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弧媒体依存性

正 員 田 口 雄 一 (日本工学院)

正 員 上 野 勲 (東京大)

1. ま え が き

パルスパワー技術は核融合、加速器増殖炉など長期エネルギーの開発に極めて重要な分野とされており、最近のその進展は目覚ましい^{(1)~(7)}。特に極めて大きな電気出力であるパルスパワーを発生させようとするとき、この技術の心臓部をになうスイッチの開発は、高速大容量遮断器の開発としてすぐにも待たれている。

遮断器の開発の一つとして金属線や金属はくの溶断爆破現象を活用することに関しては、交流1kV以上の電路における短絡保護を目的とする「電力ヒューズ」や「限流ヒューズ」⁽⁸⁾として研究されてきている。しかし、このヒューズは可溶体自身の溶断特性を利用した一種の過電流自動遮断器であるが、正確な限時を望むことが困難であり、また多相回路においては各相を同時に遮断することができず、更には動作ごとに交換を必要とするなどの難点から、積極的に遮断素子として活用されてきていない。

一方、ヒューズと同様毎回交換する点は変わらないが、著者らはこれを誘導性エネルギー蓄積回路において、利点が大きく、優れた性能を発揮する高压密閉形直流遮断素子⁽⁹⁾として開発している。そして、これを有効利用して、スローバンクの簡単な回路構成から成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、急しゅんな変化を伴う種々の波形を提供し得ることを示している⁽¹⁰⁾。更に、高繰返しプラズマフォークスからの中性子発生⁽¹¹⁾⁽¹²⁾用誘導性蓄積エネルギー電源として応用している^{(13)~(15)}。

しかし、この遮断素子は水をアーク消弧媒体(以

後、ATと略記)として使用しているため、金属線の腐蝕による特性の劣化や、高電圧回路における短絡放電の危険性、遮断後の遮断器周辺の汚れ、更に本論文における実験結果を評価する一つの目安である変換効率(後述<4・2>節(2)項参照)が60%程度であるなど、改良すべき点が多々生じてきている。そこで、これらの欠陥の改善を目的として、その形状や材質などについて種々実験的に調査を継続してきている^{(16)~(19)}。

その結果、種々の検討事項のなかで、特にATの選択は遮断素子の特性を決定し、アーク放電を瞬時に消去するうえでの金属蒸気吸収効果、冷却効果、高压密閉効果などの総合的效果を決定する重要な素因をもっていることがわかった。

本論文は、けい砂や石こうなどに対して、ATとしてのその有効性を実験的に確認し、これらを活用して誘導性蓄積エネルギー転送用密閉形高速遮断素子として開発したので、既に報告済みの水⁽⁹⁾と比較したその基本遮断特性に関して報告する。

2. エネルギー転送用遮断器に要求される条件

本章では、転送用遮断器に要求される条件をあげ、ATの具備すべき条件について言及する。

<2・1> 転送時に遮断器で消費される損失エネルギー 図1に誘導性エネルギー蓄積電源 L から純誘導性負荷 L_L と純抵抗性負荷 R_L から成る誘導性負荷 $(L_L + R_L)$ に蓄積エネルギーを供給する場合の原理図を示す。同図においてエネルギー転送は、あらかじめ蓄積コイル L に蓄積された初期蓄積エネルギー $W_s[(1/2)LI^2]$ を、遮断器(以後、BEと略記)による遮断によって、負荷 $(L_L + R_L)$ に電流転送される。

図1で誘導性負荷に蓄積エネルギーを転送する場合、BEによる遮断時に、BEに消費される損失エネルギー W_B は、負荷を $(L_L + R_L)$ として扱くと、以下

Tamper-Material Dependence of the Characteristics of Sealed-Fast-Breaking-Element for Transfer of Inductively Stored Energy. By Yuichi Taguchi, Member (Nippon Electronics Engineering College) & Isao Ueno, Member (University of Tokyo).

田口雄一: 正員, 日本電子工学院工学部電子工学科

上野 勲: 正員, 東京大学工学部電気工学科

図 1 誘導性エネルギー蓄積回路の原理図

Fig. 1. Schematic of inductive energy storage and transfer.

の(1)～(3)式(付録参照)で示される。 R_w はBEの内部抵抗である。

(i) $L_L \neq 0, R_L \neq 0$ の場合

$$W_B = W_s \cdot \frac{(L_L/L) + (R_L/R_w)}{1 + (L_L/L) + (R_L/R_w)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

(ii) $L_L = 0, R_L \neq 0$ の場合

$$W_B = W_s \cdot \frac{R_L}{R_w + R_L} \quad \dots\dots\dots (2)$$

(iii) $L_L \neq 0, R_L = 0$ の場合

$$W_B = W_s \cdot \frac{L_L}{L + L_L} \quad \dots\dots\dots (3)$$

BEにおける W_B を上記の各々に対して検討すると、(iii)の場合には R_w に無関係に L_L/L の値で決まる。この式で最大エネルギーを転送する条件は $L_L = L$ の場合で、このとき W_s の1/4が転送され、1/4が蓄積コイルに残留し、1/2が遮断器で W_B として消費される。しかし、(i)、(ii)で与えた各条件の場合には、 R_w が時間的に、低抵抗から高抵抗に高速可変の可変抵抗器形遮断器であれば、転送時にBEで消費される W_B をより小さくすることが可能になる。

〈2・2〉ATに要求される条件 本方式のように、密閉容器内で金属線を溶断すると、ATの選択によって、その内圧は数百気圧にもなる。従って、本論文におけるATの定義は、この圧力作用が金属線の溶断酸化したアーク放電を圧縮、消弧するので、アーク放電の消弧をも含めた耐圧力容器材を意味する。

密閉容器内での金属線の溶断過程はまだ不明な点も多いが、おおむね次のような過程が考えられる。

固体である導体の金属線に許容値以上の電流が流れると、金属線は加熱、溶融され液体となり、更に沸点以上の温度に達し、急激に気化する。この金属蒸気に高電圧が印加されているためにアーク放電が発生する。更に、そのアーク放電によって周囲の物質が熱電離してアーク放電が成長する。従って、このアーク放電を瞬時に消弧させるためには、種々の電離粒子を除

去してアーク抵抗を高めるようなAT、もしくはこのATをも含めた周囲に工夫を必要とする。

次の五項目は相互に関連し、その一部を重複しているが、この目的達成に対して要求される。

(1) 気化した金属粒子のアーク温度を瞬時に下げるためには、非電離性絶縁体で熱伝導率が良く、熱容量の大きなものをアーク放電に接触させる。

(2) 電離した金属粒子などを吸着して冷却するためには、吸着表面積を大きくする。

(3) 非電離性のガスを発生混入させ容器内の圧力を高め、アーク放電の電離度を低下し、放電の径を細くしてアーク抵抗を瞬時に高める。

(4) 金属粒子の蒸発速度と爆破効果を高め、容器内の瞬間的な圧力を高める。

(5) 金属粒子の蒸発速度と爆破効果を高め、導電性電離粒子数を時間的に高速度で取込むか、吸着冷却させ、絶縁性を高くする。

これらの要求事項の(1)項と(3)項がATとしての水 W に対応し、現在電力用限流ヒューズなどに充てんされているけい砂 S は(1)～(3)項が対応する。これらに対して、石こう G は(1)～(5)項までの多くの条件を兼ねそなえているものと考え、本論文ではATとして取上げている。

3. 損失エネルギーに関するシミュレーション

本章では、模擬回路を用いて W_B を最小にするためには、どのように設計するのが望ましいかをElectromagnetic Transients Program⁽²⁰⁾(以後、EMTPと略記)を用いてシミュレーションを行う。

〈3・1〉基本回路 本論文で使用した基本回路を図2に示す。同図は誘導性エネルギー蓄積方式の電源に、密閉形高速遮断素子BEを活用し、スローバンクコンデンサ C からの長周期パルス電流波形を、高速立上り電流波形に波形形成する回路である⁽¹⁰⁾。

C に蓄えられたエネルギーを GS_1 および蓄積コイル L を通して導通状態のBEに放電すると、(b)図のような振動電流 i が流れる。この電流の任意の時刻 t_1 にBEが溶断するように、銅線の径と長さを設定しておくで電流 i_1 は遮断され、同時に GS_2 の極間に高電圧が発生して GS_2 が自爆点弧し、電流 i_2 が負荷へ転送される。従って、負荷に流れる電流は(c)図のように高速立上り電流に波形形成される。

このとき、BEの端子間には(d)図の電圧波形 V_B が発生する。この V_B は t_1 が急激に減少し始める時刻 t_1 で最大となり、と同時にこの時刻で転送が開始され、転送が終了する時刻 t_2 で最小値となる。

図 2 高速立上り電流発生回路

Fig. 2. The circuit for generation of fast-rising current pulse.

本論文では、(d)図における $t=0$ から t_1 までの時間を溶断時間 Δt とし、 t_1 から t_2 までの時間を転送電流 i_2 の立上り時間 Δt_s とする。

〈3・2〉 回路特性の解析 BE は時間的非線形可変抵抗素子である。この素子を含む回路方程式を計算機で解くには二通りの方法がある。その一つは非線形微分方程式を導いて解く方法であり、他の一つは数値解析用のプログラムを用いる方法で、EMTP はその一つである。このプログラムは電力系統の過渡現象解析用に開発されたものであるが、各種の機能を有し、非線形素子を含めた模擬回路を用いることによって、任意条件の解析を行うことができる⁽²¹⁾。

本章では EMTP を用いて波形解析を行い、特に BE の V_B に着目し、その素子における W_B を最小にするための条件についてシミュレーションを行う。

図 3 は高速立上り電流発生回路の模擬回路である。C は充電用コンデンサ、 L_1 は誘導性エネルギー蓄積用インダクタンス、 L_2 と L_3 は BE と負荷のインダクタンス、 R_1 は回路抵抗、 Sw_1 と Sw_2 は始動用および転送用ギャップスイッチである。

シミュレーションにおける計算機入力の仕方は、図 2 の回路において電流 $i_1(t)$ と BE の端子電圧 V_B を測定し、非線形可変抵抗 $R(t) = V_B/i_1(t)$ を求めて行う。

例えば実験条件として、AT が S、 $V_C = 7 \text{ kV}$ 、 $C = 534 \mu\text{F}$ 、 $L_1 = 3.6 \mu\text{H}$ 、銅線 $1.2 \text{ mm}^2 \times 60 \text{ cm}$ の BE を用いた場合、 V_B 、 i_1 、 i_2 の観測波形として図 4(a) が得

図 3 高速立上り電流発生回路の模擬回路

Fig. 3. Schematic diagram of the circuit for generation of fast-rising current pulse.

図 4 実験結果と計算結果との対比

Fig. 4. Comparison between calculative and experimental results.

られる。この実験結果より $R(t)$ の値を求めると図 5 の実線が描かれ、この値を用いてシミュレーションを行うと図 4(b) が得られて、各々の波形はよい一致を示す。このときの入力パラメータは $L_2 = 0.02 \mu\text{H}$ 、 $L_3 = 5 \text{ nH}$ 、 $R_1 = 1.0 \text{ m}\Omega$ として、 $V_B = 13 \text{ kV}$ で転送するように設定する。

次に、AT が W の場合に対しても同様にして $R(t)$ を求めると図 5 の破線となり、このシミュレーション結果を図 4(b) の各々の波形の同一座標軸上に重ねて描くと図 6 が得られる。同図より、 $i_2(t)$ ならびに $W_B(t)$ の最大値は、S が 74.8 kA で 3.3 kJ 、W が 71.0 kA で 4.3 kJ の値となる。

以上の結果は、 $R(t)$ の値が時間的に低抵抗から高抵抗へ急しゅんに立上るものほど i_2 の最大値が増加

図 5 $R(t)$ のアーク消弧媒体依存性
Fig. 5. Tamper-material dependence of $R(t)$.

図 6 W と S との間の遮断特性の差異
Fig. 6. Difference of breaking characteristics between W and S .

し、 V_B も急しゅんとなり、 W_B が小さくなることを示している。すなわち、誘導性エネルギー蓄積源からエネルギー転送を高効率で実現するための一つの方式として、高速可変抵抗器形遮断器が示唆される。

4. 実験

本章では、誘導性蓄積エネルギーの電源に高速可変

表 1 アーク消弧媒体の種類とそれらの記号
Table 1. A kind of tamper-materials and their marks.

アーク消弧媒体の種類	記号
水	W
けい砂	S
石こう	G
水とけい砂	WS
水とけい砂と石こう	SG

抵抗器形遮断素子を活用し、この素子における W_B と転送電流の立上り特性、ならびに Δt の AT 依存性などについての調査結果を示す。

〈4・1〉 実験装置と測定系

(1) 電源装置の仕様 図 2 に示した回路において、 C は $534 \mu\text{F}$ 、 L は可変空心リアクトル、 BE は遮断素子、 GS_1 、 GS_2 は始動用および転送用ロータリーアーク方式ギャップスイッチ⁽²²⁾である。本電源はプラズマフォーカス装置用として開発したので、本来ならば負荷はプラズマフォーカス装置であるが、本論文では電極間を短絡した模擬負荷を使用している。

(2) 遮断素子とその構成⁽¹⁶⁾ 本装置は防爆管とカートリッジから成り、カートリッジの電極間に各種の径および長さの銅線を溶断素子として使用した。カートリッジ管の有効長は 44 cm で、この電極間から線状に巻いた銅線をはんだ付けする。この周囲には水 W 、けい砂 S 、石こう G などの AT を充てんし、内径 10 mm のビニール管の中に封入して両端を密閉する。

(3) AT とその種類 〈2・2〉節の条件より、本論文では日常ごく普通に使用されている液体である W 、粒状固体である S 、整形可能な固体である G とそれらの組合せによる試料を 5 種類準備している。それらの種類の仕分けと記号を表 1 に示す。

W と S はビニール管の中に $1 \sim 2 \text{ cm}$ の空気と水、空気とけい砂を封入して両端を密閉する。 G は粉体の石こうを水に溶かしてビニール管のほぼ全長にわたって満たし、約 3 時間放置した後両端を密閉する。また、 WS は W と S とを容積比 $1:1$ に、 SG は W と S と G とを容積比 $1:5:3$ に混合して固化した後、両端を密閉したものである。表 1 はそれらの仕分け記号を示す。

(4) 計測系と応答時間 回路各部の電流波形は、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測定する。

ログスキーコイルは電流波形の時間微分を検出する。この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ので波形の測定に積分回路を使用する。

この積分器の時定数 τ は容量 $C=0.09\mu\text{F}$ と抵抗 $R=2\text{k}\Omega$ で構成したので $\tau=180\mu\text{s}$ である。一方、立上りの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⁽²³⁾、実際に計算することは困難で、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 100ns 以下であることを確認する。

V_B は分圧比 $1/1,000$ の分圧器を用いる。そして、これらすべての観測波形には寄生振動や雑音などが混入しないように、センサと測定器との整合、シールドとアース系、装置の配置などの設計製作には十分な検討と配慮を加え、測定を行っている。

〈4・2〉 実験結果

(1) W_B 図2の回路における i_1, i_2 および V_B の測定結果を図7に示す。同図はATを W, S, G とした場合の波形である。BEは直径 $1.2\text{mm}\phi$ 、長さ 60cm の銅線を使用し、 V_c は 7kV (1.3kJ)一定とする。

これらの波形のうち、 i_1 はATには無関係にほぼ

図7 i_1, i_2, V_B のアーク消弧媒体依存性

Fig. 7. Tamper-material dependence of current i_1, i_2 and terminal voltage V_B .

同様の波形を示しているが、 V_B の立上り部分はATによって違いが現れている。すなわち、 W の場合は立上り部分に凸部が見られるのに対し、 S の場合は急しゅんな立上りを示している。また、 G の V_B 波形には立上り部分にやや凸部が見られ、 W の影響が多少残っているものと思われる。

i_1 および V_B より、 W_B を(4)式を用いて計算すると図8を得る。

$$W_B = \int_0^t V_B i_1 dt \quad \dots\dots\dots (4)$$

W_B の最大値は W, G, S の順に低下している。ここで、各々の溶断ジュール積分(溶断 I^2t)は W, S, G の順に $89.0, 88.3, 88.7$ の $10^3(\text{A}^2\cdot\text{s})$ 倍であり、ほぼ同一の値を示しているが、 V_B の立上り部分の相違によって、 W_B に差が現れている。

(2) η 本論文における η の定義は C からの放電電流波形を、高速立上り電流波形に波形成したエネルギー変換効率を意味し、(5)式とする。

$$\eta = \frac{(1/2)LI_m^2}{(1/2)CV_c^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

図8 損失エネルギーの W, S, G に対する実験結果による比較

Fig. 8. Experimental comparison of energy loss in various W, S and G elements.

表2 W, S, G, WS, SG 間の変換効率 η と溶断時間 Δt の比較

Table 2. Comparison of the conversion-efficiency η and pre-arcing time Δt between W, S, G, WS and SG .

記号	η (%)	Δt (μs)
W	51.1	45.4
S	65.1	43.1
G	63.5	43.3
WS	61.86	43.5
SG	68.45	42.1

ただし、 $L=3.6\mu\text{H}$, $C=534\mu\text{F}$, $V_c=7\text{kV}$ で I_m は転送電流の最大値である。

表2は表1に示したATを用いたときの、 Δt ならびに η の測定結果を示す。

(3) Δt_s BEの線径 1.2mm^ϕ を用いたときの Δt_s の比較を図9に示す。W, S, Gにおける Δt_s は、各々 $4\mu\text{s}$, $2\mu\text{s}$, $2\mu\text{s}$ 以下を示している。

以上の実験結果より次のことが明らかである。

SとGの η 値は、Wの値と比較して平均10%以上高く、 Δt_s はW, S, Gの順に短縮化されている。

(4) Δt のAT依存性 ATをW, S, Gと変えたときの電流密度 J (kA/mm^2) と Δt (μs) の関係を図10に示す。

図9 W, S, Gに対する転送電流の立上り時間の比較

Fig. 9. Comparison with rise time of transfer current between W, S and G.

各々の特性は次式で表される。

$$\text{けい砂 } S \text{ に対して } \cdots \cdots \Delta t = 1.24 \times 10^3 \times J^{-0.9}$$

$$\text{水 } W \text{ に対して } \cdots \cdots \Delta t = 2.08 \times 10^3 \times J^{-1.07}$$

$$\text{石こう } G \text{ に対して } \cdots \cdots \Delta t = 4.39 \times 10^3 \times J^{-1.3}$$

各特性の一般式は $\Delta t = kJ^{-n}$ と表され、 k および n はATによって定まり、対数目盛上で直線となる。ここで、電流密度の値は溶断直前の電流値を銅線の断面積で割った値であり、転送開始直前まで線径は変わらないものと仮定している。

(5) 溶断後のATの観察 図11はATにWを使用したとき、溶断後にカートリッジ管内に残存した金属片の写真である。同図は特に大きな破片が残った

図10 電流密度 J と溶断時間 Δt との関係

Fig. 10. Pre-arcing time Δt versus current density J .

(a) $\times 150$ 倍

(b) $\times 300$ 倍

図11 AT (水) の観察
Fig. 11. Observation of a tamper-material (water).

(a) $\times 150$ 倍

(b) $\times 600$ 倍

図12 AT (けい砂) の観察
Fig. 12. Observation of a tamper-material (silica sands).

(a) 断面図 ($\times 5$ 倍)

(b) $\times 150$ 倍

図13 AT (石こう) の観察
Fig. 13. Observation of a tamper-material (gypsum).

ていた部分を150倍に拡大したものであり、溶融飛散した金属片が互いに接触し合っている。また、なかには W が高温の金属片を急激に冷却するため、 W を気化しながら固まったものと考えられる完全に球状の金属が観測される。

W の場合、溶融が完全に行われ飛散した金属片の大きさは数 μm 以下であるが、部分的には数十 μm 以上の溶融されない金属片が残っている。

図12は S の場合で、その寸法は大きなもので数十 μm 以上、小さなものは1 μm 以下であり、その間に溶融飛散した金属片が残存している。ある S の表面を300~450倍に拡大してみると、サブ μm 以下の金属片が S の表面に蒸着されているのが観察される。すなわち、小片となった金属片は S の表面に蒸着して、急速に冷却されたものと考えられる。(b)図は特に小さな S の一部を600倍に拡大したもので、 S の一部が溶融して丸みを帯びているものが観察される。

図13(a)はATに G を使用したときの溶断後のBEの断面の写真である。同図の A 点は銅線が溶融飛散してきた方向の面であり、 B 点はその反対側の部分である。 A の部分を150倍で観測すると、 G の表面に粒状または微片となった数 μm 以下の金属銅片が多数付着している。また、 B の部分を拡大してみると、銅線に接した部分だけでなく、外側の G の内部に銅片が飛散してきている金属片が観察される。

このように G の場合、溶融飛散した金属銅片の大きさは全体的に数 μm 以下であり、大きな固まりがなく、また G の内部まで金属片が拡散浸透しているのが、ほかと対比した大きな特長である。

5. 考 察

本章では、使用後のATの観察を通して W, S, G における比較を行い、液状、粒状ならびに固体状の消弧作用について考察する。更に、 η と Δt_s のAT依存性に関して、BEの溶断以前と溶断以後とに分けて検討する。

〈5・1〉 溶断以前 図2の i_1, i_2 ならびに V_B の時間的な対応を図14に示す。いま、 $t=0$ で GS_1 を閉路すると、 C の放電が開始する。BEのら線状に巻いたインダクタンスは空心リアクタンスの値に比べて2けたほど小さいので無視すると、 i_1 は回路の L, R および C で定まる時定数で上昇し、 $t=t_s$ でほぼ最大値となる。 t_s から t_1 の間は曲線的に減少し、溶断を開始する t_1 から t_2 の間はほぼ直線的に減少する。

この間銅線は加熱され、固相から液相へ、そして気相へと変化し、 t_1 以後アークが発生する。

図14 i_1, i_2 および V_B の時間相関図
Fig. 14. Correlation of a time between current i_1, i_2 and a terminal voltage V_B .

V_B の波形は $t=0$ から t_s まで徐々に上昇し、 t_s から t_1 で急激に上昇する。ATが W の場合には、 t_s から t_1 の間の立上りの波形に凸部が現れている。これは、金属線が融点から沸点に至る相変化による抵抗率の変化によるものと考えられる⁽²⁴⁾。一方、 S の場合は凸部はほとんど見られない。また、 G の場合は十分乾燥して固化した資料では、 S と同様に急しゅんな立上りを示す。

以上のように、ATが水または水分を含む場合には、電圧の立上り部分に凸部が現れるのに対し、粒状ならびに十分乾燥した G の場合には凸部が現れず W_B が小さくなる。

〈5・2〉 溶断以後 V_B が GS_2 の点弧開始電圧に達すると、 GS_2 は導通し転送を開始する。すなわち、溶断を開始する t_1 は転送を開始する時刻であり、これ以後金属線は溶断気化し微粒子となってアーク放電が発生する。この温度は3,000 K以上にもなり、金属粒子や周囲媒質を熱電離し、アークを成長させるので、従って W_B を小さくするためには瞬時にその温度を下げ、粒子の電離度を下げ、アーク抵抗を高くして、 Δt_s を短縮することが必要である。

この間の現象は、ATの観察結果より次のように考えられる。

(1) 溶断気化時の初期に金属線の膨張を押さえ、爆破効果を高める作用は、水より粒状または固体状のほうが高い。

(2) 常温における熱伝導率の値は約 W が6.0, S が3.26, G が1.3 ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) であるので、熱冷却の点に関しては W が優れている。

(3) 溶断後に金属粒子を取込んで、金属粒子間の絶縁性を高める点では固化した G が優れており、転

送電流の立上り時間に関しては W が $4\mu\text{s}$, S が $2\mu\text{s}$ であるのに対し, 固化した G は $2\mu\text{s}$ 以下であった。これらの差異は AT の消弧作用の相違によるものと考えられる。

6. あとがき

本論文では, まず第2章において誘導性エネルギー蓄積回路の蓄積エネルギーを遮断器を介して負荷へ転送する場合に, 遮断器で消費される損失エネルギーをより小さくするには, 高速可変抵抗器形遮断器が望ましいことを示した。第3章ではスローバンクコンデンサとインダクタならびに遮断素子を組合せた高速立上り電流発生回路の模擬回路を用いてシミュレーションを行い, 遮断器の抵抗値が低抵抗から高抵抗へ時間の関数で瞬時に立上るものほど, その端子電圧は時間的に急しゅんに立上り, 損失エネルギーが小さくなることを示した。

第4章では高速立上り電流発生回路を用いて, アーク消弧媒体を水, けい砂, 石こうならびにそれらを混合した場合をパラメータに密閉形遮断器の損失エネルギー, 変換効率, 転送電流の立上り時間の測定を行い, それらの特性について比較した。更に, 溶断時間のアーク消弧媒体依存性ならびに溶断後の消弧媒体の観察を行った。

その結果, けい砂および石こうの変換効率は, 水の値と比較して平均10%以上高い値が得られた。また, 転送電流の立上り時間は水, けい砂, 石こうの順に短縮化され, 液体状の水より粒状または固体状のアーク消弧媒体の有効性が確認された。

更に, アーク消弧媒体に水を使用した場合は, 高压回路における湿気の問題や周辺の汚れ, 金属線の腐蝕による経年劣化などの欠点を有するが, 固体化することによってこれらの点を改善することができ, その取扱いも容易となった。

本方式の密閉形遮断素子は構造が単純で価格も安く, 使用法が簡単で長寿命であるのに加えて, 高速バンクの1/10の価格であるスローバンクを使って, 急しゅんな変化を伴う種々な波形の整形と形成⁽¹⁰⁾を提供できるので, 特に物性研究などにおける電源に最適と考えられる。また, 高電圧インパルス発生器やパルスパワー応用へと, 今後幅広い活用が期待される。(昭和63年7月25日受付, 同63年12月22日再受付)

文 献

- (1) 上野: エネルギー・資源, 5, 16 (昭59-1)

- (2) 上野: 同上, 5, 103 (昭59-3)
 (3) 電気学会技報, No.228 (昭61)
 (4) 上野: エネルギー・資源, 8, 119 (昭62-3)
 (5) 電気学会技報, No.247 (昭62)
 (6) 上野・林: 放電研究, No.116, 1 (昭62-10)
 (7) 上野・酒井: エネルギー・資源, 9, 132 (昭63-3)
 (8) 岡崎・稲葉: 電学論 B, 107, 105 (昭62-2)
 (9) 上野・J. Salge・U. Brausberger: 同上 B, 99, 721 (昭54-11)
 (10) 田口・桜井・上野: 同上 B, 105, 925 (昭60-11)
 (11) I. Ueno, K. Ikuta, Y. Taguchi, M. Tanimoto, M. Nakazawa & G. Kido: *Japan. J. Appl. Phys.*, 21, L 746 (1982)
 (12) 上野・田口・染谷: 電学論 D, 107, 93 (昭62-1)
 (13) 上野・田口・中沢・竹田: 同上 B, 102, 116 (昭57-2)
 (14) 上野・田口・中沢・岡田: 同上 B, 102, 117 (昭57-2)
 (15) 田口・千葉・桜井・上野: 同上 B, 103, 223 (昭58-3)
 (16) 田口・桜井・上野: 同上 B, 104, 196 (昭59-3)
 (17) 田口・小幡・竹田・上野: 昭61電気学会全大, p. 49
 (18) 小幡・沢渡・田口・上野: 昭62同上, p. 244
 (19) 田口・小幡・上野: 昭62同上, p. 245
 (20) H. W. Dommel: *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-887, 388 (1969)
 (21) 谷本・矢尾板: 電総研彙報, 49, 12 (昭60)
 (22) 井上・田口・上野: 電学論 B, 102, 259 (昭57-4)
 (23) 林・中野: 電学誌, 81, 1084 (昭36-7)
 (24) 元木・行村: 電学論 A, 96, 221 (昭51-5)

付 録

(1) 式の導出

図1の回路において, 全電流を I , BE に流れる電流を I_w とすると, 回路方程式は次式で表される。

$$-L(dI/dt) = L_L d(I - I_w)/dt + R_L(I - I_w) \quad \dots\dots\dots (付1)$$

$$-L(dI/dt) = R_w I_w \quad \dots\dots\dots (付2)$$

(付2)式を(付1)式に代入した微分方程式の解は,

$$I = I_s(i_1 e^{-\beta_1 t} + i_2 e^{-\beta_2 t}) \quad \dots\dots\dots (付3)$$

ただし,

$$-\beta_1, -\beta_2 = (-a \pm \sqrt{a^2 - 4b})/2$$

$$a = (R_w/L_L)(1 + L_L/L + R_L/R_w)$$

$$b = (R_w R_L / L L_L)$$

(付3)式における初期条件 $t=0$ より $I = I_s$ とおくと,

$$i_1 + i_2 = 1 \quad \dots\dots\dots (付4)$$

(付2)式で初期条件 $t=0$ より $I_w = I_s$ とおくと,

$$(L/R_w)(\beta_1 i_1 + \beta_2 i_2) = 1 \quad \dots\dots\dots (付5)$$

遮断器 R_w の損失エネルギー W_B は

$$\begin{aligned} W_B &= \int_0^\infty R_w I_w^2 dt \\ &= -(L^2 I_s^2 / 2 R_w) \{ \beta_1 i_1^2 + \beta_2 i_2^2 \\ &\quad + (4\beta_1 \beta_2 i_1 i_2) / (\beta_1 + \beta_2) \} \quad \dots\dots\dots (付6) \end{aligned}$$

ここで, 次の関係を用いて式を整理し, 初期蓄積エネルギー W_s を $(L I_s^2 / 2)$ とおくと(1)式が導出される。

$$\beta_1 i_1^2 + \beta_2 i_2^2 = R_w / L + a i_1 i_2$$

$$i_1 i_2 = -\{b + a(R_w/L) + (R_w/L)^2\} / (a^2 - 4b)$$