へと子孫を残すことのできる確率の大きさが左右される。運良く子孫を残すことのできる事となった個体は次世代へと複製され、新たな個体を生み出すことになる。

本研究ではルーレットルールと呼ばれる規則に従って動作させている。ルーレットルールとは、子孫を残すための確率を決定する方法と、その確率に従っての個体の選び方を規定するものである。具体的には、まず全ての個体に対して求められた適応度値の規格化を行う。すなわち、各個体に対して、その個体が全体の適応度値のうちのどれくらいを占めるかという比を算出する。その比の値がそのままその個体の生き残り確率となる。これを全ての個体に対して行い、生き残り確率に従った大きさを持った領域がその個体に割り当てられたルーレット板を作成する。次に $(0, 1)$ の一様乱数を全個体数と同じ回数だけ発生させ（これをルーレット板に投げ入れられた玉に見立てる）、その乱数に当たった個体を生き残る個体として指定するという考え方である。図 4.4: にその説明図を示す。この例は個体数が 4 の場合であり、最も高い適応度を持つ個体が 2 回、2 番目の個体と 3 番目の個体がそれぞれ 1 回ずつ次世代へと複製される（破線の矢印が選択されたことを示す）。最も低い個体はこの場合死滅してしまうことになる。こ

の方法によると、個体の適応度の高さに応じた確率で生き残ることができる。GAが最大化のアルゴリズムであると言われるのは、この増殖過程に起因している。

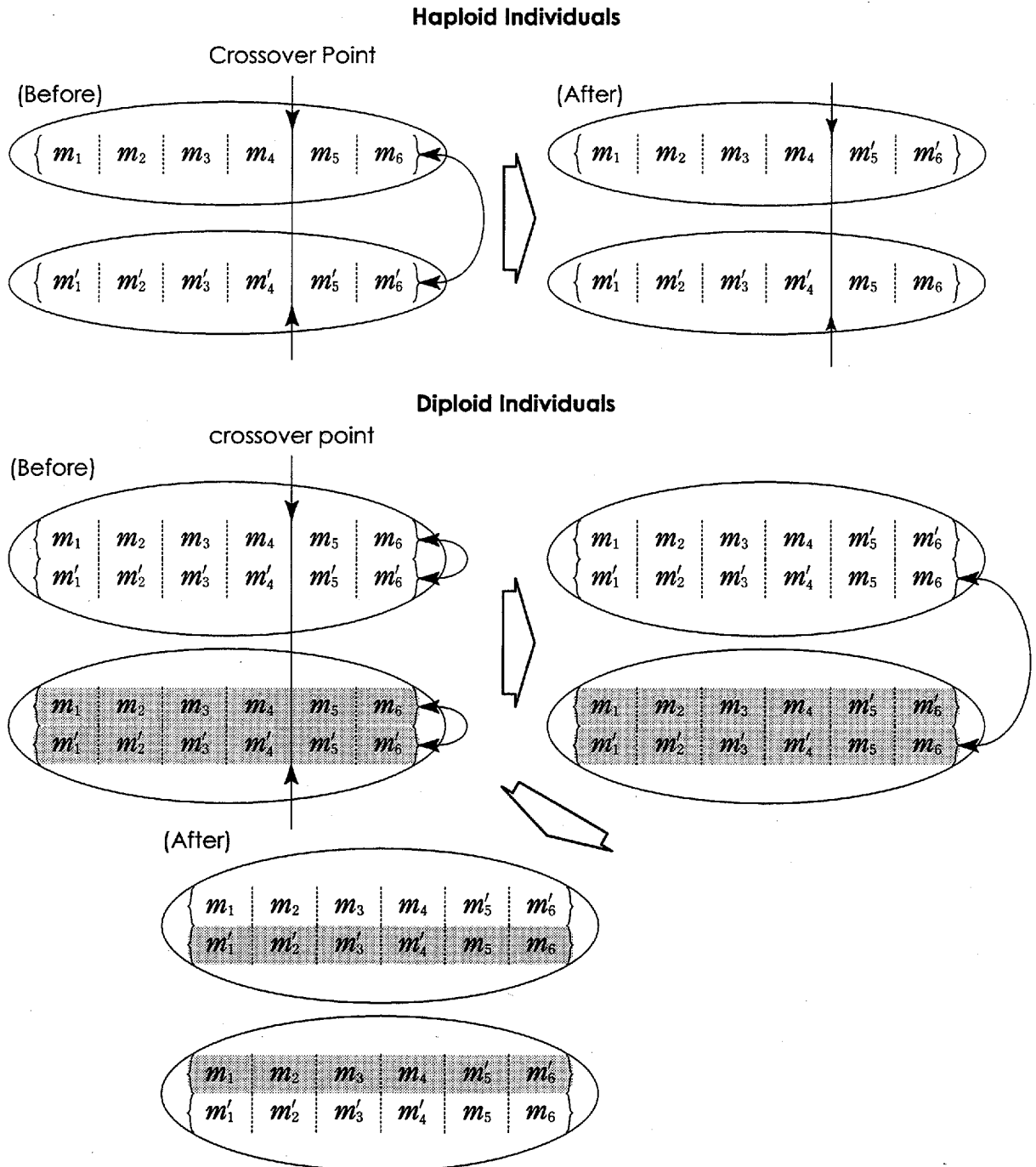


図 4.5: 交叉オペレータ

交叉オペレータ： 適当に選ばれた2本の個体間で情報交換を行うオペレータである。この操作により、前段階とは異なる新しい個体が生成される。具体的には、2本の染色体においてある点（交叉点：crossover point）を選び、その点で切り離した部分記号列を入れ換えることにより行われる。交叉点の数やその選び方によって様々な種類の交叉が存在するが、本アルゴリズムでは1点のみの交叉点をランダムに選んでいる。この過程は一倍体と二倍体とで異なり、図4.5:に示されるようになる。一倍体は1本しか染色体を持たないため、他の個体と直接情報交換を行う。それに対し二倍体では、まず自分の中で相同な染色体間での入れ換えを行い、次に他の個体との間で2本の染色体のうち1本を交換することになる。

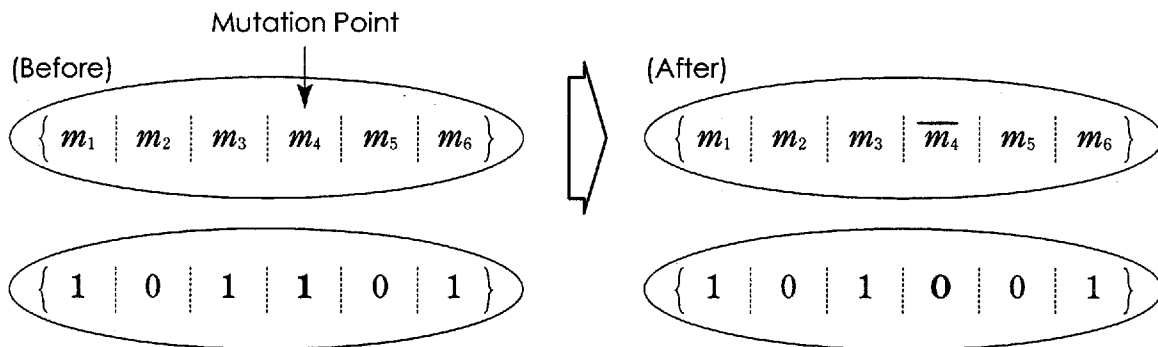


図4.6: 突然変異パラメータ

突然変異オペレータ： 小さな確率で適用され、偶発的な遺伝子の操作を担当する。やはり、ある点（突然変異点：mutation point）を選び、遺伝子の変更を行う。本アルゴリズムでは対立遺伝子が2種類しかいないため、 $1 \leftrightarrow 0$ と変更されることになる。図4.6:に概念図を示す。

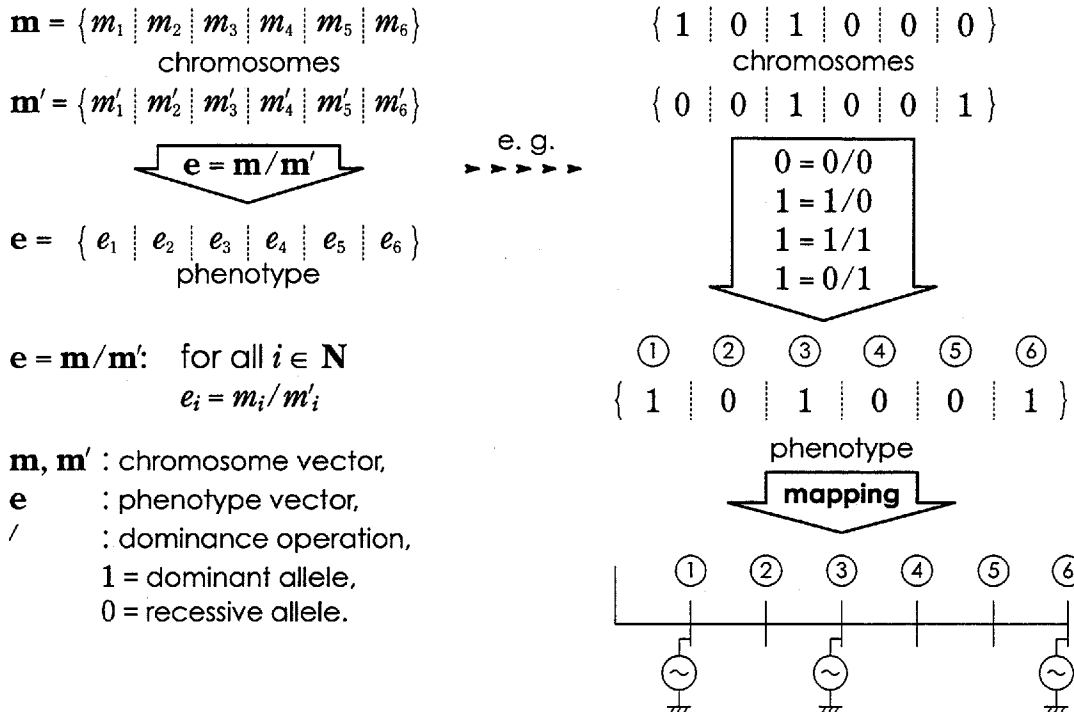


図 4.7: 優性オペレータ

優性オペレータ: 二倍体個体群から成る生殖集団の場合のみ適用されるオペレータ。二倍体では、先の図 4.3: のように相同な 2 本の染色体から 1 個体が構成される。よって、1 個体中で同じ構造の染色体を 2 本保持することになるため、その個体を評価する際、どちらの染色体の情報を採択すべきかという問題が生ずる。それを決定するのが優性オペレータである。まず、1 個体中の各遺伝子座に注目し、その相同な 2 本の染色体の遺伝子の組み合わせを調べる。そしてそれらのうち、優性な対立遺伝子の方をその遺伝子座の示す情報として決定する。図 4.7: の例では、優性対立遺伝子 (dominant allele) が “1”, 劣勢対立遺伝子 (recessive allele) が “0” であるので、“1” が “0” に優先される。よって、組み合わせが “0-0” の場合のみ “0” となり、他の場合は “1” が採られることになる。すなわち “1-0”, “1-1” の場合は “1” が採用され、いわば論理和を取っていることに相当する。

4.2.6 遺伝パラメータ (Genetic Parameters)

遺伝パラメータとは、GA の性能を左右する設定値のことを指し、以下のものがある。

- 集団規模 (population size)
- 交叉率 (crossover rate)

- 突然変異率 (mutation rate)

以下、それぞれの値の採り方によりアルゴリズムがどのように影響を受けるかについて説明する。簡単にまとめると以下表 4.1: のようになる。

表 4.1: 遺伝パラメータ

	小さ過ぎる場合	大き過ぎる場合
集団規模	探索空間の縮小	計算時間の増大
交叉率	探索の停滞, 局所解への陥落	有益な情報の破壊
突然変異率	探索の停滞	単なる乱数探索

集団規模: GA が扱う生殖集団に含まれる個体の数。これは、GA の効率に影響を与える。集団が小さいと探索空間が狭くなり、大域的な最適解を見つけにくくなる。また大きい場合、最適解を見つけ易くなるものの、度が過ぎると評価しなくてはならない個体数が増加し、各世代における計算時間が増大する。

交叉率: 交叉オペレータが適用される確率。この値が小さ過ぎると、個体間の情報交換が起こりにくく、探索の停滞、局所解への収束を引き起こすことになる。

突然変異率: 突然変異オペレータが適用される確率。ランダムなある 1 点がこの確率で変更を受ける。もし仮にこの値が 0 であり、集団中の全個体が全く同じ情報を持ってしまった場合、交叉を行ったところで全く進化が進まなくなる可能性がある。逆にあまりにも大きい場合には、本質的に単純な乱数探索となる。

いずれにしても、これらオペレータの最も良い値というのは正確には決められない。この決定に関して多くの研究があるが、結局のところ各考察問題に依存してしまうことは否めず、それぞれの場合において試行錯誤していく以外に方法はないと思われる。よって、本研究でもこの値の決定に関して、複数回の試行を行った結果をもとに本問題に最も適していると思われる値を採用している。詳しい値に関しては 4.4 節で述べる。

4.3 本アルゴリズムでの改良点

前節では、GAを実際の問題に適用するために必要となる、アルゴリズムの構造とその種類に関する事柄について説明した。これらは、今まで行われてきた工学的問題の解法において言及されてきた一般的な事柄である。

本節では、これら一般的な事柄に加えて、本問題に即した考え方で本アルゴリズムの性能の向上を図るために用いている生殖集団の生成法と、単調なパフォーマンスの向上を保証するエリート戦略とについて説明する。

4.3.1 集団の初期化（初期集団の生成法）

GAは生殖集団に対して操作を行い大域的最適解を目指す。その最初の集団の生成法にも色々な方法が存在する。これを集団の初期化と言うが、出来るだけ探索に都合の良い集団を最初に作成した方が効率的に探索できるのは明らかであり、探索効率に大きな影響を与える。

通常、GAの性能をできるだけ引き出すための方法として、各個体を均等に分散させるという集団の初期化法が用いられる。これは、探索空間中に出来るだけ均等に探索点を散在させた方が、後々の交叉などの情報交換で良い点生まれやすく有利であるとの考え方に起因する。例えば2次関数 $f(x) = x^2$ 、 $[-1, 1]$ の最小化を考えた場合、最初に置く探索点の位置は出来るだけ $[-1, 1]$ の範囲に均等に散らばった方が良いという考え方である。

しかし、この考え方はあくまでも一般的なものであり、具体的にそれぞれの問題に対して適切かどうかは断定できない。特に、先の例のような簡単な関数 $f(x)$ （関数の形も明示的に与えられ、変数は1次元直線上を移動する）を考える場合には均等にすることもメリットがあろう。ところが、大体GAを用いて解かなくてはならない問題というのは決して簡単な関数ではなく、その関数の形すら明示的に与えられないことがしばしばである。よって、初期探索点を均等に分散させることでさえできないことになり、結局、乱数を用いて初期化するという方法が最も簡単な方法となる。

他のアプローチとして、もっと積極的にこの初期化を利用するという方法も存在する。対象とする関数が明示的に与えられてはいないが、その解の傾向がある程度推測できる場合、すなわち解の符号化された記号列のパターンに何等かの規則性が存在するかもしれないという情報がある場合には、これを積極的に利用し、初期化の際にこの傾向に沿った集団を生成するという、いわば問題依存型の方法である。この方法によると、

ある程度良いと思われる解の集団から探索が開始できるため、収束が速いというメリットがある。しかし、逆に遺伝的に偏った集団が初期集団となるため、局所解が存在した場合その解に捕まりやすいという欠点も持つ。さらに、その解の傾向が推測すらできない場合には、当然この方法は使えない。

本研究では、これらのことを考慮した上で、今述べた2つの方法による初期化法を採用している。1つは乱数による初期化であり、もう1つは本問題の目的関数の性質を考慮した初期化法である。

以下、本アルゴリズムで用いている初期化方法を説明する。

乱数による初期化： これは最も単純な初期化法であり、本アルゴリズムでは以下のような方法により行っている。

- (a) 1本の記号列中の各遺伝子座に対し、あるしきい値 $(0, 1)$ を設ける。

set $th(i) \in (0, 1): i \in N$

$th()$: しきい値, N : ノード集合

- (b) 各座に対し一様乱数 $[0, 1]$ を発生させ、先に設定したしきい値と比較する。

$rd(i) = \text{rand}[0, 1]: i \in N$

rand : 乱数関数

- (c) 比較の結果を基に、その位置に入る遺伝子を決定する。

if $rd(i) > th(i): i \in N$

then $m_i = 1,$

otherwise $m_i = 0$

m_i : 遺伝子

- (d) 上述の (a) ~ (c) の過程を集団中の全個体に対して行う。

for all $k \in P$

$m(k) = [m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_N]^T$

P : 生殖集団集合

$m()$: 記号列ベクトル

本アルゴリズムにおける対立遺伝子は $\{0, 1\}$ であるので、具体的には、発生した一様乱数が設定したしきい値を越えた場合に“1”，その他の場合は“0”という具合に決定している。この方法によると、まったくランダムに選ばれた遺伝子が採用されることになる。

目的関数の性質を考慮した初期化法： この手法は、本問題の最小化すべき目的関数の性質を利用し、できるだけ有利な集団から探索を開始しようとする方法である。

本目的関数は第3章の3.2.2節で説明したように、簡単に以下のように書くことができる。

$$\begin{aligned} \text{目的関数} &= (\text{変電所の供給する全電力のコスト}) \\ &+ (\text{電力で賄っている熱需要のコスト}) \\ &+ (\text{設置コスト}) \\ &+ (\text{運用コスト}) \end{aligned}$$

ここで注目したのは、第1項と第2項である。第3、4項のコストは、燃料電池がどのノードに設置されようが変化はない。すなわち、全体の設置台数のみの関数であり、ノードの位置には依存しない。しかし、第1、2項の値はノードの位置とその設置ノードにぶら下がっている負荷の大きさに依存する。特に第2項の熱需要コストは、燃料電池の供給する排熱によって賄われることができるため、効率良く熱負荷が相殺されれば目的関数値は大幅に下がる。よって、配置パターンとしては、負荷の大きいノードに設置される傾向が出てくることが分かる。よって、この事実を踏まえ、以下のように初期化を行っている。

- (a) 事前に、系統の全ノードの負荷の値を調べる。
- (b) 1本の記号列中の各遺伝子座に対して、あるしきい値 $(0, 1)$ を設ける。その際、1で調査した負荷の規模に応じた値とする。すなわち、負荷の大きいノードに対しては“1”の出やすいしきい値とする。

$$\text{set } ld(i) \in (0, 1): i \in N$$

$ld()$: 負荷に比例したしきい値

- (c) 各座に対し一様乱数 $[0, 1]$ を発生させ、先に設定したしきい値と比較する。

$$rd(i) = \text{rand}[0, 1]: i \in N$$

- (d) 比較の結果を基に、その位置に入る遺伝子を決定する。

```

if  $rd(i) > ld(i)$ :  $i \in N$ 
  then  $m_i = 1$ ,
  otherwise  $m_i = 0$ 

```

- (e) 上述の2～4の過程を集団中の全個体に対して行う。

```

for all  $k \in P$ 
   $m(k) = [m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_N]^T$ 

```

まず最初の負荷調査の時点で、それぞれのノードに対する負荷の相対的な規模を表す値（最大値に対する比の値）を求めておく。その数値に応じて、各ノードに対するしきい値の採り方に変化を与える。すなわち、負荷の大きいところはしきい値を低めに設定し、逆に小さいところは高めに設定する。残りのステップは先の場合と同様である。このようにすることにより、負荷規模の大小により重み付けられた確率で配置されるパターンが生成されることになり、最初から比較的目的関数値の小さい記号列が生成され易くなると考えられる。

4.3.2 エリート戦略 (Elitist Strategy)

この戦略は、淘汰・増殖過程に関係するものである。通常の方法だと、全て確率的な遷移過程として行われるため、現世代のうちで最も良い個体が必ず子孫を残すとは限らない。場合によっては評価の低い個体ばかりが子孫を残し、現世代と次世代とを比べた場合、次世代の方がパフォーマンスの落ちていることも十分考えられる。これを最適解を探すための一種のノイズと考える立場もあるが、収束特性の面から言えば好ましくない。できれば単調な改善が望まれるところである。

そこで用いられるのがこのエリート戦略^[37]である。これは、現世代の集団に含まれる全個体のうち最も適応度の高い個体をエリート個体として指定し、このエリートのみは確率1で確実に次世代へと子孫を残させる戦略である。この戦略によると、最も適応度の高い個体に関しては必ず子孫を残すことができることになり、パフォーマンスの単調な向上が期待できる。

本研究では、ただ単に次世代へと複製するだけではなく、遺伝的操作（交叉、突然変異）からもエリート個体を守ることをしている。このようにすると、各世代での最良個体は交叉、突然変異などにより壊されることもなく、確実に単調な改善が保証される。

本節では、本アルゴリズムで行った改良点について言及した。そのうち、集団の初期化法に関しては本問題に即した方法であり、一般的なものではないことを断っておく。

次章では、実際に行った数値シミュレーションについて概要を説明し、その得られた結果に対する考察を行う。

4.4 数値シミュレーション

本章では、実際に計算機上で行ったシミュレーションの結果について述べる。第3章で述べた燃料電池際の配置計画問題をGAを使ったアルゴリズムにより解くことになる。

まず、4.4.1節にて本シミュレーションで用いた配電系統の対象モデルである69母線モデル配電系統とその倍程度の規模の111母線系統を示す。第3章での研究より69母線の系統に対しては解が求められているので、この69母線系統の結果を用いてGAの性能を測り、続いて111母線系統について探索を行う。4.4.2節は、シミュレーションの際に設定した事柄について説明するために設けられている。まず、本シミュレーションで用いたパラメータ等に関する説明をし、次に解法アルゴリズムについて述べる。本アルゴリズムは通常のGAを基本としているが、初期集団の生成法などに関しては問題に依存した工夫も凝らしており、また生殖集団も2種類考えている。続いて4.4.3節でシミュレーション結果についてまとめ、各結果に対する考察を行う。ここでGAの性能についての比較を行い、また111母線系統に対して求められた解の吟味、実行に費やされた計算時間などについて述べる。

4.4.1 適用モデル系統

本研究のシミュレーションのために用いたモデル系統は69母線、その倍程度の規模である111母線の放射状配電系統モデルである。以下、それぞれについて系統図を示し、構成を説明する。

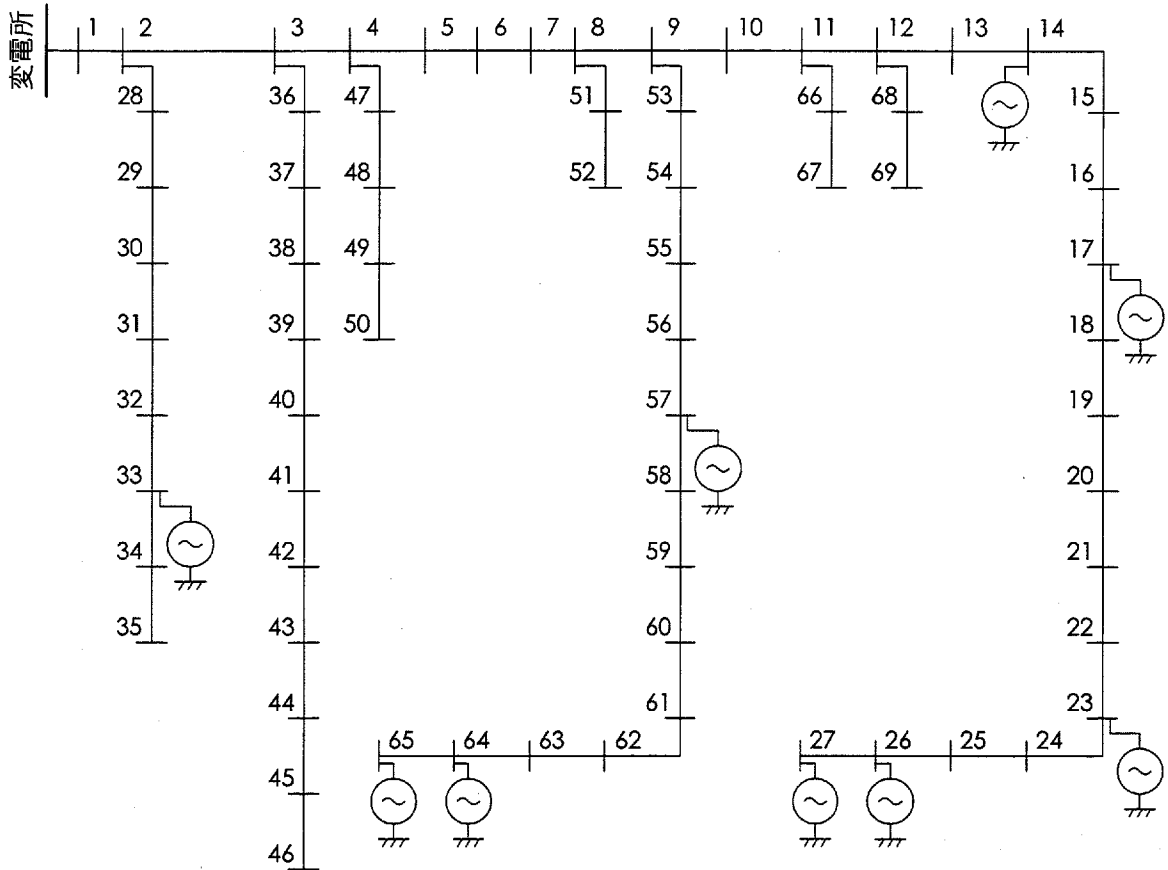


図 4.8: 69 母線モデル配電系統

69 母線モデル配電系統: 現在運用されている配電系統は、元々の構成としてはループ状である。しかし、運用面での都合、すなわち電圧管理やセキュリティ確保などの理由で、通常は系統構成を放射状にして運用されている。よって、本研究で用いたモデル系統も放射状のものであり、図 4.8: に示されているのは 69 母線のモデル配電系統図である。変電所ノードから出ている 1 本のメインフィーダを中心に、各分岐線（ラテラルフィーダ）が放射状に枝分かれしていることがわかる。

ここで、先の研究において分枝限定法により解が求められているのはこの 69 母線系統に対してである。よって、予め解が得られているこの 69 母線系統を用いて、本アルゴリズムの性能を測るべくシミュレーションを行う。

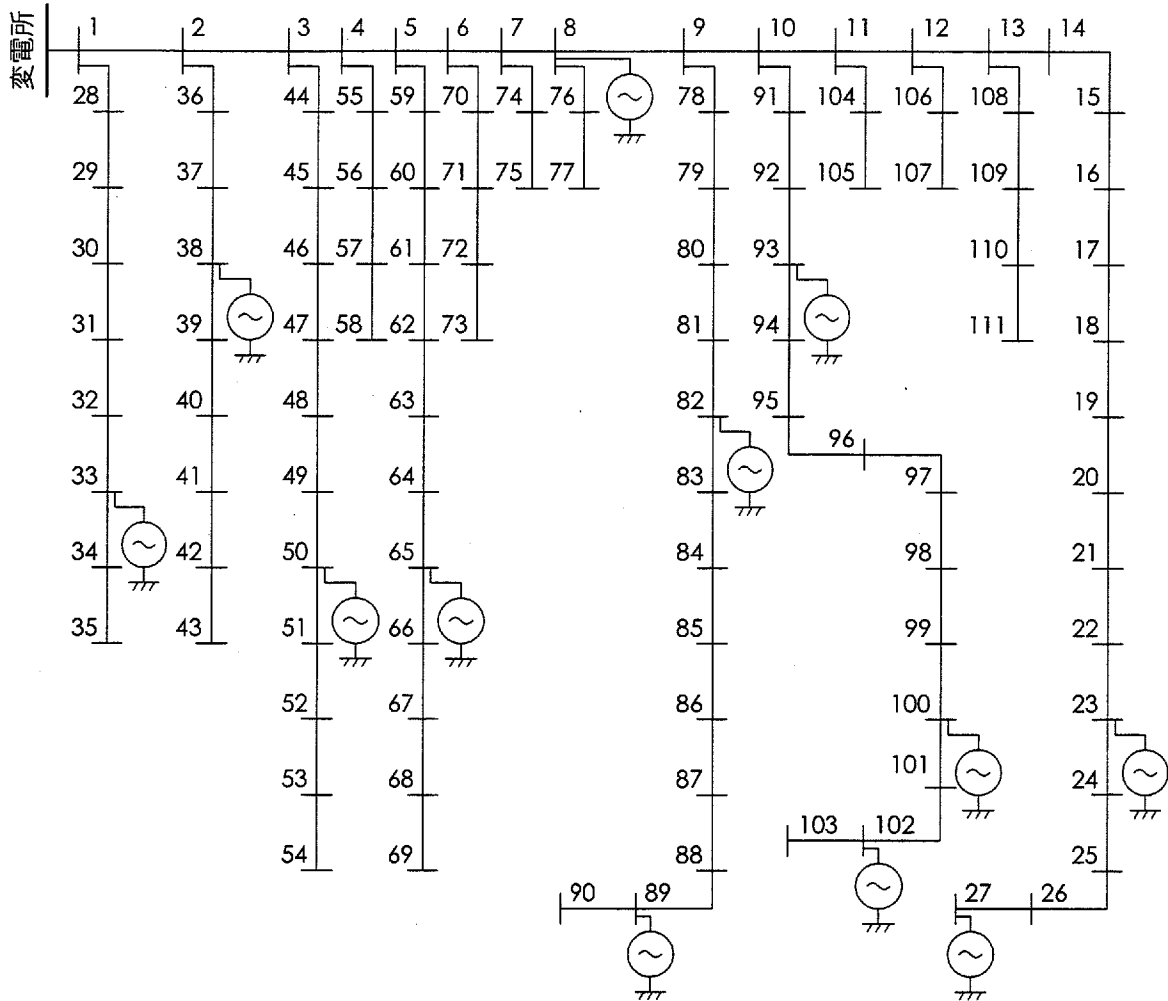


図 4.9: 111 母線モデル配電系統

111 母線モデル配電系統: 図 4.9: に 111 母線モデル配電系統図を示す。この系統は先の 69 母線系統の約 2 倍の規模であり、分枝限定法では時間的に求解が困難であるため、GA による探索が効果的であると考えられる。

本来ならば、負荷のあるノードには負荷記号である矢印がついているはずであるが、図が複雑となるため省略してある (図 4.8: も同様)。実際に負荷のぶら下がっているノードは、先の 69 母線系統で 48 ノード、この 111 母線系統で 80 ノードほどである。従って、第 3 章で仮定したように負荷ノードのみが設置対象であるので、実際には 48 ノード、80 ノードの探索空間となる。

4.4.2 シミュレーション設定

本節では、シミュレーションを行うにあたって行った各種の設定に関して述べる。まず最初は、「最適配置問題」に関する各種の設定値、主に目的関数に関係するパラメータについて述べる。

続いて、GAを基本とした解法アルゴリズムについて説明する。また、4.3節にて述べたように、2種類の生殖集団と2つの集団の初期化法を用いているので、その説明を加える。

4.4.3 最適配置問題について

第3章で定式化したとおり、本問題は非線形の目的関数を持つ組み合わせ最適化問題となる。

その目的関数に関連する各パラメータについて、本シミュレーションで設定した値は表4.2:の通りである。以下、それぞれの項目について説明する。

表 4.2: パラメータ設定 (目的関数)

燃料電池発電量 (1台)	200 kW
燃料電池回収熱量 (1台)	172 Mcal/h
電力会社の発電原価	10.4 円/kWh
燃料電池設置コスト	50 万円/kW
商用電気料金	20 円/kWh

発電量: 燃料電池の発電量を1台あたり200 kWと設定している。これは、現在実用化に向けて開発されているオンサイト用(需要地直接設置型)の電源がこの容量であるからである。3.2.1節の仮定において、燃料電池の容量は一定であって常に定格で運転されるものとした。すなわち、設置された各電源は常に200 kWで運転されることになる。

回収熱量: 燃料電池1台あたりに回収されることのできる熱量である。この熱は先の発電量に比例して排出されるものとしており、この熱を有効利用することでエネルギー経費の削減が図れ、目的関数値の下がることが期待される。

発電原価: これは変電所から供給される電力の発電原価である。電力会社がこの発電原価で発電し、送電してきているものとしている。この値は一般的な火力発電を基準に考えている。

設置コスト： 現在、燃料電池の設置コストは約100万円/kWであるといわれるが、燃料電池の導入が促進されるためには、現在の他のコージェネレーションに匹敵する価格が妥当なレベルであるとされる。これを受けて、将来的には様々な技術開発努力やメーカーによる標準化、大量生産、さらには政府による優遇措置などにより、その価格が大幅に下がると考えられる。よって大まかではあるが、燃料電池の設置コストの一例として、現在の半分の50万円/kWに設定している。

商用電気料金： これは消費者、すなわち需要家が電力会社に対して支払うべき電気料金である。燃料電池の設置により、電力会社から買う電力量が減少すればこの料金が削減され、さらに排熱の有効利用とあいまって大幅なエネルギー経費の削減が期待できる。

4.4.4 解法アルゴリズムについて

本シミュレーション中にて用いた遺伝オペレータについて以下にまとめる。

交叉オペレータ： 本アルゴリズムの交叉では、いわゆる1点交叉を用いている。交叉点を1つとする方法である。他に2点以上の方法もあるが、複数回の試行の結果を考えて決定している。また、交叉の相手の決め方であるが、本手法では全くランダムに決めている。これも適応度の高い個体には低い個体を交叉させたり、また逆を行ったりする方法も存在する。

突然変異オペレータ： 突然変異は各個体に対して1箇所のみ考えている。その遺伝子座の選び方は乱数に拠っている。

増殖オペレータ： 先に述べた通り、増殖にはルーレットルールを用いている。このとき、適応度の値をスケールリングするなどして変化を付ける方法もあるが、本アルゴリズムではそのままの値を正規化した上でルーレットへと対応づけている。

優性オペレータ： 優性オペレータに関して問題となるのは、優性および劣性遺伝子をどのように設定するかということである。本アルゴリズムで用いている対立遺伝子は{0,1}の2種類であるが、このどちらかを優性、他方を劣勢としなくてはならない。多数回の試行の結果、“0”を優勢としている。

次に、上述のオペレータとも関連するが、GAの性能を左右する遺伝パラメータについて述べる。まとめると表4.3:のようになる。

表4.3: 遺伝パラメータ

集団規模 (個体数)	40
交叉率	0.8
突然変異率	0.1
世代数	500

集団規模: 生殖集団中に含まれる個体の数である。今回は40個体とした。あまり少ないとほとんど進化が進まず、また多すぎても計算時間のかかるだけで効率が悪くなるという傾向が現れたためである。

交叉率: 交叉率も複数回の試行の後決定したものである。結局、この値は他のGAを用いた多く研究で採用されている値と余り隔たりはない。

突然変異率: 突然変異率に関しては、他の研究に比較して少し高めの値としている。これは、本問題での記号列が比較的「疎な」構造をしていることに起因していると思われる（69母線の場合、48の長さの記号列中に“1”が8個含まれる個体が最適解を示している）。また、符号化の方法として比較的簡単な“1座”対“1ノード”の写像を用いているため、突然変異による変更が実際の配置に対してあまり劇的な変化として現れてこないこと（1台の燃料電池が設置されるか否かという違いのみ）、エリート戦略を常に用いているため、少し位は乱暴な操作をしても悪い影響が出にくいことも原因に含まれると思われる。

世代数: 世代数はアルゴリズムの停止条件に関係する。本アルゴリズムでは簡単に500世代で打ち切ることとしている。これは、500世代前後からほとんど進化が進まなくなることと、あまり停止基準を厳密に設定したところで大した効果は期待できず、それよりはある世代数で打ち切り、より多くの回数を異なる初期集団で行った方が効率的であるとの考えからである。

4.5 シミュレーション結果

前節で説明した設定に従い、モデル配電系統として69母線と111母線の2つを、解法アルゴリズムとしては一倍体と二倍体の生殖集団を用いたもの、さらに集団の初期化法として2つの方法、以上計4種類のアプローチを用いてシミュレーションを行った。

まず最初は、GAの性能に関する結果である。これは、予め解の判明している69母線モデル系統を用いたシミュレーション結果である。

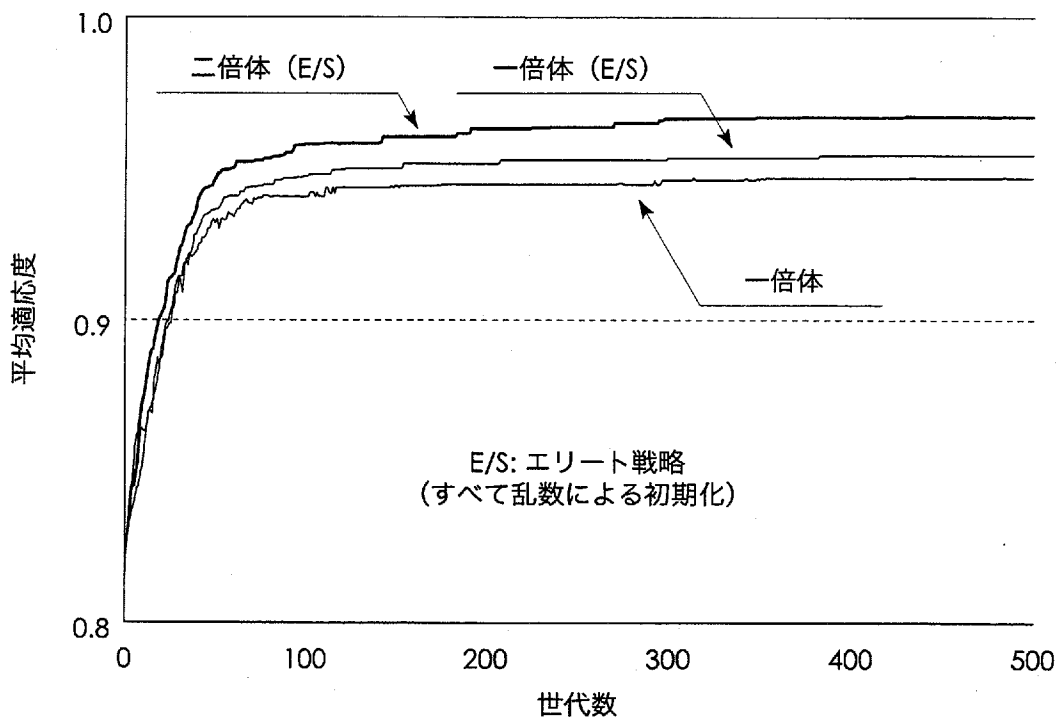


図 4.10: 収束特性

図 4.10: は、集団の種類の違い、およびエリート戦略の効果について、収束特性を示したものである。それぞれ20回ずつ異なる初期集団で試行し、その平均をとった結果である。概して、一倍体よりは二倍体の方が立ち上がりも速く、最終的な到達値も高い。また、エリート戦略を用いないものより用いた方が(単調増加が保証されるため)最終的な到達値が高くなっていることがわかる。ここで、このグラフ中の適応度の値についてであるが、この値は最適解が得られたときの目的関数値を(式 4.1) 式の分子の定数 $Const$ に代入することにより、最適解を表す個体の適応度がちょうど 1.0 になるよう考慮してある。

図 4.11: は、最終的に得られたそれぞれ 20 回の最良個体適応度値の分布である。この場合も一倍体よりは二倍体の方が特性が良いことがうかがえる。
 なお、同様の傾向は 111 母線に関しても観測された。

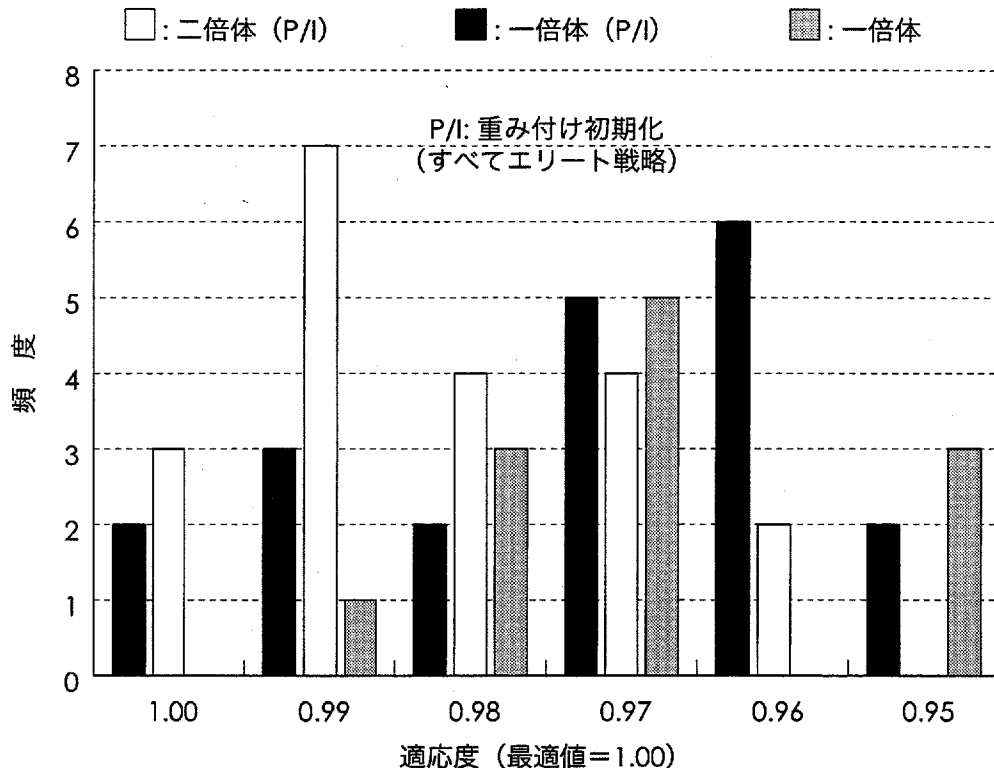


図 4.11: 最終的な解の分布

続いて、得られたうちで最も値の良かった配置パターンを 69 母線, 111 母線それぞれについて示す。69 母線については図 4.8: に示してあり、この配置は先の研究で分枝限定法により得られている解に一致するものである。111 母線に対してもすでに図 4.9: に示してある。こちらについては、最適解であるという保証はないが、GA を用いた解法アルゴリズムによって得られた解のうち最も目的関数値の小さかった配置である。

2 種類の系統に対して共通して言えることであるが、これらの系統に対して想定してある負荷の大きさというのは需要増加を考えた後の値であり、分岐線によっては系統の末端付近で電圧降下が生じている可能性がある。よって、末端付近に設置されるという傾向が現れているのは、その付近の電圧引き上げのためであると推測される。また、可能な限りの排熱利用をした方が経済的であるので、双方とも比較的熱負荷の大きいノードに集中しており、そ

れも電力と熱の負荷が燃料電池の特性にちょうど良い規模で要求される箇所が選択されている。

次に、表 4.4: に計算時間をまとめる。GA に関してはそれぞれ 20 回の試行の平均値である。一倍体と二倍体との差は単に優勢オペレータの実行に要した時間であると考えられる。69 母線で約 80 分、111 母線でも約 250 分となっている。111 母線に関しては、全探索はもとより分枝限定法でも時間的に求解が困難であることが試算から分かる。なお、計算機は Sun SPARC Station 10 (約 100 Mips) を使用した。

表 4.4: 計算時間

探索手法	69 母線系統	111 母線系統
全探索	約 162 日*	約 317,626 年*
(分枝限定法)	(約 103 分*)	(約 503 日*)
一倍体 GA	約 78 分	約 240 分
二倍体 GA	約 81 分	約 255 分

*) 1 回の反復計算時間から試算

全探索および解析的な探索法が時間的に不可能である大規模な系統に対しても、ある程度の精度で解が得られていることは評価に値すると思われる。

結 言: 本章では、大規模系統に対しても適用可能なものとするため、近似解法として遺伝的アルゴリズムを基礎とする解法アルゴリズムについて述べた。これは、単純な GA に二倍体個体や重み付きの初期化、エリート戦略などを用いた効率的なアルゴリズムである。

シミュレーションの結果、全探索や分枝限定法では現実的な時間内で探索をおけることのできない大規模な系統に対してもある程度よい解が得られることを示した。また、単純 GA と改良を施した提案アルゴリズムとの比較も行い、その効果が認められた。

次章では、対象をある需要家に限定した上で、電力貯蔵装置なども考慮した最適運用計画について述べる。

第5章 分散型電源最適運用問題

緒言：本章では、分散型電源の設置を決定した需要家の立場に立ち、いかにそれらのシステムを経済的、効率的に運用するかという命題を最適運用計画として考える。ただし、ある特定のパターンにとらわれず、できるだけ経済的な運用方法を目指す。また、分散型電源だけではなく、同様に注目されている電力貯蔵装置を含めたエネルギー供給システム全体の運用の最適化を試みる。

5.1 概要

本章では、分散型電源の設置を決定した需要家の立場に立ち、いかにそれらのシステムを経済的、効率的に運用するかという問題を最適運用計画として考える。ただし、ある特定のパターンにとらわれず、できるだけ経済的な運用方法を目指すものとし、分散型電源だけではなく、同様に注目されている電力貯蔵装置を含めたエネルギー供給システム全体の最適化を試みる。

一般にエネルギー需要は、電力需要、熱需要がそのほとんどを占めるが、これらはコージェネレーションにより効率的に供給することができる。また、貯蔵装置に夜間電力を貯めておくことによって昼間の需要のピークカットに貢献し、負荷の平準化を実現することによってエネルギー経費の削減にもなる。よって、それらを有効に利用することのできる枠組みを提案し、定式化を行う。ただし、発電を行う電源と、充電・放電を繰り返す貯蔵装置とでは基本的に性質が異なるので、協調を図りつつ運用するためには多くの制約を同時に考慮する必要がある。

まずは運用のみに焦点をあてた問題を考え、次にその導入容量の算定までを視野に入れた定式化を行うことで、最終的に様々なケースを想定した数値シミュレーションにより、様々なタイプの需要家に対し、その設置容量や運用パターンの導出を試みる。さらに、それらの経済性についても考察し、導入コストを変化させた場合の解析結果についても示す。

現在のところ、一般に現場での導入を考える場合、以下のような項目が検討される。

- (1) 対象建物 … 以下のような特性を持っている建物がコージェネレーションに適しているとされる。
 - 年間を通じて安定した電力負荷、熱負荷が発生する建物
 - 電力負荷と熱負荷の時刻パターンが類似している建物
 - 建物の熱電比が比較的高い建物
 - 法令上、発電設備が必要で、非常用発電機との兼用が可能な建物
 - 停電対策を必要とする建物例：ホテル・旅館、病院、コンピューターセンター、スポーツ施設（プールあり）、クアハウスなど
 - 特別高圧受電を回避したい場合

(2) 外部環境

- 環境保全対策 … コージェネレーションシステムは、大気汚染の防止、騒音・振動に対する対策が必要である。NO_x 規制については建物が立地する地方自治体の指導基準を事前に調査する必要がある。使用燃料についても検討が必要である。
- 系統連系の採否 … コージェネレーションシステムで発生した電力を商用連系と連系するかどうかは、コージェネレーションシステム運用上重要な要素である。系統分離方式は、保護継電器などが不要なため設備費が安価であり、対象建物が小規模な場合や一定の電力負荷が見込める場合には検討に値する。
- 特別高圧受電の回避 … 特別高圧受電を回避できるかどうかの検討は、受変電設備のイニシャルコストの削減に大きな影響を与える。
- 逆潮流および特定供給 … 1992年から、発電設備を設置する需要家から余剰電力を商用系統に逆潮流することができるようになり、電力会社の購入計画が明示されている。また、1995年の電気事業法の改正により、一建物内においては、特定供給^{†3}の申請が不要となった。これにより、一建物内においては、コージェネレーションによる発電電力をビルのテナント等に供給することが自由にできるようになった。
- 防災電源 … コージェネレーションシステムの発電機が非常用発電機を兼用することができれば、設備の有効利用が図れるうえ、非常用発電設備の設置費とスペースを削除できる。常用・防災兼用の発電機は、消防法、建築基準法の規制を受けるが、いくつかの条件を満たせば兼用が可能である。また、現在では、ガス専焼のコージェネレーションシステムが非常用発電機をかねることも可能となった。

(3) 負荷の推定

計画建物の規模・用途により、電力負荷と熱負荷が時刻別、月別にどの様に変化するかを事前に、なるべく正確に把握する必要がある。

†3: 電力会社以外の物が自家発電設備の電力を第三者に供給すること。

すなわち、電力と熱（給湯、暖房、冷房）の日最大負荷、年間負荷、月別負荷パターン、時刻別負荷パターンを推定する。一般の設備システムの装置容量は最大負荷から求められるが、コージェネレーションシステムは時刻別の負荷の変動も考慮しなければならない。

(4) 運転方法・運転時間の設定

負荷の変動を考慮して、最適な運転方法・運転時間を設定することが重要である。運用方法には、電主熱従と熱主電従の2種類があり、次の特徴がある。

- 電主熱従運転 … 電力負荷の変動に追従して発電し、回収された排熱をできるだけ利用し、余った時は廃熱する方式である。
- 熱主電従運転 … 熱負荷の変動に追従して発電する方式である。この方式は、回収される排熱が熱負荷にほぼ等しくなるように運転されるため、一般にエネルギー効率の高い運転といえるが、実際は制御が難しい。

運転時間はピークカット運転方式か、ベースロード運転方式によって異なる。経済性の観点からはなるべく長時間運転することが望ましい。

- ピークカット運転方式 … 受変電装置容量、契約電力の低減が主目的
- ベースロード運転方式 … 発電機の長時間、フル運転が主目的

(5) システムの計画

発電機の回収熱媒体を設定し、原動機種類、排熱回収機の容量を設定する。

- 原動機種の設定 … 発電機を駆動する原動機は、ガスタービン・ディーゼルエンジン・ガスタービンのいずれかを選定するのが一般的である。しかし、将来的には燃料電池も選定対象となると考えられる。各原動機の特徴は第一章を参照。
- 発電機容量の選定 … 信頼性、契約電力などを考慮し、予備機の要否も含めて発電機容量を設定し、経済性の評価を行った上で最終の容量を決定する。
- 排熱利用方法の選定 … 回収される排熱の温度、量、利用可能な時間帯・季節などを考慮して排熱の利用方法（暖房、冷房、給湯、その他の加熱用途など）を設定する。

- 排熱回収方法の設定…排熱の利用方法より、排熱回収システム（温水、蒸気、温水+蒸気、排ガス直接）を設定し、排熱回収機器の仕様（機種、容量、台数など）を決定する。
- 全体システムの設定…原動機と排熱回収機器の機種、排熱利用方法などを踏まえて、全体システムを構築する。

(6) システムの評価

エネルギー収支の算出、すなわち、コージェネレーションシステムにより賄うことができる発電電力と排熱利用量を算出する。また、コージェネレーションシステムを導入しないシステムも設定し、それぞれのイニシャルコスト、ランニングコストを算出し、経済性や省エネルギー性を評価する。さらに、最近の環境問題をふまえて、環境保全性の評価として、二酸化炭素などの発生量の比較評価も行うのが望ましい。

一般的に、以上のような項目を考えつつ実際の分散電源（ここではコージェネレーションシステム）の設置が計画される。

5.2 運用費のみの最適運用問題の定式化

コージェネレーションシステムの運用については、電力需要追従や熱需要追従といったシステム運用に関するあるルールを定めて、経済性評価や実システムの運用を行っている。このような方法の欠点は、あらかじめ設定したシステムの運用ルールがカスケード的熱利用というコージェネレーションシステムの精神を生かしながら各種需要量に対して柔軟に対応し、経済的メリットを追求してくれる保証が必ずしもない点にある。

本来、需要とは時々刻々変化するものであり、買電電力やガスの料金も、時間帯や季節によって変化する。したがって、このような拘束されたシステムの運用を仮定して論議を展開することは、せっかく高めたシステムのフレキシビリティを自ら殺してしまう可能性が高い。

さらに、二次電池などの電力貯蔵装置を導入するとことで、さらなる省エネルギー性や経済性への効果が期待できるが、両者を協調させた運用の決定は非常に複雑であり、試行錯誤的手法で決定することは一般に困難を極める。

そこで本節では、まずそれぞれの設備容量や契約電力が決められている場合のコージェネレーションシステムと電力貯蔵装置の協調を考慮した最適運用計画問題の定式化を行う。

5.2.1 仮定

目的関数や制約条件の作成に先立ち、本定式化において設けている仮定について説明する。まとめて列挙すると次のようになる。

- (1) 需要家の電力・熱需要は既知である。
- (2) 時間当たりで電力需要・熱需要は一定とする。
- (3) 熱需要は、コージェネレーションシステムと補助熱源機で賄うものとし、余った熱は破棄されるとする。
- (4) 売電を考慮する。
- (5) コージェネレーションシステムと電力貯蔵装置は、無停電電源には使用しない。

仮定 (1): 前節の導入計画にもあるように、運用を考える前に電力・熱負荷は推定されているものとする。それが仮定 (1) である。この推定をもとに、最適運用を決定し、経済性・省エネルギー性等を評価するための確に推定することが必要である。

仮定 (2): ほとんどの負荷推定が、時間帯別で推定を行っており、さらに定式化する場合においても、簡単のため時間当たりで一定とした。

仮定 (3): 熱供給において、ボイラのような熱装置をあわせて使うことが経済的かつ現実的であり、熱需要をコージェネレーションシステムと補助熱源機で賄うとした。また、今回は経済的に最小となる最適運用を目的としているので、省エネルギー性に反するがコージェネレーションシステムの排熱を破棄し電力だけ使用する場合も考慮するものとした。

仮定 (4): 電力分野の規制緩和が進む中で、コージェネレーションシステムからの電力買い取り条件・料金が設定されているので、導入におけるメリットになるものとして考慮した。

仮定 (5): コージェネレーションシステムや電力貯蔵装置は、無停電電源としても使用できることは先に述べたが、今回、上位系統が事故を起こすような場合を想定していないので無停電電源としての役割は必要ない。

5.2.2 目的関数

コージェネレーションシステムや電力貯蔵装置の導入メリットには、経済性、省エネルギー性、環境保全性などがあり、どの項目を重視した運用を行うかで、その目的関数の内容は変わってくる。しかし、多くの需要にとって最も期待されるメリットは経済性である。したがって、目的関数は需要家の時間帯別での総支出費用を表す式とする。

目的関数 = コージェネレーションシステムの運用費
+ 買電電力の電力量料金
+ 補助熱源機の運用費
+ 電力貯蔵装置の運用費
+ 売電の売電料金

それぞれの項について以下で説明する。

コージェネレーションシステムの運用費 (第1項) : 運用費としては、ガス・油といった燃料費、保守費などがある。以下に運用費にかかわる検討項目を示す。

- 燃料費 (都市ガス, 石油, LPG) … コージェネレーションシステムの燃料代である。従来システムに対し、燃料費は増加するが、その分、発電電力

による買電の電気料金と排熱利用による熱源装置の燃料費は減少する。都市ガス会社のガス料金は、ガスの使用量、負荷率、廃熱の利用用途によって料金体系が異なるので、コージェネレーションシステムの料金体系・価格を調べ、定式化に反映する必要がある。

- 保守費（メンテナンスコスト）… コージェネレーションシステムの場合、定期点検等を始めとする保守のための費用は、ランニングコストに占める割合が大きいため、十分考慮する必要がある。通常、メーカ、もしくはメンテナンス会社と運転時間や点検サイクルを吟味したうえで、一定のメンテナンス費用を支払う保守契約を結ぶことが多い。機種によっても変動するが、通常、発電量 [kWh] 当たりの原単位から算出される場合が多い。
- 用水費 … コージェネレーションシステムの運転時に必要な冷却水の補給のための水道料金である。用水費は運用費に占める比率が小さいため無視することがある。ただし、ガスタービンで窒素酸化物低減のための水噴射を行う場合や蒸気注入サイクルの場合には必ず水道料金や水処理費用を考慮しておく必要がある。

買電の電力量料金（第2項）： コージェネレーションシステムを導入した場合、発電によって商用電力の買電量を低減でき、これに相当する分の電力料金が安くなる。また、発電機容量分だけ電力会社との契約電力を低減できる。

電気料金には、電力会社によって様々な種類があり、需要家はその中から選択できる。電気料金の仕組みと料金は、ピークシフト・負荷平準化・効率的使用・夜間または休日の安価な電気を使用することにより、コストメリット・省エネルギー・地球温暖化防止になるようになってきている。したがって、どの電気料金を選択するかで目的関数も変わってくる。

補助熱源機の運用費（第3項）： 通常、コージェネレーションシステムと同じ燃料を使い、同様に燃料費、保守費などの費用がかかる。しかし、コージェネレーションシステムと比べて、出力あたりの燃料が少なく、保守も容易である。

電力貯蔵装置の運用費（第4項）： 買電の項で説明したように、多くの電力会社は、昼間の電気料金より夜間の電気料金を安く設定しており、夜間などの時間帯に電力を蓄えておき、その電力を需要のピーク時である昼間に放出することで大幅なコスト削減ができる。

電力貯蔵装置の運用にかかるコストには、保守費、充放電効率による損失が考えられる。

- 保守費… 電力貯蔵装置の保守としては、電池の補水作業や比重測定などを行わなければならない。しかし、密閉型で保守が必要ないものが数多く研究されておりメンテナンスフリーとなる場合もある。
- 充放電効率… 電力貯蔵装置には充放電効率があり、これが低いと導入によるメリットが少なくなる。NAS 電池などは自己放電がなく非常に高い充放電効率となっており、その値は約 90% である。

売電の売電料金： 余剰電力を商用電力系統へ逆潮流する場合は、電力会社が季節別・時間帯別に明示した購入価格が設定されているので、買電と同様、設定料金を基に売電の項を定式化する。また、売電の項は電気を売ることによってコスト削減を目的としているので、目的関数において負の値となる。しかし、通常、コージェネレーションシステムの発電単価より安価であるため、売電すれば常にランニングコストの削減になるとは限らない。

以上をまとめると、コージェネレーションシステムや補助熱源機は、その出力を決定変数とする関数として表され、買電、売電に関する項は、買・売電電力を決定変数とする関数となり、電力貯蔵装置は、充放電電力を決定変数とする関数として表すことができる。したがって、本問題において最小化すべき目的関数の形は次式となる。

$$\sum_{i=1}^m \left\{ OC_{co}(p_{co}(i)) + PE(p_e(i)) + OC_{bl}(p_{bl}(i)) + OC_{st}(p_{st}(i)) + PU(p_u(i)) \right\} \quad (\text{式 5.1})$$

ここで、

- $OC_{co}()$ コージェネレーションシステムの運用費
- $p_{co}(i)$ 時刻 i におけるコージェネレーションシステムの出力
- $PE()$ 電気料金
- $p_e(i)$ 買電電力
- $OC_{bl}(i)$ 補助熱源機の運用費
- $p_{bl}(i)$ 時刻 i における補助熱源機の出力
- $OC_{st}()$: 電力貯蔵装置の運用費
- $p_{st}(i)$: 時刻における充放電電力
- $PU()$: 売電料金

$p_u(i)$: 時刻における売電電力

m : 時間帯数

ここでは、それぞれの項が、決定変数に対してどのような式になるかまでは定式化を行っていない。それぞれの式には、様々な形が考えられ、それを解くための解法アルゴリズムによっても変わってくる。したがって次節にて、具体的な定式化を行う。

5.2.3 制約条件

本問題における制約として、次の条件があげられる。

電力需要に関する制約: 需要家の電力需要は、コージェネレーションシステム、買電電力、電力貯蔵装置の放電電力で賄う。電力貯蔵装置の充電電力、売電電力については負の値とし、これらが行われる場合には、コージェネレーションシステムの出力、買電電力の量が増加し電力需要を満たす。したがって、この制約条件は次式のように表す。

$$L_e(i) = p_{co}(i) + p_e(i) + \eta(i) \cdot p_{st}(i) + p_u(i) \quad (\text{式 5.2})$$

$$\eta(i) = \begin{cases} 1 & (i \in T_+) \\ -1 & (i \in T_-) \end{cases}$$

$L_e(i)$: 時刻 i における電力需要

T_+ : 放電時間帯

T_- : 充電時間帯

上式において、電力貯蔵装置は、コージェネレーションシステム、買電電力の両方から充電ができ、さらにどの時刻でも充放電が可能のため、その運用は夜間に買電電力から充電し、昼間のピーク時に放出するという固定された運用ではなく、様々な運用が可能である。したがって、コージェネレーションシステムの余剰電力も売電か電力貯蔵装置に充電するという選択肢がある。

熱需要に関する制約: 熱需要は、コージェネレーションシステムと補助熱源機の2つで満たされ、次式のように表される。

$$L_h(i) \leq H(p_{co}(i)) + p_{bt}(i) \quad (\text{式 5.3})$$

$L_h(i)$: 時刻における熱需要

$H()$: コージェネレーションシステムの電力出力に対する利用可能な排熱

不等号としてあるのは、コージェネレーションシステムの排熱を利用せず、電力だけでの利用でも買電より安くなるという場合が考えられるためである。

電力貯蔵装置の充放電電力に関する制約： 充放電電力に関する制約は2つあり、充電できる容量が決まっていることと、充電した容量しか放出できないことである。図5.1: に示した電力貯蔵装置の運用例をもとに、この2つの制約について説明する。

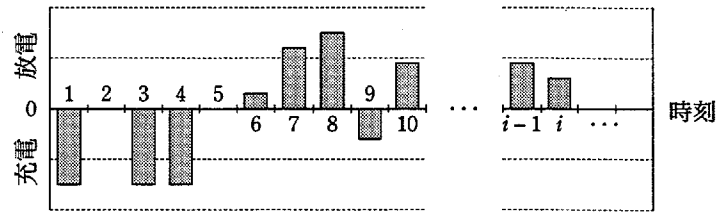


図5.1: 貯蔵装置の運用パターン例

充電電力は負の値、放電電力は正の値である。例えば、時刻1から9まで、それぞれの充放電電力を足していくとその合計は、時刻9の電力貯蔵装置に蓄えられている電力となることが分かる。したがって、時刻1から*i*までの充放電電力の合計は、時刻*i*に電力貯蔵装置に充電されている容量を表す。

また、時刻1から*i*-1までの充放電電力の合計は、時刻*i*-1に蓄えられている電力であり、時刻*i*に放出可能な電力である。したがって、本制約は、時刻1から*i*までの合計が0以下にならないことを示す。

以上のことを式で表すと次のよう表せる。

$$-S_{ch} \leq \sum_{i=1}^r \eta(i) \cdot p_{st}(i) \leq 0 \quad r=1 \dots m \quad (\text{式 5.4})$$

S_{ch} : 電力貯蔵装置の限界容量

この制約式でも電力貯蔵装置の充放電がどの時刻でもできるようになっている。

設備の上下限值に関する制約： それぞれの設備の上下限は次式のように表す。

$$PC_{\min} \leq p_{co}(i) \leq PC_{\max} \quad (\text{式 5.5})$$

$$0 \leq p_{bl}(i) \leq PB_{\max} \quad (\text{式 5.6})$$

$$0 \leq p_{st}(i) \leq PS_{\max} \quad (\text{式 5.7})$$

PC_{\min} , PC_{\max} : コージェネレーションシステムの下限值, 上限値

PB_{\max} : 補助熱源機の上限值

PS_{\max} : 電力貯蔵装置の上限值

ここで、コージェネレーションシステムは最低出力以上で必ず運用されており、起動・停止は行わないものとする。これは一般に、コージェネレーションシステムは頻繁な起動停止には適さず、エネルギーロスも大きいことから連続で運転することが望ましいことに起因する。

買電電力、売電電力の上限值に関する制約: 買電電力は、契約電力以上の電力は買うことはできないとし、売電電力は負の向きとなるので次式のように表す。

$$0 \leq p_e(i) \leq PE_{\max} \quad (\text{式 5.8})$$

$$p_u(i) \leq 0 \quad (\text{式 5.9})$$

PE_{\max} : 契約電力

5.2.4 定式化のまとめ

以上をまとめると、本問題は次の最適化問題として定式化されたことになる。

minimize

$$\sum_{i=1}^m \left\{ OC_{co}(p_{co}(i)) + PE(p_e(i)) + OC_{bl}(p_{bl}(i)) + OC_{st}(p_{st}(i)) + PU(p_u(i)) \right\}$$

subject to

$$L_e(i) = p_{co}(i) + p_e(i) + \eta(i) \cdot p_{st}(i) + p_u(i)$$

$$L_h(i) \leq H(p_{co}(i)) + p_{bl}(i)$$

$$-S_{ch} \leq \sum_{i=1}^r \eta(i) \cdot p_{st}(i) \leq 0 \quad r = 1 \dots m$$

$$PC_{\min} \leq p_{co}(i) \leq PC_{\max}$$

$$0 \leq p_{st}(i) \leq PS_{\max}$$

$$0 \leq p_e(i) \leq PE_{\max}$$

$$p_u(i) \leq 0$$

$$\eta(i): \begin{cases} 1 & (i \in T_+) \\ -1 & (i \in T_-) \end{cases}$$

以上が運用費のみを考慮した最適運用問題の定式化である。次節では、この最適運用問題をもとに設置費を考慮した最適運用問題について定式化を行う。

5.3 設置費を考慮した最適運用問題の定式化

前節では、各機種容量があらかじめ決定されている場合に、需要家の総支出費用が最小となる最適運用計画について述べた。しかしながら、システム計画において設備の容量をどの程度のするかということは大変重要である。したがって、本節ではこれまで述べてきた最適運用計画を同時に考慮しつつ、それぞれの設備の容量を決定する最適導入計画問題について定式化する。

5.3.1 仮定

運用については、前節の最適運用計画問題を用いるので同様の仮定が必要である。今回、最適導入計画を行うにあたり、仮定(6)を新たに設けた。

(6) 導入量を決定する設備は、コージェネレーションシステム、電力貯蔵装置、補助熱源機とする。

仮定(6): 補助熱源機は、コージェネレーションシステムの排熱の不足を補う熱源として設置している。したがって、コージェネレーションシステムの導入量を増やすと補助熱源機の容量低減または非設置となる。そのため、補助熱源機についても設置費を考慮し、その導入量を決定する。

5.3.2 目的関数

目的関数を定式化するにあたり、設備導入にかかる設置費を求めなければならない。以下でその設置費について説明する。

設備費: それぞれの機器本体やそれを使用するために必要な関連機器等にかかる費用である。これらは、機器の種類はもちろん、設備条件、見積もり条件、その他種々の条件によって変わってくる。

人件費・スペースコスト: 人件費やスペースコストは、システムによるコストの差が小さいとして無視することが多い。もし計上する場合は、導入のために増えた運転要員数に一人あたりの経費を乗じて人件費を算出する。また、スペースコストは設置のために増やさなければならない面積（または機械室面積）に 1m^2 あたりの賃料を乗ずる。

設備導入による設置費の減額: 設備導入による設置費の減額要素としては、以下の項目がある。

(a) 発電機容量の増加による契約電力の低減

(b) 電力貯蔵装置の負荷平準化による契約電力の低減

減額要素はあるもののほとんどの場合そのコストは増加する。設置費の増分は装置の容量あたりの原単位で概算されたり、台数ごとに増分を見積もったりする。したがって、それぞれの設置費はその容量に対する関数、基本料金は契約電力に対する関数として以下のように表すことができる。

$$CC_{co}(fs) + CC_{st}(ss) + CC_{bl}(bs) + EB(es) \quad (\text{式 5.10})$$

ここで、

$CC_{co}()$: コージェネレーションのイニシャルコスト

fs : コージェネレーションの容量

$CC_{st}()$: 電力貯蔵装置のイニシャルコスト

ss : 電力貯蔵装置の容量

$CC_{bl}()$: 補助熱源機のイニシャルコスト

bs : 補助熱源機の容量

$EB()$: 基本料金

es : 契約電力

である。

前節の運用費のみで定式化した目的関数に、この設置費の式を加えることで設置費も含めた目的関数となり、この目的関数が最小となる時に得られた設備容量が、最適運用された時の最適容量である。

ここで、設置費は減価償却などにより、運用費と同じ日数や年数あたりの費用にしなければならない。例えば、運用費が1日分であるのなら、減価償却を用いて設置費も1日分の費用としなければならない。

また、負荷パターンの数についても考慮する必要がある。1つの需要家に対して負荷パターンは1つだけということはありません、季節などによって負荷パターンは変動する。したがって、いくつもの負荷パターンを想定し最適導入量を求める必要がある。

以上のことから、設置費も含めた目的関数は以下のようなになる。

$$\sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^m \left\{ OC_{co}(p_{co}(i, j)) + PE(p_e(i, j)) + OC_{bl}(p_{bl}(i, j)) + OC_{st}(p_{st}(i, j)) + PU(p_u(i, j)) \right\} + CC_{co}(fs) + CC_{st}(ss) + CC_{bl}(bs) + EB(es) \quad (\text{式 5.11})$$

ただし、

l : 負荷パターン数

である。

設置費や基本料金がどのように表すかについても後ほど詳しく述べる。

5.3.3 制約条件

前節の制約条件に対して、設備容量を変数にしたことで設備の上下限が変数によって制約される。一方、電力需要・熱需要に関する制約式は、それぞれ電力需要、熱需要を満たす式であるので設備容量に直接関係せず変わらない。

以下では、設備容量に影響を受ける制約について説明する。

設備容量により影響を受ける制約： コージェネレーションシステム出力の上下限、電力貯蔵装置の充放電電力の上限、電力貯蔵装置の容量の上限、補助熱源機出力の上限、買電電力の上限がそれぞれの設備容量によって制約を受ける。また、出力などの運用に関する項は、それぞれの負荷パターンや時間帯数について考慮しなければならないので以下のような制約式となる。

- コージェネレーションシステム出力の上下限制約

$$LV(fs) \leq p_{co}(i, j) \leq fs \quad (\text{式 5.12})$$

$LV()$: コージェネレーションシステムの設備容量に対する最低出力

- 補助熱源機出力の上限

$$0 \leq p_{th}(i, j) \leq bs \quad (\text{式 5.13})$$

- 電力貯蔵装置の充放電電力の上限

$$0 \leq p_{st}(i, j) \leq ss \quad (\text{式 5.14})$$

- 電力貯蔵装置の充電容量の上限

$$-C(ss) \leq \sum_{i=1}^r \eta(i, j) \cdot p_{st}(i, j) \leq 0 \quad r=1 \dots m \quad (\text{式 5.15})$$

$C()$: 電力貯蔵装置の設備容量に対する限界充電容量

- 買電電力の上限

$$0 \leq p_e(i, j) \leq es \quad (\text{式 5.16})$$

制約条件の形は、前節と同じであるがすべての上下限值が変数となっている。したがって、容量が変化すると当然設置費が変化し、さらにそれぞれの設備の出力が影響を受け運用費についても変化が生じる。このような制約条件下で目的関数が最小となる時、その設備容量は、最適運用が行われた場合での最適容量となる。

5.3.4 定式化のまとめ

以上をまとめると本問題は次の最適化問題として定式化されたことになる。

minimize

$$\sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^m \left\{ OC_{co}(p_{co}(i, j)) + PE(p_e(i, j)) + OC_{bl}(p_{bl}(i, j)) + OC_{st}(p_{st}(i, j)) \right. \\ \left. + PU(p_u(i, j)) \right\} + CC_{co}(fs) + CC_{st}(ss) + CC_{bl}(bs) + EB(es)$$

subject to

$$L_e(i, j) = p_{co}(i, j) + p_e(i, j) + \eta(i, j) \cdot p_{st}(i, j) + p_u(i, j)$$

$$L_h(i, j) \leq H(p_{co}(i, j)) + p_{bl}(i, j)$$

$$-C(ss) \leq \sum_{i=1}^l \eta(i, j) \cdot p_{st}(i, j) \leq 0 \quad r = 1 \dots m$$

$$LV(fs) \leq p_{co}(i, j) \leq fs$$

$$0 \leq p_{st}(i, j) \leq ss$$

$$0 \leq p_{bl}(i, j) \leq bs$$

$$0 \leq p_e(i, j) \leq es$$

$$\eta(i, j): \begin{cases} 1 & (i, j \in T_+) \\ -1 & (i, j \in T_-) \end{cases}$$

$$0 \leq p_{co}(i, j), p_e(i, j), p_{st}(i, j), p_{bl}(i, j), fs, ss, bs, es \leq \infty$$

$$p_u(i) \leq 0$$

5.4 線形計画問題への定式化（運用のみ）

本研究では、前節で定式化した2つの最適化問題を、それぞれの項を近似的に一次式で表すことによって線形計画問題として定式化する。本節および次節では、それぞれの問題を定式化する際に考慮すべき点について述べる。

まず、最適運用問題を線形計画問題として表すため、以下のように線形化を行った。

- 燃料費・保守費などを kWh あたりの値段として表す。
- 電力貯蔵装置の充放電を表す 1, -1 整数決定変数であるを消去するため、充電電力と放電電力をそれぞれ1つの項として表す。

具体的な定式化がどのようになるかを目的関数と制約条件についてそれぞれ説明する。

5.4.1 目的関数

前節では、目的関数のそれぞれの項を単に出力に対する関数として表していたが、以下では、それぞれの項がどのように表されるかについて説明する。

コージェネレーションシステムの運用費： 運用費については、燃料費と保守費について考慮する。これらは一般的に kWh あたりの値段として表すことができるので、以下のように表すことができる。

$$OC_{co}(p_{co}(i)) \approx (f_{co} + m_{fc}) \cdot p_{co}(i) \quad (\text{式 5.17})$$

f_{co} : コージェネレーションシステムの電力量あたりの燃料費

m_{fc} : コージェネレーションシステムの電力量あたりの保守費

変数は $p_{co}(i)$ であり、 $(f_{co} + m_{fc})$ は目的関数定数である。

買電電力の電気料金： 電力会社では、電気料金は kWh あたりの値段で表されているので、そのまま用いると以下のように表せる。

$$PE(p_e(i)) = e_e(i) \cdot p_e(i) \quad (\text{式 5.18})$$

$e_e(i)$: 電力量料金

$p_e(i)$ は変数, $e_e(i)$ は目的関数定数である。電力量料金は夜間, 昼間, ピーク時間帯などによってその料金は変わってくるので $e_e(i)$ と表し, 時刻によって定数の値が違うことを示す。

補助熱源機の運用費: 補助熱源機もコージェネレーションシステムと同様に kWh または cal あたりの燃料費, 保守費を考慮する。したがって, 以下のように表せる。

$$OC_{bl}(p_{bl}(i)) = (f_{bl} + m_{bl}) \cdot p_{bl}(i) \quad (\text{式 5.19})$$

f_{bl} : 補助熱源機の燃料費

m_{bl} : 補助熱源機の保守費

熱需要は cal で表されることがあるので単位をどちらかでそろえておく必要がある。

電力貯蔵装置の運用費: 電力貯蔵装置には燃料費がいらないので保守費のみ考慮し, 同様に kWh あたりの値段として表す。また, 充電電力と放電電力の項に分けたため以下のように表すことができる。

$$OC_{st}(p_{st}(i)) = m_{st} \cdot pc_{st}(i) + m_{st} \cdot pr_{st}(i) \quad (\text{式 5.20})$$

$pc_{st}(i)$: 電力貯蔵装置の充電電力

$pr_{st}(i)$: 電力貯蔵装置の放電電力

m_{st} : 電力貯蔵装置の保守費

また, 充電した電力は必ず放電されると考えると以下のようにも表せる。

$$2m_{st} \cdot pr_{st}(i) \quad (\text{式 5.21})$$

本章では式の簡素化のため, 目的関数についてはこの式を用いることにする。

売電電力の売電料金: 売電料金も電力量料金と同様, 時刻によってその料金は変わってくるので買電電力の場合と同じように表す。しかし, 売電料金は目的関数において減額要素であるので負の値となり, 以下のように表せる。

$$PU(p_u(i)) = -e_u(i) \cdot p_u(i) \quad (\text{式 5.22})$$

$e_u(i)$: 売電料金

$p_u(i)$ が変数, $e_u(i)$ が目的関数定数である。

5.4.2 制約条件

制約条件は前章と同じであるが、その制約式は電力貯蔵装置の充電電力と放電電力をそれぞれの1つの項としたことで若干変わるものがある。しかし、ほとんどの制約式は、線形計画問題の制約式で表すための式変形をおこなうのみでそのまま用いることができる。以下では、それぞれの制約式について説明する。

電力需要に関する制約： 電力需要に関する制約は前章と同じであるが、前章の制約式は電力貯蔵装置の充放電を表す1§-1 整数決定変数であるを含んでいた。これを消去するため、充電電力と放電電力をそれぞれ1つの項として表し定式化しなければならない。また、電力貯蔵装置充電電力と売電電力は、正の値としコージェネレーションシステムや買電電力から引くことで電力需要を満たすこととし、以下のように表せる。

$$L_e(i) = p_{co}(i) + p_e(i) + \eta(i) \cdot p_{st}(i) + p_u(i)$$

$$\downarrow$$

$$p_{co}(i) + p_e(i) + p_{rst}(i) - p_{cst}(i) - p_u(i) = L_e(i) \quad (\text{式 5.23})$$

この制約式は、前章で表した制約式と意味的には全く同じである。

熱需要に関する制約式： 前章の制約式は、コージェネレーションシステムの排熱をその電力出力に対する関数として表していたがこれを熱電比で表すとする。

$$L_h(i) \leq H(p_{co}(i)) + p_{bl}(i)$$

$$\downarrow$$

$$hr \cdot p_{co}(i) + p_{bl}(i) \geq L_h(i) \quad (\text{式 5.24})$$

hr : コージェネレーションシステムの熱電比

電力貯蔵装置の充放電電力に関する制約： この制約式において変わるのは、放電電力と充電電力が2つの項に分けられることである。

$$-S_{ch} \leq \sum_{i=1}^r \eta(i) \cdot p_{st}(i) \leq 0 \quad r = 1 \dots m$$

$$\downarrow$$

$$\sum_{i=1}^r (p_{rst}(i) - p_{cst}(i)) \leq 0 \quad r = 1 \dots m \quad (\text{式 5.25})$$

$$\sum_{i=1}^r (pr_{st}(i) - pc_{st}(i)) \geq -S_{ch} \quad r=1 \dots m \quad (\text{式 5.26})$$

上が充電した容量しか放出できないという制約を表し、下が充電できる容量が決まっているという制約を表す。充放電効率を考慮する場合は、充電の項に効率をかけることで考慮することができる。

その他の制約： その他の制約式については、前章と同じである。以下でコージェネレーションシステムの上下限についてのみ表す。

$$PC_{\min} \leq p_{co}(i) \leq PC_{\max}$$

↓

$$p_{co}(i) \geq PC_{\min} \quad (\text{式 5.27})$$

$$p_{co}(i) \leq PC_{\max} \quad (\text{式 5.28})$$

その他の上下限についても同様な表し方にすることで線形計画問題として定式化する。

定式化のまとめ： 以上をまとめると、本問題は次の線形計画問題として定式化されたことになる。

minimize

$$\sum_{i=1}^m \left\{ (f_{co} + m_{fc}) \cdot p_{co}(i) + e_e(i) \cdot p_e(i) + (f_{bl} + m_{bl}) \cdot p_{bl}(i) + 2m_{st} \cdot pr_{st}(i) - e_u(i) \cdot p_u(i) \right\}$$

subject to

$$p_{co}(i) + p_e(i) + pr_{st}(i) - pc_{st}(i) - p_u(i) = L_e(i)$$

$$hr \cdot p_{co}(i) + p_{bl}(i) \geq L_h(i)$$

$$\sum_{i=1}^r (pr_{st}(i) - pc_{st}(i)) \leq 0 \quad r=1 \dots m$$

$$\sum_{i=1}^r (pr_{st}(i) - pc_{st}(i)) \geq -S_{ch} \quad r=1 \dots m$$

$$p_{co}(i) \leq PC_{\max}$$

$$p_{co}(i) \geq PC_{\min}$$

$$p_{bl}(i) \leq PB_{\max}$$

$$pr_{st}(i) \leq PS_{\max}$$

$$pc_{st}(i) \leq PS_{\max}$$

$$p_e(i) \leq PE_{\max}$$

変数の符号の制約

$$0 \leq p_{co}(i), p_e(i), p_{bl}(i), pr_{st}(i), pc_{st}(i), p_u(i)$$

5.5 線形計画問題への定式化（設置費考慮）

2.3 節では設置費を設備容量に対する関数として表した。通常，その容量は，導入される設備の容量や導入台数によって決まるため離散値である。したがって，変数が離散値となり，そのままでは線形計画問題として定式化することができない。そのため，以下のような仮定を用いることで設置費を近似的に表す。

- 変数である設備容量を連続値として扱い，それにかかる定数を kW あたりの設置費として表す。
- 変数である基本料金についても連続値として扱う。

以上の仮定を用いることで，線形計画問題として定式化できる。以下では具体的な定式化について目的関数と制約条件に分けて説明する。

5.5.1 目的関数

目的関数は，運用費のみの最適運用問題に設置費の項を加えたものである。運用費の項は前述で既に説明したものに季節などの負荷パターンを考慮すれば良い。ここでは設置費と基本料金の項について説明する。

設置費の項： 仮定において容量を連続値，定数を kW あたりの設置費としているのでそれぞれの設備の設置費は以下のように表すことができる。

- コージェネレーションシステムの設置費

$$CC_{co}(fs) = c_{co} \cdot fs \quad (\text{式 5.29})$$

$CC_{co}(fs)$: コージェネレーションシステムの kW あたりの設置費

- 補助熱源機の設置費

$$CC_{ht}(bs) = c_{ht} \cdot bs \quad (\text{式 5.30})$$

$CC_{ht}(bs)$: 補助熱源機の kW あたりの設置費

- 電力貯蔵装置の設置費

$$CC_{st}(ss) = c_{st} \cdot ss \quad (\text{式 5.31})$$

$CC_{st}(ss)$: 電力貯蔵装置の kW あたりの設置費

基本料金の項： 基本料金についても契約電力を連続値、定数を kW あたりの基本料金とし、設置費の項と同様な形で表すことができる。

$$EB(es) = e_b \cdot es \quad (\text{式 5.32})$$

e_b : kW あたりの基本料金

5.5.2 制約条件

制約条件については、前章と同様である。また、コージェネレーションシステムの下限值と電力貯蔵装置の限界容量は、設備容量に対する関数として表していたので変形する必要がある。運用に関する制約式は前節で説明しているので、ここでは、それぞれの設備の上下限に対する制約式について示す。

- コージェネレーションシステムの上下限

コージェネレーションシステムの容量が変数となった。また、出力の下限値を容量の lw 倍とする。

$$LV(fs) \leq p_{co}(i, j) \leq fs$$

↓

$$p_{co}(i, j) - lw \cdot fs \geq 0 \quad (\text{式 5.33})$$

$$p_{co}(i, j) - fs \leq 0 \quad (\text{式 5.34})$$

lw : 設備容量あたりの下限値

- 補助熱源機の上限

補助熱源機の制約式は設備容量が変数になっている。

$$p_{bi}(i, j) \leq bs$$

↓

$$p_{bi}(i, j) - bs \leq 0 \quad (\text{式 5.35})$$

- 電力貯蔵装置の上限

前節で充放電電力は2つの項で表された。したがって、それぞれの項についての上限が変数である設備容量によって制限される。

$$p_{st}(i, j) \leq ss$$

↓

$$pr_{st}(i, j) - ss \leq 0 \quad (\text{式 5.36})$$

$$pc_{st}(i, j) - ss \leq 0 \quad (\text{式 5.37})$$

- 電力貯蔵装置の充電容量

充電容量についても同様の考え方で以下のように表せる。

$$-C(ss) \leq \sum_{i=1}^r \eta(i, j) \cdot p_{st}(i, j) \leq 0 \quad r=1 \dots m$$

↓

$$\sum_{i=1}^r (pr_{st}(i, j) - pc_{st}(i, j)) \leq 0 \quad r=1 \dots m \quad (\text{式 5.38})$$

$$\sum_{i=1}^r (pr_{st}(i, j) - pc_{st}(i, j)) + h \cdot ss \geq 0 \quad r=1 \dots m \quad (\text{式 5.39})$$

h : 容量あたりの限界容量

- 買電電力の上限

買電電力については、契約電力以上の電力は買うことができず、以下のように表される。

$$0 \leq p_e(i, j) \leq es$$

↓

$$p_e(i, j) - es \leq 0 \quad (\text{式 5.40})$$

5.5.3 定式化のまとめ

以上をまとめると本問題は次の線形計画問題として定式化されたことになる。

minimize

$$\sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^m \left\{ (f_{co} + m_{fc}) \cdot p_{co}(i, j) + e_e(i, j) \cdot p_e(i, j) + (f_{bl} + m_{bl}) \cdot p_{bl}(i, j) \right. \\ \left. + 2m_{st} \cdot pr_{st}(i, j) - e_u(i, j) \cdot p_u(i, j) \right\} + c_{co} \cdot fs + c_{bl} \cdot bs + c_{st} \cdot ss + e_b \cdot es$$

subject to

$$p_{co}(i, j) + p_e(i, j) + pr_{st}(i, j) - pc_{st}(i, j) - p_u(i, j) = L_e(i, j)$$

$$hr \cdot p_{co}(i, j) + p_{bl}(i, j) \geq L_h(i, j)$$

$$\sum_{i=1}^r (pr_{st}(i, j) - pc_{st}(i, j)) + h \cdot ss \geq 0 \quad r = 1 \dots m$$

$$\sum_{i=1}^r (pr_{st}(i, j) - pc_{st}(i, j)) \leq 0 \quad r = 1 \dots m$$

$$p_{co}(i, j) - lv \cdot fs \geq 0$$

$$p_{co}(i, j) - fs \leq 0$$

$$p_{bl}(i, j) - bs \leq 0$$

$$pr_{st}(i, j) - ss \leq 0$$

$$pc_{st}(i, j) - ss \leq 0$$

$$p_e(i, j) - es \leq 0$$

変数の符号の制約

$$0 \leq p_{co}(i, j), p_e(i, j), pr_{st}(i, j), pc_{st}(i, j), p_u(i, j), p_{bl}(i, j), fs, ss, bs, es$$

5.6 負荷モデル

本節では、対象とする負荷モデルについて述べる。まず、コージェネレーションシステムの導入にあたっては、対象建物の用途規模が適切である必要がある。一般に下記のような特性を持っている建物がコージェネレーションシステムの導入に向いていると考えられている。

- (1) 年間を通じて安定した電力負荷、熱負荷がある建物
- (2) 電力負荷と熱負荷の時刻別負荷パターンが類似している建物
- (3) 建物の熱電比が比較的高い建物…建物の熱電比が原動機のそれに近い場合、エネルギーコストの大幅な削減がはかれ、また、大きな省エネルギー効果が期待できる。
- (4) 病院やコンピュータセンターなどで、電力・熱ともにエネルギー源を複数化し、信頼性を高めたい場合
- (5) 特別高圧受電を回避したい場合

したがって、本研究では負荷モデルとしてホテル、病院、事務所（標準型）、事務所（OA型）、レジャー施設、スポーツセンター、店舗を用いた。

図 5.2: ~ 図 5.15: に建物用途別の電力・熱負荷パターンをそれぞれ延べ床面積 10,000 m² のビルとして図示し、以下、それら負荷モデルを構築する際の推定法について述べる。

5.6.1 電力・熱負荷の推定

コージェネレーションシステムの導入検討やシステムの計画を行う際、経済性・省エネルギー性等を評価するために、建物の月別・時刻別の電力・熱負荷を的確に推定することが求められる。それには実施設計による負荷計算値を用いることが望ましいが、特にコージェネレーションシステム導入の可否は基本計画時に検討されることが多いため、基本計画時に明らかになっている建物条件をもとに負荷推定を行うことになる。

今回は、電力・熱負荷の原単位を用いて推定された負荷モデルを用いたので、この推定法について以下で説明する。

電力・熱負荷の原単位を用いた推定法： 電力・熱負荷の原単位は各種用意されていて、建物用途別のピークおよび年間負荷、月別・時刻別負荷パターンからなる。これらは従来のデータをもとに新しい建物のエネルギー需要分析結果を加えて見直しを図り作成される。

(a) ピーク負荷および年間負荷

ピーク負荷・年間負荷は用途によってばらつきが大きく、項目によっては最小値と最大値に2倍以上の差が生じる。この調査は、各建物の実際の熱購入量やエネルギー消費量の実績値から求められる。

(b) 月別・時刻別負荷パターン

(a) で年間の各負荷が推定されると、月別負荷パターンにより各月の負荷が推定できる。また、1日あたりの負荷は各月の負荷を各月の日数で除すことにより求められる。あとは、時刻別負荷パターンにより各時刻の負荷パターンを1日の負荷に乗ずることにより、各時刻の負荷を推定する。

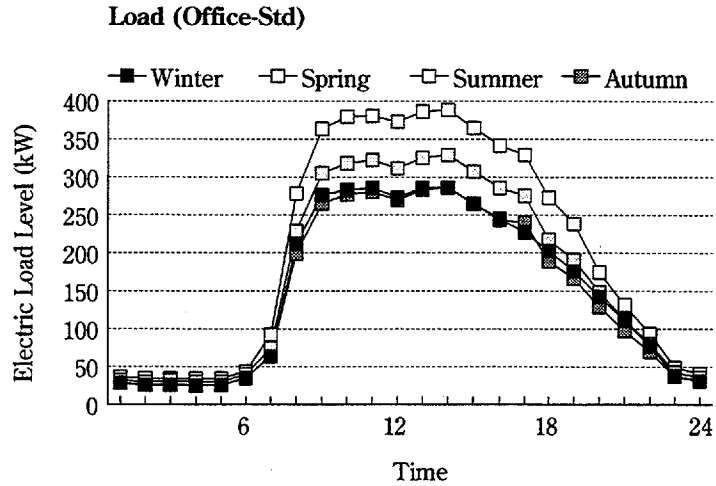


図 5.2: 事務所 (標準) 【電力需要】

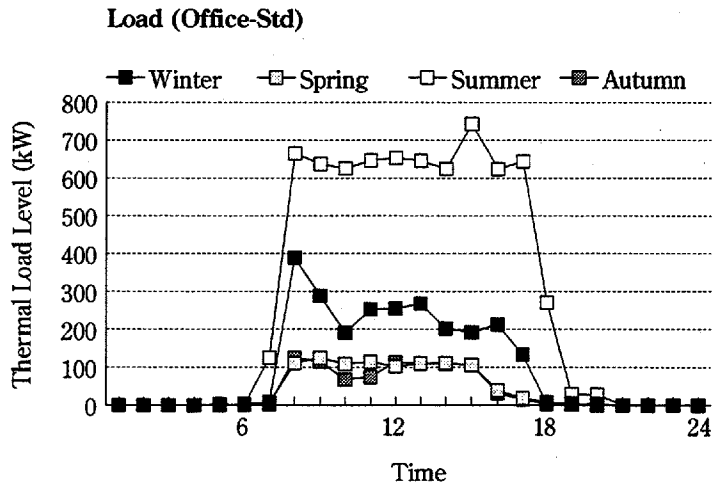


図 5.3: 事務所 (標準) 【熱需要】

《事務所 (標準型)》: 電力需要は, 年間を通じて似通った形をしており, 1 日の負荷変化は, 17 時以降の負荷が急激に減っており夜の需要はほとんどない。熱需要についても同様に, 17 時以降の需要はほとんどない。また, 8 月の需要はかなり多くなっている。

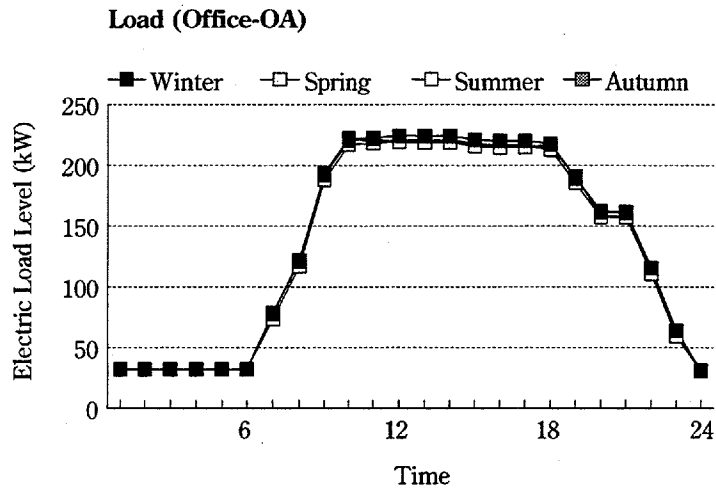


図 5.4: 事務所 (OA) 【電力需要】

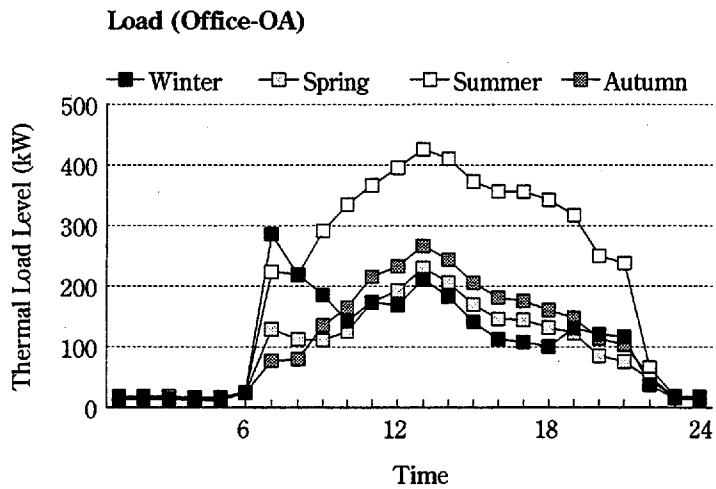


図 5.5: 事務所 (OA) 【熱需要】

《事務所 (OA形)》： 電力需要は年間を通じて似通った形をしており、夜は小さく昼は大きい。また、月ごとにおける需要の多さもほとんど同じである。熱需要は冷房需要のために8月の需要が多くなっていることが理解できる。さらに負荷変動についても大きいことがわかる。

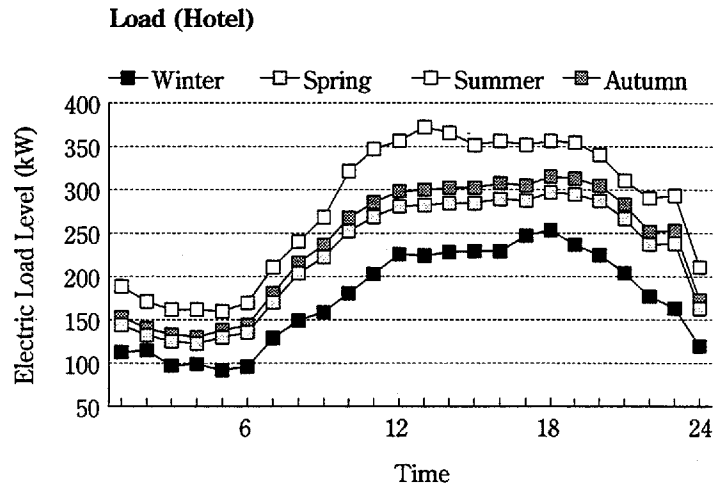


図 5.6: ホテル【電力需要】

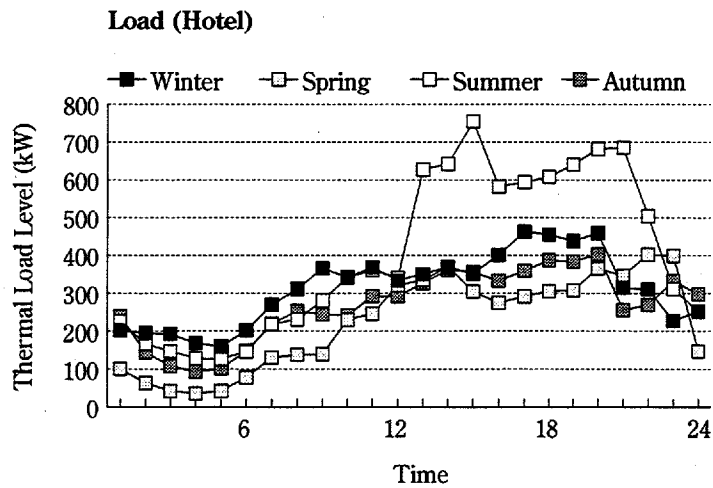


図 5.7: ホテル【熱需要】

《ホテル》： ホテルにおいても、電力需要は年間を通じて似通った形をしていることが分かる。夜間の電力需要がかなり多く、負荷変動が小さい。熱需要はかなり似通っているが8月については特に多くなっていることが分かる。

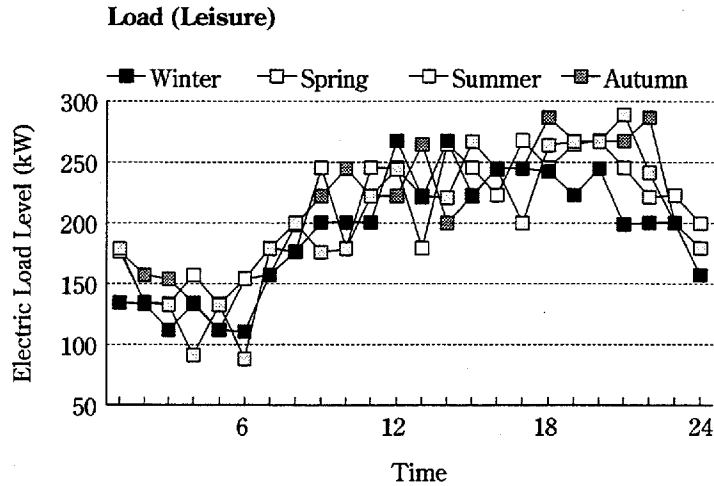


図 5.8: レジャー施設【電力需要】

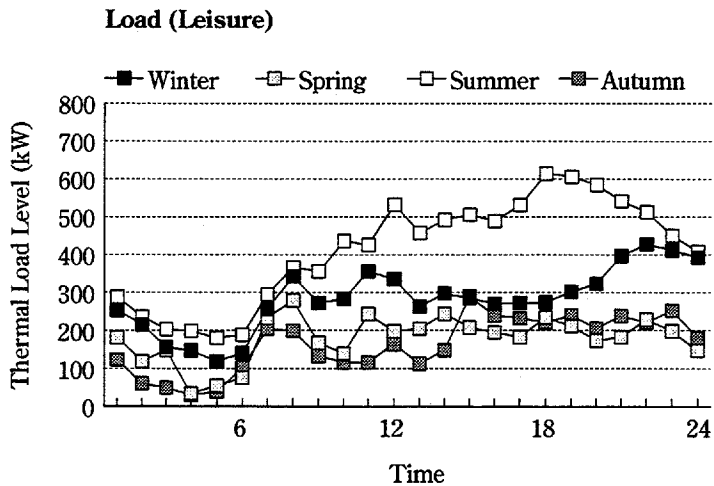


図 5.9: レジャー施設【熱需要】

《レジャー施設》： 電力需要は1日を通じてほぼ一定であるが、他の負荷と比べて時間ごとの変化がかなり激しい。月ごとの需要量の変化はほとんどないことが分かる。熱需要は1日を通じた変化は、5月と11月では少ないが、2月は特に暖房需要のため大きくなっていることが分かる。

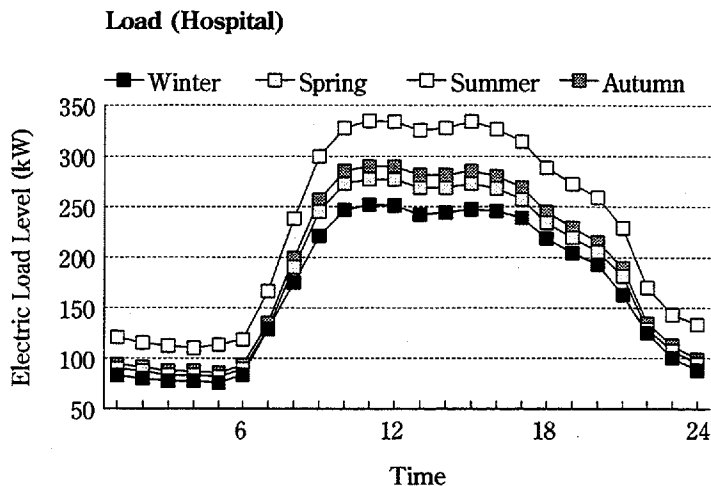


図 5.10: 病院【電力需要】

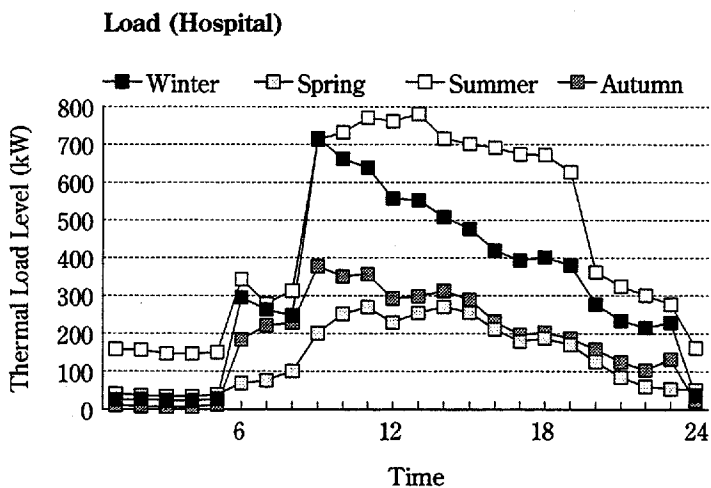


図 5.11: 病院【熱需要】

《病院》： 電力需要は、年間を通じて似通った形をしているが、月ごとの需要量が違っている。夜間の電力需要が多めであることも特徴である。熱需要は、5月、11月は似ているが2月、8月については形も大きさもかなり違う。

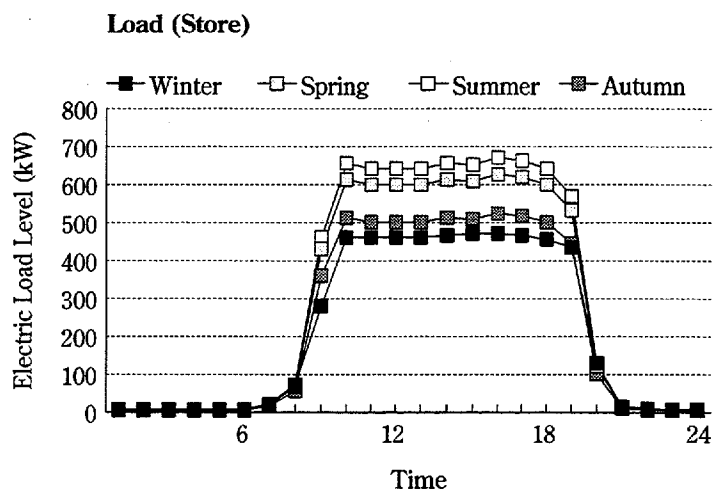


図 5.12: 店舗【電力需要】

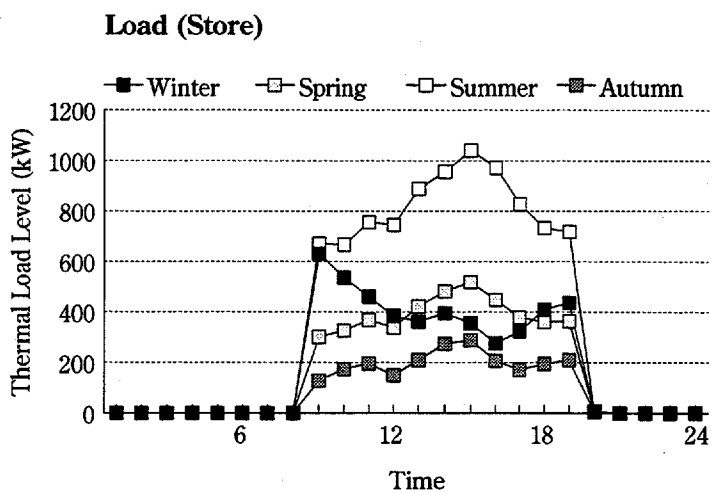


図 5.13: 店舗【熱需要】

《店舗》： 電力需要は年間を通じて似通った形をしているが、月ごとの需要量がかなり違うことが分かる。1日の負荷変化を見ると、営業時間外となる夜間はほとんど需要がないが、昼間は需要が多いため負荷変化がかなり大きくなっている。熱需要は、夜間の需要がほとんどなく、また8月の需要が飛び抜けて多い。

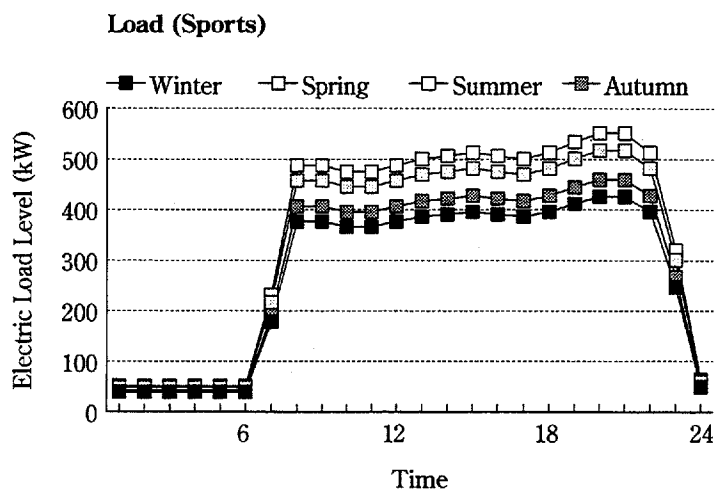


図 5.14: スポーツ施設【電力需要】

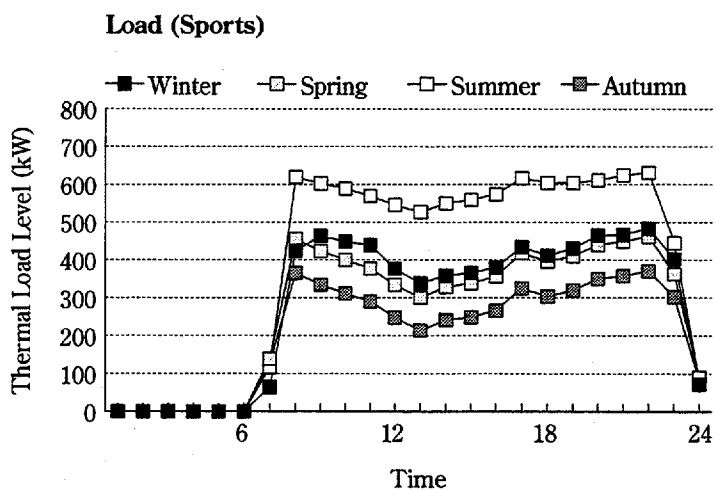


図 5.15: スポーツ施設【熱需要】

《スポーツ施設》： 電力需要は、年間を通じて似通った形をしている。1日の負荷変化は店舗と似ているが、スポーツセンターの場合、22時ごろまでかなりの電力供給が必要とされている。熱需要も年間を通じて似通った形をしているが8月の需要量がかかなり多くなっていることが分かる。

5.7 数値シミュレーション

5.7.1 シミュレーション設定

本節ではシミュレーションを行うにあたって行った各種の設定に関して述べる。目的関数に関する各パラメータについて本シミュレーションで設定した値は表 5.1: と表 5.2: に示したとおりである。コージェネレーションシステムとして燃料電池，電力貯蔵装置として NAS 電池を想定した。以下，それぞれの項目について説明する。

表 5.1: 設備のパラメータ

燃料電池	<ul style="list-style-type: none"> 燃料費 7.1 円 /kWh 保守点検費 3 円 /kWh 電力・熱出力比 50:50 排熱回収率 50% 設置費 20 万円 /kW 償却年数 5 年
貯蔵装置	<ul style="list-style-type: none"> 保守点検費 1 円 /kWh 充放電効率 0.9 充電時間 4h 設置費 20 万円 /kW 償却年数 15 年
ボイラ	<ul style="list-style-type: none"> 燃料費 4.6 円 /kWh 保守点検費 2 円 /kWh 設置費 2 万円 /kW 償却年数 30 年

表 5.2: 電気料金のパラメータ

	買 電	売 電
ピーク時間	18.05 円 /kWh	3.9 円 /kWh
昼間時間 (夏季)	14.56 円 /kWh	3.9 円 /kWh
昼間時間 (その他)	13.87 円 /kWh	3.5 円 /kWh
夜間時間	6.09 円 /kWh	2.3 円 /kWh
基本料金	1130 円 /kW 月	

燃料電池のパラメータ:

- 燃料費 … 燃料費については，燃料として最も身近である都市ガスを用いることを想定し，燃料消費量と現在のガス料金から算出したものである。燃料電池が広く普及した場合，契約方法，政府の助成金などによって安くなることが考えられるが，今回は考慮しないものとする。

- 保守点検費 … 保守点検費は、現在設置されているコージェネレーションシステムのメンテナンス費を参考にし kW あたりの値段を算出した。
- 電力・熱出力比 … 電力・熱出力比については、電力出力と同等の熱出力が得られるとし 50:50 とした。
- 排熱回収率 … 回収率は排熱のうちどれだけが熱負荷に利用できるかを示す割合であり、設置する環境、設備等によって大きく変わるが、本シミュレーションでは 50% としている。したがって、100kW の電力出力で運転している時、熱出力は電力・熱出力比から 100kW であるが、排熱回収率は 50% であるので有効利用できる熱は 50kW となる。
- 設置費 … 現在、燃料電池は kW あたり 40 万円から 80 万円とされているが、今後の研究課題として kW あたり 20 万円から 30 万円を目標としており、今回設置費を 20 万円 /kW とした。
- 償却年数 … フィールドでの累積運転が 20000 時間を超えたプラントは、現在多数存在し、そのうちの一部は 30000 時間を超えている。このようなことから、当面の業界目標が約 45000 時間（約 5 年）と設定され、本シミュレーションでもこの値とした。

電力貯蔵装置のパラメータ：

- 保守点検費 … NAS 電池には、ほとんど保守点検が必要ないため、本シミュレーションでは、kW あたり 1 円とした。
- 充放電効率 … 自己放電がないため高効率である。各種用途を想定した試験条件で放電効率はすでに 90% 以上を達成しているため、本シミュレーションでは充放電効率を 90% とした。
- 充電時間 … 定格で充電できる時間を示す。したがって、設備容量×充電時間で限界充電容量を表す。例えば、出力 50kW の貯蔵装置が、充電時間が 4 時間であれば限界充電容量は 200kWh となる。
- 設置費 … NAS 電池は、普及段階では揚水発電とのコストとほぼ同等のレベルを達成できると見通しが得られているため kW あたり 20 万円とした。
- 償却年数 … NAS 電池の開発目標値は、耐用年数 15 年、充放電回数 2250 回以上とされているので、この値に設定した。

ボイラのパラメータ：

- 燃料費 … ボイラの燃料は、燃料電池と同じ都市ガスを用いるとし、その燃料費は燃料消費量と現在のガス料金から算出した。
- 保守点検費 … ボイラは補助熱源機であるので、コージェネレーションシステムよりメンテナンス費が少なく、保守点検費をkWあたり2円とした。
- 設置費 … 燃料が都市ガスであるので、現在、売買されているガスボイラを参考にkWあたりの設置費を算出し、2万円/kWとした。
- 償却年数 … ボイラの寿命は長いため、建物と同じぐらいの寿命を持つものもある。したがって、建物の使用年数なども考慮に入れ、償却年数は30年とした。

電気料金のパラメータ：

電気料金については、実際に電力会社で用いられている電気料金を参考にした。需要家の電力負荷が大きく高圧契約となることが多いため、高圧受電の電気料金を用いた。それぞれの時間帯を説明すると、昼間時間は8時～22時、ピーク時間は夏季の12時～15時、夜間は23～7時である。

5.7.2 シミュレーション方法

ここでは、第5.2節および第5.3節にて定式化した2つの線形計画問題を用いてシミュレーションを行う。以下にそのシミュレーション方法を示す。

運用費のみの最適運用問題： 運用費のみの最適運用問題の定式化を用い、既に燃料電池と貯蔵装置の設備容量が決められている場合のシミュレーションである。燃料電池と貯蔵装置の協調運用をみるため、燃料電池のみの最適運用と貯蔵装置を協調させた場合の最適運用を比較する。また、燃料電池は熱電併給であるため、負荷についても熱需要が大きい負荷と小さい負荷について比較し、さらに電力需要の時間ごとの変化が激しい場合のような特殊な負荷についてもシミュレーションを行った。

【対象負荷】

- (1) 電力需要に比べて熱需要が小さい負荷（事務所（標準型）の冬）
- (2) 電力需要に比べて熱需要が大きい負荷（ホテルの冬）
- (3) 電力需要が入り組んでいる負荷（レジャー施設の夏）

【シミュレーション】

- (a) 燃料電池のみ
- (b) 貯蔵装置との協調

設置費を考慮した最適運用問題： 設置費を考慮した最適運用問題の定式化を用い、燃料電池と貯蔵装置の最適導入量の決定も含めたシミュレーションである。すべての負荷モデルについてシミュレーションを行い、それぞれの負荷における最適な導入量を比較する。また、負荷パターンについては季節代表月の負荷パターンを用いる。

【対象負荷】

- すべての負荷

【シミュレーション】

- 燃料電池と貯蔵装置を考慮し、四季代表月の負荷パターン数を用いる。

5.7.3 シミュレーション結果（運用のみ）

5.7.1節で設定されたパラメータを用い、それぞれのケースで行われたシミュレーションの結果を示す。本節ではまず、運用費のみの最適運用問題についてのシミュレーション結果を示し、それぞれの運用パターンについて考察を述べる。続いて、設置費を考慮した場合の最適運用問題についてのシミュレーション結果は次節に示す。

熱需要の小さい負荷として事務所（標準型）の冬季を、熱需要の多い負荷としてホテルの冬季を取り上げる。さらに、レジャー施設については夏季の電気料金と売電料金でシミュレーションを行い、その運用がどのようになるか考察する。シミュレーション結果を図 5.16:～図 5.21: にそれぞれ示す。

(1) 電力需要に比べて熱需要が小さい負荷

(a) 燃料電池のみ

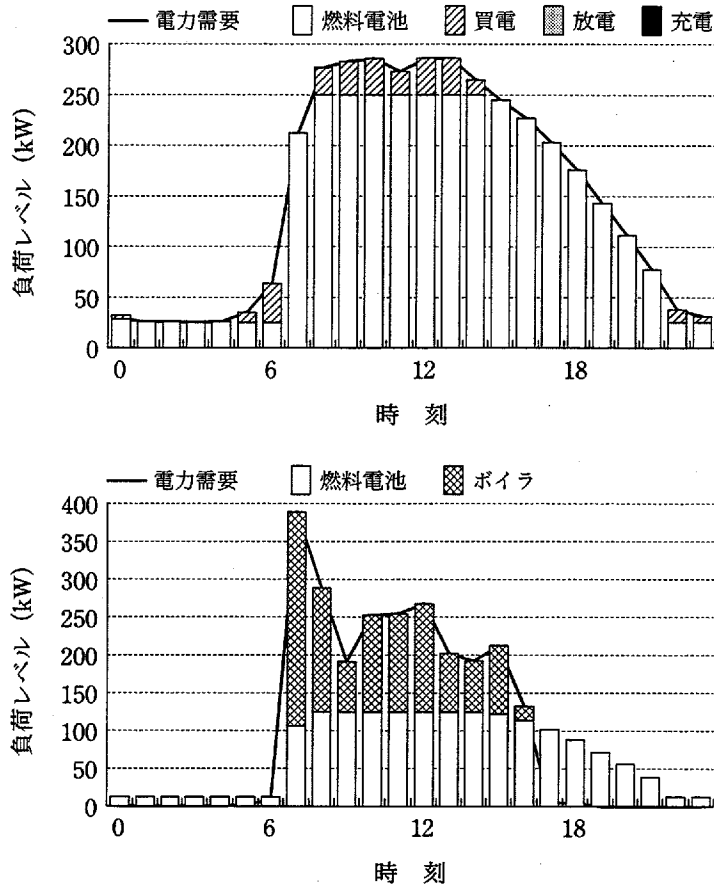


図 5.16: 熱需要が小さい負荷における燃料電池のみの最適運用

【考察】

燃料電池の運用は、夜間は最低出力で運転され、昼間は電力追従となった。熱需要が小さいために 18 時以降の燃料電池の排熱が無駄に破棄されている。これは、燃料電池の運用費が昼間の電気料金より安いいため排熱を破棄してでも電力需要を賄うためである。また、夜間では電気料金の方が安いいため燃料電池は最低出力となる。

(1) 電力需要に比べて熱需要が小さい負荷

(b) 貯蔵装置との協調

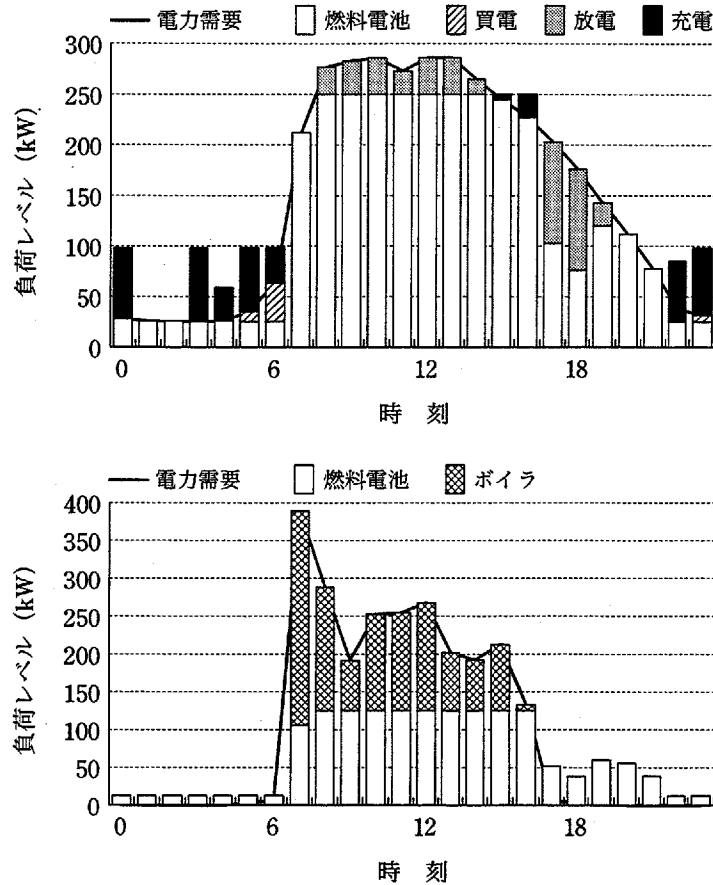


図 5.17: 熱需要が小さい負荷における燃料電池と貯蔵装置との最適運用

【考察】

貯蔵装置を導入した場合、貯蔵装置は電気料金の安い夜間に充電し、電気料金の高い昼間に放電する。しかし、図 4.16 から分かるように貯蔵装置の放電には、2つのパターンがあり、夜間充電し、電気料金の高い昼間に放出してコストを削減する役割、燃料電池の排熱が無駄に破棄されている時刻に放出され、燃料電池の出力を抑え排熱の無駄を少なくしコストを削減する役割がある。

また、充電においても 16, 17 時では、燃料電池から充電されている。したがって、排熱を有効利用している燃料電池の電力出力を充電し、燃料電池の排熱が無駄に破棄されている時刻に放出することでもコストが削減できることが分かる。

(2) 電力需要に比べて熱需要が大きい場合

(a) 燃料電池のみ

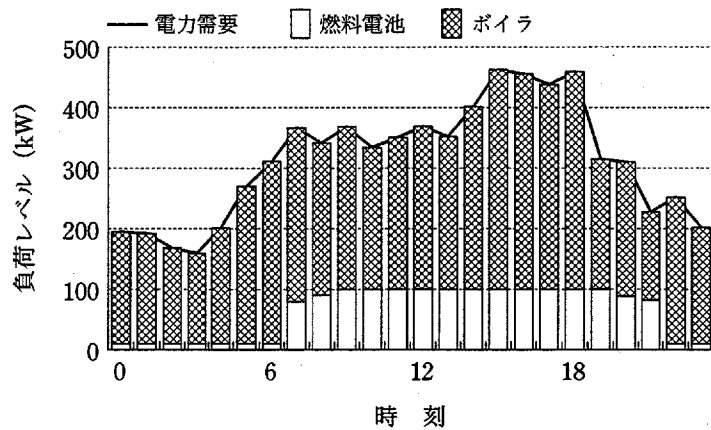
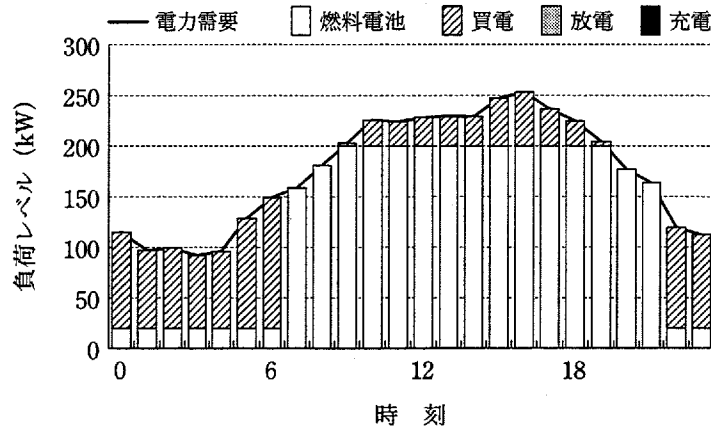


図 5.18: 熱需要が大きい負荷における燃料電池のみの最適運用

【考察】

熱需要が大きいため排熱が有効利用されているので燃料電池の運用は電力追従となる。熱需要が大きい負荷の場合、燃料電池は熱需要を賄いながら余った電力を売電するということが考えられるがそれが行われていないため設定した売電料金は安すぎるこ
とが分かる。

(2) 電力需要に比べて熱需要が大きい場合

(b) 貯蔵装置との協調

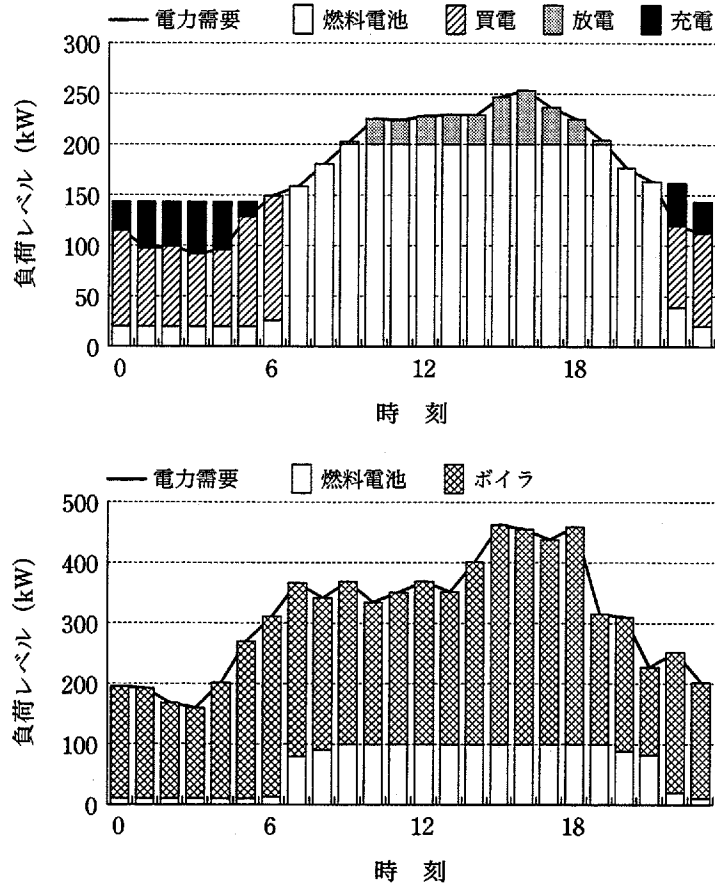


図 5.19: 熱需要が大きい負荷における燃料電池と燃貯蔵装置の最適運用

【考察】

熱需要の大きい負荷では、燃料電池の排熱が有効利用されているため、貯蔵装置の放電は昼間の買電電力を賄うのみとなり、燃料電池から貯蔵装置への充電も行われず。したがって、このような負荷では貯蔵装置の導入メリットは単に、夜間充電した電力で昼間の買電電力を賄うコスト削減のみとなり燃料電池との協調は見られない。

(3) 電力需要が入り組んでいる負荷

(a) 燃料電池のみ

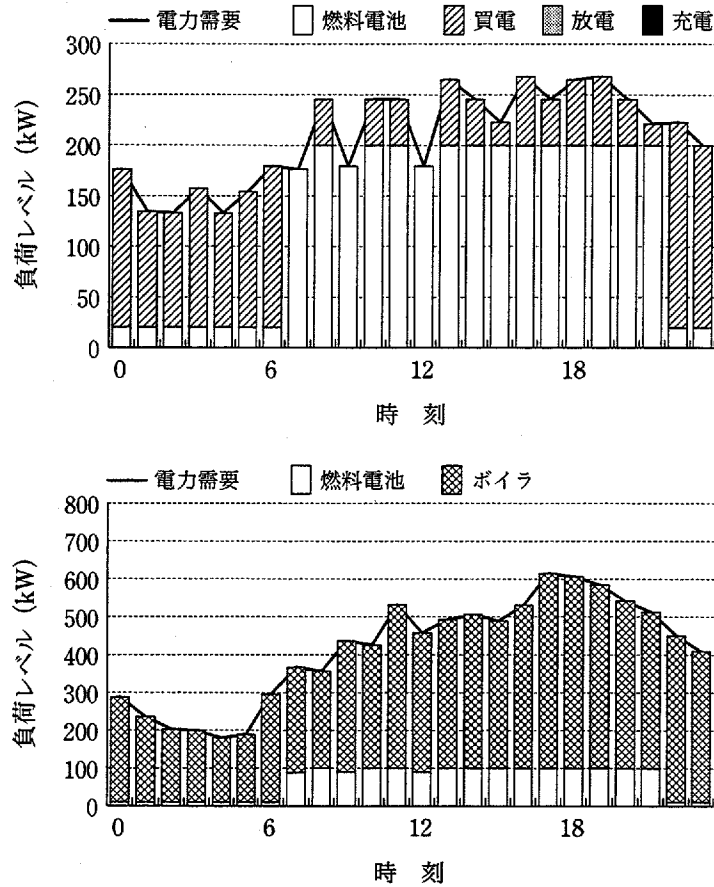


図 5.20: 電力需要が入り組んでいる負荷における燃料電池のみの最適運用

【考察】

前回同様、昼間は電力追従であった。売電料金が一番高い夏季についてのシミュレーションを行ったがそれでも売電は行われなかった。

(3) 電力需要が入り組んでいる負荷

(b) 貯蔵装置との協調

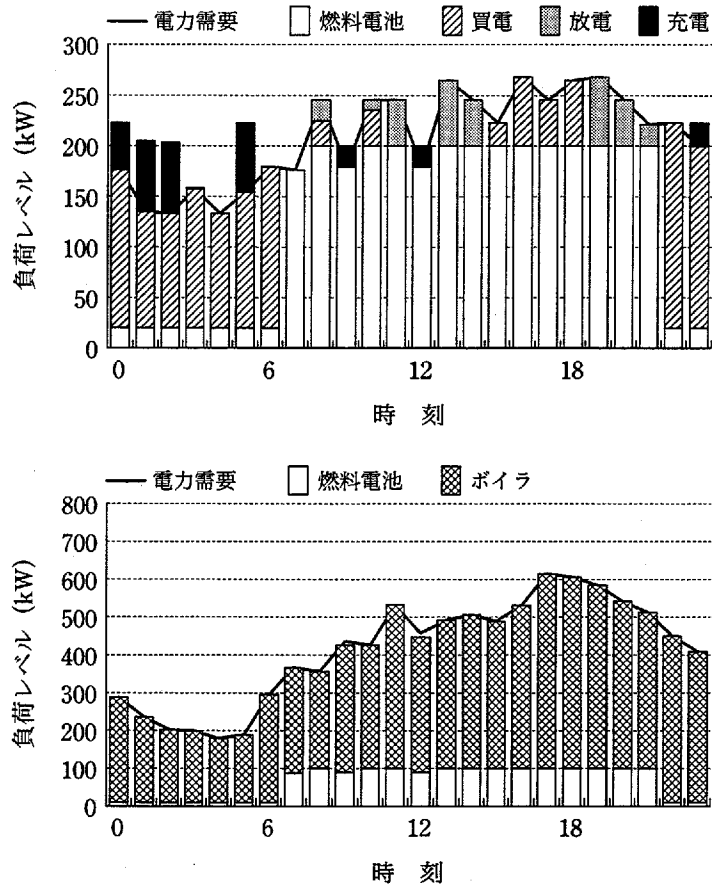


図 5.21: 電力需要が入り組んでいる負荷における燃料電池と貯蔵装置の最適運用

【考察】

貯蔵装置を協調させた場合、貯蔵装置は基本的に夜間充電し昼間放出されている。しかし、昼間に燃料電池から貯蔵装置への充電が行われている時刻がある。これは、燃料電池の電力を充電し、昼間の買電電力を賄うことでもコストの削減ができることを意味している。したがって、燃料電池はほとんど定格で運用される。

しかし、8時については定格で運転されていない。これは貯蔵装置の容量が一杯であるためであり、貯蔵装置の充電は燃料電池からより夜間電力からされた方がコスト削減になることを示す。

5.7.4 シミュレーション結果（設置費考慮）

本節では、設置費を考慮した最適運用問題について、それぞれの負荷に対し、どのような導入傾向が見られるかを考察する。さらに、経済性や省エネルギー性指標についても結果に対する値を算出し、導入メリットがどのくらいかについても考える。最後に、燃料電池や貯蔵装置の設置費を変化させた時、その導入量や導入メリットがどのように変化するかについてのシミュレーションも行い、結果について考察する。

経済性と省エネルギー性については、以下の計算方法に従った。

省エネルギー性の評価方法：

$$\text{省エネルギー率} = \frac{(\text{従来システム一次エネルギー消費量}) - (\text{燃料電池一次エネルギー消費量})}{\text{従来システム一次エネルギー消費量}} \times 100 (\%) \quad (\text{式 5.41})$$

$$\text{燃料電池一次エネルギー消費量} = \frac{\text{燃料電池燃料消費量}}{\text{燃料供給効率}} \times \text{燃料発熱量}$$

$$\text{従来システム一次エネルギー消費量} = (\text{燃料電池発電電力量}) \times 10.3 \text{ MJ/kWh} + (\text{冷温熱熱源機一次エネルギー消費量})$$

$$\text{冷温熱熱源機一次エネルギー消費量} = \frac{\text{冷熱負荷への燃料電池廃熱利用量}}{\text{燃料供給効率} \times 0.72}$$

- 燃料電池の燃料消費量：0.22 Nm³/kWh
- 燃料の発熱量：46 MJ/ Nm³
- 燃料の供給効率：0.92
- 商用電力の一次エネルギー換算値：10.3 MJ/kWh
- 吸収式冷温水器の年間平均効率：0.72

経済性の評価方法： 経済性については総支出費用の差から求めた。以下にその式を示す。

$$\text{経済性} = \frac{(\text{従来システム総支出費用}) - (\text{設備導入後システム総支出費用})}{\text{従来システム総支出費用}} \times 100 (\%) \quad (\text{式 5.42})$$

従来システムの運用費としては、電力需要を買電で購入し、熱需要をボイラで賄う場合を仮定した。

表 5.3: に、各負荷に対する各システムの導入容量、契約電力、最大需要、経済性、省エネルギー率についての計算結果を示す。

表 5.3: 各負荷に対する結果

	燃料電池	貯蔵装置	ボイラ	契約電力	最大需要	経済性	省エネ率
事務所 (標準型)	148.7 kW	220.9 kW	668.4 kW	121.8 kW	388.4 kW	4.40 %	8.93 %
事務所 (OA 型)	177.0 kW	30.2 kW	337.5 kW	31.3 kW	224.1 kW	7.16 %	15.52 %
ホテル (宿泊)	237.6 kW	28.0 kW	635.9 kW	106.8 kW	372.4 kW	6.09 %	15.50 %
レジャー 施設	212.4 kW	52.6 kW	508.5 kW	24.2 kW	286.8 kW	6.72 %	16.34 %
病院	218.0 kW	57.1 kW	672.4 kW	81.6 kW	334.9 kW	5.61 %	15.47 %
店舗	130.0 kW	611.8 kW	675.3 kW	275.0 kW	671.2 kW	2.75 %	12.69 %
スポーツ 施設	396.3 kW	54.3 kW	433.3 kW	101.0 kW	551.6 kW	7.72 %	14.85 %

【考察】

事務所 (標準型) : この負荷は、熱需要が少ないため燃料電池の排熱が有効利用されない。そのため、燃料電池はあまり導入されず、貯蔵装置が多く導入されている。8月の電力需要が多く貯蔵装置によって負荷平準化され契約電力をかなり減らしている。また貯蔵装置の放電はすべて買電電力を賄うように放出されており、貯蔵装置の排熱の無駄をなくすために放出されるより、昼間の買電電力を賄ったほうがコストの削減になることが分かる。

経済性と省エネルギー性については、他の負荷と比べるとかなり小さい。これは、燃料電池の導入量が少なく、さらに排熱の無駄が多いためであると考えられる。

事務所 (OA 型) : 熱需要がある程度多いため、燃料電池が電力需要の大部分を賄うよう導入された。貯蔵装置は残りの電力需要を補うように導入された。年間を通じてあまり電力需要が変わらないためほとんどの電力需要をこれらの設備で賄っている。また、燃料電池の電力出力を貯蔵装置に充電している時刻があり、燃料電池の排熱の無駄を少なくしている。

経済性と省エネルギー性については、ほとんどの電力需要を燃料電池と貯蔵装置で賄っているため経済性が大きく、さらに排熱も有効利用されているため省エネルギー性も大きい。したがって、導入のメリットはかなり大きい。

ホテル： この負荷についても熱需要が多いため、燃料電池が多く導入された。貯蔵装置の導入量はかなり小さくなっており、これは燃料電池が多く導入されたことのほかに、夜間の電力需要が多いため充電しにくいことが考えられる。したがって、2月の7時では夜間時間帯であるにもかかわらず契約電力を減らすための放電が行われており、さらに8月では夜間に燃料電池がかなり発電されている。

経済性については、夜間の電力需要が多いため貯蔵装置が生かせず契約電力もかなり大きい。したがって、燃料電池が多く導入された割には大きくなっていない。省エネルギー性については、燃料電池の排熱が有効利用されているため大きくなっている。

レジャー施設： 燃料電池の導入量は多く、貯蔵装置についてもある程度導入された。この負荷もホテルと同様、夜間の電力需要は多いが、それぞれの月の最大電力がほとんど同じであるため、貯蔵装置によって契約電力が減らすことができる。したがって、貯蔵装置の導入量が増え、さらに夜間の燃料電池出力も増え、かなりの電力出力が貯蔵装置に充電されている。また、昼間においても頻繁に燃料電池から貯蔵装置に充電されている。

経済性は、燃料電池が多く導入されているため、ある程度大きいですが夜間はできるだけ買電電力で賄ったほうが経済的であるため導入量の割には大きくない。逆に省エネルギー性は、燃料電池がよく運転され排熱が有効利用されているためかなり大きい。

病院： 燃料電池はある程度導入されているが、負荷の形が急な山型であるため夕方の電力需要が少なく電力需要の大部分を賄うほどの導入量ではない。また、夜間の電力需要が多く、2月と8月の最大需要の差が大きいため、貯蔵装置の導入によって契約電力を大幅に減らすことができない。

経済性については、燃料電池の導入量が電力需要や熱需要に比べて多くなく、契約電力も大きいためあまり良くない。省エネルギー性については、燃料電池の排熱がほとんど有効利用されているので大きい。

店舗： これまでの負荷と違い、燃料電池はほとんど導入されず、貯蔵装置が多く導入された。熱需要はかなりあるが夜間の電力需要、熱需要がかなり少ないため燃料電池があまり導入されなかったと考えられる。逆に貯蔵装置については負荷平準化の役割が大きくなるためかなりの導入量となった。

経済性はかなり小さくなった。理由として、燃料電池の導入量が少ないことと、貯蔵装置の導入メリットが小さいことが考えられる。貯蔵装置の導入量は611kWであるが、放電出力の最も大きいものは280kWであり定格の半分である。これは、貯蔵装置の充電容量に対して必要な導入量であり、定格に対する充電容量が大きければ設置費はかなり小さくなる。省エネルギー性については、燃料電池の導入量が多くなく夜間の排熱が無駄になっているため、その分小さくなっている。

スポーツセンター： この負荷も店舗同様、夜間の電力需要、熱需要が少ないが、ある程度夜間の電力需要があり、さらに昼間時間帯の全体を通じて電力需要が一定であるため、燃料電池が多く導入されたと考えられる。また、燃料電池でほとんどの電力需要を賄うことができるため、貯蔵装置の導入量は小さくなった。

経済性は燃料電池の導入量がこれまでで最大であり、運用においても夜間は最低出力、昼間は定格出力で運転されているためこれまでで一番の経済性となった。省エネルギー性は、燃料電池の導入量が多いが夜間の出力が小さく排熱を破棄しているため経済性に比べて大きくない。

続いて、各負荷に対するすべての負荷パターンについての運用を順に示す。

事務所（標準型）

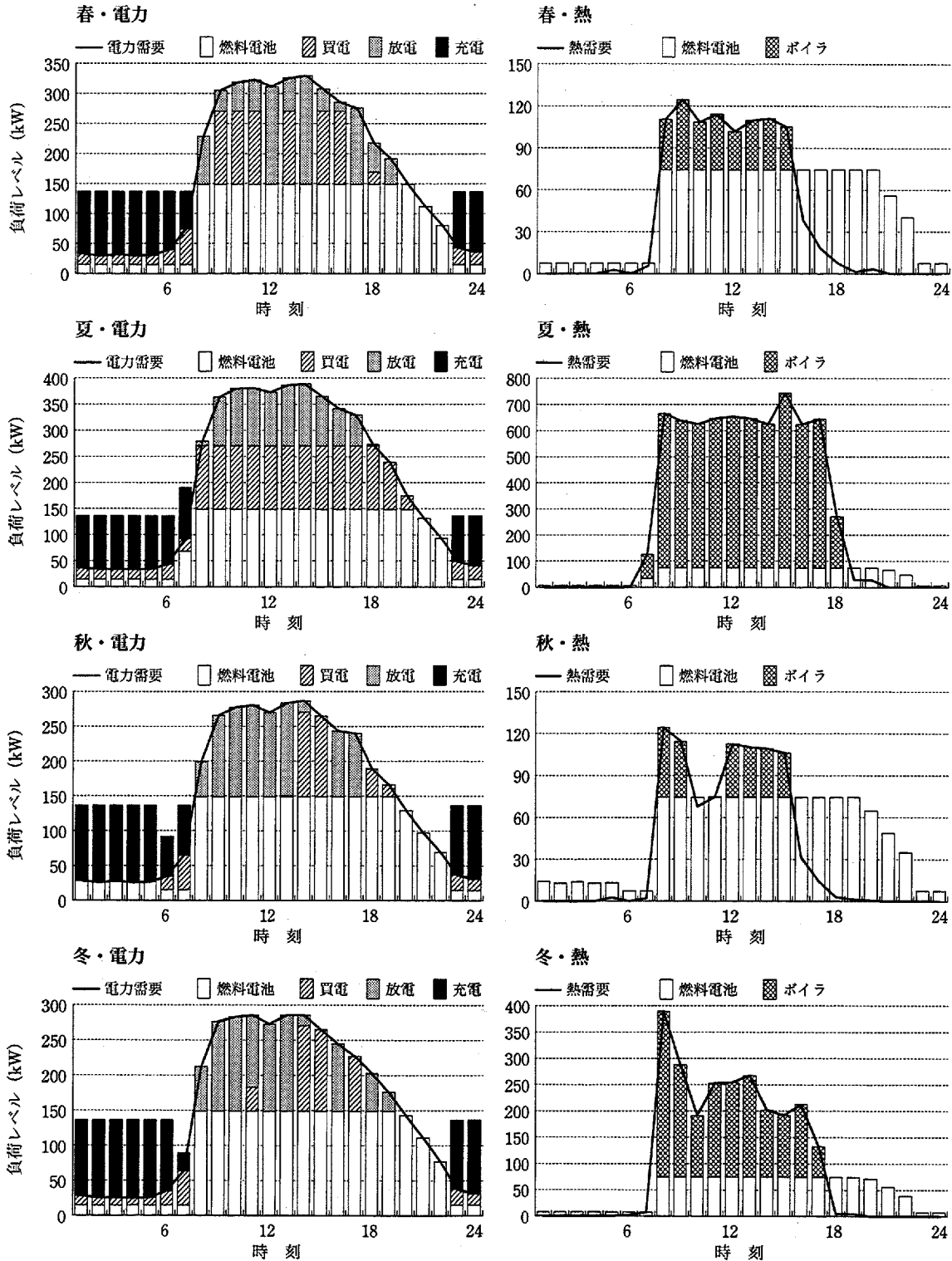


図 5.22: 事務所（標準型）における最適導入量と最適運用

事務所 (OA 型)

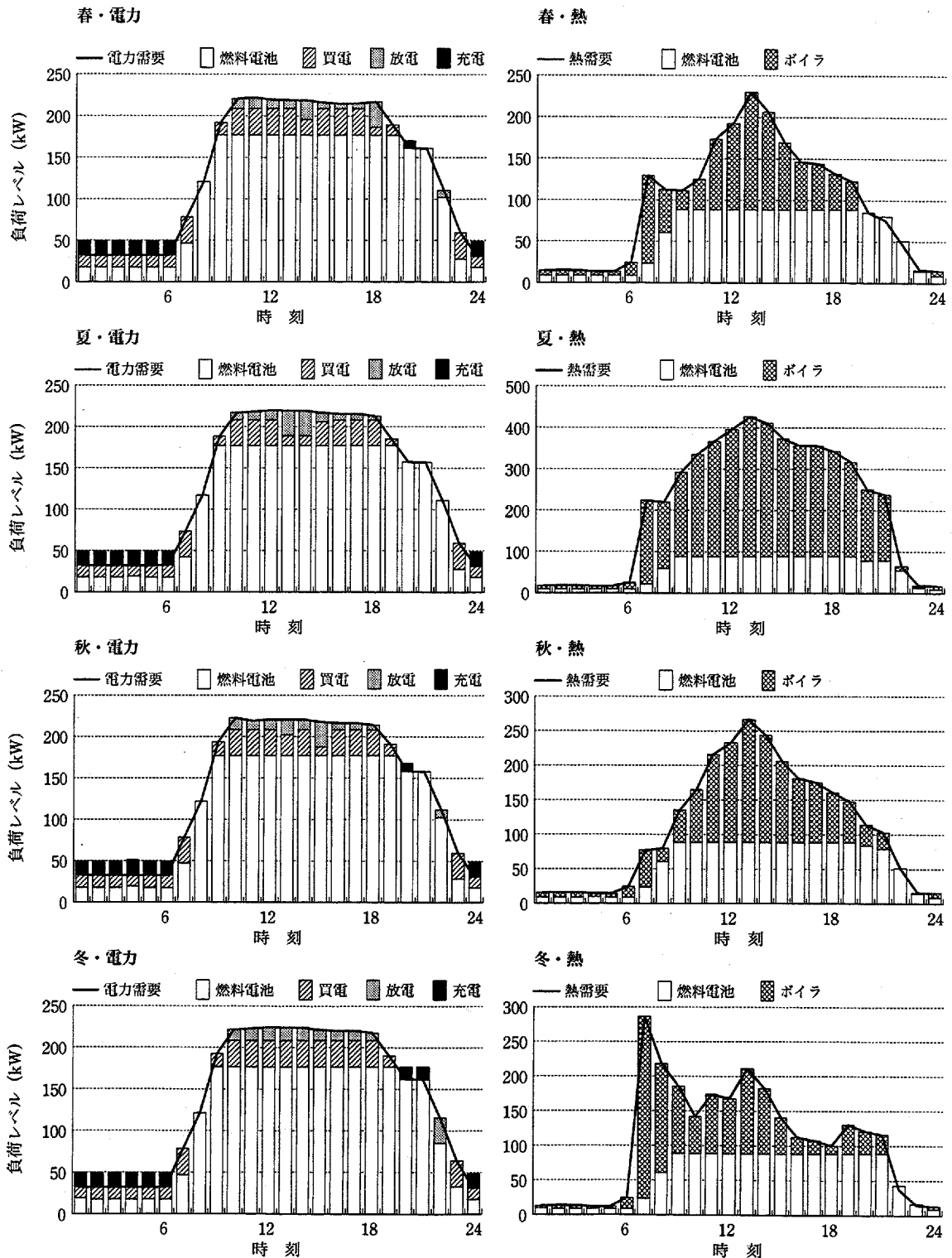


図 5.23: 事務所 (OA 型) における最適導入量と最適運用

ホテル

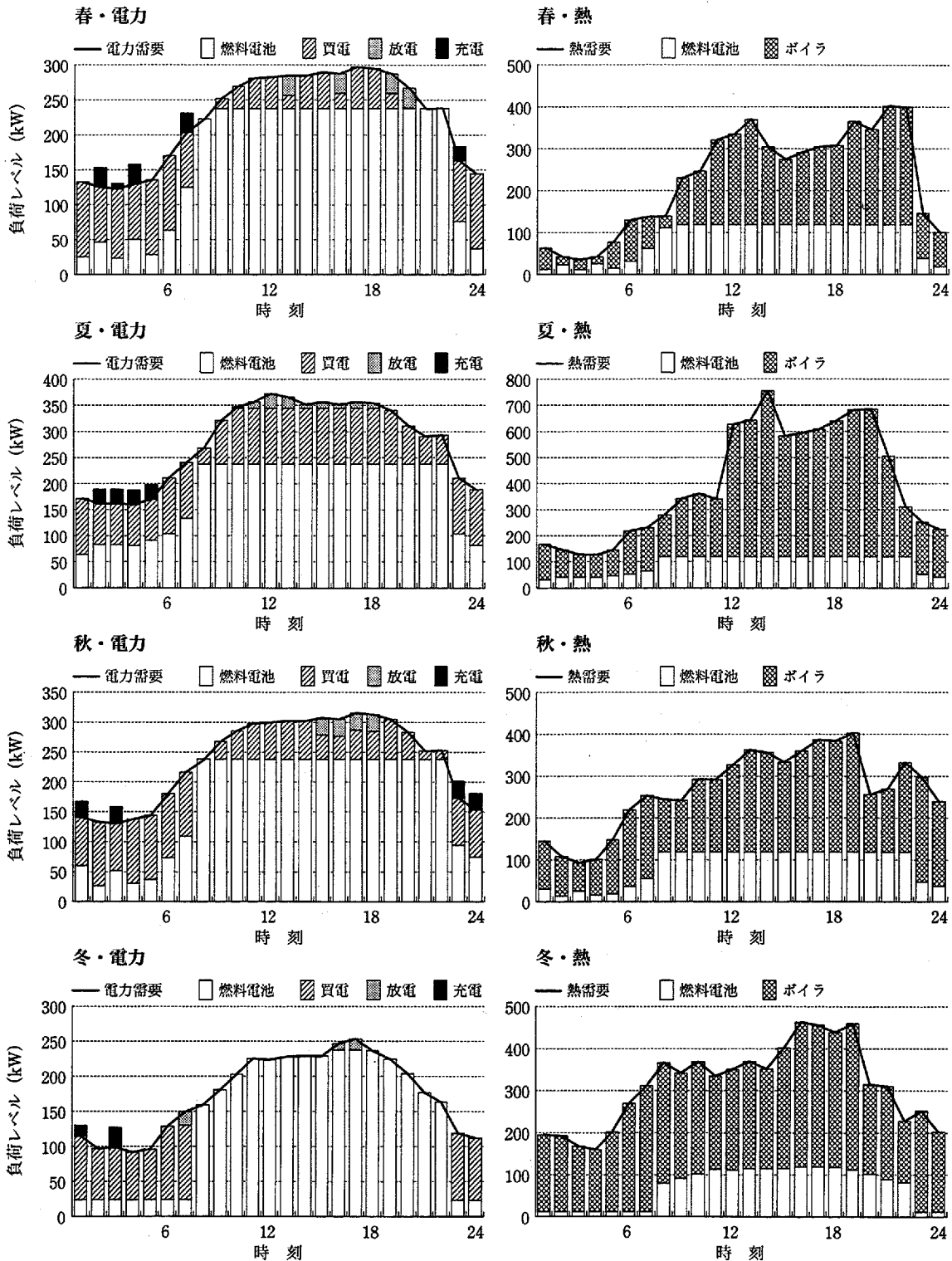


図 5.24: ホテルにおける最適導入量と最適運用

レジュー施設

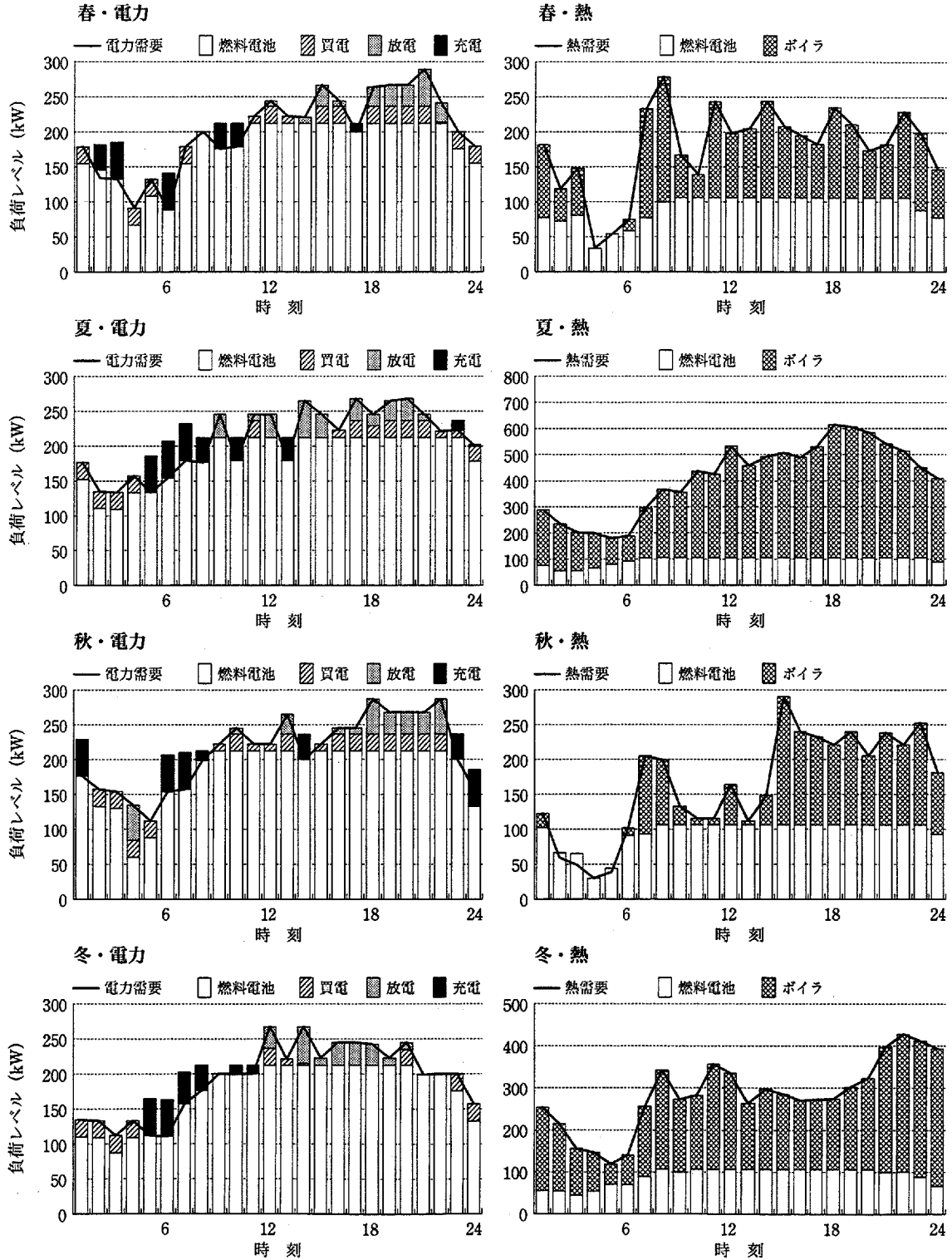


図 5.25: レジュー施設における最適導入量と最適運用

病院

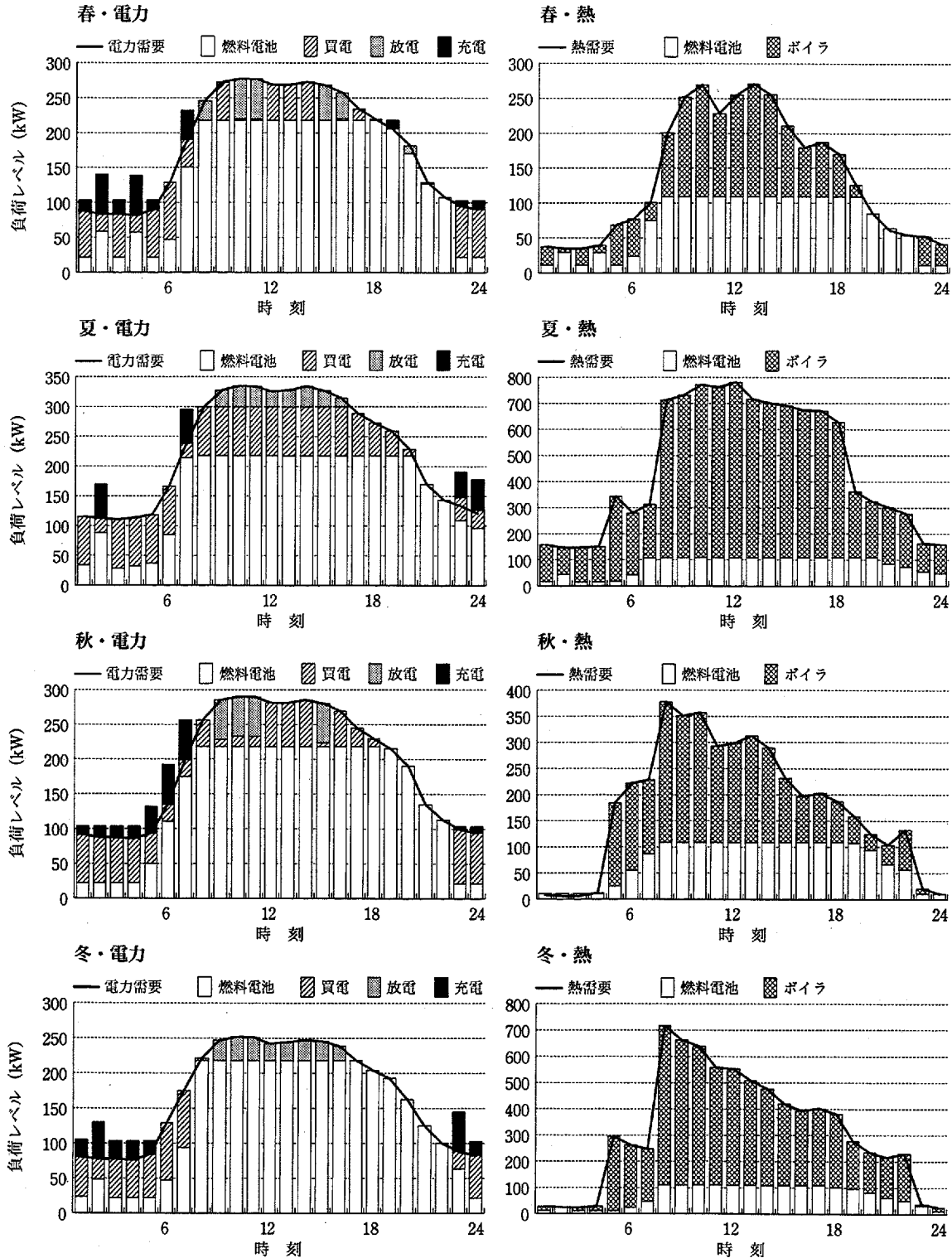


図 5.26: 病院における最適導入量と最適運用

店舗

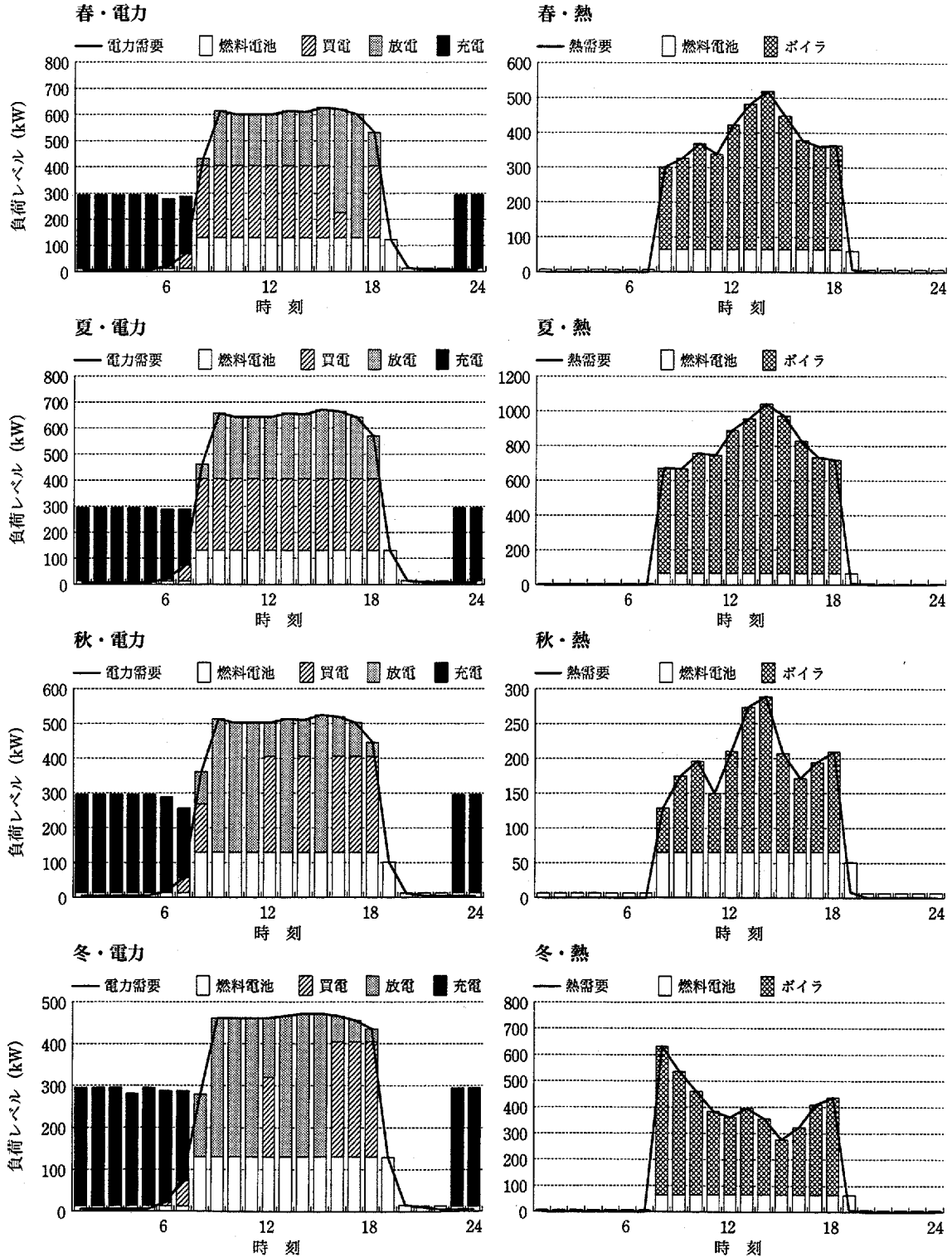


図 5.27: 店舗における最適導入量と最適運用

スポーツセンター

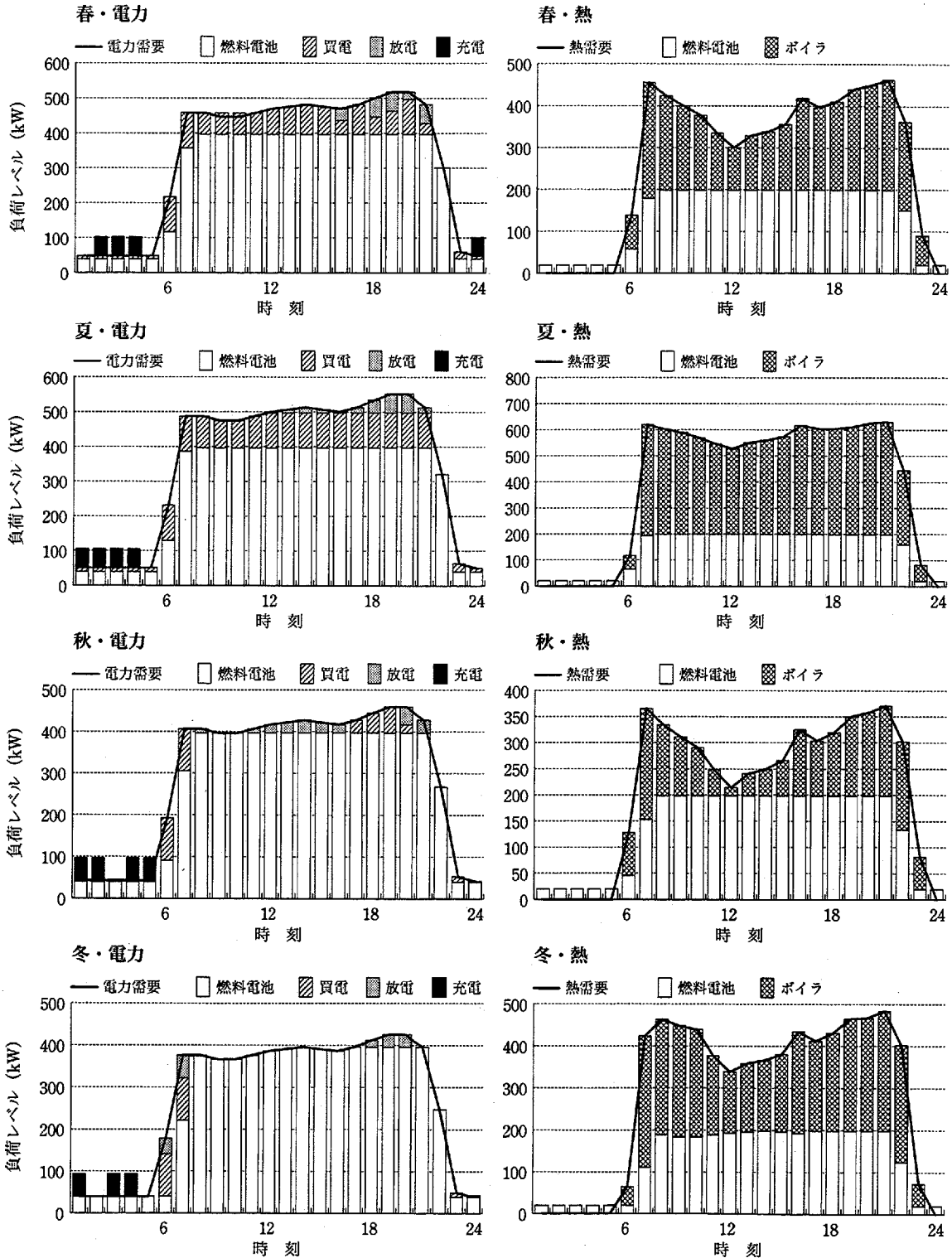


図 5.28: スポーツセンターにおける最適導入量と最適運用

5.7.5 燃料電池，電力貯蔵装置の導入傾向

本節では，燃料電池と貯蔵装置の設置費を変化させ，それぞれの設備の導入量と経済性がどのような影響を受けるかについて調べる。

【対象負荷】

- (1) スポーツセンター
- (2) 店舗

前節のシミュレーションでスポーツセンターには燃料電池，店舗には貯蔵装置が多く導入された。そのため，それぞれの設備の設置費を変化させた時，その影響が出やすいためこれらの負荷を用いた。

【シミュレーション】

- (a) 燃料電池の設置費を変化させる。
(その他のパラメータは固定)
- (b) 貯蔵装置の設置費を変化させる。
(その他のパラメータは固定)

以下にシミュレーション結果を示す。

(1) スポーツセンター

(a) 燃料電池の設置費を変化させた場合

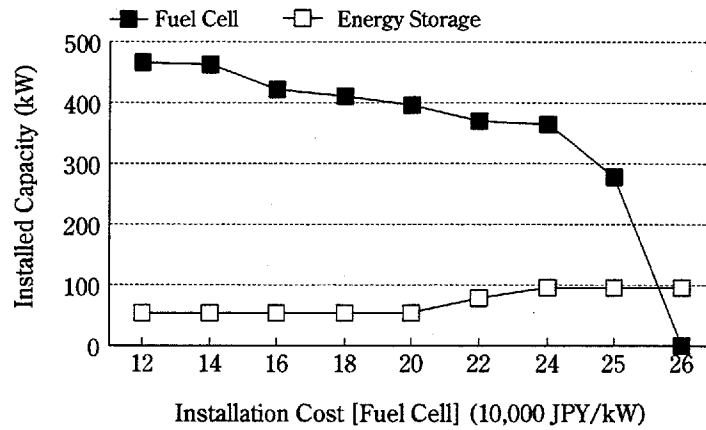


図 5.29: 燃料電池と貯蔵装置の導入量

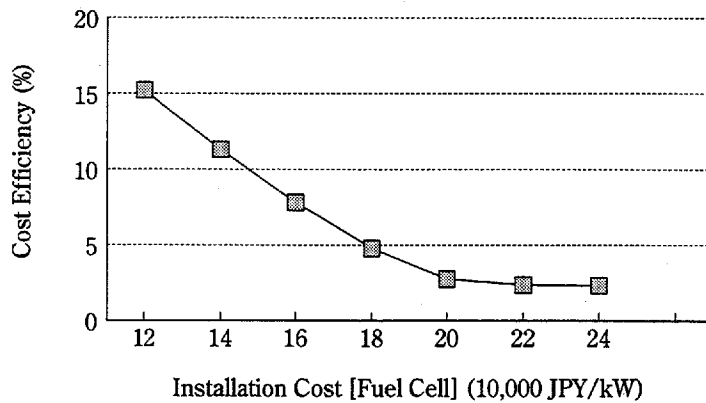


図 5.30: 経済性

燃料電池の設置費が増加すると燃料電池の導入量が減り、貯蔵装置の導入量が増える。しかし、貯蔵装置の導入量の増加は燃料電池の減少ほど急激ではない。燃料電池の導入量は、24～26万円/kWの間で急激に減少し、26万円/kWで導入されなくなっている。しかし、同じ設置費での経済性にはあまり変化がなく、設置費が高いため導入におけるメリットが小さくなっていることが分かる。逆に、12～22万円あたりでは導入量にあまり変化がなくても経済性にはかなり影響しており、設置費が下がればコストを大幅に削減できることを示す。

(1) スポーツセンター

(b) 貯蔵装置の設置費を変化させた場合

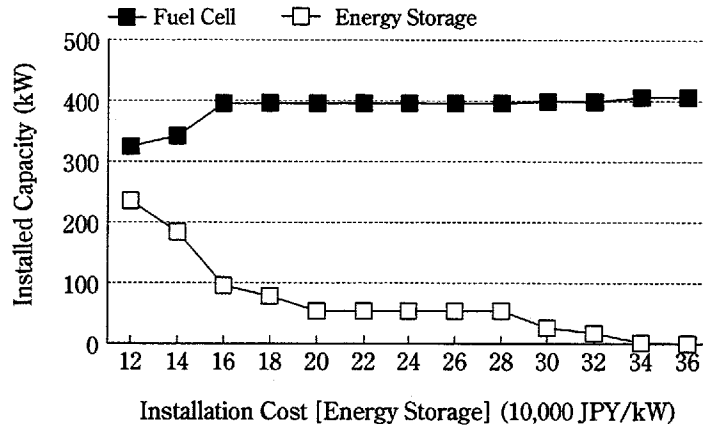


図 5.31: 燃料電池と貯蔵装置の導入量

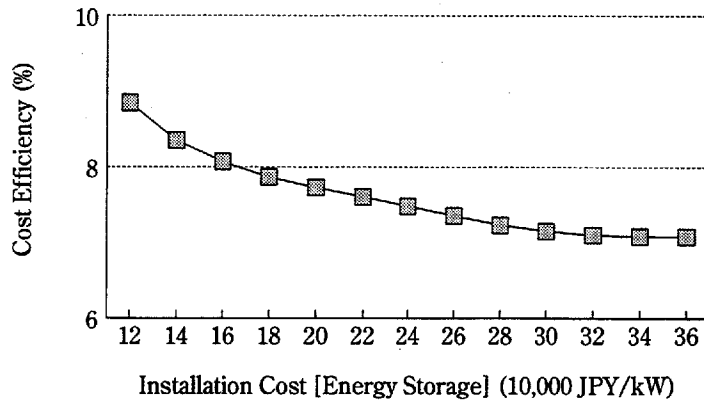


図 5.32: 経済性

燃料電池の設置費を変化させた場合とは逆に、燃料電池の増加は小さく、貯蔵装置の減少が大きくなる。燃料電池に有利な負荷のため、貯蔵装置が安く導入されても燃料電池の導入量はあまり変化しない。したがって、経済性についてもあまり変化が見られず、貯蔵装置の設置費にはあまり影響を受けないことが分かる。

(2) 店舗

(a) 燃料電池の設置費を変化させた場合

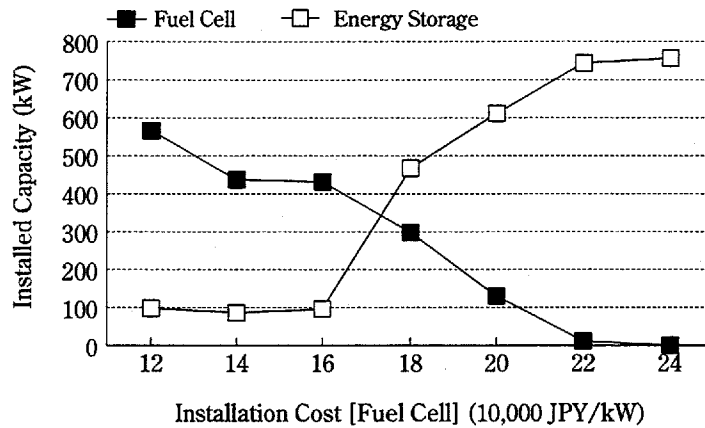


図 5.33: 燃料電池と貯蔵装置の導入量

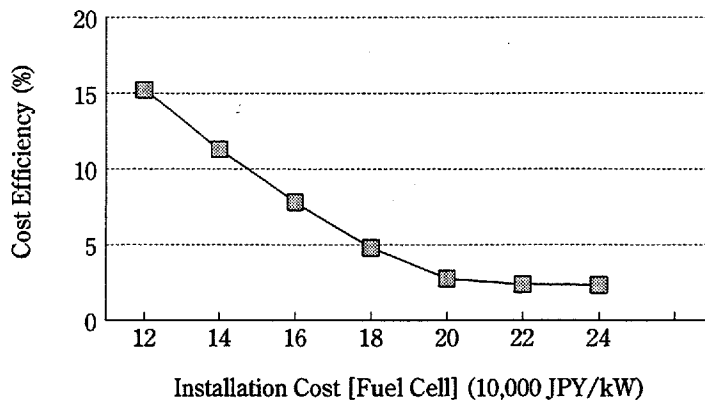


図 5.34: 経済性

スポーツセンターでは、燃料電池の導入量が減っても貯蔵装置はあまり導入されなかったが、この負荷では貯蔵装置が有利なため燃料電池の減少に伴って貯蔵装置がかなり導入されている。しかし、経済性は燃料電池の設置費の増加に伴ってかなり下がっており、貯蔵装置の導入量を増やすだけでは設置費によるコスト増加を抑えることが出来ないことが分かる。

(2) 店舗

(b) 貯蔵装置の設置費を変化させた場合

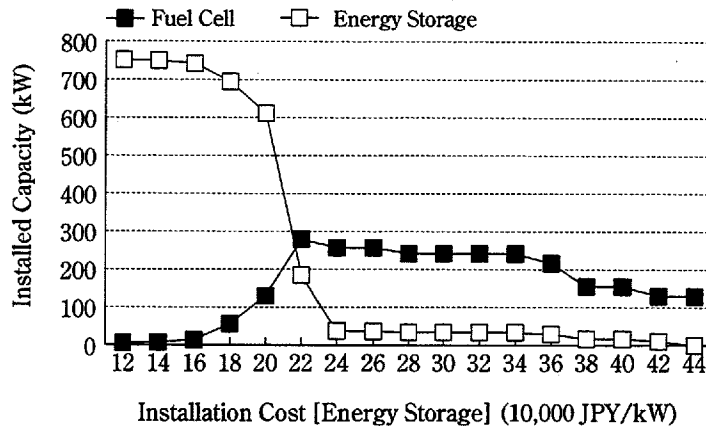


図 5.35: 燃料電池と貯蔵装置の導入量

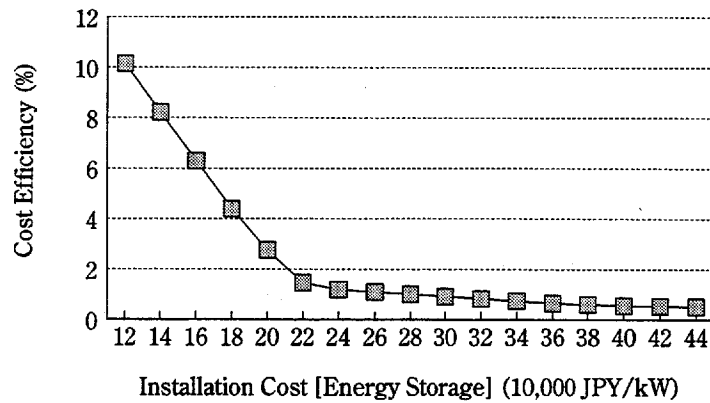


図 5.36: 経済性

18～24万円/kWで貯蔵装置の導入量が急激に下がっており、導入のメリットを望むには、最低でもこれ以下の設置費でなければならない。この負荷では、貯蔵装置の減少に伴って増加していた燃料電池の導入量が22万円/kWあたりから貯蔵装置とともに減少してきている。これは、夜間の需要が少ないため最低出力で運転しても燃料電池の電力出力が余ることから、ある程度の貯蔵装置の導入量がないと電力出力が充電できず無駄になるため、貯蔵装置の導入量とともに下がったと考えられる。経済性は、貯蔵装置の導入量と似通った形をしており、導入量が経済性に大きな影響を与えていることが分かる。

5.8 シミュレーションのまとめ

今回のシミュレーションでは、燃料電池と貯蔵装置の協調を考慮した運用費のみの最適運用問題と設置費を考慮した最適運用問題の2つの定式化を用い、最適運用パターンや最適導入量を決定した。以下にその結果から得られた最適運用パターンと最適導入量についての傾向をまとめる。

5.8.1 最適運用について

燃料電池：

- 燃料電池は排熱を破棄してでも電力需要に追従する。
- 売電は行わない方が経済的である。

貯蔵装置：

- 貯蔵装置の充電には、夜間の買電電力からと燃料電池の余剰電力からの2つのパターンがあり夜間充電される方が経済的である。
- 貯蔵装置の放電には、昼間の買電電力を賄う場合と燃料電池の排熱を減らす場合の2つのパターンがあり、昼間の買電電力を賄った方が経済的である。

5.8.2 導入傾向について

燃料電池：

- 排熱の無駄が少なくなるよう導入される。
- 排熱が有効利用される場合は電力需要のほとんどを賄うよう導入される。
- 昼間時間帯の全体を通してほぼ電力需要が一定で大きければ導入効果が大い。

貯蔵装置：

- 燃料電池の導入量に依存する。
- 夜間の電力需要が多いと導入されにくい。
- 月ごとの負荷にばらつきがあると導入されにくい。

このような最適運用問題のシミュレーションの結果は、設定されるパラメータによって様々に変化する。したがって、導入を計画する際は未来の予測なども含めていろいろなパラメータでのシミュレーションが必要になってくる。今回行ったシミュレーションでは、様々な負荷に対してシミュレーションを行い、最適な運用パターンや設備導入量の傾向を見積もることができ、さらに経済性や省エネルギー性の評価を行うことでそれぞれの需要家における導入効果の評価・比較を行った。

結 言： 本章では、対象を分散電源の設置を検討する需要家とし、電力貯蔵装置などを含めたエネルギー供給システム全体の運用の最適化を試みた。ただし、現実に行われているある特定の運用パターンに則った計画ではなく、できるだけ経済的な運用方法を目指すものとして定式化を行った。

線形計画問題として定式化を行っており、計算結果と現実問題との間に若干のギャップがあるが、様々な種類の負荷に対する最適運用パターンおよび最適導入容量を推定することができたと考えられる。

第6章 結論

緒言： 本論文では，分散電源の最適配置計画および運用計画について，その枠組みの提案と定式化，それぞれの定式化に対する解法アルゴリズムの構築，それらに基づく数値シミュレーションを行った。

以下，各章にて得られた結果，知見などをまとめ，今後の課題について述べる。

6.1 分散電源最適配置計画（第3章）

第3章では、分散電源最適配置問題の定式化および解法アルゴリズムについて述べた。本問題は、系統を運用する電気事業者側と分散電源を導入しようとしている需要家側との双方の視点を取り入れたものであり、分散電源として熱電併給の可能な燃料電池を取り上げた。また、通常は電源の二重化を図るために系統に連系した状態で導入されるが、電圧変動などの系統運用上の問題が表面化する可能性があり、それら問題点も制約条件として考慮することによって実用的な配置を考えた。

目的関数としては、電力会社側の発電コスト+系統内の熱需要コスト+電源の設置費+電源の運用費（電気料金を含む）という形を取り、燃料電池の排熱の有効活用による省エネルギー性を考えたものとした。また、制約条件については電圧変動の抑制を目的に電圧制約を、また電力供給の信頼度を確保するという目的で需要端信頼度制約を各ノードに対して課した。

定式化の結果、本問題は混合整数計画問題となり、その求解には全探索が必要になる。しかし、大規模な問題に対して全探索を行うと現実的な時間内に解の探索を終えることができず、効率的な解法アルゴリズムとして分枝限定法を基本とした方法を提案した。これは、上述の制約条件を利用した限定操作を用いて探索空間を削減する方法であり、さらなる高速化、効率化を目指した効率的な手法である。

最後に、4種類の負荷（事務所ビル、スポーツセンタ、ホテル、病院）を持つ11母線、69母線のモデル系統を用いた数値計算例により、得られた解や提案手法の性能について考察した。探索の結果、排熱を有効に利用することができ、トータルの熱需要が大幅に削減された負荷に導入された。また、系統の末端部分に設置されやすいという傾向があり、これは末端に行くほど電圧の維持が難しく、その改善のために設置されたと考えられる。限定操作を用いた解法アルゴリズムの性能としては、小規模な11母線に対して全探索の場合とまったく同じ解が得られ、また大規模な69母線系統についても現実的な時間内に探索を終えることができ、その有効性が確認された。

6.2 遺伝的アルゴリズムによる解法 (第4章)

分散電源最適配置問題は「混合整数計画問題」となるため「組み合わせ爆発」の問題から逃れられず、前章でも限定操作を用いた分枝限定法を基礎とした解法アルゴリズムを用いた。しかしながら、やはりある程度の規模までしか対応することができず、さらに大規模な問題に対しては実際的な時間内に探索を終えることが不可能である。

そこで第4章では、本問題に対する改良点を施した遺伝的アルゴリズムを用いた高速な近似解法を提案した。これは、いわゆる「単純遺伝的アルゴリズム」を基礎とし、二倍体の活用、初期集団生成法の工夫、エリート保存戦略の導入という3点を改良点として施したものである。「二倍体」は一般的に用いられている遺伝的アルゴリズムに探索情報の冗長性を持たせたものであり、遺伝的多様性を保持しようとする方法である。「初期集団生成法の工夫」は遺伝的アルゴリズムの初期化に関する改良であり、通常は乱数により行われることの多い初期化を本問題に即したものに變更し、効率的な探索によって収束特性の改善を目指したものである。また「エリート保存戦略」は各世代中の最良固体を残すことにより、単調な改善を保証する方法である。

提案した解法アルゴリズムを用い、69母線、111母線系統モデルに対してシミュレーションを行った。結果、施したそれぞれの改良点の有効性を確認することができ、分枝限定法を基礎とする解法アルゴリズムでは解くことすら現実的でない規模の問題に対しても、実用的な時間内に近似解ながら現実的な解を得ることができることを示した。

6.3 分散電源最適運用計画 (第5章)

第5章では、分散電源の設置を決定した需要家の立場に立ち、電力貯蔵装置を含めた全体のシステムをいかに経済的、効率的に運用するかという最適運用計画を考えた。ただし、これは現実に行われているある特定の運用パターンに則った計画ではなく、できるだけ経済的な運用方法を目指したものである。

電力需要、熱需要の双方がコージェネレーションにより効率的に供給することができ、また貯蔵装置に夜間電力を貯めておくことによって昼間の需要のピークカットに貢献し、負荷の平準化を実現することによってエネルギー経費の削減にもなるため、それらを有効に利用することのできる枠組みを提案し、定式化を行った。ただし、電源と貯蔵装置とでは基本的に性質が異なるので、協調を図りつつ運用するためには多くの制約を同時に考慮する必要がある。

まずは運用のみに焦点を当てた問題を考え、続いて導入容量の算定までを視野に入れた定式化を行った。また、本問題を考える際には対象となる負荷のモデル構築が重要であり、様々な負荷に対して1時間単位の需要モデルを想定した。

最終的に、数値シミュレーションにより様々なタイプの需要家に対してその設置容量や運用パターンの導出を試みた。また、それらの経済性についても考察し、導入コストを変化させた場合の解析結果についても示した。結果、それぞれの負荷パターンに対する燃料電池・電力貯蔵装置の運用についての指針や導入傾向などが明らかとなった。

6.4 今後の課題

以上のように、本論文では分散電源の配置および運用の最適化についての研究をまとめたが、まだ不十分な点が少なからず存在し、継続した研究が望まれる部分がある。以下、それらを今後の課題としてまとめる。

- (1) 遺伝的アルゴリズムを用いた解法について、本問題に対する符号化として1種類のみを考えた。この符号化もアルゴリズムの性能に大きな影響を与える部分であり、他の方法を用いることによってさらなる性能の向上が達成される可能性がある。よって、本論文にて提案した符号化以外の方法の吟味や、改良点のさらなる追加を考える余地はあるものと思われる。
- (2) 運用問題の定式化に関して、本研究では線形計画問題としたことによりいくつかの近似が含まれている。現実問題としてそれらは離散的な値を取るものが少なく、本研究にて（連続値で）得られた結果から離散値に丸めるなどの処理が必要である。さらに、本研究で考えたのはあくまでも導入前の試算のための枠組みであり、より正確なシミュレーションを望むには他の方法（混合整数計画など）による定式化も考慮すべきであると考えられる。
- (3) 負荷モデルについては、現在までの実績値から推定するほかに、導入後に実際の負荷がどのような変化を示すかというのはわからない。よって、ある負荷モデルによって試算を行った上で導入を決定したとしても、本当に最適な運用が行われるかどうかについては保証がない。よって、完全な予測は無理としても、ある一日の負荷を当日の気温や湿度などの値を用いてある程度予測する「負荷予測手法」の融合が効果的であると考えられる。

以上、本論文では分散電源の最適配置および運用に関する研究について述べた。提案した枠組み、定式化、解法アルゴリズムなどが実際の現場に適用されるようになるには更なる研究が必要であると考えられるが、本論文がこの分野に少しでも貢献できれば幸いである。

謝 辞

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

本研究は、広島大学大学院工学研究科 佐々木博司教授の御指導のもとに進めたものであり、長年にわたり数々の御教示、御鞭撻を賜りました先生に、心より厚く御礼申し上げます。

また、本研究の遂行中、大変お忙しい中で終始有益な御助言、御意見を数多く頂きました広島大学大学院工学研究科 山下英生教授、中村信人教授に心より厚く御礼申し上げます。

また、広島大学大学院工学研究科 餘利野直人助教授、輝平盛重技官、広島工業大学工学部知能機械工学科 久保川淳司助教授、福山大学工学部電気・電子工学科 川原耕治講師の各先生方には、様々な面で御指導いただき、深く感謝の意を表します。

さらに、筆者が本研究遂行中に広島大学大学院システム工学専攻の大学院生であった牛尾政幸氏（現・九州電力株式会社勤務）、下川正勝氏（現・関西電力株式会社勤務）、秋田健司氏（現・中国電力株式会社勤務）、松本健氏（現・三菱電機株式会社勤務）、柏井進司氏（現・株式会社インタフェース勤務）の各氏には多大な御協力を頂きました。心より感謝致します。

最後に、広島大学工学部電力工学研究室の学生諸君、および公私にわたり今まで私を支えて下さったすべての人々に感謝し、御礼を述べさせて頂いて最後の挨拶と致します。

平成 14 年 3 月
造 賀 芳 文

参考文献

- [1] 長谷川, 他:「ボイラの協調を考慮した熱併給分散型電源の最適運用決定手法」, 電学論 B, 114 巻 12 号, 1994
- [2] Mesut E. Baran, Felix F. Wu, “Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 1, pp. 725–734, January 1989
- [3] Mesut E. Baran, Felix F. Wu, “Optimal Sizing of Capacitors Placed on A Radial Distribution System,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 1, pp. 735–743, January 1989
- [4] L. N. Chen, H. Suwa, F. F. Wu, J. Toyoda, “Power Arrival Evaluation of Bulk System Including Network Constraints Based on Linear Programming Approach,” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. PWRS-1, No. 6, pp. 37-42, 1991
- [5] 塚本:「分散型電源の系統連系技術の現状と今後の展望」, OHM 2 月号, 1992
- [6] 牧野:「分散型電源の系統連系技術要件ガイドライン」, OHM 2 月号, 1992
- [7] 菊池:「コージェネレーションと系統連系について」, 日本ガス協会誌, No. 3, Vol. 45, 1992
- [8] 齋藤, 他:「コージェネレーション総合マニュアル」, 通産資料調査会, 2000 年
- [9] 柏木, 他:「天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル 2000」, 日本工業出版, 2000 年
- [10] 柏木, 他:「天然ガスコージェネレーション運転・保守マニュアル 2000」, 日本工業出版, 2000 年
- [11] 鈴木, 他:「エネルギー負荷平準化」, エネルギー・資源学会, 2000 年
- [12] 和久, 他:「分散型電源の基礎と適用の実際」, 日本電気技術者協会, 1997 年
- [13] 燃料電池発電システム編集委員会編:「燃料電池発電システム」, オーム社, 1992
- [14] 燃料電池発電分散配置技術調査背紋委員会編:「燃料電池発電システムの分散配置技術」, 電気学会技術報告, 第 711 号, 1999 年
- [15] 燃料電池発電システム調査委員会:「燃料電池発電システムの運転性と寿命要因」, 電気学会技術報告, 第 587 号, 1996 年

- [16] 飯村, 他:「エネルギー貯蔵の動向」, 電気設備学会誌, 第119巻11号, 1999年
- [17] 森, 他:「電力貯蔵技術の現状と将来性について」, 電気学会誌, 第111巻3号, 1991年
- [18] 千葉, 他:「最近の分散型電源システム」, 電気設備学会誌, 第118巻5号, 1998年
- [19] 星野, 他:「地球環境と省エネルギー技術」, 電気設備学会誌, 第118巻2号, 1998年
- [20] 田ノ上, 他:「新エネルギーを利用した各種発電システム」, 電気設備学会誌, 第120巻2号, 2000年
- [21] 佐々木, 他:「電力システムへの新電源の最適導入計画に関する研究 I」, エネルギー・資源学会, 第10回研究発表会講演論文集, 1991
- [22] 佐々木, 他:「電力システムへの新電源の最適導入計画に関する研究 II」, エネルギー・資源学会, 第11回研究発表会講演論文集, 1992
- [23] 造賀, 他:「電力システムへの新電源の最適導入計画に関する研究 III」, エネルギー・資源学会, 第12回研究発表会講演論文集, 1993
- [24] Y. Zoka, et al. "An Optimal Deployment of Fuel Cells in A Distribution System by Means of A Genetic Algorithm," *Proc. of Internatinal Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP '94)*, 1994
- [25] Y. Zoka, et al. "An Optimal Deployment of Fuel Cells in Distribution Systems by Using Genetic Algorithms," *Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC '95)*, 1995
- [26] 佐々木, 他:「配電システムへの燃料電池の最適配置計画に関する研究」, 電学論 B, 114巻5号, 平成6年
- [27] H. Sasaki, et al. "A Study on A Genetic Algorithm for Optimal Deployment Problem of Fuel Cells in Large Distribution Systems," *Proceedings of the International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP '97)*, 1997
- [28] Y. Zoka, et al. "An Investigation of Load Flow Methods for Radial Distribution Networks," *Proceedings of the Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC '98)*, 1998
- [29] Y. Zoka, et al. "A Study of Allocation Planning of Dispersed Electrical and Thermal Energy Systems into Distribution Networks — Optimal operation planning," *Proceedings of the 2000 International Conference on Power System Technology (POWERCON2000)*, 2000
- [30] 佐々木, 造賀, 下川, 久保川, 川原:「配電システムへの燃料電池及び電力貯蔵装置の最適配置計画に関する研究」, 平成11年電気学会電力・エネルギー部門大会, 1999年

- [31] 佐々木, 造賀, 下川, 松本, 川原:「配電系統への燃料電池の運用を考慮した最適配置計画に関する研究」, 平成 11 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料, 1999 年
- [32] 造賀, 佐々木, 川原, 「配電系統への燃料電池及び電力貯蔵装置の運用を考慮した最適配置計画に関する研究」, 平成 12 年電気学会電力系統技術研究会資料, 2000 年
- [33] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975
- [34] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1989
- [35] L. Davis, *Handbook of Genetic Algorithms*, Van Nostrand Reinhold, 1991
- [36] Gregory J. E. Rawlins, *Foundation of Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann Publishers, 1991
- [37] 坂和, 他:「遺伝的アルゴリズム」, 朝倉書店, 1995 年
- [38] 和田, 他:「進化システム論 遺伝的アルゴリズムの基礎」, *Computer Today*, No. 47-51, 1992
- [39] 伊庭:「遺伝的アルゴリズムに基づく無効電力最適計画」, *電学論 B*, 113 巻 8 号, 平成 5 年
- [40] 福山, 植木:「負荷融通問題への遺伝的アルゴリズムの適用」, *電学論 B*, 114 巻 4 号, 平成 6 年
- [41] 佐々木, 造賀, 柏井, 久保川, 川原:「分散型電源と電力貯蔵装置の協調を考慮した最適運用計画」, 平成 12 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料, 2000 年
- [42] 佐々木, 造賀, 柏井, 久保川, 川原, 「分散型電源と電力貯蔵装置の協調を考慮した最適導入計画」, 平成 13 年電気学会全国大会, 2001 年

付録 A DistFlow 法

ここでは、本論文での潮流計算として採用している DistFlow 法について述べる。

A.1 DistFlow 法と従来法との違い

分散型電源の設置による配電系統上での電圧変動や線路損失の変化などは、線路上に流れる電力潮流を正確に解析することにより初めて得られる。この計算を電力潮流計算といい、本研究中の最適配置問題では必要不可欠なものである。具体的には、最適配置問題の制約条件である電力潮流制約や電圧制約、また目的関数中の電力コストを求める際に非常に多くの潮流計算が必要となり、計算時間の大部分を占める。よって、この部分の計算をできるだけ効率よく進める必要があり、放射状系統用に F. F. Wu 教授らによって提案された DistFlow 法をインプリメントした潮流計算ルーチンを使用している。

従来からの潮流計算法としては、各ノードでの潮流バランス状態を非線形方程式として定式化し（これを潮流方程式という）、Newton-Raphson 法などの反復収束計算法を用いて解くという方法が最もポピュラーであり、一般に「潮流計算」と言えばこの方法を指す。

これはノード方程式を基本としており、ノード間がどのような接続関係にあらうとも対応できることなどから幅広く用いられてきている。しかしながら、反復時の修正量を求める過程での計算量などがノード数に応じて飛躍的に増加してしまうため、計算時間との兼ね合いから自ずと解くことのできる系統規模が決まってくる。

そこで、電力系統の接続形態が比較的“疎”な状態であり、それゆえアドミタンスマトリクス（いわゆる Y 行列）中の要素も疎（スパース）になることを利用した高速化（オーダリングとスパース処理）などが盛んに行われてきた。現在に至ってはかなり高速化が進んでおり、本研究室にて開発されたプログラムも非常に高速である。

上述のプログラムのように一般的な系統を対象とする場合には、対象系統中のあるノードがすぐ隣のノードと接続されているとは限らず、系統全体での接続関係が把握できている必要がある。しかし、対象系統を放射状の形態を取る配電系統に限定した場合（すなわちループが存在しないとした場合）には、接続されるノードは自分に対して上位のノードか下位のノードに限られ、潮流の発生源（変電所）と消費点（負荷）との接続位置関係が決まってくる。となれば、潮流方程式に定式化する際に、全体を見通さずとも隣同士のノード間の関係だけ見ていけばよいことになり、計算も芋づる式に行うことができる。これを理論的に応用した計算法が DistFlow 法であると言うことができ、非常に高速な計算方法となりうる。

A.2 定式化

ここでは、DistFlow法の定式化について述べる。

A.2.1 メインフィーダのみの場合

最初は簡単のため、図 A.1: に示される本線（メインフィーダ）のみの系統について考える。これは、左端の変電所（substationと記されている）ノードを基準とし、右側に1本のメインとなるフィーダがのびている場合に相当する。潮流の源は変電所であり、右端が系統の終端ノードとなる。

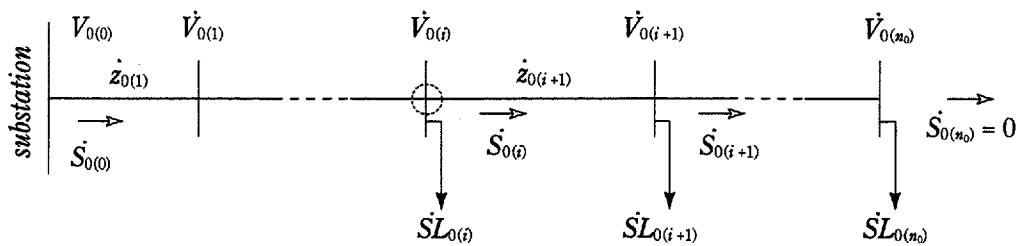


図 A.1: メインフィーダのみの場合

この図中に現れる記号は以下のとおりである。

- 0: メインフィーダを示す添え字（フィーダ番号）
- i : そのフィーダ中のノード番号
- n_0 : メインフィーダ中の全ノード数
- $\dot{V}_{0(i)}$: フィーダ0（メインフィーダ）、ノード i の電圧値
- $\dot{S}_{0(i)}$: フィーダ0（メインフィーダ）、ノード i から流出する電力潮流
(すなわち、 $\dot{S}_{0(i)} = P_{0(i)} + jQ_{0(i)}$)
- $P_{0(i)}$: $\dot{S}_{0(i)}$ の有効分
- $Q_{0(i)}$: $\dot{S}_{0(i)}$ の無効分
- $\dot{S}L_{0(i)}$: フィーダ0（メインフィーダ）、ノード i にぶら下がる負荷
(すなわち $\dot{S}L_{0(i)} = PL_{0(i)} + jQL_{0(i)}$)
- $PL_{0(i)}$: $\dot{S}L_{0(i)}$ の有効分
- $QL_{0(i)}$: $\dot{S}L_{0(i)}$ の無効分
- $\dot{z}_{0(i)}$: フィーダ0（メインフィーダ）、ノード $i \sim (i+1)$ 間の線路インピーダンス
(すなわち $\dot{z}_{0(i)} = r_{0(i)} + jx_{0(i)}$)

$r_{0(i)}$: $z_{0(i)}$ の抵抗分

$x_{0(i)}$: $z_{0(i)}$ のリアクタンス分

ここで、以下のことが仮定される。

- 変電所は上位系統に接続され、いくらでも電力を供給できるものと仮定され、計算上はいわゆるスラックノードとみなされる。
- 変電所ノードの電圧は運用上都合のいいように常に制御されるため、一定の値をとるものとする。

変電所から供給される電力が既知であるとする、変電所の電圧は一定であるから、変電所のすぐ次のノード 1 がブランチ 1 ($z_{0(1)}$) を介して受け取る電力は、

$$\dot{S}_{0(1)} = \dot{S}_{0(0)} - \dot{S}_{0(1)}^{loss} - \dot{S}L_{0(1)} \quad (\text{式 A.1})$$

である。ただし、 $\dot{S}_{0(1)}^{loss}$ はブランチ 1 による電力損失である。これは、変電所ノードを流れ出た電力潮流が、ブランチ 1 による電力損失分とノード 1 にぶら下がる負荷分だけ除いた量を受け取るということを示しており、これがそのまま次のノードへと送り出される。

ここで、この $\dot{S}_{0(1)}^{loss}$ は以下のように計算されることができる。

$$\dot{S}_{0(1)}^{loss} = (\dot{V}_{0(0)} - \dot{V}_{0(1)}) \cdot \bar{I}_{0(1)} \quad (\text{式 A.2})$$

ただし、 $\bar{I}_{0(1)}$ はノード 0 から 1 へとブランチ 1 上を流れる電流の共役値である。また、電位差 $\dot{V}_{0(0)} - \dot{V}_{0(1)}$ は、以下のように書ける。

$$\dot{V}_{0(0)} - \dot{V}_{0(1)} = z_{0(1)} \cdot \dot{I}_{0(1)} \quad (\text{式 A.3})$$

よって (式 A.2) 式は、

$$\dot{S}_{0(1)}^{loss} = z_{0(1)} \cdot \dot{I}_{0(1)} \cdot \bar{I}_{0(1)} = z_{0(1)} |I_{0(1)}|^2 \quad (\text{式 A.4})$$

となる。さらに電流 $\dot{I}_{0(1)}$ は、

$$\dot{I}_{0(1)} = \frac{\dot{S}_{0(0)}}{\dot{V}_{0(0)}} \quad (\text{式 A.5})$$

と表すことができるので、代入すると、

$$\dot{S}_{0(1)}^{loss} = \dot{z}_{0(1)} \frac{|\dot{S}_{0(0)}|^2}{|\dot{V}_{0(0)}|^2} = \dot{z}_{0(1)} \frac{|\dot{S}_{0(0)}|^2}{|\dot{V}_{0(0)}|^2} = \dot{z}_{0(1)} \frac{|\dot{S}_{0(0)}|^2}{V_{0(0)}^2} \quad (\text{式 A.6})$$

となる。

よって、ノード1の受け取る電力 $\dot{S}_{0(1)}$ は、式(式A.6)を式(式A.1)に代入して、結局

$$\dot{S}_{0(1)} = \dot{S}_{0(0)} - \dot{z}_{0(1)} \frac{|\dot{S}_{0(0)}|^2}{V_{0(0)}^2} - \dot{S}L_{0(1)} = \dot{S}_{0(0)} - \dot{z}_{0(1)} \frac{|\dot{S}_{0(0)}|^2}{V_{0(0)}^2} - \dot{S}L_{0(1)} \quad (\text{式 A.7})$$

と変形することができる。

次に、ノード1の電圧は、ブランチ1の1本分の電圧降下があるので、

$$\dot{V}_{0(1)} = V_{0(0)} \angle \theta_1 = \dot{V}_{0(0)} - \dot{z}_{0(1)} \dot{I}_{0(0)} = \dot{V}_{0(0)} - \dot{z}_{0(1)} \frac{\dot{S}_{0(0)}}{\dot{V}_{0(0)}} \quad (\text{式 A.8})$$

ただし、 $\dot{V}_{0(0)} = V_{0(0)} \angle 0$ であるから、 $\dot{V}_{0(0)} = \bar{V}_{0(0)} = V_{0(0)}$ としてかまわない。ゆえに式(式A.8)に代入すると $\dot{V}_{0(1)}$ は、

$$V_{0(1)} \angle \theta_1 = V_{0(0)} - \dot{z}_{0(1)} \frac{\dot{S}_{0(0)}}{V_{0(0)}} \quad (\text{式 A.9})$$

となる。

これでノード間の関係が明らかとなったので、次に成分に分けて定式化を行う。各複素量を実部、虚部の成分にそれぞれ分けて、

$$\dot{S}_{0(0)} = P_{0(0)} + jQ_{0(0)} \quad (\text{式 A.10})$$

$$\dot{S}_{0(1)} = P_{0(1)} + jQ_{0(1)} \quad (\text{式 A.11})$$

$$\dot{S}L_{0(1)} = PL_{0(1)} + jQL_{0(1)} \quad (\text{式 A.12})$$

$$\dot{z}_{0(1)} = r_{0(1)} + jx_{0(1)} \quad (\text{式 A.13})$$

とすると、(式A.7)式で表される $\dot{S}_{0(1)}$ は、

$$\dot{S}_{0(1)} = \dot{S}_{0(0)} - \dot{z}_{0(1)} \frac{|\dot{S}_{0(0)}|^2}{V_{0(0)}^2} - \dot{S}L_{0(1)} = \dot{S}_{0(0)} - \dot{S}L_{0(1)} - \dot{z}_{0(1)} \frac{|\dot{S}_{0(0)}|^2}{V_{0(0)}^2} \quad (\text{再掲}) \quad (\text{式 A.14})$$

であるから、それぞれの変数の成分表示を代入することにより、

$$\begin{aligned} P_{0(1)} + jQ_{0(1)} &= (P_{0(0)} + jQ_{0(0)}) - (PL_{0(1)} + jQL_{0(1)}) - (r_{0(1)} + jx_{0(1)}) \frac{|P_{0(0)} + jQ_{0(0)}|^2}{V_{0(0)}^2} \\ &= (P_{0(0)} + jQ_{0(0)}) - (PL_{0(1)} + jQL_{0(1)}) - (r_{0(1)} + jx_{0(1)}) \frac{P_{0(0)}^2 + Q_{0(0)}^2}{V_{0(0)}^2} \end{aligned} \quad (\text{式 A.15})$$

と計算される。

ここで (式 A.15) を実部・虚部に分けて書くと、

$$P_{0(1)} = P_{0(0)} - PL_{0(1)} - r_{0(1)} \frac{P_{0(0)}^2 + Q_{0(0)}^2}{V_{0(0)}^2} \quad (\text{式 A.16})$$

$$Q_{0(1)} = Q_{0(0)} - QL_{0(1)} - x_{0(1)} \frac{P_{0(0)}^2 + Q_{0(0)}^2}{V_{0(0)}^2} \quad (\text{式 A.17})$$

次に、電圧の関係式 (式 A.9) についても同様に成分表示を代入して整理すると、

$$\begin{aligned} V_{0(1)} \angle \theta_1 &= V_{0(0)} - z_{0(1)} \frac{\dot{S}_{0(0)}}{V_{0(0)}} \\ &= V_{0(0)} - (r_{0(1)} + jx_{0(1)}) \frac{(P_{0(0)} + jQ_{0(0)})}{V_{0(0)}} \\ &= V_{0(0)} - \frac{(r_{0(1)}P_{0(0)} - x_{0(1)}Q_{0(0)}) + j(r_{0(1)}Q_{0(0)} + x_{0(1)}P_{0(0)})}{V_{0(0)}} \end{aligned} \quad (\text{式 A.18})$$

となる。ここで両辺を自乗すると、

$$\begin{aligned} |V_{0(1)} \angle \theta_1|^2 &= V_{0(1)}^2 \\ &= \left(V_{0(0)} - \frac{(r_{0(1)}P_{0(0)} - x_{0(1)}Q_{0(0)}) + j(r_{0(1)}Q_{0(0)} + x_{0(1)}P_{0(0)})}{V_{0(0)}} \right)^2 \\ &= \left(V_{0(0)} - \frac{(r_{0(1)}P_{0(0)} - x_{0(1)}Q_{0(0)})}{V_{0(0)}} \right)^2 + \left(-\frac{j(r_{0(1)}Q_{0(0)} + x_{0(1)}P_{0(0)})}{V_{0(0)}} \right)^2 \\ &= V_{0(0)}^2 - 2(r_{0(1)}P_{0(0)} - x_{0(1)}Q_{0(0)}) \\ &\quad + \frac{(r_{0(1)}P_{0(0)} - x_{0(1)}Q_{0(0)})^2}{V_{0(0)}^2} + \frac{(r_{0(1)}Q_{0(0)} + x_{0(1)}P_{0(0)})^2}{V_{0(0)}^2} \end{aligned} \quad (\text{式 A.19})$$

と計算され、まとめると最終的に、

$$\begin{aligned}
V_{0(i)}^2 &= V_{0(i)}^2 - 2(r_{0(i)}P_{0(i)} - x_{0(i)}Q_{0(i)}) \\
&\quad + \frac{(r_{0(i)}P_{0(i)} - x_{0(i)}Q_{0(i)})^2 + (r_{0(i)}Q_{0(i)} + x_{0(i)}P_{0(i)})^2}{V_{0(i)}^2} \\
&= V_{0(i)}^2 - 2(r_{0(i)}P_{0(i)} - x_{0(i)}Q_{0(i)}) + \frac{(r_{0(i)}^2 + x_{0(i)}^2)(P_{0(i)}^2 + Q_{0(i)}^2)}{V_{0(i)}^2}
\end{aligned} \tag{式 A.20}$$

と表されることができ。

今は、0番ノード（変電所）と1番ノード（すぐ隣のノード）との関係を見てきたが、同様に（式 A.16）、（式 A.17）、（式 A.20）式をフィードに沿って再帰的に適用していけば、終端ノードまで一律に漸化式を立てることができる。

最終的に、これらを一般式として書き表せば、

$$P_{0(i+1)} = P_{0(i)} - r_{0(i+1)} \frac{P_{0(i)}^2 + Q_{0(i)}^2}{V_{0(i)}^2} - PL_{0(i+1)} \tag{式 A.21}$$

$$Q_{0(i+1)} = Q_{0(i)} - x_{0(i+1)} \frac{P_{0(i)}^2 + Q_{0(i)}^2}{V_{0(i)}^2} - QL_{0(i+1)} \tag{式 A.22}$$

$$V_{0(i+1)}^2 = V_{0(i)}^2 - 2(r_{0(i+1)}P_{0(i)} + x_{0(i+1)}Q_{0(i)}) + (r_{0(i+1)}^2 + x_{0(i+1)}^2) \frac{P_{0(i)}^2 + Q_{0(i)}^2}{V_{0(i)}^2} \tag{式 A.23}$$

となる。これはちょうど、図 A.1: 中の“○”印で指示されたノードにおけるノード電圧と潮流の関係を表し、branch flow equation と呼ばれる。

また、変電所端においては電圧値が指定されるため、

$$V_{0(0)}^2 = V_S^2 \quad (\text{指定値}) \tag{式 A.24}$$

が成立し、さらに末端ノードでは、そこから先には潮流が流れないため（図 A.1: 参照）次の終端条件が成り立つ。

$$P_{0(n)} = 0 \tag{式 A.25}$$

$$Q_{0(n)} = 0 \tag{式 A.26}$$

先の式（式 A.21）～（式 A.23）の branch flow equation が $3n$ 本と式（式 A.24）の電圧指定条件が 1 本、さらに終端条件である式（式 A.25）、（式 A.26）の 2 本をまとめて DistFlow equations と呼ぶ。これを基本の方程式として、流れている潮流を芋づる式に計算していくことができ、さらに反復計算のときの変数修正量の計算にも用いられる。

ここで、新たな変数を次のように導入する。

$$Z_{0(i)} = [P_{0(i)}, Q_{0(i)}]^T \quad (\text{式 A.27})$$

また、求めるべき運用点を

$$X_{0(i)} = [P_{0(i)}, Q_{0(i)}, V_{0(i)}^2]^T \quad (\text{式 A.28})$$

とおくと、先に導出された潮流方程式と境界条件より、次の2つの方程式が得られる。

$$P_{0(n_i)} = \hat{p}_{0(n_i)}(X_{0(i)}) = 0 \quad (\text{式 A.29})$$

$$Q_{0(n_i)} = \hat{q}_{0(n_i)}(X_{0(i)}) = 0 \quad (\text{式 A.30})$$

運用点は、変電所ノード電圧と変電所からの供給電力とを知ることができれば、先の方程式 (式 A.21) ~ (式 A.23) を用いて決定することができる。ただし、通常 (式 A.24) 式のように変電所での電圧は決定されているので、残る変数は供給電力のみとなる。

結果的に、先の方程式群は次式のように縮退することができる。

$$H(Z_{0(i)}) = 0 \quad (\text{式 A.31})$$

A.2.2 ラテラルフィーダをもつ場合

次に、図 A.2: のように分岐線 (ラテラルフィーダ) が存在する一般的な場合を考える。

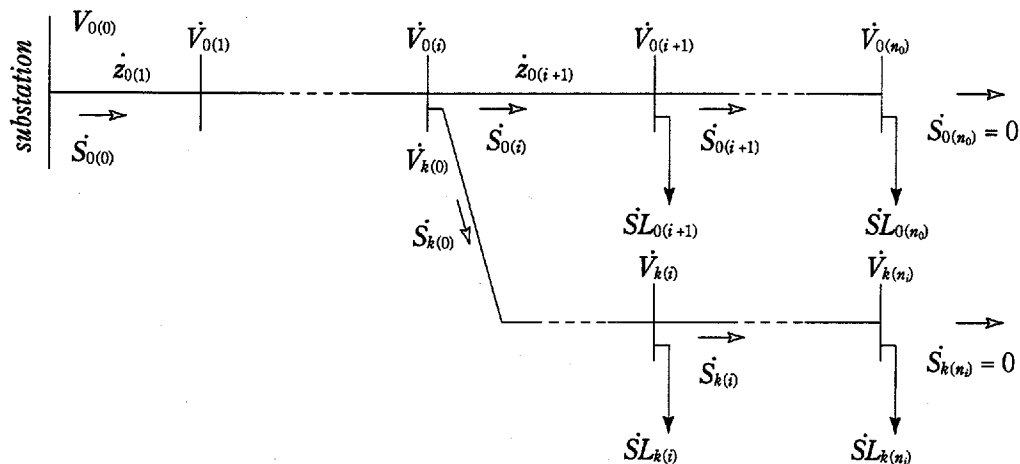


図 A.2: ラテラルフィーダが存在する場合

図中に現れる記号についてはほぼ同様であり、フィーダ番号を表す添え字が異なるのみ（メインフィーダは0番フィーダとみなされている）である。

k : フィーダ番号を示す添え字

i : そのフィーダ中でのノード番号

n_k : フィーダ k 中の全ノード数

$V_{k(i)}$: フィーダ k , ノード i の電圧値

$\dot{S}_{k(i)}$: フィーダ k , ノード i から流出する電力潮流
(すなわち, $\dot{S}_{k(i)} = P_{k(i)} + jQ_{k(i)}$)

$P_{k(i)}$: $\dot{S}_{k(i)}$ の有効分

$Q_{k(i)}$: $\dot{S}_{k(i)}$ の無効分

$\dot{S}L_{k(i)}$: フィーダ k , ノード i にぶら下がる負荷
(すなわち $\dot{S}L_{k(i)} = PL_{k(i)} + jQL_{k(i)}$)

$PL_{k(i)}$: $\dot{S}L_{k(i)}$ の有効分

$QL_{k(i)}$: $\dot{S}L_{k(i)}$ の無効分

$\dot{z}_{k(i)}$: フィーダ k , ノード $i \sim$ ノード $(i+1)$ 間の線路インピーダンス
(すなわち $\dot{z}_{k(i)} = r_{k(i)} + jx_{k(i)}$)

$r_{k(i)}$: $\dot{z}_{k(i)}$ の抵抗分

$x_{k(i)}$: $\dot{z}_{k(i)}$ のリアクタンス分

この図では、メインフィーダの i 番ノードからラテラルフィーダが出ており、このラテラルフィーダが n_k 本のブランチを持っている場合を表している。このようなラテラルフィーダが存在する場合でもメインフィーダに関しては先の例と同じである。ただし、新しい境界条件が必要となる。

それぞれのラテラルフィーダに関してもメインフィーダと同様, branch flow equation が以下のように成立する。

$$P_{k(i+1)} = P_{k(i)} - r_{k(i+1)} \frac{P_{k(i)}^2 + Q_{k(i)}^2}{V_{k(i)}^2} - PL_{k(i+1)} \quad (\text{式 A.32})$$

$$Q_{k(i+1)} = Q_{k(i)} - x_{k(i+1)} \frac{P_{k(i)}^2 + Q_{k(i)}^2}{V_{k(i)}^2} - QL_{k(i+1)} \quad (\text{式 A.33})$$

$$V_{k(i+1)}^2 = V_{k(i)}^2 - 2(r_{k(i+1)}P_{k(i)} + x_{k(i+1)}Q_{k(i)}) + (r_{k(i+1)}^2 + x_{k(i+1)}^2) \frac{P_{k(i)}^2 + Q_{k(i)}^2}{V_{k(i)}^2} \quad (\text{式 A.34})$$

ラテラルフィーダから見てメインフィーダでの変電所に相当するのが分岐点であり、分岐ノードでは以下の境界条件が成り立つ。

$$V_{0(f)}^2 = V_{k(0)}^2 \quad (\text{式 A.35})$$

これは、 $V_{0(f)}$ も $V_{k(0)}$ も同じノードを指し示していることから容易に理解できる。さらに、ラテラルフィーダにおいても末端ノードで次の終端条件が成り立つ。

$$P_{k(n)} = 0 \quad (\text{式 A.36})$$

$$Q_{k(n)} = 0 \quad (\text{式 A.37})$$

結局、ラテラルフィーダも含めて（メインフィーダは $k = 0$ ）、式（式 A.32）～（式 A.37）の本の式をまとめて DistFlow equations と呼ぶ。

次にこれらの式からそれぞれのラテラルフィーダの運用点を求めることを考える。ラテラルフィーダの運用点を求める場合もメインフィーダと同様であり、端点条件としてラテラルフィーダの分岐ノード電圧、及び分岐ノードからラテラルフィーダに流れこむ潮流電力量が必要である。

メインフィーダの場合、電圧値は変電所ノードの電圧で与えられたが、ラテラルフィーダの場合は電圧条件を用いて、メインフィーダの潮流方程式を用いた計算結果から得られたものを利用する。よって、ラテラルフィーダを持つ系統では、変電所からの供給電力及びラテラルフィーダに流れ込む潮流電力量を決定する必要がある。

ゆえに、次式が成り立つ。

$$P_{k(n)} = \hat{p}_{k(n)}(Z) = 0 \quad (\text{式 A.38})$$

$$Q_{k(n)} = \hat{q}_{k(n)}(Z) = 0 \quad (\text{式 A.39})$$

ここで、

$$Z = [Z_{1(0)}, Z_{2(0)}, \dots, Z_{L(0)}, Z_{0(0)}]^T \quad (\text{式 A.40})$$

$$Z_{k(0)} = [P_{k(0)}, Q_{k(0)}]^T \quad (\text{式 A.41})$$

(L : ラテラルフィーダ数) である。メインフィーダのみの場合と同様に、式（式 A.38）、（式 A.39）を簡単に次のようにまとめと、

$$H(Z) = 0 \quad (\text{式 A.42})$$

となる。ここで、

$$H(Z) = [\hat{p}_{k(n)}(Z), \hat{q}_{k(n)}(Z)]^T \quad (\text{式 A.43})$$

である。

最終的に求められた解くべき方程式群は (式 A.42) であり、非線形な連立代数方程式となる。

A.3 DistFlow equations の解法

この非線形方程式 (式 A.42) について、一般的な Newton-Raphson 法を用いた解法を以下に示す。これは、以下のステップを反復することにより、最終的な $Z_{0(0)}$ を求めるものである。

Step1: Z^j の値を求める。 $H(Z^j) \approx 0$ ならば終了。

Step2: 系統ヤコビアン行列 $J(Z^j)$ を求める。

$$J(Z^j) = \left. \frac{\partial H}{\partial Z} \right|_{Z=Z^j} \quad (\text{式 A.44})$$

Step3: ミスマッチ ΔZ^j を求め、 Z^j を更新し、Step1: へ戻る。

$$\Delta Z^j = -J^{-1}(Z^j)H(Z^j) \quad (\text{式 A.45})$$

$$Z^{j+1} = Z^j + \Delta Z^j \quad (\text{式 A.46})$$

ここで、 j は反復回数を表す。

簡単に説明を加えると、まず Step1: において、変電所の電圧は一定であると仮定されているので、変電所から供給される電力潮流をある値 (初期値) として運用点の暫定解を求める。すなわち、変電所から各フィーダの終端に向かって branch flow equation を適用していけば、終端ノードでの電力ミスマッチが求められることになる。このミスマッチが 0 になれば終了となるが、最初の反復では当然 0 にはならないため、Step2: でヤコビアンを利用し修正量を求めてやる。そして、Step3: にてこの修正量分だけ前のステップの変数を更新し、新しく更新された変数 (変電所から流れ出る電力潮流) をもって Step1: に戻る。これが、ミスマッチのなくなるまで繰り返される。

以上の過程を簡単に述べるため、再びメインフィーダのみの系統について考える。

A.3.1 メインフィーダのみの場合

反復 j において、変電所母線電圧 $V_{0(0)}$ は既知であり、更新された $Z_{0(0)}$ を用いて再帰的に変電所から終端へと向かって branch flow equations を適用すると、各ノードでの $X_{0(j)}$ を更新していくことができる。終端に到達したとき、更新された変数 $P_{0(n)}$ 、 $Q_{0(n)}$ が電力ミスマッチとなっているので、この値が基準値より小さければ終了する (Step1:)。

次に、状態変数の修正量を求めるためにシステムヤコビアンを構築する。この要素は連鎖律 (Chain Rule) を用いて計算することができる。メインフィードの場合について、ヤコビアンは以下の形の 2×2 行列となる。

$$J(Z_{0(0)}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{p}_{0(n_0)}}{\partial P_{0(0)}} & \frac{\partial \hat{p}_{0(n_0)}}{\partial Q_{0(0)}} \\ \frac{\partial \hat{q}_{0(n_0)}}{\partial P_{0(0)}} & \frac{\partial \hat{q}_{0(n_0)}}{\partial Q_{0(0)}} \end{bmatrix} \quad (\text{式 A.47})$$

ここで、 $J(Z_{0(0)})$ は合成微分として次式のように変形され、 $X_{0(i)} = [P_{0(i)}, Q_{0(i)}, V_{0(i)}^2]^T$ から求められる。また、このときの $X_{0(i)}$ は branch flow equations より得られる。

$$\begin{aligned} J(Z_{0(0)}) &= J_{0(n_0)} J_{0(n_0-1)} \cdots J_{0(i)} \cdots J_{0(1)} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{0(n_0)}}{\partial X_{0(n_0-1)}} \\ \frac{\partial Q_{0(n_0)}}{\partial X_{0(n_0-1)}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial X_{0(n_0-1)}}{\partial X_{0(n_0-2)}} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} \frac{\partial X_{0(i)}}{\partial X_{0(i-1)}} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} \frac{\partial X_{0(1)}}{\partial X_{0(0)}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{式 A.48})$$

ここで、

$$J_{0(n_0)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \hat{p}_{0(n_0)}}{\partial P_{0(n_0-1)}} & \frac{\partial \hat{p}_{0(n_0)}}{\partial Q_{0(n_0-1)}} & \frac{\partial \hat{p}_{0(n_0)}}{\partial V_{0(n_0-1)}^2} \\ \frac{\partial \hat{q}_{0(n_0)}}{\partial P_{0(n_0-1)}} & \frac{\partial \hat{q}_{0(n_0)}}{\partial Q_{0(n_0-1)}} & \frac{\partial \hat{q}_{0(n_0)}}{\partial V_{0(n_0-1)}^2} \end{bmatrix} \quad (\text{式 A.49})$$

$$\begin{aligned} J_{0(i)} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial X_{0(i)}}{\partial X_{0(i-1)}} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 - 2r_{0(i)} \frac{P_{0(i-1)}}{V_{0(i-1)}^2} & -2 \frac{Q_{0(i-1)}}{V_{0(i-1)}^2} & r_{0(i)} \frac{P_{0(i-1)}^2 + Q_{0(i-1)}^2}{V_{0(i-1)}^4} \\ -2x_{0(i)} \frac{P_{0(i-1)}}{V_{0(i-1)}^2} & 1 - 2x_{0(i)} \frac{P_{0(i-1)}}{V_{0(i-1)}^2} & x_{0(i)} \frac{P_{0(i-1)}^2 + Q_{0(i-1)}^2}{V_{0(i-1)}^4} \\ -2 \left(r_{0(i)} - z_{0(i)}^2 \frac{P_{0(i-1)}}{V_{0(i-1)}^2} \right) & -2 \left(x_{0(i)} - z_{0(i)}^2 \frac{Q_{0(i-1)}}{V_{0(i-1)}^2} \right) & 1 - z_{0(i)}^2 \frac{P_{0(i-1)}^2 + Q_{0(i-1)}^2}{V_{0(i-1)}^4} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{式 A.50})$$

システムヤコビアン行列は上の 2×3 行列 $J_{0(1)}$ と、 $n - 2$ 個の 3×3 行列 $J_{0(i)}$ (branch jacobian と呼ばれる)、及び 3×2 行列の $J_{0(n_0)}$ の積で最終的に 2×2 行列となる。

A.3.2 ラテラルフィーダをもつ場合

次にラテラルフィーダを持つ系統の場合を考える。計算手順は Step1: から Step3: までメインフィーダのみの場合と全く同じであり、これをラテラルフィーダにまで一般化することにより計算することができる。

k 番目の分岐フィーダに対して注入される指定電力 $P_{k(0)}$, $Q_{k(0)}$ と分岐ノードでの電圧 $V_{k(0)}$ からなるベクトル, すなわち $X_{k(0)}$ が与えられれば, メインフィーダのときと同様のことがラテラルフィーダに対しても適用できる。言い換えると, 分岐ノードをそのラテラルフィーダの変電所ノードと考えればよい。メインフィーダでの計算で決定された推定値を利用して $X_{k(0)}$ である変電所と仮定し, ここから終端に向けて $X_{k(i)} = [P_{k(i)}, Q_{k(i)}, V_{k(i)}^2]^T$ を更新していく (Step1:)。これを全てのラテラルフィーダに対して行う。

系統ヤコビアン行列 J は L 本のラテラルフィーダがある場合, 次のような $2(L+1) \times 2(L+1)$ の行列となる。

$$J = \frac{\partial H}{\partial Z} = \begin{bmatrix} J_{1(1)} & J_{1(2)} & \cdots & J_{1(L)} & J_{1(0)} \\ J_{2(1)} & J_{2(2)} & \cdots & J_{2(L)} & J_{2(0)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ J_{L(1)} & J_{L(2)} & \cdots & J_{L(L)} & J_{L(0)} \\ J_{0(1)} & J_{0(2)} & \cdots & J_{0(L)} & J_{0(0)} \end{bmatrix} \quad (\text{式 A.51})$$

ここで,

$$J(Z_{k(i)}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{k(i)}}{\partial P_{i(0)}} & \frac{\partial P_{k(i)}}{\partial Q_{i(0)}} \\ \frac{\partial Q_{k(i)}}{\partial P_{i(0)}} & \frac{\partial Q_{k(i)}}{\partial Q_{i(0)}} \end{bmatrix} \quad (\text{式 A.52})$$

である。

式 (式 A.51) は式 (式 A.48) のように合成微分でブランチヤコビアン行列に展開して計算することができる (Step2:)。また, 式 (式 A.45), (式 A.46) から $2(L+1)$ 個の変数 $P_{k(0)}$, $Q_{k(0)}$ が更新される (Step3:)。

研究業績一覧

A. 学会誌等学術研究論文

- [1] 佐々木, 牛尾, 造賀, 久保川, 北川:「配電系統への燃料電池の最適配置計画に関する研究」, 電気学会論文誌, Vol. 114-B, No. 5, pp. 491-497, 1994
- [2] 佐々木, 造賀, 久保川:「燃料電池最適配置計画問題の遺伝的アルゴリズムによる解法」, 電気学会論文誌, Vol. 117-B, No. 8, pp. 1109-1114, 1997
- [3] Y. Zoka, H. Sasaki, J. Kubokawa, K. Kawahara, "An Optimal Deployment of Fuel Cells to Distribution Systems by Means of Improved Genetic Algorithm," *International Journal of Engineering Intelligent Systems*, Vol. 9, No. 3, pp. 165-172, 2001
- [4] 川原, 造賀, 佐々木:「整定順序を考慮した保護リレー協調問題へのルールベースシステムの適用」, 電気設備学会誌, 第 18 巻, 10 号, pp. 714-721, 1998
- [5] 趙, 川原, 佐々木, 久保川, 造賀:「N-1 セキュリティを考慮した系統構成生成問題へのタブサーチの適用」, 電気学会論文誌 B, Vol. 119-B, No. 6, pp. 720-726, 1999
- [6] 川原, 朝原, 造賀, 佐々木:「作業停電設備同定支援システムの構築」, 電気設備学会誌, 第 21 巻, 12 号, pp. 1015-1022, 2001

B. 国際会議等講演論文

- [1] Y. Zoka, H. Sasaki, J. Kubokawa, "An Optimal Deployment of Fuel Cells in A Distribution Systems by Means of Genetic Algorithms," *Proceedings of the ISAP 94 (International Conference on Intelligent System Application to Power Systems)*, pp. 153-160, 1994
- [2] Y. Zoka, H. Sasaki, J. Kubokawa, R. Yokoyama, H. Tanaka, "An Optimal Deployment of Fuel Cells in Distribution Systems by Using Genetic Algorithms," *Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, pp. 479-484, 1995

- [3] H. Sasaki, Y. Zoka, K. Kubokawa, "A Distribution System Simulator for Interconnection of Dispersed Power Sources," *Proceedings of the International Power Engineering Conference 97*, pp. 142-147, 1997
- [4] Y. Zoka, H. Sasaki, J. Kubokawa, "A Study on A Genetic Algorithm for Optimal Deployment Problem of Fuel Cells in Large Distribution Systems," *Proceedings of the International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP '97)*, pp. 618-622, 1997
- [5] Y. Zoka, H. Sasaki, J. Kubokawa, "An Investigation of Load Flow Methods for Radial Distribution Networks," *Proceedings of AUPEC 98*, Vol. 1, pp. 235-240, 1998
- [6] K. Kawahara, H. Sasaki, J. Kubokawa, Y. Zoka, "A Study on Determining the Combination of Outage Works by Power Supply Indices," *Proceedings of The International Conference on Electrical Engineering (ICEE 98)*, Vol. 2, pp. 326-329, 1998
- [7] K. Kawahara, H. Sasaki, J. Kubokawa, Y. Zoka, "A Study on Evaluating Power Supply Reliability in Outage Planning of Electric Power Facilities," *Proceedings of the 12th Conference on the Electric Power Supply Industry*, Vol. 11, pp. 36-42, 1998
- [8] Y. Zoka, H. Sasaki, K. Kubokawa, K. Kawahara, "A Distribution System Simulator for Interconnection of Dispersed Power Sources," *Proceedings of the International Power Engineering Conference 99*, Vol. II, pp. 509-514, 1999
- [9] N. Zhao, K. Kawahara, H. Sasaki, J. Kubokawa, Y. Zoka, "A Study of Network Configuration for Outage Works by Applying Tabu Search And Genetic Algorithm to Optimal Switching Power Flow," *Proceedings of the International Power Engineering Conference*, Vol. II, pp. 814-819, 1999
- [10] H. Sasaki, Y. Zoka, J. Kubokawa, K. Kawahara, "An Optimal Deployment Planning of Fuel Cells and Power Storage Systems into A Distribution Network," *Proceedings of the 2nd International Meeting on Systems Technologies for Unbundled Power Quality Services*, 1999
- [11] H. Sasaki, Y. Zoka, J. Kubokawa, "An Optimal Deployment Planning of Fuel Cells into A Distribution Network Considering Optimal Capacity Sizing,"

- Proceedings of the 3rd International Meeting on Systems Technologies for Unbundled Power Quality Services*, 1999
- [12] Y. Zoka, H. Sasaki, J. Kubokawa, K. Kawahara, "An Optimal Deployment Planning of Fuel Cells and Power Storage Systems into Distribution Networks Considering Optimal Operation and Capacity Sizing," *Proceedings of the 4th International Meeting on Systems Technologies for Unbundled Power Quality Services*, 2000
- [13] H. Sasaki, Y. Zoka, J. Kubokawa, K. Kawahara, "A Study of Allocation Planning of Electrical and Thermal Energy Systems in Distribution Networks — Optimal Operation Planning," *Proceedings of The 1st International Workshop on Systems Technology for Unbundled Power Quality Services*, 2000
- [14] Suhartono, Y. Zoka, H. Sasaki, "The Evaluation of Confidence Limit on LOLP for Multi Area System," *Proceedings of the International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring, and Power Technologies 2000*, pp. 111-117, 2000
- [15] Suhartono, Y. Zoka, H. Sasaki, "The Investigation of the Expectation and Variance of LOLP of Multi Area System," *Proceedings of CEPSI 2000*, pp. 115-121, 2000
- [16] Y. Zoka, S. Kashiwai, H. Sasaki, J. Kubokawa, K. Kawahara, "A Study of Allocation Planning of Dispersed Electrical and Thermal Energy Systems into Distribution Networks Optimal operation planning," *Proceedings of POWERCON2000 Fourth International Conference on Power System Technology*, Vol. 1, pp. 43-47, 2000
- [17] N. Zhao, K. Kawahara, J. Kubokawa, Y. Zoka, H. Sasaki, "A Study of Outage Works Allocation by Means of Agent Technology," *Proceedings of POWERCON2000 Fourth International Conference on Power System Technology*, pp. 369-373, 2000
- [18] K. Kawahara, K. Yoshizu, Y. Zoka, H. Sasaki, "Construction of Automatic Drawing System for Power System Diagram by Using GA," *Proceedings of POWERCON2000 Fourth International Conference on Power System Technology*, pp. 497-502, 2000

- [19] Suhartono, Y. Zoka, H. Sasaki, "A Study on The Effect of Permanent Outage Rates of Interconnection Tie Line on Well-being Indices for Multi Area System," *Proceedings of International Conference on Electrical Engineering (ICEE 2001)*, Vol. 1, pp. 389-393, 2001

C. 学術研究会等研究発表

- [1] 佐々木, 牛尾, 造賀, 餘利野, 久保川:「電力系統への新電源の最適導入計画に関する研究」, 平成5年電気学会全国大会, 9-1214, 1993
- [2] 佐々木, 造賀, 久保川, 餘利野:「電力系統への燃料電池の最適計画～遺伝的アルゴリズムの適用～」, 平成5年電気・情報関連学会中国支部連合大会, 020603, 1993
- [3] 佐々木, 造賀, 久保川, 餘利野:「電力系統への燃料電池の最適導入計画～Genetic Algorithmの適用～」, 平成5年電気学会電力・エネルギー部門大会, 論文II, 222, 1993
- [4] 造賀, 佐々木, 牛尾, 久保川:「電力系統への新電源の最適導入計画に関する研究」, 平成5年エネルギー・資源学会研究発表会, 1-5, p.29, 1993
- [5] 佐々木, 造賀, 久保川:「配電系統への燃料電池の最適導入方策ー遺伝的アルゴリズムの適用ー」, 平成6年度電気・情報関連学会中国支部第45回連合大会講演論文集, pp. 336
- [6] 佐々木, 造賀, 久保川:「配電系統への燃料電池の最適導入計画ー遺伝的アルゴリズムによる解法」, 平成6年電気学会電力技術研究会資料, PE-94-123, pp. 11-20
- [7] 佐々木, 造賀, 久保川:「燃料電池大量導入の配電系統へ与える影響 (シミュレータ用モデルの開発)」, 平成7年電気・情報関連学会中国支部連合大会, 040605, 1995
- [8] 佐々木, 吉村, 造賀, 久保川:「燃料電池の最適配置問題に対する解法アルゴリズムの比較 (分枝限定法と遺伝的アルゴリズムの性能比較)」, 平成7年電気・情報関連学会中国支部連合大会, 040614, 1995
- [9] 佐々木, 造賀, 久保川:「燃料電池大量導入の配電系統へ与える影響 (シミュレータの設計・開発)」, 平成7年電気学会電力技術研究会, PE-95-186, pp.91-98, 1995

- [10] 佐々木, 造賀, 久保川:「分散電源系統連系シミュレータの開発(プロトタイプ構築)」, 平成8年電気学会平電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-96-103/PSE-96-103, pp. 69-78
- [11] 佐々木, 造賀, 久保川:「分散電源配電系統連系シミュレータ用燃料電池モデルの開発」, 平成8年度電気・情報関連学会中国支部第47回連合大会講演論文集, pp. 119-120
- [12] 佐々木, 吉村, 造賀, 久保川:「分散電源配電系統連系シミュレータのユーザーインターフェースの開発」, 平成8年度電気・情報関連学会中国支部第47回連合大会講演論文集, pp. 121-122
- [13] 佐々木, 造賀, 久保川:「分散電源系統連系シミュレータに関する研究」, 平成9年電気学会電力・エネルギー部門大会, 論文II, 101, 1995
- [14] 佐々木, 下垣, 造賀, 久保川:「分散型電源配電系統連系シミュレータ用燃料電池保護モデルの開発」, 平成10年度電気・情報関連学会中国支部第49回連合大会講演論文集, pp. 299-300
- [15] 佐々木, 下垣, 造賀, 久保川:「分散型電源配電系統連系シミュレータの開発」, 平成10年電気学会研究会資料, PE-98-118/PSE-98-108, pp. 1-6
- [16] 佐々木, 造賀, 秋田, 菅原, 餘利野, 杉原:「モード縮約法を利用した系統安定度解析に関する一研究」, 平成11年電気学会電力・エネルギー部門大会, 分冊A, 192, 1999
- [17] 佐々木, 造賀, 下川, 松本:「配電系統への燃料電池及び電力貯蔵装置の最適配置に関する研究」, 平成11年電気学会電力・エネルギー部門大会, 分冊A, 209, 1999
- [18] 佐々木, 造賀, 下川, 松本, 川原:「配電系統への燃料電池の運用を考慮した最適運用計画に関する考察」, 平成11年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-99-138/PSE-99-135, 1999
- [19] 川原, 造賀, 佐々木:「分散型作業要求書作成支援システムの構築」, 平成12年電気・情報関連学会中国支部第51回連合大会, 180701, 2000
- [20] 佐々木, 造賀, 秋田, 杉原, 餘利野:「モード解析による系統縮約手法の計算効率向上に関する一研究」, 平成12年電気学会全国大会講演論文集, 6-087, pp. 2643-2644

- [21] 佐々木, 造賀, 柏井, 久保川:「分散型電源と電力貯蔵装置の協調を考慮した最適運用計画」, 平成 12 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-00-124/PSE-00-129, 2000
- [22] 木村, 造賀, 佐々木, 秋田, 杉原:「周波数特性を考慮したモード縮約法に関する一考察」, 平成 13 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-01-40/PSE-01-34, 2001
- [23] 野田, 造賀, 佐々木, 川原:「供給信頼度を考慮した分散型電源の導入計画に関する研究」, 平成 13 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料, PE-01-145/PSE-01-139, 2001