

DENCHUKEN REVIEW

新時代に向けた電力システム技術

電中研レビュー No.39 2000.6



財団法人 電力中央研究所

巻頭言	中部電力 副社長 志賀 正明	2
電中研 電力システム技術研究 のあゆみ		4
はじめに	理事 狛江研究所長 福島 充男	6
第1章 研究の背景と当研究所の取り組み		7
第2章 わが国電力システムの将来像		13
2 - 1 電力需給の将来展望		13
2 - 2 電力システム技術の将来展望		19
第3章 電力輸送力の増強技術		25
3 - 1 発電機励磁制御による電力輸送力の増強		25
3 - 2 直流技術による系統機能の強化		35
第4章 電力流通網の新しい評価手法		45
4 - 1 電力系統の新しい信頼度評価手法		45
4 - 2 雷対策による電力輸送力増大効果の評価手法		53
4 - 3 コストと信頼度の調和を目指して		58
第5章 新時代の解析手法		61
5 - 1 電圧安定性解析手法		61
5 - 2 長時間動特性解析手法		64
5 - 3 パワーエレクトロニクス解析手法		67
5 - 4 並列計算によるY法高速化		69
5 - 5 電力系統解析システムの高機能化		72
おわりに	理事 首席研究員 高橋 一弘	76
引用文献・資料等		77

これからの電力システム技術



日本の電力基幹系統は、50年におよぶ電気事業者、関係業界、機関等の努力により、21世紀初頭にはほぼその骨格が完成するといつてよい。

電力系統の運用、制御面においても、各社がそれぞれの特徴を生かしながら、世界に冠たる高度なシステムを構築してきた。コンピュータ技術の飛躍的な進歩と実用的な解析手法の確立をベースに、電力とメーカー、大学、研究機関が一体となって取り組んできた成果である。40年以上にわたる広域運営の寄与も大きい。

さて、今後は電力需要の増加率が鈍化し、長期的には次第に飽和傾向を示すとの見方が一般的であるが、電力化率の向上等により、伸び率は小さくても安定した増加が見込まれ、ベースの大きさから、増分電力の絶対値は相当大きい。

一方、大規模送電線の建設は、不透明な需要や電力潮流の動向、コスト面、用地難などからますます困難になるものと考えられる。このため今後は、既存の送電系統の安定送電容量を制御技術によって増強するニーズが従来以上に高まるものと予想され、パワエレ技術等の低コスト化と適用方法の多様化などが重要な課題となろう。

また地中送電系統についても、現在の超高压ケーブルの送電容量は、架空送電線に比べて如何にも小さい。このため、大容量地中ケーブルの開発、管路気中送電のコストダウン、将来的には高温超電導ケーブルの実用化なども期待される。

ところで3月からの小売部分自由化に伴い、IPPに加えてPPS、メーカーの参入など、日本の電力系統も従来の電力対お客さまの単純構造から新規参入者を含めた混在型形態へと変化する。この中にあっても、これまでと同等の供給信頼度を維持する

ためには、これらの第三者を一体として取り込んだ円滑な運用体制を構築しなければならない。更には、分散型電源が増加する可能性もあり、設備的には常時の潮流軽減メリットがあるものの、不特定多数の様々なタイプの分散型電源を含む送電ネットワークの安定運用についても勉強しておく必要がある。

計画面では、様々な第三者が多数参入して来た場合、需要や潮流の長期想定が困難となるおそれがあり、運用面で柔軟に対応せざるを得なくなる事態が想定される。

系統解析については、手法の確立とコンピュータ、通信技術の進歩によりオンラインシミュレーションまで行うようになり、使用する定数の精度がますます重要となっている。今後は、パワエレ等の新型機器や前述のような様々な第三者の機器についても、これらをモデル化し定数を正確に把握する態勢を整えておかなければならない。

特に、若いエンジニアにとっては、シミュレーションはいきなり与えられる便利なツールである。このため、解析結果を鵜呑みにすることなく、物理現象と解析プログラムの基本概念を充分理解するとともに、入力データ、前提条件、時間領域、擾乱の大きさなどに常に留意するよう注意喚起しているところである。

また最近では系統の周波数特性が低下傾向にある。今後もコンバインドサイクル機の増加や負荷構成の変化、更には新規参入者、分散型電源などの動向に注意し、的確な特性把握に努めるとともに、周波数特性向上策についても検討していく必要がある。

ハード、ソフト両面にわたって、ほぼ成熟の域に達した感のある日本の電力系統ではあるが、21世紀を迎えるに当たって、多くの新たな課題が待ち受けている。将来のニーズを先見的にとらえた、フィージブルな技術開発に強く期待するものである。

中部電力(株)副社長

志 賀 正 明

電中研「電力システム技術研究」のあゆみ（～1999年度）

西 暦	当 研 究 所 の 状 況	内 外 の 状 況
1957	交流計算盤設置	
1958	交流模擬送電線設備設置	
1960		中地域における275kV超高压連系実現
1962		中西地域超高压連系実現
1965	電子計算機による電圧無効電力の制御基礎（オンライン制御の基礎）理論を開発	佐久間周波数変換所運開 御母衣幹線事故 米国北東部事故
1968	動的交流計算盤設置 基礎研究用電力系統シミュレータ設置	中央電力協議会広域運営の新展開発表
1972	直流送電系統異常電圧シミュレータ設置	
1973	詳細シミュレーション手法（Z法）の開発着手	第一次石油危機 初の500kV送電開始（東京電力、房総線） 米国電力研究所（EPRI）設立
1975	直流多端子集中制御装置設置	9電力社長および電源開発総裁の会議において「広域運営の拡大」新方針を決定
1977	安定度詳細シミュレーション手法（Y法）の開発着手	ニューヨーク事故 新信濃周波数変換所運開
1978		仏EdF事故
1979	超電導発電機の日立との共同研究開始 新しい定態安定度解析手法（S法）の開発着手	北海道・本州直流幹線運開 第二次石油危機
1980		中西地域500kV幹線系統の完成
1981	系統解析データファイルシステム提供開始	
1982	交・直流電力系統シミュレータ設置 UHV送電系統の基本特性の検討	わが国の原子力発電量初めて水力を抜く OPEC初めて基準原油価格引き下げ
1983	電力系統解析技術研修コースの開設 EPRIとの電力系統解析ワークショップ開始	スウェーデン系統事故

西 暦	当 研 究 所 の 状 況	内 外 の 状 況
1984	不平衡故障などY法的大幅バージョンアップ	9社最大電力1億kW突破
1985	超電導発電機など新種電源の解析モデルの開発	民間会社として東京電力の原子力設備世界一
1986	制御系の最適定数設定協調論理の開発開始	仏EdF事故 チェルノブイリ原発事故
1987	原子力・火力プラントの簡易シミュレーション手法の開発	電圧不安定性とみられる系統事故発生 UHV設計送電線の建設開始
1988	電気協同研究会、電力系統安定運用技術専門委員会参加 安定度解析用負荷モデルの開発	
1989	電力系統解析に関するEPRIとの合同シンポジウム 安定度解析システムの総合化	関西電力、電力系統解析装置（APSA）の開発
1990	電力系統の異常振動解析手法の開発	欧米で電力市場自由化の動き
1991	静的電圧安定性解析手法の開発	
1992	系統余裕による電力輸送力評価手法の開発	UHV設計送電線（西群馬幹線）完成
1993	ファジィ発電機励磁制御方式の開発	
1995	自励式直流連系の導入評価	阪神・淡路大震災 電気事業法改正（IPP、特定電気事業）
1996	可変速揚水モデルの開発 適応型PSSの開発開始	IPP入札説明会開催
1997	多入力PSSの開発 ロバストな制御系定数設計手法の開発	COP3開催（地球温暖化問題）
1998	系統解析の並列処理手法の開発開始	超電導発電機（7万kWモデル機）試験開始
1999	基幹系信頼度解析プログラム開発開始	電気事業法改正（電力市場一部自由化）

はじめに

理事・狛江研究所長 福島 充男



電力システムの研究は、当研究所においても最も電気事業の実務に近いところで仕事をしている分野の一つと考えております。その時代その時代に、わが国の電力システムに発生するさまざまな問題に対処し解決するためのお手伝いをしてきた、いわば「駆け込み寺的」な役割を果たしてきたと自負しています。このためには、次の時代を先読みし、何が問題となるか、どういう現象が現れるかを予見し、その本質について勉強しておかなくてはなりません。また、解析手法や計画手法、制御手法などのツールを準備しておくことも大切です。

さらに、次の時代に向けて、電力システムの計画や運用のあり方について、当研究所なりの立場から提言や提案をしていくことも、われわれの重要な責務と認識し努力しております。

21世紀の日本は、環境問題や電力を含む広い分野での規制緩和の進展などによって、不確実性の大きい時代になると考えられます。しかも、高度情報化や高齢化により、産業と生活の基盤を支える電力の社会的役割はますます増大します。コストダウン、サービスの多様化はもとより、電気の品質、セキュリティの確保、すなわち大きな停電の回避は極めて重要となります。発電設備に関しては、需要地への相当量の分散電源の導入が進むものの、基幹となる供給力は原子力をはじめとする大規模遠隔電源に頼らざるを得ない状況です。一方、電力流通設備は新たな送電線の建設が困難となると予想され、既設設備の最大限の利用が求められます。電力システムの複雑化・巨大化が進展し、また、さまざまな不確定要因が増大するなかで、適切なセキュリティレベルを維持しながら、一層のコストダウンを達成できるよう、設備計画や系統運用には、より高度な新しい電力システム技術が必要と認識しております。

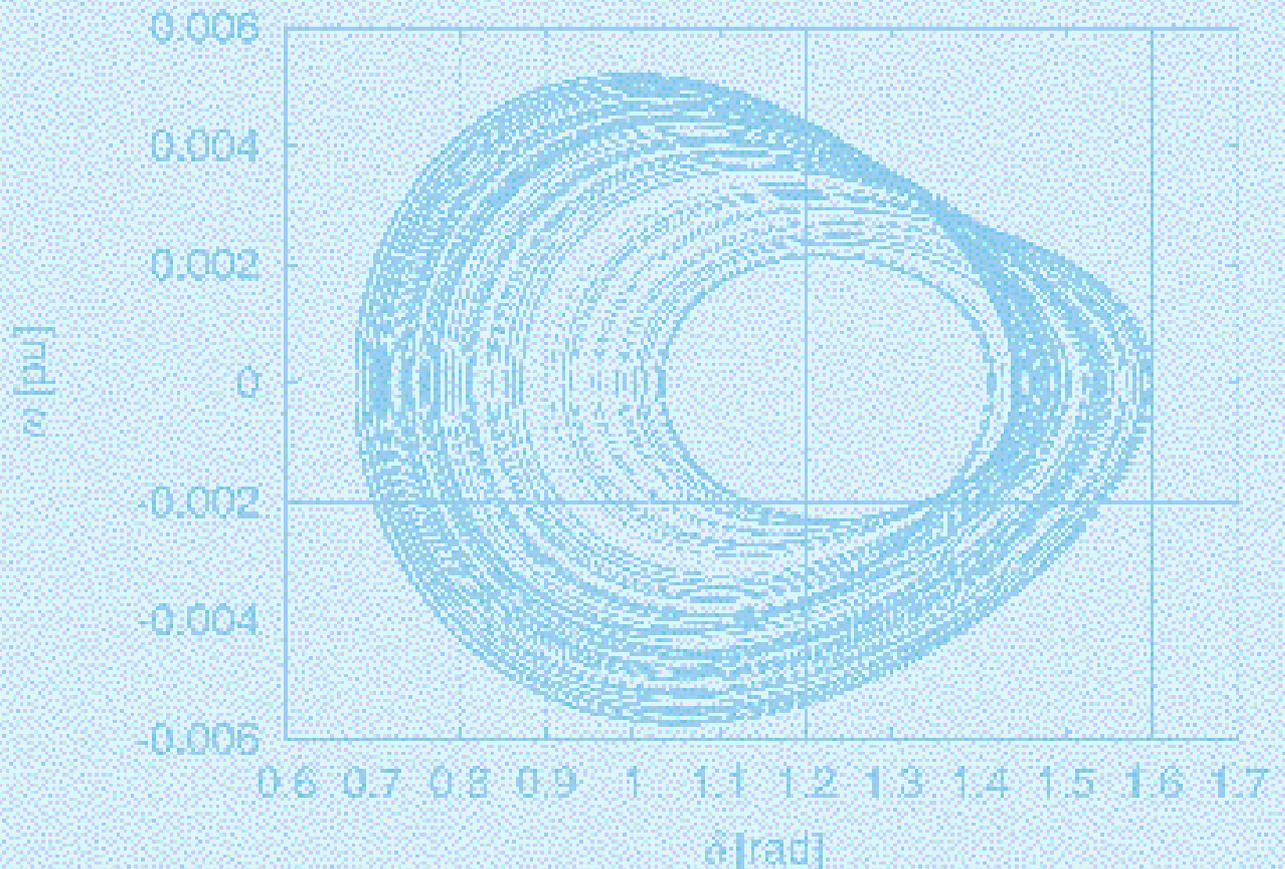
本レビューでは、上記の立場から、新時代に向けて取り組んでいる当研究所の電力システム技術研究の概要を紹介させていただきました。

第

1

章

研究の背景と当研究所の 取り組み



ω [rad/sec]

0.006

0.004

0.002

0

-0.002

-0.004

-0.006

0.6

0.7

0.8

0.9

1

1.1

1.2

1.3

1.4

1.5

1.6

1.7

δ [rad]

研究の背景と当研究所の取り組み9



谷口 治人（昭和50年入所）
主に発電機やその制御系の解析、電力系統の安定度解析、発電機による安定度向上技術開発等に関する研究に従事してきた。現在、超電導技術の電力系統への応用や、電力流通網の活用方策の研究に取り組んでいる。

第1章 研究の背景と当研究所の取り組み

電力システムは人間が作り上げた巨大なシステムであり、これを計画、構築、運用、保守するに当たってはこれまで多大の努力が払われてきた。その目的は、良質な電気を経済的かつ信頼性高く供給することである。最近では、これに加えて消費者に選択されるエネルギー源としての位置付けも重要となってきた。また、規制緩和を背景に、いっそうのコストダウン要請、コストと信頼性の調和といった面での議論も活発になされている。

電力中央研究所では、21世紀中葉を睨んで、わが国電力システムの将来像を検討してきた。その主要な成果を、第2章に示す。需要面で見ると、わが国の人口が2010年頃には増加から減少に転じることから、電力化率などの向上を考慮に入れても、2030～2050年には、1995年の1.4～1.6倍で飽和することが推定された。これに対応して、電源や流通設備などの増加についてもほぼ同様の傾向となる。すなわち、これからは、インフラ開発・拡充形からインフラ活用形へ徐々に移行していくものと考えられる。

信頼性を損ねずにコストダウンを達成するためには、

既設の設備を活用して安定に送電できる能力をいかに増加させるかが、常に重要な課題である。発電機の励磁制御による電力輸送力の向上は、すでに励磁系の高速度とPSS(電力系統安定化装置)の設置により、かなりの部分が達成されている。ただし、その最適な定数の設定手法や、電力系統の非線形性に起因する複雑な現象に幅広く対応できる手法は十分に確立されたものではない。また、新しい素子を用いた自励式変換器を直流送電に適用すれば、系統機能の強化が可能となる。すなわち、電源のない系統へも電圧を維持しながら送電が可能となる。これらの面での研究成果を第3章で紹介した。

一方、電力自由化に伴い、技術と経済を融合した課題解決への要請も強まっている。この一般的な概念を図1-1に示す。すなわち、線路事故などでの不確実性のみではなく市場の不確実性にも対応できる手法の開発、系統の計画や運用の透明性、市場性を考慮できる制度などの課題解決に必要な解析手法の開発が望まれている。

この第一歩として、電力系統の信頼度評価を確率的、定量的に求める手法の開発を進めている。この開発によ

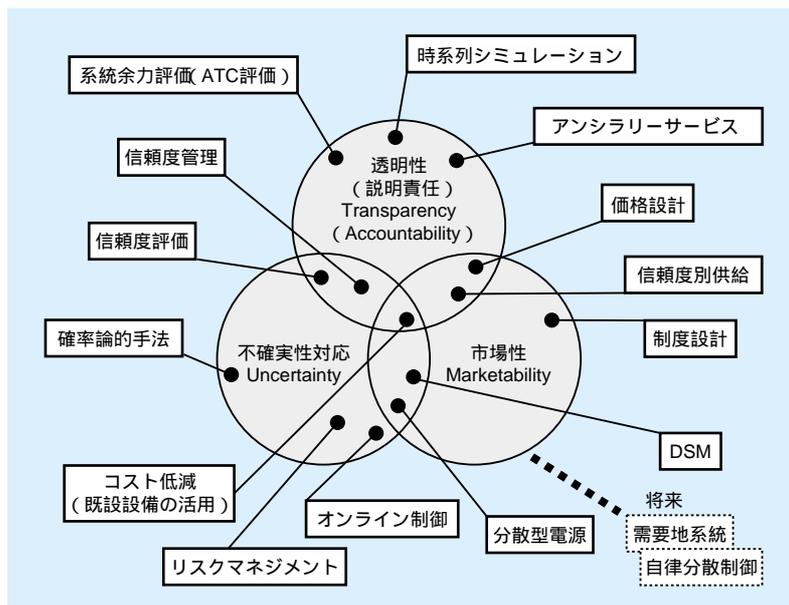


図1-1 電力自由化のもとでの系統技術と経済を融合した課題解決

り、設備増強の効果を定量的に比較することが可能となるとともに、運用面での基準の変更による効果も評価できるようになる。また、これまで評価が困難であった、送電線の雷対策の電力輸送力に及ぼす効果を定量的に評価できる手法を開発した。これらの研究成果を第4章に紹介した。

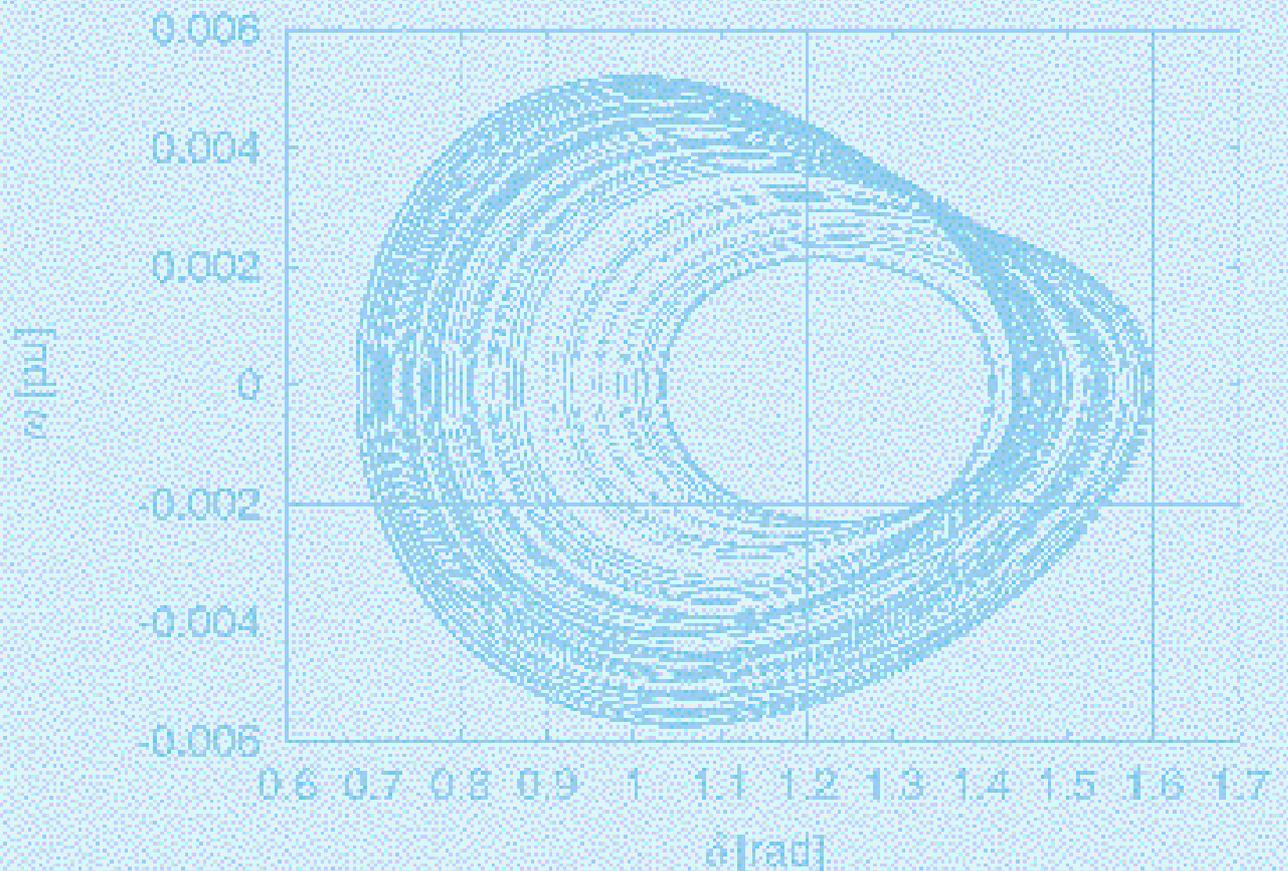
これらの一連の評価を定量的に意味のあるものにするためには、解析結果の信頼性が重要になる。このためには、これらの解析に用いるデータの信頼性ととも解析

手法そのものの信頼性も重要である。当研究所では、電力各社のご協力を得てシミュレーション解析の精度検証を進め、現在全電力会社で実務に使用頂いている。また、解析目的に応じて、種々の解析手法を開発・提供している。これらの手法についてのここ10年間の進歩を第5章にて紹介した。

今後とも、解析技術の高度化を図るとともに、技術と経済が融合した課題についてもその解決への道筋を探っていくこととする。

第 2 章

わが国電力システムの将来像



第2章 わが国電力システムの将来像 目次

狛江研究所電力システム部 上席研究員 栗原 郁夫
狛江研究所研究参事 上席研究員 林 敏之

2 - 1 電力需給の将来展望	13
2 - 2 電力システム技術の将来展望	19



栗原 郁夫（昭和57年入所）
燃料電池や電池電力貯蔵等の分散型電源の電力系統への導入評価に関する研究に従事した後、確率論的手法に基づく電力系統の供給信頼度の定量的評価の研究に携わっている。また、電力自由化に伴う新しい技術・経済研究にも取り組んでいる。



林 敏之（昭和46年入所）
主に直流送電の解析、系統制御に関する研究に従事してきた。最近、直流新技術の課題推進担当者として、自励式変換器を含む直流送電の電力系統での活用や設計合理化の取り組みについて検討を進めている。

第2章 わが国電力システムの将来像

わが国の電気事業は、信頼性の確保と品質の向上によりわが国のこれまでの経済発展を支えてきた。今、新たに電力自由化の時代を迎え、電力供給の一層の効率化とコスト低減が求められている。電力自由化は電力供給、消費の不確実性の増大をもたらすとともに、地球規模の環境問題への対応などの面でも、電力システムの計画、運用にとって新たな課題と挑戦の場とな

ろう。また、21世紀中葉にはわが国の人口は減少し、高齢化社会が一層進展することなどから、産業構造の変化も含めて、電力需要の動向と電力システムのあり方が注目される。

このことから、電力需給の将来を展望し、電力システムの技術課題を明らかにする必要がある。

2-1 電力需給の将来展望

2-1-1 21世紀中葉の電力需要

21世紀の電力消費動向

21世紀に予想される社会状況が電力消費に与える影響を定性的に評価したものを表2-1-1に示した。わが国における電力消費は、IT(情報技術)産業を中心としたハイテク、ソフト化への指向が一層強まることから、産業部門のシェアが漸減する半面、民生部門では高齢化の急速な進展、情報化、アメニティや豊かさのさらなる追求などからシェアは拡大するものと考えられる。また、交通など都市インフラの整備や省エネ・環境対

策に対しても電気の消費量で見ると増加の方向に向かうものと思われる。すなわち、21世紀は電力シフトが一段と進む時代であると考えられる。

一方、21世紀初頭までは幾分の需要の伸びは期待できるものの、それ以降では人口の伸びの停滞、経済成長の鈍化のほか、供給面から見ても環境・立地・資源の制約が一段と厳しくなる。このことから、従来のような継続的な伸びは見込めないとの見方がある。特に、環境については地球温暖化が、また、資源については東アジアの急速な経済発展が、それぞれ新たな制約要因になるものと予想される。

表2-1-1 21世紀の電力消費への影響

社会要因	内容	電力消費への影響
産業の転換	・産業のソフト化 ・産業の空洞化	+(増) -(減)
情報化社会	・IT革命 ・エネルギーの効率的利用	+
都市の高度化	・インフラの高度化 ・アメニティの追求	+
環境問題	・環境対策 ・省エネ	+
人口構成	・高齢化 ・人口減少	+
電力自由化	・安い電力(競争)	+
資源問題	・需要逼迫(東アジア)によるコスト高	-

21世紀中葉の電力需要

これらの要因を総合的に考慮した場合、21世紀中葉の電力需要はどの程度になるであろうか。また、どのような道筋で至るのであるだろうか。

この問題を議論するにあたって、ここでは「21世紀では国民一人ひとりに限ればさらなる豊かさに向かっていくものの、わが国全体の電力需要成長の量的な変化に関しては、次第に飽和に向かうであろう」ことを基本的な考え方として想定した。すなわち、全体として見た場合は、長期的な伸びや成長がこれまでの右肩上がりから、やがては飽和傾向に至ると考えた。

ここで問題となるのは「いつ頃、どの程度に飽和するか」である。しかし、この推定に使用できる確実な手法は存在しない。ここで採った方法は、わが国の人口の推移とひとり当たりの電力消費量の傾向に基づいた最も単純な方法である。つまり、今後さまざまな情勢により電力シフトは着実に進展するものの、長期的には総人口が減少するので、結局わが国の電力需要は飽和傾向になるとするものである。こうした論理展開に対しては、過度に単純であるとか、社会・経済問題や環境問題との関連が明らかでないなどと言った批判があろう。しかしながら、超長期の展望にとっては、原理・原則に基づく単純な見通しが、かえって本質をついていることもある。ここで述べることは未来の予測ではなく、前提から導かれる未来の可能性を提示しているにすぎない。

今回、人口とひとり当たりの電力消費に着目したのは、人口は時定数が長いため、その推移の見通しが比較的容易なこと、社会の豊かさや福祉も根源的にはひとり当たりで追求されるべきものと考えられること、また、各国との比較を行う場合もこうした指標が有効であるなどの理由による。具体的には、わが国の総人口（社会的な移動も含む）の推移とひとり当たりの電力消費量（民生・産業）の動向をベースにした。すなわち、

総人口の推移については、図2-1-1に示す国立社会保障・人口問題研究所のデータを用いた。これによると、わが国の総人口は、2010年頃にピークに達し、以後漸減すると推計されている。

また、人口ひとり当たりの年間電力消費量（自家発電を含む）の見通しは、図2-1-2に示す通りである。1995

年で年間ひとり当たり0.7万kWh程度であるが、これが2050年頃には2倍弱に増大し、現在の米国と同程度に達すると仮定した。

ここで、ひとり当たりの電力消費量の展望について補足しておく。まず、わが国を含む主要先進国のひとり当たりの一次エネルギー消費の推移を見ると図2-1-3の通りである。最終エネルギー消費についてもほぼ同様である。わが国では、第一次石油ショックの1970年直後から第二次石油ショックの余波が残る1985年にかけて、ほぼ一定であったが、以降、再び増加している。欧米でも若干その傾向はみられるが、概してほぼ一定である。これに対し、ひとり当たりの電力消費量を見ると短期的な変動はあったものの1970年頃から、おおむね直線的に伸びてきた（図2-1-2）。この点は海外においても同様である。これは、エネルギーの電力シフト

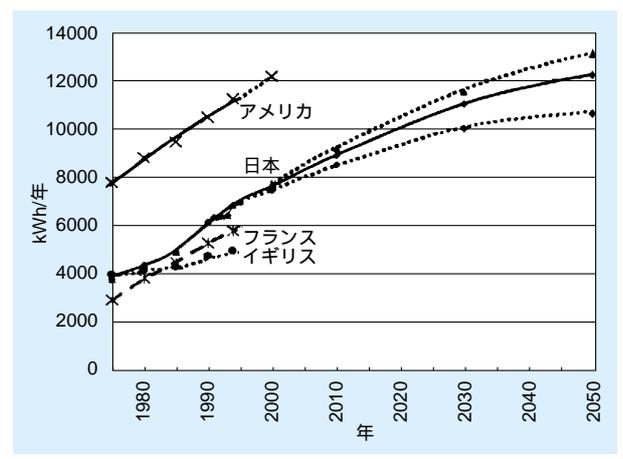


図2-1-2 ひとり当たりの電力消費量見通し (全電力)

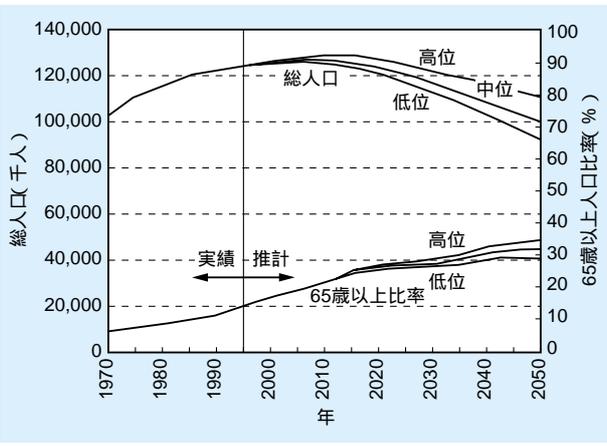


図2-1-1 日本の人口推計

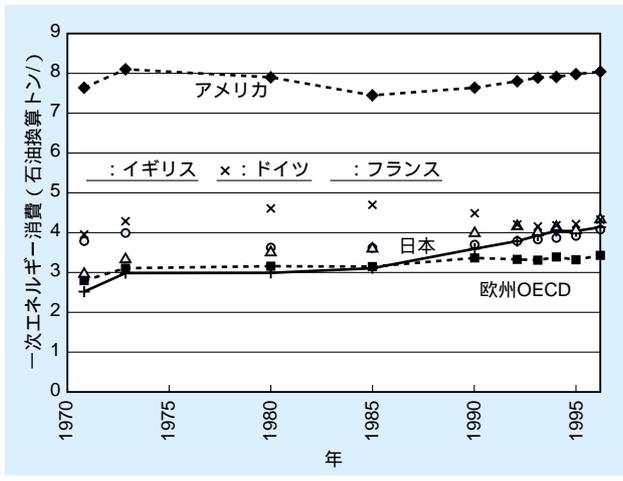


図2-1-3 ひとり当たりの一次エネルギー消費の推移

が大きな要因であり、実際、統計によっても、わが国では電力化率(1次エネルギーベース)が1975年の27%程度から、1985年には35%程度へと急激に上昇した。これは石油ショックを契機に産業構造等も含めてエネルギーの転換が進んだことを示すもので、その後、電力化率は緩やかな上昇に転じている。

ひとり当たりの電力消費量については今後も増加するものと考えられる。しかし、21世紀中葉まで従来と同様に直線状に増大していくかについては確かではない。ひとつの見通しとして、まずは、ひとり当たりの一次エネルギー消費が緩やかになるものと考えられる。わが国の一人当たりのエネルギー消費量はすでに西欧諸国と同等ないしはこれを上回っている。今後、産業構造の変化、環境問題への関心の高まりは、基本的には一次エネルギー消費を押さえる方向に向くものと考えられる。電力シフトについても、CO₂問題と関連した展開には未知の部分もあるが、かつてのような外的要因による積極的エネルギー転換によるシフトではなく、様々なエネルギーの最適利用へと向かう中での着実なシフトとなろう。このように考えると、ひとり当たりの電力消費の伸びも直線的なものからやがては漸次緩やかなものへと推移していこう。こうしたことから図2-1-2に示す展望となっている。

さて、以上のような想定に基づくと、わが国の電力需要(電気事業用)は図2-1-4に示すように21世紀中葉(2030~2050年)に向けて増大するものの、1995年を基準とするとその1.6倍を越えることは考えにくく、概ね

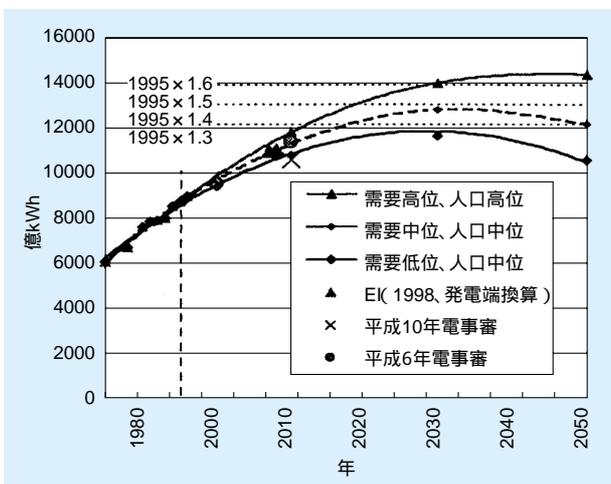


図2-1-4 わが国の電力需要(電気事業用)

1.4~1.6倍の値に飽和するものとなる。ここでは、基本シナリオとして1.5倍を選ぶこととする。ちなみに、総合エネルギー調査会需給部会の平成10年(1998年)度の見直し改定における「新しい省エネ努力」を勘案した場合には、2010年の電力需要は図2-1-4に示すようになり低い見通しとなっている。

なお、上記の値はわが国全体で見た数値であり、個々の場所では異なってくる。例えば、大都市周辺部では再開発などを通して電力需要の伸びは全国大よりも高い値を示すであろう。また、地域的な需要分布については、今後ともばらつきが残るものと考えられる。

2-1-2 21世紀中葉の電力供給

わが国全体としての供給量

ここでは、21世紀中葉に必要な電力供給について考える。前述の「21世紀中葉でわが国の電力消費は飽和に向かう」という想定に基づけば、必要な発電電力量も必然的に漸次飽和することになる。つまり、電気事業の発電電力量は、1995年度を基準とすると、2030~2050年頃には約1.5倍の1.3兆kWh程度に達することになる。もし、年負荷率について60%程度まで向上することが期待できるならば年ピークの値は2.5億kW弱になる。

将来の電力システムの展望においては、一般にこのように目標点の様子を明らかにし、これと現在とを比較して、現在からそこに至る最適な投資プロセスを探るというアプローチが望まれる。21世紀中葉における所要電源設備は、年負荷率が60%、設備率(=全発電容量/年最大電力需要-1)が20%という想定のもとでは、図2-1-5のように、現在の設備容量約2億kWの1.5倍の3億kW程度となる。そこで、ここでは21世紀中葉の電力供給の基本シナリオを次の通りとする。

発電電力量	1.3兆kWh程度
所要電源設備	3.0億kW程度

2010年までの見通しに関して、他のシナリオと比較すると、本シナリオは図2-1-5に示すように、平成10年の電事審の見通しと、同年度の中電協長計の中間に位置する。なお、これをまかなうための電源形態は、21世紀中葉までは、化石燃料、原子力、再生可能エネルギーが主流であろう。ただし、大規模集中電源の一部は分散型電源へと推移していくことが予想される。

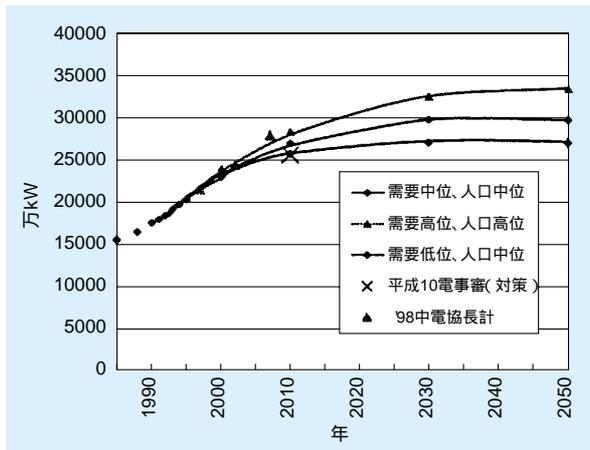


図2-1-5 わが国の所要電源設備

電源構成の基本的考え方

様々な制約や問題点を踏まえた上で、電源構成のシナリオを描くにあたって、次のような考え方を採用した。すなわち、まずは基本的な電源構成要素である原子力、火力、再生可能エネルギーのそれぞれについて単独に、総合的見地から導入可能な量を見極める。この総和が所要電源量を上回れば問題はないが、実際は以下に示す通り未達分が生じる。そこで、この未達分について、いくつかの案を提案し、それぞれの案の利点と問題点を提示する。この方法は、最適な一つの電源構成を提示するものではないが、将来に向けての問題点を鮮明にし、社会が合意の上で取り組むべき課題を明確にする点からは有益と考える。

21世紀中葉に至る電源構成を考える上で基本となるのは、図2-1-6のように次の3つの条件をバランスよく成立させることである。

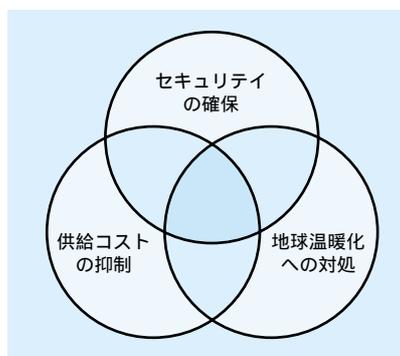


図2-1-6 21世紀中葉に向けた電源構成を考える上での3条件

セキュリティの確保

供給コストの抑制

地球温暖化への対処

これまでは主に と の両立を目指して電源多様化を推進することが基本とされたが、今後は、3本を柱とした路線、すなわち「CO₂排出を抑えつつ電源多様化を続ける」というスタンスが重要となる。これは、供給サイドから見ると具体的には、火力(化石燃料)発電をできるだけ抑制しつつ、原子力発電の推進と自然(再生可能)エネルギー発電の開発を推進することである。

火力、原子力、自然エネルギーの導入量と基本ケース

i) 火力発電とその導入量

火力発電は主として、石炭・LNG・石油からなり、1995年度では電気事業の発電設備のうち6割弱を占める。将来の化石燃料(火力)発電については、地球温暖化への対処を考えた場合どれだけ導入できるかが重要となる。わが国の火力発電の導入量は、従来、専ら海外からの燃料調達や建設用地の取得に左右されてきたが、21世紀においてはCO₂排出量に強く制約されるようになる。そのため、CO₂原単位の低減は将来の極めて重要な要因となり、LNGへの転換など燃料源の選定とコンバインドサイクルの採用など熱効率向上の2つが主要な手段となる。

21世紀中葉において実際面で導入できる火力発電量について調べてみる。ここでは、この導入量を支配する要因はCO₂排出の許容量であるとする。以下は将来の発電技術の向上をある程度織り込んだ見積もりである。すなわち、

- ・ 21世紀中葉において1990年と同程度のCO₂排出量(7919万t-C/年)が許容できるという前提に立つならば、火力発電は現在(1995年度)と同程度の1.2億kW程度(発電量で0.50兆kWh)に抑えなければならない。

- ・ 一方、電気事業における長期設備計画(中電協)の2007年度末のデータを採用すれば、火力発電は1.72億kW(発電量で0.63兆kWh)となる。この場合には、CO₂排出量は原単位を1割近く減らしたとしても、1990年の値より20%を大きく上回る値に増加することになる。

そこで、2030年頃における火力発電の導入量として、ここでは両者のほぼ中間に位置する1.5億kW(発電量で

0.55兆kWh)を基本ケースとして採用する。発電効率改善策によっては2030年頃のCO₂排出量を1990年の若干の増加に抑え込むことができ、さらに21世紀中葉以降を目指して一層の努力をすれば1990年に近い値に戻すことも不可能ではない数値と考えられる。なお、リブレース等に際してかなり大幅な出力の増強が図られる点から、長期的には火力発電の立地制約はそれほど支配的要因とはならないと考える。また、燃料制約から見ると、中国等東アジア地域の発展もあろうが、CO₂制約ほどは厳しくはないものと思われる。

ii) 原子力発電とその導入量

わが国では、1995年度時点で0.41億kWの原子力発電設備を持つ。これは電源構成の約2割を占める。発電電力量は0.29兆kWhであり全体の1/3を占める。平成10年の電事審では、2010年度までに更に0.25億kWを増設して、トータル0.66～0.70億kWを達成することになっている。一方、電気事業の長期設備計画によれば、2007年度で0.11億kWを追加することになっている。両者にはかなりのギャップがある。原子力発電の開発に当たっては、立地が最大の問題となる。また、廃棄物処理、炉廃止措置、跡地再利用など周辺の関連技術についてもいくつかの課題が残っている。

これらを勘案して、ここでは2030年頃における原子力発電の導入量として、国の長期計画における2010年度の数値を努力目標として採用する。すなわち、基本ケースとしてトータルで設備量0.70億kWを、発電電力量については設備利用率を高め85%と想定して0.52兆kWhを考える。

iii) 自然エネルギー発電とその導入量

ここで対象とする自然(再生可能)エネルギーは、一般水力、地熱、太陽光、風力である。それぞれ純国産のエネルギー資源であることからエネルギーセキュリティの面で有利であるが、一般水力など一部を除き期待できる規模が小さく、出力も不規則なものが多い。また、一般に設備利用率が低く、かつ現状ではコスト高である。自然エネルギー発電はこれまでのところほとんどが水力であり、設備的には約2割を占める(揚水を含む)が、発電電力量は1割弱に過ぎない。今後の導入に当たっては研究的に未知の要素もあるが、コスト低減が最大の課題となる。

水力発電設備については1995年度で揚水を含め0.43

億kWである。このうち、一般水力が発電設備で0.20億kW(発電量は0.08～0.09兆kWh)を占める。資源エネルギー庁の1996年度わが国包蔵水力調査によると、一般水力は約0.12億kW(0.045兆kWh)が未開発である。なお、揚水については未開発の容量は十分としている。ただし、未開発の一般水力は中小規模が多く、かなりコスト高である。一般水力の未開発のうち半分程度が開発され、揚水も適正な比率で開発されるものとなれば、水力の発電設備は全体で0.5～0.6億kW程度(発電量で0.1～0.12兆kWh程度)に達する。

地熱発電については国で開発を支援しているが、未だ48万kWで、発電電力量も30億kWh程度でしかない。今後の開発目標は2010年度末で280万kWである。

太陽光発電については、現在5万kW程度が導入されており、コストも好条件ならば70～80円/kWh程度にまで低減してきている。国の施策では2010年までに460万kWの導入を目指している。一方、風力発電については、近年急激に導入が進んでいる。経済的には比較的安いですが、kW価値としてはあまり期待できない。1999年には既に2010年の開発目標を上回る計画があがっている。

発電コストを一定の上限に定めて、2030年頃までに導入される自然エネルギー発電量を考える。ここでは基本ケースとして、設備量を約0.6億kW(発電量で0.13兆kWh)とした。増分1800万kWの内訳は、一般水力600万kW、地熱150万kW、太陽光・風力1000万kW(kW価値*1で300万kW程度)と想定した。ほかに電源運用上の必要量として揚水発電などの電力貯蔵設備700～800万kWを加えた。なお、電力貯蔵設備については、二次電池等が必要地域に相当量導入される可能性もある。

21世紀中葉の電源構成シナリオ

以上述べた電源種別毎に単独で見した場合の導入可能性に関する3つの基本ケースを整理すると、表2-1-2のようになる。この表からわかるように、これらの値を21世紀中葉の電源量とすると全体として発電量で0.10兆kWh、設備量で0.2億kWがそれぞれ未達量として残ることになる。

このため、「未達量0.10兆kWhを埋めるには、上記検討の前提の緩和ないし新たな対応が必要である」とい

*1一律の定義はないが、概略的には必要とされる時間において発電電力として保証されるkW値の最低値。

表2-1-2 21世紀中葉における電源種別導入量

	電源種別	兆kWh	億kW
単独の導入可能量	火力	0.55(42%)	1.5(50%)
	原子力	0.52(40%)	0.7(23%)
	自然	0.13(10%)	0.6(20%)
	合計(A)	1.20(92%)	2.8(93%)
所要量(B)		1.30(100%)	3.0(100%)
未達量(B-A)		0.1(8%)	0.2(7%)

う考え方が不可欠になってくる。電源種別の選択の仕方、および、省エネルギー(省電力)推進のシナリオを加えて、図2-1-7に示すような以下の4通りの電源構成シナリオが生まれる。

i) 化石燃料増大シナリオ

火力発電だけを基本ケースの1.5億kWから1.7億kWに増大させることによって、未達量を埋めるというシナリオである。このシナリオでは設備量に限れば電気事業の長期設備計画における2007年度末の数値とほぼ一致している。注意すべき点は発電量を設備量よりも大きい比率で増大させる必要があるため、CO₂排出量が基本シナリオよりもさらに20%程度増加となることである。このシナリオは、もしCO₂の問題を除くことができるとすれば、立地面、燃料入手面などその他の面ではそれ程大きな制約は考えられず、最も現実的なシナリオといえる。

ii) 原子力推進シナリオ

原子力発電だけを増大し、この増分を未達量に引当てようとするものである。このためには、発電設備を0.83億kW程度にまで増やす必要がある。この場合は、用地確保と廃棄物処理が最も大きな課題となろう。なお、このシナリオでは原子力をベース運転とするため

に、夜間電力の貯蔵とピーク対応として揚水発電などを0.07億kW程度増加する必要がある。

iii) 自然エネルギー開発シナリオ

自然エネルギーを積極的に開発することにより、自然エネルギーだけで未達量0.10兆kWhを賄おうとするシナリオである。これは、現在の自然エネルギーの発電量とほぼ同量を加えるシナリオであり、設備的には約0.4億kWを追加するものである。このシナリオにおいては、発電コストが数十円/kWh程度を越す状況も考えられ、経済性が最大の問題になる。内訳としては、一般水力を上限の1200万kW、地熱を300万kW開発する。残りを太陽光・風力で受け持つとすれば、7500万kW(kW価値で2300万kW)程度を、現在から2030年頃までに導入することになる。さらに、このほかに電源運用上必要な電力貯蔵設備として200万kW程度の揚水発電や二次電池が要求されよう。

iv) 省エネルギー推進シナリオ

21世紀中葉に向けて一層の省エネルギーを推進することによって、8%程度の電力消費の節減、すなわち発電電力量に換算して0.1兆kWh程度の節減効果を期待しようとするシナリオである。これには国民の理解と努力が必要とされる。

実際の実現ケースは、省エネルギー推進シナリオを軸に他の3つの混合型になるものと思われる。どの条件を重視するかは、さまざまな意見が出るであろう。当然であるが、単にコストや技術からでは論じられず、理想的には国民の合意と選択に委ねられるべきである。供給コストか、エネルギー安全保障(燃料リスク)か、地球環境か、等々幅広い議論が重要である。

なお、新しく導入される電源の形態については、21世紀初頭では中小規模の電源もあるが、大部分は大規模の集中型電源である。これら大規模の集中型電源は従来通り基幹系統を支える電源基地に接続されよう。ここで、電源基地には遠隔電源のほか、都市近傍の電源も含まれる。一方、21世紀中葉にもなると、分散型電源が都市内部で増大するであろう。

現在運転中の電源の多くは1965年以降に建設されているが、21世紀中葉には相当な経年となるため、大幅な改修・廃止が必要になると考えられる。現状の耐用年数に見直しがなければ、原子力については2010年以降、廃止が増加し、21世紀中葉には毎年平均で150万kW

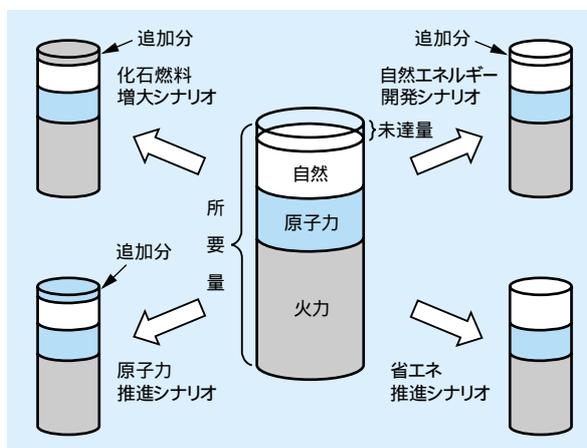


図2-1-7 21世紀中葉の電源構成シナリオ

が失われていくことさえ考えられる。ただし、リニューアブルされる原子力のユニット容量は130万kW程度に増大されるであろう。火力についても、2010年以降は毎年250～400万kWずつが休廃止されるが、リパワリングが可能になるため、ユニット容量も大幅に増大しよう。

導入電源の多様化と地域密着型電源の出現

21世紀中葉およびそれ以降において導入される電源には、さまざまな新しい変化が現れるものと予想される。この傾向は次の3つの観点から「導入電源の多様化」として捉えることができる。

まず、ユニット規模については、需要の伸び率が鈍化し大規模化のメリットが薄れてくることから、新規の電源プラントは容量が次第に中小規模化する。飽和傾向の低成長にあっては中小規模化した方が、より経済的でありリスクも小さい。この結果、「ユニット規模における多様化」が自ずと進むこととなろう。

また、IPPの参入に代表されるように電源の「所有形態における多様化」が進展する。IPP参入の将来の展開

については不透明な部分が多いが、現在の形でのIPP潜在導入量は全国で2500～3000万kWと見積られている。

さらに、長期的には地域密着型(オンサイト型)のさまざまな分散型電源の増大が予想される。これは「立地形態における多様化」を意味する。分散型電源には一般に在来型火力、熱併給発電や燃料電池、自然エネルギー発電の3種類がある。地域密着型の分散型電源は小中規模の電源であり、IPPも一部含まれる。21世紀が進むにつれて、環境対策や資源問題からエネルギーの有効利用がクローズアップし、オンサイト型の電源の比重が次第に大きくなろう。このような傾向は住民の地域コミュニティ意識の高揚などに助長されて、中葉以降では一段と顕著になる可能性もある。この結果、21世紀中葉以降には電力供給の外部への依存が極めて少ない都市地域が現れてくることも想定できる。すなわち、長期的には、需要家サイドの電源の相対的な比率が増大するものと考えられ、この点は従来の配電系統の姿を大きく変える可能性も秘めている。

2-2 電力システム技術の将来展望

21世紀中葉の電力需給分布

上記のように21世紀中葉において電力需要が1.5倍前後で飽和傾向を示すことになり、加えて地球温暖化問題や新しい電力供給形態に対応して分散型電源の導入が進むと、遠隔地からの電力供給や広域連系は、その必要性が希薄になると考えられがちである。

しかしながら、現在(1995年)の約1.5倍に対応する電源の増加分1～1.3億kWについて、一部を需要地近傍の分散型電源3500～4500万kWで賄うとしても、残りの6500～8500万kWを都市近傍電源のリプレースを含めて大規模電源で賄う必要がある。21世紀中葉までに休止となる火力電源約9000万kWの1/3をリパワリングし、2倍に増容量したとしても、3500～5500万kWの新たな電源を開発する必要がある。

地域的な需要分布について、各都道府県におけるこれまでの電力需要の動向から21世紀中葉を推定すると、関東圏の電力需要は約3倍、中部、関西の大都市圏近

傍では2倍以上に伸びることが想定され、わが国全体の需要の伸びに比べ、大都市部での電力需要は依然大きな増加傾向を示すであろう。

表2-2-1は21世紀中葉に向けた電力システムの主な課題を整理したものである。21世紀初頭においては電力自由化の中で信頼度を維持しつつ、既存設備の有効活用による電力輸送力の増強を図ることが大きな課題である。21世紀中葉に向けてはハード、ソフトを含む様々な意味で能動的な電力システムの構築と都市部への高密度電力供給技術、さらに需要地域の新しい系統(需要地系統)の展開が主要な課題になるものと考えら

表2-2-1 21世紀中葉に向けた電力システムの課題

21世紀初頭	21世紀中葉
<ul style="list-style-type: none">・既存技術の高度化・現有設備の有効活用・コストと信頼度の調和	<ul style="list-style-type: none">・能動型電力システムの構築・都市部高密度電力供給・需要地系統の展開・新しいシステム保全技術

れる。以下それぞれについて技術展望を述べる。

既存設備の有効利用による輸送力増強

わが国の電力システムの形態は、大都市部に電力を供給する大規模系統、大規模系統と負荷を結ぶ地域系統、大規模系統間を連系した広域連系系統に分類できる。大規模系統は電源送電線と外輸線とからなり、地域系統の構成には放射状構成とループ構成とがある。これらの分類のもとで、既存設備の有効利用による電力輸送力の増強方を表2-2-2に示す。

電源送電線や放射状系統では、発電機の新励磁制御や脱調予測制御による系統安定化が有効で、輸送力増強に役立つ。一方、外輸系統やループ系統では、位相調整器等による輸送力増強が考えられるが、事故波及防止が重要な課題となる。また、広域連系系統の輸送力向上のためには、多点連系が考えられるが、この場合も事故波及防止が重要となる。

これらの輸送力増強方を一層効果的、経済的なものとする方策として、事故発生の実態に応じて想定事故の見直しを行い、供給信頼度との関連を考慮しながら輸送力を向上させる考えが提案されている。これには供給信頼度の定量的評価技術の確立が重要となる。また、直流送電(連系)を含むパワーエレクトロニクス技術は、長距離電源送電のみならず外輸系統の分割、放射状、ループ系統の安定化にとって有効である。さらに、広域連系の強化のためにもパワーエレクトロニクス技術の活用が検討され、実用化のための技術が確立されている。

表2-2-2 電力システムの形態と既存設備の有効利用による輸送力増強方策

系統パターン		既存設備の有効利用による輸送力増強		
		系統安定化方策	想定事故の見直し	その他
大規模系統	電源送電線	・新励磁制御 ・脱調予測制御	・事故頻度と想定外の供給支障	・山側グループ ・パワエレ技術の活用
	外輸系統	・事故波及防止	・事故波及防止方策	・系統分割(短絡電流制御) ・パワエレ技術の活用
地域系統	放射状系統	・脱調予測制御	・事故頻度と想定外の供給支障	
	ループ系統	・新励磁制御 ・事故波及防止	・事故波及防止方策	
広域連系系統		・新励磁制御	・事故波及防止方策 ・連系分離条件	・多点連系 ・パワエレ技術の活用

都市部高密度電力供給と能動型電力システム

先に述べたように、21世紀中葉では都市部での電力需要の増加に対し、用地難に伴う電力輸送ルートへの制約から、現有設備のリプレースが重要となる。このため、高分子碍子の適用による高電圧化や絶縁厚低減CVケーブルによる増容量化が検討されている。図2-2-1は地中ケーブルの送電電力の比較を示したものである。同図において、絶縁厚低減CVケーブルはOFケーブルと比較して、約2倍程度の増容量が可能であり、管路気中送電では約4倍の輸送力増強が期待出来る。一方、超電導ケーブルは低圧ではあるが大幅な輸送力増強とともに、154～275kVの電圧を省略することにより、電圧階級の簡素化が可能となる。これは、送電ルートの有効活用と途中の変電所の省略により、系統のスリム化につながる。図2-2-2は都市部への高密度供給のイメージである。

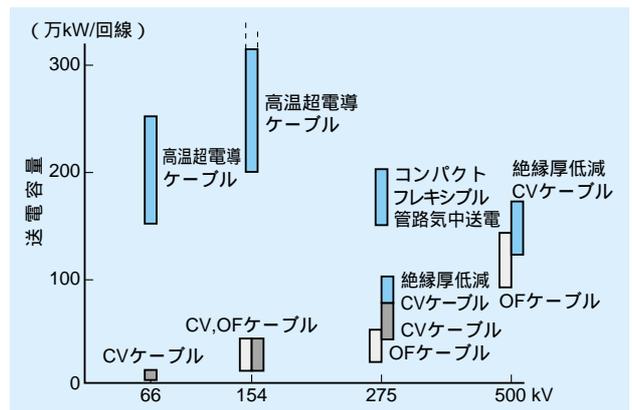


図2-2-1 地中ケーブルの送電電力の比較

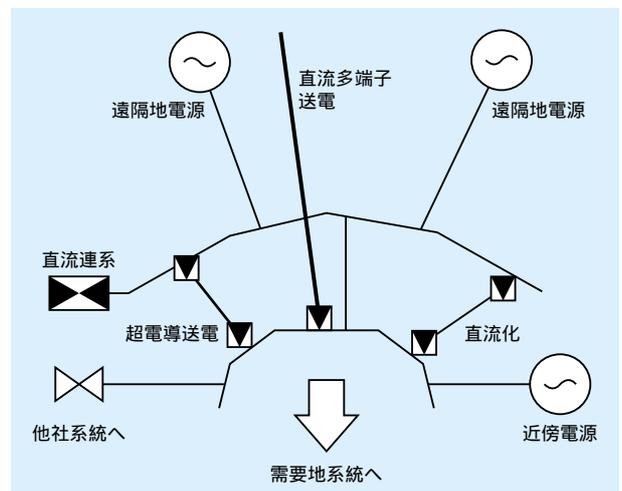


図2-2-2 都市部への高密度供給のイメージ化

能動型電力システムはハード的にはパワーエレクトロニクス技術等の適用により、電力潮流の柔軟な制御や事故時の系統変更などをオンラインで行うものである。ソフト的には供給側と消費者が一体となり運用や制御の自由度を高めるものである。ここでは以下に述べる需要地系統との密接な連携が重要となる。

需要地系統の構築

21世紀中葉では、マイクロガスタービン、燃料電池、太陽光発電などの分散型電源が都市部など特定の地域では相当量普及することも考えられる。このように電源が下位の系統に大量に導入されることを想定した場合、従来の上位から下位への潮流を前提とした電力システムでは、その運用制御を大幅に見直す必要がある。また、電力の需給アンバランスにより潮流のネックが生じることも想定される。このため、図2-2-3に示すように、いくつかの配電変電所を含むある程度の地域規模で、電圧、潮流制御や保護協調などの運用制御を行うことが効率的になるものと考えられる。ここではこうした系統を「需要地系統」と呼んでいる。

これまで電圧源が存在しなかった系統での電圧制御

の協調が必要となり、一方向であった潮流も複雑に流れることとなる。さらに、保護方式もこれまでの分散型電源の系統連系ガイドラインでは十分対応できなくなる可能性があり、その協調を検討する必要がある。このため表2-2-3に示すような運用・制御が要求される。ここでは需要地系統にとって情報のハブともなる需給インターフェイスが重要な役割を担う。これらは自律分散制御方式や、パワーエレクトロニクス技術と一体化して消費者にとっても高いアメニティを提供する。

表2-2-3 需要地系統の運用・制御

制御形態	制御項目	対象機器	目的
・自律分散制御	系統電圧制御	・ SVC等の電圧制御機器 ・ 分散型電源 ・ 電力貯蔵装置 ・ ループコントローラ	・ 配電線のロス低減と不平衡電圧の抑制
	潮流制御	・ 分散型電源 ・ 電力貯蔵装置 ・ LC (Load Conditioner) ・ ループコントローラ	・ 配電線のロス低減と負荷平準化
・運用管理センター	保護協調	・ 配電用変電所CB ・ 二次系統、配電線の静止型開閉器・遮断器 ・ ループコントローラ	・ 停電の局所化 ・ 無停電切り換え方式
	サービス情報提供	・ 需給インターフェイス	・ 料金、DSM情報等の提供 ・ 需給一体のシステム管理・運用

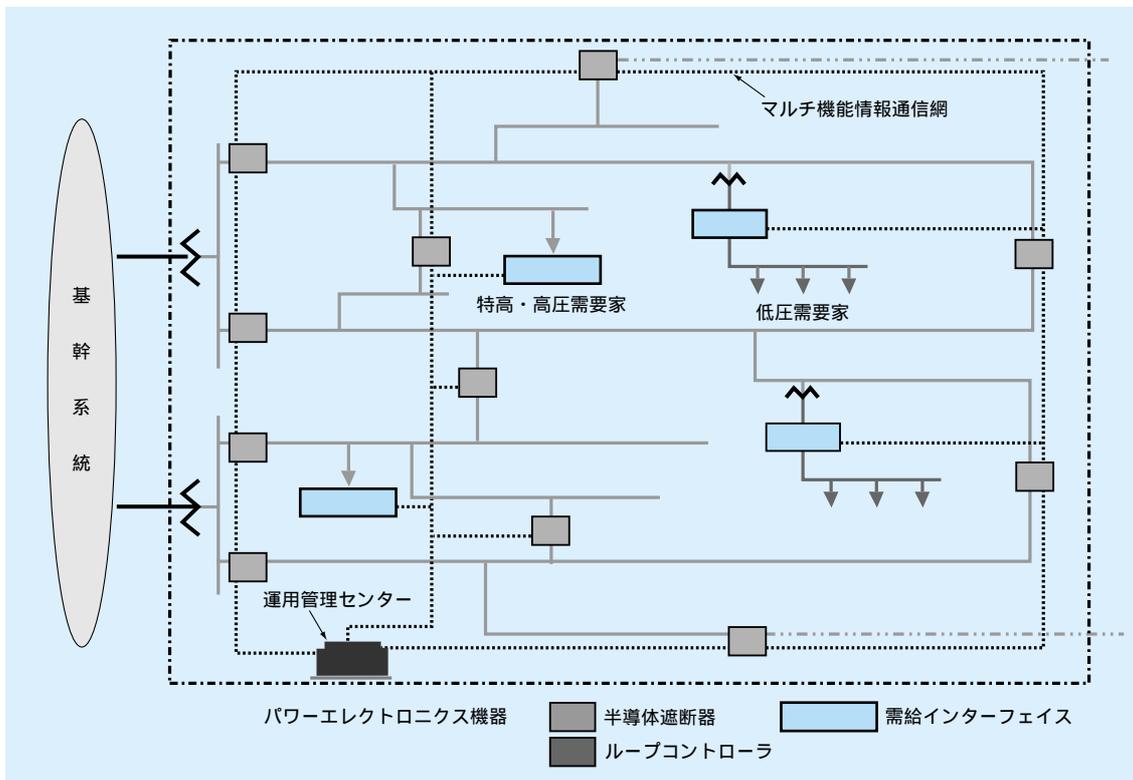


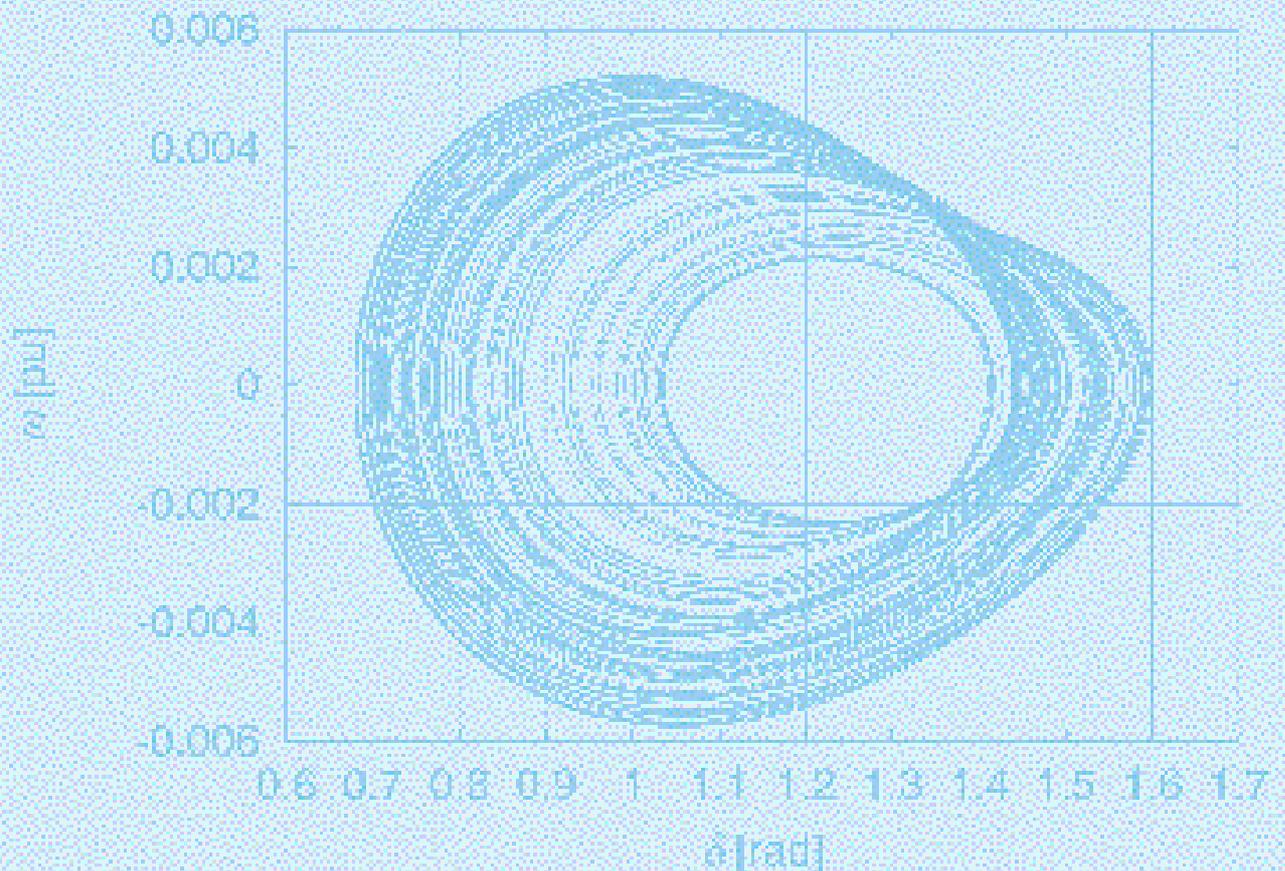
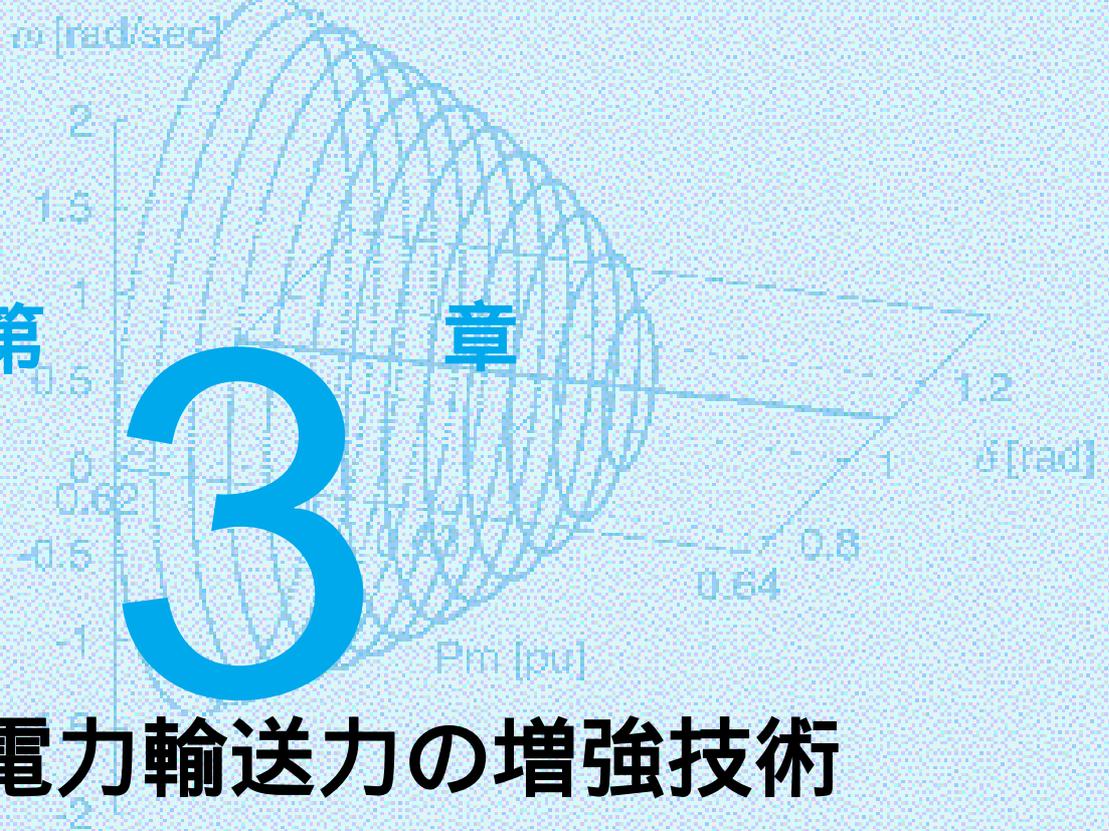
図2-2-3 需要地系統の構成

第

3

章

電力輸送力の増強技術



第3章 電力輸送力の増強技術 目次

狛江研究所電力システム部	上席研究員	井上 俊雄
狛江研究所電力システム部	主任研究員	吉村 健司
狛江研究所電力システム部	主任研究員	北内 義弘
狛江研究所電力システム部	上席研究員	高崎 昌洋

3 - 1 発電機励磁制御による電力輸送力の増強	25
3 - 2 直流技術による系統機能の強化	35



井上 俊雄（昭和57年入所）
電力系動特性解析のための火力・原子力プラントのモデリング、プラント特性を考慮した緊急時制御、電力系統の長時間動特性解析手法に関する研究に従事してきた。現在、主としてコンバインドサイクルプラントのモデリングならびに適応型発電機励磁制御方式の開発に取り組んでいる。



吉村 健司（昭和60年入所）
主に電力系統の定態安定度、特に系統安定化制御系の定数最適設計手法に関する研究に従事してきた。現在、大規模系統を対象とした高周波数の異常振動現象とその安定化対策に関する研究に取り組んでいる。



北内 義弘（昭和61年入所）
主に超電導発電機の安定度向上効果、特に発電機励磁制御系に関する研究に従事してきた。現在、発電機多入力安定化制御や電力系統のオンライン制御に関する研究に取り組んでいる。



高崎 昌洋（昭和58年入所）
主に直流送電を初めとするパワーエレクトロニクス機器の系統適用技術、解析・制御技術に関する研究に従事してきた。現在、自励式変換器を活用した電力システムの高機能化に関する研究に取り組んでいる。

第3章 電力輸送力の増強技術

大容量発電所の遠隔・偏在化、電力需要の大都市部への集中化、電力会社間の広域連系強化などによって電力系統の大規模・複雑化が進んでいる。これに伴い、落雷などによる系統事故時の系統動揺現象がより複雑になっている。またコスト低減などの観点から、電力輸送設備

の効率運用は今後ともより一層の推進が求められるため、電力輸送の増強技術はますます重要となる。

本章では輸送力増強技術として発電機励磁制御による系統安定度の向上対策と、直流技術による系統機能の強化について概説する。

3-1 発電機励磁制御による電力輸送力の増強

系統安定度を向上させる発電機の励磁制御(以下、PSSと呼ぶ)は、安定化制御の中でも発電機の運転に本来必要な励磁装置の制御装置や制御方式を変更するだけで系統安定度の向上を達成できるので最も経済的である。その反面、その制御には高度な考え方や理論が要求される。

当研究所では、図3-1-1に示すように、発電機の励磁制御に関して以下の3つの側面から同時に研究を進めている。

現用PSS制御系定数設定の最適化

従来から、PSS制御系の定数設計については、特定の

系統状態を想定した単純な系統での周波数応答解析が一般に用いられている。しかし、系統運用状態が大きく異なる場合、大規模系統において幅広い周波数領域の電力動揺現象が問題となる場合、従来手法に代わる新しいPSS定数設計手法が必要となる。

当研究所では、これまで大規模系統の固有値解析手法を用いたPSS定数最適化手法を提案し、ほぼ実用化の段階に至っている。その成果として、発電機有効電力出力(P)と発電機回転数(ω)を入力とする2入力形PSS(以下、P+形PSSと呼ぶ)定数設定に関し、複数の潮流断面を同時に考慮し、かつ、幅広い周波数帯の

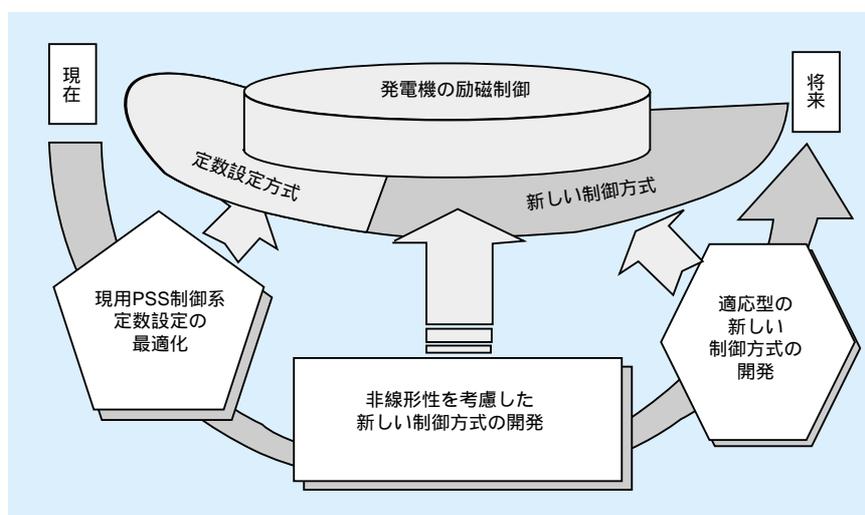


図3-1-1 発電機励磁制御への取り組み

動揺現象を良好に安定化する手法を3-1-1で述べる。

非線形性を考慮した新しい制御方式の開発

電力輸送設備の効率運用が一層推進され電力系統がその安定度限界近くで運用される状況下では、電力系統の非線形性の影響が強まる。この場合、電力系統を線形近似した上記のモデルで定数を設計したPSSでは、動揺抑制性能が低下することが懸念される。このため非線形性を考慮した制御方式の開発の必要性が今後ますます高くなっていく。

当研究所では、系統動揺形態からの知見に基づくファジィ制御方式を提案し、非線形性の影響が特に強い大擾乱に対して現用PSSより優れた制御性能が得られることを明らかにした。その成果として、ファジィ制御方式を改良・発展させた多入力PSS方式を当研究所の交・直流電力系統シミュレータに適用した検証実験結果を3-1-2で述べる。

適応型の新しい制御方式の開発

上記、は、ある系統状態を想定しそれに対して制御系の定数を設計し、設計後は以後その定数を固定とする制御方式である。このため、想定した系統状態では所期の安定化性能を発揮するが、想定から大幅に離れた状態ではその性能が低下することが懸念される。

これに対して、発電機の動揺状況に応じて適切に制御系の定数をオンラインで調整する、いわゆる適応型の制御方式は、より幅広い範囲の系統状態において安定化性能を維持でき(以下、ロバスト性が高いという)、将来的に有望な方式として期待される。

適応型の制御方式の研究は従来から国内外で実施されているが研究途上にあり、手法として確立して適用が検討されるまでには至っていない。

当研究所では、適応型制御方式の一つとして時系列モデルを用いた制御方式を提案し、そのロバスト性の高さを明らかにしている。その成果として、系統事故により系統構成が大きく変化した場合についてシミュレーションによる検証結果を3-1-3で述べる。

3-1-1 現用発電機制御系の最適設計による電力系統の安定化

従来から、PSSの設計では、ある一つの特定の系統状

態を想定し、発電機一台と送電線のみといった非常に簡略化された系統モデル(以下、一機無限大母線系統モデルと呼ぶ)が用いられている。しかし実際には、昼間と夜間のように系統の潮流状態が大きく異なったり、発電機のローカル動揺¹や広域動揺²のように動揺周波数も動揺様相も異なる現象が問題となる場合、特定の系統状態のみを想定する従来の設計手法では十分に系統の安定性を確保することができなくなる可能性が高い。

これに対応するため当研究所では、これまで大規模系統の固有値解析手法(S法³)を用いて、PSSの制御系定数を最適に設計する手法を提案し、ほぼ実用化レベルにある。ここでは、その成果の一つとして、新しいタイプのPSS(P+形PSS)の定数設定に関し、複数の潮流状態を同時に考慮し、かつ、ローカル動揺と広域動揺の両者をバランス良く良好に安定化する手法について述べる。

幅広い系統運用状態に対応するPSS定数最適設計手法

現在、電力各社で広く採用されている一機無限大母線系統を対象としたPSS定数設計手法(表3-1-1の現用設計手法)に替わるものとして、当研究所では新たに、複数の系統状態における安定性を同時に考慮したPSS定数最適設計手法を開発・実用化した(表3-1-1の新最適化手法)。大規模系統を対象にPSSを設計する際に、系統運用状態(例えば系統構成や潮流状態)が変化しても、それを事前に考慮することにより系統の安定性を確保するロバストな制御系の設計を可能とした。以下にその原理を簡単に述べる。

複数の系統状態の定態安定度の評価は、図3-1-2のように、ある系統状態における固有値を用いた F_i を系統状態数だけ足しあわせた関数 F として定量的に与える。関数 F は系統の安定性が悪いほど大きな値となる。したがって、PSS定数を最適化し系統の安定性を高めるためには、関数 F の値を最小にすればよい。そのためには、PSS定数(図3-1-2では α_1 、 α_2 として表現してい

*¹ローカル動揺：発電機固有の特性に基づく約1 Hz程度の比較的周波数の高い電力動揺

*²広域動揺：系統全体の発電機が動揺する約0.5Hz程度の比較的周波数の低い電力動揺

*³電力系統の微小外乱に対する安定性(定態安定度)を解析するプログラム。系統の安定性は、S法により得られる「固有値(ダンピングとも言う)」の符号により判別することができる。現在、我が国の電力会社で広く用いられている。

表3-1-1 PSS定数設計手法の特徴比較

	系統対象規模	発電機モデル	PSSタイプ	設計対象条件	制御対象電力動揺
現用設計手法	一機無限大母線系統	簡略モデル	P形PSS	単一系統条件	ローカル動揺
新最適化手法	大規模系統	詳細モデル	P+ 形PSS、他 任意の形式	複数系統条件	ローカル&広域動揺

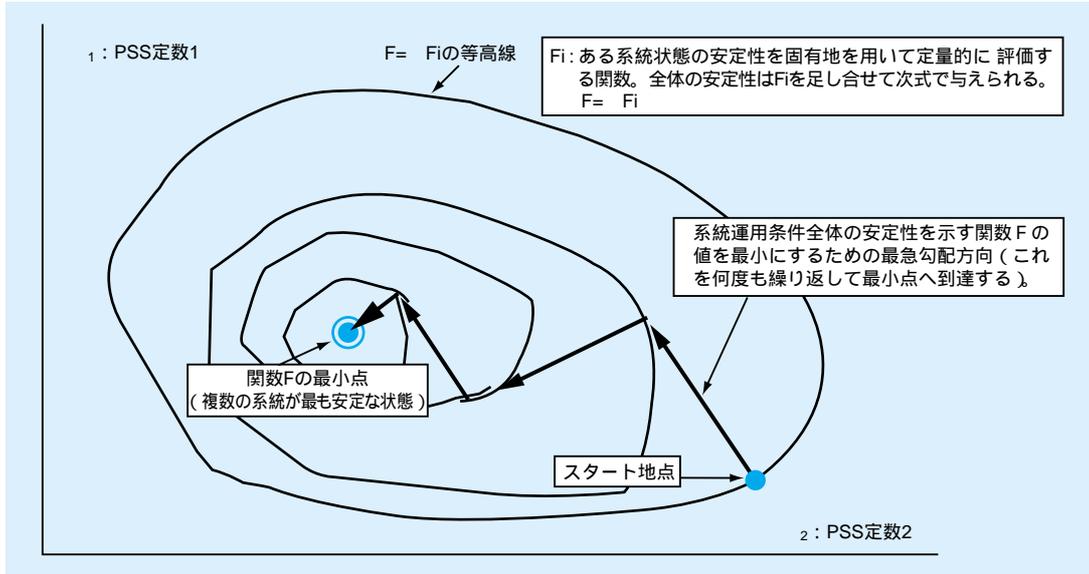


図3-1-2 安定性指標関数Fとその安定化の概念図

る)に対する固有値感度を用い、最急勾配法⁴により関数Fを最小化する。

ローカル動揺・広域動揺抑制のための2入力形PSS最適設計手法

ロバスト性の高い制御系設計のためには、のような複数の系統状態の安定化だけでなく、ローカル動揺や広域動揺といった動揺様相の異なる幅広い動揺周波数領域における安定性を確保する必要がある。

現用の制御機器を活用しかつ、周波数帯の異なる複数の動揺現象を抑制するためには、それぞれの周波数帯の動揺現象に効果的に作用するPSSを組み合わせ、発電機電圧を制御することが肝要となる。具体的には、図3-1-3に示すような発電機の有効電力出力(P)と回転子の回転数()をPSSの入力信号としたP+ 形PSSが有効である。基本的には、P形PSSがローカル動揺

に、P+ 形PSSが広域動揺抑制に効果的である。ただし、P形とP+ 形のPSSを組み合わせるとしても、P形とP+ 形を各々個別に定数を最適化しP+ 入力として組み合わせても必ずしも全体として最適とはならない。

そこで、複数系統状態の安定性を考慮しながら、P+ 形PSSの定数をP形PSSと同時に最適設計する実用的な手法を開発した(表3-1-1:新最適化手法)。

モデル系統での検証結果

図3-1-4に示す系統モデルを用いて、開発した手法の有効性を検証した。この多機系統モデルは、我が国の60Hz系統を簡略に発電機18機で模擬したもので、各発電機固有の約1秒周期のローカル動揺だけでなく、約3秒周期の広域動揺現象が発生しやすい特徴を持つ。多機系統モデルの両端に位置する発電機G1およびG18にP+ 形PSSを設置し、その定数を最適化することにより開発した手法の有効性を検証した。このモデル系統において有効性が検証されれば、実系統への適用も現実的となる。

PSS定数を最適化する際、P+ 形PSSによる広域モード

⁴関数Fを最小化する最適化繰り返し計算の各ステップにおいて、図3-1-2のように関数Fの最も急勾配の大きい(最急勾配)方向へパラメータを変化させて計算を進め、最終的にFが最小となるパラメータを探る手法。

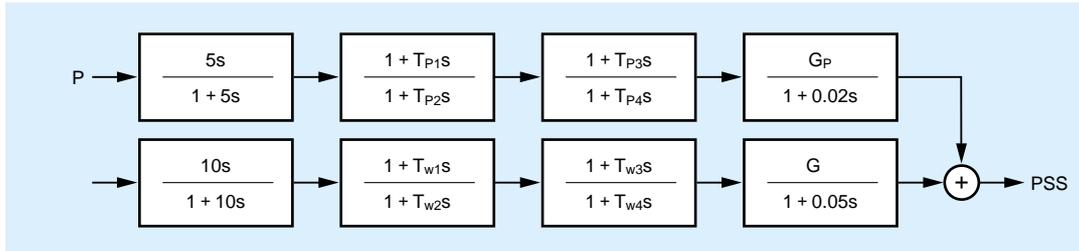


図3-1-3 P+ 形PSSブロック図

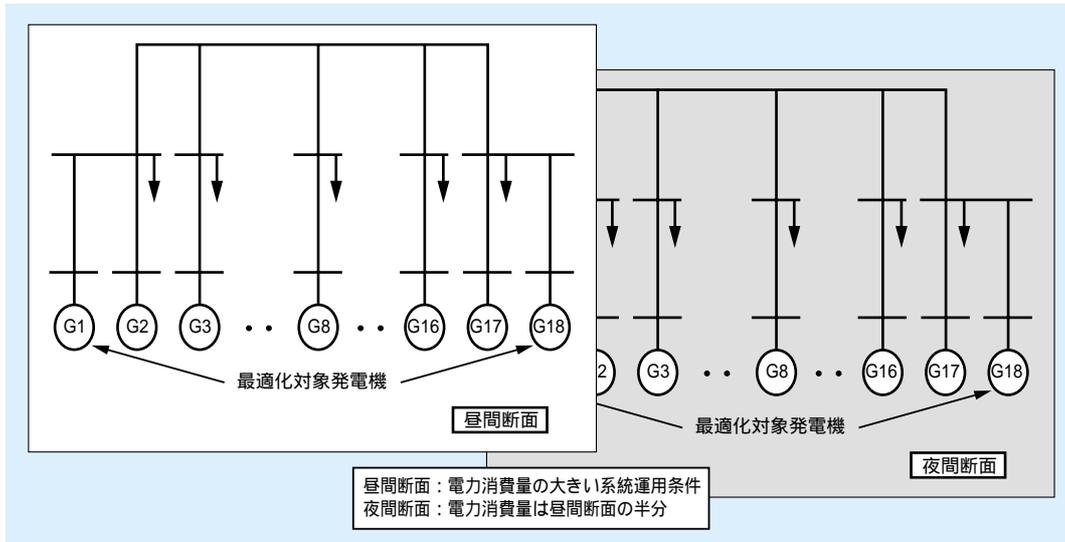


図3-1-4 18機長距離串形系統モデル

安定化のために、電力需要の大きい昼間を想定したモデル(以下、昼間断面)他に、電力需要の小さい夜間を想定した発電機容量・出力と負荷量を昼間モデルの値の半分としたモデル(以下、夜間断面)の2つを考慮した。また、PSS最適化対象発電機であるG1とG18のローカル動揺モードの安定化のために、従来手法と同様一機無限大母線系統モデルを考慮した。線路インピーダンスの値は、夜間断面において最適化対象発電機から多機系統モデルを見たときの短絡インピーダンスとした。このように、2つの多機系統モデルと2つの一機無限大母線系統モデルの合計4つの安定性を同時に考慮して、PSS定数を最適化した。P+形PSSの最適化対象パラメータは、図3-1-3で示すゲインと位相進み遅れ補償器の時定数(G_p 、 T_{p1} 、 T_{p2} 、 T_{p3} 、 T_{p4} 、 G_w 、 T_{w1} 、 T_{w2} 、 T_{w3} 、 T_{w4})とした。P形PSSのみを用いる場合は、 G_p 、 T_{p1} 、 T_{p2} 、 T_{p3} 、 T_{p4} を最適化した(この時、 $G_w=0$)。最適化検討ケースは、ベースケース(PSS定数最適化前)、G1、G18発電機のP形PSS定数最適化、G1、G18発電機のP+形PSS定数最適化、の3ケースとした。

図3-1-5に各ケースのシミュレーション結果を示す。各ケースの発電機動揺波形のうち上段は昼間断面、下段は夜間断面である。PSS定数最適化前は、昼間/夜間断面ともにG1とG18が大きく動揺する広域動揺が振動発散で不安定であり、ローカル動揺はほとんど顕在化していない(同図)。ケースでP形PSSを最適化することにより、昼間/夜間とも広域動揺は安定化できているが、シミュレーション開始後3秒間のローカル動揺が安定ではあるがケースより悪化している(同図)。P形PSSのみでも、ローカル動揺と広域動揺の両方を安定化できることが判るがその効果は十分とはいえず、もう一段の安定化が望まれる。ケースでP+形PSSへの新最適化手法の適用で、両動揺の安定性は更に向上した(同図)。シミュレーション開始後3秒程度の期間に現れるローカル動揺が支配的な領域、その後現れる広域動揺が支配的な領域共にケースよりも大幅に安定化されており、系統多断面を考慮したP+形PSS定数の最適化効果により幅広い動揺周波数領域での安定度向上効果が大きいことが明らかとなり、本手法

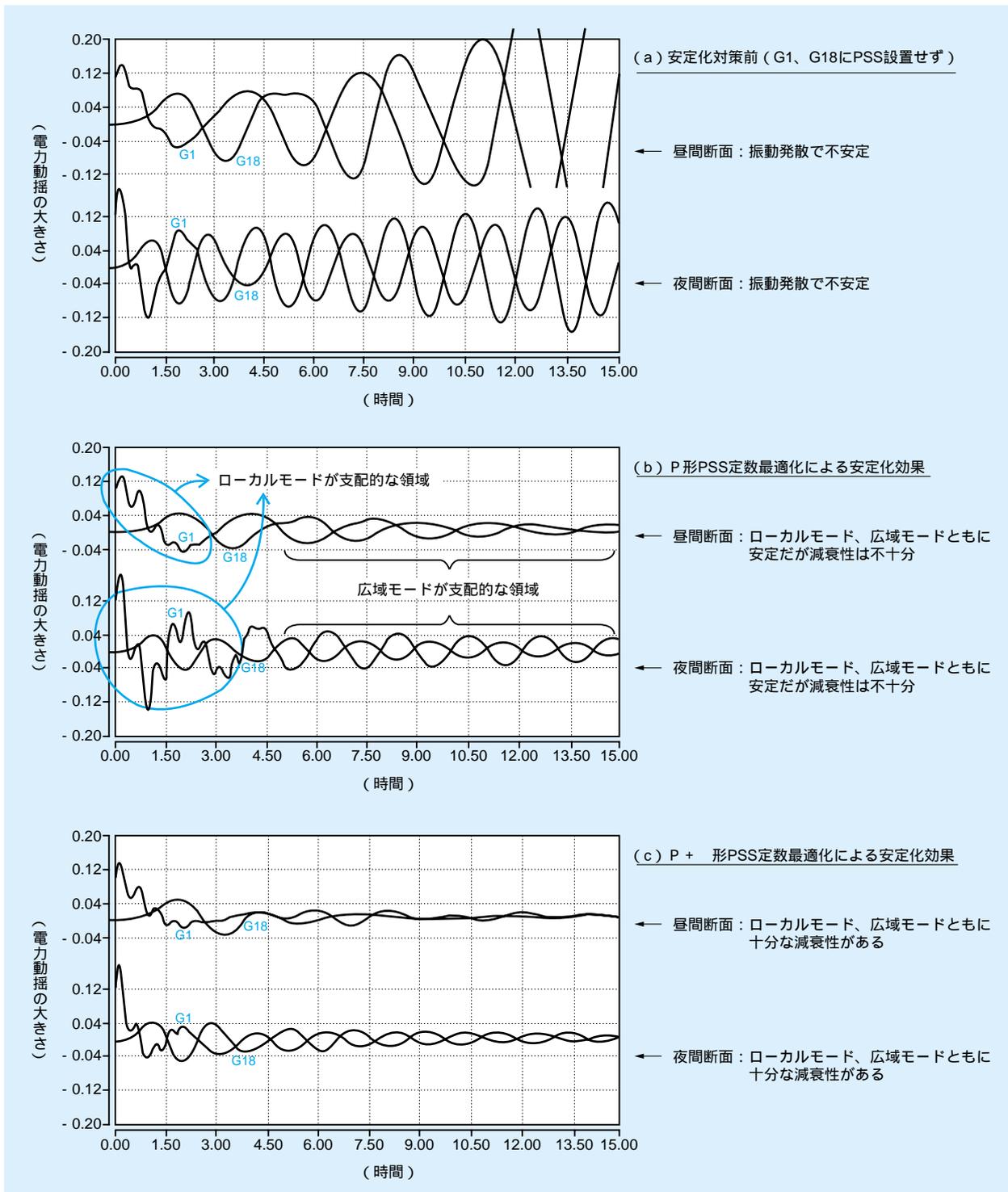


図3-1-5 P+ 形PSS定数最適化手法のシミュレーション検証例
(系統事故後の発電機G1とG18の電力動揺波形)

の有効性が検証された。

以上のように、実系統を簡略模擬した18機モデル系統に提案手法を適用し、ロバストな安定度向上効果が得られた。この結果は本手法が十分実用に耐えうるものであることを示しており、今後幅広い利用が期待で

きる。さらに、PSSの入力として今回用いた発電機自身の情報(Pや)だけでなく、発電機から遠方の情報(例えば連系線電力潮流)をPSSの入力信号とすることで、任意の発電機で任意の動揺現象を安定化させることも可能である。

過渡安定度向上論理ブロック

系統に事故が発生すると発電機は加速するが、そのまま加速が収まらずに脱調に至る場合がある。それを第1波脱調と呼ぶが、この過渡動揺第1波における過渡安定度を向上させるため、(2)のQ入力ブロックとは別の論理ブロックを開発した。これは、発電機至近端において短絡事故が発生した場合に、有効電力偏差 P の値を積分し、その値の大きさにより界磁電圧 E_f を発電機励磁系の上限值まで強制的に突き上げる回路(回路) である。これにより発電機の内部電圧を事故直後に急速に上昇させることができ、第1波脱調を防止できる可能性が高くなる。

多入力PSSの定数設定方法

$P+$ 形PSS部分とQ形PSS部分に分け、その定数を設定する。最初に $P+$ 形PSS部分の制御定数を前述(3-1-1)の $P+$ 形PSS定数最適化手法によって設定し、その後Q形PSS部分を線形化モデルにおいて0.3 ~ 1.0 [Hz] 程度の低周波数(長周期)の同期化力係数⁵および制動力係数⁶を増加させるように設定する。Q入力ブロック部分は低周波数領域を制御対象としているため、発電機の励磁機の違いによって設定を変える以外は、ほとんどの機種が発電機に同一の推奨値を適用することができる。なお、Q形PSSを導入すると、それに付随して短周期の安定性の悪い動揺現象が発生する可能性がある。したがって、実系統へ導入する際には図3-1-6に示すように、Q形PSSと併せて発電機電圧の変化分 dE_a と発電機有効電力出力の変化分 dP を加える必要がある。

交・直流電力系統シミュレータでの検証結果

長周期および短周期動揺が混在する複雑な実系統の特徴を再現するために、交・直流電力系統シミュレータにおいて、図3-1-7に示す長距離串形4機系統を構成した。実機相当のソフト・ハードにより構成される多入力PSSの試作機を無限大母線から最も遠い発電機1

に適用し、多入力PSS定数設定法の有効性、限界送電電力とダンピングの向上効果および系統状態の変化に対するロバスト性を確認した。

図3-1-7において送電線1回線の地絡事故を発電機3と4の間の送電線中間点で発生させ、発電機1から右端の無限大母線への送電電力の限界値を $P+$ 形PSSと多入力PSSで比較した。図3-1-8にその検証結果を示す。発電機が4台とも系統に接続されているケースを基本ケースとした。発電機1に設置した多入力PSSの定数はこの基本ケースを対象に設計した。次に、発電機2 ~ 4を1台ずつ系統から切り離した3種類の系統構成変更ケースを実施した(発電機切り離しの際は、負荷1 ~ 負荷3も減少または切り離した)。同図に各ケースの限界送電電力の比較を示す。基本ケースだけでなく、系統構成が変化した全てのケースにおいて $P+$ 形PSSよりも多入力PSSの方が限界送電電力を5 ~ 10(%)程度大きくできることが明らかになった。

また、同図は基本ケースで発電機1の出力が50(kW)時における各発電機の電力動揺波形である(太線がPSSを設置した発電機1)。多入力PSSのダンピング向上効果が大きいことが分かる。これらの結果より、限界送電電力とダンピング効果の両面で多入力PSSが優れていることが検証された。なお上記に併せて、実際の発電機への適用に当たって問題となる可能性のある、発電機回転数検出精度の影響、発電機の瞬時電圧の高調波ひずみ、自励式サイリスタの点弧時のノイズ、系統事故時の瞬時電流波形の直流分、あるいは不平衡故障時の動作に対して、試作機が問題無くその能力を発揮できることも確認している。

これにより、多入力PSSの実用化の見通しが得られたので、今後は実機系統への適用が期待できる。

3-1-3 適応型発電機励磁制御方式の開発

3-1-1および3-1-2において、現用発電機励磁制御系あるいはそれを改良した制御系による安定度向上効果を述べた。これらは、あらかじめ想定した系統運用状態の下での安定性を確保するために、オフラインで事前に制御系定数を設計し、設計後はその定数は基本的には固定とされる。また、複数の重要な系統運用状態を考慮することにより、通常の運用範囲におけるロバスト性は確保で

⁵同期化力係数：系統擾乱発生時に発電機動揺を引き戻そうとする力。一般にこの値が大きいと過渡安定度が向上する。

⁶制動力係数：発電機動揺の減衰を早めようとする力。一般にこの値が大きいと定常安定度が向上する。

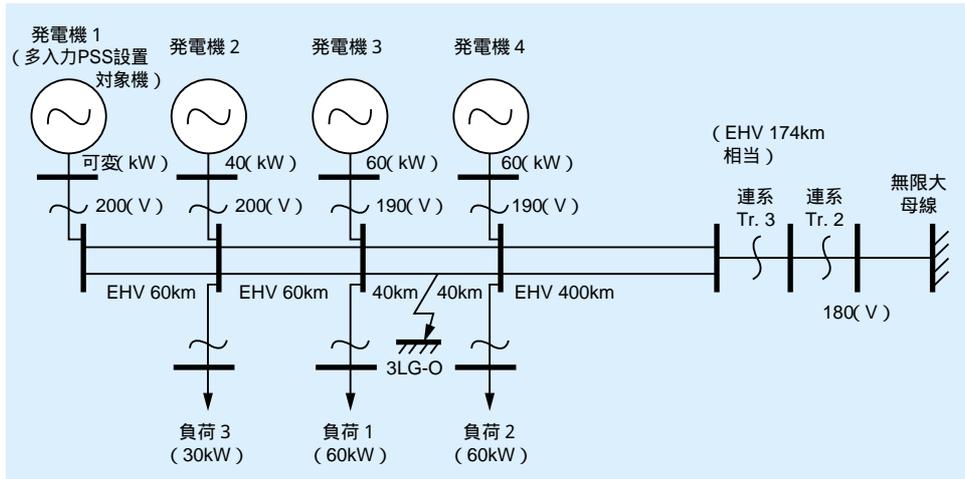


図3-1-7 交・直流電力系統シミュレータ4機系 試験系統

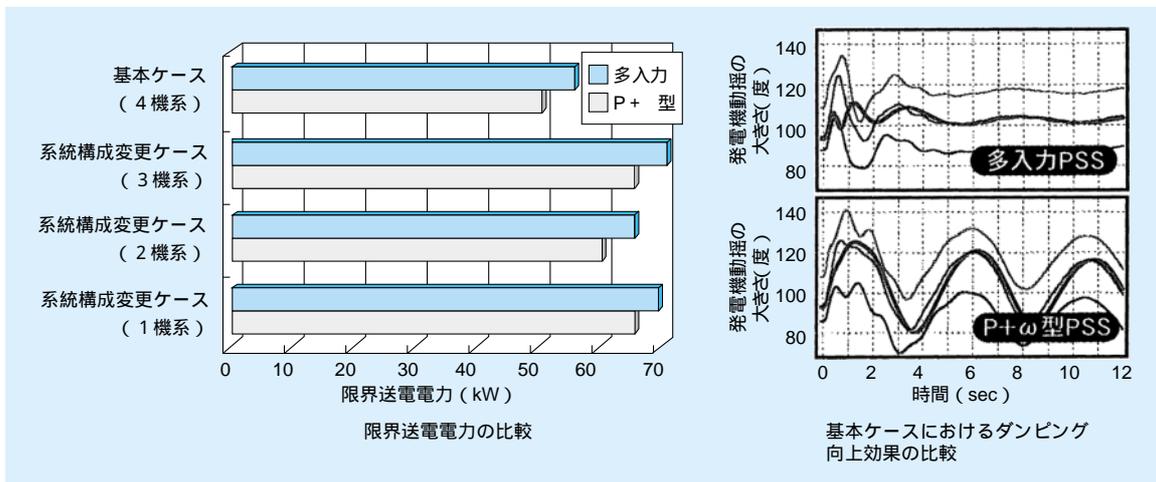


図3-1-8 多入力PSSとP+型PSSのシミュレータ検証試験結果の比較

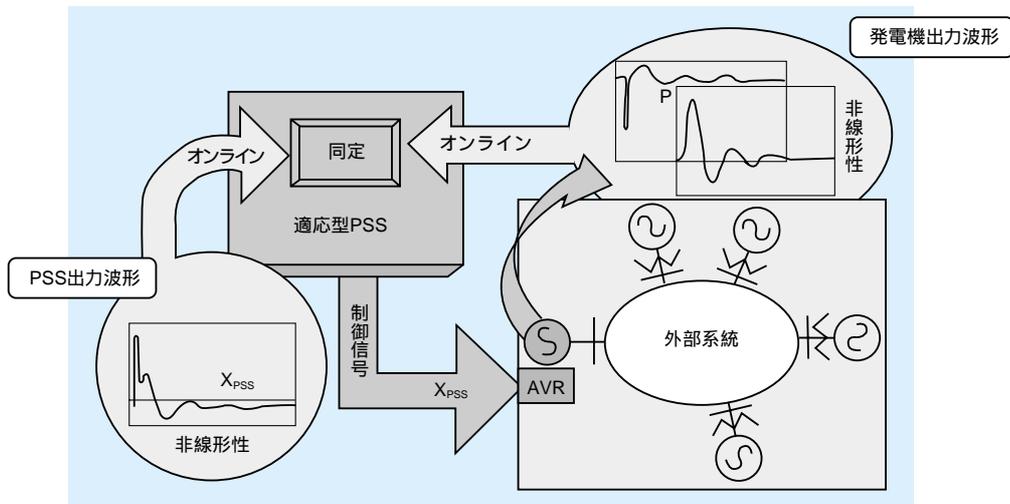


図3-1-9 適応型PSS方式の概略図

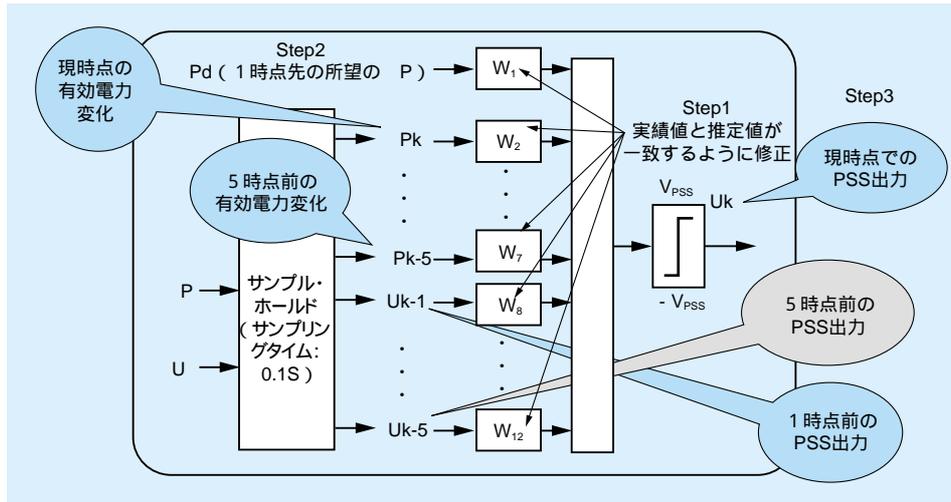


図3-1-10 提案した適応型PSS方式

きるが、送電線に事故が発生し事故後の系統構成が大きく変化するなど制御系設計時の想定外の状況となった時などでは、安定性が確保できなくなることが懸念される。

そこで当研究所ではより一層のロバスト性の向上を図るために、系統事故時の発電機の動揺特性をオンラインで同定し、時々刻々のその特性に合った適切な制御を実施していく方式を新たに提案した。

提案した適応型制御方式の概要

図3-1-9に提案した適応型PSS方式の考え方を示す。発電機動揺時の有効電力(P)波形とPSS出力(X_{PSS})波形データに基づき、両者間の動的な関係を時系列モデルとしてオンラインで同定する。そして、この時系列モデルを用い、発電機の回転数()の変化に比例した有効電力変化が生じるようなPSS出力を算定し発電機励磁制御系(AVR)へ送出する。これにより、系統状態に左右されない極めてロバスト性の高い制御系として期待できる。

図3-1-10に提案方式の具体的な構成を示す。入力信号は発電機有効電力変化(P)とPSS出力(U)であり、過去の時点から現時点(時間間隔0.1秒)までの実測値を時系列として保存している。各ステップの処理内容は次の通り。

- Step 1 : 時系列モデルのパラメータの修正
 発電機動揺中の有効電力変化(P)とPSS出力(U)の実測値から、時系列モデルのパラメータ($W_1 \sim W_{12}$)を修正する。すなわち、現時点の有効電力変化(P_k)が実測されたならば、時系列モデルを用いて1時点

前に出力したPSS出力(U_{k-1})の推定値を逆算する。もし、時系列モデルのパラメータが真値であれば、この推定値は1時点前の実績値と一致する。しかし通常はそうではないので、推定と実績が一致するように各パラメータをオンラインで修正する。

Step 2 : 有効電力変化(1時点先)所望値の決定
 PSS出力によって生じる発電機有効電力変化が発電機の回転数変化に比例するように制御すれば発電機を安定化することができる。このため、現時点の回転数変化に比例した値を1時点先の有効電力の所望値(P_d)とする。

- Step 3 : PSS出力の算定
 時系列モデルによって、1時点先の有効電力変化を予測することができる。この変化が、Step 2で決定した有効電力変化の所望値(P_d)と一致するよう現時点のPSS出力(U_k)を決定する。すなわち、Step 1で修正したパラメータ($W_1 \sim W_{12}$) およびStep 2で決定した1時点先の所望値(P_d)をもとに、5時点前から現時点までの有効電力変化($P_{k-5} \sim P_k$)と、5時点前から1時点前までのPSS出力($U_{k-5} \sim U_{k-1}$)を用い、現時点でのPSS出力(U_k)を算定する。

モデル系統での検証結果

図3-1-11の10機モデル系統を用いて提案の適応型PSSの性能をシミュレーションにより検証した。このモデル系統は系統事故発生前はループ状の系統構成となっている。提案手法のロバスト性を示すために、同図A、

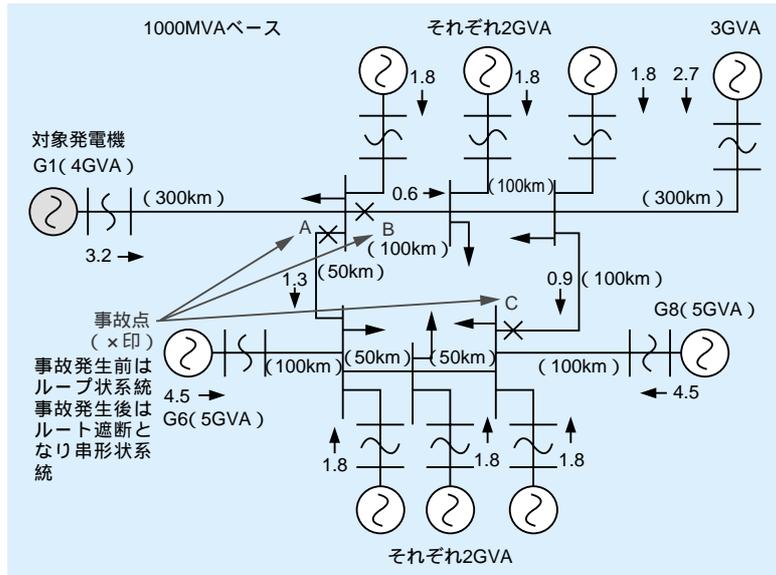


図3-1-11 モデル系統

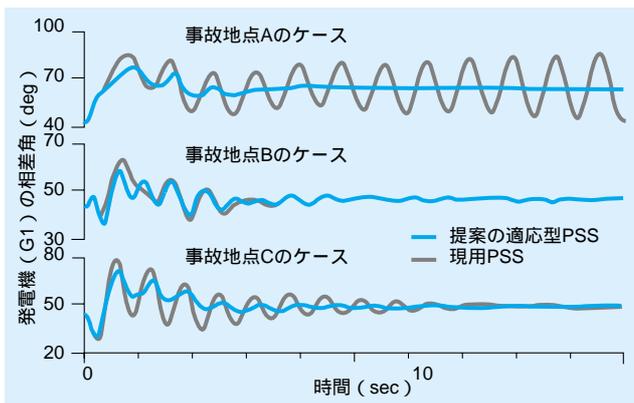


図3-1-12 提案方式と現用方式の動揺抑制性能比較

B、Cの3個所で事故をそれぞれ発生させた。事故後の送電線開放により元のループ系統構成は大きく変更され、長距離串形系統へと変化している。

提案の適応型PSS方式と現用PSS方式を発電機G1に適用し、上記事故を発生させて安定化効果を比較した。送電線ルート遮断後の系統状態が相異なる事故地点(A,B,C)に対して、その結果を図3-1-12に示す。事故Bケースは両方式の差はほとんど無く十分な安定性を確保している。事故Cケースでは両方式とも安定であるが提案手法の方が若干減衰率が悪い結果となった。しかしながら、事故Aケースにおいては、現用方式では徐々に動揺が振動発散するのに対して、提案方式は十分な安定性を示し、提案方式の系統構成の変化に対する適応性の

高さを示すロバスト性の高さを明らかにした。

以上のように、系統構成が大きく変化するような状況においても、その系統状態をオンラインで的確に把握し、それに発電機励磁系を適応させていく提案手法は現用の制御系に比べて高いロバスト性を有することを明らかにした。ただし、場合によっては現用PSSよりも減衰が悪くなるケースもあるため、今後は提案方式の適用性を広げるために、パラメータ修正の速応性と収束性を改善する必要がある。

3-1-4 発電機励磁制御系の一層の高度化を目指して

3-1節では、電力系統の安定化制御としての発電機の励磁制御に関し、当研究所で進めている研究の最近の成果を3つの側面から紹介した。現用PSS制御系定数の最適化の側面からは2入力(P+)形PSS定数の最適化手法を提案し、非線形性を考慮した新しい励磁制御方式の開発の側面からは多入力PSS方式を提案した。また、将来的に有望である適応型制御方式の開発の側面から、時系列モデルを用いた制御方式を提案した。今後は、これら3つの側面からの研究から得られた成果や知見を相互に活用することで、発電機励磁制御系のより一層の高度化に役立てたい。

3 - 2 直流技術による系統機能の強化

電力供給におけるコストと信頼度の協調のため、流通設備の利用率向上や電源、負荷の不確実性に柔軟に対応できる設備形成が重要となっている。パワーエレクトロニクス技術は、電力流通網の制御性を高め、大規模停電の防止、系統安定度向上や短絡容量軽減などの系統対策を低コストで合理的に実現することを可能とする。これにより、電力自由化などの環境下において、最適潮流制御や信頼度制御を行うための極めて有効な手段として活用することができる。

電力流通分野におけるパワーエレクトロニクス技術には、いわゆる FACTS 機器⁷と直流送電がある。直流送電に関しては、非同期連系による事故波及防止や短絡容量軽減が、一方 FACTS 機器に関しては、分散配置による安定度向上が主たる導入目的となる。また、直流送電は、環境性や経済性から、ローカル電源に代わる負荷供給や都市供給、さらには再生可能エネルギーによる分散型電源の集約送電への適用も期待されている。

直流技術による系統機能の強化とは、電力供給の信頼度と品質を確保しつつ、経済的な設備形成、運用を行うための手段として、系統の制御性を高めることを指す。

直流送電用などの交直変換器については、今後、自励式変換器⁸の適用が主流となるものと考えられる。自励式変換器は、連系する交流系統に依存することなく高速に有効・無効電力を調整可能な電圧源であり、交流系統から見れば極めて制御性の良い発電機とみなすことができる。このため、雷事故などによる系統動揺時の安定運転性能と有効・無効電力の調整能力に優れ、そのことが他励式変換器にはない画期的な導入メリットを生み出す。しかしながら、大容量の直流送電用として実用化するためには、設計合理化によるコスト低減と損失低減が大きな課題となっている。

本節では、まず自励式変換器の利点と適用効果をま

とめ、自励式直流送電による電力系統の高機能化方策について整理する。次に、コスト低減に向けた設計合理化のため、新たに開発した系統事故時の過電流、過電圧抑制方式について紹介する。

3-2-1 自励式変換器の利点と適用効果

自励式変換器の応用装置としては、STATCOM(自励式 SVC : Static Compensator)と UPFC(自励式移相変圧器 : Unified Power Flow Controller)が既に実運用に入っている。また、自励式直流送電に関しては、標準化によるコスト低減を図った数万 kW 規模の HVDC Light が実用化されている。数十万 kW クラスの直流連系(BTB)用変換器についても、わが国の連系強化技術開発プロジェクトにおいて、実規模実証器を実系統に接続して検証試験を行っている。この成果により、大容量器への自励式変換器の適用についても技術的な素地は整いつつある。

電圧形自励式変換器は、図 3-2-1 に構成と動作原理を示すように自らの転流動作により直流電圧を切り刻む形で交流電圧を発生している。従って、直流電圧が維持されている限り、自励式変換器は交流系統から見て電圧源として機能する。これにより、直流送電への適用を考えた場合、他励式変換器では実現できない次のようなメリットが得られる。

電源としての運転、負荷供給

無電源あるいはそれに近い系統への電力供給が可能である。回転機に比して慣性の非常に小さい電圧源に相当し、制御性に優れる。ただし、過負荷耐量は変換器の定格設計(素子電流耐量)により決定され、回転機よりは通常小さく制限されるが、一方では短絡電流を増加させない利点ともなる。

弱小交流系統との連系

変換器の運転や転流動作に対する交流系統電圧のアンバランス、波形歪みの影響が小さく、変換器自身にも転流失敗が無い。さらに、下記、項の能力をべ

⁷ FACTS : Flexible AC Transmission System の略。パワエレ機器を主体として交流電力系統をより柔軟に制御するシステム。

⁸ 自励式変換器 : 装置内部に電源を持って運転する交流・直流変換器。これに対して、系統の電圧を用いて運転を行う変換器を他励式変換器と呼ぶ。

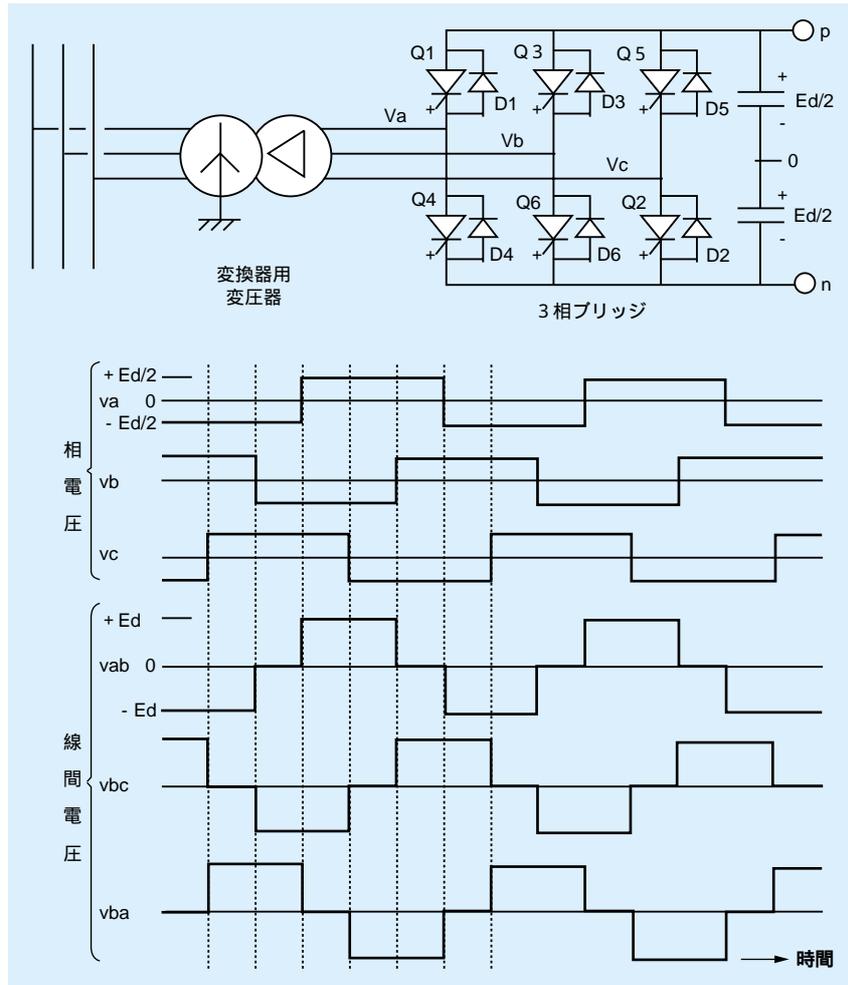


図3-2-1 3相電圧形変換器の基本構成と動作原理

ースに、交流電圧制御が可能となることから、電圧安定性にも優れるため、短絡容量が小さい弱小交流系統との連系においても、安定な運転が可能である。

無効電力供給能力

自励式変換器によって有効電力(P)と無効電力(Q)を制御できる範囲(以下、有効・無効電力可制御領域と呼ぶ)は、図3-2-2に示す円内の領域である。変換器が系統に供給できる皮相電力最大値は、変換器の実効値電流容量で決まり、系統電圧が定格の場合にはMVA容量に一致する。同図に他励式変換器の有効・無効電力可制御領域との比較を示すが、自励式変換器の特徴が、無効電力を供給できる点にあることがわかる。このため、他励式システムのような調相設備が不要となる。従って、系統事故時の交流側過渡過電圧など調相設備を原因とする過電圧が、自励式システムにおいては発

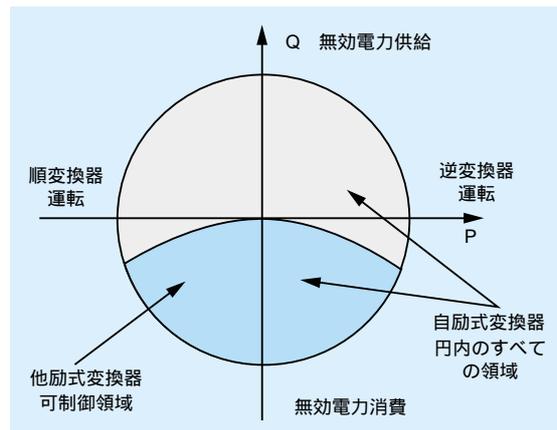


図3-2-2 有効・無効電力可制御領域

生しなくなる。

また、放射状系統においては、無効電力不足による電圧低下が送電容量の限界を決定しているケースが多く、無効電力供給能力を持つ自励式変換器の導入により、輸送力の向上効果が期待できる。

留意すべき点は、最大出力が変換器の電流容量により制限されるため、系統電圧が低下すれば、それに比例して可制御領域も同心円状に低下することである。従って、事故時などの交流電圧低下時に、変換器からの無効電力供給により系統電圧を維持したい場合、有効電力を絞らない限り、無効電力を供給できないといった制約を生じる。

高速な有効・無効電力独立制御

交流系統との連系時には、通常、系統電圧を制御入力とし、これに対して所望の有効・無効電力(実際にはこれに対応した交流電流)を系統に流し込むために必要な変換器出力電圧を発生している。すなわち、図3-2-2の円内に対応した有効・無効電力を系統に供給するために必要とされる出力電圧を発生することで、有効・無効電力可制御領域に対応した有効、無効電力が供給できる。変換器制御における有効・無効電力の独立制御は、変換器出力電圧の大きさと位相という2つの制御自由度を利用して、交流電流を調整することで実現している。

この能力は、系統の安定化制御や最適潮流制御の実現に威力を発揮する。例えば系統事故時の安定化については、変換器の有効電力と無効電力を協調して制御することで、周波数と電圧双方の変動を同時に抑制することが可能となる。

PWMによる高調波抑制

PWM(パルス幅変調)制御⁹の採用により、高調波フィルタの削減あるいは省略が可能となる。この効果は、PWMパルス数を大きくするほど高くなるが、一方では損失の増大につながり、コストを最小とする設計が求められる。フィルタの削減は、調相設備が不要となることと相まって、現状の他励式システムに比して、変換所敷地面積の大幅な削減につながる。

3-2-2 自励式直流送電による系統高機能化

自励式直流送電には、自励式変換器のみにより構成

⁹ PWM : Pulse Width Modulationの略。自励式変換器の変換タイミング指令を出すパルス信号の長さを自在に変えて所望の出力を発生させる方式。

される直流送電(図3-2-3)の他に、自励式変換器と他励式変換器の組合せによる直流送電の2つの構成がある。

自励式直流送電の活用には、基幹系統においては、大規模停電防止と流通設備の利用率向上を同時に実現する具体的な方策を考えることが重要となる。この前提として、わが国の基幹系統は、概ね電源開発に先んじて整備されてきており、電源、負荷の極端な偏在がない限り、21世紀中葉の所要送電量に対応した骨格はほぼ出来上がっていると見てよい。一方、需要地系統(2-2参照)においては、信頼度とコストの協調に加えて、環境性にも優れるシステムを構築するため、中小規模直流送電の利用方法と定量的メリットを明らかにする必要がある。

ここでは、自励式直流送電の活用方策をいくつか提示し、それぞれの導入効果について考察する。これらは、電力システムの将来像を描いていく上での要素技術となるものである。

小規模負荷供給、電源送電

図3-2-4に示すように本系統と小規模の地域系統あるいは電源を結ぶものであり、容量的には100MW程度までのシステムを想定している。負荷供給を受ける地域系統としては、離島などディーゼル発電に依存している地域が考えられ、経済性や環境面に利点がある。一方、負荷供給とは逆に、需要地とは離れた小規模電源(風力、太陽光など)の出力を集約し、送電する電源系統への適用も考えられる。これらはいずれも、HVDC Lightの適用分野に挙げられている。

直流送電のシステム構成としては、全ての端子を自励式変換器で構成する場合と、順変換器側については他励式変換器を利用するハイブリッド構成とが考えられる。このときの選定基準は、順変換器側においても電圧安定化などの無効電力制御を必要とするかどうかによる。

都市供給

都市部においては、今後電力需要が2倍近くまで増加することが予想され、都市供給系統の輸送力倍増が大きな課題となる。この対策の一つに交流送電線の直流化が挙げられる。154kV～275kV、数十kmの交流架空送電線を直流化した場合、1.5～2.4倍の輸送力増強が可能となり、同条件の交流ケーブルの場合でも相当の

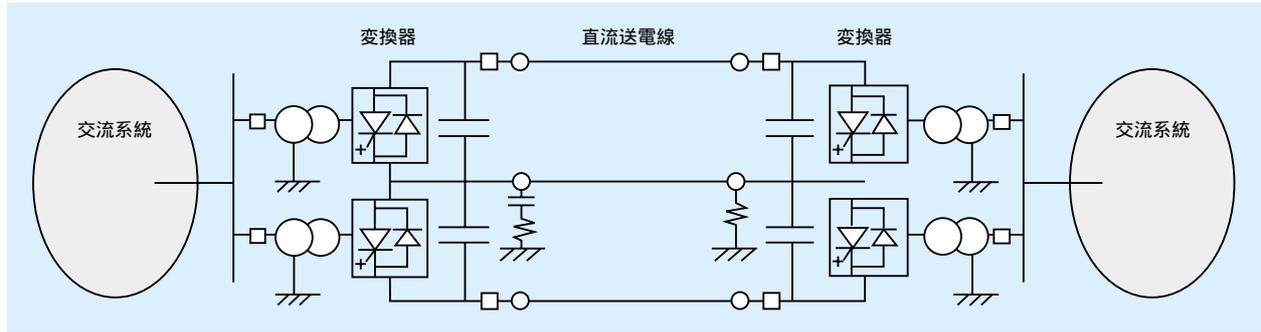


図3-2-3 自動式変換器のみにより構成される二端子直流送電システム

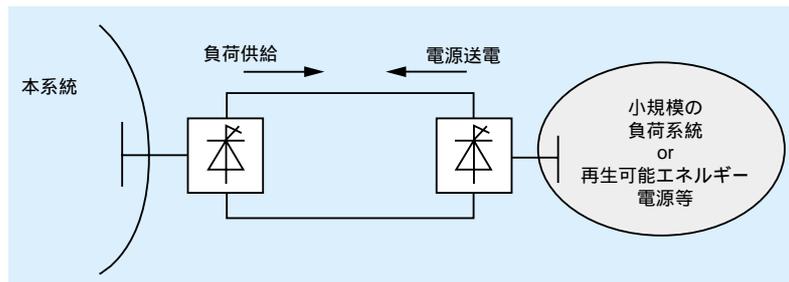


図3-2-4 小規模負荷供給あるいは電源送電への適用

効果が期待できる。

都市部への高密度電力供給を考えれば、受電側変電所のコンパクト化を図り、短絡容量の小さい系統への安定供給を実現できることから、自動式変換器の活用が有効である。また、直流化の一形態として、電源から直接都市部の需要地に供給する自動式多端子のケーブル送電システムなども考えられる。

周波数変換

50/60Hz 系統を連系する周波数変換設備は、200 ~ 250 万 kW 程度に増強すれば、想定し得る規模の需給変動などには概ね対応できよう、との検討結果がある。すなわち、現状連系容量の倍増となるが、連系地点を考慮した場合、他励式変換器の利用では同期調相機などの電圧安定化対策が必要となる可能性が高い。

自動式変換器を適用した場合、系統側の対策なしに安定な容量増加が可能となるとともに、隣接する他励式システムの安定化にも寄与できるため、適用のメリットは大きい。また、調相設備などを要因とする高調波不安定現象についても、ほとんど問題とならない。

直流連系

直流連系については、放射状系統における直流分割

とループを構成する多点連系への適用が考えられる。

まず、6 エリアからなる図3-2-5 のモデル系統を用いて、自動式変換器による直流分割の適用効果を示す。このモデル系統において、1 から 6 のエリアは、各々 1 発電機と 1 負荷からなる簡略化した地域系統を示す。いま、エリア 1 から 6 への輸送力(可能融通電力)を事故点の $F_1 \sim F_6$ のうち、最も条件の厳しい場所の送電線 3 線地絡事故に対する安定度限界で評価するものとする。直流連系の容量は、交流送電線の熱容量に対応した 3 GW(1 GW は 100 万 kW)とした。直流連系導入前の交流系統では 1.7GW の輸送力が、同図の分割点に直流連系を導入することで、直流限界容量の 3GW まで輸送力が増大することがわかる。放射状系統においては、このような効果は、直流連系の位置を動揺の中心(節)近くとするほど高い。分割点によってはかえって逆効果となる場合もあり、適正な分割点を選定することも大きな課題となる。なお、自動式変換器を採用することのメリットは、分割点の系統状態によらず、短絡容量が小さい地点においても直流の安定運転には問題が無いことである。

次に、多点連系への適用については、ループ潮流の制御が第一の目的となる。さらに、直流連系に系統事故時の安定化制御を具備することで、交流系統安定化に必要な SVC などの設置量を、他励式の場合に比

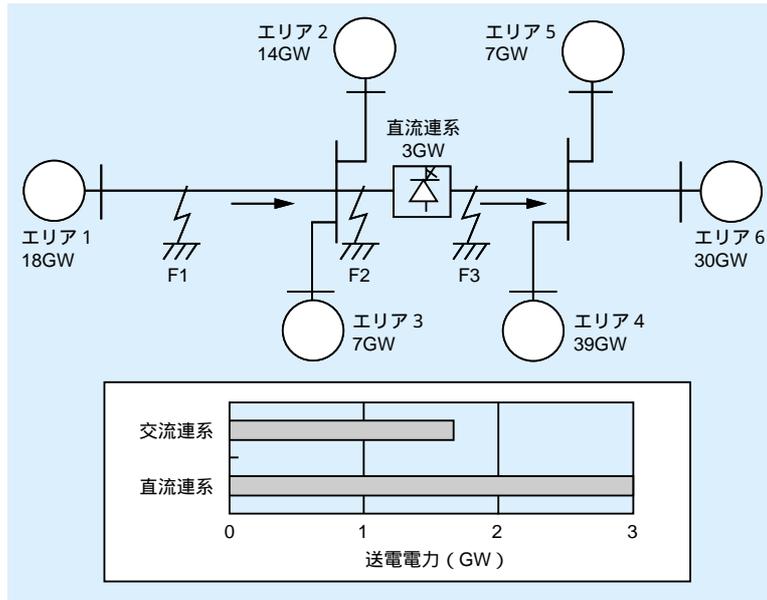


図3-2-5 放射状系統への直流連系の適用効果

して大幅に低減できる可能性がある。

広域直流多端子連系

図3-2-6は、図3-2-5と同じ放射状モデル系統をベー

スに、直流多端子系統の一導入形態を示したものである。端子1の容量が、並列する交流ルート¹の熱容量(3GW)に等しいケースを想定し、事故点F₁~F₃の送電線3線地絡事故に対する最も厳しい条件における安

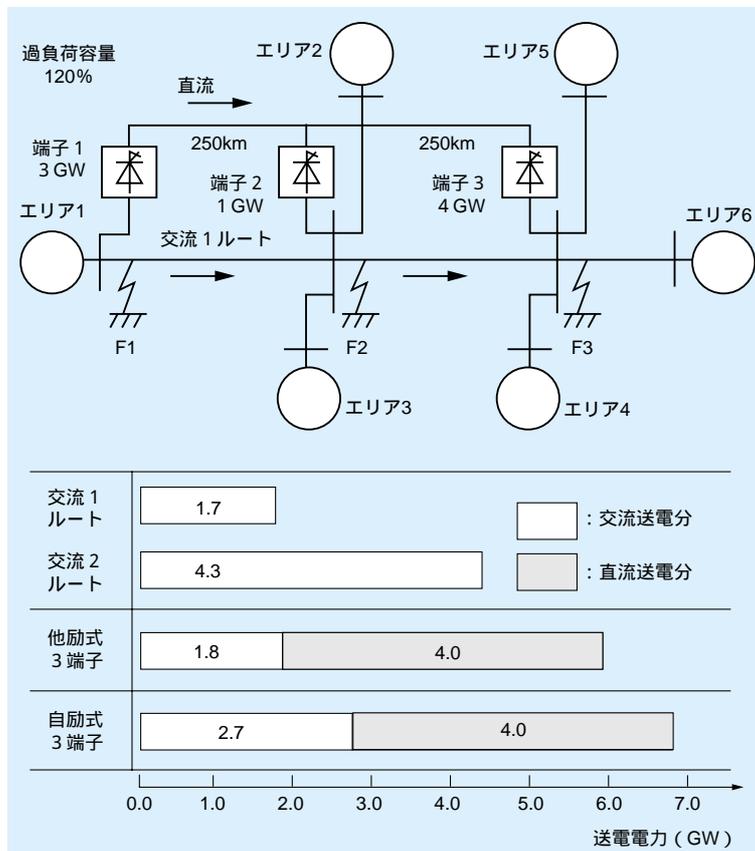


図3-2-6 自励式直流多端子の適用による輸送力向上効果

定度限界でみたエリア 1 から 6 への電力輸送力の評価を行った。端子 2、3 の定格容量はそれぞれ 1 GW、4 GW である。なお、いずれの端子とも 120% の常時過負荷容量を持つものとし、無効電力はこの範囲内で供給可能とした。

このときの輸送力を、交流を 2 ルート化したケース、および他励式変換器を採用したケースとの比較で示した。自励式変換器を採用することにより、直流送電による安定な送電容量の増加に加えて、並列する交流ルートの送電容量も熱容量限界近くまで増加 (1.7 から 2.7GW へ増加) できる。自励式変換器の運転継続に基づく事故時安定化制御 (有効・無効電力モジュレーション制御) により、系統電圧の維持とダンピングの向上を同時に実現することで、このような輸送力向上効果が得られる。

3-2-3 設計合理化のための制御保護方式開発

制御保護方式開発のねらい

自励式直流送電の系統適用にあたっては、変換器の高電圧・大容量化、低損失化、高信頼度化のみならず、システムの設計合理化によるコスト低減が重要である。設計合理化を実現するには、直流送電システムの交流側および直流側での系統事故時の過電流、過電圧の抑制方式を確立する必要がある。これにより、変換器の過負荷耐量設計や絶縁設計、また直流送電線の絶縁設計の合理化が可能となる。

さらに、過電流、過電圧抑制により、直流送電システムを保護停止することなく運転継続できるため、自励式変換器が持つ系統安定化機能をフルに活用することが可能となる。これにより、他励式システムに見られる、SVC などの安定化対策が不要となるため、特に弱小系統との連系において大幅なコスト低減が期待できる。

ここでは、自励式変換器を用いた直流送電の形態毎に、これまでに当研究所において開発した過電流、過電圧の抑制制御方式とその効果を紹介する。

自励式変換器のみで構成される直流送電の制御保護方式

図 3-2-3 に示した二端子の自励式直流送電システムを

対象として、EMTP 解析¹⁰ および交直流電力系統シミュレータ試験により次のことを明らかにした。

(i) 交流送電線事故に対する過電流、過電圧抑制方式

PWM パルス数を適切に選定した上で、変換器電流制御の高速化を図ることで、変換器過電流が抑制できる。図 3-2-7 のような変換器過電流は、変換器制御のむだ時間 (CPU 演算と信号伝送に要する制御の遅れ時間) が主な発生原因となっている。このため、このむだ時間を補償する変換器制御方式を開発し、交流事故時の変換器の最大過電流を、従来方式の半分以下の 1.3pu 程度まで低減した (図 3-2-8)。これにより、同じ素子であっても変換器の定格電流を大きく設計することができるため、素子の利用率向上によるコストダウンが可能となる。

また、事故除去後欠相状態となる 2 回線同相 1 線地絡事故に対しても、安定に運転継続可能な制御方式を開発した。これにより従来の他励式システムでは同期調相機などを設置しない限り運転ができなかった欠相期間においても、自励式システムでは、定格の約 40% の送電電力が確保できる。

(ii) 直流送電線事故に対する過電流、過電圧抑制方式

接地回路定数の適切な選定と事故発生直後の瞬時ゲートブロック¹¹を行うことで、変換器過電流を抑制しながら、直流送電線の電圧上昇を低減することができる。これにより、絶縁設計からみた直流送電線の建設コストは他励式システムと同等となる。

さらに、直流遮断器を用いて事故電流 (制御により直流定格電流程度に低減) を遮断することで、他励式システムとほぼ同等の高速な送電再開が可能となる (図 3-2-9)。

自励式変換器と他励式変換器の組合せによる直流送電の制御保護方式

都市供給や離島送電などの一方向送電には、他励式 (順) 変換器と自励式 (逆) 変換器を組み合わせたハイブ

*¹⁰EMTP : 電磁界瞬時値解析プログラム。Electromagnetic Transients Program の略。電力系統の電圧と電流を生波形 (瞬時値) のままで計算機処理する汎用プログラム。解析領域の非常に短い詳細検討に効果的。これに対して、当研究所の Y 法は実効値解析プログラムと呼ばれる。

*¹¹瞬時ゲートブロック : 事故検出により変換器の運転を一時的に停止させる保護動作。

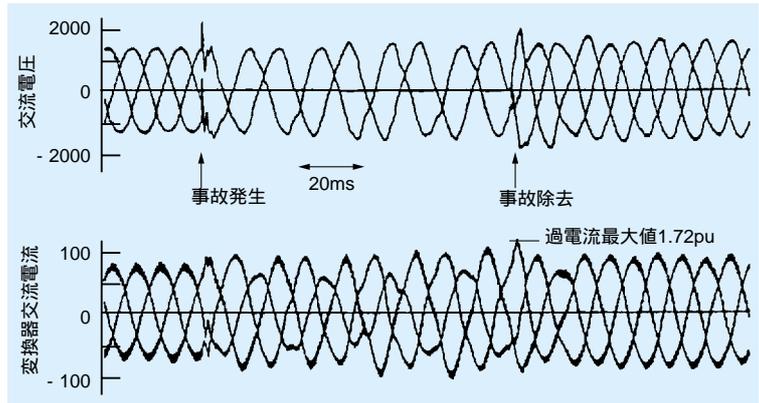


図3-2-7 交流系1回線1LG事故時の変換器過電流

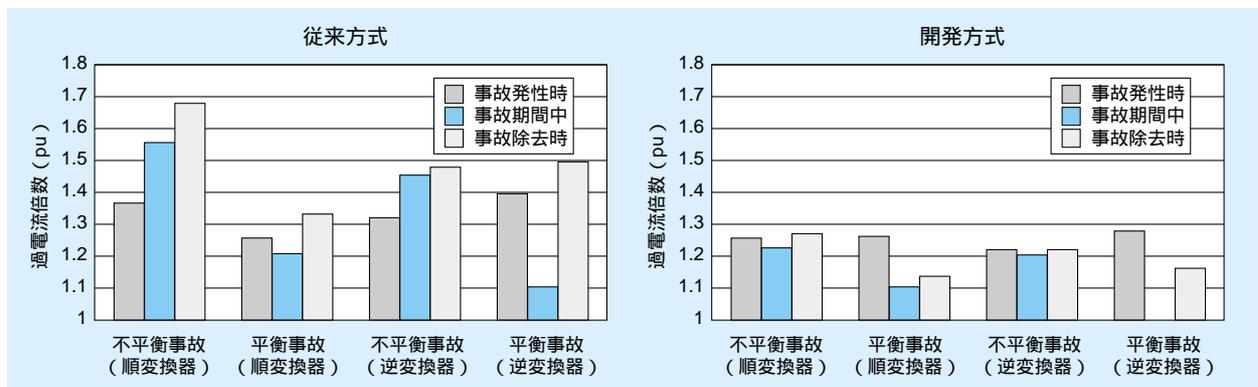


図3-2-8 過電流抑制効果の比較

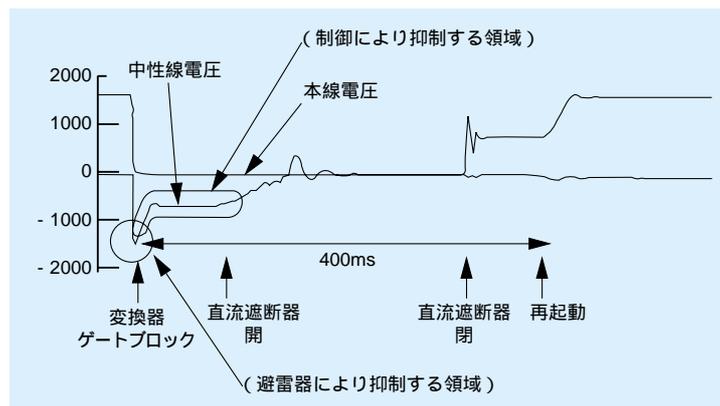


図3-2-9 直流送電線地絡時の直流過電圧の抑制

リッド式直流送電の適用が考えられる。このようなシステムに関しては、自励側交流線路事故時の過電流、過電圧抑制方式として、上述の自励式変換器のみのシ

ステムと同じ制御方式が適用できる。他励側事故時については、従来の他励式システムと同様の制御で充分である。これに対し、直流線路事故に対しては、変換

器過電流を抑制しながら、中性線および健全極の過電圧を抑制するいくつかの方策を明らかにした。

中性線接地抵抗を適切な値に選定するとともに、自励式変換器の瞬時ゲートブロック方式を採用することにより、直流線路の絶縁レベルを従来の他励式直流送電と同程度とすることができる。

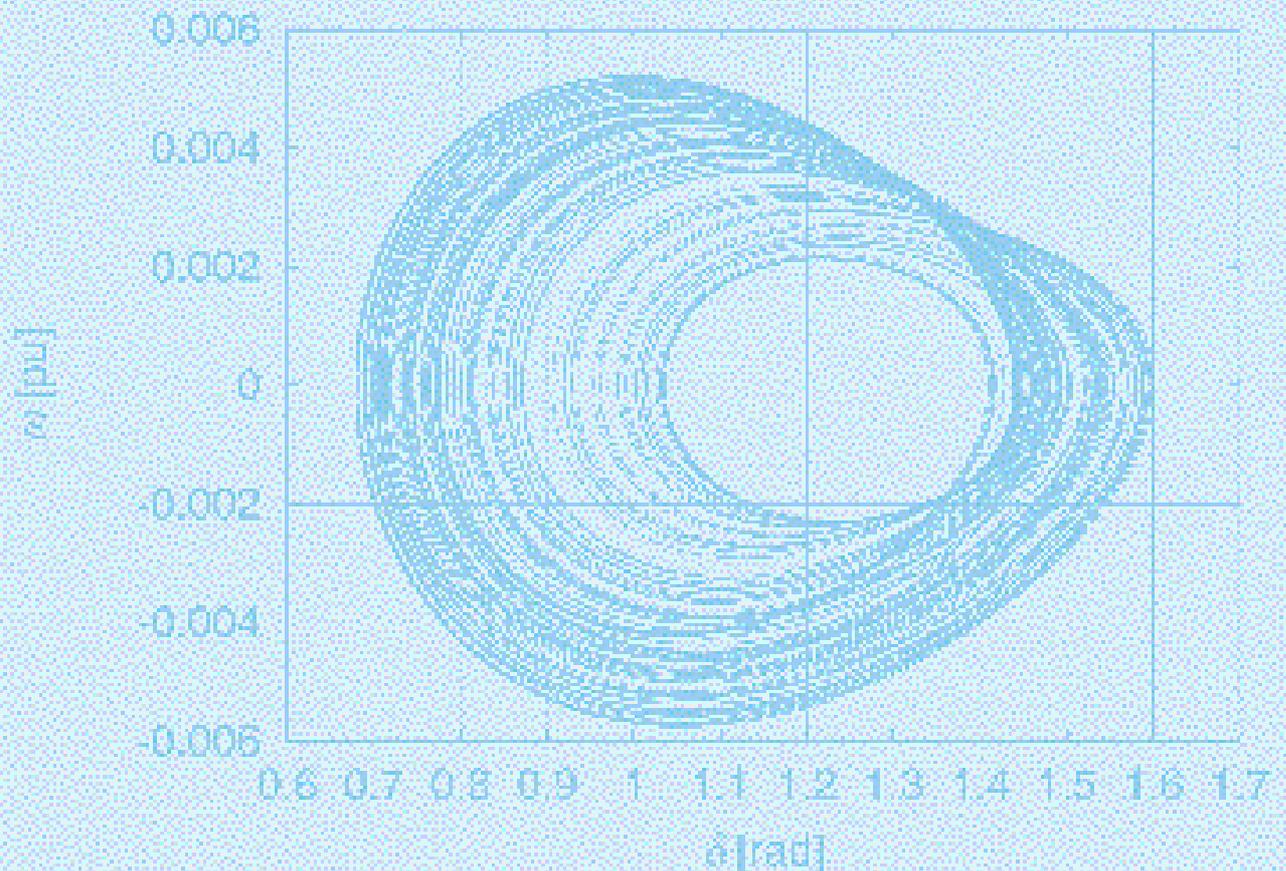
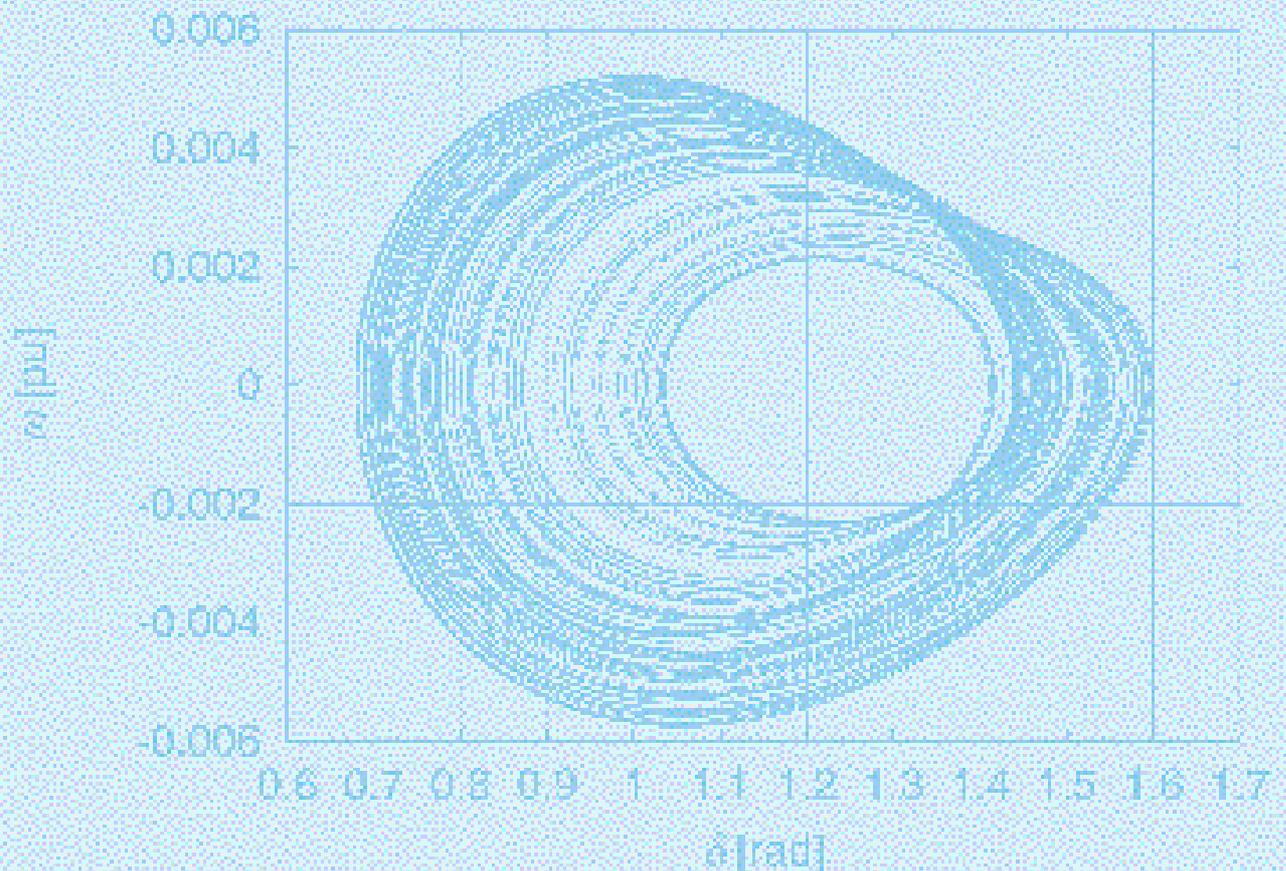
自励式変換器の直流端にダイオードを直列に接続した構成を採用することで、自励式変換器の絶縁レベルが約20%低減可能となる。

3-2-4 直流技術の広範囲な系統導入実現を目指して

既設設備の利用率向上や都市への高密度電力供給、さらには環境性に優れる負荷供給などを実現する上で、自励式変換器の系統適用が広範囲に進んでいくことは確実である。今後は、さまざまな導入形態に関し、技術的および経済的メリットをより具体的かつ定量的に提示するとともに、実用化に向けた開発課題を明確にしていく予定である。

第4章

電力流通網の新しい評価手法



第4章 電力流通網の新しい評価手法 目次

狛江研究所電力システム部 上席研究員 栗原 郁夫

狛江研究所電力システム部 上席研究員 田中 和幸

4 - 1	電力系統の新しい信頼度評価手法	45
4 - 2	雷対策による電力輸送力増大効果の評価手法	53
4 - 3	コストと信頼度の調和を目指して	58

栗原 郁夫 (12ページに掲載)



田中 和幸 (昭和51年入所)

主に電力系統の潮流計算手法や故障計算手法、電圧安定性解析手法等に関する研究に従事してきた。現在、長時間シミュレーションプログラム開発や系統余力評価関連の解析手法等に関する研究に取り組んでいる。

第4章 電力流通網の新しい評価手法

電力系統を構成する種々の電力輸送設備は、発電所で発生される電力を需要地まで効率的かつ信頼性を保って送り届ける責務を負っている。効率的とは一言で言えば低コストでという意味である。低コストを殊更に重視すれば信頼性が危うくなるし、逆に過剰な設備で過度の信頼性を確保すれば高コストという問題が発生する。両者の間には概念的には協調の取れた適正なポイントがあるはずである。

良く知られているように今日、わが国の供給信頼度は世界でも屈指の高レベルとなっている。この背景の一つとして、経済や社会生活の高度化等に伴い電気に対する質的ニーズが大きくなってきたことがある。そのため過去長年に亘って、数々の信頼度向上対策が図られてきた。

一方、わが国における近年の電力供給コストを見る

と、国のエネルギー事情や地形利用など国情を無視した単なる国別比較では、わが国は必ずしも低位にはない。これに規制緩和・自由化論議が加わり、適正な信頼度レベルを維持しつつコストダウンをというニーズが高まっている。

こうした議論を客観分析・評価するためには信頼度レベルの定量化が不可欠である。すなわち電力供給の信頼度解析が必要となる。電力系統の信頼度解析研究自体は、とくに海外においては古くから行われており、国によってはそれなりの位置付けがなされている。しかしわが国では、信頼度解析が扱う「確率」という事象に対する受容性の低さからか、今日なお実用手法として確固たる地位を占めてはいない状況にある。

そこで本章では、電力供給信頼度を定量評価する新しい解析手法について述べる。

4-1 電力系統の新しい信頼度評価手法

4-1-1 電力系統の供給信頼度評価

電力系統における供給信頼度の概念

一般に電力供給の「信頼性」と言う場合には、広くは燃料セキュリティや社会的な不確実性についてもその意味に含めることがある。しかしながら現時点では、こうした広義の信頼性について体系的に取り扱うことは極めて困難である。これに対し、電力供給の「信頼度」と言う場合には通常、限定した意味で用いる。すなわち、この場合には社会的な不確実性については除外し、電力系統という工学的なシステムを対象として、これを構成する要素の不具合(設備の故障や停止など)によって、電力の正常な供給に問題が生じる度合いを表すものとされる。

電力系統の信頼度は供給側と需要側の2つの側面から考えられる。供給側での信頼度と需要家側での信頼度は、一般に同等ではない。需要家側にとっての信頼度は、実際には統計としての停電の有無である(ちなみに通常、需要家端での電力品質の低下は信頼度に含めない)。すなわち、顕在化したリスクである。これに対して供給側にとっての信頼度は通常、潜在的なリスクを指す。こうした意味から、供給側から見た電力系統の信頼度は、限定的に「供給信頼度」と表現されることが多い。

供給信頼度は電力系統の固有の性質から、一般に以下の2つの視点から議論される。

アデカシー(Adequacy): 系統構成要素の計画停止、ならびに生じうると考えられる事故停止を前提に、需要家の要求する電力(kW)ならびに電力量(kWh)を

供給できる電力系統の能力

セキュリティ(Security): 系統要素の稀頻度多重事故など予測困難な突発的な事象に耐えることができる系統の能力

アデカシーの定義で留意すべき点は、計画停止や事故停止を考えると、需要の合計量を供給できる能力を扱うことである。後者は、事故後に系統側で何らかの操作を短時間で行うことにより供給を確保できれば、アデカシーは保証されているということの意味する。こうしたことから、アデカシーは様々な努力を行って系統が落ち着いた状態での最大供給能力を測る尺度と考えられ、この点で「静的な供給信頼度」とも言える。

一方セキュリティは、突発的な事故に対してそれを波及させずに抑え込む能力に関係し、多くの場合、広域に及び安定度や周波数異常に起因する。このため、セキュリティは「動的な供給信頼度」とも言える。なお当然のことながら、アデカシーが確保されてもセキュリティが確保されるとは限らないし、またその逆も同様である。

以上述べたような電力系統の信頼度に係わる概念の関係を図4-1-1に示す。

電力系統における信頼度確保の考え方

電力系統における供給信頼度の確保は、計画段階と運用段階において課題となる。計画段階ではアデカシーの確保が第一の課題とされるが、セキュリティが供給能力の支配的な要因となる場合にはこれを含めることもある。計画段階で系統運用の要素をどこまで含めるかによってアデカシーとセキュリティの関係は変化

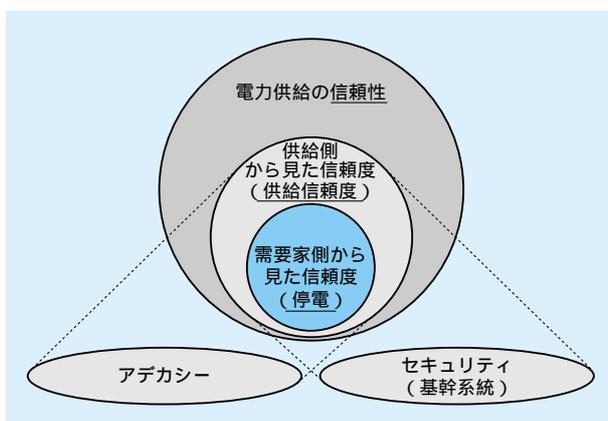


図4-1-1 電力系統の信頼度にかかわる概念の関係

する。たとえば、セキュリティを確保するために、運用によってアデカシーを犠牲にする(たとえば一部負荷の遮断)ことを計画に組み込むかどうかによって、設備増強のレベルや考え方が大きく変化する。

一方、運用段階における信頼度に関してはセキュリティの確保が特に重要となる。セキュリティに係わる事象は、過去の実例から見て大規模な停電に結びつく可能性が高い。計画で想定されなかった事故は運用面での対応が求められるため、計画者と運用者の双方での協調が重要である。

こうした供給信頼度を確保するために必要となるその評価の方法には、基本的に確定論的手法と確率論的手法とがある。現在、わが国を含めほとんどの国では確定論的手法が採用されている。

確定論的手法にもとづく信頼度の基準は、想定事故とそれに対して系統に要求される能力との関係の記述によって表現される。特に「単一の設備事故によって供給支障を生じない」という基準は、一般に(n-1)基準と呼ばれる。確定論的手法に基づく信頼度評価には下記のようなメリットがあることから、国内外で広く採用されている。

- ・計算が容易である
- ・一つの割り切りとして説得力がある
- ・安全サイドの評価が得られる
- ・これまでの経験と実績に裏打ちされている

しかしながら、こうした確定論的手法に基づく信頼度評価については以下のような問題がある。

- ・実態としての事故の発生頻度は、設備の種類や設置状態によって異なる
- ・単一事故でも、例えば母線事故と送電線の事故とでは影響が大きく異なる
- ・需要の変動が一般に考慮されていない。すなわち、通常の検討対象である年間ピーク時点はわずかな時間帯でしかなく、評価は厳しめの結果となる
- ・設備自体の信頼度向上効果が反映されていない。すなわち、設備単体の信頼度を向上させても系統計画・運用上の基準に直接的に反映されない
- ・電源部門、送電部門、配電部門での供給信頼度レベルのマッチング(部門間信頼度協調)が不明である

このような問題点に対して、確率論的手法により供

給信頼度を定量的に評価し、信頼度基準に反映させようとする動きは比較的古くからあった。実際、西欧や米国においては確率論的手法による供給信頼度評価の研究が早くから行われ、フランスやイタリアなど西欧の一部の国では既に実際の計画作業に部分的に組み込まれてもいる。

確率論的手法に基づく供給信頼度の定量的評価にも、解析技術上の問題やデータ入手など適用面での問題はあるが、上述したような従来手法の問題点に対する一つの対応としては有効である。特に今後、信頼度を確保しつつ供給コストの低減を図ることが一層強く求められる趨勢にあることから、本手法の重要性はますます高まるものと考えられる。

確率論的手法による供給信頼度の定量的評価

確率論的手法により信頼度の定量的評価を行う場合、計画業務の実態を踏まえて、電源部門、送電部門、配電部門ごとに個別に行われるのが一般的である。以下、送電部門を主体に述べる。

送電部門は、更に基幹系統と二次系統とに分けて行われる。基幹系統については電源を含めて評価されることが多い。なお、現状ではほとんどの場合アデカシーのみを対象とした評価に留まっている。

送電部門での確率論的手法による供給信頼度評価は、基本的には図4-1-2の流れに沿ってなされる。

解析に当たってはまず、系統状態の設定から始める。供給信頼度は年間のリスク期待値として得られるべきであるため、基本的には1時間ごとの時系列的な系統状態が対象である。ただ、簡単のためピーク断面のみを評価の対象とする場合や、年間をいくつかの需給断面で近似し、その加重平均を取るなどの場合もある。系統状態は基本的には需給条件と事故条件からなり、解析対象系統に応じて電源の稼働状況(補修状況や起動停止状況、出力配分状況)、需要量の分布状況、事故状況(事故設備や事故種別)などを設定する。

確率的な事故発生状態の設定方法には、大別して状態列挙法とモンテカルロシミュレーション法の2つがある。これらについては、後述する実際の開発プログラムの中で詳述する。

設定された諸条件の下で、系統の健全性チェックのための解析を実施する。アデカシーの範囲では、対象

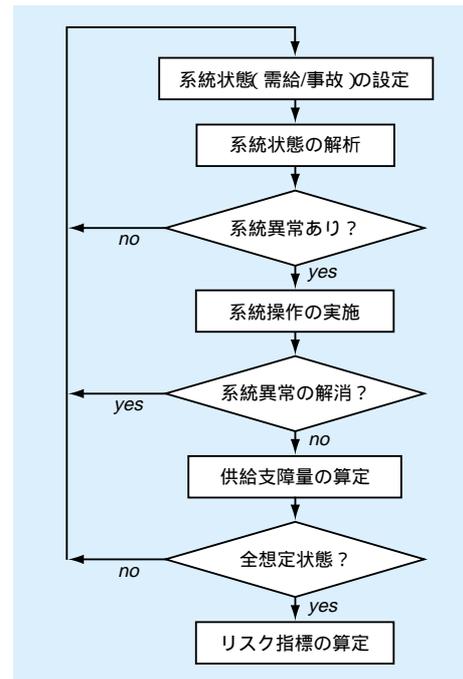


図4-1-2 供給信頼度解析の流れ

とする系統異常現象は設備の過負荷、電圧異常、周波数異常、電圧安定性、定態安定度などが主な対象である。これらに関する系統異常が認められなければ、次の状態設定に移る。

一方、系統異常が発生する場合には系統操作を行うことで異常が解消できるかをチェックする。主な系統操作には発電調整、系統切替え、調相設備開閉、変圧器タップ操作などがある。こうした系統操作の実施により系統異常が解消できれば、結果的にこの状態は問題がないと認識し、次の状態設定に移る。系統操作により系統異常が解消できない場合、部分的な負荷遮断を行う。通常、最も少ない量の負荷遮断で済む最適な箇所での負荷遮断を行う。この負荷遮断量がリスク指標を計算するために必要な供給支障量となる。

以上の計算プロセスを必要かつ十分なパターンの系統状態に対して繰り返すことにより、期待値としてのリスク指標を算定する。

4-1-2 二次系統の供給信頼度評価

開発した解析プログラムの概要

電圧階級が数万Vクラスの送電網から成るいわゆる二次系統は、電力設備数が多く、設備計画が部分系統

ごとに独立的に行われる場合が多いため、供給信頼度の定量的評価による設備投資の効率化や全系統での信頼度レベルの適正化などに対するニーズが顕著である。また基幹系統に比べ、二次系統では発生する系統異常現象が主に潮流過負荷と電圧異常に限られるため、アデカシーの範囲で十分な信頼度解析が行えるという利点もある。さらに二次系統では、事故とそれによる停電の範囲とがほぼ明確に関連付けられるという利点もある。このように二次系統は、供給信頼度評価への高いニーズと、それを現状の技術で十分に実現し得るといふ両方の特性を兼ね備えている。

このため、総合的な供給信頼度評価ツール開発の第一ステップとして、まず二次系統を対象に解析プログラム開発を行った。

表4-1-1は開発したプログラムの概要である。信頼度評価の対象となる範囲は系統変電所から配電用変電所の二次側までであり、計算結果として配電変電所ごとに以下の4つのリスク指標を算出する。これらはいずれも年間の期待値としての値である。

- ・供給支障電力(MW/年)
- ・供給支障電力量(MW分/年)
- ・供給支障時間(分/年)
- ・供給支障頻度(回/年)

信頼度指標の計算

二次系統では実態として多重事故は稀であり、様々な状態の組み合わせを考えなくて済むため、開発したプログラムでは状態列挙法を採用している。状態列挙法では一つ一つの事故条件(ここでは単一事故)を順次設定していく。

リスク指標を計算するには、各配電用変電所ごとに図4-1-3に示すような事故による供給支障の復旧過程条件が必要となる。ここで、供給支障電力は配電用変電所の停電電力、あるいは過負荷耐量を超えた過負荷を解消するために当該配電用変電所に求められる負荷遮断量である。

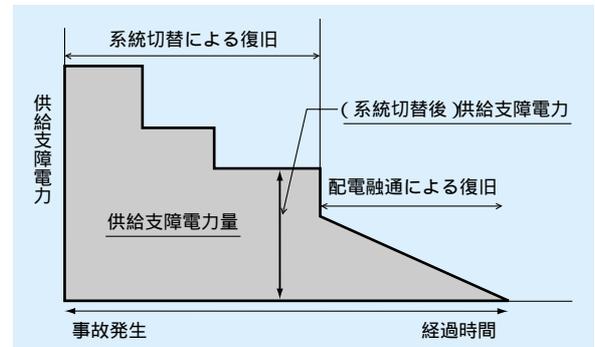


図4-1-3 供給支障の時間経過と信頼度指標

表4-1-1 二次系統の供給信頼度評価プログラムの概要

項目	内容	備考
解析対象系統	放射状系統	二次系統(配電系統も可能)
解析系統範囲	系統変電所引き込み送電線(275、154kV)～配電用変電所、特別高圧需要家変圧器2次側(6.6kV)まで	二次系統の場合
需給断面	ピーク時または年間の代表負荷断面	負荷地点毎の負荷パターンの違いの考慮が可能
信頼度指標	期待値として、 供給支障電力(MW/年) 供給支障電力量(MW分/年) 供給支障時間(分/年) 供給支障頻度(回/年)	
想定事故	・設備の単一事故(送電線、変圧器、母線、遮断器、開閉器) ・並列回線、系統変電所変圧器の多重事故	・事故頻度を設備毎に指定 ・事故範囲は遮断器の位置により特定
系統操作	・系統切替、母線切替 ・常予備受電切替 ・ローカル電源出力調整 ・配電融通	・系統操作時間の指定 ・配電融通先と可能量上限、時間を指定 ・電源の出力調整を優先
事故時復旧目標	全系統の供給支障電力の最小化	過負荷耐量を超える値を供給支障とする
目標系統決定	漸増最大フロー法とブランチ交換法の組み合わせ	・ブランチ交換のみによる高速近似計算の選択可 ・漸増最大フロー法による大域的最適解探索の効率化
復旧操作手順	負荷の重要度と切替操作数の低減を考慮した簡易手法	・負荷の重要度をサービスランクA(重要)～Dで表現
OS	Windows95/98	

事故復旧操作を求める問題は数学的には組合せ最適化問題として定式化することができるが、ここで対象としている大規模な問題に対しては最適解を求めるのが極めて困難となる。そこで開発したプログラムでは、こうした問題を軽減できる効率的なアルゴリズムを開発し適用している。これについては で述べる。

リスク指標は以下の式で計算できる。

$$RI_j = \sum_i r_{ij} \cdot f_i$$

ここで RI_j は配電用変電所 j の供給支障電力期待値などの信頼度指標であり、 r_{ij} は事故 i による配電用変電所 j の供給支障電力などに対応し、また f_i は事故 i の発生頻度を指す。

復旧操作を考慮した供給支障量の算定

供給支障電力を最小化する復旧操作を決定するために、問題を復旧目標系統の決定と復旧操作の決定に分けて求める計算手順を考案した。

前者の復旧目標系統の決定のため、図4-1-4に示すブランチ交換法と、漸増最大フロー法を組み合わせ最適化手法を開発した。こうした2段階の構成を採用した理由は、大半の事故ケースでは単純な系統操作によって完全復旧できるという系統特性を考慮したためであ

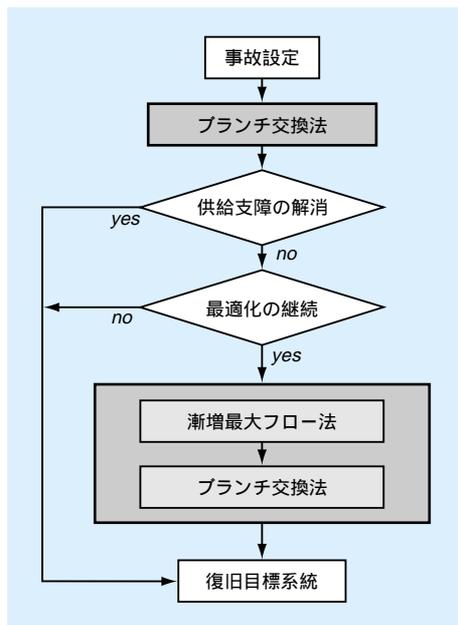


図4-1-4 復旧目標系統の決定

る。

第1段のブランチ交換法は、負荷を隣接する余裕のある系統に切り替えることで供給支障の解消を試みるもので、比較的単純な方法である。

一方、過酷な事故の場合にはより複雑な系統切り替え操作が必要で、ブランチ交換法によっては求めることができない場合も多い。これに該当するのは、たとえば遠方の系統には余裕があるのに隣接系統には無いような供給能力の空間的アンバランスが生じる場合であり、ブランチ交換法では行き詰まることが多い。このため、こうした複雑な問題に対しても供給支障解消能力の高い計算アルゴリズムとして、漸増最大フロー法を開発した。

漸増最大フロー法では、まず事故後の系統において供給力の余裕ができるだけ均一になるような放射状の系統構成を求める。これを行うために、送電線の容量を徐々に増やしながら負荷に電力を供給するという方法を採用している。こうして求めた系統構成の下で再度ブランチ交換法を適用することにより、供給支障量を最小化する復旧目標系統を求めることができる。

表4-1-2は、あるモデル系統に対して漸増最大フロー法の有効性を検証したものである。同表から、漸増最大フロー法の適用によって供給支障を低減する系統構成が求められていることが分かる。

上記の復旧目標系統を実現するための実際の操作手順は、これもまた組み合わせ最適化問題となるが、ここでは負荷の重要度と切り替え操作回数を考慮した簡易手法を採用している。

検討例

供給信頼度の定量的評価を行うことにより、配電用

表4-1-2 漸増最大フロー法による供給変電所事故時の供給支障電力最小化

事故供給変電所番号	1	6	20	28	49	61
初期供給支障電力 (MW)	463	393	245	514	632	604
ブランチ交換法による供給支障電力 (MW)	77	101	23	89	187	2
漸増最大フロー法による供給支障電力 ¹⁾ (MW)	0	54	0	59	147	0
計算時間 ²⁾ (sec)	10.5	13.5	24.6	7.1	14.8	25.9

1) ブランチ交換も含む

2) 計算時間：CPU-Pentium II 266 MHz

変電所毎の信頼度レベルの違いなど、コストと信頼度の調和に基づいた合理的な系統計画を行う上で有用となる様々な結果を得ることができる。

その一例を図4-1-5に示す。同図は、モデル系統の個々の設備事故について事故頻度と供給支障電力量との関係をプロットしたものである。図の右上が、事故頻度が高くてかつ供給支障量も大きく、信頼度面で問題のある領域である。そこでこうした問題改善のため、たとえば図の破線(事故による供給支障電力量の期待値が一定)の右側の領域にある事故ケースについて対策するなどの適用が考えられる。

4-1-3 基幹系統の静的供給信頼度評価

開発した解析プログラムの概要

基幹系統は事故による影響が大きいいため、信頼度の確保は一段と重要な課題となる。基幹系統の場合、一般にアデカシーとセキュリティの双方の視点が必要となるばかりでなく、系統異常を引き起こす電氣的現象が二次系統とは異なり多岐に及ぶことから、信頼度評価のための解析計算は大幅に複雑にならざるを得ない。このため、プログラム開発にあたっては段階的に進めるのが効果的と考え、現在までにアデカシーを対象とした静的な供給信頼度評価プログラムを開発している。

解析対象系統は電源を含む基幹系統であり、事故に伴う系統異常現象として設備過負荷、電圧異常、周波数異常、電圧安定性(静的安定性)を考慮している。確率現象の模擬には、二次系統の場合と異なり様々な事故の組み合わせが重要であることから、この種の解析に効率的なモンテカルロシミュレーション法を採用している。負荷の時間変動や系統運用の影響を評価できるように、時間的な流れを考慮した時系列モンテカルロ法を用いているのが特徴である。

信頼度指標は二次系統の場合と同様に、供給支障電力、電力量、時間、頻度の年間期待値として算定する。必要に応じて分布も算出できる。供給支障の考え方は、系統異常現象を解消するために様々な系統操作を行った上で、なお必要となる最小の負荷遮断量としている。このための最適操作の決定と最小の負荷削減量の算定には、線形計画法を採用している。

信頼度指標の算定

計算の全体的な流れは図4-1-2に示したとおりであるが、基幹系統の解析では問題の性格上、個々のブロックでの処理が複雑化するのが避けられない。本プログラムにおける主な処理はつぎのとおりである。

- 状態設定
- ・系統構成と負荷

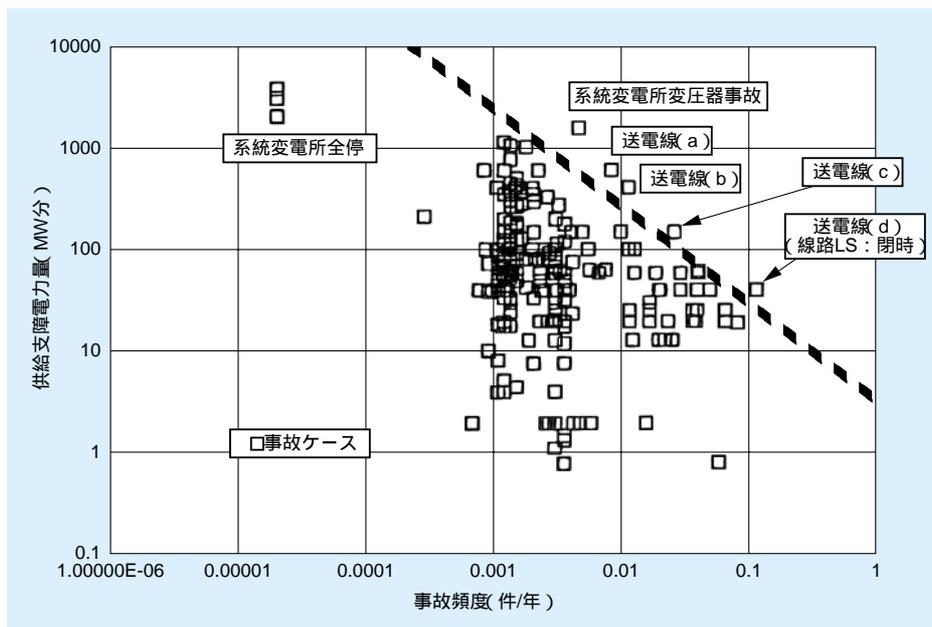


図4-1-5 設備事故頻度と供給支障電力量との関係

系統構成については母線構成や遮断器、断路器などの開閉状態を詳細に模擬する。負荷は年間8760時間分を考え、時間ステップは1時間とする。全系の負荷を与え、各地点には一定の比率で配分する。

・電源の定期補修

個々の電源ごとに補修期間を指定する場合と、補修計画を自動立案する場合とに対応できるようにしている。補修計画の自動立案では、供給予備率が年間を通してできるだけ均一になるように、対象電源の中で容量が大きく、かつ補修期間が長い電源順に割り当てていく簡易ロジックを用いている。

・電源運用

電源種別として原子力・火力・水力(自流式・貯水式・揚水式)を考え、また運用形態としてベース・ミドル・ピークを個々に指定する。起動停止は優先順位に基づくものとし、起動電源の出力配分は経済負荷配分(ELD)に基づく。なお、水力については実出力値をデータで与えることとしている。

・設備事故発生・復旧

設備の事故は、擬似乱数を用いて指定された事故率で発生するようにしている。数の多い同一の設備については、効率化のためにまず故障数を決定し、次いで設備に割り当てるという2段階の手法を採用している。復旧に要する時間は平均修理時間に基づき算定する。

系統解析と支障量の算定

系統解析には現状、ごく一般的なニュートンラフソン法潮流計算を用いている。潮流計算により系統異常が検出された場合、これを解消するための系統操作の決定、ならびに最終手段としての最小負荷遮断量の算定には逐次線形計画法を用いている。系統操作として発電調整、調相設備開閉列、変圧器タップ調整の他、二次系統の負荷切り替えや予備電源の起動を考慮できる。

信頼度指標の計算

信頼度指標は、モンテカルロ法の毎回の試行から得られる評価値 $F(x^i)$: (たとえば供給支障電力量など) を、全サンプリング数 (N) で割った期待値として算出する。すなわち

$$\tilde{F}(F) = \frac{\sum_{i=1}^N F(x^i)}{N}$$

なお、モンテカルロ法の誤差は通常、次式の相対誤差 (RU) をもって表現される。次式から、小さな値をもつリスク指標を高い精度で求めるには数多くのサンプリングが必要になることが分かる。

$$RU = \frac{\sqrt{V(F)}}{\sqrt{N}\tilde{F}(F)}$$

ここで、 $V(F)$ は求めたい指標の分散である。

検討例

図4-1-6のモデルシステムに対する信頼度解析の例を図4-1-7に示す。なお、本例では簡単のため電源の故障は省略し、一方解析精度を確保するために量的に5000年相当分の計算を行った。

図4-1-7から、ノード番号が3、8、18の負荷(変電所)の信頼度レベルが低いことが分かる。そこでいま、負荷ノード8と18の信頼度低下の原因を探ることとする。これを行うには、解析結果の一部として与えられる統計処理を参照すればよい。その結果、このケースではノード18の母線遮断器の事故が両母線停止を招くことと、ノード7の電源がほとんどの時間帯で起動しないのが主要な原因であることが分かる。

一つの対策として、母線遮断器事故時に片母線運用

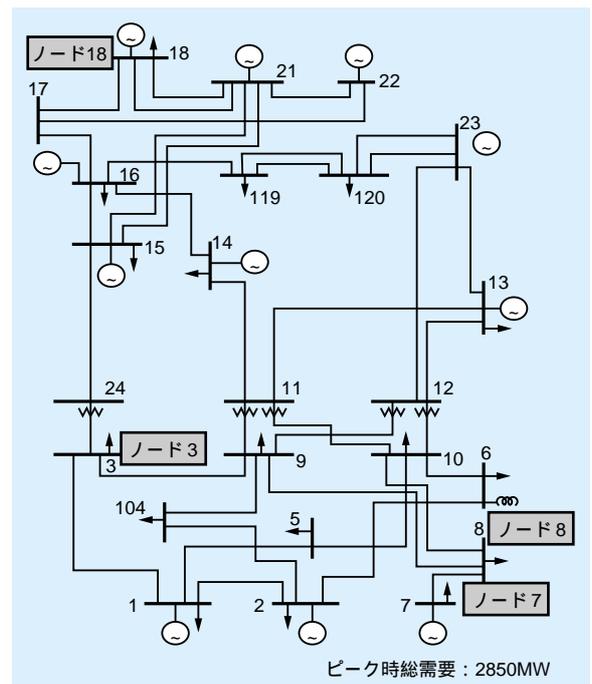


図4-1-6 モデル系統 (IEEE信頼度テスト系統)

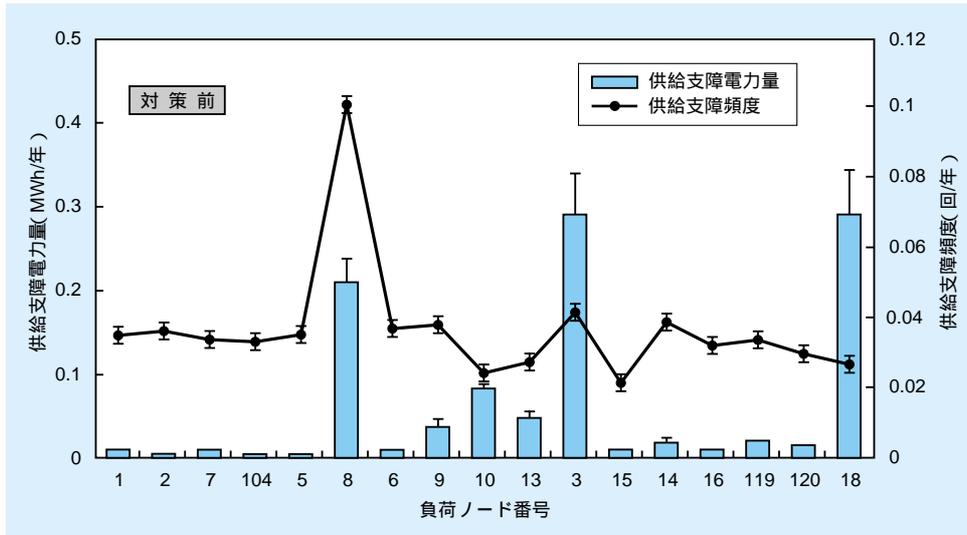


図4-1-7 負荷ノード毎の信頼度指標（対策前）

とし、ノード7の電源の起動優先順位を高めることを考える。この結果、信頼度レベルは図4-1-8のようになり、本対策により供給支障頻度は全てのノードでほぼ一定となる。

なお、供給支障電力量はノード18では対策により大きく低下したが、ノード8、3ではほとんど改善が見られない。これは、今回考えた対策はこれらのノードには効果がないことを示すもので、別途の対策が必要であることを示唆している。

以上、確率論による供給信頼度の定量的評価手法の概要について述べた。ここで紹介した信頼度評価に関

しては、より現実的な問題として電源と系統の信頼度バランスの評価、既存設備の運用変更の信頼度面への影響評価、電力自由化の信頼度への影響評価、信頼度別供給などの新しいサービスの設計・評価など、広範な分野への適用が考えられる。

また、本節で述べた基幹系統の供給信頼度評価はアデクシーのみを対象にしてきたが、わが国のように系統安定度が重要となる系統ではセキュリティの定量的評価も重要である。現時点でセキュリティの定量評価は困難であって、世界的に見ても未だ研究段階にあるが、今後はこれを含む総合的な供給信頼度評価プログラムの開発が目標となる。

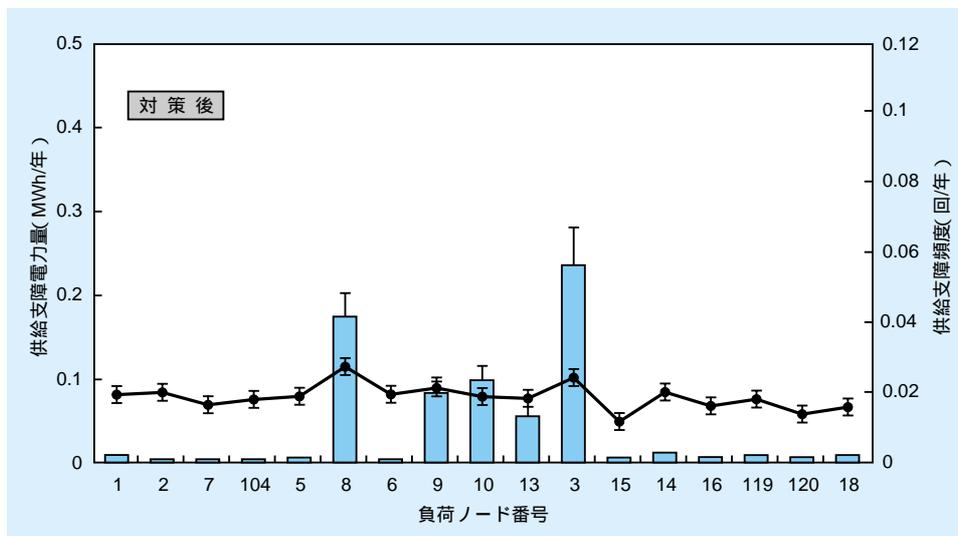


図4-1-8 対策実施後の信頼度指標（対策後）

4 - 2 雷対策による電力輸送力増大効果の評価手法

4-2-1 雷と電力輸送力

図4-2-1は、わが国の500kV、275kV系の架空2回線送電線における17ヶ年送電線雷事故統計(送電線トリップ件数の集計)である。なお、図の故障相は代表相で表記したもので、たとえばABは回線内の任意の2相事故の総和を意味する。架空送電線路への雷撃は、雷そのものが自然現象であるために事故を避けることはできない。ただ、これまで積み重ねられてきた耐雷技術により、雷事故件数自体は年々減少している。この結果、近年では他の原因での事故が急減していることもあり、結果的に雷事故は基幹系統における故障原因の多くを占めている状況にある。

雷に対して電力系統側で取るべき対策にはハード面とソフト面の2つがある。ハード面では、雷がなるべく送電線路に侵入しないよう設備面での工夫をすることと、仮に雷が侵入してきても送電線や変圧器の本来の性能に支障が生じないようにしておくことが重要である。前者の対策の代表が避雷器であり、後者では耐雷絶縁設計が該当する。

一方ソフト面では過渡安定度対策がある。わが国の送電ルートの標準的な仕様は2回線1ルート方式である。雷による事故は、こうした2回線送電線への「地

絡」現象として現れる。事故前に送電線を流れていた電力の量と、6本の送電線路のうちどの相が地絡するかにより、地絡地点に近い発電所の過渡的な安定運転継続の可能/不可能が左右される(図4-2-2)。これを過渡安定度という。発電所の安定運転継続が不可能な場合、極端な場合には大規模な停電を招く危険がある。

こうした過渡安定度の問題は、わが国の基幹送電線の電力輸送力を制約する最大の要因のひとつとなっている。そのため、耐雷技術の進歩や導入は電力供給の信頼性向上、すなわち停電の減少に大きな寄与を果たしてきた。今日、わが国における電力供給の信頼度レベルは世界的に屈指のものとなっている。

ところが近年、信頼度レベルは現状程度を維持しつつその代わりにコストダウンをという社会ニーズが大きくなりつつある。そこで、当研究所ではたとえば今後の新しい耐雷対策の効果を、信頼度レベルの向上という形ではなく、電力輸送力の増大効果の形で定量づける研究を行っている(図4-2-3)。電力輸送力の増大により、送電コストの抑制に資することができる。

雷故障の発生メカニズム

台風や豪雪など大きな被害のない通常の年においては、500kV送電線が受ける80%以上の故障は雷によるフラッシュオーバーが原因である。この雷故障には、遮へい

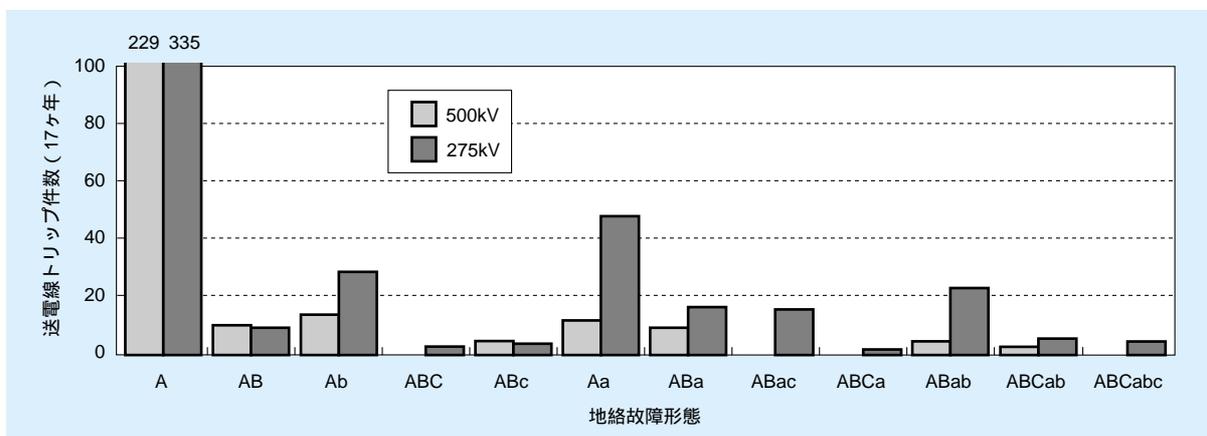


図4-2-1 架空2回線送電線の17 年(1980~1996)雷事故統計

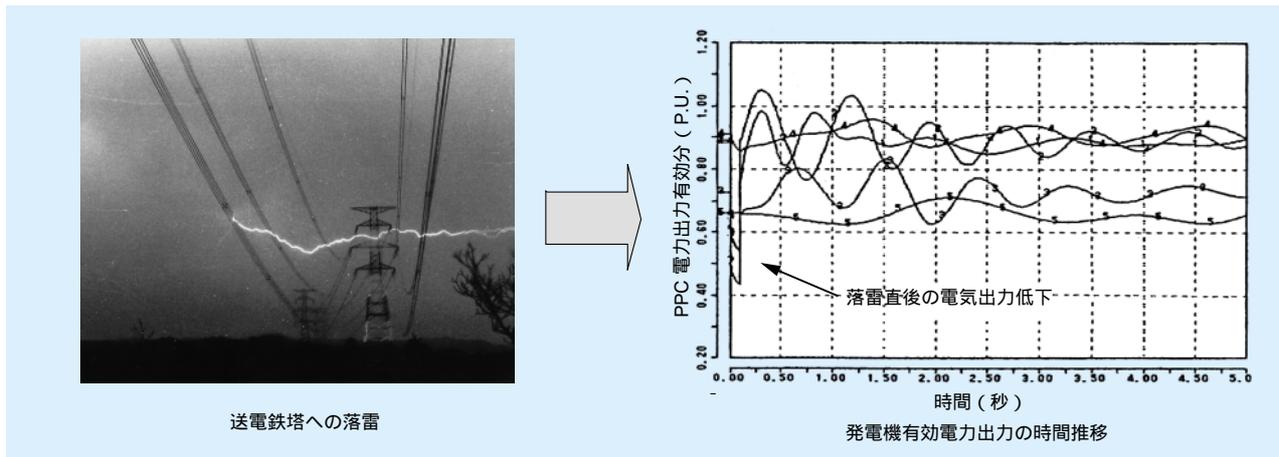


図4-2-2 落雷による電力系統の動揺現象

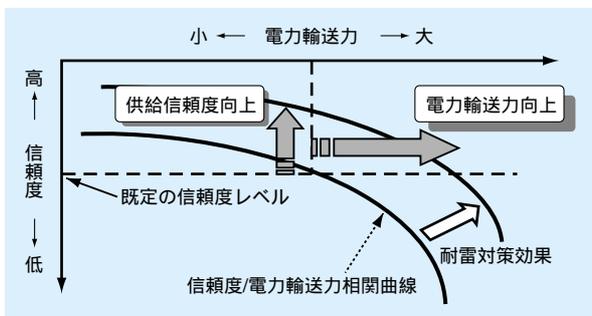


図4-2-3 耐雷対策による信頼度向上/輸送力向上の概念

失敗によるものと逆フラッシュオーバーによるものの2種がある。

遮へい失敗による故障とは、架空地線が雷撃の遮へいに失敗したために、電力線が雷の直撃を受け、その電位が上昇し、がいし間にフラッシュオーバーが発生する故障である。しかし、わが国での観測記録では、2線以上にまたがる遮へい失敗は確認されていないことから、遮へい失敗による故障はほぼ1線に限定されると考えてよい。

一方、逆フラッシュオーバーによる故障は、架空地線あるいは鉄塔が雷撃を受けたとき、瞬時的に鉄塔の電位が電力線の電位より高くなり、がいしの絶縁耐圧を超えたときにフラッシュオーバーが発生する故障である。通常の放電が電力線側から鉄塔側へ向いているのに対して、この場合には逆方向に生じるため逆フラッシュオーバーと呼ばれる。

実際においては、このような故障が発生しても、直ちに線路を自動的に開放しアークを消滅させ再閉路を

行い、送電を復帰させる再閉路方式が採用されているため、ほとんどの場合送電停止には至らない。事実、図4-2-1の事故実績で、再閉路成功率は90%以上である。

想定故障

雷による送電線事故には、2回線送電ルートを構成する6本の送電線路のうち何本が、またabc相のうちどの相が事故を受けるかに依存する種々のパターンがある。現在、電力会社では基幹系統の計画段階において、送電線路の電力輸送力を決める場合、送電信頼度面からみてつぎのような方法を採用している。すなわち、ある基準となる故障条件を想定し、その故障が発生しても系統全体が安定な運転を維持できるような最大の電力を電力輸送力として定めている。基準の故障条件としては、一般に2回線送電ルートのうちの片回線3相地絡故障である。

実際には3相地絡故障(3 LG故障)は頻度が少なく、かつやや過酷な故障形態に属するが、電力供給の社会的な重要性から基幹系統の設計には安全サイドの基準をとるという観点もあって、この基準が採用されている。ちなみに先の図4-2-1の実績で、3相地絡故障より影響の軽い事故(A、AB、Ab相)の事故率(回/100km・年)は次のようである。

- ・ 500kV系では0.393で、全事故率0.435の約90%を占めている
- ・ 275kV系では0.491で、全事故率0.646の76%を占めている

想定故障の基準として3相地絡故障が採用されてき

たこの他の理由としては、故障形態がシンプルであるため、シミュレーション計算が簡単であり、大量の技術業務の処理が容易に済むことなどによる。この方法は確定論的方法であり簡便であることから、実務的な方法として世界的にも広く使用されている。

しかし近年のように、送電線路の建設に多大なコストを要したり一部の建設が遅れるようになってくると、従来どおり系統全体に対して一律にこのような単純な基準を適用することは合理的ではなく、送電信頼度と電力輸送力の定量的な関係を考慮することが必要になっている。

4-2-2 雷故障の低減対策と安定送電限界電力

架空地線3条化対策

架空地線や遮へい線などの接地線を設置すれば、雷撃電流の分流効果ならびに接地線からの誘導効果(電力線への誘導電圧の増大)の2つの作用によって、がいし間電圧の上昇を抑制することができる。当研究所では、これを1/5の縮尺のモデル鉄塔を用いて実証した。その結果、たとえば2回線送電線において2条の架空地線を3条にすれば、上線、中線、下線のがいし間電圧をそれぞれ77%、85%、84%に低減することができることを明らかにした。

さらに、雷故障の発生頻度を様々な故障形態別に算定することのできる手法を開発した。この手法を用いることによって、上記の実験で求めたがいし間電圧の

低減値から、雷害対策による故障回数の低減値を予測することができる。

なお、他の雷害対策として送電用避雷装置があるが、避雷装置は高価であるため、その適用は限定される。上述した架空地線の3条化対策費用は建設費の2%以下との試算もあり、安価であることが長所である。

開発した手法を用いて、わが国で広く採用されている500kV送電線逆相配列の2回線の送電線(図4-2-4のモデル系統)を対象に、架空地線が2条と3条の場合について逆フラッシュオーバー故障の発生頻度を試算した。その結果を図4-2-5に示す。本試算から、逆フラッシュオーバー故障の一般的な特徴として以下を明らかにした。

- 1) 一般に上線の逆フラッシュオーバー故障の回数が最も多く、中線、下線の順序で回数は減少する。これは、通常では上線から下線への順にがいし間電圧が小さくなるためである
- 2) 同回線の上線と中線、中線と下線の2線にそれぞれ同時にフラッシュオーバーが発生する頻度は、中線の隣合う2線に同時に発生する頻度よりも小さい。この理由は、中線の電力線での商用周波数電圧の位相

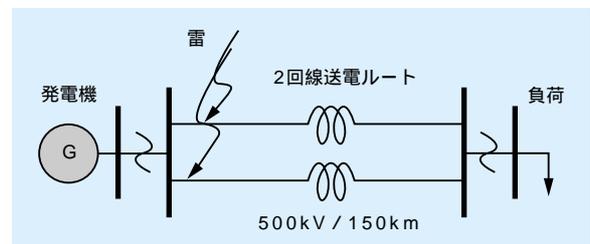


図4-2-4 単純モデル系統

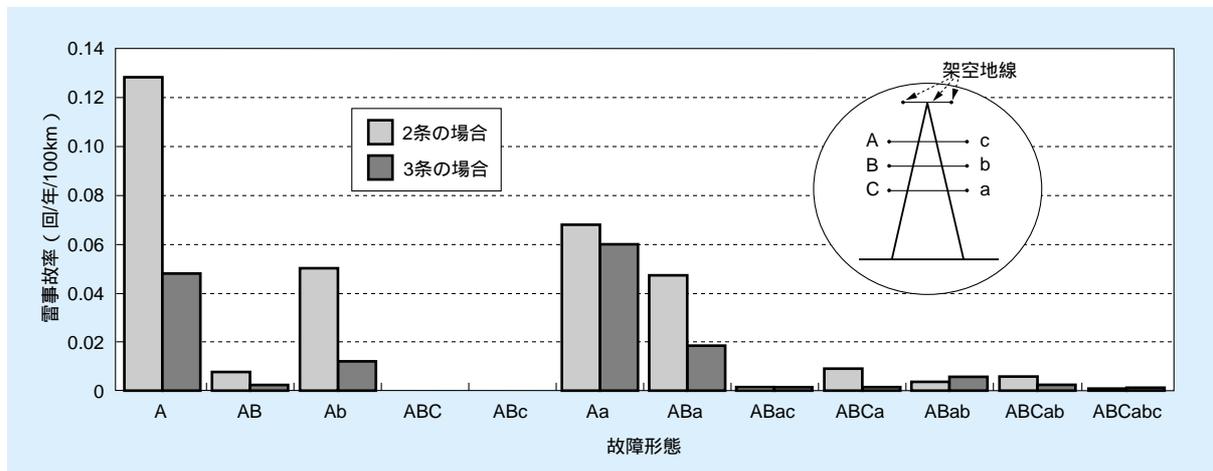


図4-2-5 故障形態と故障回数(雷事故率)

の同時性による

3) 架空地線の3条化により故障回数は半減する。とくに上線に対する効果が大きい。これは、架空地線から上線への誘導電圧がとくに増大するため、上線のがいし間電圧が小さくなるためである

また、図4-2-5の結果から以下のことが分かる。

- 1) 故障形態“A”、“Ab”、“Aa”ならびに“ABa”の4つが比較的大きな故障回数の割合を占めている。3条化対策の効果も、これらの故障形態に対する効果が大きい
- 2) 系統計画の基準として一般に採用されている故障条件“ABC”の故障回数は極めて小さい。

安定送電限界電力

一方、2回線送電線のどの相が地絡するかという各故障形態別ごとに、過渡安定度現象に依存する安定送電限界電力が存在する。ここでは、故障形態別の送電限界電力を図4-2-4のモデル系統を例に示す。

想定した故障条件は以下のとおりである。故障継続時間は0.08秒、線路再閉路を行って成功するものとし、無電圧時間は1.0秒とした。故障形態はすべて地絡故障とし、図4-2-5の左方9タイプを選定した。これらは全て、異相の2線以上が健全という再閉路の一般的な条件を満たしている故障形態である。

これら9つの故障形態について、それぞれ送電限界電力を算定した結果が図4-2-6の棒グラフである。

図4-2-6から、以下のことが分かる。

- 1) 故障線数が多いほど概して送電限界電力は小さい
- 2) 片回線故障よりも2回線にまたがる故障が厳しい

3) 同相を含む故障が異相の場合よりもかなり厳しくとくに故障“Aa”は、地絡相の数は1つだけであるにもかかわらず、かなり厳しい故障となることに注意が必要である。この理由としては、この故障形態の送電限界電力に対しては地絡時のショックよりも、無電圧時における同相欠相の状態のほうが厳しい制約を与えるためと考えられる。

なお、従来の系統計画で基準として採用されている故障条件は、片回線の3相地絡故障(再閉路は行わない)であるが、この故障に対する送電限界電力1700MWが、モデル系統の送電線路の電力輸送力に相当することになる。

4-2-3 電力輸送力増大効果の評価

送電信頼度の尺度

図4-2-6の折線グラフは、図4-2-5の故障回数を累積値として表現したものである。この図4-2-6中の2つのグラフ値を用いることにより、年間送電停止電力[MW/年]という送電信頼度の尺度を導くことができる。

これは、年間当たり送電が停止する回数[回/年]と1回当たりに停止する電力の大きさ[MW/回]の積として定義される。この送電信頼度の尺度は、いわゆる供給支障電力(LOLP: Loss of Load Probability)に相当するもので、統計学でのひとつの期待値である。年間送電停止電力は当然、その送電線路に流れる電力の大きさに依存する。

図4-2-4のモデル系統について、この年間送電停止電力を計算した。計算の考え方は次のようである。たと

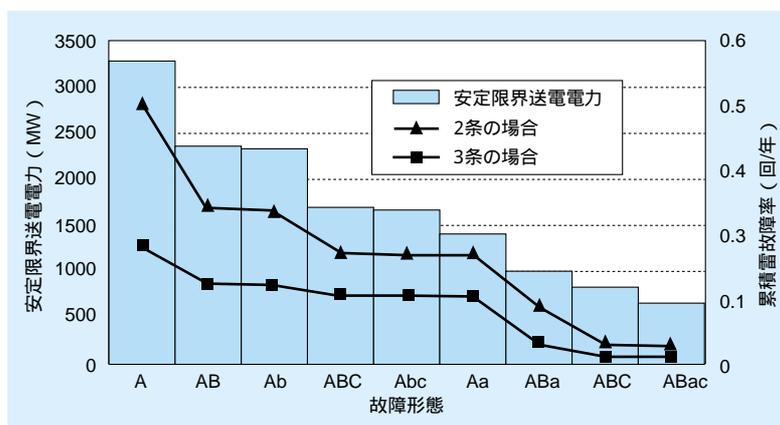


図4-2-6 安定限界送電電力と累積雷故障率

例えば送電電力が1700MWの場合は故障“ A ”～“ ABC ”のいずれの故障が起こっても送電停止にはならない。しかし故障“ ABc ”～“ ABac ”あるいはそれ以上の過酷な故障が発生すると、送電系統の安定性が失われるため、1700MWの送電が全て停止することになる(ここでは部分的な電源制限は考えない)。したがって架空地線が標準の2条の場合、この送電電力の時に送電系統が送電停止となる回数は“ ABc ”以上の累積故障回数に相当することから0.2055 [回/年] となるため、年間送電停止電力はこれに1700 [MW/回] を乗じることで349 [MW/年] と算定される。

電力輸送力の向上効果

上述のように、送電停止電力は送電線路を流れる電力の大きさに依存する。したがって、送電電力に対する年間送電停止電力の様子を示すひとつの曲線を描くことができる。この曲線をここでは送電信頼度曲線と呼ぶ。一般に送電線路を流れる電力が増すにつれて、その送電信頼度は下がる。これは、送電電力が増すほど一回の停止電力は増加し、同時に送電停止となる累積故障回数も増えるからである。

図4-2-4のモデル系統について送電信頼度曲線を具体的に描くには、図4-2-6の各数値に基づき送電電力を0MWから3300MWまで変えながら計算すればよい。結果を図4-2-7に示す。同図の送電信頼度曲線は、架空地線が2条の場合と3条の場合についてそれぞれ示している。

本モデル系統における従来の基準の故障条件に対す

る送電限界電力(電力輸送力)は、上述のように1700MWである。そして、架空地線が2条の場合にこの送電電力のときの年間送電停止電力は349 [MW/年] である。この値は従来この送電線路に対して保証されていた送電信頼度レベルに相当すると考えてよい。図4-2-7において、点Xがこの状態を指している。

この図において、送電電力1700MWを上方に延長し、3条の場合の送電信頼度曲線と交わる点Yを求めると、年間送電停止電力は218 [MW/年] となる。すなわちこの場合、架空地線の3条化による故障回数の低減効果を、従来型の送電信頼度向上(曲線が上方へ移動)の形で示したことになる。

一方、2条の送電信頼度レベル349 [MW/年] を右方へ延長し、3条の場合の送電信頼度曲線と交わる点Zを求めると、送電電力は2370MWとなる。この場合、3条化による故障低減効果は電力輸送力の向上(曲線が右方へ移動)の形で示されている。すなわち本モデル系統の場合、従来の送電信頼度レベルを維持すれば十分という考えに立てば、架空地線の3条化により

$$2370\text{MW}/1700\text{MW} = 1.4 \text{ 倍}$$

の電力輸送力の向上効果が得られることになる。

さらに図4-2-7から次のことが分かる。

- 1) 3条化による電力輸送力の向上には、故障形態“ Ab ”、“ Aa ”ならびに“ ABa ”の故障回数の減少が寄与している
- 2) この場合、故障“ A ”の故障回数の減少は電力輸送

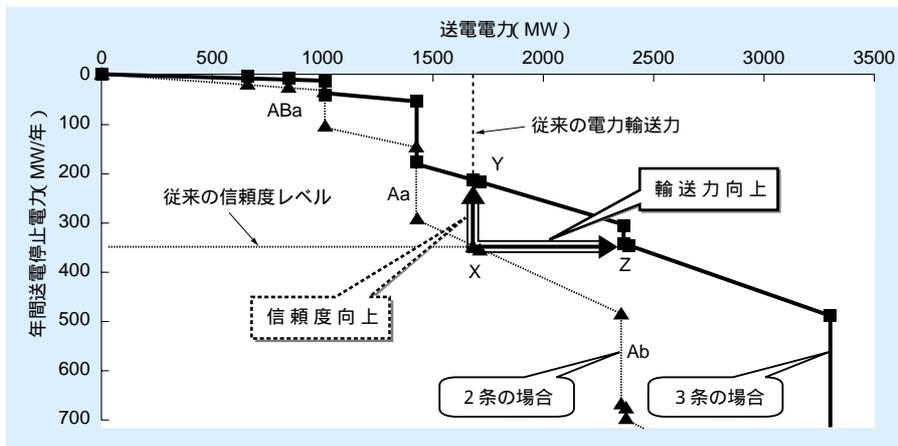


図4-2-7 送電信頼度特性曲線

力の向上には寄与していない

3) 3条化することにより想定故障の基準条件を緩和することができ、本例では“AB”を採用してもよい
なお、3条化対策は必ずしも送電ルート全区間に亘って適用する必要はない。すなわち、3条化の効果的な適用区間は次のようである。

- ・落雷が多発する区間
- ・安定度の厳しい送電端と受電端の近傍区間

以上、本節では確率論的アプローチによる定量評価手法のひとつとして、架空送電ルートの架空地線を2条から3条化する対策を例に取り、その効果の定量評価法について述べた。すなわち、3条化によって落雷による故障発生頻度は低減するが、その効果を従来と同じ送電信頼度レベルに保つという視点に立てば、送電電力を等价的に増大させることができることを示した。

本節で述べた手法は、理想的には前節の供給信頼度評価に含まれて論じられるべきである。ただ前節末尾でも触れたように、過渡安定度までを含めた信頼度評価は、主として安定度解析に要する膨大な計算時間という制約から、世界的に見ても研究途上にある。

しかし、とくにわが国では基幹系統の輸送力は多く安定度が支配的であるという状況にあることから、本節では安定度のみを取り上げた。ちなみに、ここで使用した安定度解析ツールは「過渡安定度解析プログラム(Y法:表5-5-1参照)」であり、したがって限界送電電力求解等にあたって特段の計算効率は考えなかったことになる。

今後、前節の供給信頼度評価手法との融合を視野に、エネルギー関数法あるいは5.4節の並列計算手法等の適用による安定度判別の高速化を目標としている。

4-3 コストと信頼度の調和を目指して

供給信頼度の定量的評価の大きな目標の一つは、コストと信頼度の調和の実現である。コストと信頼度の概念的な関係は図4-3-1のようになる。すなわち、供給側にとっては信頼度を上げるために設備等の供給コスト負担が増え、一方で消費者側にとっては信頼度が低いと停電によって被る損失コストが増えることになる。供給コストと損失コストの和を社会コストと考えると、最適な信頼度レベルなるものが存在する。

ただ上記の考え方は多分に概念的であり、実際には各々の要素にバラツキがあるために最適なレベルは幅をもったものとなるし、また損失コストの評価や電力自由化による影響などの問題点もある。しかしながら今後、合理的な信頼度レベルの追求へのニーズが高まるのは必至であり、これに伴い信頼度レベルの定量的な評価が重要性を増すものと考えられる。

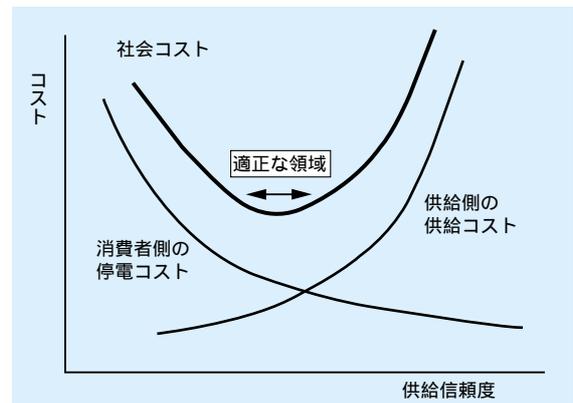
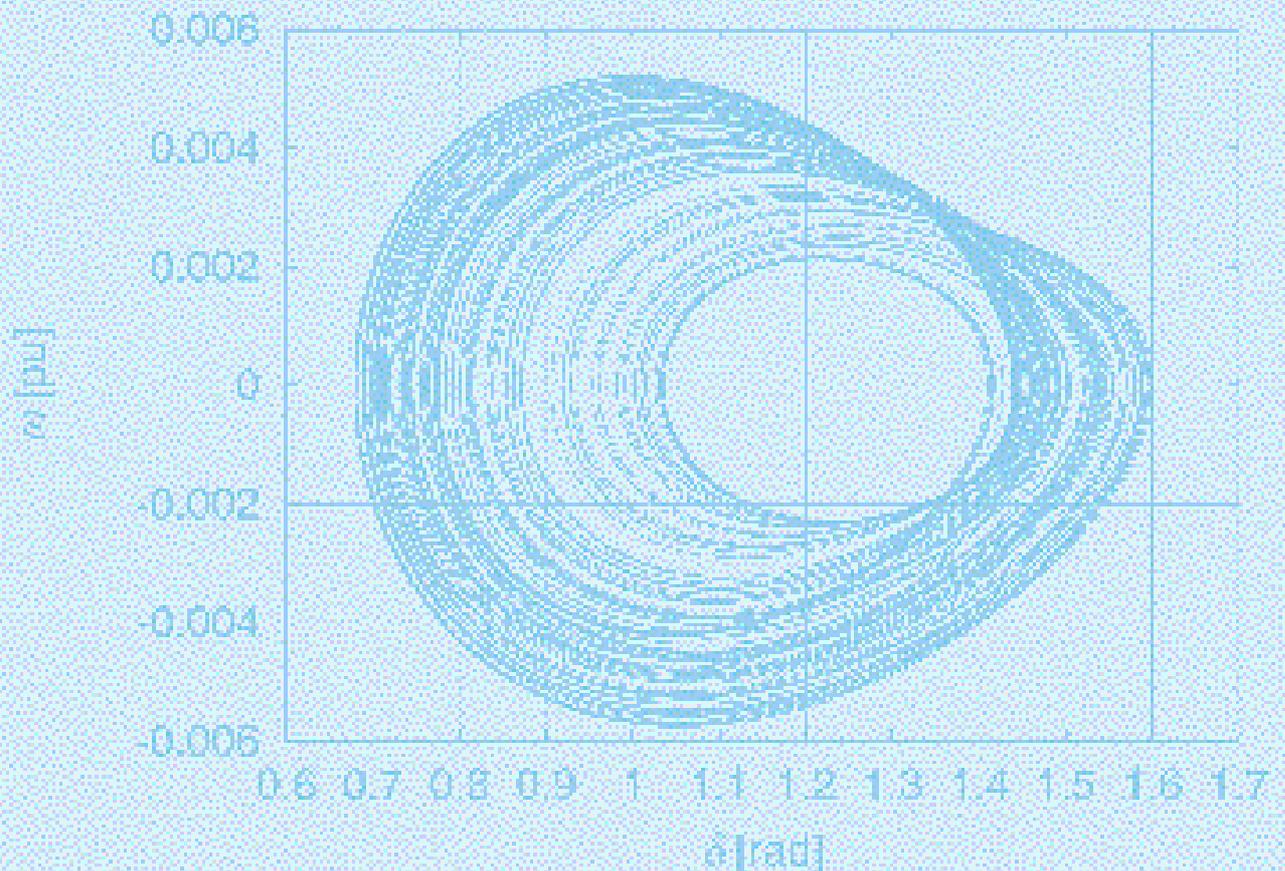
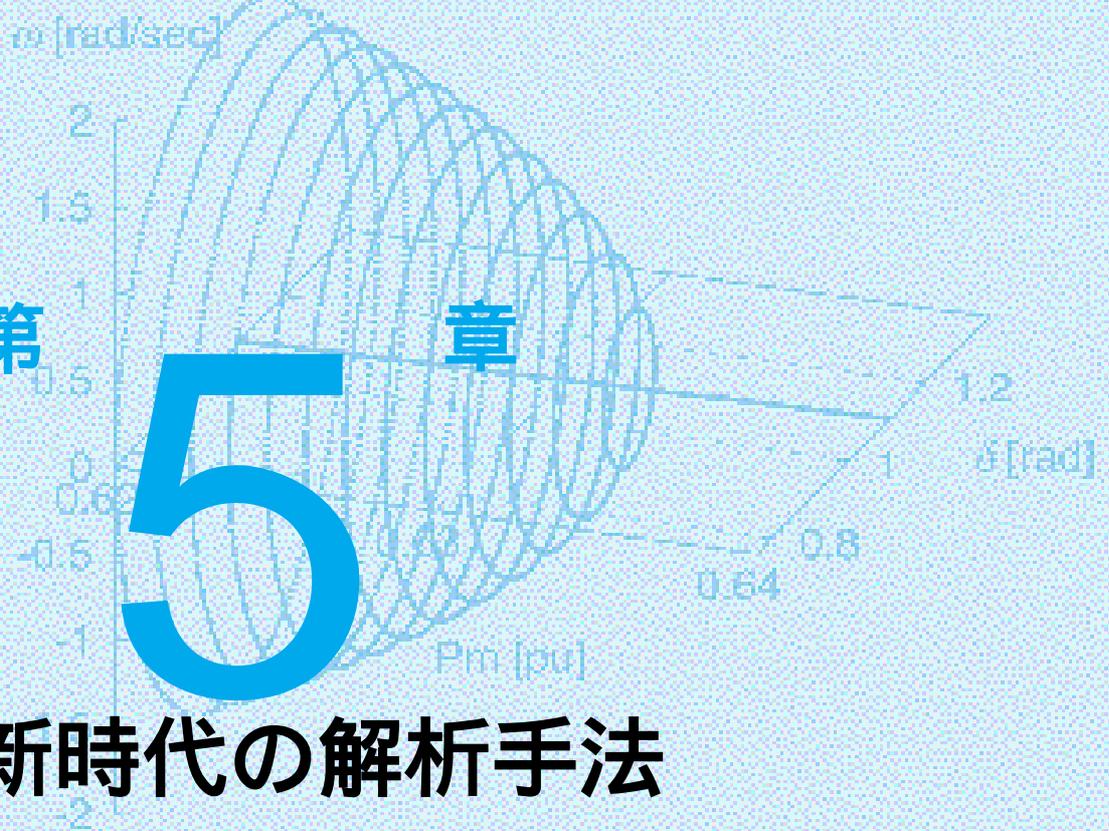


図4-3-1 最適な信頼度レベル

第 5 章

5

新時代の解析手法



狛江研究所電力システム部	上席研究員	田中	和幸
狛江研究所電力システム部	上席研究員	井上	俊雄
狛江研究所研究参事	上席研究員	林	敏之
狛江研究所電力システム部	上席研究員	高崎	昌洋
狛江研究所電力システム部	上席研究員	内田	直之
狛江研究所電力システム部	主任研究員	永田	真幸
狛江研究所電力システム部	上席研究員	竹中	清

5 - 1	電圧安定性解析手法	61
5 - 2	長時間動特性解析手法	64
5 - 3	パワーエレクトロニクス解析	67
5 - 4	並列計算によるY法高速化	69
5 - 5	電力系統解析システムの高機能化	72

田中 和幸 (44ページに掲載)

井上 俊雄 (24ページに掲載)

林 敏之 (12ページに掲載)

高崎 昌洋 (24ページに掲載)



内田 直之 (昭和53年入所)
定態安定度解析手法や安定化技術に関する研究の他、近年では電力系統解析の並列計算手法に従事してきた。現在、モード法の応用による過度安定度解析の高速化、信頼度解析用の高速定態安定度解析に関する研究に取り組んでいる。



永田 真幸 (平成8年入所)
電力系統過渡安定度解析計算の並列化、短絡電流面等から見た限流器の導入効果評価など、送電網特性解析に関する研究に従事してきた。現在、系統余力評価の解析手法などに関する研究に取り組んでいる。



竹中 清 (昭和53年入所)
主に交直連系・分散電源・電圧安定性の解析・シミュレーション等の研究に従事してきた。現在は、安定度解析手法の高機能化やパワーエレクトロニクスモデリング等に関する研究に取り組んでいる。

第5章 新時代の解析手法

第3章ならびに4章において、電力輸送力の増強技術ならびに信頼度評価手法という近年関心の高い課題について述べた。

電力系統解析には、これらの解析技術や解析手法を支える基礎・基盤的な位置付けにあり、かつ将来的にその進展が期待されている種々の解析分野がある。そこで本章ではこれに属する解析手法として、電圧異常

現象に対する安定性解析手法、過渡安定度領域から周波数領域までの数分オーダーの系統動揺現象を効率的に解析する長時間解析手法の他、輸送力増強に大きい期待のあるパワーエレクトロニクス技術の解析技術、Y法(過渡安定度解析プログラム：表5-5-1参照)による安定度計算の並列処理による高速計算などを取り上げ、各々についての成果や進捗の状況を概説する。

5-1 電圧安定性解析手法

電圧不安定現象とは、長距離送電線により大電力を送電する際に、その受電端電圧が異常に低下する現象である。近年におけるコストダウンへの要請あるいは送電線増設の困難さといった要因から、本現象への対処は今後一層重要性を増すものと考えられる。

そのため、電圧安定性を効率的に解析する2種類の計算プログラムを開発した。

5-1-1 電圧不安定現象の基本特性

電力の品質を決めるのは、大別して周波数と電圧の2つである。周波数とは50Hzないしは60Hzといった状態量であり、これは全系の有効電力の需給バランスに依存する。この需給バランス、すなわち周波数の調整指令は各電力会社の中央給電指令所で一元的に行われている。

一方、電圧レベルは系統の各地点で一様ではなく、送電線で輸送する電力の量に応じて275kVや66kVといった規定の電圧階級が設けられている。これら系統各部の電圧は電力需要の増減等に伴って変動するが、常に規定レベル近傍に維持しておく必要がある。電圧は、調相設備や変圧器タップ等を用いて無効電力の流れを制御することによって調整することができる。これを電圧・無効電力制御という。

電圧不安定現象とは、通常は効果的なこうした電圧制御の効き目が不十分もしくは無くなって、電圧が異

常なレベルまで低下していく現象である。図5-1-1はわが国で1987年に発生した電圧異常低下現象の事例である。事故直後、500kV系の受電地域の電圧が370kV程度まで低下し、一時的に800万kW余の供給支障が生じたと報じられた。その後の詳細な検討から、無効電力消費の予想外の急増に起因する電圧不安定現象であったことが、今日ではほぼ定説となっている。

電圧不安定現象は、複数発電機の同期運転の可否を対象とする同期安定度とは異なり、次のような特徴があるとされている。

- ・送電線の送電能力に比べて大きな電力を受けている需要地域で多く問題となる
- ・現象の進展が分オーダーであり、同期安定度に比べればかなりゆっくりしている
- ・電圧低下は多くの場合30%程度で収まる

図5-1-2は、電圧不安定現象の発生が危惧される系統条件を大まかに例示したものである。図中の需要地点に設置される調相設備は、大電力送電により低下する需要地点の電圧を電圧運用許容範囲に維持するための無効電力補償装置である。図で右側に膨らんだ曲線はP-Vカーブと呼ばれるものであり、この形状は送電ネットワークの特性で決まる。P-Vカーブの先端は、電圧面から見た安定送電限界を意味している。

電圧不安定現象の発生が危惧されるのは、電圧の運用点がP-Vカーブの先端に近づく場合である。

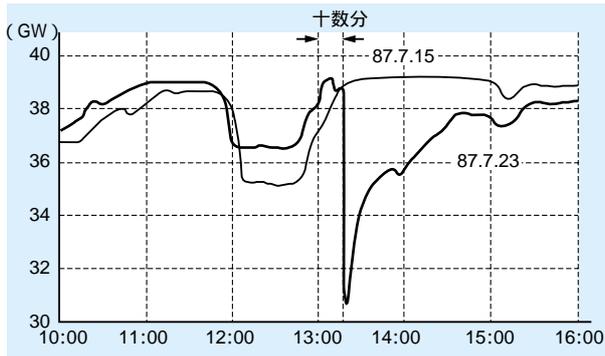


図5-1-1 電圧不安定現象の事例

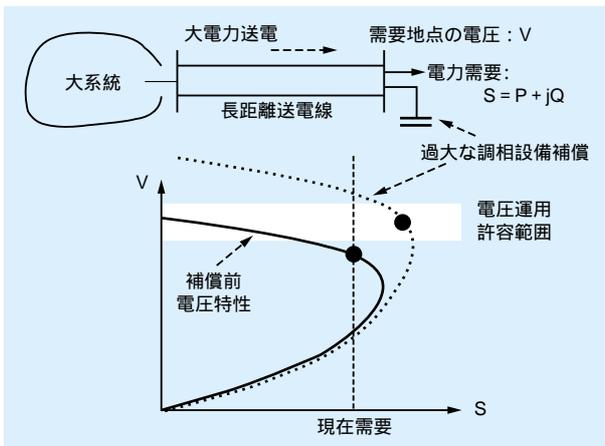


図5-1-2 電圧不安定性現象が発生し易い代表例

図5-1-2の過大な調相設備補償はその典型的な例であり、過大な調相補償は電圧の運用点をP-Vカーブの先端に近づけることを意味している。

現実的に図5-1-2のような条件が成立する可能性が高いのは、たとえば需要点近くの送電ルートで事故が発生し、送電線の一部が送電不可能となったり、近傍の発電機が停止した場合である。前者の場合で、送電線の事故開放により横軸方向に縮まるP-Vカーブが現在需要(縦軸と平行な直線)と一定の余裕をもって交点を持つようであれば問題ないが、交点を持たない場合は電圧不安定現象の有力な発生要因となる。

5-1-2 2種類の電圧安定性解析プログラム

電圧安定性は将来、同期安定度に加えて大きな問題になると予想される。そこで当研究所では、電圧安定性を効率的に解析する2種類の計算プログラムを開発している。開発したプログラムには、電圧安定性の検討に重要な下記3点に係わる解析機能を付加している。

- ）需要地点におけるP-V特性の把握
- ）需要地点における電圧安定性余裕の把握
- ）送電線事故や需要急増時の電圧安定性の確認

静的解析プログラム

上の)および)は静的解析の範疇であり、これは既開発の潮流計算プログラム(L法)の機能向上を図ることにより達成している。

)については、注目する需要地点におけるP-Vカーブを得ることを意味する。P-Vカーブの上側は、ごく一般的な潮流計算により得ることができ、カーブの先端に近づくほど得ることが困難になる。そこで潮流計算によりいったん現在値を得た後、需要特性を“定インピーダンス”に変更してこの値を徐々に減少させつつ潮流計算を繰り返すことによりP-Vカーブを効率的に計算する手法を開発した。IEEE(米国電気・電子学会)の118ノード標準モデル系統に対するP-Vカーブの計算例を図5-1-3に示す。

)に関しては、電圧安定性余裕は基本的に需要地点ごとに異なる点が解析上のネックである。それらの余裕は、基本的には各需要地点ごとに上述したようなP-Vカーブを描くことによって計算できる。しかし一般に需要地点は数百以上と多いため、個々に計算する手順では多大な計算労力を伴い、極めて非効率である。そこで、全ての需要地点の安定度余裕を一括して推定する「電圧安定性指標」を開発した。本指標は、需要の現在値からその電圧安定度限界までの余裕をパーセンテージで表すものであり、各需要地点でのP-V特性を集約化して数値表現することにより、個々にP-Vカーブを描くことなく効率的に指標を計算することができる。

図5-1-4は前出IEEE118ノード標準モデル系統に対する計算例である。同図でたとえば負荷ノード42に対する指標(電圧余裕の推定値)は30%強であるが、図5-1-3の厳密解33%と比較すると精度良く推定されていることが分かる。

シミュレーション解析プログラム

最後に上記の)に関する機能であるが、上述した諸計算にあたっては通常、需要の増加等に伴って電圧が低下する場合の対策、すなわち電圧・無効電力制御

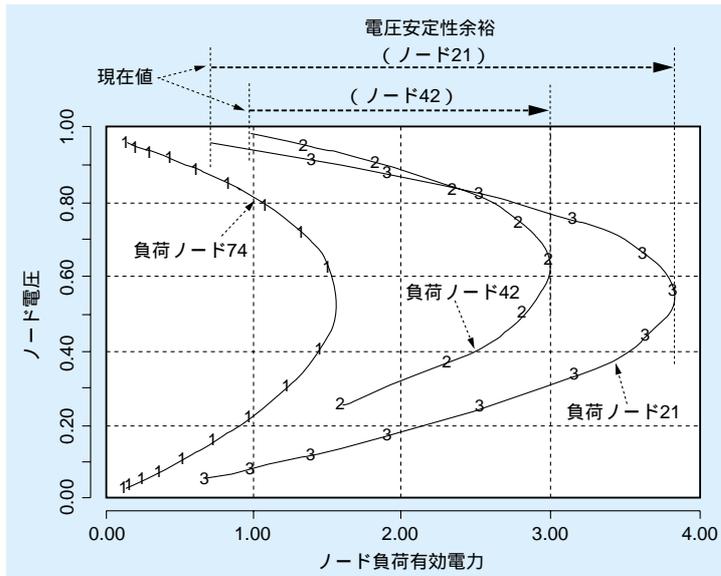


図5-1-3 P-Vカーブの求解例 (IEEE-118ノード系統)

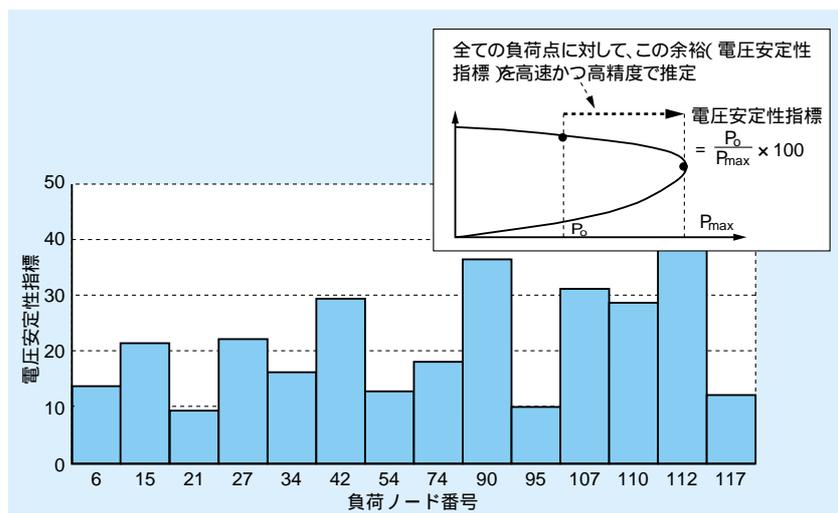


図5-1-4 電圧安定性指標の求解例 (IEEE-118ノード系統)

は考慮しない場合が多い。その主な理由は、種々考えられる制御によって結果が異なるため、需要地点ごとの相互比較等の客観的な評価が行いにくいことがその一因にある。

しかし電圧安定性が厳しい場合、変圧器タップや調相設備等による電圧・無効電力制御を考慮に入れた具体的な検討が必要になることがある。厳しい場合とは、たとえば昼休み後の需要急増時とか、あるいは送電線事故時などである。こうした計算を行う最も効率的な方法は、時間軸に沿ってできるだけ現実に近い条件で電圧の推移を計算するシミュレーション法と呼ぶ方法である。

そこで、調相設備や変圧器タップなど各種の電圧・無効電力制御モデルの応動を考慮できるシミュレーション法を開発した。計算例を図5-1-5に示す。図は需要が時間と共に増加する例である。同図には主要負荷点の電圧を示しているが、その時間推移がギザギザしているのは、変圧器タップなど電圧制御系の動作によるものである。時間が進んで、ある負荷点の電圧が異常に低下していく様子が分かる。この手法では、どの時点で電圧不安定領域(図5-1-2のP-Vカーブの下領域)に入ったかを明示するため、計算の各時間断面ごとに上述した電圧安定性指標を算出する機能を併設している。

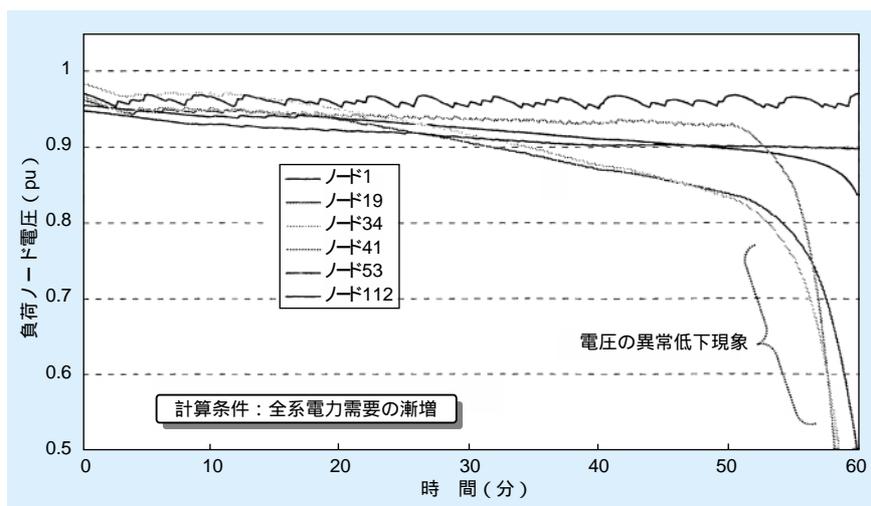


図5-1-5 電圧シミュレーション計算例 (IEEE-118ノード系統)

5 - 2 長時間動特性解析手法

電力システムには種々の事故が発生し得るが、中でも多重事故のような過酷な事故の場合、その影響がシステムの広範囲に拡大・波及する恐れがある。そこで事故波及防止制御などの緊急時制御をより適切に行えば、信頼度の維持向上のみならず、既設の発電変電設備を一層有効に活用することができ、これにより電力輸送力を向上することが可能である。

大規模な電力システムにおけるこのような緊急時制御方式の検討には、事故発生時のシステムの安定度、電圧、周波数等の他に、大容量発電プラントの応動や脱落など、相互に複雑に関連した分オーダーにわたる長時間のシステムの現象(動特性)を解析する必要がある。

しかしこうした現象解析には、秒オーダーの過渡安定度を主対象とする解析プログラム(たとえば当研究所Y法: 5.5節参照)は、解析に要する膨大な計算時間面からその適用が困難であり、この種の解析を高速に実行できる新しい解析ツールに対する必要性が近年大きくなっている。

そこで当研究所では、このような分オーダーにわたる長時間の現象を精度よく高速に解析するため、可変時間ステップの数値積分法を提案し、また解析モデル追加などの機能拡張性に優れた基本プログラムの開

発を進めている。

本節では、長時間解析を目的として開発した基本プログラムの概要について述べるとともに、解析機能の検証例として火力プラントモデルを含めた長時間の現象解析を行い、その解析精度や計算速度を当研究所Y法と比較した結果について記述する。

5-2-1 基本プログラムの概要

開発したプログラムでは、発電機など機器の動特性を表した微分方程式にトラペゾイダル法を適用して代数近似した方程式と、送電線の電圧・電流特性を表した系統方程式からなる連立非線形代数方程式を、可変時間ステップの数値積分法シミュレーションにより解く。

その解法にはニュートンラフソン法(NR法)を用いており、また積分器や加算器など種々の基本要素を用意し、これらの組合せによって解析モデルを表現することにより、NR法に必要なヤコビアン行列をプログラム内部で自動的に作成する構造としている。

積分時間ステップの自動調整は、各積分変数について各時点で推定した局所打ち切り誤差の大きさに基づ

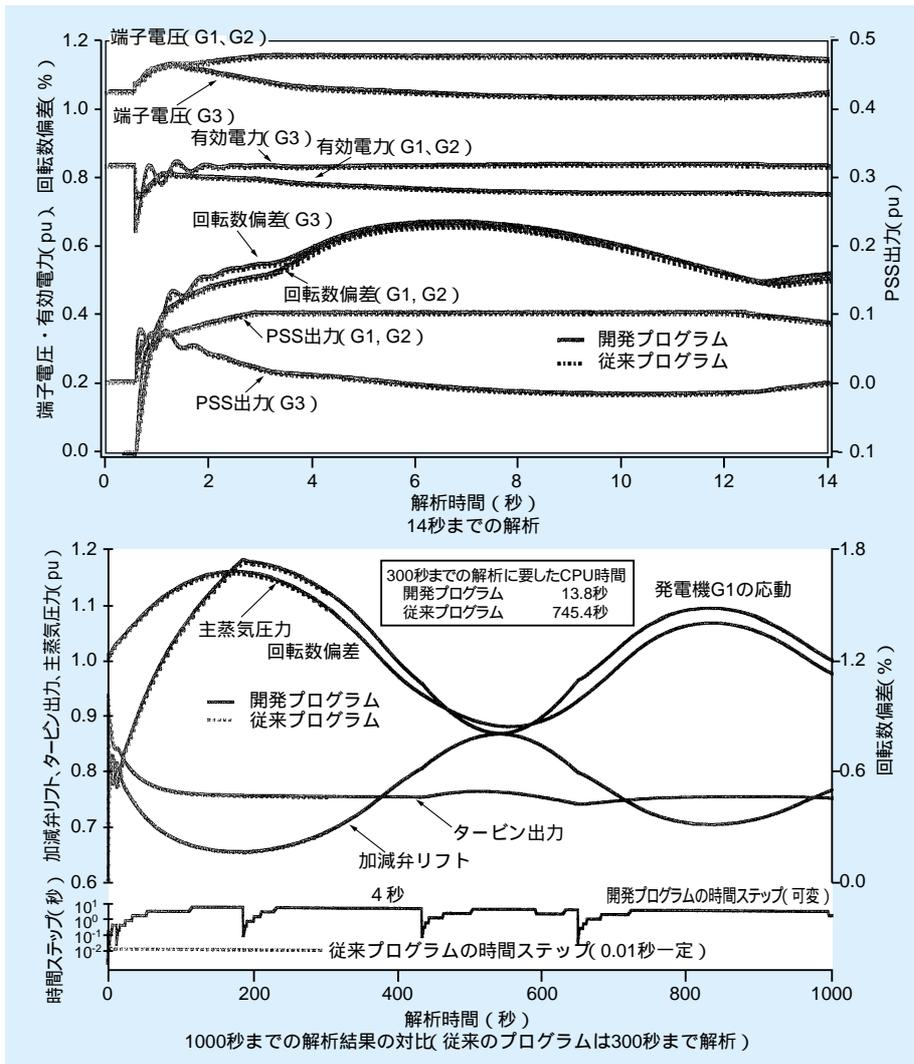


図5-2-2 シミュレーション結果の比較

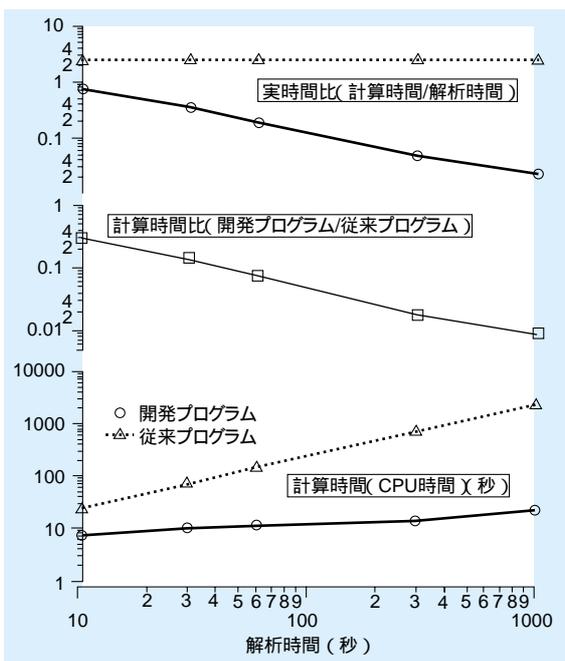


図5-2-3 解析時間と計算時間の比較

対する機能検証例について述べた。検証を通し、Y法と同等の解析精度を維持しつつ、プラント応動や周波数変動を主体とした現象変化の緩やかな領域を含む全領域で見て、高速に現象解析できることを明らかにした。

今後、大規模モデル系統への適用試算等を通して、Y法と並ぶ実用プログラムの開発を目標としている。

5-3 パワーエレクトロニクス解析手法

現在、FACTS(Flexible AC Transmission System)として開発が進められているパワーエレクトロニクス機器のほとんどが自励式変換器をベースとしたものであるが、静止型無効電力補償装置(SVC)やサイリスタ制御直列コンデンサ(TCSC)など他励式の機器もある。主なパワーエレクトロニクス機器の開発状況と解析手法を表5-3-1に示す。Y法については、他励式変換器を用いた直流送電やSVCの解析手法が電力各社で既に活用されており、またTCSCを含む解析手法は現在実用化されつつある。一方、自励式変換器を含む解析手法は、電力共同研究「連系強化技術開発」を進めるに当たって新たに開発したもので、今後電力各社で活用されることになる。

パワーエレクトロニクス機器を含む電力系統の解析は解析内容により異なるが、潮流計算、故障計算および動特性解析では交直変換器を電流源ないしは電圧源と考えればよく、一方瞬時値解析のためには変換器のスイッチングを模擬した詳細な回路方程式を解く必要がある。ここでは動特性解析のための新しい解析モデルについて述べる。

5-3-1 自励式変換器モデル

自励式変換器を用いた自励式SVCが実用化されており、直流連系あるいは直流送電他への活用が期待されている。

電圧形の自励式変換器1ブリッジ当たりの主回路構成を図5-3-1に示す。瞬時値解析における主回路モデルは、他励式の場合と同様、スナバ回路まで含めてブリッジ回路をアーム毎にモデル化しており、スイッチン

表5-3-1 主なパワーエレクトロニクス機器の開発状況と解析手法

分	類	開発状況	解析手法の開発状況
他励式	直流送電(連系)	実用中	Y法、EMTPモデル開発済み
	SVC	"	Y法モデル開発済み
	TCSC	実用化	"
自励式	自励式直流送電	開発段階	Y法、EMTPモデル開発済み
	自励式SVC	実用化	Y法モデル開発済み
	UPFC	実用化	"

注) UPFC(Unified Power Flow Controller); 並列、直列2組の自励式変換器により、電圧(無効電力)調整と位相(有効電力)調整を行う。

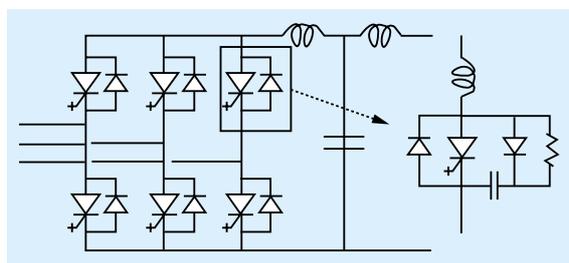


図5-3-1 自励式変換器の主回路モデル

グ素子は、通常は理想スイッチで取り扱われる。

制御系は階層構成を有し、上位の制御部ではAFCやパワーモジュレーション等の系統制御と変換所端子毎の有効および無効電力制御を行う。一方図5-3-2に示す下位の変換器制御部では、共通制御部からの有効・無効電力($P \cdot Q$)指令値を入力として、高速に交流出力電流を制御することにより、結果的に有効・無効電力を制御する。この変換器制御には、有効・無効電力が独立に制御可能なPQベクトル制御を用いている。モデリングにあたっては、サンプルホールドを考慮して図5-3-2の制御ブロックをそのままモデル化する。なお、共通制御部は通常msオーダーのサンプリングで動作するのに対し、変換器制御部は0.1ms程度の高速制御を採用している。

次に、Y法による実効値解析においては、共通制御部は瞬時値モデルと同じでよいが、変換器制御部と変換器本体は、瞬時値モデルとはかなり異なるモデルとなる。変換器本体は可制御電流源として模擬される。これは変換器の出力する基本波成分に着目した交流電圧を電流源変換したものであり、これにより有効・無効電流指令値に対応した交流電流を系統に注入する。

5-3-2 TCSC(SVC)モデル

サイリスタ制御直列コンデンサ(TCSC)は、図5-3-3に示すように逆並列サイリスタとリアクトルを直列コンデンサと並列に接続して、直列コンデンサの補償度を自由に変えることができる機能を持つ。

この回路における逆並列サイリスタとリアクトルは、静止型無効電力補償装置(SVC)と同じで、両端の交流

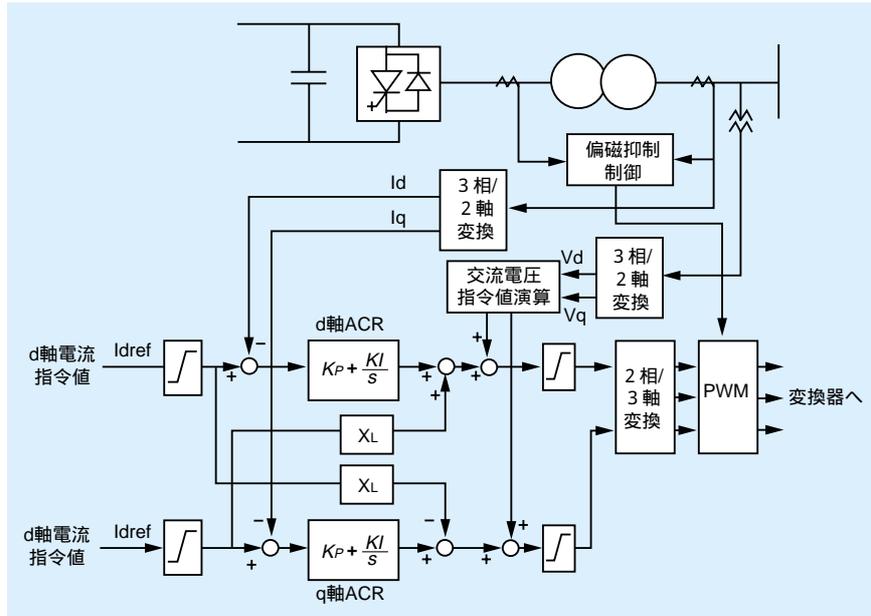


図5-3-2 自動変換器の制御系モデル

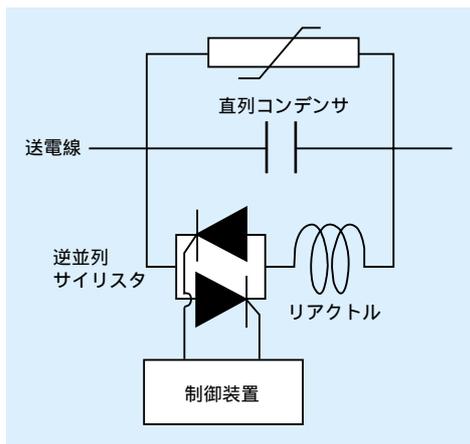


図5-3-3 TCSCの回路構成

電圧と制御角に応じた電流が流れることになる。瞬時値モデルにおいては変換器などと同様、スイッチング回路として直接モデル化されるのに対し、実効値モデルにおいては、基本波成分に着目した電圧と電流の関係式により表現される。

5-3-3 交直連系システムの技術検討項目と解析方法

交直連系システムのシステム設計や運用における技術検討項目を、対象現象の周波数領域に基づいて分類し、それらの解析手法を示したものが表5-3-2である。

表5-3-2 交直連系システムの計画・運用時の技術検討項目と解析方法

解析対象現象の周波数領域	技術検討項目	モデリング/解析方法
定常時領域	常時運転性能 ・潮流バランス ・無効電力バランス ・電圧変動 ・発生高調波量 ・高調波分布 短絡容量/短絡電流	モデル：潮流計算（定常時）モデル 解析方法： 潮流計算プログラム 短絡容量計算プログラム 高調波解析プログラム
安定度領域（～数Hz）	過渡時安定運転性能 ・直流系統の事故回復 ・交流系の同期安定度（パワーモジュレーションの効果） ・周波数安定度（AFCの効果） 電圧安定性 ・無効電力制御方法	モデル：実効値モデル（シミュレータでは瞬時値） 解析方法： 安定度解析プログラム ・時間シミュレーション ・固有値解析 シミュレータ ・デジタル/アナログハイブリッド
過電圧・過電流領域あるいは瞬時値領域（数Hz～）	過電圧（絶縁協調） ・交流過渡過電圧 ・交流持続性過電圧 ・雷サージ ・開閉サージ異常現象 ・軸ねじれ振動 ・転流失敗 ・高調波不安定	モデル：3相瞬時値モデル（固有値解析では拡張実効値モデル） 解析方法： 時間シミュレーションプログラム 固有値解析プログラム シミュレータ ・デジタル/アナログハイブリッド

解析手法をモデリングと解法に分けて考えると、解法については時間シミュレーション、固有値解析を問わず、通常の交流系統解析と共通であり、ここではモデリングに関して簡単に現状での技術レベルを紹介する。

まず、定常時から安定度領域に関するモデリング技術については、実系統試験との対比等に基づき、ほぼ

確立しているものと考えられる。実システムを対象としたシミュレーションを行う際の課題も、制御系をどこまで詳細に模擬しているか、あるいは負荷特性、損失等をどの程度実際に近く模擬できるかといった、解析に使用するデータの精度の問題が中心となる。一方、過電圧・過電流領域については、変圧器や線路の周波数

特性の他、自励式変換器等の機器についても、解析対象に応じたパラメータの同定に課題を残している。このため、特にこの領域のモデリングについては、実システムや大規模アナログシミュレータによる試験結果との対比に基づき、より一層の精度向上を図っていく必要がある。

5 - 4 並列計算による Y 法高速化

近年における電力の規制緩和の動向を鑑みると、近い将来、電力システムの制御や運用計画において系統解析計算の高速化が、とりわけ過渡安定度解析プログラム(Y法)の高速化が一層重要になると考えられる。また現状の系統運用・系統制御においても、高度なオンライン監視・制御機能の実現に向けたY法高速化へのニーズは大きい。

そこで当研究所では、Y法過渡安定度計算の高速化のための並列計算手法を開発した。

2つに大別できる。Y法を始めとする一般的な安定度解析プログラムでは、前者を数値積分計算ロジックにより、後者を代数計算(連立一次方程式: Y行列の求解計算)ロジックを用いて処理している。

このY法のような逐次処理を行うプログラムに並列処理を適用して高速化を図る場合、現行計算ロジックが本来的に持つ並列性を最大限に引き出すことが、高速化実現のための重要な鍵となる。この点から見ると、上記2つの計算ロジックは以下の点で大きく異なる。

- 1) 前者の数値積分計算での微分方程式は発電機ごとに独立した計算となっており、個々の発電機ごとに並列に処理することが容易にできる
- 2) 後者の連立一次方程式は系統全体で一つの方程式となっており、従来の計算ロジックのままでは並列処理を行うことができない

5-4-1 過渡安定度計算の特徴

図5-4-1に示すように、電力システムの過渡安定度計算は発電機などのダイナミクスを持つ要素を扱う計算部分と、ダイナミクスを持たない送電網を扱う計算部分の

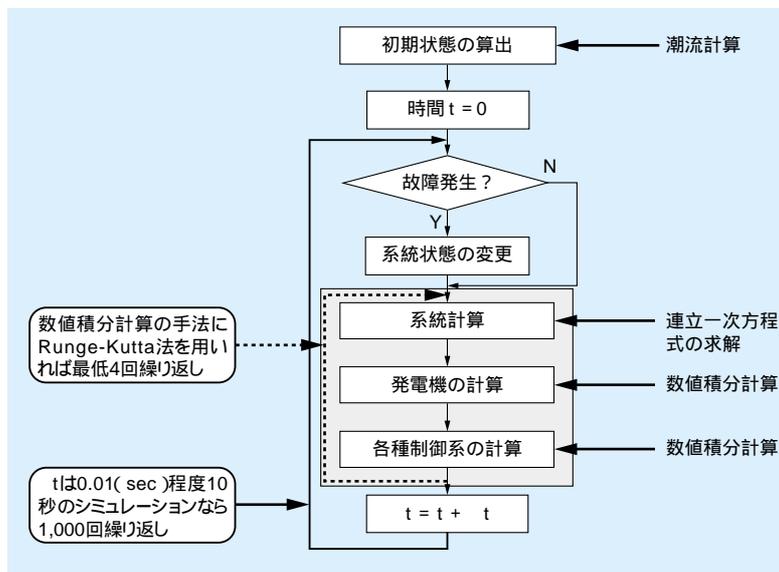


図5-4-1 過渡安定度計算の流れ

そのため、過渡安定度計算へ並列計算を適用する上で、系統計算の並列化手法の開発が主たるテーマとなっている。

いま、わが国における典型的な大規模モデル系統(1270ノード、1417ブランチ、275発電機)に対して20秒間のシミュレーション(積分計算での時間刻み幅は0.01秒)を行った場合の、Y法における上記各処理の実行回数と、実行に必要な時間の割合を表5-4-1に示す。Y法の場合、代数計算(ノード数の次元から成るY行列連立一次方程式の求解)に直接法と呼ばれる手法を用いている。この直接法は、Y行列のようにその行列要素中に占める非零要素数が5%程度以下と極めて小さい疎行列を係数行列とする連立一次方程式を逐次処理により解く手段として大変有効である。このため、過渡安定度計算に限らず潮流計算などほとんどの系統解析プログラムで多用されている。

5-4-2 直接法系統計算への並列処理の適用

上記直接法の処理を細かく見ると、さらに順序付け計算、三角化行列への分解計算、前進/後退代入計算の3つの計算に細分化される。これらの処理の内容については関連文献に譲るが、ここでは過渡安定度計算におけるこれら3つの処理の実行回数と計算処理時間に着目してみる。

表5-4-1から分かるように、Y法の実行時においては3つの処理のうち、前進/後退代入の実行回数および処理時間の占める割合が圧倒的に大きい。したがって前進/後退代入の部分を並列処理によって高速化することができれば、代数計算部分全体が高速化できることになり、さらにはY法全体の処理時間が短縮できることになる。

直接法に対して並列計算を適用する場合には、以下の点に留意する必要がある。

- ・上記分解計算の過程で新たに発生する非零要素数(fill-in)の増加をなるべく少なく抑えること
- ・計算処理のうち、並列に実行可能な部分をなるべく多く抽出すること
- ・計算処理を複数のCPUに割り当てる際に、処理量のバランスがなるべくとれるようにすること
- ・並列処理を行う上で必要となるCPU間のデータ転送(通信)回数をなるべく少なくすること

このうち、fill-inの発生抑制に関して、開発手法では並列計算向けのノードの順序付け手法を開発することで、その発生を逐次処理の場合と同レベルに抑えることが可能となっている。

並列に実行可能な計算処理の抽出には、計算処理の流れを表したツリー図を用いることで、これを可能としている。図5-4-2のように、送電網の構成(結合状態)が与えられた場合に、その計算処理をツリー上の構造に一意に変換する手法を開発した。このツリーにおいて、計算処理は横向きの矢印として表され、根からみて同じ高さにある計算処理は全て互いに並列に実行可能である。したがって、このツリー図から並列処理可能な計算処理を自動的に抽出することが可能である。開発手法ではこのような特徴を持つツリー図を用いることで、効率のよい並列処理を可能としている。

一般に計算処理の割り当てのバランスと通信回数の減少は相反するものであり、両者の間で何らかのバランスを取る必要がある。開発手法では、図5-4-2に示すように、計算処理の流れを表すツリーを用いて、計算処理のCPUへの割り当てを行っている。その際に、CPUに割り当てられるノード数の最大値と通信回数を用いた評価関数を最小化することで、計算処理量のバ

表5-4-1 Y法実行時の処理時間の内訳の例

処理内容		実行回数	全計算時間に対する割合 [%]
全体		-	100.0
系統計算	計算処理の順序付け (ノードの順序付け)	1	0.08
	行列の前処理(三角分解)	3	0.01
	発電機の処理(注入電流計算)	23354	15.2
	連立一次方程式の解の計算 (前進/後退代入)	12455	23.9
その他(積分計算を含む)		-	60.9

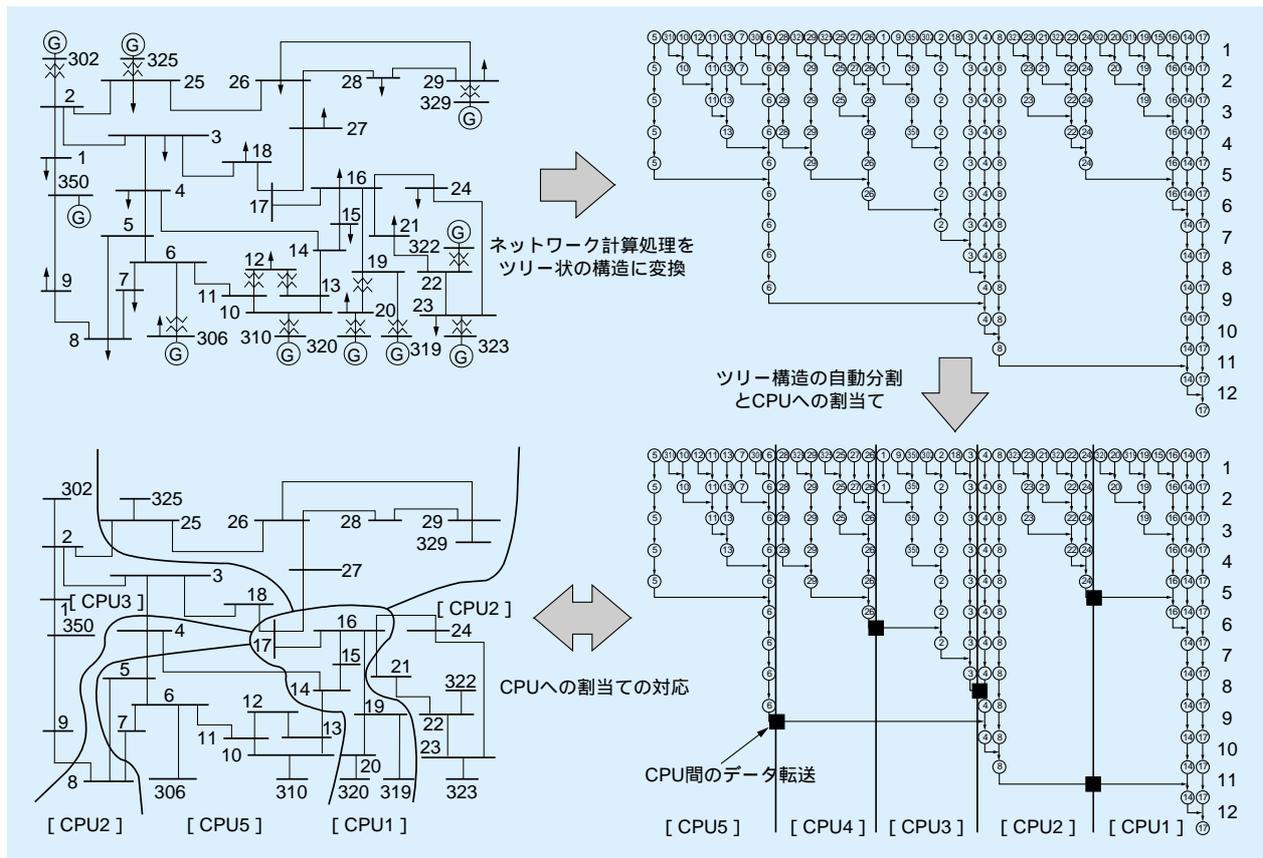


図5-4-2 ツリー/ネットワークの分割/割り当ての例

ランスと通信回数の減少を両立することを可能としている。開発手法で得られる割り当ての結果は、図4-5-2からわかるように、ネットワーク上では近接した結びつきの強い部分が同じCPUに割り当てられるようになっており、開発手法が適切な割り当ての結果を得られる方法であることが示されている。

5-4-3 系統計算以外の部分への並列処理の適用

系統計算以外の、発電機や制御系などの部分は、構成要素ごとに独立して処理できる場合が多い、すなわち通信処理をする必要がない。そのため系統計算に比べ容易に並列化することができる。ただし、計算処理量のバランスが取れるように、処理の割り当てについては留意する必要がある。開発手法では、発電機部分の処理の際に、各CPUでどの発電機を分担するかは、系統計算のためのノードのグルーピング結果に従うものとしている。電源(発電機)がネットワーク上で極端

に特定の地域に集中するような場合でない限り、このような割り当て方法で系統計算以外の部分での計算処理量のバランスが大きく損なわれることはない。

5-4-4 実規模系統への適用例

当所では、以上に述べた並列計算手法を当所開発の過渡安定度シミュレーション計算プログラム(Y法)の基本部分に適用して並列化した「並列版Y法 Version-0」を開発した。今回、並列化を実施したY法の基本部分とは、時間刻みで計算を繰り返すシミュレーション部分のうち、送電網と発電機本体部分であり、前処理部分ならびに計算機ハードウェアの制約により現状では並列化が難しい入出力部分は除いている。

この並列版Y法を、冒頭述べた実規模の大規模モデル系統に適用した結果を図5-4-3に示す。この図で「シミュレーション部分のみ」となっているのは、上記の並列化されていない部分を除いて比較した場合である。6 CPUを使用した場合には、並列版Y法は従来のY法

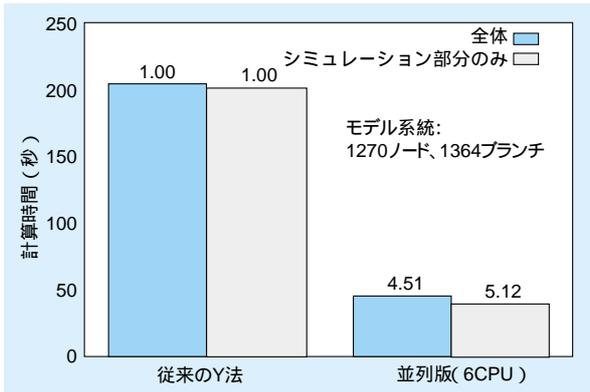


図5-4-3 大規模系統への適用結果

に比べて、全体で約4.5倍、シミュレーション部分のみでは、約5倍の速度向上が得られており、過渡安定度シミュレーション計算の高速化に十分な効果が得られていることがわかる。

本節の冒頭に述べたように、今後、電力系統解析計算への高速化へのニーズはさらに高まるものと考えられる。計算機技術の進展により、計算機自体の高速化はもちろん、並列計算が可能な環境も容易に構築することが可能となっており、並列計算技術の系統解析計算への応用が大きなメリットをもたらす。

5 - 5 電力系統解析システムの高機能化

5-5-1 Y法とS法

上述の各章・各節における安定度関連の解析技術や解析手法では、Y法あるいはS法といった略称で呼ばれる安定度解析プログラムが基本となっている。

Y法やS法の意味や解析機能の概要等は表5-5-1のようである。これらのプログラムは今日、わが国各電力会社における日々の電力系統運用や設備拡充計画等の検討業務において極めて重要な役割を担っている。

Y法やS法プログラムは1970年代、わが国全電力会社の協力を得て当研究所が開発したものであり、以降

表5-5-1 Y法とS法の機能概要

略 称	Y 法	S 法
正式名称	電力系統動的過渡安定度解析プログラム	電力系統動的定態安定度解析プログラム
概略の機能	送電線への落雷など電力系統が比較的大きなショックを受けたときの複数発電機の同期安定運転の可否を計算	負荷の変動や種々の機器動作など小さなショックを受けたときの複数発電機の同期安定運転の可否を計算
計算の特徴	<p>電力系統の動的特性をショック後の10～20秒間に回り時間を追ってシミュレーションする。計算結果は多くの場合、時間軸上での各種状態の動揺波形として出力される。系統解析の中では最も多くの計算労力を要する。</p> <p>【計算出力例】</p> <p>**** JIEE WEST 10-MACHINE MODEL(PEAK) BRANCH=20 ****</p> <p>内部相差角 (度)</p> <p>AG</p> <p>時間 (秒)</p>	<p>電力系統の動的特性を線形表示し、その特性式に対する数学的安定判別(固有値計算)を行う。計算結果は2次元平面の固有値分布として出力される。Y法より1桁程度計算効率に優れ、最適化などの定量的検討に適する。</p> <p>【計算出力例】</p> <p>#1 減衰率 (1/SEC): 1.434921e-02 周波数(Hz)</p> <p>IMAC < 10** -1 ></p> <p>REAL < 10** -1 ></p>

今日まで、電力系統規模の拡大あるいは新しい技術・設備の導入といった電力系統の成長に伴う電力各社からのニーズに対応して、年ごとに解析機能の向上を図ってきた。

実務面から見た安定度解析の重要な点は、解析プログラムに用いられている演算論理の信頼性に加え、現象に係わる系統構成要素をどのように適正にモデル化するかという点にある。たとえば各発電機には種々の高度な制御装置が備えられており、これらの特性的確なモデル化が不可欠である。モデル化やその定数として何をを用いるべきか、といった点には高度な工学的判断が要求される。このため、実態に即した多種多様

なモデルや参考とすべき標準定数を内蔵しておくことが重要な要件となっている。また、モデルの規模を微分方程式の次数で見れば、一発電機あたり平均で20～30次元程度、原子力プラントの場合に炉の挙動まで含めるとすれば100次元程度に及ぶ。さらに最近では、揚水機の可変速運転やSVC(静止型無効電力補償装置)など、従来なかった高度な制御機能の付加が進んでおり、こうした新しい技術のモデル化も不可欠である。

今日、Y法で解析できる機能は概略図5-5-1のようであり、開発当初に比べれば極めて広範な解析機能を有するまでに至っている。

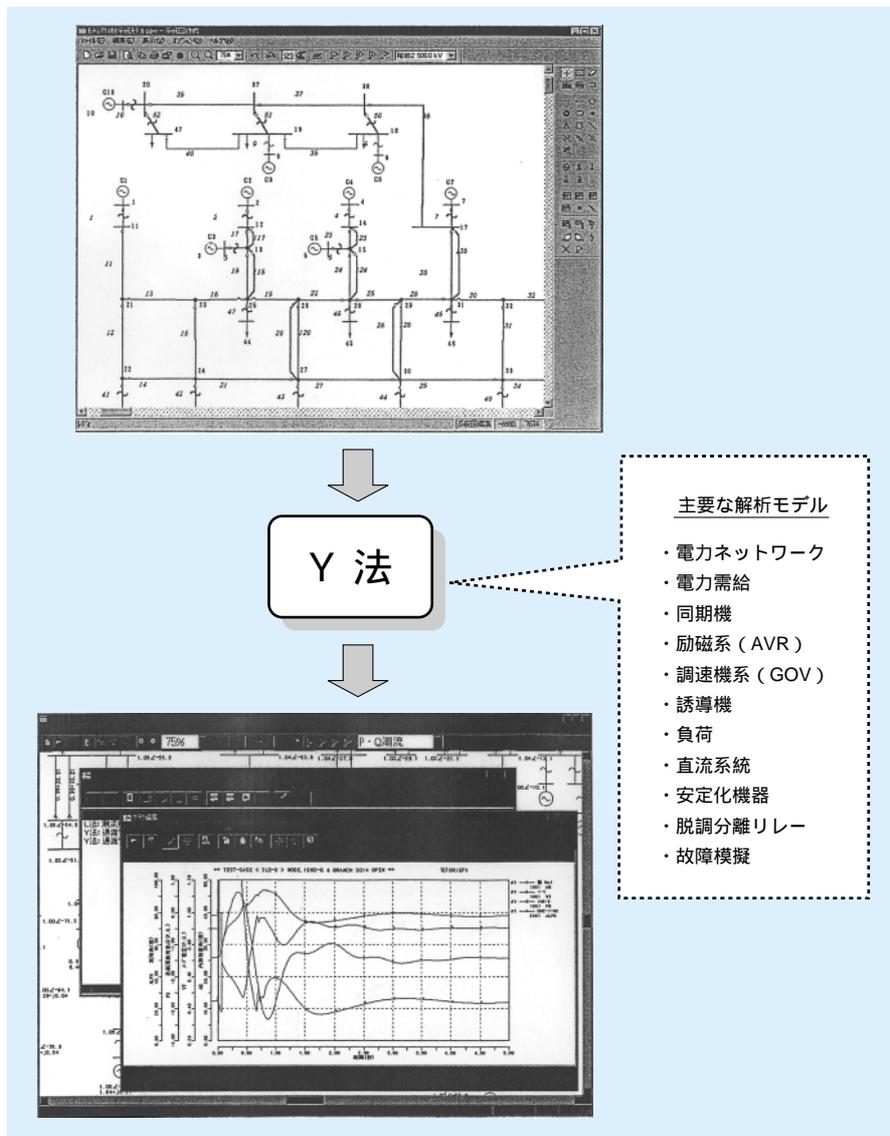


図5-5-1 Y法の解析機能の概要

5-5-2 高機能な電力系統解析システム

近年、Y法やS法に用いられているモデル系統規模は50Hz連系系統で2000母線余、60Hz連系系統の場合に1200母線余と、いずれも極めて大規模となっている。これを構成する入力データ種別は、各負荷点の負荷特性から原子力や大型火力発電のプラント特性まで多種多様であり、またこれら全体のデータ数はざっと10万にも達している。

そのため、Y法やS法の計算にあたってはこうした膨大な入力データ値の収集・維持・管理が、プログラム解析機能に劣らず重要である。また解析精度面からは自社系統のみならず、応分の精度を持った連系他社系統データも必要である。連系系統の解析データを体系的に整備しておくことは、各社における関連検討業務の効率化、また連系各社間の協力体制の基本条件となっている。

一方で今日、Y法やS法等の系統解析計算のための諸データを実務担当者の手で白紙の状態から短期間で作成することはほとんど不可能となっている。

そこで当研究所では、Y法データをマスターデータとし、この一元化されたデータの下でY法やS法の他、以下の関連系統解析を一貫して効率的に取り扱う電力系統解析システムを開発した。

- ・短絡電流計算：主に送電線の地絡故障時における遮断器電流値のチェックのために用いられる
- ・故障計算：種々の系統保護リレーの整定や動作チェックのために用いられる
- ・高調波分布計算：電力系統内の高調波電流や電圧分布計算のために用いられる

従来、これらの計算は各々個別のデータ入力様式に拠っていたため、データ作成や解析作業に多大な労力を要していた。しかし図5-5-2に例示するように、Y法データは各種系統解析に必要なデータをほぼ包含している。加えて現状、Y法データ構造は電力各社の実務者を主体に広く知られているため、Y法データ様式を基準とすることは利便性が高い。

こうした諸点に着目し、概略図5-5-3に示す電力系統解析システムを開発した。図中の系統縮約プログラムは、系統解析計算の効率向上のために原データの特性

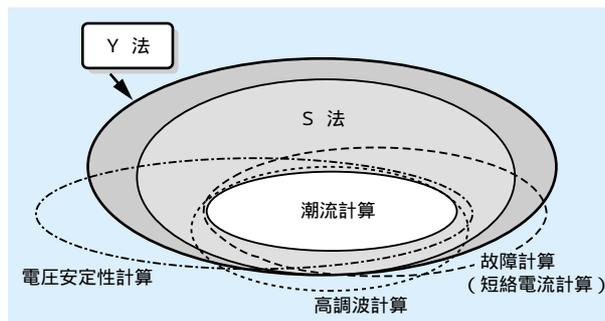


図5-5-2 各種解析プログラムのデータ範囲

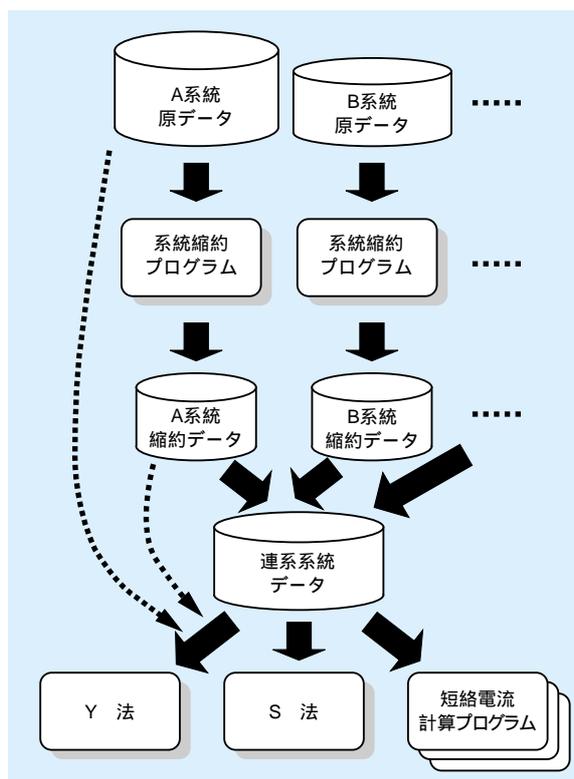


図5-5-3 電力系統解析システムの構図

をできるだけ保存しつつ規模を縮小化処理するものである。

図5-5-2の各系統解析プログラムは、各々に固有のオプション機能指定を除けば、Y法データそのままで計算することができる。

以上、当研究所で開発した電力系統解析システムの概要について述べた。本システムは、わが国電力各社の長年に亘る多大なバックアップを得て広く実用に供している。今後とも、時代の要請に先んじて解析機能や利便性の向上を図る予定である。

とくに利便性の向上という点では、系統解析に係わる近年の入出力支援機能の充実、すなわち GUI 機能の進展が見逃せない。そこで当研究所では、従来から実

施してきた解析機能の高度化に併せ、実業務における有用性を念頭に置いた GUI 支援機能の充実を図る計画である。

お わ り に

理事 首席研究員 高橋 一弘



今後の電力システムの問題には、電力需要の飽和と不確実性の増大が大きく係わってくる。21世紀にはわが国の電力システムの規模は頭打ちになり、需給条件については一段と見通しが困難になると同時に地域間の偏りも変わっていくだろう。電力自由化に見られるような規制緩和の進展、分散型を含む新規電源の参入、電力需要の伸びの地域的な濃淡などは、いずれも不確実さを拡大する因子となる。とりわけ、需要成長が飽和傾向における不確実性は、設備投資を行う上で大きなリスク要因となることが懸念される。

したがって、これからの電力システムには、これまで以上にコストの抑制と信頼性の確保および両者の調和が要求されるようになる。そのため、既存の流通設備を有効に活用し、また保全しながら電力輸送力を増強する技術が第一に望まれるようになるだろう。これには、当面、電力システムとしての輸送力を地点別に定量化したり、これまで一律的であった信頼性の評価を個々の設備ごとにキメ細かく行う手法などが望まれる。長期的には、さまざまな革新的手段を駆使して電力システムを改造し機能を飛躍的に高めるなどの技術が期待されるようになる。当然のこと、これらの基盤となる系統解析やシミュレーション技術については、対象範囲の拡大、演算の高速化、より容易な取り扱いなどが望まれる。

本レビューは1990年に発刊した電中研レビュー「電力系統の高度安定運用に向けて」(NO. 25)に引き続いて、上記のような新しい観点から電力システムに関連する最近の10年間の研究成果を取りまとめたものである。近年の電気事業を取り巻く情勢変化には厳しいものがあるが、先を見据えた研究開発が重要なことは言うまでもないことであり、この点についてはわれわれも十分意識しながら日々の研究に取り組んでいる。今後とも関係諸氏の忌憚のないご意見とともに、暖かいご協力をお願いする次第である。

引用文献・資料等

第2章

- (1) トリレンマ問題群、4. 新電気文明へのシナリオ、電力新報社、1998/11

第3章

- (1) 内田直之・長尾待士：「電力系統の定態安定度向上効果（その1）- PSSの設置個所選定と定数最適化論理 - 」、電中研研究報告183040、昭和59年6月
- (2) 吉村健司・内田直之・吉田忠美：「電力系統の定態安定度向上効果（その3）- 複数の系統断面に対するPSS定数最適設計手法 - 」、電中研研究報告T93072、平成6年4月
- (3) 藤田光一・谷口治人・松本忠行：「発電機出力と回転数の2入力形PSSの系統動揺抑制効果」、電中研研究報告T93025、平成6年3月
- (4) 吉村健司・内田直之：「電力系統の定態安定度向上効果（その4）- 2入力形PSS定数最適化によるロバスト安定化効果 - 」、電中研研究報告T96027、平成9年5月
- (5) 吉村健司・内田直之：「多機系統ロバスト安定化のためのP+形PSS定数最適設計手法」、電気学会論文誌B、Vol. 118-B, No. 10 (1998. 10)
- (6) 岡田俊之・吉村健司・内田直之：「発電機任意制御系の定数最適化プログラムの開発」、平成10年電気学会全国大会 No. 1306 (1998. 3)
- (7) 吉村健司・内田直之：「電力系統の定態安定度向上効果（その5）- 遠端情報PSSの定数最適化による広域動揺抑制効果 - 」、電中研研究報告T97025、平成10年5月
- (8) 吉村健司・内田直之：「重潮流長距離串形系統における遠端情報入力PSSによる安定度向上への寄与」、平成11年電気学会全国大会 No. 1478 (1999. 3)
- (9) 吉村健司・内田直之：「電力系統の定態安定度向上効果（その6）- 限界送電電力向上のための発電機励磁制御系の設計手法 - 」、電中研研究報告T99027、平成12年4月
- (10) 北内義弘・谷口治人：「長距離動揺抑制用 多入力PSS (P+ +Q型)の開発」、電中研研究報告、T96021、1997年5月
- (11) Y. Kitauchi & H. Taniguchi, "Experimental Verification of Fuzzy Excitation Control System for Multi-Machine Power System", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, No. 1, March 1997
- (12) 北内義弘・吉村健司・谷口治人・白崎隆・市川嘉則・萬城実・天野雅彦：「長周期動揺抑制用多入力PSSの定数設定法とその検証」、電中研研究報告T98030、1999年3月
- (13) 北内義弘・谷口治人・白崎隆・市川嘉則・天野雅彦・萬城実：「長周期動揺抑制用多入力PSS試作機のシミュレータ試験（その1：RTDSによる多機系統試験）」、電気学会全国大会、1476、1999年3月

- (14) 北内義弘・谷口治人・白崎隆・市川嘉則・天野雅彦・萬城実：「長周期動揺抑制用多入力PSS試作機のシミュレータ試験（その2：電中研シミュレータによる長距離串型4機系統試験）」、電気学会全国大会、1477、1999年3月
- (15) Y. Kitauchi, H. Taniguchi, T. Shirasaki, Y. Ichikawa, M. Amamo, M. Banjo, "Experimental Verification of Multi-input PSS with Reactive Power Input for Damping Low Frequency Power Swing", IEEE Transactions on Energy Conversion Vol. 14, No. 4, December 1999.
- (16) 井上俊雄・谷口治人：「電力系統安定化のための適応型PSS方式の開発 - 時系列モデルを用いた制御方式の提案 - 」、電中研研究報告T95093 (平成8年)
- (17) 井上俊雄・谷口治人：「電力系統安定化のための適応型PSS方式の開発（その2）- 大幅な系統構成変化に対する適応性能の検証 - 」、電中研研究報告T96002 (平成9年)
- (18) 関根泰次・林敏之：「広域・大電力送電のための“連系強化技術開発” - プロジェクトの概要とこれまでの成果 - 」、電気学会論文誌B、114、955~959 (1994-10)
- (19) 関根泰次・高橋一弘：「小特集：21世紀の電力エネルギーと輸送技術 . 我が国の電力事情の展望」、電学誌、Vol. 112, No. 8, pp582~586 (1992)
- (20) 町田武彦 (編著)：「直流送電工学」、東京電機大学出版局 (1999-1)
- (21) G. Asplund, et al., 高崎訳：「HVDC Lightによる遠隔地需要家への送電技術」、OHM 1998年9月号
- (22) 高崎昌洋・竹中清・林敏之：「自励式直流連系のモデル化と系統導入効果」、電中研研究報告T93095 (1994)
- (23) 川島渉・高崎昌宏：「誘導機負荷を模擬した系統の自励式BTBによる安定度向上効果」、平成10年電気学会電力・エネルギー部門大会、No. 105 (1998-8)
- (24) M. Takasaki, T. Hayashi : "Effect of HVDC System with Self-commutated Converter for Enhancing Transmission Capability", IEE 6th International Conference on AC and DC Transmission, No. 423, pp411-416 (1996-4)
- (25) 高崎昌洋・竹中清・林敏之：「自励式変換器を用いた直流送電の系統導入効果の解明」、電中研研究報告T94020 (1995)
- (26) 高崎昌洋・宜保直樹・竹中清：「自励式変換装置制御・保護方式の開発（その1）- 自励式変換器モデルの開発と交流系故障時の過電流現象の解明 - 」、電中研研究報告T95073 (1996)
- (27) 高崎昌洋・宜保直樹・竹中清・林敏之：「自励式変換装置の制御・保護方式の開発（その2）- 系統事故時の過電流・過電圧抑制方式 - 」、電中研研究報告T96035 (1997)
- (28) 宜保直樹・竹中清・高崎昌洋：「自励式変換装置の制御・保護方式の開発（その3）- 欠相事故時の運転継続性能向上方式の開発 - 」、電中研研究報告T97020 (1998)
- (29) 高崎昌洋・宜保直樹・竹中清・林敏之：「自励式変換装置の制御・保護方式の開発（その4）- ハイブリッド式

直流送電システムの事故時制御・保護方式 - 」、電中研研究報告T98044 (1999-4)

- (30) 宜保直樹・竹中清・高崎昌洋・林敏之：「自励式変換装置の制御・保護方式の開発(その5) - 変換器制御のむだ時間補償による過電流抑制制御方式 - 」、電中研研究報告T98039 (1999-4)

第4章

- (1) 栗原郁夫・高橋一弘：「電力システムの輸送力評価 - 計画段階での系統余力評価に関する一考察 - 」、電中研研究報告T91062、1992年5月
- (2) 栗原郁夫・高橋一弘：「電力システムの輸送力評価 - 系統余裕の均一化手法の開発 - 」、電中研研究報告T92046、1993年5月
- (3) 栗原郁夫・高橋一弘：「電力システムの輸送力評価 - 種々の制約要因を考慮した系統余裕の評価手法の開発 - 」、電中研研究報告T93071、1994年5月
- (4) K. Takahashi, I. Kurihara “ A New Concept on Adequacy Evaluation in Power System Planning ”; Proceedings of 11th Power Systems Computation Conference, pp959-965 1993
- (5) I. Kurihara, K. Takahashi, B. Kermanshahi “ A New Method of Evaluating System Margin under Various System Constraints ”; IEEE Transactions on Power Systems, November 1995
- (6) 井上敦之・高橋一弘・和田淳：「送電線雷事故防止対策とその輸送力向上効果評価法の開発」、電中研研究報告T93085、1994年7月
- (7) 高橋一弘・井上敦之・田中和幸：「雷害対策による電力輸送力増大効果の評価手法」、電気学会論文誌B、115巻9号、1995年9月
- (8) 井上敦之：「送電線雷事故率予測計算法」、電中研研究報告T87089、1988年9月
- (9) 浅田実・田中和幸：「電力システムの不平衡故障時の過渡安定送電限界」、電中研研究報告T87075、1987年3月
- (10) 田中和幸・竹中清：「大規模電力システムの多点故障計算プログラムの開発」、電中研研究報告T92034、1993年3月
- (11) 田中和幸・松野昭弘：「多回線送電ルートを含む電力システムの故障計算プログラムの開発」、電中研研究報告T95020、1996年3月
- (12) 高橋一弘・田中和幸・栗原郁夫・井上敦之：「基幹システムの電力輸送力に関する新しい評価方法」、電気学会論文誌B、117巻11号、1997年11月
- (13) 田中和幸：「電力システムの動特性解析のための多点故障計算手法」、電気学会論文誌B、第113巻3号、1993年3月
- (14) 田中和幸：「故障計算における零相回線間影響の効率的計算手法」、電気学会論文誌B、第115巻2号、1995年2月

- (15) 田中和幸：「多回線送電ルートにおける不平衡故障時の零相回線間影響の計算手法」、電気学会論文誌B、第120巻2号、2000年2月

- (16) K. Tanaka, K. Takahashi “ Multifault calculation methods for dynamic stability study of electric power system ”; Proceedings of 12th Power Systems Computation Conference, 1996

第5章

- (1) 長尾待士・児玉博明・田中和幸・竹中清・熊野照久：「電力システムの電圧安定性解析手法の開発」、電中研総合報告T37、1995年4月
- (2) 長尾待士：「電力システムの電圧異常低下現象(いわゆる電圧安定度について)」、電中研研究報告74043、1974年12月
- (3) 長尾待士・内田直之：「発電機特性と負荷特性を考慮した汐流計算法」、電中研研究報告180008、1980年9月
- (4) 竹中清・長尾待士：「潮流多根解析手法の開発と電圧安定性指標への応用」、電中研研究報告T87092、1985年11月
- (5) 田中和幸・長尾待士・竹中清：「基幹システムにおける電圧不安定現象の解析 - シミュレーション手法の開発と現象の基礎的解明 - 」、電中研研究報告T88091、1989年5月
- (6) 児玉博明・長尾待士：「電圧安定性評価のための無効電力損失指標」、電中研研究報告T90014、1991年1月
- (7) 田中和幸：「求解性を高めた長時間電圧シミュレーション手法の開発」、電中研研究報告T97022、1998年3月
- (8) T. Nagao, K. Tanaka and K. Takenaka “ Development of Static and Simulation Programs for Voltage Stability Studies of Bulk Power Systems ”; IEEE Transactions on PAS, Vol. 12, No. 1, 1997
- (9) 「電力系統安定運用技術」、電気協同研究、第47巻第1号、1991年
- (10) 井上俊雄・谷口治人・市川建美：「電力系統長時間動特性解析に適した数値積分手法の検討」、電気学会論文誌B、第113巻第12号、1993年12月
- (11) 井上俊雄・田中和幸・市川建美：「電力系統長時間動特性解析プログラムの開発」、電中研研究報告T92048、1993年4月
- (12) 井上俊雄・谷口治人：「電力系統動特性解析のための火力プラントモデルとその標準定数」、電中研研究報告T91007、1991年11月
- (13) 高崎昌洋・竹中清・林敏之：「自励式直流連系のモデル化と系統導入効果」、電中研研究報告T93095、1994年
- (14) 高崎昌洋・竹中清・林敏之：「自励式変換器を用いた直流送電の系統導入効果の解明」、電中研研究報告T94020、1995年
- (15) 高崎昌洋・宜保直樹・竹中清・林敏之：「自励式変換装置の制御・保護方式の開発(その2) - 系統事故時の過電流・過電圧抑制方式 - 」、電中研研究報告T96035、1997年

- (16) 高崎昌洋：「系統解析技術の現状と開発動向」、平成9年電気学会全国大会シンポジウムS23-6、1997年
- (17) 高橋一弘：「短絡容量計算のための疎インピーダンス行列の作成計算」、電中研研究報告73040、1973年12月
- (18) 高橋一弘：「大規模電力系統の行列演算手法 - 行列のグラフ表示と三角化分解 - 」、電中研研究報告176074、1977年7月
- (19) 永田真幸・内田直之：「大規模電力系統の超高速解析手法の開発 - 系統計算の並列処理アルゴリズム - 」、電中研研究報告T98037、1999年4月
- (20) 永田真幸・内田直之：「過渡安定度計算高速化のための系統計算の並列処理アルゴリズムの開発」、電気学会論文誌B、第120巻第2号、2000年2月
- (21) 永田真幸・内田直之：「大規模電力系統の高速解析手法 - 並列処理による過渡安定度計算の高速化 - 」、電中研研究報告T99028、2000年3月
- (22) 高橋一弘、他：「大規模電力系統の安定度総合解析システムの開発」、電中研総合報告T14、1990年
- (24) 浅田実・谷口治人：「各種安定化技術の総合的活用」、電中研研究報告T92072、1993年4月
- (25) 滝本昭・内田直之：「系統動特性解析のためのモード法系統縮約論理の開発」、電中研研究報告T90071、1990年
- (26) N. Uchida, T. Nagao " A New Eigen-Analysis Method of Steady-State Stability Studies for Large Power Systems : S Matrix Method "; IEEE Transaction on PAS, Vol. PWR-3, No. 2, 1988
- (27) K. Tanaka, M. Takemura " Development of Reduction Program for Bulk Power System Stability Study "; POWERCON 98, Beijing, China (1998)
- (28) K. Tanaka, K. Takahashi " Multifault calculation methods for dynamic stability study of electric power system "; Proceedings of 12th Power Systems Computation Conference (1996)
- (29) 田中和幸・高橋一弘：「効率的な短絡容量計算プログラムの開発 - 安定度解析システムとの結合 - 」、電中研研究報告T93007、1993年
- (30) 永田真幸・田中和幸：「大規模系統における限流器設置点選定ための基本論理の開発」、電中研研究報告T98006、1999年1月
- (31) 永田真幸・田中和幸：「超電導限流器の短絡電流計算への組み込みと設置点に関する検討」、電気学会論文誌B、第119巻第11号、1999年11月

既刊「電中研レビュー」ご案内

- NO. 32 「人間と技術の調和に向けて ヒューマンファクター研究 」1995. 3
- NO. 33 「放射線ホルミシス 研究の意義と取り組み 」1996. 3
- NO. 34 「ガスタービン研究 高効率発電の主角を担う 」1997. 1
- NO. 35 「地下の探査・可視化技術」1997. 5
- NO. 36 「送電線コンパクト化技術の開発 高分子材料の適用 」1998. 3
- NO. 37 「乾式リサイクル技術・金属燃料FBRの実現に向けて」2000. 1
- NO. 38 「大気拡散予測手法」2000. 3

編集後記

電中研レビュー第39号「新時代に向けた電力システム技術」をお届けいたします。発電分野に続いて平成12年3月から電力小売の一部自由化がスタートしました。さらに、太陽光、風力などの自然エネルギーや小型ガスタービン発電機などの分散型電源の開発や実用化が盛んになり、これらが多数電力系統に接続されると電力系統の運用には従来にない複雑な現象が生じるほかきめ細かな運用が必要になってきます。

電力系統の運用については、当研究所は、電力安定供給技術や効率的な運用法の開発などを進めてきました。電力システムでは、多くの発電機の発電電力や送電線を

流れる電力は時々刻々変動しており、一時も同じ状態にとどまることのない躍動感に富んだシステムです。今回、今後の電力需要を展望するとともに、電力自由化の混沌とした不確実性の時代においても、透明性が高く市場性のある電力システム技術についてまとめました。本レビューが、新時代における電力システム技術者の参考になれば幸いです。

最後になりましたが、巻頭言をご執筆いただきました中部電力株式会社副社長 志賀正明様に、心より感謝申し上げます。



電中研レビュー NO.39

平成12年6月20日

編集兼発行・財団法人 電力中央研究所 広報部
100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 [大手町ビル7階]
(03) 3201-6601 (代表)
E-mail : www-pc-ml@criepi.denken.or.jp
<http://criepi.denken.or.jp/index-j.html>
印刷・株式会社 電友社

本部 / 経済社会研究所	100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1	(03) 3201-6601	我孫子研究所	270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646	(0471) 32-1181
柏江研究所 / 情報研究所 / 原子力情報センター			横須賀研究所	240-0196 神奈川県横須賀市長坂2-6-1	(0468) 36-2121
ヒューマンファクター研究センター / 事務センター			赤城試験センター	371-0241 群馬県勢多郡宮城村苗ヶ島2567	(027) 283-2721
	201-8511 東京都柏江市岩戸北2-11-1	(03) 3480-2111	塩原実験場	329-2801 栃木県那須郡塩原町関谷1033	(0287) 35-2048

