スローバンクの大容量化に伴う保護システムと その破壊保護素子

正員 長谷川 三 雄 (国士館大)

正員 井 上 訓 一 (指月電機)

正員 上 野 勲 (東京大)

Protective Systems and its Protective Switching Elements on Local Failures of Large Slow-Capacitor Bank System

Mitsuo Hasegawa, Member (Kokushikan University), Kunikazu Inoue, Member (Shizuki Electric Co., Inc.), Isao Ueno, Member (University of Tokyo)

In various applications of pulsed power technologies, large capacitor bank systems are used to feed high current impulse to different experimental devices. The accidental electric breakdown in one of the capacitors in a parallel connection of the large bank may result in serious damages such as mechanical explosion and oil effusion or fire. In most fast banks, each unit capacitor has an output gap switch, which is expected to decouple the capacitors one another. However, no such special element is adopted usually in the slow bank system, partly because of the economical consideration.

We have developed a novel and inexpensive protective element for these relatively slow capacitor banks, utilizing a concept of the enclosed type of the fast breakers. The principle of the operation of the protection elements is verified by a simulation experiment. Their practical effectiveness is also successfully demonstrated in the application to the system of the pulsed high magnetic field generator.

キーワード：パルスパワー、スローバンク、破壊保護素子、高圧密閉形高速遮断素子、低インダクタンス短絡スイッチ

1. ま え が き

パルスパワー科学技術は、核融合炉、加速器増殖炉など、長期エネルギー資源の開発に極めて重要な分野で、その近年の進展は目覚ましい^{(1)~(6)}。

その周辺装置としてのパルスパワー発生装置、電磁力応用装置、強磁界発生装置、ならびに、核融合実験装置などに用いられる衝撃大電流発生装置は、多数個の単位コンデンサを特別なディカップリング素子を用いず、充放電用コンデンサバンク(以後、スローバンクと略記)をコンデンサの並列接続で形成し、その充電蓄積エネルギーを単一負荷に放電する方式がとられている。この方式の大きな問題点は、バンクを形成しているあるコンデンサが内部絶縁破壊などによる短絡事故を起こすと、他の正常コンデンサから短絡事故絶縁破壊コンデンサ(以後、破壊コンデンサと略記)へ過大なエネルギーが流入し、その結果コンデンサのケースやがいしを破壊し、油の流出や、その油への引火などの事態をまねき、その経済的損失が極めて大きい点にある。

そこで、この方式の問題点を解決するためには、破壊コンデンサを瞬時に正常コンデンサから遮断するか、あるいは、破壊コンデンサを低インダクタンス回路で短絡するか、などの手法が知られているが、現実には、二次事故の発生が想定され、簡単な構造では不可能である。

一方、著者らは誘導性蓄積エネルギーの転送用に、優れた性能を発揮する高圧密閉形直流遮断素子を開発し^{(7)~(9)}、スローバンクの簡単な回路構成からなる、誘導性エネルギー蓄積パルスパワーシステムにおいて、これを活用すると、急峻な変化を伴う種々の電流波形にパルスパワー整形と形成しうることを示し^{(10)~(13)}、この方式を応用して、高繰返しプラズマフォーカスからの中性子発生^{(14)~(18)}用誘導性蓄積エネルギー電源として開発をしてきている。

更に、誘導性蓄積エネルギー回路に対して、永年積み重ね、継続し研究開発をしてきている、この高圧密閉形高速遮断素子の原理を活用して、スローバンク用低インダクタンス短絡スイッチである、破壊保護素子を開発したことをレターなどで報告してきている⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。

本論文は、スローバンクを構成している任意のある単位コンデンサが、絶縁破壊を起こした場合における短絡事故時の回路現象を解析し、スローバンクの保護システムと、その破壊保護素子としての最適な構造、ならびに、その動作原理について、保護協調を考慮し、設計・検討をしたので、その調査結果について報告する。

2. 破壊保護素子の必要性和その要求される条件

〈2・1〉 ファーストバンクとスローバンク ファーストバンクは、各々の単位コンデンサにディカップリング用の抵抗を直列に接続し、並列に充電する。従って、ある単位コンデンサが内部絶縁破壊を起こし、短絡事故を起こせば、破壊コンデンサへ流入するエネルギーは、ディカップリング用の抵抗で消費されるため、破壊コンデンサへは原理的に流入しない。更に、ファーストバンクは、単位コンデンサ1台に対して、ギャップスイッチ1台を接続することにより、低インダクタンス化を図り、高速放電を可能にしている。

他方、スローバンクに対しては、各々の単位コンデンサにギャップスイッチを接続することは、経済的に難しい。そこで、コンデンサ毎 100 kJ 当りにギャップスイッチ1台を接続するなどの方式を採用している。スローバンクでは、単位コンデンサに対して各々抵抗を接続すると、エネルギーは抵抗で消費されるため、負荷に伝送するエネルギーは非常に小さくなる。従って、スローバンクでは、抵抗を接続しディカップリングする方式を採用することができないため、破壊保護素子の必要性が生じる。

〈2・2〉 破壊保護素子に要求される条件と保護協調

特別なディカップリング素子を用いていない、並列接続による充放電用スローバンクにおいて、ある単位コンデンサが内部絶縁破壊を起こし、短絡事故を起こすと、他の正常コンデンサに蓄えられているエネルギーが破壊コンデンサに集中して流れ込み、そのケースやがいしを破壊させ、油の流出や、その油への引火などの危険な事態をまねく。

これを保護し防止するために、破壊コンデンサに過大なエネルギーが流入しないうち、次の対策をとればよいことは知られている。

(1) 破壊コンデンサを他の正常コンデンサから電氣的に遮断する。

(2) 破壊コンデンサを、低インダクタンス回路で短絡する。

(1)項の方式に対する条件は、LCR 回路に流れる振動放電電流を、瞬時に遮断することが要求されるが、電流遮断時にアーク放電による持続放電電流が回路の L に依存して生じるため、簡単な構造では不可能である。そこで、(2)の方式が焦点化される。

この方式の原理は、破壊コンデンサのケース破壊保護を目的とするので、破壊コンデンサの端子間を低インダクタンス回路で瞬時に短絡することが要求される。従って、短絡電流はバンク母線や正常コンデンサを流れるため、バン

ク母線間に働く、電磁機械力によるコンデンサプッシングの破損や、正常コンデンサのリード部爆発などの二次事故の発生が想定される。それゆえにスローバンクの保護システムとしては、破壊コンデンサのケース破壊のみならず、短絡事故時の二次事故にも十分留意しなければならない。

そこで、スローバンクの保護システムに要求される条件は、内部絶縁破壊コンデンサのケース破壊保護のみならず、短絡事故に伴う二次的事故的防止に対しても、保護協調をとることにある。具体的には、次に記述する6項目などを検討し、保護協調のとれたバンクを構成することが要求される条件となる。

- (1) 単位コンデンサ当たりの充電エネルギー
- (2) バンクの総充電エネルギー
- (3) ケース破壊保護素子の性能
- (4) コンデンサケース非破壊許容注入エネルギー
- (5) スローバンク母線のインダクタンスと機械的強度
- (6) コンデンサリード部の通電容量

3. スローバンク回路の解析

本章では、スローバンク用破壊保護素子を開発するに当たり、バンク回路におけるその回路特性を解析し、模擬絶縁破壊コンデンサを用いた、短絡事故時のその回路現象とその特性を理論的にも実験的にも明白にしておく。

〈3・1〉 スローバンクと測定系

(1) 等価短絡回路と仕様 図1はスローバンクの等価短絡回路を示す。単位コンデンサの等価回路は、LCRの直列回路で等価的に記述でき、コンデンサ枝路回路の回路定数を含めて、それぞれ L_c 、 C 、 r_c とする。本実験に使用するスローバンクの仕様は 5 kV-400 μ F の単位コンデンサ C を 10 台まで並列接続できる電源で、最大容量 50 kJ までのエネルギー範囲内で、10 台分の任意の値まで接続換えが可能である。 L_b 、 r_b は、単位コンデンサ当たりのバンク母線のインダクタンス、ならびに、その抵抗値を示し、 L_s 、 r_s は、破壊コンデンサとこれに隣接する単位コンデンサ当たりのバンク母線の回路定数を模擬する。

本実験では破壊コンデンサとしてスパーク・ギャップスイッチと接続線を用いて模擬実験を行う。 V_{ch} はコンデンサの充電電圧を示す。

図1 コンデンサバンクの等価短絡回路
Fig. 1. Equivalent short circuit for capacitor bank.

回路定数の測定法は、放電電流波形を観測し、 C の値を既知として放電電流波形から計算により求める。 L_c , r_c は、コンデンサブッシングに直接母線を接続した実験回路であることを考慮し、コンデンサ端子間を最短距離で強制短絡させ、その放電電流波形より求める。 L_s , r_s は、図1の右側端ループの放電電流波形より、 $(L_c + L_s)(r_c + r_s)$ を求め、 L_c , r_c の値を差し引き求める。同様の方法で右端より2番目のコンデンサと $r_c - L_c - L_b - r_b - L_s - r_s$ のループより L_b を求める。

(2) 計測系と応答時間 本論文における電流波形は、以下に記述するログスキー電流測定回路に、7623 A形ソニーテクトロニクス製メモリスコープを接続して観測したものである。

ログスキーコイルは、電流の時間微分を検出する方式になっているので、ログスキーコイルのインダクタンスで決まる実効インピーダンスは、測定系の特性インピーダンスより十分小さい。従って、電流波形の測定のために、積分回路を使用する。

この回路の時定数 τ は、容量 C と抵抗 R の積で与えられるので、 $R=2\text{ k}\Omega$, $C=0.09\text{ }\mu\text{F}$ で構成した積分器の時定数は $\tau=180\text{ }\mu\text{s}$ である。

一方、立上り応答時間は、ログスキーコイルの漂遊容量に支配されるため、実際に計算することは困難であり、信

頼性も低い。そこで、パルス電流による実測を行い、応答時間は 100 ns 以下であることを確認する。

〈3・2〉 短絡事故時に破壊コンデンサに流入する電流特性 図2(b)は図2(a)に示す模擬短絡回路を用い、コンデンサの並列接続数 N のスローバンクにおける、短絡事故時の破壊コンデンサに流入する電流 i_s の波高値 I_{sp} と、立上り時間 T に対する実測値と計算値を示す。計算値は、図1に示す回路定数により計算した値であり、オシログラムからの読取り精度を考慮すると、実測値とほぼよく一致している。

図2(b)は、 $N=6$ 以上では I_{sp} , T ともに一定の値を示し、並列接続の個数 N 依存性による I_{sp} の値は、 400 V 充電で最大値 14 kA , 5 kV 充電で最大値 175 kA の一定の値に飽和することを示している。従って、図2(b)は破壊コンデンサへ流入するエネルギーのみが N 依存性で増加することを示している。

図1の等価短絡回路に着目すると、図1は方形波インパルス電流発生回路としてよく用いられるラダー回路を構成していることが理解できる。従って、 i_s の N 依存性の波形は、方形波交流に漸近し、正常スローバンクは特性インピーダンスが $Z=(L_b/C)^{1/2}$ として作用する。破壊コンデンサのインピーダンスを集中インピーダンス Z_s で表示すると、 I_{sp} と i_s の周波数 f は、(1)式、ならびに、後記付録に導出してある(2)式で近似できる。

$$I_{sp} = V_{ch}/(Z + Z_s) \dots\dots\dots (1)$$

$$f = \{4(N-1)(L_b C)^{1/2}\}^{-1} \dots\dots\dots (2)$$

この実験結果に(1)式を適用すると、 $Z=24.5\text{ m}\Omega$, $Z_s \approx r_s=3.6\text{ m}\Omega$ という値になり、 $I_{sp}=14.2\text{ kA}$ となり実測値とよく一致する。(2)式については、積分器の積分誤差に起因し、定量的には十分な一致をみなかったが、 f 値の N 依存性は低くなることが定性的に確認できる。

(1), (2)式は、特性インピーダンス Z の同軸ケーブルを V_{ch} に充電し、その一端を、集中インピーダンス Z_s で短絡した場合の、短絡電流の波高値と周波数の式に相当する。ただし、 $(N-1)$ はケーブル長に相当する。従って、 I_{sp} の最小値はバンクの末端のコンデンサを短絡した場合であり、 I_{sp} の最大値はバンクの中央のコンデンサを短絡した場合に相当する。そこで、 $N=6$ 以上に関してはバンクの末端のコンデンサを短絡した場合、(1), (2)式を用いて、 I_{sp} , f を容易に近似計算できるので、 $N=12$ 以上の場合に関しても、バンク内の I_{sp} の最小値、最大値、ならびに、それらの f をほぼ正確に、かつ簡便に求めることができる。これらに対する等価回路を集中インピーダンスで表すと、図3(a), (b)で表示され、このバンクの I_{sp} はいずれのコンデンサが短絡しても(3)式を満足する。

$$V_{ch}/(Z + Z_s) \leq I_{sp} \leq 2V_{ch}/(Z + 2Z_s) \dots\dots\dots (3)$$

Z_s の評価はコンデンサの破壊の状況によって異なるので、極めて複雑となるが、(3)式で $Z_s=0$ とすれば、 I_{sp} は(4)式で求めることができる。

$$V_{ch}/Z \leq I_{sp} \leq 2V_{ch}/Z \dots\dots\dots (4)$$

図2 短絡電流の並列単位コンデンサ数依存性
Fig.2. Dependence of peak short circuit current on number of unit capacitors.

この(4)式は、特性インピーダンス Z と充電電圧 V_{ch} が、すなわち、充電エネルギーと単位コンデンサ当たりのバンク母線のインダクタンス L_b が、 I_{sp} を決定する素因子であることを示す。

〈3・3〉 正常コンデンサからの流出する電流特性

図4(a)は、図1の等価短絡回路で $N=6$ の場合の i_s と、各々の正常コンデンサから流出する $i_1 \sim i_6$ の電流波形を、図4(b)は、 $N=10$ における i_s のオシログラムを各々示す。

図3 集中インピーダンスで表した等価短絡回路
Fig.3. Equivalent short circuit represented by lumped impedance.

4.8 kA/div, 20 μs/div, $V_{ch}=400$ V
(a) $N=6$ の場合

4.8 kA/div, 20 μs/div, $V_{ch}=400$ V
(b) $N=10$ の場合

図4 短絡電流波形のオシログラム

Fig.4. Oscillogram of waveform of short circuit current: (a) $N=6$ and (b) $N=10$.

図4(a)は、 $i_1 \sim i_6$ の波高値が約 $(1/3) I_{sp}$ の値を示し、その立上り時間は遠方のコンデンサからの流出電流ほど遅いことを示している。次に、同図(a)、(b)の i_s に焦点化すると、 i_s の立上り時間は、 $N=6$ と $N=10$ のいずれの場合に対しても等しく、立上り時間 T は、破壊コンデンサに隣接するコンデンサ6台からの流出電流のみで定まることが示唆されている。更に、 $N=6$ 以上では I_{sp} は一定となり、 i_s は並列接続の個数に依存して方形波交流波形に形成され、整形されていく過程が示されている。

正常コンデンサからの流出電流の波高値は、充電電圧 400 V では 4.7 kA で飽和することが示されており、5 kV では約 60 kA で飽和している。

バンク母線の電流値は、 $i_n, i_n + i_{n-1}, \dots, i_n + i_{n-1} + i_{n-2} + \dots + i_3 + i_2, i_n + i_{n-1} + i_{n-2} + \dots + i_3 + i_2 + i_1$, と破壊コンデンサからの母線の距離に逆依存して漸増する。

〈3・4〉 解析結果とその考察 本節は、スローバンク中のある単位コンデンサが内部絶縁破壊などを起こした場合の、その短絡事故時のバンク回路現象を模擬実験をすることによって解析した。その結果、短絡事故時の破壊コンデンサに対しては、図4(a)に見るように、流入電流 i_s の立上り時に、破壊コンデンサの端子間を低インダクタンス回路で短絡を可能にする、そして更に、正常スローバンクの単位コンデンサからの放電流出電流に対しても、最大値近辺で同様に短絡を可能にする、低インダクタンスの短絡スイッチの開発に成功すれば、そのスイッチを単位コンデンサの端子間に各々挿入し、備え付けておけば、正常コンデンサからの流出電流を抑制し、二次事故の発生を防止できることが結論として得られた。

4. 破壊保護素子

本章は、第3章の結論を基に、誘導性蓄積エネルギー回路に対して、永年積み重ね、継続して研究開発をしてきている、高圧密閉形高速遮断素子^{(7)~(9)}を応用した、低インダクタンスの短絡スイッチである、スローバンク用破壊保護素子の構造、ならびに、その動作原理とその特性について記述する。

〈4・1〉 構造とその動作原理 図5にスローバンク用破壊保護素子の構造とその動作回路図を示す。破壊保護素子の構造は、金属板端子①、⑦、⑧、⑫に接続されたヒューズ素子②、⑪を絶縁物⑥、⑨で囲い、一對の金属板④と、ねじ⑤によって高圧密閉形遮断素子として形成され構成されている。

蓄積されたコンデンサからの正常放電電流は図5の→印で示す経路を流れるため、ヒューズ素子に働く電磁力は吸引力として作用する。従って、金属板に密着している絶縁物、ならびに、ヒューズ素子は、正常放電電流に対しては物理的にも、機械的にも損傷を受けない。そこで、内部絶縁破壊事故を想定し、スローバンクの C_s を短絡すると、その動作原理は次のようになる。

短絡電流は→印で示す経路に流れ、 C_s と C_1 に接続され

図 5 バンク破壊保護素子の構造と動作回路
Fig. 5. Structure of protective element in bank circuit.

(a) 動作試験回路

上: 46 kA/div, 50 μ s/div
下: 23 kA/div, 50 μ s/div

(b) 動作試験電流波形

図 6 動作試験回路と動作試験電流波形

Fig. 6. Performance test of protective element: (a) equivalent test circuit and (b) typical current waveforms.

たヒューズ素子は電磁反発力により図中における上下方向の力を受け、金属板に設けた孔③、⑩へ絶縁物を押し付ける応力を与える。と同時に、短絡電流 i_{sc} 、ならびに、 i_1 によりヒューズ素子は溶断爆破し、その結果、固体のヒューズ素子は高圧の金属蒸気に気化され、密閉容器の孔の部分の絶縁物を被壊し、孔から吹き出す。すなわち、金属板端子と絶縁物でおおわれた空間はアークプラズマで充満し、絶縁物の破壊によって④と金属板端子とはアークプラズマの導体で短絡され、導通状態となる。その後、時間的に遅れて流れ込む i_s は⑦-④-⑭を通して放電するので、本素子によって正常コンデンサからの過大なエネルギーは C_s へ流入することを防ぎ、低インダクタンスの短絡スイッチとしての機能を完全に果たすことになる。同様に、 C_1 からの流出電流 i_1 も⑫-④-⑭と流れ、 C_1 の端子間は短絡される。一方、正常コンデンサ C_2, C_3 からの流

出放電電流は、 C_s に隣接されているため、流出電流の立上りが C_1 の次に速く、かつ、流出電流のピーク値が大きいため、流出電流 i_2, i_3 により、ヒューズ素子が溶断爆破し、 i_{sc}, i_1 と同様な過程を経て⑬に転流する。この場合、正常放電電流、短絡時の流出電流、並列コンデンサバンクの容量などと、ヒューズ素子の設計による組合せによって、その動作は積極的にさせることも、させないことも可能になる。同図の L は負荷を表す。転流前後の電流波形は、次の〈4・2〉節と、その図6に示す。

〈4・2〉動作特性 図6(a)は、正常コンデンサからの流出放電電流による動作を模擬した等価試験回路を示し、図中の L_0 は放電電流周期調整用インダクタンス、 L_1 は破壊コンデンサの等価残留インダクタンスを示す。(b)図は(a)図を用い、周期 190 μ s、最大電流 70 kA の減衰振動電流を放電した場合、50 μ s の遅れで動作した典型的

(a) 外観

(b) 接合部

図 7 動作後の破壊保護素子

Fig. 7. Element after performance test.

な模擬試験による電流波形の特性を示す。(b)図は破壊コンデンサとしてスパーク・ギャップスイッチと、接続線を用いた模擬実験によるオシログラムであるが、本開発の目的が成功裏に達成したことを観測している。なお、図7(a), (b)の写真は動作後の本破壊保護素子の外観と接合部を示す。

5. 大容量化に伴う保護システムとその耐久性評価

〈5・1〉 大容量化に伴う保護システム スローバンクにおける、単位コンデンサに破壊保護素子を装着した保護システムの等価回路図を図8に、その実施例の写真を図9に示している。図8の、 $S_1 \sim S_{n/2}$ は個々の単位コンデンサ $C_1 \sim C_n$ に装着したそれぞれの破壊保護素子を示し、 L は負荷を、 SW は主放電用のスイッチを各々示す。スローバンクの大容量化に伴う保護システムとしては、主放電用スイッチの複数個の使用で数バンクに分割充電し、短絡事故の拡大防止を行う必要が生じる。また、 SW としてメタルコンタクトスイッチやロータリーアーク放電ギャップスイッチ⁽²¹⁾などの単器大通電容量の SW を用いる場合には、

図 8 保護システムの回路図

Fig. 8. Circuit diagram of capacitor bank.

図 9 保護システムの実施例

Fig. 9. Protective elements installed in capacitor bank.

図8に示した SW とスローバンクの間に、ディスコンスイッチを設け、充電に対しては分割充電をし、過大なエネルギーが破壊コンデンサや個々の単位コンデンサの破壊保護素子へ回り込み、流入しないように考慮すべきである。

バンクの大容量化に対しては、いずれにしても、第2章で述べたように、単位コンデンサの短絡事故に伴う二次事故を最小限に抑制するよう、保護協調を含め十分配慮すべきである。

〈5・2〉 ヒューズ素子の耐久性評価 本破壊保護素子の仕様は5 kV, 250 kJ スローバンク用として開発をした。そこで、その耐久性評価試験は、単極性パルス電流最大値12.5 kA, その半値幅1.5 ms, その周期60秒で20回通電し、その後に分解し、ヒューズ素子の絶縁性などに対して、損傷、劣化など詳細な耐久性の認査を行い、問題が起こっていないことを確認し、評価している。

従って、本破壊保護素子の仕様は、2種類の単極性パルス定格通電電流の最大値6.25 kA, その半値幅628 μ s と、最大値12.5 kA, その半値幅314 μ s の電流波形を、周期3分で通電し、放電総回数3万回を目標に開発した。本論文では、前記耐久性評価試験を実施した時点で適用したが、現在、3万回以上の通電を経過しているが支障なく実用に寄与している。

6. あとがき

本論文は、5 kV-400 μ F の単位コンデンサ10台を並列接続したスローバンクを用いて、バンクを構成しているある単位コンデンサの短絡事故を模擬し、その短絡事故時における、破壊コンデンサへ流入する電流、ならびに、正常単位コンデンサからの流出する電流を実測した。そして更に、その結果より得られた実測値と計算値に対して検討を

加え、短絡事故時のバンクを構成している各々の正常コンデンサから放電する各電流の実験式を導出し、これらの総合的結論より、高圧密閉形高速遮断素子の原理を活用した、低インダクタンスの短絡スイッチである、スローバンク用破壊保護素子の開発に至る短絡事故時の回路現象と、保護協調を考慮した大容量スローバンク用保護システムについて報告した。

破壊コンデンサに流入する電流の波高値 I_{sp} は、いずれの単位コンデンサが短絡した場合においても、並列単位コンデンサ数が $N=12$ 以上である場合は、並列単位コンデンサ数の N に関係なく(4)式で与えられた。

$$V_{ch}/Z \leq I_{sp} \leq 2 V_{ch}/Z \dots\dots\dots (4)$$

破壊コンデンサに流入する電流の立上り時間は、破壊コンデンサ近傍の正常コンデンサからの流出電流に依存した。例えば、図1の短絡回路において、破壊コンデンサに流入する電流の立上り時間は、 $N=6$ 以上である場合、実験値においても計算値においても約 $50 \mu s$ の値で一定となった。

正常コンデンサからの流出電流の波高値は、いずれのコンデンサからの流出電流に対してもほぼ等しく、約 $(1/3) I_{sp}$ となった。単位コンデンサからの流出電流の立上り時間は、破壊コンデンサから遠ざかるに従って遅くなった。

本論文は、スローバンクの大容量化に伴う短絡事故による二次事故を最小限に抑制する保護システムとして、破壊コンデンサはもちろんのこと、正常コンデンサの端子間に対しても、その短絡電流を高圧密閉容器内のヒューズ素子を通して流すことで、ヒューズ素子を溶融爆破させ、その爆破力を利用し、コンデンサの端子間を低インダクタンス回路で短絡するスイッチの開発に成功するとともに、保護協調を考慮したスローバンクの大容量化に伴う保護システムとその破壊保護素子の開発について論じ、報告した。

本論文の特徴は、高圧密閉形高速遮断素子を活用した、スローバンクの大容量化に伴う保護システムとその高信頼性破壊保護素子を開発し、それを廉価に供給しえた点にある⁽²²⁾。

(平成5年10月23日受付、同6年4月7日再受付)

文 献

- (1) 上野：「パルスパワー技術の開発とその将来(第1部)核融合」, エネルギー・資源, 5, 16 (昭59-1)
- (2) 上野：「パルスパワー技術の開発とその将来(第2部)加速器増殖炉」, 同上, 5, 103 (昭59-3)
- (3) 上野：「パルスパワー科学技術の開発とその将来(I)(高輝度加速器に関する NATO 高等専門家会議)」, 同上, 8, 119 (昭62-3)
- (4) 上野, 他：「パルスパワー技術の現状」, 放電研究, 116, 1 (昭62-10)
- (5) 上野, 他：「パルスパワー科学技術の開発とその将来(II)(液体状態とその電気特性に関する NATO 専門家会議)」, エネルギー・資源, 9, 132 (昭63-3)
- (6) 上野, 他：「特集パルスパワー(その制御と関連現象)」, 同上, 13, 25 (平4-7)
- (7) 上野, 他：「誘導性蓄積エネルギー転送用高圧密閉形高速遮断素子の特性と応用」, 電学論 B, 99, 721 (昭54-11)

- (8) 田口・上野, 他：「けい砂密閉形高速遮断素子の開発」, 同上 B, 104, 196 (昭59-3)
- (9) 田口・上野：「誘導性蓄積エネルギー転送用密閉形高速遮断素子のアーク消滅媒体依存性」, 同上 B, 109, 273 (平元-6)
- (10) 上野, 他：「誘導性エネルギー蓄積方式による高速立上りパルスパワー電源の開発」, 同上 B, 102, 116 (昭57-2)
- (11) 上野, 他：「誘導性エネルギー蓄積方式による波形制御されたパルスパワー電源の開発」, 同上 B, 102, 117 (昭57-2)
- (12) 田口・上野, 他：「誘導性エネルギー蓄積方式による方形波発生用パルスパワー電源の開発」, 同上 B, 103, 223 (昭58-3)
- (13) 田口・上野, 他：「誘導性エネルギー蓄積パルスパワーシステムの高速度遮断素子制御によるパルス整形と形成」, 同上 B, 105, 925 (昭60-11)
- (14) J. Salge, I. Ueno, et al.: "Sequences of Neutron and X-Ray Flashes During a Long Lasting Current in a plasma Focus Device", *Nuclear Fusion*, 18, 972 (1978-7)
- (15) I. Ueno, et al.: "Production of Repetitive Dense Plasmas in a Focus Device with Inductive Energy Storage", *Japan. J. Appl. Phys.*, 18, 1189 (1979-6)
- (16) I. Ueno, et al.: "Neutron Yield in a Repetitive Dense Plasma Focus", *ibid.*, 21, L746 (1982-12)
- (17) 上野, 他：「誘導性蓄積エネルギーによる高繰返しプラズマフォーカスの中性子発生とその比例則」, 電学論 D, 107, 93 (昭62-1)
- (18) H. Asai & I. Ueno.: "Neutron Source Based on the Repetitive Dense Plasma Focus Model", *Nuclear Engineering & Design/Fusion*, 7, 335 (1989)
- (19) 長谷川・井上・平井・林・上野：「大電流中低速コンデンサバンク用破壊保護素子の開発」, 電学論 D, 112, 1008 (平4-10)
- (20) M. Hasegawa, K. Inoue, M. Tanimoto, I. Ueno, T. Hirai & M. Hayashi: "Development of Protective Switching Elements on Local Failures of Large Slow-Capacitor Bank System", Ninth IEEE International Pulsed Power Conference, Albuquerque, New Mexico, 14-3 (1993)
- (21) 井上・上野, 他：「永久磁石駆動方式ロータリーアーク放電スイッチの開発」, 電学論 B, 102, 259 (昭57-4)
- (22) 井上, 他：特許第 1475014 号

付 録

(2)式の導出

i_s の周波数 f , (2)式の導出は、図1に示す回路で、ラダー回路があらかじめ $V_{ch}=E$ に充電されている場合において、ラダー回路右端の SW を閉じたときの i_s の自由振動周波数 f を求めることである。ここでは、付図1に示す回路を用い、抵抗分を無視した無損失線路として近似計算をする。

付図1において、コンデンサの並列接続数を N とすると、最終段のコンデンサは SW で置き換えているため、 $(N-1)$ 段のラダー回路となり、無損失線路の伝搬速度 v は次式で表される。

$$v = (L_b C)^{-1/2} \dots\dots\dots (付1)$$

(付1)式は、ラダー回路1段当たりの伝搬時間と等価となり、進行波が付図1の㉔点から㉔点に到達するのに要する

付図1 抵抗分を無視した無損失線路
app. Fig. 1. Non-loss line for excluded resistance.

付図 2 格子図
app. Fig. 2. Lattice diagram.

伝搬時間 τ は次式で表される。

$$\tau = (N-1) v^{-1} \dots\dots\dots (付 2)$$

付図 2 は、このときの ④、⑤ 点の進行波の状態と ④ 点の電圧を模式的に示す。付図 2 より、開放されている ④ 点の電位の周期は 4τ となる。従って、周期 T は(付 3)式で表される。

$$\begin{aligned} T &= 4\tau \\ &= 4(N-1)(L_b C)^{1/2} \dots\dots\dots (付 3) \end{aligned}$$

従って、 i_s の周波数 f として(2)式が導出される。

$$\begin{aligned} f &= T^{-1} \\ &= \{4(N-1)(L_b C)^{1/2}\}^{-1} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

長谷川 三 雄 (正員) 1951 年 3 月 10 日生。1976 年 3 月日本大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月国士舘大学教養部助手、現在、同助教授。1991～92 年テキサス大学オースチン校客員研究員。この間、環境工学、パルスパワーに関する研究に従事。IEEE, IAWPR, 環境技術研究协会会员。

井 上 訓 一 (正員) 1947 年 1 月 2 日生。1974 年 3 月広島工業大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月(株)指月電機製作所入社。同社中央技術研究所長を経て、現在、同社コンデンサ事業本部商品技術開発部長。1975～79 年工業技術院電子技術総合研究所出向。この間、大電流制御技術に関する研究に従事。平成元年度オーム技術賞、科学技術長官奨励賞受賞。

上 野 勲 (正員) 1938 年 11 月生。1966 年 3 月明治大学大学院工学研究科博士課程修了。同年 4 月東京大学工学部文部教官、現在に至る。工学博士。この間、学内、ならびに、国内では、工学部の計画研究テーマである「強力中性子源開発」研究グループのプロジェクトリーダー、工学部運営委員(10 年)などを経て、近年は融合サイエンスグループの代表として「人類の生き残りをどうするか」を共同作業テーマに「地球環境保全」と「エネルギー問題」に取り組んでいる。国外では、アレキサンダー・フォン・フンボルトフェローの Dozenten として Braunschweig 工科大学高電圧研究所など、テキサス工科大学 Visiting Professor としてパルスパワー研究所、他、等々で、高電圧大電流制御に関する研究に従事。物理学会、エネルギー・資源学会、米国 IEEE, The New York Academy of Sciences 会員。