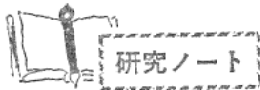


超電導エネルギー蓄積



村上吉繁*

超電導電力機器は次の世代のエネルギー需給システムにおいて重要な地位を占めるものと思われる。その中で超電導マグネットによるエネルギー蓄積は最も早く実用になるといわれている。その用途は、

- 1) 電力系統におけるピークシェービング
- 2) 核融合炉
- 3) 加速器などの高エネルギー実験機器電源などである。

エネルギー蓄積の原理は、超電導コイルの抵抗はほとんど零で（1ターンの円形コイルで、 $R \approx 10^{-18} \Omega$ 、 $L \approx 10^6 \text{H}$ 、時定数 $\tau = L/R = 10^{12}$ 秒）、一旦コイルに流れ込んだ電流はコイル端

子を短縮することにより極めて長時間流れ続け磁気エネルギーの形でエネルギーを蓄えることができる。現在泡箱電源用に 400MJ 、核融合炉用では $3 \times 10^{11} \text{J}$ の計画があり、ピークシェービング用の実用規模 10^{12}J (300Mwh) には 1980年代に到達しようと言われている。

このような超電導マグネットの基本的な制御方式は、図1のようにサイリスタ電力変換装置とマグネットを結合したインダクターコンバータユニット (I-C Unit) である。この回路の特徴は、交流⇄直流の電力変換が矢印のようにどちらの方向にも可能なことである。すなわち変換装置の直流出力電圧 E_d は、サイリスタの

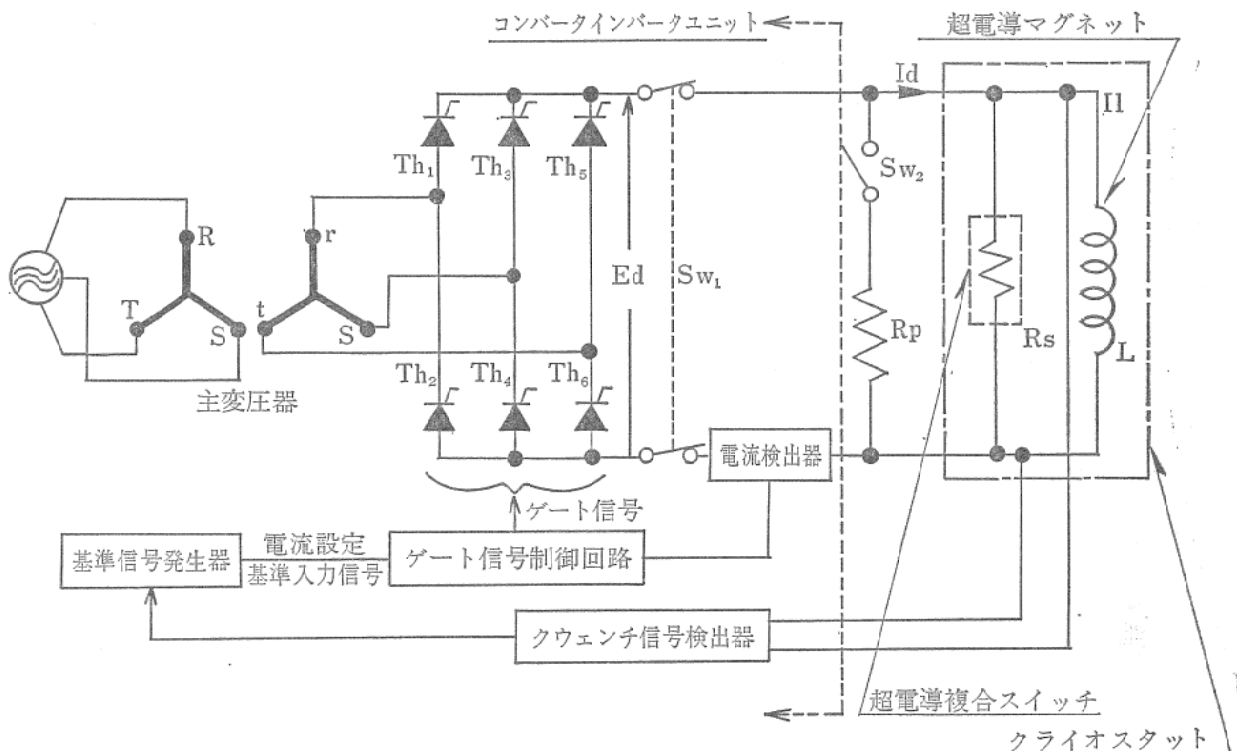


図1 超電導マグネット制御回路構成図

* 村上吉繁 (Yoshishige MURAKAMI), 大阪大学, 工学部, 電気工学科, 助教授, 工博, 電気工学

点弧制御角 α の関数として

$$E_a = E_{a0} \cos \alpha - (3/\pi) I_a X_c \quad (1)$$

と与えられる。ここで(1)式の第2項は変換器を直流側からみて直流電源とみなしたとき、電源インピーダンスによる出力電圧降下に対応するもので E_{a0} の10%以下となる。 X_c は転流リアクタンス、 I_a はマグネット電流である。

マグネット充電時(交流→直流電力変換)には(1)式において $\alpha < \pi/2$ とすれば、 L をマグネットインダクタンスとして $E_a \approx L dI_a/dt > 0$ となりマグネットは充電される。マグネットの蓄積エネルギーを交流電源側に返還するには、 $\alpha > \pi/2$ とすれば $E_a \approx L dI_a/dt < 0$ となり、マグネット電流は減少しながらエネルギーが返還される。

現在の電力系統でピークシェービングの用途においては、揚水発電所が最も広く用いられていて、その貯蔵エネルギーは矢木沢1,000、新豊根8,000、奥吉野4,000Mwh (1 Mega-watt-hour (Mwh) = 3600×10^6 Joule (J)) に達している。したがって超電導エネルギー蓄積も1,000および10,000Mwh級の容量が最も実用的であろう。揚水発電所との得失を比較すると超電導方式のすぐれている点は、

- 1) 冷凍機を除いて主要部分は静止機器である。
 - 2) 効率がよい。すなわち揚水発電所は電気エネルギーと位置エネルギーの間に変換を往復させるので、その効率は65~70%と評価されているが、超電導方式では90%以上が得られる。
 - 3) 応答が早い。揚水発電所のスタートに最低5~6分必要であるに対し、超電導方式では電力変換装置サイリスタの点弧制御により電源周波数の1~2サイクルでスタートできる。したがって電力系統の妨害に対する安定性を大巾に改善できる。また局所的に妨害対策を立て得る。
 - 4) 超電導方式はインダクタ電流を定電流源とみなし得るので、大きい短絡電流は流れない。したがってサーキットブレーカの定格を特にあげる必要もなく、同期機における短絡時過渡トルクの考慮も不要である。
 - 5) 電力消費中心部近くに設置できる。
 - 6) 無公害である。
 - 7) 発電系統だけでなく送電系統負荷率も改善でき、系統の安定限界も高められる。
 - 8) 運転保安費用が少ない。
- 欠点としては、

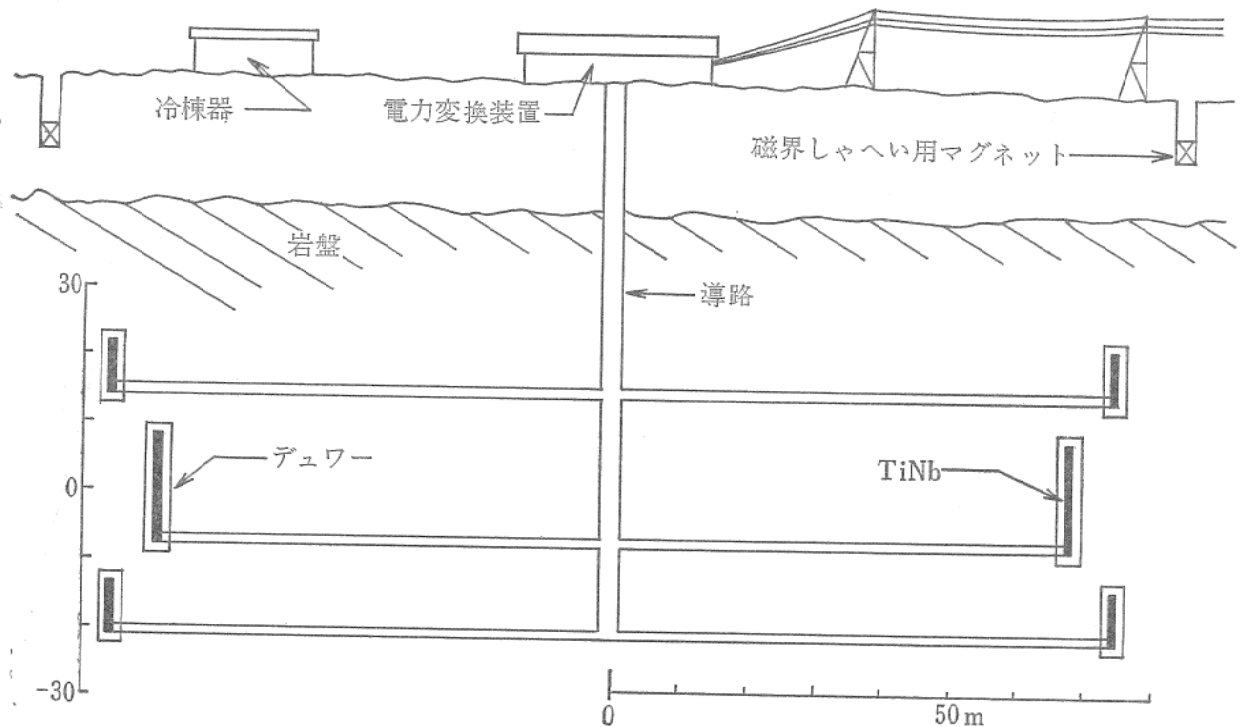


図2 1000MWH貯蔵ユニット(ソレノイドマグネット)
(Boom. R. W., Wisconsin Superconductive Energy Storage Project I)

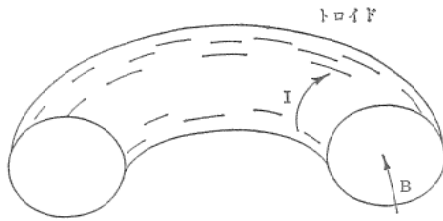


図3 トロイダルマグネット

- 9) キャピタルコストが高い。
 - 10) 強力外部磁場を発生する。しかしトロイダル方式ではこれはさけられる。
 - 11) 大電流装置であり、最高出力がインダクタ電流値に比例する。
 - 12) 転流用電源として常に電力系統が接続される必要がある。ヘリウム資源も必要である。
- マグネットの構成は、ウィスコンシン大では図2のような分割ソレノイド方式、ロスアラモス研究所では図3のトロイダル方式を提案している。いずれも岩盤中に埋込むが、ウィスコン

シンではコイルをファイバークラス補強エポキシ樹脂トラスで支持する。線材は TiNb 超電導フィラメント線材に高純度 Al をカストしたもので、機械的ストレスを減じるためリプル形状とし、デュアに入れシールドする。1.8Kのヘリウム II による冷却を提案している。

マグネットの中心磁場は5~8 Tとなるから強力な電磁力に対してコイルを保持しなければならない。支持構造は非磁性材料でなければならないが、これをステンレス鋼で構成するとたちまちコスト的に実現不可能となるであろう。そこで岩盤埋込方式が導出された。この方式などを取り原価低減の努力を払うと、試算によれば表1に見るように揚水発電所に比べ高くない。

超電導マグネットはピークシェーピングの用途においては、有効無効電力、電圧電流の定常制御特性、系統妨害時負荷変動時の過渡状態に

表1 各種エネルギー貯蔵方式の特性と開発状況 (EPRI — Kalhammer 氏の資料)

貯蔵方式	総合効率 (%)	エネルギー密度 (KW h/立方フィート)	資本コスト		研究開発状況	応用例
			Cp (ドル/KW)	Cs (ドル/KW h)		
1. 揚水従来式	70	0.001 (300m)	60~90	4~12	現行技術の応用	○ピークシェーピング ロードレベリングのための集中ストレージ
地下式	70	0.03 (1000m)	60~90	7~15		
2. 圧縮空気地下式 (ガスタービン) スチールタンク	65~75	(50気圧)	90~110	3~20	初期開発段階	○同上
	70~80	0.01~0.05	90~110	100	同上	
3. 蓄電池鉛一酸新型	60~75	1~2 1~10	80~100 60~100	20~40 10~20	直ちに試作に入れる段階 研究室の段階	○同上 ○分散設置ストレージ ○非常用電源用
4. レドックス・フロー蓄電装置	60~75	0.5~2	100~200	5~10	研究所検討段階	○蓄電池と同様
5. 水素貯蔵 (電池分解・燃料電池)	35~60		200~250	2~10	試作研究段階 サブシステムの新開発段階	○蓄電池と同様
6. フライホイール貯蔵	85~90	0.5~1.5	30~50	50~75	初期開発段階	○蓄電池と同様 電力動揺の補正
7. 超電導磁石	90	0.5~1	30~50	35~400	概念検討中	○集中ストレージ 系統安定化
8. 熱貯蔵地下式 スチームタンク	65~80 75~85	(500気圧 590 フィート)	60~80 60~80	25 15~25	現行技術の応用 モデル研究段階	○集中ストレージ

注: Cp—Capital Costs Proportional to Power rating (Power Conditioning, etc.)

Ca—Capital Costs Proportional to the Systems energy storage capacity.

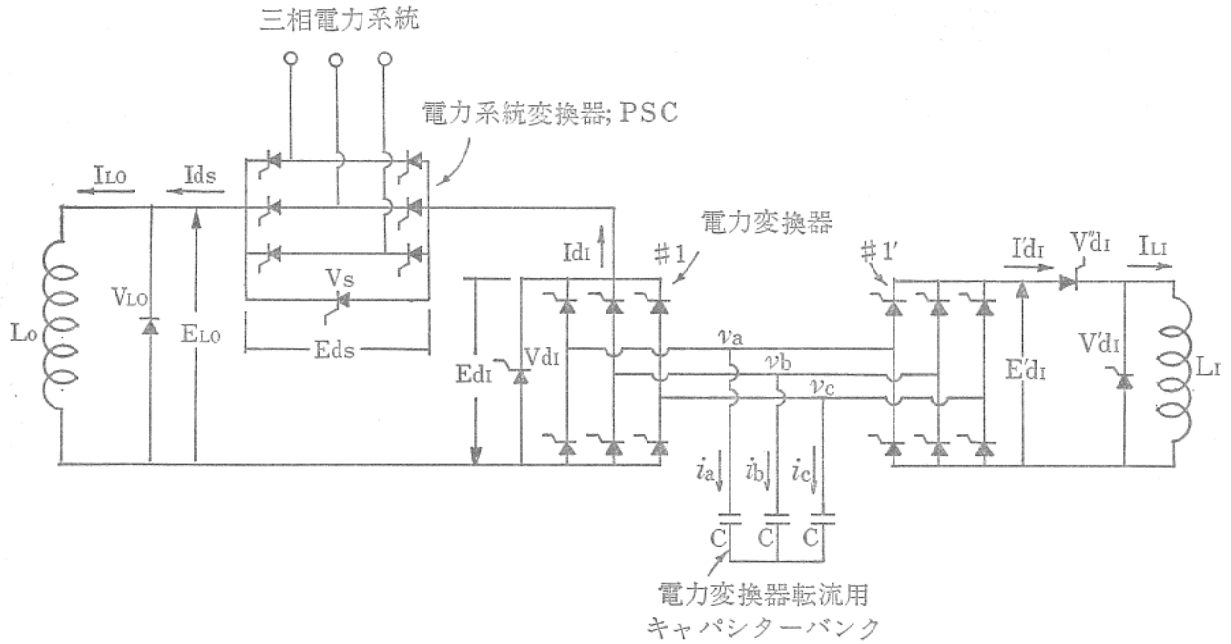


図4 パルス電力源装置 (三相中間電力変換方式)

(Boom. R. W., Wisconsin Superconductive Energy Storage Project II)

おける動特性が重要である。一方トカマク核融合炉においては、超電導マグネットはダイバータおよびトランスフォーマコイルにくり返しパルス電力を供給する。これらのコイルも超電導マグネットである。ウィスコンシン大のUWMAK-I (2.8×10^{11} J) ではパルス電力ピーク値が700MW以上になる。このような負荷は電力系統に苛酷な妨害を与えるから、超電導マグネットの蓄積エネルギーからパルス電力を供給するのが適当である。この場合の電源構成は図4のようになる。図において負荷のコイル L_1 (ダイバータまたはトランスフォーマコイル(超電導)) は #1 コンバータを直流→交流、#1' コンバータを交流→直流電力変換に動作せしめ、超電導マグネット L_0 により充電する。一旦 L_1 にビルドアップした電流は #1', #1 コンバータを逆方向の電力交換に動作せしめて L_0 にエネルギーを返還すれば、電力系統から

供給するエネルギーは回路損失程度ですむ。

以上のことなどからも、超電導エネルギー蓄積は将来のエネルギー発生、伝送に不可欠な装置となることがうかがわれる。日本では、高エネルギー物理研究所で100K Jのエネルギー蓄積実験に続き1MJのシステムを計画中である。また電総研にも同様の計画がある。さらに次の核融合研究プロジェクトでは超電導マグネットによるプラズマ閉じ込めが予定されている。

われわれの研究室も、これらの基礎的な技術に寄与する目的で、小規模 I-C Unit と制御系(図1)を試作し動特性と構成法について実験と考察を行った。現在高エネルギー研究所のグループと共同研究を進めており、大容量マグネットの動特性の決定、高速応性高精度計算機制御系の開発を分担している。