

送変電システムの変遷と今後の展望

系統変電システム製作所
系統変電エンジニアリング統括センター長
田所通博



1. ま え が き

電力システムは、電気を供給する社会インフラとして、大規模なシステムを形成している。図1に示すように、発電所で発生した12～22kVの電気は、送電時の電気抵抗によるロスを低減するため、変電所の変圧器で275kV、500kV等の高い電圧に変換され、送電網を経由して送電される。そして超高圧変電所、一次変電所、二次変電所、配電用変電所と各変電所で徐々に電圧を下げて、家庭や工場に届けられている。変電所には変圧器のほかに、故障などのときに自動的に電気を切る“遮断器”，送電装置を点検するときに電気を切る“断路器”，落雷のときに雷の電気を地面に逃すための“避雷器”等の安全装置を備えている。

電力システムは電気の発生と消費が同時刻に行われるため、需給制御を行っている。また、系統事故をすみやかに除去して安定な電力供給を実現する保護リレーシステムが導入されている。送変電システムは、高信頼性・高効率化・経済性が要求され、構成要素である開閉装置・変圧器などの変電機器も高電圧・大容量化へ対応するとともに、高信頼性を追求した機種開発が進められた。

本稿では、送変電システムの構成要素の中で、開閉装置、変圧器と保護装置、電力システムを安定に運用するための装置について、技術の変遷と今後の展望を述べる。

2. 送変電システム事業をとりまく環境の変遷

送変電システムの変遷を表1に示す。電力は、産業にとって重要なエネルギー形態であり、電力流通を行う送変電システムは重要なインフラである。高度成長期には、電力需要が急増し、発電所が多数建設されたが、立地制約のため、電力消費地域から遠隔の建設となり、高電圧・大容量送電技術の開発及び安定送電技術の開発が最重要事項となった。日本では1950年代後半から275kVで送電していたが、高電圧化のニーズに対応して1973年から500kV送電が運用を開始した。電力システム規模の拡大とともに、電力システムにおける事故の影響が系統全体に波及することを防止するために、事故時の広域情報をリアルタイムに収集して電源と負荷のバランスを高速制御する系統安定化システムが日本の独自技術として進化してきた。

また日本は50Hzと60Hz地域に分かれているため、BTB (Back To Back) などのパワーエレクトロニクス(以下“パワエレ”という。)機器を用いて異なる周波数間の電力融通を行ってきた。

その後、高度成長期から安定成長期さらには低成長期に移行するに従い、装置の新設が減少し、高度成長期に設置された設備が高経年化してきたことから、機器の延命化・更新計画の平準化等の課題が生じている。さらに、東日本大震災後の原発停止に伴い、低環境負荷の代替電源として

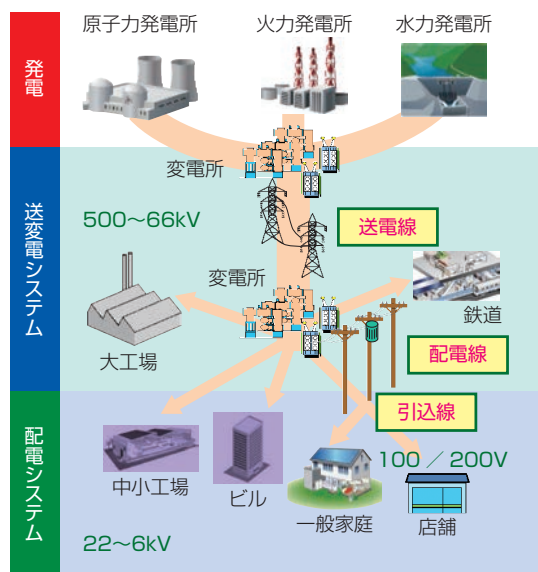


図1. 電力システム

表1. 送変電システムの変遷

	1960	1970	1980	1990	2000	2010
	高度成長期		安定成長期		低成長期	
開閉装置 遮断器 GIS	高電圧化・大容量化 ☆84kV GCB ☆84kV GIS		☆550kVフルGIS ☆米国工場 高信頼化・保守省力化 ☆機器センサ ☆開閉極位相制御		☆1,000kVGIS実証器	
変圧器	高電圧化 大容量化		☆500kV送電運用開始1973年 ☆500kV器 ☆765kV器		☆1,000kV 実証器 ☆分解輸送器(CGPA) ☆三相器1,510MVA世界最大 ☆77kVガス絶縁変圧器 ☆275kVガス絶縁変圧器	
電力系統保護 事故波及防止リレー 電力系統運用	アナログ静止形リレー 位相比較リレー		デジタルリレー (マイクロプロセッサ、メモリ等) FM/PCM電流差動リレー		分散形 事故波及防止	
送電安定化			中央集中形事故波及防止 (系統安定化システム)		☆STATCOM ☆GTO-STATCOM ☆GCT-STATCOM ☆紀伊水道HVDC	
系統解析技術	☆アナログシミュレータ		デジタルシミュレーション ☆ハイブリッドシミュレータ		☆フルデジタルシミュレータ	

HVDC : High Voltage Direct Current

の再生可能エネルギーの一層の導入、供給力不足を補うためのガスタービン電源の新設が行われている。また老朽化電源の廃止・再起動によって電源構成が変化している。従来は大規模電源の大容量長距離送電に対する送電安定度の課題が主体であったが、送電線の潮流制約や、再生可能エネルギー電源の出力変動による電圧変動抑制、電圧安定度などの系統課題への対応が迫られている。パワエレを活用したFACTS(Flexible AC Transmission System)機器であるSVC/STATCOM(Static Var Compensator/STATIC synchronous COMpensator)は、無効電力を制御することによって、これらの課題を解決する対応策として導入が加速されている。海外では大規模な再生可能エネルギー導入に伴い大容量・長距離直流送電の実績が増加している。

3. 変電機器の変遷と展望

3.1 開閉装置の変遷

三菱電機では、表2に示すようにガス遮断器(Gas Circuit Breaker：GCB)の開発・実用化を背景に、1960年代前半からいち早くGIS(Gas Insulated Switchgear)の研究に着手し、1968年に国内初の84 kV GISの実系統試験を行った。さらに、1973年に主母線が気中の550kVハイブリッド形GIS(H-GIS)を、1976年にフルGISをいずれも世界で初めて開発し、実用化に成功した(図2)。550kV GCBでは遮断点数4点であったものを1990年代には保守性向上、小型・軽量化を図った油圧操作一点切GCB及び550kV GISを開発した。この技術を発展させ1,000kV機器開発を行った。また、1990年代には保守性に優れた超高圧ばね操作GCBの開発に注力し、世界初の国内向け300kV GCB、海外向け245 / 362 / 420kV GCBを順次納入した。2010年にはメンテナンスフリー化、経年機器更新のレトロフィットを指向した550kV 2点切ばね操作GCBを開発した(図3)。一方、保守の省力化・合理化要請に応じ、機器の状態に

応じた保守を行うCBM(Condition Based Maintenance)を支援する、高感度のGIS用センサを1990年代から提供してきた。さらに、機器状態の情報をセンサで収集するインテリジェントシステムでデジタル信号伝送をネットワーク化できる小形・軽量の計器用変流器(Electric Current Transformer：ECT)、計器用変圧器(Electric Voltage Transformer：EVT)、開閉時の電力系統・機器へのショックを減らす開閉極位相制御でコンデンサ投入、リアクトル遮断、変圧器投入、線路投入に対応した装置を開発した。

3.2 開閉装置の最新技術と将来展望

2009年には大容量短絡電流への対応が求められる北米などの市場向けに245kV / 80kA GISを製品化しており(図4)、引き続き大容量化の対応とメンテナンスフリー化、ライフサイクルコスト低減、高経年機器レトロフィット対応の開発に注力するとともに東日本大震災に鑑み耐震性評価、耐震技術の開発を推進する。

3.3 変圧器の変遷

変圧器は当社創立当初からのラインアップの一つであり、米国ウェスティングハウスエレクトリック社からの技術導入をベースに独自技術を積み上げてきた。外鉄形、内鉄形の2種類を持ち、高電圧・大容量器や特に堅牢(けんろう)性・コンパクト性を要求される場合に外鉄形を、標準的の中小容量器には内鉄形を適用するなど、ニーズに合わせて適材適所で対応してきた。

1970年代から国内外に500kV器を納入、1980年代には765kV器を輸出、1990年代には1,000kV実証器を納入するなど常に高電圧化の先陣をきるとともに、2002年には三相器として世界最大容量の1,510MVA器を製作・納入した(図5)。

高電圧、超高圧の都心導入に対応し、1980年代には77kV系、1990年代には275kV系の防災型ガス絶縁変圧器を開発・納入した。

表2. 変電機器の変遷

	1960	1970	1980	1990	2000	2010
	高度成長期		安定成長期		低成長期	
開閉装置 遮断器 GIS	高電圧化・大容量化					
	☆84kV GCB		☆550kVフルGIS		☆米国工場 ☆1,000kVGIS実証器	
	☆84kV GIS		☆245kV / 80kA GIS		☆開閉極位相制御	
			☆機器センサ		☆550kV 2点切ばね操作 GCB	
変圧器	☆500kV送電国内運用開始					
	高電圧化		☆500kV器		☆765kV器 ☆1,000kV 実証器 ☆米国工場	
	大容量化		☆分解輸送変圧器(CGPA) ☆三相器1.510MVA世界最大			
	☆特別三相器		☆77kVガス絶縁変圧器 ☆275kVガス絶縁変圧器			



図2. 世界初550kVフルGIS

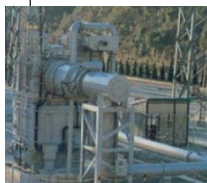


図6. 500kV CGPA変圧器



図5. 1,510MVA変圧器



図4. 245kV / 80kA GIS



図3. 550kV 2点切ばね操作GCB

特集 I：当社技術の変遷と将来展望

高電圧・大容量化に反して厳しくなる一方の輸送制限を打破する開発に先陣をきり、いち早く特別三相変圧器や分解輸送変圧器(Coil Group Packed Assembly：CGPA)を製品化した。1984年に275kV、1992年に500kV CGPA変圧器を納入開始している(図6)。

3.4 変圧器の最新技術と将来展望

高経年器の増加に対応し、オンライン油中ガス分析装置などの早期異常診断装置を製品化しており更に高度化を図る。また、外鉄形変圧器が本来持っている耐震性に加え、ブッシングの油-ガススペーサ化など、付属部品の簡素化によってトータルとして高耐震化を図るとともに、低騒音、低損失にも配慮した環境適合形変圧器を目指す。

3.5 変電機器のグローバル生産体制整備

海外市場の機種競争力強化を目的に、現地生産による地産地消を推進してきた。北米の当社生産拠点であるMEPPI(Mitsubishi Electric Power Products Inc.)社では、1986年から開閉器の製品出荷を開始した。変圧器は米国の更新需要の活発化を背景として2013年にMEPPI社の傘下に米国テネシー州メンフィスに変圧器工場を新設し、変圧器事業のグローバル生産体制を強化している。

4. 系統保護リレーの変遷と展望

4.1 系統保護リレーの役割

系統保護リレーは、事故除去リレーと事故波及防止リレーに大別される。前者は、落雷などに起因する事故の区間(送電線、変圧器、母線等の設備)をすみやかに系統から遮断し、公衆安全の確保や設備損傷の防止を図る。後者は、所定の発電機や負荷の遮断などによって、事故の影響が波及し系統異常現象(脱調、周波数・電圧逸脱、過負荷等)にいたるのを未然に防止する。ともに供給支障の軽減を目的とする。

4.2 系統保護リレーの変遷と当社の取組み

系統保護リレーの主要な変遷を、最高送電電圧や年間使

用電力量の推移とともに表3に示す。同表から分かるように、500kV送電線の導入(1973年)、電力需要の急増、及びマイクロプロセッサ・通信など基盤技術の進歩は、系統保護リレーのデジタル化を急速に進展させた。

当社は初期の16ビット形からデジタルリレー市場に参入、2000年代に入ってから、小型化、運用保守性・信頼性・拡張性・適応性の向上、及び環境負荷低減等の時代の新たな要求に応えて、32ビット“MELPRO-CHARGEシリーズ”を投入した。最近では、ユニット交換による部分更新を可能として保守性を大幅に向上、従来機種との対向接続が可能であるなどの特長を持つ“MELPRO-CHARGE2シリーズ”を開発し、2013年に初号機を納入した。従来機種と比べてヒューマンインタフェース(HI)も向上させている(図7)。

基幹系統(187～500kV)の送電線保護を目的とした事故除去リレーに着目すると、デジタル化以前は位相比較方式が広く採用されていた。これは対象送電線両端の電流位相差から事故区間を判定するものだが、原理上多端子系統への適用が困難であるため、拡大化する電力系統で、主役の座を電流差動方式に譲っていった。電流差動方式は、全端子の電流瞬時値を相互に伝送し合い、キルヒホッフの法則に基づいてリレー演算するもので、多端子系統を含めてほぼ完璧に事故区間判定が行える。伝送する電流の変復調の方法によって、FM(Frequency Modulation)電流差動とPCM(Pulse Code Modulation)電流差動とあるが、保護リレーや通信路のデジタル化に対応し後者が主流となっていく。1980年代に実用化され、現在では、ほぼ全ての重要送電線でこの方式が採用されている。500kV送電線保護用PCM電流差動リレーの例を図8に示す(MELPRO-CHARGE適用)。

事故波及防止リレーは、1950年代に単体の脱調分離リレーなどが導入された。系統規模の拡大や電源の大容量化・遠隔化等は系統現象の複雑化を招き、これに応じて事

表3. 系統保護リレーの主な変遷

	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010
形態 (基本要素)	電気機械形リレー (誘導円盤など)		アナログ静止形リレー (トランジスタなど)		デジタルリレー (マイクロプロセッサ、メモリ等)		
系統保護用通信	FDM：周波数分割多重 TDM：時分割多重 OPGW：光ファイバ複合架空地線			マイクロ波回線 (FDM→TDM)			
						光伝送 (OPGW)	
最高電圧 kV	154～	275～	500～				
年間電力 使用量 (GWh)	電気事業連合会ホームページ 電気事業 60 年の統計から引用						
	37	99	320	620	766	982	1,056

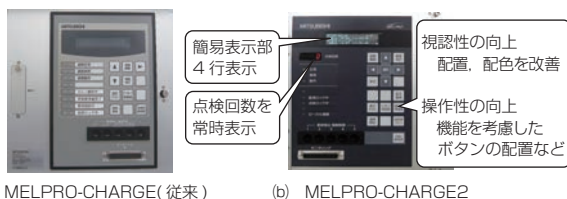


図7. 主力デジタルリレーのHIパネル



図8. 500kV送電線保護用PCM電流差動リレー(1端子分)



図9. BSS装置の外観

故波及防止リレーは、単体の分散形から通信を活用する中央集中形へとシステム化されていった。これは系統安定化システムとも呼ばれ、1960年代に日本が世界に先駆けて実用化した。初期にはアナログ静止形などが使われていたが、現在ではデジタルリレーが主流となっている。当社は導入当初からこの市場に参入しており、最近では、大幅な系統構成の変更、新規大容量電源・長距離送電線の新設等による保護範囲の拡大に応じて、複数の大規模系統安定化システムを製作・納入した。2011年5月に運用を開始した関西電力BSS(Bulk power System Stabilizer)を例にとり、各装置の外観を図9に示す。これは、100箇所近い電気所に設置され事故検出・負荷制限装置が親装置と通信で結合された世界最大規模の系統安定化システムである。

4.3 今後の展望

分散型電源の普及拡大、電力システム改革による広域連系の強化は、系統保護上の課題を更に複雑化させる可能性がある。そのため、系統保護リレーに求められる機能・性能・信頼性は、今後ますます高度なものになっていくと予想される。当社は、分散型電源の事故時応動を考慮できる系統解析手法の確立、最新機種であるMELPRO-CHARGE2シリーズの適用拡大、及び効率的なシステム構築を可能とする新たな通信方式の開発等を推進し、これからの系統保護リレーに求められるニーズに応じていく所存である。

5. 送電安定化技術

最近の電力系統では、原子力問題、環境問題や電力自由化を背景に、電源の遠隔化又は集中・偏在化、変動負荷の増加が発生し、さらに老朽火力の廃止によって、系統安定度や電圧安定性等の系統問題が生じている。これらの対策として、自励式のSTATCOMや他励式のSVCは、系統安定度や電圧安定性等、多くの系統問題を解決する手段として有効である。SVCやSTATCOMは、半導体スイ

チング素子を用いることで、連続的かつ高速な無効電力制御が可能であり、静止器の長所であるメンテナンス性の良さも持ち合わせている。STATCOMは、自励式変換器でGCT(Gate Commutated Turn-off)サイリスタなどの自己消弧素子を適用した交直変換器である。図10に示すように自励式変換器の直流コンデンサによって直流電圧を一定に維持しながら、自励式変換器から発生させる交流電圧を上下させることで、進相・遅相無効電力を自由に制御できる。当社は1979年にSTATCOMの実フィールド試験を行い、1991年にGTO(Gate Turn-off)サイリスタ素子を用いた世界初の80MVA STATCOMを納入し、定態安定度向上によって送電能力を向上させた。2004年にはGCTサイリスタ素子を用いた80MVA STATCOM、2012年には世界最大級容量の450MVA STATCOMを納入した。2013年には定態安定度向上と過渡安定度向上を行う130MVA STATCOMを納入した。外観を図11に、システム構成を図12に示す。このSTATCOMは78MVA器と52MVA器の2並列構成となっており、合計130MVAの容量を持つ。STATCOM主回路は自励式変換器と変換器用変圧器(多重変圧器)で構成される。3台又は2台の自励式変換器の出力電圧を、3段又は2段多重変圧器を用いて合成して系統に連系する。このシステムでは系統の定態安定度や送電容量を向上させるため、系統電圧低下に応じて無効電力を供給するAVR(Automatic Voltage Regulator)制御を行う。さらにダンピングを向上させる目的でSTATCOM連系点における発電機からの潮流変動を検出し、これに応じて系統電圧を上げ下げするPSS(Power System Stabilizer)機能を付加し、系統動揺を抑制する。

また、系統事故中、事故除去時や除去後に無効電力出力を制御することで、過渡安定度問題を解決している。

今後、原子力問題や再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、様々な系統課題が顕在化する可能性があり、これらを

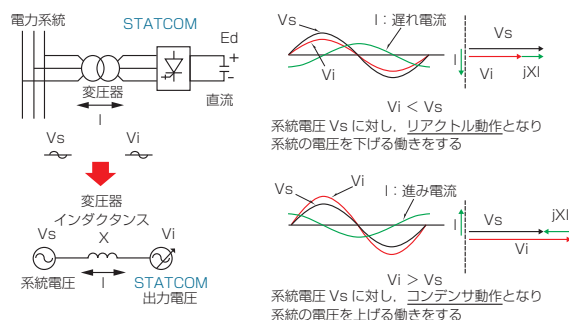


図10. STATCOM基本動作



図11. 130MVA STATCOM

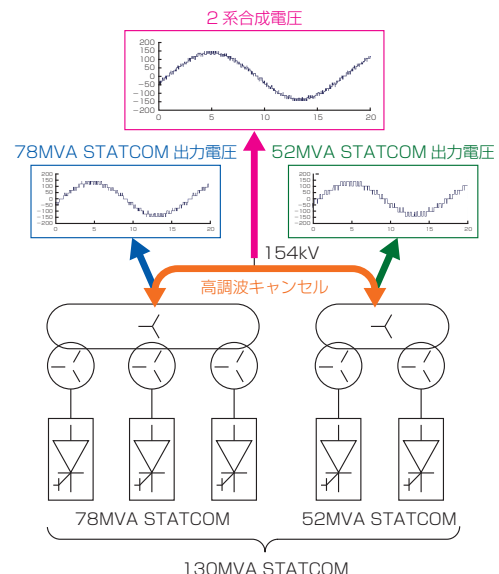


図12. 130MVA STATCOMのシステム構成

特集Ⅰ：当社技術の変遷と将来展望

解決する手段の一つとして、無効電力補償装置はますます重要になると考えられる。

6. 系統解析技術

系統解析技術の主要素として、図13に示すように、①動作特性を記述したモデル、②モデルを組み込んでシミュレーションを行う解析プログラム、③製品検証・実証試験用にリアルタイム模擬を行うシミュレータがある。このうちシミュレータは計算機とパワーエレクトロニクス技術の適用によって近年大きく進化した分野である。シミュレータとして1960～1970年代は、回転機・変圧器・送電線等、実機器をそのまま小型化した模擬送電線が用いられたが、スペース・保守・安全性・柔軟性に着目して1980年代からデジタル技術を組み合わせたハイブリッド型、さらにはフルデジタル型シミュレータが開発・適用された。当社では、自励式パワーエレクトロニクス機器にはハイブリッド型、それ以外の機器にはフルデジタル型を用いて製品検証してきた。ハイブリッド形の外観を図14に示す。近年、従来の基幹系に加えて、需要家・配電系まで含めたスマートグリッドとしての解析が重要となった。需要家・配電系は、実機器を用いての実証実験が可能かつ効果的である。当社では伊丹地区で6.6kVの実証施設を設置している。この時に、基幹系の動きをリアルタイムでシミュレーションして、実証配電系統にフィードバックすることで配電系と基幹系の相互作用が模擬でき、系統全体としての評価ができる。実証配電系へのシミュレータの接続点には巨大なアンプが必要となるが、パワーエレクトロニクス技術適用によって1 MW / 6.6kVのBTB装置として実現している。

今後、新型変換器・分散電源・通信・制御系等の新機器のモデル開発とともに、各種解析プログラムとシミュレータのシームレスな統合化が進むと考えられる。

7. む す び

送変電システムの変遷と今後の展望について述べてきたが、当社はこれまで市場のニーズに合致した製品開発をいち早く行い、世の中に提供してきた。

高経年機器の増加、環境負荷低減、地域間連系・国家間連系強化、電力自由化への対応、異種エネルギーとの統合システム、スマートグリッドシステム導入等、電力システムは転換期を迎えていると言われている。海外では大規模長距離送電に直流送電が適用され、近年では洋上風力発電関連での直流送電計画が増えてきている。電力システム側でも、システムを安定に運用するため各種のパワーエレクトロニクスシステムが検討されている。スマートグリッドの導入に伴い、先に述べたパワーエレクトロニクス技術に、従来の電力系統運用技術などが融合し、新しい送変電システムに発展するものとする。今後も国内外の市場ニーズを見極め、市場が求める製品を世に送出し、多様化する電力システム・社会インフラの発展に寄与していく所存である。

参 考 文 献

- (1) 高塚桂三，ほか：550kVガス絶縁開閉装置(GIS)の開発と製品化，電気学会論文誌B，128，No.5，709～713(2008)
- (2) 玉置榮一：外鉄形変圧器の技術動向と展望，三菱電機技報，75，No.8，544～548(2001)
- (3) 保護リレーシステム基本技術体系，電気学会技術報告第641号(1997)
- (4) 竹田正俊：自励式無効電力補償装置(STATCOM)の開発と製品化，電気学会論文誌B，129，No.7，855～858(2009)
- (5) 福井伸太：電力流通の進化を支えるシステム技術，三菱電機技報，86，No.9，480～483(2012)

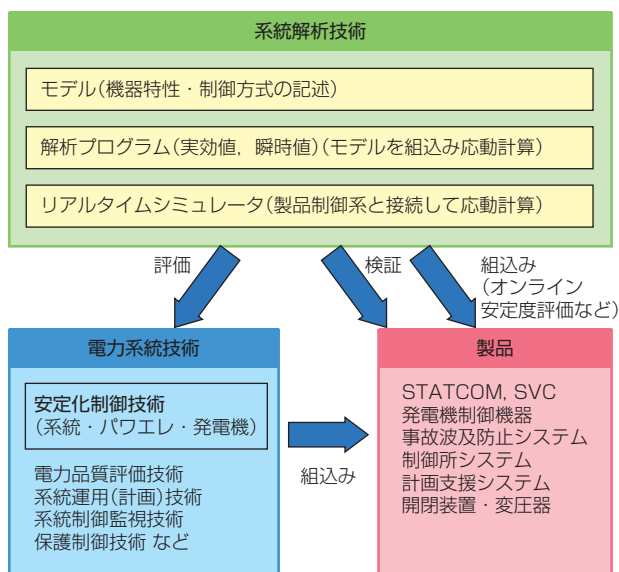
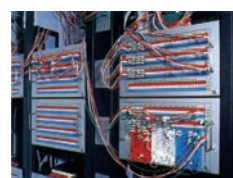
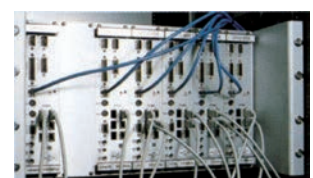


図13. 系統解析技術とその適用



送電線アナログモデル



発電機デジタルモデル

図14. 当社のハイブリッドシミュレータ