

超電導エネルギー貯蔵

Superconducting Magnet Energy Storage

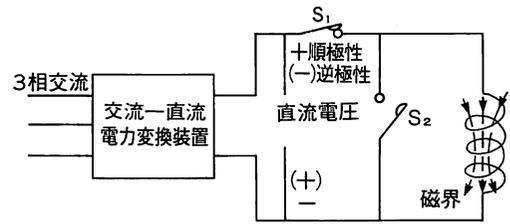
村上 吉 繁*
Yoshishige Murakami

1. 超電導エネルギー貯蔵にいたるまで

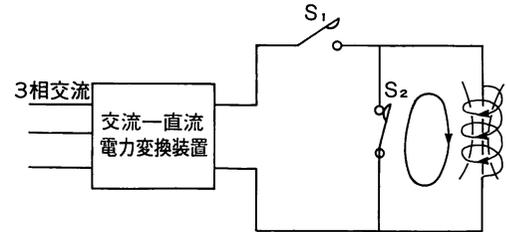
超電導現象は、1911年オランダライデン大学のオネスの発見以来長い研究の歴史をもつが、実用に着手され出したのは1950年代前半の第2種超電導体の開発成功からである。起電導体の高磁界マグネットへの応用は、オネス以来着目されていたのであるが、はじめに発見された第1種超電導体では低磁場において常電導に転移しマグネットとはならなかった。

1950年代にベル研究所のマチアスとクンツラーが合成した第2種超電導体の一つである金属間化合物 Nb_3Sn は、現在10テスラ以上の高磁場超電導材料の主流となっている。10テスラ以下の磁場用としては $NbTi$ 合金が最も広く用いられている。これらの超電導体は磁界と温度および電流について超電導状態の臨界値がある。この値をこえると常電導に転移してしまう。 $NbTi$ については、12テスラ、10ケルビン、 $10^6 A/cm^2$ 、 Nb_3Sn については、25テスラ、18ケルビン、 $5 \times 10^6 A/cm^2$ がそれぞれ臨界条件である。超電導体で作った線材に外からわずかに熱などが加わると、臨界条件をこえて常電導になり、オーム損失によって急速に常電導が広がりコイル全体を破壊してしまうおそれがある。そこでアルミや銅などの安定化導体を被覆し、局部的に常電導に転移しても、電流が安定化導体にバイパスしてオーム損失をおさえ再び超電導状態に復帰するような工夫をしている。また超電導体自身もできるだけ細いフィラメント状である方が安定性向上に効果がある。したがって現在実用されている超電導ケーブルは、数 μm から数十 μm の極細フィラメント線に銅またはアルミを被覆して撚り合わせた極細フィラメント複合超電導線できている。

超電導マグネットは、このような超電導ケーブルで



(a) S_1 を閉じてコイルの充放電を行う。
充電のときは順極性(+-)、放電のときは逆極性(-+)にする。



(b) エネルギーを貯蔵するときは、
 S_2 を閉じて永久電流運転を行う。

図-1 超電導電力貯蔵の原理

作ったコイルである。常電導体 비해高電流密度の電流を流すことができ、オーム損失がないから図-1(b)のようにコイル端子を短絡すると永久に電流を流すことができる。またこの時 $1/2 LI^2$ (L はインダクタンス、 I は電流) の形で磁界エネルギーをたくわえることができる。これを利用して大きなエネルギーを電力のまま蓄えようというのが超電導エネルギー貯蔵である。

電池や揚水発電所のように化学エネルギーや水のポテンシャルエネルギーとして電気とは別の形で電力を蓄えるのではないから、エネルギー変換にともなう損失がなく効率が高くなるという特長がある。超電導エネルギー貯蔵も第2種超電導体の出現後まもなく1950年代の終りに提案されている。その後1970年代にはコイルを広げようとする巨大な電磁力をおさえ込むため岩盤に埋め込む構想が出された。また、コイルを流れ

* 大阪大学工学部超電導工学実験センター 助教授
〒565 吹田市山田丘2-1

る直流と電力系統の交流との間の電力変換にサイリスタ変換装置を応用するという提案もあった。折しも電力系統では年々夏期昼間のピーク電力が増えるという問題がクローズアップされ、その対策として揚水発電所にかわり得る超電導エネルギー貯蔵の研究が脚光をあびることになった。またこの方式では貯蔵電力の充放電が1サイクル以内に制御できる速応性があることも一つの特長で、これを活用すれば電力系統の安定化にも効果があることが着目されている。

現在では超電導エネルギー貯蔵は、尖頭負荷対策、負荷平均化のための大規模貯蔵 (10^{12} ジュール以上) と電力系統安定化のためのパルス電力貯蔵 (10^7 ジュール以上) の用途に大別されて活用されようと思われている。以下では、大規模貯蔵の必要性と設計、パルス電力貯蔵の系統安定化への効用の順で解説したい。

2. 大規模貯蔵

日本における今後10年間の電力需要は平均6%の増加率で伸びるとともに負荷率(ある期間の平均電力/ある期間の最大電力)の低下が著しくなることも指摘されている。特に東京、中部、関西地方においては商業用および一般消費電力の増加および産業領域における機械工業の伸びに対する鉄鋼、アルミ、石油化学工業の相対的低下があいまって負荷率の低下に寄与することになる。また月間負荷率については、商業および居住地域の空調電力需要による夏季尖頭負荷の増大が顕著になる。これらの要因から夏季の1日当り負荷率はますます低下すると言われている¹⁾。さらに図-2に見るように今後ベース負荷をになう原子力発電の比重が増し²⁾、尖頭負荷の供給手段の開発はますます重要な問題となり、以下のような対策が考えられる。

1) 発電設備の傾向

電力供給のための発電設備は、常時定出力運転を行うベース電源、負荷追従を行う中間負荷電源と、ピーク電源となる貯蔵装置または短時間で起動可能な電源から構成されている。ベース電源としては将来原子力発電の比重が30~40%と増して行くであろう^{1), 2)}。その時現在の火力および水力発電設備では1日の負荷変動に十分応答できないので、次のような条件を満たす中間負荷用の発電設備の開発が必要になる。1)高信頼性と高速起動停止能力をもつこと、2)1日の負荷曲線への追従性と瞬時負荷変動に対する速応性があること、3)発電容量の大形化と起動時の低損失、および低負荷率運転における経済性があること。現在では250メガ

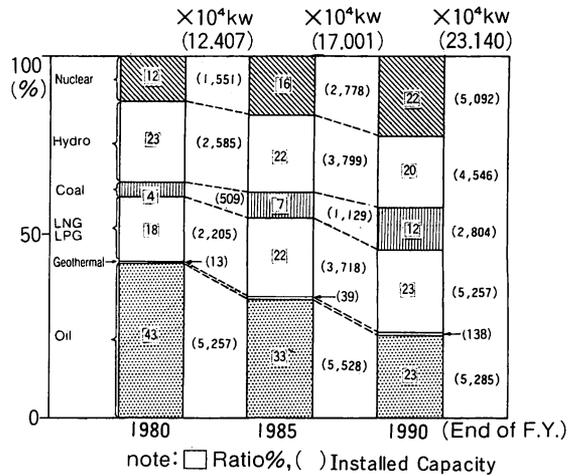


図-2 我が国の電力需要予測

ワット以下の中小形容量発電機が1日の負荷変動に応答して起動停止運転しているが、今後はより大形化をはからねばならない。しかし、それでも翌日の需要予測と周波数制御の確保のためにはいくつかの中間容量ユニットは停止できずに余剰電力はさげられない。

しかし、技術の進歩には限りがなく、原子力発電も負荷追従制御を可能にするための努力が続けられている。また、火力機でも効率と短時間起動のための改善が行われている。例えばコンバインドサイクル発電設備は、ガスタービンと蒸気タービンの結合方式により、1時間以内の起動と急速な負荷調整が可能、総合効率42%、容量50~100万キロワットを目指している。その中で貯蔵設備の導入の利点を検討しなければならない。その時に考慮すべき事項としては次の諸点があげられよう。1)電源構成、2)電力需要の時間的変化と負荷追従能力、3)貯蔵容量、4)貯蔵効率、貯蔵損失、5)系統安定化効果、6)安全性・信頼性、7)経済性。以下では経済性についての最近の研究を紹介したい。

2) 超電導電力貯蔵の経済性

貯蔵設備と他の電源の経済比較を行う場合、発電単価によって比較するのが一つの方法である。図-3はその一例で負荷率(ここでは、1日24時間のうちAの部分は全負荷残りの1-Aは零負荷に換算して、Aを負荷率としている)が5~25%の時は揚水発電、貯蔵放出時間が500時間以下の時は新形電池が有利という結果が出ている³⁾。これに対し超電導エネルギー貯蔵(Superconducting Magnet Energy Storage, 以下SMES)がどのような位置を占めるかについては新しい技術であるだけにまだ定説がない。一例として貯蔵

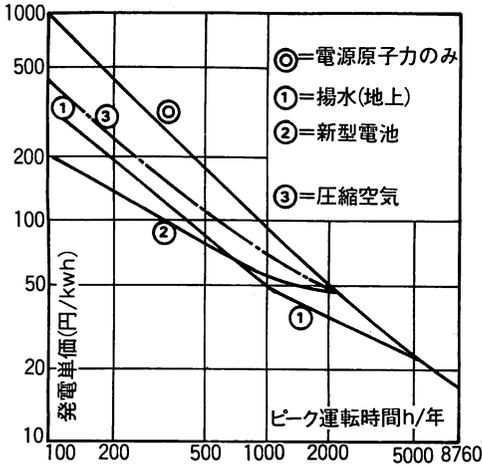


図-3 各貯蔵設備の発電単価

容量が10,000メガワット時(3.6×10¹³ジュール)規模ならば、貯蔵効率が90%以上という試算がある⁴⁾。しかし、建設費は961億円(Wisconsin大学)となり100万キロワットの揚水発電所の280億に対してかなり高価である。したがって揚水発電所の効率70%に対して高効率の故に使用時間を長くしてキロワット時当りの発電単価を下げねばならない。図-3から見れば負荷率が25~60%のあたりが有利となるであろう。

ここで貯蔵効率 η とは、貯蔵電力の充放電に伴う電力変換装置の損失と超電導を維持するための冷凍機電力の和をW、有効貯蔵エネルギーをEとした時、 $\eta = E / (E + W)$ である。貯蔵装置を比較する場合には、この他に貯蔵部損失も比較しなければならない。これは貯蔵エネルギーの目減りで、フライホイールならば回転速度の低下、SMESならば、電力貯蔵期間の永久電流運転における短絡回路の損失に担当している。もしもこのような貯蔵損失が大きければ、夜間に貯蔵した電力は翌日のピーク時に全部放出してしまわないとなくなってしまう。しかし、SMESでは、短絡回路の損失を低減する方法はいくつか考えられている。したがって、1週間のうち土曜、日曜に貯蔵し、月曜からは充放電をくり返しながら平均貯蔵量を上げて週末にいたるような図-4のような週間運転のパターンは可能となろう。

最後に貯蔵装置の最適配置については、送電による損失を考慮して火力の燃料費を最小にするような配置を求めている⁵⁾。小容量の装置については、電力潮流の末端程有利な設置点となる。容量の大きな装置は負荷の大きな地点や、負荷を集約すれば比較的大きな負

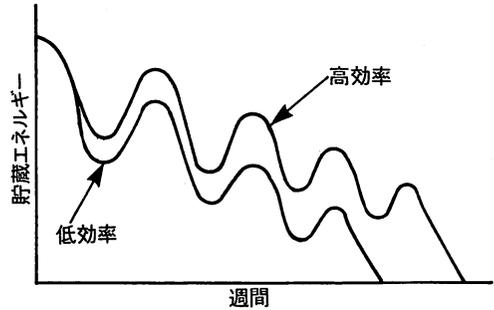


図-4 エネルギー貯蔵装置の1週間における貯蔵量

荷となる地点が有利となるという結果が得られている。これらの事項を考慮した貯蔵装置の経済性の検討は始まったばかりで今後の成果に期待したい。

3) 大規模貯蔵の設計

コイル構造としては、図-5(a)のトロイダルと図-5(b)のソレノイダルの2方式があり、トロイダルは外部に磁場もれない特長があるが、10メガワット時以上の大形になるとコスト高になる。揚水発電所におきかわるSMESはエネルギー貯蔵量1,000~10,000メガワット時級の大型となるのでソレノイダル方式を使用せざるを得ない。ソレノイダルコイルについては、ウイソコンシン大学 Boom 教授のグループが詳細な概念設計を行っている。1970年に10,000メガワット時についてウイソコンシン大学で建設コストを試算した時は、ステンレス鋼のクライオスタットを用いるとした。しかしキロワット時当り101ミル(23円)について揚水発電所とはコスト的に競争できないことになった。さらに

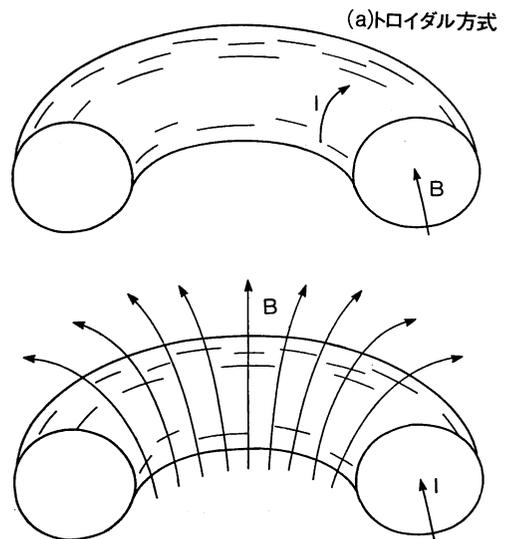


図-5 マグネットの基本方式

1974年には、岩盤による電磁力保持とアルミ複合導体の使用により建設コストは1/4キロワット時当り27ミル（6円強）に低減されると試算し実用性を示唆した。さらにコストが最小になるように計算をつめて1978年の結果ではキロワット時当り19ミル（4円）となっている。大形化する程貯蔵エネルギーのジュール当りの単価が安くなるスケールメリットがあるのが特徴で、コストはエネルギー貯蔵量の2/3乗に比例するとしている。したがって揚水発電所規模の1,000～10,000メガワット時になると他の貯蔵装置である新型バッテリー、圧縮空気貯蔵に比べて非常に有利になる。

ソレノイダル構造について二つの設計例を表1に示す^{6),7)}。ソレノイダル構造では、外部への磁界もれを防ぐため地表近くに逆方向磁界をかけて打ち消すシールドコイルを設計せねばならない。

冷却方式は Wisconsin 大学では1.8ケルビン（絶対温度-273℃が絶対零度）の超流動ヘリウムによる浸漬冷却（以下He II方式）他方では超臨界ヘリウムによる強制循環冷却を採用している（以下SHE方式）。

コイルに用いる超電導ケーブルはHe II方式で図-6のようになっているアルミを安定化導体に用いている。SHE方式ではNb₃Sn超電導線を銅で安定化したもので図-7に示している。線材重量に格段に差がついたのは、1.8ケルビン超流動ヘリウムによれば、冷却効果が高く臨界温度に対する温度余裕が大きいため高電流密度、通電が可能となることによるものである。電流密度はHe II方式で60 A/mm²に対しSHE方式は超電導線材自体で60 A/mm²、冷却通路も含めた断面の平均電流密度で20 A/mm²である。必要ヘリウム量はSHE方式で9.73×10⁶ℓに対し、He II方式は6×10⁶ℓとむしろ少なめである。コイル構造はHe II方式では、円周にそって波を打たせる図-8(a)のようなリブル構造をとっている。コイルは液体ヘリウムデューワ中に浸漬され岩盤へ電磁力を伝達するコイル支持台は強化プラスチック（FRP）製で真空容器中で2mおきに非連続的に支えている。支持台の脚は岩盤に接するからそこから浸入する熱を取り去るため20ケルビン、80ケルビンなどの冷媒の流れる冷却管路を脚の途中に取りつけている。岩盤中のコイル全体は図-8(b)のようになっている。SHE方式では、浸漬冷却用のデューワは不要となるからデューワの渦電流損失がないのが特長である。また電磁力支持はFRPの中空円筒を用いているが、岩盤に接する常温端部には油圧機構を設け、こ

表1 10,000メガワット時超電導電力貯蔵の概念設計

	ウスコンシン大(He II)	国内 (SHE)
電 流	157 kA	749 kA
自己インダクタンス	2920 H	162 H
超電導線材	NbTi+Al/37×10 ⁶ kg	Nb ₃ Sn+Cu/257×10 ⁶ kg
構造材料	609×10 ⁶ kg	47×10 ⁶ kg
損失冷凍機	358 Mwh	280 Mwh
変換機	360 Mwh	755 Mwh(360 Mwh)
効 率	93.3%	93.9%
半 径	160.5m/146.5m	122m
高 さ	16.2m×4	122m
深 さ		200m
冷 却	浸漬冷却(1.8k超流動ヘリウム, He II)	強制循環冷却(超臨界ヘリウム)

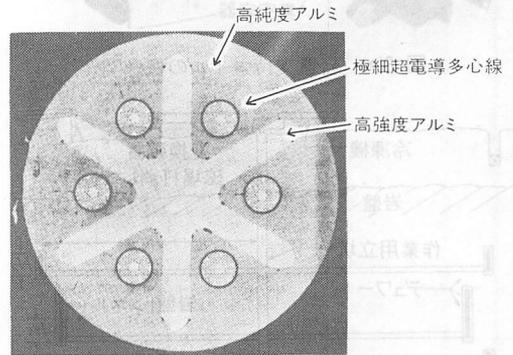


図-6 エネルギー貯蔵用超電導ケーブル その1

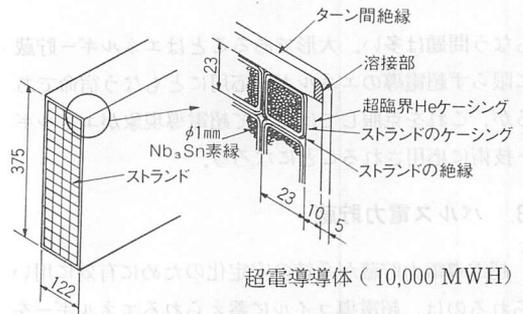


図-7 エネルギー貯蔵用超電導ケーブル その2

の油圧を調整して電磁力により発生する構造材中の応力を許容値以下におさえている。

このような概念設計でも多くの問題点が浮かび上がってくる。(1)1000万トンの電磁力を支えるために均質である程度の強度をもつ岩盤が我が国で得られるだろうが、(2)冷却方式の選択、(3)ヘリウムデューワ、真空容器、支持台の材料と設計などである。これはいずれも越えがたい問題ではないが大規模構造であることに

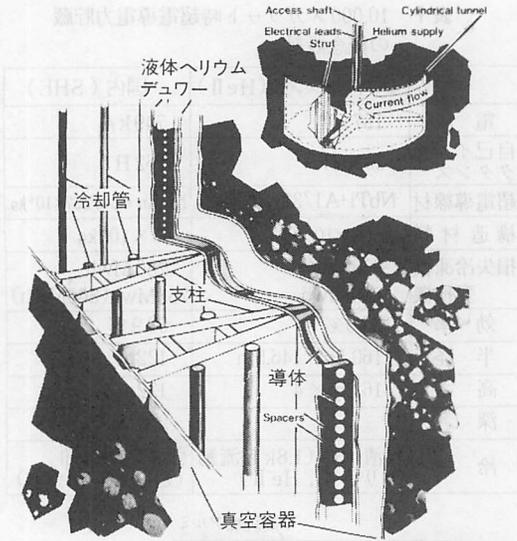


図-8(a) 岩盤支持コイルの概念図

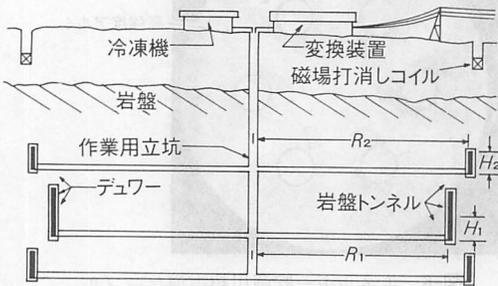


図-8(b) エネルギー貯蔵コイルの岩盤埋込

もなう問題は多い。大形であることはエネルギー貯蔵に限らず超電導のエネルギー応用にもなう宿命であるが、これを克服してはじめて超電導現象がエネルギー技術に応用されることになる。

3. パルス電力貯蔵

超電導電力貯蔵がシステムの安定化のために有効に用いられるのは、超電導コイルに蓄えられるエネルギーを電源の1サイクル以内に充放電できることによる。すなわちシステムの電力動揺に合わせて逆位相にサイリスタ変換装置を通じて電力を出し入れすれば、動揺を吸収してしまえることができる。これはSMES構想の初期段階から提案され大規模貯蔵にその機能も持たせることが考えられた。しかし、研究が進むにしたがいシステム安定化のためには、数百万キロワットのシステムに対して小規模の数十メガジュールの電力貯蔵を複数個設置すればよいことがわかってきた。

またこのような貯蔵には、頻繁で急速な充放電をく

り返すことに適したパルスコイルを用いねばならない。パルスコイルの技術は、我が国が世界的にも最も進歩しているため開発には直ちに取り組むことができる態勢になっている。事実、米国太平洋岸で、北部ワシントン州とロスアンジェルスをつなぐ1,500kmの電力連系線に0.35 Hzの電力動揺が見られる。これを抑制するため30メガジュールのパルスコイルがLos Alamos 研究所で開発され、1982年12月にワシントン州タコマ変電所に設置された。以下では、パルス電力貯蔵のシステム安定化効果とそれを可能にするための制御装置について述べる。

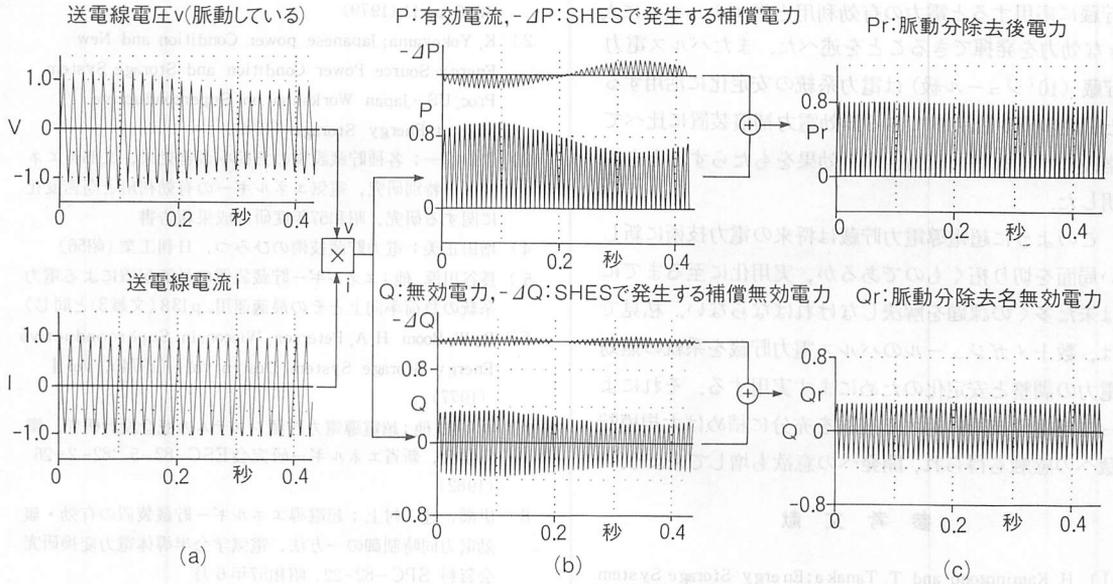
3.1 パルス電力貯蔵によるシステム安定化

これまで電力システム安定化のための主要な装置としては、発電機界磁を制御するPSS (Power System Stabilizer) と無効電力補償装置 SVC (Static Var Controller) があった。いずれも電圧と無効電力を制御する機能によってシステム安定化に効果があるが、有効電力は制御できない。これに対しパルス電力貯蔵によれば、無効電力とともに有効電力も制御できるから格段に安定化の効果が期待できる。

SMESによるシステム安定化の意味をもう少しわかりやすく説明してみよう。電力システムに流れる電圧と電流は、60Hz (または50Hz) の交流であるから図-9(a)のように変化している。図-9(d)のようにシステムにじょう乱が生じ電圧が動揺すると、電力が脈動する。有効電力Pと無効電力Qは、図-9(b)のように交流にともなう120 Hzの搬送波であるがP、Qの変動は大きな周期の脈動によって表わされている。もしも電圧の動揺を抑制するように無効電力 $-dQ$ を加えてやると図-9(c)下図のようにQの動揺はなくなってしまう。これは通常は無効電力補償装置の役割でシステムの電圧動揺を抑制する効果があるが、有効電力の動揺はそのまま残っている。SMESはこの ΔQ の打ち消しの動作をしてなおかつ図-9(c)上図に示すように ΔP も打ち消すように働かすことができるのである。

3.2 超電導電力貯蔵装置の電力制御装置

SMESの電力は図-10のようなグレースブリッジ接続サイリスタ電力変換装置によって制御される⁸⁾。ここで超電導マグネットはコイルLでサイリスタはGT Oで表わしている。図-11(a)および図-11(b)はサイリスタの点弧角 α によってマグネットの電圧が正から負に制御される様子を示している。電流の方向は変わらないので、電圧が正の時に電力は交流側からマグネットに与えられ、 $\alpha = 90^\circ$ をこえて電圧が負になると電力



$-\Delta P$ はSMES(超電導電力貯蔵)でないと発生できない

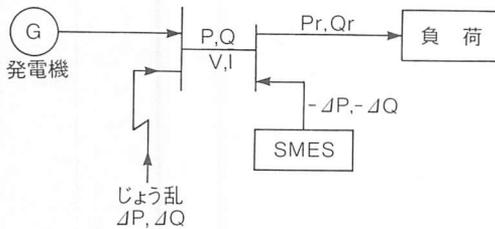


図-9 SMESによる電力システム安定化の原理

は直流側から交流側に返還される放電モードになっている。通常のサイリスタ(SCR)では α が0から 180° まで制御される。GTO(ゲートターンオフ)サイリスタを用いれば、 α がさらに 180° から 360° まで制御され

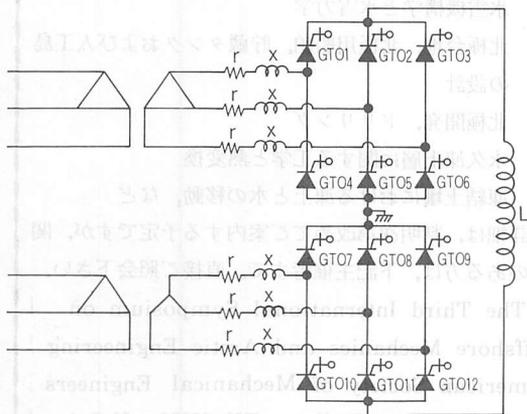


図-10 三相グレートブリッジ接続サイリスタ変換装置

る。 α が 0° から 180° ではおくれ力率の電力、 α が 180° から 360° は進み力率の電力を交流側に与えることができる。図(c)では $\alpha=90^\circ$ でおくれ力率無効電力、 $\alpha=270^\circ$ で進み力率無効電力が得られる様子を示している。

4. おわりに

超電導電力貯蔵では90%以上の貯蔵効率を得られるために、揚水発電所規模(10^{12} ジュール以上)の大形

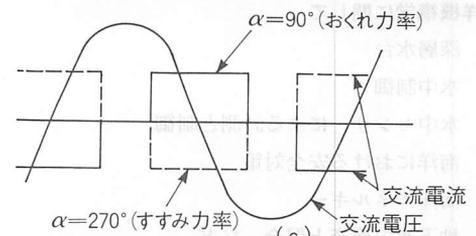
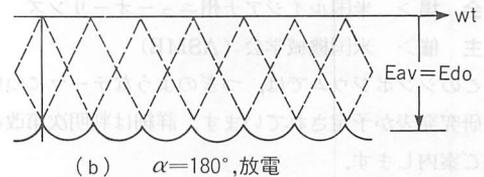
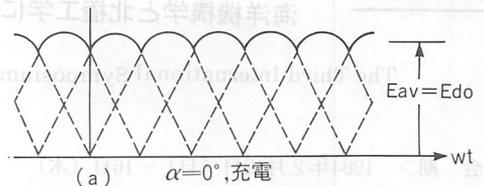


図-11 サイリスタ点弧角(α)による超電導マグネットの充放電制御

貯蔵に応用すると電力の有効利用と省エネルギーに大きな効力を発揮できることを述べた。またパルス電力貯蔵 (10^7 ジュール級) は電力系統の安定化に活用すると、他の安定化装置である無効電力補償装置に比べて格段にすぐれた系統動揺抑制効果をもたらすことを説明した。

このように超電導電力貯蔵は将来の電力技術に新しい局面を切り拓くものであるが、実用化に至るまでには未だ多くの課題を解決しなければならない。私見では、数十メガジュールのパルス電力貯蔵を系統の無効電力の調整と安定化のためにまず実用する。それによって超電導技術に対する経験を十分に積めば大規模貯蔵への感触も得られ、開発への意欲も増して来よう。

参 考 文 献

- 1) H. Kaminozono and T. Tanaka; Energy Storage System in Electric Utilities, International Symposium on SCES, p. 11 (1979)
- 2) K. Yokoyama; Japanese power Condition and New Energy Source Power Condition and Storage System, Proc. US-Japan Workshop on Superconductive Magnet Energy Storage (1981)
- 3) 豊田淳一; 各種貯蔵設備の負荷率改善効果, 文部省エネルギー特別研究, 電気エネルギーの有効利用と高密度化に関する研究, 昭和57年度研究成果報告書
- 4) 増田正美; 電力貯蔵技術のみみつ, 日刊工業 (昭56)
- 5) 長谷川淳 他; エネルギー貯蔵装置の最適配置による電力系統の負荷率向上とその最適運用, p.138 (文献3)と同じ
- 6) R. W. Boom H.A. Peterson, Wisconsin Superconductive Energy Storage System Design vol I (1974), vol II (1977)
- 7) 中丸修 他; 超電導電力貯蔵システムの概念設計研究, 電気学会, 新省エネルギー研究会 ESC-82-5 '82-2-26 (1982)
- 8) 伊瀬 辻, 村上; 超電導エネルギー貯蔵装置の有効・無効電力同時制御の一方法, 電気学会半導体電力変換研究会資料 SPC-82-22, 昭和57年6月

- 1) H. Kaminozono and T. Tanaka; Energy Storage System in Electric Utilities, International Symposium on

海外行事案内

海洋機構学と北極工学に関する第3回国際シンポジウム

The Third International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering

<会 期> 1984年2月12日(日) - 16日(木)

<会 場> 米国ルイジアナ州ニューオーリンズ

<主 催> 米国機械学会 (ASME)

このシンポジウムでは、つぎのようなテーマについて研究発表が予定されています。詳細は判明次第改めてご案内します。

海洋機構学に関して

深層水台

水中制御

水中センサーによる計測と制御

海洋における安全対策

海洋エネルギー

地下水の検査と保全, など

北極工学に関して

氷雪機構学と氷雪力学

北極台地, 北極用船舶, 貯蔵タンクおよび人工島の設計

北極開発, ドリリング

永久凍土層に関する工学と熱変換

凍結土壌における凍上と水の移動, など

詳細は、判明次第改めてご案内する予定ですが、関心のある方は、下記主催者まで、直接ご照会下さい。

The Third International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering | American Society of Mechanical Engineers | P. O. Box 59489 Dallas, TX 75229 U.S.A. |