

## 特集

## エネルギーの長距離輸送

## 電気の形態での輸送

## Energy Transmission by Electric Power

一 原 嘉 昭\*

Yoshiaki Ichihara

## 1. まえがき

電力需要は堅調な伸びを示しており、今後ともこの傾向は続くと思われている。これに対して電源立地はますます困難化しており、電源は需要の中心から遠隔地に開発されることが多い。

このため電力輸送については長距離、大容量の送電が必要となってきており、このための技術開発も多方面で積極的に推進されている。

将来、分散型電源が導入された場合を想定しても、電力の大半は集中型大電源によって賄われると考えられるため、長距離大容量送電技術は電力輸送システムの発展を支えるキーテクノロジーであると考えられる。

## 2. 電力輸送システムのあゆみ

2.1 送電方式のなごれ<sup>1), 2)</sup>

わが国初の電気事業者である東京電燈は、1887年米国エジソン社製の25kWのエジソンダイナモを設置し、周辺のお客さまに直流210Vで送電を開始した。

そのころ米国では、ウェスティングハウス社はスタンレーの発明した変圧器を用いて広い範囲に電力を供給できる交流送電を1886年に開始した。

これを契機に米国において、いわゆる交直論争が盛んに行われたが、1897年ウェスティングハウス社によりナイアガラ水力発電所(5,000馬力, 3相交流発電機, 2機)から35km離れたバッファローへ3相交流送電が開始されたことで、長距離送電方式としての多相交流方式の優位性が決定的に認められた。

交流周波数としては、世界各地で20から100Hzのさまざまな方式が試みられたが、電磁気理論が十分確立していなかったころでもあり、経験的な積み上げによって後には50Hzか60Hzが大勢を占めるようになった。

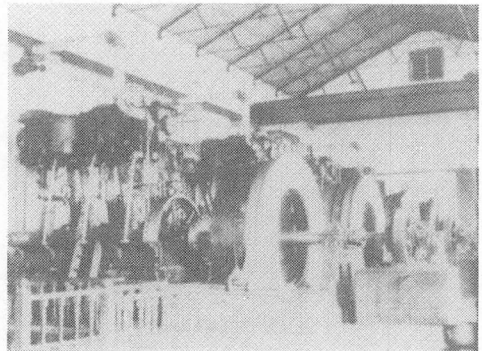


図-1 ドイツ・アルゲマイネ社製3相交流発電機

さて、東京電燈においても、その後の営業規模の拡大に伴い、1895年に大容量集中火力発電所を浅草に設置し、直流方式からより広範囲に電力を供給できる3相交流方式に切り換えた。このとき導入された発電機の一部はドイツ・アルゲマイネ社の3相50Hz機(図-1)であった。その後の拡張も同社の50Hz機を中心に行われ、東日本で50Hzが使われるもとなった。

一方、わが国で二番目に電気事業を開始した大阪電燈は、1892年米国トムソン・ハウストン社製の125Hzの発電機を導入したが、その後の拡張はGE社製の3相60Hz機を中心に行われ、西日本で60Hzが使用されるもとなった。

その後、送電網の拡大によって連系、接続が進むと、周波数統一の不便が痛感されるようになり、地域毎には周波数統一が進められた。しかし、全国的に見れば、50Hz、60Hz両建てのまま拡大、発展を遂げた東西の電力系統は、何回も周波数統一の提案がなされたものの、現実の困難さから実施の動きとはならず現在に至っている。ところが、1965年に設置された佐久間周波数変換所によって、両系統は直流を介する形態で連系された。更に、1979年に北海道・本州間の連系が直流送電(全長167km, 直流電圧250kV, 容量15万kW)によって実現され、これによって北海道から九

\*東京電力(株)技術開発本部開発計画部長  
〒100 東京都千代田区内幸町1-1-3

州に至る系統連系が達成された。

このように、黎明期の一般送配電分野において、直流送電は、交流送電にその地位を譲ったが、水銀整流器やそれに続く半導体電力変換器の登場は、直流送電の復活や周波数変換など新たな応用の道を開いた。

ところで、商用周波数（50、60Hz）よりも高い周波数で電力輸送システムを構成することも検討されている。この場合、回転機の高速度化や鉄心をもつ機器の小形化、蛍光灯等の高性能化が利点としてあげられる。実際、機器の小形化軽量化が重要となる航空機内では400Hzで電力が供給されている。

400Hz程度の周波数を長距離の電力輸送システムにおいて採用すると、損失が増大すると共に安定度も低下するため適さない。しかし、分散電源等と組み合わせて、限定されたエリアで電力供給を行うことは技術的に不可能ではなく、これらに関する検討も行われている。

交流回路において周波数が同じで位相の異なる起電力が存在する回路を多相系と呼んでいる。その中でも各相起電力の大きさがそれぞれ等しく、かつ隣り合う各相起電力の位相差が等しいものを対称多相系という。

現在、電力輸送システムに用いられているのは、直流送電を除けば相電圧の位相が120度づつ異なる3相方式である。これに対して相電圧の位相が60度づつことなる6相方式が提案されている（他の多相も原理的には同じ）。

6相方式にした場合、従来の3相方式に比べ相間電圧が $1/\sqrt{3}$ となるため相間距離の縮小化、電線の表面電界の低下によるコロナ雑音の低減等が、回転機ではより良質な回転磁界が得られるためトルクの高品位化等が期待できる反面、変圧器等の静止器では巻線の構造が複雑化するために、千鳥、フォーク結線変圧器等と同様に機器が大型化する問題点もある<sup>3)</sup>。

6相送電の実現は原理的にはそれほど困難なものではないが、送電システムにとって拡張性は非常に重要な問題であることから、3相送電が確立している現状では実行困難と考えられること、更に我国では信頼性確保のため原則として送電線が2回線構成となっており、同じ6本の線を用いる送電としての優位性は問題があると考えられること等、問題点も多い。

2.2 系統の拡大<sup>4)</sup>

やがて、日露戦争後の工業の発展と石炭の高騰により水力発電が魅力あるものとなり、競ってより大規模の水力発電の開発が行われ、消費地までの長距離送電

線が建設された。

1907年に運転が開始された東京電燈の駒橋発電所（15MW）の発電電力を、東京の早稲田変電所までの間の75kmを55kV送電線により送電したのがわが国における大容量水力発電および長距離送電の始まりである。

更に、1914年には猪苗代第一発電所が一部竣工し、猪苗代・田端間に225km、115kV送電という当時としては世界でも有数の長距離高電圧送電が実現した。

この後、電力需要の急激な増加に伴い、山岳地帯の大規模水力発電所から都市部へ送電する154kV長距離送電線が次々と建設され、1930年頃には本州中央部の154kV送電網が構築された。

当時の高電圧送電線の建設を通して絶縁設計、耐電設計の検討や鉄塔、がいし、電線などの各要素技術について輸入技術の国産化をめざして活発な研究開発が成され、技術課題の克服と国産技術の急速な進歩が達成された。

このように電力系統の発展に伴い、系統構成も複雑化の一途を辿ったが、系統に併設された多数の同期発電機が安定に運転するためには、系統内の故障や負荷変化に対しても一定の相差角を保つことが必要である。この同期運転を維持できる割合を安定度とよぶ。

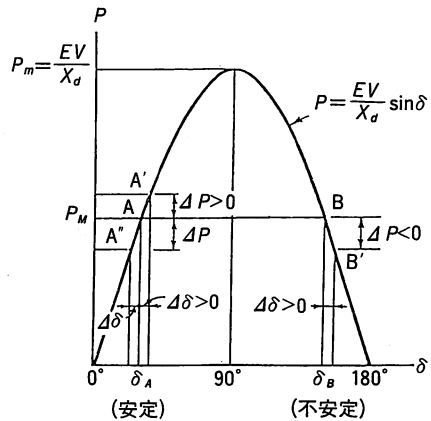


図-2 相差角と送電可能電力の関係

同期発電機の送電可能電力 $P_m$ は、図-2に示すように負荷との相差角を $\delta$ とすると $\sin \delta$ に比例し、発電機と送電線のリアクタンスの和に反比例し、 $\delta$ が90度を越えると不安定領域に入る。従って、送電線のリアクタンスが増大すると同一電力を送電した場合でも $\delta$ は大きくなり、系統の僅かな擾乱によっても不安定

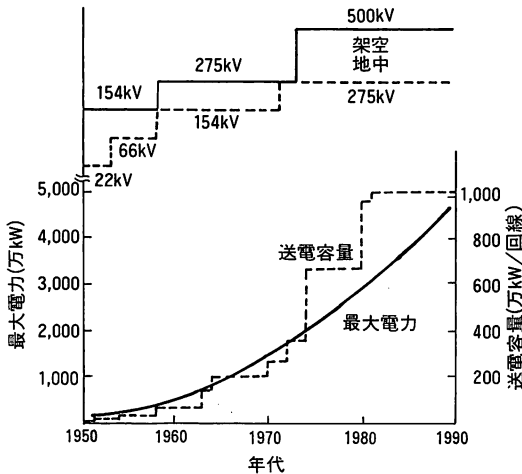


図-3 送電容量の拡大と送電電圧の高電圧化

領域に達して同期運転を維持できなくなる（この現象を脱調と呼ぶ）。

この安定度の問題を解決し、一層の大容量化を図るために1952年には275kV 新北陸幹線の運用が開始された。このように電力需要の増加に伴い、送電電圧を高電圧化することにより、送電容量の増大と安定度の確保を図ってきた。

図-3に1951年に東京電力が発足してからの最大電力の伸びと、送電電圧の変遷を示す。1951年には166.5万kWであった最大電力は、現在では約5,000万kWと約30倍になっている。それに応じて送電電圧は154kVから275kV、500kVとなり、やがては1000kVを採用する計画である。

現在の電力系統の一例として図-4に東京電力の送電系統図を示す。大容量送電線には電圧50万Vが採用されており系統の骨格を形成している。電圧階級としては50万Vの他に27万5千V、15万4千V、6万6千V等が送電電圧として用いられており、ネットワークを形成している。電源は立地難から遠隔化の傾向が進んでおり、首都圏を取り囲むループ系統に遠隔地の発電力を接続する構成となっている。

このように、電気エネルギーは貯蔵が困難であるため、他のエネルギーシステムと比較して輸送ネットワークが発達している。

また、他のエネルギー形態での輸送と比較すると、例えばガスとの対比では、世界最大級の送電線（500kV、TACSR1520cm<sup>2</sup>×4導体）が約413×10<sup>9</sup>kcal/日であるのに対して<sup>5)</sup>、世界最大級のガスパイプライン（500万m<sup>3</sup>/日）が約48×10<sup>9</sup>kcal/日であり<sup>6)</sup>、

エネルギー輸送能力の面で、電力はガスより1桁程度上回っていることがわかる。

加えて、エネルギー輸送システムの保安性、制御容易性等も重要な機能であり、電力輸送システムはこれらの面で優れているために今日のネットワークを構築するに至ったと考えられる。

更に、首都圏で消費されるエネルギーにおける電力と都市ガスの比率は約8対1となっており<sup>7)</sup>、電力は現状では最も優れたエネルギー輸送手段の1つであると考えられる。

### 3. 大容量長距離電力輸送システムの特徴と技術課題<sup>8)</sup>

#### 3.1 長距離交流送電の特徴と技術課題

長距離交流送電は、距離が長くなるほど送電線の誘導性リアクタンス分が大きくなり、系統安定度の問題から送電容量が制限される。これによって、大電力を送るための技術的方策として、以下の項目を挙げることができる。

- 送電系統の誘導性リアクタンスの低減（上位送電電圧の導入、送電線・変圧器の増強など）
- 発電機入出力の制御（速応励磁やPSSの導入など）
- 非同期連系（直流連系）

わが国の電力系統においては、長距離大容量送電にともなう安定度の低下と、これを防止するために行う系統構成のグリッド化による短絡容量の増加という2つの問題を解決するために、先に述べたように上位送電電圧の導入を進めてきている。

一方、交流送電特有の安定度の問題を回避することができる直流送電に関する検討も進められている。

#### 3.2 UHV交流送電<sup>9)</sup>

UHV交流送電については従来の500kV送電線までの技術の単なる延長では解決できない課題も多く存在している。UHV交流送電は公称電圧1000kVという高電圧で運転されるため、機器の大型化とともに系統に発生する過電圧や充電電流の増加が問題となる。

これに対して、機器のコンパクト化・コストダウンと系統信頼度の確保を両立させるためには、系統設備全体に渡る合理的な絶縁協調が必要である。

(1) 充電容量対策 UHV交流送電においては500kV送電線に比べ約4.2倍という格段に大きな充電容量を有している。この充電容量を抑制し電圧を適正に維持するためには、分路リアクトルを系統上、適切

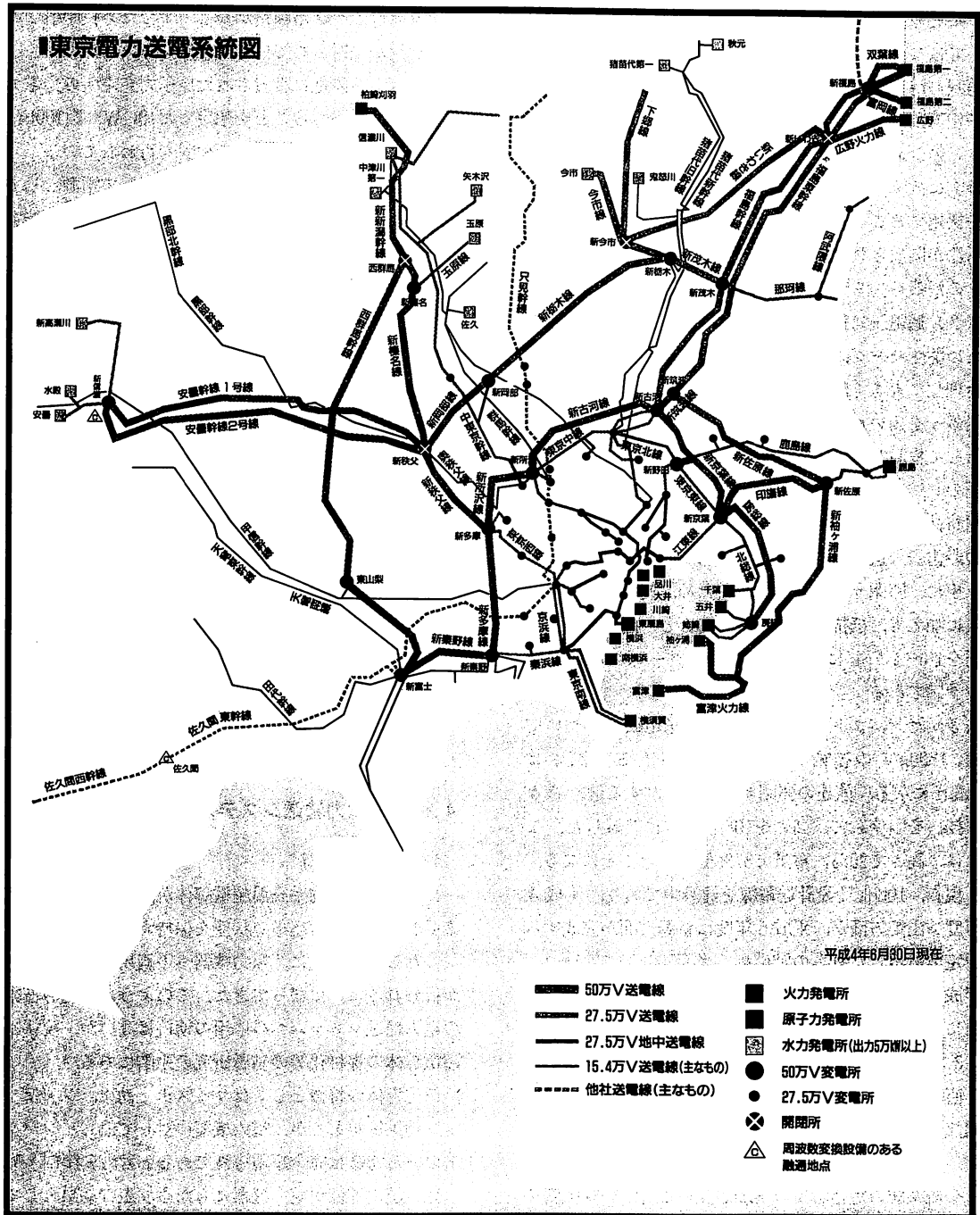


図-4 東京電力送電系統図

な位置に接続して補償に用いることが有効である。

また充電容量の増大に対してUHV交流送電線の信頼度を確保するためには、高速度多相再閉路技術の確立が必要である。UHV送電線では相間の静電容量が大きく電圧も高いため、雷によるアーク発生時に故障

相の両端の遮断器を開いても健全相からの静電誘導により事故点に二次アーク電流が流れ続け約4秒程度継続すると推定されている。このため、通常275kV、500kV系統で用いられている高速度多相再閉路方式の採用ができない。

系統運用上、基幹系統のルート事故は極力回避しなくてはならず故障相のみを約1秒間開放して、アーク消滅を待って再投入し、安定な送電を継続する高速度多相再開路方式は必要不可欠である。

このため二次アーク継続時間を1秒程度以下とし、確実に故障除去を行うために新しく高速自動接地方式を採用することとしている。これは故障相の両端の遮断器が開放された段階でその故障相を接地して二次アークの消弧を図る方式である。

(2) 過電圧対策 UHV送電においては高電圧のため開閉サージ、雷サージ等の過電圧の抑制は絶縁の合理化に大きく関わっている。これについては酸化亜鉛素子を用いた制限電圧の低い高性能避雷器をベースとして検討している。高性能避雷器については制限電圧のレベルを現行のJEC規格による500kV用避雷器特性の延長に対して約60%まで大幅に低減する性能の避雷器の適用見通しが得られている。

更に、開閉サージを低減するため、遮断器の抵抗投入に加えて、抵抗遮断を行うこととし、開閉サージ電圧を1.6~1.7puに抑制し、これをベースに設計を行う予定である。

(3) コンパクト化 1000kVの送電鉄塔については、500kVの技術をそのまま適用すると高さは143mになる。前述の開閉サージを抑制する他、様々な技術を駆使して、高さを108mまでに低減した。これは、高さで25%、重量で37%低減したことになる。

現在、1000kV設計送電線を建設中であり、平成4年度に山梨方面が、平成5年度に新潟方面が完成する予定である。これらの設備は、当面500kVで運転し、平成10年代前半に1000kVに昇圧する予定である。これに備え、機器の検証を計画しているところである。

### 3.3 UHV直流送電<sup>10)</sup>

直流送電には交流送電に比べて、安定度問題、充電電流、交流損失(表皮効果、誘電損)が存在しないこと、非同期、異周波数系統の連系でき直流で連系される交流系統の短絡容量の増加がないこと、絶縁強度を小さくできること等の利点がある。

反面、直流系統の両端に交直変換装置が必要であること、大容量直流遮断器が実用化されていないため直流分岐が困難で系統構成の自由度が低いこと等の問題点もある。

このように、交直変換所建設にかかる費用が高価であるが、充電電流が存在しないことから海底ケーブルによる送電を必要とする場合等では利点が多い。更

に、交流に比べ送電線路が安価ですむため長距離送電への適用が検討されている。

例えば、遠隔地に設置された原子力発電所の発電力を需要地に送電することを想定した10GW、数100kmのUHV直流送電線に関する検討も行われている。

その結果、直流送電線路の故障に対して電源として想定した原子力発電所、直流系統とも安定運転可能であり、発電機・タービン軸系と直流系統の相互作用による軸ねじれ共振現象も直流系統の制御系により対処可能ということが判明した。大容量交直変換所の実現も技術的には可能であり、直流送電線の環境対策も特に問題ないとされている。

総合評価としては、信頼度についてUHV交流送電とはほぼ同程度となる見通しが得られており、経済的にも送電距離が300kmでUHV交流送電と同程度、500kmでは直流送電が有利という試算結果が得られている。

現在、日本国内では、佐久間、新信濃の両周波数変換所および北海道・本州連系線において直流送電が採用されている。また、諸外国では長距離大容量送電に直流送電を採用している例が多くみられる。

このような状況から、21世紀にはUHV交流送電に加えて長距離直流送電が登場するものと予想される。

## 4. 将来の電力輸送システムにおける新技術

### 4.1 超電導技術<sup>11)</sup>

1986年に酸化物系高温超電導体が発見され、液体窒素温度レベルでも超電導状態を保持することが可能になったことを契機に、電力機器への適用に関する検討が行われるようになってきた。このように超電導技術の電力輸送システムへの応用の期待は高いが、現状は超電導体の線材化等の基礎研究の段階にある。

超電導体の特徴としてはマイスナー効果、ジョセフソン効果等があるが、電力機器に対して最もインパクトのある特徴は完全超電導性であると考えられている。

完全超電導性が電力機器にもたらす主な効果としては、損失減少による効率向上、抵抗発熱減少によるコンパクト化、大電流通電による大容量化、永久電流による電力貯蔵等をあげることができる。

そこで、電力輸送システムに大きなインパクトを与えると期待される超電導ケーブルおよび超電導電力貯蔵システム(SMES)について紹介する。

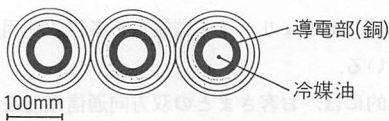
超電導ケーブルでは、電流密度を非常に大きくとれること、抵抗発熱による温度上昇がないこと等からコ

コンパクトなケーブルを用いた低電圧での大容量送電が技術的に可能となると考えられている。しかし、交流送電とした場合は、酸化物超電導体の磁氣的性質によりヒステリシス損失等を生ずるため無損失とはならず、低交流損失化を可能とするため方式も検討されている。

一般に超電導ケーブルは冷却設備等を一定区間毎に設置する必要があるため、UHV送電のような長距離大容量送電に用いるのではなく、大都市供給用大容量地中送電線路（特に既設管路の有効利用）への適用が想定されている。

図-5 (a) に送電容量100万 kW の大容量ケーブルを従来の内部油冷ケーブル、(b) にヘリウム冷却の低温超電導ケーブル、(c) に窒素冷却の高温超電導ケーブルで構成した場合の概念図を示す。

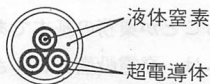
内部油冷ケーブルの送電電圧は275kV である。これに対して、超電導ケーブル2種の送電電圧は66kV



(a)内部油冷ケーブル(275KV, 1,000MW)



(b)超電導ケーブル (66KV, 1,000MW液体ヘリウム冷却)



(c)超電導ケーブル (66KV, 1,000MW液体窒素冷却)

図-5 従来ケーブルと超電導ケーブルの概念図

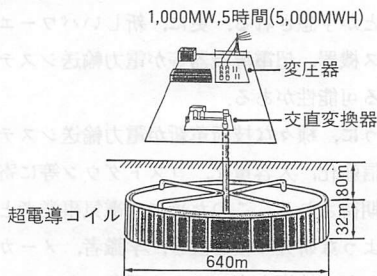


図-6 5 GWh・SMESの概念図

で100万 kW の送電容量が得られる。高温超電導ケーブルは、低温超電導ケーブルに比べて断熱構造が簡潔で、液体窒素の絶縁耐力が液体ヘリウムに比べて高いために大幅なコンパクト化が達成されていることがわかる。

一方、超電導コイルに直流電流を流すといつまでも流れ続け、エネルギー貯蔵が可能となる。この現象を利用したエネルギー貯蔵装置がSMESである。

図-6に貯蔵容量5 GWhのSMESの概念図を示す。SMESは、貯蔵効率が90%程度と高い、応答速度が極めて早い、有効・無効電力が独立に制御可能であるなどの特徴をもつ。この特徴を利用して系統安定度向上のためにSMESを用いることが検討されている。長距離送電線を模擬した実験では、SMESを用いることにより送電電力の安定限界が大きく改善されたというシミュレーション結果も報告されている。

しかし、図-6に示す大型のSMESでは、大電流を流すためコイルに大きな電磁力が働くのでコイルを地下の岩盤等の堅固な構造物で支持することが必要であるため建設費が膨大になる等、実用化に際して解決すべき課題も多い。

#### 4.2 パワーエレクトロニクスの技術<sup>2)</sup>

近年の半導体電力変換素子の大容量化、スイッチング速度の高速化に伴い、直交変換装置、静止形無効電力補償装置 (SVC) や可変速揚水発電などパワーエレクトロニクス技術を駆使した電力機器が着実に電力系統に取り入れられてきており、電力輸送システムの安定運用等に寄与している。

米国の電力研究所 (EPRI) では、これらパワーエレクトロニクス技術を用いて電力輸送システムの能力を飛躍的に増大しようとする「フレキシブル交流送電系統 (FACTS) 構想」を打ち出し、実現のための技術開発を進めており注目されている。

FACTS構想は、図-7に示すように個々のFACTS機器 (パワーエレクトロニクス技術を利用した電力機器) を送電系統の各所に分散配置し、これらをシステムとして高速度で協調制御するものである。

FACTS機器としてはSVCの他に、サイリスタ遮断器 (サイリスタを用いた高速遮断器)、位相調整装置 (送電線の位相制御装置)、モジュール方式直列コンデンサ・リアクトル、故障電流制限装置 (インピーダンス制御による故障電流制御) などがある。

これらの個別機器について現在技術開発中だが、この構想を実現させるためには高電圧・大電流対応素子

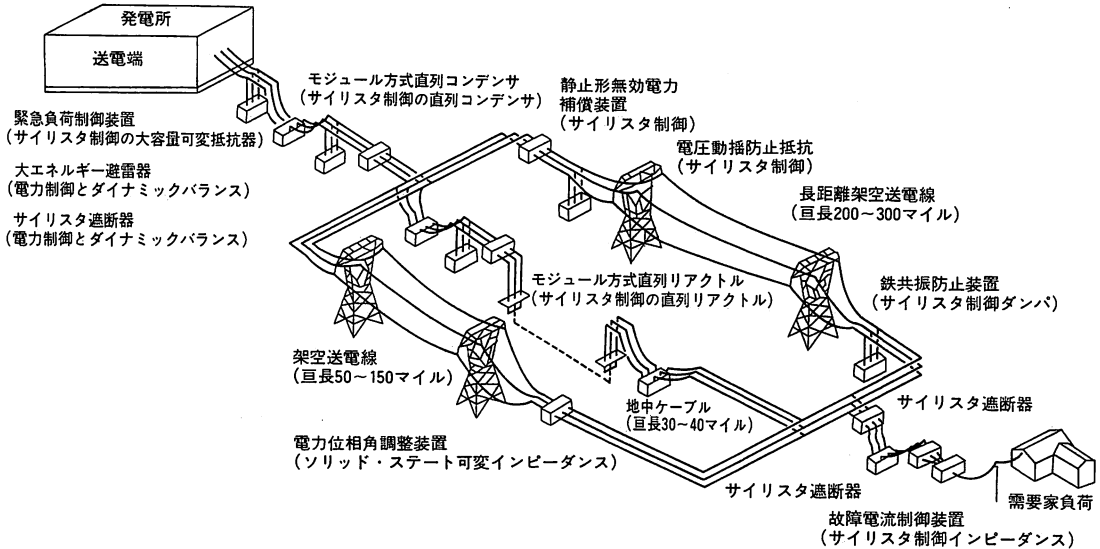


図-7 FACTS構想の概念図

の開発が必要であり、転流回路を必要としないGTOサイリスタのような自己消弧型デバイスの一層の高電圧・大容量化が望まれる。

日本のパワーエレクトロニクス技術は世界でも最高水準にあり、FACTS構想の実現に対する日本の役割は大きいものと考えられる。また、これらハードウェアの開発とともに、信頼性の高い制御ソフトウェア、通信システムの技術の確立も重要である。

#### 4.3 情報通信技術<sup>10)</sup>

電力輸送システムの高い信頼度を保ちながら、その能力を最大限に発揮させるためには、多くの測定点から得られる情報を瞬時に処理・判断して運転・制御を行うことが必要であり、情報通信技術はこれらを支える基盤技術である。

これら膨大な情報から電力輸送システムの状態を迅速・的確に判断するためにAI、ニューラルネット等最新の情報処理技術を駆使した各種支援システムの開発が進められている。

加えて、光ファイバー複合架空地線、電力線搬送等に見られるように、電力輸送ネットワークには情報通信機能を付加させることが可能であり、各種情報処理系に正確な情報を高速に伝送する高速・大容量の情報通信ネットワークが構築されつつある。

更に、これらの情報通信ネットワークを利用して電力輸送システムの終端であるお客さまにより高度なサービスを提供する「お客さまサービスシステム」の開発に取り組んでいる。このシステムは、自動検針、各種

情報提供、セキュリティ監視など多目的利用が考えられている。

将来的には、お客さまとの双方向通信機能を発展させて、お客さまにより多様な電気の利用法に関する情報を提供するとともに、お客さまのニーズに適したメニューを選択いただき、負荷平準化やエネルギーの有効利用に役立てることも期待される。

#### 5. むすび

電気エネルギーは、その利便性から今後とも着実に需要を拡大していくものと考えられる。電気事業者はお客さまが必要とする電気を必要とする時に、いつでも十分にお届けすることが業務の基本である。

電力輸送システムは、発電設備とお客さまを結ぶ架け橋であり、需要の増加や電源の遠隔化とともに長距離大容量化の道を辿ってきた。これらの過程で、多くの技術革新が電力輸送システムの発展を支えてきた。

21世紀には、UHV交流送電、長距離直流送電が登場することが予想される。更に、新しいパワーエレクトロニクス機器、超電導機器等が電力輸送システムに導入される可能性がある。

このように、様々な技術革新が電力輸送システムの一層の高信頼化、大容量化、コストダウン等に寄与するものと期待される。このために、電気事業者としては、このような研究の核を置き、学識者、メーカー等と協力しながら技術を育てていく所存である。

## 文 献

- 1) 渡辺;「東京における明治期の発電所」, 電気学会電気技術史研究会資料, HEE-92-2(平4-8)
- 2) 一原;「電力系統の周波数問題百年の移り変わり」, エネルギーレビュー(昭63-1)
- 3) 東京電力編;「東京電力三十年史」(昭58-3)
- 4) 高橋他;「6相送電の定常特性」, 電気学会論文誌, 102B, No.4, (昭57-4)
- 5) 堀越他;「電力輸送設備の性能向上」電気学会雑誌, 112, No.8(平4-8)
- 6) 石油公団編;「天然ガス関係資料(1990年度版)」(平3)
- 7) 東京通産局監修;「電気・ガス事業統計」(平3-10)
- 8) 関根編;「大学課程・送配電工学」, オーム社, (平2-8)
- 9) 三井;「高電圧技術の過去と将来」, 電気学会雑誌, 112, No.5, (平4-5)
- 10) 桜井他;「電源と直流送電系統との協調制御方式について」, 電気学会電力技術研究会資料, PE-81-61(昭56-7)
- 11) T. Mitsui; "Prospects for Application of Super conductivity - Application to Electric Power System -", Proc. of ISS'88(1988-8)
- 12) N. G. Hingorani; "Network Access and the Future of Power Transmission", EPRI Journal(1986-5)
- 13) 鶴沢他;「お客さまサービスシステムにおける自動検針システム」, 電気学会通信研究会資料, CMN-88-221(昭63-7)

## 共催行事ごあんない

## 第31回原子力総合シンポジウム 開催について(案)

と き 1993年2月15日(月) 9:30~18:00

と ころ 学士会館本館(202会議室, 210会議室)

(東京都千代田区神田錦町3-28, ☎03-3292-5931)

**開催趣旨** 原子力関連学協会の共同主催により, 21世紀を前にますます広領域化しつつある原子力研究関連の各専門分野の研究者—技術者間および学界—産業界間の知識と情報の交換・普及を図ると共に, 単に専門家に対してのみならず, 一般社会に対しても, 原子力研究の現状, 展望を含め, 原子力界が直面している問題点を提示し, 理解することを目的として本シンポジウムを開催する。

**予稿集** 1月中旬に作成し, 領布する(予価 2,000円)

**参加費** 共催学協会会員 2,000円(非会員 3,000円)  
学生 1,000円(当日受付)

**運 営** 「原子力総合シンポジウム」運営委員会事務局

〒105 東京都港区新橋1-1-13(東新ビル)

(社)日本原子力学会内 TEL 03-3508-1261, FAX 03-3581-6128