

研究論文

大型ヘリカル装置の超伝導コイル保護用 直流大電流転流回路の開発

棚橋秀伍, 佐藤 徹*, 稲葉次紀**, 森本茂行***
北川史郎, 山田修一, 山本純也, 本島 修
(核融合科学研究所)
*(愛知電機株式会社)
**(電力中央研究所)
*** (金沢工業大学)

(1992年7月9日受理/1992年11月11日改訂原稿受理)

Development of High Commutation Circuit in a Protection System
for Superconducting Coils of the Large Helical Device.

Shugo Tanahashi, Toru Satoh*, Tsuginori Inaba**, Shigeyuki Morimoto***,
Shiro Kitagawa, Shuichi Yamada, Junya Yamamoto and Osamu Motojima
(Received July 9, 1992/revised manuscript received November 11, 1992)

Abstract

A new commutation circuit for protection system of superconducting coils in the Large Helical Device has been developed. This circuit enables the system to transfer a high DC current of 30kA from a power supply to a dump resistor at a coil quench. The circuit is composed of a conventional ac vacuum breaker, disconnectors, power fuse(s) and diodes. Its features include simple configuration, excellent cost performance and reliability because that this circuit needs no large capacitor bank which essential part in a conventional dc breaker system including VCB. Experiments show successful commutation of high DC currents up to 32kA in this circuit.

Keywords:

Large Helical Device, quench, superconducting coil, protection system, commutation circuit, vacuum circuit breaker, power fuse, diode,

National Institute for Fusion Science, Nagoya 464-01.

*Aichi Electric Co.,Ltd., Kasugai 486.

**High Voltage Power Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry, Yokosuka 240-01.

***Kanazawa Institute of Technology, Kanazawa 921.

1. まえがき

核融合用超伝導磁場コイルの大型化に伴い、コイル電流は数10kA、コイルに蓄積される磁場エネルギーは1コイル当たり数百MJと極めて大きくなってきた。とくにヘリカル系装置の場合、大電流化の傾向が強く、現在核融合科学研究所で設計製作中の大型ヘリカル装置 (LHD) [1] では、コイル電流は20及至30kAである。

LHD に用いる超伝導コイルは、超伝導素線の部分的な常伝導転移に対して必ず超伝導回復するように銅・アルミ等の安定化材を用いた完全安定化線を使用して製作されるが、素線の移動による摩擦熱や液体ヘリウム液面の下降などの冷却能力の低下など予測困難な原因により全体的な常伝導転移 (クエンチ) が生じる危険性が存在する。

この危険性に対する対策として、コイル電源回路に保護系を設ける必要がある。この保護系には高い信頼性が要求されその責務は非常に大きい。

この保護系は保護用抵抗と転流回路から構成され、クエンチ発生時に電源をコイルから切り離してコイル電流を保護抵抗に転流させてコイルの蓄積エネルギーを放出させ、コイルの発熱を最小限に抑えて焼損を防止するものである。

この転流回路においては、電流が保護抵抗に移行するに伴って抵抗に発生する高電圧に抗して保護抵抗に転流させなければならない。30kA の電流の転流終了時点ではその電圧は 3kV 程度になる。

この種の用途にはこれまで各種の直流遮断器が用いられてきた。しかし従来の直流遮断器の中で 30kA 級の性能を持つものはコスト面で問題がある。

そこで超伝導コイルの保護という特殊な用途の特徴に合致して、30kA の直流電流を遮断転流出来、汎用の真空遮断器、電力ヒューズ、ダイオードなどの量産品のみを組み合わせたもので経済性に優れかつ信頼性の高い転流回路を開発したので報告する。

2. 従来の直流遮断器の問題点

直流遮断の方式には、(a)無充電コンデンサを補

助としてアーク電圧の急上昇を利用する電流零点を使用した転流式、(b)充電された並列コンデンサの他励振動による逆電流注入式、(c)コンデンサとリアクトルからなる高周波振動回路を並列に設けた自己励振式、(d)GTO などのスイッチング素子を用いた半導体式、(e)アークの逆電圧による限流式など種々のものが実用化され或は開発されている [2,3,4]。

しかし(a)と(b)のコンデンサを用いる各種の方式では性能的には十分なものが実用に供せられている [2,5] が、大容量コンデンサを必要とするため高価であるという問題がある。(c)の自己励振式は遮断電流が大きくなり、(d)の半導体式は極めて高価である。(e)のアーク電圧による限流式には(e1)気中アークによるもの、(e2)限流ヒューズを用いたもの [2,3,6-9] などが報告されている。

しかしながら、(e1)の気中アーク式では定格電圧が1500~6600V [10] と適当なものの電流が10kA 程度以下と小さく、並列使用ではコストがかさむ欠点がある。この様にこれらの方式では性能とコストにおいて問題がある。超伝導コイルの保護用という限られた用途に適した性能と低コストのものが求められているなかで、(e2)のヒューズ方式においては低コストで十分な遮断電流・アーク電圧が期待されるので、この方式によるものを検討する必要がある。

3. 大型ヘリカル装置用コイル励磁回路に必要な転流回路

大型ヘリカル装置の超伝導コイルは3対のヘリカルコイルと3対のポロイダルコイルより成り、コイル電流は20kA から30kAである。自己インダクタンスは0.5H から1.24H で相互に強く磁気結合している。これらはそれぞれ個別のサイリスタ整流電源で励磁され、コイルにクエンチが発生したときには時定数約20秒で急速減磁させてコイルを焼損から保護することになっている。尚 LHD 装置設計におけるクエンチ時のコイル温度上限は100K としている。サイリスタ整流電源は出力電圧が数十ボルトと低圧であり、耐圧も低いことから急速減磁の時にはコイルから切り離すことにし

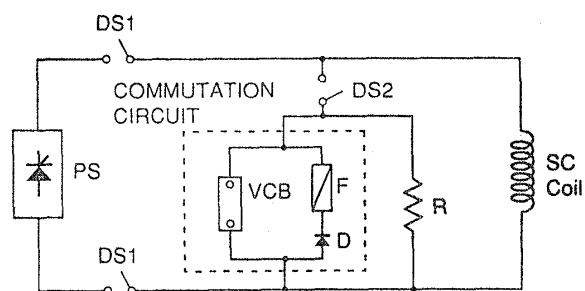


図1 Commutation circuit in a protection circuit for a superconducting coil in LHD.

ている。これら超伝導コイル励磁回路として現在計画中的実機回路は6回路共全て図1に示す回路構成となっている。図1中の真空遮断器 VCB、ヒューズ F およびダイオード D から成る部分を転流回路と呼ぶこととする。

図1において実機回路の動作を簡単に説明する。運転に先立ち予め真空遮断器 VCB を閉路しておく。超伝導コイルを励磁する時には断路器 DS1 を閉路し、サイリスタ整流電源 PS において正電圧を発生させてコイル電流を上昇させ、目標の電流値に至った後はその電流を保持する。減磁する時は負電圧を発生させて電流を零にする。次

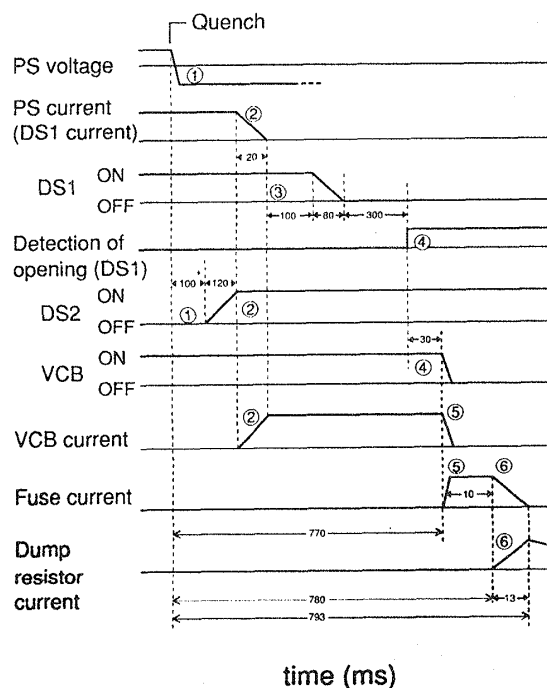


図2 Sequential action of the protection circuit. Melting time (10ms) of the fuse is correspond to the current of 32kA.

に図1とタイムシーケンスを示す図2と共に保護動作を説明する。超伝導コイルに電流が流れている時、超伝導コイルにクエンチが発生した場合には、①断路器 DS2 に閉指令を送り、同時にサイリスタ整流電源 PS に負の電圧を発生させる（逆変換動作）。②220ms 程度の後 DS2 が閉となり直後に電源電流（DS1 電流）は20ms 程度で零となると共に VCB 電流が立ち上がる。電源のリプル電圧による微少な断続電流が残るがこれは問題とならない。③電源電流零の検出で DS1 に開指令を送る。この時コイル電流は断路器 DS2 と真空遮断器 VCB を通して流れている。④DS1 開を検出して、VCB に断指令を送り30ms 後に断となる。⑤VCB 電流はヒューズ F とダイオード D から成る分岐回路（F-D ブランチ）に転流する。⑥溶断時間に達するとヒューズ F が溶断してアークが発生し、このアーク電圧で電流が並列の保護抵抗 R に転流する。その後は所定の時定数（約20秒）でコイル電流は減衰する。なお VCB に電流が流れる時間は550ms 程度であるため連続定格電流としては小容量のものが使用できる。

4. 転流回路の構成と試験回路

転流回路の構成を図3に示す試験回路において詳しく説明する。また転流回路の構成要素を表1に示す。

表1において、VCB は3個の真空バルブを持っており、1個の真空バルブの真空アーク電圧が15-20V [11] であるので3個直列接続にして全体のアーク電圧を高くして使用した。このアーク電圧により F-D ブランチへの急速な転流を期待した。各種の遮断器の中で比較的アーク電圧が低い

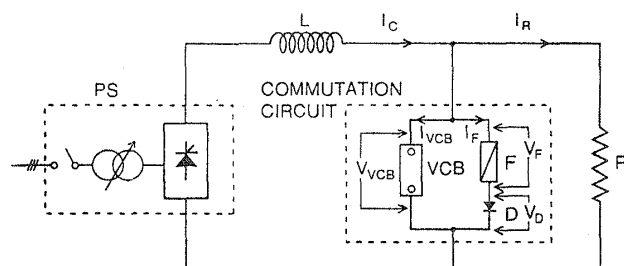


図3 Test circuit for the commutation circuit.

表1 転流回路の構成要素の定格

記号	名称	仕様等	備考	
VCB	真空遮断器（3相）		3バルブを直列接続で使用	
	動作方式	電動・スプリング方式		
	定格遮断電流	31.5kA		
	定格電圧	7.2kV		
	定格電流	2000A		
	接触抵抗	12μΩ（1相）		
	形式	HS3106P-20MF-N		
	製造者	富士電機株式会社		
F	限流形電力ヒューズ			
	形式	CL	CLS-R	
	定格電流	G400A	M400A	
	定格電圧	3.6kV	3.6kV	
	定格遮断電流	40kA	40kA	
	最大遮断 I^2t	$0.75 \times 10^7 \text{A}^2\text{s}$	$1.10 \times 10^7 \text{A}^2\text{s}$	
	抵抗値	540μΩ	350μΩ	
	製造者	三菱電機株式会社		
D	ダイオード		2S2Pで使用	
	FD3500BP			
	許容電流二乗時間積	$1.25 \times 10^7 \text{A}^2\text{s}$		（1個あたり）
	平均順電流	3500A		（1個あたり）
	サージ順電流	55kA		（1個あたり）
	順電圧降下（11kAで）	1.5V		（1個あたり）
	製造者			三菱電機株式会社

真空遮断器を選定した理由は、それが急速な絶縁回復特性[12]を持っているからである。

ヒューズはM400AとG400Aの二種類を比較し、G400Aについては2並列(2P)でも実験した。ヒューズは溶断後に高いアーク電圧が期待されるので保護抵抗に発生する電圧に抗して電流を保護抵抗に転流させうる十分な能力を有するものとして選定した。またその両端に溶断前に発生する電圧が真空遮断器のアーク電圧に比べて小さくなるようにそれ自身の電気抵抗が比較的小さいものを選定した。

ダイオードは真空遮断器が「閉」状態で電流が流れている時にその接触抵抗による電圧によってヒューズに流れる分流電流を小さくする目的で用いており、この分流電流がヒューズの溶断時間や長期劣化に影響を与えない程度に抑えている。またダイオードの許容電流二乗時間積(I^2t)がヒューズの最大遮断 I^2t に比して充分大きなものを選定してダイオード自体の破損を防いでいる。なお

ダイオードは、このような性能を持たせるため2S2P接続で使用しているが、これには順方向の電圧のみが印加されるのみで各ダイオード素子には自動的に電圧・電流の分担が行われるので付加的な均圧・均流回路は不要である。並列数は電流分担の片寄りによる加速昇温も考慮して選定した。図4には使用したダイオードの最大順特性曲線及び測定値を示す。

以上のように転流回路の構成要素は全て一般に市販されている量産品である。

次に図3の試験回路について詳細に説明する。PSは直流電源(最大電圧450V, 最大電流40kA), Lはコイル(自己誘導係数2.1mH, 内部抵抗5.6m Ω), Rは保護抵抗(95m Ω), VCBとFとDとからなる閉回路のインダクタンスは2.6 μH (実測), FとDとRとからなる閉回路のインダクタンスは60 μH (実測)である。実験における電流波形の概略を図5に示す。実験ではVCBを「閉」として電源PSより電圧を発生させる。コイルLの時

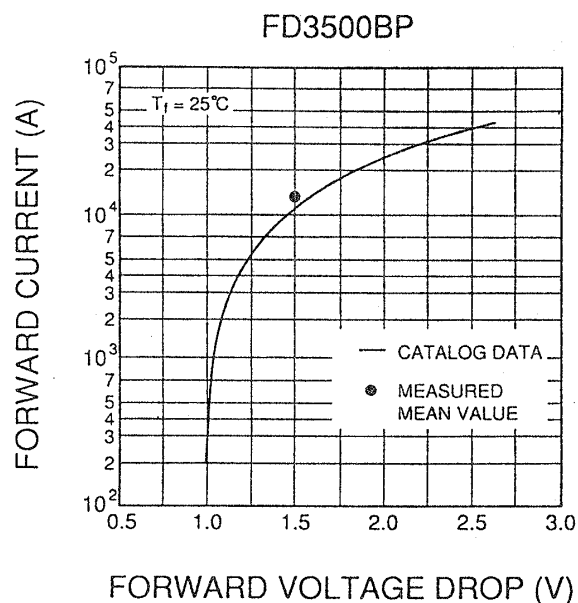


図4 Maximum forward characteristics (soil curve) and measured mean value (point) of the diode (FD3500BP).

定数 (0.375秒) で電流 I_c が立ち上がる。この電流は VCB を通して流れる。電流が一定値に近づいた時点で真空遮断器 VCB を「開」とすると共に、電源電圧をさげる。電流は VCB から F-D ブランチに転流しヒューズ F の溶断で保護抵抗 R へ転流、電流の減衰という経過をたどる。

5. 実験結果とその考察

図6に G400A ヒューズ2並列を用いた32.1kAでの実験の電流電圧波形を示す。VCB 端子電圧 V_{VCB} は当初1.5V となっているがこれは VCB の接触抵抗による電圧である。この電圧によって F-D ブランチに分流する電流は100A 以下と想定され、この電流による溶断時間への影響は無視できる。VCB が時刻 $t=0$ で開極を開始して $t=2\text{ms}$ の VCB 電圧39V まで3段階で上昇している。この3段階の電圧上昇は3個のバルブの開極に対応している。 $t=2.5\text{ms}$ で VCB 電圧は急速に下がり、その後 $t=3.5\text{ms}$ で極小値となる。この時点でヒューズ電流 I_F は上昇を終了している。この時 VCB 電流 I_{VCB} は零となっていると考えられる。ヒューズ端子電圧 V_F がこの時点からヒューズエレメントの発熱により上昇し11.3ms で溶断発弧し高アーク電圧を発生している。この

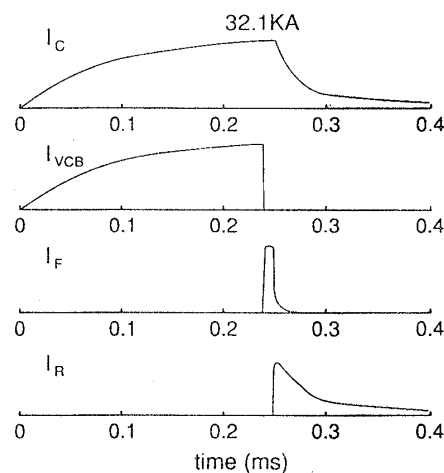


図5 Cuurent waveforms in a commutation experiment.

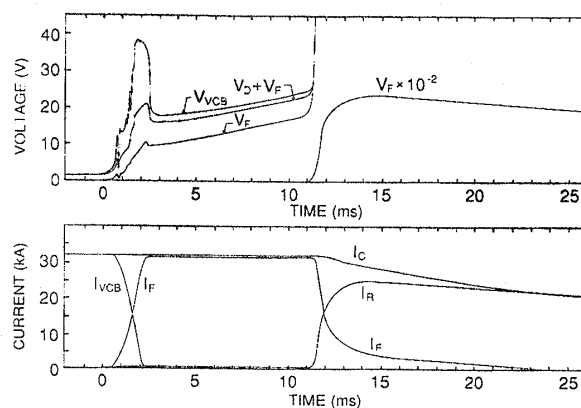


図6 Voltage- and current waveforms in a commutation experiment (parallel-connected G400A fuses are used).

高アーク電圧によりヒューズ電流 I_F は保護抵抗に転流する。この後 $t=15\text{ms}$ で保護抵抗電流 I_R が最大となり、 $t=24\text{ms}$ でヒューズ電流 I_F が零となり、これ以後 I_R は指数関数的に減少している。以上の様に VCB に流れていた電流が VCB の開極開始から2段階の転流を経て24ms で完全に保護抵抗に移っている。この時間のうちヒューズに電流が流入して溶断するまでの時間は電流値の二乗に依存して大きく変化するがその他の時間は電流値にほぼ比例するものと考えられる。

今回の実験に用いたヒューズの溶断時間と電流との関係を図7に示す。

ヒューズの溶断時間と電流との関係は「溶断時間—電流特性」として発表されているのでそれを図中実線で示した。しかし標準規格 [12] では

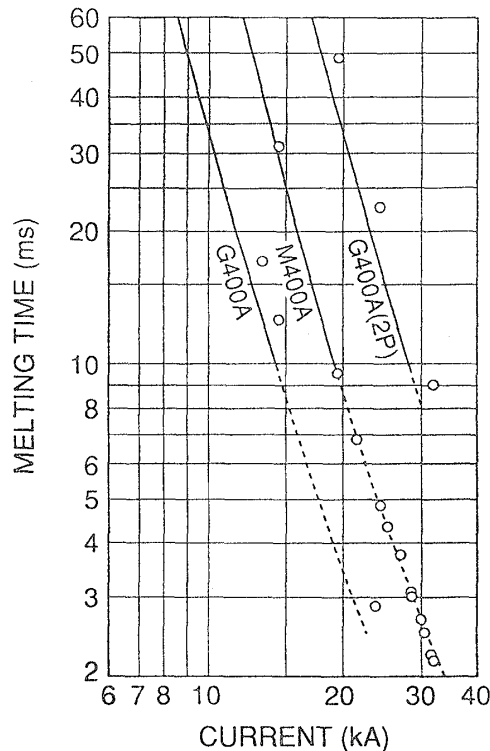


図7 Relation between melting time and current of the fuses.

10ms 以上を表示する指示をしていて、それ以下は表示していない。従って10ms 以下の部分は実線部を外挿し、これを破線で示した。また規格特性は平均値であり、製品のばらつきは電流軸で $\pm 20\%$ を超えないことと規定されている[13]。ここで溶断時間は規約溶断時間[13-15]であり、(1)式で定義されている。

$$t_{mv} = \int_0^{t_m} i^2 dt / I^2 \quad (1)$$

ここで t_m は溶断時刻、 i はヒューズ電流の瞬時値、 I はヒューズ最大電流値である。

図7に示す様に使用した M400A (3.6kV) ヒューズの実測溶断時間 (○印) は規格曲線上に良く乗っている。実測した溶断時間は(1)式の定義による規約溶断時間であり、測定した電流波形から求めたものである。G400A 及び G400A 二並列 (2P で示す) の場合には規格値に対して測定値の方が電流値で10%程度大きく出ている。これは製品のバラツキによるものと考えられる。この試験に使用した M400A ヒューズ11個には製造ロットの異なるものが約半数含まれている。G400A

は全て同一ロットである。

この実験では32kA 迄の電流で期待した転流が行われ、図7に示す18回の試験以外の他のヒューズを用いた数回の実験を含め全ての試験で転流が正常に動作した。

なお試験用電源の関係で32kA 以上の電流については試験を行っていない。従ってこの電流値はこの方式の転流回路の限度ではない。

6. 実用化に関する考察

真空遮断器の接触抵抗は3バルブ直列で使用前の測定値 (小電流での測定値) が $63\mu\Omega$ であり、実験中の接触電圧を図8に示す。図中の直線はこの $63\mu\Omega$ に対応したものである。この直線より上方の点 (14.2kA) は実験の初期のものでその他の点は概ねこの直線のやや下方にある。定格電流遮断での接触抵抗の推移は一般に若干低下する傾向にあるものの殆ど変化しないとの報告がある[16]が、定格遮断電流での報告は無いようである。今回の各電流値での実験回数 (少なくとも18回) で殆ど変化がないかやや小さく出ている。仮に接触抵抗が1.5倍に増加したとした場合にはヒューズへの分流電流は G400A の場合約6kA となりヒューズの定格電流400A (1個当たり) を大幅に超え溶断時間に影響を与えるのでダイオードの直列数を1.5倍の3にする必要がある。こうすればヒューズへの分流電流は定格電流以下とするこ

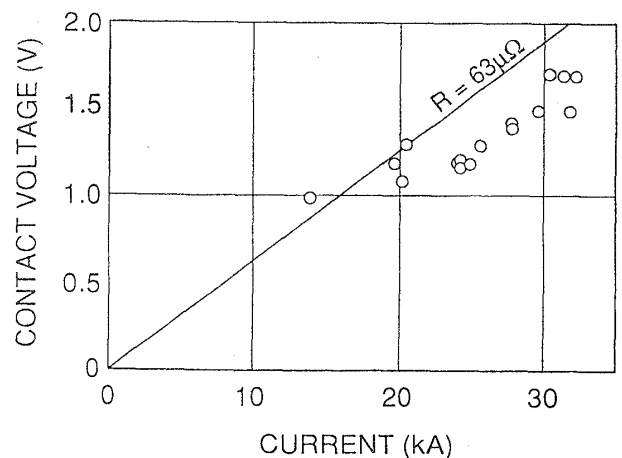


図8 Contact voltage and current of VCB (three valves are connected in series). The straight line shows contact voltage corresponding to the resistance measured before operation at low current.

とができる。実用に供した場合の遮断回数は試験を含めても今回の実験回数程度と考えられる。従って、接触抵抗のこれ以上の変化はないと考えられるが、余裕をとってダイオードを三直列2並列(3S2P)とするのが適当であると考えられる。

またVCBの電氣的寿命は1万回(メーカー保障値)であるが定格遮断電流での寿命は数回程度(メーカーにより異なる)とされていて明確な保障回数は規定されていない。ただ電極の消耗が限度に達するまで使用可能としている(取扱説明書)。しかし今回の実験回数では検知できるほどの消耗はない。

次に図6において $t = 2.5\text{ms}$ から 3.5ms の間はVCBに微小な電流が流れていると考えられるので、ヒューズ溶断時刻がこの時間内に来ないようにヒューズの選定をしなければならない。このこととヒューズの溶断時間-電流特性が電流で $\pm 20\%$ が許容されていることの両方から十分な時間的余裕をもたせる必要がある。このため 15kA 以下の電流にたいしてはG400Aを使用し、 $15\text{--}20\text{kA}$ の電流に対してはM400Aを使用し、 20kA から 30kA にはG400A2並列を使用するのが適当である。

VCBへの開極指令から開極開始までの時間は $30 \pm 2\text{ms}$ (実測)が見込まれる。従って図2において、クエンチ検出から 32kA の電流を保護抵抗へ転流を完了するまでの時間は 793ms である。この時間は超伝導コイルの急速減磁時定数(20秒)に比べて充分小さいが、これによるコイル温度の付加的上昇を見込んでおく必要がある。

実用上の問題として一回毎にヒューズを交換する必要があることが難点としてあるが、完全安定化超伝導コイルのようにクエンチ発生の可能性の極めて小さい用途で、しかも動作した後は数時間後でなければコイルの再励磁が行われないような箇所にはこの方式の転流回路を用いることは特別に不便ではない。もちろん再励磁において正常なヒューズに交換されていることが必要であり、そのためのインターロックを採用することは困難なことではない。

ダイオードの方向は保護動作時に電流が順方向

に流れる向きに挿入するが、電流の方向が変わる可能性のある回路では2組のものを逆並列接続して挿入する。

7. 全電流領域における保護動作

ヒューズの溶断時間は概ね電流の自乗に逆比例していて小電流になる程溶断時間が急激に増大する。このため超伝導コイルの定格電流以下の全ての電流領域において本方式の有効性と限界ならびにその対策を論ずる必要がある。

常伝導化したコイル導体の温度上昇はポットモデル[17]を用いると次式で表される。

$$U = S_c^2 \int_{T_b}^{T_m} \frac{\sigma_c C_c(T)}{\rho_c(T)} dT = \int_0^\infty [i(t)]^2 dt \quad (2)$$

ここで T_b はクエンチ直前のコイル導体の温度で 4.2K 、 T_m は導体の最終温度(設計値 100K)、 σ_c はコイル導体の実効的比重、 $C_c(T)$ は温度 $T(\text{K})$ におけるその実効的比熱、 $\rho_c(T)$ は温度 T における安定化材の実効的抵抗率、 S_c はその断面積である。 $i(t)$ は時刻 t におけるコイル電流で、初期値を I_0 とする。コイルの材質・形状・構造が決まれば U は定数となる。

(A) I_0 としてはコイルの定格電流 I_R の 110% に設計されていると仮定する。この電流 I_0 がコイルに流れている時にクエンチが発生したとする。クエンチ発生直後に保護抵抗 R_d がコイル電流回路に挿入されたたすると、(2)式の右辺から次式を得る。

$$U = I_0^2 \cdot \tau / 2 \quad (3)$$

ここで τ は減衰時定数で $\tau = L/R_d$ 、 L はコイルの実効的自己インダクタンスである。LHDのSCコイルでは $\tau = 20\text{s}$ に設定することにより導体の最終温度 T_m を 100K 以下程度に設計されている。

(B) コイル電流が I の時、クエンチ発生から t_0 秒後に保護抵抗 R_d がコイルの電流回路に挿入された場合には、(2)式右辺から次式を得る。

$$U = I^2 \{t_0 + (\tau/2) \cdot \exp(-2t_0/\tau)\} \quad (4)$$

いま保護抵抗挿入時間（別の言い方をすれば保護動作遅れ時間）の最大許容限度を求めるため(3)式と(4)式を等しいと置き t_0 を t_{0m} と書き直して次式を得る。

$$(I/I_R)^2 = 1.1^2 \tau / [2\{t_{0m} + (\tau/2) \cdot \exp(-2t_{0m}/\tau)\}] \quad (5)$$

(5)式における電流 I と最大許容保護動作遅れ時間 t_{0m} の関係を LHD の OV コイル ($I_R = 30\text{kA}$, $\tau = 20\text{s}$) を例にして図9の曲線 A に示す。

(C) コイル電流が I である時におけるクエンチ発生直後にコイル電源の逆定電圧 $-V_0$ により電流を減衰させたならば(2)式右辺から次式を得る。

$$U = I^2 t_V / 3 \quad (6)$$

ここで $t_V = IL/V_0$ である。

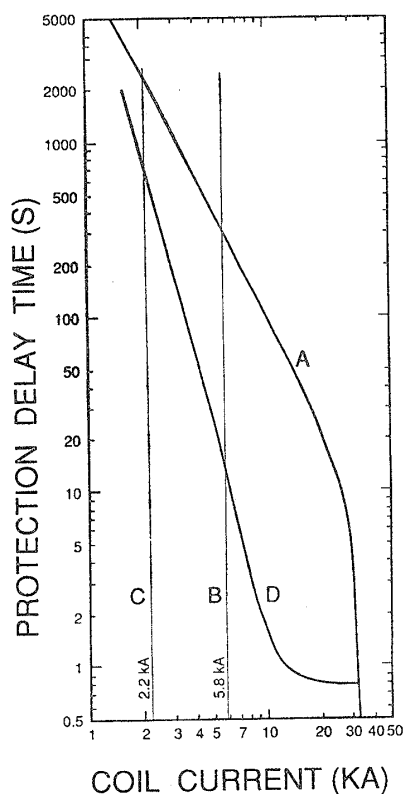


図9 Allowable maximum protection delay time (A curve) and protection delay time of parallel-connected two G400A fuses (D curve). Line B shows maximum current that can be decreased by the negative voltage of the power supply. Line C shows maximum current that can be decreased by the resistance of bus lines between coil and power supply. In all cases the final temperature of the quenched part in the SC coil is assumed to be 100K.

OV コイルにおいては $V_0 = 20\text{V}$, 実効的自己インダクタンス $L = 640\text{mH}$ であるから

$$t_V = 960\text{s} \quad (7)$$

となり, (3)式と(6)式を等しいと置いて,

$$I = 1.1 I_R \sqrt{3\tau/2t_V} = 5.8\text{kA} \quad (8)$$

即ち電源電圧によって減磁する場合にはコイル電流が 5.8kA 以下であればコイルの昇温を T_M 以下に出来る。この電流値を図9中に直線 B で示す。

(D) 停電などで電源が働かない時にクエンチが発生した時, コイル電流回路の導体の電気抵抗だけで減衰させる場合を考える。常伝導導体 $8000\text{mm}^2 \times 40\text{m}$ を考慮して $140\mu\Omega$ 程度の抵抗が想定されるので, 減衰時定数 τ_{BUS} は 4500s 程度となる。(3)式から

$$I = 1.1 I_R \sqrt{\tau/\tau_{\text{BUS}}} = 2.2\text{kA} \quad (9)$$

即ち, 2.2kA 以下のコイル電流の場合には回路の電気抵抗のみで減衰して, コイルの温度を T_M 以下に出来る。この電流値を図9中に直線 C で示す。

(E) 図9中の曲線 D はヒューズ G400A (2P) を用いた遮断転流回路におけるクエンチ検出からヒューズ溶断迄の時間（保護動作遅れ時間）を示している。

この図から次のことが判る。即ち, コイル温度上昇を限度 (100K) 以下にする条件の下で, 保護動作遅れ時間は A 曲線に示す時間迄許容されるが, ヒューズを用いた本方式の場合 D に示す時間で動作し, A 曲線以下にある。ただし 1.6kA (最小溶断電流) 以下では動作しない。一方コイル電源が正常であれば 5.8kA (B 直線) 以下の電流では電源電圧のみで減磁することによってコイル温度を限度以下にできる。また電源が動作しない場合には常伝導導体の抵抗により 2.2kA 以下なら安全である。これ以上の電流では本方式の保護動作を必要とする。

以上で全電流領域でクエンチ時のコイル保護が可能であることが判明した。

8. 信頼性に関する考察

VCB は保護用機器であり、その信頼性は高い。それが確実に動作することを要求するためには、その定格の範囲内で使用する必要がある。この点では定格遮断電流（今回採用した VCB で 31.5kA）以下を守り、開極後の印加電圧が定格電圧（同 7.2kV）以下を守る限り保障されている。VCB の接触抵抗については製品個々の値が形式試験時の 1.2 倍以下との規定 [13] があり、また前述のように接触抵抗値が大きくなることがない。余裕を見てダイオードを 3S2P としておけば十分に信頼性が上がる。VCB の機械的動作自体の信頼性は十分に保障されている。ヒューズも元来保護用部品でありその信頼性は高い。規格値からのばらつきについては前述のように電流値に対応したフーズを選択することで問題を完全に回避出来る。ダイオードに関しては、電流二乗時間積の選択に注意すれば信頼性は充分確保出来る。これら部品の集合体としての転流回路の信頼性は VCB の急速な絶縁回復特性とヒューズの高アーク電圧特性に依拠している。これらの特性によりこの回路が確実に動作することを実験は証明している。

9. 本方式の特長と欠点

本方式の特長は第一に 30kA の大電流を保護抵抗に転流できること。第二に大容量のコンデンサなどの高価な部品を用いていないことと、使用部品が全て市販の量産品のみで構成しているので経済性に優れていること。第三に回路構成が簡単であり、VCB を「開」とするための引き外しに小電力が必要である他は、全ての部品が基本的に補助的な電源や装置が不要であること。このことは故障発生率を下げ信頼性の向上に役立つ。第四に消耗部品のヒューズは安価である。

欠点としては、第一に動作毎にヒューズの交換が必要なことである。これは大型の超伝導コイルへの適用においては必ずしも欠点とはならない。第二に二段転流方式のため保護動作時間がやや長いことである。第三にヒューズを使用しているので小電流ほど保護動作遅れ時間が長くなるため広範囲の電流に対応させるためには電源や回路抵抗

などの支援が必要であることである。このため電流の大きさによって保護方法を選択する様制御することが必要となる。

10. まとめ

大型ヘリカル装置の超伝導コイル保護に用いることのできる転流回路の開発を行った。この回路は 32kA の直流電流を保護抵抗へ転流させることが出来る。この回路は構成が簡単で構成部品の信頼性が高くかつ安価であるので信頼性が高くかつ経済性に優れている。また回路構成が簡単であることは総合的な信頼性が高いことを意味する。反面、毎回ヒューズの交換を要するが、クエンチ発生頻度は極めて小さいのでこのことは必ずしも欠点とは云えない。

この様にこの転流回路は大型ヘリカル装置の超伝導コイル保護用として有力な候補となり得るものである。

参考文献

- [1] A. Iiyoshi, M. Fujiwara, O. Motojima, N. Ohyabu and K. Yamazaki, Fusion Technology, **17**, 169 (1990).
- [2] 大電流技術調査専門委員会, 大電流技術の現状と展望, 電気学会技術報告 (II 部) 第 228 号, 24 頁 (電気学会, 昭和 61 年).
- [3] 大電流制御技術調査専門委員会, 大電流制御技術の現状と動向, 電気学会技術報告 (II 部) 第 292 号 (電気学会, 1989 年).
- [4] 大内茂樹, 電気学会雑誌, **111**, 147 (1991).
- [5] 嶋田隆一, 谷 啓二, 岸本 浩, 田村早苗, 柳 父 悟, 玉川 徹, 高橋宣之, 金井康晴, 電気学会論文誌 B, **54B-93**, 773 (1979).
- [6] T. Inaba, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, **PAS-103**, 1888 (1984).
- [7] 稲葉次紀, 生産と電気, 1 月号 (昭和 58 年).
- [8] T. Inaba, Y. Kuzuma and Y. Goda, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, **PAS-103**, 1903 (1984).
- [9] 稲葉次紀, 葛間泰邦, 合田 豊, 電力中央研究所報告 683001, (昭和 58 年 5 月).
- [10] 岡崎正幸, 関口輝一, 電気学会論文誌 B, **110**, 701 (1990).
- [11] 大電流工学ハンドブック, 電気学会 大電流応

- 用技術調査専門委員会編, (コロナ社, 1992), 43頁.
- [12] 真空遮断器の大容量化調査専門委員会, 直流遮断器の大容量化とその基礎技術, 電気学会技術報告(II部)第259号 (昭和62年).
 - [13] 電気学会電気規格調査会標準規格, 電力ヒューズ, JEC-2330-1986 (電気書院).
 - [14] ヒューズ専門委員会, ヒューズの溶断時間と限流ヒューズの最大アークエネルギーについて, 電気学会技術報告(II部)第7号(昭和44年).
 - [15] ヒューズ常置専門委員会, 限流ヒューズの直流動作について, 電気学会技術報告(I部)第132号 (昭和55年).
 - [16] 真空開閉器具と適用の実際, 岩原皓一編, 104頁 (電気書院, 昭和50年).
 - [17] 佐藤 隆, 服部泰秀, 第19回低温工学研究発表会, A2-6 (1997年11月).