



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システム(FRIENDS)における電力改質センターに関する基礎研究
Author(s)	三島, 裕樹
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第4751号
Issue Date	1999-03-25
DOI	<a href="https://doi.org/10.11501/3151433">https://doi.org/10.11501/3151433</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/51597">https://hdl.handle.net/2115/51597</a>
Type	doctoral thesis
File Information	000000336623.pdf



高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システム  
(FRIENDS)における電力改質センター  
に関する基礎研究

三島裕樹

①

高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システム  
(FRIENDS)における電力改質センター  
に関する基礎研究

平成10年12月

三島 裕樹

## 論 文 要 旨

近年、電気事業を取り巻く環境は大きな変化を見せている。一つは、世界各国において電気事業に関する法的規制緩和が進行し、電力市場自由化の波が押しよせていることである。この規制緩和の流れの中で電気事業は大きな変革を迫られている。例えば、英国では1990年に国有電気事業が民営の発電・送電・配電会社へ分割された。それ以降、多くの欧米諸国でも同様に規制緩和による電気事業の再編が実施されている。我が国においても、1995年に電気事業法が31年ぶりに大幅改正された。その内容は、新規電源に対する競争入札制の導入、特定電気事業(特定地域内の一般需要家に対する小売電気事業)の創設、ならびに卸・自己託送の許可条件の緩和が主たるものであり、一部では更なる電気事業法の改正を念頭に置いて、一層の競争促進方策について議論が行われている。このように、我が国も徐々にではあるが電力市場自由化の方向に向かっている。

二つ目は、近年の技術革新による設備価格の低下ならびに需要家の省エネルギーへの関心の高まりに伴って、太陽光発電システムなどの小規模電源や二次電池などの電力貯蔵装置の需要家サイドへの導入が進むものと予想されることである。現行の電力システムは大規模電源から需要家への一方向の電力の流れを想定し設計・運用されているため、電力システムの末端である需要家サイドに不特定多数の電源がある場合、これまでにはなかった新たな問題が起こる可能性がある。現行の配電システムでは、それらに柔軟に対処できなくなることが考えられており、新しい柔軟な配電システムの構築が望まれている。

三つ目は、需要家の電力供給に対する要望の拡大がある。近年、コンピュータやそのネットワーク化による情報通信機器や制御器利用の普及は、都市部を中心に需要家が受けとる電力品質に対し、極めて高い品質が要求されている。また、供給信

頼度の一層の向上に加えて瞬時電圧低下や高調波などといった波形品質の向上も要求される。一方、一部の照明や加熱などの用途では、その品質よりも価格の方が優先されるものと考えられる。すなわち、電気利用の多様化は品質と価格の異なる組み合わせサービス(いわゆる多品質電力供給サービス)の潜在需要に結びつくものである。こうした多品質電力供給は、現行の配電システムではシステム的に実現が困難であると考えられ、つまり、多品質電力供給の実現に際して、双方向の情報のやり取りが可能な高機能通信ネットワークを備え持つ次世代電力供給システムを構築する必要がある。最後には、配電自動化技術ならびに関連技術の飛躍的な進歩が挙げられる。配電システムの自動化は高信頼な電力供給を行うために、各電力会社で精力的に実施されている。これらは近年急速に発展している情報処理・情報通信技術を組み込むことにより、さらなる高機能化が期待されている。また、半導体デバイス技術の進歩により、大容量・低価格なパワーエレクトロニクス応用電力変換器も開発されてきている。さらに、高機能情報通信・情報処理技術の発展に伴い、将来の配電システムには、強力な情報通信ネットワークが併設されることが容易に予想でき、そのネットワークを使ってより柔軟な需要家サービスを行うことが可能であると予想される。つまり、将来の新しい配電システムを構築するための技術的要素は徐々に整いつつある。

このように、現在、電気事業ならびに電力システムは大きな転換期を迎えている。規制緩和後の将来の電力システム、とりわけ需要家に直接電力を供給する役目を担う配電システムは、これまでも増して需要家サービスを重視した考え方、システム作りをしていかなければならない。多種多様な需要家のニーズに高い柔軟性と信頼性を確保して対応できるとともに、需要家との双方向な情報サービスができる特性をも兼ね備える必要がある。このような次世代の配電システムは、電力供給者から需要家に一方向に電力を**配る**のではなく、需要家側からの電力潮流を有効利用し、ネットワーク中を自由方向に電力を**流通させる**ことが必要であり、「**配電システム**」というより、むしろ「**電気エネルギー流通システム**」などと呼ばれる方が適切かも知れない。

このようなことから、世界中で、様々な新しい電力輸送・電力供給の形態が研究され始めてきている。その中で、茨城大学 奈良教授、北海道大学 長谷川

教授らは、将来の望ましい電力流通の一形態として、1994年から「高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システム (*Flexible, Reliable and Intelligent Electrical eNergy Delivery System*; FRIENDS)」の構想を提唱している。FRIENDS構想は、電力改質センター (*Quality Control Center* ; QCC) と呼ばれる全く新しい設備を需要家近傍に設置し、分散電源・電力貯蔵装置技術、需要家側制御技術、パワーエレクトロニクス技術、高度な情報処理ならびに情報伝送技術を駆使することによって、需要家に対し多品質電力供給が可能であるとともに、高機能な需要家側制御 (*Demand Side Management*; DSM) や顧客サービスの向上を果たすことができることを想定している。

FRIENDS構想は次世代の望ましい電力流通システムの一形態として世界の研究者からの関心も高まりつつあり、早急にその実現が望まれている。そのためには、FRIENDSの中核的存在を担う電力改質センターという新しいシステムの具体的な内部構成を明確にするとともに、それらの制御性能・能力を定性的かつ定量的に評価することが必要である。本論文はこうした現状を踏まえ、FRIENDS構想の実現に関する基礎研究として、FRIENDSの概念をより明確にするとともに、FRIENDSの最も特徴的な電力改質センターの具体的な内部構成を構築することを目的として検討を行っている。

本論文は全6章により構成されており、各章の概要を以下に示す。

第1章では、本論文の背景として、現在、電気事業・電力システムが直面している話題をいくつか取り上げ、新しい電気エネルギー流通システムを構築する必要性を明らかにしている。将来の望ましい電気エネルギー流通システムであるFRIENDSが提案されるに至った背景を明らかにすることによって、本論文の目的と位置づけを明確にする。

第2章では、これまでに提案されているFRIENDSの概念に加え、本研究によってより明確にしたFRIENDS構想の全体像について説明する。FRIENDSの概念は現行の配電システムとは全く異なる発想に基づくシステム構成であるため、FRIENDSのシステム構成を現行の配電システム構成と比較し、FRIENDSの持つ機能や特徴を整理するとともに、FRIENDSの目的とするところを述べる。さらに、FRIENDSの中で最も重要な役割を果たす電力改質センターについて、それがFRIENDSの目的を実現するために果たすべき役割と、多品質電力供給の観点

から電力の品質について論じる。本章により、基本的イメージとして提案されているFRIENDS構想を、第3章以降で具体的に論じることが可能となる。

第3章では、FRIENDSの中核的存在である電力改質センターの内部構成として具体的にどのような形式があり得るのかを明確にするために、電力改質センターをいくつかの主要部分に分割し、それらに対して考えられ得る数種類の内部構成をスケルトンレベルで提案する。さらに提案した構成について経済性、規模、実現可能性などの特徴を検討する。本章の結果は、より実際的な電力改質センターを構築するための基礎となるものである。

第4章では、将来の電力システムにおいて重要な機能を果たすと期待されている電力貯蔵装置に焦点を絞り論じる。まず、FRIENDSシステムの中に分散配置された種々の電力貯蔵装置が果たすべき機能を列挙し、どの種類の貯蔵装置がその機能を果たすのに適しているかについて定性的に検討する。この結果より、FRIENDSにおいてその重要性こそ認識されていたが、これまで概念的にしか考えられていなかった電力貯蔵装置の果たすべき機能や役割をより具体化できる。さらに、多品質電力供給が実現可能な電力貯蔵装置の運用アルゴリズムを開発し、FRIENDSにおける負荷平準化や線路損失低減の効果を評価する。この結果は、需要家近傍の電力改質センターに分散配置された電力貯蔵装置の効果的な運用方策の一つを示すものである。

第5章では、電力改質センターの多品質電力機能について詳細に検証を行っている。すなわち、最も実現性が高いと考えられる一つの具体的な電力改質センターの内部構成モデルを想定し、電磁過渡解析プログラム(EMTDC)を用いた計算機シミュレーションによって、msecオーダーの時間領域で電力の波形品質を瞬時値レベルで解析する。特に力点を置いたところは、電力改質センター内における電力品質の制御方式、ならびに需要家への品質別電力の供給方式の評価であり、電力改質センターが多品質電力供給を行うとき、実際の電圧電流波形にどのような影響が現れるかについて検討する。本章の結果により、FRIENDSにおける多品質電力供給機能の一方式が、少なくとも技術的には実現できる可能性があることを示した。

第6章は本論文の結論であり、各章で得られた知見をとりまとめている。

## 目次

### 論文要旨

### 第1章 序論

1.1. 概要	1
1.2. 近年の電気事業・電力システムの動向	2
<1.2.1> 電気事業の規制緩和	3
<1.2.2> 小規模分散型電源および電力貯蔵装置の動向	4
<1.2.3> 需要家ニーズの多様化	6
<1.2.4> 配電自動化技術ならびに関連技術の動向	7
1.3. 新しい電気エネルギー流通システム	9
1.4. 本論文の位置づけと構成	11

### 第2章 高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システム (FRIENDS)の概念

2.1. 概要	15
2.2. FRIENDSの目的	16
2.3. FRIENDSの構成	19
<2.3.1> 現行配電システムの構成	20
<2.3.2> FRIENDSのシステム構成	21
<2.3.3> FRIENDSの情報ネットワーク	25

2.4. 電力改質センターの役割と電力の品質	26
<2.4.1> 電力改質センターの役割	27
<2.4.2> 電力の品質	29
2.5. まとめ	31

### 第3章 電力改質センターの内部構成の提案

3.1. 概要	33
3.2. 電力改質センターの果たすべき機能と主要部分	34
3.3. 高圧側母線形状の提案	35
3.4. 電力供給形態と内部構の提案	39
3.5. 低圧側母線形状の提案	44
3.6. 需要家側屋内配線の提案	46
3.7. 分散電源・電力貯蔵装置	49
<3.7.1> 需要家側分散電源・電力貯蔵装置の提案	49
<3.7.2> 電力改質センター内分散電源・電力貯蔵装置の提案	52
3.8. その他の電力改質センターの提案	54
<3.8.1> 電力改質センターの全体構成の提案	54
<3.8.2> 三相による新しい多品質電力供給方式の提案	56
3.9. まとめ	57

### 第4章 FRIENDSにおける電力貯蔵装置の役割とその運用例

4.1. 概要	59
4.2. 各種電力貯蔵装置の概要	60
<4.2.1> 各種電力貯蔵装置の原理と特徴	60
<4.2.2> 各種電力貯蔵装置の開発状況	64
4.3. FRIENDSにおける電力貯蔵装置の役割	67
<4.3.1> 電力貯蔵装置が果たすべき機能	67

<4.3.2> 定性的検討	71
4.4. 多品質電力供給の観点から見た電力貯蔵装置の運用	72
<4.4.1> 多品質電力供給の実現方法	74
<4.4.2> FRIENDSネットワークモデル	75
<4.4.3> 電力改質センターが単独で多品質電力供給を補償する場合	79
<4.4.4> 電力改質センター間の電力融通を考慮して多品質電力供給を補償する場合	85
4.5. まとめ	90

## 第5章 電力改質センターの内部構成の解析

5.1. 概要	92
5.2. 需要地域の特徴と電力改質センター	93
5.3. 電力改質センターの内部構成モデル	95
<5.3.1> 解析モデルの特徴	96
<5.3.2> 解析モデルの仕様	99
5.4. 停電発生時の解析	102
<5.4.1> 電力フローの概要	102
<5.4.2> 瞬時停電時の解析	104
<5.4.3> 長時間停電時の解析	106
5.5. 負荷遮断時の解析	108
<5.5.1> 遮断指令による負荷遮断時の解析	108
<5.5.2> 負荷増加時の解析	110
5.6. まとめ	111

## 第6章 結 論

結 論	112
-----	-----



## 第1章 序論

### 1.1. 概要

現在、電気事業は大きな変革期に直面している。例えば、世界各国において電気事業に関する法的規制緩和が進行し、電気事業にも電力市場自由化の波が押しよせようとしている。また、近年の技術革新による設備価格の低下ならびに需要家の省エネルギーへの関心の高まりに伴って、太陽光発電システムなどの小規模電源や二次電池などの電力貯蔵装置の需要家サイドへの導入が進むものと予想される。現行の電力システムは大規模電源から需要家への一方向の電力の流れを想定し設計・運用されているため、電力システムの末端である需要家サイドに電源がある場合、これまでにはなかった新たな問題が起こる可能性がある。さらには、需要家の電力供給に対する要望の拡大がある。特に我が国においては、極めて高水準な品質の電力を全ての需要家に供給しているが、必ずしも全ての需要家が高品質な電力供給を望んでいるわけではない。需要家は電力品質とその料金とについて、多様な選択ができることを望む傾向にある。従って、将来の電力システム、特に需要家に最も近い配電システムには、さらなる高柔軟性かつ高信頼性が求められている。このようなことから、世界中で、様々な新しい電力輸送・電力供給の形態が研究され始めてきている。このような背景のもと、茨城大学 奈良宏一教授、北海道大学 長谷川淳教授らは、将来の望ましい電力流通の一形態として、1994年に「高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システム (Flexible, Reliable and Intelligent Electrical eNergy Delivery System; FRIENDS)<sup>[1]~[7]</sup>」の構想を描いた。FRIENDSシステムは、従来から国内外で個別に検討されてきた配電システムの自動化、近代化に関する話題を統合し、分散

電源・電力貯蔵装置技術、需要家側制御、パワーエレクトロニクス技術、高度な情報処理ならびに情報伝送技術を駆使してシステム全体に高柔軟性かつ高信頼性を持たせたところに特徴がある世界に類を見ない全く新しい概念である。

本論文では、FRIENDSの中核的存在である「電力改質センター(Quality Control Center; QCC)」と名付けられた新しい設備に焦点を絞り、その実現に向けての基礎的な検討として電力改質センターの具体的な内部構成を定性的かつ定量的に評価するが、その前に、本章においてFRIENDSシステムの概念が提案されるに至った背景、すなわち近年の電気事業を取り巻く環境の変化ならびに新しい電気エネルギー流通システムの必要性について論じる。

以下本章では、まず、1.2.節において、現在電気事業・電力システムが直面している話題をいくつか取り上げ、これを踏まえ、1.3.節において新しい電気エネルギー流通システムの必要性について説明する。さらに、1.4.節では、本論文の位置づけを明確にするとともに、本論文の具体的な構成を示す。

## 1.2. 近年の電気事業・電力システムの動向

現在、電気事業・電力システムを取り巻く環境は大きな変化を見せている。我が国においても、1995年に電気事業法が大幅に改正され、電力市場の一部自由化が始まっている。そこで本節では、現在、電気事業・電力システムが直面している話題をいくつか取り上げる。

まず、<1.2.1>では電気事業に関する法的規制緩和に関して、特に我が国の現状を中心に説明する。次に、<1.2.2>では、小規模分散電源ならびに電力貯蔵装置、<1.2.3>では、近年多種多様化される需要家ニーズの拡大について触れる。さらに<1.2.4>では、配電自動化技術ならびに関連技術の開発動向について述べる。

### <1.2.1> 電気事業の規制緩和

英国では1990年に行われた電気事業の再編成に伴い、発電部門、送電部門、配電部門が分離され、部分的にはあるが自由競争の時代に入った。米国やその他の国々でも法的規制緩和により、競争の時代に移りつつある。特に、発展途上国では不足がちな電力インフラの整備に外国資本を利用するために、電気事業の規制緩和は今後ますます進む傾向にあると予想される<sup>[8]~[11]</sup>。我が国においても、電気事業法が1995年、31年ぶりに大幅改正された<sup>[12][13]</sup>。その主たる改正点は、非電気事業者 (*Independent Power Producer; IPP*) による卸発電部門へ入札という形式での参入、特定電気事業者による特定地域に対する小売部門への参入、ならびに卸・自己託送に対する規制の緩和などであり、これらは徐々に実施され始めている。さらに、一部では電気事業法の更なる改正を念頭に置きつつ、一般小売部門の部分自由化を進める議論もある。

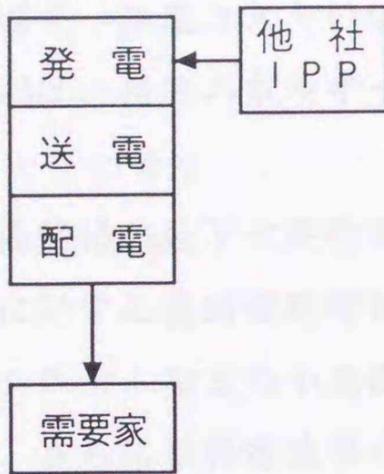
一般に、電力市場自由化の形態は図1.1.に示すように四つのモデルに類型化できる<sup>[14]~[19]</sup>。モデル1は、電気事業の伝統的な供給体制で、発電から配電まで垂直統合された独占体の形である(伝統的独占供給モデル)。モデル1の下では非電気事業者の参入はどこにも許されていない。競争が導入されると、その度合いに応じて伝統的供給体制は再編されることになる。1995年の電気事業法改正前の我が国はこのモデルに対応していた。モデル2は、発電部門への競争導入が特徴的であるが(競争入札モデル)、電気事業者の発電設備まで競争にさらされるわけではなく、非電気事業者による新規電源のみが入札という形で参入可能である。我が国では、1996年に第一回の入札が7電力会社で実施され、募集に対して4倍もの応札があった。モデル3は、卸売りおよび小売託送を認める供給体制である(託送モデル)。現在(1998年)の我が国は、特定電気事業と呼ばれる小売電気事業制度が確立されているが、これは特定地域にのみ限られた極めて例外的なものである。基本的にはモデル2の供給体系である。しかしながら、卸託送が可能という点ではかなりモデル3に近い状況であると言える。モデル4は、発・送・配電の垂直統合が分離され、より徹底した競争が導入される(プールモデル)。現在の英国(発送配電の分離と送電部門の電力プール)やその他のEU諸国がこれにあたる。

(従来型モデル)



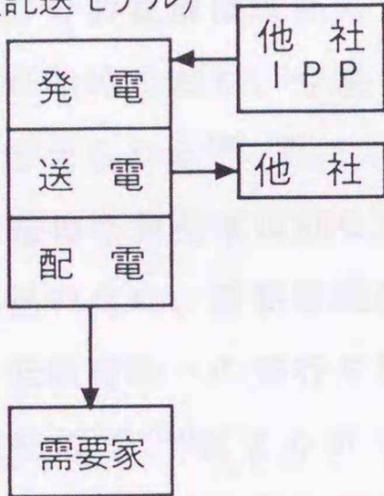
モデル1

(競争入札モデル)



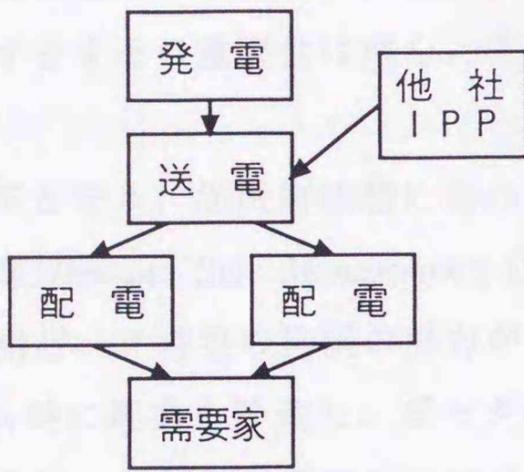
モデル2

(託送モデル)



モデル3

(プールモデル)



モデル4

図1.1. 規制緩和後の電力供給体系の例

### <1.2.2> 小規模分散型電源および電力貯蔵装置の動向

分散電源とは、一般には分散して配置される小規模な電源のことを言う。広い意味では、小規模水力なども含まれるが、通常は太陽光発電システム、燃料電池システム、ならびに小規模風力発電システムなどのいわゆる新型電源の分散電源を言うことが多い。

近年、原子力・火力等の大規模電源は、立地上の制約、環境制約などから新設・増設がますます困難となっている。また、これらの大規模電源は、建設か

ら運開まで長時間を有することから、電力需要の変化に柔軟に対応できない恐れがある。一方、分散電源は立地箇所を選ばず、送電コストの低減、建設工期の短さ、さらには太陽光発電や風力発電などは、自然エネルギーの有効利用が可能であるといった利点もある。

このようなことから、技術開発による設備価格の低下や高効率化、需要家の省エネルギーへの関心の高まり、設置条件に対する法的規制緩和、ならびに政府援助の拡大の後押しを受け、太陽光発電システムなどの小規模電源が需要家サイドに設置されるようになってきており、さらに燃料電池等のスケールメリットのあまりない小規模電源も事業用分散型電源として都市部の変電所に設備されつつある。分散電源は既存の大規模電源を補完する役割を持つものとして非常に注目され始めており、今後ますますその重要性は増し、その導入が促進されるものと考えられる<sup>[20]~[27]</sup>。

一方、我が国の年負荷率は60%以下となり、危機的状态に陥っていると言える。負荷率改善のため、需要家側制御 (*Demand Side Management*; DSM) により、ピーク負荷の低負荷時への移行や夏期ピーク需要の抑制の努力がなされているが、電力貯蔵技術<sup>[28]~[34]</sup>によりボトム時に電力を貯蔵し、ピーク時に放出してピークシェイピングを行う負荷平準化は、重要で本質的解決の道を与えるものとして期待されている。また、

- ・分散電源が導入された系統の需給バランスの確保
- ・将来起こりうる余剰電力を吸収
- ・系統安定度の向上

など、電力貯蔵装置への期待は大きく、多くの研究が行われている<sup>[35]~[43]</sup>。現在、二次電池電力貯蔵装置が実用に近づき、また小規模超電導電力貯蔵装置が開発されるなど、無停電供給や局所的負荷均等化の目的でこれらの設備が配電用変電所に分散配置されることも検討されている。

このような技術的發展を背景として、将来、配電系統へ多数の分散型電源や電力貯蔵装置が設備されることが予想されており、法的準備も進められている(系統連系技術要件ガイドラインの整備など)。しかしながら、これまでの電力システムは電力の発生地から需要地までの一方向の電力の流れのみを考慮して設計・運用されており、系統の末端である需要家サイドに不特定多数の分散電

源や電力貯蔵装置がある場合、現状の常時開放型配電システムでは、例えば故障時や復旧時の潮流方向を特定できない、需要家端電圧を適切に維持できないなどの様々な問題が引き起こる可能性がある。従って、システムの末端にエネルギー源があることを想定した新しい配電システムの枠組みを構築する必要があるものと考えられる。逆に、需要家に対して小規模電源や電力貯蔵装置の設置をより促進するためには、装置自身のコストダウンもさることながら、このような小規模エネルギー源を安心して設置できる新しい配電システムを構築することが重要である。

このような次世代の配電システムは、電力供給者から需要家に一方向に電力を"配る"のではなく、需要家側からの電力潮流を有効利用し、ネットワーク中を自由方向に電力を"流通させる"ことが必要であり、「配電システム」というより、むしろ「電気エネルギー流通システム」、あるいはコジェネレーションシステムの地域熱併給も含めてもっと幅広く「総合エネルギーサービスシステム」などと呼ばれる方が適切かも知れない。

### <1.2.3> 需要家ニーズの多様化

我が国の電力品質に関する法的規制は、最終の需要家端の100Vおよび200Vの電圧(表1.1.)、および周波数に関する記述にとどまっておき、停電回数や停電時間などに関しては特別の規制はなく、これまでの電気事業は、この供給信頼度の向上に力を注いできた。しかしながら、我が国において電気事業の供給しているサービス品質(供給信頼度等)は非常に高水準になっている感がある。

表1.1. 電圧の範囲

標準電圧	維持すべき範囲
100V	101Vの上下6Vを超えない値
200V	202Vの上下20Vを超えない値

近年、コンピュータやそのネットワーク化による情報通信機器や制御器利用の普及は、都市部を中心に需要家が受けとる電力品質に対し、極めて高い品質が要求されている。また、供給信頼度の一層の向上に加えて瞬時電圧低下や高調波などといった波形品質の向上も要求される。一方、一部の照明や加熱などの用途では、その品質よりも価格の方が優先されるものと考えられ、電気利用の多様化は品質と価格の異なる組み合わせサービス(いわゆる多品質電力供給サービス)の潜在需要に結びつくものである<sup>[45]~[56]</sup>。

また、エネルギー間競争において、従来、価格面での競争が弱いとされてきた電力も、近年はガスや石油利用の自家発、コジェネレーションシステムとの競争が激しく、このようなエネルギー競争環境下での一律な品質向上は電気事業経営にとって必ずしも得策であるとは言えないだろう。

近年、需要家の電力品質に対するニーズの多様化を考慮して、負荷遮断サービスやプライオリティーサービスなどといった電力品質とその価格とが異なる電力の供給方式も検討されている<sup>[57][58]</sup>。さらに、米国を中心に顧客に対して電力の品質(広い意味での品質、波形品質を含む)<sup>[48][59][60]</sup>を個別にプレミアムとして販売するといった考え方(多品質電力供給: Unbundled Power Quality Service)もでてきている。これらの多品質電力供給は現行の配電システムではシステム的に実現が困難であると考えられ、つまり、多品質電力供給の実現に際して、双方向の情報のやり取りが可能な高機能通信ネットワークを備え持つ次世代電力供給システムを構築する必要がある。こうした多品質電力供給を実現する具体的方策として、Custom Power Park構想<sup>[48][59]</sup>や本論文でその詳細を検討するFRIENDSと呼ばれる、分散電源・電力貯蔵技術、パワーエレクトロニクス技術を応用した新しい電力供給形態が提案されている。また、電力品質と価格とが異なる電力供給方式に対する透明性が高く、かつ合理的な料金体系を開発することも極めて重要である。

#### <1.2.4> 配電自動化技術ならびに関連技術の動向

配電システムは、需要家に直接電力を供給する役割を担っており、極めて地

域密着性の強い性格を持っている。従って、配電設備は需要家個々の電力ニーズに応じて柔軟に電力供給を行うとともに、様々な地域社会の環境に調和したシステムが必要となる。特に、近年の電力需要の地域的かつ時間的遍在化や情報社会への変貌等の現象は、今後にもましてその傾向が強まるものと考えられ、配電システムにも量・質の両面から高度な対応が求められている。

今後ますます巨大化する配電設備に対して、設備形成面での拡充・改良のみならず、電力システムの保守・運用面においても自動化の推進による供給信頼度の一層の向上、設備運用の高効率化、保守の省力化、業務の合理化を図ることが求められ、今日では幾多の配電自動化システムの構築や展開が全国で進められている<sup>[61]~[65]</sup>。

配電自動化は、表1.2.にあるような配電システムの監視制御 (*Supervisory Control and Data Acquisition; SCADA*) と操作の自動化が主たる機能であり、国内ではほぼ完了しつつある。これらは、近年発展してきた地図情報作成/設備管理—地理情報システム (*Automated Mapping/Facility Management-Geographical Information System; AM/FM-GIS*) によって、さらなる高機能化が期待される<sup>[66]~[69]</sup>。

また、さまざまな産業の規制緩和、ならびに高機能な情報処理・情報通信技術の発達に伴い、配電自動化は従来の設備運用の自動化ばかりでなく、顧客サービス機能が付加されたものになっていくと期待される。すなわち、顧客からの苦情解析や料金不正検出付自動検針に加えて、双方向顧客情報サービスなどが付加されることなどが考えられる。この双方向サービスには、自動検針、停電・事故状況表示、DSM<sup>[70]</sup>などの電力供給に関するサービスの他に、顧客との情報交換や、ロードサーベイ結果を用いたホームオートメーション住宅のエネルギー利用制御や保守制御などの付随的なサービスも十分可能である。

また、半導体デバイス技術の進歩により、大容量・低価格なパワーエレクトロニクス電力変換器も開発されてきている<sup>[71]~[76]</sup>。さらに、高機能情報通信・情報処理技術の発展に伴い、将来の配電システムには、強力な情報通信ネットワーク<sup>[68][69]</sup>が併設されることが容易に予想でき、そのネットワークを使ってより柔軟な需要家サービスを行うことが可能となるであろう。こうした技術的発展を背景に、次世代の電力流通・電力輸送技術が展望されており<sup>[77]~[79]</sup>、将来の新しい配電システムを構築するための技術的要素は徐々に整いつつある。

表1.2. 配電自動化システムの機能

機能	処 理 概 要
系 統 監 視	変電所情報(CB、リレー)と開閉器情報により配電系統の状態を監視
状 態 把 握	時々刻々の電圧・電流・CB・開閉器の状態を把握
系 統 操 作	
・ 事故時操作	事故発生時の健全区間に対する自動融通操作
・ 作業計画操作	配電系統の作業に伴う事前系統切り替え(戻し)計画と操作
・ 個別操作	任意フィーダCB・開閉器の個別操作
保守・安全	系統設備の新設・変更・撤去データの更新
記 録	事故操作記録、負荷記録、作業停電操作表などの各種帳票の出力
配電経路図表示	配電線の色別表示、縮尺街路図対応表示など
事故情報伝送	営業所への事故情報伝送

監視制御規模：通常、変電所数 20～100  
 配電線数 200～1000  
 遠制開閉器数 1000～10000

### 1.3. 新しい電気エネルギー流通システム

前節で述べたように、現在、電気事業ならびに電力システムは大きな転換期を迎えている。規制緩和後の将来の電力システム、とりわけ、需要家に直接電力を供給する役目を担う配電システムは、これまでも増して需要家サービスを重視した考え方、システム作りをしていかなければならない。多種多様な需要家のニーズに高い柔軟性と信頼性を確保して対応できるとともに、需要家との双方向な情報サービスができる特性をも兼ね備える必要がある。

こうした背景から、次世代を見据えた新しい高機能な電気エネルギー流通システムの枠組みを構築する必要があるとの認識を世界の研究者が持つようになってきている。すなわち、規制緩和後の将来の電力流通システムとして、様々

な装置を利用して柔軟に系統構成を変更したり、供給信頼度の高い電力や波形品質の面でも優れた電力、さらには高度情報化により付加価値をつけたりする電力輸送形態の実現に関して、世界的に様々な議論がなされている。例えば、CIGRE(国際大電力システム会議) S.C.14(HVDC links & AC power electronics equipment)の中では、パワーエレクトロニクス技術を配電システムに積極的に取り入れ、電力品質の向上を目指すCustom Power Systemに関する作業部会(W. G.14.31)が、1999年に報告書を出すべく活動している<sup>[60]</sup>。なお、Custom Powerの機能を簡潔に整理すると、表1.3.のようになる。また、Westinghouse社(現Siemens USA)ではUnbundled Power Quality Service(多品質電力供給)を実現すべく、"Custom Power Park"<sup>[48][59]</sup>と呼ばれる新しい設備を提案している。国内に目を向けると、関西電力では高度なD.S.M.と顧客サービスの向上を目指し、"顧客系双方向情報通信ネットワークサービス"<sup>[68]</sup>を提案しており、東北大学の研究グループでは主として基幹システムを対象とし、小規模分散電源が既存の大規模電源と共存しながら電力供給の場に参入できるための新しい電力ネットワークの構想："開放型電力ネットワーク(Open Electric Energy Network; OEEN)"<sup>[36]</sup>を提案している。また、茨城大学 奈良教授、北海道大学 長谷川教授らは、次世代の望ましい電力流通システムの一形態として、「高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システム(Flexible, Reliable and Intelligent Electrical eNergy Delivery System; FRIENDS)」<sup>[1]~[7]</sup>の概念を提案した。FRIENDSの概念では、電力改質センター(Quality Control Center; QCC)と呼ばれる全く新しい設備を需要家近傍に設置し、分散電源・電力貯蔵装置技術、需要家側制御技術、パワーエレクトロニクス技術、高度な情報処理ならびに情報伝送技術を駆使することによって、需要家に対し多品質電力供給が可能であるとともに、高機能なDSMや顧客サービスの向上を果たすことができることを想定している。

表1.3. Custom Powerの機能<sup>[2]</sup>

機 能	説 明
信 頼 性 維 持	顧客との契約による停電頻度・停電時間制御・管理
契 約 品 質 維 持	顧客との契約品質の維持のモニタ・制御
高 調 波 抑 制	フィルタなどによる高調波の抑制
電 圧 制 御	過電圧・低電圧・瞬時電圧低下・フリッカ防止
そ の 他	不平衡抑制・搬送波の影響抑制・直流供給など

#### 1.4. 本論文の位置づけと構成

前節までに、規制緩和の流れの中で電気事業・電力システムが直面している様々な問題について説明し、将来を見据えた新しい電気エネルギー流通システムを構築することが必要とされていること、ならびにFRIENDSの概念が提案されるに至った背景を明らかにした。FRIENDS構想は次世代の望ましい電力流通システムの一形態として世界の研究者からの関心も高くなり始めていおり、早急にその実現が望まれているが、その基本的アイデアが提案されてからまだ日も浅く、実際的な実現方法やその効果が具体的に検討されている段階にない。FRIENDS構想を実現するためには、その中核的存在を担う電力改質センターという新しいシステムの具体的な内部構成を明確にするとともに、それらの制御性能・能力を定性的かつ定量的に評価することが必要である。本論文はこうした現状を踏まえ、FRIENDS構想の実現に関する基礎研究として、FRIENDSの概念をより明確にするとともに、FRIENDSの最も特徴的な電力改質センターの具体的な内部構成を構築することを目的として検討を行っている。

本論文は6つの章と付録により構成されており、全体的な各章ならびに付録の関連図は図1.2.のようになる。まず、第1章は序論であり、本論文の背景ならびに本論文の位置づけについて述べた。第2章では、これまで提案されているFRIENDS構想の概念に加え、本論文によってより明確にしたFRIENDSの全体像について論じる。第3章では、電力改質センターの具体的な内部構成が定性的

に提案しており、第4章では、将来の電力システムの中でキーアイテムとなるであろう電力貯蔵装置について焦点を絞り、FRIENDSにおける電力貯蔵装置の役割が論じる。第5章は実現性の高い電力改質センターの内部構成モデルに対し、電磁過渡解析プログラムにより瞬時値レベルにおいて解析する。最後に第6章は結論であり、本論文で得られた知見がとりまとめている。以下に、各章の概要を示す。

第2章では、これまでに提案されているFRIENDSの概念に加え、本研究によってより明確にしたFRIENDSの全体像について説明している。FRIENDSの概念は現行の配電システムとは全く異なる発想に基づくシステム構成であるため、FRIENDSのシステム構成を現行の配電システム構成と比較し、FRIENDSの持つ機能や特徴を整理するとともに、FRIENDSの目的とするところを述べる。さらに、FRIENDSの中で最も重要な役割を果たす電力改質センターについて、それがFRIENDSの目的を実現するために果たすべき役割と、多品質電力供給の観点から電力の品質について論じる。本章により、これまで基本的概念として提案されているFRIENDSシステムを、第3章以降で具体的に論じることが可能となる。

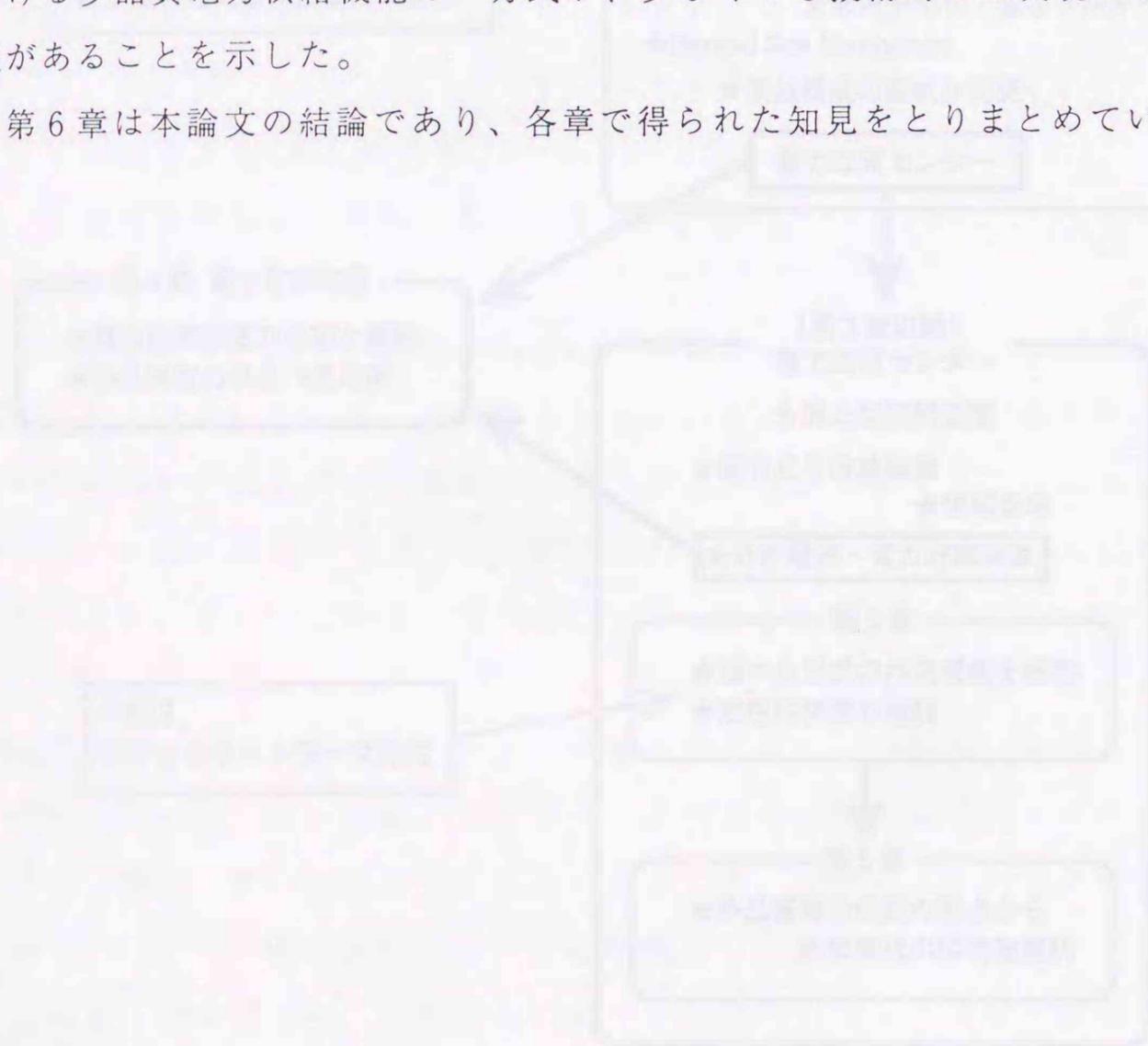
第3章では、FRIENDSの中核的存在である電力改質センターの内部構成として具体的にどのような形式があり得るのかを明確にするために、電力改質センターをいくつかの主要部分に分割し、それらに対して考えられ得る数種類の内部構成をスケルトンレベルで提案している。さらに提案した構成について経済性、規模、実現可能性などの特徴を定性的に検討する。本章の結果は、より実際的な電力改質センターを設計・構築するための基礎となるものである。

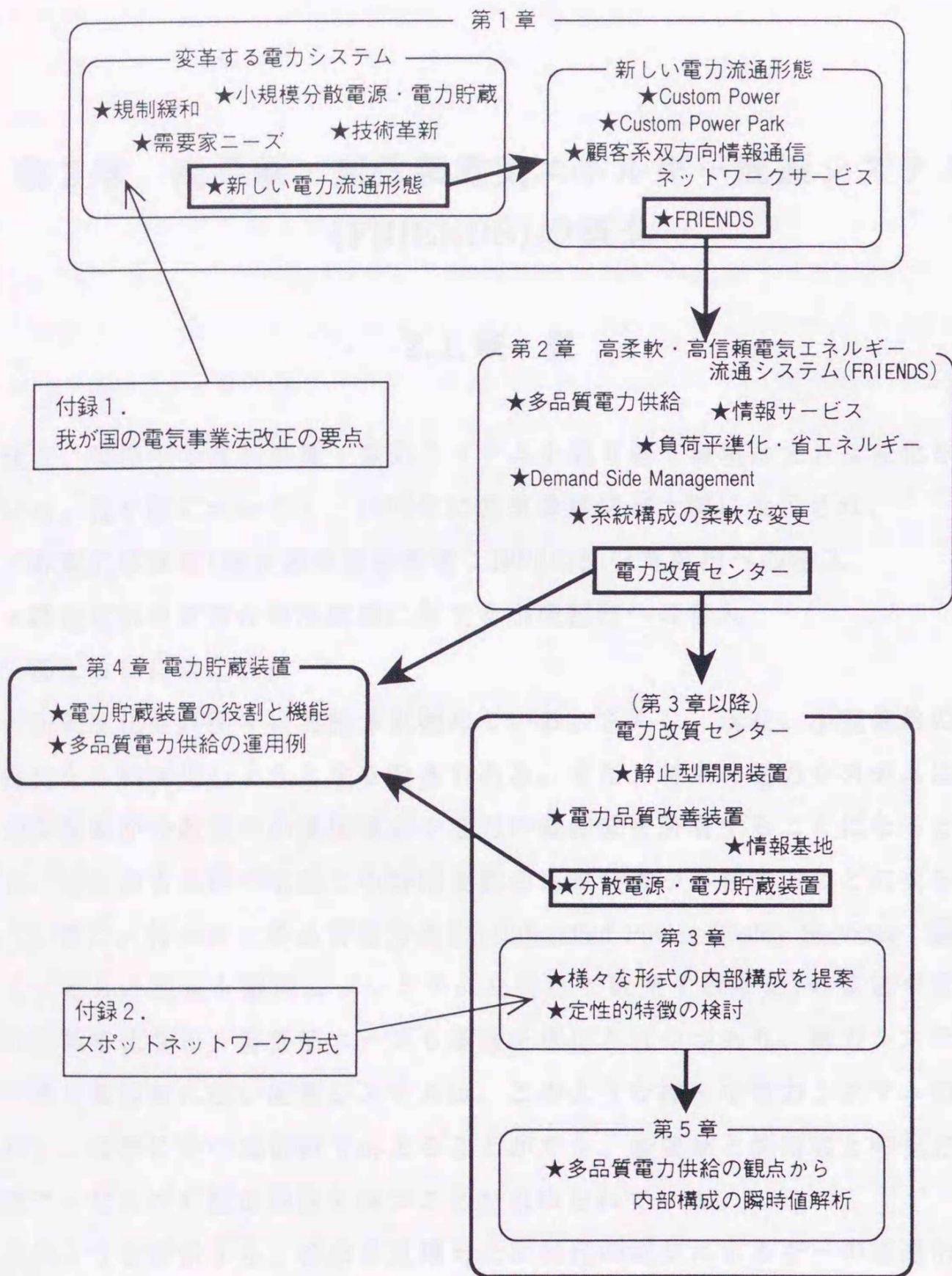
第4章では、将来の電力システムにおいて重要な機能を果たすと期待されている電力貯蔵装置に焦点を絞り論じている。まず、FRIENDSシステムの中に分散配置された種々の電力貯蔵装置が果たすべき機能を列挙し、どの種類の貯蔵装置がその機能を果たすのに適しているかについて定性的に検討する。この結果より、FRIENDSにおいてその重要性こそ認識されていたが、これまで概念的にしか考えられていなかった電力貯蔵装置の果たすべき機能や役割がより具体的に考えることができる。さらに、電力貯蔵装置の効果的な運用方策の一例として、FRIENDSネットワークに分散配置された電力貯蔵装置について、多品質

電力供給が実現可能な運用アルゴリズムを開発し、負荷平準化や線路損失低減の効果を評価する。

第5章では、電力改質センターの多品質電力機能について詳細に検証を行う。すなわち、最も実現性が高いと考えられる一つの具体的な電力改質センターの内部構成モデルを想定し、電磁過渡解析プログラム(EMTDC)を用いた計算機シミュレーションによって、msecオーダーの時間領域で電力の波形品質を瞬時値レベルで解析する。特に力点を置いたところは、電力改質センター内における電力品質の制御方式、ならびに需要家への品質別電力の供給方式の評価であり、電力改質センターが多品質電力供給を行うとき、実際の電圧電流波形にどのような影響が現れるかについて検討する。本章の結果により、FRIENDSにおける多品質電力供給機能の一方式が、少なくとも技術的には実現できる可能性があることを示した。

第6章は本論文の結論であり、各章で得られた知見をとりまとめている。





付録1.  
我が国の電気事業法改正の要点

付録2.  
スポットネットワーク方式

図1.2. 各章および付録の構成

## 第2章 高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システム (FRIENDS)の概念

### 2.1. 概 要

現在、世界中で電気事業・電力システムを取り巻く環境は大きな変化を見せている。我が国においても、1995年に電気事業法が大幅に改正され、

- ・非電気事業者(独立系発電事業者；IPP)の卸発電部門への参入
- ・特定電気事業者の限定地域に対する小売部門への参入
- ・卸ならびに自己託送

などが制度化され徐々に実施され始めている。さらに、現在、小売供給の部分自由化をも制度化しようとする動きもある。また、将来の電力システムは、多くの需要家が分散型の小規模電源や電力貯蔵装置を所有することになると考えられ、いわゆる系統の末端に不特定多数の電源装置が存在することになるであろう。また、将来的に多品質電力供給(Unbundled Power Quality Services：顧客に対して電力の品質を個別にプレミアムを付けて販売する考え)の要望や電気料金の低価格化など、需要家ニーズも多種多様化されつつあり、電力システムの中で最も需要家に近い配電システムは、このような様々な電力システムの変化に対し、柔軟にかつ高信頼で応えることができ、需要家と供給者との双方向な情報サービスが可能な特性を持つことが求められている。

このような背景から、将来を見据えた次世代の電気エネルギーの流通形態が世界的に研究され始めてきている。その一形態として、「高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システム(Flexible, Reliable and Intelligent Electrical eNergy Delivery System; FRIENDS)」の考え方が提案され、世界的に多くの関心を集めている。し

かしながら、このFRIENDS構想は、すでにその基本的概念は提案されているが、FRIENDSを実現するためには、FRIENDSシステムの具体的構成ならびにその制御・運用方策、さらにはFRIENDSの実現可能性などについて、定性的かつ定量的に検討する必要がある。

そこで、本章ではこれまでに提案されているFRIENDSの概念に加え、本研究によってより明確にしたFRIENDS構想の全体像について説明する。まず、2.2.節において次世代の電力流通システムであるFRIENDSの目的とするところを説明し、2.3.節では、FRIENDSのシステム構成を現行の配電システム構成と比較し、FRIENDSの持つ機能や特徴を整理する。さらに、2.4.節では、FRIENDSの中で最も重要な役割を果たす「電力改質センター(*Quality Control Center*; QCC)」について、FRIENDSの目的を実現するために、電力改質センターが果たすべき役割と、電力の品質について論じる。本章により、これまで基本的概念のみが提案されているFRIENDSを、第3章以降で具体的に論じることが可能となる。

## 2.2. FRIENDSの目的

規制緩和後における将来の電力流通システムは、従来の配電システムのような電力供給者から需要家への一方向の電力流通のみを取り扱うシステムではなく、将来に起こるであろう様々な電力システムの変化に対し、柔軟にかつ高信頼で応えることができ、需要家と供給者との双方向な情報サービスが可能な特性を持つことが求められている。このような背景を踏まえ、FRIENDSは、従来から国内外で個別に検討されていた配電システムの自動化・近代化、並びに省エネルギー方策などの話題を統合し、システムに柔軟性および高信頼性を持たせたところに特徴がある全く新しい概念であり、需要家のすぐ近くに「電力改質センター(*Quality Control Center*; QCC)」の概念を挿入することによって、次に挙げる項目を実現することを目的として提案された次世代の電気エネルギー流通システムである。なお、次節以降でFRIENDSシステムの全体構成ならびに電力改質センターの詳細を明らかにする。

### ①柔軟な系統構成の変更

現行の配電システムは基本的に放射系統を構成し、区分開閉器等は機械式スイッチであるため、それほど頻繁に系統構成は変更されない。しかしながら、将来の電力システムでは、需要家が分散電源等を持つことによって、配電ネットワークに流れる電力潮流は一方向ではなくなるのが予想され、必要に応じて柔軟に配電ネットワーク構成を変更できることが望ましい。FRIENDS構想では、配電用変電所の下位で電力改質センターが高圧あるいは特別高圧の配電ネットワークを構成し、従来の(機械式)区分開閉器を電力半導体デバイスを用いた静止型開閉器、あるいは機械式と半導体式を併用した開閉器にすることによって、比較的自由に配電ネットワーク構成を変更することが可能である。例えば、平常時には損失最小化、迅速な事故除去・復旧など、目的に合わせて電力改質センターが自律的に系統構成を変更することが可能となる。また、点検・補修による作業停電も必要最小限に抑えられることが期待される。

### ②無停電の高信頼電力供給

①で述べたように、事故時でも柔軟に配電ネットワーク構成を変更することによって、電力改質センターは複数の配電用変電所(電源)から受電することができる。また、電力改質センターにも小規模分散電源や電力貯蔵装置などのエネルギー源が設置されるため、基本的には無停電で高信頼な電力供給が可能である。

### ③多品質電力供給

前節で述べたように多種多様化される需要家ニーズに応えるため、多品質電力供給は最も重要な機能の一つである。FRIENDSシステムでは、配電用変電所は電力改質センターにあたかも負荷が集中しているかのように電力を流通させ、電力改質センターから個別負荷に多品質電力供給を行うことを想定している。つまり、電力改質センターに様々な電力品質の改善装置を設置することによって、需要家が望む多様な品質の電力を作り出すことが可能であり、さらに、小売自由化を想定する場合には、

電力改質センターが需要家と情報交換をすることによって、需要家が自由に購入先をも選択できるシステムである。

#### ④電力需要の平準化および省エネルギー

現在、夏期の冷房用電力需要の急増や電化率の向上に伴って、負荷率の低下が著しい。そこで、負荷率改善の対策として近年注目を集めているのが、高効率な電力貯蔵装置の電力系統への導入である。電力貯蔵装置によって負荷の小さい時間に電力を貯蔵し、負荷の大きいときに放出すれば、電力系統にとっては電力需要を平準化することと等価になる。FRIENDS構想では、電力改質センターに分散配置された電力貯蔵装置が、こうした負荷平準化に重要な役割を果たすことになる。このことによって、発電設備の高効率利用、新設増設の繰り延べ、発電機の燃料費や送電損失の減少等、電力システム全体としての省エネルギー化に結びつくものと期待される。ならびに供給予備率も小さくできることが期待できる。さらに、高効率な熱併給型の分散電源によって、電力改質センターが電力と同時に熱をも供給する拠点となる場合には、エネルギー利用全体としての省エネルギー化を図ることができるとも可能性がある。

さらに、電力改質センターが需要家のすぐ近くに設置されることから、需要家の持つ太陽光・風力発電システムなどの局所的な微小自然エネルギーを有効に利用することが可能となる。

#### ⑤顧客サービスの向上

将来の電力システムには高度な機能を持つ通信ネットワークが併設される可能性が高い。すでに、一部の電気事業者ではケーブルテレビ(CATV)事業者と協調を図りながら、需要家まで光ケーブルを敷設する計画もある<sup>[69]</sup>。FRIENDS構想では、電力改質センターが情報通信ネットワークの情報処理・情報交換センターとしての役割をも果たすことによって、様々な顧客サービスを向上できることが期待される。これらは、オンライン料金情報や停電情報、自動検針などといった電力供給に関する情報に留まらず、CATV、ホームオートメーション(HA)や、その他の

マルチメディア環境での多目的情報通信サービスを実現することが可能となる。

#### ⑥高度な需要家側制御 (Demand Side Management; DSM)

一般に、DSMとは、電力供給者から需要家側に積極的に働きかけ、電力システム全体ならびに社会全体に最も望ましい需要形態(負荷パターンやその大きさなど)に誘導する計画を立案し、実行することである。電力供給に関する通信ネットワークが十分に発達していない現状では、主として、マスメディアを通じた省エネルギーの呼びかけや省エネルギー技術の提供、さらには季時別料金・負荷平準化のための特別料金などの料金制を利用した間接型DSMである。しかしながら、⑤で述べた強力な通信ネットワークを用いることによって、FRIENDSでは、直接に需要家機器を制御するといった、高度な需要家側制御が可能である。なお、FRIENDSによって実現できるDSMは<2.3.3>で詳細に説明する。

### 2.3. FRIENDSの構成

本節は、次世代の電力流通システムとして有望視されているFRIENDS構想の全体構成について説明する。FRIENDSの構成は、従来の配電システムとは異なる全く新しい発想に基づいている。すなわち、電力改質センターを需要家近傍に設置することによって、様々な機能を実現することが可能となる。従って本節では、まず、<2.3.1>において、現行の配電システムのシステム構成の概要を、特に配電自動化システムに重点をおいて説明し、<2.3.2>において、FRIENDSのシステム構成を現行の配電システムと比較して説明する。さらに、FRIENDSの重要な特徴の一つは、電力供給者-需要家間に設置される強力な通信ネットワークを活用する点である。そこで、この通信ネットワークにより期待される様々な具体的機能を<2.3.3>で述べる。

### <2.3.1> 現行配電システムの構成

現行の電力システムの中で最も需要家の近くに位置する配電システムは、面的に大きく広がる需要家に対し、高信頼な電力供給を行っている。基本的な現行の配電システムは、図2.1.に示されるように樹枝状の系統構成をなす<sup>[81]~[90]</sup>。なお、同図は架空配電方式を示しているが、需要の過密地域や架空線の設置が困難な場所には、高圧地中配電系統が敷設されている。さらに、一部では、本線予備線方式、スポットネットワーク方式やレギュラーネットワーク方式と呼ばれる無停電供給方式<sup>[81][82]</sup>も採用されている。

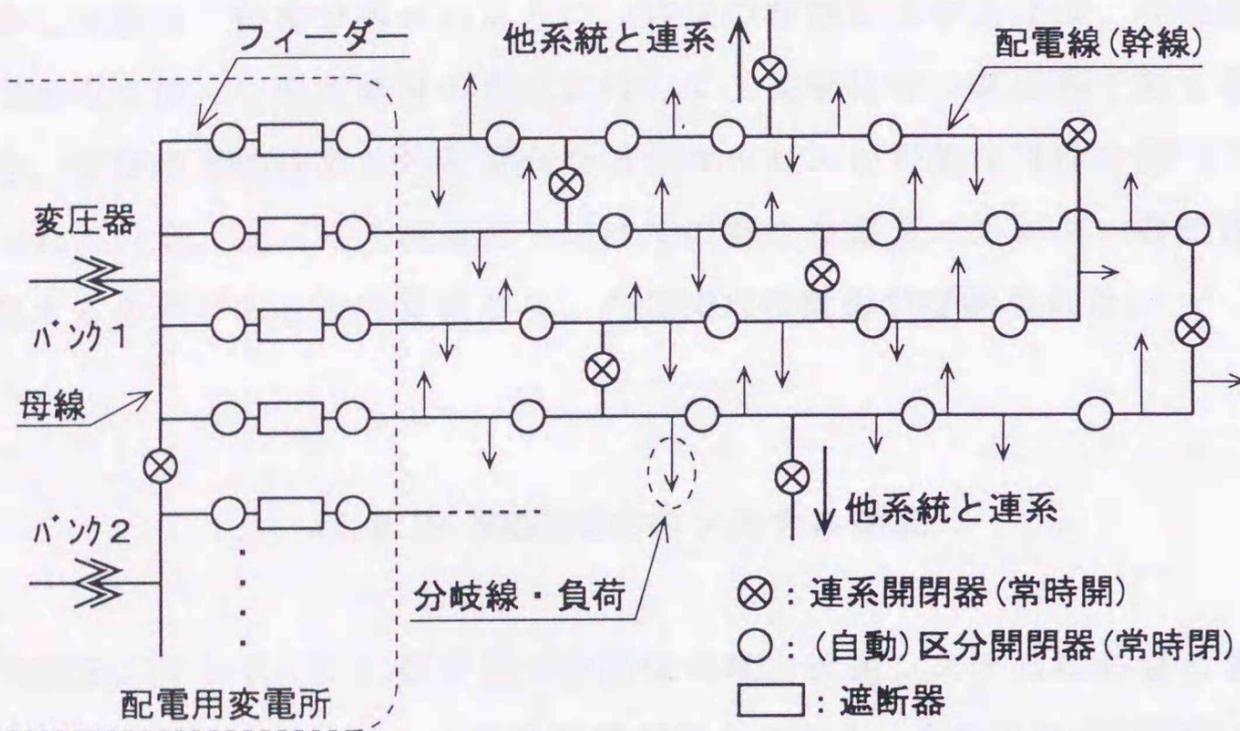


図2.1. 現行の配電システムの概要

前述のように、配電システムは効率的で高信頼な電力供給を行うため、電力各社では設備利用率の向上や停電時間の短縮などを目的とし、積極的に配電自動化に取り組んでいる。配電自動化技術に関しては、これまでに多くの研究成果が報告され、すでに高機能な配電システムの監視制御や操作の自動化が実現されている。この配電自動化により、柱上変圧器に併設される子局と営業所等の親局との間の情報伝送によって自動開閉器のON/OFFを遠方で操作できるという、いわゆる開閉器の遠方制御技術が導入され、配電系統構成の迅速切替えおよび

コンピュータを活用した系統運用が可能となった。このため、事故時には隣接配電線だけでなくさらに周辺の配電線も切替えの対象とすることができ、隣接配電線の負荷が多い場合には、その負荷の裕度を周辺の配電線にいったん振り替える多段切替えも適用されている。これに伴い、現行の配電線の常時稼働率は非常に高くなっている。電力システムの中において、配電システムでの損失は全体損失の60~70%をしめると報告されており、配電自動化を使って、その損失を最小にするための最適な系統構成決定手法の研究も、多くの研究者によって各所で盛んに行われている<sup>[91]~[94]</sup>。さらに、配電自動化によって、配電線の事故検出・除去・復旧も迅速に行うことができ、電力供給の信頼度向上要請への効率的な対応を図っている。

しかしながら、前章で述べたように、将来の配電システムには、将来起こり得るであろう様々な電気事業の変化に対して、柔軟にかつ高信頼で応えることができ、需要家と供給者との双方向な情報サービスが可能な特性を持つことが求められている。従って、次世代へ向けての新たな電気エネルギーの流通形態を構築する必要があるとの背景から、FRIENDSの概念が提案された。

### <2.3.2> FRIENDSのシステム構成

FRIENDSに限らず、2.2.節で述べた将来の電力流通システムに必要とされる機能を果たすためには、様々な実現形態が考えられる。その中でFRIENDSでは、現行の配電用変電所よりもさらに需要家に近い場所に(現在の配電線の一区間ごと、配電塔ごと、大規模工場やビルごとや集合住宅ごとに)"電力改質センター"を設置することによって、システムに柔軟性ならびに高信頼性を持たせる形態を提案している。

FRIENDSの全体イメージ、および都市部を念頭においた配電ネットワーク構成の一例は、それぞれ図2.2.、および図2.3.のように示すことができる。つまり、FRIENDSと現行の配電システムとの最も大きな相違点は、図2.2.ならびに図2.3.に示されるように、電力改質センターが配電用変電所の下位で高圧あるいは特別高圧の配電ネットワークを構成するというところにある。すなわち、

FRIENDSの電力供給形態は、現行の配電システムのように、放射状高圧配電線に沿った柱上変圧器から需要家に単一品質の電力を供給する方式ではなく、電力改質センターが配電ネットワークのノードの役割を果たし、あたかも電力改質センターに負荷が集中しているかのように電力を流通させ、電力改質センターで多様な品質の電力を作り出し、需要家の望む多品質電力を供給する電力流通方式である。

また、電力改質センターには適切容量の電力貯蔵装置や分散電源が設備され、需要家の不規則な負荷変化を吸収する役割を果たす。すなわち、上位系から見ると、各電力改質センターには、それぞれある程度予測可能なスケジュール的な負荷が集中して存在していることになる。上位系統は、このような不規則性の少ない電力改質センター群に電力を流通させることになるため、不確定要素が少ないことを仮定して効率的な計画・運用が可能になるものと期待される。

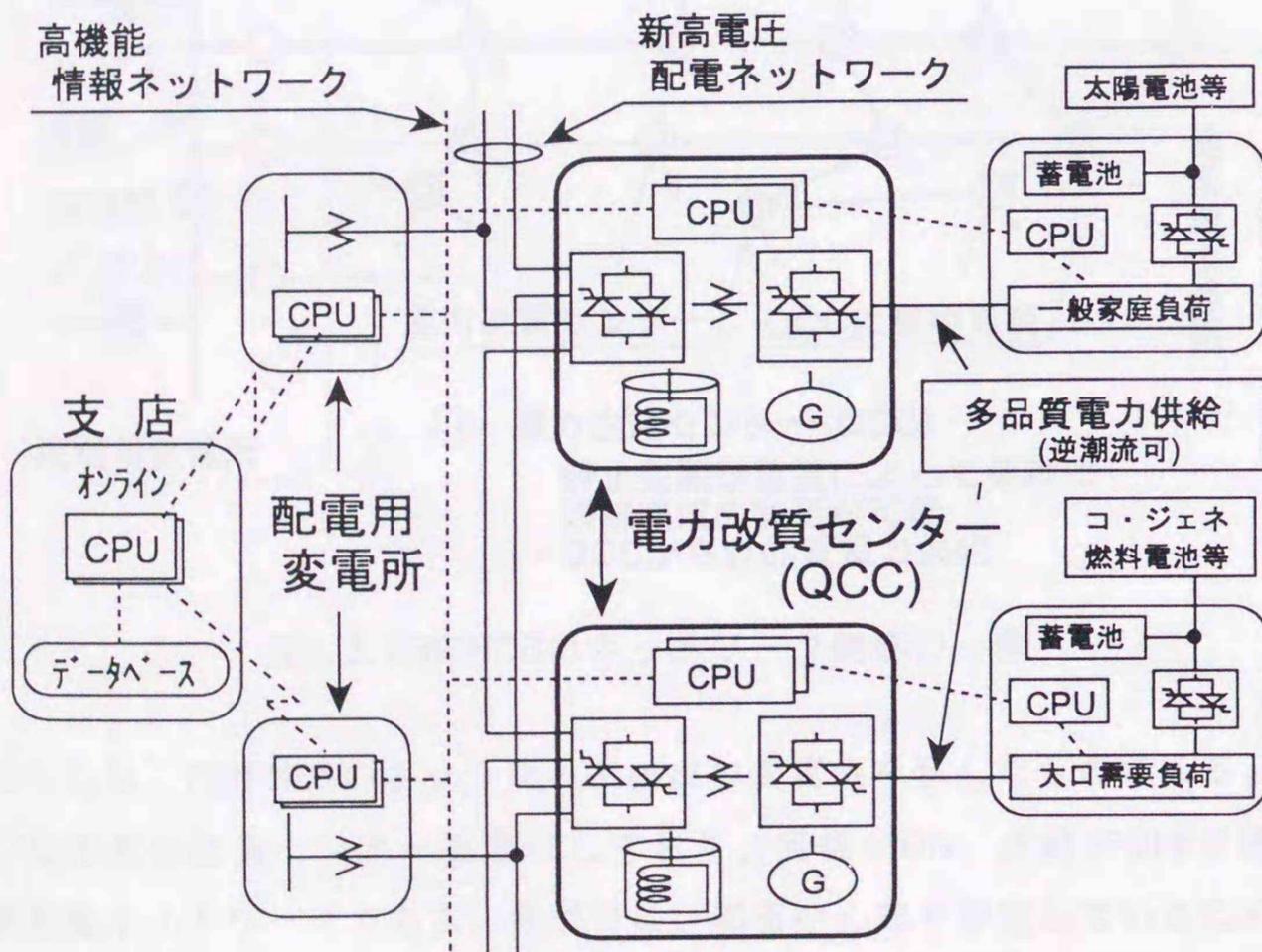


図2.2. FRIENDSの全体イメージ

図2.3中の◎印が電力改質センターを意味しており、全ての電力改質センターには複数の高圧配電線が接続されている。ただし、高圧配電ネットワークは全ての配電線が通電状態である必要はなく、各々の電力改質センターに設置される静止型開閉装置により、電力流通ネットワークの構成を柔軟に変更することが可能である。また、電力改質センターに適切な電流遮断機能を持つ開閉装置を設置すれば、配電用変電所内のフィーダー遮断器を省略できる可能性がある。もちろん、図2.3.はあくまでもネットワーク構成の一例であり、実際のFRIENDSにおける配電ネットワークは、設備コストや損失最小化などの観点から最適な構成が決定されることになる。

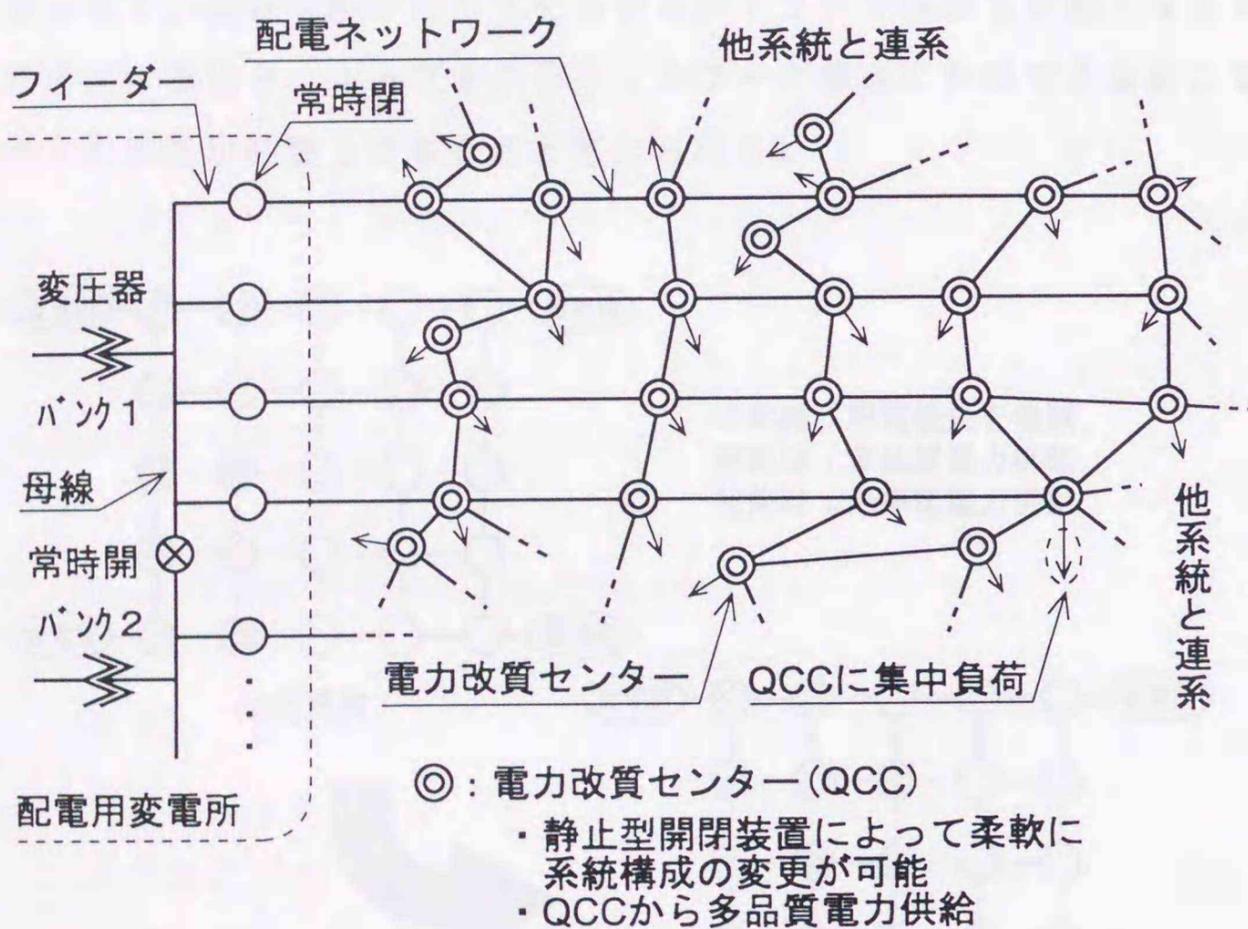


図2.3. FRIENDSのネットワーク構成の一例

図2.4.は、FRIENDSのネットワーク構成の変更例を示したものである。図中の○印が電力改質センターを意味しており、実線がON、点線がOFF状態の高圧側配電ネットワークである。同図では、都市中心部を想定しているため、この配電ネットワークは格子状を形成しているが、必ずしもこのような格子状で

ある必要はない。各々の電力改質センターには静止型開閉装置が設置され、ネットワーク構成を柔軟に変更可能である。平常時には、電力負荷のバランスによって、ネットワークにおける電力損失が最小となるように構成を変更するべきであり、事故時には多品質電力供給が可能となることを目的として速やかに系統構成を変更しなければならない。また、配電ネットワーク構成を自由に操作できるため、補修や点検のための作業停電は必要最小限に留めることができる。なお、現行の配電システム構成や図2.4.の例では、配電ネットワークは放射状を基本として形成されているが、電力改質センターに高速かつ高機能な限流装置(例えば、半導体型、超伝導型の限流装置)を設置することによって、事故時の短絡電流を容易に抑えることができ、必ずしも放射状系統を基本に考える必要はなく、変電所間のループを含むネットワーク構成も可能となるであろう。そのような場合、ループを含むネットワーク構成に対処できる新たな保護システムの開発が必要となるものと考えられる。

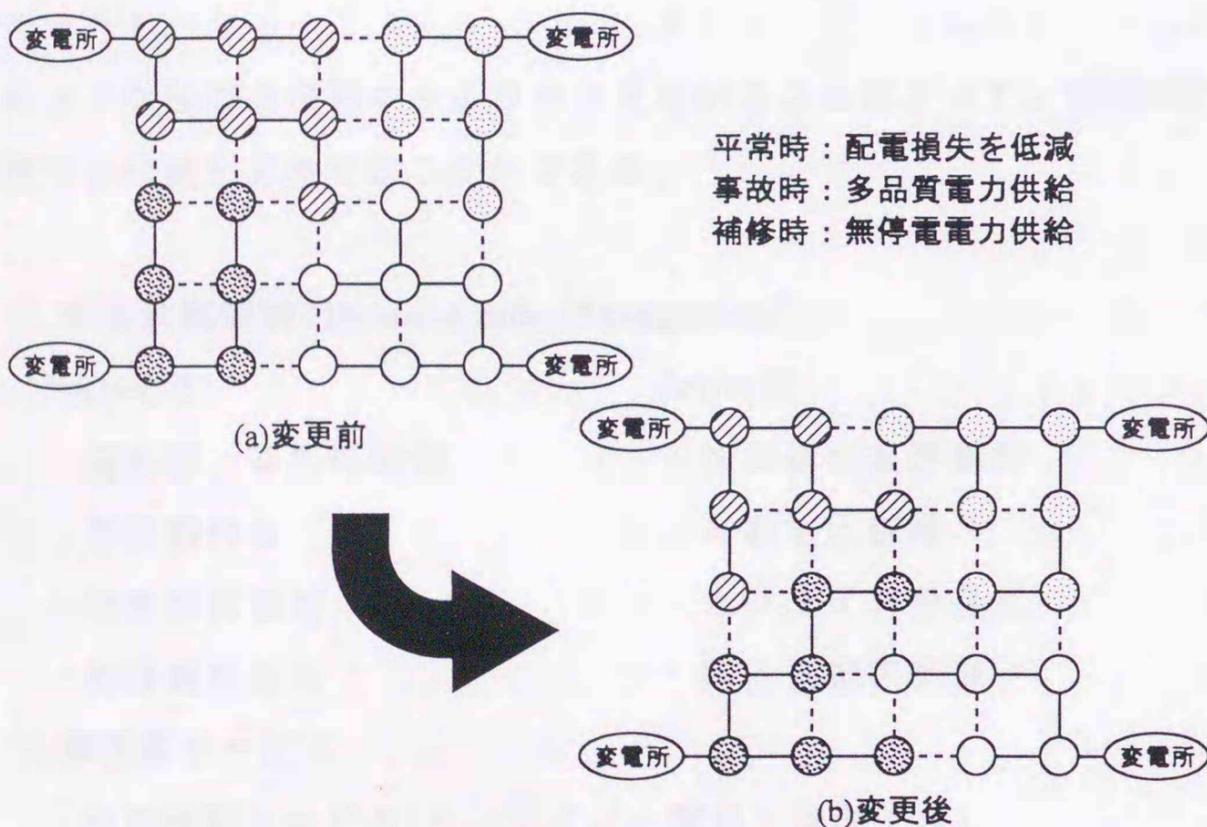


図2.4. FRIENDSのネットワーク変更例

### <2.3.3> FRIENDSの情報ネットワーク

FRIENDSの重要な特徴の一つは、電力供給者と需要家間に設備される強力な情報ネットワークを活用する点である。電力改質センターは需要家に最も近いという利点を利用し、この情報ネットワークにおける情報処理並びに情報交換センターの役割も果たさなければならない。電力改質センター内の開閉装置やその他の機器・装置の操作・制御・保護、および需要家側制御は、支店等に設置される制御用計算機と配電用変電所や、電力改質センターおよび需要家側のコンピュータの連携によって、グローバルな視点から行われつつ、場合によっては電力改質センターが自律的に行動する分散処理体系にもなるものと思われる。これらの用途に用いられるデータは、運用・保守・マッピング・料金計算などの電力流通システムの管理・運用・制御を統合したデータベースとして一元的な管理がなされることになる。当然、この情報ネットワークは、電力供給に関する情報提供・情報交換に止まらず、高度な顧客サービス<sup>[68]</sup>にまで結びつくものである。

このような強力な情報ネットワークを用いることによって、FRIENDSは以下に整理する機能を実現することができる。

#### (1) 需要家側制御 (Demand Side Management)

##### Possible型

- ・ 温水器、蓄熱器制御
- ・ 季特別料金
- ・ 時間帯別契約
- ・ 負荷調整契約

##### Active型

- ・ 機器運転直接制御
- ・ 自動電圧制御
- ・ オンライン料金制
- ・ 購入先選択制御

#### (2) 需要家サービス

- ・ 停電情報サービス (オンライン・警報・長期予定)
- ・ 電力品質の選択
- ・ オンライン情報制御
- ・ 自動検針
- ・ 逆潮流制御
- ・ 高調波制御
- ・ 通信サービス
- ・ 情報提供サービス
- ・ CATV、インターネット

### (3) 大口需要家に対する機能

- ・ 熱・電力管理
- ・ コジェネ運転管理
- ・ 逆潮流制御
- ・ テナント負荷計測
- ・ テナント料金計算
- ・ 空調制御
- ・ 照明制御
- ・ 購入先制御

### (4) 一般家庭に対する機能

- ・ 小規模発電制御
- ・ 家庭負荷制御
- ・ 電力使用アドバイス
- ・ ホームオートメーション
- ・ 逆潮流制御
- ・ 料金表示
- ・ 購入先制御

## 2.4. 電力改質センターの役割と電力の品質

これまで述べてきたように、FRIENDS構想は、電力改質センターと名付けた新しい電力設備を需要家近傍に設置することによって、将来起こりうる様々な電力システムの変化に柔軟に対応できる次世代の電力流通システムの概念である。しかしながら、FRIENDSは、まだその基本的なイメージが提案されているだけであり、電力改質センターの果たすべき機能や、その詳細な内部構成は確立されていない。そこで、本章では、<2.4.1>で、FRIENDSの目的を実現するために、電力改質センターが果たすべき機能を明確にする。また、FRIENDSの最も重要な機能の一つに、多品質電力供給がある。ここで、議論となるのが、電力品質の定義であるが、いまのところ、電力の品質に関して、世界的に統一された見解はない。そこで、<2.4.2>では、電力品質に関する様々な議論を整理し、本論文で考えている電力品質について論じる。

#### <2.4.1> 電力改質センターの役割

FRIENDSの様々な機能を実現するために、電力改質センターでは、以下の役割を果たす必要がある。

##### (1) 多品質電力供給機能

FRIENDSの最も重要な機能である多品質電力供給を実現するためには以下に示す能力を持つことが必要である。

- a. 配電ネットワーク構成の変更、分散電源・電力貯蔵装置の適切な運用、あるいは負荷遮断を適切に組合せ、少なくとも無停電電力供給が可能であること。
- b. 電力に関する波形品質 (*harmonics, flicker, phase unbalance, ringing waves, impulse, voltage sags and swells, momentary outage, etc.*) を改善できること。
- c. 直流配電など需要家の要望に柔軟に応え得ること。

##### (2) 逆潮流制御機能

第1章でも述べたように、将来の電力システムは多くの需要家が太陽光発電システムなどの小規模分散電源を所有することになる。不特定多数の需要家が自由に逆潮流(需要家から電力供給者への電力潮流)を行うためには、需要家に近い電力改質センターにおいてその逆潮流を適切に管理・制御できることが望ましい。従って、以下に示す方式および装置の開発が必要である。

- a. 逆潮流が可能な保護方式。
- b. 低価格・大容量系統連系用変換装置。
- c. 需要家側分散電源あるいは電力貯蔵装置の適切な制御方式。

##### (3) 電力融通機能やバイパス機能

FRIENDSにおいては配電用変電所の下位にある複数の電力改質センターが高圧の配電ネットワークを形成しており、電力改質センター間の電力融通やバイパスを比較的簡単に行えることを想定している。従って、例えば配電ネットワークに事故が生じた場合にも、電力改質センター間で連携をとり、協調して運

用することによってすみやかに事故に対処できることが必要である。さらに、ネットワークに局所的な重潮流が生じた場合にも、適切に配電ネットワーク構成を変更するなどして、電力潮流をバイパスできる機能を持つ必要がある。

#### (4) 情報処理・情報交換センターとしての機能

近い将来、配電ネットワークには強力な通信ネットワークが併設され、電力供給者は需要家との双方向情報通信が可能となるであろう。不特定多数の需要家に多様な情報サービスを提供するためには自律的かつ分散型の処理体系が必要であり、需要家の最も近くに位置する電力改質センターはその情報処理・情報交換センターとしても重要な役割を果たさなければならない。

#### (5) その他：電圧調整機能・故障電流限流機能など

次に、これまでに考えられている電力改質センターの内部構成の一例を図2.5.に示す。電力改質センターは供給信頼度の向上を図るため複数の配電線と接続され、静止型開閉装置により自由に配電ネットワーク構成を変更することができる。また、多品質電力供給やその他のFRIENDSの様々な機能を実現するため、適切容量の分散型電源・電力貯蔵装置や電力品質の改善装置が設置されることになる。また、ネットワーク保護ならびに電力改質センターおよび需要家保護のため、FRIENDSネットワーク(NW)プロテクタおよびQCCプロテクタと名付けた新しい保護装置も電力改質センターに設備されることとなるが、その詳細はまだ検討されておらず、電力改質センターを実現するためには解決すべき課題は多く残されている。もちろん、図2.5.の構成は数ある電力改質センターの内部構成の一例であり、この構成に固執して考える必要はない。様々な需要家の要求(品質別電力の種類、大きさや経済性)などによって、電力改質センターの果たすべき役割が異なり、それに伴い適切な電力改質センターの内部構成があるものと考えられる。

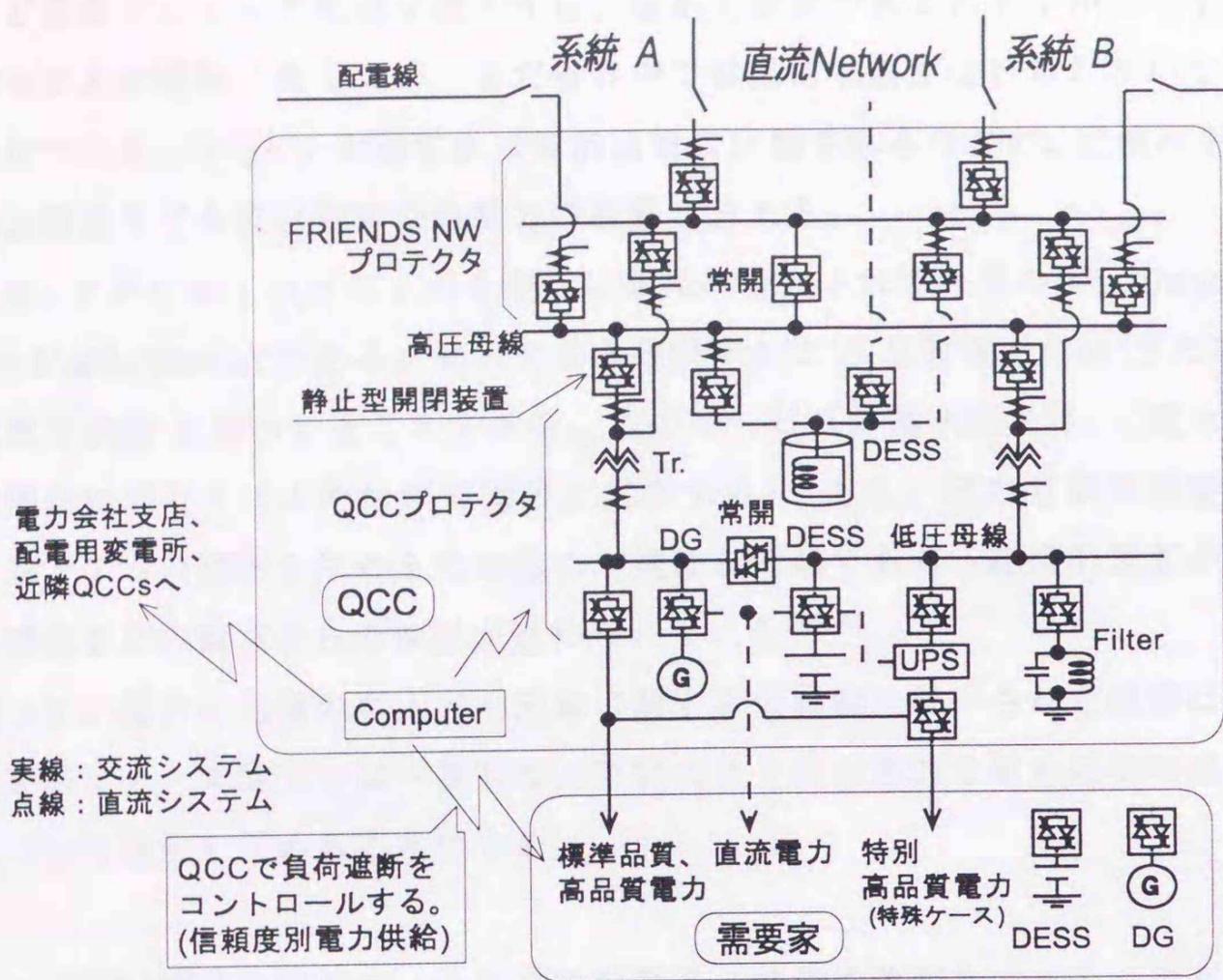


図2.5. 電力改質センターの内部構成例

#### <2.4.2> 電力の品質

電力の品質の考え方や定義に関しては、様々な意見があり、いまだ世界的に統一された見解はない。このような状況から、CIGRE(大電力国際システム会議)では、1996年から"Custom Power"に関する作業部会(W.G.14.31:"CUSTOM POWER SYSTEMS")、1997年には電力品質に関する作業部会(W.G.37.28:"QUALITY OF SUPPLY ---CUSTOMER REQUIREMENTS")が設置され、「電力の品質」に関して様々な議論が交わされている<sup>[79]</sup>。また、ITIC(*Information Technology Industry Council, U.S.A.*)では、情報処理機器に影響を及ぼす波形品質の劣化の範囲をITI(CBEMA) Curve<sup>[60]</sup>として一つの指針を与えている(ただし、単相の情報処理機器のみに対する調査)が、電力品質の劣化(特に波形品質の劣化)が、ど

れほど需要家にとって被害を被るかは、極めて重要であるにもかかわらず、その調査が大変困難であるため、まだ世界中で体系的な調査は行われていないのが現状である。さらに、大別すれば波形品質に分類されるのだが、三相不平衡、周波数偏差なども広い意味での電力の品質と言える。

近年、アメリカ・ヨーロッパを中心に盛んに研究されているのが、"Unbundled Power Quality Service"である。強いて日本語訳すれば"多品質電力供給"または"品質別電力供給"と言ったところである。このサービスの基本概念は、「電力の品質に個別にプレミアムを付けて顧客に販売する」である。電力品質の程度とそのプレミアムの関係を決めるのは極めて複雑な問題であり、経済的側面かつ技術的側面などの観点からの検討が進められている<sup>[48][59]</sup>。

従って、電力の品質の考え方や定義に関する世界的に統一された見解はない現状を踏まえ、本論文では一貫して、下記のような定性的な電力品質の差別化に基づいて検討を進めることにする。

- ・ (交流)標準品質電力：上位系や配電系に供給支障が生じると、遮断される可能性のある電力。遮断される負荷に優先順位をつけることができる。
- ・ (交流)高品質電力：上位系や配電系に供給支障となる事故が生じても、配電ネットワーク構成を変更させたり、電力改質センターに設置される分散電源や電力貯蔵装置からの電力で供給を継続できるもの。標準品質電力に比べ、供給信頼度は高い。
- ・ (交流)特別高品質電力：上記の高品質電力に加え、瞬時電圧低下や高調波などといった過渡的な電圧波形の面でも優れた電力。特別高品質電力が最も電気料金が高く、高品質、標準品質電力の順で、電気料金が安くなる。
- ・ その他の品質の電力：直流電力や高周波電力など

## 2.5.ま と め

次世代の電力流通システムの一形態として、「高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システム (*Flexible, Reliable and Intelligent Electrical eNergy Delivery System; FRIENDS*)」の考えが提案されている。FRIENDSは、電力改質センターと名付けた電力品質改善設備を、需要家の近傍に設置することによって、将来起こるであろう様々な電力システムの変化に、柔軟にかつ高信頼で対応することができることを想定している。本章では、FRIENDSの目的を説明し、これまでに提案されているFRIENDSの概念に加え、本研究によってより明確にしたFRIENDSの全体像について述べた。

FRIENDSの目的をまとめると、以下のようになる。

- ①必要に応じて柔軟に系統構成を変更できる柔軟性
- ②基本的には無停電の高信頼電力供給
- ③多品質電力供給
- ④負荷平準化および省エネルギー
- ⑤情報サービスなどの顧客サービスの向上
- ⑥需要家側制御

FRIENDSの構成と現行の配電システムの構成との相違を簡単に整理すると、表2.1.のようになる。

さらに、電力改質センターが果たすべき機能を整理することによって、これまで概念的にしか提案されていなかった電力改質センターの役割を明確にすることができた。その機能を列挙すると、

- (1)多品質電力供給機能
- (2)逆潮流制御機能
- (3)電力融通機能やバイパス機能
- (4)情報処理・情報交換センターとしての機能
- (5)その他：電圧調整機能・故障電流限流機能など

となる。

表2.1. 現行配電システムとFRIENDSとの相違

現行の配電システム	FRIENDS
<p>高圧配電線に沿った柱上変圧器から単一品質の電力を需要家に供給。</p>	<p>配電用変電所は、需要家近傍に設置される電力改質センターにあたかも負荷が集中しているかのように電力を供給する。電力改質センターでは、多様な品質の電力を作り、需要家に多品質電力供給を行う</p>
<p>基本的には樹枝状構成。</p>	<p>配電用変電所の下位で、複数の電力改質センターが配電ネットワークを構成する。ループ構成も可能である。</p>
<p>遠方制御により、自動区分開閉器で系統構成の変更が可能である。しかしながら、これらの大部分が機械式スイッチであるため、それほど頻繁にON/OFF操作ができない。</p>	<p>電力改質センターに設備される開閉装置によって、配電ネットワーク構成の柔軟な変更が可能である。また、開閉装置は半導体素子を用いた静止型とするため、かなり頻繁に系統構成の変更が可能である。</p>

## 第3章 電力改質センターの内部構成の提案

### 3.1. 概 要

現在、電力システムは大きな変革期を迎えている。特に、将来の配電システムには、将来起こりうるであろう様々な電力システムを取り巻く環境の変化に、柔軟にかつ高信頼で応えることができ、需要家と供給者との双方向な情報サービスが可能な特性を持つことが求められている。世界を見ても、新しい配電システムを構築することが注目され始めてきている。「高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システム (*Flexible, Reliable and Intelligent Electrical eNergy Delivery System; FRIENDS*)」の構想も、このような背景から提案された次世代の電気エネルギー流通システムの一形態である。このFRIENDSの最も特徴的なところは、複数の高圧配電線と接続される「電力改質センター (*Quality Control Center; QCC*)」という新しい設備を需要家の近くに設置したところにある。電力改質センターでは多様な品質の電力を作り出すほか、半導体素子を使った静止型開閉装置により配電ネットワークの柔軟な変更が可能である。また、電力改質センターには高信頼化、省エネルギーならびに負荷平準化等のために分散電源や電力貯蔵装置も設備されることになる。

ところで、電力改質センターの内部構成は、ある唯一の形式のものだけでなく、様々な需要家の要求(品質別電力の種類、大きさや経済性)などによって、いくつもの種類があるものと考えられる。現在、無停電電力供給が可能な配電システムの一つとして、20kV級スポットネットワーク方式<sup>[88]~[90]</sup>などが開発されているが、この方式はそもそも末端に電源があることを前提としていないため、必ずしも、電力改質センターとして最低限必要な機能を満足しているとは

言えない。現在、電力改質センターのような多品質電力供給が可能な電力設備は存在せず、これは世界的にも全く新しい設備となる。つまり、FRIENDSを実現するためには、その中核的存在である電力改質センターの内部構成として具体的にどのような形式があり得るのかを明確にし、考え得るいくつかの構成に対してその特徴を定性的かつ定量的に評価する必要がある。すなわち、FRIENDSの主たる機能を実現するために必要となる電力改質センター内部の能力や具体的な装置・構成等を明らかにしなければならない。本章では、その一環として、3.2.節において電力改質センターをいくつかの主要部分に分割し、3.3.節以降でそれらに対して考えられ得る数種類の内部構成をスケルトンレベルで提案する。また、提案した構成について経済性、規模、実現可能性などの特徴を定性的に検討する。

### 3.2. 電力改質センターの果たすべき機能と主要部分

電力改質センターは、静止型開閉装置により系統構成を柔軟に変更でき、需要家に高信頼で多品質な電力を供給できるという特徴を持っている。さらに、必要箇所に故障検出装置があり、適切な保護システムを有していなければならない。FRIENDSの様々な目的を達成するために、電力改質センターが果たすべき機能や役割は、すでに2.4.節で述べたように、

- (1) 多品質電力供給機能
- (2) 逆潮流制御機能
- (3) 電力融通機能やバイパス機能
- (4) 情報処理・情報交換センターとしての機能
- (5) その他：電圧調整機能・故障電流限流機能など

がある。もちろん、すべての電力改質センターが上記の機能のすべてを満足する必要はない。様々な需要家の要求(品質別電力の種類、大きさや経済性)などによって、その主として電力改質センターが果たすべき役割・機能があり、それに伴い適切な電力改質センターの内部構成があるものと考えられる。

そこで、本章では、電力改質センターの内部構成を設計するにあたり、内部

構成を表3.1.のように分割し、その中の主要部分である(Ⅰ)-1,(Ⅱ)-1~4および(Ⅲ)-1について、いくつかの具体的な構成を提案する。さらに、それらの定性的な特徴を示し、電力改質センターとしての可能性を検討する。

表3.1.電力改質センターの主要部分

(Ⅰ)高圧部分	1.母線形状、2.開閉装置、 3.保護システム、4.その他
(Ⅱ)低圧部分	1.供給形態、2.母線形状、3.屋内配線 4.需要家設備、5.その他
(Ⅲ)電力改質センター の設備	1.分散電源・電力貯蔵装置、2.フィルタ、 3.限流器・移相器、4.電圧調整装置、 5.電力品質改善装置、 6.情報ネットワーク、7.その他

### 3.3.高圧母線形状の提案

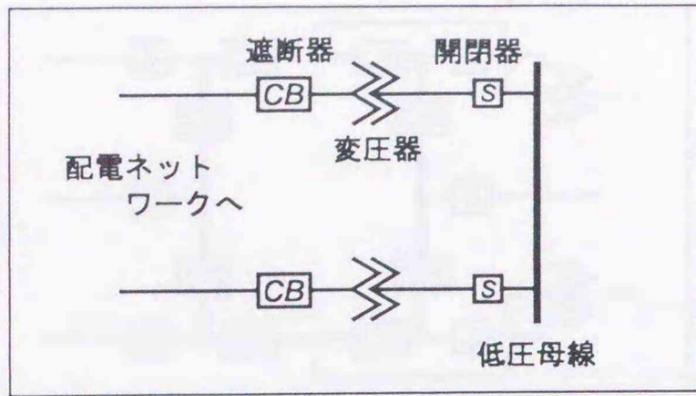
図3.1.(a)~(e)は本章で提案する電力改質センターの高圧母線の形状を示しており、表3.2.はそれらの特徴を示している。高圧母線形状は、配電用変電所等の母線形状にならって図3.1.に示すように、図(a)：母線なし、図(b)：単母線、図(c)(d)：多重母線、および図(e)：環状母線が考えられる。ただし、図は全て単線図で示しており、表中の数値は提案構成の相対評価である。数値の小さい方が優れていることを意味する。評価項目としては、その部分が持つ特徴的な事項、経済性、信頼性、規模、および実現性である。経済性、信頼性、および規模については、付属の機器および装置の種類や個数から定性的に評価

した。実現性とは総合的に考えた場合の電力改質センターとしての可能性を示す目安である。なお、最後にその提案する個々の構成が電力改質センターとして適用されると考えられる場所についても示している。

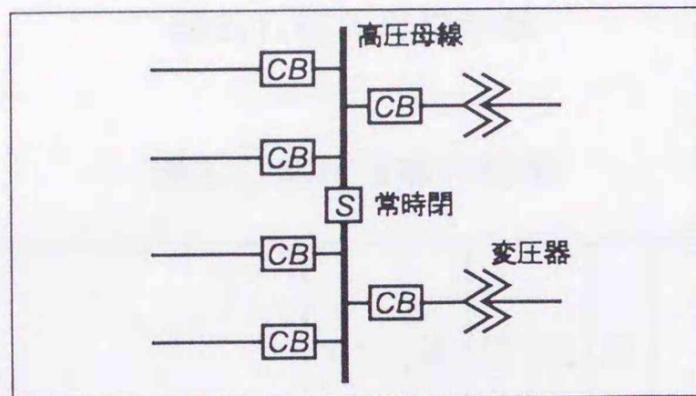
電力改質センターの高圧母線は主として静止型開閉装置によるネットワーク構成の変更や、電力改質センター間の電力融通並びにバイパス機能を有する必要がある。単母線構成(図3.1.(b))および多重母線①構成(同図(c))は、一つの母線に複数の高圧配電線が接続されており、それらは静止型開閉装置により自由にON/OFF制御が可能であるから、上記の機能に適した構成である。電力改質センターの高圧母線には複数の高圧配電線が接続されるため、基本的に高圧側はスポットネットワーク方式などの多回線受電に対応することになるが、必ずしも全ての配電線が通電状態である必要はない。また、FRIENDSの配電ネットワークの構成によって、電力改質センターと接続される配電線に流れる電力潮流は、電力改質センターに電力を供給する方向ばかりではなく、電力改質センターの高圧側から配電ネットワークへの潮流もあり得る。配電ネットワークの末端付近に位置し、それほど電力融通やバイパス機能を必要としない電力改質センターには経済的な図(a)に示す高圧母線がない構成、いわゆるユニット方式<sup>[81][82][88]</sup>が適切な場合もあると考えられる。

さらにFRIENDSでは、配電用変電所と需要家との間に、知的制御機能を持つ電力改質センターを設置することによって、配電ネットワークを放射状に限らずループを含む系統とすることも可能である。この場合、異なる系統との連系箇所には図(d)のような母線構成が必要であると考えられる。ここでの異なる系統(図中の系統A、系統B)とは、同一変電所内の異なるバンク間、異なる変電所間の系統を含め、非同期系統全般であるという意味を指す。環状母線構成(図(e))は高圧母線をリング状に配置した構成であるが、現在の変電所でもほとんど使用されておらず、経済的な側面からは電力改質センターとしての実現性は低いと考えられる。

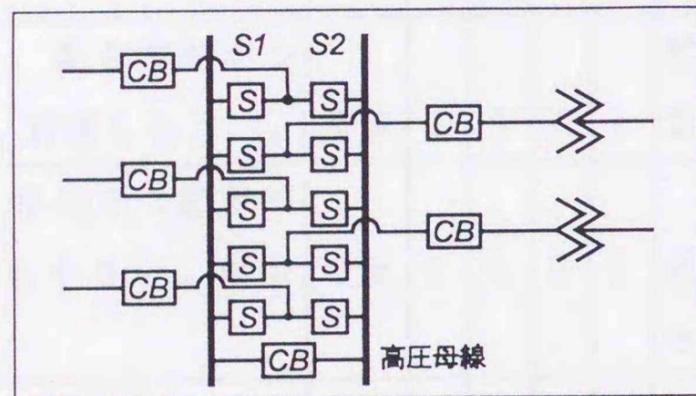
なお、全ての図中には開閉器(S)と遮断器(CB)のみを示しているが、この他にも必要箇所に限流装置(*Fault Current Limiter*; FCL)や保護リレーなどの系統保護装置が設置されることになろう。



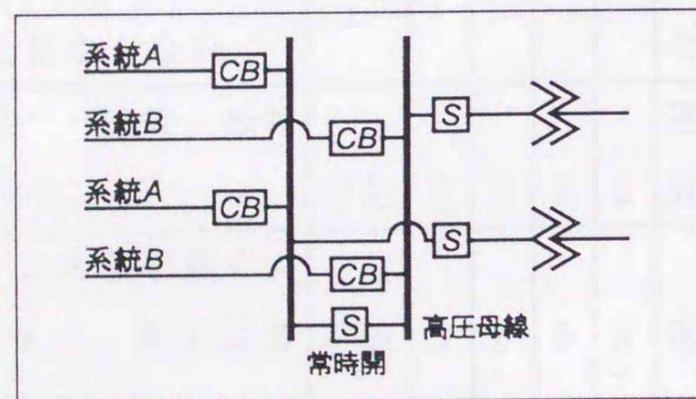
(a) 母線なし



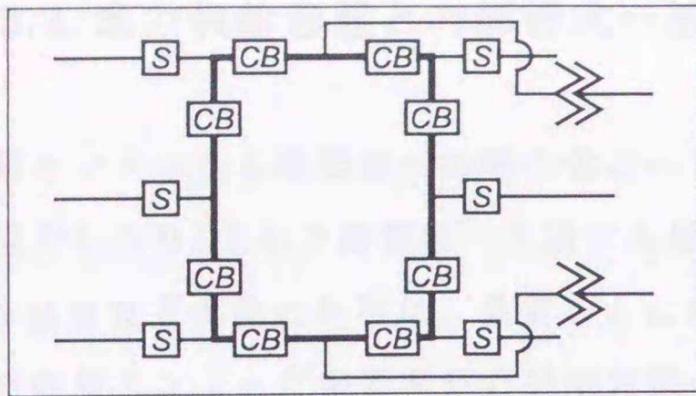
(b) 単母線



(c) 多重母線①



(d) 多重母線②



(e)環状母線

図3.1.高圧母線形状

表3.2.高圧母線の特徴

定性的な特徴	バ イ 可 パ 能 ス か	経 済 性	信 頼 性	規 模	実 現 性	適 用 箇 所
(a)母線なし 最も単純かつ 経済的である。規模も小さい。	困難	1	5	1	1	簡易的な電力改 質センター
(b)単母線 単純かつ経済的 である。規模も小さい。最も 一般的である。	可能	2	4	2	1	通常の電力改質 センター
(c)多重母線① 変電所等で よく使われる結線方式。S1とS 2は同時にONとはならない。	可能	4	1	4	2	重要な電力改質 センター
(d)多重母線② 通常、母線 間は異系統とする。	可能	3	3	3	2	連系用の電力改 質センター
(e)環状母線 コストが高く、 規模は最も大きい。電力改質 センターには適さない。	可能	5	2	5	3	適用されにくい

### 3.4. 電力供給形態と内部構成の提案

本節では電力改質センターから需要家への電力供給の形態、特に電力改質センターで多品質な電力を作り、それを需要家へ供給する形態について提案する。FRIENDSにおける多品質電力供給の形態は、品質ごとに専用線を設けて供給する方式、および電力改質センターで需要家側の開閉装置をコントロールして1回線で供給する方式に大別できる。図3.2. (a)～(f)に多品質電力供給のために必要な電力改質センターの構成を示す。なお、電力改質センターから需要家に電力を供給するとき、様々な電圧階級・供給方式(单相・三相、100V・200V・400Vなど)<sup>[95]</sup>があるが、電力改質センターの内部構成を設計する際には、いずれの方式でも基本構成には影響を及ぼさないものと考えられる。

まず、品質ごとに専用線を設ける場合(図3.2. (a)および(c))は、電力改質センターの開閉装置(図中の"CB1"および"CB2")をON/OFF制御することによって多品質電力供給を行うものである。すなわち、電力改質センターの開閉装置に優先順位を付け、適切に負荷遮断を行い、高品質電力を確保する方式である。ただし、この方式の場合、電力品質の数すなわちプレミアム数は回線数に等しくなる。

また、瞬時電圧低下なども電力の質を低下させる一つの要因である。図(a)および(b)の構成では、品質改善装置が設置されていないため、需要家に供給できる電力品質の種類は供給信頼度のみであるのに対し、例えば図(c)では、電力改質センターの高品質回線側に電力(波形)品質改善装置(本例では、無停電電源装置(*Uninterruptible Power Supply*; UPS))を設置することによって、瞬時電圧低下のない高品質な電力を供給可能である。つまり、供給可能な電力品質の種類は多種類となる。近年のパワーエレクトロニクス技術の発展はめざましく、電力系統にパワーエレクトロニクス技術を適用することが盛んに行われている<sup>[96]～[108]</sup>。これらは主として基幹系統を対象とするものであったが、CIGRE W.G. 14.31(Custom Power System)で議論されているように、パワーエレクトロニクス機器を配電系統に適用することによって電力の品質を向上することが可能となる。一般に、これらの具体的装置は従来から開発されており、

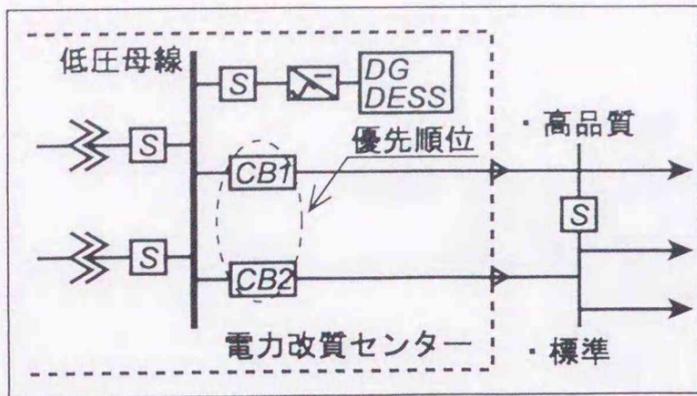
- ・瞬時電圧低下対策：無停電電源装置、DVR (*Dynamic Voltage Restorer*) など
- ・高調波対策：アクティブフィルタなど
- ・電圧適正化：AVR (*Automatic Voltage Regulator*) など

が挙げられる。多品質電力供給を行うためには、需要家の望む電力の質に応じて、これらの品質改善装置を電力改質センターに設置する。なお、本節では全て無停電電源装置についてのみ記述しているが、その他の装置も無停電電源装置と同様に考えることができる。

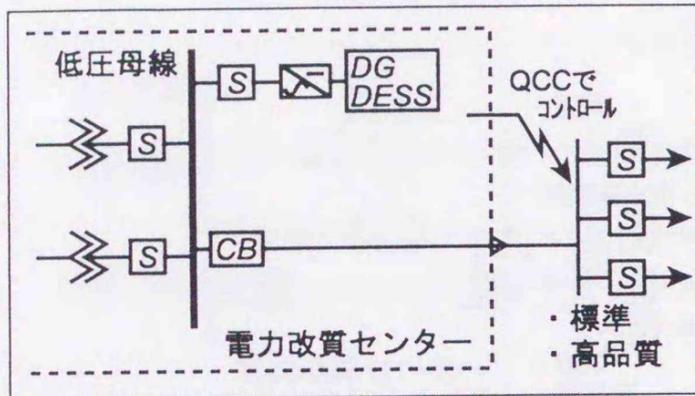
前章でも述べたように、将来の電力システムには電力供給者と需要家との間には、強力な情報通信ネットワークが敷かれることは必至である<sup>[66]~[68]</sup>。もちろん、FRIENDS構想でもこの機能を活用することによって、図(b) および(d)では、電力改質センターの制御装置で需要家側の開閉装置あるいは直接機器をON/OFF制御することによって、1回線で多品質電力供給が可能となる。品質ごとに専用線を設ける場合は、プレミアム数は回線数だけであるのに対し、この方式はプレミアムを多段階に設定できる特徴を持つ。さらに図(c)および(d)の利点を合わせると、図(e)のように特別高い品質のみを専用線で供給する方式に拡張可能である。

近い将来、直流による電力利用が増す可能性もある<sup>[109]~[111]</sup>。文献[109]では、オフィスビルを対象に直流配電の可能性を検証し、文献[110][111]では、需要家側にインバータを設置し、屋内における直流配電の実例を示している。FRIENDSにおいては、図(f)のように電力改質センターから直接需要家に直流を供給することも可能である。この場合、需要家に個別にインバータを設置する場合に比べて、大幅に変換損失を低減できると考えられる。さらには、緊急時の協調性もより簡潔になるものと考えられる。

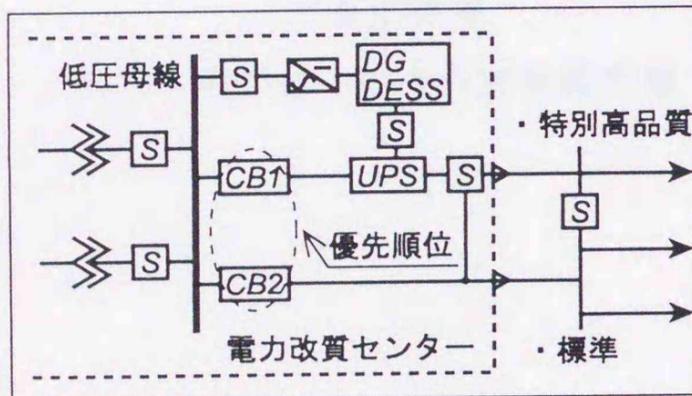
以上のことをまとめると、需要家への電力供給の形態は表3.3.のように整理することができる。



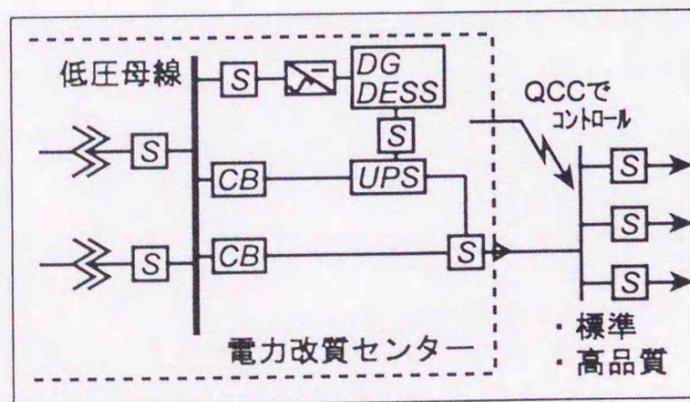
(a) 多回線



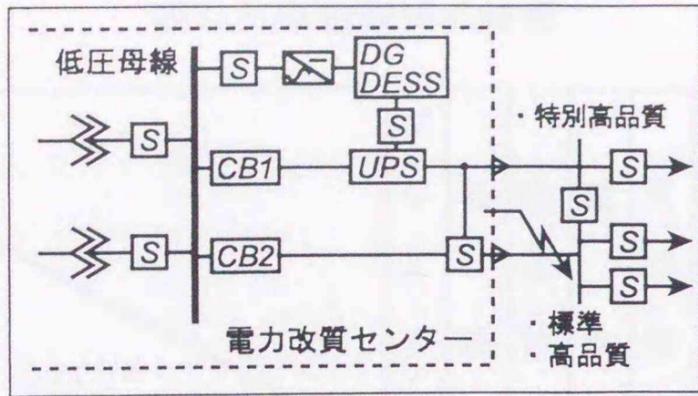
(b) 1回線



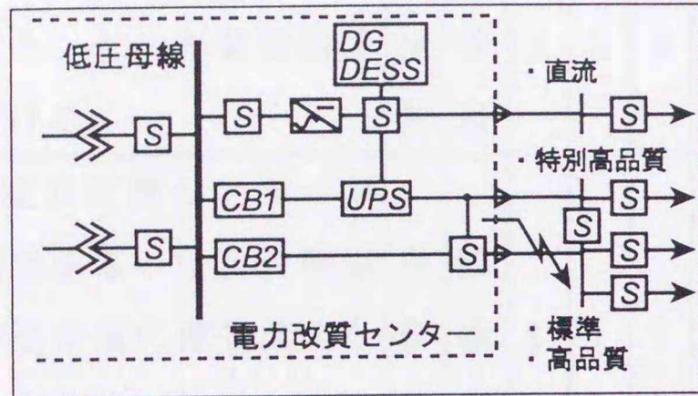
(c) UPS付多回線



(d) UPS付1回線



(e) 多機能多回線



(f) 直流配電

図3.2. 需要家への多品質供給形態

表3.3. 供給形態の特徴

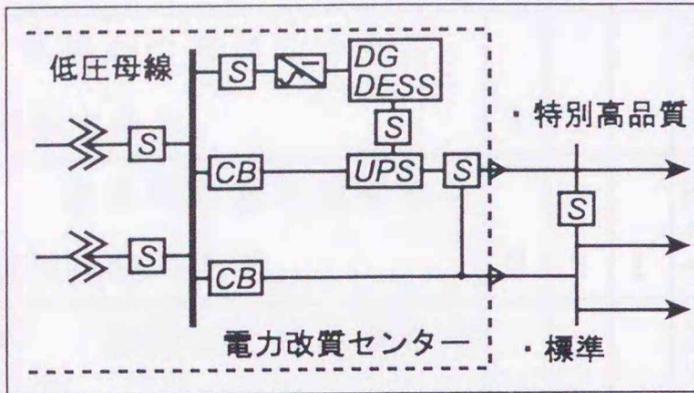
定性的な特徴	プ レ ミ ア ム	種 類	経 済 性	規 模	実 現 性	適 用 箇 所
(a)多回線 高品質に専用線を設ける。電力改質センターの開閉装置に優先順位を付ける。	回 線 数	信 頼 度	2	2	3	高品質用の電力改質センター
(b)1回線 電力改質センターで需要家側開閉装置あるいは負荷機器を制御する。需要家側に優先順位を付ける。	多 段 階	信 頼 度	1	1	2	通常の電力改質センター
(c)UPS付多回線 (a)の高品質側に無停電電源装置を導入する。瞬低もない高品質を供給可能である。	回 線 数	多 種 類	4	3	2	高品質用の電力改質センター
(d)UPS付1回線 (b)に無停電電源装置を導入する。	多 段 階	多 種 類	3	3	1	通常の電力改質センター
(e)多機能多回線 (c)(d)の利点を合わせる。特に高品質な需要に対し専用線を設ける。	多 段 階	多 種 類	5	3	1	高品質用の電力改質センター
(f)直流配電 直流を需要家に供給する。直流機器の開発が必要である。	多 段 階	多 種 類	6	4	2	直流配電用電力改質センター

### 3.5. 低圧側母線形状の提案

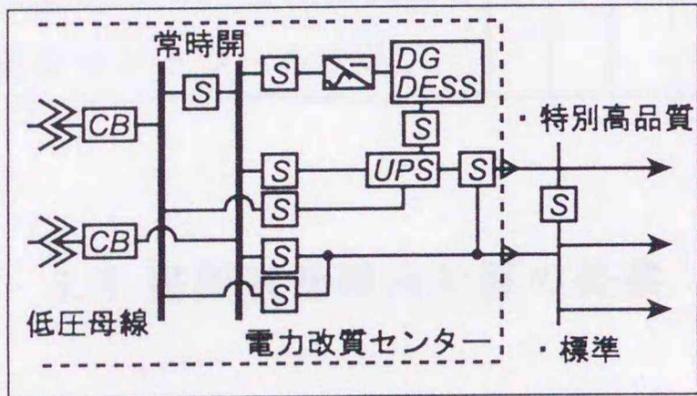
電力改質センター低圧側の母線形状は図3.3.(a)～(c)のように単母線、多重母線および品質付母線方式が考えられる。ここでは、需要家への電力供給形態はUPS付多回線方式としてあるが、前節で述べたいずれの方式でも構わない。表3.4.は各々の特徴を示している。

単母線方式(図3.3.(a))は一般的な構成であり、標準品質の供給信頼度を高めるために母線を並列に併設したものが多重母線方式(同図(b))である。この図(b)は、母線を柔軟に切り替えることが可能であるから、3.3.節図3.1.(d)で示したように異なる系統との連系箇所にも適した構成と言える。しかしながら、むやみに母線を多く設置することは、経済性を悪化させる恐れがあり、需要家の近くに数多く設置される電力改質センターはなるべく単純な構成、制御法をとるべきであるという観点から通常ケースは図(a)単母線が妥当と考えられる。また、電力改質センターの制御や保護システムを簡素化するために、あらかじめ電力改質センターの低圧母線自身に品質を付ける方式(図(c))も考えられる。この方式は、片方の低圧側母線と変圧器との間に無停電電源装置などの品質改善装置を設置し、母線自身に品質を付けるものである。さらに変圧器の低圧側開閉装置のON/OFFも、標準品質側 $CB_L$ より高品質側 $CB_H$ の方が高信頼となるように操作される。しかし、品質改善装置が変圧器と同数必要となるため、経済性が悪化する可能性があり、今後、経済的な側面からのより詳細な検討を行う必要がある。

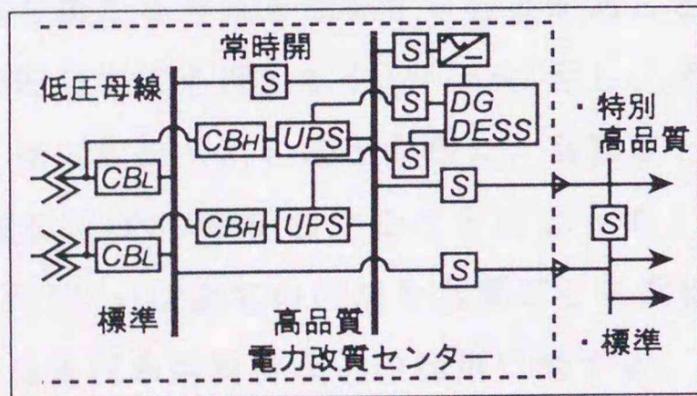
なお、詳細な電力改質センターの設置場所や規模などは、今後詳細に検討する必要があるが、もし電力改質センターが大・中規模工場やビルなどに設置される場合、あるいは現在ビルの地下にある無停電装置を電力改質センターとして発展させる場合などには、この電力改質センターの低圧母線は需要家側配電盤の役割を兼ねることになるであろう。



(a) 単母線



(b) 多重母線



(c) 品質付母線

図3.3. 低圧母線形状

表3.4. 低圧母線の特徴

定性的な特徴	経済性	規模	実現性	適用箇所
(a)単母線 単純かつ経済的である。制御・保護も簡単である。	1	1	1	通常の電力改質センター
(b)多重母線 連系用の電力改質センターとしても適用可能である。	2	2	1	連系用電力改質センター
(c)品質付母線 母線ごとに品質を付ける。変圧器と低圧母線との間の品質改善装置と、変圧器低圧側開閉装置(CB <sub>L</sub> およびCB <sub>H</sub> )で品質をコントロールする。	3	3	2	通常の電力改質センター 連系用電力改質センター

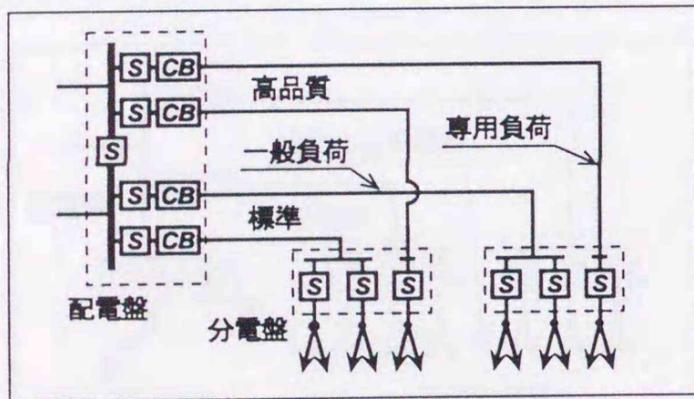
### 3.6. 需要家側屋内配線の提案

電力改質センターから需要家に多品質電力を送る場合、その電力を受け取る側の需要家屋内配線も新たな方式を開発する必要があると考えられる。まず、本節で提案する屋内配線方式を図3.4.(a)~(e)に示し、それらの定性的特徴を表3.5.に整理する。屋内配線も3.4.節と同様に、品質ごとに配線を重複させる構成と開閉装置を適切にON/OFF制御することによって1回線のみを配線する構成に大別できる。同図(a)は全ての配線を品質ごとに重複させるものであり、例えば、備え付けの品質別専用負荷などの利用に適する。しかし、この方式は、一般の負荷に供給される品質を自由に変更することが困難であると考えられ、そこで、図(b)のように分電盤に切替スイッチを施すことによって、需要家は自由に品質を変更することが可能となる。

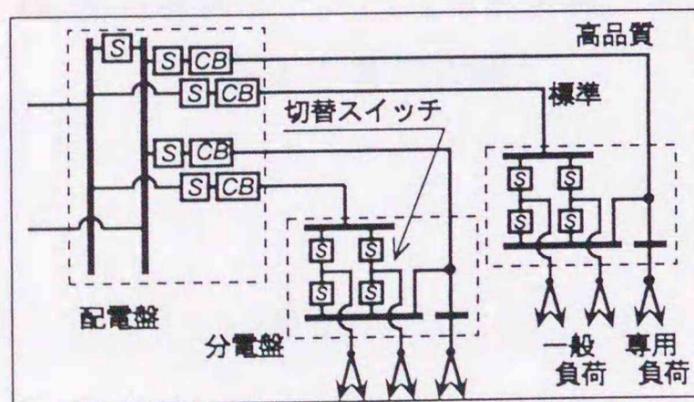
FRIENDSでは需要家の開閉装置に優先順位を付け、電力改質センターでそれらのON/OFF制御が可能であり、制御される開閉装置の場所によって多品質電

力の利用形態が変わる。図(c)は配電盤の開閉装置を制御する方式であり、この方式は特定の部屋やフロアを一括して品質に差別を付ける場合に有効である。より細かく電力品質を差別化したい場合には、図(d)のように分電盤の開閉装置を制御する方式がある。また、将来的に直接負荷機器を制御することが可能となれば(図(e))、更なる柔軟性が期待できる。これらの方式は任意の品質の電力を需要家が自由に選択可能であるが、電力改質センターから1回線で電力供給を受けるため、電力品質の種類は停電の多少、すなわち供給信頼度のみとなる。なお、これらの開閉装置の優先順位は需要家が任意に選択可能であるが、緊急時などには電力改質センターが適切に制御することも可能である。

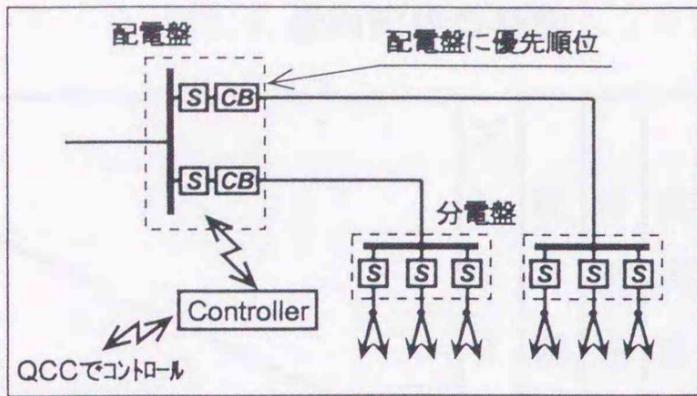
以上のように、本節では屋内配線を多重化する方式と需要家開閉装置を制御する方式について提案したが、実際の需要家に適用されるときには、これらの方式を適切に組み合わせ、需要家の要求に合った屋内配線方式になるものと考えられる。



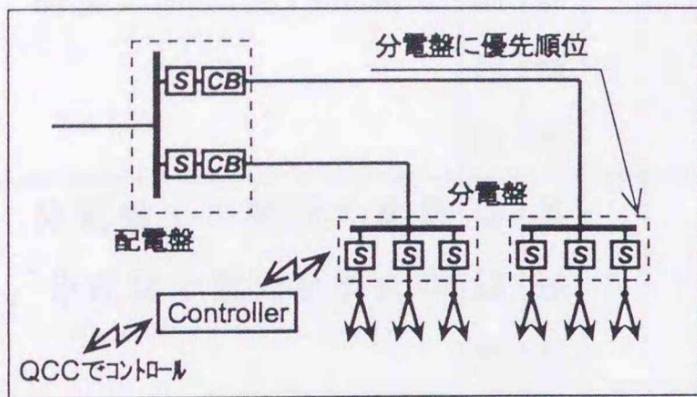
(a) 多回線①



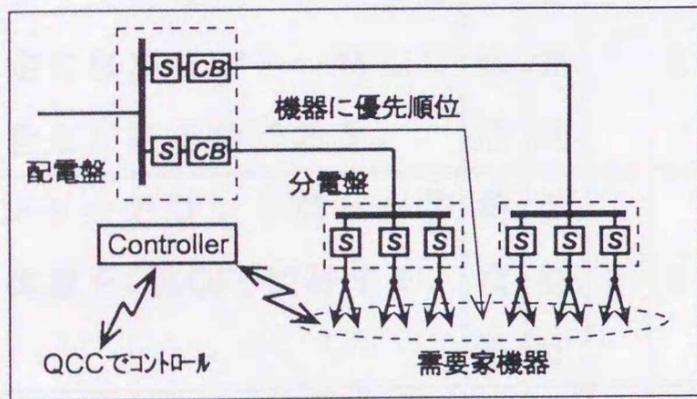
(b) 多回線②



(c) 電力改質センターでコントロール①



(d) 電力改質センターでコントロール②



(e) 電力改質センターでコントロール③

図3.4. 屋内配線

表3.5. 屋内配線の特徴

定性的な特徴	プレミアム	種類	経済性	実現性	利用の形態
(a)多回線① 品質ごとに屋内配線を重複させる。	回数	多種類	4	2	専用負荷
(b)多回線② 分電盤まで配線を重複させる。多回線。分電盤で電力品質を切り替える。	回数	多種類	5	1	コンセント 通常負荷
(c)電力改質センターでコントロール① 電力改質センターで配電盤の開閉装置を制御する。特定の部屋などを一括して高品質にする場合などに有効である。	多段階	信頼度	1	1	特定の部屋ごと
(d)電力改質センターでコントロール② 分電盤の開閉装置をON/OFF制御する。	多段階	信頼度	2	1	コンセント 通常負荷
(e)電力改質センターでコントロール③ 電力改質センターで直接、需要家の機器を制御する方式である。	多段階	信頼度	3	1	機器ごと

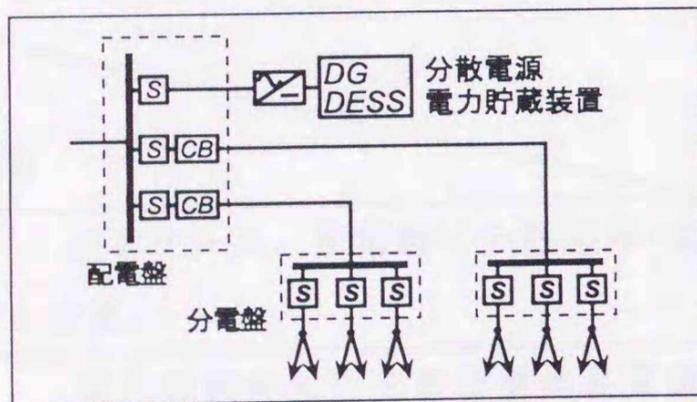
### 3.7. 分散電源・電力貯蔵装置

#### <3.7.1> 需要家側分散電源・電力貯蔵装置の提案

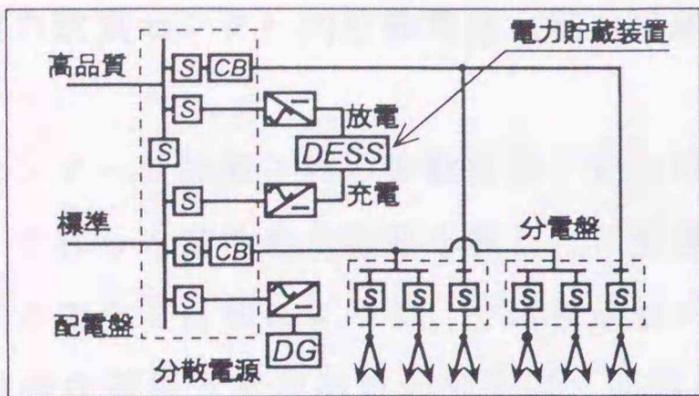
近い将来、設備価格の低下に伴い、太陽光発電システムや燃料電池発電シス

テムなどの小規模分散電源、あるいは二次電池や小規模SMESなどの小規模電力貯蔵装置を不特定多数の需要家が所有することになる。そのような場合、電力改質センターのような需要家に近い設備で、逆潮流(需要家側から供給者側への電力潮流)や緊急時の対応などを管理する必要があると考える。例えば、分散電源の単独運転に関する問題は、電力改質センターで適切に制御することによって、効果的な対策を図ることができる。このことは、需要家側に設置する系統連系保護装置を簡素化できる見込みがあることを示している。

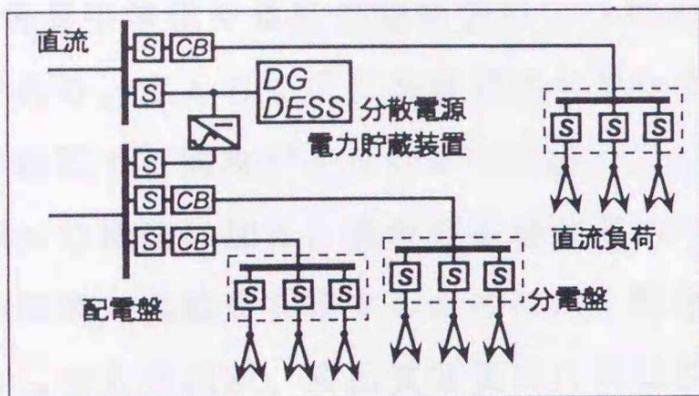
逆潮流の方式で需要家側分散電源・電力貯蔵装置の設置構成を区別すると、図3.5.(a)~(c)のようになる。それぞれ通常品質、高品質、および直流で逆潮流を行う方式である。なお、これらの構成が持つ特徴を表3.6.に示す。同図(a)は現在でも使用されている一般方式であり、連系用インバータを通して配電盤などに接続するものである。また、図(b)のように多回線で受電している場合は、電力貯蔵装置への充電は標準品質側から行い、いずれの品質側へも放電可能な構成が必要である。3.4.節図3.2.(f)で述べたように、FRIENDSでは電力改質センターと需要家との直流による電力流通が可能である(図3.5.(c))。この場合は連系用インバータを簡素化することが期待でき、AC-DC変換器の損失を低減できる。



(a) 1 回線



(b) 多回線



(c) 直流配電

図3.5. 需要家分散電源・電力貯蔵装置

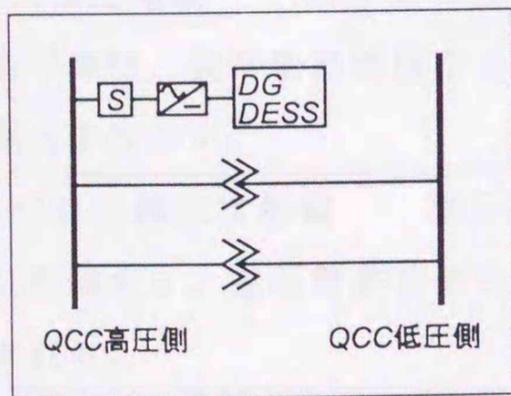
表3.6. 需要家分散電源・電力貯蔵装置の特徴

	逆潮流	経済性	規模	実現性
定性的な特徴				
(a) 1回線 通常ケース。配電盤に分散電源・電力貯蔵装置を設置。	通常	1	1	1
(b) 多回線 電力貯蔵装置の充電は標準品質側から、放電は標準あるいは高品質側へ行う。逆潮流は高品質で行うことも可能である。	高品質	2	2	1
(c) 直流配電 逆潮流は直流で行うことができる。AC-DC変換器による損失の大幅な減少が期待される。	直流	2	2	1

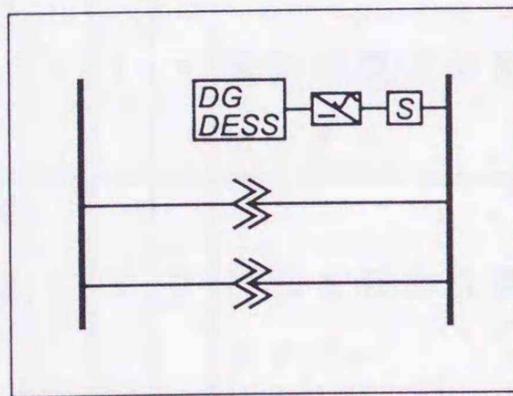
### <3.7.2> 電力改質センター内分散電源・電力貯蔵装置の提案

まず、電力改質センターに設備される分散電源・電力貯蔵装置の形態を図3.6.(a)~(d)に示し、それらの定性的な特徴を表3.7.に整理する。分散電源・電力貯蔵装置を設置する主たる目的によって、その接続箇所が異なり、かつ、その用途に合わせた適切な運用方策がある。例えば、同図(a)のように、電力改質センター間の電力融通やバイパス機能を果たす電力改質センターには高圧に接続され、図(b)は負荷平準化や負荷変動補償など一般的な分散電源・電力貯蔵装置の運用方策である。主として電圧調整機能を果たす電力改質センターには変圧器三次巻線に接続する構成がとられる(図(c))。

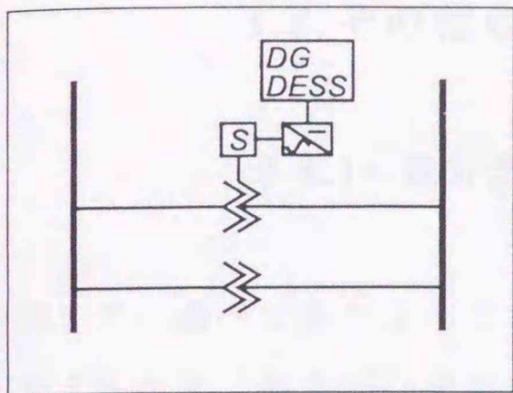
また、図(d)は図(b)の機能に加え、無停電電源装置のバックアップをも兼ねる。この場合、多品質電力供給を実現するためには、緊急時に電力改質センターへの入力がなくなっても最低限、高品質需要だけには供給できるように、あらかじめ適切な運用を行う必要がある。次章4.4.節では、この場合の電力貯蔵装置の運用アルゴリズムを提案し、簡単なモデルシステムに対して数値計算を行っている。



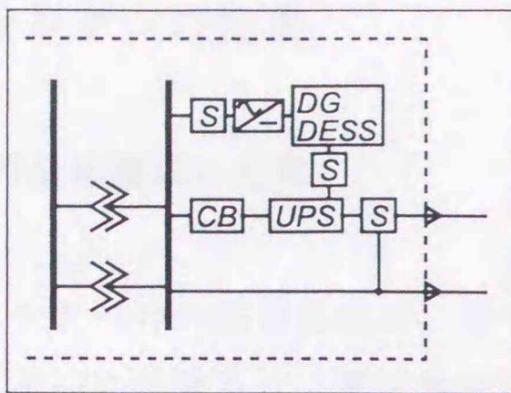
(a) 高圧接続



(b) 低圧接続



(c) 三次巻線



(d) UPSバックアップ

図3.6. 電力改質センターに設備される分散電源・電力貯蔵装置

表3.7. 電力改質センターに設備される分散電源・電力貯蔵装置の特徴

定性的な特徴	経済性	規模	実現性	適用箇所
(a) 高圧接続 電力改質センターの高圧側に分散電源・電力貯蔵装置を接続する。緊急時における電力融通などに有利。	2	2	2	電力融通用電力改質センター
(b) 低圧接続 低圧側に接続される。負荷平準化、負荷変動補償など需要家に近い利点を活かす。	1	1	1	通常の電力改質センター
(c) 変圧器三次巻線 変圧器の三次巻線に接続する。電圧調整装置などの目的で使われる。	1	2	2	特別な電力改質センター
(d) UPSバックアップ (b)の機能に加え、無停電電源装置のバックアップとしても使われる。	2	3	1	通常の電力改質センター

### 3.8. その他の電力改質センターの提案

#### <3.8.1> 電力改質センターの全体構成の提案

前節までに述べてきたように、電力改質センターの内部構成には、様々な形式が考えられる。例えば、その電力改質センターに接続される需要地域の特徴(要求される電力品質の種類や量など)、近隣電力改質センターの状況や配電ネットワークの観点から捉えたその電力改質センターの設置個所などによって、電力改質センターの果たすべき機能が異なるはずであり、それに伴って適切な内部構成があるものと考えられる。そこで本項では、これまで部分的に提案してきた内部構成を組合せ、特に電力改質センターの重要な機能である多品質電力供給、バイパスや電力融通、および直流配電の機能に適した電力改質センター全体の内部構成を示す。

図3.7.は多品質電力供給を主たる目的とした電力改質センターの内部構成である。電力改質センター低圧側の無停電電源装置の機能があり、停電や瞬低も無い高品質な電力を供給可能である。また、電力改質センターには適切容量の分散電源や電力貯蔵装置が設置される。図3.8.の構成では、電力改質センター高圧側に分散電源・電力貯蔵装置が接続され、異系統間との連系箇所や電力改質センター間の電力融通・バイパスなどの目的に有利であると考えられる。また、先述のように近い将来、直流配電が普及する可能性もある。FRIENDSでは、図3.9.のような構成を採用すれば、電力改質センターから直接需要家に直流電力を供給することも可能となる。なお、全ての図中の「FRIENDS-NWプロテクタ」は、電力改質センター間で形成される配電ネットワークを保護・制御する装置である。「QCCプロテクタ」は、電力改質センター自身や需要家側を保護・制御する装置であり、需要家側からの逆潮流も制御可能な保護装置でなければならない。これらは、いずれもまだ具体的に確立されておらず、今後の検討課題の一つである。

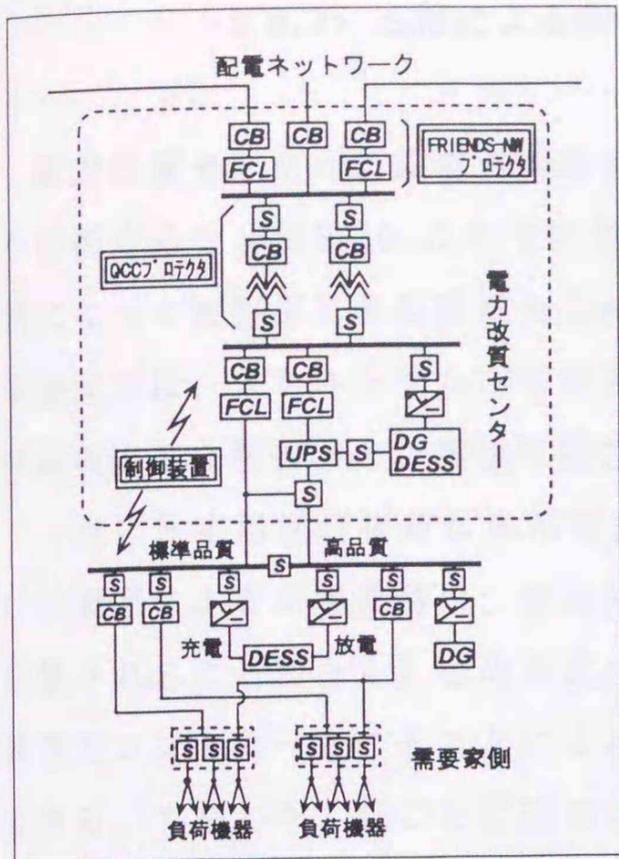


図3.7. 多品質電力供給

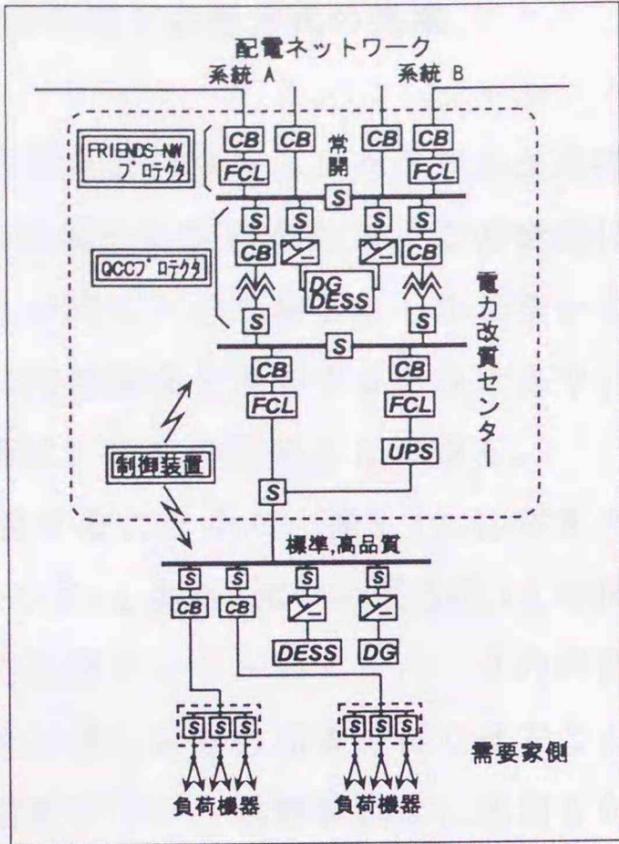


図3.8. バイパス・電力融通機能

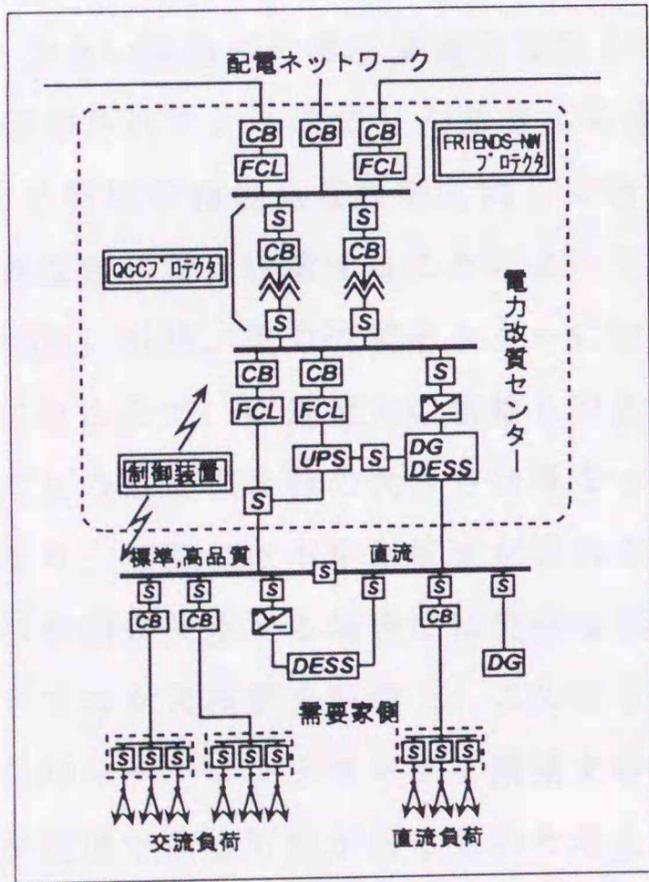


図3.9. 直流配電機能

### <3.8.2> 三相による新しい多品質電力供給方式の提案

電力改質センターに設置されるであろう様々なパワーエレクトロニクス技術を活用すると、図3.10.に示す内部構成も実現の可能性がある。この構成は三相によって需要家に多品質電力供給を行う方式の一つである。しかしながら、本論文では、スケルトンレベルで定性的に内部構成を提案するのみであり、本構成の詳細な解析および実現可能性の評価は、今後の課題として残る。

一般に住宅用電灯負荷は単相電力を消費することから、図3.10.に示すように需要家にある単相負荷は、接地線(図中の④)と各線(図中の③⑤⑥)との間に接続されることになる。この方式は、電力改質センターのインバータ内の開閉装置をコントロールすることによって各相に異なる電力品質を持たせることができる。すなわち、相ごとに適切に負荷遮断を行い、供給信頼度に差別を付けた電力を供給できる構成である。さらに特定の相に無停電電源装置などの品質改善装置を設置することによって信頼度以外の電力品質を持たせることも可能である。本構成は基本的に三相4線式で需要家に電力を供給するので、単相で供給する方式に比べ、少ない線路での多品質電力供給が可能となる。もちろん、平常時は三相電圧が印加されているので三相負荷にも供給可能である(図中の⑦)。この場合の電力品質は単相低品質負荷と同じになる。さらに別途に無停電電源装置などの品質改善装置を設置することによって三相高品質負荷にも供給可能である(図中の①)。当然、電力改質センターには分散電源や電力貯蔵装置が設置されることになるので、直流電力の供給も可能となる(図中の②)。また、平常時でも品質ごとの需要家負荷の大きさは異なっており、すなわち三相不平衡負荷の状態となり、線路には不平衡電流が流れることになる。さらに、負荷遮断によって一つの相が欠落する場合には完全な三相不平衡電圧となる。今後、パワーエレクトロニクス技術を駆使し、このような三相不平衡を適切に制御可能な新型のインバータ・コントローラを開発することによって、図3.10.に示す電力供給方式が実現できる可能性があるものと考えられる。

電力改質センターから単相電力を供給する場合には、必ずしも需要家側の負荷が平衡に近い状態にバランスされとは限らず、20kV級以上の電圧階級で形成される配電ネットワークに三相不平衡電流が流れる可能性が高く、三相不

平衡の上位系統に与える影響は大きいと考えられる。しかし図3.10.に示す構成は、電力改質センターの低圧側ですべての電力を一度直流に変換することによって、容易に三相不平衡を是正できると考えられる。従って、電力改質センター変圧器および配電ネットワークには需要家側の三相不平衡の影響が及ぶことはない。さらに直流を介することによって短絡容量の減少などの付随的な効果が期待でき、FRIENDSの運用を容易にするものと考えられる。また、分散電源や電力貯蔵装置のAC-DC変換器も省略できる利点を持つ。

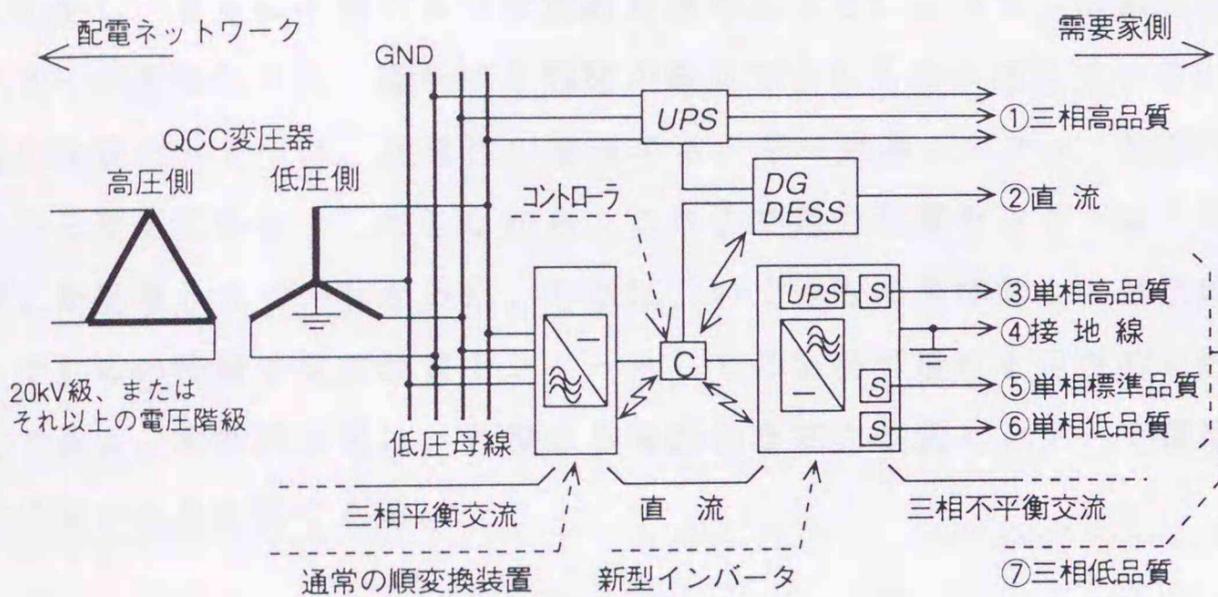


図3.10. 三相四線式による多品質電力供給

### 3.9. ま と め

本章では、将来の電力流通システムであるFRIENDSの中核部分である電力改質センターの具体的な内部構成を確立するための基礎的な検討を行った。すなわち、電力改質センターの果たすべき機能を明示し、以下の電力改質センターの主要部分について具体的な内部構成を提案した。さらに提案した構成のもつ特徴を定性的に説明した。

- ・ 高圧側母線形状
- ・ 多品質電力供給形態と内部構成

- ・ 低圧側母線形状
- ・ 需要家側屋内配線
- ・ 分散電源・電力貯蔵装置
- ・ その他の構成

しかしながら、電力改質センターの具体的構成、特に多品質電力の供給方式には様々なものが考えられる。本章で提案した種々の内部構成は、電力改質センターの構成としての可能性を示したものであり、必ずしもここで提案した構成の全てが、電力改質センターの内部構成として適切なものであるとは限らない。しかし、さらに本章のような検討を進めることによって、次第に電力改質センターが具体化され、望むべき形態が確立できるものと考えている。

電力改質センターは、次世代の電気エネルギー流通システム；FRIENDSの中核となる要素である。しかしながら、これまで電力改質センターはその概念的構成しか提案されていなかった。本章は、いくつもの具体的な内部構成を提案し、それらの特徴や電力改質センターとしての実現可能性を定性的に評価したものである。本章の結果は、今後より実際的な電力改質センターを構築するための基礎となるものである。

## 第4章 FRIENDSにおける電力貯蔵装置の役割と その運用例

### 4.1. 概要

<1.2.2>で述べたように、将来の電力システムには、不特定多数の小規模電源 (*Dispersed-type Generator*; DG) や電力貯蔵装置 (*Dispersed-type Energy Storage System*; DESS) が電力システムの末端に設置されるものと予想される。特に、高機能な特性 (高効率、即応性、あるいは有効・無効電力同時制御性など) を持つ電力貯蔵装置が分散配置される場合には、それらの持つの高機能性によって、電力システムの自律的制御能力を高めることができる。従って、将来の電力システムにおいて、分散配置された電力貯蔵装置は重要な役割を果たすことが期待される。

ところで、現在、電気エネルギーを貯蔵する装置は、様々な形式のものが開発されており、それぞれ性能や特性が異なる。「高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システム (*Flexible, Reliable and Intelligent Electrical eNergy Delivery System*; FRIENDS)」を実現するためには、「電力改質センター (*Quality Control Center*; QCC)」に分散配置された種々の電力貯蔵装置がどのような役割を果たし、どのような機能を実現できるのかを明確にする必要があるものと考えられる。本章では、まず、4.2.節において、電力改質センターに設置される可能性のある種々の小規模電力貯蔵装置の持つ特徴と、それらの開発状況について説明し、4.3.節では、電力改質センターで電力貯蔵装置が果たすべき機能を列挙し、どの種類の貯蔵装置がその機能を果たすのに適しているかを定性的に検討する。この結果より、これまで概念的にしか提案されていなかった電力貯蔵装置の機能や役割をより具体化できる。また、FRIENDSの最も重要な機能の一つに、多品

質電力供給がある。これは、電力改質センターに設置される分散電源や電力貯蔵装置を有効に運用することによって実現することができる。4.4.節では、多品質電力供給が実現可能な電力貯蔵装置の設備規模とその運用アルゴリズムを提案し、簡単なモデルシステムに対して数値計算を行い、負荷平準化や線路損失低減の効果を評価する。

## 4.2. 各種電力貯蔵装置の概要

電力改質センターは、需要家のすぐ近くに分散配置されることを想定している。従って、電力改質センターにはコンパクト性が求められ、内部に設置される貯蔵装置も分散配置が可能な小・中規模となるであろう。一般に、電力貯蔵装置として、揚水発電所、二次電池、超電導電力貯蔵システム(SMES)、フライホイールおよび圧縮空気電力貯蔵システム(CAES)などが、現在、実用化あるいは開発段階として研究されている。しかしながら、FRIENDSの概念の中における電力貯蔵措置は、電力改質センターに分散配置されるという観点から、揚水発電所、大規模SMES、大規模フライホイール、ならびにCAESなどの大規模貯蔵装置は適用されにくいものと予想される。従って、本節では、電力貯蔵装置に分散配置される可能性のある二次電池、(小・中規模)SMES、(小規模)フライホイールについて、それらの原理および特徴を<4.2.1>、また、それらの開発状況を<4.2.2>で説明する。

### <4.2.1> 各種電力貯蔵装置の原理と特徴

一般に、電力貯蔵装置の概略図は、図4.1.のように示される。ここでは、各種電力貯蔵装置について、エネルギー変換の原理、ならびに必要とされる補機を説明し、それらの貯蔵装置の持つ特徴を述べる。

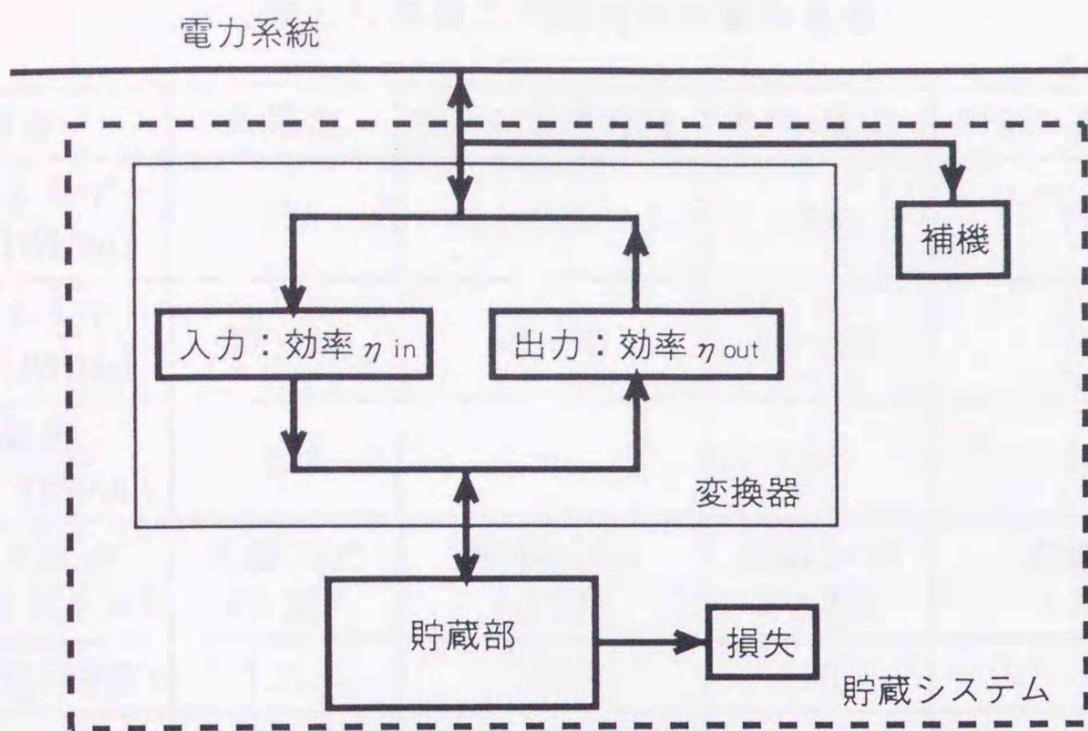


図4.1.電力貯蔵システムの概略

#### (1)二次電池電力貯蔵装置

二次電池電力貯蔵装置は、電気エネルギーを化学エネルギーに変換して貯蔵する。一般に、電池本体は直流電力で充放電されるため、電力系統に二次電池を連系する場合には、補機として交流/直流の電力変換器が必要である。二次電池にもその内部構成物質(電解質や正・負極活物質)の種類により、鉛電池、リチウム電池、レドックスフロー電池、ニッケル-水素電池、ならびにナトリウム-硫黄電池などに分類される。一般に二次電池は、多数の単電池がモジュールとして構成されるので、容量を柔軟に設定可能である。ナトリウム-硫黄電池は高温で動作するため、補機としてヒーターが必要であり、レドックスフロー電池は電解液を電池セル部へ循環させるために、ポンプが必要となる。二次電池の電力貯蔵効率は、揚水発電と同等、もしくは、それ以上が見込まれており(70~85%)規模は、数kWの戸建、集合住宅用から、数十~数百MW程度の基幹系統用まで研究が進められている。種々の二次電池の特徴をまとめると、表4.1.のようになる。

表4.1.各種二次電池の特徴の比較

項目	鉛電池	ニッケル-水素電池	リチウム電池	ナトリウム-硫黄電池
理論エネルギー密度 [Wh/kg]	170	225	546	760
実用エネルギー密度 [Wh/kg]	30~40	50~65	60~90	120
電力貯蔵用組電池 [kW/m <sup>2</sup> ]	157	—	—	108
サイクル寿命 [サイクル]	実績1500 (大型)	実績1000 (小型)	実績1000 (小型)	実績800 (大型)
自己放電 [%/月]	1.5	30	10	6
リサイクル	市場で確立	可能	可能	—
資源 [万トン]	Pb : 12000	Ni : 12000、 MH : 773	Li : 835	Na : 大 S : 大
過放電	△	△	×	—
過充電	△	◎	×	—
内部抵抗 [Ω・Ah]	0.16程度	—	0.15程度	0.37程度

いま、分散型電力貯蔵装置の規模として、数100kW程度までの大きさを考えた場合、

- ・ 体積エネルギー密度
- ・ エネルギー貯蔵効率
- ・ 電池コスト
- ・ 電池システム設計

などを勘案すると、一般に、電力貯蔵装置の大きさによって、適合する電池の種類を次のように大別することができる。

- ・ 数kWまでの小規模なシステムでは、リチウム電池が、
- ・ 数十kWまでの中規模クラスのシステムでは、鉛電池(密閉型)が、
- ・ 数十kWから数百kWクラスになると、NAS電池が、

それぞれ有利になると考えられる。

最後に、二次電池電力貯蔵装置の特徴を列挙すると、次のようである。

- ・小容量であっても、効率が比較的高く、サイズも小さいので、特別な立地制約もなく、需要家の近くに分散配置が可能である。
- ・建設工期が短く、需要の増加に柔軟に対応できる。
- ・システムの起動停止特性、ならびに負荷追従特性などの運転特性が優れており、電力系統への多機能性を与える。
- ・振動、騒音などが比較的少なく、環境保全面で優れている。
- ・研究開発が進んでいる：実用化に向けて実証試験が行われている。
- ・腐食性物質を使用するため、耐用年数は短い場合が多い。
- ・一部の電池では、非常に危険な物質(ナトリウムなど)を用いるため、取り扱いに細心の注意を払う必要があり、また、現時点では法的規制(消防法)を受け、設置場所などに制約がある。

## (2)超電導電力貯蔵装置(Superconducting Magnetic Energy Storage; SMES)

超電導電力貯蔵装置(SMES)は、エネルギーを電気の形態のまま貯蔵するので、エネルギーの貯蔵効率が高い(95%以上が見込まれている)ほか、エネルギーの出し入れの速度が速い(数～数十[msec]オーダー以下))特徴を持つ。また、交流/直流変換器を適切に制御することによって、有効・無効電力を同時にかつ独立に制御できるなど、エネルギー貯蔵量(kWh)に関する機能だけでなく、電力の瞬時入出力(kW)の面でも高い機能を有しており、将来の電力系統において様々な機能を果たすものと大きな期待がかけられている。SMESの基本構成は図4.2.に示されるようである。SMESは超電導コイルに永久電流を流し、エネルギーを貯蔵するものであり、冷蔵装置、クエンチ検出器などの補機が必要となる。

SMESの規模は、100kWh級の小容量から、GWh級の大容量まで、様々なものが研究されている。さらに、近年、特にアメリカでは瞬時電圧低下補償などの電力品質改善用として、マイクロSMES<sup>[29]</sup>と呼ばれる大kW容量、小kWh容量のSMES(例えば、0.28[kWh]/1[MW]×1[sec]など)を商品化している。

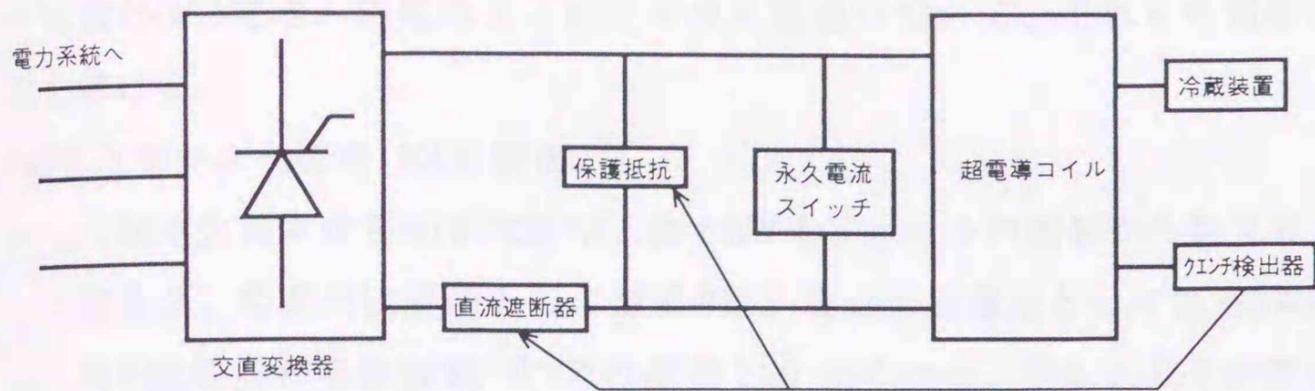


図4.2. SMESの基本構成

### (3) フライホイール電力貯蔵装置

フライホイール電力貯蔵装置は、電気エネルギーをロータの回転エネルギーに変換し貯蔵するものである。機械的な軸受けを用いた機械式フライホイールは、無停電電源装置<sup>[43]</sup>や電気鉄道用の電圧補償電源、あるいは電力系統用の周波数安定化用<sup>[26][29]</sup>として既に実用化された実績がある。しかしながら、これら機械式のフライホイールは、軸受けの回転損失が大きいいため、利用分野は秒～分オーダー程度の比較的短時間の用途に限られる。一方、高温超電導体を利用してロータを浮上させ、軸受けと非接触でロータを回転させる高温超電導フライホイール<sup>[27]</sup>も徐々に研究されている。

しかしながら、機械式、超電導式いずれの方式のフライホイールでも、出力が大きくなるに従って、大きなロータが必要となり、分散配置できるフライホイールは、小容量のものとなる。また、フライホイールは、電気エネルギーをロータの回転エネルギーに変換しエネルギーを貯蔵するため、入出力には回転式発電機/モータが必要である。

## <4.2.2> 各種電力貯蔵装置の開発状況

### (1) 二次電池電力貯蔵装置

二次電池は、その構成物質からいくつかの種類に分けられる。ここでは、すでに実用化されている、あるいは実用化が期待されている、ナトリウム

—硫黄(NAS)電池、鉛電池およびリチウム電池について、それらの開発状況を挙げる。

(a) ナトリウム—硫黄(NAS)電池

80年代後半から90年代前半、数十kWモジュールの開発から始まり、現在は、変電所設置用として数MW級、需要家設置用として数百kW級のNAS電池が実証試験<sup>[26]~[29]</sup>の段階となっている。表4.2.にNAS電池モジュールの仕様の一例を示す。

表4.2. NAS電池モジュールの一例

出力	26.3[kW]	重量	2.0[t]
電圧	93[V]	時間率	8時間放電
電流	283[A]	充放電効率	90[%]
容量	210[kWh]	エネルギー密度	145[kW/m <sup>3</sup> ]
単電池本数	480[本]	X	
寸法	1440[mm], 1940[mm], 520[mm]		

(b) 鉛電池

鉛電池は古くから負荷平準化用として、大規模装置が開発されてきた。これより現在に至るまで、太陽光発電システム用、周波数調整用、ならびに非常用電源用などの様々な用途の鉛電池が開発・実用化<sup>[26]</sup>されている。

現在は、密閉型鉛電池の開発が行われており、この電池の特徴は、

- ・完全密閉型で、従来の鉛電池のような補充電、補水が不要
- ・過充電レス技術の採用で、エネルギー効率80%後半まで向上できる。

などである。

(c) リチウム電池

リチウム電池は、高いエネルギー密度とエネルギー変換効率を持ち、寿命が長く、安全でかつ信頼性が高い20~30kWh級の開発が期待されている。特に、電気自動車などの移動体用の分散型電力貯蔵シ

システムとして期待が高まっている。

## (2) 超電導電力貯蔵装置 (SMES)

ここでは、分散配置が可能な小・中規模SMESについて、その開発状況を述べる。近年、アメリカにおいて大kW容量/小kWh容量のSMESの開発が盛んに行われている。特に、瞬時電圧低下補償用として、 $0.28[\text{kWh}]/1[\text{MW}]-1[\text{sec}]$ 級のいわゆるマイクロSMES<sup>[29]</sup>が商品化されたのを筆頭に、瞬時予備力用として、 $375[\text{kWh}]/30[\text{MW}]-40[\text{sec}]$ 級SMESなどが開発されている。一方、我が国では、 $100[\text{kWh}]/20[\text{MW}]$ 級の多用途SMESの開発を目指し、その要素技術の開発に取り組んでおり、 $1[\text{kWh}]/1[\text{MW}]$ 級小規模SMESの系統連系試験が始まろうとしている。

## (3) フライホイール電力貯蔵装置

前項で述べたように、無停電電源装置や電気鉄道用の電圧補償電源等の用途で、すでに機械式フライホイールは実用化されている。現在は、軸受けに高温超電導体を用いた超電導フライホイールの開発が盛んに行われている。特に、無停電電源装置用にフライホイールを用いる場合、鉛電池式無停電電源装置に比べ、小規模化、高効率化(総合効率90%程度)、省エネルギー化、長寿命化などが期待される。

以上、本節では、電力改質センターに設置可能な分散型電力貯蔵装置として、二次電池、(小・中規模)SMESおよび(小規模)フライホイールについて、そのエネルギー貯蔵原理ならびにシステムの特徴、およびそれらの開発状況を説明した。その結果、種々の電力貯蔵装置は、それぞれその特徴に適した機能があり、技術的にも将来的に高性能な装置の開発が期待できる。従って、次節では、電力改質センターに設置される電力貯蔵装置が、どのような機能を果たすべきかを明らかにし、その機能を果たすためにはどの種類の電力貯蔵装置を設置すればよいかを検討する。

### 4.3. FRIENDSにおける電力貯蔵装置の役割

将来の望ましい電力流通の一形態であるFRIENDSの最も大きな特徴は、需要家近傍に設置された多くの電力改質センターが配電用変電所の下位で高圧配電ネットワークを構成するということにある。電力改質センターには、省エネルギー、高信頼電力供給などの目的で、小規模分散電源や電力貯蔵装置が設置されるであろう。特に、電力貯蔵装置は、電力改質センターという需要家に近い場所に分散設置されることによって、上位系に設置される場合には果たすことのできなかつた潜在的な能力を発揮できる可能性があり、FRIENDSの様々な機能を実現するためのキーアイテムの一つであると考えられている。一方、種々の電力貯蔵装置には、それぞれ固有の特徴があり、果たすことのできる機能は異なる。従って、本節では、<4.3.1>において、電力改質センターに設置される電力貯蔵装置が果たすことのできる機能を整理し、<4.3.2>では、いかなる種類の貯蔵装置が、どの機能を果たすのに適しているかを定性的に検討する。これらの検討により、これまで概念的にしか考えられていなかった、FRIENDSにおける電力貯蔵装置の役割がより明確となる。

#### <4.3.1> 電力貯蔵装置が果たすべき機能

一般に、電力貯蔵装置の機能は、発電機と貯蔵を組み合わせた場合、貯蔵により発電電力の高付加価値化ができ、電力の安定供給・時間帯移動による高価値化、ベース負荷電源による負荷追従運転を実現できる。また、システムの運用面では、電力貯蔵装置の適用により、システムの短時間変動に対応して系統制御の安定化ニーズが、変電・配電系統においては、負荷平準化、電圧変動、負荷変動補償、瞬時停電・電圧低下など、系統全体への対応から負荷端の電力品質向上まで幅広いニーズがある。さらに、負荷の立場において電力貯蔵装置のニーズを整理すると、ピークカットによる契約電力の減少、負荷変動補償、無停電電源機能、負荷力率制御、深夜電力の有効利用など、電力貯蔵装置を用いること

によって、電力系統への影響を少なくし、供給電力の品質を維持・向上できる。一方、FRIENDSにおいて、電力改質センターに分散配置される電力貯蔵装置は、小規模貯蔵装置にもかかわらず、需要家(負荷地点)に最も近いという利点を生かし、様々な機能を実現できる可能性がある。FRIENDSの概念において、これら電力貯蔵装置の果たすべき役割は以下のものが挙げられる。

#### (a) 負荷平準化

負荷平準化とは、電力貯蔵装置が電力負荷のボトム時に充電、ピーク時に放電することによって、負荷率の向上を目指すものである。一般に、負荷平準化に用いられる電力貯蔵装置は、できるだけ多くの負荷量をピークからボトムに移行できるように、kWh容量が大きく、かつ貯蔵損失(貯蔵時の目減り)の小さな特性を持つことが望ましい。さらに、配電ネットワーク内の電力流通を比較的自由に操作できるFRIENDSでは、近隣の電力改質センターと協調して運用し、地域全体として負荷平準化するという方策もとることも可能である。

#### (b) 周波数変動の抑制

小規模な電力系統では、比較的大きな負荷変動が系統周波数変動の原因の一つとなりうる。瞬時に大電力を充放電できる電力貯蔵装置を系統に導入することによって、周波数変動を抑制できることが期待でき、実際に可変速フライホイールを用いた周波数変動抑制装置も実用化されている<sup>[29]</sup>。

#### (c) 系統安定化制御

電力潮流の擾乱に対する系統安定化は重要である。電力貯蔵装置のうち、大規模なSMESやフライホイールは、短時間かつ大電力の高速制御が可能であるため、事故時などの系統の動揺を抑制し、系統安定度を向上させる効果も期待できるとして、盛んに研究がなされている<sup>[42]</sup>。

#### (d) 力率制御および(e) 電圧・無効電力制御

一般に、SMESなどの電力貯蔵装置は、半導体素子を用いた電力

変換器を介して系統との電力のやり取りを行う。すなわち、一度電力を直流に変換して貯蔵あるいは放電を行う。このときSMESの持つ即応性と電力変換器を高機能に制御することで、有効・無効電力を同時にかつ独立に制御することが可能である。従って、系統側から貯蔵装置側を見たときの力率を向上することができ((d)力率制御)、さらに、あたかも無効電力補償装置(Static Var Compensator; SVC)と等価な機能((e)電圧・無効電力制御)を果たすことも期待できる。

#### (f) 負荷変動補償

現在、短時間で不規則に変化する負荷変動に対し、電力系統では、発電機のガバナフリー運転とAFC(自動周波数制御)装置の組み合わせにより対応しているが、将来的に大規模電源の偏在化、硬直化が進むことを鑑みると、より需要家に近いところで負荷の変動を補償することが望ましい。従って、より需要家に近い電力改質センターに設置される貯蔵装置には、高性能な負荷変動補償機能が要求される場所である。このような負荷変動補償に用いられる貯蔵装置は、例えば、マイクロSMESのように、貯蔵電力量(kWh容量)が小さくても、大きなkW容量を持ち、入出力の損失が少なく、即応性の良い電力貯蔵装置が適していると考えられる。

#### (g) 非常用電源としての機能

電力改質センターが果たすべき重要な機能の一つに、多品質電力供給がある。この機能を実現するためには、平常時には負荷平準化等の他の目的で運用している電力貯蔵装置も、緊急時にはエネルギーのバッファとして、高信頼電力供給のために非常用電源としての役割も果たす必要がある。この場合、あらかじめ(平常時においても)、最低限遮断不可能な負荷分のエネルギーを確保して運用しておく必要がある。つまり、適当なkWh、kW容量を持ち、貯蔵損失が小さい電力貯蔵装置が適する。

#### (h) 無停電電源装置などの電力品質改善装置のバックアップ電源

さらに、電力改質センターには無停電電源装置などの電力品質

を改善するための様々な装置が設置されることになる。高信頼な多品質電力供給を行う場合には、電力貯蔵装置は、これらの装置に対するエネルギーのバッファとしての役割も果たす。従って、大kW容量、高効率な電力貯蔵装置が適するものと考えられる。

#### (i) 自然エネルギー電源(PVシステムなど)との協調運用

電力改質センターを需要家近傍に設置する利点は、需要家が持つ局所的な小規模電源(太陽光発電(*Photo-Voltaic*; PV)システム、風力発電システム)を有効利用できることにある。通常、これらの自然エネルギーを利用した電源は、その出力が不規則に変動するため、電力貯蔵装置でその変動を補償することによって、確定的な容量価値を得ることができる。これらの負荷変動は、一般に時間的に短く、変動幅が大きいので、大kW容量かつ即応性の良好な電力貯蔵装置が適している。

#### (j) 熱電併給電源(FCシステムなど)との協調運用

また、電力改質センターの一部には、電力供給のみに限らず、熱やガスなども供給しうる地域エネルギーセンターとしての機能を果たす可能性もある。その場合、電力貯蔵装置は燃料電池発電(*Fuel Cell*; FC)システムやガスタービンなどのコジェネレーション設備と協調をとり、エネルギー全体の供給形態として最適な運用をする必要がある。例えば、熱負荷と電力負荷に等時性がない場合、電力貯蔵装置を適切に運用し、熱・電負荷の等時性を作ることによって、コジェネシステムを有効に利用できる可能性がある。つまり、大kWh容量、かつ貯蔵損失の少ない電力貯蔵装置が適する。

#### (k) 直流配電用電源

近い将来、直流による電力利用が増す可能性もある。文献[109]では、商業ビル内における直流配電の可能性を検証しており、文献[110][111]では、需要家側にインバータを設置し、屋内における直流配電の実例を示しているが、FRIENDSでは、直流型の分散電源や電力貯蔵装置が電力改質センター設置されるため、電力改質センターから直接需要家に直流を供給することも可能である。こ

の場合、需要家に個別にインバータを設置する場合に比べて、変換損失を大きく低減できると考えられる。さらには、需要家の持つ直流型の分散電源や電力貯蔵装置も有効利用できるものと考えられる。従って、直流電源として適する電力貯蔵装置は、大kWh容量、かつ良好な制御特性を持つことが必要である。

上記(a)～(e)までの機能は、通常、配電用あるいは二次変電所等に設置される電力貯蔵装置によってなされる役割であるが、さらに需要家に近い電力改質センターに設置された場合にもこれと同等の効果を期待できる。

(f)～(k)の機能は、電力貯蔵装置を需要家に近い場所に設置することによって、より大きい効果を期待できるものである。従って、次項では、上記(f)～(k)に(a)を加えたそれぞれの機能について、どの種類の貯蔵装置が適しているのか定性的に検討する。

#### <4.3.2> 定性的検討

4.2.節で述べたように、各種電力貯蔵装置はそれぞれ異なる特徴を持っている。例えば、SMESには高効率、即応性、有効・無効電力同時制御が可能などの特徴があり、二次電池電力貯蔵装置(*Battery Energy Storage System*; BESS)は、低価格、小型、構造が簡単などの特徴を持つ。また、小容量フライホイールは、高効率、かつ即応性に優れているが、回転エネルギーによって貯蔵するため、交流発電機を必要とするといった特徴がある。そこで、本検討では次の分散配置が可能な5種類の電力貯蔵装置を対象とした。

1. BESS①：数～数十[kWh]/数[kW]級の小規模二次電池
2. BESS②：数[MWh]/数[MW]級の中規模二次電池
3. SMES①：数百[Wh]/数[MW]級、"マイクロSMES"と呼ばれるようなもの
4. SMES②：数百[kWh]/数十[kW]級の小規模SMES
5. SMES③：数十[MWh]/数[MW]級の中規模SMES
6. フライホイール：数百[Wh]/数百[kW]級の小規模フライホイール

表4.3.は、<4.2.1>で説明した各種電力貯蔵装置の特徴と<4.3.1>で述べた電力貯蔵装置が果たすべき機能を踏まえ、電力改質センターに設置される種々の電力貯蔵装置が、いかなる機能を果たすのに適しているのかを比較したものである。表中の記号(a)～(k)は、前項の電力貯蔵装置の果たすべき機能の記号と同じ意味である。これらを電力貯蔵容量の観点から考察すると、貯蔵容量の大きさは、「SMES①<フライホイール<BESS①<SMES②<BESS②<SMES③」の順となり、小容量設備であるBESS①、SMES①、ならびにフライホイールは、多くのエネルギーを継続的に必要とする機能には適さず、また、これらの貯蔵装置は比較的負荷追従性に優れていることから、小容量のエネルギーを頻繁に充放電する(f)負荷変動補償、(h)電力品質改善装置用、ならびに(i)自然エネルギー電源との協調などの機能を果たすのに適していると考えられる。BESS②、SMES②、ならびにSMES③は、いずれの機能をも果たすことができる可能性があるが、これらは比較的大kWh容量を持つことから、秒オーダーにおいて充放電を行うような機能より、むしろ(a)負荷平準化、(g)非常用電源、(j)熱電併給電源との協調、および(k)直流配電用電源などといった時間オーダーにおいて充放電を行う運用の方が適すると考えられる。さらに、BESSは過充電・過放電に比較的弱い、SMESは他の貯蔵装置に比べエネルギー密度が低い(おおよそ、SMESは2[kWh/m<sup>3</sup>]、二次電池(鉛)は30[kWh/m<sup>3</sup>]など)ため、サイズが大きくなる、フライホイールは貯蔵時の損失が大きいなどの、各種貯蔵装置の持つ特徴を考慮して、各機能に適した貯蔵装置の形式が決められる。

また、電力改質センターは、配電系統の中で需要家近傍に数多く設置されるため、用地取得の困難さから、電力改質センターを設計するときコンパクト性は重要な要素の一つである。本検討では、電力改質センターを構成する重要な装置である各種電力貯蔵措置の大きさも評価している。さらに、表4.3.には、それらの電力貯蔵装置の経済的および技術的実現可能性も定性的に検討している。BESS②ならびにSMES③などの比較的貯蔵装置の大きさ装置は、様々な機能を果たすことができると考えられるが、電力改質センターに設置するという観点、すなわち貯蔵装置自身の大きさという観点からは満足いくものではないという欠点がある。

表4.3.種々の電力貯蔵装置の役割

	電力貯蔵装置の機能							貯蔵装置の大きさ	経済的可能性	技術的可能性
	(a)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)			
BESS①	△	○	×	◎	◎	△	△	excellent	excellent	excellent
BESS②	◎	△	◎	○	△	○	◎	unsatisfy	satisfy	satisfy
SMES①	×	◎	×	◎	◎	×	×	good	satisfy	excellent
SMES②	△	○	○	◎	○	○	△	unsatisfy	unsatisfy	satisfy
SMES③	◎	△	◎	△	○	◎	◎	poor	poor	satisfy
フライホイール	×	◎	×	○	◎	△	×	good	satisfy	good

◎: 非常に適している, ○: 適している,

△: 場合によって適している, ×: 適していない

(a)負荷平準化 (f)負荷変動補償 (g)非常用電源

(h)電力品質改善装置用 (i)自然エネルギー電源との協調

(j)熱電併給電源との協調 (k)直流配電用電源

#### 4.4.多品質電力供給の観点から見た電力貯蔵装置の運用

電力改質センターには、適切容量の分散電源や電力貯蔵装置を設備され、特に、電力貯蔵装置を適切に運用することによって様々な機能を実現することができる。一方、FRIENDSの重要な機能の一つに多品質電力供給がある。4.3.節で述べたように、電力改質センターに設置される電力貯蔵装置は、非常用電源機能ならびに電力品質改善装置としての役割を持ち、FRIENDSの多品質電力供給に必要不可欠な要素の一つである。

そこで、本節では、電力貯蔵装置が分散配置されたFRIENDSのネットワークモデルを想定し、需要家に多品質電力を供給可能な電力貯蔵装置の設備規模と

その運用アルゴリズムを提案し、簡単なモデル系統によるシミュレーションを行う。まず、<4.4.1>では、本節における多品質電力供給(高信頼電力供給)の考え方とその実現方法について説明し、想定するFRIENDSのネットワーク構成、ならびにシミュレーション方法を<4.4.2>で説明する。次に、多品質電力供給を実現可能な電力貯蔵装置の運用アルゴリズムを、(I)電力改質センターが単独で多品質電力供給を保証する場合、ならびに(II)電力改質センター間の電力融通を考慮して保証する場合に分けて提案し、それらのシミュレーション結果をそれぞれ<4.4.3>、および<4.4.4>において考察する。

#### <4.4.1> 多品質電力供給の実現方法

本項では、多品質電力供給の概念を簡単に説明し、FRIENDSにおけるその実現形態について述べる。多品質電力供給とは多様な品質の電力を需要家が利用できるシステムである。しかしながら、これまでに述べたように、電力品質の定義に関し、まだ世界的に統一された見解はない。そこで、本論文では<2.4.2>で定義した定性的な電力の差別化に基づいて検討を進めている。なお、本節での検討では、簡単のため、電力品質は標準品質と高品質の2種類を考える。すなわち、電力品質の差別化を供給信頼度の大小とし、高品質電力は全く停電が無く、標準品質電力は非常時には供給者の意向によって遮断されるものと仮定して検討を進める。

多品質電力供給を実現するためには、事故などにより電力供給に支障が生じる場合でも、最低限高品質電力だけは供給を継続しなければならない。FRIENDSの概念に基づくと、多品質電力供給を行うために電力改質センターは、

- ① 高圧配電ネットワークを柔軟に切り換え、系統構成を変更する。
- ② 電力改質センター内に設備される分散電源や電力貯蔵装置の一部を非常用電源として、あらかじめ適切に運用しておく。
- ③ 負荷を低減するために、標準品質電力の供給を一時停止する。
- ④ 需要家が所有する分散電源や電力貯蔵装置を有効に利用する。

これらのいずれか、もしくはいくつかの措置を講じなければならない。本節で

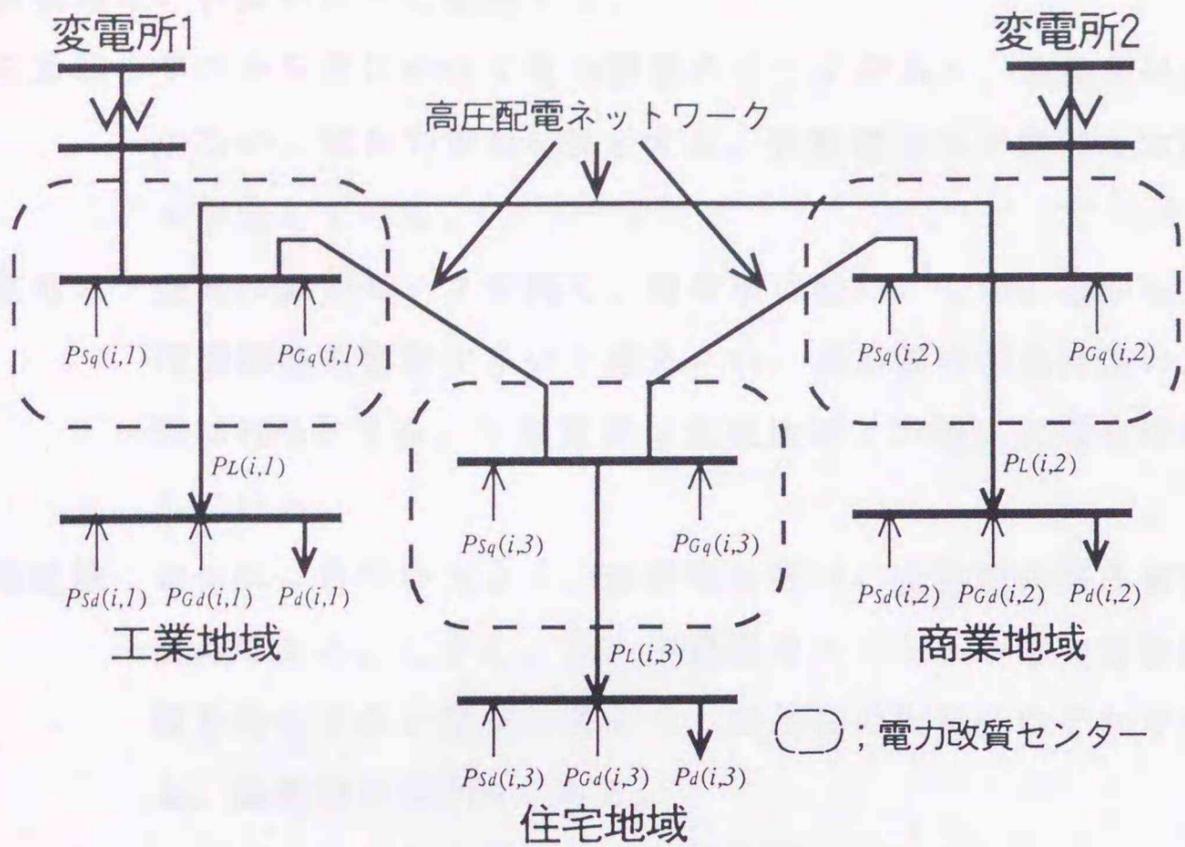
は、特に電力貯蔵装置に焦点を絞り、上記の②と③の方策により多品質電力供給が可能な電力貯蔵装置の適切な容量とそれらの運用方式に関して検討する。

#### <4.4.2> FRIENDSネットワークモデル

まず、本検討で用いたモデル系統を図4.3.に示す。同図に示されるように、FRIENDSの特徴である電力改質センターを配電用変電所と需要地域との間に設置してある。このモデルは配電用変電所が二つ、電力改質センターが三つの簡単なモデルであるが、電力改質センターは複数の配電用変電所に接続され、その中には分散電源や電力貯蔵装置が設置されており、FRIENDSの特長を十分に生かすことができるようにしている。また、本モデル中の電力改質センターは、図4.4.のような構成を想定しているため、瞬電圧低下などは考慮しなくても良く、近隣の電力改質センターとの電力融通やバイパスなども柔軟に行うことができる。さらには、電力改質センターの制御装置によって需要家側の標準品質電力を自由に遮断可能である。

電力改質センター内の分散電源や電力貯蔵装置などの設備は、その電力改質センターに接続される負荷の特徴によって、それぞれ異なる運用や制御方式がなされるべきである。従って、電力改質センターには図4.5.に示す3種類の需要地域が接続されるとしている。

3種類の需要地域（住宅、商業および工業地域）には、あらかじめ高品質と標準品質とに分けた一日の負荷パターンを与える（図4.5.(a)）。また、同図(b)(c)に示すように、それぞれの需要地域は分散電源と電力貯蔵装置を所有しており、これらは高品質を供給していると仮定するが、本検討では電力改質センターに設備される電力貯蔵装置によって多品質電力供給を実現することを目的としているため、今回はその運用パターンを変化させないものとした。



$P_d(i, k) = P_{dh}(i, k) + P_{do}(i, k)$ ; 需要家負荷=高品質+標準品質  
 $P_{Gd}(i, k)$ ; 需要家側分散電源  $P_{sd}(i, k)$ ; 需要家側電力貯蔵装置  
 $P_L(i, k)$ ; 電力改質センターと需要家間の電力流通  
 $P_{Gq}(i, k)$ ; 電力改質センター分散電源  
 $P_{sq}(i, k)$ ; 電力改質センター電力貯蔵装置  
 ただし、 $i$ ; 時間帯幅、 $k$ ; 電力改質センターまたは需要家番号

図4.3. モデル系統

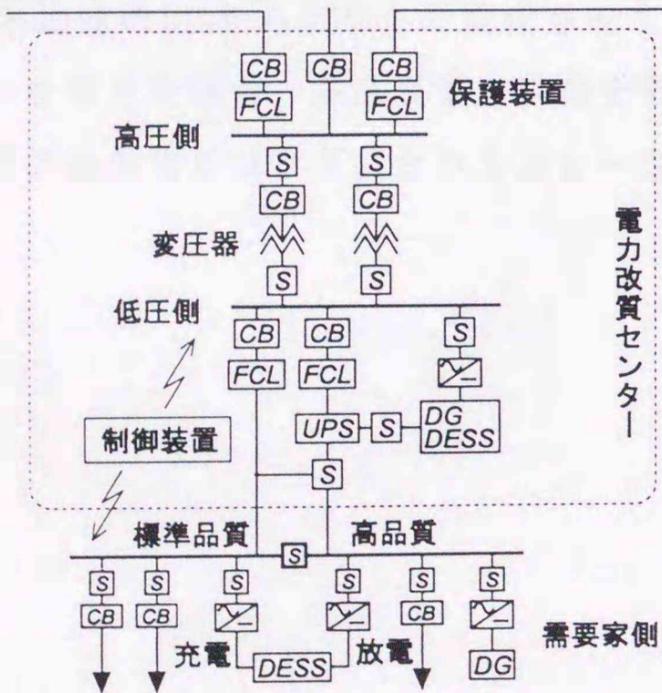


図4.4. 想定した電力改質センターモデル

各需要地域の特徴を以下に整理する。

住宅地域：夕方から夜にかけて電力需要のピークがあり、高品質は全体的に少ない。負荷力率は60%とする。分散電源は小規模な太陽光発電を想定している。

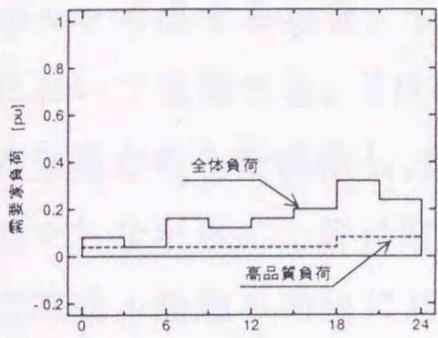
商業地域：昼間に高いピークを持ち、負荷率は低い。しかしながら、情報処理機器等の需要が多いと考えられ、高品質の割合は高い。負荷力率は70%とする。分散電源は住宅地域と同様に太陽光発電を想定している。

工業地域：全体的に負荷が大きく、負荷率も高い。全体的に高品質の割合も高めである。しかし、大・中規模なコ・ジェネ等の自家用発電設備を所有すると想定しており、高品質の大部分はそれで分担される。負荷力率は90%である。

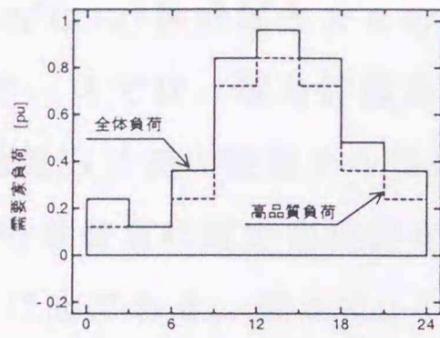
なお、全ての地域の小規模電力貯蔵装置はピークカット、ボトムアップを基本として運用される。

結局、需要家と電力改質センターとの電力流通、すなわち電力改質センターから見た負荷 $PL(i,k)$ は図4.6.(d)となる。なお、電力改質センターに設備される分散電源は一日中一定出力とし、その大きさはその電力改質センターに接続される需要地域負荷の平均値の0%から30%まで変化させている。このようにモデル系統と負荷モデルを与えた場合、多品質電力供給を実現できる電力改質センター内電力貯蔵装置の運用アルゴリズムとシミュレーション結果を次節以降に示す。

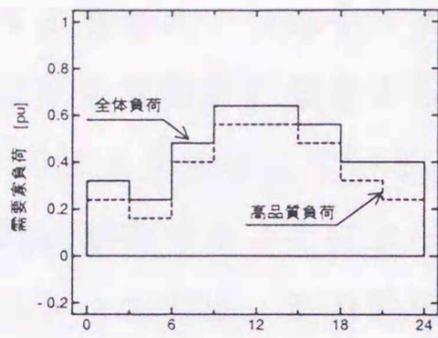
住宅地域



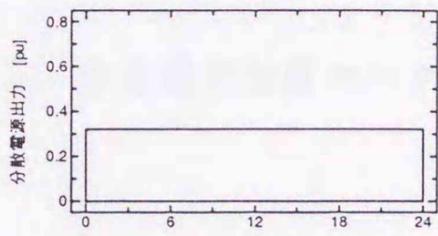
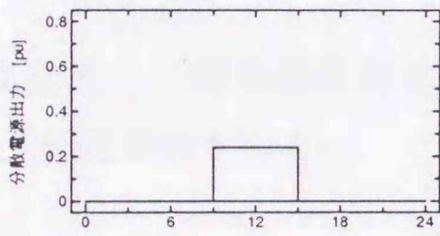
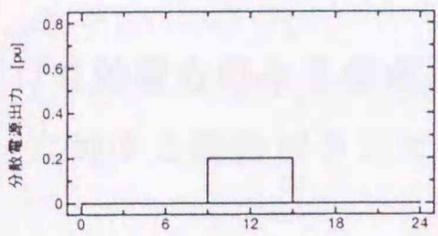
商業地域



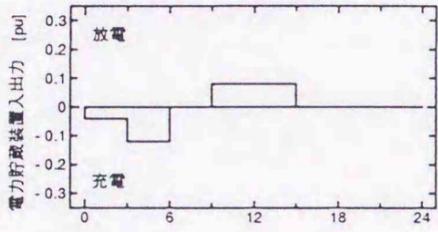
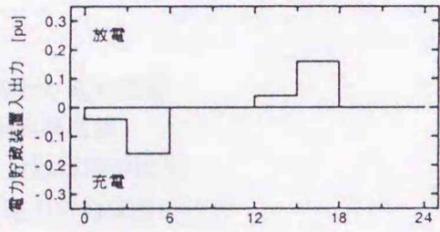
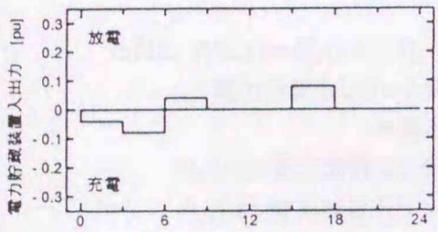
工業地域



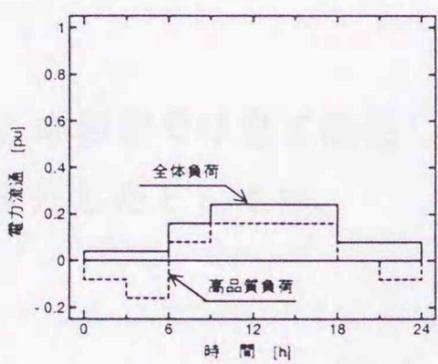
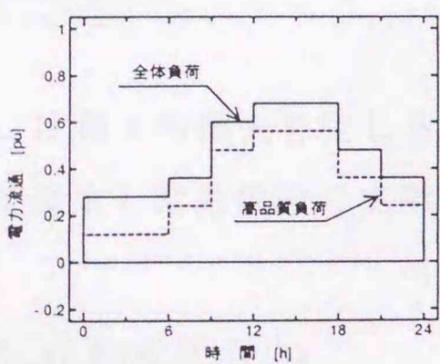
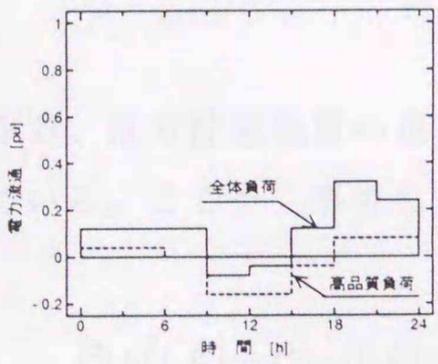
(a) 需要家負荷



(b) 需要家側分散電源出力



(c) 需要家側電力貯蔵装置入出力



(d) 需要地域と電力改質センターとの電力流通

図4.5. 負荷パターン

#### <4.4.3> 電力改質センターが単独で多品質電力供給を補償する場合

本項では、その電力改質センターに接続される需要地域に対してのみ多品質電力供給を保証するような電力貯蔵装置の運用アルゴリズムを、(1)有効電力のみを考慮する場合、ならびに(2)無効電力をも考慮する場合の二つのケースにおいて提案する。(1)のケースでは、電力貯蔵装置は高品質負荷の要求する有効電力のみを供給し、無効電力は別の装置から供給することを想定している。しかしながら、一般に電力貯蔵装置は電力変換器を適切に制御することによって有効・無効を同時に制御可能である。従って、(2)のケースでは、電力貯蔵装置が高品質負荷の要求する有効・無効電力を供給することを想定している。

(1)有効電力のみを考慮するとき 平常運用時において、ある電力改質センターに対する需給バランスは、次式で示される。

$$P_L(i,k) - P_{Gq}(i,k) - P_{Sq}(i,k) = P_{in}(i,k) \quad \dots(4.1)$$

ただし、 $P_L(i,k) = P_{Lh}(i,k) + P_{Ll}(i,k)$

: 電力改質センターと需要家との電力流通  
= 高品質 + 標準品質

$P_{Gq}(i,k)$ : 電力改質センターの分散電源の出力

$P_{Sq}(i,k)$ : 電力改質センターの電力貯蔵装置の出力

$P_{in}(i,k)$ : 配電ネットワークから

電力改質センターに流入する電力

$i$ : 時間帯番号  $k$ : 電力改質センター番号

なお、電力貯蔵装置の運用には種々の損失を生じるが、本検討では全て無視している。ここで、事故などが発生し電力供給に支障をきたしたとしても、

$$P_{Lh}(i,k) - P_{Gq}(i,k) - P_{Sq}(i,k) \leq P'_{in}(i,k) \quad \dots(4.2)$$

を満足するような入力  $P'_{in}(i,k)$  を得られれば、その電力改質センターは確実に高品質電力  $P_{Lh}(i,k)$  を供給できる。すなわち、多品質電力供給が可能である。しかしながら、事故の発生箇所や、線路、変圧器等の制約によって常に(4.2)式を

満足するとは限らない。そこで、最悪のケースを想定すると、すなわち、電力改質センターへの電力の流入がない場合 ( $P_{in'}(i,k)=0$ ) では、

$$\frac{E_{Sq}(i-1,k)}{T} \geq P_{Lh}(i,k) - P_{Gq}(i,k) \quad \dots (4.3)$$

を満足するような電力量が電力貯蔵装置に蓄えられていなければならない。ただし、 $E_{Sq}(i,k)$ は時間帯*i*の終期における電力改質センター*k*に設置される貯蔵装置の貯蔵電力量であり、 $T$ は時間帯の長さで3時間である。上式の不等号を等号にし、全ての時間帯について計算すると、多品質電力供給を可能とするために最低限貯蔵されていなければならない貯蔵電力量パターン  $E_{Sqneed}(i,k)$  が分かる。いま、これを最低貯蔵電力量制約と呼ぶことにする。ここで、

$$P_{Sqmax}(k) = \max_{i=1 \sim 8} \left( \frac{E_{Sqneed}(i,k)}{T} \right) \quad \dots (4.4)$$

によって計算される  $P_{Sqmax}(k)$  が、電力改質センター*k*に設置される電力貯蔵装置の最大入出力制約となる。貯蔵装置の最大貯蔵量制約  $E_{Sqmax}(k)$  を、

$$E_{Sqmax}(k) = T \cdot P_{Sqmax}(k) \cdot K \quad \dots (4.5)$$

とすれば、電力貯蔵装置の平常時の運用パターンは、(4.6)～(4.9)式の制約の範囲内でその電力改質センターに接続される負荷を平準化 (*Peak Cut & Bottom Up*) するように計算される。ただし、(4.5)式において負荷平準化の効果をよく出すために係数*K*は1/0.6としてある。

・入出力制約

$$|P_{Sq}(i,k)| = \left| \frac{E_{Sq}(i-1,k) - E_{Sq}(i,k)}{T} \right| \leq P_{Sqmax}(k) \quad \dots (4.6)$$

・日間運用制約

$$\sum_{i=1}^8 P_{Sq}(i,k) = 0 \quad \dots (4.7)$$

・最大貯蔵電力量制約

$$E_{Sq}(i,k) \leq E_{Sqmax}(k) \quad \dots (4.8)$$

・最低貯蔵電力量制約

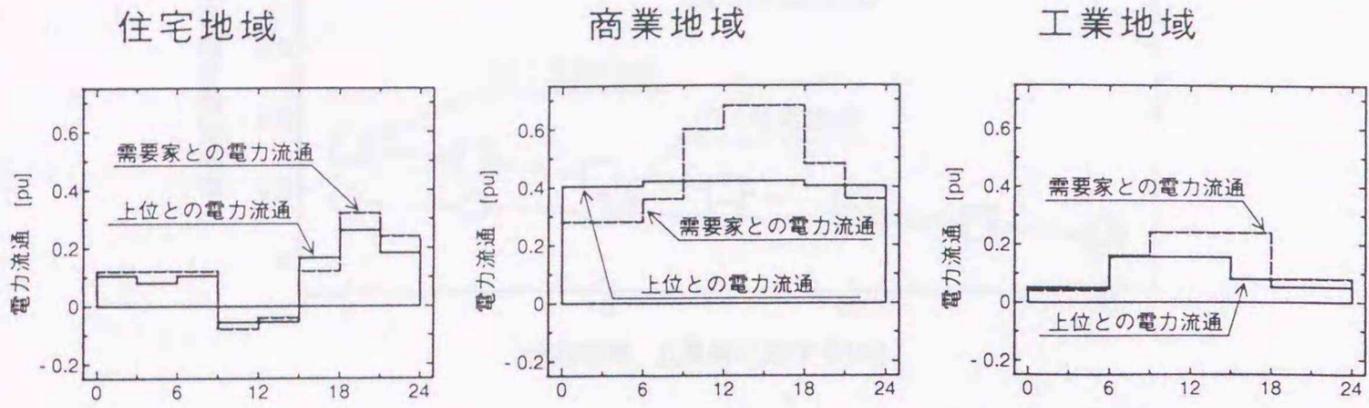
$$E_{Sq}(i,k) \geq E_{Sqneed}(i,k) \quad \dots (4.9)$$

ここでは、高品質電力を補償するために、電力貯蔵装置の運用制約に新たな最低貯蔵量制約を導入し、上位系に事故が発生し、対象とする電力改質センターに電力供給が無くなっても、最低限高品質電力は供給を継続可能な運用アルゴリズムを提案した。次に、本アルゴリズムを図4.3.の例題モデルに適用する。

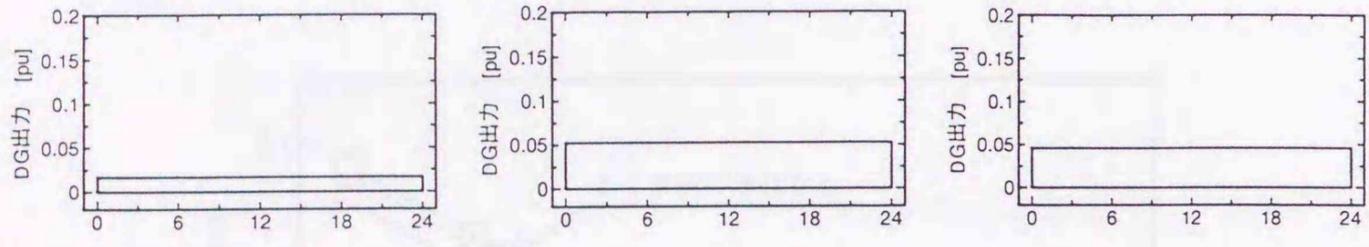
まず、図4.6.にシミュレーション結果の一例を示す。同図は、平常運転時における電力貯蔵同図(d)は電力貯蔵装置の貯蔵電力量パターンを示しており、貯蔵電力量が最低貯蔵量制約を下回ることはなければ多品質電力供給が可能であることを示している。電力貯蔵装置の運用パターンは同図(c)のようになり、上位との電力流通は同図(a)に示されるように負荷平準化されていることが分かる。また、電力改質センターに設置する分散電源の出力を変えると、多品質電力供給に必要なとされる電力貯蔵装置の設備量(kWh)も変化する。その推移を図4.7.に示す。同図において多品質電力供給に必要な分散電源と貯蔵装置の関係を定量的に把握できる。

さらに本検討では線路損失についても検討した。図4.8.は負荷平準化するように運用したもの(○)、多品質電力供給は保証するが負荷平準化を考慮しないもの(△)および電力貯蔵装置を設置しないもの(□)について、一日の線路損失を比較したものである。同図より、負荷平準化するように電力貯蔵装置を運用したものが最も線路損失を小さくできることが分かる。

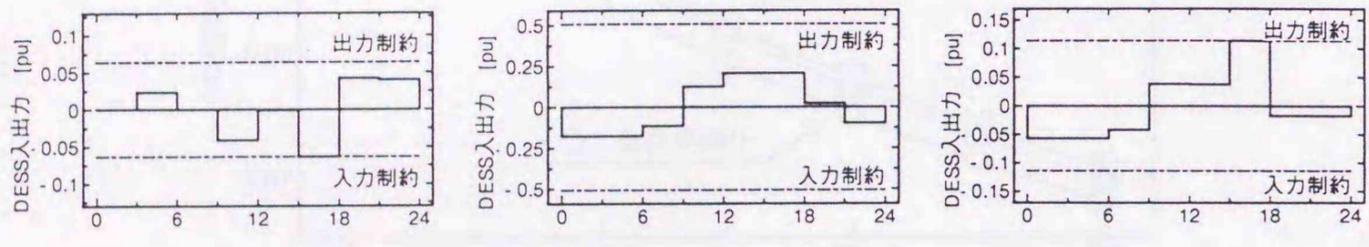
以上の結果から、電力改質センターに設備される分散電源や電力貯蔵装置を適切に運用することによって、FRIENDSの基本概念である多品質電力供給のみならず、負荷平準化や線路損失の効果を期待できることが分かる。



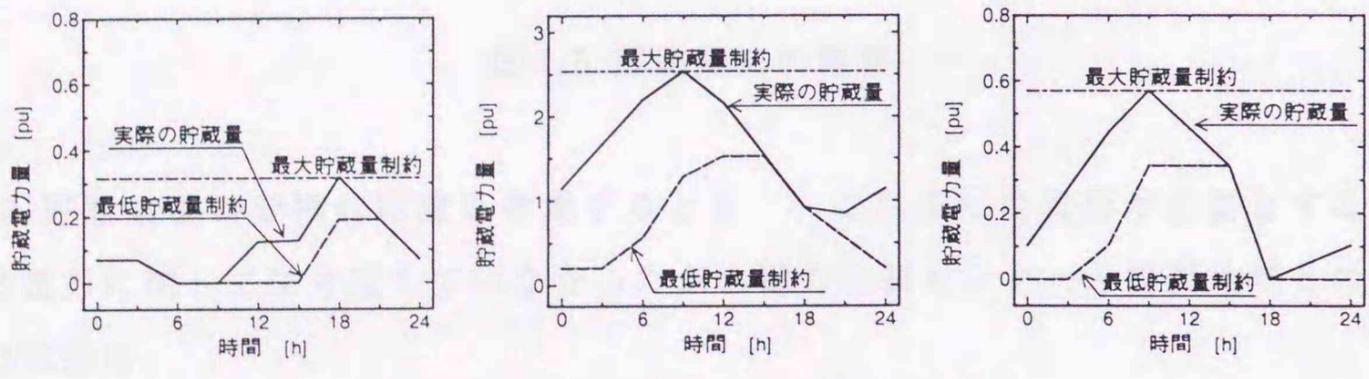
(a) 各需要家地域と電力改質センターとの電力流通



(b) 分散電源出力



(c) 電力貯蔵装置入出力



(d) 電力貯蔵装置の貯蔵電力量

図4.6. 電力改質センターの運用パターン

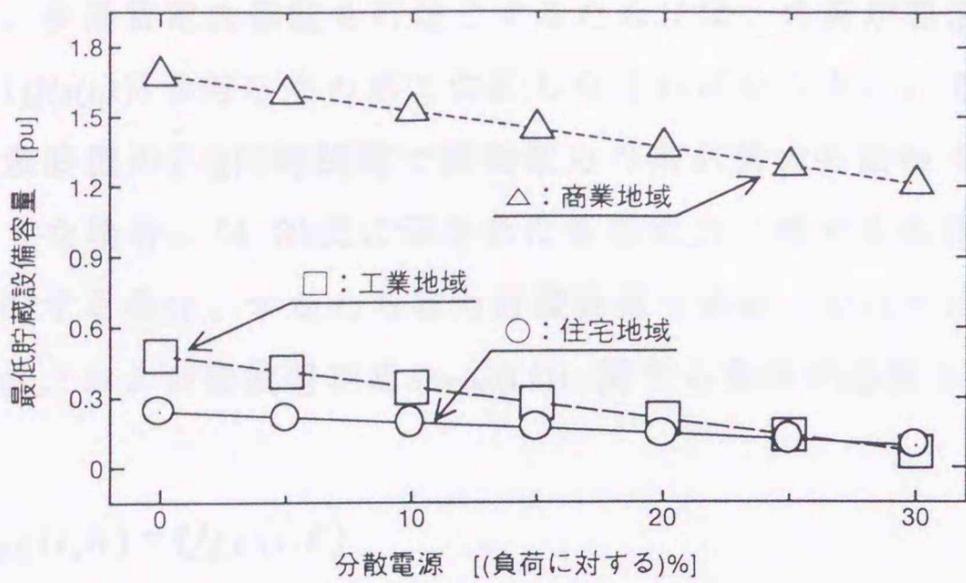


図4.7. 最低貯蔵設備 (kWh) 容量

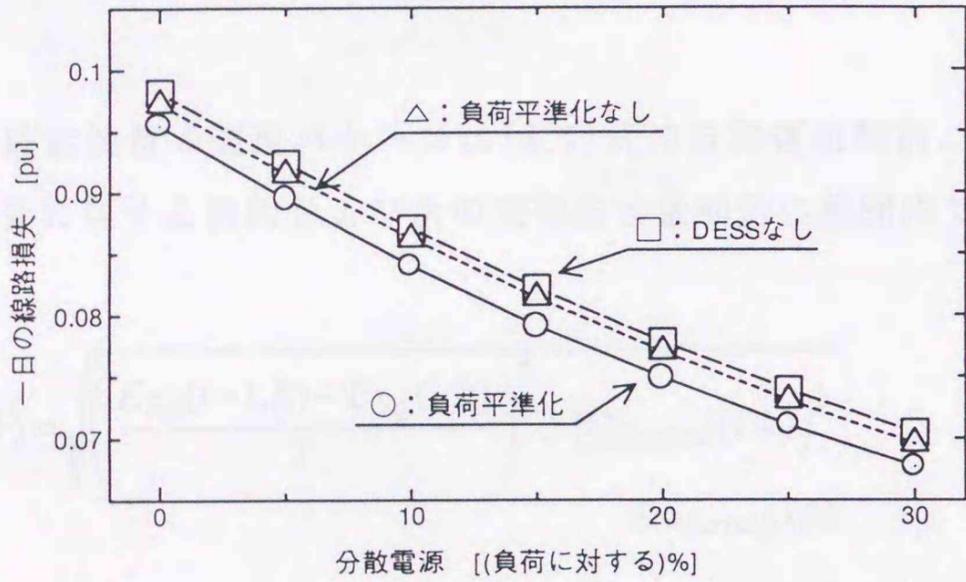


図4.8. 線路損失の推移

(2) 貯蔵装置の変換器容量を考慮するとき これまでは負荷が必要とする無効電力に関しては考慮していなかったが、電力改質センターと需要地域との電力流通は、

$$\begin{aligned}
 & P_L(i,k) + jQ_L(i,k) \\
 & = \underbrace{\{P_{Lh}(i,k) + jQ_{Lh}(i,k)\}}_{\text{高品質分}} + \underbrace{\{P_{Lo}(i,k) + jQ_{Lo}(i,k)\}}_{\text{標準品質分}} \quad \dots (4.10)
 \end{aligned}$$

であるので、多品質電力供給を可能とするためには、負荷が要求する無効電力の高品質分 ( $Q_{Lh}(i,k)$ ) も何らかの形で供給しなければならない。そこで、本検討では電力貯蔵装置のP-Q同時制御で無効電力の高品質分を供給することを考える。このような場合、(4.3)式に示された有効電力に関する条件に加え、次の無効電力に関する条件、すなわち電力貯蔵装置で供給しなければならない無効電力  $Q_{Sqneed}(i,k)$ 、および変換器容量  $S_{Sqmax}(i,k)$  に関する条件が必要となる。

$$Q_{Sqneed}(i,k) = Q_{Lh}(i,k) \quad \dots (4.11)$$

$$S_{Sqmax}(k) = \max_{i=1 \sim 8} \left\{ \sqrt{\left( \frac{E_{Sqneed}(i-1,k)}{T} \right)^2 + (Q_{Lh}(i,k))^2} \right\} \quad \dots (4.12)$$

従って、貯蔵装置の運用パターンは(4.7)式の日間運用制約、(4.8)(4.9)式の貯蔵電力量に関する制約および次の変換器容量制約の範囲内で計算できる。

$$S_{Sq}(i,k) = \sqrt{\left( \frac{E_{Sq}(i-1,k) - E_{Sq}(i,k)}{T} \right)^2 + (Q_{Sqneed}(i,k))^2} \leq S_{Sqmax}(k) \quad \dots (4.13)$$

また、電力貯蔵装置の最大貯蔵容量は次式で計算される。なお、係数  $K$  は(5)式と同様に  $1/0.6$  である。

$$E_{Sqmax}(k) = \max_{i=1 \sim 8} \{ E_{Sqneed}(i,k) \} \cdot K \quad \dots (4.14)$$

負荷の要求する無効電力の高品質分を電力貯蔵装置で供給する場合には、電力貯蔵装置の有効電力に関する部分、すなわち有効電力の入出力パターンおよび最低貯蔵設備容量は(1)有効電力のみを考慮する場合と同じであり、多品質電力供給に必要な電力貯蔵装置の変換器容量のみが異なる結果となる。本運用

アルゴリズムを適用して、図4.3.のモデル系統について平常時運用を計算すると、その電力貯蔵装置の変換器容量の推移は図4.9.のようになる。同図より、いずれの電力貯蔵装置も分散電源の出力が増すにつれ、必要となる変換器容量も減少する傾向にあることが分かる。なお、図4.3.のモデル系統では、無効電力の影響が良く現れるように、あえて各需要地域の力率を低く設定している。実際には、需要家が分散電源や電力貯蔵装置を所有する場合、分散電源の系統連系ガイドラインの規制を受け、ある一定以上の高力率にしなければならない。

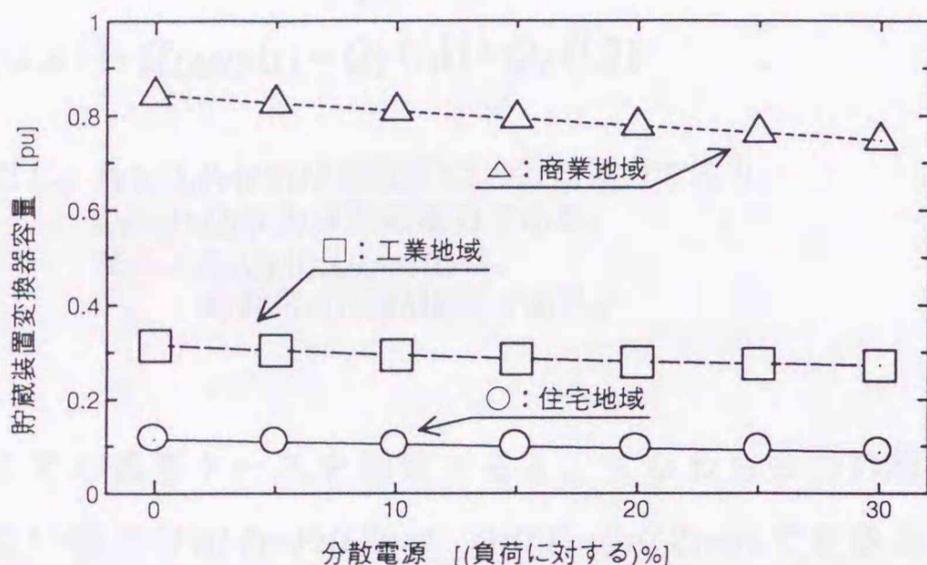


図4.9. 変換器容量 (kVA) の推移

#### <4.4.4> 電力改質センター間の電力融通を考慮して 多品質電力供給を補償する場合

FRIENDSという新しい電力流通システムの特徴の一つは、比較的自由に電力改質センター間の電力融通を行えることである。前項のように電力改質センターが単独で多品質電力供給を保証する場合には、設備されなければならない電力貯蔵装置が大規模なものとなる可能性がある。しかしながら、本モデルのように不等率(複数の需要家群における、最大電力の発生時刻の時間的ずれを示す指標)の大きな需要家間で、電力融通を考慮して電力貯蔵装置を運用すれば、必要とされる貯蔵装置の設備量を低減できることが予想される。そこで、本項

ではFRIENDSネットワーク全体として、多品質電力供給を保証できる貯蔵装置の運用パターンを提案する。

ある電力改質センターの電力バランスは(4.1)式のように示されるが、図4.3.のモデル系統全体の需給バランスは、

$$\sum_{k=1}^3 (P_L(i,k) - P_{Gq}(i,k) - P_{Sq}(i,k)) + P_{LOSS}(i) = P_T(i,1) + P_T(i,2) \quad \dots(4.15-1)$$

$$\sum_{k=1}^3 (Q_L(i,k)) + Q_{LOSS}(i) = Q_T(i,1) + Q_T(i,2) \quad \dots(4.15-2)$$

ただし、 $P_T(i,1), P_T(i,2)$ は変電所1,2の有効電力であり、  
 $Q_T(i,1), Q_T(i,2)$ は無効電力である。  
 また、 $P_{LOSS}(i), Q_{LOSS}(i)$ は、  
 時間帯*i*の線路損失である。

である。ここでも最悪ケースを想定すると、すなわち3つの電力改質センターへの入力がない場合( $P_T(i,1)=P_T(i,2)=0, Q_T(i,1)=Q_T(i,2)=0$ )でも多品質電力供給を保証するためには、次式で示す電力を貯蔵装置で供給しなければならない。

最低限貯蔵されていなければならない電力量 $E_{Sqn}(i,k)$ および無効電力出力 $Q_{Sqn}(i,k)$ は、次式を満足するように決定する必要がある。

$$\sum_{i=1}^3 \left( \frac{E_{Sqn}(i-1,k)}{T} \right) = \sum_{k=1}^3 (P_{Lh}(i,k) - P_{Gq}(i,k)) + P'_{LOSS}(i) \quad \dots(4.16-1)$$

$$\sum_{k=1}^3 (Q_{Sqn}(i,k)) = \sum_{k=1}^3 (Q_{Lh}(i,k)) + Q'_{LOSS}(i) \quad \dots(4.16-2)$$

ただし、 $P'_{LOSS}(i), Q'_{LOSS}(i)$ は、このときの線路損失

しかしながら、全ての電力貯蔵装置の $E_{Sqn}(i,k)$ および $Q_{Sqn}(i,k)$ を決めることは非常に複雑となる。ここでは有効電力の電力融通によって、どれほど**商業地域**

の電力改質センターに設置される貯蔵設備を低減できるかを調べることにする。すなわち、工業地域および住宅地域の変換器容量 ( $S_{Sqmax}(1)$  ,  $S_{Sqmax}(3)$ )、最大貯蔵容量 ( $E_{Sqmax}(1)$  ,  $E_{Sqmax}(3)$ ) および無効電力 ( $Q_{Sq}(i,1)=Q_{Sqneed}(i,1)$  ,  $Q_{Sq}(i,3)=Q_{Sqneed}(i,3)$ ) を前項(2)で計算したそれらと同じにし、商業地域の設備ができるだけ小規模になるように電力貯蔵装置の運用パターン  $P_{Sq}(i,k)$  を決定する。商業地域の電力貯蔵装置の最低貯蔵電力量  $E_{Sq}(i,2)$  は、次式で計算できる。

$$\frac{E_{Sq}(i-1,2)}{T} = \sum_{k=1}^3 (P_{Lh}(i,k) - P_{Gq}(i,k)) - \left( \frac{E_{Sq}(i-1,1)}{T} + \frac{E_{Sq}(i-1,3)}{T} \right) + P'_{Loss}(i) \quad \dots (4.17)$$

ただし、工業( $k=1$ )および住宅地域( $k=3$ )については、

$$E_{Sq}(i,k) \leq E_{Sqmax}(k),$$

$$\frac{E_{Sq}(i-1,k)}{T} \leq \sqrt{(S_{Sqmax}(k))^2 - (Q_{Sqneed}(i,k))^2}$$

の制約の範囲内で  $E_{Sq}(i,k)$  を決定する。

従って、商業地域に設備される電力貯蔵装置の変換器容量  $S_{Sqmax}(2)$  は、

$$S_{Sqmax}(2) = \max_{i=1 \sim 8} \left( \sqrt{\left( \frac{E_{Sq}(i-1,2)}{T} \right)^2 + (Q_{Sq}(i,2))^2} \right) \quad \dots (4.18)$$

であるから、多品質電力供給のために必要な貯蔵装置の容量は、

$$\max_{i=1 \sim 8} (E_{Sq}(i,2)) \quad \dots (4.19)$$

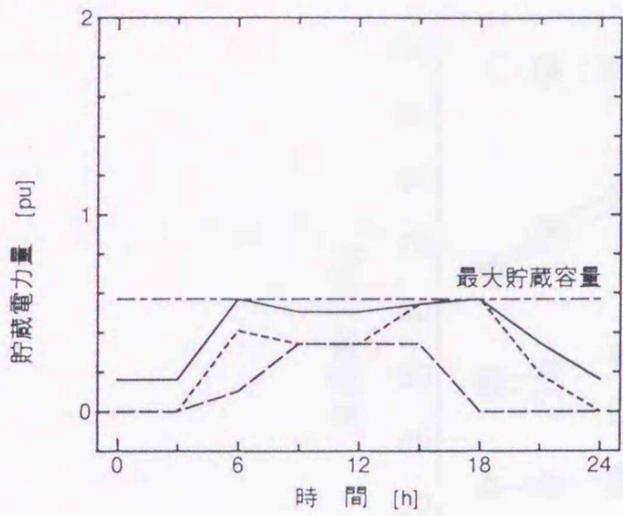
となる。また、 $E_{Sq}(i,2)$  を用いて(4.14)式と同様に商業地域の最大貯蔵容量  $E_{Sqmax}(2)$  を計算できる。電力貯蔵装置の運用は(4.7)式、(4.8)式および(4.13)式の制約と次式の最低貯蔵量制約を受け、そのセンターに接続される負荷を平準化するように計算される。

$$E_{Sq}(i,k) \geq E_{Sq_n}(i,k) \quad \dots (4.20)$$

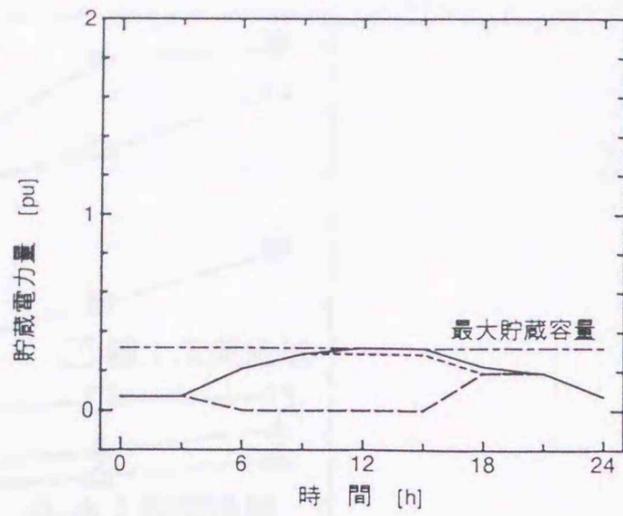
また、貯蔵装置の最大貯蔵量の大きさによって融通できる電力が変わってくるので、最大貯蔵容量  $E_{Sq_{max}}(k)$  の計算式 ((4.14) 式) における係数  $K$  を 1 から 2 の間で適当に変化させている。

次に、この運用アルゴリズムをモデル系統で数値計算した結果を述べる。図 4.10. は貯蔵電力量パターンの計算結果の一例 (分散電源:10%、 $K=1/0.6$ ) である。破線 (--) が単独時の最低貯蔵電力量制約  $E_{Sq_{need}}(i,k)$ 、点線 (··) が協調時の制約  $E_{Sq_n}(i,k)$  であり、実線 (—) が負荷平準化を考慮した実際の貯蔵量パターン  $E_{Sq}(i,k)$  である。工業地域および住宅地域の変換器容量、最大貯蔵容量および貯蔵装置の無効電力出力を変えずに、電力改質センター間の有効電力の電力融通を考慮することによって効果的に商業地域の電力改質センターに設置される電力貯蔵装置を小規模にできることが分かる。そこで、最大貯蔵容量を決める (4.14) 式の係数  $K$  をパラメータにした多品質電力供給を保証する最低貯蔵電力量の推移を図 4.11 に示す。同図では分散電源出力の大きさによって、多品質電力供給に対する最適な最大貯蔵容量があることを示している。

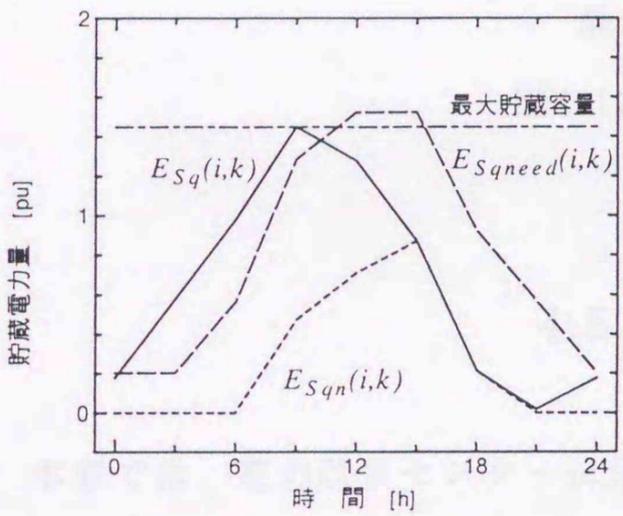
また、図 4.12 は最大貯蔵容量に対する各電力改質センターにおける負荷率の推移を示したものである。それぞれ黒塗りが電力改質センター単独で多品質電力供給を保証する場合である。工業地域および住宅地域では、電力融通を考慮すると最大貯蔵容量が等しい場合でも、最低貯蔵量制約が大きくなるので、負荷平準化の効果が少なくなる場合があることがわかる。



(a) 住宅地域



(c) 工業地域



(b) 商業地域

図4.10. 貯蔵電力量パターン  
(分散電源:10%、係数  $K=1/0.6$ )

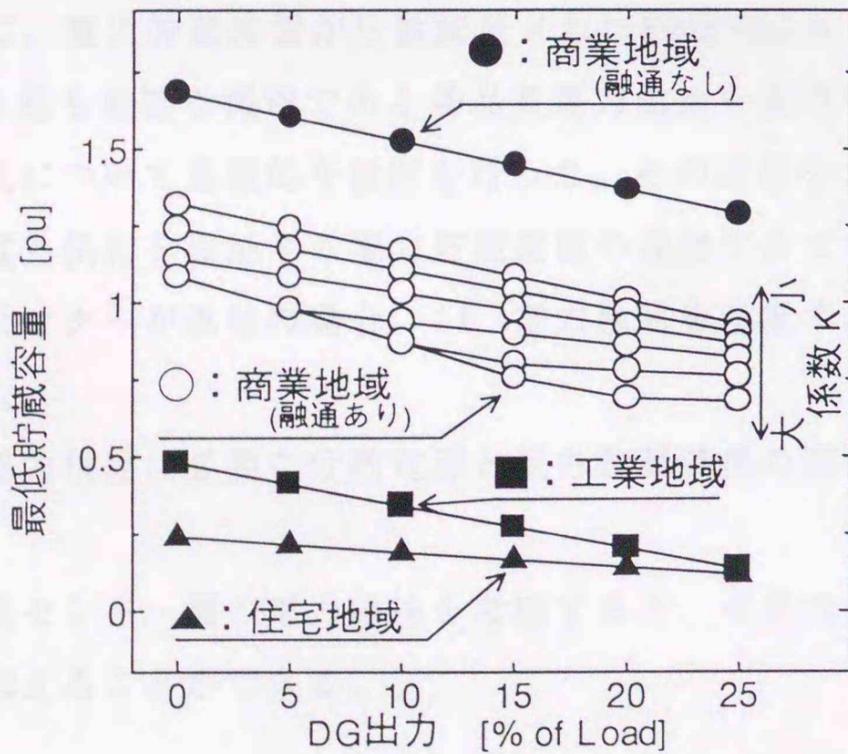


図4.11. 最低貯蔵容量の推移

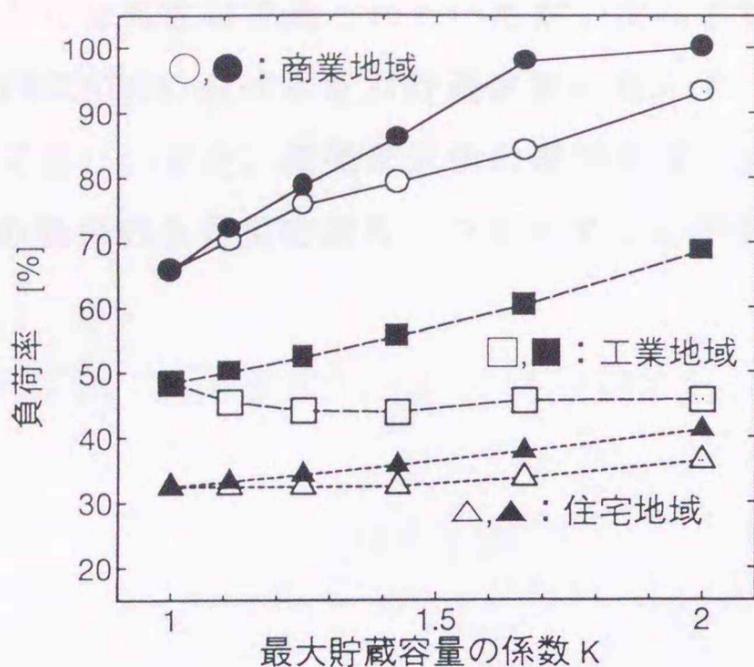


図4.12. 負荷率の推移

#### 4.5. ま と め

本章では、電力改質センターに分散配置される電力貯蔵装置に焦点を絞り、FRIENDSの目的を果たすために、電力貯蔵装置が果たすべき機能を整理し、どの種類の電力貯蔵装置がどのような機能を果たすのに適しているか定性的に検討した。さらに、電力貯蔵装置が分散配置されたFRIENDSネットワークにおいて、FRIENDSの最も重要な機能である多品質電力供給を実現可能な、電力貯蔵装置の運用方式について基礎的な検討を行った。その結果をまとめると、

- (1) 多品質電力供給を保証する電力貯蔵装置の運用アルゴリズムを(I)電力改質センターが単独の場合、(II)電力融通を考慮する場合に分けて提案した。
- (2) 多品質電力供給に必要な分散電源と電力貯蔵装置の関係を定量的に示した。
- (3) 電力改質センター間の電力融通を考慮すると、効果的に貯蔵設備を小規模に抑えることができる。



## 第5章 電力改質センターの内部構成の解析

### 5.1. 概 要

これまで述べてきたように、「高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システム (*Flexible, Reliable and Intelligent Electrical eNergy Delivery System; FRIENDS*)」は電力の質を柔軟に制御可能であり、将来起こり得る様々な状況に対応できる次世代の電力流通システム概念として提案されている。FRIENDSを実現するためには、「電力改質センター (*Quality Control Center; QCC*)」という新しいシステムの具体的な内部構成を明らかにするとともに、FRIENDSの最も重要な機能である多品質電力供給という観点からその制御性能を、実際の配電システムを想定して定量的に評価する必要がある。そこで、本論文では、第3章において電力改質センターとして可能性のある具体的な内部構成を提案し、それらの持つ定性的な特徴について論じ、本章では、多品質電力供給の観点から、具体的な内部構成に対し、その構成の持つ能力を定量的に評価する。その際、<2.4.2>で述べたように、「電力の品質」が、瞬時停電、瞬時電圧低下、高調波、電圧変動といったmsecオーダーの極めて短時間の現象を考慮したものであるため、電力改質センターの内部構成に対する定量的評価には、瞬時値解析をベースとした波形品質の側面からの検討が不可欠である。

以上のことから、本章では、電力改質センターの多品質電力機能について詳細な検証を行う。第3章でも論じたように、電力品質の制御能力は、電力改質センターの低圧部分の構成が鍵を握る。従って、まず、5.2.節では、特徴的な需要地域に電力を供給する電力改質センターにはどのような内部構成であるべきか、その特徴を定性的に論じる。それを踏まえ、次に5.3.節において、実現

性が高いと考えられる一つの具体的な電力改質センターの低圧側の内部構成モデルを構築する。本モデルは、需要家サイドに設置される「無停電電源装置」の回路構成をベースとしたものであり、この無停電電源機能により電力の波形品質の劣化がない、特別高品質電力を供給できる。さらに、静止型開閉器を用いて高速に負荷を遮断することで、多様な供給信頼度を作り出すことができるとともに、分散電源を併用した高信頼電力供給や直流負荷への電力供給をも可能な構成である。すなわち、5.2.節で論じる商業地域に設置される電力改質センターの持つ特徴に近い構成である。なお、電力改質センターの高圧部分については、電力品質の制御に本質的な関わりがないので、特別の考慮はしていない。次に、5.4.節および5.5.節では、5.3.節で考案した電力改質センターモデルの基本性能を調べるために、msecオーダーの時間領域で電力の波形品質を評価可能な電磁過渡解析プログラム(EMTDC)を用いて電圧電流波形を瞬時値レベルで解析する。特に、電力改質センター内における電力品質の制御方式、ならびに需要家への品質別電力の供給方式に重点を置いて、実際の電圧電流波形にどのような影響が現れるかについて検討を行う。まず、5.4.節では、電力改質センターの上位系に供給支障が発生したケースを想定し、本電力改質センターモデルがどのような品質の電力を需要家に供給できるのかについて検討する。さらに、5.5.節では、電力改質センターが行う負荷遮断に関して基礎的な検討を行う。5.4.節ならびに5.5.節のシミュレーションの結果、FRIENDSにおける多品質電力供給機能の一方式が、少なくとも技術的には実現できる可能性があることを示している。

## 5.2. 需要地域の特徴と電力改質センター

第3章でも述べたように、需要地域の要求する多品質電力の種類や量などによって、電力改質センターの内部構成は大きく変わるものと考えられる。本節では、いくつかの特徴的な需要地域について、それらの品質別電力の特徴や電力改質センターに要求する事項を定性的に検討する。

### (1) (低層)住宅地域

一般に住宅地域の需要家が要求する負荷は、単相負荷が大部分を占める。従って、電力改質センターが供給する負荷には三相不平衡の割合が高く、電力改質センター内部にはアクティブフィルタなどによる不平衡是正装置が必要である。また、面的に広い地域に供給する場合には、電力改質センターから需要家までの電圧降下を補償する装置も必要となる。パワーエレクトロニクス可変モータや電磁開閉器などの非常に良質な電力を要求する機器も少ないため、特別高品質電力の割合は低く、安価な標準品質の割合は高くなる。

また、多くのPVシステム等の不確実な電源があるものと考えられ、その負荷変動を保障するために、電力改質センターには比較的kW容量の大きい電力貯蔵装置が必要となるであろう。

### (2) マンション群

負荷の特徴は(低層)住宅地域と同様であるが、供給する範囲が面的に狭いので、PVシステム等の規模は小さい。また、需要家までの電圧降下も小さいので、電圧調整装置も簡素化できる。

また、電力改質センターは電力供給のみならず、内部に設置される分散電源の熱を利用して熱供給も行い、地域のエネルギーセンターとしての役割をも果たす可能性がある。マンション群に用いられる熱の温度は比較的低いものが多いので、電力改質センター内には低温型のFCシステム(例えばリン酸型)が配備されることになるであろう。

### (3) 大型デパート、オフィスビル

大規模デパートやオフィスビルには、インバータ応用機器が多く、将来的には直流配電の可能性もある<sup>[109]</sup>。FRIENDSでは、電力改質センターに設置される直流型電源や貯蔵装置より、需要家に直接直流電力を供給可能である。また、コンピュータなどの情報処理機器も多く、特別高品質電力の要求は高い。さらに、照明機器用に高周波の電力供給を必要とする場合もある。従って、デパートやオフィスビルことに設置される電力改質センターには、直流電源と高機能なインバータ装置との協調的な制御が必要不可欠である。また、一般に負荷率

の低いこれらの需要地域は、負荷率改善のための様々な装置が設置されるであろう。しかしながら、電力改質センターの立地スペースは、ビル地下などに限られるため、他の電力改質センターに比べよりコンパクト性が重要となり、種々の装置の小型化が必要である。

#### (4) 大規模工場

工場需要では、住宅、商業地域のような低圧の負荷に加え、高圧あるいは特別高圧の負荷も存在する。また、パワエレ制御器や高圧ランプ負荷などの電力品質の劣化に弱い負荷も多く、電力改質センターには大きな容量を持つ特別高品質用品質改善装置が必要である。また、大容量電動機の大きな起動電流に伴う電圧降下も大きくなる恐れがある。従って、その瞬間的な電圧降下を補償するための特別な措置を講じる必要がある。通常の大規模工場は、中規模クラスの自家用発電設備を所有するケースが多い。電力改質センターはその発電設備と商用電源との協調や、自己・卸託送等の制御を行う必要がある。また、工場の敷地内に電力改質センターを設置するため、比較的設置スペースは確保できるケースが多く、経済性の許す限り、大容量の装置を設置することが可能である。

#### (5) 工場団地

負荷の特徴は大規模工場と同様であるが、小・中規模工場群に電力供給を行う電力改質センターは、多くの不規則な負荷変動や発電機出力に対し柔軟な対応を図らなければならない。そのために、比較的大容量な貯蔵装置を有し、適切に負荷変動補償や電圧調整を行う必要がある。

### 5.3. 電力改質センターの内部構成モデル

第3章では、電力改質センターをいくつかの主要部分に分け、個別に様々な形態の内部構成を提案した。FRIENDSをより具体的なシステムにするためには、第3章のように、いくつかのスケルトンレベルでの内部構成を定性的に評価す

ることに加え、本章で検討するような瞬時値レベルにおける種々内部構成の定量的な評価が不可欠である。本章の解析は、FRIENDSの最も重要な機能である多品質電力供給についての解析であるため、高圧部分については特段の配慮をせず、低圧部分に対してのみ電力改質センターをモデル化し、EMTDCによる過渡解析を行う。

EMTDCの基本的な回路の定式化は、EMTPと同様な接点解析である。すなわち、分布定数線路を含む電気回路の全ての素子を、抵抗と等価電流源で置換し、この等価回路に対して接点解析を応用してノード方程式を立て、そのコンダクタンス行列の逆行列をとることにより解を求めている<sup>[112]~[115]</sup>。さらにEMTDCでは、補間法<sup>[112]</sup>を用いることによって、計算ステップを小さくすることなくスイッチング時刻を正確にモデル化できる特徴を持っている。文献[113]~[115]にもあるように、EMTDCは半導体デバイス等の詳細な物理特性は表すことができないが、任意の関数ブロックを作成できるため、実特性に基づいた時系列モデルとして素子特性を簡易的に模擬でき、電気・電子回路系、機械・電気系からパワーエレクトロニクスなどの広範囲に渡って適用されている。

本節は、まず<5.3.1>において、シミュレーションに用いた電力改質センター低圧側の構成モデルの特徴と期待される多品質電力供給機能について定性的に明らかにし、<5.3.2>において、本モデルの詳細な仕様を述べる。

### <5.3.1> 解析モデルの特徴

これまで論じてきたように、電力改質センター(QCC)には要求される負荷特性等によって、様々な形式の構成が考えられる。本章は実現可能性が高いと考えられる構成の一つとして、図5.1.に示される電力改質センターモデルに対してEMTDCシミュレーションによって瞬時解析を行う。ただし、本章では、多品質電力供給の観点から電力改質センターの内部構成を検討することに主眼を置くため、電力改質センターの高圧側には特別な配慮をせず、電力品質の制御に重要な役割を果たすと考えられる低圧側のみについて電力改質センターモデルを構築し、シミュレーションを行う。

本解析で用いた電力改質センターモデル(図5.1.)は、品質改善装置としての無停電電源装置<sup>[100]~[102]</sup>、静止型開閉装置ならびに直流型分散電源を設置することによって、電力改質センター低圧側において標準品質、高品質、特別高品質および直流電力を作ることができ、需要家に対して多品質電力供給が可能であるという点に大きな特徴がある。本論文で考えている「電力品質」の定義は、すでに<2.4.2>で述べているように、

- ・ (交流)標準品質電力
- ・ (交流)高品質電力
- ・ (交流)特別高品質電力
- ・ その他の品質の電力：直流電力

である。しかしながら、電力品質の詳細な定義は、需要家要望や電気料金などの経済的かつ技術的側面などの観点からの検討により決められるものであり、世界的に統一された見解はない。現在もこれに関する多くの研究が行われている。従って、本論文では、上記のような定性的な電力品質の差別化に基づいて検討を行っている。

本モデルにおける標準品質および高品質電力は、平常時には電力改質センター変圧器を通して電力を供給し、電力改質センター低圧部の静止型開閉装置に優先順位を付けてON/OFF制御することにより、供給信頼度を差別化できる。つまり、平常時においては、標準品質と高品質電力との品質の相違は陽には見えない。しかしながら、高品質電力においては、非常時(上位系統からの電力供給が無くなったとき)には電力改質センター内の電力品質改善装置および分散電源により電力供給を行うことによって電力品質(供給信頼度)を高めることができる。これは、通常は無停電電源装置における常時商用方式と同様な動作に相当する。特別高品質は平常時においても無停電電源装置のインバータから電力供給を行うため、瞬時電圧低下、および高調波などといった波形品質の面でも優れた電力である。これは、通常は無停電電源装置における常時インバータ方式に相当することになる。さらに、将来の電力システムでは、需要家が直流で電力を利用する可能性も高い。電力改質センター内に直流型の分散電源や電力貯蔵装置を有するFRIENDSでは、電力改質センターから需要家に直接直流電力を供給する新たな直流配電方式も可能である。図5.1.のモデルは電力改質

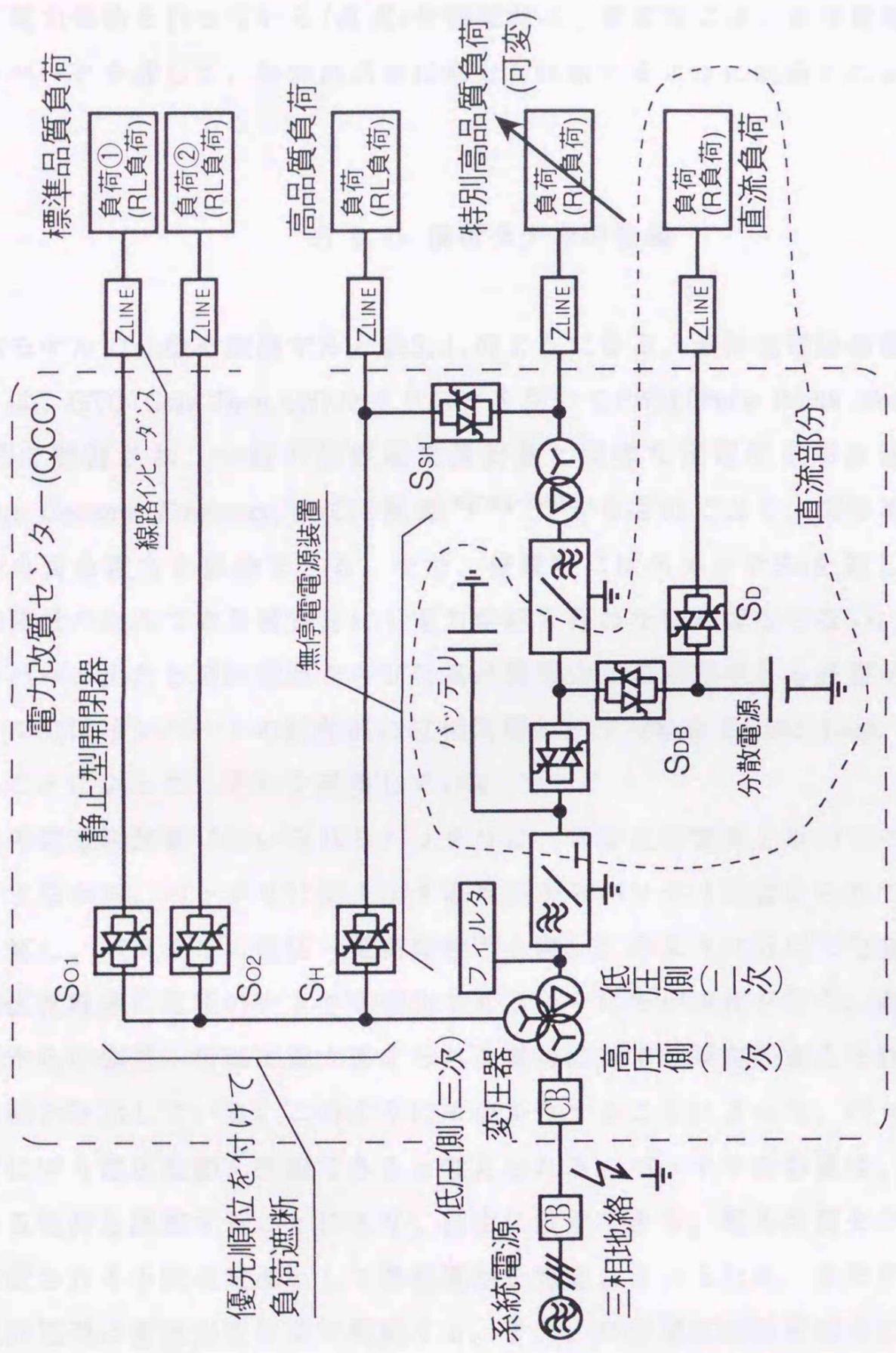


図5.1. シミュレーション回路

センター内に直流分散電源が設備されており、平常時には直流負荷に電力を供給している状況を考えている。しかしながら、本モデルは直流負荷より特別高品質電力の方が供給信頼度を高く想定しているため、平常時には直流負荷に対して電力供給を行っている(直流)分散電源は、非常時には、無停電電源装置のインバータを通して、特別高品質に電力を供給するように制御される。

### <5.3.2> 解析モデルの仕様

本モデルの仕様を整理すると表5.1.のようになる。無停電電源装置のインバータは、GTO(*Gate Turn Off*)サイリスタを用いてPWM(*Pulse Width Modulation*)方式<sup>[72]</sup>で制御され、一般の無停電電源装置と同様な定電圧定周波数(*Constant Voltage Constant Frequency*; CVCF)制御<sup>[72][100]~[102]</sup>がなされており、瞬時電圧低下のない良質な電力を供給できる。また、停電時にはスイッチ $S_{SH}$ を通して無停電電源装置の出力で高品質負荷にも電力供給を行わなければならない。従って、インバータ出力と系統電源ならびに高品質電力との同期をとる必要があり、本モデルではインバータの制御部に位相同期ループ(*Phase Locked Loop*; PLL)を用いることによって、それを実現している。

無停電電源装置に用いられるバッテリーは、可変直流電源を用いてモデル化する。すなわち、バッテリーに流入出する電流からバッテリーに蓄えられている電荷を計算し、バッテリーの電圧-電荷特性<sup>[30]</sup>を図5.2.のように近似した直線に基づいて直流電源の電圧の大きさを変化させるようにモデル化を行う。縦軸は定格電圧からの偏差、横軸は最大蓄えられる電荷に対する現在の蓄えられている電荷の割合を示している。このようにモデル化することによって、バッテリーの充放電に伴う電圧変動を模擬できると考えられる。バッテリーの容量は、最大蓄えられる電荷を調整することにより、自由に設定できる。電力改質センターに分散配置される小規模電源として燃料電池を想定しているため、本モデルにおける分散電源は直流定電圧源で模擬する。また、無停電電源装置部分には、冗長系は採用していないが、高品質電力側と特別高品質側とを結ぶスイッチ $S_{SH}$ がバイパスの役目も果たすことになり、無停電電源装置の故障やメンテナンス時

の信頼性を高められることが期待できる。さらに信頼性を高めたい場合には、一般のUPSと同様に並列冗長方式<sup>[100]~[102]</sup>など採用することによって可能である。

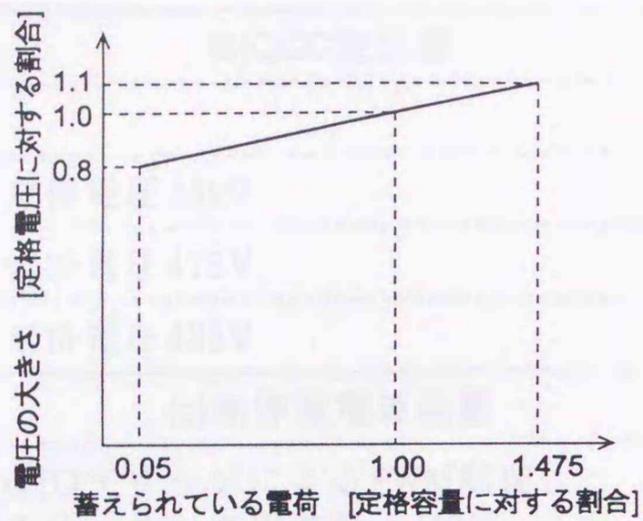


図5.2. バッテリの電圧—電荷特性

本電力改質センターモデルではGTOサイリスタによる静止型開閉器を負荷に直列に挿入し、負荷遮断等を行う構成である。一般に、低圧レベルでの半導体素子による通電損失および電圧降下は無視できるほどには小さくない。しかしながら、今後の半導体デバイスの技術開発によって大容量・低損失のスイッチング素子が開発されると予想されること、また、機械式スイッチと半導体スイッチとを併用したハイブリッドな開閉器を採用することによって、通電損失等を小さくすることも可能であることから、本章では、将来、半導体デバイスによる開閉操作が一般的になるものと考え、本モデルは静止型開閉器を負荷に直列に挿入する構成を構築した。なお、図5.1.の回路は全て単線図で示しているが、実際には交流部分は三相で解析している。

表5.1.本モデルの仕様

(a)系統電源	
電 圧	三相 3 線式、定格電圧33kV
容 量	1000kVA
(b)QCC変圧器	
容 量	400kVA
一 次	Y 結線、定格電圧33kV
二 次	△結線、定格電圧415V
三 次	Y 結線、定格電圧425V
(c)無停電電源装置	
整 流 器	GTOブリッジによるPWM制御、 スイッチング周波数：1kHz
イ ン バ ー タ	GTOブリッジによるPWM制御、CVCF制御、 スイッチング周波数：1kHz
DCリンク電圧	500V
バ ッ テ リ	可変直流電源で模擬
フ ィ ル タ	RLC帯域フィルタ(3,5,7次)、RLCローパスフィルタ(1kHz)
変 圧 器	△-Y接続(215V-430V)
(d)静止型開閉器	
GTO	ON抵抗：0.005Ω、OFF抵抗：10 <sup>8</sup> Ω、ターンオフ時間：30μs
(e)線路インピーダンス	
R	0.0124Ω、L：0.0326mH、C：0.026μF
(f)分散電源	
直流定電圧源としてモデル化	
(g)負荷	
標 準 品 質	三相 4 線式、415/240V、①：100kW+②：50kW
高 品 質	三相 4 線式、415/240V、100kW
特別高品質	三相 4 線式、415/240V、100kW(可変)
直 流	500V、100kW
※交流負荷の力率は全て遅れ0.9	

## 5.4. 停電発生時の解析

本節では、上位系(電力改質センターの高圧側より上位)に事故が発生し、電力改質センターへの電力流入が停止した場合について解析する。すなわち、図5.1.のモデルにおいて配電線に三相地絡事故を発生させることにより、高圧側保護装置(遮断器:CB)が動作し停電を模擬する。実際に電力改質センターに設備される保護システムは、配電ネットワーク構成の変更などを考慮しなければならないため、より複雑な機能を持つものと考えられるが、今回の目的は電力改質センター低圧側の多品質電力供給の観点から捉えた解析であるため、遮断器の動作は、単純に過電流検出による事故電流遮断および再閉路のみの簡単なものとした。

### <5.4.1> 電力フローの概要

本節の解析では、電力改質センターの高圧側より上位に事故が発生し、電力改質センターへの入力が全くなくなった場合を想定している。電力改質センターは、このような場合においても、特別高品質負荷には波形品質の劣化の少ない電力を供給でき、高品質負荷には瞬時電圧電圧低下などの極めて時間的に短い過渡的な波形品質の劣化はおっても、深刻な供給支障が生じてはならない。また、本節では、電力改質センターにどのような設備があり、それをどのように制御すれば、上記の電力供給を達成できるのかということを検討する。本解析における電力フローの概要を図5.3.に示す。標準品質電力は、上位系統(電力改質センター高圧側)と同じ供給信頼度であるため、本解析のように電力改質センターへの流入電力が全くない場合には負荷遮断される。高品質電力は、このような状況においても、品質改善装置や分散電源からの出力補償によって停電することなく電力供給を行うことができる。しかしながら、平常時には電力改質センター変圧器から直接電力供給を行っているため、事故時には瞬間的な電圧低下を生ずることになる。特別高品質負荷には、平常時においても無停

電電源用バッテリーから電力が供給されるため、事故時にも電圧低下や停電を生ずることなく電力供給が可能である。また、供給支障が長時間に及ぶと、バッテリーに蓄えられた電力では高品質負荷および特別高品質負荷に電力供給ができなくなる可能性がある。このような場合、平常時に直流電力を供給していた分散電源を無停電電源側に切替えることにより、高品質および特別高品質電力を保障することになる。

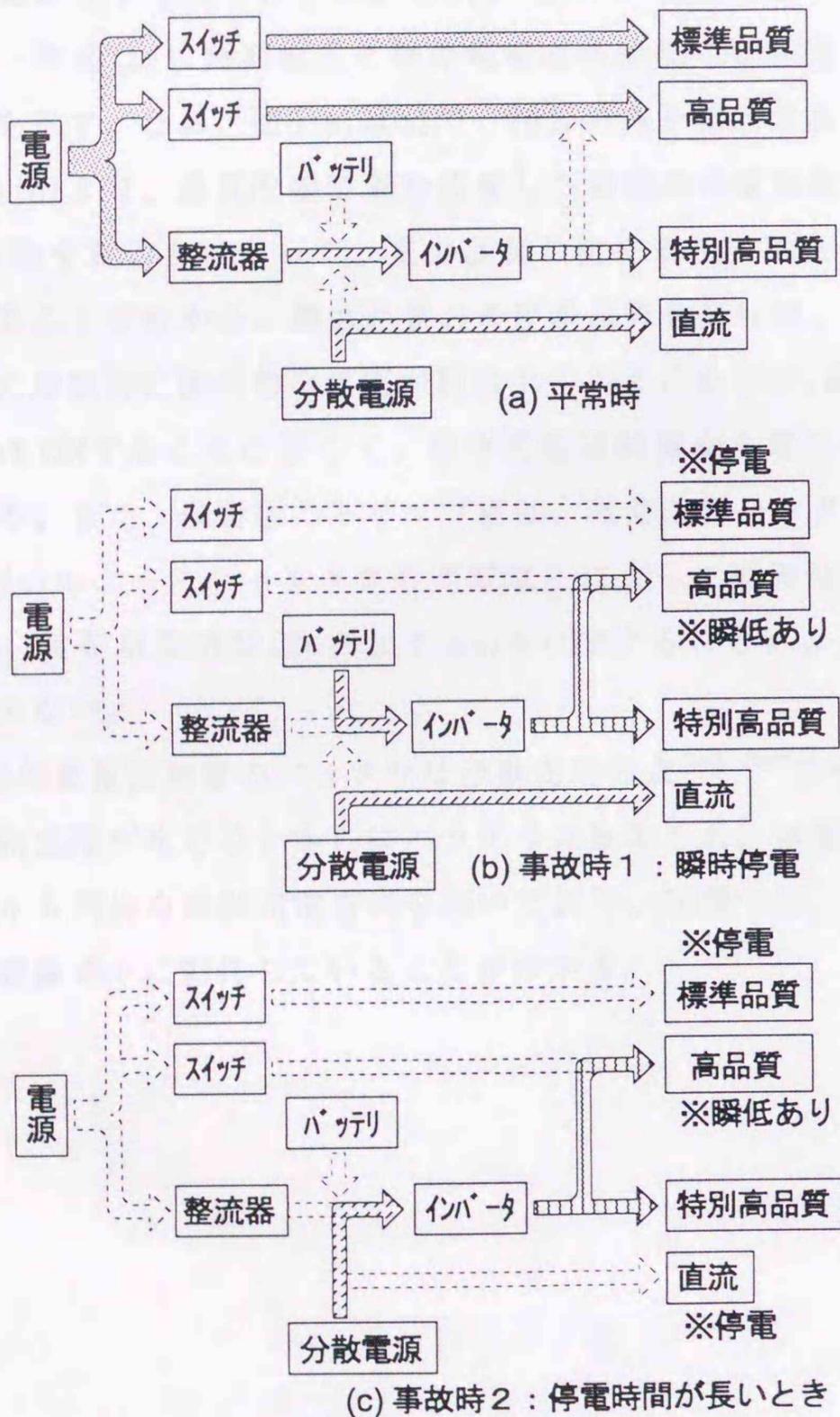


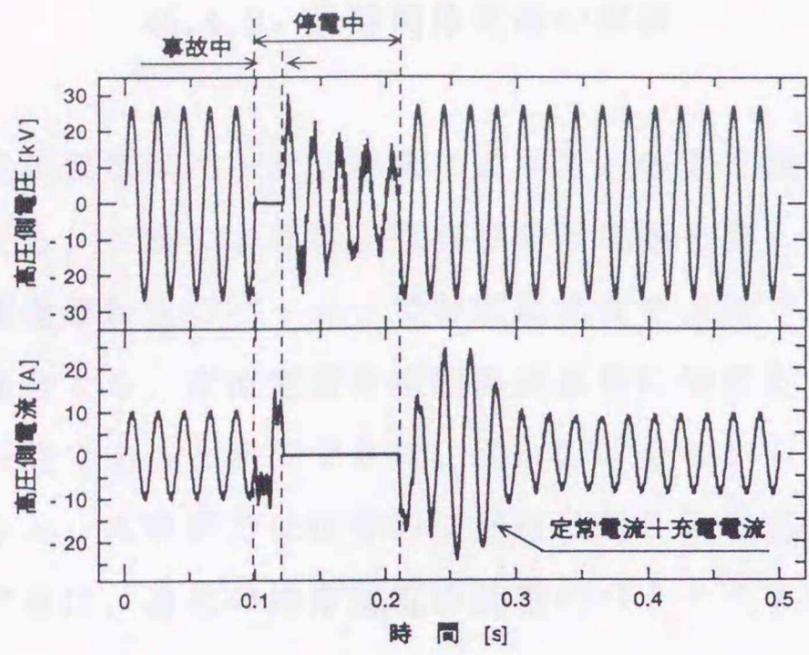
図5.3. 電力フローの概要

#### <5.4.2> 瞬時停電時の解析

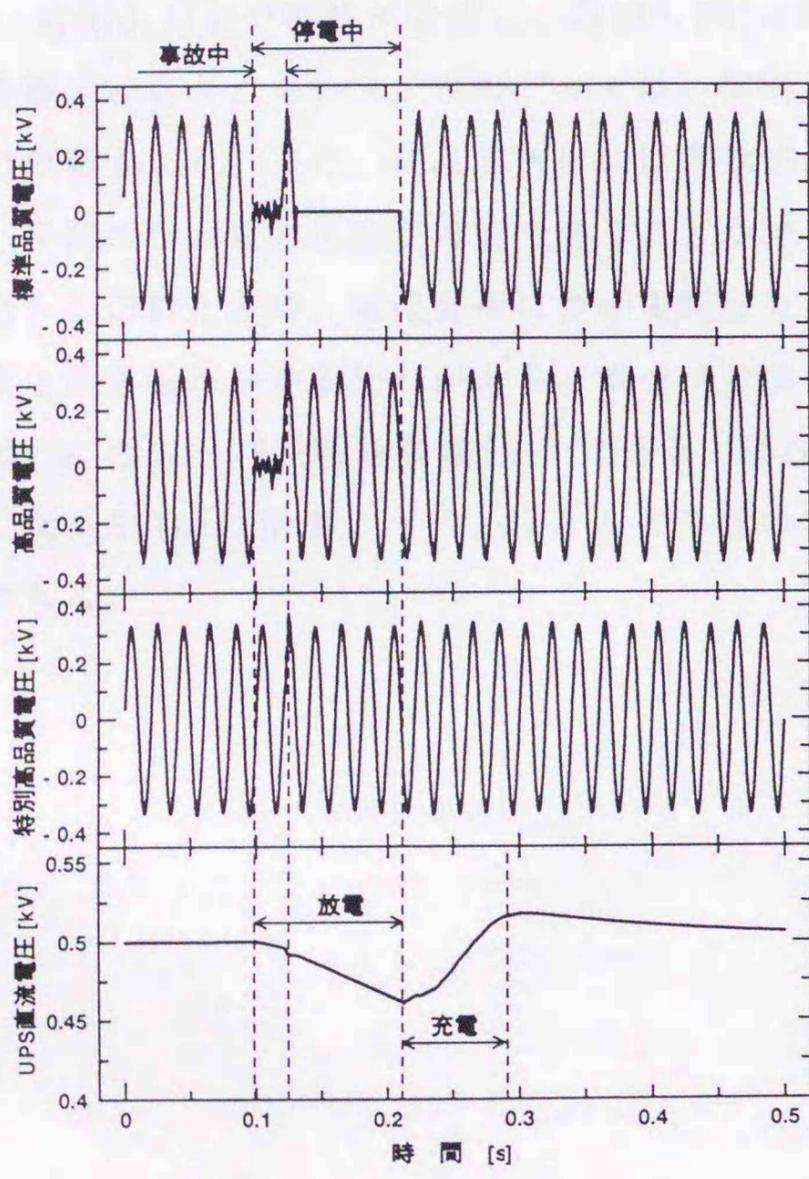
停電時間の短い場合の検討として、本解析では約0.1[s]程度の瞬時停電を考える。すなわち、時刻0.1[s]の時点で上位系に事故を発生させ、事故電流を検出した後、遮断器をトリップし、その0.1[s]後に再閉路させることを模擬する。つまり、電力改質センター高圧側には、時刻0.1[s]の時点から約0.1秒間、電力の供給支障が生ずることになる。図5.4.(a)に、電力改質センター変圧器の高圧側波形、同図(b)に負荷電圧と無停電電源直流部の電圧波形のシミュレーション結果を示す。なお、図5.4.は全て一相分のみを記してある。

図5.4.(a)(b)より、品質改善装置を設置した特別高品質負荷には、インバータをCVCF制御することによって、電力品質の劣化を招くことなく良質な電力を供給できることが分かる。標準品質および高品質負荷には、高圧側電圧波形と同じように事故時に瞬時的な停電が発生することになるが、高品質負荷には、スイッチ $S_{SH}$ をONすることによって、無停電電源装置から電力供給を維持することができる。また、遮断器のトリップ後は、電力改質センター変圧器の高圧側は図5.4.(a)のようにフィルタ等の充電電圧によって過渡的な電位の上昇が見られるが、負荷用開閉器( $S_{01}$ および $S_{02}$ )をOFFすることによって、負荷に及ぼす影響は少ない。

一般に、無停電電源装置のバッテリーは浮動充電方式<sup>[100]~[102]</sup>で充電されており、上位系に供給支障が生じるときにはバッテリーは放電され、復電すると充電される。本モデルも同様な浮動充電方式を用いており、同図では、バッテリーの充放電の様子も理論通りに動作していることが分かる。



(a) 高圧側電圧・電流波形



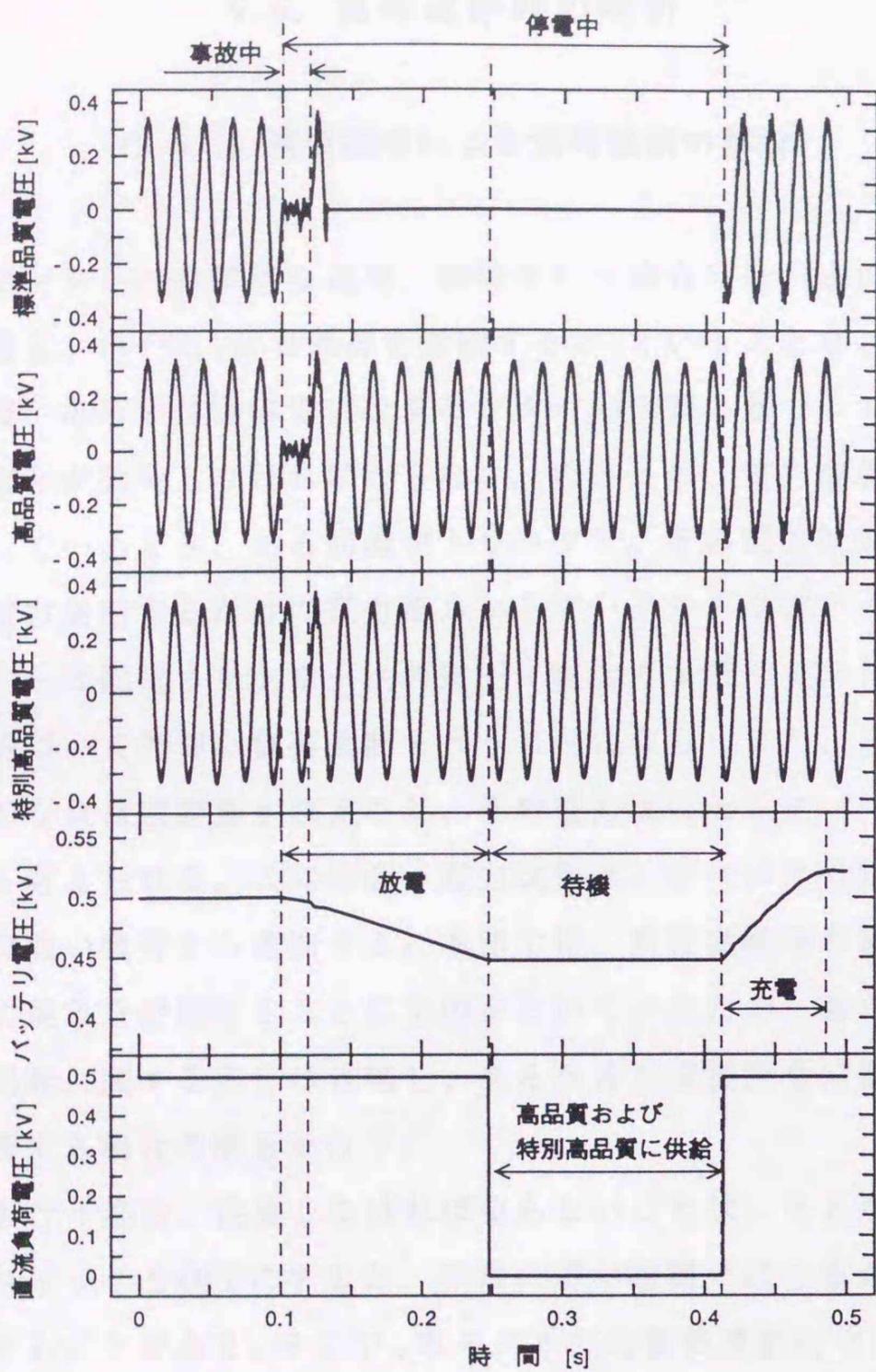
(b) 低圧側電圧波形

図5.4. 瞬時停電時の電圧・電流波形

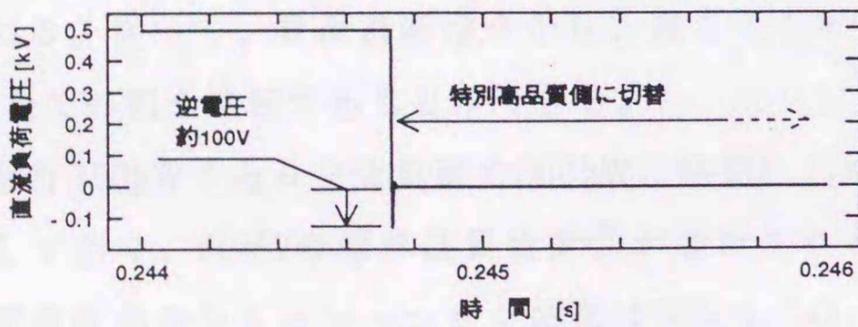
### <5.4.3> 長時間停電時の解析

通常は無停電電源装置はバッテリー容量によって、停電を保障できる時間が決まる。しかしながら、本章のように、直流型分散電源を備え持つ電力改質センターでは、無停電電源装置のバッテリーで特別高品質を保障できない長時間の供給支障が生じた場合でも、直流電源を特別高品質側に切替えることによって、電力供給を維持可能であると期待できる。図5.5.にそのシミュレーション結果の一例を示す。なお、本解析では切替時に回路に起こる電氣的現象を見るために、バッテリーの容量は、通常は無停電電源装置のバッテリーよりも小さく設定している。

図5.5.(a)では、時刻0.1[s]で事故が発生し、時刻0.25[s]付近でバッテリーから分散電源へと切替えがなされている。本モデルでは、特別高品質負荷に事故時および切替えの影響もなく、また、高品質負荷には事故時の瞬時的な供給支障はあるものの、停電のない電力供給が可能であることが分かる。また、バッテリーから分散電源へと切替える時、直流負荷にかかる電圧を瞬間的に遮断することになり、大きな逆電圧がかかる恐れがある。本モデルでは、直流負荷側のサイリスタ開閉器( $S_D$ )のスナバ回路を調整(並列素子 $R: 50\Omega$ 、 $C: 0.05\mu F$ )することによって、図5.5.(b)に示すように、ほとんど影響のない程度に逆電圧を抑えることができる。



(a) 各部の電圧波形



(b) 切替時の直流負荷電圧

図4. シミュレーション結果

## 5.5. 負荷遮断時の解析

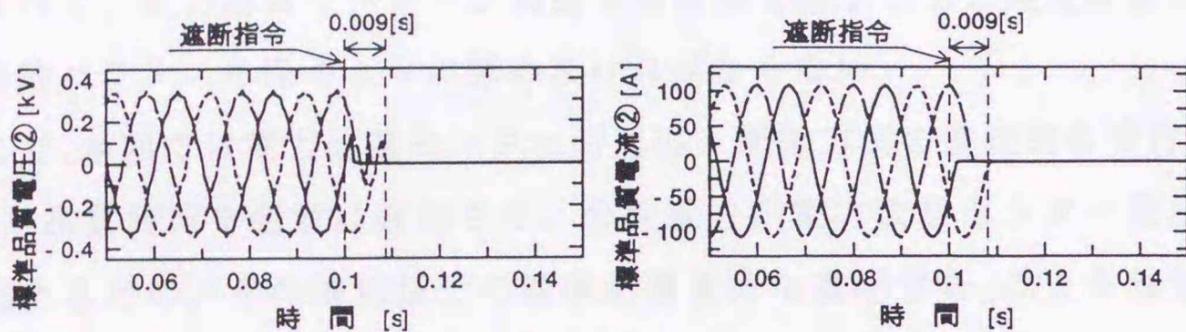
### <5.5.1> 遮断指令による負荷遮断の解析

電力改質センターが自律的な運用・制御を行う場合には、上位系に供給支障が発生した場合、「いつ、どの負荷を遮断するか」ということを、電力改質センター内の情報、あるいは近隣電力改質センターの情報に基づいて、その電力改質センター自らが判断しなければならない。たとえば、電力改質センターが多回線受電をしているとき、ある回線がトリップし、その電力改質センターの全ての負荷に電力供給するだけの電力をネットワークから受電できない場合、電力改質センターは配電ネットワークの電圧・電流や負荷の大きさを監視し、自らの判断に基づいて適切な負荷遮断を行うことになる。また、系統全体の判断により、適切な負荷遮断量が決定され、その電力改質センターへ負荷遮断指令があることも考えられる。この場合、電力改質センターはその指令値に基づいて優先順位の低い負荷から遮断する。本節では、負荷遮断時の電力改質センター内の電氣的現象を把握することに主眼をおいているため、電力改質センターの自律的な判断に関する部分は省略し、ある負荷値変更指令に基づいて標準品質負荷を遮断する場合の解析を行う。

負荷遮断を行う場合、注意しなければならないことは、大きな電流が流れている時点でスイッチをOFFにすると、非常に短い時間ではあるが、過渡的な過電圧が発生することである。そこで、本モデルでの負荷遮断のアルゴリズムは、負荷遮断指令があった後、それぞれの相ごとに電流がゼロ近傍になるのを待ち、順次遮断している。従って、負荷遮断指令から、遅くても半サイクル(50Hz系で0.01秒)で、全ての相を遮断することができる。

本解析は、合計350kWである交流負荷を300kWに時刻0.1[s]の時点で変更することを想定しており、50kWの標準品質負荷②が遮断されることになる。その電圧および電流波形のシミュレーション結果は図5.6.(a)、遮断時について拡大した波形は同図(b)のようになる。同図から、遮断指令があった後、0.01[s]以内で速やかに負荷遮断でき、遮断に伴う過渡的な電圧も、平常時の電圧レベ

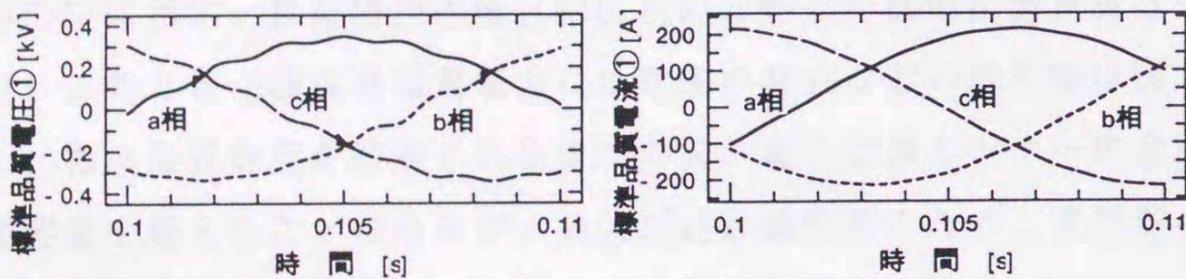
ルより小さいことが分かる。また、標準品質負荷②の遮断に伴う、その他の負荷への影響を調べるため、同図(c)に遮断されない標準品質負荷①の電圧電流波形を示す。この負荷①は、遮断される負荷②に並列に接続されているが、負荷①の遮断に伴う影響は大きくない。すなわち、標準品質の負荷遮断するタイミングは、遮断される負荷に流れる電流を考慮するだけでよいと言える。なお、実際の電力改質センターにはさらに多くのフィーダがあり、遮断指令値に見合う量の負荷を優先順位の低いものから遮断することになる。



(a) 標準品質負荷②の電圧電流波形



(b) 拡大図



(c) 遮断されない標準品質負荷①の電圧電流波形

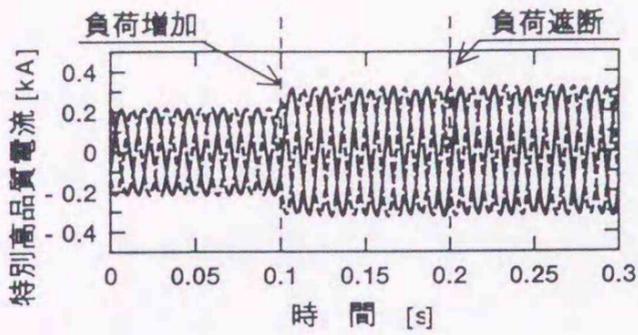
図5.6. 負荷遮断時の解析結果の一例

### <5.5.2> 負荷増加時の解析

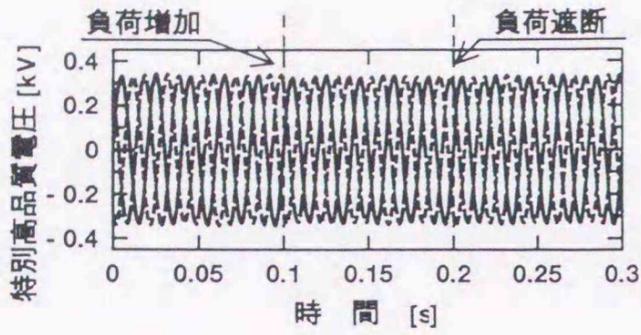
一般に、電力改質センターの負担する負荷が急増した場合、電力改質センター内に設置している電力貯蔵装置を放電することにより負荷の変動分を吸収するか、もしくは配電ネットワークより受電する電力を増加させることにより電力改質センター入出力の需給バランスを保つ。しかし、なんらかの制約により、それができない場合や、合計の負荷が電力改質センター各部の容量(変圧器、電力変換器など)を超える場合には、より優先順位の低い負荷から遮断することによって、電力改質センターが負担する負荷を減少させ、電力改質センター内の需給バランスを保つように努めなければならない。

そこで、本項では電力改質センターの運用・制御方策の基礎的な検討として、「特別高品質負荷を急激に増加させ、合計電力が電力改質センター変圧器の容量を超えるため、その増加量分の標準品質負荷を遮断する」ことを想定してシミュレーションを行う。なお、遮断する負荷を決定する際には、各部の電力をあらかじめ計測しておき、特別高品質負荷がどれだけ増えたのかを判断し、それに見合う標準品質負荷を選定しなければならない。この制御系には、高調波分を除去するために1次遅れ系を使用しているため、負荷増加の時間から若干遅れて標準品質負荷が選定され遮断される。

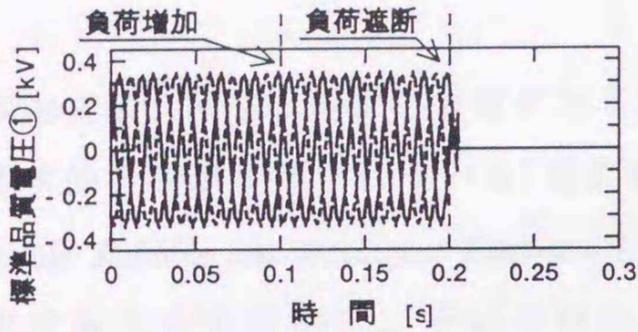
時刻0.1[s]で特別高品質負荷を約50kW増加させた時のシミュレーション結果を図5.7.に示す。負荷増加の後、約0.1[s]の時点で標準品質負荷は遮断されており、このとき、特別高品質電力には電圧の乱れなどの悪影響は現れない。ただし、標準品質負荷が遮断されるまでの間、電力改質センターの合計負荷は変圧器容量を超えることになるが、約0.1[s]と短時間のため、変圧器の発熱などの影響は小さく、電力供給に支障はないものと考えられる。



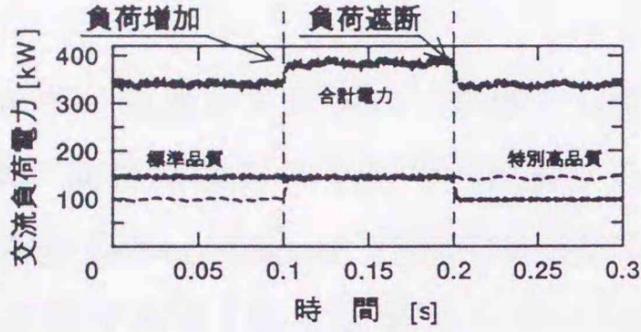
(a) 特別高品質電流波形



(b) 特別高品質電圧波形



(c) 標準品質電圧波形



(d) 負荷電力

図5.7. 負荷増加時のシミュレーション結果の一例

## 5.6. ま と め

本章では次世代の配電システムの一形態として提案しているFRIENDSに関する研究の一環として、その中核的存在である電力改質センターについて、最も実現性の高いと考えられる詳細な内部構成モデルを構築し、電力品質の制御に主眼をおいて、電磁過渡解析プログラム(EMTDC)により、本モデルの電氣的現象をシミュレーションした。その結果、無停電電源装置や分散電源などの様々な装置を配備した電力改質センターを需要家に設置し、それらを適切に制御・運用することによって、電力品質を柔軟に制御・管理でき、FRIENDSの最も重要な機能の一つである多品質電力供給を行うことができる可能性を明らかにした。

## 第6章 結 論

本論文は、将来の望ましい電気エネルギー流通システムの一形態として、その基本的概念が提案されている「高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システム (*Flexible, Reliable and Intelligent Electrical eNergy Delivery Systems*; FRIENDS)」をより具体化することを目的に、その中核的存在である「電力改質センター (*Quality Control Center*; QCC)」の具体的構成について基礎的な研究を行ったものである。本論文により、従来から提案されているFRIENDSの概念をより明確にすることができ、電力改質センターとして可能性のある具体的な内部構成が提案された。また、将来の電力システムの中で重要な役割を担うことが期待されている電力貯蔵装置について、それらがFRIENDSシステムにおいて果たすべき役割・機能を明確にし、FRIENDSの特徴の一つである多品質電力供給の観点から捉えた電力貯蔵装置の運用アルゴリズムの基礎を開発した。さらには、電力改質センターの低圧部分の具体的構成モデルに対し、瞬時値レベルによる解析を行うことにより、FRIENDSにおける多品質電力機能の一方式が、少なくとも技術的には実現できる可能性があることを示した。以下に、各章ごとの要約を示す。

第1章では、本論文の背景として、現在、電気事業・電力システムが直面している話題をいくつか取り上げ(電気事業の規制緩和、小規模分散電源・電力貯蔵装置、需要家ニーズの拡大、ならびに配電自動化技術)、新しい電気エネルギー流通システムを構築する必要性を明らかにした。このように将来の望ましい電気エネルギー流通システムであるFRIENDSが提案されるに至った背景を明らかにすることによって、本論文の目的と位置づけを明確にした。

第2章では、従来から提案されているFRIENDSの基本的概念に加え、FRIENDSのシステム構成を現行の配電システム構成と比較し、FRIENDSの持つ機能や特

徴を整理することによって、FRIENDSの全体像をより明確にした。さらに、本研究で対象とする電力改質センターについて、そのFRIENDSのなかで果たす役割と、多品質電力供給の観点から電力の品質について論じた。このことにより、これまで基本的概念しか提案されていなかったFRIENDS構想を、第3章以降で具体的に論じることが可能となる。

第3章では、FRIENDSの中核的存在である電力改質センターの内部構成として具体的にどのような形式があり得るのかを明確にするために、電力改質センターをいくつかの主要部分に分割し、それらに対して考えられ得る数種類の内部構成をスケルトンレベルで提案するとともに、提案した内部構成について経済性、規模、実現可能性などの特徴を定性的に検討した。この結果は、より実際的な電力改質センターを構築するための基礎となるものである。

第4章では、将来の電力システムにおいて重要な機能を果たすと期待されている電力貯蔵装置に焦点を絞り論じた。まず、FRIENDSシステムの中に分散配置された種々の電力貯蔵装置が果たすべき機能を列挙し、どの種類の貯蔵装置がその機能を果たすのに適しているかについて検討した。この結果より、FRIENDSにおいてその重要性こそ認識されていたが、これまで概念的にしか考えられていなかった電力貯蔵装置の果たすべき機能や役割をより具体化できた。さらに、簡単なFRIENDSモデルによって、多品質電力供給が実現可能な電力貯蔵装置の設備規模とその運用アルゴリズムの基礎を開発し、負荷平準化や線路損失低減の効果を評価した。これより、需要家近傍の電力改質センターに分散配置された電力貯蔵装置の効果的な運用方策の一つが示された。

第5章では、電力改質センターの多品質電力機能について詳細な検討を行った。すなわち、実現性が高いと考えられる一つの具体的な電力改質センターの低圧側の内部構成モデルを想定し、電磁過渡解析プログラム(EMTDC)を用いた計算機シミュレーションによって、msecオーダーの時間領域で電力の波形品質を瞬時値レベルで解析した。特に力点を置いたところは、電力改質センター内における電力品質の制御方式、ならびに需要家への品質別電力の供給方式の評価であり、電力改質センターが多品質電力供給を行うとき、実際の電圧電流波形にどのような影響が現れるかについて検討を行った。ここでは、まず、電力改質センターの上位系に供給支障が発生したケースを想定し、本電力改質

センターモデルがどのような品質の電力を需要家に供給できるのかについてシミュレーションされたのち、電力改質センターが行う負荷遮断に関して基礎的なシミュレーションを行った。シミュレーション結果により、FRIENDSにおける多品質電力供給機能の一方式が、少なくとも技術的には実現できる可能性があることを示した。

本論文で対象としている「高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システム (*Flexible, Reliable and Intelligent Electrical eNergy Delivery System*; FRIENDS)」は将来の望ましい電気エネルギーの流通形態として有望視されているシステムであり、すでにその基本的概念が提案されている。本論文は「電力改質センター (*Quality Control Center*; QCC)」というFRIENDSの中核を担う全く新しい電力設備の基礎を固めたものであり、今後のFRIENDSを含む次世代の電力流通システムに関する研究に対して一つの基盤を与え得るものと考えられる。

## 謝 辞

本論文は、筆者が北海道大学大学院工学研究科博士後期課程に入学後、北海道大学大学院工学研究科 長谷川 淳 教授の提起に基づき、在学中に行ってきた研究成果をまとめたものである。この間、本研究の遂行にあたり、多くの方々の御指導・御支援を頂戴いたしました。

北海道大学大学院工学研究科 長谷川 淳 教授には、本研究に対し終始絶大な御指導・御支援を戴き、また、数々の有益な御助言を頂戴いたしました。ここに心より厚く感謝申し上げます。同 北 裕幸 助教授には、日頃より懇切なる御指導を頂戴し、また、本論文の作成に際し、多大なる御支援を頂戴いたしました。ここに心より厚く感謝申し上げます。

北海道大学大学院工学研究科 大西 利只 教授ならびに同 本間 利久 教授には、様々な御助言を頂戴いたしました。ここに厚く御礼申し上げます。

茨城大学工学部 奈良 宏一 教授、大阪大学大学院工学研究科 辻 毅一郎 教授、横浜国立大学工学部 大山 力 教授、ならびに広島大学工学部 佐々木 博司 教授には、多大なる御支援・御激励を賜りました。厚く御礼申し上げます。

大阪大学大学院工学研究科 伊瀬 敏史 助教授、茨城大学工学部 林 泰弘 講師には、度重なる御教示・御支援を頂戴いたしました。ここに深く感謝の意を表します。

(株)日立製作所 有田 浩 博士、三菱電機(株) 笹尾 博之 博士をはじめとする FRIENDS 研究会のメンバーの皆様には、多くの有益な御教示・御助言を頂戴いたしました。ここに厚く御礼申し上げます。

北海道大学大学院工学研究科 田中 英一 助手、ならびに北海道工業大学 西谷 健一 教授には、日頃より多大なる御助言・御支援を頂戴いたしました。こ

ここに厚く感謝申し上げます。

第5章のEMTDCシミュレーションに関しては、北海道大学大学院工学研究科修士課程 原 亮一 君の多大な御協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

北海道大学工学部 石川 貞夫 技官、秘書 笹原 早苗 さん、北海道大学大学院工学研究科博士後期課程 K. Aska Juste 氏、ならびに 同 杉原 英治 君をはじめとする著者の所属する北海道大学大学院工学研究科システム情報工学専攻 電磁エネルギーシステム工学講座電気エネルギーシステム工学分野の皆様には、日頃より多くの御支援を頂きました。ここに心より感謝申し上げます。

筆者が秋田大学大学院鉱山学研究科博士前期課程に在学中、秋田大学鉱山学部(現 工学資源学部) 佐藤 正志 助教授の懇切なる御指導を頂戴し、電気工学に関する研究の基礎を固めることができました。ここに心より厚く御礼申し上げます。

最後に、本研究は平成8年度文部省科学研究費基盤研究((A)(1))「高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システムに関する基礎研究」(研究代表者：北海道大学大学院 長谷川 淳 教授)、平成9年度日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「環境負荷低減化を目的とした新しい自律分散型都市エネルギーシステム(JSPS-RFTF97P01002)」(研究代表者：大阪大学大学院 辻 毅一郎 教授)、ならびに平成10年度文部省科学研究費国際学術研究(共同研究)「多品質電力供給システム技術に関する研究」(研究代表者：茨城大学 奈良 宏一 教授)の研究助成を受けて行ったことを付記して、関係各位への謝辞といたします。

## 参考文献

### I. 主たる参考文献

- [1] 奈良宏一、長谷川淳：「新しい柔軟な電気エネルギー流通システム」、電気学会論文誌B、Vol.117、No.1、pp.47-53(1997)  
(同上英文) Koichi Nara & Jun Hasegawa : "A New Flexible, Reliable and Intelligent Electrical Energy Delivery System", *Trans. of Electrical Engineering in Japan*, Vol.121, No.1, pp.26-34(1997)
- [2] 奈良宏一、長谷川淳：「新しい配電ネットワーク技術」、電気学会誌、Vol.117、No.6、pp.349-352(1997)
- [3] 長谷川淳、奈良宏一：「配電システム技術の新しい動向」、電気学会論文誌B、Vol.117、No.10、pp.1324-1327(1997)
- [4] Jun Hasegawa, Koichi Nara, Eiichi Tanaka & Hiroyuki Kita : "Multipurpose Usage of Decentralized SMES in Advanced Power Distribution Networks", *The Proc. of The IEA Symposium on the use of Superconductive in Energy Storage*, pp.284-294, Karlsruhe, Germany, October 1994
- [5] Koichi Nara & Jun Hasegawa : "An Advanced Flexible and Reliable Distribution System", *Proc. of The International Conference on Energy Management and Power Delivery(EMPD'95)*, pp.55-60, Singapore, November 1995
- [6] Koichi Nara & Jun Hasegawa : "Future Flexible Power Delivery System and Its Intelligent Functions", *Proc. of The International Conference on Intelligent Systems Applications to Power (ISAP'96)*, pp.261-265, Orlando, Florida, U.S.A, January 1996
- [7] Koichi Nara & Jun Hasegawa : "An Advanced Flexible and Reliable Power Delivery System", *Proc. of The NSF Conference on Unbundled Power Quality Services in the Power Industry*, pp.129-137, Key West, Florida, U.S.A., December 1996
- [8] 浅野浩志：「欧米電気事業における規制と競争－電力託送を中心に－」、電気学会誌、Vol.111、No.9、pp.755-762(1991.9)
- [9] 矢島正之：「電力市場自由化の環境・省エネルギーに及ぼす影響とその対策－米国の例から見た考察－」、電力経済研究、Vol.37、pp.73-79 (1996.12)
- [10] 玉貫滋：「世界の電気事業の動向」、電気評論、Vol.83、No.2、pp.7-20(1998.2)
- [11] 蟻生俊夫：「英国電気事業における民営化後の経営動向」、電力経済研究、Vol. 36、pp.15-22(1996.7)

- [12] 資源エネルギー庁公益事業部計画課(監修):「'96電気事業法令集 電気事業法(平成7年4月21日改正)」、pp.3-27(1996.4)東洋法規出版
- [13] 「電気事業法改正のポイント」、電気雑誌OHM、pp.21-41(1996.5)
- [14] 矢島正之:「電力市場の自由化と将来展望」、電気学会誌、Vol.115、No.11、pp.717-720(1995.11)
- [15] 浅野浩志:「電力自由市場下での需給マネジメントのモデル化」、電気学会論文誌B、Vol.115、No.3、pp.207-210(1995.3)
- [16] 留岡寛、奥本芳治:「電力市場の自由化が電力系統に与える影響(CIGREシンポジウムから)」、電気評論、Vol.82、No.9、pp.7-10(1997.9)
- [17] 鈴木紀臣:「IPP・自己託送の現状と今後の展開」、電気雑誌OHM、pp.74-79(1998.1)
- [18] 電気新聞:「連載記事 電力改革の行方 第1部経過と論点」、電気新聞平成10年2月25日~3月17日
- [19] 矢島正之:「競争時代における新しい電気料金制(上)ー料金設定の弾力化についてー」、エネルギーフォーラム、No.427、pp.34-37(1990.7)
- [20] 「特集:分散型電源と配電連系」、電気評論、Vol.78、No.10(1993.10)
- ・中川興史:「太陽電池の現状と課題」、pp.11-16
  - ・一ノ瀬貴士:「太陽光発電の系統連系と系統保護装置の開発」、pp.17-23
  - ・岡野一清:「燃料電池開発の現状と課題」、pp.24-28
  - ・松本芳一:「熱電供給システムの最適規模設計」、pp.29-36
  - ・石田修、菊池智丈:「風力発電の配電線の系統連系」、pp.37-44
  - ・数井弘幸:「小水力発電と配電線の系統連系」、pp.45-48
- [21] 「特集:新エネルギー開発の現状と将来動向」、電気評論、Vol.82、No.11(1997.11)
- ・渡辺修:「太陽光発電の技術開発動向」、pp.13-17
  - ・窪谷達雄:「風力発電システムの開発状況と風力発電装置」、pp.13-22
  - ・本間琢也:「燃料電池の開発状況と課題」、pp.38-43
  - ・山上慶介:「廃棄物発電の現状と課題」、pp.52-64
- [22] 「特集:最近の分散型電源システム」、電気設備学会誌、Vol.18、No.5(1998.5)
- ・進士誉夫:「系統連系技術要件ガイドラインの経緯とその内容」、pp.306-308
  - ・岡田正宣:「系統連系」、pp.309-314
  - ・梅内功:「コジェネレーションシステムの概要と現状」、pp.318-321
  - ・光田憲朗、大谷徹:「燃料電池の概要と現状」、pp.322-326
  - ・西脇秀則、井家健仁:「太陽光発電の概要と現状」、pp.326-329
  - ・島田保:「風力発電の概要と現状」、pp.330-334
  - ・渥美淳、佐藤晃一:「NAS電池の概要と現状」、pp.335-336
- [23] 「都市形分散電源システム」、電気学会技術報告、第609号(1996.10)
- [24] 鳥塚達夫:「分散電源および電気エネルギー貯蔵」、電気学会誌、Vol.117、No.6、pp.353-356(1997.6)

- [25] 佐々木博司、他：「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B、Vol.114、No.5、pp.491-497(1994.5)
- [26] 斉藤浩海、豊田淳一：「分散型電源群の微小発生電力を効果的に輸送する将来の新しい電力ネットワーク」、電気学会論文誌B、Vol.115、No.6、pp.568-575 (1999.6)
- [27] 岡村幸壽：「分散電源を含むネットワーク配電系統の保護協調シミュレーション手法の開発」、電気学会論文誌B、Vol.113、No.10、pp.1106-1112 (1993.10)
- [28] 「小特集：エネルギー貯蔵技術」、電気学会雑誌、Vol.101、No.6、pp.507-533 (1981.6)
- [29] 鈴木胖、伊東弘一(編著)：「エネルギー貯蔵システム」(1992.9)エネルギー・資源学会
- [30] 「特集：負荷平準化方策の現状と将来展望」、電気評論、Vol.82、No.7(1997.7)
- ・西嶋健一：「電池電力貯蔵システムの開発状況と今後の課題」、pp.36-42
  - ・元島直樹：「新方式揚水発電技術」、pp.43-48
  - ・根尾定紀：「超電導電力貯蔵システム(SMES)の開発状況と将来展望」、pp.49-4
  - ・飯島滋：「圧縮空気貯蔵(CAES)発電システムの開発状況と将来展望」、pp.55-8
  - ・石川文彦：「高温超電導フライホイールの開発状況と将来展望」、pp.59-62
- [31] 田中祀捷：「電力貯蔵新時代—新たな視点と戦略構想を提起する—」、エネルギーフォーラム、No.501、pp.42-45(1996.9)
- [32] 奥村嘉賀男：「電力貯蔵シンポジウム'95」、ISTECジャーナル、Vol.9、No.2、pp.20-29(1996.2)
- [33] 高村(監訳)：「最新電池ハンドブック」、p.350-351(1996)朝倉書店
- [34] 豊田淳一：「電力エネルギー貯蔵システムの役割と経済評価」、電気学会論文誌B分冊、Vol.104、No.5、pp.273-280(1984.5)
- [35] 今中健雄、山路憲治：「太陽光発電システムに組み込まれる蓄電装置の経済的運用」、電気学会論文誌B、Vol.118、No.5、pp.511-518
- [36] 西川禎一、他：「電力貯蔵装置を備えた電力系統における太陽光発電システムの経済評価」、電気学会論文誌C、Vol.111、No.3、pp.107-111(1991.3)
- [37] 秋澤淳、茅陽一：「電力託送を含めたコジェネレーション自家発電のモデル分析」、電気学会論文誌B、Vol.114、No.10、pp.1016-1021(1994.10)
- [38] 盧大錫、他：「分散型電力貯蔵システムの導入評価に関する—考察—二次電池を中心として—」、電気学会論文誌B、Vol.116、No.2、pp.187-196 (1996.2)
- [39] K. H. Jung, H. Kim & D. Rho : "Determination of the Installation Site and Optimal Capacity of the Battery Energy Storage System for Load Leveling", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.11, No.1, pp.162-167, March 1996

- [40] 安田恵一郎、他：「電力系統の潮流平準化を目的とした小容量分散型電力貯蔵システムの最適配置」、電気学会論文誌B、Vol.106、No.12、pp.1021-1028(1986.12)
- [41] 諸住哲、他：「電力系統における分散型電力貯蔵装置の最適運用」、電気学会論文誌B、Vol.103、No.7、pp.467-474(1983.7)
- [42] 三谷康範、他：「超電導エネルギー貯蔵装置による電力系統の動態安定度の改善」、電気学会論文誌B、Vol.104、No.11、pp.749-756(1984.11)
- [43] 高橋勲：「高速回転フライホイールを応用した無停電電源装置がめざすもの」、電気雑誌OHM、pp.31-36(1990.7)
- [44] 小野賢治：「エネルギーサービスに関する生活者意識構造の分析」、電力経済研究、No.22、pp.37-49(1987.1)
- [45] 辻毅一郎、竹田功：「家庭用電力の地区別需要特性 — 近畿地域のパネルデータによる分析(その1)(その2) —」、エネルギー・資源学会誌、Vol.17、No.2、pp.67-74、pp.75-82(1996.2)
- [46] C. J. Melhon & F. McGranaghan : "Interpretation and Analysis of Power Quality Measurements", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol.31, No.5, pp.1363-1370, Nov./Dec. 1995
- [47] D. O. koval & C. Carter : "Power Quality Characteristics of Computer Loads", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol.33, No.3, pp.613-621, May/June 1997
- [48] A.Domijan & G.Heydt (Ed.) : *Proc. of The NSF Conference on Unbundled Power Quality Services in the Power Industry*, Key West, November 1996
- [49] 前田幸美：「電気事業にみる"電力の質"の現状」、電気雑誌OHM、pp.53-65(1972.4)
- [50] 藤井美文、他：「需要家における電力の品質と価格の選択に関する分析」、電力経済研究、No.26、pp.27-42(1989.1)
- [51] 松川勇：「電力品質と価格に対する需要家の選択」、電力中央研究所報告、Y89005(1990)
- [52] 大山力：「規制緩和下の電力供給システムにおける価格戦略に関する考察」、電気学会論文誌B、Vol.117、No.1、pp.54-60(1997.1)
- [53] S. N. Siddiqi & M. L. Baughmam : "Reliability Differentiated Real-Time Pricing of Electricity", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.8, No.2, pp.548-553, May 1993
- [54] 松川勇、藤井美文：「競争時代における新しい電気料金制(下) — 品質別電力供給サービスの提案 —」、エネルギーフォーラム、No.427、pp.44-47(1990.7)
- [55] 伊与田功：「電気の質の評価」、エレクトリック・エナジー全書(エレクトリック・エナジー・明日/マネージメント・デザイン編)、pp.218-220(1989)
- [56] 松川勇：「電力供給業から環境設計のクリエイターへ — 多様化するニーズに応える電力供給メニュー —」、エレクトリック・エナジー全書(エレクトリック・エナジー・明日/マネージメント・デザイン編)、pp.168-170

- (1989)
- [57] 松川勇：「プライオリティ・サービス：電力における品質差別化の料金理論の概要」、電力中央研究所報告、Y90004(1990)
- [58] 栗原郁夫、橋本英二：「マルチメニュー電力供給システム－技術面からの予備的検討－」、電力中央研究所報告、T88015(1988)
- [59] J. P. Kessinger : "Advanced Power Electronics as an Enabler of Unbundled Power Quality Services", *Proc. of the NSF Conference on Unbundled Power Quality Services in the Power Industry*, pp.114-120, Key West, November 1996
- [60] G. T. Heydt : "Electric Power Quality: A Tutorial Introduction", *IEEE Computer Application in Power*, Vol.11, No.1, pp.15-19, January 1998
- [61] 高田九十九、増井三千雄：「配電自動化技術の現状と将来」、電気学会雑誌、Vol.108、No.9、pp.882-887(1988.9)
- [62] 池田一成、他：「配電総合自動化システム」、三菱電機技報、Vol.70、No.4、pp.366-372(1996.4)
- [63] 飛田政泰、丹羽茂治：「配電自動化の現状と今後の展望」、電気学会論文誌B、Vol.116、No.3、pp.265-268(1996.3)
- [64] 「特集：配電総合自動化」、電気評論、Vol.77、No.10(1992.10)
- ・「Ⅰ．総論－配電総合自動化について」、pp.6-11
  - ・「Ⅱ．高度負荷集中制御システム」、pp.12-27
  - ・「Ⅲ．電力会社における配電総合自動化システム」、pp.28-49
  - ・「Ⅳ．配電総合自動化祈願技術の動向」、pp.50-64
- [65] 「小特集：次世代の配電システムを目指して－技術開発の現状と展望－」、電気学会雑誌、Vol.111、No.7(1991.7)
- ・佐野光夫：「Ⅰ．配電システムの未来像」、pp.547-551
  - ・大野宏、雪平謙二：「Ⅱ．配電自動化の進展」、pp.552-556
  - ・濱田亨、和田光夫：「Ⅲ．新サービスの展開」、pp.557-561
  - ・橋本英二、石川力雄：「Ⅳ．分散型電源の系統連系技術」、pp.562-566
- [66] 菅原安哉、他：「電力マッピングシステム」、三菱電機技報、Vol.70、No.4、pp.373-379(1996.4)
- [67] 速水光夫、他：「多様化する配電系統運用を支える高度情報制御技術」、日立評論、Vol.78、No.2、pp.175-180(1996.2)
- [68] 「特集：情報ネットワーク時代」、電気評論、Vol.81、臨時増刊(1996)
- [69] 松本翼：「ネットワーク技術が変革する今後の配電システム」、電気学会論文誌B、Vol.117、No.10、pp.1328-1331(1997.10)
- [70] 「特集：デマンドサイド・マネジメント」、エネルギー・資源学会誌、Vol.14、No.6、pp.512-560(1993.6)
- [71] 「特集：21世紀のパワーエレクトロニクス技術」、電気学会誌、Vol.112、No.9、pp.673-694(1992.9)
- [72] 山村昌、大野栄一：「パワーエレクトロニクス入門(改訂2版)」、pp.163-194(1995.2)オーム社

- [73] 深尾正：「パワーエレクトロニクスの最新状況と将来への期待」、電気雑誌OHM、pp.22-31(1993.4)
- [74] 鈴木浩、伊与田功：「パワーエレクトロニクス応用技術」、電気学会誌、Vol.117、No.6、pp.357-360(1997.6)
- [75] A.M.Gole, et.al. : "Guidlines for Modeling Power Electronics in Electric Power Engineering Applications", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.12, No.1, pp.505-514, January 1997
- [76] 「パワーエレクトロニクス・ガイドブック」、電気雑誌OHM別冊(1997.10)
- [77] 高橋一弘、他：「次世代の電力輸送に関する基盤研究」、電力中央研究所報告、総合報告：T35(1994.8)
- [78] 正田英介、他：「特集：次世代の電力流通技術を展望する」、電気雑誌OHM、pp.26-74(1989.1)
- [79] 「小特集：21世紀の電力エネルギーと輸送技術」、電気学会誌、Vol.112、No.8、pp.582-605(1992.8)
- [80] "Progress Reports for 1997", *CIGRE electra*, N°.179, June 1998
- [81] 「電気工学ハンドブック」、電気学会
- [82] 電気学会：「送配電工学」(1980)オーム社
- [83] 小池東一郎：「改訂 送配電工学 前編」(1986.10)養賢堂
- [84] 小池東一郎：「送配電工学 後編」(1974.11)養賢堂
- [85] 関根泰次、他：「電力系統工学」(1979.3)コロナ社
- [86] Turan Gonen : "Electric Power Distribuiton System Engineering"McGraw-Hill Book Company
- [87] 電気学会：「配電・屋内配線(再改訂版)」(1981.1)オーム社
- [88] 「20kV級配電方式(地中編)」、電気協同研究、Vol.30、No.5(1975)
- [89] 星野聰史、安富重文、押山博一：「テクノシステム 第15巻配電・需要設備・家庭電気」(1983)電気書院
- [90] 石井一雄(監修)：「最新 地中配電技術ハンドブック」(1990)電気情報社
- [91] C. S. Chang & T. S. Chung : "An Expert System for On-Line Securty -- Economic Load Allocation on Distribution Systems", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.5, No.1, pp.467-473, January 1990
- [92] K.Nara, A.Shiose, M.Kitagawa & T.Ishihara: "Implementation of Genetic Algorithm for Distribution System Loss Minimum Reconfiguration", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.7, No.3, pp.1044-1051(1992)
- [93] V. Glamocanin & V. Filipovic : "Open Loop Distribution System Design", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.8, No.4, pp.1900-1906 October 1993
- [94] 崔大燮、長谷川淳：「配電損失最小化問題への個体の寿命を考慮した遺伝的アルゴリズムの適用」、電気学会論文誌B、Vol.115、No.7、pp.741-748(1996.7)
- [95] 「低圧配電電圧技術」、電気協同研究、Vol.49、No.2(1993.10)
- [96] 深尾正：「パワーエレクトロニクスは電力技術にどんな改革をもたらす

- か」、電気学会全国大会論文集[6]、S.24-3、pp.9-11(1996.3)
- [97] 「特集解説；分散型電源システムに用いられる電力変換技術」、電気学会論文誌D、Vol.115、No.2(1995.2)
- ・ 仲治和夫、他：「Ⅰ．分散電源の開発・適用状況」、pp.98-102
  - ・ 萩原義也、他；「Ⅱ．分散型電源用電力変換技術」、pp.103-106
  - ・ 石川忠夫：「Ⅲ．分散型電源の今後の課題」、p.107
- [98] 国吉真照、他：「電池電力貯蔵システムと変換装置へのパワーエレクトロニクスの適用」、電気雑誌OHM、pp.65-72(1987.2)
- [99] 常磐幸生、堀内恒郎：「電力系統におけるパワーエレクトロニクス技術の最近の動向」、電気学会論文誌B、Vol.111、No.3、pp.242-246(1991.3)
- [100] 地福順人、天野比佐雄：「特集解説：UPSの技術動向」、電気学会論文誌D、Vol.107、No.11、pp.1311-1315(1987.11)
- [101] 「瞬時電圧低下対策」、電気協同研究、Vol.46、No.3(1990)
- [102] 加護谷隆巳：「最近の小容量UPSとその性能」、電気計算、Vol.61、No.14、pp.43-50(1993.11)
- [103] S. W. Middlekauff, et. al. : "Systems and Customer Impact: Considerations for Series Custom Powe Device", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.13, No.1, pp.278-282, January 1998
- [104] 岡村幸壽、岡田有功：「6.6kV配電用サイリスタ開閉器の試作と動作検証」、電力中央研究所報告、T94021(1995.4)
- [105] J. J. Horner, Jr.: "Successful Power Quality Solution Using The Midium-Voltage Sub-cycle Transfer Switch", *Power Quality/Power Value Proceedings*, pp.44-53, September(1997)
- [106] A.Zyl, J.H.R.Enslin & R.Spee: "A New Unified Approach to Power Quality Management", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol.11, No.5, pp.691-667, September 1996
- [107] R. K. Smith, et. al. : "Solid Stste Distribution Current Limiter and Circuit Breaker: Application Requirements and Control Strategies", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol..8, No.3, pp.1155-1164, July 1993
- [108] 「アクティブフィルタ機能を有する電力変換回路とシステムー電源高調波規制および対策技術の現状と動向ー」、電気学会技術報告、第643号(1997.7)
- [109] T. Ishikawa & B. Kamimura : "Possibility of DC Power Supply System in Commercial Buildings", *Japan-US Seminar on Intelligent Distributed Autonomous Power Systems (IDAPS)*, Hakone, Japan July 1998
- [110] 「家庭内の新しい電力供給方式」、電気学会技術報告、第580号(1996)
- [111] 新エネルギー総合開発機構(NEDO)：「電気用品等の直流電力供給による使用の可能性調査」、昭和59年度調査報告書、NEDO-P-8422(1985.4)
- [112] P. Kuffel, K.Kent & G. Irwin : "The Implementation and Effectiveness of Linear Interpolation Within Digital Simulation", *International Conference on Power System*

*Transients*, September(1995)

- [113] 雨谷昭弘：「過渡現象解析プログラムEMTPの最近の動向」、電気学会誌、Vol.113、No.11、pp.936-944(1993.11)
- [114] 夏井健一：「回路と電磁界の過渡解析技術」、電気雑誌OHM、pp.55-61(1996.3)
- [115] 奥野敦、他：「パワーエレクトロニクスに適用されているシミュレータ」、電気学会産業応用部門全国大会講演論文集[I]、S.2-4、pp.S.34-S.55(1998.8)

## II. 本研究に関して筆者が公表した論文

- [116] 三島裕樹、北裕幸、長谷川淳：「高柔軟・高信頼電気エネルギー流通システム(FRIENDS)における電力改質センターの内部構成の一提案」、電気学会論文誌B、Vol.118、No.11、pp.1292-1301(1998)
- [117] 三島裕樹、原亮一、北裕幸、長谷川淳：「EMTDCを用いたFRIENDSにおける多品質電力供給の解析」、電気学会論文誌Bに投稿中
- [118] Yuji Mishima, Hiroyuki Kita & Jun Hasegawa : "Basic Study on Operation of Quality Control Center for Multi-quality Power Supply by FRIENDS", *Proc. of The IASTED International Conference on High Technology in the Power Industry*, pp.175-180, Orlando, Florida, U.S.A., October 1997
- [119] Yuji Mishima, Jun Hasegawa & Koichi Nara : "Roles of Energy Storages in Future Electric Power Delivery System", *Proc. of The International Conference on Electrical Energy Storage Systems Applications & Technologies (EESAT'98)*, pp.279-284, Chester, U.K., June 1998
- [120] Yuji Mishima, Hiroyuki Kita & Jun Hasegawa : "A Proposal of Interior Structure of Quality Control Center in the FRIENDS", *Proc. of The International Conference on Electrical Engineering (ICEE'98)*, Vol.1., pp.346-349, Kyongju, Korea, July 1998
- [121] Jun Hasegawa, Hiroyuki Kita, Yuji Mishima, Koichi Nara & Yasuhiro Hayashi : "Operational Simulation of Flexible, Reliable and Intelligent Electrical Energy Delivery System (FRIENDS) Using PSCAD/EMTDC", *The 61st American Power Conference*, Chicago, U.S.A., April 1999(講演予定, accepted)
- [122] Yuji Mishima, Ryoichi Hara, Hiroyuki Kita & Jun Hasegawa : "Analysis of Quality Control Center in Flexible, Reliable and Intelligent Electric Energy Delivery System (FRIENDS)", *The 13th Power Systems Computation Conference (PSCC'99)*, Trondheim, Norway, July 1999(講演予定, accepted)
- [123] 三島裕樹、北裕幸、長谷川淳：「FRIENDSにおける多品質電力供給を実現可能な電力改質センターの運用に関する基礎検討」、電気学会電力・エネルギー部門(B部門)大会論文集、論文I、No.23、pp.133-138(1997.7)
- [124] 三島裕樹、北裕幸、長谷川淳：「多品質電力供給の観点から見たFRIENDS

- の平常時運用の基礎検討」、電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料、PE-97-88/PES-97-88、pp.59-64(1997.10)
- [125] 三島裕樹、原亮一、北裕幸、長谷川淳：「FRIENDSにおける電力改質センターの解析－電力品質制御方式の検討－」、電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料、PE-98-48/PSE-98-38、pp.12-24(1998.10)

### Ⅲ．本研究に関して筆者が行った講演発表等

- [126] 三島裕樹、北裕幸、長谷川淳：「負荷平準化と配電損失の観点に基づくFRIENDSの平常時運用に関する検討」、電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集、No.436、pp.483-484(1996.10)
- [127] 三島裕樹、北裕幸、長谷川淳：「多品質電力供給を実現可能なFRIENDSの平常時運用に関する基礎検討」、電気学会全国大会論文集[6]、No.1485、pp.206-207(1997.3)
- [128] 三島裕樹、北裕幸、長谷川淳：「FRIENDSにおける電力改質センターの内部構成例の一提案」、電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集、No.39、pp.51(1997.10)
- [129] Yuji Mishima, Hiroyuki Kita & Jun Hasegawa : "Basic Study on Interior Structure of Quality Control Center in the FRIENDS", *Proc. of The Fourth Japan - Korea Joint Symposium on Electrical Engineering (SAPEC'97)*, pp.39-42, Seoul, Korea, December 1997
- [130] 三島裕樹、北裕幸、長谷川淳：「FRIENDSにおける電力改質センターの内部構成の提案 その2－多品質電力供給に関する検討－」、電気学会全国大会論文集[6]、No.1340、pp.113-114(1998.3)
- [131] Yuji Mishima, Hiroyuki Kita & Jun Hasegawa : "A Proposal of Interior Structure of Quality Control Center in the FRIENDS", *Proc. of Japan - US Seminar on Intelligent Distributed Autonomous Power Systems (IDAPS) Funded by JSPS/NSF*, Hakone, Japan, July 1998
- [132] 長谷川淳、三島裕樹、北裕幸、奈良宏一：「FRIENDSにおける電力貯蔵装置の機能と役割」、電気学会電力・エネルギー部門(B部門)大会論文集(分冊1)、論文Ⅱ、No.210、pp.424-425(1998.8)
- [133] 三島裕樹、北裕幸、長谷川淳：「FRIENDSにおける電力改質センターの内部構成の提案 その3－簡単な回路構成による解析－」、電気学会電力・エネルギー部門(B部門)大会論文集(分冊1)、論文Ⅱ、No.293、pp.542-543(1998.8)
- [134] Yuji Mishima, Jun Hasegawa & Koichi Nara : "Roles of Energy Storages in Future Electric Power Delivery System", *The Fifth Japan - Korea Joint Symposium on Electrical Engineering*, Sapporo, Japan, August 1998

- [135] 原亮一、三島裕樹、北裕幸、長谷川淳：「FRIENDSにおける電力改質センターの内部構成の提案 その4 -分散電源を考慮したEMTDC解析-」、電気学会産業応用部門(D部門)全国大会論文集[1]、No.38、pp.119-120 (1998.8)
- [136] 三島裕樹、原亮一、北裕幸、長谷川淳：「FRIENDSにおける電力改質センターの内部構成の解析 -需要家地域の特徴と内部構成に関する基礎検討-」、電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集、No.120、pp.133-134 (1998.10)
- [137] 原亮一、三島裕樹、北裕幸、長谷川淳：「FRIENDSにおける電力改質センターの内部構成の解析 -UPSバイパス回路の運用方式に関する検討-」、電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集、No.121、pp.135-136 (1998.10)
- [138] Jun Hasegawa, Hiroyuki Kita, Eiichi Tanaka, Yuji Mishima, Gou-Bin Wang, Ryoichi Hara : "Designs of Quality Control Center for Unbundled Power Quality Service", *The 2nd International Meeting on Unbundled Power Quality Service*, Gainesville, Florida, U.S.A. February 1999 (講演予定)

#### IV. その他の論文・講演発表

- [139] 川本哲郎、三島裕樹、北裕幸、田中英一、長谷川淳：「FRIENDSにおける電圧・無効電力制御に関する基礎検討」、電気学会電力・エネルギー部門(B部門)大会(論文Ⅱ)、No.283(1997.7)
- [140] 川本哲郎、三島裕樹、北裕幸、田中英一、長谷川淳：「FRIENDSにおけるネットワーク構成に関する基礎検討 -GAによる配電損失最小システムの検討-」、電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集、No.40、pp.52-53 (1997.10)
- [141] 吉田光志、北裕幸、三島裕樹、西谷健一、長谷川淳：「多品質電力供給を考慮した総合エネルギー供給システムに関する基礎検討」、電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集、No.119、pp.131-132 (1998.10)
- [142] 川本哲郎、三島裕樹、北裕幸、田中英一、長谷川淳：「FRIENDSにおけるネットワーク機能に関する基礎検討 -電力改質センター高圧側設備の検討-」、電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集、No.122、pp.137-138 (1998.10)
- [143] 川本哲郎、三島裕樹、北裕幸、田中英一、長谷川淳：「FRIENDSにおけるネットワーク機能に関する基礎検討」、電気学会電力系統技術研究会、PSE-99-1(1999.1)
- [144] Guo-Bin Wang, Yuji Mishima, Hiroyuki Kita, Eiichi Tanaka & Jun Hasegawa : "Unified Power Quality Control in FRIENDS",平成11年電気学会全国大会

(1999.3)(講演予定)

- [145] 原亮一、三島裕樹、北裕幸、田中英一、長谷川淳：「FRIENDSにおける電力改質センターの内部構成の検討－双方向変換器による多品質電力供給－」、平成11年電気学会全国大会(1999.3)(講演予定)
- [146] 川本哲郎、三島裕樹、北裕幸、田中英一、長谷川淳：「FRIENDSにおけるネットワーク機能に関する基礎検討－配電ネットワークへの限流装置の適用についての検討－」、平成11年電気学会全国大会(1999.3)(講演予定)

電力品質の向上、特に電圧降下や電圧変動の抑制に有効な手段として、双方向変換器を用いた電力改質センターの内部構成の検討を行った。また、配電ネットワークへの限流装置の適用についても検討を行った。

## 付録 1 . 我が国の1995年電気事業法改正の要点

昭和39年に制定された(旧)電気事業法を抜本的に改正すべく、(新)電気事業法改正案は平成7年(1995年)2月21日に閣議決定され、翌22日には国会に上程、衆参両院で審議された結果、4月14日に可決・成立し、4月21日に交付、12月1日より施行された。世界各国で行われている電気事業に関する法的規制緩和の流れを受け、我が国でも実に31年ぶりに電気事業法が改正された。

今回行われた改正の目的は、

電力需要の増大、特に夏期ピークの先鋭化に対応した安定供給を確保しつつ、可能な限り電気事業への参入に係る事業機会を増大させることによって電力会社の経営効率を促進し、ひいては一層の効率的な電力供給体制を構築すること、および法制定以来の保安技術の進歩を踏まえた保安規制の合理化を行う。

であり、これを具体的に展開すると、次の三点に集約される。

1. 発電部門などへの新規参入の拡大を目的とした事業規制の見直し
2. 料金規制の改善
3. 国の直接的関与の必要最小限度化・重点化などの  
保安規制の合理化

ところで、現在、世界で議論となっている電力市場自由化に関する話題は、上記1に関わるところであり、上記1は次の二点に大別できる。

- (a) 発電事業への新規参入の拡大
- (b) 特定電気事業に係る制度の創設

本付録では、上記(a)(b)について、その要点を説明する。

### (a) 発電事業への新規参入の拡大

近年、需要家に近接し、エネルギー効率の高い分散型中小規模電源による発電事業への参入の可能性が拡大していることを受け、これを適切かつ有効に電気事業を組み込むことは、電気事業全体としてより適切な電源配置によるより効率的な設備構成を達成できるとの見解から、これら新たな事業者に対して適切な参入機会を確保しつつ、発電分野への競争原理を促すことにした。そのため、

- ①：卸電気事業の許可の原則撤廃
- ②：卸供給制度の整備
- ③：卸託送の開放

などの措置が講じられた。以下に、これらの概要を記す。

#### ①：卸電気事業の原則撤廃

発電事業に競争原理を導入するとき、(旧)卸電気事業者も参入対象者となるため、供給義務を課す必要はないこと、さらに一般には一般電気事業者がその供給義務を全うすれば、安定供給という本来の目的は達成されるということから、卸電気事業の許可を原則として廃止した。しかしながら、ごく大規模な発電事業者に対しては、電力供給システムの安定供給のために義務を課すべきとの判断により、卸電気事業の制度自体は新電気事業法にも存続している。

従って、事業法改正前までは卸電気事業者として電気事業法の規制を受けていた発電事業者の大部分は、新電気事業法では法的には自家用発電設備設置者となり、電気事業法の規制は受けない。なお、新法での卸電気事業者とは、その合計出力が200万kWを越える事業者との方針があり、改正後の卸電気事業者は、電源開発(株)と日本原子力発電(株)の2社のみである。

## ②：卸供給制度の整備

卸発電市場の開放に伴い、公正な取引ルールの整備を行う必要があるとの見解から、料金規制を設けることにした。ただし、規制を最小限度にとどめるため、ある程度まとまった量のある程度長時間(1000kW以上・10年以上、または10万kW以上・5年以上)、計画的な電力供給(これを卸供給と呼ぶ)についてのみ規制が課される。

このように、卸供給は認可制を原則とするが、小中火力電源を中心に潜在的な参入可能性がある現状を鑑み、一般電気事業者が実施する「入札」による卸供給が可能となった。この入札による場合、卸供給は認可制を不要とし、届け出制で足りる。

## ③：卸託送の開放

実効性のある健全な卸発電市場の形成のためには、一般電気事業者の供給区域に縛られない広域的な市場形成が必要である。そこで、改正電気事業法では、一般電気事業者の送電網を活用して、電気の広範囲な流通を可能とするため、卸売電に関する振替供給についての制度設計が抜本的に変更されている。

振替供給とは新法第二条十一号で次のように定義されている。

- ・振替供給とは、他の者から受電したものが、同時に、その受電した場所以外の場所において、当該他の者に、その受電した電気の量に相当する量の電気を供給することをいう。

新制度では、一般電気事業者などの送電ネットワークを有する事業者に対して、卸売電に係る振替供給について、料金などに関する約款の算定および公表、さらにその約款の遵守を義務づけることによって、発電事業者が卸託送を利用しやすくした。しかしながら、送電ネットワークはあくまで一般の需要への供給を最優先して利用されるものであり、振替供給の引き受けを義務づければ、本来の目的(一般需要家への安定供給)を圧迫する事態が生じかねないため、義務づけは直接的に規定していない。

## (b) 特定電気事業に係る制度の創設

近年、発電機にまつわる技術の向上から、ある程度限定された需要に追いつき、独立して電力の直接販売事業を営む能力を有する事業者の参入の可能性が拡大している。そこで、改正電気事業法では、世界に類を見ない「特定電気事業」を創設した。

特定電気事業は、供給を望む特定の需要家に対して電気を供給する業務であり、一般にごく小規模なものであり、特定の供給地点を一単位として電気の供給を行う許可事業である。この特定電気事業の創設に当たり、改正電気事業法では、以下の制度が整備された。

- ①：特定電気事業の事業許可
- ②：特定電気事業者の供給義務
- ③：特定電気事業の料金に係る規制の整備
- ④：補完供給契約

以下に、これら四点の概略を示す。

### ①：特定電気事業の事業許可

特定電気事業は、一般電気事業の供給区域の上に成立するものであるから、これが闇雲に増加すると、一般電気事業の事業効率が不当に低下し、結局、一般需要家に不当な不利益をもたらしかねない。従って、特定電気事業は許可制とし、その事業許可に当たっては一般需要家の利益を阻害しないことも電気事業法に明記されている(新法第五条六号)。

### ②：特定電気事業者の供給義務

特定電気事業者は、需要家に供給義務を負う「電気事業者」である。これに伴い、一般電気事業者は、その供給区域内であっても、特定電気事業者が電力供給を行っている地点については供給義務を免れる。

### ③：特定電気事業の料金に係る規制の整備

特定電気事業についても、需要家の利益保護の観点から、一定の料

金規制が必要であるが、

- ・ 特定電気事業の電力供給先は限定的・固定的であること
- ・ 需要家は一般電気事業者との間で供給先を選択可能

であることから、厳格な認可制を必要しないと考えられ、これは届出制となっている。

#### ④：補完供給契約

安定供給義務を負う特定電気事業者は、事故時を備えてバックアップの措置を講じておく必要がある。しかしながら他社からの電力供給を受けることでも足りるとするべきである。こうした特定電気事業者に対する非常時のバックアップ供給を補完供給契約と呼ぶ。

以上、1995年に改正された電気事業法の改正の要点を説明したが、詳細は文献[12]ならびに[13]を参照されたい。なお、現在、電気事業審議会(基本政策部会など)では、電気事業法の更なる改正を念頭に置いて、一層の競争促進方策について協議中である。

## 付録2. スポットネットワーク方式の構成

一般に、現行の高圧あるいは特別高圧配電系統は、次の5つに分類される。

- (1) 樹枝状方式
- (2) ループ方式
- (3) 常用予備切換方式
- (4) スポットネットワーク方式
- (5) 高圧ネットワーク方式

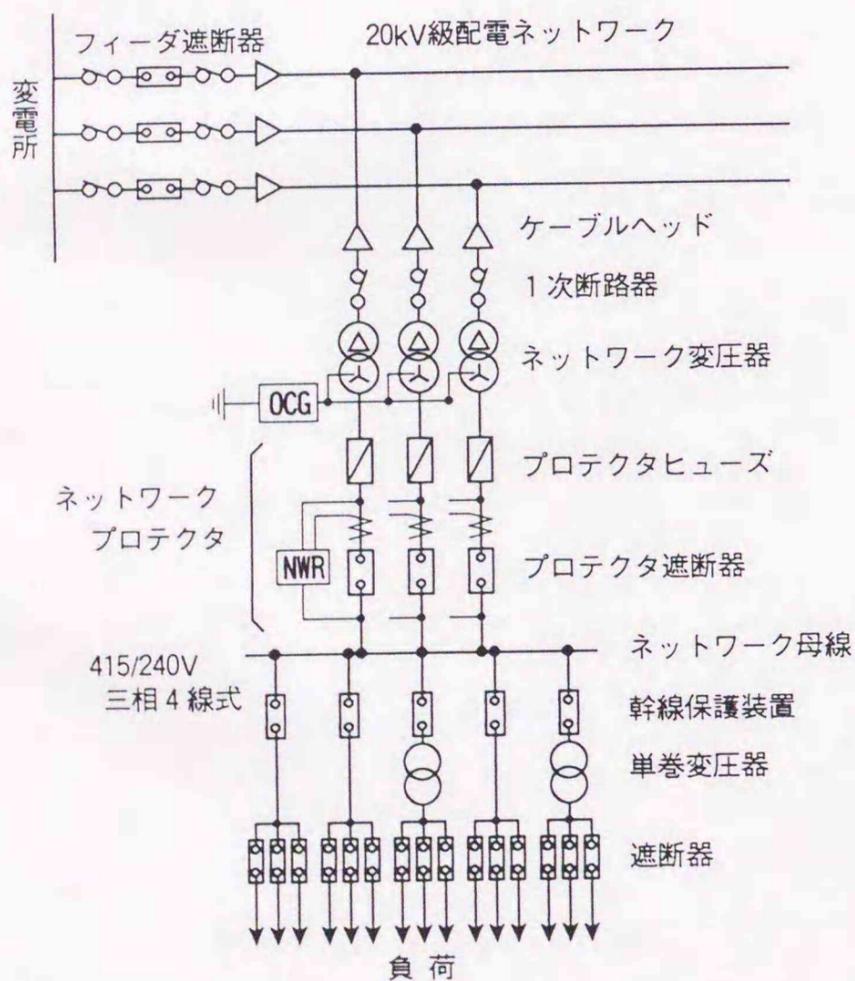
このなかで、スポットネットワーク (*Spot Network*; SNW) 方式は、22kV(あるいは33kV) 電源変電所から2回線以上の配電線で受電し、都心部の高層ビルや大規模工場などのように、極めて高度に集中した大容量負荷群に適用する方式であり、1回線に事故が発生した場合でも他の健全な回線から、自動的に受電することができる無停電方式で、供給信頼度は高い。SNW方式の構成を付図2.1.に記す。

ネットワーク変圧器の二次側には、各バンクごとにネットワークプロテクタを設置し、その負荷側を一つのネットワーク母線で並列にした上、その母線に接続されたいくつかの幹線によって、需要家内の各方面の負荷に供給する方式である。このSNW方式の特徴は、22kV側の受電用遮断器を省略し、その代わりに変圧器の二次側に設置されたネットワークプロテクタを従来の22kV受電方式の受電用遮断器に代わる保護装置として使用している点である。ネットワークプロテクタは、逆電力遮断特性、差電圧投入特性、ならびに無電圧投入特性の三つの特性によりプロテクタ遮断器を動作させることによって、各種事故に対して無停電供給が可能となる。

例えば、ネットワーク配電線またはネットワーク変圧器の一回線事故時には、

まずその回線の変電所フィーダ遮断器が過電流継電器または地絡方向継電器によって自動遮断するが、各プロテクタ変圧器はその二次側で健全回線と並列に接続されているため、ネットワーク母線から事故回線に接続された変圧器に向けて短絡電流あるいは変圧器励磁電流と配電線充電電流が逆流することになる。この逆電流をネットワークプロテクタが検出して、プロテクタ遮断器を動作させ事故を除去する。こうすることによって、負荷には無停電で電力供給が可能となる。この特性をネットワークプロテクタの逆電力遮断特性と呼ぶ。

しかしながら、SNW方式はそもそも需要家側に分散電源などのエネルギー源があることを想定しておらず、ネットワークプロテクタの持つ逆電圧遮断特性によって、需要家側から配電ネットワーク側への電力潮流が許容していない。また、SNW方式はネットワーク変圧器の低圧側において多回線を同時に受電する方式であり、高圧配電ネットワーク構成を自由に変更することが不可能な構成である。



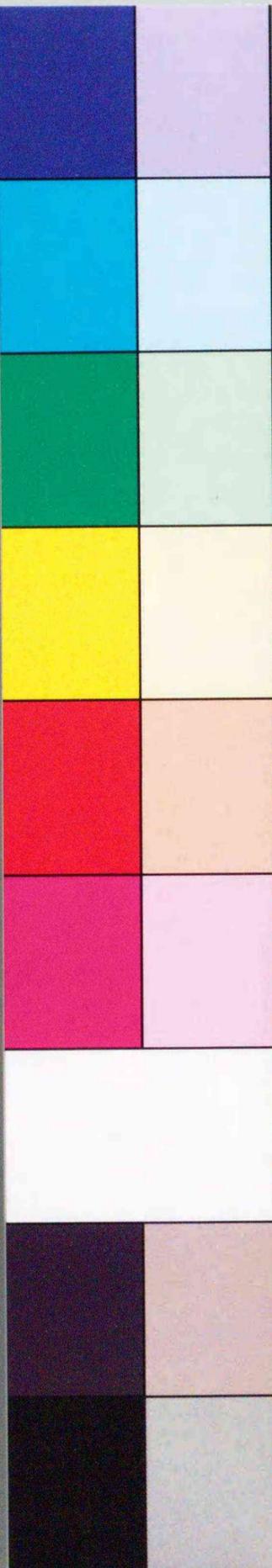
付図2.1. スポットネットワーク方式

日本における電力改質センターに関する基礎研究

Inches 1 2 3 4 5 6 7 8  
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

### Kodak Color Control Patches

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black



### Kodak Gray Scale

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19



© Kodak, 2007 TM: Kodak