UDC 621.039.61:533.95:621.318.4:621.311.29.
07:681.3.02

論 文

59-B79

0.5MJ 超電導パルスマグネットの特性と その制御システム

正 員 村 上 吉 繁 (大阪大)

正 員 伊 瀬 敏 史 (大阪大)

非会員 山 本 純 也 (大阪大)

正 員 辻 毅一郎 (大阪大)

1. ま え が き

超電導パルスマグネットの研究は、我が国では1970年代から盛んに行なわれた。その目的は、磁界閉込め形核融合炉のプラズマ加熱用パルスコイルを超電導マグネットとして開発するための基礎研究を行なうことであった⁽¹⁾。コイルのパルス電流によって核融合炉の磁界を10 T/s以上の速度でパルス状に変化させれば、プラズマ中に電磁誘導によって電流を誘起し、そのオーム損失によってプラズマを加熱することができる。

一方では、パルスマグネットに貯蔵される電気エネルギーを急速に充放電することによって、電力システムの安定化が有効に行なえることが最近の研究で明らかになった⁽²⁾⁽³⁾。この場合には、電源の1サイクル以内に有効電力(P)および無効電力(Q)の充放電を制御できる性能が系統における電力潮流と電圧の変動の補償に活用される⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。

このように、超電導パルスマグネットは核融合および電力貯蔵などエネルギー技術への応用が期待され、各方面でマグネットの特性と応用のためのシステム技術の研究がなされている。パルスマグネットの磁界変化速度については、アメリカのロスアラモスおよびアルゴンヌ研究所⁽⁷⁾、我が国では日本原子力研究所、東芝などで磁界の増加および減少の両方について変化速

度6 T/s以上を得ている。最近では、この速度は名古屋大学プラズマ研究所、日本大学、三菱電機および電子技術総合研究所の共同研究により200 T/sに到達した⁽⁸⁾。これらの成果は、パルス駆動に対して交流損失が少なく、熱除去特性の優れた導体とコイル構造についてのこれまでの多くの技術蓄積に負うもので、磁界変化速度については初期の目標に到達しているといえる。

今後は、このようなパルスマグネットを核融合や電力系統などのエネルギー発生と利用システムにおいて活用するための運用方式と、これを裏付けるための制御システムのソフトウェアとハードウェアを開発し、超電導技術のエネルギー技術への実用化を図らねばならない。大阪大学超電導工学実験センターでも、0.5 MJのパルスマグネットを開発し、マグネットの特性と、その制御システムについて実験的研究を重ねている。これまでは、多くの研究が線材構成や交流損失の評価などマグネットの構成と特性を中心課題にしてきた。

これに対し、ここではシステム技術の立場でマグネットを等価回路で表現して動特性を同定し、直接ディジタル制御方式を適用することにより高精度で最大磁界において6.1 T/sの高速度のマグネット電流制御特性を得たこと、充放電やクウェンチ時のモード制御において、マグネットと電源に障害を与えないような主回路のシーケンス制御方式を完成したことを述べる。また、マグネットの線材と構成においても適切な配慮を施した結果、交流損失が少なく、高電流密度においても安定性の高い通電特性が得られ、マグネット技術に新しい進歩が得られたことを報告する。

Characteristics and Control System of 0.5MJ Superconducting Pulsed Magnet. By Yoshishige Murakami, Member, Toshifumi Ise, Member (Faculty of Engineering, Osaka University), Junya Yamamoto, Non-member (Low Temperature Center, Osaka University) & Kiichiro Tsuji, Member (Faculty of Engineering, Osaka University).

村上吉繁：正員，大阪大学工学部電気工学科

伊瀬敏史：正員，大阪大学工学部電気工学科

山本純也：非会員，大阪大学低温センター

辻 毅一郎：正員，大阪大学工学部電気工学科

2. 0.5 MJ パルスマグネット

超電導パルスマグネットを設計するとき考慮を払わねばならない事項として次の諸点があげられる。

(1) エネルギー貯蔵効率を高め、常電導転移に対する安定性を確保するために、マグネットのパルス駆動時における交流損失をできるだけ少なくすること。

(2) 交流損失による熱の発生を除去するよう冷却媒体の通路を十分に設けること。

(3) 繰り返しパルス駆動によるコイル構造のゆるみについて対策を施すこと。また、線材や構造材料の繰返し応力による疲労を適切に考慮して、耐用限界を設定すること。

0.5 MJ パルスマグネットの開発においては、5 T/s (最大磁界 6.1 T/s) の磁界の増加率および減少率を目標にした。この値を目指すため、上記の諸点について以下のような対策を施した。

(i) パルスマグネットの線材については、我が国においてこれまで図1に示すような、NbTi/Cu/CuNi の3層構造フィラメントを基本要素とする複合多心線構成法の技術が育成されてきた⁽¹⁰⁾。このマグネットでも、フィラメント構造は同じ3層構造(直径 34 μm)で、更に新しい試みとして、フィラメント216本からなる素線(ストランド)外皮も CuNi 合金で被覆することにより、パルス駆動時の素線間の結合電流を低減する構成を試みた。金属巻棒の場合のうず電流を考慮して、コイルの巻棒はガラスエポキシ材料(G-11)で製作した。

(ii) コイルを14層ダブルパンケーキ巻線構造として、層間にガラス強化プラスチックスペーサを挿入して半径方向に液体ヘリウムが流動する冷却チャンネルを設けた。また、巻棒表面には垂直にヘリウム流路用溝を掘った。更にケーブル表面積の40%は液体ヘリウムに直接触れるように間隔をあけて絶縁テープを巻

図1 0.5 MJ マグネットの線材

Fig. 1. Cable structure of 0.5 MJ magnet.

表1 0.5 MJ パルスマグネットのパラメータ

Table 1. Parameter values of 0.5 MJ pulsed magnet.

コイル内径	268 mm
巻線内径	310 mm
巻線外径	494 mm
巻線高さ	256 mm
定格電流	1,976 A
中心磁界	5.0 T
最大磁界	6.1 T
導体電流密度	168 A/mm ²
平均電流密度*	79.9 A/mm ²
巻数	952 ターン
インダクタンス	0.264 H
貯蔵エネルギー	515 kJ

*: 全アンペアターンとコイル全断面積の比

図2 マグネットケーブルの臨界電流と負荷特性
Fig. 2. Critical current and load characteristic of the magnet cable.

いた。

(iii) また、強固なコイル構造が得られるように、コイル巻線加工において、適切な張力を加えるようにした。更に巻線の表面には、ガラスファイババンド(GFRP)を巻き、半径方向の線材ずれを押さえ込むようにした。

このようにして高い電流密度においても超電導を十分安定に維持できるコイルとなった。このことは、交流損失の原因となる安定化導体の断面積が少なく、しかも直流通電においても安定なコイルであることを意味している⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

表1に示した導体電流密度 168 A/mm² は高い水準のものである。また超電導ケーブルの臨界電流値は、6.1 T において 2,650 A である。ケーブルは15本の素線をより合せて作られているが、ケーブルの臨界電流値は素線の臨界電流値の15倍の89%であり、ケーブルの整形加工工程において特性の劣化があったことを意味している。磁界と臨界電流、および磁界と電流との間の負荷特性の関係を図2に示す。

3. 0.5 MJ マグネットの動特性

(3.1) マグネットの等価回路パラメータの推定方

法 超電導マグネットの電流を高精度で制御するためには、制御対象の動特性を正確にとらえなくてはならない。筆者のこれまでの研究では状態ベクトルフィードバックによる、最適制御を適用する場合でも、マグネットを抵抗 (R) とインダクタンス (L) の直列回路で簡単に表現しても、この回路パラメータを適切に与えれば満足できる結果が得られている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。

しかし、これらのパラメータは、マグネットの通電電流値 (I_{SM}) とその時間的な変化率 ($\dot{I}_{SM}$) によって変化すると考えねばならない。そこで、マグネットパラメータを定めるために次のように実際的な方法を採用している。

(1) L はマグネットの設計値で与え、 R は変圧器漏れインダクタンスおよび配線などの抵抗分によって生じるサイリスタ電力変換装置の直流側の電圧降下を与える等価抵抗値とする。この値は、変圧器のインダクタンスの設計値と、その他の抵抗分の推定値によって定める。

(2) (1) で与えた回路パラメータを中心にした数種のパラメータ値によってマグネット電流の制御特性をシミュレーションする。その結果と実際の制御特性とを比較して最も適当なパラメータ値に修正する。

(3) 別に、不規則電圧入力をマグネットに与え、出力としてマグネット電流を記録して入出力特性から動特性を推定する。この結果により、(1)および(2)の回路パラメータの裏付けを得る。

〈3.2〉 入出力特性によるマグネットの等価回路パラメータの推定 超電導マグネットに不規則波形の電圧 V_{SM} を入力として与え、その出力としてのマグネット電流 I_{SM} との関係を線形離散数系 (パルス伝達関数) として表現する。更にこの系の方程式から等価回路を推定する方法をこれまでに導いた⁽¹⁴⁾。0.5 MJ マグネットの動特性の推定にも、この方法を適用した⁽¹²⁾⁽¹³⁾。その結果は、 I_{SM} と $\dot{I}_{SM}$ の変化に影響され大きな変動がある。パルス伝達関数 $G_{SM}(z) = I_{SM}(z)/V_{SM}(z)$ から図3のような等価回路のパラメータを推定した。等価的には (R_1-L_1) に主に電流が流れ、動特

図3 マグネット等価回路

Fig. 3. Equivalent circuit of the superconducting magnet.

性の回路表現もこれだけで十分である。 (R_2-L_2) , (R_3-L_3) …枝は寄生的な素子 (parasitic elements) で、マグネット主回路と相互誘導で結合し、マグネット線材中やクライオスタット金属中に誘起されるうず電流による損失と磁束を主回路側に換算して表現した等価回路素子と考えられ、 $G_{SM}(z)$ の部分分数展開各項をそれぞれ、 (R_2-L_2) , (R_3-L_3) …と当てはめたものである。 (R_3-L_3) …の全体の電流への寄与は無視できる程度である。 I_{SM} の変域が大きく、かつ $\dot{I}_{SM}$ が大きいほど、 L_1 は設計値 (0.264 H) より小さくなる傾向がある。電流波形によりパラメータは $R_1=0.01\sim0.05\ \Omega$, $L_1=0.18\sim0.27\ \text{H}$, $R_2=5\sim28\ \Omega$, $L_2=0.02\sim0.7\ \text{H}$ の範囲で変化している。図4に測定された V_{SM} および I_{SM} と、それから導出された $G_{SM}(z)$ に基づいて I_{SM} を推定した結果を示している。 I_{SM} の測定波形と推定した $\dot{I}_{SM}$ はよく一致しており、変動する動特性のパラメータがよく追跡されている。

以上述べたように、動特性のパラメータの変動が大きいところから、正確な制御にはパラメータを適応せしめるようなモデル規範適応制御系を採用すべきことを示唆している。また、 $\dot{I}_{SM}$ が大きいときに L_1 が減少する傾向は、ステンレス鋼製クライオスタットに流れるうず電流によりコイル全体の磁界の急速な変化が妨げられる傾向を表わしていると考えられる。

図4の波形による推定結果から、 $R_2=28.2\ \Omega$, $L_2=0.205\ \text{H}$ として、1.3秒の間に三角形に電流をゼロから1,200 Aまで立ち上げ、再びゼロに戻す駆動をする場合の交流損失を計算すると、1パルスあたり、10,995 Jとなる。一方、この計算とは別にマグネットだけの交流損失を計算すると次のようになる。

マグネットの交流損失は、フィラメント間の結合電流による結合損失 W_p とヒステリシス損失 W_h とからなる。まず、単位体積あたりの結合損失 w_p は、

図4 不規則入力/出力波形によるマグネット動特性の推定

Fig. 4. Identification of the magnet dynamics using random input/output waveforms.

$$w_p = 2(B_m^2/2\mu_0) \cdot (2\tau_0/t_e) \text{ (J/m}^3\text{)} \dots\dots (1)$$

で与えられる⁽¹⁰⁾⁽¹⁷⁾。ここで、 τ_0 は結合損失の等価時定数であり、測定値より $\tau_0 = 2.1 \text{ ms}$ である。また t_e は電流変化平均時間で、電流立上り時間 t_u 、電流減少時間 t_d より

$$\frac{2}{t_e} = \frac{1}{t_u} + \frac{1}{t_d} \dots\dots\dots (2)$$

とする。 $t_u = t_d = 0.65 \text{ s}$ より $t_e = 0.65 \text{ s}$ となる。1,200 A での磁界を $B_m = 3.70 \text{ T}$ とすると、

$$w_p = 7.06 \times 10^4 \text{ (J/m}^3\text{)}$$

となる。マグネット全体の結合損失は、マグネットの体積を $V (V = (\pi/4) \cdot (0.494^2 - 0.31^2) \times 0.255 \text{ m}^3)$ として

$$W_p = (1/3) w_p V = 697.5 \text{ (J)} \dots\dots\dots (3)$$

と算出される。次に、ヒステリシス損失は単位長あたり

$$P_h = 2J_c/3\pi \cdot d \dot{B} \{1 + (I_t/I_c)^2\} A_{sc} \text{ (W/m)} \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここで、 J_c は臨界電流密度、 d は3層構造フィラメント径、 $\dot{B}$ は磁界変化速度、 I_t はマグネットケーブル通電電流 (定格値)、 I_c はマグネットケーブル臨界電流、 A_{sc} はケーブル中の超電導体断面面積でそれぞれ、 $J_c = 2.2 \times 10^9 \text{ A/m}^2$ (4 T において)、 $d = 40 \times 10^{-6} \text{ m}$ 、 $\dot{B} = 6 \text{ T/s}$ 、 $I_t = 1,920 \text{ A}$ 、 $I_c = 3,000 \text{ A}$ 、 $A_{sc} = \{(40 \times 10^{-6})^2 \pi/4\} \times 210 \times 15 = 3.96 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ とすれば

$$P_h = 0.625 \text{ (W/m)}$$

となる。コイル長 l (1,358 m) にわたって1パルス期間 ($t_u + t_d = 1.3 \text{ s}$) におけるヒステリシス損失を求めると、

$$W_h = (1/2) P_h l (t_u + t_d) = 551.7 \text{ (J)} \dots\dots (5)$$

となる。従って、マグネットの交流損失は、

$$W_h + W_p = 1,249 \text{ (J)} \dots\dots\dots (6)$$

となる。ここで、(3)式における (1/3)、および(5)式における (1/2) は経験的な重み係数である。このように、マグネット本体の交流損失は、貯蔵エネルギー 500 kJ の 0.25% に過ぎず極めて少ないといえる。等価回路の R_2 には、マグネット本体の交流損失とクライオスタットに誘起するうず電流による損失も含まれている。推定した R_2 の値により求めた推失 (10,995 J) の大部分はクライオスタット中の損失によるものである。

次に、ヘリウム蒸発量からパルス駆動時の損失を推定すると、1パルスあたり 6,000 J となり、等価回路より推定した値よりは小さい。その理由は次のように考えられる。

交流損失による液体ヘリウム蒸発量は、マグネット本体とステンレス鋼製クライオスタット内壁のヘリウム液面レベルまでの交流損失によって生じている。このほかにクライオスタット外壁と内壁の間の真空部に液体窒素温度の銅製の輻射熱しゃへい槽があり、この部分にも交流損失を生じるが、液体ヘリウムの蒸発には関係しない。等価回路より推定した損失はこの損失も加えたものとなっている。

4. 超電導マグネットシステム

大形の超電導マグネットを高い信頼性のもとに活用するには、超電導マグネットを運用する技術としての超電導マグネットシステム技術を確立していかなければならない。マグネットシステム技術としては、

(1) 電力系統においてマグネットを効果的に運用する上位レベルの方策

そのもとでの下位レベルの制御技術として、

(2) マグネットの保護動作および永久電流運転などに伴うモード制御

(3) 電流および電力の高精度・高速度制御手法がなくてはならない。0.5 MJ マグネットでは、上記の(2)と(3)のシステム技術の原形として図5のようなシステムを構成した⁽¹⁶⁾。

主回路には、保護抵抗の投入・短絡用に S_1 、マグネットの短絡用に S_2 、電源投入・しゃ断用に S_3 、変換装置直流出力の直列・並列接続用に S_4 の各種スイッチがある。これらのスイッチはシーケンス制御装置のもとにおかれ、マグネット運転の各種モード、すな

図5 マグネットシステムの構成

Fig. 5. Configuration of the magnet system.

わち充放電、永久電流、異常状態における保護などのモード制御が行なわれる。

電流および電力のフィードバック制御には小形計算機 LSI-11/23 による直接デジタル制御が適用される。以下では、直接デジタル制御による電流制御に引続き、モード制御について述べる。

5. 直接デジタル制御による超電導マグネット電流の高速度制御

〈5.1〉 制御系の構成 これまでに小形マグネット (3 kJ) について、三相ブリッジ接続サイリスタ電力変換装置の、直接デジタル制御方式を開発してきた⁽¹³⁾。この成果を応用して、0.5 MJ マグネットについて図5のような小形計算機 LSI-11/23 による制御系を構成し、各種の制御方式を試みた。変換装置の1基あたり直流側出力は 500 V/1,000 A で、2基の接続を直並列に切り換え、500 V/2,000 A または 1,000 V/1,000 A の出力を得る。並列運転時には電流を2台の変換装置で均等に分担するように相間リアクトルを挿入している。

マグネット電流の、フィードバック制御を行なう場合、この電流は直流電流変換器 (DCCT) によって電圧値に変換されて検出される。三相交流電源の相電圧における位相角 60° ごとの交点 (ゼロ点) に同期して電流値を A-D 変換 (分解能 10ビット、変換時間 60 μs) する。計算機はデジタル化された電流量を取り込んで制御演算を実行し、その結果得られる変換装置の出力電圧値の逆余弦演算から点弧角 α をデジタル量として決定し、その値をバッファストレージスタへ出力する。三相交流電圧の交点 (ゼロ点) が検出されるとパルス分配器により、点弧すべきサイリスタのダウンカウンタに点弧角が置数される。カウンタは 480 kHz のクロックにより減算し、ゼロに至ればトリガパルスを発生する。半サイクル (180°) に相当するデジタル量は 4,000 である。

〈5.2〉 最適レギュレータ (LQI) 制御 状態ベクトルフィードバックにより、次の制御系のいずれを実現することができる。

- (1) 制御系の固有値を指定通りに設定する。
- (2) 2乗積分形の評価関数を最小化する (LQI)。
- (3) 非干渉制御系、あるいは動的分割系を構成する。

超電導マグネット制御系の制御量は、電流値 (1出力) または、有効および無効電力 (2出力) である。電流値制御は1入力 (基準電流)/1出力 (マグネット電流) 系であるから、非干渉の考慮は不必要で、(1)に

属する有限整定制御および (2) の LQI 制御の適用を検討した⁽¹⁸⁾。

有限整定制御においては、系の次数 n のステップ数で基準値に整定せしめる制御となるが、操作量が過大になる。また、系の動特性のパラメータ変動に対して感度を低くするような調整パラメータを別に導入する必要がある。これに対し、LQI制御では、 $r(k)$ を基準入力、 $y(k)$ を出力、 ω を重み係数として、評価関数を

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} \{ (r(k) - y(k))^2 + \omega (\Delta u(k))^2 \},$$

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \dots \dots \dots (7)$$

によって与えれば、 ω を大きくすることによって動特性変動に対する感度を下げ、プラントとモデルの動特性の不一致による制御特性の劣化を緩和し、適当な制御特性が得られるので、LQI制御を適用することにした。

超電導マグネットの動特性は、第3章で述べた考察から、(R-L)直列回路によって近似している。更に1サンプル期間 T の間同一点弧角が出力されるので、電力変換装置出力電圧を期間 T のサンプルホールドと利得 K_1 で近似し、演算より計算機出力に至るまでの期間をむだ時間 T_1 で表わしている。これらの伝達関数とマグネット動特性を接続した構成を図6のように制御対象 (プラント) の動特性としている。このプラントの動特性はパルス伝達関数

$$G_p(z) = Z \left[K_1 e^{-T_1/s} \cdot \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \cdot \frac{1}{R + sL} \right]$$

$$= g_1 Z^{-1} + g_2 Z^{-2} + g_3 Z^{-3} / (1 - PZ^{-1})$$

$$\dots \dots \dots (8)$$

によって表わす⁽¹³⁾。このパルス伝達関数を、状態方程式によって表わせば、状態ベクトル $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$ に対する最適フィードバック利得 $K = [k_1 \ k_2 \ k_3]$ および積分器利得 K_I は、リカッチ方程式の解として求められ、 $k_1 = 0$ 、 $k_2 = K_I$ と k_3 が得られる。ここで、 $x_1(k) = y(k)$ である。また、図6において K_2 は、電流検出端である DCCT と A-D 変換器の特性をあわせて利得 K_2 で近似したものである。

観測器においては、図7にみるように暫定ベクトル $\hat{x}_0(k)$ を観測値 $y(k)$ によって修正し、状態ベクトルの推定値 $\hat{x}(k)$ が得られ、それに利得 K を乗じて、

図6 制御系のブロック線図

Fig. 6. Block diagram of the control system.

図 7 LQI 制御のアルゴリズム

Fig. 7. Algorithm of LQI control.

表 2 シミュレーションで用いたパラメータ

Table 2. Parameter values for simulation.

L	0.264 H
R	0.04 Ω
T	16.7 ms
T_1	5.56 ms
K_1	621/4,000 V/digit
K_2	1,024/3,000 digit/A

$u(k)$ を定めている。

〈5・3〉 制御特性 LQI 制御において考慮すべき事項は、

- (1) 操作量の変化 $\Delta u(k)$ の重み ω
- (2) 制御対象動特性のパラメータ変動
- (3) A-D 変換器量子化誤差の影響

である。表 2 に示すような各パラメータを与えて制御系のシミュレーションを行なった結果を図 8 に示している。(a)~(c)の順に ω を小にするほど、基準入力に正確に追従するようになるが、電流検出の量子化誤差の影響でマグネット電圧にこまかな振動がみられるようになる。また、モデルパラメータをプラントパラメータと異なる $L=0.2\text{H}$, $R=0.08\Omega$ と与えた結果は(d)図に示している。実験でも同様の傾向が見られるので、 $\omega=0.05$ を適当な重みとして設定し、繰返しパルス励磁と単一パルス励磁について得られた特性を図 9 に示す。このパルスマグネットの開発における目標の一つである励磁速度 5T/s が電流変化率 $1,976\text{A/s}$ の正確な電流制御によって達成されている。

6. 超電導マグネットのモード制御と保護

〈6・1〉 モード制御 表 3 にみるような主回路ス

基準電流は (a)、(b)、(c)、(d) のともに共通

図 8 制御特性のシミュレーション結果

Fig. 8. Simulated performance of the control algorithm.

(a) (b)

図 9 (a)連続パルス励磁, および(b)単一パルス励磁の実験結果

Fig. 9. Experimental results of, (a) repeated pulsed operation, and (b) single pulsed operation.

イッチの開閉の組合せによってモード制御を行なう。サイリスタ短絡モード (スルーモード) は図 10 にみるように、カスケードに接続されたサイリスタを同時に導通して三相交流電源を短絡することなくマグネットの短絡回路を形成するモードである。

表 3 モード 制 御

Table 3. Mode control.

モ ー ド	電力系統との充放電		永 久 電 流		エネルギー消散 (保 護)		サイリスタ短絡 (スルー, through)	
	並 列	直 列	並 列	直 列	並 列	直 列	並 列	直 列
電力変換器								
点 弧 角 α_1, α_2	$\alpha_1 = \alpha_2$	$\alpha_1 \neq \alpha_2$ ($P-Q$ 同時) (制御)	任 意	任 意	任 意	任 意	カスケード 導通	カスケード 導通
S_1	○	○	○	○	×	×	○ ×	○ ×
S_2	×	×	○	○	○	○	×	×
S_{2a}/S_{2b}	○	○	×	×	×	×	○ ×	○ ×
S_{4a}	×	○	×	○	×	○	×	○
S_{4b}	○	×	○	×	○	×	○	×

○: スイッチ閉, ×: スイッチ開

図 10 スルーモード

Fig. 10. Through mode.

充放電と永久電流またはエネルギー消散のモード間の切り換えにおいて、交流電源は電圧源であり、短絡してはならないが、マグネットは電流源であり開放してはならない。スルーモードはこの相入れない条件を満たすことができ、これらのモードの間に挿入するものである。例えば、充電より永久電流運転のモードに移るとき、充電モードの次にスルーモードを入れて、マグネット電流は(SCR 2-SCR 5)と(SCR 9-SCR 12)を経て通電を続けるが、交流電源とは切り離されている。そのうち S_2 を閉じて永久電流モードの運転に入る。

〈6・2〉 マグネットの保護 電源回路およびマグネットに異常状態を生じたとき、マグネットのエネルギーは保護抵抗(0.4Ω)で消散せしめ、マグネットの過電圧による絶縁破壊や損傷、電源回路の事故の拡大を防止する。シーケンス制御装置は、サイリスタ変換装置の異常、交流側過電流およびマグネットのクウェンチなどの異常状態を監視しているが、これらの異常現象を検知すると、スルーモードを経てエネルギー消散モードに入るように主回路スイッチをシーケンス制御する。

保護抵抗は変換装置に並列でなく直列に接続されて

図 11 保護動作の実験結果

Fig. 11. Experimental results of the protecting action.

いる。これは、スルーモードにおけるサイリスタによるマグネット短絡状態から、 S_1 開により保護抵抗がマグネットに直列に接続され、エネルギー消散ができることをねらったものである。図 11 に充電モードよりエネルギー消散に至る過渡状態を示す。(b) 図にみるように、55 ms の期間のスルーモードに続き、54 ms の期間の保護抵抗とサイリスタを通じる電流の減衰があり、次いで S_2 によりサイリスタが短絡される。サイリスタの電流が保持電流以下になるとサイリスタはオフ状態になるが、図 10 の 2 個のブリッジ回路で並列につながる 2 組のサイリスタのなかでオフ状態への回復時間の相異があれば、図にみるような交流電圧波形が現われることがある。

これまでに数回のクウェンチ現象を生じたが、保護モードは確実に作動してマグネットの損傷には至っていない。

7. む す び

0.5 MJ パルスマグネットとその制御・保護システ

ムについて述べた。その結果は以下のように要約される。

(i) 0.5 MJ パルスマグネットにおいては、液体ヘリウム冷却通路を適切に設け、交流損失を低減するような線材構成を行ない、更に巻線間にゆるみのない処理を施した結果、高い電流密度 (168 A/mm²) で安定に通電でき、高速度 (1,976 A/s) で最大電流 (1,976 A) まで励磁できる性能を得た。

(ii) 高い信頼性のもとで超電導マグネットを活用するための超電導マグネットシステム技術を確認しなければならない。その原形となるシステムを 0.5 MJ マグネットについて構成した。

(iii) マグネットの電流を高速度・高精度で制御する直接デジタル制御系を構成し、状態ベクトルフィードバックを用いた最適制御により正確な電流制御特性を得ている。

(iv) シーケンス制御装置により主スイッチの開閉を制御し、モード切り換えを行なうシステムを構成した。モードの切り換えを確実にこなうために、切り換えの中間に直流側と交流側を分離するスルーモードを設けて、マグネットの短絡においても交流系統には短絡回路を生じないようにした。この結果、マグネットの異常現象においてモード切り換えの組合せからなる確実な保護動作が行なわれている。

最後に、ご指導を賜った本学超電導工学実験センター前所長 犬石嘉雄名誉教授に厚く謝意を申し上げます。また、パルスマグネットの損失の推定にご指導を受けた電総研 大西氏、マグネットの開発に尽力していただいた三菱電機 河村、佐藤、萩野、川口、東野、住友電工 川島、永田、武井 (現在、豊橋科学技術大学) の各氏、ならびに大学院学生として実験に協力された諸君に深い謝意を表する。

この研究には、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」の補助を受けた。

(昭和58年8月15日受付, 同59年5月28日再受付)

文 献

- (1) 安河内・小山:「核融合超電導磁石の研究開発と問題点」電学誌 99, 731 (昭 54-8)
- (2) M. Masuda, et al.: "Power System Stabilization by Superconducting Magnet Energy Storage", *US-Japan Workshop of Superconducting Magnet Energy Storage*, p. 120, Oct., 19-23, University of Wisconsin, Madison (1981)
- (3) 三谷・辻・村上:「超電導エネルギー貯蔵装置による電力系統の安定化効果の評価の方法」電気学会情報処理研究会資料 IP-83-19 (昭 58)
- (4) K. Tsuji, T. Ise & Y. Murakami: "A P-Q Simultaneous Control Scheme for SMES", *US-Japan Workshop of Superconducting Magnet Energy Storage*, p. 106 (1981)
- (5) 伊瀬・辻・村上:「0.5 MJ 超電導エネルギー貯蔵装置による有効・無効電力同時制御」電学誌 B 104, 545 (昭 59-9)
- (6) 村上, 他:「GTO 変換装置による超電導エネルギー貯蔵の有効無効電力制御」電気学会半導体電力変換研究会資料 SPC-83-19 (昭 58-8)
- (7) S. H. Kim, C. I. Krieger, & D. G. Mcgee: "Further Tests of the Argonne 3.3 MJ Pulsed Superconducting Coil and its Nonmetallic Cryostat", *IEEE Trans. Magnetics, MAG-19*, 3, 346 (1983)
- (8) T. Satow, M. Iwamoto, K. Toyoda, T. Ogasawara, Y. Kubota, T. Makiura, K. Yasukochi, H. Momota, K. Sato, S. Yamada, K. Koyama & T. Onishi: "Superconducting Poloidal Coils for the Reacting Plasma Project—Test Results of a Model Coil (RPC-I) at a 200 T/s Pulsing rate and design of a new coil (RPC-II)", *ibid. MAG-19*, 3, 1406 (1983-5)
- (9) Y. Murakami, T. Okada, J. Yamamoto, Y. Inuishi, A. Mitsuishi & M. Nishimura: "0.5 MJ Superconducting Pulse Magnet for Energy Storage", *ibid. MAG-17*, 1, 505 (1981)
- (10) T. Onishi, H. Takeishi, K. Komuro & K. Koyama: "Experiment of Pulsed Superconductive Energy Storage", *Proceedings of the International Symposium on Superconductive Energy Storage*, p. 56 (1979)
- (11) T. Satow, et al.: "Development and Characteristics of 0.5 MJ Superconducting Magnet", *ICEC-9*, p. 309, Kobe (1982-5)
- (12) H. Takei, et al.: "Metallurgical and Electromagnetic Properties of Superconducting Cable for OSAKA Univ.'s 0.5 MJ Pulsed Magnet", *ibid.* p. 485 (1982-5)
- (13) 村上・谷口・平田・西村:「超電導マグネットの直接デジタル制御」電学誌 B 102, 4, 203 (昭 57-4)
- (14) 村上・橋本・西村:「超電導マグネットとその制御系の動特性推定」同上, 102, 3, 129 (昭 57-3)
- (15) Y. Murakami, K. Kikuchi, K. Hashimoto, J. Yamamoto, T. Okada & Y. Inuishi: "Dynamics and Controlled Characteristics of 0.5 MJ Pulsed Magnet", *ICEC-9*, p. 126 (1982-5)
- (16) Y. Murakami, M. Sugita, H. Okuda, N. Ouchi, J. Yamamoto, T. Kinouchi, T. Okada & Y. Inuishi: "0.5 MJ Pulsed Magnet with its Control and Cooling Systems", *ibid.* p. 130 (1982-5)
- (17) H. Takeishi, T. Onishi, K. Komuro & K. Koyama: "The Influence of Solder-filling on the AC Losses of Pulsed Superconducting Cables", *Cryogenics*, p. 509 (1982 10)
- (18) 高橋:「システムと制御」第2版下 (昭 55) 岩波書店