超電導技術の電力システムへの適用について

解説

正 員 原 築 志 [東京電力(株)技術研究所]

1. はじめに

電気は産業の血液といわれて、産業を支える要となってきた。産業のみならず、快適な生活を支える重要な要素として、電気への期待は、今後ますます高くなることが予想される。1992年夏季の東京電力の最大電力は5,410万kWとなり、今後も堅調な電力需要の伸びが予想されていることから、これが裏付けられる。このような状況を反映して、電力システムも大規模・重潮流化する傾向にあり、電気事業では新しい技術を導入しつつ将来とも安価で信頼性のある電力供給を続けるよう努力している。超電導技術は、このようなニーズにこたえて電力システムを飛躍的に高性能化するポテンシャルを有しており、電力システム用の機器の積極的な技術開発が行われている。

超電導の研究開発は、1911年にライデン大学のカメルン・オンネスにより水銀の超電導が発見されたことに始まる。超電導現象は、ある温度（臨界温度）以下で電気抵抗が零となる特異な現象であるが、この臨界温度は、その後約70年間に20度程度しか上がらなかった。この間、NbTi金属系超電導体の発見など多くの成果があったが、臨界温度が上がらなかったために、冷媒は高価で取り扱いの難しい液体ヘリウムが用いられてきた。1986年、IBMチューリッヒ研究所のペドノルツ、ミュラー両博士により35K付近から電気抵抗が減少し始める現象が、ランタン系酸化物で発見⁽¹⁾されたのを契機として、イットリウム、ビスマスなどの新物質、いわゆる高温超電導体が相次いで発見された。イットリウム以降に発見された高温超電導

体は、臨界温度が77Kを超えているため、冷媒として安価で取り扱いが容易な液体窒素を使用できるメリットが大きく、金属系・高温超電導体を問わず、その応用をめざして全世界で“超電導フィーバ”が巻き起った。現在も、金属系・高温両分野で精力的な研究が続けられており、金属系超電導線を使った機器の多くは実用化段階の研究に入っている。高温超電導体は、大きなポテンシャルを背景に実用化を意識した研究開発が行われている。

電力などパワー応用の分野での超電導技術の開発は二つに大別される。一つは、超電導特有の新しい技術を使うことにより、これまでにない革新的な機器が電力システムに生まれる可能性のあることである。超電導の泣きどころである急速な常電導化（クエンチ）を利用した限流器がその代表例である。もう一つは、超電導の無損失性を利用した既存の機器の効率向上や、大電流・高磁界の発生を応用した機器の小型・軽量化である。地中ケーブルのコンパクト化によるコストダウンはその一例である。

本稿ではまず、超電導技術を使うことにより、新しい機器が生まれる可能性があるとともに、既存の機器の高性能化が可能であることを述べる。そして、電気事業として積極的に開発を行っている超電導限流器などの超電導機器について、そのニーズと開発状況について概観することにより、電力分野における超電導応用を展望する。

2. 電力システムと超電導技術

電力システムの構成を図1に示す。発電所において、一次エネルギー源である水力エネルギーや、火力・原子力のもつ熱エネルギーを発電機によって電気エネルギーに変換する。発生した電気エネルギーは変圧器により電圧を高くし、送電線により変電所へ送電し、更に配電線を経由してお客様へ届ける。お客様側では、電動機により機械エネルギーに変換して使用され

Application of Superconductivity Technology to Electric Power Systems.

By: Tsukushi Hara (Engineering Research Center, Tokyo Electric Power Company)

キーワード：超電導、電力系統、超電導限流器、高温超電導ケーブル、超電導発電機、超電導エネルギー貯蔵

図 1 電力システムの構成

図 2 電力システムに超電導技術を適用する考え方

るほか、照明・電熱・情報機器用などに幅広く使用されている。

図2は、このような電力システムに超電導技術を適用する考え方を示している。まず、超電導特有の機能を使った新しい応用から考えていく。超電導の欠点にクエンチがあり、通常の超電導機器では、これをいかに食い止めるかが重要な課題である。しかし、クエンチを使うと、超電導線にある値以上の電流が流れたときに急速に常電導化して電流の流れを止めること（限流）が可能である。そこで、これを積極的に利用して、系統規模の増大に伴って拡大する短絡電流を抑制するのが超電導限流器である。これまで、超電導以外にも様々な原理の限流器が研究されてきた⁽²⁾が、これまで実規模での限流に成功した例はなく、超電導のクエンチを使った限流器が実現の可能性のある限流器

として、最近、世界的に注目を浴びている。

また、超電導技術によりエネルギー貯蔵のための新しい機器を創出する可能性がでてきている。電力設備の年負荷率は60%弱で推移しており、夏季ピーク時の深夜率（夜間の最小需要と昼間ピークとの比）は約40%である。このように、電力需要は大きく季節・昼夜で変動しており、電気エネルギーを他のエネルギーとして蓄え、変動を平準化するためのエネルギー貯蔵に対する電気事業の関心は極めて高く、その研究開発に努めている。無損失の超電導コイルに電気を貯蔵して電力需要の平準化を図ることのできる超電導エネルギー貯蔵装置（SMES）は、超電導ゆえに実現可能な新しい電力機器の一つである。イットリウム系高温超電導体の強い磁界捕捉力（ピンニング力）⁽³⁾を利用すれば、軸受け損をなくするとともに、浮上力も大きいフ

ライホイールができる可能性があるため、新しい電力応用として検討が開始されている⁽⁴⁾。

一方、電力技術者がつねに頭を悩ましてきた問題の一つに、電力機器から発生する熱、すなわち電力損失がある。入口を発電所における機械エネルギーとし、出口をお客様が使用する電動機の機械エネルギーまでとしたシステムを想定した場合、電力損失（抵抗損）の合計は7.8%となる。超電導は、この損失を零にできる可能性をもっている。銅線においては、熱発生のために1mm²あたり1Aのオーダの電気しか流すことができないが、抵抗損ゼロの超電導線を使えば、同じ断面積に、実にその100倍から1万倍の電流を流すことができる。つまり、超電導技術を使えば、発電機や地中ケーブルなど既存の発電送電の機器の効率向上が図られるばかりが、副産物としてコンパクト化・軽量化を達成することが可能となる。

3. 超電導電力機器の展望

次に、超電導限流器、SMES、発電機、ケーブルを対象として、電気事業として超電導電力機器に何を期待して、どのような研究開発を進めているのかを個別に見ていくこととする。

3.1 超電導限流器

電力需要の増大に伴い、系統事故の際の短絡電流は増加傾向にある。そこで、電力会社では、短絡電流が既存の遮断器の定格を超えないよう工夫しながら系統を構成するとともに、短絡電流が特に大きいところでは遮断器を高い定格のものに交換するなどの対策を取っている。そこで、通常運転時には系統を連系でき、事故時には大きなインピーダンスとなって事故電流を抑制できるような限流器を開発することができれば、効率的な設備形成を行い安定送電限界を増加させるとともに、電力供給の信頼度を一層向上させることがで

きる。限流器は世界的にニーズが高く、1991年パリで開催された国際大電力システム会議（CIGRE）でも大きく取り上げられている。

このような電力システムでの高いニーズを背景に、現在までに様々な原理の限流器が提案されてきたが、実規模級の電流抑制に成功した例はない。そこで、東京電力では、超電導のクエンチを積極的に利用した超電導限流器の研究を開始している⁽⁵⁾。

新しい超電導限流器の原理を図3(a)に示す。通常、負荷電流は無誘導に巻かれたトリガコイルを流れる。事故時には、短絡電流によってトリガコイルがクエンチして高いインピーダンスとなり、事故電流を瞬時に抑制する。抑制された事故電流は最終的に限流コイルに転流して限流する。開発した限流器のトリガコイルには、フィラメント径0.13μm、フィラメント数377,982本から構成される素線を36本のより線構造としたNbTi交流超電導線を用いた。このトリガコイルには、連続で1,000A_{rms}の電流を流すことができる。この限流器に、配電用変電所の規模に相当する1,000A_{rms}/6.6kVを印加して限流試験を実施したときの波形が図3(b)である。短絡事故発生と同時に無誘導巻きた二つのトリガコイルの電流値は回路の時定数 L/R に従って急速に上昇し、約80μs後にピーク値2,200Aに達した後、急速に減少している。この限流器がない場合に比較し、短絡電流は約1/30に抑制されたことになる。図4は、この限流器の外観（単相）で、巻線部の高さ60cm、直径27cm、重量約5kgと非常にコンパクトな構成となっている。

このように、新しい超電導限流器は世界に先駆けて、実系統の電圧レベルでの限流試験に成功するとともに、短絡電流の大きさや位相にかかわらず安定した限流動作を示すことも確認している。このことは、超電導限流器の電力システムへの適用に向け一つの突破

図3 新しい超電導限流器の原理と限流波形

図 4 1,000A_{rms}/6.6kV 級超電導限流器 (東芝製)

口になったと考えている。今後は、トリガコイルの低損失化を図りつつ、連続通電電流を 2,000A_{rms} 以上に上げること、コンパクト化のために必須な高温超電導体を使用したパワーリードの開発、小型高効率冷凍機の開発などを行いつつ、システムとして完成させていく予定である。将来的には、更に 500 kV クラスの基幹系統への適用をめざす予定である。

3.2 超電導エネルギー貯蔵

超電導エネルギー貯蔵装置 (SMES) は、超電導体をコイル状にして、インダクタンス作用によって電気エネルギーを蓄え、必要なときにこれを放出する新しい機器である。1,000 MW の電力を 5 時間蓄えることのできる、貯蔵容量が 5,000 MWh の SMES の場合、コイルの直径が 640 m と相当大きなものになる。

このように、SMES は本来のニーズからは、デリーの運用を目指す大規模エネルギー貯蔵が望ましいと考えられる。しかし、現状の技術レベルや立地上の課題からみて、当面の開発規模としては、瞬動性能の活用による変動負荷対策などの付加価値も期待する中小規模の多目的型 SMES が現実的であると思われる。そこで、開発ステップはコイルの部分モデルなどの要素技術開発をバランスよく行い、その後、100 kWh 級の小規模パイロットプラントの試作・運転試験を実施するといった着実な開発を行うべきである。電力としてのニーズからの仕様例としては、100 kWh 級の場合、 ± 20 MW、周期 20 秒程度の変動負荷に追従可能とすると、 $V_{\max}=2$ kV、 $I_{\max}=30$ kA、 $B_{\max}=6$ T、 $dI/dt=2$ kA/s、 $dB/dt=0.4$ T/s、インダクタンス=1 H

図 5 超電導発電機の構造

程度となるが、系統の安定化の機能を付加する場合には $I_{\max}=60$ kA、 $dI/dt=5\sim 6$ kA/s の性能が必要となる。

現在、この考え方にたった国レベルの開発が(財)国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) を中心にして開始されている。また東北、中部、関西、九州、電源開発の電力各社が数 MJ 級 SMES の開発などを行っている。開発に際して最も重要な着眼点は、クエンチに強い信頼性ある導体方式の開発である。その他の重要な開発課題としては、変換器のための大容量 GTO (4.5 kV/1.5 kA 級) 素子ならびにこれの直並列方式の開発、永久電流スイッチ、直流遮断器、クエンチ保護などで、これらをバランス良く開発して効率的な開発を行うことが望まれる。なお、クエンチについては、外乱に対して安定性が高く交流損失が少ない超電導体の設計、冷却方式を開発することが重要であり、この面から東京電力も独自の研究を行っている。

3.3 発電機

超電導発電機の構造を示したのが図 5 である。発電機は、磁界を発生する回転子と、この磁界を使って電磁誘導により電圧を発生する固定子で構成される。超電導発電機の基本構造は通常の発電機と何ら変えることはないが、回転子に巻かれた界磁巻線が銅線から超電導線に変っているため、回転子内部を真空にして液体ヘリウム温度に冷やす「魔法瓶」の構造とする必要がある。また、回転軸を通して液体ヘリウムを供給するシステムを構築する必要がある。

超電導発電機は界磁巻線に超電導線を用いるので、全体としての効率を 0.5% 程度向上させることができる。そこで、1,000 MW の超電導発電機 1 台あたり、年間およそ 6 億円に相当する省エネルギーとなる。

また、超電導線を使用することにより、大きな界磁電流で高い磁界を発生できるために、電機子巻線の位置につくる磁束が現用機に比べて大きく、同じ端子電圧であれば電機子巻線の起磁力が相対的に小さくなって電機子反作用が小さくなる。このため、発電機と同

期リアクタンスが減少し、定態安定度や系統電圧維持能力が向上する。試算によれば、限界送電電力が1.7倍程度増加する。電機子の鉄心の加熱の問題がなくなるので、進相運転領域が広がり、安定運転性能が向上する。なお、通常の発電機と比較して、寸法、重量とも約50%にすることができるが、発電所における発電機の占める面積は5%以下なので、コンパクト化の効果はさほどでもない。

このように、発電機を超電導化することにより、省エネルギーのメリットが得られるとともに、発電機リアクタンスの減少を有効に活用して、限界送電電力を大きくするなど、安定運転性能の向上に期待したいところである。

超電導発電機の開発については、アメリカ、ドイツ、フランス、旧ソ連など各国で、鋭意開発が進められてきた。日本においても電力会社、関連メーカなど16法人が参加する超電導発電関連機器・材料技術研究組合（Super-GM）が、1987年に通産省（MITI）のご指導・ご支援のもと設立された。既に、超速応励磁型1種類、低速応励磁型2種類の導体試作、界磁巻線の部分モデル試験などが行われ、今後は70 MW級モデル超電導発電機の開発、運転試験を行うことを予定している。その成果は200 MWパイロット機に反映され、実用化技術として完成させることを目標としている。また、京都大学・関西電力では、100 kVAの超速応超電導発電機の開発を行っている⁽⁶⁾。

なお、実系統の導入にあたっては、過渡安定度の向上を図るための速応励磁方式の開発や、超電導機と現用機の併用運転の際の発電機間の横流や安定度の効果の差異⁽⁷⁾など、実系統導入時の問題を十分つめておく必要がある。

3.4 地中ケーブル

通常の地中ケーブルでは温度上昇により電流容量が制限されているが、これに超電導体を用いるとその制約がなくなるので、電流容量を大きくすることができる。従って、高い電圧とする必要がないので、1,000 MW級の大容量を送電する場合でも、66 kVクラスの低電圧で送電が可能である。

図6は、1,000 MWを送電するための各種ケーブルの断面図を示している。一番上は液体ヘリウム冷却の金属系超電導ケーブルである。液体ヘリウムの外側にも、熱絶縁のための窒素シールドを設けることになる。中段の高温超電導体を用いた液体窒素冷却ケーブルであると、2段熱絶縁の必要がないで、かなりコンパクトにできている。

従って、高温超電導体を用いた液体窒素冷却ケー

図6 1,000 WM 送電のための各種ケーブルの断面形状

ブルの場合は、現在の管路に布設してある地中ケーブルを取り替えることにより送電容量を増大することが期待できる。同じ容量を送電する下段の内部水冷ケーブルと比較すれば小型化の状況が理解できる。地中ケーブルの場合はこれを収容する洞道や管路の建設費が大きなウェイトを占めるので、小型化のメリットは大きい。

この高温超電導ケーブルを電力システムに適用するとどのようなことになるかについて、モデル系統により検討してみた。高温超電導ケーブルの電流密度は 10^6 A/cm^2 とした。

図7が、そのモデル系統である。上の図面が現状モデルである。500 kV 変電所が都心部から約30 km離れた郊外にあり、この変電所から都心に向けて275 kVで200万kW送電している。今、このシステムにおいて電力需要が増加し、現在の2倍の400万kW送電する必要が生じたと仮定する。年平均の電力需要の増加率が3%程度とすると、需要が2倍となるのは2010年代となる。通常の地中ケーブルであると、内部水冷ケーブルなどを収容する洞道の新設が必要となる。これが高温超電導ケーブルであると、下の図のように66 kVのケーブルで、都心部まで400万kW送電することができる。しかも既設の洞道や管路内に収容することができ、更に途中の変電所も省略することができるので、極めて経済的である。概算値ではあるが、高温超電導ケーブルを用いると通常の地中ケーブ

図 7 高温超電導ケーブル適用検討のためのモデル系統

- ・ビスマス系銀シース線使用
- ・長さ 1.4 m
- ・臨界電流 600 A

図 8 1 m 長高温超電導導体 (住友電工製)

ルの送電コストの 60~70%で済むという結果を得ている⁽⁸⁾。

以上のような高温超電導ケーブルを開発するためには、まず、高温超電導体を用いて長尺線材を作成しなくてはならない。そこで、東京電力では、原理的に長尺化が可能でフレキシビリティを有している銀シース線材を用いたモデル導体の作製・特性評価を開始している。図 8 は、銀シース線 61 本を直径 18 mm の銀のパイプの上に多層に巻きつけて作成した導体である。長さは 1.4 m で約 600 A の電流を流すことができる。今後は、更に長さを伸ばすとともに、1,000 A を超える電流を流せる導体の開発を行う予定としている。

4. おわりに

以上、電力分野における超電導技術の展望について述べてきた。超電導技術は、電力システムの様々な分野に革新的な変化をもたらす可能性を有している。しかし、これまでのほかの技術開発と違って、長い研究期間と大きな研究コストがかかることもまた事実である。このような技術については、本格的な開発に入る

前に技術開発戦略の明確化および可能性研究による効果の評価を十分行い、ニーズの高いものについて効率的な研究を行うことが肝要であることを申し添えておく。
(平成 4 年 9 月 18 日受付)

文 献

- (1) J.G. Bednortz, et al.: "Possible High T_c Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System", *Z. Phys. B-Condensed Matter*, **64**, 189 (1986)
- (2) 原：「超電導限流器の開発の現状」, 低温工学, **26**, 4 (平 3)
- (3) M. Murakami: "Processing of bulk YBaCuO", *Supercond. Sci. Technol.*, **5**, 185 (1992)
- (4) 中村, 他：「8 MWh 級高温超電導浮上式フライホイール電力貯蔵システムの概念設計」, 平成 4 年電気学会全国大会 No. 938
- (5) T. Hara, et al.: "Development of a New 6.6kV/1,500A Superconducting Fault Current Limiter for Electric Power System", *IEEE 92WM 239-4 PWRD* (1992)
- (6) T. Okada, et al.: "Design and Manufacture of Superconducting Generator with High-Response Excitation", *MT-11*, No. ND-04 (1989)
- (7) 仁田, 他：「超電導発電機と従来型発電機との並行運転過渡特性実験」, 電学論 B, **111**, 396 (平 3-4)
- (8) T. Hara, et al.: "Feasibility Study of Compact High- T_c Superconducting Cables", *IEEE 90WM 075-2 PWRD* (1990)
- (9) 向井, 他：「高温超電導体の導体化に関する研究」, 平成 4 年度春季低温工学講演会, D 3-7 (平 4)

原 築 志 (正員)

昭和 29 年 2 月 10 日生。52 年 3 月東京工業大学電子工学科卒業。54 年 3 月同大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月東京電力(株)入社。開発研究所にて直流送電, 多変数制御, 冬季雷観測の研究などに従事の後, 技術研究所電力研究室で超電導の研究に従事, 現在に至る。工学博士。62 年電気学会論文賞, 平成 4 年進歩賞受賞。