

特集

エネルギー・資源の将来展望

超電導発電機と超電導エネルギー貯蔵

Superconducting Generator and Superconducting Energy Storage

岩本 雅民*・中村 史朗**
Masatami Iwamoto, Shiro Nakamura

1. はじめに

超電導現象とは、特定の物質をその物質固有のある温度（臨界温度）以下に冷却するとその電気抵抗が零となる現象であることはよく知られている。1911年、K. Onnes による超電導現象発見以後、この現象を利用してジュール損失のない超電導マグネットを作り、小形で高磁界を発生させようとする試みがなされてきた。1950年代後半に試作マグネットによる数キロガウスの磁界発生に成功して以来、超電導線材の技術的進歩とともに超電導応用技術は発展を遂げてきた。特に、この10年の発展はめざましい。最近の超電導の大形応用の現状を表1に分類した。その応用分野は極めて広範囲にわたっていることが判る。この中の幾つかは既に技術的に目途が得られ実用化域にあるが、現在開発中のものも数多い。これらは超電導にもとづく特性上のメリットや省エネルギーの観点から熱い期待が寄せられているものばかりであり、今後も実用化努力が続くものと予想される。さらに本表以外にも超電導を応用した全く新しいシステムが創出される可能性もある。

超電導発電機は、初の本格的な電力分野への応用として世界的に注目されている。現在の火力、原子力発電に使用されているタービン発電機と比べて超電導界磁巻線を回転子に適用する超電導発電機は、効率向上小形軽量化、大容量化および電力システムの安定度向上などの特長を有し、省エネルギー・省資源、経済上のメリットが大きい。このため、世界各国で研究開発が活発におこなわれている。現在、すでに数10MVA級の試作段階を経て数100MVA級の開発段階に移行しつつある。事実、商用プロトタイプとしての数100MVA級の開発計画がドイツとソ連においてすでにスタートしている。

超電導発電機には Scientific Break Throughを必

表1 超電導の大形応用の現状

分野	機種	用途・目的
発電	核融合	R and D
	MHD	電力
	同期発電機	電力, 防衛
	直流発電機	工業
貯蔵	電力貯蔵	電力
	パルス電源	R and D, 防衛
送電	送電線路	電力
	同期調相機	電力
	系統動揺抑制	電力
	VAR調整	電力
	系統安定化装置	電力
電力応用	直流電動機	製鉄, 船舶, 防衛
	電磁推進	船舶, 防衛
	磁気浮上	交通
	電磁石	R and D
	・磁気分離	鉱業, 水処理, ウラン
	・計測・分析	質量分析, 高分解NMR
	・NMR—CT	医療
・高エネルギー物理	R and D, 医療, 微細加工	

要とするような克服困難な技術課題は存在しないといわれている。しかし新技術・新材料を駆使した新構成の発電機となるために、着実かつ大規模な開発と実証ステップが必要なことは言うまでもない。特に今後の開発課題として最も重要になるのは、構造的信頼性の向上という点と考えられる。この課題に対する解決は実用規模すなわち数100MVA級の実証機の開発と実証運転試験による信頼性の検証であろう。本稿では、電力用超電導発電機の特長と開発の現状ならびに展望を述べる。

さて、超電導のもう一つの電力応用として超電導エネルギー貯蔵がある。インダクタンスLのコイルに電流Iが流れていれば、 $E_m = LI^2/2$ の磁気エネルギーが貯えられている。コイルの両端を短絡しておけば、このエネルギーをいつまでも保持することができる。超電導コイルの抵抗が零のために電流が減衰しないわけであり、これが超電導エネルギー貯蔵の原理である。その応用には、a) 定常電力用と、b) パルス電力用の2つがある。前者は余剰電力貯蔵やピーク負荷電力供給用

* 三菱電機(株) 中央研究所電機技術研究部部長

〒661 尼崎市塚口本町8-1-1

** 三菱電機(株) 中央研究所電機技術研究部主事

で、揚水発電に代替しようとするものである。後者はコンデンサやフライホイールに代替しようとするもので、超電導コイルは大きさ・重量・建設コストの点で有利になる可能性も指摘されている。特に、核融合の分野で必要性が高い。また、最近話題となっているものに超電導エネルギー貯蔵システムを電源とする電力系統安定化装置がある。

本稿では、超電導発電機とともに、これらの超電導エネルギー貯蔵の研究の現状と今後の検討課題にも触れることにする。

2. 超電導発電の原理と構成

超電導発電機の基本構造を図-1に示す。また表2に超電導発電機と従来形の発電機の構成を比較してみた。

これらから明らかなように、発電の原理は従来機と同じであるが、回転子コイルを超電導化することにより極めて強力な磁界を磁性体を用いずに発生させ、それを有効に利用する点が超電導発電機の原理といえる。そのために回転子は全く新しい構造となる。すなわち、超電導コイルを4K(-268℃)程度に保持するために真空断熱構造となり、その内部に液体ヘリウムを循環する回路が備えられたものとなる。また、固定子には常電導巻線を用いるものの、回転子起磁力を有効に利用することから鉄心のない新しい空隙巻線構造が採用される。

3. 超電導発電機の特徴

超電導発電機の利点を図-2に示す。

3.1 大容量化、小型軽量化

発電機出力(KVA)と体格(D²・L)との間には、

$$KVA = K_o \cdot D^2 \cdot L \cdot RPM$$

の関係がある。ここで、K_o:出力係数、D:回転子外

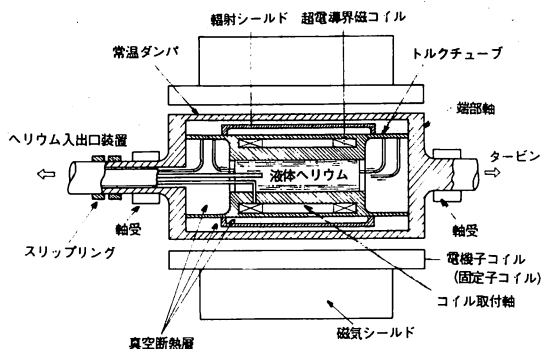


図-1 超電導発電機の基本構造

表2 超電導発電機と従来形発電機の比較¹⁾

		超電導発電機	従来形発電機
回転子	界磁コイル	種類 超電導線	常電導線
		冷却媒体 (温度) 液体ヘリウム (-269℃)	水素ガス (45℃~110℃)
回転子軸	材 料	非磁性鋼	磁性鋼
	構 造	多重円筒 真空断熱構造	単一軸構造
固定子	固定子コイル	種類	常電導線
		構成	細線二重巻
	冷却媒体	水	水
	巻線方式	空隙巻線	鉄心スロット内巻線
固定子コイル外周		磁気シールド (積層けい素鋼板)	鉄心 (積層けい素鋼板)

径、L:固定子鉄心長、RPM:回転数である。出力係数K_oは空隙磁束密度B_gと電気装荷ACの積に比例する量であり、Cを定数として

$$K_o = C \cdot B_g \cdot AC$$

となる。K_oを増大させることは同一定格においては小形軽量化を、同一寸法においては大容量化を意味する。

従来機では、D、LおよびB_gの増大には制約があり、これ迄は主として冷却性能を上げることによりACを増加させてきた。しかし、ACの増加はリアクタンスの増加につながり系統安定度の低下につながるという問題がある。

これに対し回転子に磁性体を用いず固定子も空隙巻

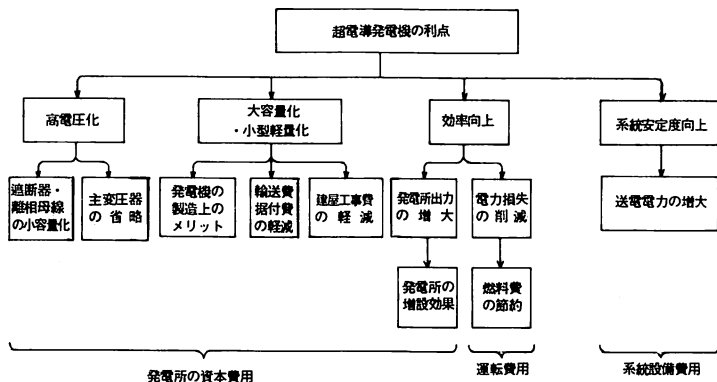


図-2 超電導発電機の利点

線構造となる超電導発電機は、磁気飽和によるBgの制約がなく、超電導界磁コイルの強大な起磁力を有効に利用してBgを大幅に増大することが可能である。リアクタンスはBgに反比例するため、大容量化に伴うリアクタンス増大の問題もなく、単機最大容量限界は拡大する。同一容量の場合には従来機に対し、重量が約50%、軸長が約60%に減少すると試算されている。

3.2 効率の向上

図-3に従来機との損失の比較例を示す。一般に損失は1/2~1/3に減少し、発電機効率は0.5~1%程度向上する。図から明らかのように、回転子銅損は巻線部で零のために極めてわずかとなる。又、漂遊損、鉄損は従来機の約1/2に、軸受損と風損の減少も顕著である。ヘリウム液化機の動力は他の損失に比べ小さく、損失の増加要素とはならない。

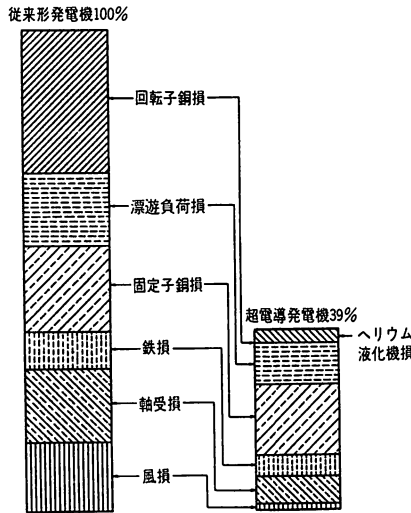


図-3 損失比較 (2極 1,200MVA発電機)¹⁾

3.3 系統安定度の向上

(1) 定態および動態安定度が大幅に向上する。超電導発電機では回転子が非磁性材料で構成されるとともに空隙巻線構造の固定子が採用される。この結果、発電機のリアクタンスが大幅に減少し、いわゆる低リアクタンスの鉄機械となる。また、進相運転域での鉄心端部の加熱による無効電力供給限界の問題も無い。これらは、系統安定度の大幅な向上をもたらす。また過渡安定度についても低リアクタンスのために、慣性定数減少分を差し引いても従来機よりも向上する。

(2) 限界送電電力が増大する。安定度の向上に伴い、系統でのじょう乱が発生した場合でも安定に送電できる電力、いわゆる限界送電電力が増大する。従来

機では動態安定限度界により制限されていたものが、過渡安定限界一杯にまで拡大し、超速応励磁制御をかけない場合でも従来機より20~50%増大する。

(3) 不平衡負荷耐量及びSSR(次同期共振)耐量が増大する。超電導発電機には界磁コイルを変動磁界から遮へいするため、強力な全周・全長ダンパが設けられる。この結果、不平衡負荷に強い回転子となる。またダンパが強力なため、系統から見た回転子の等価抵抗が小さく、系統に補償用直列コンデンサを設ける際に問題となるSSR現象に対する耐量も増加する。

3.4 端子電圧の高電圧化

固定子が空隙巻線構造のために、電気絶縁距離が取り易く端子電圧を高電圧化できる可能性がある。従来機に採用されている絶縁方式を採用した場合で50KV程度まで、ガス絶縁方式で150KV程度まで、また油絶縁方式で500KVから、1,000KVの高電圧化が可能といわれている。この結果、遮断器や離相母線容量の低減、あるいは主変圧器の省略ができる、などの利点が生じる。

3.5 超電導発電機のコスト

超電導発電機の製造コストについては新技術・新材料を採用した新構造の発電機であるのでその予測には困難な面がある。現在、詳細なコスト予測が多くの開発メーカーで成されているところであるが、図-2に示したように、超電導発電機を採用することにより、運転コスト、発電所プラントの資本コスト等に関する経済上の効果が非常に大きいため発電機の製造コストはその分余裕があるという見方が一般的である。現在迄に公表された試算例としては、米国のEPRIの報告⁽²⁾が知られている。

4. 研究開発状況と今後の展望

超電導発電機の研究開発は1970年代になって本格化

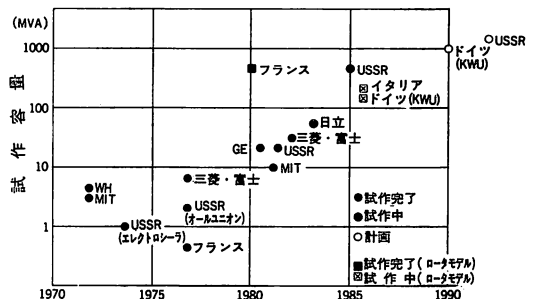


図-4 超電導発電機の開発状況

してきた。現在、世界の主要な国では何らかの研究活動が行なわれている。その中で、実際の試作を伴う大形の研究開発の実施状況を図-4に示す。各国の研究開発には、a)段々と大きな発電機を試作しながら技術開発と実証を行ない、実用規模に到達しようとするスケールアップ方式、b)実用機相当の直径のモデルロータを試作し、その結果を実用機開発に適用するモデルロータ方式の2種類のアプローチがある。前者は米国、ソ連、日本の、後者はドイツ、フランス、イタリアの進め方である。

米国ではMITおよびWH社の3～5 MVA機の試作に続き、MITの10MVA機³¹、GE社の20MVA機³²へと発展してきた。MITの10MVA機は現在組立の最終段階にあり1985年には試験開始の予定である。GE社の20MVA機は完成後、工場内で全負荷試験をすでに完了している。

ソ連でも、すでに20MVA機の開発と試験を完了しており、現在300MW機の製作に着手している³³。

ドイツのKWU社は、1,000MVA機の1990年完成を目指した開発計画³⁴を実施中で、その第1段階として400MVA相当のテストロータを製作中である。

フランスでは、アルストム社がEDFの支援のもと、直径1mの大形モデルロータ³⁵の開発、試験を完了している。現在、250MWの開発計画を検討中である。

我が国では、三菱電機と富士電機が共同で、通産省重要技術開発費補助金の交付を受けて、6MVA発電機³⁶(昭和49年度から3年計画)、30MVA同期調相機³⁷(昭和52年度から5年計画、図-5に外観を示す)の2つの試作研究を実施してきた。これらはいずれも完了時点で世界最大規模のものであり、我が国の研究が世界をリードしてきているということができよう。30 MVA機は大直径回転子、チタン合金材料の適用、スロット・ウエッジによる界磁コイル支持、および閉サイクルの専用ヘリウム冷凍システムの実現など多くの技術課題

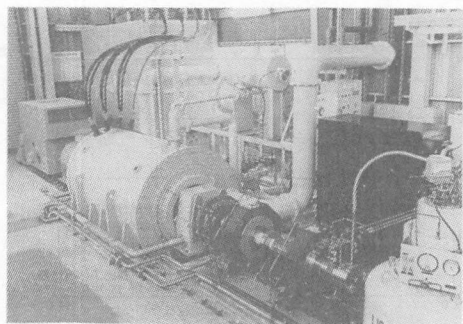


図-5 30MVA超電導同期調相機

を実証した意欲的な研究試作機である。また、日立は50MVA機を試作している¹⁰⁾。

このように内外とも積極的な研究が進められているが、超電導発電機の実用化はこれから正念場を迎えようとしており、今後の開発努力は一層その必要性が高まっている。すなわち、数10MVA級以下の試作段階であったこれまでの研究開発と比べ、今後は実用機と同程度の容量のプロトタイプとしての開発になることは間違いない。この場合最大の技術課題は、信頼性の高い構造の実現と実証にある。当然このための開発努力は、中・小容量機のそれとは比較にならないものとなる。したがって、次世代の商用発電機としての超電導発電機への理解と積極的な支持が大いに期待されるところである。

5. 超電導エネルギー貯蔵

5.1 定常電力用

我が国では概念設計による問題点の摘出と実現可能性の研究に重点が置かれている。メーカーによる本格的な概念設計研究として、①東電・三菱電機の共同による設計例¹¹⁾と、②関電・東芝の共同による設計例¹²⁾がある。

海外の研究では米国のウィスコンシン大学の一連の研究が有名である。彼らは建設コストの低減のために暫新なアイデアを次々に打ち出すとともに、概念設計にとどまらず、一部ハードウェアを伴う予備開発や立地岩盤調査に踏み込むなど極めて精力的な活動を実施している。

以下に我が国の2例および米国の最近の概念設計の1例を紹介する。

図-6は上述した①の設計研究における10GWhシステムを示すもので、直径500mのソレノイドコイルが地下200mの岩盤中に埋設される。コイルに働く電磁力は、径方向の力は岩盤で、軸方向の力は鉄骨構造物(図-6—b)で支持される。この設計では各導体に作業者が容易にアクセスできることが特長といえる。システムの効率は90.6%、コイル総重量は約86万トンである。現在の実績をはるかに越える巨大システムのために建設コストの推定は困難であるが、仮に、10GWhの揚水発電所の建設コストを3,000億円とするとコイルの単位重量当たり、35万円/トン(建設工事費を含めて)で建設しなければコスト面で競合はできない。これは、かなり困難なコストであろう。

図-7は上述した②の10GWhシステムの設計例である。

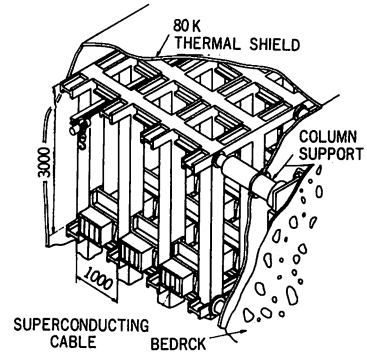
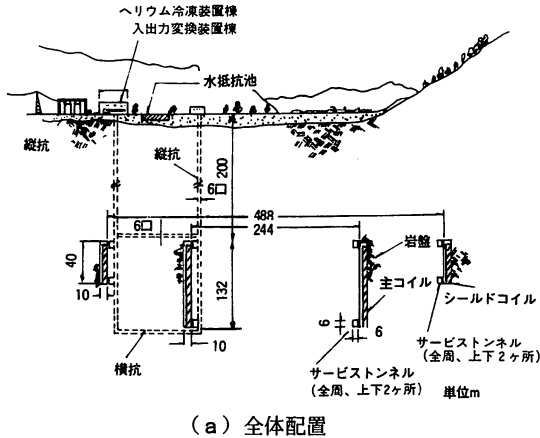


図-6 東電・三菱電機の共同による10GWh超電導エネルギー貯蔵システムの概念設計研究

直径34.1mの円形コイルを直径500mの円周上に500個並べたものである。トロイダル形コイルのため、漏れ磁界がない、コイルがユニット化され製作し易いという利点がある。システム効率は94%、コイル総重量は150万トンであり、向心電磁力は岩盤で、膨張電磁力を構造材で支持している。この結果、上の例よりも重量が大きくなったものと思われる。この設計例も建設コストはかなり高くなると推定される。

最近実施された概念設計例¹³⁾は、米国のベクテル社とジェネラルアトムクス社の共同による5.5GWhのマルチトンネル式ソレノイド形システムである。岩盤中の複数のトンネルにコイルを分割配置し、電磁力を全て岩盤で支持する方式である。直径400m、全重量は6.5万トンであり、我が国の設計例より大幅に軽量となっている。システム効率は83%である。この例では建設コストを詳細に検討し、総コストを $1,292 \times 10^6$ ドル(～3,000億円)としている。結論としてコストの面で十分メリットがあるとしている。

いずれにしても、定常電力用エネルギー貯蔵システムは超電導コイルの規模が極めて大きく、超大規模システムの開発という難しい問題を今後いかに克服するかが重要な課題であろう。同時に、既存の方式とコスト面で競合できるためには、思いきった新構造、新アイデアの創出と導入による建設コストの低減が必要である。

5.2 パルス電力用

パルス用エネルギー貯蔵システムは核融合装置で間欠的な運転となる加熱コイルや平衡磁場コイルの電源、プラズマ加熱用電源として必要である。

超電導を用いたシステムは、エネルギー貯蔵超電導コイルと負荷へのエネルギー移送系から構成される。

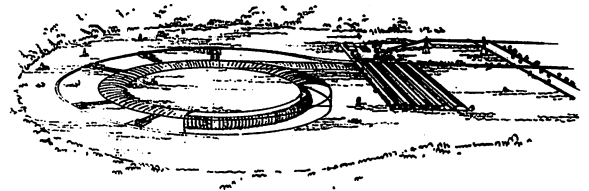


図-7 関電・東芝他の共同による10GWhトロイダル超電導電力貯蔵システムの概念設計¹²⁾

超電導コイルのパルス運転に関しては、超電導コイルのパルス励磁の可能性とパルス磁界による周辺金属容器のうず電流の2つの技術課題がある。いずれについても相当の技術開発がおこなわれており、前者については例えば名大プラ研と三菱電機の共同計画(RPC計画)があり、すでに磁界の立ち上げ速度で200テスラ/秒の超高速パルス励磁の技術が実証されている。後者についてはFRPデュワーの開発採用や強制冷却導体の開発が実施されてきている。

1,000MWeのトカマク実験炉に関する米国アルゴンヌ研の概念設計におけるコスト試算例¹⁴⁾によると、現在方式のフライホイール電源に比べ超電導方式が安価となる可能性が指摘されている。もちろん、フライホイールによる従来方式は十分確立された技術であるのに対し、大形コイルとしての問題を有する超電導エネルギー貯蔵方式は今後多くの開発努力を必要とするものであることは否めない。

また最近、パルス電力用として超電導式の電力系統安定化装置が米国で試作されている¹⁵⁾。これは貯蔵エネルギー30MJの超電導コイルを用いサイリスタ制御により最大10MWの電力を0.35Hzで出力し、送電線の電力動揺を抑制しようとするもので、ボネビル電力会社の

タコマ変電所に設置試験された。このシステムは信頼性が実証されれば実用化される可能性もある。しかし、我が国でこのニーズがあるか否かは今後の検討課題である。

6. おわりに

電力分野への2つの超電導応用の現状と展望を述べた。これらの実用化の成否は技術的可能性のみならず、従来機に比べ特性やコストの点でどの程度のインパクトを与え得るにかかっている。この意味では、超電導発電機は特性やコスト面でのメリットがほぼ明らかになってきており、今後実証機の開発と信頼性の実証が残された主要な課題といえよう。また、超電導エネルギー貯蔵は巨大システムの技術開発と低コスト化を念頭においた研究開発が今後一層望まれる。

超電導はある意味で省エネルギー技術である。資源に乏しく国土狭隘・高密度社会である我が国こそ、超電導の工業応用を最も必要としている。

参 考 文 献

- 1) 上田他; 超電導発電機, 三菱電機技報57, No. 12, p. 838 (1983)
- 2) J. S. Edmonds and W. R. McCown; Large Superconducting Generators for Electric Utility Applications-The Prospects, American Power Conference, Chicago, Illinois (1980)
- 3) J. L. Smith, et al; Construction of MIT-DOE 10-MVA Superconducting Generator, Applied Superconductivity Conference, San-Diego, California (1984)
- 4) D. R. Albright, et al; Liquid Helium Rotational Reservoir Management in a 20 MVA Superconducting Generator, Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 29, Plenum Press, New York City (1984)
- 5) I. A. Glebov and V. N. Shaktarin; High Efficiency and Low Consumption Material Electrical Generators, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-19, No. 3, p. 541 (1983)
- 6) L. Intichar and D. Lambrecht; Technical Overview of the German Program to Develop Superconducting AC Generators, 同上, p. 536(1983)
- 7) J. L. Sabrié and J. Goyer; Technical Overview of the French Program, 同上, p. 529(1983)
- 8) 岩本他; 6MVA超電導発電機の試作研究, 三菱電機技報, Vol. 52, No. 11, p. 779(1978)
- 9) S. Nakamura, et al; 30MVA Superconducting Synchronous Condenser: Design and It's Performance Test Results, Applied Superconductivity Conference, San-Diego, California (1984)
- 10) K. Yamaguchi, et al; Superconducting Rotor Development for a 50MVA Generator, IEEE Trans. on Power

Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No.7, p.1795 (1984)

- 11) 中丸, 岩本他; 電気学会研究会資料 ESC-82-5(1982)
- 12) 清水, 堀内他; 低温工学研究発表会予稿集 B3-12, 13, 14, 1983年5月16, 17, 18日
- 13) EPRIRP-1199-17, July 1982
- 14) J. N. Brooks, et al; Plasma Driving System Requirements for Commercial Tokamak Fusion Reactors, Proc. of the 7th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research.
- 15) 岩本; 超電導大型応用の最近の発展, 応用物理 53, 6, 471(1984)

