



福井伸太*

21世紀の電力流通を支える最新技術

State-of-the-art Power Grid Technologies in the 21st Century

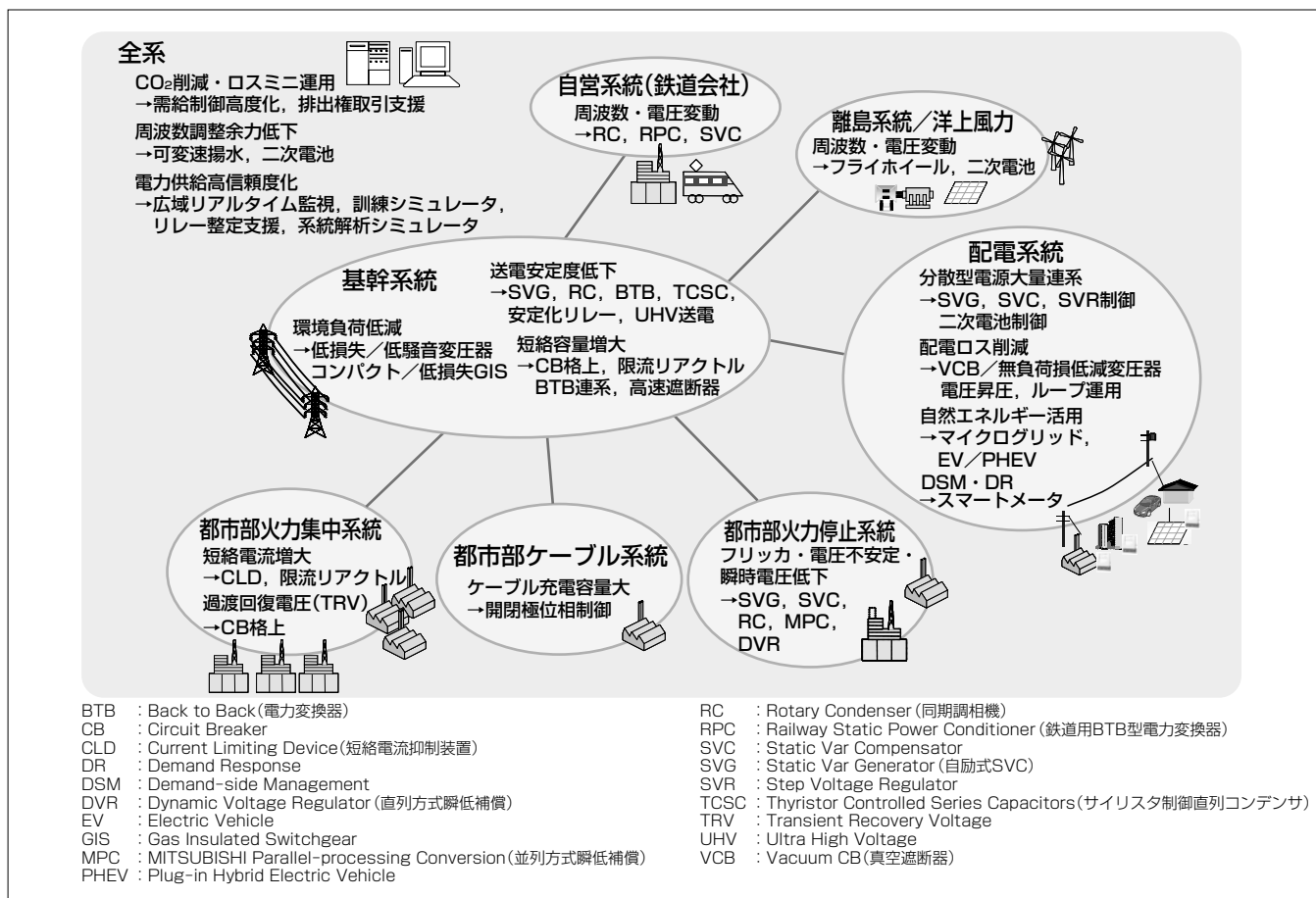
Shinta Fukui

要 旨

我が国の電力需要は、少子化や省エネルギーの進展があるものの電化率の向上が進み、21世紀においても緩やかではあるが拡大方向にある。一方、地球温暖化低減の必要性からも、電力供給の低炭素化となる原子力・揚水の増加、高効率火力集中化への更新が進む方向にあり、再生可能エネルギーである太陽光発電や風力発電などの新エネルギー電源の大量導入が計画されている。また、ここ数年で発生した大規模地震での経験から、自然災害による大規模停電の発生・進行防止への確実な対応が必要となっている。流通設備面では1980年代までの高度経済成長時代に建設された変電機器の老朽化が進んでおり、2020年代には全国で最初の更新ピークを迎えることになる。ICT(情報通信技術)

の積極導入によって、運用階層の圧縮や保守拠点の集約による省力化に加えて需要家サイドでの電力需要の管理が進行すれば、低損失の変電機器導入と相まって、発電から流通、消費まで含めた電力供給の更なる効率化が加速していくと考えられる。このように、低炭素電力供給化による電源構成の変化に直面し、流通設備の計画的更新の中で、電力系統の信頼度を維持して、運用と保守の合理化を実現する21世紀の電力流通システムには、系統の安定・効率運用、被災時・緊急時の迅速な復旧、電源の多様化における電力品質の維持が要求されている。

本稿ではこれらの電力系統における新しい課題を明らかにし、21世紀の電力流通を支える最新技術について述べる。



電力系統の課題と対策

電源構成の変化及び地球温室効果ガス低減などの環境負荷低減、電化率の向上が予想される21世紀の電力系統の課題に対して、三菱電機がその解決策として提供する機器及びシステム技術についての全体像を示す(課題→対策)。

1. ま え が き

21世紀は、社会的には少子化、省エネルギーの進行が進むが、地球温暖化防止の観点からヒートポンプを含む家庭機器の電化率向上や電気自動車の普及によって、ピーク電力需要は全体的には今世紀前半までは年0.5%程度で緩やかに拡大すると予想されている。一方、電力の低炭素化供給の進行によって、2030年までに原子力の新增設と火力の高効率化への更新、再生可能エネルギーである太陽光発電や風力発電の大量導入が国で計画されている。このような電源構成が多様化する中で、送電線や変電所設備の経年化が進み、高度成長時代に建設された設備の更新が2020年代ごろには最初のピークを迎えることが予想されている。また、至近に国内外で発生した大規模な停電事故の発生防止や、中越沖大地震による原子力発電所停止による大きな潮流変化など、希頻度の大停電リスクへの対応も喫緊の課題となっている。このような電力システムを取り巻く環境の変化の中で、設備面では、大容量長距離送電の安定化や電力品質の維持、経年更新に合わせた電力流通の高効率化、系統運用面では、連系線拡充に伴う系統の監視制御対象の広域化並びに被災時・緊急時における系統の信頼性・ロバスト性の維持を同時に進めていく必要がある。

本稿では、21世紀の電力システムの新たな課題と解決策としての最新技術動向について述べる。

2. 電源構成の変化に適応した安定運用

原子力発電所や大規模風力発電ファームは、需要地から遠い場所に設置されることから、電力会社間を結ぶ連系線の容量拡大に伴い、長距離送電が多くなる傾向となる。また、用地取得の制約から高効率火力の電源線長距離化や集中的な高効率火力への更新によって、送電可能量に制約が生じる場合が出てくる。発電機間の同期化力低下を抑える送電安定化対策としては、送電線の多回線化、連系線のDC送電化、UHV送電などの高電圧化が効果的である。太陽光発電の電力は大半が家庭用であるため、大量普及が進むと基幹系統での連系線潮流は全体的には少なくなるが、無効電力供給も少なくなり、連系線での電圧低下によって同期化力が下がる時間帯が発生すると考えられる。局所的な対策としては、送電回路に並列に接続して系統電圧を高速に制御するFACTS(Flexible AC Transmission System)機器によって、等価的な効果を実現することができる。図1に長距離電源線での同期安定度及び送電電圧安定度の向上を実現している自動電力変換素子を用いたSVG(Static Var Generator)の適用例を示す。

一方、エネルギー消費における電化比率が大きくなるにつれて、電力品質維持への要望は高くなると予想される。老朽化による都市部火力停止に伴うフリッカ電圧発生、直

流電源機器の増加による高調波の抑制にもSVG, SVC, アクティブフィルタ等の無効電力補償装置、又はLCフィルタの導入が進むと考えられる。

大規模な停電の発生防止には、事故点除去後の系統周波数や潮流の変化、発電機の電圧位相の変化などの系統状態指標の予測計算を行い、発電量や負荷量の最適な制御によって系統の緊急状態から脱出して、事故波及を防止する必要がある。系統事故時の系統周波数の変化をリアルタイムに検出して、最小限の発電及び負荷制御によって、系統の周波数を適正範囲に維持する系統安定化システムの基本構成を図2に示す。

発電出力が自然状況に応じて急変する再生可能エネルギーの大量導入時には、広域の電力融通量も時間帯によっては大きく変動し、系統事故時での電圧低下によって太陽光発電の一斉脱落、又は運転継続機能が付加されている分散電源もあり、周期的なテレメータ値の冗長度による状態推定では系統状態指標の正確な予測が困難となる可能性がある。1サイクル内遮断などの高速遮断器による事故除去で発電機の数変化を極力抑え、系統動揺時の電圧・電流のベクトル値を広範囲にリアルタイムに計測して発電機又は負荷を高速に制御する系統安定化システムが必要になる。系統の情報発信源である変電所へのICT(情報通信技術)適用によって、変電所構内の現場機器近傍に光ファイバ等の耐ノイズ性の情報バスを配置し、GPS(Global Positioning System)の同期時刻を付加した母線電圧や線路電流な

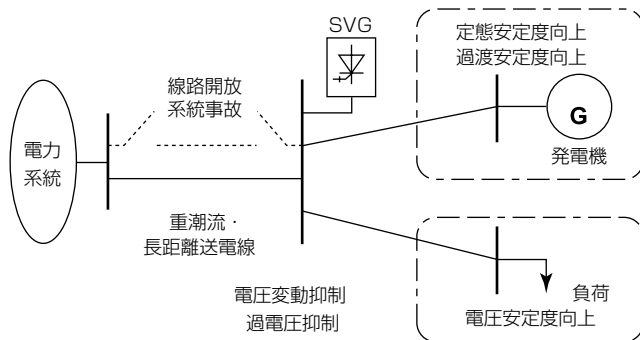


図1. 長距離電源線でのSVG設置

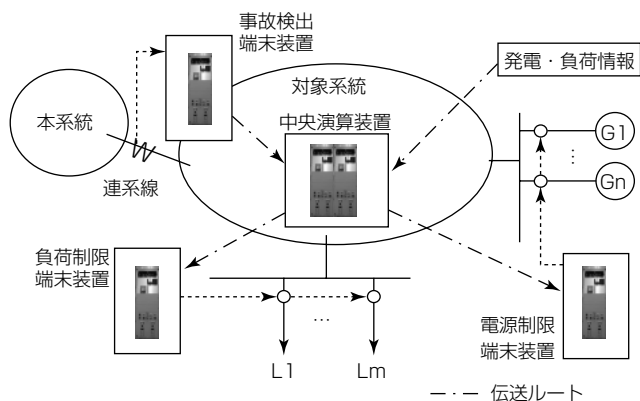


図2. 系統周波数安定化システムの構成

どのデジタル情報を高速に変電所内外に配信できる。さらに設備運用や設備保全計画に反映する変電機器の各種センシング情報、映像、音などのデジタル情報も配信できるフルデジタル変電所の実現が期待される。

2008年に行われた資源エネルギー庁の低炭素電力供給システムの研究会では、再生可能エネルギーの大量導入時には太陽光発電時などの需給が一致しない時間帯に備えて、昼間揚水や蓄電池の系統側設置が検討されている。蓄電池はインバータ制御によって、有効電力と無効電力を独立に高速に供給する電源として、周波数や電圧変動が大きいマイクログリッドでの自立運転試験でその有効性が実証されている。系統事故時の周波数や電圧の安定化制御を担う電源になり得る。

停電時間の短縮化のためには、給電運用制御システムから変電所機器の遠隔状態監視と直接操作による復旧迅速化、並びにそれを支える給電運用者の復旧技能の維持と継承が必要である。系統運用の効率化を目指して、電力系統の運用階層は圧縮され、保守拠点の統合に伴う運用拠点の統合が進んでいる。被災時のリスク分散を考慮した運用拠点の広域での相互バックアップによって、被災時・緊急時での系統運用のロバスト性を維持できる。広域給電の進展とも相まって、給電運用制御所単位での監視制御範囲拡大の一要因である単位CPU (Central Processing Unit) 当たりの処理能力増大は、今後も1年半程度で倍増していくと見込まれている。

これらの背景から、事故時の系統復旧迅速化のためには、事故箇所と設備運転状態の情報、系統制御や系統操作情報が広域かつ高速大容量の制御用IP (Internet Protocol) ネットワーク経由で変電所の監視制御システムと給電運用制御システム間で相互共有されていくと予想される。

給電訓練シミュレータは、広域停電での復旧に必要なとなる中給や複数の給電所運用制御所に跨(また)がる広域系統のリアルタイムシミュレーションが実現されてきており、復旧技能の訓練だけでなく、経年設備事故時の復旧時間など系統への影響度推定も可能であり、設備の保全計画にも活用が期待される。

3. 経年変電機器の大量増加と環境負荷低減

電力系統の要(かなめ)である変電所を構成する変電機器のうち、高度成長期(60年代後半～80年前半)に建設された機器の多くはすでに設計想定寿命を超過しており、今後これら高経年機器の増加が懸念される。保守部品の枯渇や保守要員の減少、又はトラブル実績から性能劣化がある機器は、ライフサイクルコストや不具合発生時の停電範囲などの系統への影響度を考慮して、更新優先度と時期を選定する必要がある。設計寿命が近づいている機器については、適切な保全計画の立案、つまり劣化状態や余寿命を的確に

診断し、適切な修理・部品交換等の補修を行うことで、設計寿命を超えて使用される可能性がある。特に再生可能エネルギー電源の大量導入が毎年継続する予定である2020年代には、最初の更新量のピークを迎えると予想される。機器の状態に応じた更新の前倒しや延命化を組み合わせた年度単位でみた更新量の平準化は、一定の系統余力を確保した上での設備停止を伴う更新工事を進めることができ、適正な系統信頼度を維持する上でも極めて重要である。

主要な変電機器である開閉器や変圧器の性能劣化を決定づける要因としては、ガスシール用Oリングや摺動(しゅうどう)部のグリースの劣化と磨耗、フランジ面の発錆(はっせい)、油及び絶縁物の機械的重合度の劣化、負荷時タップ切り換え器の接点磨耗、また最近注目されてきている経年性流動帯電がある。これらを起因とする性能変化を検出できるセンシング技術を適用して、経年劣化や余寿命を診断するアルゴリズムを搭載した可搬又は遠隔の監視装置がすでに実現されているが、環境負荷低減の観点から最も重要なセンシング技術は、温暖化係数の高い絶縁媒体であるSF₆(六フッ化硫黄)ガスのリークセンシングである。高経年化に伴い、Oリング劣化やフランジ面の発錆によるSF₆ガスのスローリークが懸念されるため、フィールドでのガスリークを早期に発見し、大気中への漏洩(ろうえい)レスを実現しなくてはならない。IEC(International Electrotechnical Commission)／JEC(Japanese Electrotechnical Committee)で規定している0.5%/年のリーク管理を、半年間の短期間の計測データで検出できる精度を持つ可搬型のガススローリーク監視装置を図3に示す。

変電設備の保全を計画的かつ効率的に実施するためには、これらのセンシングデータや巡視点検履歴・事故障害情報など多岐にわたる設備情報の一元管理を行い、設備状態の的確な劣化トレンドの把握が必要である。加えて、設備とその“資産・原価・収益”情報を紐(ひも)付けることによるアセットマネジメントも大量の設備更新時には重要な課題である。図4に、設備データ統合管理基盤である“三菱DiaPassage”の概要を示す。設備の統合データベースであ

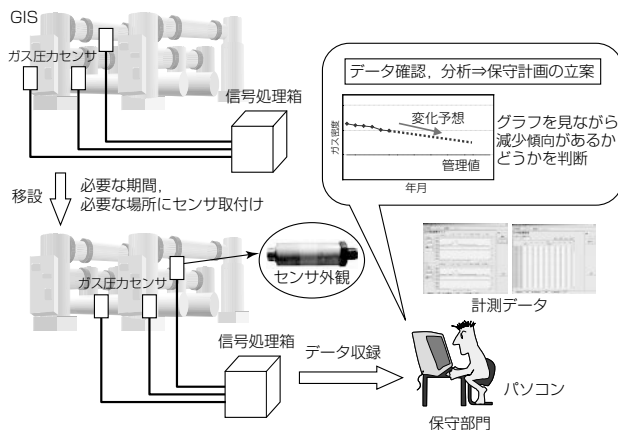


図3. 可搬型ガススローリーク監視装置

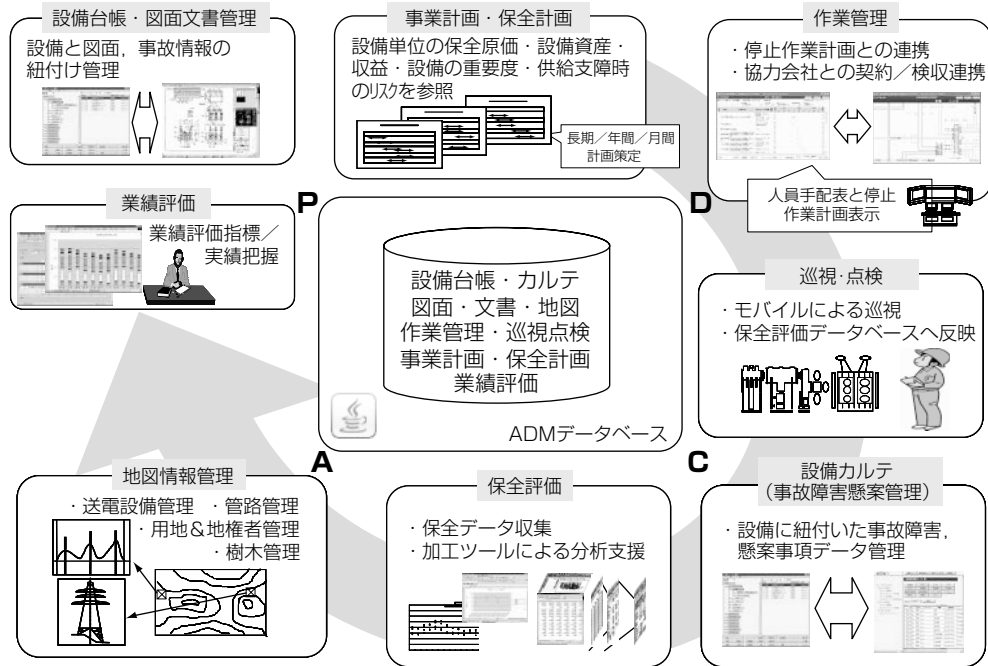


図 4. 三菱DiaPassageにおけるADM

るADM(Asset Data Management)に蓄積された、過去から現在までのデータから将来の故障・劣化を予測し、最適な維持管理方策を立案して、PDCA(Plan Do Check Action)のサイクルを回すことが可能になる。

経年変電設備の更新に合わせた電力流通の高効率化としては、基幹系統では、変圧ロスを低減した変圧器や操作エネルギーや通電ロスを抑制する開閉機器への更新が進むと考えられる。日本の系統では、電力流通ロスは数%程度であるが、その大半を占める配電系統でのロス削減が望まれる。無負荷時の励磁損失を削減する配電用変圧器の合理化設置や配電電圧の昇圧は最も効果的である。配電線の柱上に設置されたCT(Current Transformer)やPT(Potential Transformer)内蔵の開閉器によって電圧や電流の計測値を遠隔監視すれば、配電系統のループ化運用時での配電線損失の削減が実現できる。

環境負荷低減機器への更新に当たっては、図 5 に示すような機器の製造、輸送、据付け、運用、廃棄に至る全ステージを含めたLCA(Life Cycle Assessment)が考えられる。例えば、運用面によるロス低減効果は、期待寿命での長期間運用におけるCO₂排出量減少に積算換算することによって、ライフサイクルの全期間で実際に大気中に放出されるCO₂総量を減少させるか否かを定量的に試算可能である。また、製造、輸送、除却時の使用エネルギー削減が可能だけでなく、部分的な機器の段階更新が可能であり、更新時や内部開放点検時の温室効果ガス回収時間削減など、保守や保全時の系統信頼度を考慮した総合評価が必要である。

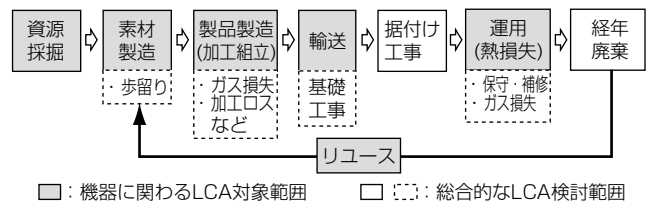


図 5. CO₂削減のLCA評価

4. 21世紀の電力流通システム

電力系統の運用と保全を担う電力流通システムの要件は、大きく次の3項目に集約される。

- (1) 低炭素電力供給進行時の系統運用及び設備運用の信頼度維持
再生可能エネルギー電源の比率拡大、連系線拡充に伴う広域電力供給の増加による管内潮流の不確実性増大、並びに設備の劣化状況や不具合状況を反映した系統運用への対応力強化
- (2) 変電所運転・保守の省力化・効率化
変電所運転業務の集中制御化と、保守拠点統合に伴う運転・保守業務増大への対応力強化
- (3) 被災時・緊急時の信頼性・ロバスト性維持
広域供給に伴う被災時・緊急時の事故波及防止・復旧能力の強化

図 6 に21世紀の電力流通システムの構想を示す。高速大容量の広域IPネットワークによって、監視制御だけでなく設備保全に関する大量の情報を瞬時にN:Nで伝送することができ、運用拠点や保守拠点の集約や分散に柔軟かつ迅

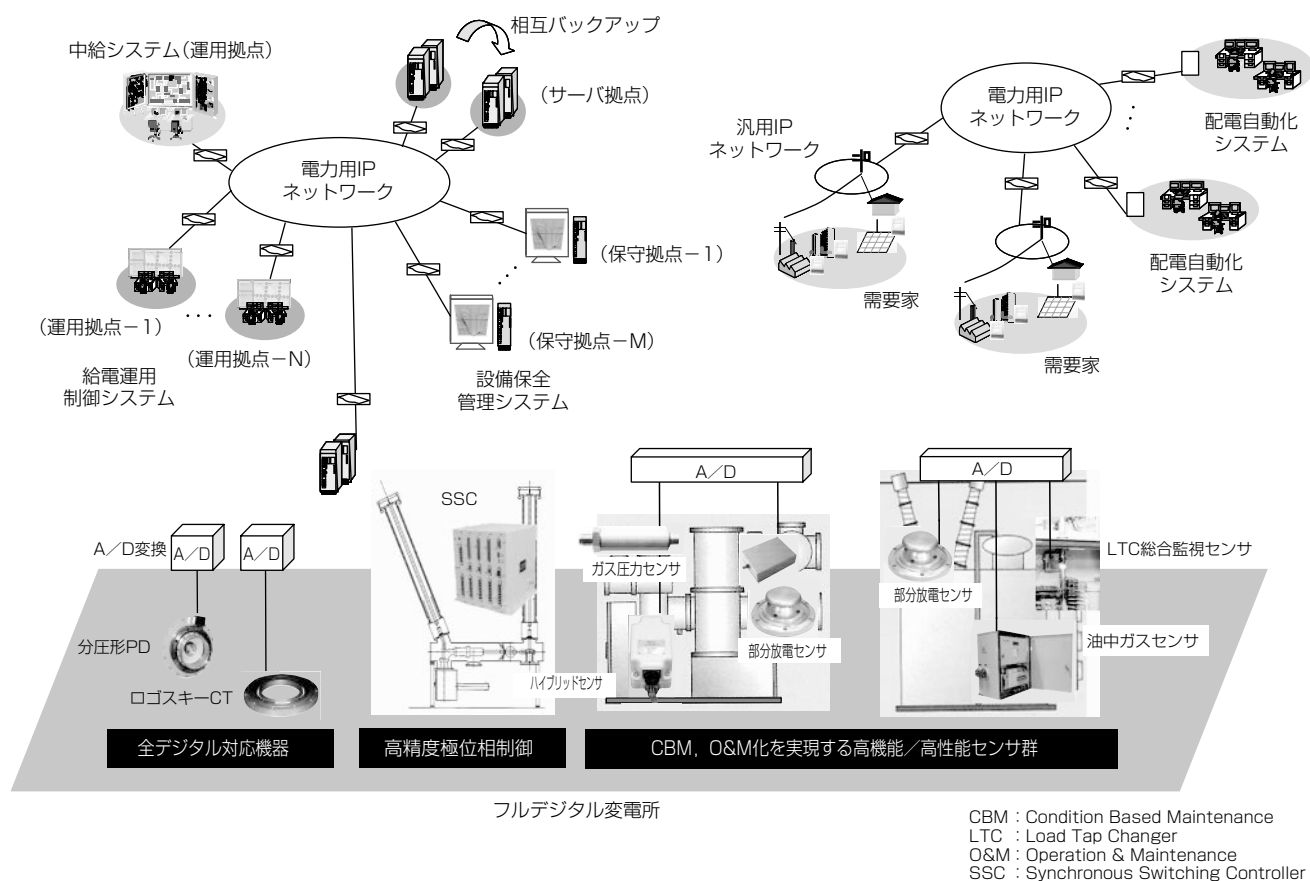


図6. 21世紀の電力流通システム

速に対応可能である。再生可能エネルギーの大量導入の進行状況に応じて、地域的にある程度まとまった太陽光発電や風力発電専用の給電運用制御システムを分散させて実現させることも可能であり、電源構成の変化にも追従できる。ここで、最も重要なのはセキュリティ技術である。国内では、発電所から配電用変電所までは、すでに専用の通信ネットワークでネットワークセキュリティや情報セキュリティなど物理的な対策を施しているが、米国では過去に計算機内で不正プログラムが見つかった事例が2009年4月に報告されている。さらに、ICTの適用をDSM(Demand Side Management)まで進めた電力流通効率向上によって再生可能エネルギー電源導入の促進を図るという観点からのスマートグリッドの実現には、配電用変電所から配電線を経由した需要家側の電子メータ、電化機器、PHEV/EVに至るまでの双方向通信インフラが必要である。社会への二重投資防止の観点から、電力専用ではなく音声や画像まで含めた次世代ネットワークNGN(Next Generation Network)等の汎用(はんよう)ネットワークを適用する場合には、基幹系の電力流通システムへのサイバー攻撃を防ぐための頑強なセキュリティ維持手段が不可欠である。

5. む す び

21世紀の電力系統の新たな課題に対し、電力流通の解決策を最新技術とともに述べた。制御面から見た実質的な電源特性の変化、経年変電機器の増加による設備不具合リスクを含んだ中で、更なる電力流通の効率化、環境負荷低減機器への更新、電力系統の運用と保全を融合する電力流通システムについて述べた。当社は、今後も低炭素社会の最重要インフラである21世紀の電力流通に向けて、ハードウェア・ソフトウェア両面からのベストミックスによる環境性、機能性、経済性を追及した製品開発に邁進(まいしん)していく所存である。

参 考 文 献

- (1) 低炭素電力供給システムの構築に向けて：資源エネルギー庁，研究会報告書（2009）
<http://www.meti.go.jp/report/data/g90727ej.html>