大容量キャパシタバンクの保護システム

正員 佐藤 康宏 (電総研)

正員 平野 洋一 (電総研)

正員 山口 作太郎 (三菱電機)

Protective System for High Power Capacitor Bank

Yasuhiro Sato, Member, Yoichi Hirano, Member (Electrotechnical Laboratory), Sataro Yamaguchi, Member (Mitsubishi Electric)

A new protection system for capacitor banks in case of short-circuiting accident is described.

A pulsed power system, which is composed of many capacitor units and closing switches, is well known for producing a controlled pulse current of high power as for the power source of plasma experimental device, etc.. According to the increase of a capacity of bank system, it becomes important to protect the whole bank system from the accident of short-circuiting in a capacitor unit.

Although some protective ideas have been proposed, these conventional ideas have not been sufficient means to absorb the energy flowing into the failure unit from other normal units. Constructing the new 1 MJ capacitor bank for plasma experimental device, we designed a protective device of new conception. The new protection system, which is able to absorb the bank energy and to suppress the short-circuiting current flowing into the failure capacitor units, overcomes the defect in former protection systems. To confirm the utility of new protection system, we made a test of protection resistor imitating the actual bank circuit. Test result showed that absorbable energy for unit ceramic resistor amounted to 1500 joule/cc. The new system is adopted to the bank system of TPE-1RM15 plasma experimental device.

キーワード：キャパシタバンク，パルスパワー，保護システム，セラミック抵抗

1. ま え が き

高電圧・大電流のパルスを発生する手段として、大容量コンデンサを用いてエネルギーの蓄積を行い、閉路スイッチを始動することによって定められた時間に瞬時に大電流を発生するキャパシタバンクは、エネルギーの蓄積・移送手段が容易なことから、数 MJ 程度までのパルスパワー電源として利用される⁽¹⁾。

パルス電源用コンデンサは、1~10 kJ のユニットを必要な容量分だけ並列接続する構成を用いる。この場合、キャパシタバンクの充電中などにユニット内の構成素子や端子部などにおいて絶縁破壊事故が生じると短絡状態になるので、並列に接続された他の健全ユニットのエネルギーが破壊ユニットに流れ込む。バン

クの全エネルギーが小さい場合は、各キャパシタユニット間に接続された伝送用ケーブルなどの回路インピーダンス分によって短絡電流を抑制し、エネルギーを吸収することなどで事故の拡大を防ぐことが可能である。しかし装置の大型化などに伴いバンクエネルギーが大きくなると、ケーブルによる保護だけでは不十分になるので、故障ユニットを外部で短絡したり、回路から切り放してエネルギーが故障ユニットに流入しないように工夫された保護方式が提案されている。ただし、これらは構造が複雑で必ずしも動作が確実でなく、またエネルギーの吸収機構をもたないという不具合をもっている。

当所の核融合実験装置においても、研究計画の進展に伴ってキャパシタバンクの容量が大きくなってきた

ため、事故時の安全対策をせまられることになった。そこで従来方式の欠点を改善するものとして、エネルギー吸収用抵抗を用いるとともに、キャパシタユニットを並列と直列の構成にした新しい保護方式を考案し^{(2)~(4)}、各種検討と基礎的実験を行った。その結果、本システムの実用性が確認できたので、当所核融合実験装置 (TPE-1 RM 15)⁽⁵⁾の電源保護に応用した。

2. キャパシタバンク保護システムの概要

〈2・1〉 従来の保護システム キャパシタバンク破壊事故時の安全保護対策として、故障ユニットに過大なエネルギーが流入するのを防ぐための、種々の方法が提案されている。図1は従来の安全装置の一例で⁽⁶⁾、並列接続されたキャパシタユニット群 $C_1 \sim C_n$ の中の1ユニット (C_x) が短絡破壊事故を起こしたとき、他の健全ユニット群から C_x へ流入する短絡電流が発生する電磁力によって保護短絡器 S_x の絶縁を破壊して C_x の高電圧側を外部で短絡し、故障ユニットに電流が流れ込まないようにして爆発などの事故の拡大を防止するよう工夫したものである。

図2は保護短絡器の構造の一例を示している⁽⁷⁾。故

図1 従来のキャパシタバンク保護方式の一例
Fig.1. Circuit diagram of a capacitor bank with a conventional protective means.

図2 保護短絡器の構造の一例
Fig.2. Sectional view of a protective short-circuiting device.

障ユニット C_x へ流入する短絡電流が、ヒューズエレメント2を爆発溶断させることによって端子間絶縁シート4を破壊短絡し、エネルギーが C_x へ流入しないように工夫したものである。

しかし、これらの方法では短絡器の動作が遅れるとエネルギーが故障ユニットに流入し続けることになり、事故の拡大をまねきかねない。また蓄積エネルギーを積極的に吸収する機能を備えていないので、短絡器が動作した後も故障ユニットおよび放電回路自身の抵抗分によってエネルギーが消費されるまで、大きな短絡電流が回路を流れ続けるという欠点がある。

他の保護システムとして、短絡電流を用いてヒューズを遮断し、故障ユニットを回路から切り放す方式が提案されている⁽⁸⁾。しかしながら、電流の遮断時間が速くなるほど正常動作時には発生しない大きな過渡電圧が回路に誘起される。また、電流の遮断技術は閉路技術に比べて格段に難しく安定な動作が保証されにくい。更に、ヒューズが動作しアークが消弧されるまでの間、過大な電流が故障ユニットを流れるので事故の状況を更に悪化させる恐れがある。

短絡器やヒューズを用いる方式は、正常時の回路電流では動作せず事故時の短絡電流で速やかに動作するように調整する必要がある。また保護システムが動作した場合、短絡器やヒューズを交換する必要があるなど経済性を考慮すると、従来提案されている短絡方式およびヒューズ方式にはまだ改善すべき点が多い。

〈2・2〉 本システムの概要 上記問題点を解決するものとして、キャパシタユニットの各々にエネルギー吸収用抵抗を挿入するとともに、キャパシタバンクのユニットを並列接続と直列接続の組合せにした図3に示す回路方式を提案した⁽²⁾⁽³⁾。

簡単のため、最初に図4(a)のように同一容量 C_u をもつキャパシタユニットが n 個並列接続され、各ユニットには抵抗値 R_{ab} をもつエネルギー吸収用抵抗が挿入されている場合を考える。ここで、 x 番目のユニット C_x が短絡破壊事故を起こしたとすると、このときの等価回路は図4(b)になる。キャパシタユニットの充電電圧、内部抵抗を各々 V_c, R_c とすると、短絡電流 I_{sh} および C_x の挿入抵抗 R_x (抵抗値 $= R_{ab}$) で吸収されるエネルギー W_x は次式で表すことができる。

$$I_{sh} \sim \frac{V_c \times (n-1)}{(R_{ab} + R_c) \times n} \dots\dots\dots (1)$$

$$W_x \sim \frac{C_u V_c^2 \times R_{ab} \times (n-1)^2}{2 \times (R_{ab} + R_c) \times n} \dots\dots\dots (2)$$

$R_{ab} > R_c$ で、なおかつ並列数 n が大きい場合は

図 3 エネルギー吸収用抵抗を用いたバンク保護システム (ユニット構成が n 並列 $\times k$ 直列の場合)

Fig. 3. Improved circuit diagram with protective resistors (units are consist of n -parallel and k -series connection).

図 4 抵抗を用いたバンク保護システムの簡単な構成例 (ユニットが n 並列の場合)

Fig. 4. Improved circuit diagram with protective resistors (units are connected in parallel).

$$I_{SH} \sim V_c / R_{ab} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$W_x \sim n C_u V_c^2 / 2 \quad \dots \dots \dots (4)$$

となる。蓄積エネルギーの大部分が挿入抵抗 R_x で吸

図 5 抵抗を用いたバンク保護システムの一例 (ユニットが n 並列 $\times 2$ 直列の場合)

Fig. 5. Improved circuit diagram with protective resistors (n -parallel and 2-series connection).

収されることになり、故障ユニット内での吸収エネルギー量は小さい。従って、前節で述べた保護短絡器などを用いなくても事故の規模が大きくなる心配はない。また絶縁破壊時の短絡電流は挿入抵抗値によって制限され、瞬時にしろ過大な電流が流れることはない。更に、従来の保護システムのように動作条件の調整を行う煩わしさもなく、回路構成も単純である。挿入抵抗により短絡時の寄生的な振動電流が防止される効果も期待でき、電源を構成する他の機器類への故障時の悪影響を小さくすることが可能である。また保護動作が働いた場合でも、基本的には抵抗などの構成素子を交換する必要がないため経済的である。

次に図 5 のように、キャパシタユニットおよび保護抵抗が並列に接続され、これが 2 段に直列接続された回路において、例えば 1 段目のユニット C_{1x} が故障した場合を考える。図 4 の場合と同様に、並列接続されたユニット群のエネルギーの大部分が故障ユニット部 (C_{1x} および R_{1x}) に流入するが、2 段目のユニット群 ($C_{21} \sim C_{2n}$) は故障ユニットに対して短絡状態にはならないので、事故による影響の範囲は 1 段目のみに限定され、 R_{1x} で吸収すべきエネルギーは全エネルギーの $1/2$ でよいことになる。また、キャパシタユニットの充電電圧がバンク電圧の $1/2$ になるので、抵抗の耐電圧特性も楽になる。

同様の考え方で、図 3 のように、 n 個並列接続されたユニット群を直列に k 段接続すると、短絡事故時に事故の影響を受ける範囲は全バンクの $1/k$ に限定され、故障ユニットの挿入抵抗が吸収すべきエネルギー量も同じく $1/k$ になる。バンクの蓄積エネルギーや充電電圧などのバンクパラメータに応じてキャパシタユニットの直並列構成を適当に選べば、挿入抵抗の

仕様を現実的なものとする事ができる。

なお本システムは、正常放電時に放電エネルギーの一部が挿入抵抗部で損失を受けエネルギー利用効率が低下するという基本的な欠点をもつが、等価的な挿入抵抗値は R_{ab}/n となるので、バンク容量、すなわちキャパシタユニットの並列数 n が大きくなるほどその損失分は小さくなる。ちなみに、本システムの導入を検討した TPE-1 RM 装置の場合、保護抵抗を挿入したことによる電流の低下分は約 4.4% になるとの評価が得られたが、安全性を考慮した場合に許容できる損失と判断した。目標とする許容損失を同程度以下とした場合、1 MJ を超える一般的なバンクシステムにおいて本保護システムは十分に適応可能と考える。

3. エネルギー吸収用抵抗について

〈3・1〉 抵抗の選定 抵抗を用いた保護方式が実用化されるためには、パルスのなエネルギーに対して必要な耐電圧、耐電流およびエネルギー吸収能力を有する抵抗を用いる必要がある。そこで、これらの目的にかなうと思われる抵抗を選択し、その抵抗が上記保

護システムに利用できることを確認するため、またパルスパワーに対する抵抗の仕様および性質を明らかにするために、抵抗へのパルス印加試験を行った。

抵抗材料には金属系、炭素系、セラミック系などがある。それぞれに特徴をもつが、パルスのなエネルギー吸収用材料としてこれらを比較すると、アルミナセラミックに抵抗体を混ぜて焼結したセラミック系抵抗が無誘導性であること、500°C 程度までの温度領域で安定した性能が得られること、許容吸収エネルギーが大きいことなどから、これを使用することとした。抵抗形状には棒状、管状、ディスク状などがあるが、抵抗およびインダクタンスが最も小さくなり、許容吸収エネルギーが大きい（ディスク抵抗では 300 J/cc、棒状抵抗では 70~90 J/cc⁽⁹⁾）ディスク形状を採用した。試験に用いた抵抗仕様を表 1 に示す。

〈3・2〉 抵抗の性能確認試験 パルス印加試験に用いる回路を図 7 に示す。80 kJ (10 kV) のキャパシタバンクおよび可変インダクタによって実際の放電条件を模擬したパルス電流を発生し、抵抗に印加される電流、電圧、上昇温度を測定した。電流の測定には、ロゴスキーコイル、および積分補正と感度補正のためにホール効果素子（商品名：LEM モジュール、LA 1500-S⁽¹⁰⁾）を併用した。電圧測定には岩崎通信機製高電圧プローブ (HV-P 30⁽¹¹⁾) を、温度測定には携帯型デジタル放射温度計（チノー製 IR-AH⁽¹²⁾）を用いた。

抵抗は、抵抗値の異なるもの、形状の異なるもの、抵抗表面の絶縁塗料の異なるものなど、表 2 に示す 4 タイプについてそれぞれ数枚ずつ用意した。抵抗の電流接触面は 4 kg/cm² 以上の指定圧力になるように導電端子をかねるアルミニウム板（2 cm 厚）で挟んで固定した⁽⁹⁾。

試験は、抵抗に印加される電圧、電流および表面温

表 1 セラミックディスク抵抗の特性⁽⁹⁾
Table 1. Characteristics of ceramic resistor.

項 目	特 性 値
かさ比重	2.65
比 熱	0.12~0.18 cal/g°C
熱伝導率	0.003 cal/cm·s°C
温度係数	-0.05~-0.1 %/°C
熱膨張係数	4.0~7.0×10 ⁻⁶ cm/°C
最高使用温度	250 °C
許容注入エネルギー	300 J/cc
接触圧力	4.0 kg/cm ²

図 6 セラミックディスク抵抗の仕様⁽⁹⁾
Fig. 6. Characteristics of ceramic resistor.

図 7 パルス印加試験用回路構成
Fig. 7. Test circuit.

表 2 試験に用いた抵抗のタイプ別パラメータ
Table 2. Parameter of ceramic disk resistors.

	抵 抗 寸 法				沿面の 絶縁塗料
	抵抗値	外半径	内半径	厚 さ	
タイプ-1	0.25 Ω	37.5 mm	15 mm	25 mm	有機塗料
タイプ-2	0.56	37.5	25	25	有機塗料
タイプ-3	1.4	37.5	15	25	有機塗料
タイプ-4	18	20		25	無機塗料

図 8 パルス印加試験時の電圧、電流波形
(1.2 ms 秒後に絶縁破壊を生じた例)

Fig. 8. Measured voltage, current and resistance (break down has occurred at $t = 1.2$ ms).

度を同時測定しながら、抵抗が絶縁破壊されるまでエネルギーを徐々に上げていった。図 8 はタイプ 2 の抵抗への印加試験において、抵抗が 1.2 ms 後に絶縁破壊したときの電圧、電流の測定例を示す。

〈3・3〉 抵抗の吸収エネルギー量の算定 抵抗が吸収するエネルギー量は、抵抗値 (R) および抵抗に印加される電圧 (V)、電流 (I) を同時測定することによって以下の 4 通りの方法で計算できる。

- (i) 蓄積エネルギーを回路の抵抗比に分配する
- (ii) $I^2 \times R$ を時間積分する
- (iii) $V \times I$ を時間積分する
- (iv) V^2/R を時間積分する

ここで、電流値や温度の変化などによって抵抗値が変化することを考慮して、吸収エネルギーの計算には抵抗値を用いないケース (iii) を採用することにした。ただし、抵抗値が大きい場合 (タイプ 4) では電流値の測定精度が悪くなるためケース (iv) を用いた。

以上の方法に基づく抵抗への吸収エネルギー量を、表 3 にまとめた。表によれば、もっとも良かったのはタイプ 4 ($R=18 \Omega$) の場合で、1,500 J/cc 程度までエネルギーが吸収できており、パルスエネルギーに関しては公表値の 5 倍程度まで使用できることがわかった。

図 9 抵抗の吸収エネルギーと温度上昇値
Fig. 9. Absorbed energy vs. temperature rise.

〈3・4〉 抵抗の温度測定 最高使用温度は 250°C と指定されているが、パルスエネルギーによる温度上昇の評価に対する知見がないため、パルスの使用条件下での抵抗温度を測定してその特性を明らかにするとともに、パルス加熱に対する熱歪などの問題点の有無を検討することとした。温度測定には放射温度計⁽¹²⁾を用いたが、抵抗表面の放射率の違いによる誤差を避けるため、サーミスタ温度計を用いて校正を行った。その結果、放射温度計の放射率 (ϵ) を 1 に設定した場合にもっとも両温度計の指示が一致した。

以下、 $\epsilon=1$ に固定して放電試験時の抵抗温度の変化を放射温度計で測定した。放電持続時間は 2~5 ms であるが、温度計の応答時間は 1 s なので、放電前、放電の 1 s 後、およびその後の 30 s ごとに抵抗温度を測定して減衰時定数 (a) を求め、以下の式から放電直後のピーク温度 ($T_{\max}$) を推算した。

$$T - T_0 = T_{\max} \exp(-at) \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 T_0 : 放電前の抵抗温度、 t : 放電後の経過時間、 T : t 秒後の温度

温度評価の結果を表 3 および図 9 にまとめた。表 3 によると、抵抗体の最大温度上昇値は抵抗側面の絶縁塗料によって異なっており、無機系塗料の場合に 500~600°C、有機系塗料の場合には 200~300°C であった。これは後述のように、塗料の耐温度特性が異なっており、焼入れ処理時の温度以上では、塗料の蒸発を生じ沿面耐電圧を低下させるためである。図 9 より、注入エネルギーが大きくなると比例関係から若干ずれてくるものの、温度上昇値はほぼ吸収エネルギー量に比例している。このずれは、抵抗体およびアルミニウム支持体からの熱放射のバランスが高温で変わるためであろう。同図より、抵抗の比熱 C は

表 3 テスト結果
Table 3. Test result.

(a) タイプ1 (抵抗値=0.25 Ω, 有機系塗料)

番号	充電電圧 (kV)	吸収エネルギー (J/cc)	吸収パワー (kW/cc)	温度上昇 (°C)	メ モ
1	1.32	15	23	7	導電ペースト 塗布
	2.38	40	58	22	
	3.45	77	108	45	
	4.51	135	182	74	
	5.58	208	282	116	
	6.65	298	398	158	
	7.70	413	546	216	
2	8.76	413	546	216	沿面フラッシュ オーバー
	3.45			49	
	4.51	144	135	82	
	5.58	211	195	117	
	6.65	309	280	163	
	7.70	426	380	217	
	8.76	561	491	282	
3	9.81	561	491	282	沿面フラッシュ オーバー
	3.45	74	71	48	
	4.51			77	
	5.58	198	181	111	
	6.65	298	269	163	
	7.70	413	364	225	
	8.76	539	467	285	
4	9.81	539	467	285	導電ペースト 塗布
	3.45	68	64	45	
	4.51	121	112	77	
	5.58	190	172	114	
	6.65	281	252	157	
	7.70	391	348	210	
	8.76	518	450	262	
5	9.81	672	585	326	OK
	3.45	77	75	41	
	4.51	130	122	68	
	5.58	201	184	105	
	6.65	298	271	135	
	7.70	418	371	193	
	8.76	546	481	241	
6	9.81	699	601	296	クラック
	3.45	77	75	41	
	4.51	130	122	68	
	5.58	201	184	105	
	6.65	298	271	135	
	7.70	418	371	193	
	8.76	546	481	241	

(b) タイプ2 (抵抗値=0.56 Ω, 有機系塗料)

番号	充電電圧 (kV)	吸収エネルギー (J/cc)	吸収パワー (kW/cc)	温度上昇 (°C)	メ モ
1	4.51	116	113	66	OK
	5.58	177	173	99	
	6.65	262	249	139	
	7.70	364	343	188	
	8.76	475	538	239	
	9.81	611	704	296	
2	3.45	71	71	42	沿面フラッシュ オーバー
	4.51	125	122	73	
	5.58	194	188	108	
	6.65	278	265	152	
	7.70	386	362	204	
	8.76	503	468	261	
	9.81	657	600	322	
3	10.36	627	702	322	沿面フラッシュ オーバー
	3.45	75	74	41	
	4.51	125	122	67	
	5.58	196	190	99	
	6.65	285	273	143	
	7.70	390	369	188	
	8.76	511	480	240	
4	9.81	370	969	359	OK
	3.45	76	66	45	
	4.51	124	120	65	
	5.58	186	181	105	
	6.65	279	264	153	
	7.70	393	371	217	
	8.76	519	483	282	
5	9.81	545	689	359	沿面フラッシュ オーバー
	2.38	39	39	38	
	3.45	74	75	62	
	4.51	131	126	96	
	5.58	191	186	136	
	6.65	280	270	185	
	7.70	404	380	232	
6	8.76	519	484	232	沿面フラッシュ オーバー
	9.81	545	689	359	
	2.38	39	39	38	
	3.45	74	75	62	
	4.51	131	126	96	
	5.58	191	186	136	
	6.65	280	270	185	

(c) タイプ3 (抵抗値=1.4 Ω, 有機系塗料)

番号	充電電圧 (kV)	吸収エネルギー (J/cc)	吸収パワー (kW/cc)	温度上昇 (°C)	メ モ
1	3.45	87	62	54	沿面フラッシュ オーバー
	4.51	174	111	85	
	5.58	260	164	128	
	6.65	361	231	182	
	7.70	412	944	182	
2	3.45	41	33	24	導電ペースト 塗布
	4.51	85	67	49	
	5.58	179	122	83	
	6.65	270	183	116	
	7.70	284	810	116	
3	2.38	41	33	24	導電ペースト 塗布
	3.45	79	60	51	
	4.51	132	102	84	
	5.58	228	163	130	
	6.65	228	163	130	
4	3.45	83	60	56	アーク発生
	4.51	176	110	90	
	5.58	265	165	133	
	6.65	347	228	193	
	7.70	431	1,011	1,011	

(d) タイプ4 (抵抗値=18 Ω, 無機系塗料)

番号	充電電圧 (kV)	吸収エネルギー (J/cc)	吸収パワー (kW/cc)	温度上昇 (°C)	メ モ
1	2.38	124	11	65	導電ペースト 塗布
	3.45			133	
	4.51	510	39	224	
	5.58	796	61	314	
	6.65	1,115	86	428	
	7.70	1,458	107	428	
2	2.38	136	11	61	導電ペースト 塗布
	3.45	288	22	128	
	4.51	505	39	212	
	5.58	760	60	307	
	6.65	1,108	85	434	
	7.70	1,480	116	537	
3	8.76			635	沿面フラッシュ オーバー
	9.81			635	
	2.38	146	11	71	
	3.45	310	23	137	
	4.51	542	40	230	
	5.58	826	62	325	
4	6.65	1,202	87	467	OK
	8.76	1,503	117	561	
	9.81			561	
	2.38	146	11	71	
	3.45	310	23	137	
	4.51	542	40	230	

$C=0.17\sim0.21 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ ……………(6)
と評価される。

4. 試験結果のまとめ

〈4・1〉 抵抗形状の影響について 放電試験において絶縁破壊を生じたときの放電痕を見ると、タイプ2および4の抵抗の場合は外部帰還電流路のあるほうの側面に集中しており、回路インピーダンスを最小にするように電流が流れていた。ドーナツ型タイプの抵抗(タイプ1, 3)の場合は、必ず抵抗の内側穴のエッジ部分から沿面絶縁破壊を生じていた。また、ドーナツ型抵抗のほうが耐電圧が低い傾向にあった。これは抵抗に絶縁塗料を塗布する際、外側沿面は吹付けで行っているが、内側沿面は刷毛塗りであるため塗料が不均一になっているのが原因の一つと思われる。また端部での電界集中を抑えるため抵抗の角を丸めているが、作業性の違いから内側沿面部の仕上がりが外側ほど良くないことも影響しているのであろう。なお内側沿面部に絶縁破壊を生じたとき、空間部の空気が瞬間的に膨張して抵抗が破壊される場合があった。従って、穴のないタイプの抵抗を用いるほうが適当であると判断した。

〈4・2〉 抵抗側面の塗料の影響 抵抗の絶縁破壊は必ず沿面フラッシュオーバーによっており、抵抗内部の貫通による破壊はなかった。このため抵抗側面に絶縁強化のための塗料が塗布されるが、緑色のものと白色のものの2種類が用意されている。緑色の抵抗は有機溶剤系の塗料で350°Cで焼入れ処理がされている。一方、白色の抵抗はセラミック系塗料が用いられており500°Cで焼き入れを行っている⁽¹³⁾。

そこで塗料の違いによる影響をテストしたところ、セラミック系塗料を用いた抵抗のほうが沿面耐電圧が高く吸収エネルギーが大きかった。有機系塗料の場合は抵抗温度が300°C程度でフラッシュオーバー事故を生じているが、無機系塗料の場合は400°Cを超えても絶縁破壊を生じていない。これは、有機系塗料のほうが低い抵抗温度で塗料成分の一部が抵抗側面から蒸発し、この蒸発成分に沿ってフラッシュオーバーが生じたためと思われる。絶縁破壊を生じた抵抗の表面状態を観察したところ、有機系塗料の場合は黒化していたが、無機系塗料の場合は放電痕跡も目立たず外観の変化は少なかった。

〈4・3〉 抵抗接触面の処理方法による影響 抵抗の電流接触面を固定する集電端子にアルミニウムを用いたが、大気中ではアルミニウム表面が酸化されて絶縁膜ができるため接触抵抗が増加する。この対策とし

て、当所のプラズマ実験装置TPE-2⁽¹⁴⁾では、アルミニウム導体の電流接触部に導電ペースト⁽¹⁵⁾を塗布して、表面の酸化を防ぐとともに電流接触の改善を図ることにより、良好な結果を得た。

今回もアルミニウム表面の電流接触部に同様の導電ペースト処理を施して、処理をしない場合との比較実験を行ったが、試験結果からは明らかな違いは見られなかった。ただし、抵抗温度が上昇して200°Cを超えるとペースト塗布部から白煙が立つようになり、更に1~2 kV電圧を上げたところで絶縁破壊を生じた。これは、抵抗が加熱されることによってペースト中の成分が蒸発し、これに沿ってアークが成長したためであると考えられる。従って、試験結果に差異がないならば、ペーストを用いないほうがよい。ただし、酸化膜が形成されるほどの期間において実験を行えば、異なる結果を生じた可能性がある。この弊害を避けるためには、銅板など絶縁性の酸化膜を作らない材料を用いるか、蒸発成分の少ない導電ペーストを使用する必要がある。

〈4・4〉 抵抗の破壊原因について 抵抗へのパルス印加試験の結果をみると、抵抗のタイプ、使用条件などによって破壊限界が異なっているものの、最適条件下ではパルスの許容吸収エネルギーは1,500 J/cc程度であることが明らかになった。そして、この限界値を制限する要因に3種類あることが観察された。以下に、その要因の内容および対策を列記する。

(1) 抵抗の耐電圧限界を超えた場合 抵抗に印加される電圧が許容値を超えたために生じる電圧的破壊である。図8に例示したケースがこれにあたり、ほぼ電圧のピーク(〜5.8 kV)で絶縁破壊を生じている。破壊はすべて沿面で生じ、貫通破壊はなかった。抵抗中心に穴のあいていない形状、無機系塗料を用いた抵抗、導電ペーストを用いない方法を考慮することなどによって、大気中では7 kV (2.8 kV/cm)の耐圧が得られた。

(2) 電流接触面でのアーキングによる破壊 抵抗と金属板との電流接続は点接触であるが、電流値が大きくなると接触部の許容値を超えて接触抵抗による局所的な過熱とアーキングを発生する。そして、金属を熔融蒸発させてこれに沿って抵抗の絶縁破壊を生じる。許容電流値を増やすには、接触抵抗を減らす何らかの対策を施す必要があるが、導電ペーストを用いて接触抵抗を減らす方法は必ずしも良い結果ではなかった。絶縁性酸化皮膜を作らない銅金属を用いるなどの対策を考えるべきである。

(3) 抵抗温度上昇が原因となる破壊 抵抗への

吸収エネルギーにより抵抗が加熱され、温度上昇が生じる。抵抗が加熱されると、抵抗中の揮発性成分が蒸発してこれに沿ってアークが伸展し、絶縁を破壊する。また温度上昇はパルス的なので、蒸発物の急激な膨張や熱歪による亀裂などの影響を受けやすい。対策としては、温度上昇に耐える抵抗を用いること、冷却を考慮することなどである。ただし、無機系塗料を用いた抵抗は許容温度上昇値が高いので、他の破壊原因によって制限される場合が多い。

5. 本安全方式の TPE-1 RM 15 装置への応用

プラズマ実験装置 TPE-1 RM 15⁽¹⁶⁾ の OH 電源は Fast バンク（プラズマ電流立上げ用）と Flat バンク（電流維持用）の 2 系統から構成され〔図 10(a)〕、それぞれ 624 kJ (10 kV × 2 直列, 6.5 kJ ユニツト 96 台で構成) および 400 kJ (3.3 kV, 3.7 kJ ユニツト 108 台で構成) の電源容量をもつ。Fast バンク用始動スイッチはイグナイトロンと金属接触スイッチが並列接続で使用され⁽¹⁷⁾、Flat バンク用制御素子にはダイオードが用いられている。Fast バンクには負荷電流の

(a) 改造前の回路構成

(b) バンク増設および保護回路改良後の回路構成

図 10 TPE-1 RM 15 装置の OH 電源
Fig. 10. Ohmic heating circuit of TPE-1 RM 15.

振動防止用に SUS 製抵抗 R_{sus} (50 mΩ) が挿入されている。キャパシタユニットの短絡破壊などに対するバンク保護用としては、図 2 に示す方式⁽⁷⁾を用いた保護短絡器と、ユニット間およびユニットからスイッチまでの 5 m の同軸ケーブルのインピーダンス分による短絡電流の抑制効果を期待していた。保護短絡器 (SCD) はキャパシタユニット 2 台に 1 個ずつ装着されている。上記 SUS 抵抗は Fast バンクに一括して挿入されているため、ユニットの短絡事故に対する保護とはなり得ていない。

研究の進展に伴い、Fast バンクを 1.04 MJ (6.5 kJ ユニツト 80 並列 × 2 直列) に増設することになったが、従来の対策だけではバンクの短絡破壊事故などが生じた場合に 500 kJ 近いエネルギーが故障ユニットおよび短絡器に流れ込むとともに、伝送系の通電定格を大幅に超えることが予想された。そこで、抵抗保護による本安全システムを採用することとした。SUS 抵抗を撤去して、代わりにセラミックディスク抵抗 ($R_{1,1} \sim R_{2,40}$) を各ユニットに分散配置した〔図 10(b)〕。ここで、回路パラメータによって決まる臨界振動条件を満足する全抵抗値が 30 mΩ となるので、これをキャパシタユニットに挿入される各抵抗 ($R_{1,1} \sim R_{2,40}$) で分担すると、0.6 Ω と計算される。このときの短絡電流は (3) 式より与えられ、15.8 kA となる。ちなみに、本抵抗がない場合の短絡電流は ~400 kA と計算される。ユニットの短絡破壊事故時に各抵抗が吸収すべきエネルギーは ~500 kJ である。一方、各保護抵抗に前記予備実験で用いたタイプ 4（無機系塗料）のディスク抵抗を用いるとすると、抵抗 1 個当たりの吸収エネルギーおよび耐電圧は、試験結果より 1,500 J/cc および 2.8 kV/cm となり、温度上昇値は 500°C 程度になっている。抵抗素子 1 個当たりの体積は 110.5 cm³ なので 165 kJ のエネルギーを吸収でき

図 11 TPE-1 RM 15 用 OH 電源上の保護
抵抗器および短絡器

Fig. 11. One of protective devices on OH bank for TPE-1 RM 15.

ることになる。従って抵抗は4個以上であればよい。一方、保護動作時に抵抗部に印加されるサージ電圧を模擬回路を使って測定したところ、充電電圧の1.1倍が発生することがわかったので、抵抗の必要な直列数は2になる。ここで2倍の安全率を見込むこととし、抵抗素子を4直列×2並列の構成にした。図11に保護装置の実際の装着状態を示す。装着後10,000回を超える放電試験を行っているが、保護回路が動作するような事故はまだ起こっていない。

6. ま と め

大容量キャパシタバンクの短絡事故時などに対する安全保護対策として、従来の保護短絡器やヒューズを用いたシステムはバンクエネルギーを積極的に吸収処理する機能をもっていなかったため、バンク容量が大きくなるにつれて、事故の規模が拡大するなどの欠点をもっていた。

そこで、従来の保護システムがもつ欠点を補うものとして、短絡事故時にバンクの蓄積エネルギーを抵抗に吸収させて事故の拡大を防ぐとともに、キャパシタユニットを並列と直列接続の組合せを用いて事故の及ぼす範囲を限定するように工夫した新しい保護システムを提案した。そして、本システムの実用性に関する確認試験を行った結果、その実用性が確認された。主な特徴を以下に示す。

(1) 保護短絡器やヒューズを用いる従来の方法と比較して、構成が単純で保護動作が確実である。

(2) 保護動作後も基本的には部品の交換を必要とせず、メンテナンスフリーである。

(3) 本方式は正常動作時の出力波形にはほとんど影響を与えることなく、事故時の短絡電流を安全値以内に抑え、放出エネルギーを速やかに吸収してユニット爆発などの二次的事故の発生を確実に抑えることができる。

(4) パルスエネルギー吸収用として、無機系塗料を用いたセラミック系統焼結抵抗を用いれば、1.5 kJ/cc以上のエネルギー吸収能力、気中で2.8 kV/cm以上の沿面耐電圧をもつことが実験により確かめられた。

以上の検討結果に基づいて、当所のプラズマ実験装置TPE-1 RM 15のOH電源を増設する際に、本保護システムを採用した。

本研究の遂行にあたって、試験用抵抗類の提供をいただくなど、東海高熱(株)殿には御協力をいただき深く感謝いたします。電総研プラズマ研究室および三菱電機核エネルギー開発部の関係者には、本研究を行う

機会を与えていただき、また各種の助力をいただいたことを感謝します。

(平成4年9月21日受付, 同5年3月8日再受付)

文 献

- (1) 竹田: 電学誌, **100**, 810 (平2)
- (2) 特願平1-245491号
- (3) 特願平1-245492号
- (4) 米国特許第5087999号
- (5) T. Shimada, Y. Hirano, Y. Yagi, et al.: 14th Symp. on Fusion Technology, **1**, p. 665 (1986)
- (6) 特許第738536号
- (7) 特開昭57-88825号
- (8) MAXWELL カタログ「Franklin High Voltage Fuses」
- (9) 東海高熱カタログ「エレマ抵抗器」, CC-30/1 OB (S61.07)
- (10) LEM モジュールカタログ「LEM Module LA 1500-S」
- (11) 取扱説明書「電圧プローブHV-P 30」, G981-925101(K) (岩崎通信機)
- (12) 「携帯形デジタル放射温度計IR-AH series」, チノーカタログ Cat-NO. CP-35-07
- (13) 東海高熱(株)からの情報による
- (14) 電総研彙報, **50**, 5 (昭63)
- (15) 新井 修: 日立評論, **48**, No. 9, 1043 (昭63)
- (16) 島田・平野・八木・小川: 電総研彙報, **53**, No. 3, 215 (平成元)
- (17) 山口, 他: 電学論B, **108**, 443 (昭63-10)

佐 藤 康 宏 (正員)

昭和44年3月早稲田大学電気工学科卒業。同年4月富士電機製造(株)入社。同社を経て、46年4月電子技術総合研究所入所。同所プラズマ研究室において、ピンチ型核融合プラズマ試験装置の建設と実験、および核融合装置技術の研究開発に従事。

平 野 洋 一 (正員)

昭和22年8月23日生。47年3月京都大学大学院電機工学修士課程修了。同年4月電子技術総合研究所入所。現在、エネルギー基礎部プラズマ研究室にて、逆磁界ピンチによる核融合の研究に従事。

山 口 作 太 郎 (正員)

昭和26年11月生。55年3月名古屋大学理学研究科修了。56年4月三菱電機(株)入社後、核エネルギー開発部にいて、プラズマ核融合装置の設計開発に従事。平成4年8月より核融合科学研究所に勤務。