

博士論文

分散型電源の積極活用のための
負荷供給システム制御システムに関する研究

高野 富裕

目次

第1章	序論	1
1.1.	研究の背景	1
1.2.	研究の目的	3
1.3.	論文の構成	4
第2章	分散型電源を含む配電系統における電圧適正化技術	7
2.1.	緒言	7
2.2.	配電電圧適正化の課題と関連研究	7
2.2.1.	配電系統の電圧上昇・変動	7
2.2.2.	関連研究	8
2.3.	集中型電圧制御システムの開発	11
2.3.1.	集中型電圧制御の枠組み	11
2.3.2.	二階層制御	13
2.3.3.	最適潮流計算による制御量決定	15
2.3.4.	実証結果	21
2.3.5.	分散型電源の連系容量拡大効果	25
2.4.	需要家進相コンデンサ制御システムの開発	33
2.4.1.	需要家進相コンデンサ制御の意義	33
2.4.2.	フェランチの要因	34
2.4.3.	提案システムの概要	35
2.4.4.	進相コンデンサの制御ロジック	37
2.4.5.	実証による評価	45
2.4.6.	分散型電源の連系容量拡大効果	51
2.5.	結言	55
	参考文献	57
第3章	再生可能エネルギー電源の活用技術	59
3.1.	緒言	59
3.2.	新エネ電源活用の課題と関連研究	60
3.2.1.	出力の不安定さ	60
3.2.2.	関連研究	61
3.3.	蓄電池併用による安定化技術	63
3.3.1.	蓄電池併設による出力安定化	63
3.3.2.	計画立案方法	64
3.3.3.	計画立案シミュレーション	73
3.4.	自立運転のための不平衡補償	83

3.4.1.	マイクログリッド自立運転における課題	83
3.4.2.	対象マイクログリッド.....	84
3.4.3.	不平衡対策.....	86
3.4.4.	実証結果.....	92
3.5.	結言	95
	参考文献.....	97
第4章	事例ベースエキスパートシステムによる系統操作支援技術.....	99
4.1.	緒言	99
4.2.	系統操作の課題と関連研究.....	100
4.2.1.	系統操作の課題.....	100
4.2.2.	系統操作の関連研究	102
4.3.	階層的概念に基づく専門知識獲得方式.....	104
4.3.1.	HCL の枠組み	104
4.4.	系統操作手順作成への適用	108
4.4.1.	システム構成	108
4.4.2.	系統操作手順作成のための拡張	109
4.4.3.	系統操作手順作成例	110
4.5.	マイクログリッド系統操作手順作成への適用.....	118
4.5.1.	事例活用の意義.....	118
4.5.2.	事例の階層的整理.....	118
4.6.	結言	123
	参考文献.....	125
第5章	分散型電源を含む電力系統の監視制御システム構築技術.....	127
5.1.	緒言	127
5.2.	監視制御システム構築の課題と関連研究.....	128
5.2.1.	監視制御システム構築の課題.....	128
5.2.2.	監視制御システム構築の関連研究	128
5.3.	監視制御システムの動的検証技術	131
5.3.1.	動的検証法の意義.....	131
5.3.2.	システムの自動検証	132
5.3.3.	自動検証のための制約条件	133
5.3.4.	制約条件の例	135
5.3.5.	シミュレーターと組み合わせた動的検証	139
5.4.	部品ライブラリ化による監視制御システム構築技術.....	142
5.4.1.	ソフトウェア半自動生産環境の枠組みと理念	142
5.4.2.	生産環境の構造と特徴.....	144

5. 5.	結言	152
	参考文献.....	154
第 6 章	結論	155
6. 1.	研究の成果	155
6. 2.	今後の展開	157
	謝辞.....	163
	業績目録	165

第1章 序論

1. 1. 研究の背景

地球温暖化対策として、再生可能エネルギー（RE: Renewable Energy）を用いた発電システムや、発電時の排熱利用による高効率運転を目指したコージェネシステムなど、いわゆる分散型電源が増加し続けている。

特に 2012 年から始まった RE 発電電力の固定価格買取制度（FIT: Feed-in Tariff）を追い風に、我が国においても太陽光発電（PV: Photovoltaic Generation）や風力発電（WT: Wind Turbine Generation）に代表される RE の普及増加が著しい。

一方で 2011 年 3 月の東日本大震災以降、原子力発電の停止にともなう重負荷期の需給逼迫と電気料金値上げがマスコミでも度々騒がれるようになった。その結果、これまでエネルギー問題に関心の低かった民間でも電力供給に強い関心を抱くようになり、電力は使いたいだけ使うという時代から、限られた供給の中で如何に賢くやりくりするかという時代へと移り変わりつつある。同時に、政府でも電力会社による独占供給体制を見直し、一般家庭など低圧需要家でも、複数の電気事業者から供給元を選択できる完全小売自由化を目指すようになった。

分散型電源の普及に加えた、この民間レベルでの電力に対する関心の高まりと、小売自由化を受け、今後は地域に根ざした中小規模の新電力事業者が増え、RE をはじめとする分散型電源の導入がさらに加速すると考えられる。

RE は、そのエネルギー源によって分類され、一定した発電が得られる地熱発電、数時間レベルであれば出力を自在にコントロールできる水力発電やバイオマス発電、秒レベルでも出力制御が難しい PV や WT などがある。

現状での伸び率という点では PV と WT が主体となっている。PV や WT は、どこにでもある日照や風をエネルギー源として発電するため立地条件にあまり縛られず、また導入コストも手ごろなことから普及している。

例えば国内では、2011 年時点で総発電電力量の 9.0%が水力、1.4%が水力以外の RE にとどまっているが、PV と WT の比率は年々増え続けると予想される。2004 年に策定された政府ロードマップ「PV2030」では 2020 年に 28GW、2030 年

に 53GW の導入目標が掲げられている。53GW は国内発電の最大出力 209GW の約 25% に相当するとともに、2005 年の累計導入量 1.4GW に比較すると、伸び率では 2020 年に 20 倍、2030 年には 38 倍という驚異的な数値となる。

このように普及著しい RE ではあるが、地熱発電を除いては、いずれのタイプでも、火力発電や原子力発電のように燃料を安定供給される電源に比べると、通年で安定した電力供給は難しい。例えば水力発電はダム貯水量によって発電総量が決まり、バイオマス発電は、現状では植物油などのバイオエネルギー源の供給能力は限定的である。PV や WT に至っては、時々刻々と変化する天気任せの発電である。このような出力不安定な電源は、電力系統にとっては不安定要因となることから、系統周波数や電圧などの電力品質面での対策が望まれている。

また、前述のように 2030 年には PV の発電容量が全体の 25% にも達する可能性があることを踏まえ、出力不安定な RE をより積極的に活用しようとする動きも出始めている。特に東日本大震災以後、エネルギー効率向上とエネルギーコスト低減の観点から、地方自治体や住宅ディベロッパーなどで注目を集めるようになったのが、マイクログリッドやスマートコミュニティに代表されるエネルギー地産地消である。これらの運用形態においては、特定の閉じたエリア・電力系統において、可能な限りのエネルギー自給自足を志向している。例えばコージェネシステムによる排熱利用、蓄電池併用による PV や WT 発電の安定供給である。特にエリア内の自前電源による安定供給が実現できると、大震災による大停電や、台風直撃による山間部など僻地停電でも、生活に最低限必要なエネルギー供給が可能となるという新たな付加価値を産むことになる。

ところが、マイクログリッドやスマートコミュニティに必要な不可欠である、RE やコージェネなどの発電設備、発電電力を需要家に届ける送配電網の運用は、極めて専門的な知識を要する。専門の運転員を常駐させると 1 千万円程度の人件費がコストに上乗せされるため、マイクログリッドやスマートコミュニティの普及のネックとなっている。専門の運転員を必要とせず、その他の一般業務を兼ねた管理者でも運用できるよう、可能な限りシステム化が望まれる。

システム化の技術という観点では、電力分野に限らず、様々な産業分野でエキスパートシステムと呼ばれる専門員の代行を行う技術が数十年前より研究・開発されてきた。これは、専門員の深い知識をルールや事例などの形式で計算

機システムに蓄積し、状況に応じてそのルールを適宜選択・適用してすることにより、問題解決を図っていくものである。このエキスパートシステムをマイクログリッドやスマートコミュニティの運用ガイダンスとして活用すれば、専門の運転員でなくとも、系統事故処理などグリッド運用で生じる諸問題に対して常に的確な判断が期待できる。ところがエキスパートシステム構築に実装すべき専門知識は非常に膨大であり、これをいかに効率的に獲得し、妥当性を検証していくかが実用化に向けての鍵と言える。

また運転員の負担軽減、ひいては人件費削減という意味においては、エキスパートシステムのような高度な中央演算処理の導入に加えて、グリッド内の系統保護や機器監視といった、パターン化が容易なプリミティブ情報処理は、現地に近いローカルシステム、いわゆる現地制御盤の段階で自動化することが望ましい。そのためには、個々のグリッド構成や特質に応じたプリミティブ処理を適宜選択し、簡単なパラメータ設定だけで効率的にシステム開発できる環境が望まれる。

1.2. 研究の目的

大型工場など特高需要家がつながる 22kV～154kV 特高系統、中小工場やビル、商業施設など高压需要家がつながる 6.6kV 高压系統、住宅など低压需要家がつながる 100/200V 低压系統など、さまざまな階級の電力系統に分散型電源は連系することになる。

例えば大型 WT やメガソーラ、水力発電は特高系統に、数百 kW クラスの PV や大型コージェネ、バイオマス発電などは高压系統に、住宅用 PV や燃料電池などは低压系統に各々連系し、さまざまな課題とともに、活用の可能性を産むことになる。

そこでこれらの需要家や分散型電源が連系する電力系統を“負荷供給系統”として定義し、分散型電源に対する問題解決と積極活用を目指した技術開発を行うことを、本研究の目的とする。具体的には、前述の背景を鑑み、以下の4点を研究課題として設定する。

(1) 負荷供給系統（特に配電系統）における電圧適正化

RE をはじめとする分散型電源は、電力会社の大型発電設備に比べれば安定性・信頼性の両面で高いとは言えない。そのため、分散電源の普及に伴い、需給アンバランスや周波数変動、電圧変動など、さまざまな電力品質低下が問題

視されてきた。特に負荷供給系統においては、分散型電源の出力変動による電圧変動と、逆潮流による電圧上昇といった電圧問題が顕在化するため、その適正電圧維持技術の確立を目指す。

(2) RE 電源の積極活用

分散型電源の積極活用という面においては、天気次第で出力が時々刻々と変動するとともに、事前の出力予測も困難な PV, WT の出力安定化が必要不可欠と言える。そこで近年電力用途に大容量化が進みつつある蓄電池併設による出力安定化技術の開発を目指す。また、分散型電源をベースとしたマイクログリッドやスマートコミュニティへの付加価値創造として、災害時などにおける自立運転を支える電力品質保証技術の実現を目指す。

(3) 分散型電源普及に向けた系統運用支援

マイクログリッドに代表されるように、電力自由化によって近い将来、電力事業者が増えるとともにその供給形態も多様化し、電力系統の管理範囲が細分化されることが予想される。その場合、事業性という観点から、個々の細分化系統の運用コストをいかに抑えるが課題となる。そこで個々の系統において、熟練オペレータのような専属運転員を必要とせず、そ専門知識を有さない一般管理者にも運用業務を可能とする、系統運用支援システムの実現を目指す。

(4) 分散型電源普及に向けたシステム構築技術

分散型電源の普及を支える計算機システム構築技術として、分散型電源による系統運用の複雑化を、高度情報処理によって支えるエキスパートシステムと、系統の多様化を、系統機器に近いローカルシステム段階でパターン化処理の選択と組み合わせによって吸収するプリミティブ情報処理システムとの両方を、効率的に開発し、システムとしての信頼性を高める技術の実現を目指す。

1.3. 論文の構成

前節までに述べた背景と目的のもとで、筆者は分散型電源普及に備えた負荷供給系統の電圧適正化や、出力不安定な RE の有効活用、並びに操作支援システムやシステム構築技術を対象とした研究を行ってきた。本論文はそれらをまとめたものであり、序論である本章を含めて6章から構成されている。

本論文の構成を図 1-1 に示す。1.2 節で述べた4つの研究目的に対応する形

で、本論文の内容は2つに大別され、系統機器や分散型電源の制御手法に関する第2章・第3章と、システムによる運用高度化とそのためのシステム構築技術に関する第4章・第5章の2つの大枠から成る。以下に、各章の概要を述べる。

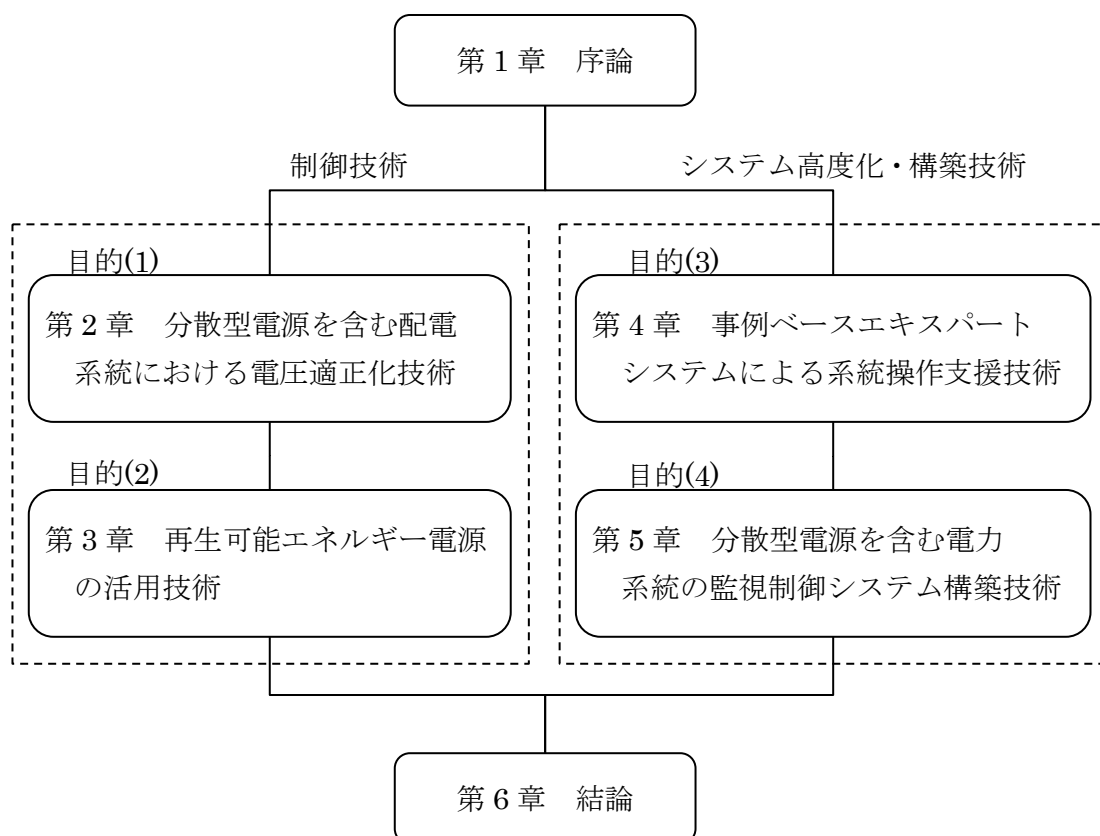


図 1-1 本論文の構成

まず第2章において、RE 普及による電力品質低下問題の中で、最初に顕在化することが予想される配電システムの電圧上昇・変動問題の対策技術について述べる。

対策としては、系統運用者側で実施する対策と、需要側で実施する対策の2つを挙げる。電力系統側の対策技術として、配電システムに複数設置された電流・電圧センサー付開閉器の計測データを中央サーバーに集約し、その結果をもとに配電システムの電圧調整器を最適制御する集中型電圧制御について述べる。

もう1つの需要家側の対策技術として、RE と並んで配電システムの電圧上昇問題の要因となっている、進相コンデンサ過剰接続を改善するための、安価なコン

トローラ実現について述べる。

第3章においては、RE電源の積極的な有効活用について検討する。

1つはREを信頼性の高い安定電源として活用するための蓄電池制御と発電計画に関する技術、もう1つは、災害による系統停電時のマイクログリッド・スマートコミュニティといった地域内の独立系統による電力自給自足、すなわち自立運転技術について述べる。特にマイクログリッドのような小規模系統における自立運転では、受給バランス維持に加えて、住宅などの単相負荷が主体となるため、三相不平衡が課題となる。ここでは特にREによる不平衡解消技術にスポットを当てた技術について述べる。

第4章においては、エキスパートシステムによる系統操作支援について述べる。

特に本稿では、過去の操作事例から知識を体系的に整理し、新たな専門知識として蓄える事例学習の手法と、それに基づく操作手順作成を考える。系統操作の例として、送電系統や変電所における系統切り替えや作業停止の操作手順作成を取り上げるとともに、マイクログリッド・スマートコミュニティへ適用した場合のケーススタディについて考察する。

第5章においては、電力系統向け監視・制御・保護システムの設計・製作・検証技術について述べる。

1つは、第4章のような、様々な専門知識の複雑な組み合わせによって動作するエキスパートシステム向けの検証技術であり、システムを動作させ、その挙動を見つつ成否判断を行う動的検証技術について述べる。今一つは、電力向け監視・制御・保護システム構築の汎用的手法であり、計算機システム上のアプリケーションソフトを予め部品化・ライブラリ化し、設計・製作段階では必要な部品選択とそのパラメータ設定作業によって、システムを構築する技術について述べる。

第6章では、本研究で得られた成果を総括するとともに、分散型電源の更なる活用という観点から、今後の展開について述べる。

なお、本論文の第2章～第5章は、業績目録【査読付き論文】に記載の、電気学会論文誌B掲載論文[1]～[6]から引用転載したものである。

第2章 分散型電源を含む配電系統における電圧適正化技術

2.1. 緒言

環境意識の高まりと、固定価格買取制度をはじめとする政府の RE 促進策を受けて、設置場所や規模を選ばず導入できる PV が普及拡大し続けている。

政府導入目標として掲げられている PV 導入量のうち、約 7 割が住宅用 PV と想定されている。そのため PV により引き起こされると懸念される系統への諸影響が、配電系統でいち早く顕在化すると目されている。

特に PV は天気任せの発電であるため、日射変動に比例して秒レベルで出力が変化し、連系配電線の電圧を上下に変動させるとともに、余剰電力による逆潮流は電圧上昇を引き起こし、電気事業法で定められた $101 \pm 6V$ 内の電力供給に支障をきたす危険性がある。

本章では、まず配電系統における電圧問題を明確化したうえで、その関連研究について述べる。次にその対策技術として、電力会社側で実施する集中型電圧制御と、需要家側で実施する進相コンデンサ制御の 2 つの電圧適正化技術について紹介する。

2.2. 配電電圧適正化の課題と関連研究

2.2.1. 配電系統の電圧上昇・変動

配電系統は設計の当所、負荷のみが接続し、変電所から末端へと一方向に電流が流れることを前提としていた。そのため電圧分布も図 2-1 のごとく末端方向へ下がっていくことを前提としており、各点の柱上変圧器タップ（変圧比率）が設定されてきた。例えば変電所付近では高圧系統の電圧は高めであるため、柱上変圧器タップが 6, 750V : 105V で低圧に降圧される。一方で末端付近では高圧系統の電圧は低めであるため、柱上変圧器のタップは 6, 450V : 105V で降圧さ

れる。これによって、高圧系統側の地点による電圧のばらつきを吸収することを基本とし、更に負荷量の時間変化とそれによる電圧降下幅の大小変化は、変電所の LRT (Load Ratio control Transfer : 負荷時タップ切替変圧器) と、配電線途中に直列接続される SVR (Step Voltage Regulator : 機械式自動電圧調整器) が各々通過電流/電力を監視し、タップ制御 (= 変圧比操作) により微調整を行ってきた。

ところが PV 連系とその余剰電力により、末端から変電所方向へ電力が流れる逆潮流と、それによる末端部の電圧上昇が生じる。また、雲の移動によって出力が頻繁に変動するため、秒レベルの短周期の電圧変動を誘引する可能性がある。

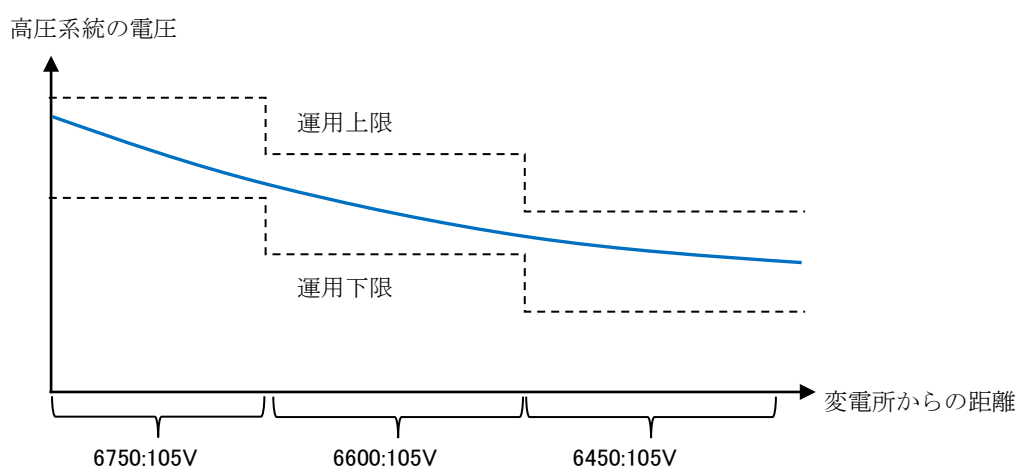


図 2-1 後発系統の電圧分布と柱上変圧器タップ

2.2.2. 関連研究

配電系統の電圧適正化には、様々な機器の開発と、制御方式が研究・開発されてきた。

新たな機器による対策としては、文献[2-1]では、比較的小容量のコンデンサ・リアクトルを配電線に分散配置し、個々の自律分散制御により電圧プロフィールを理想形に近づける方式が紹介されており、既に 10 年以上前に実系統で

検証されている。一方で低圧系統に自動電圧調整器を追加し、高圧系統で吸収しきれない電圧変動を吸収する対策も、文献[2-2]などで紹介されている。

また高速に変動する PV に追従すべく、パワーエレクトロニクス応用機器（以下、パワエレ機器）による対策も注目されている。文献[2-3]において、UPFC(Unified Power Flow Controller) や STATCOM(Static Synchronous Compensator)、 BTB(Back-To-Back)といった送電系統に使われてきた機器の配電系統への応用を考え、その必要容量の算定方式について検討している。

文献[2-4]では、配電線直列接続型の SVC(Static Var Compensator：静止型無効電力補償装置)の開発と、従来からの機械式電圧調整器である SVR との協調制御について紹介されている。文献[2-5]では、PV 自体に力率一定制御を実施させた場合の、電圧変動緩和効果と、従来電圧調整器への影響評価が紹介されている。

しかし国内で6万本と言われる配電線にこれらの新型機器を導入していくには、10年オーダーの長い時間と膨大なコストを要し、電力自由化・規制緩和によってコスト競争が激化しつつある配電系統では、特効薬となるのは難しい。そこで可能な限りは新たな機器追加を必須とせず、制御方式の高度化によって凌いでいくことが望まれる。

制御方式に関しては、文献[2-6]において、電力会社の配電系統を、センサー付開閉器も含めて忠実に再現したミニチュア系統を用い、集中電圧制御方式の効果を評価した結果が報告されている。集中制御では、制御対象となる電圧調整器台数が増えるに従い、組合せ最適問題を解くための計算時間が指数関数的に増える点が1つのネックとされている。そこで文献[2-7]のように、系統を複数ブロックに分けて組合せ問題も分割し、計算時間を抑制するといった、階層的協調制御なども提唱されている。また、集中制御には不可欠となる電圧分布計算を高速化する試みとして、文献[2-8]のように、潮流計算と簡易的な電圧降下計算との中間的な計算方式を採用し、精度と速度の両立を狙ったものもある。

このような電圧問題は、近年は日本のみならず、海外でも問題視され始めている。例えば文献[2-9]でも、集中監視制御によって電圧を適正維持する枠組みが机上レベルではあるが提案されている。この文献では、基幹系統で用いられている状態推定技術を導入することで、計測データの誤差を補正した電圧分布

を推定し、電圧調整器の制御量を決定する。国内では、計測誤差1%のセンサー付開閉器が今後主流となるため、計測誤差の影響は比較的小さいと予想されるが、計測点以外の電圧推定は、今後有効な技術の1つと言える。

また、海外でのREは、農山村や郡部でのWTやメガソーラが主体となって普及している。そのため、電圧問題が発生するのは比較的電圧階級が高く、長距離線であることが多い。従って線路の抵抗分に比べてリアクタンス分が大きく、無効電力による電圧制御がより効果的となる。そのため、LRT、SVRといったタップ制御型電圧調整器の多段直列配置で対応する国内システムとは異なり、分散型電源の力率制御やパワーエレ機器の無効電力制御が海外では主体となる。このようなシステムでは、文献[2-10]や[2-11]のように、比較的単純なローカル制御ロジックでも適正電圧が維持できることが特徴と言える。

LRTやSVRによる電圧調整が主体となっている国内配電システムにおいては、それら既存機器を活用しつつ、更に高速応答可能なパワーエレ機器でPVによる急峻な変動を吸収するといった新たな制御手法の実現が望まれる。

2.3. 集中型電圧制御システムの開発

2.3.1. 集中型電圧制御の枠組み

PV 普及に伴う電力品質と供給信頼性低下に対処すべく、国内電力会社では、高圧配電系統の区分開閉器を電流・電圧センサー付開閉器に置き換え、その計測データを、高速通信網を介して配電自動化システムへ集約する集中監視システムの構築に着手している。

そこで高速通信網を活用した ICT 化として、高圧配電系統に設置された LRT や SVR といった電圧調整器を配電自動化システムから直接制御する、集中型電圧制御システムを提案する^[2-12, 13, 14, 15, 16]。

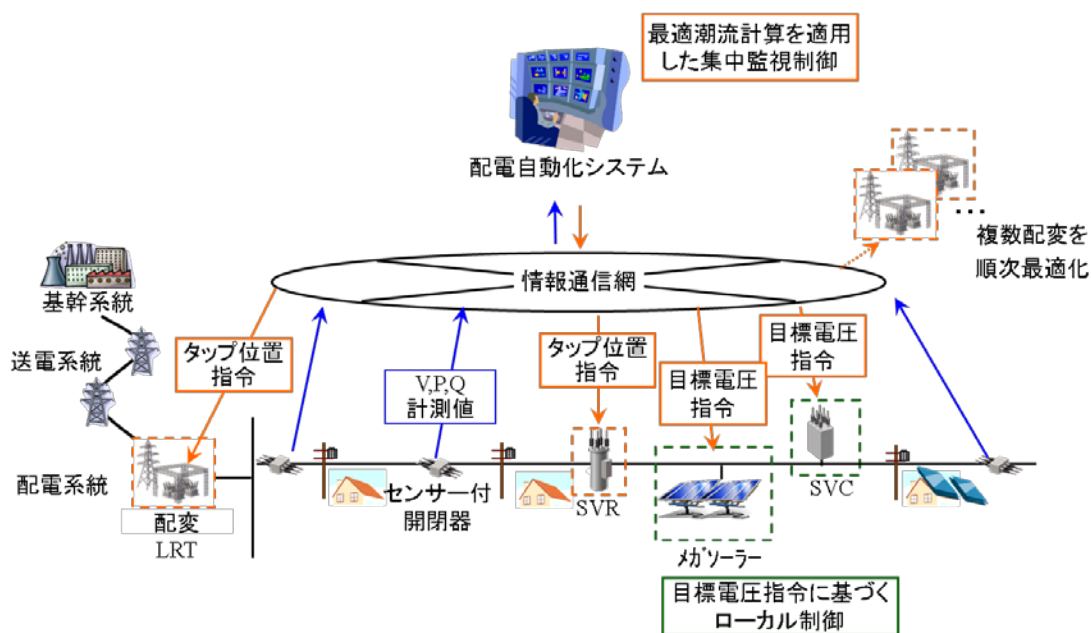


図 2-2 集中型配電電圧制御の概略

これは、センサー付開閉器で計測される潮流（線路通過有効電力・無効電力）と電圧を元に配電自動化システムにて最適潮流計算（OPF: Optimal Power Flow）^[2-17]を実施、最小制御量で各点の電圧を適正範囲に収めるように、各電圧調整器

の制御指令を決定するものである。

制御対象の電圧調整器としては、下記を想定する。

① 機械式タップ切替型電圧調整器（離散制御型）

- ・ 配電変電所用の LRT
- ・ 配電線路用の SVR

の2種類を考える。これらの電圧調整器は配電線に直列接続され、一次側の巻線比をタップ制御により変更し、変圧比をオンロードで切替える一種の変圧器である。通常、一次側の系統は電圧固定の無限大母線に繋がった状態であるため、タップ制御により変圧比を切替えると、二次側電圧のほうが変化する。

したがって、電圧調整器への制御指令は一次側タップ位置であり、制御前後のタップ位置の相違が制御量となる。

機械式の電圧調整器は、その動作原理や機器寿命の観点から高速制御が難しい反面、制御による電力ロスが少ない為、長周期の電圧変動吸収に適している。

② パワエレ式無効電力制御電圧調整器（連続制御型）

- ・ 配電線路用の SVC
- ・ 産業用 PV-PCS（Power Conditioning System）

の2種類を考える。これらの電圧調整器は配電線に並列接続され、無効電力を配電線から出し入れすることにより、電圧を調整する。

電圧調整器への制御指令は無効電力量であるが、①とは異なり、制御前後の無効電力量の変化分ではなく、出力する無効電力量の絶対値自体が制御量となる。

パワエレ式の電圧調整器は高速制御が可能のため、機械式では対応が難しい秒レベルでの短周期電圧変動の吸収に適しているが、無効電力による線路ロスと電圧調整器自体の機器ロスが機械式に比べて大きい。

2.3.2.二階層制御

集中制御の制御周期は、センサー付開閉器の通信端末処理、配電自動化システムでの膨大な計測データ加工処理、通信網の通信トラフィックなどの影響により、分周期（概ね1～5分程度）となる。一方でPV出力変動に起因する電圧変動は秒レベルで発生し、また分周期の制御ではパワエレ式電圧調整器の高速性を活かすことができない。

そこで本研究における集中制御方式では、すべての制御対象機器に対して直接制御指令を与えるのではなく、パワエレ式電圧調整器については

- ・中央装置から現地の SVC, PV-PCS 制御端末へは、制御目標（目標電圧＋不感帯幅）を指定（分周期）
- ・SVC, PV-PCS 制御端末から電圧調整器本体へは、制御目標を達成するための無効電力量を指定（秒周期）

の二階層制御方式を採用する（図 2-3 参照）。まず最適潮流計算の実装された配電自動化システムにおいて、センサー付開閉器の計測値と電圧調整器の制御状態（タップ位置や無効電力出力）を取り込み、系統全体の電圧分布を把握するとともに、電圧逸脱があれば、それを解消する電圧調整器の最適な制御量とその結果生じる電圧分布を決定する。

LRT, SVR に対しては、決定した制御量（タップ動作）を直接指示する。SVC, PV-PCS 制御端末に対しては、決定した制御を実行することで得られるであろう電圧分布において、各機器の連系点の電圧を目標電圧として指示する。

SVC, PV-PCS 制御端末では、次の制御周期で新たな目標電圧が指示されるまでは、自身の連系点電圧が与えられた目標電圧±不感帯幅に収まるよう、図 2-3 の垂下特性を元に SVC, PV-PCS の無効電力出力を決定する。垂下特性の傾きは、系統基準電圧 V （即ち 6.6kV）と、変電所から SVC, PV-PCS 連系点までの線路リアクタンス X との比 (V/X) を基準に、系統の背後インピーダンス（特高系統や配電用変電所のリアクタンス）を考慮し、若干小さめの値を設定する。

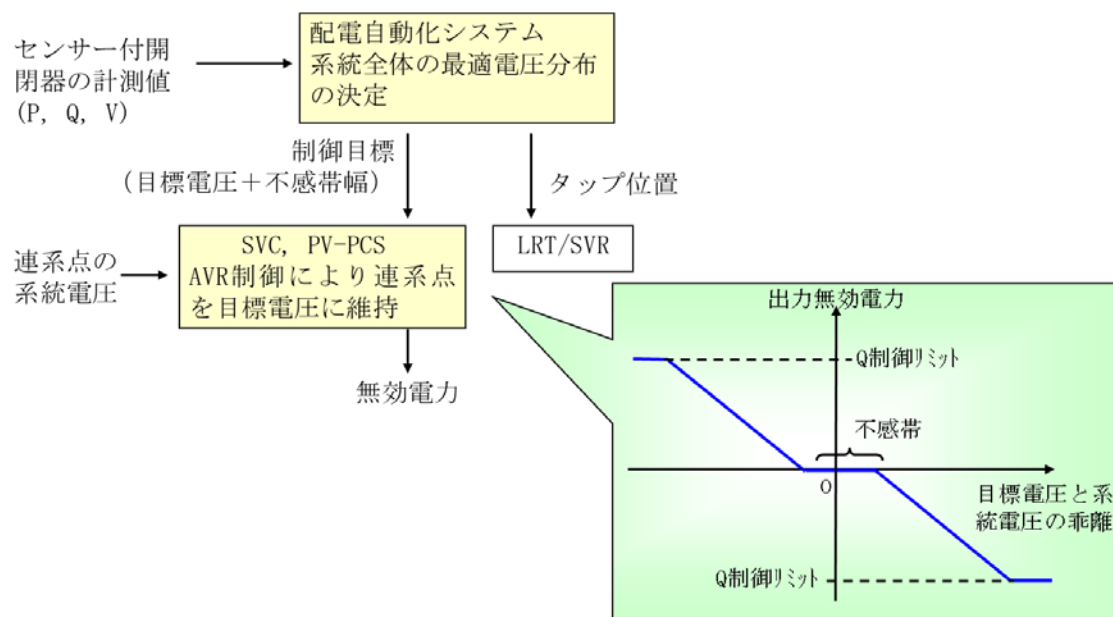


図 2-3 二階層制御における制御指令

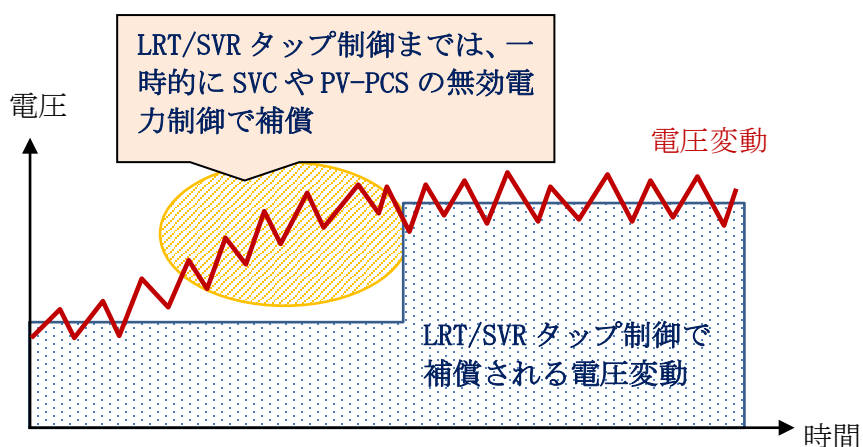


図 2-4 集中型配電電圧制御における電圧調整器間の持ち替え

これにより、PV による急峻な電圧変動が生じた場合でも、図 2-4 のように、いったん高速応答のパワエレ電圧調整器で変動が吸収される。その後の制御周期では、電力ロスの小さい機械式タップ付電圧調整器に持ち替えらることを狙う。

2.3.3.最適潮流計算による制御量決定

(1) 全体の制御量決定

図 2-5 に最適潮流計算^[2-17]を用いた制御量決定フローを示す。まずセンサー付開閉器からの計測値と、各電圧調整器の状態（現タップ、無効電力出力）を取得する。いずれかの計測電圧が所定の上下限から逸脱している場合、その逸脱量を計算し、整定以上であれば、電圧制御必要ありと判断する。また、電圧逸脱が整定以内であっても、SVC や PV-PCS が無効電力を大幅に出力している場合は、LRT や SVR による持ち替えが必要であると判断する。

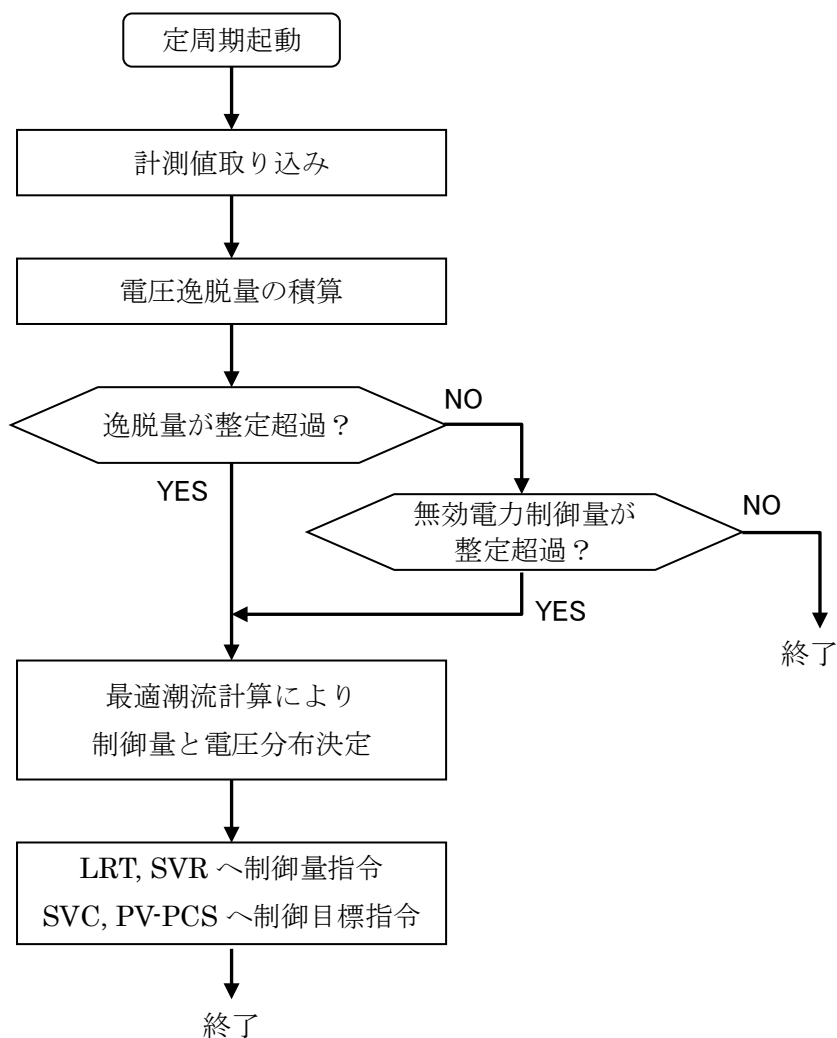


図 2-5 集中型配電電圧制御の処理フロー

制御量を決定する最適潮流計算により、LRT, SVR のタップ位置と、SVC, PV-PCS 連系点電圧が出力されるため、各々に指令として出力する。

電圧制御では、最適潮流計算を下記のように定式化した。

【目的関数】

制御量最小化（正確には制御により発生するコストの最小化）を目的関数として、以下のように設定した。

$$F = W_L \times T_L + W_S \times \sum_{i=1}^n T_{Si} + W_Q \times \sum_{i=1}^m Q_i \quad \dots (2-1)$$

ただし、 W_L : LRT のタップ制御量重み係数

T_L : LRT の制御量（タップ動作数）

W_S : SVR のタップ制御量重み係数

T_{Si} : 個々の SVR の制御量（タップ動作数）

W_Q : SVC, PV-PCS の無効電力制御量重み係数

Q_i : 個々の SVC, PV-PCS の制御量（無効電力出力）

この目的関数 F を最小化する LRT, SVR タップ位置と、SVC, PV-PCS の無効電力出力の組合せを最適化計算により求める。

なお LRT, SVR の制御量はタップ動作 1 回を 1 とカウントし、SVC, PV-PCS の制御量は 1 kvar 出力を 1 としてカウントするものとした。重み係数 W_L と W_S は、LRT, SVR の 1 タップ動作による機器寿命低下のコスト換算値を設定する。一般に大型の LRT は SVR よりも高価であるため、 $2 \times W_S > W_L > W_S$ (LRT は SVR 1 台を制御するよりは高コストだが、SVR 2 台を制御するよりは低コスト) とする。

W_Q も同様に、無効電力制御による機器寿命低下のコスト換算値と、無効電力出力によって生じる機器ロスのコスト換算値（出力とロスとは線形近似）の合算を設定する。

図 2-6 に一般的な機器の制御効果とコストとの関係を示す。SVR は概ね 100V 刻みでタップ制御でき、一箇所の 100V 程度の電圧逸脱解消には最も低コストと

なる。LRTはSVRよりタップ刻みがやや小さく、複数フィーダーにわたって電圧調整が可能であるが高コストとなる。SVC、PV-PCSは連続的に制御可能であるが、数十V程度の微小な電圧逸脱解消を除いては最も高コストである。また連系箇所(=変電所からの線路リアクタンス)によって制御効果が変わる、といった特徴がある。

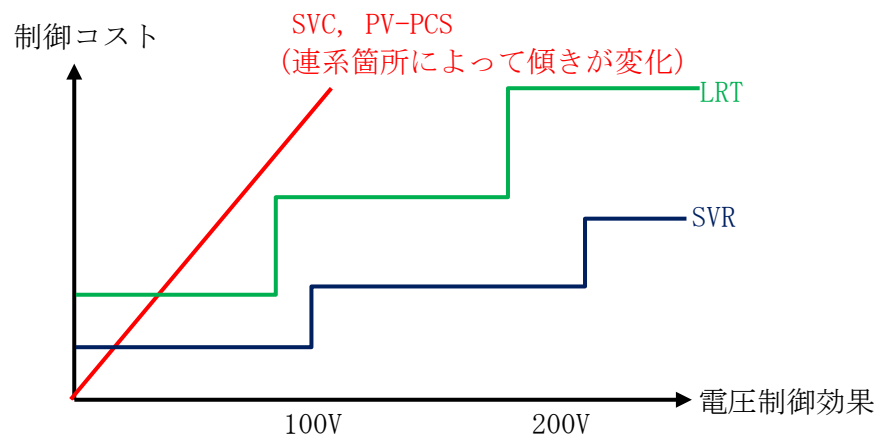


図 2-6 機器の制御効果とコストのイメージ

【制約条件】

制約条件としては、電圧逸脱がないこと、制御対象機器の制御可能量を超えないこととして、下記で与えられる。

$$g(P, Q, V, \theta) = 0 \quad \text{ノード・ブランチ潮流に関する等式制約 (潮流制約)}$$

$$V_{\min_n} \leq V_n \leq V_{\max_n} \quad \text{ノード電圧に関する不等式制約}$$

$$T_{\min_c} \leq T_c \leq T_{\max_c} \quad \text{LRT, SVR の制御幅に関する不等式制約}$$

$$Q_{\min_c} \leq Q_c \leq Q_{\max_c} \quad \text{SVC, PV-PCS の制御幅に関する不等式制約}$$

・・・ (2-2)

ただし、 P, Q : ノード/ブランチの電力

V : ノード電圧、 θ : ノード位相

V_{min} , V_{max} : ノードの制御目標最小電圧、最大電圧

n : ノード番号

T_{min} , T_{max} : LRT, SVR の最小タップ位置、最大タップ位置

c : 機器番号

Q_{min} , Q_{max} : SVC, PV-PCS の定格容量

ここで、各ノードの制御目標最小電圧 V_{min} と最大電圧 V_{max} は、各ノードの運用上の上下限電圧（それ以上逸脱すると低圧側で電気事業法で定める $101 \pm 6V$ 供給に支障をきたす電圧値、例えば下限は低圧系統での電圧降下を最大 $6V$ と想定した低圧換算 $101V$ 相当の $6,350V$ 、上限は同じく低圧系統での電圧降下を最小 $1V$ と想定した $107V$ 相当の $6,720V$ ）より、短期電圧変動幅 V_{f1} を加算、減算した値とする（下図参照）。

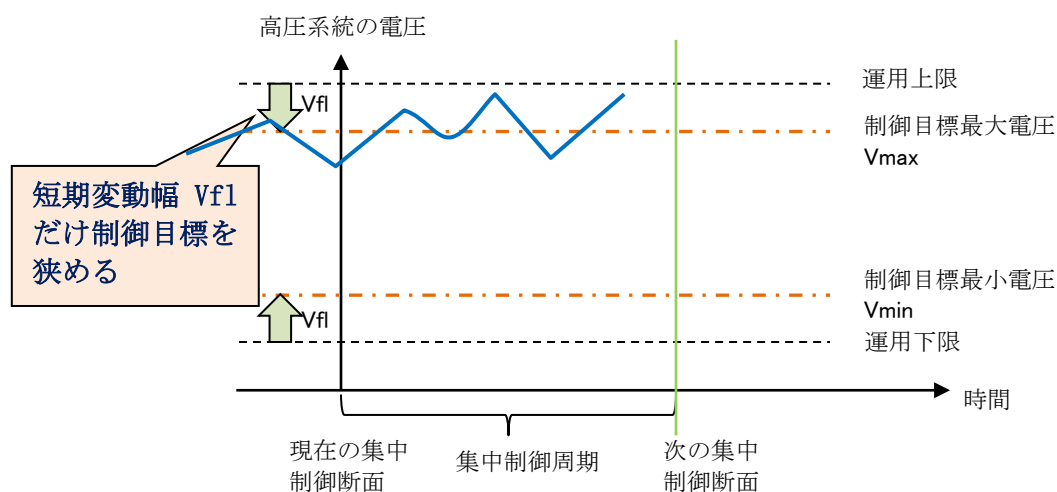


図 2-7 制御目標電圧の設定

ここで V_{f1} は、制御対象系統における PV 非発電時（夜間や雨天）での電圧変動の短周期成分（いわゆる常時変動）を平均した値である。時々刻々と変化する計測電圧に集中制御周期（1～5 分）の時定数のハイパスフィルターを通した結果を平均することによって求める。 V_{f1} は系統によって異なるが、概ね $10 \sim 40V$ である。

運用上の上下限より若干、上下限を狭めた範囲での電圧を目指すことで、次

の集中制御周期までの、PV 以外の要因による常時電圧変動で生じる運用上下限逸脱を大幅に回避することができる。

(2) パワエレ式無効電力制御電圧調整器への制御指令

SVC, PV-PCS への制御目標は、前述のように目標電圧 V_{ref} と不感帯幅 D で与えられる。目標電圧 V_{ref} は、(1) の最適潮流計算の結果、最適と判断・決定された系統状態における電圧分布から、各 SVC, PV-PCS 連系点の電圧値を抽出し、各々の目標電圧として設定する。

不感帯幅 D については、次の集中制御周期までに上下限逸脱を発生させないように電圧を維持しつつ、SVC, PV-PCS 間のハンチングを防止できるよう、下記によって設定する。

$$D = \max(V_{lk}, Ver) \quad \dots (2-3)$$

ただし、 V_{lk} : 対象配電系統において、最適潮流計算によって決定した電圧分布での運用上下限までの尤度 (下図参照)

Ver : 計測器の電圧計測誤差 + 潮流計算の電圧分布推定誤差

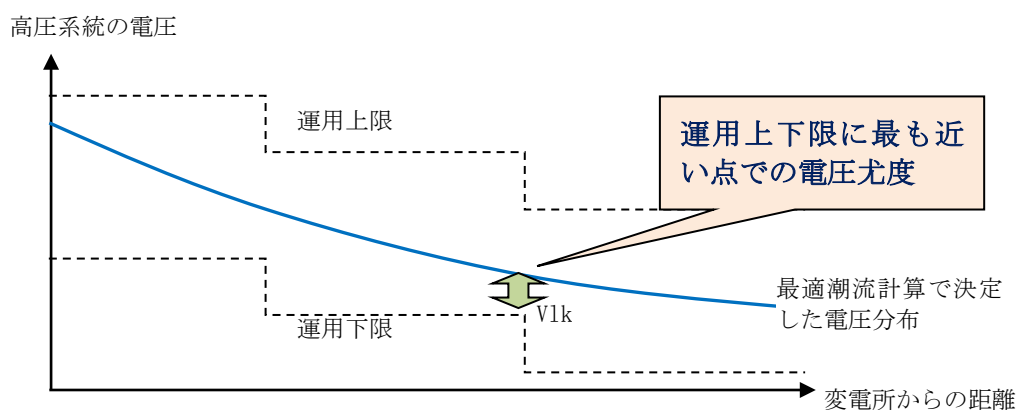


図 2-8 系統の電圧尤度

不感帯幅 D が電圧尤度 V_{1k} 以下であれば、PV 出力変動による瞬時電圧変動が発生した場合でも、運用上下限逸脱に到達する前に SVC, PV-PCS で電圧補償できることになる。

また、最適潮流計算で求めた電圧分布は、電柱単位の正確な負荷分布・発電分布によって算出した電圧分布では無い為、実際の電圧分布とは推定誤差が生じるとともに、SVC, PV-PCS でも連系点電圧の計測誤差があるため、図 2-9 のように SVC, PV-PCS で計測される電圧とは差異が生じる。

その差異以上に不感帯幅を設定しなければ、各 SVC, PV-PCS は最適潮流計算で決定した電圧へ自端電圧を補正しようとし、ハンチングを引き起こす。例えば図 2-9 のケースでは、SVC1 は電圧を下げ方向に、SVC2 は電圧を上げ方向に、ともに定格出力に達するまで制御し続けることになる。

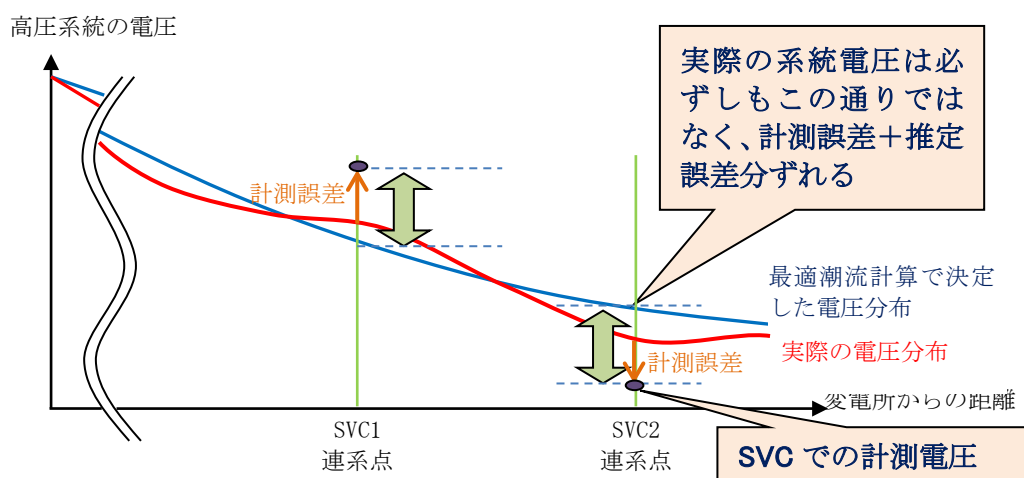


図 2-9 推定電圧分布と実際の電圧分布・推定誤差との関係

実世界では、実際の電圧分布（真値）は知ることができないが、各集中制御周期における制御前状態での潮流計算結果と、実測電圧との偏差から、 V_{er} は求めることができる。

2.3.4.実証結果

(1) 実証設備の概要

二階層制御の有効性を、三菱電機（株）尼崎地区の実証設備を用いて評価した。実証設備では、各種配電機器の接続位置を切替えることで任意の系統構成を模擬可能となっている。

実証実験では、負荷のみのフィーダーとPVを大量連系したフィーダー（定格総量 3MW、亘長 10km 相当）の 2 フィーダー構成とし、フィーダー間の末端電圧差が大きい系統を模擬した。図 2-10 がその単線結線図である。同図左上が配電用変電所であり、右方向に 2 フィーダーが延びている。2 本のフィーダーは、常時開放の開閉器（同図中、緑色の四角に×印）を境に電氣的に分かれており、上側のフィーダーは負荷のみ、下側のフィーダーは合計 3MW の PV が分散連系している。同図の赤色四角印がセンサー付開閉器を示しており、ここから 1 分周期で計測される電流・電圧・力率が二階層制御システムの入力情報となる。

また、PV は MPPT (Maxmum Power Point Trracking) 制御による最大出力を上限として、任意の出力をプログラムによって事前指定可能な設備となっている。

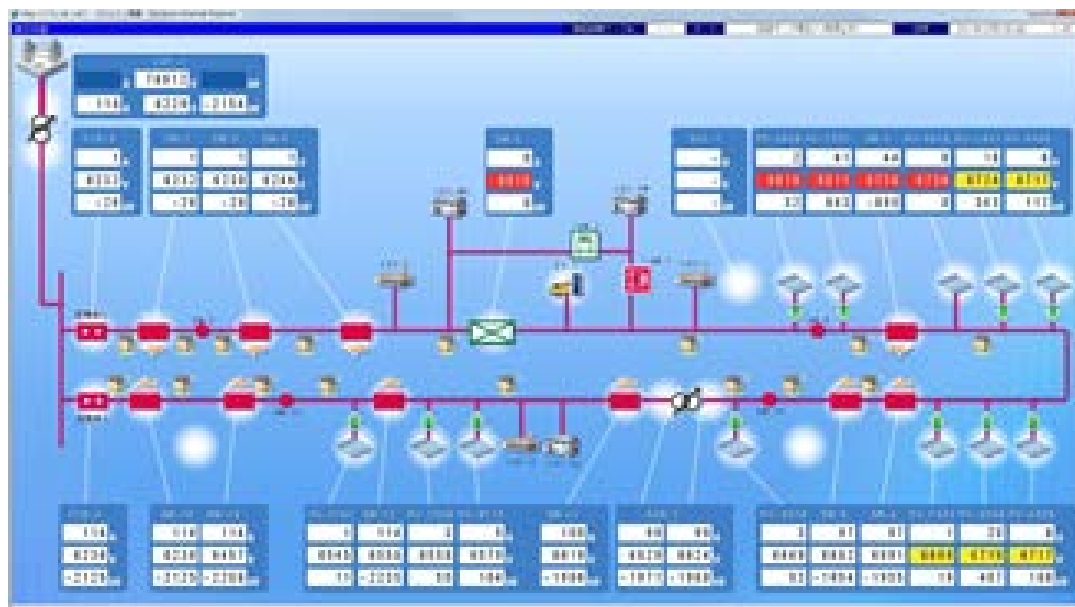


図 2-10 実証システムの監視画面

実証実験においては、予めプログラムしておいた同じ PV 出力変動を 2 時間ずつ再現し、下記の 3 方式について制御後の電圧仕上りを比較した。

- ・ 従来制御： LRT、SVR によるローカル制御
- ・ 集中制御： LRT、SVR のみの集中制御
- ・ 二階層制御： LRT、SVR、SVC、PV-PCS への集中制御

なお、集中制御、二階層制御については、式(2-1)に示した最適潮流計算によって LRT、SVR へのタップ指令値と、SVC、PV-PCS への目標電圧指令を決定する。

今回の実証では、式(2-1)における重み係数は、LRT、SVR のタップ動作回数が機器寿命を考慮して概ね 1 日 20 回程度に収まることを優先しつつ、更に無効電力制御による系統ロス削減も狙えるように、 W_s を W_q の 200 倍、即ち無効電力制御 200kvar と SVR タップ動作 1 回を同価値として設定した。 W_l は W_s の 1.5 倍とした。この数値は電圧変動の頻度に依存し、今回の実証系統のように電圧変動の激しい系統では W_q を小さく、元々電圧変動が小さくタップ動作も小さい系統では W_l 、 W_s を小さ目に設定することになる。今回の重み係数では、概ね SVC、PV-PCS の無効電力出力が 200~300kvar を超えた時点で、LRT、SVR のタップ制御を実行し、SVC、PV-PCS の負担を移行することになる。

また、最適潮流計算における制約条件としては、下記とした。

- ・ 制御目標最小・最大電圧：電力会社で一般的に採用されてい運用下限 6,350V (低圧換算 101V 相当)、運用上限 6,720V (同 107V 相当)に、実証系統の常時電圧変動として 20V を加算・減算した 6,370V~上限 6,700V とした。
- ・ LRT 制御幅：1 次側は 66.5kV~84.0kV (17 段)、2 次側は 6.9kV 固定
- ・ SVR 制御幅：1 次側は 6.2kV~7.0kV (9 段)、2 次側は 6.6kV 固定
- ・ SVC 制御幅：遅れ 100kvar~進み 100kvar (SVC 定格容量)
- ・ PV-PCS 制御幅：遅れ力率 85% (=PV 発電出力 kW の 52.7%)~100% (=0kvar)

メガソーラ独特の急峻な電圧変動に追従するために、最適潮流計算と LRT、SVR の制御周期は 1 分、SVC、PV-PCS の制御周期は 1 秒とした。

なお、ノードはセンサー付開閉器の設置個所としているため、センサー付開閉器各点での電圧を適正範囲に収めるように制御することになる。

(2) 実証結果

従来制御、集中制御、二階層制御の順に2時間ずつ実施した実証結果を図2-11、図2-12に示す。図2-11上部の系統電圧は、最も電圧上昇・変動が大きいPV大量連系フィーダーの末端電圧である。制御目標最小・最大電圧の範囲内が緑色ゾーン、それを超えて運用上下限内が黄色ゾーン、運用上下限の逸脱状態が赤色ゾーンである。

実証結果より、集中制御では従来制御と比較して、LRTとSVRのタップ動作回数が増加するものの、電圧上限逸脱の改善が確認できる。ただし大幅なPV出力変動に対しては、電圧制御が追従できず、微小な電圧逸脱が発生している。

一方SVC、PV-PCSの無効電力制御（総容量450kvar）を活用した二階層制御では、電圧逸脱が完全に解消され、かつ電圧変動幅も約70%低減できた。また集中制御と比較してLRTとSVRのタップ動作回数の抑制効果が確認できる。

本実証結果より、配電電圧制御システムと無効電力ローカル制御による電圧逸脱改善効果と不要タップ動作抑制効果が確認できた。

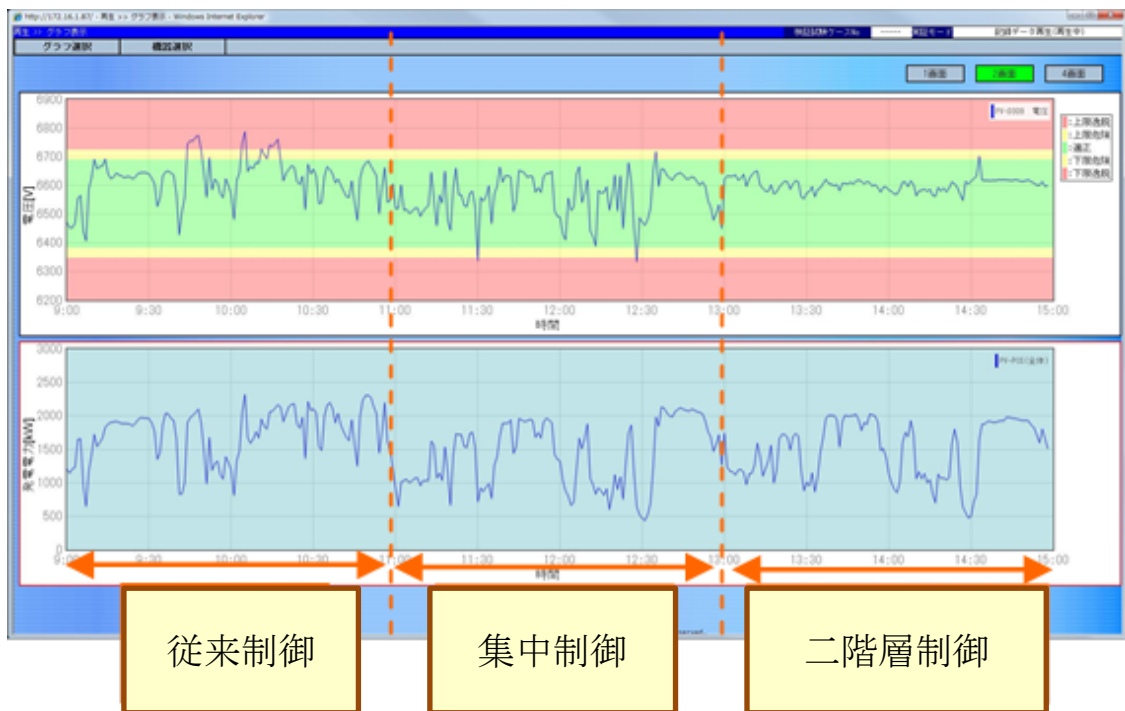


図 2-11 実証結果（上：PV 連系フィーダー末端電圧、下：PV 出力総計）

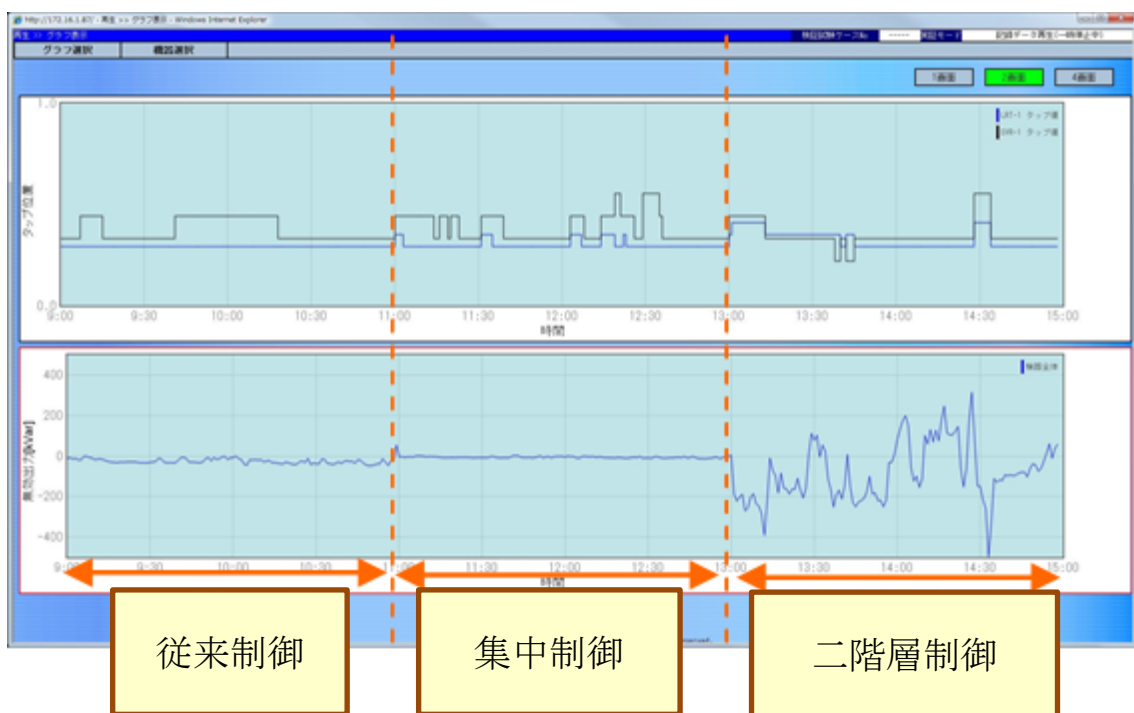


図 2-12 実証結果（上：タップ動作、下：無効電力出力）

2.3.5.分散型電源の連系容量拡大効果

二階層制御システムの目的は、PV 大量普及時における電圧変動対策であり、裏を返せば高度に電圧をコントロールすることにより、連系できる PV 容量を現状より増やせる効果がある。ここでは、同システム導入による、PV 連系容量の拡大効果について検討した。

現状の配電系統では、具体的には下記 3 点が課題となり、PV 連系容量が制限されることになる。

- ① 電圧上昇幅が、LRT, SVR の制御可能範囲を超え、タップを最大位置にしても運用上限を逸脱する。
- ② 電圧変動幅が、LRT, SVR の不感帯幅を超え、タップ動作頻発により LRT, SVR 寿命が著しく低下する。
- ③ LRT, SVR ローカル制御での電圧推定誤差が拡大し、適正範囲を逸脱するようになり制御してしまう。

この中で、二階層制御では②、③の課題を完全に解消することが可能である。以下にその詳細を述べる。

(1) LRT, SVR 短命化の回避

LRT, SVR には、一般に不感帯が設定されており、二次側に設定した目標点(通常は負荷分布の重心点に設定)の推定電圧が目標電圧±不感帯の中に収まっている場合には、タップ制御は行わない。不感帯を設定する目的は、

- ・タップ動作の頻発を防ぐ
- ・LRT, SVR 間のハンチングを防ぐ

の 2 点にある。例えば SVR の代表的なタップ刻みは 100V であるため、電圧調整も概ね 100V 刻みとなる。そのため理論上、不感帯は 50V 以上に設定しなければ、不感帯を逸脱して電圧制御を実施した結果、目標電圧と推定電圧との偏差がより拡大する可能性が生じ、結果的にハンチング現象へと繋がる。通常、LRT, SVR の不感帯は、定格電圧の 1.0~1.5% (=66~99V) に設定される。

仮に不感帯を 1% (プラス・マイナス両方向で計 2%幅) とした場合、PV による系統の短期電圧変動が 2%を超過すると、SVR はタップ動作を頻発し、設計寿命の 1 日 20~30 回を超過し、本来の機器寿命を短命化することとなる。

文献[2-18]によると、国内配電線の変電所から末端までの幹線線路インピーダンス平均値は $R=1.446\Omega$ 、 $X=1.629\Omega$ である。この平均的な配電線に PV が均等分布で普及した場合、その総発電量 P_g による末端部の電圧変動は

$$\Delta V = \frac{P_g \times 1.446}{6.6} \times \frac{1}{2} (V) \quad \dots (2-4)$$

である。 ΔV を定格電圧 2%=132V 以内とするには、

$$132 = \frac{P_g \times 1.446}{6.6} \times \frac{1}{2}$$

$$P_g = \frac{132 \times 6.6 \times 2}{1.446} = 1,205 (kW) \quad \dots (2-5)$$

以下とする必要がある。これが平均的な配電系統における、PV の導入限界の目安であり、これ以上の PV が連系すると、電圧変動が定格の 2%を超過し、出力変化によって、配電線の LRT, SVR タップ動作が頻発することとなる。

二階層制御を導入することによって、短期的な電圧変動は SVC や PV-PCS によって吸収されるため、この制約は除外されることとなる。

(2) 電圧推定誤差による適正電圧逸脱の回避

PV 普及以前の配電系統では、負荷分布の様相は時間帯に依らずほぼ一定と見なすことができた。そのため、図 2-13 のように、SVR の計測電流から、ほぼ一意に電圧分布が推定可能であった。

これを前提に、従来の LRT, SVR ローカル制御では、図 2-14 に示す LDC (Line Drop Compensator) と呼ばれる制御方式が一般に採用されてきた。LDC では、①電圧調整器通過電流 (有効分と無効分のベクトル)、②電圧調整器から目標点までの線路インピーダンス (整定)、③電圧調整器の二次側電圧、の 3 情報から目

標点の電圧を推定し、目標電圧±不感帯（共に整定）内に収まるようにタップを制御する。整定値は、R, X（目標点までの線路インピーダンス）、目標点電圧、不感帯、動作時限（推定電圧が不感帯を超えてから実際にタップ動作させるまでの待ち時間）、である。

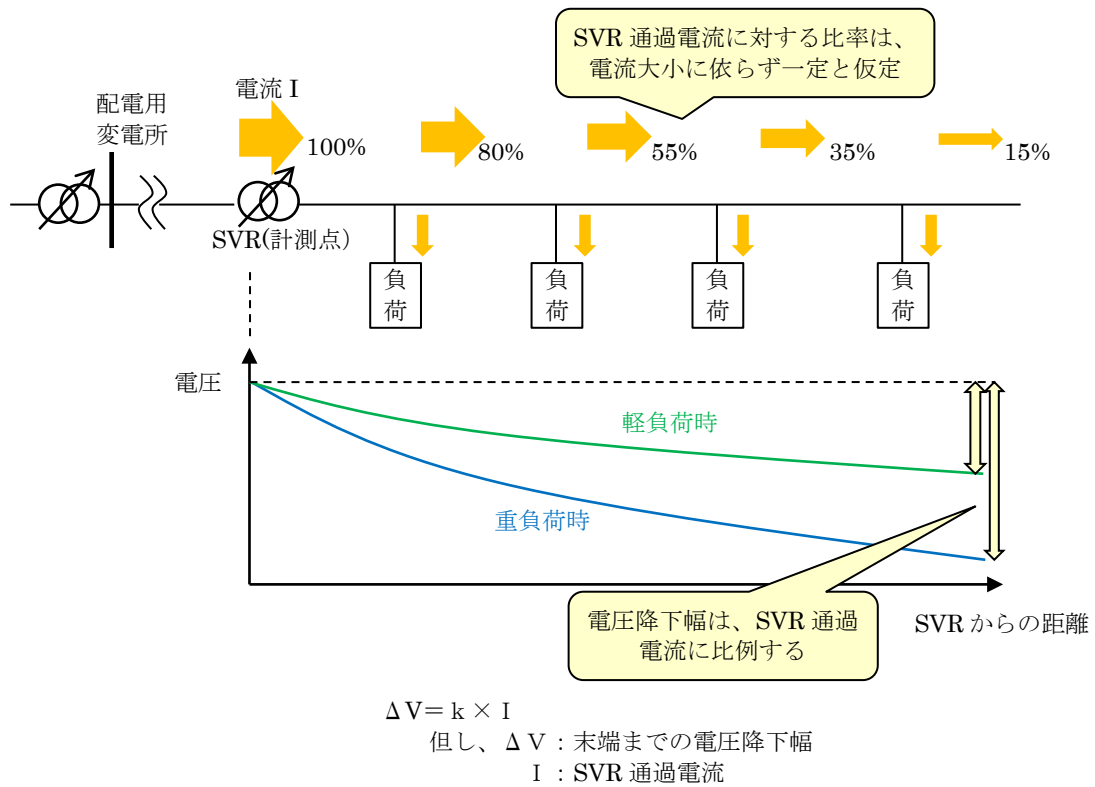


図 2-13 PV 普及前の負荷分布と電圧分布

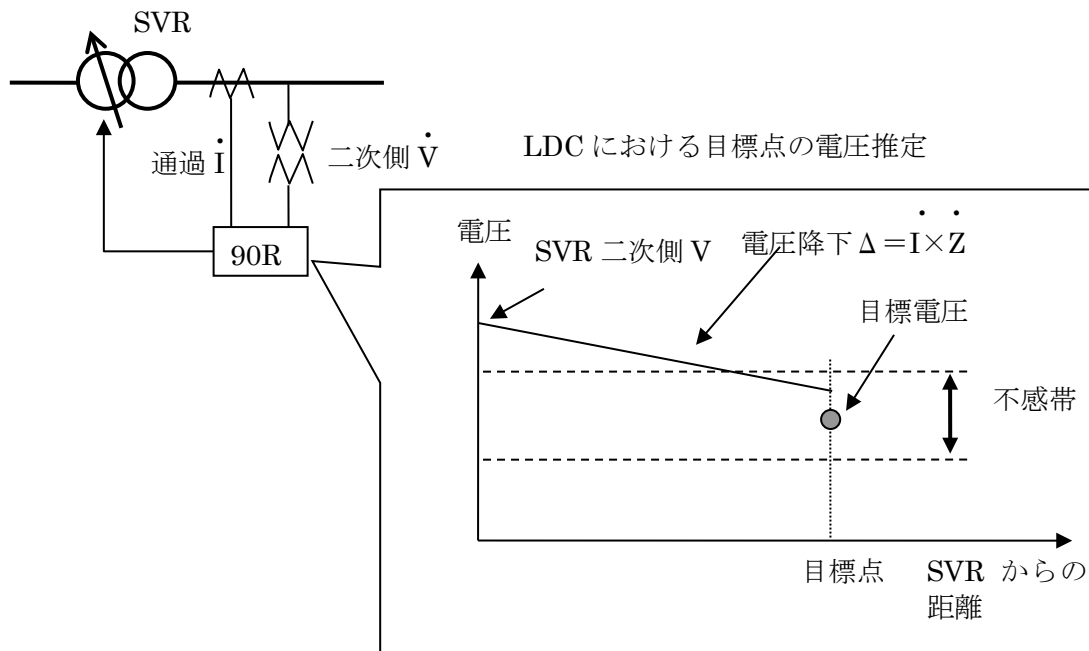


図 2-14 SVR のローカル制御 LDC

ところが PV が普及するにつれ、負荷分布は一様であるという前提は崩壊する。例えば配電線末端に PV が集中連系した場合、電流分布は図 2-15 のように変化する。軽負荷で PV 発電ゼロの状態と、重負荷で PV フル発電の状態とでは、SVR 通過電流に差異がなくなるが、SVR 以降の電流分布・電圧分布の様相は全く異なる。

このように、SVR 通過電流から下流域の電圧分布を推定する LDC 制御方式では誤差が拡大し、適正に電圧制御ができなくなる。逆に言えば、ローカル制御で適正に電圧制御するには、電圧推定誤差を考慮した SVR 増設が必要となる。電圧推定誤差と SVR 増設数との関係は次のようになる。

ある SVR から見て、補償範囲の末端までの電圧降下幅は、負荷分布の重心点までのインピーダンスを (R_c, X_c) とし、SVR 二次側電圧を V 、通過電力を (P, Q) とすると下式で簡易的に与えられる。

$$\Delta V = \frac{P \times R_c + Q \times X_c}{V} \quad \dots (2-6)$$

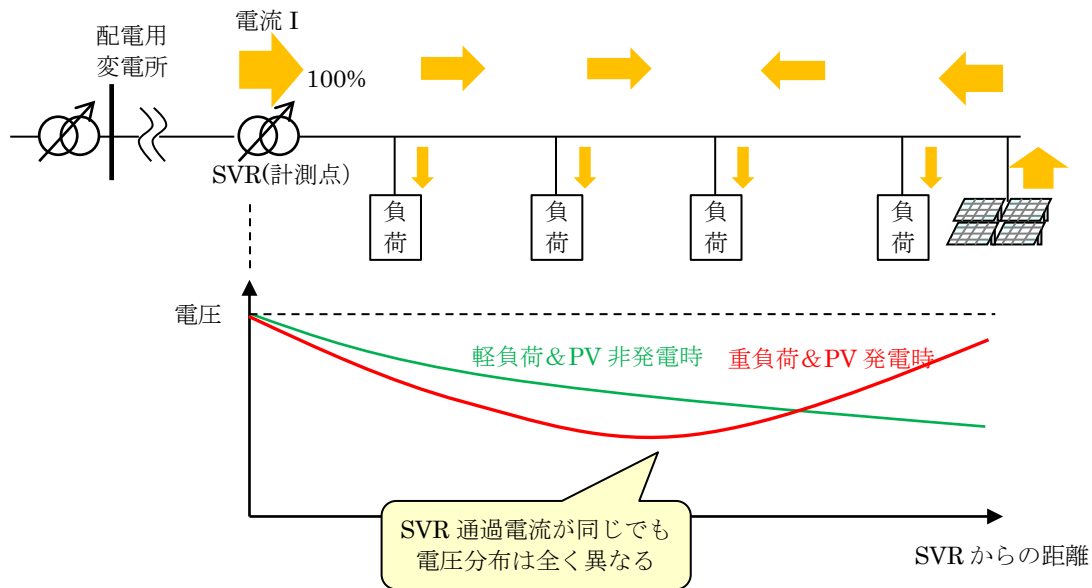


図 2-15 PV 普及後の負荷分布と電圧分布

ここで、目標点である負荷重心点に変化し、 R_c , X_c が (ΔR_{c_er} , ΔX_{c_er}) の範囲で変動する場合、その電圧降下幅は

$$\Delta V_{er} = \frac{P \times \Delta R_{c_er} + Q \times \Delta X_{c_er}}{V} \dots (2-7)$$

の電圧推定誤差を含むことになり、その誤差も考慮して余分に SVR を追加設置する必要がある。

単純な例として図 2-16 のように、高圧系統側の運用上下限範囲を 101~107 V 相当とした場合、標準的な 6,600 : 105 の柱上変圧器タップ比では高圧換算で 6,350~6,720V となり、その幅は 370V である。SVR の 1 タップ幅を 100V とすると、変電所側 SVR から見て最大 270V (370V-100V) 電圧降下すると予想される地点に、次の SVR を追加設置すれば適正電圧が維持できることになる。

ここで仮に 370V の電圧降下に対して ΔV_{er} (V) の推定誤差がある場合、図 2-17 のように、推定電圧より ΔV_{er} 低い (もしくは高い) 電圧となっている可能性がある。実際の電圧が推定電圧より低い場合、下限逸脱をしている可能性

が出てくるため、270V に更に ΔV_{er} の余裕を見た地点で SVR を追加設置する必要がある (図 2-18 参照)。

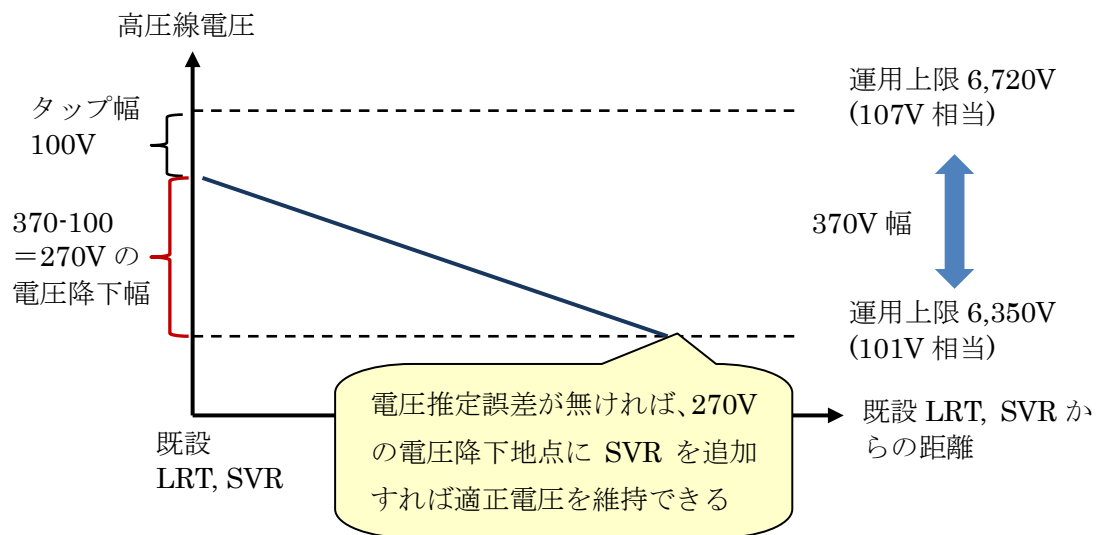


図 2-16 電圧推定が無い場合の SVR 追加位置の決め方

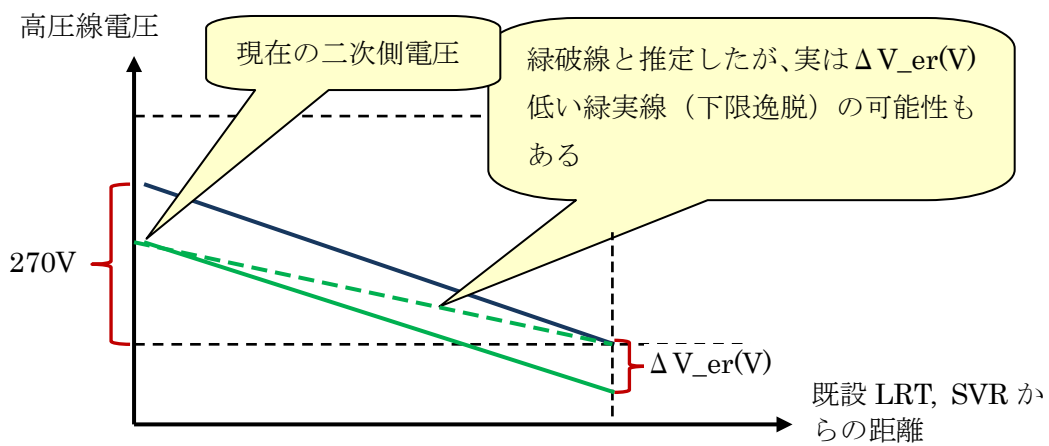


図 2-17 電圧推定誤差を含む場合での SVR 電圧制御

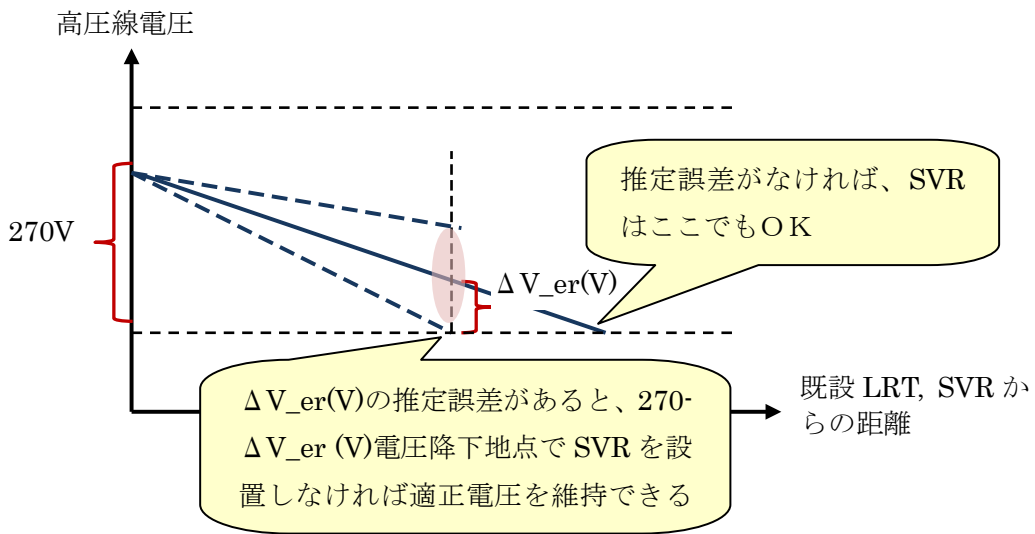


図 2-18 電圧推定が有る場合の SVR 追加位置の決め方

電圧降下幅 270V に対し、 $\Delta V_{er}(V)$ の推定誤差が有る場合と、無い場合との、SVR 追加位置の関係は、既設 LRT, SVR からの各々の追加位置までの距離を $D1$ 、 $D2$ とすると、以下の関係が成り立つ。

$$D1 : D2 = 270 - \Delta V_{er} : 270$$

$$\frac{D2}{D1} = \frac{270}{270 - \Delta V_{er}} \quad \dots (2-8)$$

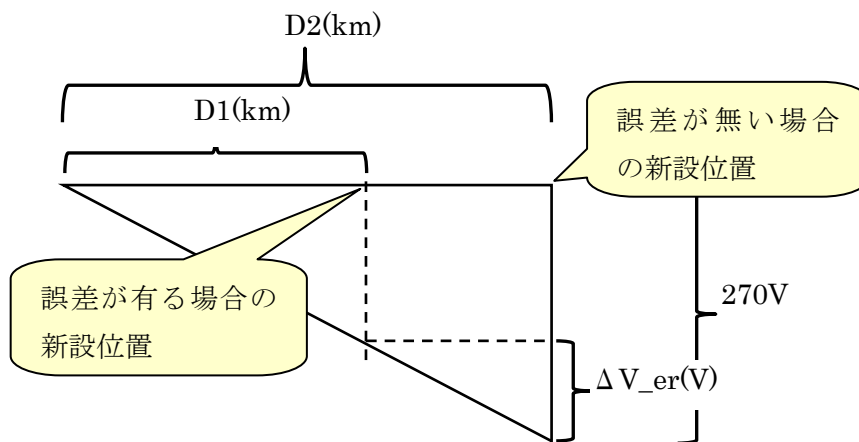


図 2-19 電圧推定誤差が有る場合／無い場合での SVR 追加位置

ここで、電圧降下幅の誤差率（＝推定誤差／電圧降下幅）を ε とすると、

$$\varepsilon = \Delta V_{er} / 270$$

であるから、

$$\frac{D2}{D1} = \frac{270}{270 - \Delta V_{er}} = \frac{270}{270 - 270 \times \varepsilon} = \frac{1}{1 - \varepsilon} \quad \dots (2-9)$$

となる。即ち、電圧推定誤差率が ε あれば、誤差が無い場合に比べて、 $1/(1 - \varepsilon)$ 倍の SVR を設置する必要性が生じる。

その一例として、SVR から見て配電線の中央に負荷分布の重心点 (R_c, X_c) があり、その総量は P_{ld}, Q_{ld} とする。PV が末端部 ($2R_c, 2X_c$) に連系し、 $P_{ld} \times \alpha$ だけ発電している場合、末端部の電圧推定誤差は、簡易的に

$$\begin{aligned} \Delta V_{er} &= \text{電圧降下幅の真値} - \text{電圧降下幅の推定値} \\ &= \left(\frac{P_{ld} \times R_c + Q_{ld} \times X_c - \alpha \times P_{ld} \times 2 \times R_c}{V} \right) - \frac{P_{ld}(1 - \alpha) \times R_c + Q_{ld} \times X_c}{V} = \frac{-\alpha \times P_{ld} \times R_c}{V} \end{aligned} \quad \dots (2-10)$$

となる。即ち、誤差は総負荷に対する PV 発電量の割合 α に比例して増え、例えば $\alpha = 0.5$ の場合、誤差は 50% となり、SVR 設置台数は 2 倍に増えることになる。

二階層制御のような集中型電圧制御を導入した場合、各点の電圧は実測しつつタップ制御を決定するため、電圧推定誤差はゼロと見なすことができる。したがって、集中型電圧制御を導入した場合の SVR 必要台数は、電圧推定誤差を考慮したローカル制御の SVR 必要台数に比べて、上記の逆数 $(1 - \varepsilon)$ 倍となる。

2.4. 需要家進相コンデンサ制御システムの開発

2.4.1. 需要家進相コンデンサ制御の意義

二階層制御などの集中電圧制御によってPVに起因する電圧変動を吸収し適正電圧を維持するには、各電圧調整器で電圧の調整代があることが前提となる。既にLRTやSVRのタップが上限/下限に張り付いた状態においては、制御方式を高度化したところで、電圧を改善することはできない。逆に言えば、電圧の調整代が大きいほど、集中電圧制御によって、より大きな効果が期待できる。

配電系統の電圧調整代を増やすには、既に配電系統の電圧裕度を減少させている要因である、フェランチ現象を低減させることが望ましい。

例えば図2-20のように、設計当所に想定した重負荷時・軽負荷時の電圧分布では電圧裕度が確保されているが、実際の軽負荷時の電圧分布がフェランチ現象によって、より電圧が上がる方向にあった場合、もはやこの配電線には電圧裕度がなく、PVによる電圧変動が生じた場合、もはや制御不能となる。

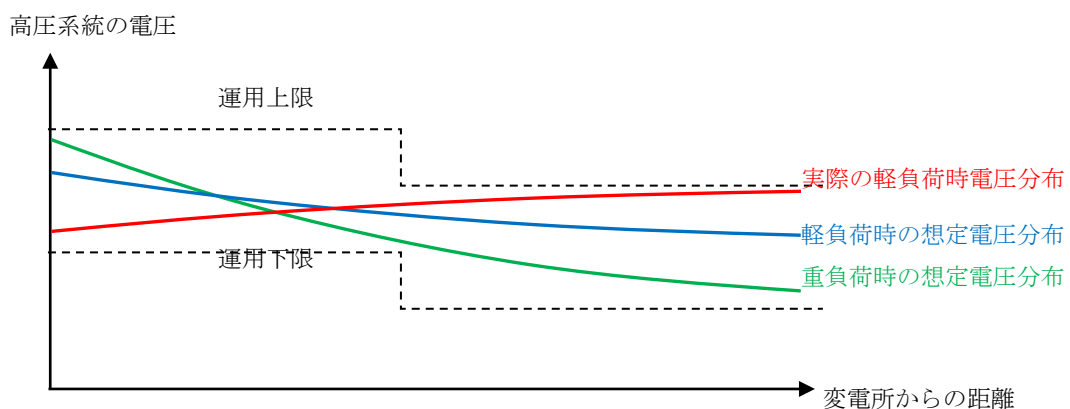


図 2-20 フェランチ現象により電圧裕度がゼロとなる例

そこでここでは、PV 非連系時/非発電時の電圧分布を、設計時点での想定電

圧分布に近づけるべく、フェランチ現象の主要因である高圧需要家の進相コンデンサ常時接続の回避策について検討した。

2.4.2.フェランチの要因

国内電力会社では、高圧需要家に対して、受電点力率を進み方向へと改善することによって基本料金を割り引く力率割引制度を設定している。これは動力負荷の主体が力率の低い誘導機負荷であった時代に、当初遅れ力率となっていた配電系統の力率を是正する目的で設定された。この割引制度を受けて、多くの需要家では、受電点の力率を進み方向に改善すべく、進相コンデンサ (Static Capacitor:以下略してSC) を設置している。

しかし現在では、下記の理由によってSCの過補償状態となり、逆に配電系統の力率を大幅な進みへと悪化させている。

- ① 負荷力率が概ね遅れ 70%程度であると仮定し、重負荷時の無効電力負荷を補償できるように、受電設備容量 (=変圧器容量の合計) の3分の1のSCを選定する。
- ② しかし近年の負荷機器は、インバータ化などにより負荷力率が高くなっている^[2-19]。
- ③ 力率割引制度は、遅れ力率を100%まで改善すれば割引率が最大となるが、それ以上に進み方向へ改悪しても特にペナルティは発生しない。そのため、受電点力率が過剰な進みとなっても放置されている。
- ④ 過剰な進みを防止するためには、自動力率調整器 (以下、略して力調) の設置が望ましいが、市販されている力調は高価である。そのため、SCは力調なしで常時接続とする傾向が強い。

その結果、特に軽負荷時にはSCによる過補償が顕著となり、需要家から配電系統へと無効電力が流出、系統電圧を引き上げるフェランチ現象や、力率悪化による電力損失の増加へと繋がっている。

フェランチ現象については、電気協同研究でも全国大で実態調査が行われた^[2-19]。これによれば、重負荷時でも 85%、軽負荷時では 94%の配電線が進みとなっている。またシミュレーションの結果、2/3 の配電線でフェランチ現象が発生していると推測され、無効電力による損失は 1,361GWh/年と推定された。力率悪化の主要因は、高圧需要家が力率改善用に設置する SC であり、大半を占める SC 常時接続の需要家の平均力率は進み 72%~19%、軽負荷時には進み 42%~19%という結果であった。

今後 PV が本格的に普及すると、その余剰電力による電圧上昇との相乗効果により系統電圧が一層上昇し、電気事業法で定められた $101\pm 6V$ の上限を超過する危険性が高くなる。

さらに現状の SC は、受電点での力率改善を主目的としているため、受電点近傍の高圧母線に設置されるケースが多い。これでは需要家構内系統の力率は改善されておらず、無効電力を削減して、電圧と配電損失を適正化するという本来の SC の意義が、需要家内では全く無視されている。需要家への導入メリット増加を考えれば、SC の設置箇所も見直す必要がある。

2.4.3.提案システムの概要

フェランチ現象の根本原因である高圧需要家 SC 問題を解決すべく、需要家の導入メリットを最大限に引き出すと共に、低コスト化を狙った新たな SC 制御システムについて検討した^[2-20, 21, 22]。提案システムでは、電流計測のみといった簡易計測によりコスト削減を図ることを目指し、電流値のみで如何に精度よい SC 制御を実現するかについて検討を重ねた。

(1) 対象需要家

現状市販されている力調の多くは、特高需要家や大口高圧需要家を対象とし、御可能な SC 台数も 6~12 台と高性能タイプが主流である。従って SC が 1, 2 台の小口需要家(設備容量が概ね 300kVA まで)にとってはかなりの過剰機能が実装されていることになる。そのためもあって、小口需要家での力調の普及率は大

口需要家に比べて低い。そこで力調普及率は低いが軒数が多いため、全体的には配電系統への影響が強い小口高压需要家を対象とした、新たな力調について検討した。

(2) システム全体像

図 2-21 に提案方式に基づく新たな力調(SC コントローラ)の概略図を示す。SC は小容量ではコスト的に有利となる低圧用を採用し、変圧器二次側の低圧母線へ接続する(最大2台)。これにより、力率改善による変圧器の電力損失削減も狙う。

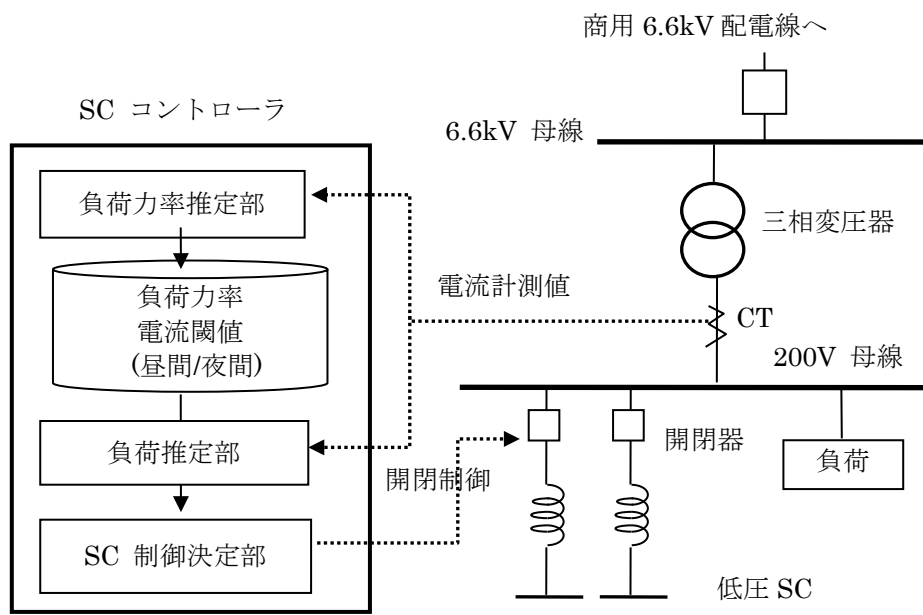


図 2-21 高压需要家向け SC 制御システムの構成

(3) 提案システムの特徴

従来力調との主な相違は、無効電力を直接計測せず、簡易的な電流計測と、想定負荷力率とから無効電力を推定し、SC 入切制御をする点にある。電流計測点は、既設キュービクルへの CT 設置作業性を考え、三相変圧器二次側直下とした。

実際の SC コントローラでは、負荷力率を元に無効電力負荷を皮相電流に換算した電流閾値が自動設定される。負荷電流が閾値を上回った時点で該当容量の SC を投入、下回った時点で開放する。特に本システムでは、需要家の力率割引の 100%補償と、受電点平均力率の可能な限りの進み抑制の両立を考え、昼間と夜間とで電流閾値を若干変更している。すなわち、力率割引の算定対象となる昼間は SC が入り気味となるように低めの数値とし、対象外の夜間は進み／遅れに拘らず、力率 100%に近づくように昼間よりはやや高めの数値としている。なお、電灯負荷の力率は文献[2-19]での調査結果を踏まえ 100%と見なすこととした。

2.4.4.進相コンデンサの制御ロジック

(1) 電流制御の基本ロジック

電流計測のみで実施する SC コントローラの制御フローを図 2-22 に示す。概略の流れとしては、①負荷電流を推定、②負荷電流が電流閾値を超過した場合は SC を投入、低下した場合は SC を開放する、である。ただし SC 制御の頻発を防止するために、数分の動作時限を設定し、連続して閾値を超過／低下した場合のみ、投入／開放するようにした。

小口高圧需要家をユーザとして想定するため、SC は最大 2 台とし、その組み合わせ容量段数（例えば 50kvar 品が 2 台の場合、組み合わせとしては 0kvar, 50kvar, 100kvar の 3 段）ごとに閾値を設定する。

電流閾値は、力率割引算定対象時間である 8 時から 22 時までに適用される昼間閾値と、22 時から翌 8 時まで適用される夜間閾値を設ける。

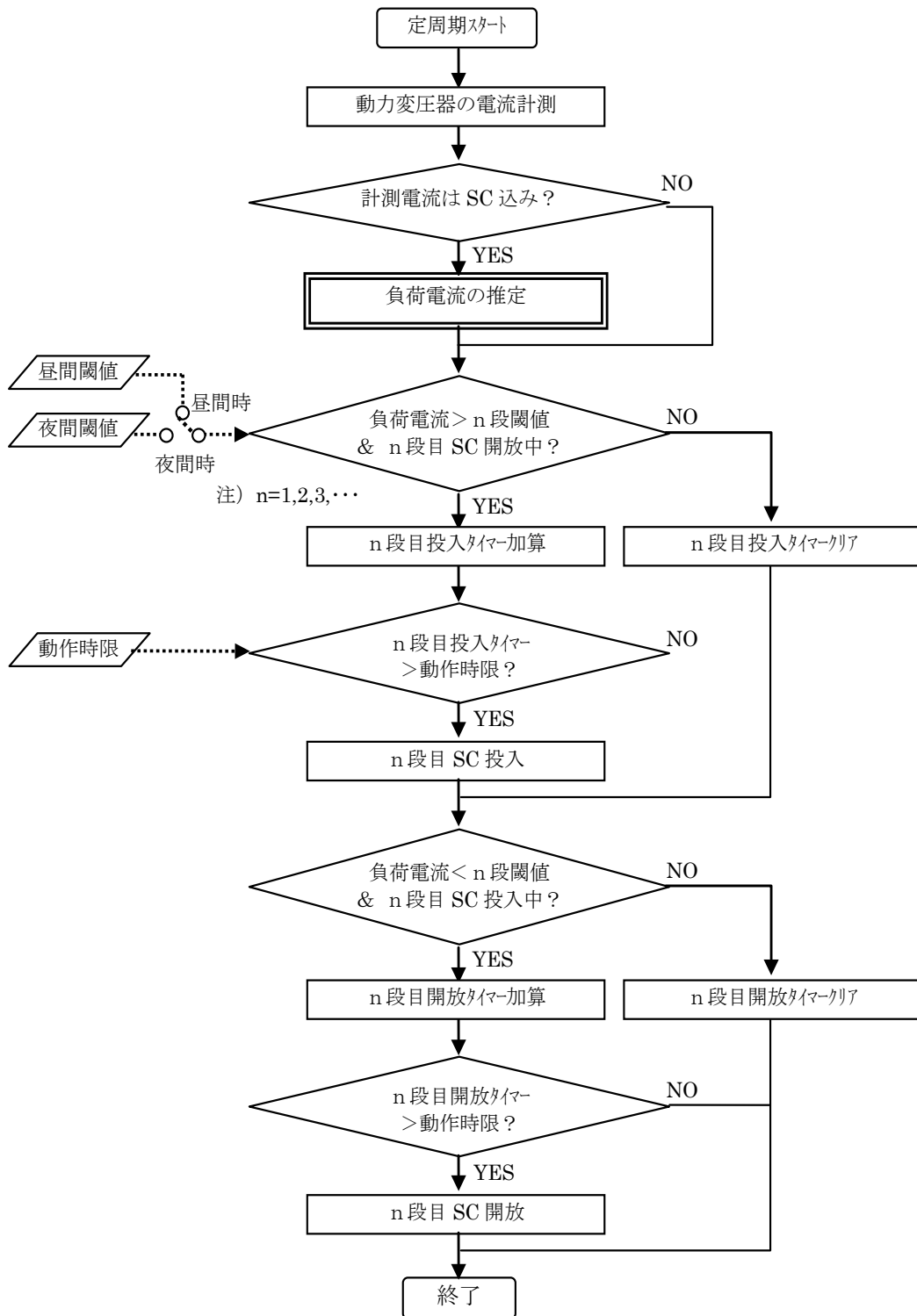


図 2-22 高圧需要家向け SC 制御フロー

(2) 負荷力率推定方式

SC 制御では、力率割引を確保しつつ、過剰な進み力率を回避するために、無効電力負荷成分の正確な把握は不可欠である。特に直接無効電力を計測しない本方式の場合は、負荷力率の想定が必要となる。しかし負荷力率の事前予測は難しく、また負荷機器の変更と共に随時更新する必要があり人手による設定は現実的でない。

そこで SC 制御の運用中に、図 2-23 に示すように、SC 投入制御が発生した時点で、SC 投入前後の計測電流（変圧器二次側で計測，スカラー量）の変化から、負荷力率の推定を実施する。負荷力率の算出は、図 2-24 のように、SC 投入前、投入後、SC 容量に相当する電流スカラー量が既知となると、三角形の 3 辺が決定されるため、SC 投入前の電流ベクトルの角度が決まる、という原理を用いる。

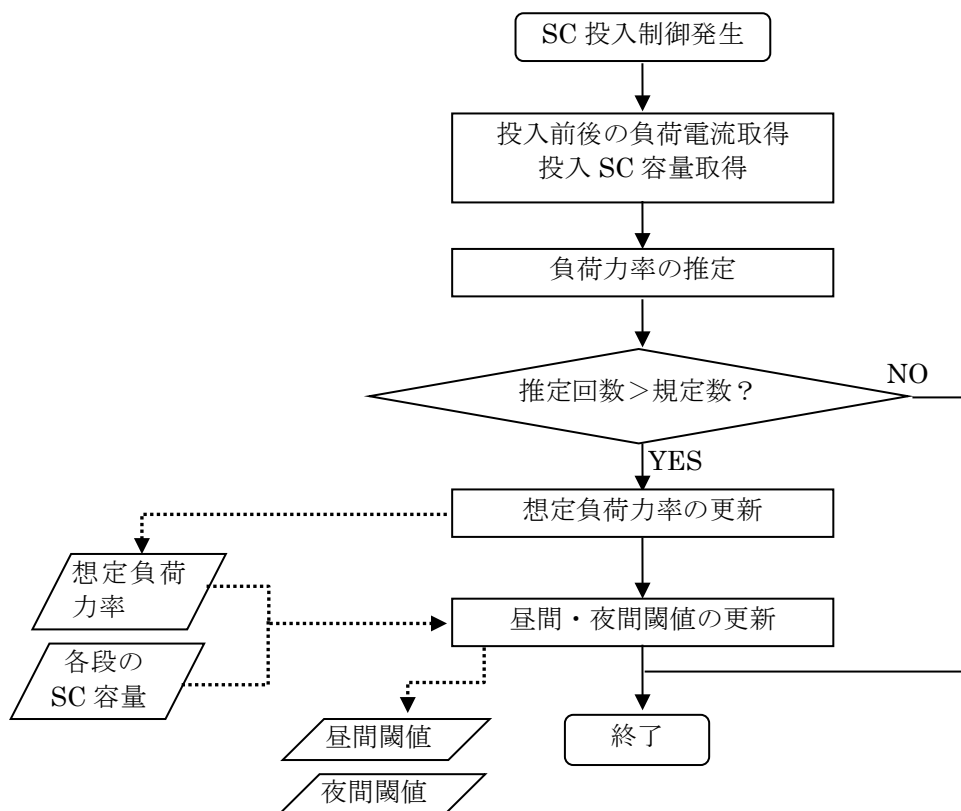


図 2-23 負荷力率推定フロー

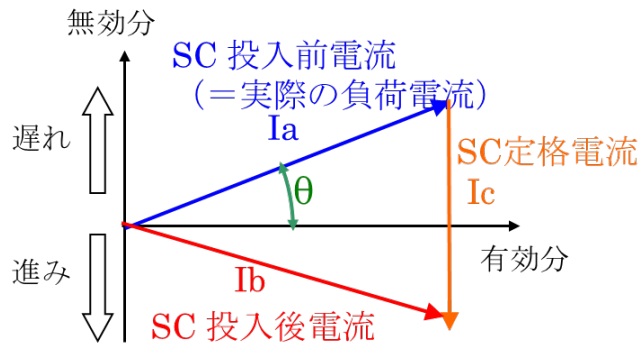


図 2-24 力率と投入 SC ・ 計測電流変化の関係

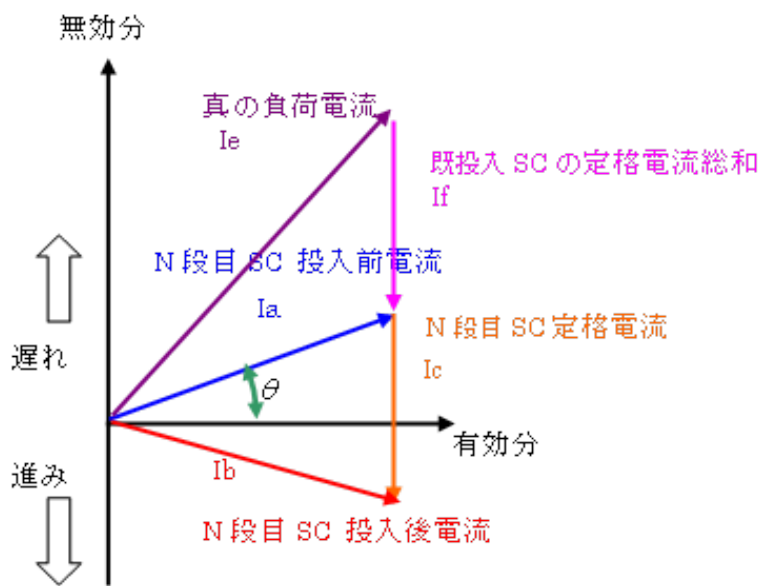


図 2-25 力率と投入 SC ・ 計測電流変化の関係 (既投入 SC がある場合)

SC 投入前の電流 (=負荷電流) を I_a (図 2-24 の青線)、有効分からの角度を θ (同, 緑の角度)、投入後の電流を I_b (同, 赤線)、投入 SC 容量を基準電圧で除した電流換算値を I_c (同, 橙線)、とすると、

$$(I_c - I_a \cdot \sin \theta)^2 + (I_a \cdot \cos \theta)^2 = I_b^2 \quad \dots (2-11)$$

が成り立つ。左辺を展開し、 $\sin \theta$ の式に置き換えると

$$\sin \theta = \frac{Ia^2 + Ic^2 - Ib^2}{2 \cdot Ia \cdot Ic} \quad \dots (2-12)$$

となる。負荷力率 PF_L は $\cos \theta$ であるため、下式で求まる。

$$PF_L = \sqrt{1 - \sin^2 \theta} = \sqrt{1 - \left(\frac{Ia^2 + Ic^2 - Ib^2}{2 \cdot Ia \cdot Ic} \right)^2} \quad \dots (2-13)$$

また、既投入 SC があり、更に SC を投入する場合は、上記の延長で負荷力率が推定可能である。すなわち N 段目の SC 投入前後の電流を各々 Ia , Ib 、有効分からの角度を θ 、既投入 SC の容量を基準電圧で除した電流換算値を If 、負荷電流を Ie とすると、図 2-25 のような関係が成り立つことから、同図の角度 θ が求まると、

$$Ie = \sqrt{(Ia \cdot \cos \theta)^2 + (If + Ia \cdot \sin \theta)^2} \quad \dots (2-14)$$

となる。真の負荷力率 PFL は、新たに投入した SC の電流換算値を Ie とすると

$$PF_L = \frac{Ia \cdot \cos \theta}{Ie} = \frac{Ia \cdot \cos \theta}{\sqrt{(Ia \cdot \cos \theta)^2 + (If + Ia \cdot \sin \theta)^2}} \quad \dots (2-15)$$

によって求めることができる。

(3) 推定負荷力率から制御閾値の設定

力率推定は SC 投入の都度実施されるが、その推定結果は計測誤差等で若干の誤差を含み、かつ現実の負荷力率も常時一定とは限らない。そこで本システムでは直近 20 回分の推定結果の平均値を、SC 制御で使用する想定負荷力率として採用していくこととした。その値をもって、以下のように閾値の更新も行う。

① 昼間閾値 (8時～22時)

昼間は、力率がやや進み気味になるよう制御するため、図 2-26 のように SC 投入・開放の閾値を設定する。すなわち、負荷の無効電力分が、既投入の SC 容量を上回った時点で、次段の SC を投入となるように閾値を設定する。

ただし、受電点力率は 99.5%以上を確保すれば力率割引は 100%受けることができる点を考慮し、少しでも過剰な進みを防止すべく、1 段目閾値は若干の加算マージン α (SC 容量の 5%程度) を設定する。

$$1 \text{ 段目閾値} = \alpha \quad \dots (2-16)$$

$$N \text{ 段目閾値} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \Delta Q_{ci}}{\sqrt{3}V \cdot \sqrt{1 - PF_L^2}} \quad \dots (2-17)$$

ただし、 $N=2, 3, \dots$

ΔQ_{ci} : i 段目と $(i-1)$ 段目との SC 容量差

V : 基準電圧

ここで式(2-9)は、各段で投入される SC 容量増分 ΔQ の合算 (三相分) を、想定負荷力率を用いて皮相電力へ換算、更に $\sqrt{3} \times$ 基準電圧で除して単相電流換算することを意味する。

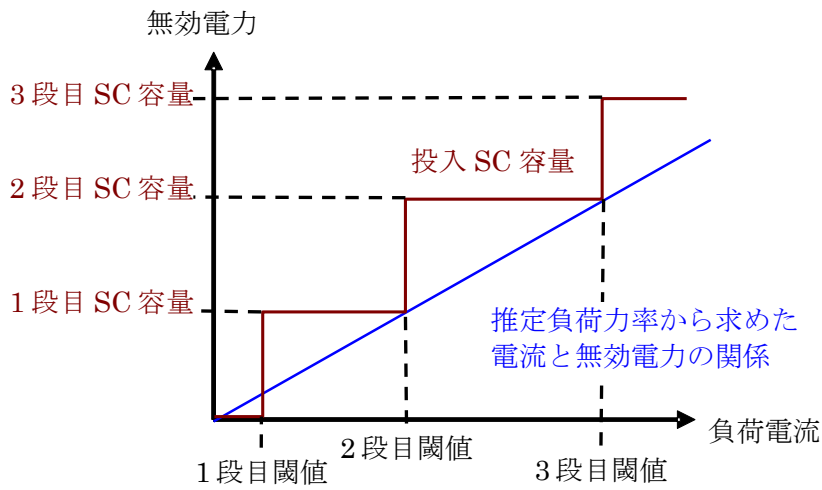


図 2-26 昼間の力率と閾値

② 夜間閾値 (22 時～翌 8 時)

夜間は、遅れ／進みにかかわらず力率が 100% 近くとなるように制御するため、図 2-27 のように SC 投入・開放の閾値を設定する。

$$N \text{ 段目閾値} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \Delta Q_{ci} + \frac{1}{2} \Delta Q_{cN}}{\sqrt{3V} \cdot \sqrt{1 - PF_L^2}} \quad \dots (2-18)$$

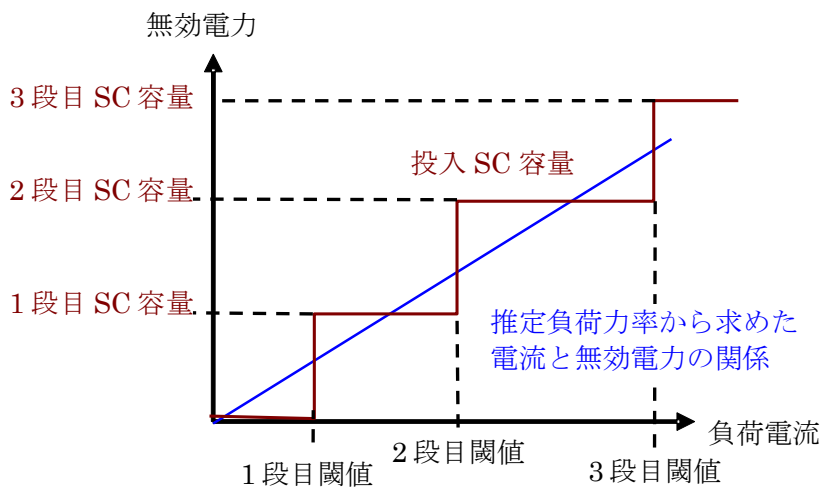


図 2-27 夜間の力率と閾値

(4) 負荷電流推定方式

キュービクルタイプの多い小口の高圧需要家では、SC と負荷との間に CT を設置し、負荷電流を直接計測することは難しい。そこで前述のように変圧器二次側直下の CT 計測から負荷電流を推定する。この場合の計測電流は、負荷電流と SC 電流との合算（ベクトル和）であるため、まず負荷電流を推定する必要がある。負荷電力 (PL, QL) と投入中 SC 容量 QC のベクトル和が皮相電力 S（計測電流 × 基準電圧 × √3）であることから、下式が成り立つ。

$$P_L^2 + (Q_L - Q_C)^2 = S^2 \quad \dots (2-19)$$

前節で推定した負荷力率 PFL を用いて QL を PL に置き換えると、下式のように PL の二次方程式が得られ、これを解くと負荷電流も推定できる。

$$P_L^2 + \left(\sqrt{\frac{1 - PF_L^2}{PF_L^2}} P_L - Q_C \right)^2 = S^2 \quad \dots (2-20)$$

二次方程式の解であるため PL の解としては 2 値（大きい方を“解 1”、小さい方を“解 2”と呼ぶこととする）が得られる。PL は正值であるが、図 2-28 のケース A のように、多くの場合では解 2 (A2) は負値となり除外される。しかし軽負荷の場合は、解 1、解 2 とも正值をとり一意的に決められない。この場合でも、解 1、解 2 とも小さい値であり、両者の差は小さいことから、解 1 を仮に正解として SC が入り気味となる安全サイドで制御することで実用上は問題ない。

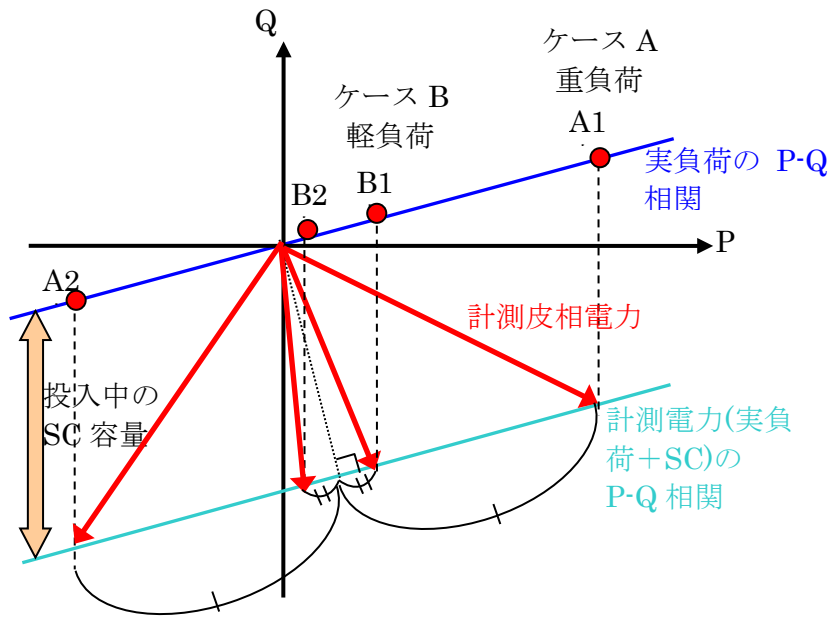


図 2-28 計測電流と負荷電流

2.4.5. 実証による評価

(1) 実証試験環境

前記推定機能を実装した試作機で、高压需要家 2 軒 (A: 工場, B: サービス業) で 2010 年 10 月から 5 ヶ月間の実証試験を行った。両需要家とも表 2-1 のように三相変圧器は 150kVA が 1 台の小口需要家である。実証試験に先立ち実施した予備計測結果では、両需要家とも、営業日の昼間のみ負荷が発生し、夜間と休日はほぼ無負荷に近い状態であった。

制御対象の SC は、別途開発した容量可変型 (定格 50kvar) を適用し、既設の SC 容量を考慮して需要家 A には 2 台、B には 1 台設置した。この SC は、図 2-29 のように内部結線を Δ から Y 結線へ切替えることで印加電圧を変え、容量を 1/3 にすることができるタイプである。1 台で 2 段階、同容量 2 台で表 2-2 のように 5 段階に容量調整が可能である。図 2-30 は実証試作機の、図 2-31 は SC コントローラ試作機の概観写真である。

表 2-1 実証需要家と受電設備

需要家	業種	三相変圧器 容量	単相変圧器 容量	既設 SC 容量 (参考) *1
需要家A	工場	150kVA	15kVA	50kvar
需要家B	サービス業	150kVA	75kVA	31.9kvar

*1: 既設 SC は実証では不使用

表 2-2 新型 SC の容量切り替えステップ

段数	0	1	2	3	4	5
容量(kvar)	0	16.7	33.4	50	66.7	100
SC1	Off	Y	Y	Δ	Δ	Δ
SC2	Off	Off	Y	Off	Y	Δ

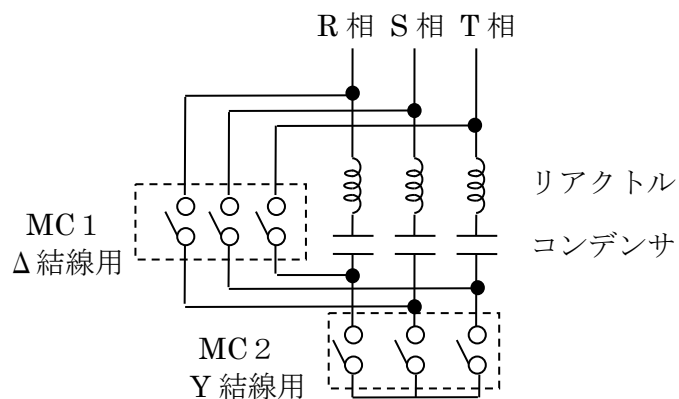


図 2-29 容量可変型 SC の回路図



図 2-30 容量可変型 SC の外観



図 2-31 開発コントローラの外観

実証では、以下の観点で評価を行った。

- ① 負荷力率・負荷電流の推定を正しく行い、その結果、適性に SC 入切制御を実施したか
- ② 力調として需要家の力率割引が補償され、かつ構内電力損失を削減できたか。

(2) 力率推定結果

SC コントローラ試作機内に記録されていた負荷力率の推定結果と、別途計測した実測の比較を、表 2-3、表 2-4 に示す。但し投入 SC 容量が小さい場合は、投入前後の電流変化が小さく、推定誤差が大きくなることが予想されたため、ここでは 50kvar が投入された場合のみ力率推定を実施・採用することとした。

両需要家とも、規則的に 8 時ごろに負荷が立ち上がるため、負荷力率推定も同時間帯に集中している。実測力率とほぼ合致しており、特に 10 回平均で見れば、誤差は数%の範囲に収まっている。電流のみでも、力率推定が可能であることが確認できた。特に需要家 B では、実際の系統電圧と基準電圧との乖離が少なく、SC 容量の電流換算誤差が小さいため、推定誤差もより小さくなっていた。

表 2-3 需要家 A での負荷力率推定結果

No	日時	推定負荷力率	実測負荷力率	推定誤差
1	1/27 8:10	79.2%	82.6%	3.4%
2	1/27 8:52	75.9%	76.8%	0.9%
3	1/27 9:32	70.4%	73.6%	3.2%
4	1/27 9:40	68.3%	69.1%	0.8%
5	1/27 12:59	75.6%	75.9%	0.3%
6	1/27 13:05	73.4%	75.6%	2.2%
7	1/27 17:08	71.5%	76.4%	4.9%
8	1/28 8:17	74.5%	76.2%	1.7%
9	1/28 8:38	77.3%	78.2%	0.9%
10	1/28 9:22	70.9%	73.4%	2.5%
平均	-	73.7%	75.8%	2.1%

表 2-4 需要家 B での負荷力率推定結果

No	日時	推定負荷力率	実測負荷力率	推定誤差
1	12/28 8:20	86.2%	87.4%	1.2%
2	12/29 8:33	88.9%	88.8%	0.1%
3	1/2 8:21	87.5%	86.9%	0.6%
4	1/3 8:12	86.5%	87.1%	0.6%
5	1/3 8:33	85.8%	86.4%	0.6%
6	1/4 8:11	90.6%	89.4%	1.2%
7	1/4 8:36	86.5%	86.7%	0.2%
8	1/5 8:06	89.8%	87.3%	2.5%
9	1/5 8:32	86.7%	85.9%	0.8%
10	1/7 8:47	87.6%	87.8%	0.2%
平均	-	87.6%	87.4%	0.2%

表 2-5 投入 SC 容量ごと負荷力率推定結果

需要家	投入 SC	推定誤差平均	推定誤差最大
需要家 A	16.7kvar	3.8%	26.3%
	33.3kvar	No data	No data
	50kvar	2.1%	4.9%
	66.7kvar	3.0%	5.0%
	100kvar	1.7%	6.3%
需要家 B	16.7kvar	0.3%	7.0%
	50kvar	0.2%	2.5%

また参考として表 2-5 に投入 SC 容量に応じた力率推定誤差（各ケースとも 10 回分の推定結果の平均と最大。50kvar 投入時以外の推定結果は制御には不採用）を示す。需要家 A では、16.7kvar 投入での推定結果は、他に比べて誤差が大きいことがわかる。また、需要家 B でも 16.7kvar 投入時より 50kvar 投入時のほうが、より推定精度が高い。

（3）制御結果

図 2-32、図 2-33 は実証結果の一例であり、三相変圧器二次側の有効・無効電力、投入 SC 容量と、両者から算出した負荷無効電力を示している。図 2-32 の需要家 A は朝夕に急激な負荷の立ち上がり・立ち下がりがあり、また 12 時過ぎに軽負荷となる典型的な工場負荷である。負荷変動も大きいですが、SC 制御は正しく追従しており、変圧器二次側無効電力は、ゼロ付近に維持されている。昼間はやや進み力率（=受電点 Q がマイナス）となるように、夜間軽負荷時は力率が 100%に近づくよう、負荷電流の直接計測なしでも適正制御されていることが確認できる。図 2-33 の需要家 B では SC 容量が 2 段階だけであるため、全般に進み気味となるが、これは力率割引を補償するために適正な制御結果と言える。

なお図 2-32 の需要家 A では 10:15~11:10 頃にかけて受電点力率が定常的に遅れとなっているが、これは 2.4.4 節（1）記載の動作時限（実証では 2 分）が作用しているためである。秒レベルの変動が頻発する需要家 A では、負荷電流が瞬間低下し、閾値超過状態がなかなか継続しなかったため、SC 投入が遅れた。ローパスフィルタにより瞬間変動を除外するなど、動作時限については、

更に工夫の余地がある。

また図 2-32 の 13:30 付近と 16:40 付近において本来は不要な SC 開放が発生している。これは、2.4.4 節（4）記載の負荷電流推定で、解が一意に決められない場合、SC を全開放して得られる実負荷電流と比較・評価する機能を、実証機に盛り込んだためである。同時間は、瞬間的に負荷が低下したため、この実証用の特別機能が働いた。

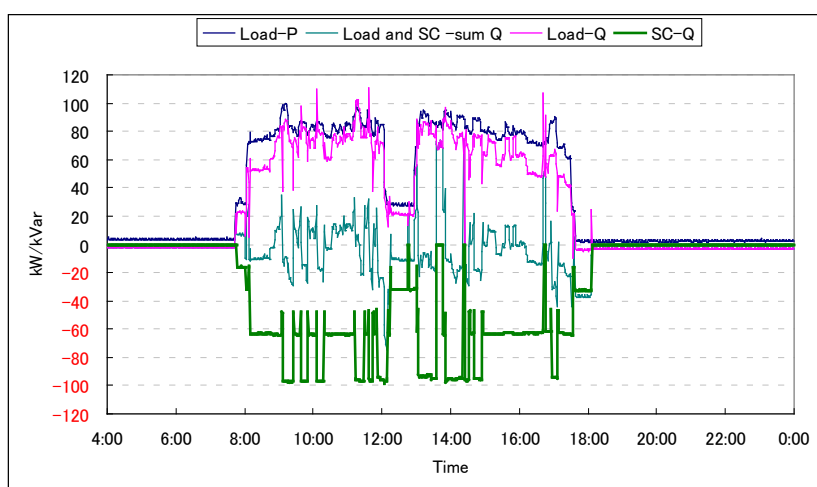


図 2-32 提案制御方式による実証結果（需要家 A）

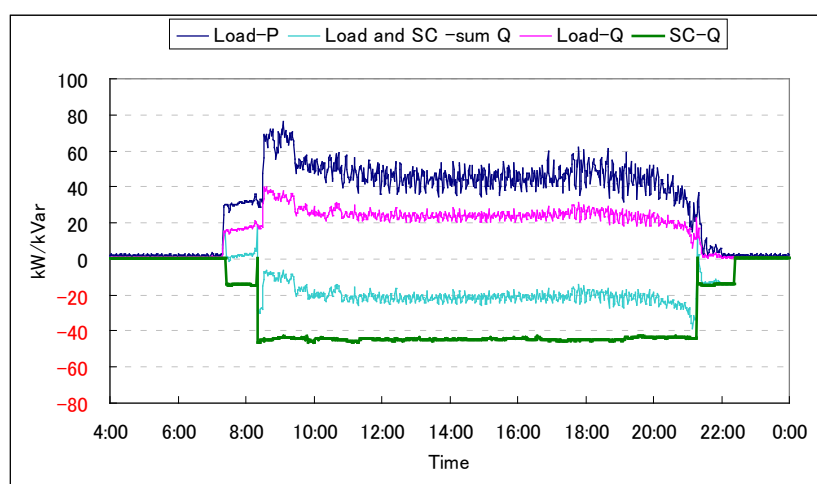


図 2-33 提案制御方式による実証結果（需要家 B）

(4) 損失削減効果の評価

表 2-6 は両需要家での、従来（全ての SC を高圧側に直付け状態）と提案方式（高圧側 SC を外し、低圧側に新たに SC 設置）の各々について、変圧器損失や受電点力率などの評価項目での比較結果である。従来と異なり、変圧器二次側で無効電力を削減するため、変圧器損失が改善されている。また従来では、夜間に大幅な進みとなるため、受電点力率は需要家 A が平均で進み 77.9%、需要家 B が進み 84.6%と大きく進みとなっていたが、各々100.0%、進み 99.3%と大幅に改善された。この結果、フェランチ現象の抑制効果が期待できる。また、力率割引算定手法での受電点力率は、両需要家とも 100%割引を確保できていた。

表 2-6 従来固定 SC と提案 SC 制御との比較

評価項目	需要家	従来方式*2	提案方式	改善幅
三相変圧器での電力ロス*1	A	5,561kWh/年	4,297kWh/year	1,264kWh/year
	B	3,282kWh/年	3,221kWh/year	62kWh/year
平均力率*3 (昼間)	A	遅れ 96.4%	遅れ 99.5%	3.1%
	B	100.0%	100.0%	0.0%
平均力率 *4 (全日)	A	進み 77.9%	100.0%	22.1%
	B	進み 84.6%	進み 99.3%	14.7%

*1 トップランナー変圧器の性能で試算

*2 全 SC は高圧母線に直付固定

*3 力率割引算定対象となる遅れ無効電力のみカウント

*4 遅れ/進み両方をカウント

2.4.6.分散型電源の連系容量拡大効果

2.3 節の電圧制御と同様に、開発した SC 制御による、PV をはじめとする分散型電源導入量の拡大効果について検討した。

2.3.5 節で述べた 3 つの課題に対し、二階層制御によって 2 つの課題が解消可能である。残された 1 つの課題

- ① 電圧上昇幅が、LRT, SVR の制御可能範囲を超え、運用上限を逸脱する。

は、電圧を下げる方向に SVC や PV-PCS に無効電力を出し続けさせない限り、完全には解消することは不可能である。しかし無効電力による対策では、系統力率は遅れ方向に悪化するとともに、SVC や PV-PCS 制御による不要な配電ロスを産むと言ったデメリットもあるため、可能な限り回避すべきである。

一方で開発した需要家 SC 制御の普及により、フェランチ現象による系統電圧上昇が抑制されるため、上記①の課題は完全ではないにしろ、ある程度は解消することが可能である。

2.3.5 節の(2)で述べたように SVR は、電圧降下幅が高圧系統側の上下限範囲(例えば 6,350~6,720V)の電圧幅から SVR タップ幅(同 100V)を差し引いた ΔV_{svr} (同 6720-6350-100=270V)となる地点に設置される。この SVR が制御しきれない電圧上昇幅は、柱上変圧器のタップが一律の場合では、図 2-34 のように重負荷時の電圧降下幅と同じである(但し、SVR のタップ制御範囲が上げ下げ同じだけある場合)。

ここで PV により許容される電圧上昇幅 ΔV_p は、

$$\Delta V_p = \text{軽負荷時の電圧降下幅} + \Delta V_{svr} \quad \dots (2-21)$$

である。実際には多くの電力会社で、柱上変圧器タップは一律ではないため、許容される ΔV_p は、図 2-35 のようにより小さい値となる。いずれにしろ、軽負荷時の電圧降下幅を大きくするほど、PV 連系量を増やすことが可能である。

需要家 SC が常時接続したままでは、フェランチ現象によって、軽負荷時の電圧降下幅はマイナス値となるため、PV 連系可能量は当初から大幅に制限されていることになる。本研究で提案・開発した安価な SC 制御装置を普及させることで、軽負荷時においても系統力率は 100%近くに維持できるため、軽負荷時のフェランチ現象による電圧上昇分だけ、PV 連系容量を増やすことが可能となる。

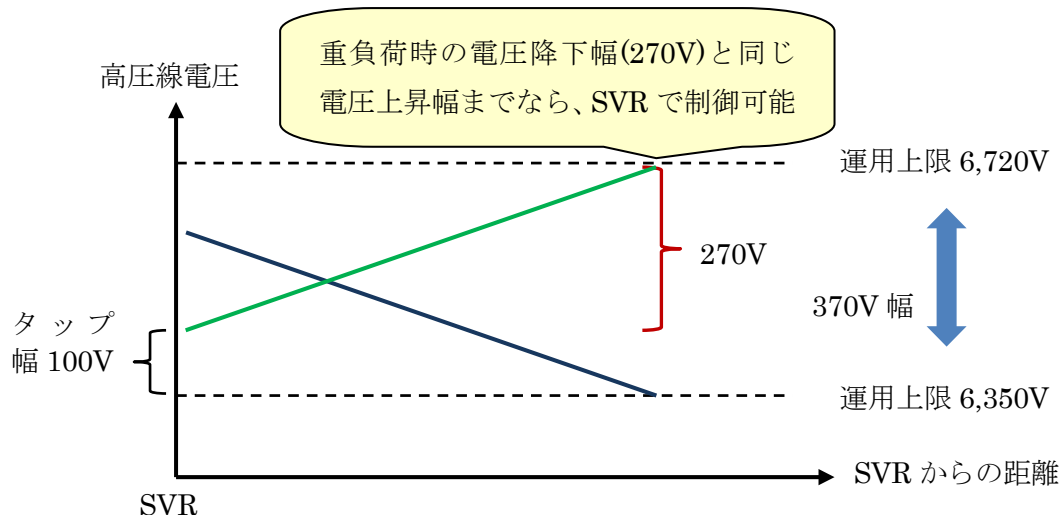


図 2-34 許容される電圧上昇幅（柱上変圧器タップが一律の場合）

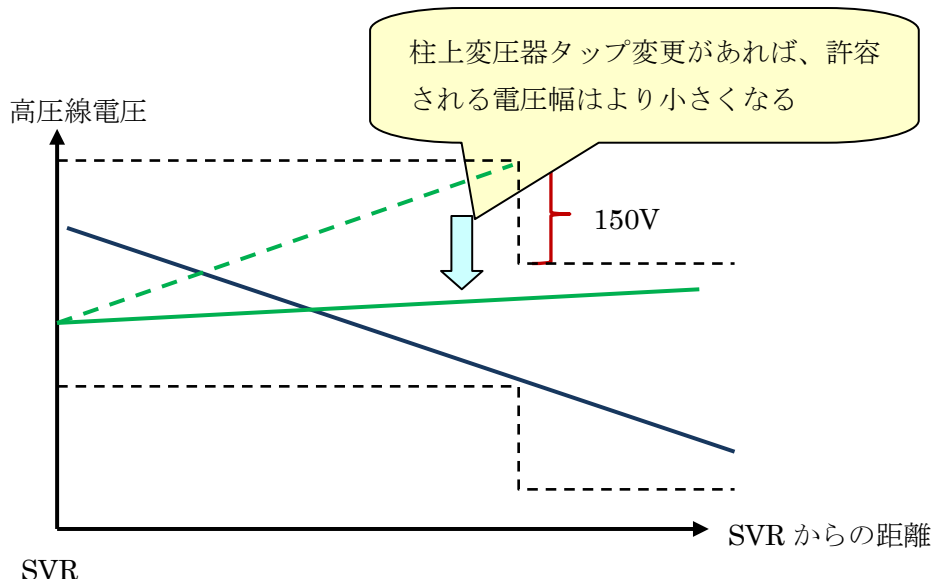


図 2-35 許容される電圧上昇幅（柱上変圧器タップが多段の場合）

文献[2-19]によれば、PV 発電が最大となる 12 時での配電線では、平均して工業地域で 764kvar、住宅地域で 154kvar、農山村地域で 390kvar の無効電力が進みで流れている。これを提案システムでゼロに改善することで、各配電線の無効電力相当の有効電力を上乗せできる。例えば配電システムの平均的な線路インピ

ーダンスは、文献[2-18]から $R=1.446\ \Omega$ 、 $X=1.629\ \Omega$ であるため、工業地域で 764kvar の無効電力を削減することにより、それによる電圧上昇分を減らすことができ、

$$P_g = 764 \times \frac{1.629}{1.446} = 861(kW)$$

の PV を更に連系させることが可能となる。

2.5. 結言

本章では、将来の PV 大量導入時に問題となる、配電系統における電圧上昇・電圧変動に対して、系統運用側からの対策と、需要家側からの対策の 2 技術を検討した。

系統運用側の対策技術としては、スマートメータ普及とも絡んで ICT が進む配電系統において、集中監視が進むことを見据え、最適潮流計算を活用した集中制御システムを開発、その導入効果を検証した。

一般に集中制御は、センサー付き開閉器を通して系統の潮流分布・電圧分布を直接監視しつつ、機器の制御量を決定するため、電圧逸脱を最大限に解消することが可能である。

本研究で開発した二階層制御では、更に以下の新規性と優位性を有する。

- ・ 低速応答で電力ロスの少ないの機械式電圧調整器と、高速応答で電力ロスの大きいパワエレ式電圧調整器とを、ベストミックスな配分で制御する最適潮流計算モデルを構築。これにより、特性の異なる 2 種類の電圧調整器の長所を最大限に活用。
- ・ 機械式電圧調整器は中央の配電自動化システムからの直接制御としたのに対し、パワエレ式電圧調整器では、集中制御側からは制御目標を与え、後は高速応答できるローカル制御で電圧を維持する間接制御方式を開発。これにより制御周期の長い集中制御の制御遅れ問題を解消。
- ・ 適正電圧を維持しつつ、ハンチングを防止し、制御量を最小化するための、制御目標電圧、ならびに不感帯の設定方法を検討。

本研究で開発した電圧制御方式は、世界初の実用化に向け、現在実機システムの詳細設計段階にある。

需要家側の対策技術としては、配電系統の電圧上昇の要因であった需要家進相コンデンサ常時接続によるフェランチ現象を抑制すべく、安価な進相コンデンサ制御システムを開発し、その有効性を検証した。

安価な制御システムを実現するには、少ない入力情報から最大限の効果を産

み出せる技術が1つの鍵になる。その点において、本研究で開発したコンデンサ制御システムは以下の新規性と優位性を有する。

- ・ 無効電力を直接計測せず、コンデンサ投入前後の電流変化のみから負荷力率を精度よく推定する方式を開発。
- ・ 推定負荷力率と、コンデンサ電流が含まれた計測電流から、コンデンサ分を除外した負荷電流を精度良く推定する方式を開発。
- ・ 上記2技術によって、電流計測のみから負荷の無効電力を正確に補償できる低コストのコンデンサ制御装置を実現。
- ・ 閾値を昼間と夜間とで使い分けることで、昼間は需要家の力率割引を優先、夜間は配電系統のフェランチ現象抑制を優先する実用性の高い制御を検討。

なお、負荷力率の推定技術は、需要家のコンデンサ制御のみならず、配電線の力率推定など、電力系統全般にも応用可能である。

本研究で開発した進相コンデンサ制御システムは、製品ベースの試作段階にあり、近く予想される電圧問題の顕在化に合わせて製品化する方向で検討中である。

電力系統の品質管理は、これまでは系統運用側が全てを担うことが常識とされてきた。しかし、近年の需給調整におけるデマンドレスポンスのように、需要家側でも必要に応じて運用管理に協力する土壌が国内でも芽生え始めている。

今後、このように両者が分担しあい、全体として最適なソリューションとなるような対策技術の検討を推進していくことが望まれる。

参考文献

- [2-1] 壁村・米倉・塚本・橋本・原：“自律分散型電圧調整装置の実高圧配電線路への適用”，電気学会論文B, Vol. 122, No. 12, pp. 1252-1261 (2002)
- [2-2] 松田・堀越・瀬戸・井山・小林：“低圧系統用自動電圧調整機器の開発”，電気学会論文B, Vol. 132, No. 5, pp. 436-444 (2012)
- [2-3] 近藤・馬場・横山：“太陽光発電が多数導入された配電系統の FACTS 機器を用いた電圧制御”，電気学会論文B, Vol. 126, No. 3, pp. 347-358 (2006)
- [2-4] 上野・藤原・深津・佐藤・前川・中田：“配電線電圧変動補償装置(直列型)の実線路検証”，電気学会論文B, Vol. 122, No. 12, pp. 1321-1329 (2002)
- [2-5] 石丸・田町・駒見：“配電用変圧器のタップ動作を考慮した PV 進相運転による電圧上昇抑制効果”，電気学会論文B, Vol. 131, No. 5, pp. 429-436 (2011)
- [2-6] 花井・林・松木・栗原：“センサ開閉器から得られる計測情報を活用した配電系統の電圧推定・制御手法の提案と実験的検証”，電気学会論文B, Vol. 130, No. 10, pp. 859-869 (2010)
- [2-7] 近藤・安芸・山口・村田・石井：“階層的協調制御による配電系統の電圧調節”，電気学会論文B, Vol. 126, No. 10, pp. 994-1002 (2006)
- [2-8] 河野・林・板屋・高野・大野：“低圧配電系統における高速電圧計算手法の開発と評価”，電気学会論文B, Vol. 133, No. 4, pp. 34-349 (2013)
- [2-9] S. GREARD, C. BROLLY, O. DEVAUX, O. CARRE：“Implementation of a centralized voltage control experiment in presence of distributed generation in ERDF’s MV network”，CIGRE2012 パリ大会, C6-109 (2012)
- [2-10] J. HISCOCK, N. HISCOCK, A. Kennedy：“Advanced Voltage Control for Networks with Distributed Generation”，CIRED 19 回大会, paper-0148 (2007)
- [2-11] J. APPEN, M. BRAUN, T. KNEISKE：“Voltage Control using PV Storage System in Distribution Systems”，CIRED 22 回大会, paper-1396 (2013)
- [2-12] 吉永・平井・本橋・高野・渡辺・小和田：“配電系統における集中型電圧制御方式の開発”，平成 16 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 30 (2004)
- [2-13] 本橋・生石・高野・板屋・押田・小和田・坂口：“配電系統向け集中型電圧制御システムの実証試験”，平成 19 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 307 (2007)
- [2-14] 大野・高野・小島：“スマートグリッド対応の配電系統向け最適制御技術”，平成 22 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 234 (2010)
- [2-15] 大野・高野・板屋・泉井：“スマートグリッド実証実験(その3) - 配電電圧制御システムの開発 -”，平成 26 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 掲載予定 (2016)
- [2-16] J. Motohashi, K. Taguchi, T. Takano, M. Watanabe, M. Watanabe, K. Ogawa：“”

Development of Advanced Systems Corresponding to the Connection of Dispersed Generation to Distribution System in Tokyo Electric Power Company”, CIGRE2004 パリ大会, C6-109 (2012)

- [2-17] 橋本・高口・中村：“高速・安定な二次計画法の開発と実用問題への適用”，三菱電機技報, Vol. 83, No. 5, pp. 5-9, (2009)
- [2-18] 電気協同研究会：“配電系統における電力品質の現状と対応技術”，電気協同研究第 60 巻第 2 号 (2004)
- [2-19] 電気協同研究会：“配電系統における力率問題とその対応”，電気協同研究第 66 巻第 1 号 (2013)
- [2-20] 松田・堀越・瀬戸・高野：“需要家進相コンデンサの電流制御方式の検討”，平成 22 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 207 (2010)
- [2-21] 松田・堀越・瀬戸・高野・片岡・小林：“電流計測による進相コンデンサ制御装置の開発と評価”，平成 23 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 265, (2011)
- [2-22] 松田・二上・高野・片岡・小林：“電流計測による自動力率調整装置の実現と評価”，電気学会論文 B, Vol. 133, No. 2, pp. 210-217 (2013)

第3章 再生可能エネルギー電源の活用技術

3.1. 緒言

PVやWTは、日照や風といったどこにでもあるエネルギーを源としているため、水力発電や地熱発電など他のREに比べると設置場所を選ばず、世界レベルで導入が進んでいる。しかし天気任せの発電であるため、電力源としての価値は低く扱われてきた。ところがその変動吸収を補償できる蓄電池の大容量化・低コスト化が進むにつれ、電力源としての活用が注目され始めている。

近年増加しつつある特定供給（自営線エリア内の需要家への自己電源による電力供給）においても、2014年4月、REが蓄電池併設を条件に供給力と見なされるようになるなど、規制緩和が進んでいる。

またPVやWTに限らず、REの多くは、震災などで広域停電が発生し、交通網混乱によりガスや石油など化石燃料供給もままならない災害時においても発電が可能である。東日本大震災以降、単なる電気料金のみならず、エネルギー安定供給という付加価値としても、REが評価されている。

このような背景のもと本章では、電力系統から見れば電力品質低下を招く変動要因と見なされていたREを、より積極的・能動的に有効活用していく技術について検討する。

そこで本章では、まずREの問題点と、それを有効活用する関連研究について触れ、次にREを蓄電池併設によって供給力として活用する技術、ならびに活用事例として、災害時や離島などを想定したマイクログリッド自立運転について述べる。

3.2. 新エネ電源活用の課題と関連研究

3.2.1. 出力の不安定さ

PV は太陽光電池によって光を電気エネルギーに変換するためその出力は日射にほぼ比例する。また WT は空気の運動エネルギーをブレードで受け止め電気エネルギーに変換するため、その出力は風速の 3 乗にほぼ比例する。そのため両者は、時々刻々と変化する天気によって、図 3-1、図 3-2 のごとく秒レベルで出力が変化する。

一方で、規模の大小にかかわらず商用ベースにおける電力供給は、需要変化に応じてその出力を調整することが求められる。そのため、出力が天気によってのみ決定づけられる PV や WT は、当初は電力システムの運用上、電力品質低下を招く負荷変動要素の 1 つとして見なされていた。

ところが、例えば日本政府目標が掲げる PV の導入目標では、2020 年には 28GW、2030 年には 53GW となっており、これは国内の電源容量としては各々 13%、25% に相当する。これだけの比率になると、単なる負荷変動要素として扱うにはあまりにも大きすぎる。そのため、より安定した電源として積極活用することが望まれる。

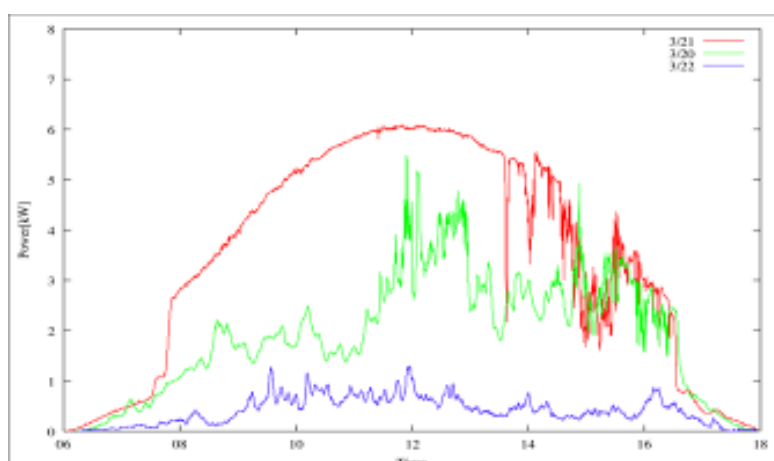


図 3-1 PV 発電例

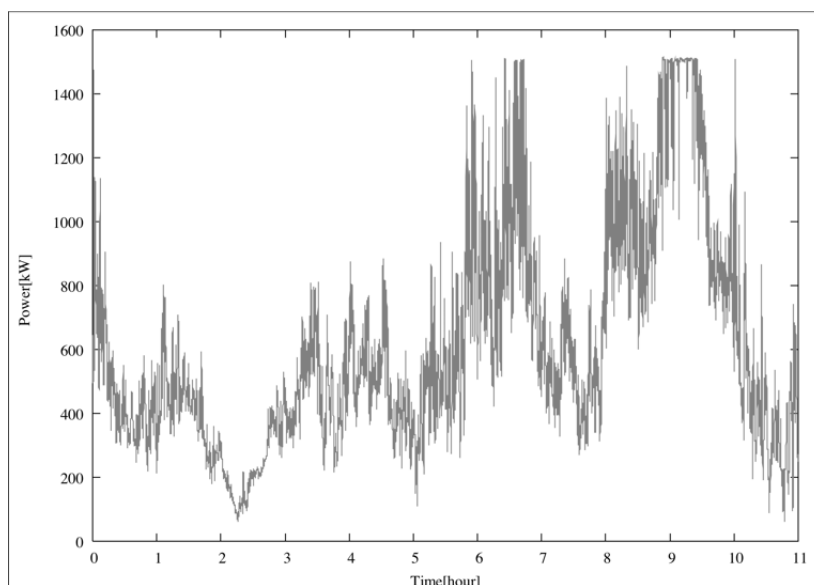


図 3-2 WT 発電例

3.2.2. 関連研究

これまでの研究では、PV や WT に対し、蓄電池に併設によって、天候変化に起因する短期変動成分をいかに吸収するかに主眼が置かれていた。文献[3-1]では、WT の出力変動の確率分布を元に、その変動成分を吸収するために最適な蓄電池容量の算出手法を提案している。文献[3-2]では PV を対象に、変動吸収手法の検討と合わせて、最適な蓄電池容量を試算している。更に進んで文献[3-3]では、蓄電残量も考慮した変動吸収を提案し、シミュレーションにより有効性を示している。また、視点を変えて PV や WT を含めたマイクログリッドにおける周波数制御という観点からもいくつかの研究成果が報告されている^[3-4, 5, 6]。これらの研究はあくまで短期変動の吸収をするのみであり、より積極的に PV や風力発電を電力供給電源として活用することを目指してはいない。

これに対し文献[3-7]では、PV を対象に、PV 発電予測に基づき翌日の充放電計画を立案し、当日補正しつつ制御する方式が提案されている。同様に文献[3-7]では、30 分同時同量制約を満たすために必要な蓄電池容量を試算している。文献[3-9][3-10]などでは、PV や WT の予測誤差をモデル化し、予測が外れた場合の影響を評価している。PV や WT の発電予測精度は現状では低く、予測が外れによる影響度合いを考慮した計画立案が望まれる。

海外でも蓄電池は RE を補完する設備として注目されているが、国内のように RE の変動吸収用というよりは、文献[3-11]のように、需要家のピークカット、ピークシフトとしての活用研究が主体となっている。これは他系統からの電力融通力が大きい欧米においては、未だ高額な蓄電池を変動吸収用として活用するだけのコストメリットが見いだせていない現状があると推測される。しかし他からの電力融通が期待できない離島においては、文献[3-12]のように、蓄電池併設による RE 変動吸収の研究が散見される。

また、RE の代表的な活用先としては、マイクログリッドが挙げられるが、マイクログリッド関係では、文献[3-13]において、本研究でも紹介する 4 階層からなる需給制御システムを提案している。ここでは、最上層制御において PV や WT の発電予測に基づき蓄電池も含めた需給計画を立案する。下層になるに従い時間幅が数時間・数分と短くなり、当日の実績を見つつ計画を補正するとともに、制御を行う。また、最下層では周波数制御の領域となり、蓄電池が自律的に制御を実施する。この 4 階層制御の考え方は、文献[3-14]等においても採用されている。RE を用いたマイクログリッドは、2005 年の愛知万博^[3-15, 16]、八戸マイクログリッド^[3-13, 17, 18]、既に多くの実証がなされており、文献[3-19]をはじめ多くの文献で報告されている。

元々、マイクログリッドの概念は米国発祥であるため、米国をはじめ海外でも多数の研究開発事例を見ることができる。文献[3-20]では様々な事例が紹介されており、分散型電源導入による軍事基地の電力セキュリティ向上、カリフォルニア州企業団地での Power Park によるグリーンエネルギーの有効活用、オハイオ州 Premium Power Part による多品質電力供給など、様々なシーンでマイクログリッド化の可能性を秘めていることがわかる。

近年は、2009 年の米国グリーン・ニューディール政策を発端に、マイクログリッドの概念をより広域に展開し、参加者（プレーヤー）を、送配電会社、発電事業者と仲介者（アグリゲータ）、他マイクログリッドなどに広げたスマートグリッドの概念が世界レベルで浸透している^[3-21, 22]。文献[3-23]等で紹介されている EU プロジェクトでは、20-20-20 目標（2020 年までに CO₂ を 20%減、再生可能エネルギーを 20%増）が掲げられ、注目を集めている。

3.3. 蓄電池併用による安定化技術

3.3.1. 蓄電池併設による出力安定化

出力不安定な PV や WT も、蓄電池を併設することによって、供給信頼性は向上する。蓄電池を用いた制御としては、PV, WT の短周期変動の吸収に目的を置いた出力変動緩和型と、PV, WT を供給安定電源として活用するための計画発電型の 2 種類が考えられる^[3-24]。

前者は、WT 出力の移動平均や一次遅れフィルター結果を合成出力目標値とし、WT 出力との差分を蓄電池で出力する方式である。この場合、例えば常に過去 20 分間のウィンドウで合成出力の変動を WT 設備定格の 10%以下に抑えるということが制御の目標となる。

一方後者は、市場取引や、マイクログリッドでの電源としての活用を想定し、天候によらず、従来の火力発電に匹敵する計画性を実現する運転方式である。したがって、発電計画値と実績の偏差を抑えることが制御の目標となる。

併設する蓄電池の容量を増やすほど供給信頼性は向上するが、現状は蓄電池も高価であるため、必要最低限の容量に絞らなければ事業としての成立は困難となる。また逆に蓄電池容量を絞りすぎると、供給信頼性が低下し、必要などきに必要な電力を供給できずに市場から高額な電力を調達したり、最悪は停電や電力供給不能により高額なペナルティが課せられることになり、事業性悪化の要因となる。

そこで、予め決定した計画通りに発電を行う“計画発電”を対象に、シミュレーションを通して、最適な計画立案パラメータと、最適な蓄電池容量を決定する方法について検討した。

計画発電によって、以下の 2 つのメリットが期待できる。

- ・ 売電する場合は、事前に売買契約を結ぶことによって供給信頼性の高い電源として扱われ、売電単価が高くなるため経済性が向上する。
- ・ マイクログリッドなどで自家消費する場合は、供給安定電源として使えるた

- め、同期発電機など他電源容量を減らすことができ、経済性が向上する。
- ・ 結果的には短周期の出力変動もある程度抑制することになるため、配電系統の電圧変動や送電系統の周波数変動への影響を殆ど無くすることができ、電力会社が設定する連系可能容量の制約対象外とできる。

以下、ここでは計画発電により、PV、WT 発電電力を売電する運用形態を例にとり、その計画・制御技術について検討する。

3.3.2. 計画立案方法

(1) 概略フロー

計画発電では、当日の発電計画（30 分刻みで 24 時間分とする）を前日朝（概ね午前 9 時）に立案し、不足電力を調達したり、余剰電力を市場に出したりといった売買契約を結ぶ必要がある。しかし現実には PV や WT の前日予測は困難なため、当日まではある程度の補正が許容される。そこで本研究では図 3-3 に示すように、当日午前 0 時に発電予測・計画立案を実施し、当日の最終決定とする運用を想定する。

したがって、発電予測は午前 0 時から 24 時間先までの 30 分周期・48 断面の発電量を予測し、計画立案も 24 時間先までの 30 分周期 48 断面の発電計画値を設定する。

以降に、計画発電の各処理について詳述する。

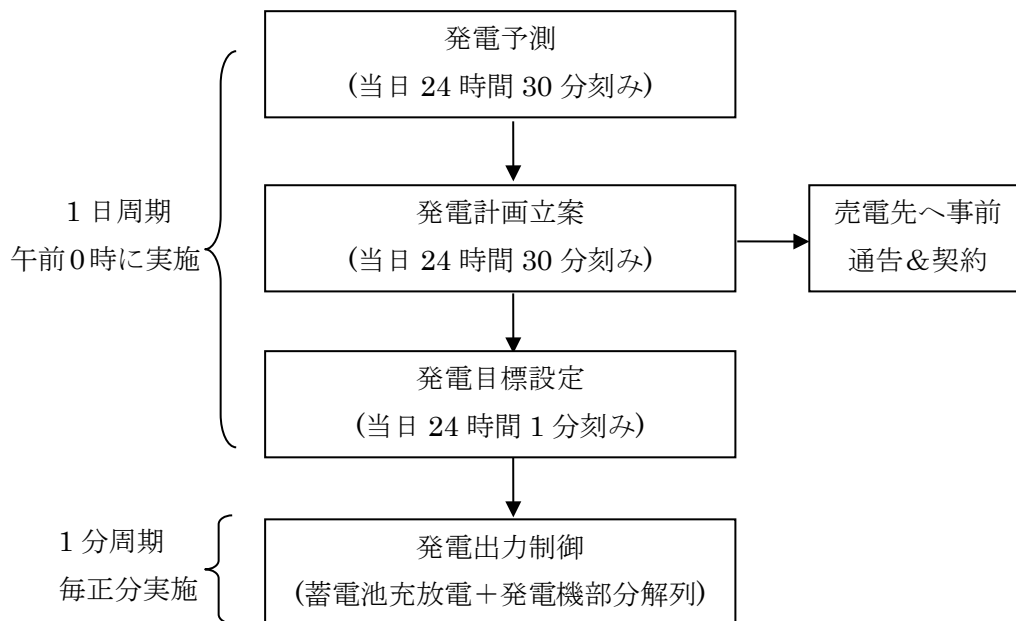


図 3-3 計画発電の概略フロー

(2) 発電予測

天候予測、もしくは天候シミュレーションにより、

- ・ WT：午前0時時点での24時間先までの風速予測
- ・ PV：午前0時時点での24時間先（実態は昼間のみ）までの日射・気温予測

から、24時間先30分刻み48断面の発電量を予測する。

WTでは、風速と発電出力の相関特性グラフが発電機メーカーから提供されるため、風速が予測されれば、発電量が一意に決定できる。

またPVでは、晴天時の24時間発電パターンに天候（晴／晴時々曇り／曇り／雨など）に応じて補正（例えば晴天は100%、晴時々曇りは70%、曇りは30%、雨天は0%など）することによって行う。

(3) 発電計画立案

【基本方針】

発電予測に対して、売電の計画値（30分ごとのkWh値）を決定する。この際、

発電予測精度の考慮が重要な鍵となる。

売電収益を上げるには、予測値と同じ計画値で立案すれば良い。しかし発電予測が外れて事前通告通りの発電が出来なかった場合は、契約違反（インバランス）に対するペナルティを支払うことになる。一般にはペナルティ料の単価は、売電単価の10倍程度で設定されるため、計画値は予測値より低めの安全サイドに設定することになる。しかし低めに設定しすぎると、せっかくのWT発電の多くを売れず、逆に収益は悪化する。

そこで図3-4のように、発電予測精度を考慮した上で、売電による収益が最大となる発電計画を立案する方式を検討した。

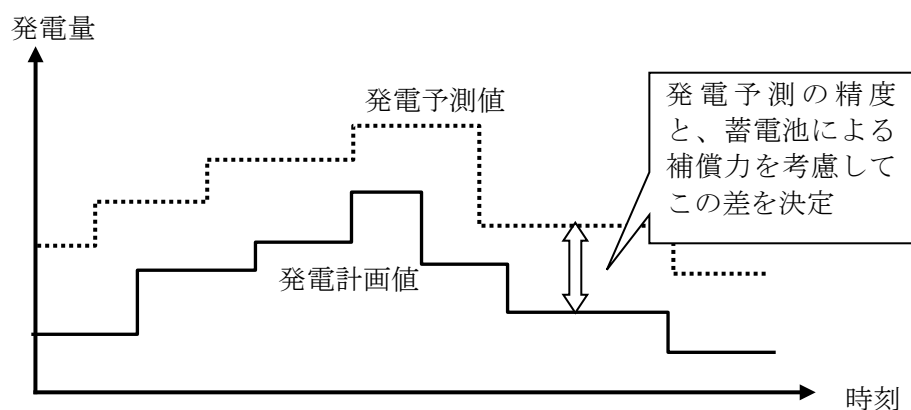


図3-4 発電予測値と発電計画値のイメージ

【予測誤差の扱い】

図3-5は、風力発電の予測誤差の一例であり、2時間先からの30分間発電量の予測誤差を、予測値（発電定格比）別に統計分析したものである。予測値が定格近いかゼロ近い場合は、予測誤差は±30%以内と小さいことがわかる。これは、両極端の場合では、天候が比較的安定していることに起因する。

この予測誤差分布は、0時間先から24時間先まで、30分ごとに48断面分与えられることを想定する。

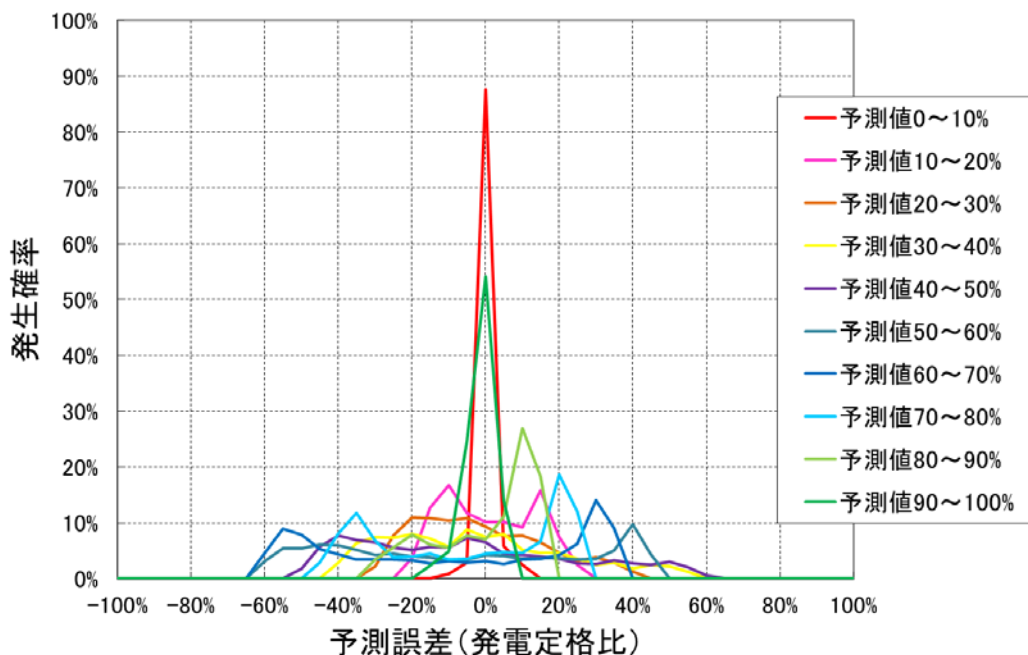


図 3-5 風力発電の予測誤差分布の例（2 時間先の予測の場合）

※予測誤差＝実績値－予測値

このような予測誤差分布が予測時間ごとに与えられれば、確率論的に、売電額からインバランスによるペナルティ損失を差し引いた売上げ期待値が算出できる。

即ち、i 時間先における発電予測値が与えられると、図 3-5 のいずれかの誤差分布曲線が決定される。図 3-6 は図 3-5 の予測値 60～70%の誤差分布を抜粋したグラフである。ここで予測誤差が正值の場合は、予測より多くの発電量が得られることを意味するが、電力が余る分には、WT のピッチ制御や一部解列等で出力を下げるため、インバランスのペナルティは回避できる。計画発電においては、予測誤差が負値の場合のみを考慮すればよい。

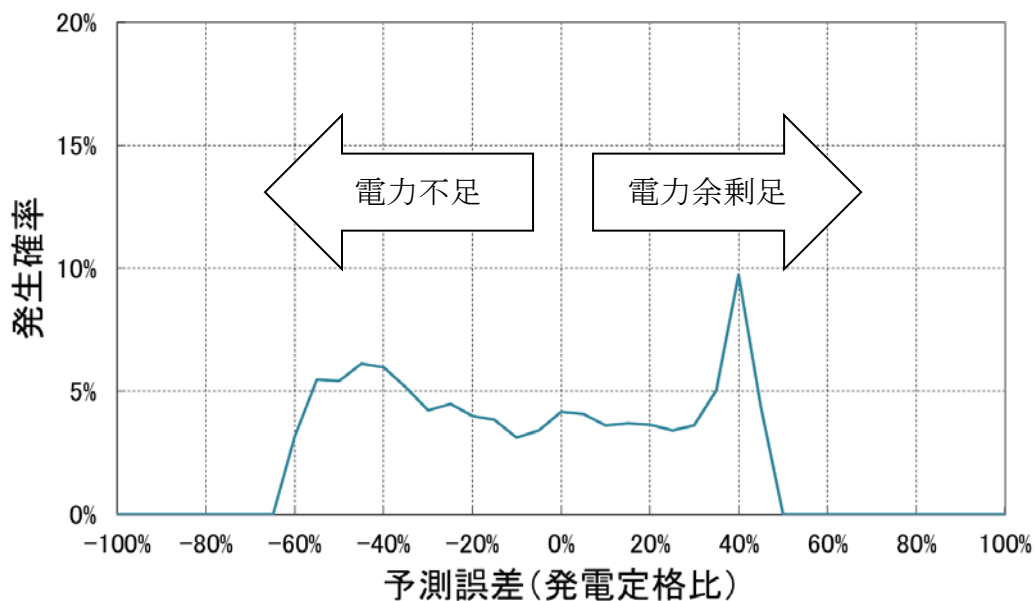


図 3-6 2 時間先・予測値 60~70%の場合の予測誤差分布

参考までに、図 3-6 のように予測値が定格 60~70%の場合には、予測誤差は、発電予測値にほぼ等しい - 60%まで均等に分布している。従って、蓄電池が無ければ、ペナルティを考えると、このような出力予測の時間帯では、売電計画値はゼロにせざるを得ない。

風力発電電力と同容量の蓄電池を併設することにより、この予測誤差（予測外れ）は 100%補償可能となる。しかし蓄電池は WT など発電設備なみに高額であることから、WT 設備も含めた初期投資額が売電収益を上回り、事業としては成立しない危険性がある。

【発電計画方法】

PV, WT における収益性は、①インバランスによるペナルティ損失との兼ね合いを考慮しつつ高い計画値を設定するか、②インバランスを回避するための蓄電池容量をどの程度に設定するか、の 2 点によって決定づけられる。そこで収益性を下式のように定義し、①と②との様々な組み合わせの中で、シミュレーションを通して収益性が最大となるものを、最適な運用として選定する。

$$G = \sum (S_i \times SC_i - L_i \times LC) - B \times CB \div LT \quad \dots (3-1)$$

ただし G : 売電収益(円)

S_i : i 時間先の売電計画値(kWh)

SC_i : i 時間先の売電単価(円/kWh)

L_i : i 時間先のインバランス量期待値(kWh)

LC : インバランスに対するペナルティ単価(円/kWh)

B : 蓄電池容量(kWh)

CB : 蓄電池単価(円/kWh)

LT : 蓄電池寿命(日)

右辺第一項は、計画売電による収益、第二項は計画未達成時に発生するペナルティ損益、第三項は蓄電池初期コストの単位時間当たりの換算値を意味する。

なお、 SC_i 、 LC 、 CB 、 LT については前提条件として与えられる固定値とする。

売電計画値 S_i は、下式で表現される (図 3-7 参照)。

$$S_i = F_i - E_i(\alpha) + B_i \quad \dots (3-2)$$

ただし F_i : i 時間先の発電予測値(kWh)

$E_i(\alpha)$: i 時間先のインバランス発生確率を α にするための予測誤差幅(kWh)

B_i : i 時間先における蓄電池の補償可能量(kWh)

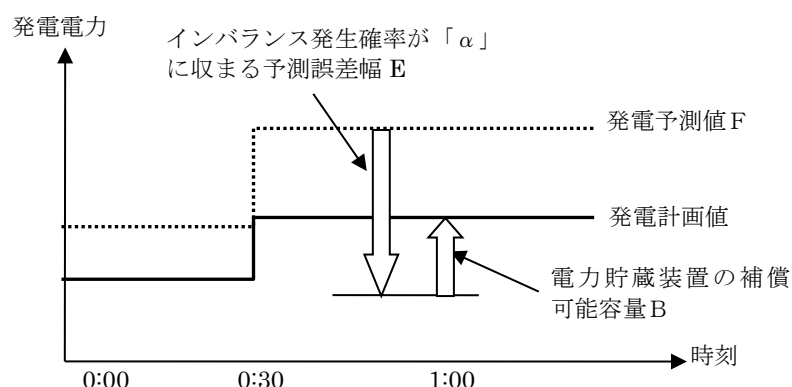


図 3-7 発電予測値と発電計画値の関係

ここで $E_i(\alpha)$ は、図 3-8 のように、蓄電池が無い場合において、インバランス発生確率を α に抑えるための予測誤差幅であり、任意の α を設定すると、予測時間とその時の予測値が決まれば、一意に決定できる。

また、 B_i については、正確にはSOC (State of Charge : 充電残量) がゼロとなり補償不能となるケースがあるため、24 時間の SOC 変化を予想して設定する必要があるが、ここでは計画発電値は予想値より常に下目に設定され、多くのケースでは充電方向に動くことが多い(=フル充電状態になっているケースが多い)ことを踏まえ、瞬時出力(kW)値×単位時間分のフル補償が可能と想定する。なお、実際にはこの想定通りにならず、蓄電池の残量不足により補償しきれないケースも発生するが、どの程度の頻度で発生するかは、所定期間(概ね1年)の発電予測と発電実績データを用いたシミュレーションを通して確認する。

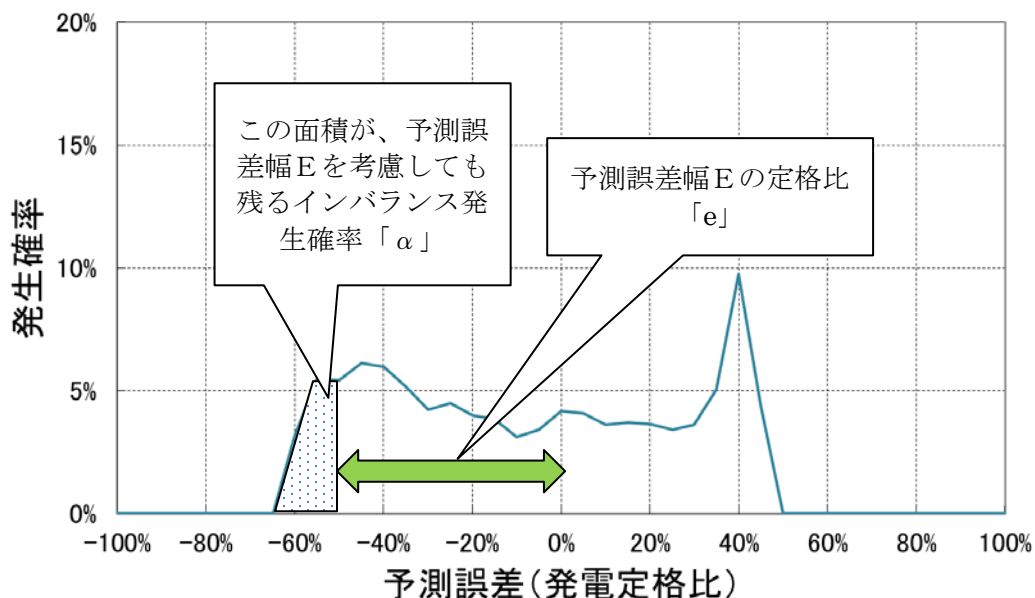


図 3-8 予測誤差分布とインバランス発生確率

インバランス量期待値 L_i については、インバランス発生確率 α を設定すると、下式で算出される。

$$L_i = \int_{-1}^{-e} \{f_i(x) \times (x + e_i)\} dx \quad \dots (3-3)$$

ただし $f_i(x)$: 予測誤差 x の発生確率 (予測誤差分布から得られる)

e_i : 予測誤差幅 E_i (α によって決定される) の定格容量比

(4) 発電目標設定

前節で設定された発電計画は売電契約のための、30分ごとの平均発電量である。電力系統からすると、図 3-4 のように 30分ごとの時間の境目で急激に発電が変化すると、周波数や電圧の急激な変動の危険性がある。そこで図 3-9 に示すように、30分の平均値が発電計画値となり、かつ急激な出力変化が発生しないように、1分刻みでの発電目標値を設定する。

計画達成率は、この発電目標値と、実際に系統へ流出する電力値との偏差が所定範囲内であった時間比率 (所定範囲内に収まっていた時間 ÷ 全時間) となる。

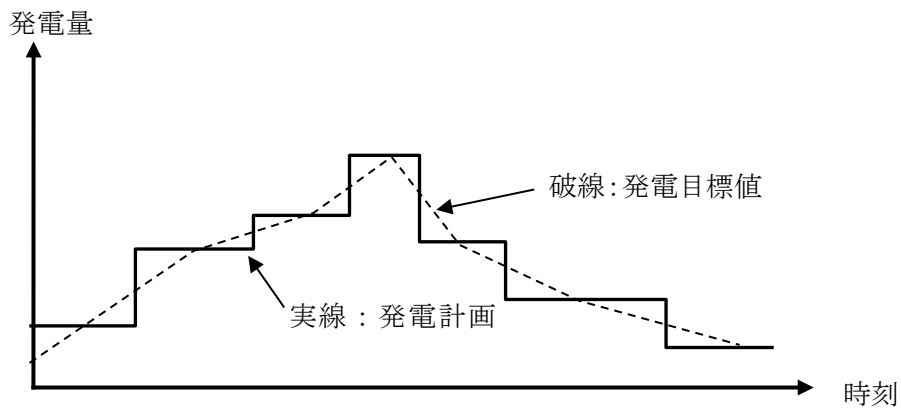


図 3-9 30分ごとの発電計画値と1分ごとの発電目標値のイメージ

(5) 発電電出力制御

発電出力制御は、前節で決定した30分ごとの発電目標値に、商用系統へ流出する電力値(=PV, WT 出力値と蓄電池充放電値の合計)が合致するように、以下の制御を行う。

- ・ 蓄電池の放電 (PV, WT の発電実績が予測値を下回った場合)
- ・ 蓄電池の充電 (PV, WT の発電実績が予測値を上回った場合)
- ・ ピッチ制御や解列等による PV, WT の出力抑制 (蓄電池で充電しきれない余剰電力が発生した場合)

以上を踏まえたシステム構成例を図 3-10 に示す。

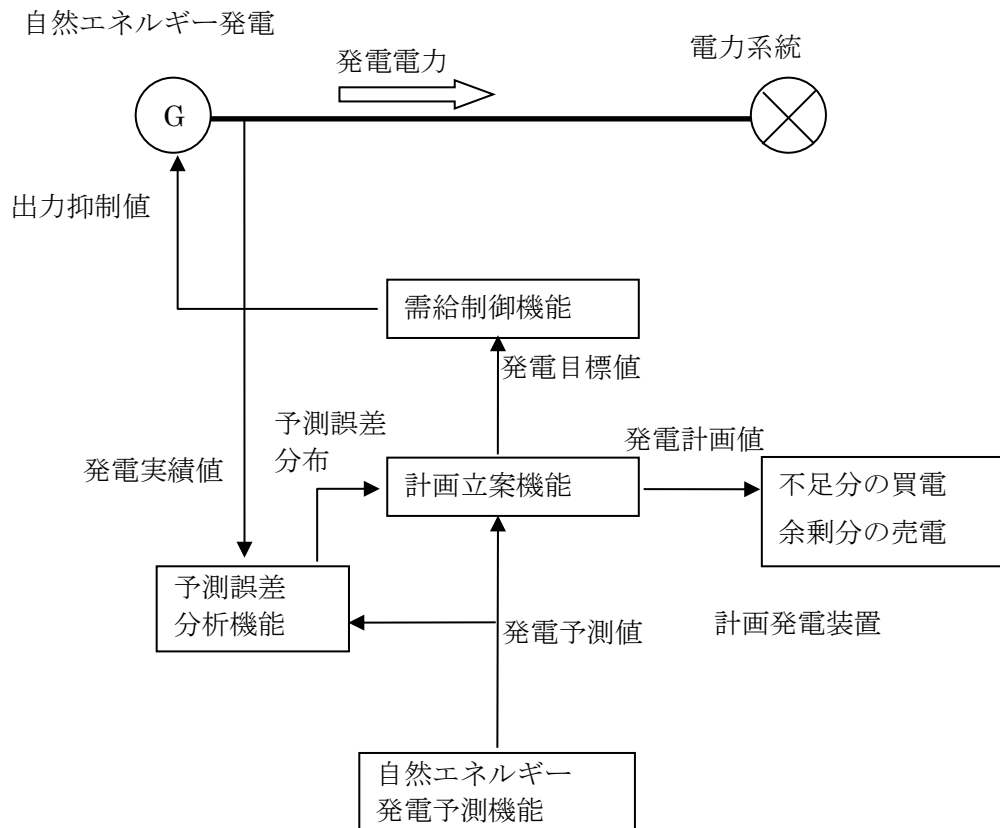


図 3-10 計画発電を取り入れたシステム構成例

3.3.3.計画立案シミュレーション

ここでは、風力発電を例にとりシミュレーションで有効性を確認した。

(1) シミュレーション条件

A) 風力発電装置

容量：34MW（単機定格 2MW×17 機）

B) 蓄電池

現状、電力用に実用化されている以下の 2 種類の蓄電池を想定した。

① 鉛電池

kW 容量：5 MW、10MW、15MW の 3 通り

kWh 容量：瞬発力 0.3CA とした場合に必要な kWh (=kW 容量÷0.3)

但し、容量の 1/2 を使用可と想定 (kW 容量÷0.3÷2=kW 容量×1.7h)

充放電効率：70%

② NAS 電池

kW 容量：5MW、10MW、15MW の 3 通り

kWh 容量：kW 容量×7.2h の 80%を使用可と想定 (kW 容量×5.76h)

充放電効率：75%

C) 運用制約

商用系統への影響を考慮し、その一例として、2006 年東北電力公開の計画発電型風力の募集条件を採用する。

- ① 平時は、発電目標値と実出力の偏差が風力発電装置定格容量の±2%以下となるように制御する。この制約を逸脱した時間帯は、計画未達成とする。
- ② 夜間解列前後は、発電目標値の増減速度を、風力発電装置定格容量の±2%/分以下となるように設定する。
- ③ GW、盆、正月、及び夏季・冬季ピーク期間を除く季節の夜間（22 時～6 時）に解列もしくは出力一定時間帯を設定する。

D) 使用データ

- ① 風力発電装置 1 年分、1 分刻みの出力データ
- ② 同、10 分刻みの発電予測データ

(参考) 年間発電量：110,532.00MWh (設備利用率 37.1%相当)

a) 昼間(平日 8～22 時)：64,222.45MWh (総発電量の 58.1%)

b) 夜間(b を除く休日, 平日 22～8 時)：37,055.75MWh (同 33.5%)

c) 指定解列時間帯：9,253.80MWh (同 8.4%)

(2) シミュレーション結果

3.3.2 節で述べた計画発電方式で、目標滞在率 (= $1 - \alpha$) が 90%、95%、

99%となるように各々発電計画を立案した場合の仕上がりについてシミュレーションにより評価した。仕上がり評価項目としては以下とした。

① 制御後の計画達成率

想定した目標滞在率（90%、95%、99%）に対して、蓄電池の状態（空になり放電できなくなった、等）やkW容量の限界、瞬間的な風力出力変動に対する追従性などの要因により、仕上がりが異なってくる。

② 売電計画に対する不足電力量

発電計画で売電先に事前通告した契約電力総量(kWh)に対し、予定通り売電出来なかった不足量(kWh)の比。電力取引の一般的なるルールである、契約電力量に対して、その3%を下回った分を不足電力量としている。不足電力量は、ペナルティ課金対象となる。

③ 売電量（%比）

風力の総発電量(kWh)に対する、実際に売電した量(kWh)の比。達成率を高めるために計画を低めに設定した場合は、低い数値となる。

④ 売電量（金額）

平日昼間（夏季）：10.9 円/kWh

平日昼間（その他）：10.2 円/kWh

夜間・休日：7.8 円/kWh

として、③の売電量を金額に換算。なお、単価は2006年時点での実勢価格を参考に設定した。

また、不足電力量に課金されるペナルティ分は、単価を売電単価の10倍として差し引いた。

※ 本来は、ここで蓄電池コストも加えて評価すべきであるが、蓄電池コストは変動の激しい数値のため、ここでは除外しておく。

⑤ 蓄電池の空／満充電時間

蓄電池が空となり放電制御が不能となった時間と、満充電となり充電制御が不能となった時間の、1年間に対する比。この時間が大きいと、計画達成率が低下する。

⑥ 1日の平均充放電量

蓄電池のサイクル寿命に影響。目安として、1日平均で蓄電池容量の100%以下でなければ経年劣化寿命（約15年）前にサイクル寿命で取替えとなる。

A) 鉛蓄電池（kWh容量が小さい電池）の場合

表 3-1 にシミュレーション結果を示す。

- ① 鉛電池の場合、kWh容量がkW容量×1.7h分と小さいため、空もしくは満充電となる時間が多くなった。その結果、仕上りの計画達成率は目標達成率より数%小さい結果となった。
- ② 目標達成率と仕上がり達成率の偏差を縮めるためには、蓄電池の kWh 容量を増やす必要がある。もしくは、計画値をより低く設定することも考えられるが、売電量が極端に小さくなり、発電事業としての収益が悪化する。
- ③ 同じ計画達成率では、蓄電池容量が大きいほど、売電量が増える。しかし蓄電池導入初期コストが加算されるため、適正な蓄電池容量の選定が望ましい。（最適な蓄電池容量選定のためには、売電計画不足電力に対するペナルティ単価や蓄電池単価の想定が必要）
- ④ 蓄電池容量が5MW（風力定格比15%弱）で99%の計画達成率を目指すと、売電量は風力発電量のわずか43%という極端に低い数字になる。5MWでは計画達成率は95%が限界と言える。
- ⑤ しかし計画達成率95%という前提で見れば、電池容量が10MWと15MWとでは売電量に大差なく、10MWあれば十分であると言える。
- ⑥ 更に蓄電池が5MWと10MWでの売電量差は、蓄電池容量が倍増している割には小さい。蓄電池のコスト（概ね20万円/kW、WT自体の初期費用

とほぼ同じ) を考えると、5MW でも十分の可能性はある (10MW といずれがベストかは、売電単価などの想定に依存する)。

B) NAS 電池 (kWh 容量が大きい電池) の場合

表 3-2 にシミュレーション結果を示す。

① NAS 電池の場合、kWh 容量が大きいため、空もしくは満充電となる時間が鉛電池に比べて極端に小さくなった。その結果、仕上がりの計画達成率は目標達成率とほぼ同じ数値が確保できた。

また、鉛電池の②～⑥と同じことが NAS 電池についても言える。

参考までに、図 3-11 は、10MW の NAS 電池で、目標滞在率を 95%とした場合と、99%とした場合の発電目標値と実際の WT+蓄電池の合成出力 (目標値に対する実績) である。目標滞在率 99%では、95%に比べてより安全サイドに低めに目標値を設定している反面、WT 出力の多い時間帯でも全量を売電していないことが分かる。ただし、1～2時や4～6時にかけて、予測より WT 出力が大幅に下回っている時間帯では、目標滞在率 95%では、目標値通りに殆ど売電できていない。この時間帯には、インバランスによるペナルティが発生していることになる。

表 3-1、表 3-2 の結果から、計画達成率を 99%のように高く期待せず、やや低めの 95%程度で満足する運用を考えることにより、蓄電池容量は大幅に抑えることが分かった。

ただし未達成の 5%については、デマンドレスポンスによる負荷調整などで、別途対策を講じる必要がある。

なお、今回のシミュレーションでは電力向け大容量システムが既に商用ベースに達している NAS 電池と鉛電池について行ったが、今後普及が期待されるリチウム電池など他の電池についても、同様にシミュレーション評価は可能である。

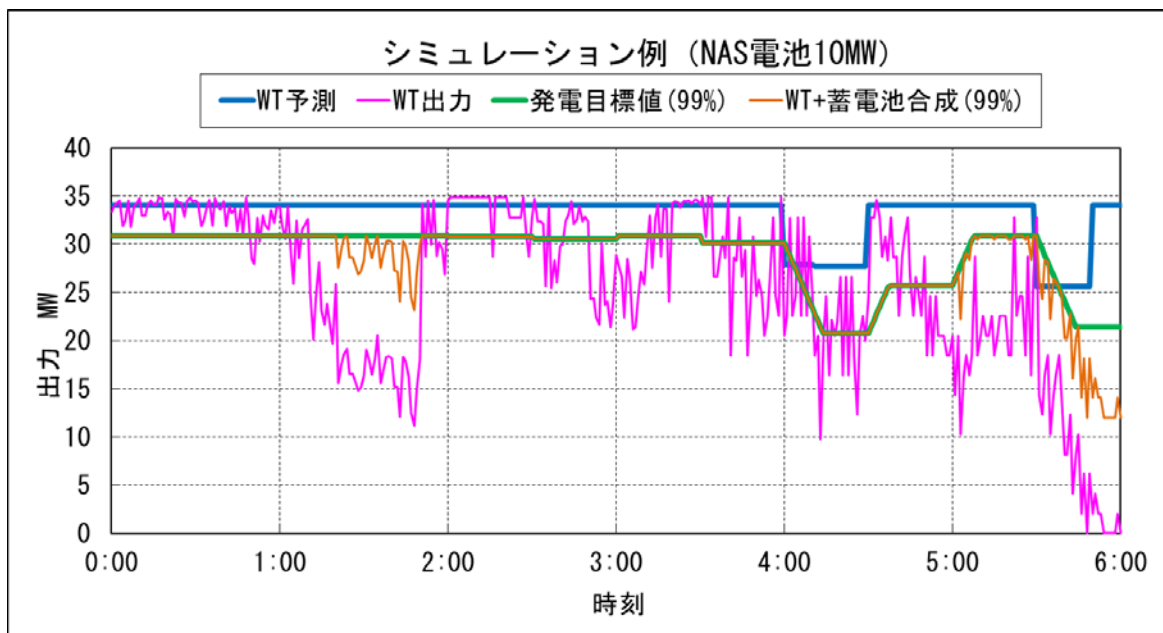
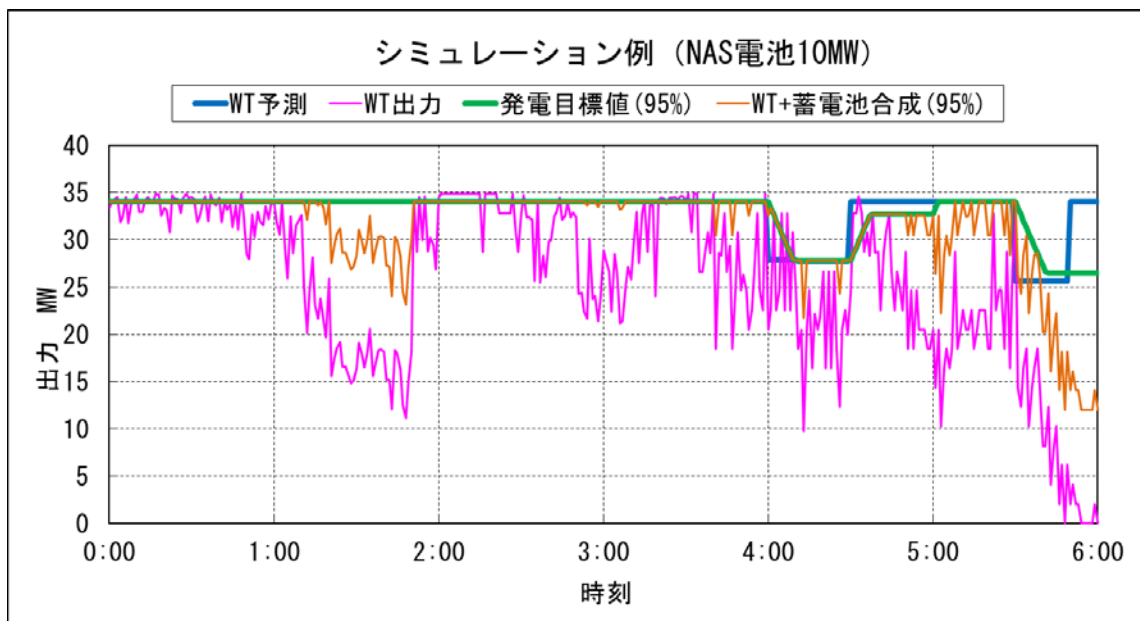


図 3-11 シミュレーション例
 (上：目標滞在率 95%、下：同 99%)

表 3-1 鉛電池でのシミュレーション結果

設定条件			計画達成率 %		売電計画に対する 不足量 %		売電量 %			売電量 百万円		
蓄電池容量		目標 滞在率 %	昼間	夜間	昼間	夜間	昼間	夜間	合計	昼間	夜間	合計
MW容量	MWh容量											
5	8.33	90	86.39	88.73	2.18	1.07	46.80	27.43	74.23	510.4	236.5	746.9
		95	91.15	93.20	1.11	0.55	41.63	24.55	66.19	454.1	211.7	665.8
		99	95.00	97.01	0.30	0.10	27.11	16.18	43.29	296.1	139.5	435.6
10	16.67	90	88.36	90.54	2.93	1.17	50.48	30.35	80.83	550.6	261.7	812.3
		95	90.59	92.62	2.18	0.86	49.58	29.48	79.06	540.8	254.2	795.0
		99	94.52	96.31	0.94	0.36	39.98	24.11	64.09	436.5	207.8	644.4
15	25.0	90	90.20	92.36	3.31	1.25	51.39	31.28	82.67	560.6	269.6	830.2
		95	91.43	93.84	2.77	0.98	51.26	31.14	82.40	559.2	268.5	827.7
		99	94.11	96.19	1.64	0.53	48.63	29.03	77.66	530.8	250.3	781.1

(続き)

設定条件			蓄電池空/満蓄時間 %		平均充放電量/日		
蓄電池容量		目標 滞在率 %	空	満蓄	充電量 MWh	放電量 MWh	DOD %
MW容量	MWh容量						
5	8.33	90	10.17	21.26	16.70	11.69	70.14
		95	7.19	34.28	14.16	9.91	59.48
		99	5.14	47.27	10.64	7.45	44.69
10	16.67	90	9.01	8.90	32.71	22.90	68.70
		95	7.79	13.14	30.15	21.11	63.32
		99	5.27	33.26	23.05	16.14	48.41
15	25.0	90	7.71	5.32	46.24	32.37	64.73
		95	6.97	6.39	44.37	31.06	62.12
		99	5.41	17.11	36.32	25.42	50.84

表 3-2 NAS 電池でのシミュレーション結果

設定条件			計画達成率 %		売電計画に対する 不足量 %		売電量 %			売電量 百万円		
蓄電池容量		目標 滞在 率 %	昼間	夜間	昼間	夜間	昼間	夜間	合計	昼間	夜間	合計
MW容量	MWh容量											
5	28.8	90	91.45	91.48	1.42	0.83	50.83	28.90	79.72	554.6	249.1	803.7
		95	95.80	95.44	0.63	0.42	45.98	26.52	72.50	501.7	228.6	730.4
		99	99.20	99.16	0.08	0.05	32.06	18.72	50.78	350.2	161.4	511.6
10	57.6	90	95.04	95.91	0.91	0.43	55.29	31.05	86.35	603.8	267.7	871.5
		95	96.18	96.72	0.71	0.37	54.85	30.75	85.60	599.0	265.1	864.1
		99	99.02	98.82	0.12	0.11	47.20	27.16	74.36	515.6	234.1	749.8
15	86.4	90	97.65	98.05	0.40	0.21	56.95	31.64	88.59	622.1	272.8	894.9
		95	97.97	98.41	0.36	0.18	56.95	31.57	88.52	622.2	272.2	894.3
		99	99.08	98.96	0.17	0.12	55.95	31.24	87.19	611.3	269.3	880.6

(続き)

設定条件			蓄電池空/満蓄時間 %		平均充放電量/日		
蓄電池容量		目標 滞在率 %	空	満蓄	充電量 MWh	放電量 MWh	DOD %
MW容量	MWh容量						
5	28.8	90	3.01	8.92	27.27	20.47	47.40
		95	1.09	20.64	23.72	17.80	41.20
		99	0.29	37.38	18.10	13.58	31.44
10	57.6	90	1.29	1.41	47.15	35.44	41.01
		95	1.04	2.80	45.12	33.91	39.25
		99	0.31	22.79	36.77	27.62	31.97
15	86.4	90	0.45	0.39	57.74	43.38	33.47
		95	0.45	0.63	57.24	43.02	33.19
		99	0.21	3.31	52.92	39.79	30.70

3.4. 自立運転のための不平衡補償

3.4.1. マイクログリッド自立運転における課題

PV や WT の効果的な利用法として、災害時の商用系統ダウン時の非常電源としての活用や、燃料供給コストの高い離島における活用があげられる。

このような場合は巨大な商用系統に繋がる連系運転と異なり、独立系統内で周波数や電圧を自身で維持する自立運転型マイクログリッドとなる。自立運転型マイクログリッドでは、大別して以下の課題がある。

(1) 周波数変動

一般にマイクログリッドは系統規模が小さいため、系統容量に対する需要変動の比率が大きくなる。特に同期発電機を主電源とするマイクログリッドでは、需給アンバランスが発生すると、発電機の垂下特性に従い、極めて敏感に周波数偏差が発生する。例えば空調機など誘導機負荷起動時の消費電力は瞬間的に定格容量の数倍に上る。更に PV、WT といった天候任せの発電設備が加わると、その正確な発電予測が現状技術では難しいことから、これら発電変動も需給アンバランス要因となる。

(2) 三相不平衡

大規模系統では、局所的な不平衡があっても全体の平準化効果によって不平衡が問題になることはない。しかし小規模系統でかつ单相負荷の比率がある程度高いようなマイクログリッドでは、三相不平衡はグリッド内でキャンセルされず、それがそのまま周波数と電圧を維持する主電源へ逆相電流の負担となる。

主電源が同期発電機の場合、その許容逆相電流は、日本電機工業会規格 JEMA-1354 等で定格電流の 15%以下と規定されている。これ以上の逆相電流が流れると、発電機の回転が不安定となり機械的に障害が出るため、発電機に併設される逆相電流リレーにより、秒レベルで検出・発電機トリップとなる。

またインバータ型電源の場合は、逆相電流への耐量は大きいものの、いずれ

かの相の電流がインバータ定格値を超えると全体が停止するため、可能な限り三相不平衡をなくし、各相とも定格値近くまでフル活用することが望ましい。

(1) については、3.2 節で紹介したように、既に多くの研究・開発がなされているため、ここでは特に (2) に主眼を置いて、その対策技術について検討する。

3.4.2. 対象マイクログリッド

検討題材として、図 3-12 の自立運転型マイクログリッドについて対策技術の開発と検証を行った^[3-17, 18, 25, 26]。同図の系統は、NEDO 技術開発機構からの委託事業「新エネルギー等地域集中実証研究」の中の「八戸市 水の流れを電気で返すプロジェクト」（三菱総合研究所，三菱電機，八戸市の 3 者共同で実施）における系統である。

バイオマス同期発電機 170kW×3 台を主電源とし、PV や WT、鉛蓄電池などの電源から構成されている。負荷はこれまで多くのマイクログリッドで対象とされてきたような動力負荷主体ではなく、市庁舎や学校といった一般負荷であり、三相動力負荷と単相電灯負荷の比率が半々程度と、かなり不平衡の危険性が高い系統である。

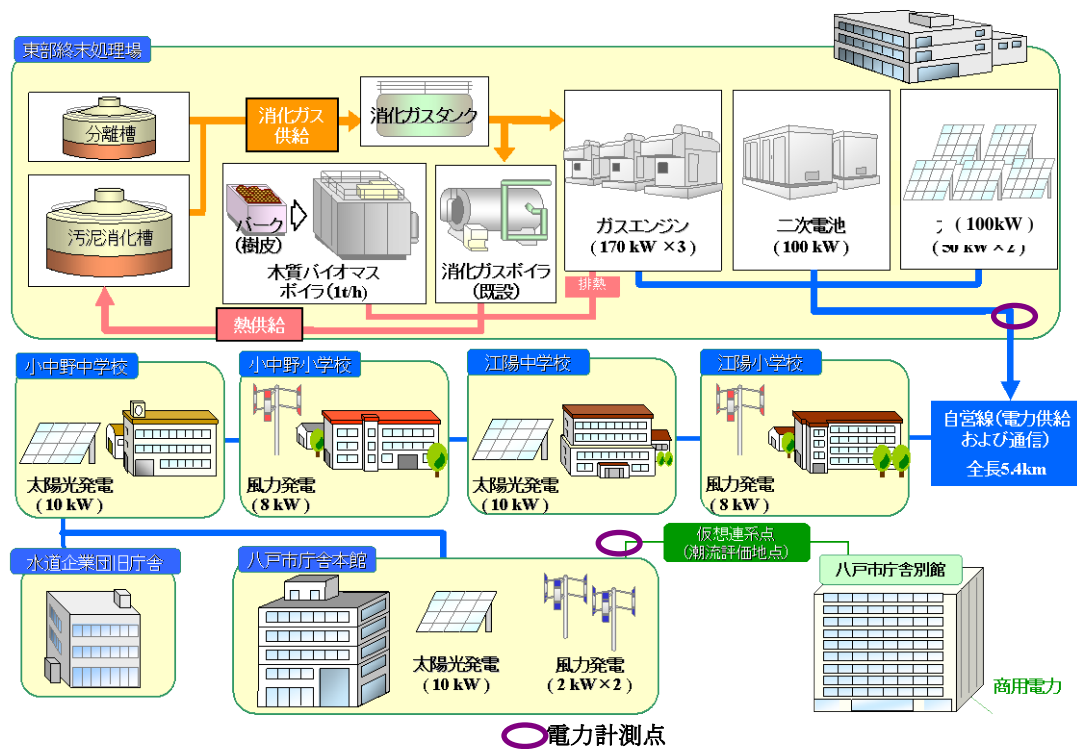


図 3-12 自立運転型マイクログリッドの例

表 3-3 自立運転型マイクログリッドの設備構成

設備名	容量
ガスエンジン発電機	170[kW] (200kVA) × 3 台
鉛蓄電池	±100[kW] × 1 台
太陽光発電	50[kW] × 2 台, 10[kW] × 3 台
風力発電	8[kW] × 2 台, 2[kW] × 2 台
木屑ボイラー	1.0[t/h]
消化ガスボイラー	4.2[t / h]
排ガスボイラー	0.09[t/h]

3.4.3.不平衡対策

(1) 制御目標

前述のとおり、同期発電機では逆相電流耐量を超過するとトリップし、マイクログリッド全体が停電となる。そこでマイクログリッド内の逆相電流を、同期発電機の耐量以内に抑えるべく、発電機定格電流の15%以下とすることを目標とした。なお、今回のマイクログリッドで使用したガスエンジン型同期発電機では、定格電流の15%強である2.8A(6.6kV基準)が耐量の限界となっている。それに対し予備計測段階では、最大9.6Aの逆相電流が発生していた。

(2) 不平衡抑制方式

まず自立運転に先立ち、約半数を占める単相負荷がほぼ均等となるように表3-4のように接続相の付替え工事を行ったが、依然5A前後の逆相電流が観測された。これは、市庁舎や小中学校など需要家の主負荷は照明や空調であり、需要家単位で使用量や起動停止時間に“ばらつき”が多いためである。

表 3-4 マイクログリッド内の単相負荷容量と接続相

接続相	接続負荷 (ピーク電力)	ピーク合計
RS 相	市庁舎(60kW) 江陽中(30kW)	90kW
ST 相	市庁舎 (50kW) 江陽小(30kW, RS 相から付替え)	80kW
TR 相	市庁舎 (30kW) 小中野中(30kW, ST 相から付替え) 小中野小(30kW, RS 相から付替え) 水道企業団 (25kW)	115kW

従来の不平衡補償では補償したい場所（ここでは同期発電機の出口端）にアクティブフィルタ等の補償装置を設置し、設置点を通過する逆相電流を打消すべく、逆位相の逆相電流を出力させる方式が一般的であった。その思想に基づきマイクログリッドの不平衡補償を考えると、図 3-13 のようになる。即ち、ガ

スエンジン発電機の逆相負担を軽減するために、その連系点の不均衡量を計測し、その値が零となるようにフィードバック制御をかける。

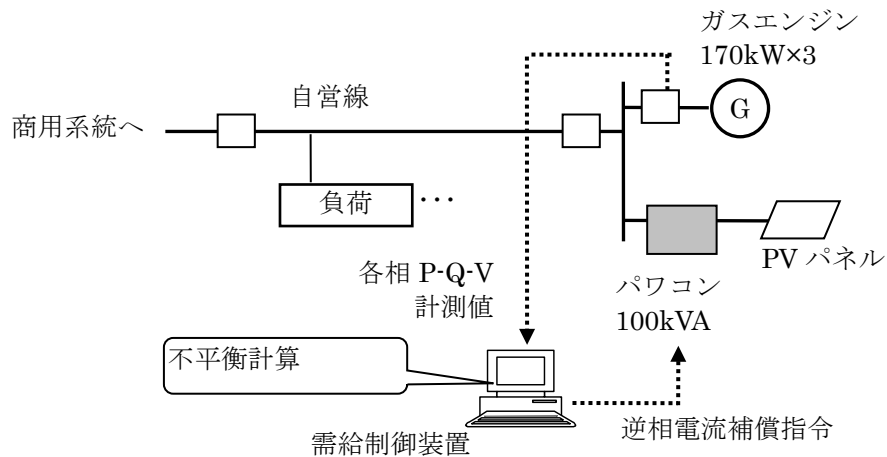


図 3-13 従来の不平衡補償

それに対し本研究では、図 3-14 のように、需給制御装置でマイクログリッド自営線の電力出入り口に該当する商用系統連系点（図 1 での八戸市庁舎本館内）と、発電所である東部週末処理場から自営線への送出し点の 2 箇所で各相 PQV を遠隔計測し、それを元にマイクログリッド内の逆相電流総量を算出、一元管理する。また、各電源と補償装置の逆相負担配分を決定し、補償装置にその出力指令を与える。この方式では、以下の長所がある。

- ・ 系統の不均衡量を直接計測するため、フィードバック制御が不要となり、制御応答性が高い。
- ・ 自立運転時のみならず、連系運転時もマイクログリッド内の不平衡を補償できる。
- ・ 補償設備が複数・多地点に散在している場合でも、需給制御装置でその補償配分を任意に決定できる。
- ・ マイクログリッドの様々なトポロジーにも柔軟に対応できる。

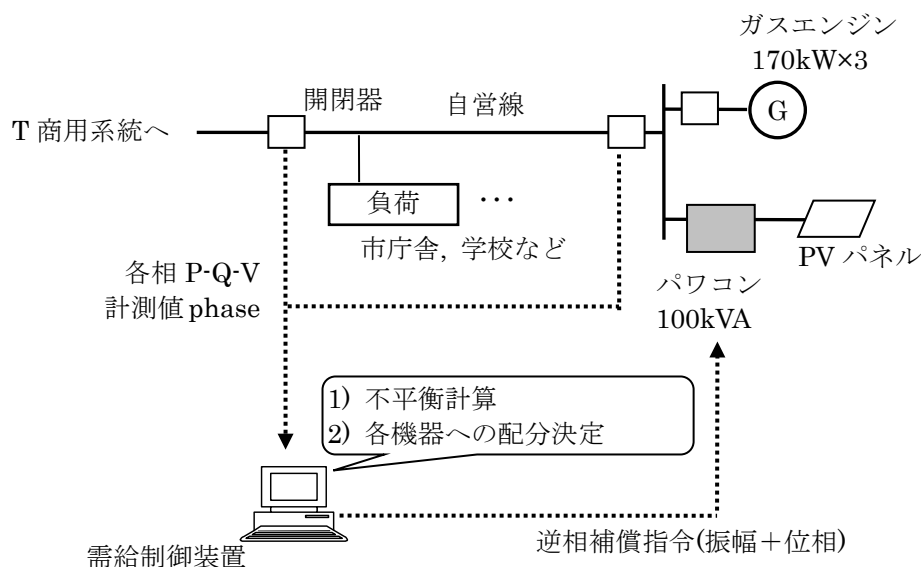


図 3-14 新たな不平衡補償

マイクログリッド内の不平衡量を求めるには、まず計測点ごとに、各相電流（R相/S相/T相電流）を求める必要がある。相電流を直接計測する方式もあるが、産業用計測器としては電力（有効電力P，無効電力Q）計のほうが一般的であるため、システムの汎用性を考慮し、需給制御装置でP，Qから相電流を算出する方式とした。需給制御装置の演算・補償手順としては、下記を1秒周期で実施した。

① 各相電流の算出（計測点ごと）

計測点ごとのR相/S相/T相の有効・無効電力から、R相/S相/T相電流の大きさと位相（各々、R相/S相/T相電圧基準）を求める。ここで、一般に電圧不平衡は無視できるレベルであることから、電圧は三相平衡と仮定して算出した。すなわち、相電流の大きさ I_r 、 I_s 、 I_t は下式で与えられる。

$$I_r = \frac{\sqrt{P_r^2 + Q_r^2} \times \sqrt{3}}{V}, \quad I_s = \frac{\sqrt{P_s^2 + Q_s^2} \times \sqrt{3}}{V}, \quad I_t = \frac{\sqrt{P_t^2 + Q_t^2} \times \sqrt{3}}{V}$$

・・・ (3-4)

ただし、V：計測点の線間電圧（三相平均値）

P_r, Q_r ：R相の有効・無効電力

P_s, Q_s ：S相の有効・無効電力

P_t, Q_t ：T相の有効・無効電力

また、各相電流と相電圧の位相差 $\theta_r, \theta_s, \theta_t$ は下式で与えられる。

$$\theta_r = \tan^{-1} \frac{Q_r}{P_r}, \quad \theta_s = \tan^{-1} \frac{Q_s}{P_s}, \quad \theta_t = \tan^{-1} \frac{Q_t}{P_t} \quad \dots (3-5)$$

② 逆相電流の算出（計測点ごと）

計測点ごとに求めた R 相/S 相/T 相電流値に対し、回転座標系から対称座標系への変換を行い、逆相電流の大きさ（振幅）と位相を求める。

逆相電流 I2 は、各相電流の大きさ I_r, I_s, I_t 、ならびに R-S 相, T-R 相間の位相差 θ_{rs}, θ_{tr} から、下式によって R 相電流を基準とした（= I_r の位相をゼロとした）ベクトルとして求められる。

$$\begin{aligned} I2 = & \frac{1}{3} \left\{ |I_r| + \left(-\frac{1}{2} \cos \theta_{rs} + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta_{rs} \right) |I_s| + \left(-\frac{1}{2} \cos \theta_{tr} + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta_{tr} \right) |I_t| \right\} \\ & + j \frac{1}{3} \left\{ \left(-\frac{1}{2} \sin \theta_{rs} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta_{rs} \right) |I_s| + \left(\frac{1}{2} \sin \theta_{tr} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta_{tr} \right) |I_t| \right\} \end{aligned} \quad \dots (3-6)$$

ただし、 $\theta_{rs} = \theta_s - \theta_r, \theta_{tr} = \theta_r - \theta_t$

これから、I2 の位相 θ_{i2} (I_r 基準) は下式で求められる。

$$\theta_{i2} = \tan^{-1} \frac{\left(-\frac{1}{2} \sin \theta_{rs} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta_{rs} \right) |I_s| + \left(\frac{1}{2} \sin \theta_{tr} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \theta_{tr} \right) |I_t|}{|I_r| + \left(-\frac{1}{2} \cos \theta_{rs} + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta_{rs} \right) |I_s| + \left(-\frac{1}{2} \cos \theta_{tr} + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \theta_{tr} \right) |I_t|} \quad \dots (3-7)$$

ここで、R相電流の位相は、有効電力・無効電力によって系統内の地点ごとに異なるため、それを基準とした I_2 のベクトル表現では、加算・減算には不向きである。そこで R 相電圧を系統内全点での共通基準として採用し、下式で逆相電流の位相を扱うことにした。

$$\theta_{i_2} = \theta_r + \theta_{I_2} \quad \dots (3-8)$$

但し、 θ_{i_2} : R 相電圧を基準とした逆相電流位相

θ_r : R 相電流と R 相電圧との位相差

③ マイクログリッド内の逆相電流の算出

計測点ごとに算出した逆相電流 (R 相電圧ベース) を合算し、マイクログリッド内の総逆相電流とする。

④ 逆相電流の負担配分の決定

求めた逆相電流に対し、逆相補償する電源ごとの負担量を決定する。但し、計測と制御の時間遅れを考慮し、1 秒周期で算出される逆相電流に時定数 10 秒程度の一時遅れフィルターを通し、短期的な変動は除外した。本プロジェクトでは、逆相電流の主体を後述の PV-PCS に負担させた。残りはガスエンジンが自動的に負担することになる。

⑤ 各電源への指令値への変換

決定した逆相電流は、高圧 R 相電圧ベースである。逆相補償する電源が低圧連系である場合、変圧器の結線方式、変圧比を考慮した指令値に置き換える。例えば Y- Δ 結線の変圧器では、正相は遅れ方向に 30 度、逆相は進み方向に 30 度ずれるため、逆相電流の位相は、基準電圧である正相の R 相電圧に比べて更に 60 度加算する必要がある。また逆相電流の大きさは、変圧比の逆数を乗じて変換する。

指令を受けた電源では、指令された逆相電流を、自身が出力する正相電流に加算して出力する。

(3) 不平衡補償 PV-PCS

不平衡補償装置としては、一般にはアクティブフィルタなど専用のパワーエレ機器が用いられる。八戸では電源の1つで、フル出力期間は短期なためインバータ能力に余裕があり、特に夜間は使用されない三相出力 PV-PCS (定格 50kVA × 2 台) を有効活用することで逆相電流補償の実現を図った。

すなわち図 3-15 のように PV-PCS の MPPT (Maximum Power Point Tracking : 最大点負荷追従) 制御と PV-PCS の瞬時波形を生成する電流制御の間に、逆相補償電流の合成と、合成出力を定格内に収める制限回路 (Limiter) を追加し、需給制御装置からの逆相電流指令を出力させた。PV-PCS では、合成出力の大きさが 1 相でもインバータ定格電流を超えそうな場合は、制限回路が働いて合成出力を縮小させる。縮小方法として、以下の 2 つの運転モードを用意した。

① 逆相補償優先モード

需給制御装置より受けた逆相電流を優先的に出力し、インバータ定格内で余力のある範囲でのみ PV パネルによる発電を出力する。両合成値が定格を超過する場合は、PV パネル発電を縮小させる。主に自立運転時の運転を想定。

② PV 出力優先モード

PV パネルによる発電電力を最大限に取り出す MPPT 制御を優先し、インバータ定格内で余力のある範囲で逆相電流を出力する。主に系統連系時の運転を想定。

対象系統では、定格 100kVA の PV-PCS を使用しているため、理論上 6.6kV 基準で最大 8.75A ($=100\text{kVA} \div 6.6\text{kV} \div \sqrt{3}$) までの逆相電流が出力可能である。

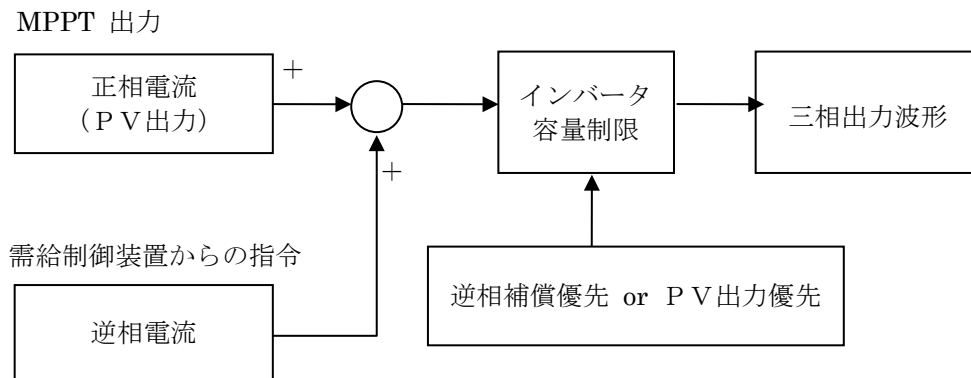


図 3-15 不平衡補償付 PV-PCS の制御回路

3.4.4.実証結果

(1) 自立運転への移行

2007年11月3日(土)～10日(土)までの1週間、同マクログリッドで連系運転から移行する形で自立運転試験を実施した。連系運転状態において需給バランス制御機能の目標値設定を変更し、連系点有効電力、無効電力、逆相電流が零となるよう調整した上で、現場操作により市庁舎本館-別館間のCBを開放して自立運転状態に遷移した。

図 3-16 に連系状態から自立運転への移行時の電圧・周波数を示す。ガスエンジン型同期発電機の運転モードは、

- ① 連系運転時
 - 有効電力：指令値追従
 - 電圧：力率一定 (0.95) モード
- ② 自立運転時
 - 有効電力：周波数の垂下特性
 - 電圧：設定値一定 (6.7kV) モード

と切り替わる。自立運転移行直後に電圧が過渡的に上昇、その後 6.7kV に落ち着いているが、同期発電機にて連系解列を認識して自立運転モードに遷移する数秒のタイムラグが原因である。また周波数については事前潮流がほぼゼロとなっていたため大きな変化は発生しないが、定常的に発電機のガバナ特性によ

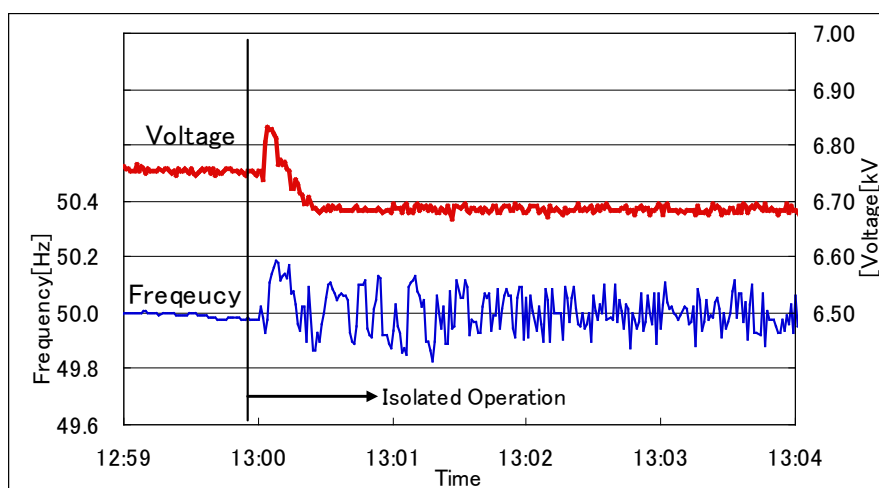


図 3-16 連系運転から自立運転移行時の周波数と電圧

る周波数変動が現れている。なお、自立運転終了後は、市庁舎本館を自営線から切り離し商用系統に停電切り替え後、自営線-本館を同期投入することで連系運転に再移行した。

(2) 不平衡補償結果

一例として図 3-17 に、2007 年 11 月 5 日(月)におけるマイクログリッド内の逆相電流総量、PV-PCS による補償量、ガスエンジン発電機の負担量（全て 6.6kV 基準）の推移を示す。また図 3-18 に同日の負荷総量の推移を示す。

逆相総量は日や時間によって変動は異なり、規則性は殆ど見られない。これはその日の外気温によって空調負荷量が左右され、それが需要家によって不均等であるためと推測される。但し負荷が急減する平日 17 時頃は総じて逆相総量が増えている。

図 3-17 から、系統内の逆相電流は不規則に激しく増減しているが、PV-PCS
 が高い追従性で補償していることが分かる。また、ガスエンジン発電機の逆相
 負担は、変化に因らず 1 A 弱にほぼ一定に保たれおり、同期発電機の耐量である
 2.8A 以下に維持できている。

同期発電機の逆相負担がゼロでない理由は、今回補償外としたマイクログリ
 ッド電源端の単相負荷（発電設備の補機など）による逆相成分があるためであ
 る。

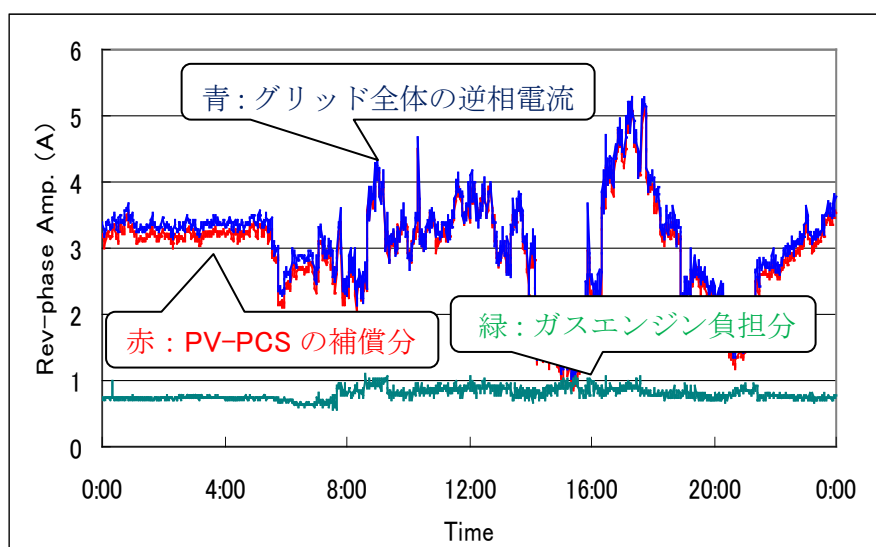


図 3-17 自立運転時の逆相電流の推移

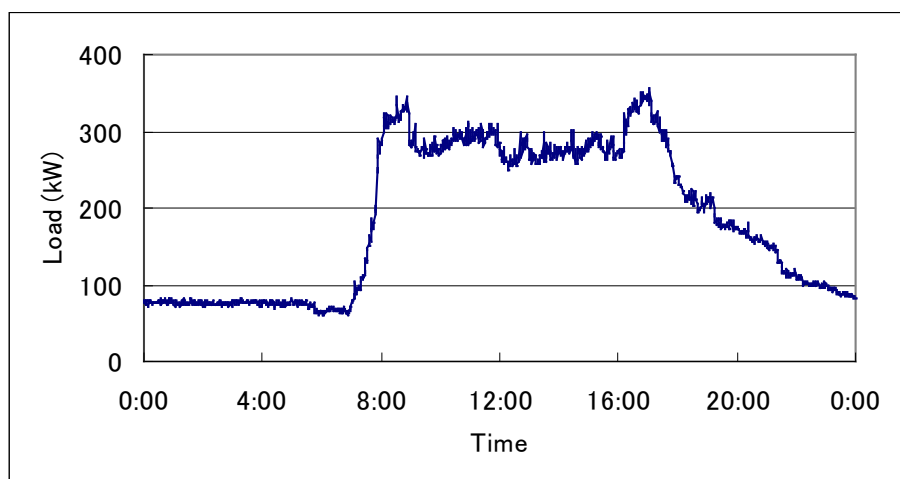


図 3-18 図 3-17 と同日の負荷カーブ

3.5. 結言

本章では、従来は商用系統にとっては変動要因としてネガティブに受け止められていた PV、WT を、より積極的に活用する技術について検討した。

蓄電池併設による計画発電においては、収益最大という目的関数の下で、発電計画値の設定方法と、それに適した蓄電池容量をシミュレーションを通して選定する方式を検討した。

また、実データに基づくシミュレーションを通して、100%の計画達成を目指さず、95%程度の計画達成率を目指すことで、事業性も高くなり、かつ蓄電池容量は大幅に減らすことが可能であるという知見が得られた。

本研究で開発した蓄電池併設による計画発電では、以下の新規性と優位性を有する。

- ・ RE による発電事業の普及に向け、予測時間ごとの RE 発電予測誤差分布を考慮し、統計的に見て最大収益が期待できる計画立案方法を確立。
- ・ 収益最大化のためには、計画値を低めに設定する 100%計画達成を指向せず、計画値を高めに設定することによる収益増と、計画未達による損失とのトレードオフとして定式化。
- ・ 年間シミュレーションによる定量的評価で、収益最大となるパラメータとそのための必要最小限の蓄電池容量を試算。

現在多くの地域で進められている、蓄電池併設型 RE 発電実証の多くは、RE 容量とほぼ同容量の蓄電池を併設し、100%の発電計画達成や変動吸収をめざしている。しかし商用ベースで考えると、このような設備投資では採算性の実現は難しく、本研究のように、ある程度の妥協と割り切りを伴った運用により、コスト削減を図っていくことが重要であると考ええる。

また、マイクログリッド自立運転では、多くの小規模独立系統で問題となる不平衡対策に着目し、PV-PCS による新たな不平衡補償方式を開発した。八戸マイクログリッドでの 1 週間にわたる自立運転の実証を通し、その有効性が十二

分に確認できた。

本研究で開発した不平衡補償の枠組みでは、以下の新規性と優位性を有する。

- ・ 今後普及が予想される、住宅など単相負荷を主体としたマイクログリッドの電流不平衡問題に着眼。
- ・ マイクログリッド全体の電流不平衡を集中監視し、各分散型電源へその補償量を配分するといった、ICT を活用した新たな不平衡補償の枠組みを考案。
- ・ 今後配電系統に多数連系が期待できる、三相 PV-PCS における不平衡補償回路を開発。
- ・ 従来は電力系統の悪影響要因として見なされていた PV や WT への、電力品質補償機能という新たな付加価値を創造。

近年、住宅や複合施設を主体とした特定供給（一種のスマートコミュニティ）が増えている。災害時の自立運転が付加価値として注目されているが、このような小規模独立系統においては、不平衡の問題は必ず発生する。本研究で検討した不平衡補償方式は、任意の場所に連系する PV に付随する PV-PCS の余力を活用し、系統の電力品質を向上させる手段として広く応用可能であり、当社のマイクログリッド、スマートコミュニティビジネスの差別化技術として活用されている。

参考文献

- [3-1] 千住・菊永・與那・舟橋：“風力発電機に用いる最適蓄電池設備容量に関する検討”，電気学会論文 B, Vol. 128, No. 1, pp. 321-327 (2008)
- [3-2] 赤塚・原・北・伊藤・植田・齋藤：“大規模太陽光発電所の出力変動抑制用蓄電池容量の試算”，電気学会論文 B, Vol. 131, No. 1, pp. 87-93 (2011)
- [3-3] 由本・七原・輿水：“風力発電出力平滑化用蓄電池の充電レベルの制御法 -残存容量フィードバック制御に関する考察-”，電気学会論文 B, Vol. 129, No. 5, pp. 605-613 (2009)
- [3-4] 村上・横山・多田：“大容量風力発電が導入された電力系統における周波数制御のための蓄電池容量評価に関する基礎的検討”，電気学会論文 B, Vol. 126, No. 2, pp. 236-242 (2006)
- [3-5] 上原・安里・與那・浦崎・千住・舟橋：“離島電力系統における負荷電力推定を用いた蓄電池併設型風力発電システムによる周波数制御法”，電気学会論文 B, Vol. 130, No. 12, pp. 1039-1048 (2010)
- [3-6] 名古屋・駒見・荻本：“太陽光発電が大量導入された電力系統における蓄電池を用いた負荷周波数制御の一方式”，電気学会論文 B, Vol. 132, No. 4, pp. 325-333 (2012)
- [3-7] 嶋田・川崎・植田・杉原・黒川：“集中連系型太陽光発電システムにおける翌日連系点電力の計画・制御を可能とする蓄電池容量の検討”，電気学会論文 B, Vol. 129, No. 5, pp. 696-704 (2009)
- [3-8] 島陰・曾根・角田・加藤・鈴置：“30分同時同量を制約とするマイクログリッドにおける太陽光発電システム導入量に応じた NaS 電池 kW 容量響” 電気学会論文 B, Vol. 130, No. 8, pp. 751-759 (2010)
- [3-9] 林・下尾・若尾：“蓄電池併設型太陽光発電システムの運用設計における発電量・負荷量の予測誤差の影響評価”，電気学会論文 B, Vol. 133, No. 11, pp. 903-909 (2013)
- [3-10] 加藤・曾根・島陰・鈴置：“30分同時同量を目的としたマイクログリッドの設備計画および運転に対する太陽光発電出力予測精度の影響” 電気学会論文 B, Vol. 132, No. 4, pp. 350-358 (2012)
- [3-11] M. Koller, B. Vollmin: ” Preliminary Findings of a 1MW Battery Energy Storage Demonstration Project” , CIRED 22 回大会, paper-0568 (2013)
- [3-12] W. Michael, T. Frank: ” Operation of Large Scale Autonomous Hybrid Power Supply System with Renewables” , CIGRE2012 パリ大会, C6-302 (2012)
- [3-13] 小島・古塩・中村：“マイクログリッド向け需給制御機能の開発と実証検討”，電気学会論文 B, Vol. 128, No. 2, pp. 429-436 (2008)
- [3-14] 林・島崎・近藤・長田・飯坂・勝野・中西：“マイクログリッド向け需給制御シス

- テムの開発”，電気学会論文 B, Vol. 134, No. 1, pp. 40-48 (2014)
- [3-15] 角田・西岡・野呂・篠原・伊東・矢吹・川上：“新エネルギー発電装置を用いたマイクログリッドの自立運転の検討”，電気学会論文 B, Vol. 127, No. 1, pp. 145-153 (2007)
- [3-16] 島陰・角田・内山・加藤・鈴置：“新エネルギーの普及を目的としたマイクログリッドにおける分散型電源の需給制御”，電気学会論文 B, Vol. 128, No. 1, pp. 143-150 (2008)
- [3-17] 高野・小島・天満・下村：“八戸市マイクログリッドにおける自立運転の実証”，電気学会論文 B, Vol. 129, No. 4, pp. 499-506 (2009)
- [3-18] 天満・河野・下村・片岡・合田・上坂：“マイクログリッド自立運転時の電力品質維持手法の提案と開発”，電気学会論文 B, Vol. 126, No. 10, pp. 1032-1038 (2006)
- [3-19] 進士・関根・秋澤・柏木・藤田・松原：“分散型電源によるマイクログリッド内の電力変動抑制に関する考察”，電気学会論文 B, Vol. 126, No. 1, pp. 14-20 (2006)
- [3-20] E. Coffman, W. Steigelmann: “Microgrids - Providing Power Quality, Reliability, Security, and Economic Development”, DistribuTECH (2004)
- [3-21] 横山・合田・林・浅野・坂東・今井・他：“スマートグリッドの構成技術と標準化”，日本規格協会 (2010)
- [3-22] 横山：“スマートグリッド”，日本電気協会新聞部 (2013)
- [3-23] P. Birkner, M. Laskowski, C. Rehtanz: “Generic Model for a Smart Distribution Grid, its Evolutionary Technical Implementation and the Energy Market Place of the Future”，CIGRE2012 パリ大会, C6-107 (2012)
- [3-24] 高野：“自然エネルギー発電のための電力貯蔵技術”，電気学会論文 B, Vol. 126, No. 9, pp. 857-860 (2006)
- [3-25] 高野・小島・下村：“八戸市水の流れを電気で返すプロジェクトその 3 ～自立運転のための不平衡補償の検討～”，平成 20 年電気学会全国大会, 6-231 (2008)
- [3-26] 小島・高野：“「八戸市 水の流れを電気で返すプロジェクト」における自立運転実証試験”，平成 21 年電気学会電力技術研究会, PE09003 (2009)

第4章 事例ベースエキスパートシステムによる系統操作支援技術

4.1. 緒言

REをはじめとする分散型電源の、系統全体における比重が増えるに従い、系統内の潮流分布が複雑化・多様化する。それに伴い、運用面での機械化・自動化が次々に推進されている。特に複雑な判断を要する業務については、知識工学の応用が期待され、系統事故時の事故点評定システム、事故復旧システム、平常時の操作手順などのいわゆるエキスパートシステムが開発されてきた。

エキスパートシステムの基本的な枠組みを図 4-1 に示す。エキスパートシステムはルールベースシステムとも呼ばれ、熟練オペレータなど専門家（エキスパート）の知識を何らかのルール表現に置き換え、知識ベース（ルールベースとも言う）に蓄えておく。解決すべき問題は、ワーキングメモリーに設定される。推論エンジンと呼ばれる機構が、設定された問題に適したルールを適宜選択・適用し、その結果（問題をブレイクダウンしたサブ問題など）を更にワーキングメモリーに設定する。推論エンジンは、前回のルール適用で新たに設定されたサブ問題に対し、更にルール選択・適用を行い、ワーキングメモリーを更新する。この作業を、最終の解決策が得られるまで繰り返す。

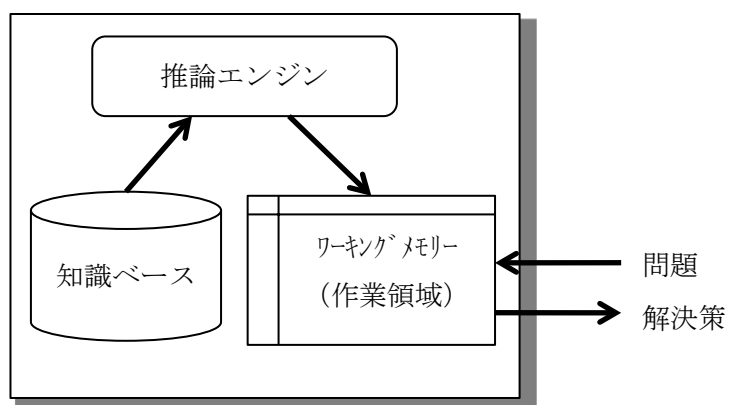


図 4-1 エキスパートシステムの枠組み

このエキスパートシステム構築においては、問題規模の増大・複雑化に従い、計算機システムへの運用知識移植や編集作業が困難となり、いかに効率よく知識獲得するかが課題となる。また獲得知識は相互依存しているケースが多いため、蓄える知識ベースの巨大化に伴い、知識編集作業が複雑となり、システム構築後の知識ベースは拡張性に欠ける結果となる。

一方、電力業界の構造改革と規制緩和により、今まで電力関係には関わりの薄かったガス事業者や住宅ディベロッパーが自営線によるマイクログリッドを構築し、需要家に電力供給する特定供給ビジネスが注目されている。このような新たな事業者・運用形態が生まれると、そこには新たな運用ノウハウが生じ、その活用が必要とされるようになる。

そこで、計算機システム内に蓄えられた操作事例から、知識ベースを自動的に構築・保守する事例学習アルゴリズム HCL (Hierarchical Concept based Learning) を開発した。

本章では、まず系統操作やエキスパートシステムの課題を明確化した上で、その関連研究について述べる。次に HCL の考え方と知識獲得技術について紹介し、変電所操作や地方給電操作への適用ケース、分散型電源を保有する特定供給を意識したマイクログリッド系統操作への適用ケースについて考察する。

4.2. 系統操作の課題と関連研究

4.2.1. 系統操作の課題

電力系統の操作手順を自動作成するには、下記の課題がある。

(1) 問題規模の大きさ

国内においては、電力系統の管轄は、取り扱う系統の電圧階級に応じて階層化されている。中央給電所は 275kV 以上の基幹系統を扱い、154kV 以下の送電系統は地方給電所や制御所、22kV 以下の配電系統は営業所の管轄となる。

1つの地方給電所の所管内変電所数、送電線数は、およそ300にのぼる。また営業所でも100本程度の高圧フィーダーを管理しており、取り扱う系統の規模が大きい。

国内系統は送配電線ともに網の目状に張り巡らされ、冗長性も高いことから、これらの操作では、操作前系統から目標系統へと切り替える手順はいく通りにも考えられ、問題としては組み合わせの爆発が生じる。

(2) 操作の多様性

以下の理由により、送配電線、変電所ごとに操作が多種多様である。

- ① 遮断器、断路器、保護リレー、中性点設備などの機器種別や設置方法がそれぞれ微妙に異なる。
- ② 運用形態が、設備保守工事などの関係上、標準形態に必ずしもなっていない。
- ③ 特別高圧や高圧需要家（以下“需要家”）では、設備の構造形態、運用形態が需要家ごとに異なる。

この多様性が、操作手順作成の自動化を阻む主要因となっている。ここでは、地方給電所における需要家を含めた線路作業停止を例に、操作の多様性について説明する。

通常、給電所から変電所に発せられる操作指令手順は「〇〇線の作業停止」などの目的指令である。しかし需要家に対しては、安全のため、遮断器などの機器操作まで展開した操作手順を作成する。しかし需要家での線路停止手順は、それぞれ微妙に異なる。

例えば2回線送電線から受電する需要家の構成例を図4-2に示す。通常、2回線のいずれか一方から受電し、他方からの受電回路にある遮断器、断路器は開放されている。ここで同図左上のように、系統側断路器と遮断器を開放して需要家側断路器は投入したままとするか、同図中上のように全断路器・遮断器を開放するか、同図右上のように遮断器のみ開放しておくかは、送電線事故時における停電時間の許容範囲や安全への考え方により、需要家ごとに異なる。また、同図下のように、設備構成自体も異なる場合がある。操作手順は、これらの個別事情に応じて作成する必要がある。

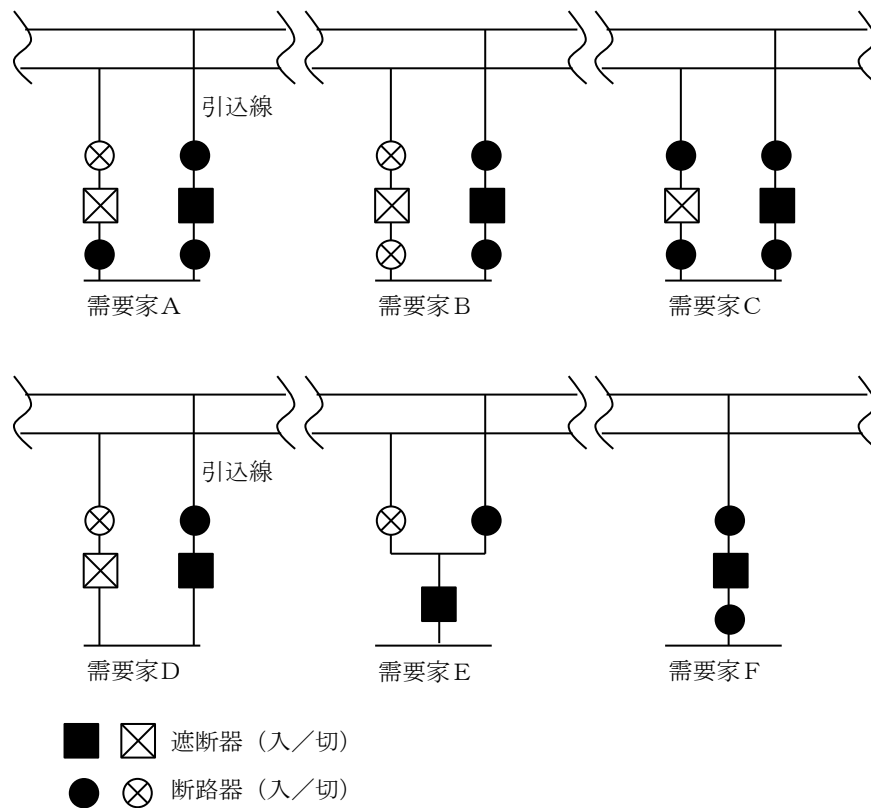


図 4-2 特別高圧受電の需要家の回路構成

4.2.2. 系統操作の関連研究

この複雑な系統操作手順作成の自動化に対し、いくらかの研究開発がなされている^[4-1]。文献[4-2]では、エキスパートシステムによる手順作成に加え、潮流計算による停電有無判定や、位相角判定などの制約違反チェック機能を追加している。もし潮流計算で停電や位相角違反などの制約違反が検出された場合には、それに対処した手順を追加・修正する。しかし1手順ごとに潮流計算を回すとなると、計算処理がかなり重くなることが予想される。

オブジェクト指向の概念を取り入れ、エキスパートシステムの知識と推論エンジンを一体化したオブジェクトとして表現した試みもある。文献[4-3]では、

設備機器ごとにエージェントと呼ばれる一種のオブジェクトを設定し、それらが互いに協調しあって手順を作成していくといった、マルチエージェント方式のシステムを提案している。

文献[4-4]では、当時は処理性能の高いワークステーション上に実装することが常識的であった操作手順エキスパートシステムをパソコン上に実装するとともに、本論文の5章で詳述する動的検証の枠組みを取り込んでいる点で注目される。

また平常時操作以外にもエキスパートシステムを適用した研究がある。文献[4-5]では、基幹系統の事故復旧操作への適用例であり、再送電経路の変更や逆再送電などの複雑な手順作成に取り組んでいる。また操作手順に限らず、設備保守支援など電力分野へのエキスパートシステム適用は幅広く検討され続けている^[4-6]。

海外においても近年、配電自動化などの自動化システムが普及し始めており、それに伴い、主に系統事故時の自動復旧操作を題材に、手順作成が研究されている。但し多くは手順作成を、操作回数などを最小化する最適化問題として捉えている。最適化手法としては、問題への依存性が強く汎用性の低いヒューリスティックと、依存性を排除したメタヒューリスティックに分類される。文献[4-7]では、事故復旧操作手順での操作回数最小化を目的に、ヒューリスティックな最適化手法を採用している。一方で文献[4-8]では、平常時でのロスミニや電圧適正化を目的に、メタヒューリスティックの1つである遺伝アルゴリズム(GA : Genetic Algorithm)を採用している。

また文献[4-9]のように、文献[4-3]と同じくマルチエージェントを使い、専属運転員という専門家のいない船上電力系統での、エキスパートシステムを適用した自己保全・自動復旧の実現を狙った例もある。

これらの研究は、いずれも開閉器や制御器の入り切り手順のみを扱っているが、実際の系統操作では、入り切り操作を伴わないような、機器状態確認などの手順作成も必要であり、単に最適化問題を解くアプローチのみでは十分とは言えない。

エキスパートシステムに限らず、より広く人工知能の技術という観点でも、新たな試みがなされている。例えば近年、マイクログリッドのように電力系統

の管理単位が細分化されることを前提とした、自律分散型電力ネットワークが注目されている。文献[4-10]では、相互の利益が最大となる電力取引を、機械学習を応用した人工知能に支援させる、といった試みもある。

電力分野でのエキスパートシステムや人工知能の実用化例は未だ少ないのが現状であるが、電力以外の分野では、文献[4-11]にあるワトソンに代表されるように、ユーザの質問に的確な回答をする対話型システムが、スマートフォンなどをターゲットに実用化が進んでいる。また、冷蔵庫などの家電機器でも、個々のユーザに合致するように学習機能を備えた製品が出始めている。

電力以外の分野で発展し続けるこれらの技術も加えられ、いずれ系統操作のエキスパートシステム実用化へも展開されていくことが期待される。

4.3. 階層的概念に基づく専門知識獲得方式

4.3.1. HCL の枠組み

操作目的が与えられ得た時、全体としてどのような機器操作をすれば良いかは分かっているとしても、それらをどの順番で実行すれば良いかは、個々の系統によるところも多い。また電氣的に深い専門知識が無ければ、重大事故を招きかねない誤操作をする危険性がある。例えば、断路器で系統を遮断するような操作をすれば、機器損傷や遮断失敗の危険性がある。そこで機器の操作実行順序に関する知識を自動獲得する枠組みを考えた。

図 4-3 に階層的概念に基づく事例学習アルゴリズム HCL の枠組みを示す[4-10, 11, 12]。HCL は、過去に作成された操作手順（事例）を入力として知識ベースの構築・更新を行うアルゴリズムである。

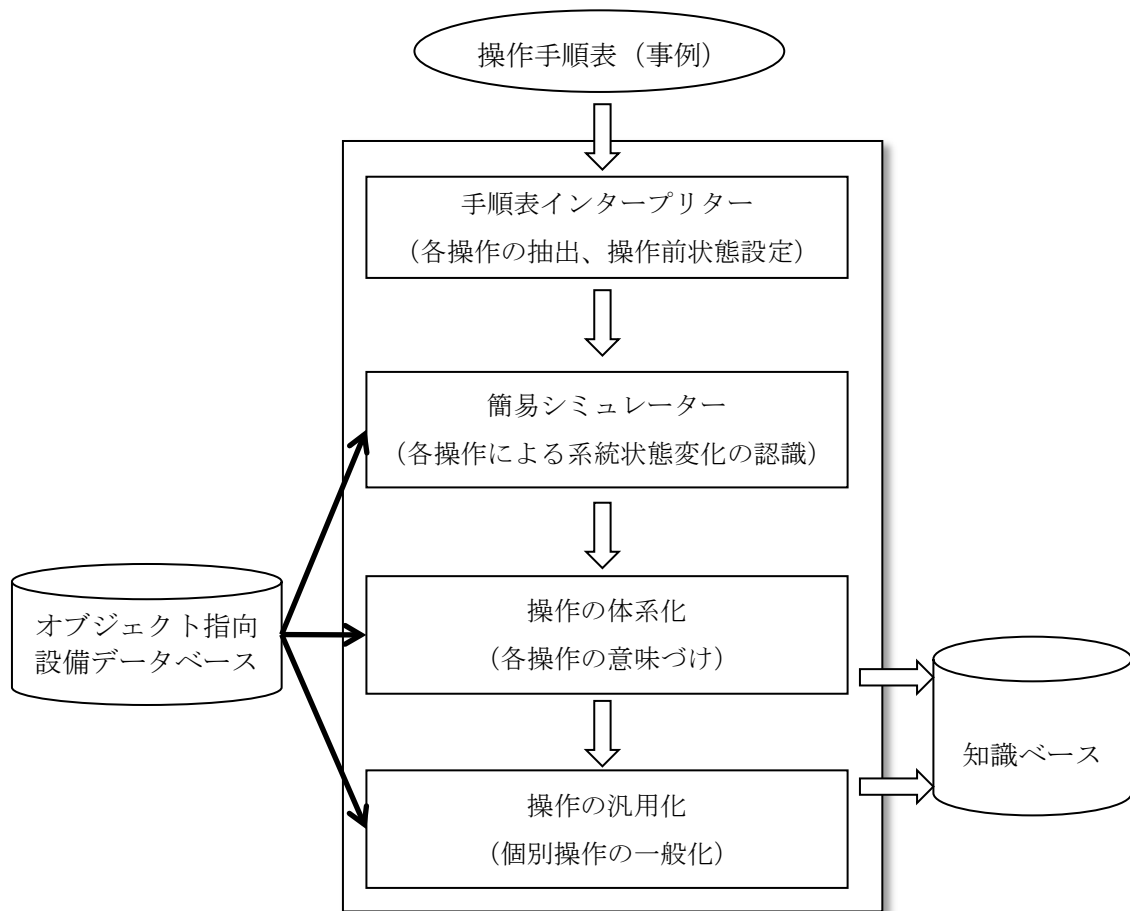


図 4-3 事例学習方式 HCL の枠組み

(1) 系統モデル表現

HCL では、個々の系統設備機器は、図 4-4 に示す階層構造の 1 つのオブジェクトとして表現されることを前提とする。設備間の構造的関係は、同図の設備間を結ぶ全体一部分関係などのリンクで表現する。

個々の設備機器（オブジェクト）は、可変属性と固定属性を持つ。可変属性は、現在の設備機器の状態を表し、2 種類の構造があるものとする。

① ENUM 値：所定の候補値の中のいずれかの 1 つの値をとる。例えば開閉器や遮断器の“入”“切”状態、母線、送電線の“充電”“停電”状態などはこの可変属性で表現する。

リスト値：所定の候補値の中の、不特定数の値をとる。例えば母線から見た接続中設備などはこの可変属性で表現する。

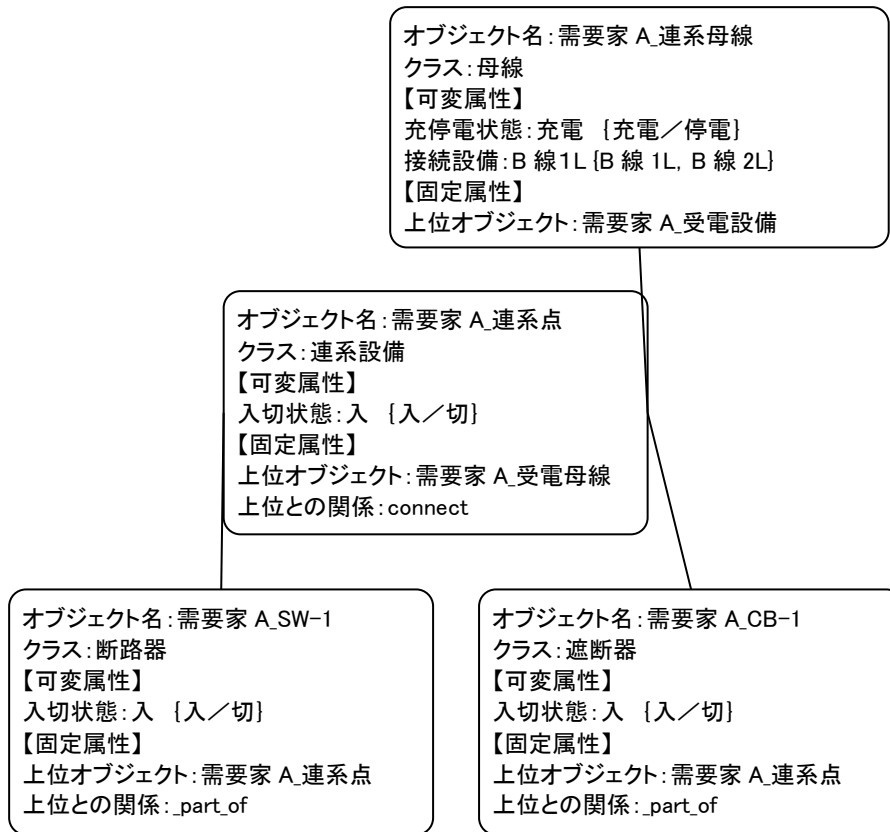


図 4-4 HCL におけるオブジェクト指向の設備機器モデル表現

なお、HCL では離散値のみを扱い、連続値は対象外とする。そのため電圧値や電力値などアナログ値の変化を扱う場合は、“定格内” “定格外” “などの離散値に置き換える必要がある。

(2) 事例

過去の事例としては、下記 2 つの情報とする。

- 機器の操作手順表
- 操作前状態（操作対象以外の機器も含めた全機器の初期状態）

(3) 手順表インタープリター

手順表インタープリターでは、手順表に記載されている（２）の操作前状態や機器操作手順を、（１）の最下層にある機器オブジェクトの可変属性の初期状態や状態変化の形式に置き換える。

（４）簡易シミュレーター

簡易シミュレーターでは、（３）の機器初期状態からその上位概念の設備機器の初期状態を設定し、さらに個々の機器操作によって、上位概念の可変属性にどのような変化が生じるかを認識させる。

状態変化は、可変属性が ENUM 値かリスト値によって、下記のように異なる。

① ENUM 値の場合

取りうる値は 1 値であり、任意の値から別の値への変化として表現される。

② リスト値の場合

任意の値が現在リストに追加されたか「add(X)」、削除されたか「remove(X)」として表現される。なお、系統操作に多い切替は、追加と削除の組み合わせとして表現可能である。例えば、X から Y への切替は、無停電切替に代表される「add(X), remove(Y)」もしくは停電切替に代表される「remove(Y), add(X)」となる。

（５）操作の体系化

事例からの学習は、体系化と汎用化からなる。体系化では、操作手順と簡易シミュレーターを通して生じた系統変化との因果関係を、木構造に整理する。すなわち、すべての“系統の状態変化”について、それに寄与した操作手順を選出し、その状態変化を実現するための手順として登録する。

（６）操作の汎用化

汎用化では、体系化の結果得られる個別知識の中に、異オブジェクト同クラスの木構造知識が複数ある場合に限り、他オブジェクトにも共通に使える知識出ると判断し、オブジェクト名を変数に置き換える。

4. 4. 系統操作手順作成への適用

4.4.1. システム構成

図 4-5 に HCL を適用した系統操作手順作成支援システムを示す。初期段階では、過去の様々な事例から学習により知識を獲得し、知識ベースを蓄える。

初期学習が終了した段階で運用段階へと移行する。運用段階では、その知識ベースを利用して、推論エンジンが与えられた操作目標を手順へと展開する。もし知識ベースが不完全なため手順への展開が完成できなかった場合には、運転員が手順を手動作成し、新たな事例として入力する。HCL はその手順から新たな知識を獲得する。

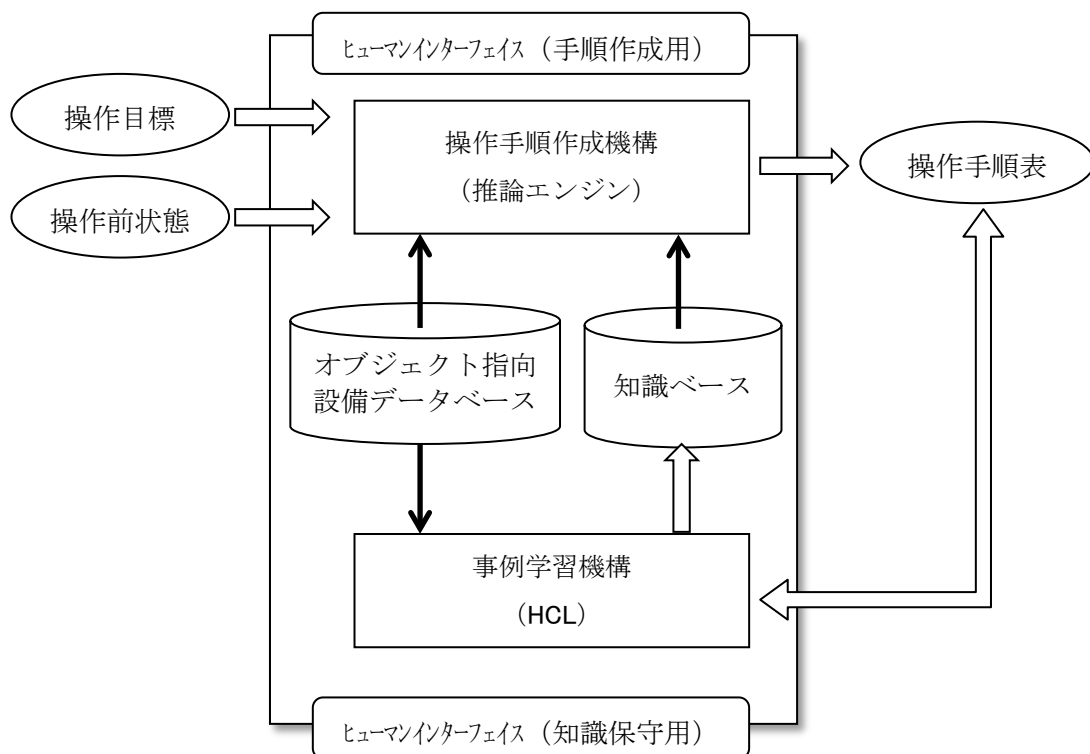


図 4-5 HCL を組み込んだ系統操作手順作成支援システム

4.4.2. 系統操作手順作成のための拡張

系統操作では、充停電など系統の電気的な状態変化を伴う機器の入切操作だけでなく、機器のロックや機器状態の確認など、電気的な変化を伴わない手順もある。そこで図 4-4 の設備機器表現の現在状態を表す可変属性に“ロック”や“確認”などの属性を追加し、図 4-3 の簡易シミュレーターでも電気的な状態変化と同様、それ以外の状態変化も仮想的変化として認識できるように拡張した。

図 4-6 は、図 4-4 の断路器、遮断器モデルに、“操作ロック”“入確認”“切確認”を拡張した例である。断路器や遮断器のこれらロック、確認操作も、上位概念の“需要家 A 連系点”では入切操作の一部として扱われることになる。

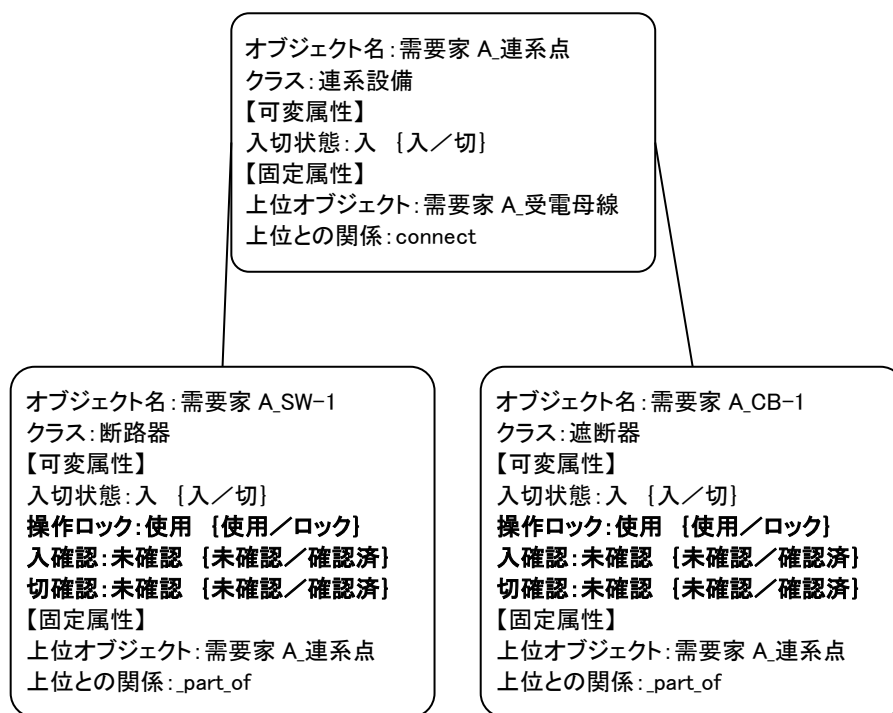


図 4-6 拡張した設備機器モデル表現

4.4.3. 系統操作手順作成例

図 4-7 の仮想の三菱変電所・二重母線の系統において、常時使用している甲母線を停止し、乙母線へと切り替える母線切替操作を例について考える。設備データベースは、図 4-8 のように階層化された設備機器モデル表現で与えられていることを前提とする。

表 4-1 は事例として与えられる母線切替操作の操作手順表であり、制御対象機器と制御内容が列挙されている。また手順表には、開閉器の入切操作のみならず、入確認などの状態確認も手順として含まれる。この手順表を取り込み、インタープリターにて設備データベース内のオブジェクト可変属性変化として認識し、さらに簡易シミュレーターにて上位概念の可変属性変化を抽出した結果が、図 4-9 である。

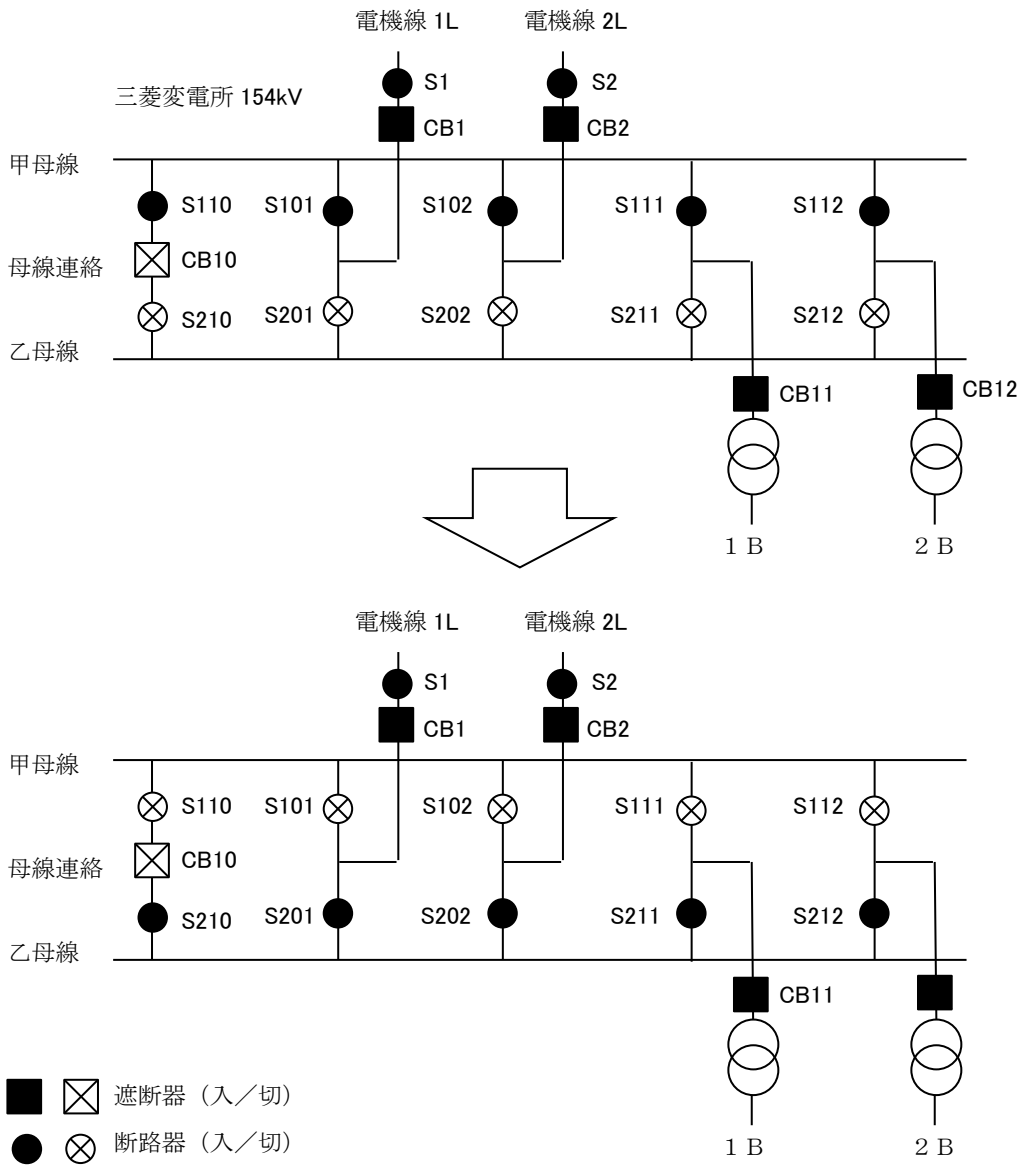


図 4-7 母線切替え操作の例

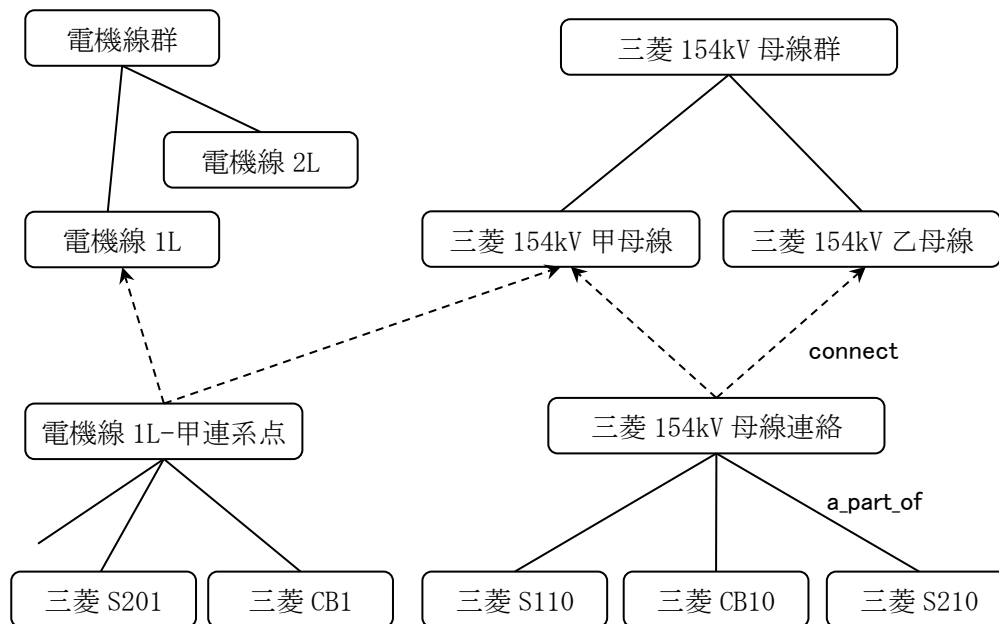


図 4-8 システムの階層的概念構造

表 4-1 母線切替操作の操作手順表

操作手目的		三菱 154kV 甲→乙母線切替	
操作 No	操作機器	操作内容	操作時刻
1	三菱 S110	入確認	2014 年 1 月 10 日 10:00
2	三菱 S210	投入	同 10:01
3	三菱 CB10	投入	同 10:03
4	三菱 S201	投入	同 10:06
5	三菱 S101	開放	同 10:07
6	三菱 S202	投入	同 10:10
7	三菱 S102	開放	同 10:11
8	三菱 S211	投入	同 10:14
9	三菱 S111	開放	同 10:15
10	三菱 S212	投入	同 10:18
11	三菱 S112	開放	同 10:19
12	三菱 CB10	開放	同 10:22
13	三菱 S110	開放	同 10:23
14	三菱 S210	入確認	同 10:24
以上			

手順表の取り込み結果

簡易シミュレーターの出力

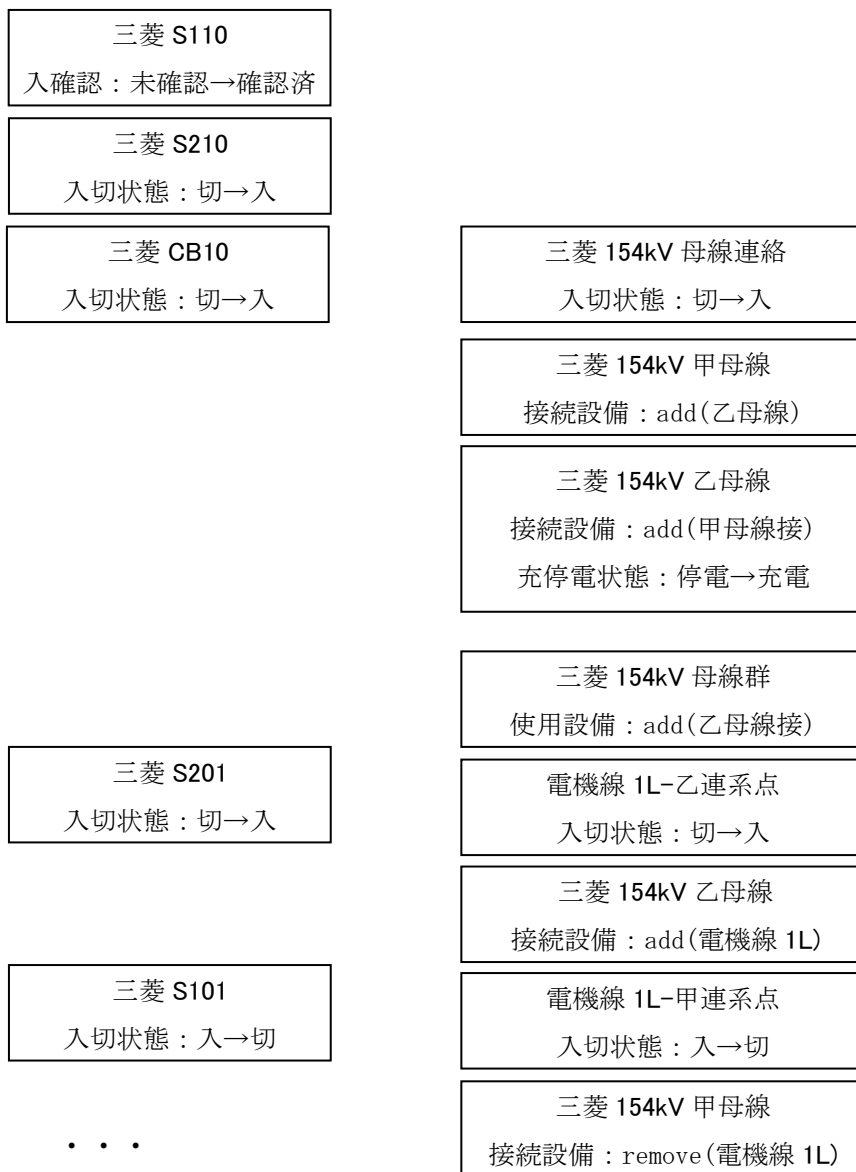


図 4-9 操作手順のシステム内部表現（左列）と操作に伴う状態変化（右列）

（1）操作の体系化

体系化では、個々の機器操作の意味づけを行う。すなわち、全体的な操作目的（＝事例で与えられた操作目標）の中で、それぞれの機器操作はどのサブ目的を達成するために行われたかを区分けし、サブ目的の下に包括する。これによって、操作事例を木構造に整理する。

システム内部表現された機器操作手順ならびに簡易シミュレーター出力に対して、体系化を行った結果が図 4-10 の木構造である。ただし、ここではシステム内部表現を言語表現に置き換えて表示している。

最下層が事例として与えられた機器操作手順、それを同図左から順に実行されることにより、簡易シミュレーターによって認識された結果が 2 階層目より上位の操作概念（サブ目的）を意味する。

この体系化の結果得られる、1 つ操作概念（サブ目的）とその下位概念の一連の手順のセットが、1 つの知識（ルール）となる。

これらのルールを用いて新たな操作手順を作成する際には、最上位概念の操作目的が与えられた時点で、上位から下位へとルール適用によって目的がブレイクダウンされていく。この際、操作前状態の相違に応じて、個々の適用ルールが選択される。例えば図 4-10 の例のように、同じ母線切替という操作目的であっても、母線連絡の開閉器の入切状態が異なっていれば、その部分のみ適用されるルールが変えられることになる。

（2）体系化知識の汎用化

別系統でも類似の操作事例が生じた場合、図 4-10 と同じような木構造のルール群が HCL により獲得される。例えば母線連絡の投入・開放操作は、変電所によらずほぼ同じ機器操作手順であるため、その部分のルールは図 4-4 のようにオブジェクト指向表現された設備機器モデルでは、オブジェクト名など固有名詞が異なるのみで、クラスとしては共通である。

このような固有名詞部分が異なるだけの複数ルールは、固有名詞部分を変数化した 1 つの汎用化ルールとして統合する。図 4-11 はその一例であり、二重枠線部分が固有名詞からクラス名称に置き換えられている。これによって、同構造の異系統にも適用可能な知識を獲得する。

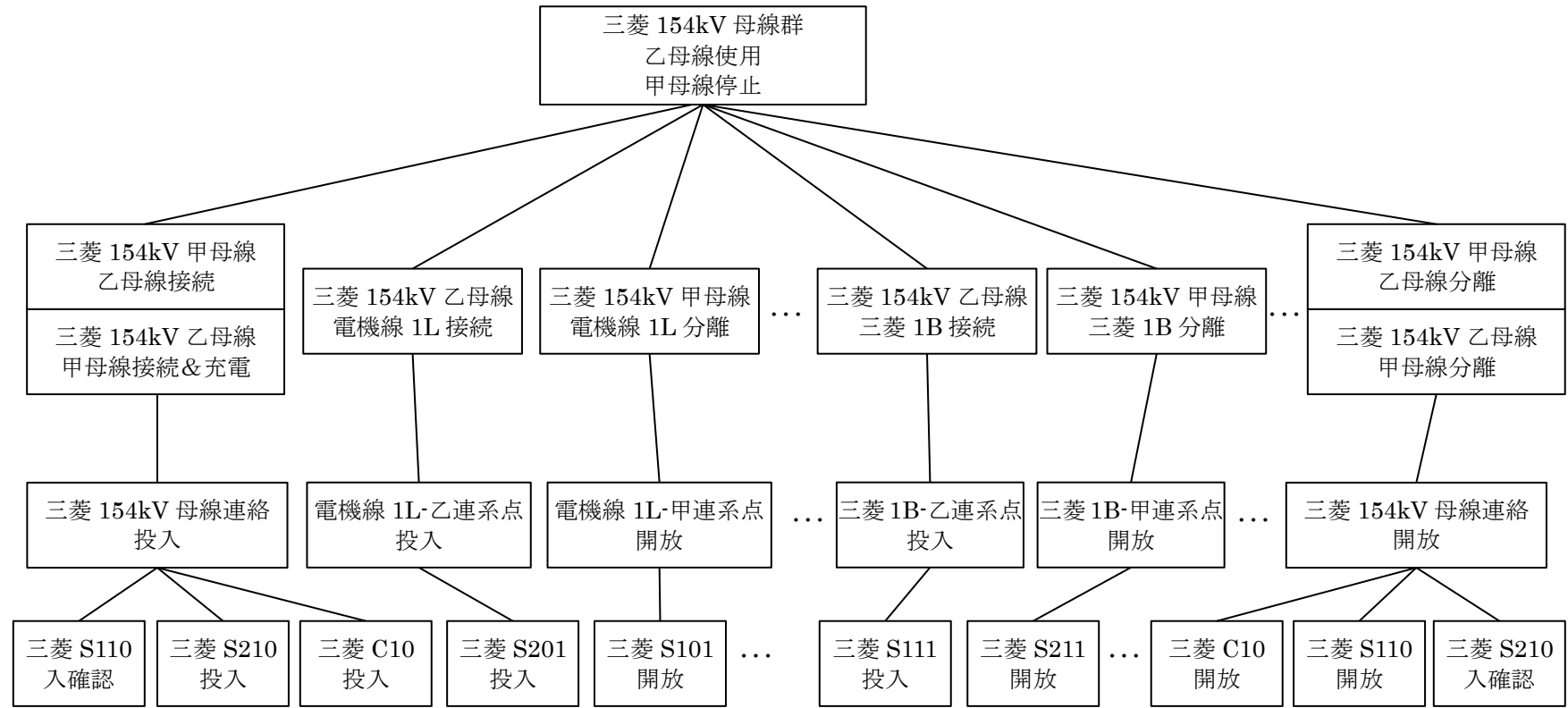


図 4-10 操作手順の体系化例

最下層が機器の操作手順、それより上位層が簡易シミュレーターによって認識された系統の状態変化

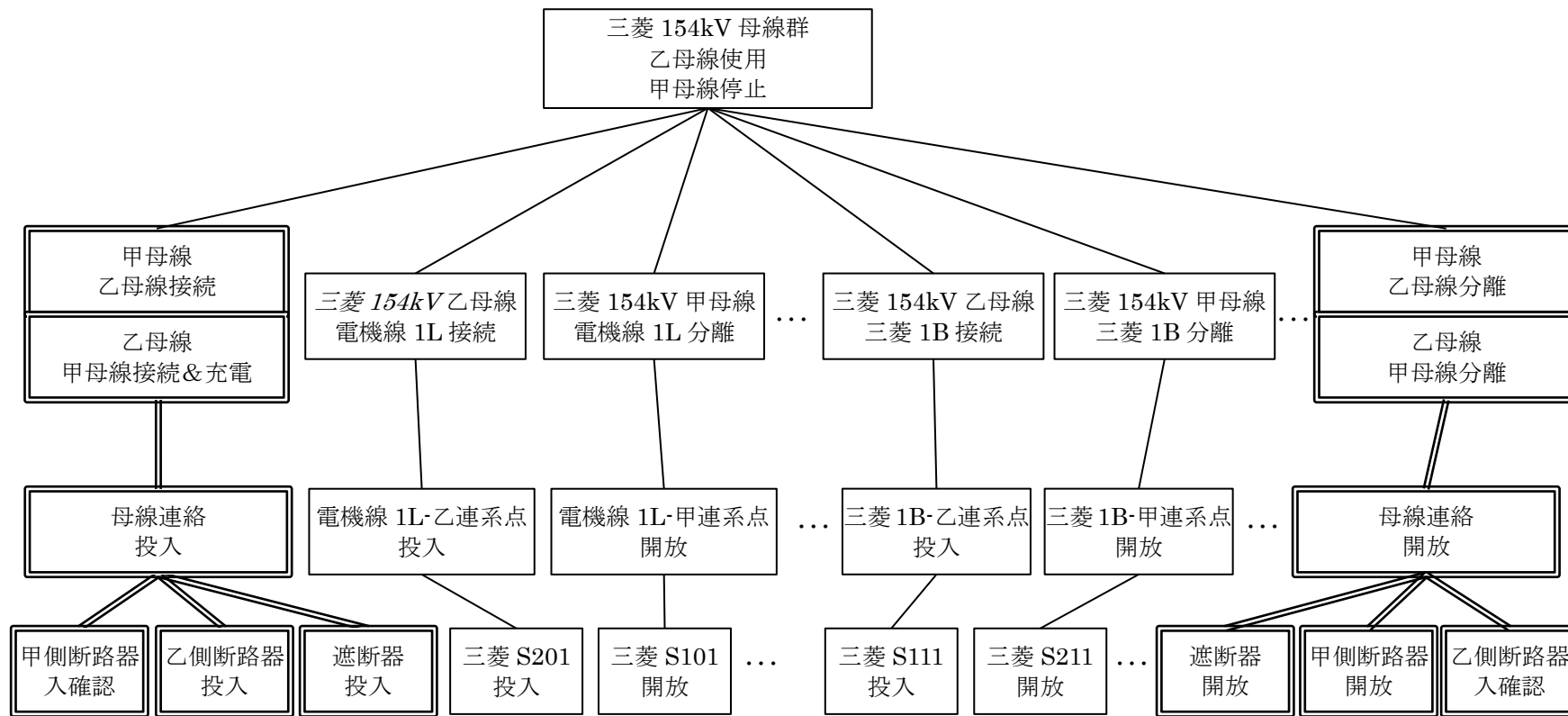


図 4-11 操作手順の汎用化例（二重柵線が汎用化された部分）

図 4-12 は HCL に入力した事例数と獲得知識数の推移である。与えた操作事例は、変電所操作における母線・送電線・変圧器、それぞれの停止あるいは使用など、目的指令レベルの主回路操作を一事例としている。

約 20 事例までの初期段階では、知識数は飛躍的に増加し、その後は比較的緩やかに増加を続けている。これは、得られる知識の内容が、初期段階では連系設備の開閉器操作手順など、最下位概念の手順展開知識が主であり、その後はより上位概念の手順展開知識獲得が主となっていったためである。

100 事例入力時点での獲得知識の内訳を見ると、全く汎用化されていない知識は、最下位概念が 11%、より上位概念が 46%であった。部分的に汎用化されている知識は、最下位概念が 29%、上位概念が 17%、完全に汎用化されている知識は、最下位概念が 60%、上位概念が 37%となっていた。最下位の機器レベルでより汎用化が進む原因としては、操作目的が異なっても、最下位の機器レベルでは同じような操作が繰り返されるためと考えられる。汎用化には、類似した冗長な知識を減らすという点で、意義がある。

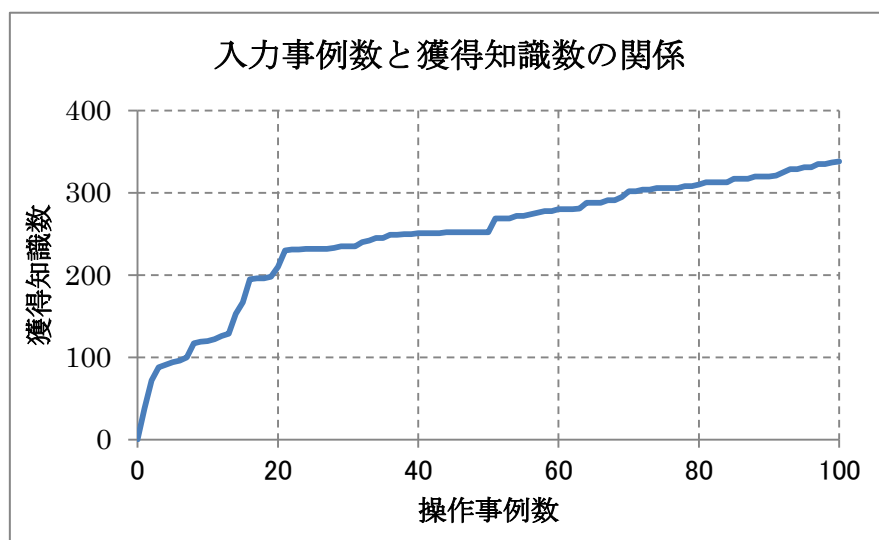


図 4-12 事例数と獲得知識数の推移

4.5. マイクログリッド系統操作手順作成への適用

4.5.1. 事例活用の意義

特定供給の規制緩和に伴い、PV や蓄電池、コージェネシステムなどの分散型電源を備えたマイクログリッド単位のエネルギー供給形態が注目されている。この場合、マイクログリッド内は自営系統、商用系統と一点連系した電力運用となる。したがって、平時はマイクログリッド保有電源と商用系統からの買電の両方で電力を賄い、災害時にはマイクログリッド保有電源のみによる自立運転が可能である。

このような供給形態の下では、自営系統の電源や開閉器など系統操作は、資格を有したマイクログリッドのエネルギー管理者（以下、管理者）が実施することになる。しかし発電設備や系統機器の専門技術者でない管理者が、系統操作を一通り理解するには、相当な専門知識と訓練を要する。また、緊急を要する停電時の自立運転の起動・停止には、管理者の誤操作を防止する、何らかの支援機能が望ましい。

マイクログリッド自営系統の操作は、電源類の起動・停止、制御モード切替えや出力調整、遮断器や開閉器の入切や保護リレーの整定変更、43スイッチ類の切替えなど多岐に及ぶ。管理者にも幅広い専門知識が要求され、設備機器の各種マニュアルを参照しながらの操作となる。また、管理者の勤務交代による知識伝承も課題となる。

そこで前節と同様、マイクログリッドにおける操作手順の適用について考察した。

4.5.2. 事例の階層的整理

操作手順は、個々の設備機器に対する単なる手順の羅列に過ぎず、そこには各操作の意味合い（目的）の情報がない。そこでHCLの枠組みを適用し、図4-13のような各設備機器の階層概念を用い、その意味合いを設定することを考える。

例えば連系保護リレーであるOVGR（地絡過電圧保護リレー）やDGR（地絡方

向リレー)、OCR (過電流リレー) は、系統連系保護という上位概念の一部である。また商用系統との連系点に設置される遮断器や開閉器は、商用連系点という上位概念の一部とみなすことができ、更にそれらは自立運転系統の一部と位置づけられる。

一連の系統操作は、個々の設備機器について

- ・ ある状態から別の状態に移行 (例えば開閉器を投入状態から開放状態へ移行)
- ・ ある状態にあることを確認 (例えば開放状態を確認)

のいずれかある。それらを上位概念で表すと、

- ・ ある状態から別の状態に移行
- ・ ある状態にあることを確認
- ・ あるリストからの要素追加／削除 (例えば自営系統の「連系設備」というリストからの「主電源」追加)

のいずれかで表現される。

このような考え方のもとで、図 4-13 下側に示すマイクログリッドにおいて、商用系統が停電してマイクログリッド内自立運転へ移行する場合の手順 (表 4-2) を、図 4-13 上側の階層概念を元に体系化した例が図 4-14 である。上位概念になるほど、より包括的かつ抽象化した目的表現となる。

連系保護 DGR や OCR の不動作確認は、停電原因がコミュニティ外にあり、自営系統は安全であることを確認することが目的である。連系遮断器 CB-0 や連系開閉器 SW-0 を開放、操作ロックすることは、商用系統との連系点を切離すことが目的であり、それらの操作は、商用系統と分離する (=連系設備というリストから商用系統を削除する) ことを意味する、また、主電源 (もしくは副電源) で自立運転釦押す、ガスエンジン起動、起動確認、励磁開始、等々は主電源の起動が目的であり、主電源遮断器 CB-S1 や開閉器 SW-S1 の投入は、主電源の連系が目的として表現できる。

このように個々の操作手順の目的を明確化し、体系的に整理することにより、異なる操作目的／異なる操作前状態の手順を作成する場合、全てを最初から作成せずとも、体系化知識の部分的組み換えのみで手順が作成できるというメリットがある。

表 4-2 構内自立運転起動の操作手順表

操作手目的		構内自立運転起動	
操作 No	操作機器	操作内容	操作時刻
1	連系保護 DGR	不動作確認	2014年2月1日 10:00
2	連系 CB-0	切確認	同 10:01
3	連系 SW-0	開放	同 10:03
4	連系 SW-0	操作ロック	同 10:04
5	主電源 CB-S1	切確認	同 10:07
6	主電源 SW-S1	開放	同 10:07
7	副電源 CB-S2	切確認	同 10:09
8	副電源 SW-S2	開放	同 10:09
9	負荷 SW-1	開放	同 10:11
10	負荷 SW-2	開放	同 10:12
11	負荷 SW-3	開放	同 10:13
12	主電源モード選択釦	自立釦押す	同 10:15
13	副電源モード選択釦	自立釦押す	同 10:15
14	主電源ガソエンジン	起動	同 10:16
15	主電源ガソエンジン	起動確認	同 10:24
16	主電源励磁機	開始	同 10:24
17	主電源 SW-S1	投入	同 10:27
18	主電源 CB-S1	同期検定投入	同 10:27
19	主電源 CB-S1	電圧確認	同 10:26
20	負荷 SW-L1	投入	同 10:27
21	主電源発電機	出力確認	同 10:28
22	副電源ガソエンジン	起動	同 10:30
. . .			
以上			

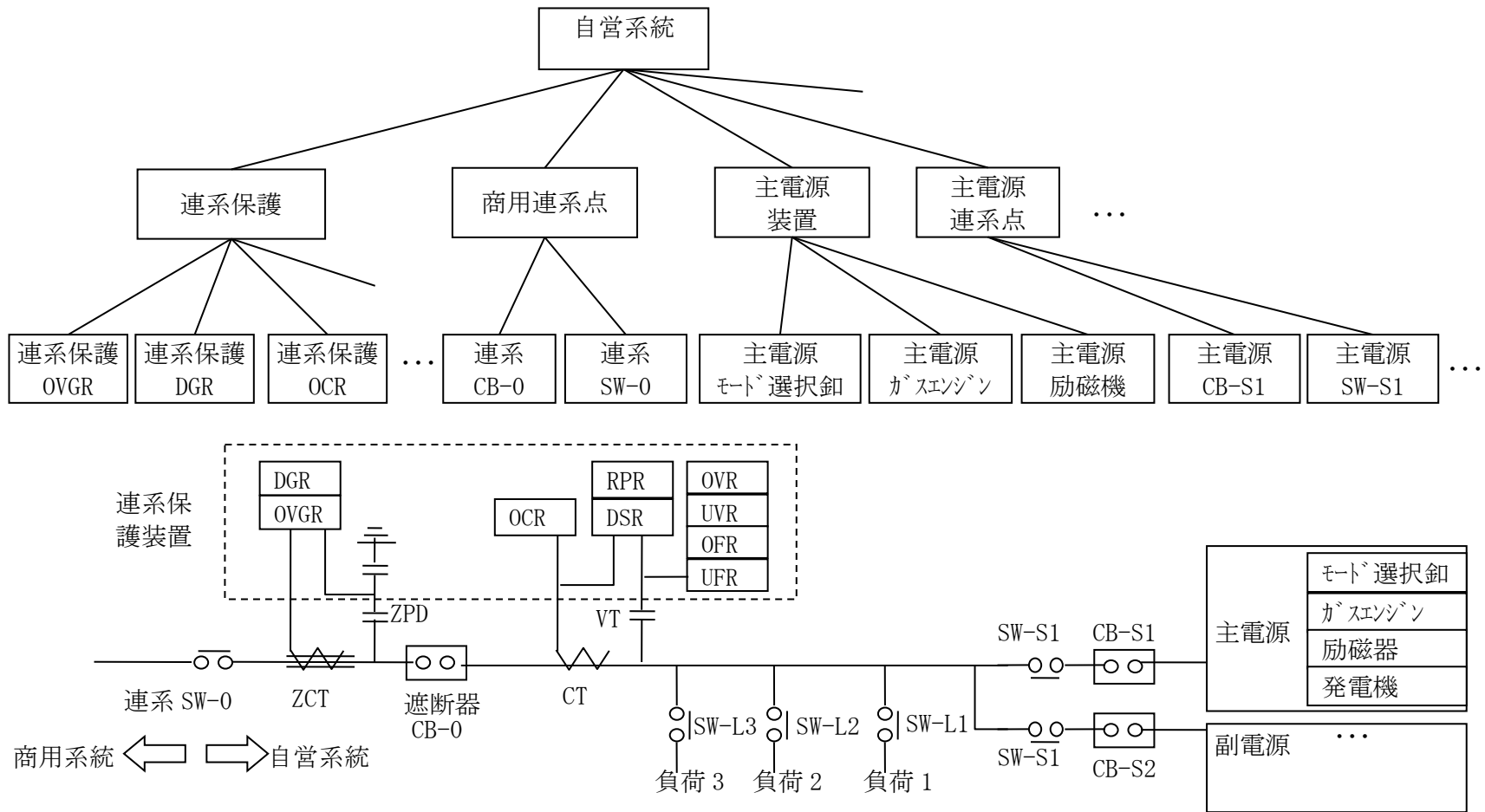


図 4-13 マイクログリッド自営系統設備機器と階層概念

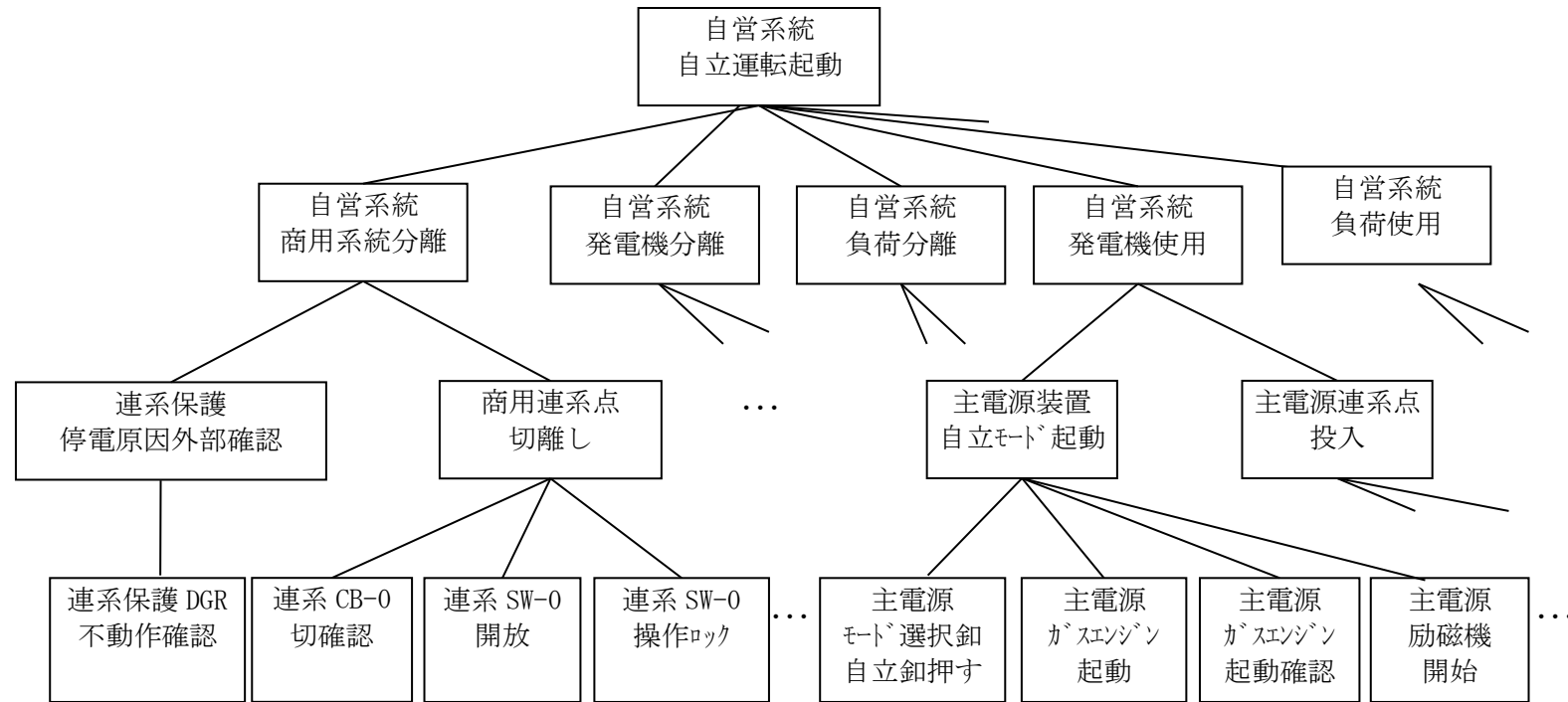


図 4-14 マイクログリッド系統操作の階層化

4.6. 結言

本章では、系統操作手順作成をエキスパートシステムで支援すべく、そのエキスパートシステムの新たな知識（ルール）獲得手法を開発した。分散型電源をベースとしたマイクログリッドでは、事業性という観点で、電力会社のように系統操作専属の運転員を雇用することは難しい。それに代わる計算機支援システムが必要不可欠と考え、エキスパートシステムの実現に着眼した。

エキスパートシステムの実現には、その知識獲得問題が常に付きまとうが、その1つの解決策を提案することができた。

本研究で開発した知識獲得手法とそれに基づくエキスパートシステムは、以下の新規性と優位性を有する。

- ・ 操作手順は、一連の離散事象で表現できるという点に着目し、操作目的というマクロ的な事象を達成するために必要なサブ事象（＝操作）の選定と、事象間の前後関係の学習に特化した学習方式を考案。
- ・ 操作（事象）の候補、ならびに操作目的（＝上位のマクロ事象）との因果関係は、階層化されたオブジェクト指向表現の設備機器モデルとして与えられることを前提とし、設備機器モデルを使ったシミュレーションを通して、一連の操作を操作目的で包括した知識表現を提案。
- ・ その結果、操作手順は個々の操作目的単位で分解・意味づけがされ、従来の事例ベース推論のように、事例としての操作手順を一括流用する方式に比べて、高い流用性を実現。
- ・ 機器状態の確認操作など、物理的な変化を伴わない事象も、仮想的な離散事象として扱うことで、操作知識の一部として表現。

本研究の成果は、電力自由化により今後多様化が予想されるマイクログリッドに対し、その運用支援システムにおける当社差別化技術の1つとして、活用していく予定である。

本研究では基本的な知識獲得の枠組みについて検討したが、実用化に向けては、さらに検討を進めるべき課題もある。例えば一般に、対象世界は日々変化

し、それとともに必要とされる知識も更新され続け、古い知識は陳腐化することになる。そこで新たな知識を獲得し続けるとともに、使われなくなった知識は適宜忘却、すなわち知識ベースから削除していく必要がある。そこで今後の改良として、知識ごとに、適用回数に応じて優先度を加算するとともに、周期的に優先度を減衰させ、一定レベルを下回った知識は削除するなどの工夫が望ましい。

また、エキスパートシステムは知識のみで動作するわけではなく、適用すべき知識を選択する推論エンジンや、その途中経過を保存するワーキングメモリーの実装形態によって動作が異なってくる。そのため、次章で述べるような動的検証と組み合わせた、知識の洗練技術について、検討を重ねていく必要がある。

参考文献

- [4-1] 電気学会技報：“電力系統のエキスパートシステム”，(II部) No. 399 (1990)
- [4-2] 幅・前田・渡部・福井・野本：“作業時操作手順自動作成システム”，電気学会論文B, Vol. 113, No. 2, pp. 159-167 (1993)
- [4-3] 永田・中山・中村・歌谷・佐々木：“電力系統平常時操作へのマルチエージェント技術の適用”，電気学会論文B, Vol. 122, No. 10, pp. 1089-1095 (2002)
- [4-4] 永田・佐々木・北川・杉原：“パソコンによる電力系統平常時操作支援エキスパートシステム”，電学論B, Vol. 114, No. 7-8, pp. 807-813 (1994)
- [4-5] 垣本・林・林：“超高压系統全停電時における初期復旧操作のエキスパートシステム化”，電気学会論文B, Vol. 110, No. 6, pp. 495-503 (1990)
- [4-6] 電気協同研究会：“電力技術へのAIの応用”，電気協同研究第48巻第1号 (1992)
- [4-7] S. Adhikari, F. Li, Q. Hul, Z. Wang：“Heuristic Optimal Restoration Based on Constructive Algorithms for Future Smart Grids”，Proceeding of 2011 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems (ISAP' 2011) (2011)
- [4-8] A. Jaime, M. Walter, M. Giovanni, I. José：“Application of Genetic Algorithms in Colombian Interconnected Power System Operative Planning”，Proceeding of 2011 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems (ISAP' 2011) (2011)
- [4-9] K. Butler-Purry：“Multi-Agent Technology for Self-Healing Shipboard Power Systems”，Proceeding of 2005 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems (ISAP' 2005), pp. 207-211 (2005)
- [4-10] 谷口：“自律分散型スマートグリッドにおける適応的電力融通手法 人工知能によるボトムアップな市場価格形成と電力需要応答の動態分析”，人工知能学会論文誌, Vol. 28 (1), pp. 77-87 (2013)
- [4-11] D. Ferrucci, E. Brown, J. Chu-Carroll, J. Fan, D. Gondek, A. A. Kalyanpur, A. Lally, J. W. Murdock, E. Nyberg, J. Prager, N. Schlaefler, C. Welty：“Building Watson: An Overview of the DeepQA Project”，AI Magazine, Vol. 31, No. 3, pp. 59-79 (2010) s
- [4-12] 吉澤・荻・高野・松本：“階層的概念関係に基づく学習方式 HCL と操作手順作成知識の獲得”，電気学会論文B, Vol. 113, No. 2, pp. 123-130 (1993)
- [4-13] J. Yoshizawa, H. Ogi, T. Takano, K. Matsumoto：“An Automatic Knowledge Acquisition for Switching Sequences and its Evaluation”，IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 2, pp. 884-890 (1994).

[4-14] 高野・松本・大木・大橋：“事例学習による給電所向け操作指令手順表作成システム”，電気学会論文 B, Vol. 115, No. 7, pp. 795-802 (1995)

第5章 分散型電源を含む電力システムの監視制御システム構築技術

5.1. 緒言

4章では分散型電源普及および規制緩和による系統運用の多様化に備えた、系統運用操作支援システムの知識（ルール）獲得技術について述べた。しかし獲得された知識が100%完全とは限らず、また4章の結言での触れたように、システムの挙動は、知識のみによって一意には決まらず、知識を選定する推論エンジンなどの実装によって挙動が変わってくる。そのため、獲得された知識を元に構築されたシステムの検証は実用化する前のステップとして必要不可欠である。

一方で、系統操作のような深い専門知識を必要としない、系統機器に近いローカルな監視制御システムで処理すべきプリミティブな情報処理（例えばマイクログリッド内の分散型電源の起動・停止処理や、系統事故が起こればどの遮断器をトリップさせるか、といった、個別にはロジックを組む必要はあるが、状況に左右されず固定パターンで対処可能な処理）においても、機械化とICTによる一層の自動化推進とが望まれている。この領域のシステムでは、個々の製品コストを下げるべく、いかに多種大量生産を効率的に実現するかが課題となっている。

そこで本章では、まず監視制御システム構築における課題を明確化した上で、その関連研究について述べる。次にエキスパートシステムについて、4章で検討した構築したエキスパートシステムの妥当性を、実際にシステムを動作させることによって評価する動的検証技術について述べる。また、エキスパートシステムのような複雑なルールと判断処理までは必要としないが、個別の系統に即した処理が要求されるプリミティブな情報処理システムを対象に、ソフトウェア部品化・ライブラリ化による監視制御システムのラピッド構築技術についても述べる。

5.2. 監視制御システム構築の課題と関連研究

5.2.1. 監視制御システム構築の課題

4章では、分散型電源普及による系統運用の変革を踏まえた系統操作を題材に、その支援システムにおける知識（ルール）獲得手法について述べた。しかし知識ベースに個々のルールが次々に追加されるに従い、新旧ルール間の矛盾発生など一貫性維持の問題は避けることができない。

またエキスパートシステムに限らず、すべての監視制御システムにおいて、分散型電源の普及と規制緩和によって運用の多様性が生じるに従い、監視ロジック、制御ロジックにも多様性に応じた様々な条件分岐が含まれることになる。

そのためには、いったん製作されたシステムをいかに効率的に検証するか、もしくはそもそも監視制御システムの構築そのものをいかに効率化し、人為ミス防止を図っていくかが1つの大きな技術課題となる。

5.2.2. 監視制御システム構築の関連研究

エキスパートシステムの知識ベースの検証は、米国において先駆的に始められたが、文献[5-1, 2, 3]にあるように、個々の知識について妥当性を評価する方式が主流であった。これはエキスパートシステムの推論エンジンやダイナミックに変化するワーキングメモリー状態は考慮せず、知識の論理的な妥当性を検証するもので、“静的検証”といえる。

静的検証では、例えば以下のような項目があげられる。

(1) 矛盾ルール (Conflicting Rules)

2つ、あるいはそれ以上の一連のルールが、同時に適用可能となり、それらが互いに矛盾した結果を導く。例えば、Pをルール適用条件部、Qをルール実行部とすると、矛盾ルールは、次のように表現される。

$$P \rightarrow Q$$

$$P \rightarrow \neg Q$$

ただし、“ \neg ”は否定を表す。

(2) 冗長ルール (Redundant Rules)

2つ、あるいはそれ以上の一連のルールが、同時に適用可能となり、それら同じ結果を導く。

$$\neg (P_1 \cap P_2) \rightarrow Q$$

$$\neg P_1 \cup \neg P_2 \rightarrow Q$$

(3) 包含ルール (Subsumed Rules)

同じ結果を導く2つのルールがあり、一方のルール条件部が、他方のルール条件部に、更にいくらかの条件を付加したものとなっている。

$$P_1 \rightarrow Q$$

$$P_1 \cap P_2 \rightarrow Q$$

この場合、後者は前者に包含されるため不要である。

(4) 不要条件 (Unnecessary Rules)

同じ結果を導く2つのルールがあり、ルール条件部の一部が互いに否定関係にある。

$$P_1 \cap P_2 \rightarrow Q$$

$$P_1 \cap \neg P_2 \rightarrow Q$$

この場合、条件 P_2 が不要であり、両ルールは1つに統合されるべきである。

(5) 巡回ルール (Circuit Rules)

一連のルールが、巡回推論経路（無限ループ）を構成する。

$$P \rightarrow Q$$

$$Q \rightarrow P$$

これらの誤りを検出するためには、表 5-1 に示すような依存関係チャートが用いられる。これは、個々のルールを条件部 (IF 部) と実行部 (THEN 部) の2つの状態 (S_1, S_2, \dots) 間の依存関係を表したテーブルである。例えば同表では、

S 1 → S 3 ∩ S 5

S 2 → S 3

S 3 → S 1

などのルールが存在することを意味する。

表 5-1 ルール依存関係チャート例

THEN IF 部	S 1	S 2	S 3	S 4	S 5
S 1			※		※
S 2			※		
S 3	※				
S 4		※			
S 5				※	

このチャートに基づき、前述の矛盾ルール有無などの項目を検証していく。
同表の例では、S 1 と S 3 の間に、巡回ルールが存在することがわかる。

しかしすべての状態をチャートに抽出することは困難であり、またこれらの
検証は、知識ベースの整合性を保持するものであり、システムが正しく動作す
るかどうかを検証することはできない。

プリミティブなロジックベースのシステム構築のための技術としては、ブロ
ックダイアグラムで制御ロジックを記載できる PLC(Programmable Logic
Controller)が広く実用化されており^[5-4]、受配電設備などへも適用が進んでい
る^[5-2]。最近では工業用パソコンの性能と信頼性向上に伴い、工業用パソコン上
で動作するソフト PLC の適用も進んでいる。これは比較的容易にプログラミング
できる環境が提供されているものの、基本的には一からソフトを製作すると

ともに、入出力信号を発生させる簡易的なエミュレータを使って動作確認することとなる。

また、オブジェクト指向によるソフトのパッケージ化技術をベースとして、分野別の統合生産環境の開発も、電力以外の分野では既に進んでいる^[5-6,7]。電力分野でも、電力向けに特化した統合生産環境が待たれる。

また国際的な流れとして、システムのデータ構造や通信 IF を規格化し、それによりシステム構築を効率したり拡張性を高める動きが活発である。データ構造としては 1992 年米国発祥の CIM(Common Information Model)が IEC-61970 として規格化されている。これは系統設備機器をオブジェクト指向に基づき表現するもので、その表現方法とアクセス方法が細かく規定されている。システムと機器間、機器と機器間の通信 IF 規格としては、IEC-61850 が著名である。これは実質的な国際標準言語である XML をベースに、システムや機器ごとの入出力信号を宣言、その宣言に基づき信号授受を紐づけるもので、いわゆるマルチベンダーシステムを目指した規格と言える^[5-8]。

5.3. 監視制御システムの動的検証技術

エキスパートシステムの知識ベースは、4章で述べたような事例学習を通して効率的に構築される。しかし専門知識をルールとして獲得・蓄積しても、それを実運用に持っていくには、想定どおりに動作するかの最後の検証が必要となる。ここではその検証における効率化について述べる。

5.3.1. 動的検証法の意義

エキスパートシステムが仕様に反し、誤った動作（誤推論）を引き起こす原因は、以下の2種に大別される。

① 知識自体の誤り

知識ベースの個々の知識の記述ミス・欠落、あるいは知識間の矛盾などが

ある。

② 知識適用法の誤り

個々の知識に誤りは無いが、任意の状況において、本来適用されるべき知識が適用されずに別の知識が適用される。

2番目の誤りは、ある状況において2つ以上の知識が同時に適用可能となる場合に発生する。その原因としては、知識適用の条件付け不足や、適用優先度の設定ミスであり、例えば対象システムに固有の知識があるにもかかわらず、一般知識のほうが選択・適用されてしまうケースなどが考えられる。

これらの誤りを避けるためには、一般にシステム構築時に、知識適用条件として前述の表 5-1 のようなチャートを作るなどし、知識の漏れ、適用条件の漏れを洗い出す作業が必要となる。推論対象世界を表す入力変数も数個で、知識数も1桁レベルであればチャート作成も可能であるが、入力変数が2桁に上るようなシステムにおいては、この作業は現実には不可能である。

5.3.2. システムの自動検証

前節の理由から、図 5-1 に示すような動的検証の枠組みを考えた^[5-9,10]。同図は、検証対象システムが、ルールを蓄えた知識ベースと、ルールを選択・適用する推論エンジン、その推論過程を記録するワーキングメモリーから構成される、いわゆるエキスパートシステムを想定した例である。与えられた問題（例えば操作目的）とその時の条件（システムの操作前状態）は、同ワーキングメモリーに設定される。推論エンジンは、与えられた問題を解くべく、知識ベース内のルールを適用し、その結果生じる系統の状態変化を、随時ワーキングメモリーに反映していく。

検証対象となるエキスパートシステムがどのような流れで動作すべきか、あるいは逆にどのような動作が禁止されているかといった項目は、システム仕様として与えられる。これを検証機構内で、システム動作の制約条件という形に置き換え、コレクトネスチェッカーが、その制約条件に反することがないか、

という観点で対象システムの挙動を監視し続ける。

例えば操作手順作成支援システムを例にとれば、平常時の操作において停電が発生しないことが制約条件の1つとして挙げられる。停電をとまなうような操作手順を対象システムが作成した場合、その結果はワーキングメモリーに反映されるので、ワーキングメモリーで停電となる状況が発生していないかを、監視することになる。

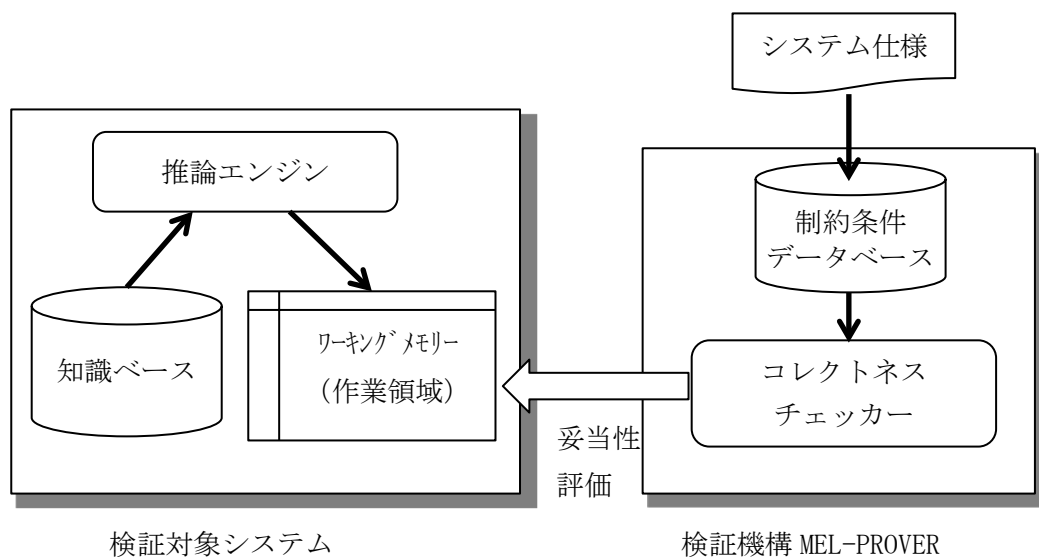


図 5-1 検証機構 MEL-PROVER による動的検証の枠組み

5.3.3. 自動検証のための制約条件

知識ベースに蓄えられるルールが、問題解決のための、推論対象世界に関する肯定的知識・局所的知識であるのに対し、それ以外の否定的知識、大局的知識を制約条件として活用する。

具体的には、図 5-2 のように 3 種類の制約条件を考える。

① 状態禁止制約条件

推論過程の任意の時間断面において、発生してはならない状況を表す。

② 遷移禁止制約条件

推論過程の任意の時間断面から次の時間断面において、発生してはならない変化を表す。

③ サブゴール到達制約条件

前記2つの制約条件だけでは、無限ループに陥った状況などを検出することはできない。そこで推論の大局的な流れを指定し、段階的にどのような結果が達成されるべきかを指定する。例えばシステム仕様における、大まかなフローチャートに該当する。

推論エンジンがルールを適用するごとに、ワーキングメモリー内の推論対象世界が更新され、別の状態に遷移する。その都度、この3種類の制約条件に反することがなかったがチェックされる。

状態禁止制約条件については、それに反するワーキングメモリー状態が発生した時点でコレクトネスチェッカーにより警告が出される。同様に、遷移禁止制約条件についても、反するワーキングメモリー状態の遷移があれば警告が出される。サブゴール到達制約条件は、所定のルール適用回数内に、ワーキングメモリー状態が次のサブゴールに合致しなければ、警告が発せられる。

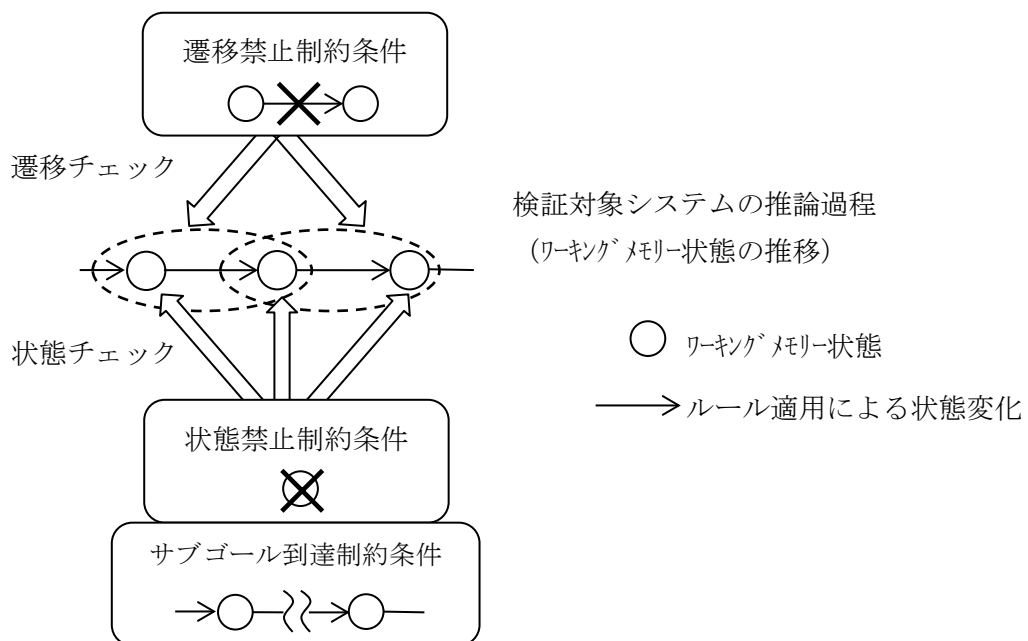


図 5-2 動的検証における制約条件の種類

5.3.4.制約条件の例

ここでは、検証対象システムの例として、前章でも例示した系統操作手順作成支援システムを考える。操作も前章と同じような、図 5-3 の母線切替とする。電機線 1L、1B を甲母線から乙母線に切替える操作手順を作成する例であるが、この系統操作においては、表 5-2 に記載のように、下記のシステム仕様が考えられる。

- ・ 平常時操作のため、停電を発生させてはならない。
- ・ 断路器の入切によって系統の潮流状態を変化させてはならない。すなわち、隣接の母線連絡や遮断器が開放状態での断路器操作の禁止。
- ・ 母線切替の操作は、母線連絡投入、送電線や変圧器の母線切替、母線連絡開放の流れに沿っていること。

これらを系統機器の状態に置き換えた結果が、図 5-4、図 5-5、図 5-6 の制約条件である。

図 5-7 は、これらの制約条件を与えた上で、操作手順作成支援システムの動作を検証した例である。「%%」で始まる行が、コレクトネスチェッカーが出力しているメッセージとなっており、それ以外の最初の 3 行は、操作手順作成支援システム自体の出力である。

操作手順作成支援システムは、

- ・ 1 行目：既に投入状態にある母線連絡の断路器入り確認
- ・ 2 行目：母線連絡の、もう一方の断路器の投入
- ・ 3 行目：送電線 S201 の断路器を投入

という誤った手順を作成してしまった。

そのため、図 5-5 の遷移禁止制約条件の 1 項目目に反してしまい、推論を中断させている。参考として、その時に適用可能な知識（ルール）が 3 個あり、その中で 1 つ目のルールが適用されたことになる。

ここでは3つ目のルール適用が正解であるが、1つめルールの方が適用優先度のほうが高く設定されていたため、誤った推論を招いている。この誤りは、適用優先度の変更、もしくは適用条件の追加によって回避する必要がある。

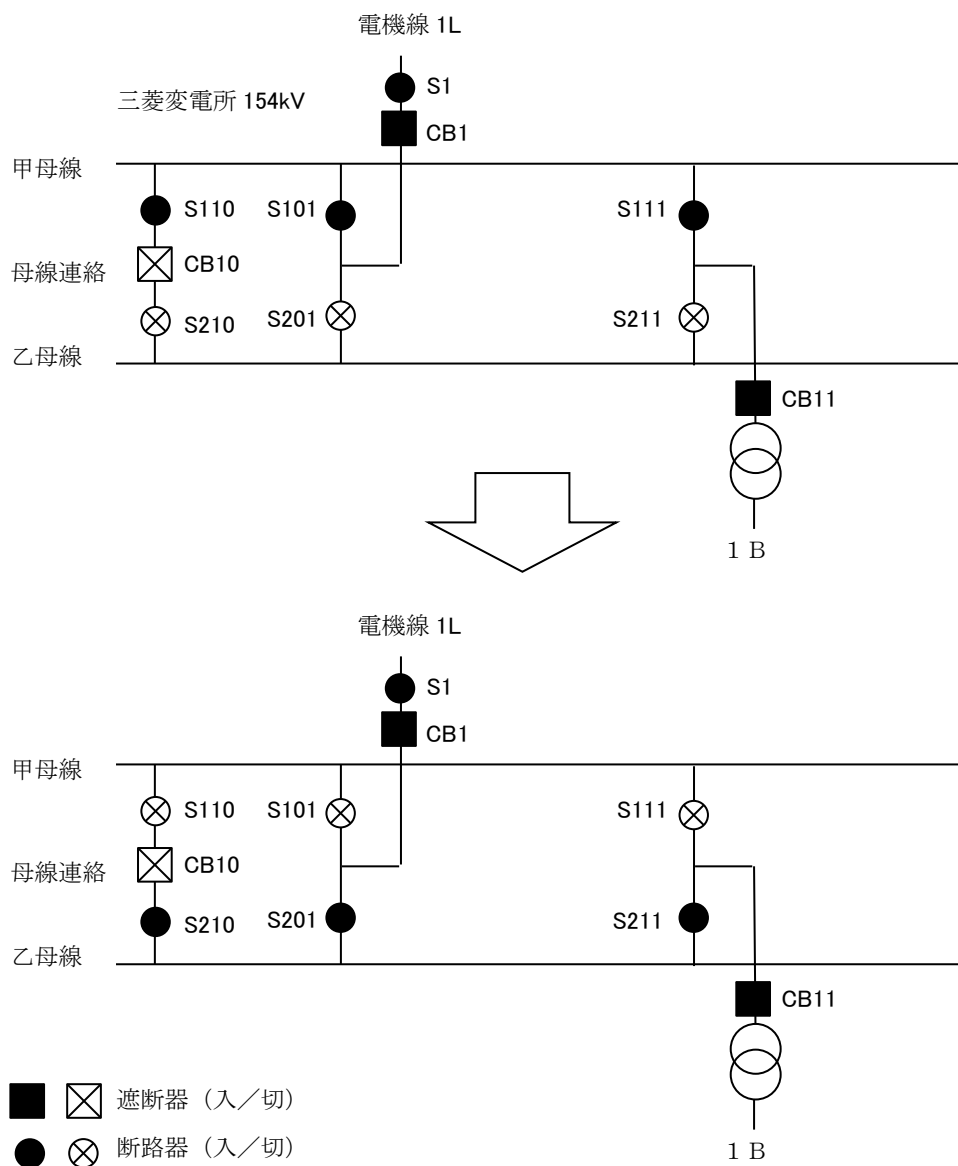


図 5-3 系統操作の例 (母線切替え)

表 5-2 操作手順作成支援システム仕様と制約条件

操作手順作成支援システムの仕様		該当する制約条件
停電の禁止	送電線から変圧器への電力供給中断の禁止	状態禁止制約条件
断路器操作の制限	母線連絡が開放状態の時の送電線、変圧器の母線切替操作の禁止	遷移禁止制約条件
	隣接遮断器が切状態の時の断路器操作の禁止	
操作目標の達成	母線切替操作の流れは、母線連絡投入→送電線・変圧器の切替→母線連絡開放	サブゴール到達制約条件

#以下の各状態が発生しないこと
 #
 # 送電線切離しによる停電の禁止
 ((名称=三菱 S1, 入切状態=切) ∪ (名称=三菱 CB1, 入切状態=切)
 ∪ ((名称=三菱 S101, 入切状態=切) ∩ (名称=三菱 S201, 入切状態=切)))
 # 変圧器切離しによる停電の禁止
 ((名称=三菱 CB11, 入切状態=切))

図 5-4 母線切替操作における状態禁止制約条件の例

```

#以下の各状態変化が発生しないこと
#
# 母線連絡開放状態での送電線切替え操作の禁止
( (名称=三菱 CB10, 入切状態=切) ∩ ( (名称=三菱 S101, 入切状態=切) ) )
→ ( (名称=三菱 CB10, 入切状態=切) ∩ (名称=三菱 S101, 入切状態=入) )

( (名称=三菱 CB10, 入切状態=切) ∩ (名称=三菱 S101, 入切状態=入) )
→ ( (名称=三菱 CB10, 入切状態=切) ∩ (名称=三菱 S101, 入切状態=切) )

( (名称=三菱 CB10, 入切状態=切) ∩ ( (名称=三菱 S201, 入切状態=切) ) )
→ ( (名称=三菱 CB10, 入切状態=切) ∩ (名称=三菱 S201, 入切状態=入) )

( (名称=三菱 CB10, 入切状態=切) ∩ (名称=三菱 S201, 入切状態=入) )
→ ( (名称=三菱 CB10, 入切状態=切) ∩ (名称=三菱 S201, 入切状態=切) )

# 母線連絡開放状態での変圧器切替え操作の禁止
( (名称=三菱 CB10, 入切状態=切) ∩ ( (名称=三菱 S111, 入切状態=切) ) )
→ ( (名称=三菱 CB10, 入切状態=切) ∩ (名称=三菱 S111, 入切状態=入) )

...

```

図 5-5 母線切替操作における遷移禁止制約条件の例

```

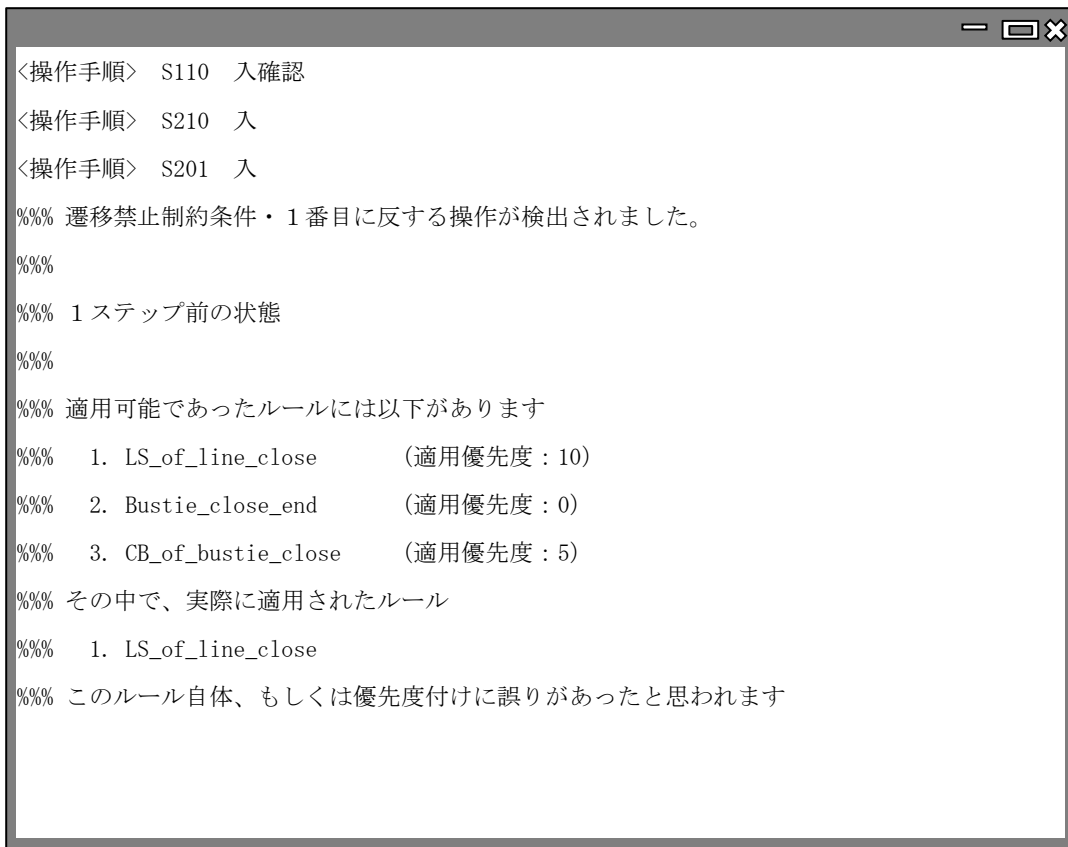
#以下の各項目が上から順に達成されること
#
# 母線連絡投入
( (名称=三菱 CB10, 入切状態=入) )

# 甲母線への接続開放
( (名称=三菱 S101, 入切状態=切) ∩ (名称=三菱 S111, 入切状態=切) )

# 母線連絡開放
( (名称=三菱 CB10, 入切状態=切) )

```

図 5-6 母線切替操作におけるサブゴール到達制約条件の例



```
<操作手順> S110 入確認
<操作手順> S210 入
<操作手順> S201 入
%% 遷移禁止制約条件・1番目に反する操作が検出されました。
%%
%% 1ステップ前の状態
%%
%% 適用可能であったルールには以下があります
%% 1. LS_of_line_close (適用優先度:10)
%% 2. Bustie_close_end (適用優先度:0)
%% 3. CB_of_bustie_close (適用優先度:5)
%% その中で、実際に適用されたルール
%% 1. LS_of_line_close
%% このルール自体、もしくは優先度付けに誤りがあったと思われます
```

図 5-7 システム検証結果の例

5.3.5.シミュレーターと組み合わせた動的検証

前述のとおり、検証のための制約条件は停電禁止などのマクロ的な言葉で表現されるが、それを個々の機器状態にブレークダウンして表現するには、かなりの組み合わせを考慮する必要がある。そこで4章の操作手順作成で検討したように、検証対象システムが作成した操作手順をシミュレーターで模擬実行し、それによって系統の状態変化を把握、その結果を制約条件と照合する方式が考えられる(図 5-8 参照)。これにより、例えば、図 5-4~図 5-6 の制約条件は、上位概念でマクロ的表現に置き換えることができ、図 5-9~図 5-11 のように、より簡潔で直感的にわかりやすい表現とすることができる。

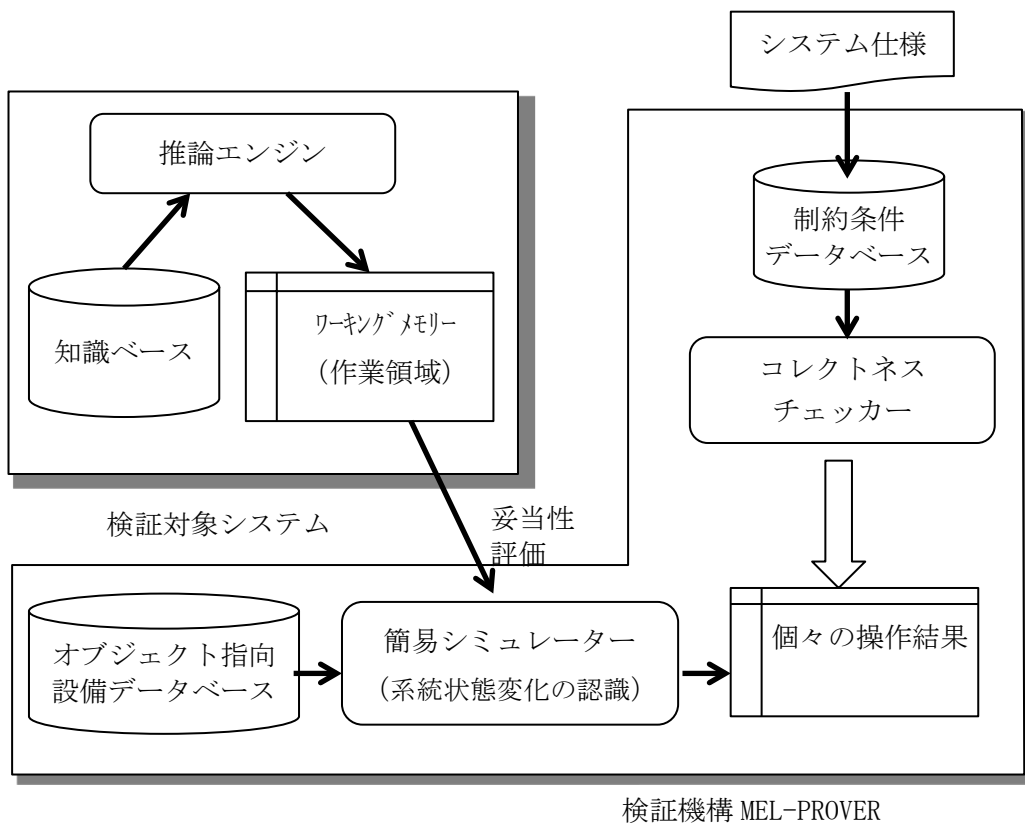


図 5-8 簡易シミュレーターと組み合わせた動的検証の枠組み

```

#以下の各状態が発生しないこと
#
# 母線群停電の禁止
( (名称=三菱 154kV 母線群, 充停電状態=停電) )

# 変圧器群停電の禁止
( (名称=三菱変圧器群, 重停電状態=停電) )

```

図 5-9 母線切替操作における状態禁止制約条件の例（上位概念表現）

```

#以下の各状態変化が発生しないこと
#
# 母線連絡開放状態での切替え操作の禁止
((名称=三菱 154kV 母線連絡, 入切状態=切) ∩ ((名称=三菱 154kV 甲母線, 充停電状態=停電)))
→ ((名称=三菱 154kV 母線連絡, 入切状態=切) ∩ (名称=三菱 154kV 甲母線, 充停電状態=充電))

((名称=三菱 154kV 母線連絡, 入切状態=切) ∩ ((名称=三菱 154kV 乙母線, 充停電状態=停電)))
→ ((名称=三菱 154kV 母線連絡, 入切状態=切) ∩ (名称=三菱 154kV 乙母線, 充停電状態=充電))

```

図 5-10 母線切替操作における遷移禁止制約条件の例（上位概念表現）

```

#以下の各項目が上から順に達成されること
#
# 母線連絡投入
((名称=三菱 154kV 母線連絡, 入切状態=入))

# 甲母線への接続開放
((名称=三菱 154kV 甲母線, 接続設備={}))

# 母線連絡開放
((名称=三菱 154kV 母線連絡, 入切状態=切))

```

図 5-11 母線切替操作におけるサブゴール到達制約条件の例（上位概念表現）

5.4. 部品ライブラリ化による監視制御システム構築技術

監視制御や保護システムに実装するロジックは、電力システムに導入され始めた初期段階においては、対象システムの個別事情に応じた個別仕様が主流であったが、コスト削減や保守性向上を目指し、運用ルールの統一化によって徐々に仕様統一化・標準化へと動いていた。

しかし分散型電源の普及により、負荷供給システムの潮流方向が双方向になり、システム事故時の事故様相や復旧手順などに個別事情を考慮する必要性が生じるに従い、再び統一仕様から個別仕様の時代に戻ることが考えられる。

この場合、監視制御システム、保護システムのハードウェア仕様はプロセッサなど部品の高性能化により、統一仕様でも多様化に耐えうるが、ソフトウェアは個別事情に応じたカスタマイズ機能が重要となる。

5.4.1. ソフトウェア半自動生産環境の枠組みと理念

電力システムや大口需要家の特殊事情に応じた監視制御ロジック、保護ロジックのカスタマイズを簡易に実現する環境として、ソフトウェア半自動生産環境を構築した。当社内で MELPRO-SAVE (MELCO Protection Relay - Sure Arrangement and Verification Environment) と呼ばれる生産環境の枠組みを図 5-12 に示す^[5-11, 12]。同図は保護装置や変電所監視制御端末向けに開発した生産環境であるが、基本的な概念は配電自動化システムなどの系統全体の中央監視制御システムにも適用可能である。

同生産環境は、システム設計者が設計することにより、プログラマーを介さず正確に、自身の意図をソフトウェアに反映できるように、下記の理念の下に開発した。

- ① 誰でも：プログラミング未経験者でも、所定の流れ作業で S/W 生産が可能であること。

- ② 短時間で： 1台のパソコン上で、検証も含めて全ての作業が可能であること。リポート工事ならば、簡単なパラメータ編集で、数日でS/W生産が可能であること。
- ③ 正確に： ヒューマンエラーの可能性を一切排除すること。

同生産環境は、1台のPC上で監視・制御・保護システムの設計から製作・検証までを一貫してサポートする。特に、システム設者計自身が正確にソフトウェアを生産できるように、メニュー選択を主体としたソフトウェア部品の選定機能、製品品質を保証する整合チェック機能、瞬時値シミュレーター組込みによる精密な動作特性の検証機能、ソースコード自動生成機能などを備えている。以下、そのコンセプトと実現方法について述べる。

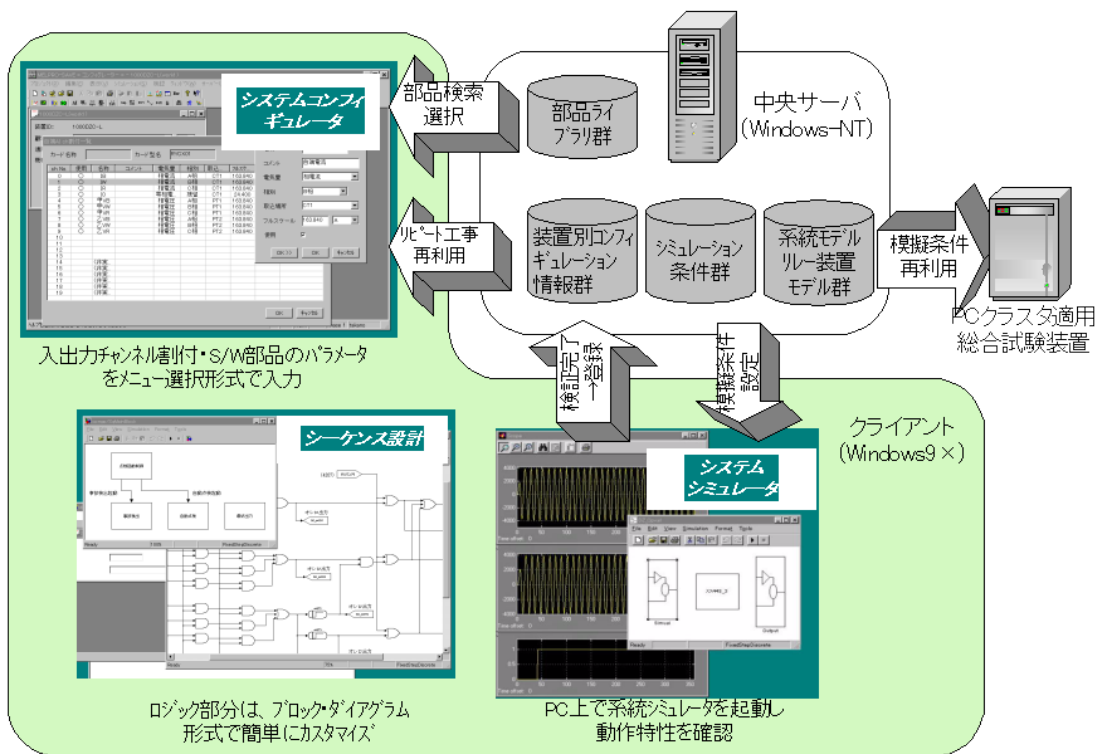


図 5-12 ソフトウェア半自動生産環境 MELPRO-SAVE の枠組み

5.4.2.生産環境の構造と特徴

(1) 構造

同生産環境は、図 5-12 に示した通り、サーバおよび設計者が通常業務で使用する PC クライアントからなる。設計者は、必要なデータをサーバにアップ/ダウンロードすることにより、作業履歴やデータを共有できる。クライアント上での生産の流れは、

- ① システムコンフィギュレータにて H/W 部品と S/W 部品選定後、部品のパラメータ値と部品間の信号授受を定義
- ② シーケンスエディタにて、ロジックゲート部品やタイマー部品をドラッグ & ドロップによりカスタマイズ
- ③ システムシミュレータにて、生成 S/W の動作特性を確認

の 3 段階からなる。これらの作業の後、アプリケーションソフトウェアは C 言語に自動変換され、コンパイル後、実機にダウンロードされる。

(2) システムコンフィギュレータの特徴

システムコンフィギュレータは、使用する部品の選択、ならびに選択した部品への入出力信号やパラメータの割り当て作業は、図 5-13 のように全てスプレッドシート上で実施する。システムコンフィギュレータ部は、以下の特徴を持つ。

① ソフトウェアの標準部品化

装置を構成する CPU カードや I/O カードのハードウェア部品に加え、過電流検出などの演算要素やそれらを組み合わせて全体の挙動を決定付けるロジックシーケンス等アプリケーションソフトウェアも機能単位に標準部品化されている。設計者は、装置ごとに必要な部品をサーバ上のライブラリから検索し、整定値などの内部パラメータ設定、入出力信号割付け作業だけで、ソフトウェアが生成できる。

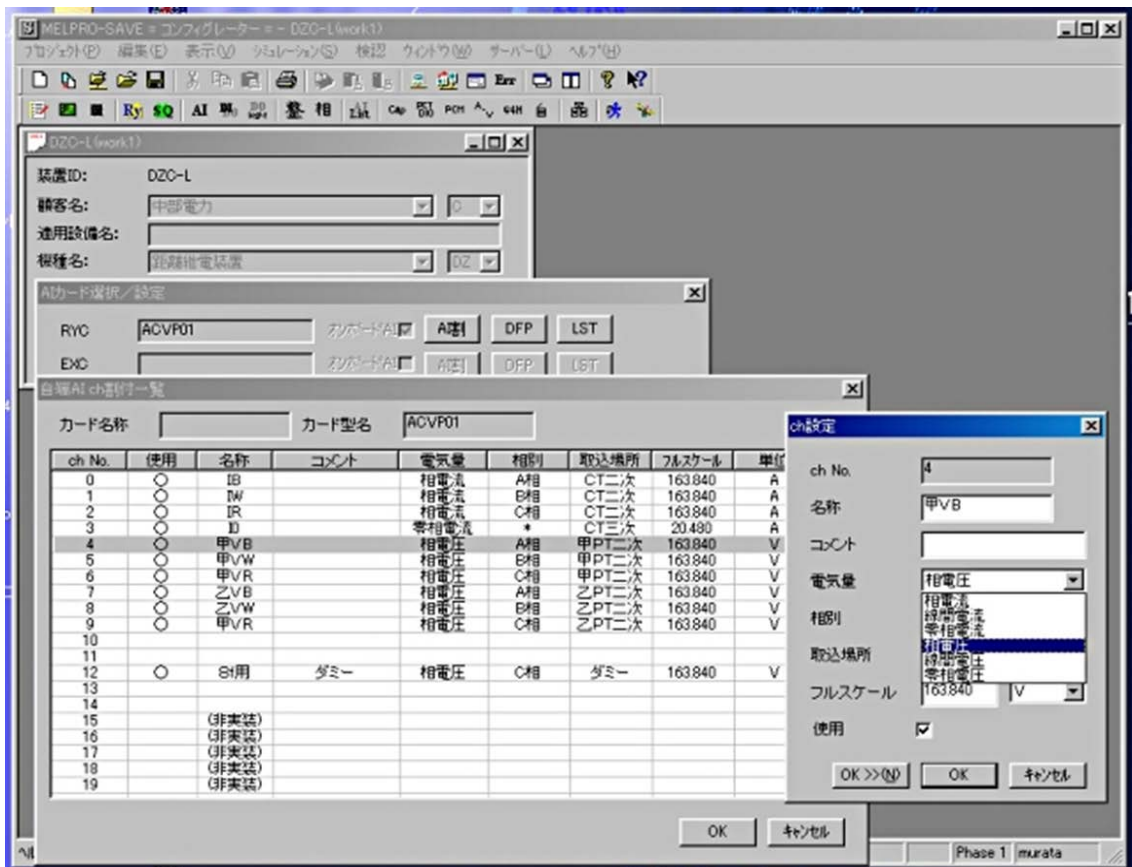


図 5-13 MELPRO-SAVE のシステムコンフィギュレータ画面例

② 強力なヒューマンエラー対策

ソフトウェアの品質向上では、パラメータ設定ミスなどヒューマンエラーをいかに撲滅するかが重要なカギとなる。当生産環境では、下記のように、パラメータ間の整合性を保ちつつ、設定候補を自動的に絞込むことによりヒューマンエラーを防止している。

- ソフトウェア部品間の結線作業による信号授受設定では、ミスの可能性が高い。そこで GUI 上での結線作業をなくし、図 5-14 のように共有メモリテーブル経由方式を採用した。信号割付は、共有メモリテーブルをイメージしたスプレッドシート上で実施される。

- ・ 部品の入出力信号や部品内部パラメータに属性を持たせ、パラメータ値の入力候補の自動絞込みを行う。例えば図 5-15 では、「過電流リレー演算」というソフトウェア部品の入力信号 1 は「電流・A相」と規定されているため、「アナログ信号共有テーブル」の中で、電圧やB，C相の信号は自動的に選択候補から除外される。更に入力信号 2 と 3 は、入力信号 1 と同じ計測点のB相、C相と規定されているため、入力信号 1 を選択した時点で、自動的に設定される。

図 5-16 は、実際のツール画面であり、スプレッドシート上で、自動的に絞り込まれたメニュー候補から、該当信号を選択する。

③ サーバ/クライアントによる情報一元管理

設計者が使用するクライアント PC で作成・変更された部品や装置ごとの設定情報は、責任者の承認を経てサーバへ登録される。どのような作業を実施したかの履歴管理や作業前後の差分情報は、当ツールによって自動的に行われる。

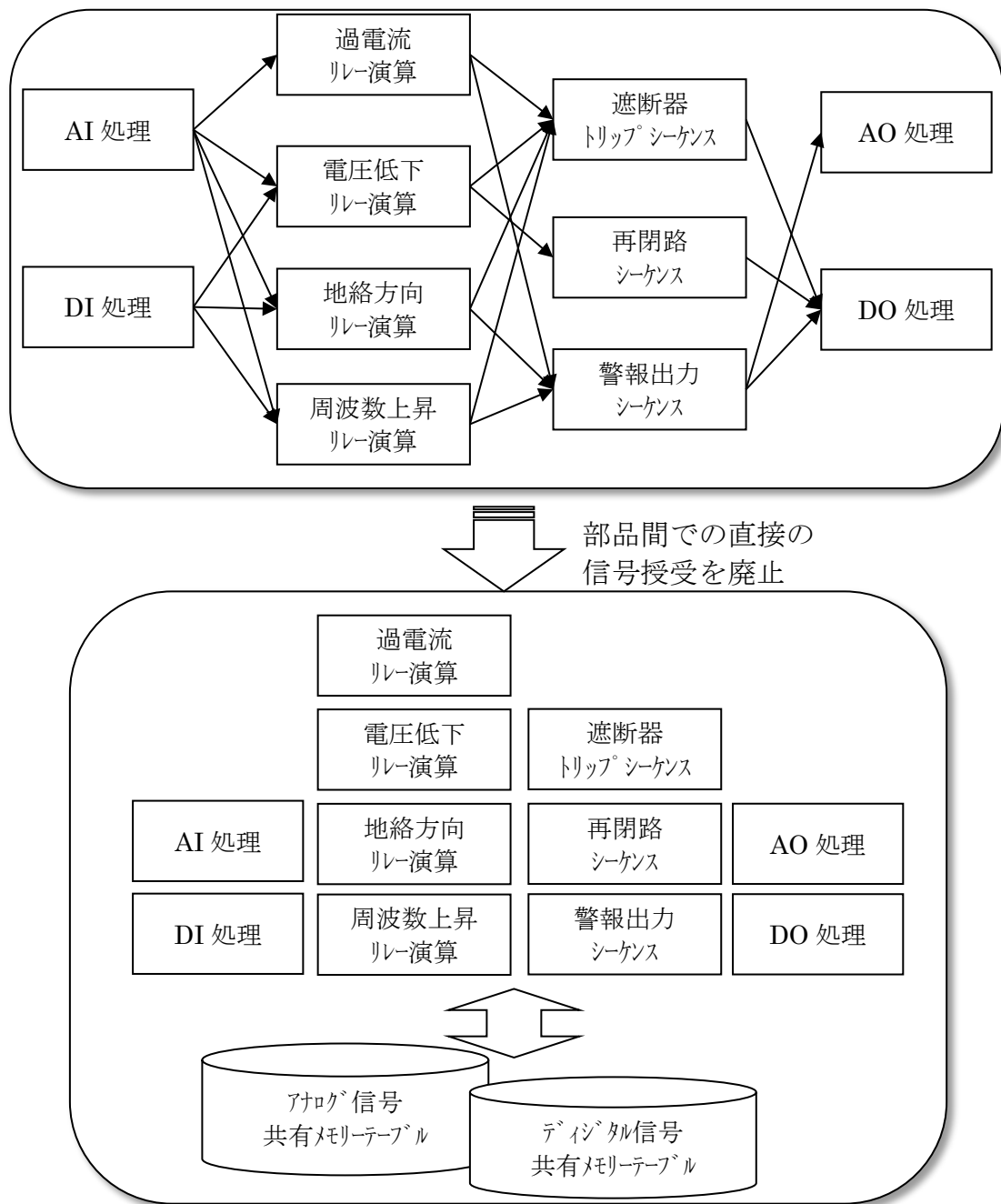


図 5-14 従来の部品結合（上部）と
共有メモリーテーブル経由での部品間結合（下部）の概念図

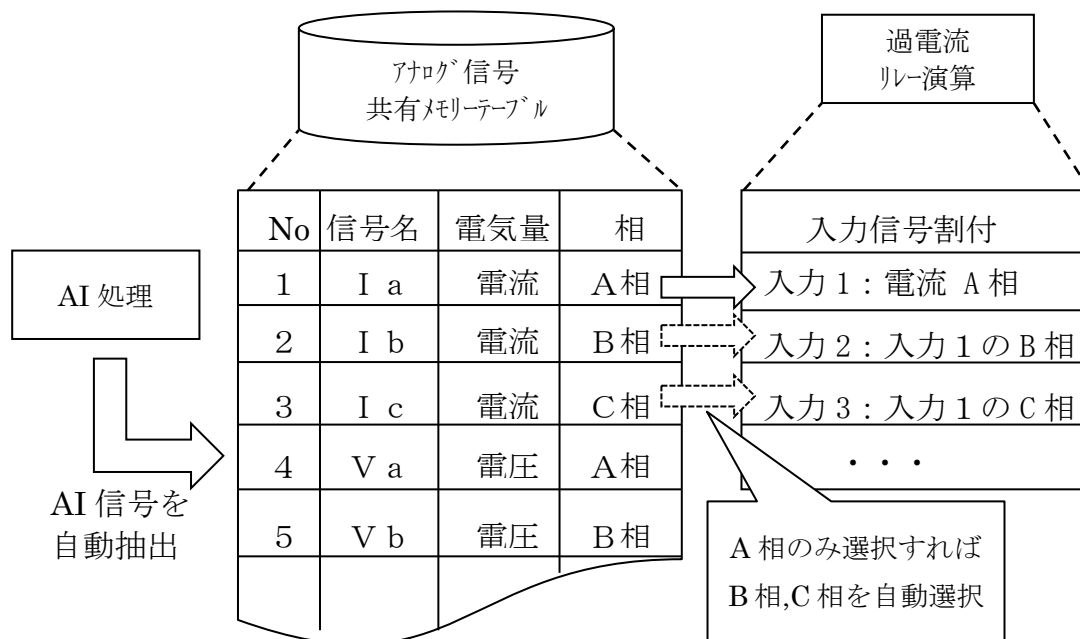


図 5-15 入出力信号の自動割付例

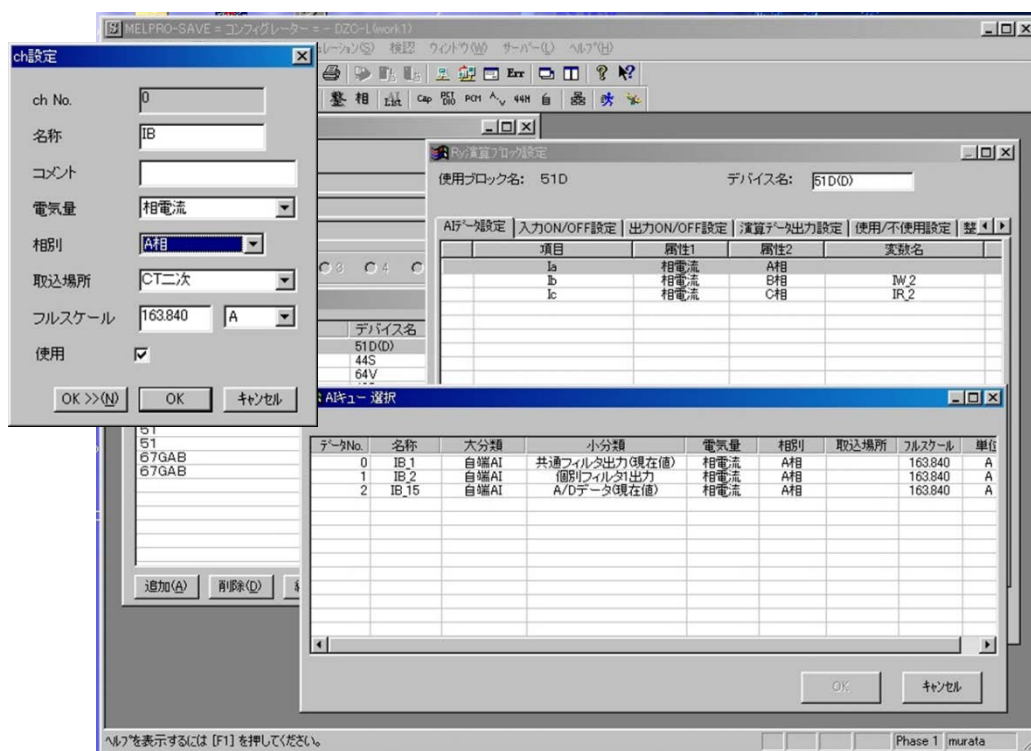


図 5-16 入出力信号の割付画面の例

(3) シーケンスエディタの特徴

標準化が困難な部分は、ロジックシーケンスとして、ブロックダイアグラム形式の専用エディタでロジックを表記できるようにした。図 5-17 はシーケンスエディタの画面例である。設計者は、同図左上オレンジ色の部品一覧から AND/OR などのゲートやタイマーなどの所望の部品シンボルをマウスで選択し、ドラッグ&ドロップで編集できる。当エディタの編集結果は、自動的に C 言語に変換されるため、プログラミング作業なしに高速かつ正確なアプリケーションが生産できる。

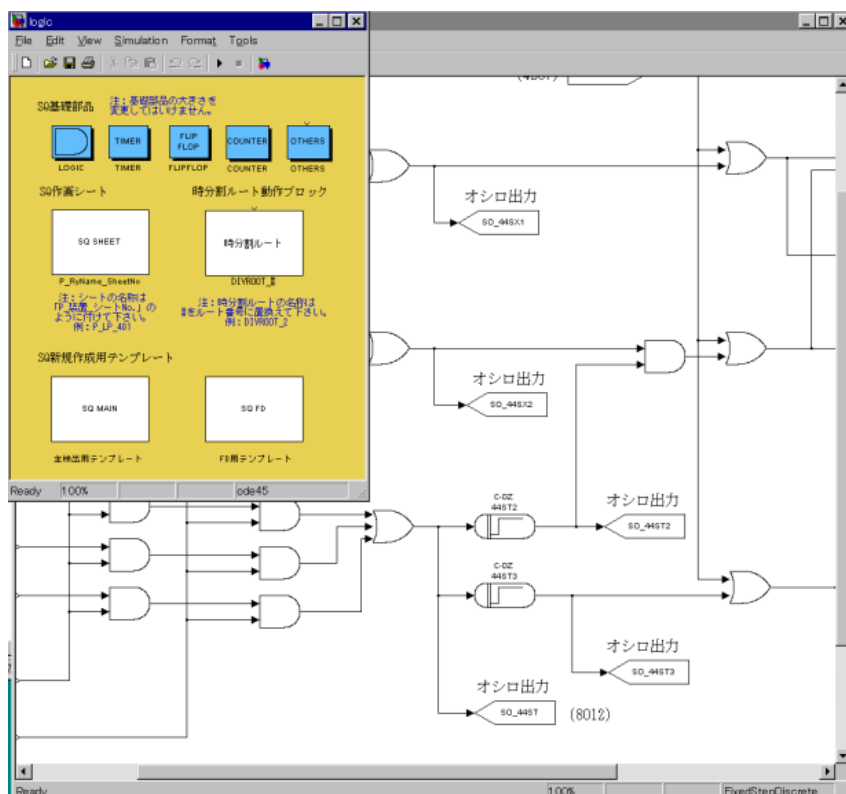


図 5-17 入出力信号の割付画面の例

(4) システムシミュレータの特徴

システムコンフィギュレータ、シーケンスエディタを通して生成されたソフトウェアは、同じ PC 上で動作確認される。

① 瞬時値シミュレーターの実装

EMTP と同レベルの瞬時値シミュレーターを系統モデルとして実装しているため、複雑な系統事故ケースでの動作確認が行え、また、遮断器トリップなどのシステム動作を系統モデルフィードバックさせ、再閉路動作などの一連の流れまで確認できる。

② 仮想装置モデルを実現

上記シミュレーターのみならず、CT/PT からのアナログ入力や他装置との信号授受を行う IO カード、アナログフィルターなどの装置ハードウェアの電気的特性をも装置モデルとして模擬している。これにより、実機相当のチェックが可能となり、動作確認したアルゴリズムを実機ソフトウェアとしてそのまま出力するため、製品ソフトウェアそのものを検証することになる。

③ 総合自動試験装置との連携 (図 5-18 参照)

生成ソフトウェアを実装した実機の総合試験装置は、上記瞬時値シミュレーターをリアルタイム演算する環境となっている。シミュレーションエンジン自体は共通であるため、本ツールで実施したシミュレーションの内容・条件は、総合試験装置でも自動的に実行できる。

図 5-19 は、PC 上でのシミュレーション試験の例である。シミュレーターが生成した三相 4 線系統における 1 線地絡事故の電流波形と、それを AI 信号として取り込んだ保護リレー装置の遮断器トリップ信号出力、更にそれを反映した事故電流除去といった一連の動作を確認している画面例である。従来では、このような系統へのフィードバックを加味した動作確認、実機の H/W 特性を加味した動作確認は、実機を用いた図 5-18 のような総合試験でのみ可能であったが、前記①と②により、PC 上でも同レベルの確認が可能となり、システム開発が格段に効率化した。

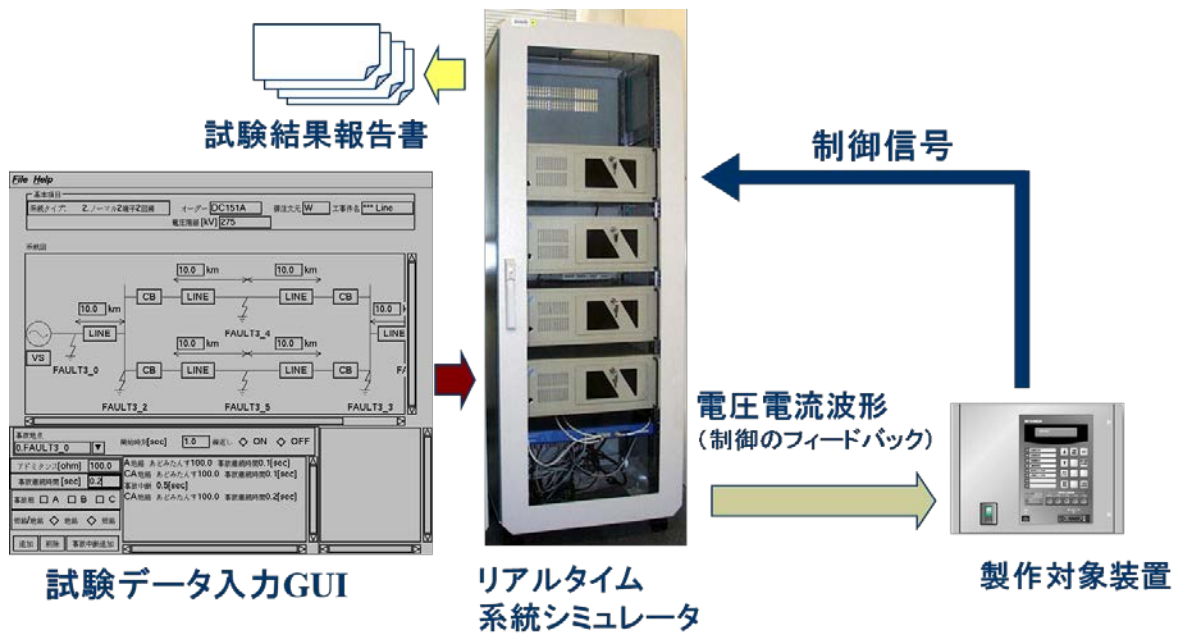


図 5-18 MELPRO-SAVE と連携の総合試験装置

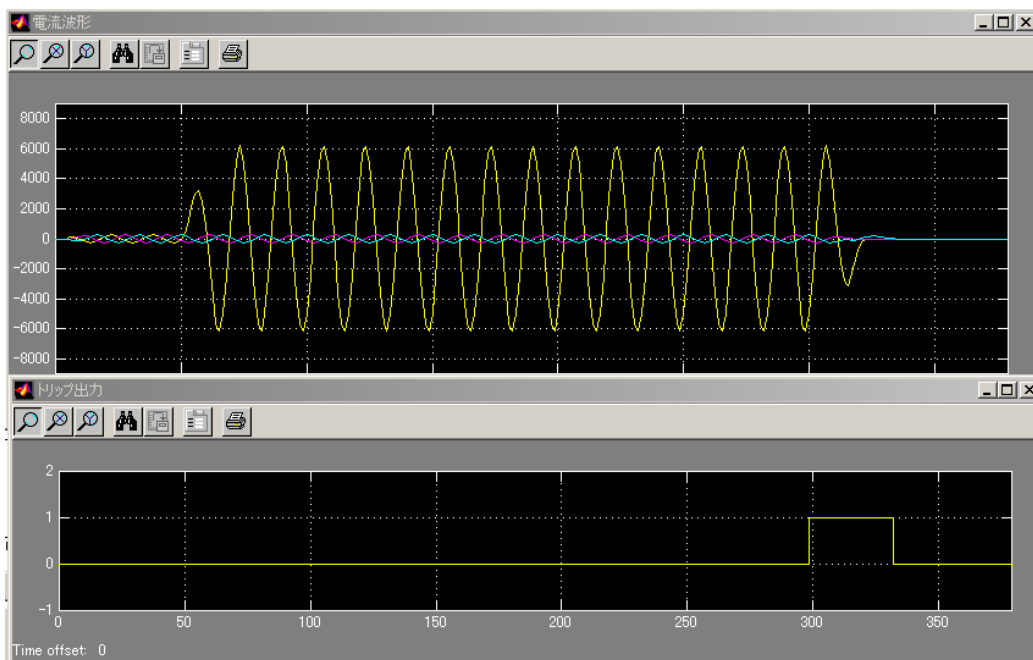


図 5-19 系統事故波形 (上) と遮断器トリップ信号出力 (下) の例

5.5. 結言

本章では、分散型電源をベースとしたマイクログリッド事業の実現に不可欠なエキスパートシステムの実用化に向け、エキスパートシステムの挙動を、実際にシステムを動作させ、その過程を監視し続けることによって妥当性を判定する動的検証技術を検討した。また、マイクログリッドの分散型電源の起動・停止処理のように、系統構成や運用条件に応じて個々にパターン化できるような、系統機器に近いローカルシステムのラピッド構築技術について検討した。

本研究で開発した動的検証法では、以下の新規性と優位性を有する。

- ・ 複雑化するエキスパートシステムにおいて、知識ベースを論理的にチェックする静的検証法では困難であったシステム全体として妥当性を、エキスパートシステムを実際に動作させつつ評価する手法を考案。
- ・ 検証項目ともいふべき制約条件として、最終的に得られるべきゴールのみならず、推論途中で許容されない状態・遷移を加えることで、より精度の高い検証を実現。
- ・ 検証項目ともいふべき制約条件を、個々の機器レベルの状態組み合わせではなく、シミュレーターと組み合わせることによって、より運用者の実感に近いマクロ的なレベルで表現。

静的検証技術でもある程度の妥当性は評価できるため、今後、実用化に向けては、まずは静的検証法で評価し、更に最終確認として動的検証法を適用する、といった複合型の検証技術を検討していく必要がある。

ラピッド構築技術では、従来のソフトウェア部品化技術・部品結合技術に、ヒューマンエラーを防止する入出力信号紐付方法など新たな工夫をこらし、パソコン上でより簡単かつ正確にシステムを生産する環境を実現した。

本研究で開発したラピッド構築技術に基づく生産環境では、以下の新規性と優位性を有する。

- ・ 単にソフトウェアを部品化するのみならず、部品間の信号割付時のヒューマンエラーを防止するための、新たな自動割付方式を考案。

- ・ 実機ハードウェアの特性をソフト的に模擬した仮想装置やシステムシミュレーションソフトとリンクすることによって、従来では製作ソフトウェアを実機ハードウェアに実装し、電力系統模擬装置と接続して実施していた検証作業を、パソコン上でソフト的に実施する環境を構築。
- ・ 上記技術により、システム構築で約 1/3 の比重を占めていた検証作業を格段に短縮。自動信号絞り込みやスプレッドシートに統一された作業環境の改善効果と合わせて、システム構築に要する時間を概ね半分近くに短縮。

本技術によるシステム構築環境は、主に変電所の監視・制御・保護システム、発電機保護システム、鉄道の電力系制御システムなどを対象に、2000 年より当社内で実用化されており、バージョンアップを繰り返しつつ、現在も活用されている。

参考文献

- [5-1] T.Nguyen : ” Verifying Consistency of Production Systems” , 3rd Conference on AI Applications, 4 (1987)
- [5-2] T.Nguyen, W.Perkins, T.Laffery, D.Peora : ” Checking an Expert System Knowledge Base for Consistency and Completeness” , 9th International Joint Conference on Artificial Intelligence, pp.375-378 (1986)
- [5-3] H.Marathe, C.Liu, T.Ma : ” A Relational Representation of Complex Knowledge with Application to Power System Problems” , Symposium on Expert System’ s Application to Power Systems, 2, 4 (1998)
- [5-4] 片山・竹並・川上・黒澤 : “汎用 PC におけるソフト PLC の開発／実行環境の実現” , 平成 10 年前記情報処理学会全国大会, pp.30-31 (1998)
- [5-5] 渡部・土居崎 : “受配電設備の運転支援技術の最近の動向” , 電気学会論文 B, Vol. 119, No. 10, pp.1016-1019 (1999)
- [5-6] 小泉・杉本・飛山 : “III. 分野別ソフトウェア開発方法論と技法” , 電気学会論文 C, Vol.114, No.6, pp.627-635 (1994)
- [5-7] 小島・中田・丹下・西田 : “監視制御システム向けアプリケーションフレームワーク” , 電気学会論文 C, Vol. 119, No. 10, pp.1274-1282 (1999)
- [5-8] <http://www.iec.ch/smartgrid/standards/>
- [5-9] 高野・松本・坂口 : “知識ベースシステムの動的検証法” , 電気学会論文 B, Vol. 111, No. 1, pp. 125-132 (1991)
- [5-10] 高野・松本・坂口 : 「知識ベースの動的検証法と電力分野への応用」, 平成 2 年電気学会電力技術研究会, PE-90-76 (1990)
- [5-11] H.Sato, T.Takano, S.Inoue, S.Oda, T.Anzai, N.Kusano : ” A Comprehensive Approach for Numerical Relay System Evaluation and Test” , Developments in Power System Protection, 1A-3 (2001)
- [5-12] 高野・佐藤・山根・村田 : “新型デジタルリレーのエンジニアリング環境” , 平成 12 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 178 (2000)

第6章 結論

6.1. 研究の成果

今後更なる普及が期待される RE、特に天候任せで出力変動の激しい PV や WT に対して、負荷供給系統における電圧問題の回避や、マイクログリッドによる積極活動について検討した。

また、RE 普及と電力自由化の流れの中で、今後、多様な負荷供給系統の運用形態が発生してくることを想定し、系統操作を題材に、その多様性に対応した監視制御システムの構築技術について検討した。

具体的には、各章において、以下の成果を得ることができた。

第2章においては、PV 大量導入時に問題となる、配電系統における電圧上昇・電圧変動に対して、系統運用側からの対策と、需要家側からの対策の2技術を検討した。

系統運用側の対策技術としては、集中とローカルを組み合わせた二階層型の電圧制御システムの枠組みと、最適潮流計算を応用した制御ロジックについて検討し、実証系統にて、従来のローカル制御と比較し、その有効性を確認した。特に SVC や PV-PCS などの無効電力制御を高速に行うことができるパワエレ機器と、従来の低速の機械式電圧調整器を組み合わせることにより、より高い電圧維持効果が期待できることが分かった。

需要家側の対策技術としては、電流計測のみで安価に実現できる進相コンデンサ制御システムの制御ロジックを検討し、実際に複数の高圧需要家にて実証、その有効性を確認した。特に進相コンデンサ投入前後の電流変化から負荷力率を推定する機能では、高精度での力率推定が実証でき、それにより負荷の無効電力を正確に把握、適正なコンデンサ制御ができることが分かった。このコンデンサ制御システムを普及させることで、現在問題となっている配電系統のフェランチ現象の解消が期待できる。

第3章においては、出力不安定な PV や WT といった RE 電源を積極活用すべく、蓄電池による出力安定化技術と、災害地域や離島など小規模独立系統での RE 電源による自立運転技術について検討した。

蓄電池による出力安定化技術としては、PV や WT を安定電源として活用してい

くために必要不可欠な計画発電技術について検討した。事業収支最大化という目的関数のもとで、発電予測誤差を考慮した出力安定性と蓄電池容量削減とのトレードオフという観点から、適正な発電計画の設定方法と、必要な蓄電池容量の見積りについて、シミュレーションを通して知見を得ることができた。

またマイクログリッドのような小規模独立系統では問題となる三相不平衡を、PV など分散電源のパワーコンディショナーを使って解消する技術を新たに開発し、その有効性を確認できた。この技術は、住宅用 PV が大量普及して不平衡拡大の可能性が高い一般配電系統にも応用可能と考える。

第4章においては、分散型電源を含めた小規模系統の運用で障壁となることが予想される、熟練オペレータの欠如という課題を、計算機システムで補うことを目指した。特に本研究では、系統操作手順の作成という、系統運用において極めて高い専門知識と経験が要求される領域をターゲットとし、エキスパートシステムによる手順の自動作成について検討した。

操作手順作成エキスパートシステムを構築するには、膨大な熟練オペレータの専門知識・経験を効率的に計算機へ移植することが一番の課題である。本研究では、過去の操作事例を分析・整理することで知識を自動獲得する、事例学習手法を提案した。また、実際の系統操作を題材に、その可能性について検討した。

第5章においては、エキスパートシステムのように高度な判断を行う中央計算機システムと、パターン化された基本処理を行うローカル計算機システムの2つを対象に、系統を運用するための監視制御保護システムの構築技術について検討した

エキスパートシステムの実用化に向けては、従来はシステム信頼性保証の面で課題が残されているが、その解決策として実際にシステムに問題を解かせ、挙動を監視しつつ妥当性を評価する動的検証法についても検討した。

また、処理やロジックがある程度パターン化されていながらも、個々の系統に応じた細部のカスタマイズが必要な、系統機器に近いローカル監視制御保護の情報処理についても、処理ソフトウェアの部品化・ライブラリ化によって、システム開発を効率化する手法について検討した。

6.2. 今後の展開

PV や WT といった出力不安定な RE 電源による電力系統への影響を回避する技術については、これまでも多くの研究開発がなされてきた。しかし、それらの研究にとって、分散型電源はあくまで系統にとって“迷惑をかける”存在として扱われてきた。

今後は、RE をはじめとする分散型電源の比重が増えるに従い、出力や稼働が不安定ながらも、いかに上手く分散型電源を使いこなしていくかが今後の大きな研究の流れと考える。

電力自由化により、電力系統や分散型電源の運用形態が、様々な方向に発展していく可能性があるこの変遷の時代において、どのような点に着眼して研究開発をしていくかも、電力の研究者にとって1つの大きな課題である。

そのような状況下、本論文で検討した内容をベースに、更なる発展として、以下のようなテーマに取り組んでいく予定である。

(1) 分散型電源を考慮した負荷供給系統の運用高度化

第2章で検討した電圧制御に限らず、系統事故復旧時の融通計算（停電区間をどの経路で復旧していくか）などのオンライン系機能、制御機器の増設や系統トポロジー設計などオフライン系機能など様々な運用業務においては、まずは現状の系統状態（潮流分布や電圧分布）を正確に把握し、問題の有無、問題のレベルを評価することが第一ステップとなる。

しかし負荷供給系統では、出力を直接計測できない PV や WT が増えることにより、図 6-1 のように電圧分布・潮流分布が複雑化しても、それを把握することがが難しい。

現在、国内の電力各社は、センサー付開閉器を段階的に配電線へ展開し、配電線の電圧分布・潮流分布を詳しく把握しようとしている。しかしセンサー付開閉器は展開完了には 20 年程度を要し、しかもせいぜい 1, 2km おきに設置されるのみであることから、未展開状態の系統、展開済みでも開閉器間の系統電圧・潮流把握については、以前として未知の状況が続く。

そこで、需要家単位で負荷が把握できるスマートメータ情報を活用し、センサー付開閉器間の電圧・潮流分布を数十 m おきの電柱単位で詳細に把握する技術の開発が望まれる。

センサー付開閉器で計測される潮流は、実際に消費されている負荷（実負荷）から分散型電源出力分が差し引かれた、見かけ上実負荷より軽い潮流と

なっている。ところが、系統事故が発生すると分散型電源は一斉に解列し、停電復旧後も3分程度は再連系されないため、その間は系統から見れば急に負荷が増加することになる。その対策として、日射計や天気情報により RE 発電量を精度良く推定しておくことも、併せて必要である。

電柱単位の電圧・潮流分布の把握と、分散型電源発電推定に基づく実負荷分布の把握により、図 6-2 のような各種業務の高度化が期待できる。

例えば第2章で検討した電圧制御では、あくまで現在断面の潮流・電圧分布に基づき制御を決定するが、RE の現発電量を把握することによって、数分先に RE 発電が最大/最小でどの程度変化し、それによって電圧が最大/最小でどの程度の変化しうるかが予測可能となる。予測制御により、現在の瞬間的な電圧逸脱には LRT/SVR のタップ制御を使わないなど、より高度な制御が実現できる。

事故復旧においても、分散型電源の発電量を除外した系統の実負荷を電柱単位で把握することにより、より小刻みな継投単位での復旧が可能となるとともに、融通復旧後、分散型電源が再連系するまでの潮流過負荷発生を完全に回避できる。

設備計画においても、将来系統の潮流・電圧分布の最大/最小値が電柱単位で予測できるため、どこにどの程度の容量の設備増設をすればよいか、また電圧制御でいえば、SVR を設置したほうがよいか、SVC を設置したほうがよいかといった、適切な機器種別の選定が可能となり、必要にして十分な設備投資を実現できる。

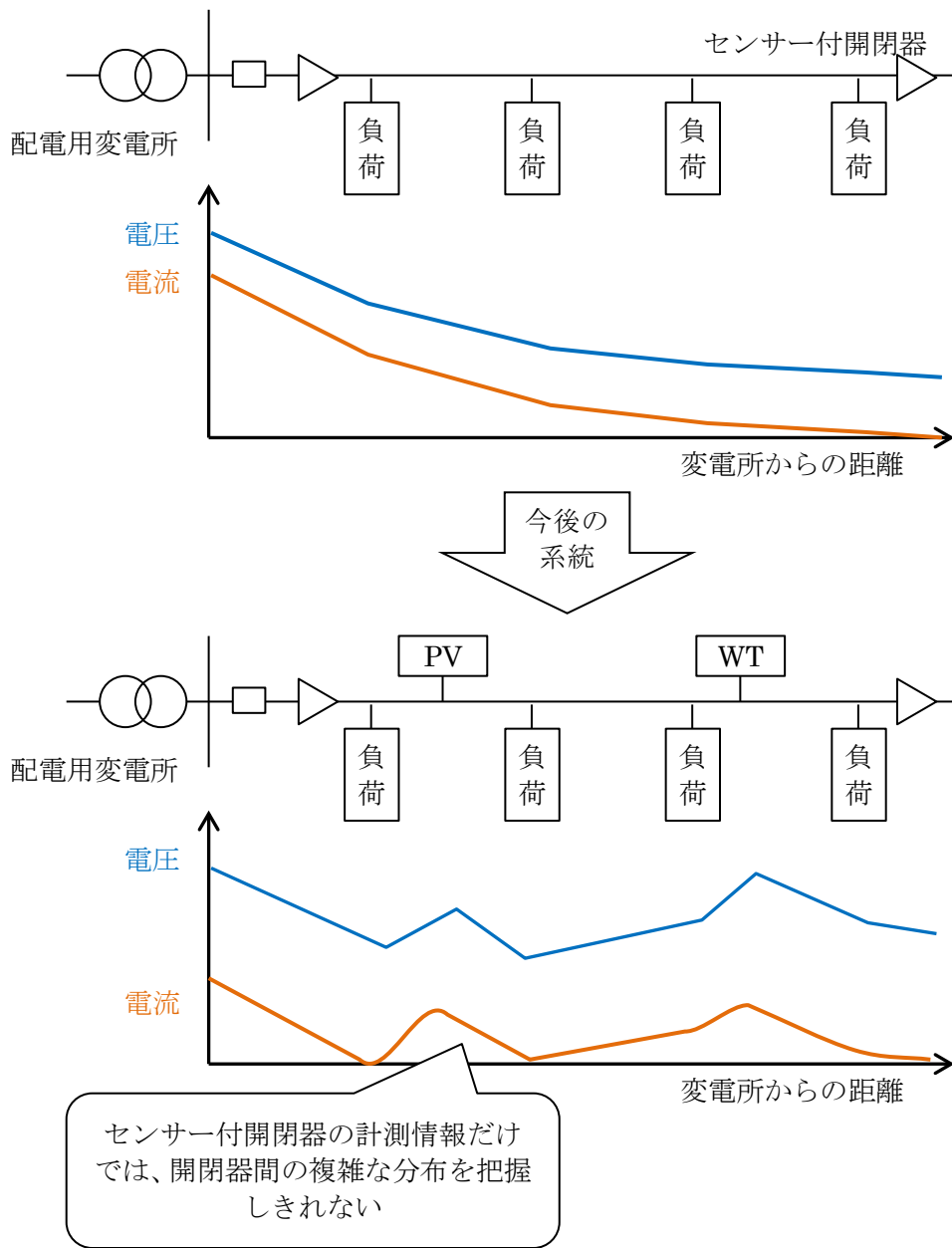


図 6-1 分散型電源普及に伴う電圧・潮流の複雑化イメージ

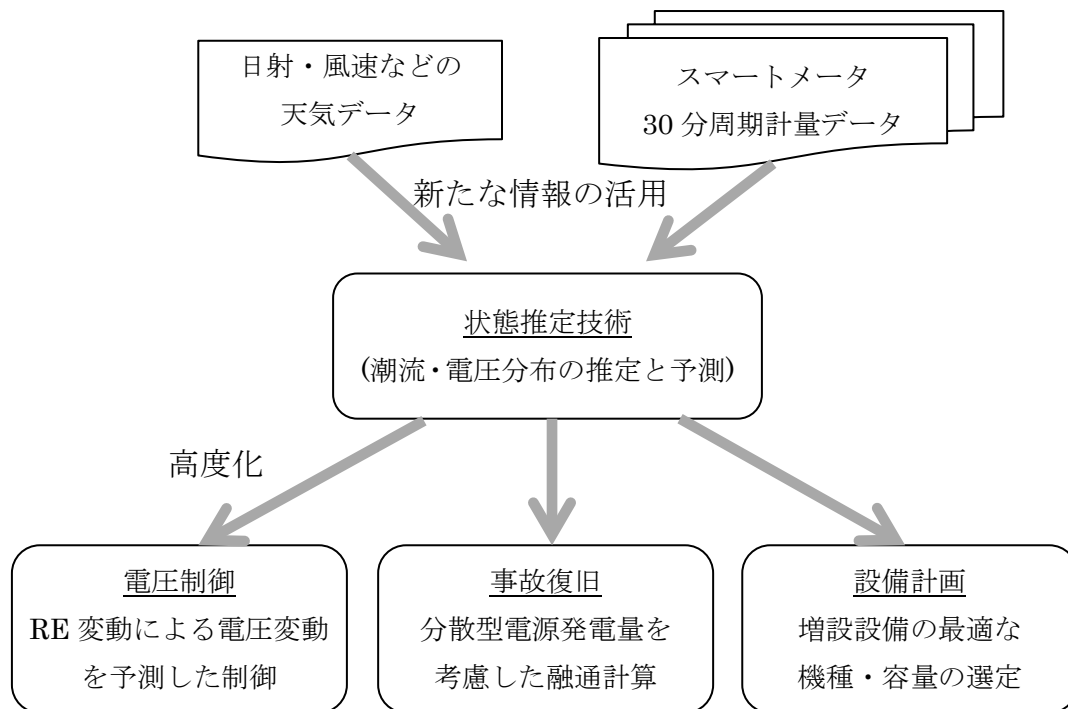


図 6-2 状態推定技術と運用業務の高度化

(2) 分散型電源・需要家を取り込んだ統合的な系統運用

近年、“Prosumer” (Producer : 発電者と Consumer : 消費者との合成語) や、DSI (Demand Side Integration : Demand Side Response より一步進んだ、需要家サイド、分散型電源を統合した系統運用) といった、需要家を取り込んだ系統運用の概念が海外で一般化しつつある。

これは、需給調整や電力品質維持といった諸問題を、従来のように系統運用側がすべて負担するのではなく、需要家サイドでも負担できるところは負担してもらい、全体としてコストミニマムを図っていく思想と言える。

国内においても、東日本大震災依頼デマンドレスポンスが多方面で研究されている。また、一部の大容量 RE に対しては、系統電圧への影響を低減すべく、進相力率一定運転といった負担を求めるケースも出ている。

第3章で述べたような RE 制御技術をされに進めて、図 6-3 のように需要家サイドで、①系統電圧に応じて分散型電源の力率をダイナミックに変化させる電圧制御や、周波数変動に応じて電源出力、負荷量を瞬時に調整すると

いった電力品質維持への貢献、②系統全体の供給余力に追従したダイナミックな分散型電源出力調整や従来型ピークカット／ピークシフトを強化、リアルタイム化した供給力確保への貢献、③出力不安定な RE も含めたロードレベリングやエネルギー地産地消による、系統潮流の増大回避とそれによる系統設備投資への抑制への貢献、といった様々な貢献のポテンシャルについて分析・評価していくことが望まれる。

また、それら需要家サイドのローカルかつミクロな対策と、系統運用サイドによるセントラルかつマクロな対策とのベストバランスについても検討が必要である。

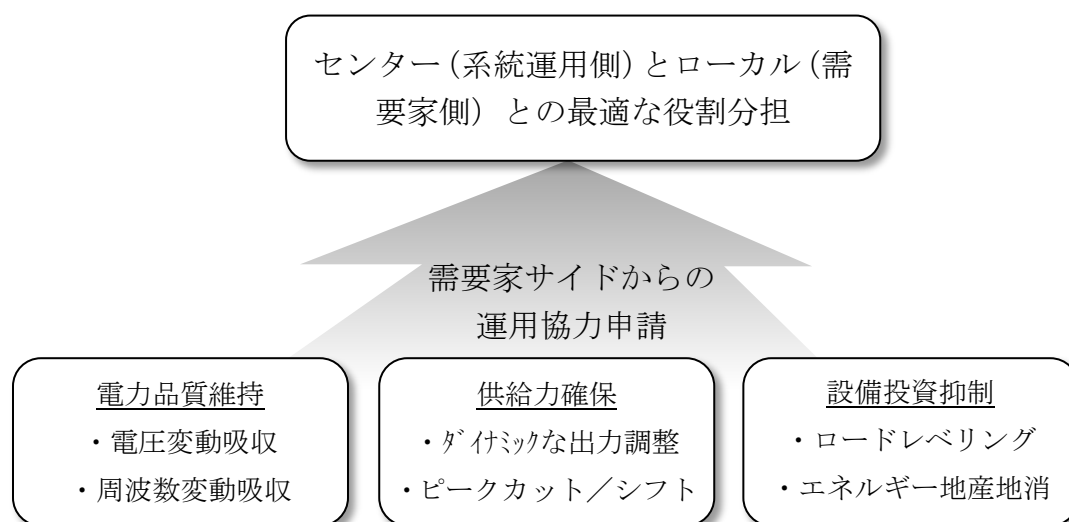


図 6-3 需要家サイドの系統運用への貢献

(3) システムの更なるインテリジェント化

系統運用の多様化に従い、第4章、第5章で検討したシステム技術の発展形として、系統操作などのオンライン制御系に限らず、系統異常や事故検出などの監視保護系、設備形成等のオフライン計画系にいたる様々な分野で、電力系統の専門知識のない一般技術者でも運用できるレベルの各種支援システムの充実が望まれる。同時に、技術伝承の意味においても、熟練オペレータや専門家のみが保有していた系統運用の専門知識の公開・共有が望まれる。

一方で、従来は国ごと、電力会社ごと、系統ごとに発展してきた電力系統

の運用技術の標準化も解決策の1つとして重要である。電力分野においては、国際標準化は、欧米に主導権を握られた形で進んでいるが、日本の優れたPV、WT 対策技術、蓄電池制御技術、電圧制御など負荷供給システムの制御技術などの国内標準化を図り、国際標準の主導権を握ることが望まれる。

そこで、図 6-4 のように、個別に発展してきた現状の運用知識・技術を整理し、国内電力の標準運用知識として幅広く公開するとともに、IEC 規格など国際標準へ展開していくことを考える。そのためには、運用知識の自動抽出と体系的整理を行えるような、機械学習を応用した計算機システム技術を開発していく必要がある。

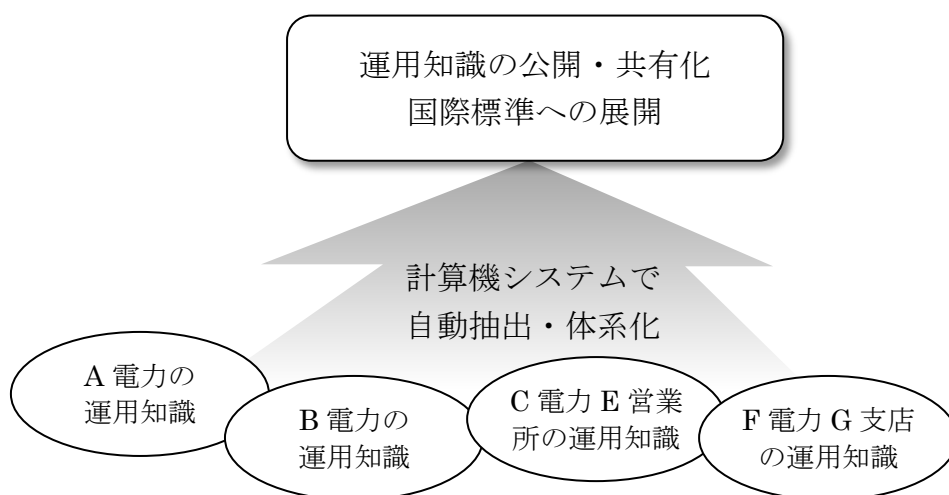


図 6-4 系統運用知識の発展

謝辞

本論文は、主として著者が三菱電機（株）先端技術総合研究所で行ったものを、東京大学大学院工学系研究科 横山明彦教授のご指導のもとに、まとめたものである。本論文をまとめるにあたり、同教授よりいただいたご懇篤なご指導は、大きな推進力となった。また、本論文の査閲と討論を賜りました、東京大学大学院工学系研究科 谷口治人特任教授、日高邦彦教授、松橋隆治教授、藤井康正教授、東京大学大学院新領域創成科学研究科 馬場旬平准教授に厚く御礼申し上げます。

また、本研究を進めるにあたり、送配電系統における諸問題の提起、ならびに貴重なるご助言、データをご提供いただいた東京電力（株）パワーグリッド・カンパニー配電部、同技術開発センター、東北電力（株）研究開発センター、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構、（株）三菱総合研究所の各位には、心より感謝いたします。

著者が所属する三菱電機（株）先端技術総合研究所 ソリューション技術部長 石原鑑博士には、よい研究環境と本論文を書く機会を与えていただくとともに、終始ご厚情あふれる激励を賜った。また、同所システム部門 泉井良夫博士には、著者の長年に渡る上司として、研究遂行上の有益かつ適切なご示唆とご教示をいただくとともに、並々ならぬご指導をいただいた。

大阪府立大学大学院工学研究科 松本啓之亮教授、および福井大学大学院工学研究科 田岡久雄教授には、入社以来、研究開発全般を通じて、適切なご助言、ご意見をいただいた。

本論文は、三菱電機（株）の諸先輩方、同僚、後輩の多大なご支援とご協力の賜物である。本論文における監視制御保護システム関連においては同社系統変電システム製作所、ならびに神戸製作所、マイクログリッド関連においては電力システム製作所の多くの方々に、社会ニーズや実用性をはじめ、さまざまな観点からのご助言とご討論の機会をいただいた。いただいたご示唆は、本研究を進める上で、誠に大きな力添えとなった。特に系統変電システム製作所電力流通システム部 小島課長、ならびに同所系統変電エンジニアリング統括センター 北山課長には、長年に渡り、さまざまな研究テーマにおける共同研究者として、熱心な議論を通して貴重なご意見をいただくとともに、本論文を作

成する上でも、貴重なるご助言をいただいた。

著者の所属する先端技術総合研究所ソリューション技術部の方々には、格別のご激励とご助力をいただいた。技術上関連の深い同所電力変換システム技術部、電機システム技術部、蓄電デバイスプロジェクトグループの方々には、実証機構築、フィールド試験など多岐にわたってご協力いただくとともに、熱心な技術討論をしていただいた。

以上の方々に対し、心より感謝の意を捧げます。

業績目録

【主執筆の査読付き論文】

- [1] 高野・松本・坂口：“知識ベースシステムの動的検証法”，電気学会論文B, Vol. 111, No. 1, pp. 125-132 (1991)
- [2] 吉澤・荻・高野・松本：“階層的概念関係に基づく学習方式 HCL と操作手順作成知識の獲得”，電気学会論文B, Vol. 113, No. 2, pp. 123-130 (1993)
- [3] J. Yoshizawa, H. Ogi, T. Takano, K. Matsumoto：“An Automatic Knowledge Acquisition Method for Switching Sequences and its Evaluation”，IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 2, pp. 884-890 (1994).
- [4] 高野・松本・大木・大橋：“事例学習による給電所向け操作指令手順表作成システム”，電気学会論文B, Vol. 115, No. 7, pp. 795-802 (1995)
- [5] 高野・小島・天満・下村：“八戸市マイクログリッドにおける自立運転の実証”，電気学会論文B, Vol. 129, No. 4, pp. 499-506 (2009)
- [6] 松田・二上・高野・片岡・小林：“電流計測による自動力率調整装置の実現と評価”，電気学会論文B, Vol. 133, No. 2, pp. 210-217 (2013)

【主執筆の国際学会】

- [1] T. Takano, K. Matsumoto, S. Kuzuoka, E. Ogawa：“Verification of Practical Rule-Based Systems for Space”，i-SAIRAS' 90, pp. 189-192 (1990)
- [2] J. Yoshizawa, H. Ogi, T. Takano, K. Matsumoto：“An Approach to Knowledge Acquisition for Switching Sequences based on HCL (Hierarchical Concept based Learning)”，Proceedings of ESAP IV, pp. 569-575 (1993)
- [3] T. Takano, K. Matsumoto, I. Oki, T. Ohashi：“A Case Learning Tool for Operations of Power Systems”，Proceeding of 1996 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems (ISAP' 96), pp. 91-96 (1996)
- [4] H. Sato, T. Takano, S. Inoue, S. Oda, T. Anzai, N. Kusano：“A Comprehensive Approach for Numerical Relay System Evaluation and Test”，Developments in Power System Protection, 1A-3 (2001)
- [5] J. Motohashi, K. Taguchi, T. Takano, M. Watanabe, M. Watanabe, K. Ogawa：“Development of Advanced Systems Corresponding to the Connection of Dispersed Generation to Distribution System in Tokyo Electric Power Company”，CIGRE2004 パリ大会, C6-109 (2004)

【主執筆の研究会・全国大会】

- [1] 高野・松本・坂口：“仕様記述に基づくルールベースシステムの動的な検証法”，計測自動制御学会第 11 回知識・知能システムシンポジウム講演論文集，pp. 195-198 (1990)
- [2] 高野・松本・坂口：“ルールベースシステムの動的な検証法”，平成 2 年電気学会全国大会，985 (1990)
- [3] 高野・松本・坂口：「知識ベースの動的検証法と電力分野への応用」，平成 2 年電気学会電力技術研究会，PE-90-76 (1990)
- [4] 吉澤・荻・高野・松本：“階層的概念構造に基づく学習 (HCL: Hierarchical Concept-based Learning) と系統操作手順作成への応用”，平成 3 年電気学会全国大会，1160 (1991)
- [5] 吉澤・荻・高野・松本：“階層的概念関係に基づく学習方式HCLと系統操作手順作成知識の獲得”，平成 3 年電気学会電力技術研究会，PE-91-34 (1991)
- [6] 吉澤・荻・高野・松本：“階層的概念関係に基づく学習方式HCL (Hierarchical Concept based Learning) と手続き知識の獲得”，計測自動制御学会第 15 回知能システムシンポジウム，pp. 181-186 (1992)
- [7] 吉澤・荻・高野・松本：“階層的概念構造に基づく学習方式HCLを導入した系統操作手順作成システム”，平成 4 年電気学会 全国大会，1019 (1992)
- [8] 吉澤・荻・高野・松本：“操作手順学習方式HCLにおける拡張と操作確認項目に対する検討”，平成 4 年電気学会電力技術研究，PE-92-9 (1992)
- [9] 吉澤・荻・高野・松本：“階層的概念関係に基づく学習方式HCLによる系統操作手順作成知識の獲得とその評価”，平成 4 年電気学会 電力・エネルギー部門大会，199 (1992)
- [10] 吉澤・荻・高野・松本：“操作手順学習方式HCLにおける拡張—給電所指令手順への対応—”，平成 5 年電気学会全国大会，1116 (1993)
- [11] 吉澤・荻・高野・松本：“階層的概念関係に基づく学習方式—電力系統操作における手続き知識の獲得とその評価—”，計測自動制御学会第 17 回知能システムシンポジウム，pp. 57-62 (1993)
- [12] 吉澤・荻・高野・松本：“系統操作手順作成システムのための知識自動獲得手法の評価と拡張”，平成 5 年電気学会 電力・エネルギー部門大会，24, pp. 139-144 (1993)
- [13] 大木・大橋・高野・松本：“給電所向け系統操作支援システムの開発と評価”，平成 7 年電学電力技術研究会，PE-95-171 (1995)
- [14] 高野・佐藤・山根・村田：“新型デジタルリレーのエンジニアリング環境”，平成 12 年電気学会電力・エネルギー部門大会，178 (2000)
- [15] 吉永・平井・本橋・高野・渡辺・小和田：“配電系統における集中型電圧制御方式

- の開発”，平成16年電気学会電力・エネルギー部門大会，30（2004）
- [16] 本橋・生石・高野・板屋・押田・小和田・坂口：“配電系統向け集中型電圧制御システムの実証試験”，平成19年電気学会電力・エネルギー部門大会，307（2007）
- [17] 高野・小島・下村：“八戸市水の流れを電気で返すプロジェクトその3～自立運転のための不平衡補償の検討～”，平成20年電気学会全国大会，6-231（2008）
- [18] 松田・堀越・瀬戸・高野：“需要家進相コンデンサの電流制御方式の検討”，平成22年電気学会電力・エネルギー部門大会，207（2010）
- [19] 松田・堀越・瀬戸・高野・片岡・小林：“電流計測による進相コンデンサ制御装置の開発と評価”，平成23年電気学会電力・エネルギー部門大会，265（2011）
- [20] 高野：“事例に基づくコミュニティ系統操作支援”，平成26年電気学会全国大会，320（2014）

【主執筆の解説記事など】

- [1] 大橋・高野・辻野：“運転保守支援知識の整理・獲得手法”，三菱電機技報，Vol. 70，No. 6，pp. 39-44（1996）
- [2] 高野：“自然エネルギー発電のための電力貯蔵技術”，電気学会論文 B，Vol. 126，No. 9，pp. 857-860（2006）
- [3] 高野：“自然エネルギー発電のための電力貯蔵技術”，電気学会誌，Vol. 127，No. 10，pp. 668-671（2007）
- [4] 高野・山本・小島：“新エネルギー・マイクログリッド制御技術”，三菱電機技報，Vol. 81，No. 6，pp. 26-30（2007）
- [5] 渡邊・小島・高野：“再生可能エネルギー100%による自立運転試験結果”，日本動力協会エネルギーと動力，Vol. 58，No. 270，pp. 23-32（2008）
- [6] 河野・北山・高野：“スマートグリッドを支えるシミュレーション技術”，三菱電機技報，Vol. 86，No. 2，pp. 41-44（2012）

【主執筆の以外の査読付き論文】

- [1] 仲林・高野・天満・伊与田：“BTB システムのライフサイクルコストを指標とした評価”，電気学会論文 B，Vol. 122，No. 1，pp. 18-25（2002）
- [2] 志岐・横山・馬場・高野・合田・泉井：“単独マイクログリッドにおけるインバータを用いた分散型電源群による自律分散型需給制御”，電気学会論文 B，Vol. 127，No. 1，pp. 95-103（2007）

- [3] 山本・高野・田熊・井上・荒生：“住宅向けエネルギー供給へのマイクログリッド適用による CO2 排出量削減の評価”，電気学会論文 C, Vol.128, No.1, pp.32-38 (2008)
- [4] 小島・高野・谷川・高木・広岡・熊谷：“蓄電池による風力発電出力安定化システムの事業性検討”，電気学会論文 C, Vol.128, No.2, pp.191-198 (2008)
- [5] 河野・林・板屋・高野・大野：“低圧配電系統における高速電圧計算手法の開発と評価”，電気学会論文 B, Vol.133, No.4, pp.34-349 (2013)
- [6] 高野：“用語解説(第4回テーマ:海洋温度差発電)”，電気学会論文 B, Vol.131, No.2, p.244 (2011)
- [7] H. Sun, D. Nikovski, T. Ohno, T. Takano, Y. Kojima :” A Fast and Robust Load Flow Method for Distribution Systems with Distributed Generations” , IEEE International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE) (2011)
- [8] H. Sun, D. Nikovski, T. Ohno, T. Takano, Y. Kojima :” A Hybrid Decoupled Power Flow Method for Balanced Power Distribution Systems” , Journal of Electronic Science and Technology (JEST), Vol. 10, No. 1, pp. 15-21 (2012)
- [9] H. Sun, D. Nikovski, T. Ohno, T. Takano, Y. Kojima :” Hybrid Three-Phase Load Flow Method for Ungrounded Distribution Systems” , IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), pp.1-8 (2012)
- [10] H. Sun, D. Nikovski, T. Ohno, T. Takano, Y. Kojima :” Decoupled Three-Phase Load Flow Method for Unbalanced Distribution Systems” , IEEE International Conference on Power System Technology” , pp.1-6 (2012)

【登録特許】

- [1] 「電力系統シミュレーション装置」, 特許第 3148460 号, 高野富裕, 松本啓之亮, 荻宏美, 吉澤純一, 2001 年登録
- [2] 「電力系統模擬システム」, 特許第 3683466 号, 高野富裕, 安斉俊夫, 佐藤廣, 片山善博, 山根定章, 田中靖之, 2005 年登録
- [3] 「電力系統制御装置」, 特許第 3684292 号, 高野富裕, 仲林見幸, 北山匡史, 2005 年登録
- [4] 「監視制御システムの試験装置」, 特許第 3710619 号, 高野富裕, 北原英樹, 2005 年登録
- [5] 「電力系統安定化システム」, 特許第 4694614 号, 高野富裕, 藤塚正史, 小島康弘, 2011 年登録

- [6] 「自然エネルギー発電向け電圧変動抑制装置」, 特許第 4794523 号, 高野富裕, 小島康弘, 田熊良行, 2011 年登録
- [7] 「自然エネルギー発電制御システム」, 特許第 4808754 号, 高野富裕, 小島康弘, 2011 年登録
- [8] 「蓄熱制御装置」, 特許第 4994108 号, 高野富裕, 藤塚正史, 2012 年登録
- [9] 「太陽光発電装置」, 特許第 5073058 号, 高野富裕, 藤塚正史, 西尾直樹, 島田直人, 2012 年登録
- [10] 「進相コンデンサ制御装置」, 特許第 5274413 号, 高野富裕, 松田勝弘, 2013 年登録
- [11] 「進相コンデンサ制御装置」, 特許第 5410884 号, 高野富裕, 松田勝弘, 2013 年登録
- [12] 「自動力率調整器」, 特許第 5444168 号, 高野富裕, 松田勝弘, 2013 年登録
- [13] 「自動力率調整器」, 特許第 5419830 号, 高野富裕, 松田勝弘, 2013 年登録