UDC 621.316.57.064.26 : 621.3.064.3.024.1

論 文

55-B 76

真空しゃ断器の直流大電流しゃ断特性

正 員 柳 父 悟 (東 芝)

正 員 金 子 英 治 (東 芝)

正 員 玉 川 徹 (東 芝)

正 員 相 馬 茂 男 (東 芝)

正 員 奥 村 博 行 (東 芝)

1. ま え が き

将来のエネルギー源として核融合発電が注目されている。そのため各所で各種の核融合の実験が行なわれているが、中でもトカマク形の装置が大々的に研究されている。これを実現するのに解決しなければならない技術的な問題は数多いが、その中の一つに、プラズマ電流励起のための誘導エネルギー蓄積 (IES) システムで必要となる直流大電流のしゃ断器がある⁽¹⁾⁽²⁾。これはプラズマループに電磁的に結合した一次ボロイダルコイルの直流大電流 (100kA クラス) を急激にしゃ断することによってプラズマループに電流を誘起し加熱する方式であるが、このしゃ断のために必要とされるしゃ断性能を従来の単器のしゃ断器で実現することは困難である。また、このしゃ断器は多ひん度で運転されるため長寿命でなくてはならず、ますます実現が困難となる。

そこで、しゃ断器を並列に運転するなどの新しい技術が要求されている⁽³⁾⁽⁴⁾、しかしながら、しゃ断器を並列に運転するためには使用できるしゃ断器として真空しゃ断器のようなアーク電流電圧特性が正特性であるものを用いる必要がある。

また、多頻度で運転されるため、電極の消耗の観点から、しゃ断器内で大量のエネルギーを処理することによってしゃ断を行なうタイプのしゃ断器などは不適

当であることは明らかである。また、このようなシステムにおいて用いることのできるしゃ断器としては、真空しゃ断器のほかにサイリスタなどの半導体しゃ断器が考えられるが、現在のところコスト面、および実現模のしゃ断試験により好結果を得た点で真空しゃ断器の方が有望である。

本論文はこのような 100kA クラスの大電流の並列しゃ断システムのために開発された真空しゃ断器のしゃ断特性につき、直流の大電流しゃ断を行なった場合の電流零点近傍における di/dt - dv/dt などの特性を調査し、その解明を行なうことを目的とした。更に、これから得られた諸特性をもとに経済的なしゃ断システム設計のための資料を得ることを目的としたものである。またこれらから得られた結論は、前出の IES システムにおいて用いられるしゃ断システムのみでなく将来送電系統などにおいて広く用いられる直流送電系統保護用直流しゃ断システムにも適用することができる⁽⁵⁾。

従来、このような目的のしゃ断器は存在しておらず、更に大電流の直流しゃ断現象には不明な部分が多いのが現状であり、将来の実用化についてこれらを明らかにし、基礎的な考え方を得てゆく必要がある。

筆者らは、このような 100kA クラスのシステムにおける並列運転を目的としてまず実際の真空しゃ断器を用いて 20kA 程度の直流電流を転流方式でしゃ断する試験を行ない、そのしゃ断特性に影響を及ぼす各種の要因について検討を加えた。しかる後にしゃ断システムに関する検討を加えた。

2. 真空バルブ

真空しゃ断器のしゃ断特性はその消弧室である真空バルブの特性によって決定される。この真空バルブには現在大きくわけて二つの方式のものがある。一つは

High DC Current Interrupting Characteristics of Vacuum Circuit Breakers. By Satoru Yanabu, Member, Eizi Kaneko, Member, Toru Tamagawa, Member, Shigeo Soma, Member (Toshiba Corporations, Heavy Apparatus Engineering Laboratory) & Hiroyuki Okumura, Member (Toshiba Corporation Hamakawasaki Works).

柳父 悟: 正員, 東京芝浦電気(株)重電技術研究所
金子英治: 正員, 東京芝浦電気(株)重電技術研究所
玉川 徹: 正員, 東京芝浦電気(株)重電技術研究所
相馬茂男: 正員, 東京芝浦電気(株)重電技術研究所
奥村博行: 正員, 東京芝浦電気(株)浜川崎工場

スパイラル状の電極を用いたもので、他は電極面に軸方向に磁界を印加する方式のものである。この縦磁界形の真空バルブは一般にアーク電圧が低いために後述する転流しゃ断に用いられるしゃ断器には極めて都合がよい。また、アーク電圧が低いとそれだけしゃ断接点へのエネルギー注入が少なくなるので、電極消耗が少なくなり、多数回繰返ししゃ断を行なわせる必要のある、例えば IES システムなどには都合のよいしゃ断器であると言える⁽⁶⁾。

本報告は、このような IES システムなどに用いられる多ひん度しゃ断用真空しゃ断器のしゃ断特性の検討を行なったものである。また、大電流しゃ断試験も連続して数千回以上行なった。なお、供試しゃ断器には上に述べた理由により縦磁界形の真空バルブを用いている。

よく知られているように、縦磁界形の真空バルブにおいては、単なるつき合わせ電極のときにはアークが集中するような形態をする領域の電流値であっても、アークはそれぞれ 100 A 程度の小さなコラムに分散し、アークプラズマが安定して維持されることによりアークプラズマの損失が小さく抑えられ、従って、アーク電圧が低くかつ安定しているなどの特長が現われる⁽⁸⁾。これは他の接点アークには見られない特長であり、長寿命の真空しゃ断器を実現できる大きな理由である。

3. 直流しゃ断試験回路

第 1 図に今回の試験回路と電流電圧のダイアグラムを示す。回路はいわゆるクローバ回路付コンデンサ放電回路で、擬似的な直流電流を発生し、供試しゃ断器に供給することができる。しゃ断はあらかじめ充電した転流コンデンサ C_2 を放電することにより、しゃ断点に強制的に電流零点をつくる転流しゃ断方式により行なった。

しゃ断時の di/dt はこの転流コンデンサ C_2 の充電電圧と供試器に直列のインダクタンス L_s の値により変化できる。このインダクタンスについては、今回可飽和リアクトルを 4 個製作し、これらを 4 並列 (4P) ~ 1 並列 (1P) にして用いることにより値の変更を行なった。また、合せて空心のリアクトルを用いた試験も行なった。再起電圧に関しては、電流しゃ断後転流コンデンサ C_2 の残留電圧が供試器の極間に現われてくる。再起電圧上昇率 dv/dt は di/dt と同様に転流コンデンサ C_2 の充電電圧と、インダクタンス L_s により変化できる。また、供試器に並列に CR を取り付けることによって dv/dt は抑えることもできるが、

(a) 試験回路
(a) Testing circuit diagram.

(b) 電圧、電流波形の説明
(b) Voltage and current diagram.

第 1 図

Fig. 1.

今回は特に CR を取り付けずに浮遊の C のみによる影響だけにした。従って試験条件としては CR サプレッサのない dv/dt が最もきびしい条件下での試験である。

供試しゃ断器は 30 kV-30 kA クラスの通常の電力用真空しゃ断器で、使用している真空バルブは縦磁界形電極を用いた試作真空バルブである。

試験装置はシーケンス制御盤によって制御され、供試器の開極、転流時間など自由に設定でき、供試器のアーク時間は 0 から最大 30 ms まで変えることができる。また、本試験回路においてしゃ断電流は最大直流 30 kA まで可能であるが本報告はすべて 20 kA で行なった試験の結果である。

4. 試験結果

〈4.1〉 空心リアクトルを用いた試験 しゃ断電流は 20 kA 程度とし、直列のリアクトルの値を変えて試験を繰返し行なった。

リアクトルの値を一定として、アーク時間 T_a と di/dt の限界の関係を第 2 図に示す。ここでの di/dt は電流零点近傍における電流変化率である。試験装置はアーク時間を 0 付近から最大 30 ms まで変えることが可能であるが、この範囲では第 2 図に示すようにし

第2図 アーク時間と di/dt との関係
Fig. 2. Relation between arcing time and di/dt .

第3図 di/dt - dv/dt としゃ断限界
(空心リアクトルの場合)

Fig. 3. Relation between di/dt - dv/dt and a limit of interruption.

しゃ断限界に対して差異が認められなかった。本供試真空しゃ断器に用いた真空バルブは縦磁界形であるので 20 kA 程度の電流であると十分に電極面上にアークは広がり、何らしゃ断限界を下げる現象が発生しない。そのためここで示した時間の範囲では、 di/dt で表示したしゃ断限界はアーク時間にほとんど依存しないものと思われる。

第3図に、直列リアクトルの大きさを変えた場合の di/dt - dv/dt に対するしゃ断特性を示す。 di/dt , dv/dt とともに電流零点近傍の接線から求めた値である。再起電圧の上昇率はリアクトルとともに、2~9 kV/μs の程度の値を示しているが、電流変化率の方は 130~180 A/μs 程度の値を示している。

本供試真空しゃ断器のしゃ断特性にはばらつきが多く、同一のしゃ断条件でもしゃ断成功したり、失敗したりする場合があります。厳密にしゃ断限界を規定することはむずかしいが、ここではまったくしゃ断不能の起

こらないところを成功の領域、それ以外を失敗の領域とした。しゃ断限界が第3図の破線のものであるとするならば、特に dv/dt が 6 kV/μs 以下では di/dt は 160~180 A/ms である。従って dv/dt が 0~6 kV/μs と大幅に変わるのに対して di/dt はあまり差はないので、この範囲内では di/dt が主体的であり、 dv/dt は二次的要因であると考えられる。

これ以上の dv/dt においては何らかの相関関係があるが今回の試験ではその領域について考察するだけの十分なデータが得られていない。

〈4・2〉 可飽和リアクトルを用いた試験 本節では、供試器に直列にそう入するリアクトルとして可飽和リアクトルを用いた場合のしゃ断特性について述べる。しゃ断性能の試験はアーク時間 $T_a=10\sim20$ ms の範囲で行なった。

第4図に di/dt - dv/dt としゃ断限界の関係を示す。可飽和リアクトルを用いると、リアクトルの飽和電流値の前で電流の変化率は大きく異なる。第4図での di/dt は電流零点近傍における電流の変化率である。パラメータとして可飽和リアクトルの並列個数を示した。すなわち 1P は並列個数 1 個でリアクトルが 1 個の場合を意味している。可飽和リアクトルは、一つあたり非飽和時のインダクタンス約 80 μH、飽和時には約 5 μH の値を持っており鉄心の飽和電流値 I_s は約 2 kA である。従って I_s のときしゃ断時の電流は第5図のオシロ例で示したようにしゃ断電流約 2 kA で電流波形が変化し屈折した電流波形となる。

可飽和リアクトルの並列個数を増すとこの飽和電流値 I_s は増え、更にインダクタンス値は小さくなる。第4図ではこのようなインダクタンスをパラメータにした。ここでは第3図の空心リアクトルのときと異なる

第4図 di/dt - dv/dt としゃ断限界
(可飽和リアクトルを用いた場合)

Fig. 4. Relation between di/dt - dv/dt and a limit of interruption.

第 5 図 シャ断試験例

Fig. 5. Example of waveforms at interruption test.

り電流零点近傍の di/dt がパラメータに従って $80 \text{ A}/\mu\text{s}$ から $190 \text{ A}/\mu\text{s}$ まで大幅に異なるにしても、シャ断限界を示す dv/dt はほとんど $3.5 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 一定であった。第 3 図では dv/dt よりもむしろ di/dt が特性に主体的に影響を及ぼしていることを示したが、この節での結果は、表面的にはこれと矛盾すると思われる。しかしながらここで注意すべき点は、パラメータとしてリアクトルの並列個数を変えたが、これは単にインダクタンスが変化しただけに止まらず、飽和電流値も変化したことを意味している。従ってこれらの関係を明確にするために飽和電流値 I_s とシャ断限界の dv/dt の関係をグラフにプロットしてみると、第 6 図に示すように I_s の増加とともに限界の di/dt が大きくなる傾向がある。また、更にリアクトルの飽和特性により電流が屈折する点から電流零でシャ断するまでの時間 T_2 と電流零点近傍の di/dt との関係をプロットすると、第 7 図に示した関係が見出された。それぞれのパラメータごとにシャ断限界を示した。それぞ

第 6 図 I_s と di/dt の関係Fig. 6. Relation between I_s and di/dt . 第 7 図 T_2 と di/dt の関係Fig. 7. Relation between T_2 and di/dt . 第 8 図 di/dt と T_1 との関係Fig. 8. Relation between di/dt and T_1 .

れのシャ断限界のときの dv/dt は第 4 図で示したように $3.5 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 一定であるので、この結果は dv/dt を一定としておいたときの電流零点近傍の di/dt と T_2 との関係と言える。パラメータは可飽和リアクトルの並列個数であり、図中に示した矢印の向きにインダクタンスが減少し、飽和電流値が増加している。それぞれのリアクトルの場合ごとに di/dt と T_2 はほぼ次の式

$$di/dt \times T_2 = I_s \dots\dots\dots (1)$$

で関係づけられるので測定点は I_s をパラメータとする双曲線上に乗り、また di/dt の大きい側でシャ断不能が起りやすくなる。従って、それぞれの双曲線上でシャ断不能と成功との限界が存在する。これらの限界を結ぶとほぼ右上の関係が示された(第 7 図)。

転流開始からシャ断までの時間、いわゆる転流時間 T_1 と電流零点近傍の di/dt との関係を第 8 図に示す。この場合も測定点は I_s をパラメータとする双曲線上に乗るが、シャ断限界に関してはほとんど $T_1 = 80 \mu\text{s}$ 一定のところになる。第 7 図においては T_2 が電流零点近傍の di/dt に対して比例的な関係を示したのに対し、 T_1 は一定であることは興味深い。 I_0/T_1 はシャ断時の平均的な電流変化率を意味するが、第 8 図のように 20 kA シャ断時に $T_1 = 80 \mu\text{s}$ ということは、す

なわち平均的な電流変化率 (I_0/T_1) として平均 $di/dt = 250 \text{ A}/\mu\text{s}$ ということを示し、第3図の空心リアクトルのときの結果と比較し、平均としてはかなり大きな di/dt でのしゃ断が可能であることを示している。第6図から第8図にわたって示したように可飽和リアクトルを用いた直流しゃ断では、空心リアクトルを用いたときに比べ、平均的にはかなり大きな電流変化率 (I_0/T_1) でしゃ断が可能であることが明らかになった。また、飽和電流値などの多くのパラメータによりしゃ断特性がかなり異なることがわかり、単に電流零点近傍のみの di/dt だけでしゃ断特性が議論できないことが示された。

5. 検 討

〈5・1〉 実験結果の検討 20 kA 程度の直流電流をしゃ断し、その電流零点近傍の特性、特に di/dt としゃ断限界について調査したが、しゃ断についていくつかの興味ある結果が得られたのでここで検討を加える。

アーク時間が数 ms~30 ms の範囲では、しゃ断特性にほとんど差異が見られなかった。これは電極径がアーク電流に対して十分に大きいためである。縦磁界形の電極の場合、アークコラムは細かいアークコラムに分散しており、一つ当たり銅電極の場合 100 A 程度の電流であることが知られている。また、アークの軸方向に適切な磁界を印加することにより、この微細なアークコラムが電極面に一様に分布される⁽⁸⁾。このようにアークコラムが一様に分散ししかも安定しているために、アークプラズマの損失も少なく、アーク電圧が低下する。従って大電流を流しても極端なアークの集中が生じないためにアーク時間の長短によってもそれほど電極表面の状態は変わらず、しゃ断特性もそれほど変わらないと考えられる。 di/dt - dv/dt 特性については前章において di/dt が主体的であり、 dv/dt は二次的であると述べた。 dv/dt がしゃ断特性にまったく関係がないとは決して考えられないが少なくとも今回の試験の範囲では di/dt に主に関係すると考えられる。特に単に電流零点近傍の di/dt の大きさだけでなく、可飽和リアクトルを用いたときには、その飽和電流値が重要な要因になることが明らかになった。これに関しては、次節において簡単なモデルを用いることによってその機構の解明を行なう。

〈5・2〉 理論的考察 しゃ断性能が転流期間中の電流変化率、特にしゃ断電流がリアクトルの飽和特性によって屈折する時点からしゃ断までの時間 T_2 、電流変化率 di/dt とその飽和電流値 I_s によって大き

第9図 アーク電流とプラズマ密度の関係

Fig. 9. Relation between arcing current and plasma density.

な影響を受けており、転流時間 T_1 そのものにはあまり関係がないことを前節までに述べてきた。この T_2 が $20 \sim 30 \mu\text{s}$ の値であることは、真空中のプラズマ移動速度が 10^4 ms^{-1} 程度であることから⁽⁹⁾、このプラズマが電極間空間から拡散、再結合などでなくなってゆく時間と関係があると考えられる。また、プラズマの拡散現象と関連して求めた真空の絶縁回復時間がこの程度の値であるという報告も多く⁽¹⁰⁾、これらの挙動が実際の真空しゃ断器のしゃ断特性にも密接に結びついていると考えられる。

そこで、電流零の時点で電極間に残留するプラズマが多いほど再発弧、すなわちしゃ断不能につながると考え、この量を評価するためにここでは電流の変化の仕方に関連して、電流零点においてどの程度のプラズマ粒子が電極間に残り得るのかということを簡単なモデルと計算によって検討することにした。

ここで検討するのは、縦磁界形の真空しゃ断器であるので、アークは電極間に十分に均一に分散していると仮定し、電流値によってアークコラムの存在している領域の大きさが変わらないとして、更に次の仮定を用いてモデルの簡単化を図った。

(1) 定常状態ではプラズマ密度 n_0 はアーク電流 I_0 に比例する。

$$n_0 = a I_0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

(2) アーク電流のないときにプラズマ密度の減衰率はプラズマ密度に比例する。

$$dn/dt = -\alpha n \quad \dots\dots\dots (3)$$

アーク電流の存在するときには(3)式にアーク電流の寄与分を付け加えて

$$dn/dt = -\alpha n + \beta I \quad \dots\dots\dots (4)$$

と表すと(2)式から $\beta = \alpha a$ である。

第9図で、 $t \leq t_0$ では $dn/dt=0$ であり、 $t_0 < t \leq T_1$ では $di/dt = -\gamma$ とすると、 $I = I_0 - \gamma t$ 、但し、 $\gamma = I_0/T_1$ となり、これから

$$n = -\frac{\beta\gamma}{\alpha^2} e^{\alpha t} - \frac{\beta\gamma}{\alpha} \cdot t + \left(n_0 + \frac{\beta\gamma}{\alpha^2}\right) \dots\dots (5)$$

となる。

まず、(5)式を用いて空心リアクトルの場合の電流ゼロにおける残留プラズマ密度を求める。結果は1に正規化してある。条件は $I_0=20\text{ kA}$ とし、転流時には電流は直線的に変化するとした。ここで考察したしゃ断電流値は 20 kA 一定であるので正規化してそれぞれの場合を比較することが可能である。プラズマの減衰の時定数は $20\text{ }\mu\text{s}$ とした。これは前に述べた真空中のプラズマ移動速度から仮定した。

第10図に(5)式を di/dt をパラメータとして解いたものを示す。白丸は電流零点のときの残留プラズマ密度を示しており、 di/dt の大きいほど残留プラズマ量が多くなることがわかる。 di/dt を横軸にし、残留プラズマ量を示したものが第11図である。

第10図 プラズマ密度の計算結果

Fig. 10. Calculation of plasma density.

第11図 di/dt と残留粒子密度

Fig. 11. di/dt and residual particle density.

第4章の結果からもわかるように、 $dv/dt=6\text{ kV}/\mu\text{s}$ 以下では $di/dt=170\text{ A}/\mu\text{s}$ 程度で空心リアクトルの場合不能を起すが、第11図からこのときの電流零の時点におけるプラズマ密度は 0.17 程度である。上に述べた仮定のもとにこの値がしゃ断の成否を決定する目安となる。次に可飽和リアクトルの場合であるが、第12図で $t_s \leq t$ では(4)式を解きなおして次のようになる。

$$n = \left(n_s - \frac{\beta I_s}{\alpha} - \frac{\beta\gamma}{\alpha^2}\right) e^{-\alpha t} - \frac{\beta\gamma}{\alpha} t + \left(\frac{\beta I_s}{\alpha} + \frac{\beta\gamma}{\alpha^2}\right) \dots\dots (6)$$

但し、 $t=T_s$ で $n=n_s$ 、 $I=I_s$ 、

第2章の実験結果をふりかえって、第4図において例えば $1P$ の条件と $4P$ の条件においては、それぞれのしゃ断限界の di/dt が前者は $80\text{ A}/\mu\text{s}$ 、後者は $180\text{ A}/\mu\text{s}$ と、2倍以上も異なる。

これらの理由として、(5)、(6)式をそれぞれの条件で解いて、残留プラズマ量を比較してみる。第4図

第12図 可飽和リアクトルを用いた場合の電流波形

Fig. 12. Current waveform with saturable reactor.

第13図 可飽和リアクトルを用いたときのプラズマ密度

Fig. 13. Plasma density with saturable reactor.

第 14 図

Fig. 14.

から第 8 図までから T_1, T_2, I_0, I_s など (6) 式を解くのに必要な定数を組みとり、1P と 4P について解いたものが第 13 図である。1P においては電流零点近傍の $di/dt = 80\text{ A}/\mu\text{s}$ 、4P では $di/dt = 180\text{ A}/\mu\text{s}$ の条件で解いた。すなわち両条件ともそれぞれのしゃ断限界であるが、両者とも電流零において $n = 0.175$ 以下となり、先の空心リアクトルの条件から $dV/dt = 6\text{ kV}/\mu\text{s}$ 以下では、しゃ断可能な領域であることがわかる。従って、このような観点から第 4 図のような関係はアーク中のプラズマの減衰に起因する現象であると考え得ることがわかる。また、 $n = 0.175$ という値がしゃ断不能と可能との限界であると考えてもよく、いろいろなしゃ断の場合にもこのプラズマ密度を指標として考え、この量の大ききでしゃ断可能か不可能かの評価をすることができる。例えば第 14 図(a)に示したように、瞬時に I_0 から I_s まで電流を減衰させるというような電流の変化のさせ方だと、可飽和リアクトル 1P に対応する条件 ($I_s = 2\text{ kA}$) で $di/dt = 50\text{ A}/\mu\text{s}$ [第 14 図(b)], 4P の条件で $di/dt = 120\text{ A}/\mu\text{s}$ [第 14 図(c)] でのしゃ断が可能であることがわかる。実際の試験結果に比べて少し小さめの値となっているのは $t = 0$ で電流が I_0 から瞬時に I_s まで減少するとしたからで、まだ大電流時の大量のプラズマの影響が残っているからである。しかし、転流開始からしゃ断まで $40 \sim 50\mu\text{s}$ であるので平均として $500 \sim 400\text{ A}/\mu\text{s}$ でのしゃ断を行なったことになる。第 8 図の結果からは高々 $250\text{ A}/\mu\text{s}$ のしゃ断能力であることからするとかなりな能力のしゃ断システムとなり得ることがわかる。従って、例えば第 14 図のような電波波形が可能な

らば、短い時間での転流しゃ断が可能であり、しかも電流零点近傍では電流の変化率を抑えているので、再起電圧上昇率も抑えたしゃ断システムが実現できる。

〈5.3〉 しゃ断システムの検討 直流しゃ断システムの設計をするときに重要な要因となるものにしゃ断時の di/dt がある。前章までにしゃ断性能と di/dt との関係を検討してきた。従来は単に di/dt の大きさのみを設計の基準にすることが多かったが、前章までに示したように、 di/dt については特に電流零点近傍の値を含めた電流の変化の様子が重要であることが明らかになった。すなわち、単に di/dt が大きい小さいかということにより可飽和リアクトルを用いたときに、その可飽和リアクトルの飽和電流値と di/dt との関係が重要で、これらに第 4 図から第 7 図までにみられるような関係がある。IES システムのような大電流直流しゃ断システムの設計にあたっては、コストの関係上、あるいは信頼性の上、それぞれのシステム固有の転流コンデンサバンクの大きさや、リアクトルの大きさ、あるいはリアクトルの飽和特性など種々の要因があり、 di/dt , dv/dt などの値をどこまで要求するかというような問題があるが、これまでに述べてきたような関係から単に di/dt の大きさのみでなくリアクトルの飽和特性を含めた合理的な設計の指針が与えられるものと考えられる。

6. む す び

縦磁界真空バルブを用いた真空しゃ断器のしゃ断特性につき、 20 kA 程度の直流電流をしゃ断する試験を行なった。その $di/dt - dv/dt$ 特性を求め、これ

に影響を与える要因につき検討をした。また、簡単なモデルを用いて理論的考察を行なった。

これらの試験と計算から次のような結論を得た。

(1) 今回の試験条件において縦磁界形の実験用試作真空バルブを用いた真空しゃ断器では電極径に対してしゃ断電流に余裕があるときには、しゃ断特性に対してアーク時間は 0~30 ms の範囲でほとんど影響をしない。

(2) 電流零点近傍の di/dt - dv/dt 特性については dv/dt が 6kV/ μ s より小さい範囲において di/dt が主体的であり、 dv/dt は二次的である。

(3) 可飽和リアクトルを用いれば電流零点近傍の di/dt は空心のときより小さいものの、転流開始からしゃ断までの時間で求めた平均的 di/dt は空心よりはるかに大きな値でしゃ断が可能である。

(4) 可飽和リアクトルを用いると、 di/dt 以外に飽和電流値 I_s によりしゃ断特性が大きく影響を受ける。また転流期間中の電流の減衰のさせ方によりしゃ断特性が異なることがわかった。

(5) プラズマの減衰を考慮した簡単なモデルを用いて解析的な検討を行ない、この結果と実際のしゃ断器のしゃ断特性とのあいだにより一致を得た。このモデルは実際の真空プラズマの挙動を十分に模擬しているとはいいがたいが、可飽和リアクトルを用いたしゃ断特性の一見矛盾する傾向に対して十分な説明を行な

えるものである。

(6) 転流しゃ断を用いた直流しゃ断システム設計において上記結論から転流期間中の電流波形を適当に選べば、かなり大きな di/dt (平均) でしゃ断するものが得られることがわかった。特に転流時において可飽和リアクトルの飽和電流値まではなるべく早く電流を減衰させ、飽和電流値以降は、 di/dt をゆるめる方式が有効であることが示された。この方式により空心リアクトルの場合の 2~3 倍程度の平均的 di/dt でしゃ断が可能であることがわかった。

終りに、本研究に関し有益なご助言とごべんたつを頂いた東京芝浦電気(株)重電技術研究所 山本所長、村野副所長、山口所長附に感謝の意を表する。

(昭和 54 年 6 月 19 日受付, 同 55 年 4 月 17 日再受付)

文 献

- (1) 嶋田, 他: 電学論A, 99, 49 (昭 54-2)
- (2) A. N. Green Wood, et al.: CONF 721111, USAEC. 309 (1974)
- (3) 嶋田, 他: 昭 52 電気学会全大 No. 99, 129
- (4) 金子, 他: 昭 52 電気学会全大 No. 1410, 1902
- (5) 嶋田・柳父: 電学誌, 98, 545 (昭 53-6)
- (6) 笹倉, 他: 東芝レビュー, 30, 12, 888 (昭 50-12)
- (7) 嶋田, 他: 昭 52 電気学会全大 No. 98, 128
- (8) S. Yanabu, et al.: "Third International Symp. on Switching Arc Phenomena", 222 (1977-9)
- (9) M. P. Recce: *Proc. Inst. Elect. Engrs.* 110, 793(1963-4)
- (10) J. D. Cobine, et al.: *J. Appl. Phys.* 42, 12, 4865 (1971)