UDC 621.316.57.024.1: 621.039.6

論文

54-B93

核融合実験装置用直流しゃ断器の解析と 実証試験 [(JT-60) への適用]

正員	嶋田隆一	(日本原子力研)
正員	谷啓二	(日本原子力研)
非会員	岸本浩	(日本原子力研)
非会員	田村早苗	(日本原子力研)
正員	柳父悟	(東芝)
正員	玉川徹	(東芝)
正員	高橋宣之	(東芝)
正員	金井康晴	(東芝)

1. ま え が き

最近の大形トカマク核融合装置ではプラズマの点弧と加熱を行なう為に、インダクタンスに蓄えられたエネルギーを用いるようになった⁽¹⁾。即ち直流電源から変流器コイルに電流を流し、コイルにエネルギーを蓄え、この電流を急速にしゃ断することによってコイルの端子間に高電圧を発生させ、コイルと磁氣的に結合したプラズマを点弧するとともにプラズマにエネルギーを注入し加熱する。また、この装置は稼働効率を上げる目的から極めて多ひん度で運転される。このため長寿命、多ひん度の直流しゃ断器が必要となった。例えば日本原子力研究所で開発が進んでいる臨界プラズマ試験装置 JT-60 の場合では、92 kA の直流を約 10 分間隔でしゃ断しなければならない⁽¹⁾。

Dokopoulos 氏ら⁽²⁾は空気しゃ断器を使用して 24-73 kA の直流を 300 回しゃ断した。しかし寿命およびしゃ断電流の観点からみて、上記のしゃ断器はほぼ限

界に近く、更に高性能なしゃ断器の開発が要求されている。一般のしゃ断器ではしゃ断電流を定格値より下げて使用すると寿命が増加することはよく知られている。従って多ひん度、大電流のしゃ断を実現するためには既存のしゃ断器を並列に接続して運転できればよい。しかし現在広く使用されている空気しゃ断器や SF₆ ガスしゃ断器のような高気圧アークを利用したしゃ断器では、小電流領域でのアーク電圧がしゃ断する電流に対して負の特性となるため並列運転はできない。これに対して真空しゃ断器のアーク電圧は正の特性となるため並列運転に適していると考えられる。しかし一般の真空しゃ断器ではアーク電圧が大電流領域でスパイク状に振動するため並列運転に適さず、寿命も短いと想像される。

筆者らは長年真空アークに対し平行に磁界を印加する方法について研究を行ない、アークを安定化することに成功した。この結果アーク放電中に電極間で消費されるエネルギーも低くなり、そのため寿命およびしゃ断電流を飛躍的に増加させることが可能となった⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。そこでこのしゃ断器を並列に接続して、JT-60 用の直流しゃ断器の開発を行ない、44-130 kA の責務をしゃ断することに成功した。またその寿命も数千回を保証できるに至った。本論文ではこの直流しゃ断器の開発における問題のうちで、並列分流に関する諸問題と実規模直流しゃ断器の製作およびそのしゃ断試験結果について報告する。

2. 変流器電源回路と直流しゃ断器

〈2・1〉 動作原理 第 1 図に変流器電源回路の原

Analysis and Full Scale Test of DC Circuit Breaker for Takamak Device JT-60. By Ryuichi Shimada, Member, Keiji Tani, Member, Hiroshi Kishimoto, Non member, Sanae Tamura, Non member, (Japan Atomic Energy Research Institute) Satoru Yanabu, Member Tohru Tamagawa, Member, Nobuyuki Takahashi, Member & Yasuharu Kanai, Member (Tokyo Shibaura Electric Co., Ltd. Heavy Apparatus Division)

嶋田隆一: 正員, 日本原子力研究所

谷 啓二: 正員, 日本原子力研究所

岸本 浩: 日本原子力研究所

田村早苗: 日本原子力研究所

柳父 悟: 正員, 東京芝浦電気(株)重電事業本部

玉川 徹: 正員, 東京芝浦電気(株)重電事業本部

高橋宣之: 正員, 東京芝浦電気(株)重電事業本部

金井康晴: 正員, 東京芝浦電気(株)重電事業本部

理図を示す。直流しゃ断器に課せられる電流、電圧波形を記号化して第2図および第1表に示す。変流器電源回路の動作は以下のとおりである。

直流電源 (PS) よりしゃ断部 (S_p) を通して変流器コイル (OH) に電流を立上げる。変流器コイルの電流が規定の値 (I_0) に達した時点でしゃ断部を開極させる。しゃ断部の電極間が十分な距離に達した時点でギャップ (g_c) を動作させる。しゃ断部にはあらかじめ充電してあるコンデンサ (転流コンデンサ C_c) から変流器コイルの電流とは逆方向の高周波電流 (転流電

Fig. 1. OH coil power supply circuit.

Fig. 2. Voltage and current wave-forms applied to DC circuit breaker.

第 1 表 電圧電流波形上の記号

Table 1. Symbols used on voltage and current wave-forms.

記 号	内 容	記 号	内 容
$[di/dt]_m$	基本電流傾斜率	V_R	再起電圧
$[di/dt]_z$	電流零点近傍電流傾斜率	V_{Rmax}	再起電圧最大値
$[dv/dt]_z$	電流零点近傍電圧上昇率	V_{CR}	逆極性の再起電圧
$[dv/dt]_m$	再起電圧上昇率	V_{CRmax}	逆極性の再起電圧最大値

流 I_c が重畳される。しゃ断部の電流には強制的に零点ができ、直流電流はしゃ断される。しゃ断部には直列に可飽和リアクトル (L_s) が接続されており、電流零点近傍の電流傾斜率を緩和し、しゃ断を容易にする。変流器コイルには抵抗が並列に接続されており、しゃ断電流 (I_0) と抵抗の値 (R) の積でほぼ決まる電圧が変流器コイル端子間に発生する。プラズマは変流器コイルと磁氣的に結合しており、上記の変流器コイル端子電圧によりプラズマが点弧し電流が流れ始める。一方、しゃ断部には電流をしゃ断した直後、転流コンデンサに残った初期充電電圧の一部が、しゃ断電流とは逆極性の再起電圧 (V_{CR}) として印加される。この残留電圧が変流器コイルおよび抵抗を通して放電した後、しゃ断部には前記した変流器コイル端子電圧が再起電圧 (V_R) として印加される。プラズマ点弧のための電圧は JT-60 の場合変流器コイル端子電圧として最大 25 kV である。

〈2・2〉 真空しゃ断器用バルブ 真空アークと平行に磁界（以下縦磁界という）を印加したときのアークの様態については、既に発表した報告を参照願いたい⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。また後記する 試作直流しゃ断器に用いた真空バルブについても別途報告する⁽⁶⁾。従って、ここではアークの安定を示すアーク電圧波形を第3図に示し、真空バルブの基本的な特性のみを述べる。

①第3図に示すごとく直流 23 kA のアーク電流の場合、そのアーク電圧は開極初期 25 V で電極間の距離が開くとともに増加し、10 ms 後約 45 V になる。②交流で使用するときは 40 kV-63 kA(実効値)の責務をしゃ断できる。③第2図の $[dv/dt]_z$ を 300 V/μs とすると、しゃ断回数が少ないときでは $[di/dt]_z$ は 100 A/μs までしゃ断できる。④ 23 kA を 1 万回しゃ断した後ではこの値が 60 A/μs に低下する。⑤再点弧の特性は再起電圧 (V_R) が 12.5 kV の場合 0.05% の発生率であるが、2 本を直列に接続すれば 25 kV を印加しても再点弧はまったく発生しない⁽⁶⁾。

Fig. 3. Arc voltage of axial magnetic field type electrodes.

以上のような真空バルブを交流三相用しゃ断器に2本取付け、このしゃ断器4台を円周上に配置した。そしてこれらしゃ断器を2直列-4並列に接続することによりJT-60用25 kV-92 kAの直流しゃ断器のしゃ断部とした。

3. 並列分流

〈3・1〉 並列分流の問題点 直流しゃ断器を複数に並列接続したしゃ断部で構成するとき、その問題点はしゃ断の過程を四つの区分に分類して把握することができる。①電流立上がりからしゃ断器開極前まで②しゃ断器開極から転流電流重畳前まで③転流電流重畳から電流しゃ断まで④電流しゃ断から再起電圧印加まで。①の過程は電流立上がり時間からみて各分岐の分担電流は各分岐の直流抵抗値で決まり、この抵抗値を一致させておけば特に問題はない。また④の過程は単一のしゃ断器の場合とまったく同一で並列接続であるがための問題はない。②および③の過程では真空バルブのアーク電圧が一定であれば、アーク電圧自体による各分岐の分担電流の不均衡は発生しない。しかし各分岐のしゃ断器には開極時間の不ぞろいがあり、各分岐ではアーク電圧の発生する時間的なずれによって分担電流の不均衡が発生する。そこで並列接続に対する問題点を明確にするためデジタルシミュレーションと実験を行なって比較検討した。

〈3・2〉 デジタルシミュレーション 計算に用いた回路を第4図に示す。変流器電源回路は変流器コイルのような大きなインダクタンスを含んでいるため、計算では電源は定電流源を仮定した。真空しゃ断器のアーク電圧は第2章で述べた真空バルブの特性からしゃ断電流値による変動はほとんどないので、開極初期25 V、10 ms経過後45 Vの2点を直線を結んで仮定した。可飽和リアクトルの特性は実際のものでは

Fig. 4. Calculation circuit.

第2表 計算に用いた各分岐の諸定数

Table 2. Circuit constants used for calculation.

項目	定数値	項目	定数値
I_0	92 kA	C_c	1,200 μ F
R_1	2.85 m Ω	L_{of}	30 μ H
$R_2 \sim R_4$	3.0 m Ω	I_{s1}	1.2 kA
L_{s11}	84 μ H	$I_{s2} \sim I_{s4}$	1.0 kA
$L_{s12} \sim L_{s14}$	80 μ H	開極初期のアーク電圧	25 V
L_{s21}	152 μ H	10 ms 経過後の "	45 V
$L_{s22} \sim L_{s24}$	160 μ H	V_{co}	25 kV

※ 但し $I_{s1} \sim I_{s4}$ は、可飽和リアクトルの値が変化する電流値

第5図 開極不ぞろいによって発生した分担電流の不均衡

Fig. 5. Sharing current unbalance caused by opening time delay.

複雑な特性となるが、ここでは便宜上、鉄心の飽和時および非飽和時の二つのインダクタンスで代表させた。計算に用いた諸定数を第2表に示すが、できるだけか酷条件を想定している。すなわち、各分岐中で1分岐のみが他と異なる条件下にある例である。第5図に電流立上がりから転流電流重畳前までの過程の計算結果を示す。図の初期部分 t_1 までの各分担電流は、第2表に示した各分岐の直流抵抗値によって決定されており、やはりか酷条件を想定している。図中 t_1 は同じ条件下にある $i_2 \sim i_4$ の分岐のしゃ断器が開極する時刻を示す。また t_1' は他と異なる条件下にある i_1 の分岐が遅れて開極する時刻を示し、第5図の例ではこの遅れの時間をパラメータとして示した。これらの結果は図でも示されるごとく、 $i_2 \sim i_4$ の分岐が開極すると、これら分岐にはアーク電圧が発生し、各分岐の端子電圧が同じであるため i_1 の分担電流は増加する。この状態は i_1 の分岐が開極するまで増加し続ける。時刻 t_1' で全ての分岐が開極するが一たん生じた分担電流の不均衡は10 ms経過後でもほとんど改善されていない。

第6図には転流電流重畳開始から電流をしゃ断する

(第5図に続く電流の分担)

第6図 転流電流重畳後の分担電流の不平衡
Fig. 6. Sharing current unbalance after a commutation. (Current sharing continued from Fig. 5)

までの過程における計算結果を示す。図中 t_2 は転流電流を重畳した時刻を示し、これ以前の分担電流は第5図の i_1 の分岐の開極が1 ms 遅れた場合の t_1 以後10 ms 経過後の状態を採用した。この過程では図で示すように分担電流の不平衡な状態がそのまま継続して電流零点に達している。これは転流コンデンサの初期充電電圧 (V_{co}) が高いため、転流電流は回路の全インダクタンスと転流コンデンサのキャパシタンスによって決まり、アーク電圧や抵抗値にはほとんど影響されないためである。すなわち、この過程では電流立上げ時やシャ断器開極時の分流の状態を大幅に変化させる要因はほとんど存在せず各分岐の可飽和リアクトルの特性の差によってわずかに変化するのみである。

〈3.3〉 実験 デジタルシミュレーションによって並列分流における諸問題を検討したが、この結果の妥当性を調べるため実験を行なった。

実験回路を第7図に示す。シャ断器は二相の真空バルブを並列に接続して用いた。電源として約10 Hzで運転した短絡発電機を用い、投入器の投入位相を制御することにより半波約80 msの電流をシャ断器に流した。シャ断器のアーク時間約10 msに比べ、この電流のピーク近傍は十分直流とみなせる。二相シャ断器の開極時間の不ぞろいは各相の真空バルブを操作しているリンク部を調整して得た。第3表に転流電流を重畳しない条件での実験結果を計算の結果と対比して示した。また第8図に実験のオシログラムの一例を示す。

第7図 分流試験に用いた回路

Fig. 7. A circuit for current sharing test.

第8図
分流試験時のオシログラム例

Fig. 8. Oscillograms of current sharing tests.

第3表 直流分流過程の計算と実測の比較

Table 3. Comparison of DC current sharings between computed values and tested results.

L_{s11}/L_{s12} (μH)	$R_2(m\Omega)/R_1(m\Omega)$		開極不ぞろい時間 $t_1'-t_1$ (ms)	分担電流の比 (i_2/i_1)	
	計 算	実 験		時 刻 t_1	時 刻 t_1'
				計算/実測	計算/実測
20/20	2.42/2.42	1/1	0.5	1/1.04	0.98/1.03
20/20	2.42/2.42	1/1	6.2	1/1.05	0.8/0.76
20/20	1.42/3.42	$\approx 0/2$	3.5	2.05/2.10	1.60/1.70
10/30	0.86/2.48	$\approx 0/0.5$	0.5	2.9/2.7	2.75/2.60
10/30	0.86/2.48	$\approx 0/2$	0.5	4.3/4.3	3.99/4.00
10/30	0.86/2.48	$\approx 0/2$	3.5	4.3/4.4	2.98/2.9

す。実験では流した電流が10 Hzであるために、シャ断器開極前および両分岐開極後の状態は全くの直流を流した場合と異なり、抵抗とインダクタンスの値によって決まっている。しかし一方の分岐が開極してから、他方が開極するまでの両分岐の分担電流の不平衡が時間とともに進行する様子は計算の結果とよく一致した。第3表のごとく転流電流重畳前までの過程における両分岐の分担電流の比率は開極時間の不ぞろいや抵抗およびインダクタンスの値の違いによる比較でも計算と実験の結果がよく一致している。

一方、転流電流の重畳から電流シャ断までの過程は

第3章でも述べたごとく大幅な変化はなく電流零点に達しているため本報告では特に詳細には述べず、また実測データも特に示さなかった。但し可飽リアクトルの特性は実際のものでは計算で仮定したほど単純ではないが、第2図で示した $(di/dt)_m$ と $(di/dt)_z$ の各値および転流電流重畳から電流零点までの時間は計算と実測がよく一致したことを述べておく。

以上の結果デジタルシミュレーションによる並列分流の検討の妥当性を確認した。

4. 試作直流しゃ断器と実スケールしゃ断試験

〈4.1〉 試作しゃ断器と試験法 第3章までの検討結果を基礎にして JT-60 用の直流しゃ断器を試作した。直流しゃ断器の回路構成を第9図に示す。

本直流しゃ断器のように世界でも類をみない大電流をしゃ断すること、並列しゃ断を初めて採用することおよびアーク安定のための磁界が外部磁界によって乱される可能性があることなどを考えると、実スケールのしゃ断試験を実施しその性能を検討することが是非必要である。しかし JT-60 のように大きなイン

C_{c1} : 転流コンデンサ 710 μ F
 C_{c2} : 転流コンデンサ 490 μ F
 $R_1 \sim R_4$: 分流用抵抗 2.6 m Ω
 $L_{s1} \sim L_{s4}$: 可飽リアクトル $\begin{cases} L_{s11} \sim L_{s14} & 80 \mu\text{H} \\ L_{s21} \sim L_{s24} & 120 \mu\text{H} \end{cases}$
 $V_1 \sim V_8$: 真空しゃ断器
 g_{c1}, g_{c2} : 転流用回路始動ギャップ
 $R_{11} \sim R_{14}$: 分圧用抵抗 500 k Ω
 $R_{21} \sim R_{24}$: 回復電圧調整用抵抗 80~320 Ω まで可変
 $C_{v1} \sim C_{v4}$: 回復電圧調整用コンデンサ 2 μ F

第9図 試作直流しゃ断器の回路構成

Fig. 9. Circuit diagram of prototype DC circuit breaker.

第10図
等価試験
回路

C_b : バイパスコンデンサ, C_v : 電圧源コンデンサ
 L_p : 短絡発電機および短絡変圧器を含む電流源側の全インダクタンス
 R_g : L_p のエネルギー放電用抵抗, P.G.: g, g_r スタータ
 g_o : R_g 接続用ギャップ, g_v : C_v 接続用ギャップ
 C_d : 分圧器, R_v : 電圧源電流制限抵抗

Fig. 10. Synthetic test circuit.

ダクタンスに大電流の直流を流すような設備は実際の JT-60 実機の電源以外には存在しない。また例えば交流の大電流を流すことができる電源があっても本試験のためには大規模な整流装置が必要となる。従って、実スケールのしゃ断試験は、当然のことながら等価試験法によって実施せざるを得ない。第10図にこのために考えた等価試験法の一例を示す。図に示すように第9図に示した直流しゃ断器しゃ断の部 (S_d) と直列に補助しゃ断器 (S_a) が接続されておりこれらが転流コンデンサとループを形成している。回路の動作原理は以下のようなものである。

必要な電流はほぼ 10 Hz で運転する短絡発電機 (Ge) から変圧器 (Tr) を通して供給する。転流電流を重畳して電流をしゃ断する。この動作により転流コンデンサの残留電圧によって発生するしゃ断電流とは逆極性の再起電圧 (V_{cr}) とインダクタンス (L_p) に残留するエネルギーによる正極性の再起電圧 (V_R) をバイパスコンデンサ (C_b) を通してしゃ断部に回復電圧の初期部として印加する。この電圧は分圧器 (C_d) を介してスタータ (PG) に動作指令を与え、スタータはギャップ (g_r) と (g_v) を動作させる。これにより抵抗 (R_v) が回路に接続され、過電圧の発生を防ぐとともに、電圧源コンデンサ (C_v) が接続され、しゃ断部には一定の電圧が印加される。

この試験の利点は回路の諸定数を任意に選ぶことができ、これらを変化することにより実機に対し十分等価性のある試験ができる。また、電流零点近傍の電流傾斜率、再起電圧の値とその上昇率および電圧印加時間を比較的自由に選ぶことができる。更に場合によっては実機より苛酷な条件の試験も可能である。また、本試験では回復電圧の初期部はバイパスコンデンサを通してしゃ断部に印加されるので、電流しゃ断直後の現象に関して厳密な意味で等価とはいえない。しか

第 4 表 試験条件としゃ断回数

Table 4. Test condition and number of interruptions.

試験条件	しゃ断回数
全しゃ断回数	79 回
80 kA—25, 44 kV	32 回
102 kA— 44 kV	1 回
116 kA— 44 kV	1 回
130 kA— 44 kV	1 回

第 5 表 試験結果と実機設計値上の対比

Table 5. Comparison between test results and design values.

特性項目	JT-60における設計値	しゃ断試験結果	
		80 kA— 44 kV 時	130 kA— 44 kV 時
$I_a(I_a')$ (kA)	92	80	130
アーク時間 (ms)	8~10	8~10	8.5
$[di/dt]_m$ (A/ μ s)	450	600	470
$[di/dt]_s$ (A/ μ s)	120	180	180
$[dv/dt]_s$ (V/ μ s)	300	1,000	800
$[dv/dt]_m$ (V/ μ s)	25	340	340
V_{CRmax} (kV)	10	11	9
V_{Rmax} (kV)	25	44	44

し電圧源コンデンサを切離し、補助しゃ断器を短絡して試験を実施すれば正規の値の回復電圧は印加されないが電流零点近傍の現象のみは実機と等価にできる。

〈4.2〉しゃ断試験結果 実施したしゃ断試験のしゃ断責務としゃ断回数をまとめて第4表に示す。しゃ断試験は 25 kV-80 kA の責務から始め、最終的に 44 kV-130 kA の責務まで行なった。但し 44 kV-130 kA の責務は試験設備上の限界があり、試作した直流しゃ断器のしゃ断能力の限界ではない。44 kV-130 kA の責務におけるしゃ断時のオシログラムを第11図に示す。この条件ではしゃ断電流を増加させるため電流

第 11 図 44 kV-130 kA しゃ断時のオシログラム

Fig. 11. Oscillogram at 44 kV-130 kA DC current interruption.

源の短絡発電機を 16 Hz で運転している。第3章で述べた並列分流で問題となる開極時間の不ぞろいは生じていない。各分岐での分担電流の不均衡度は $\pm 2.5\%$ 以下である。第1表で示したしゃ断器に課せられた電圧、電流波形上の諸定数を JT-60 実機における設計値と比較して第5表に示した。いずれのしゃ断責務上の定数もしゃ断試験時のほうが実機の場合より上廻っている。また再起電圧に関しては実機では減衰する波形であるが、本試験では一定の電圧を印加した。このような苛酷な電圧に対しても再点弧はまったく発生しなかった。

本試験ではしゃ断責務 44-80 kA の条件で4分岐中1分岐のみが 2.5 ms 遅れて開極する試験も行なった。しかし、何んら問題なくしゃ断することに成功した。

5. 検 討

〈5.1〉スパイラル電極と縦磁界電極との比較

第3章で縦磁界を加えた方式の真空しゃ断器による分流を検討した。ここで並列分流に対するアーク電圧の影響をもう少し詳細に検討してみる。今検討を簡単にするために第4図に示した回路で2並列の場合を例に考えてみる。しゃ断器が開極しアークが発生したとき、 i_1 および i_2 の電流は(1)式で示される。

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= I_{10} - \frac{V_{a1} - V_{a2}}{2R_a} (1 - e^{-(R_a/L_a)t}) \\ i_2 &= I_{20} - \frac{V_{a2} - V_{a1}}{2R_a} (1 - e^{-(R_a/L_a)t}) \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

I_{10}, I_{20} は開極前の i_1, i_2 の初期電流値 R_a は R_1, R_2 , L_a は L_{a1}, L_{a2} を表わす。

(1)式において二つの分岐に開極時間の不ぞろいがあった場合、アーク電圧が発生した側の分岐の電流の減少分は(2)式で与えられる。

$$(V_a/2R_a)(1 - e^{-(R_a/L_a)t_a}) \dots \dots \dots (2)$$

但し、 $t_a = t_1' - t_1$

(2)式において各分岐の直流抵抗 R_a は、電流立上げからしゃ断開極までの過程における各分担電流の平衡を保つために必要である。しかし特別の抵抗を接続しなくても、各分岐の導体の抵抗値を合わせたうえで、リアクトルの抵抗値を合わせれば直流抵抗 (R_a) はほぼ一致させることができる。 R_a は通常数百 $\mu\Omega$ 程度である。真空バルブの電極間の接触抵抗は 20~30 $\mu\Omega$ であり、この接触抵抗のばらつきによって分担電流に不平衡が起ることはない。開極時間の不ぞろいは数 ms 以下であるから $R_a \cdot t_a / L_a \ll 1$ とみなせば(2)式の分担電流の減少分は簡略化でき $V_a \cdot t_a / 2L_a$ で示すことができる。いま $V_a \cdot t_a / 2L_a$ を一定と考えれば、こ

のアーク電圧とインダクタンスと開極の不ぞろいの時間との関係から以下のことが結論できる。①かりにアーク電圧を $1/2$ にできれば、各分岐に接続するインダクタンスは $1/2$ の値ですむ。②アーク電圧を $1/2$ にできるとき、インダクタンスを同一とすれば、許容される開極の不ぞろいの時間は 2 倍となる。

一方しゃ断部に零電流零点を作る転流電流 I_c は転流コンデンサの容量を C_c 、その初期充電電圧を V_{co} 、転流回路の全インダクタンスを L_T とすれば(3)式で表わすことができる。

$$I_c = (V_{co} - V_a) \sqrt{\frac{C_c}{L_T}} \sin \frac{1}{\sqrt{L_T C_T}} t \dots\dots (3)$$

この式において I_c の大きさは、しゃ断する電流に対し一義的に決る。また V_{co} は直流しゃ断器を使用する変流器回路の最高電圧できまるため、同じく一定の値と仮定できる。このことより(3)式から、インダクタンスを $1/2$ にできれば、転流コンデンサの容量も $1/2$ にできると判る。従って、アーク電圧を低く抑えれば、直流しゃ断器を設計するうえで非常に経済的である。ここで一般に使用されているいわゆるスパイラル形の電極を用いた真空バルブによる並列分流を検討してみる。スパイラル電極でのアーク電圧は、非常に不安定でスパイク状に変動することが良く知られている。第12図に直流 28 kA をしゃ断したときのアーク電圧波形を示す。このアーク電圧 (V_{as}) はその特性から三つの要素に分けて(4)式のごとく表わすことができる⁽⁷⁾。

$$V_{as} = E_{a0} + R_0 I + E_{af} \dots\dots\dots (4)$$

E_{a0} はアーク電圧中の一定の定数成分で、電極材料の特性できまる。 $R_0 I$ はアーク電流に比例する成分でアークのコラムの電圧降下分と考えられる。 E_{af} はスパイク状に変動する成分で、電極の溶融などによって発生すると考えられる。(4)式における電圧を縦磁界電極におけるアーク電圧と比較してみる。第3図に示した縦磁界電極によるアーク電圧から $R_0 I$ は流した電流にわずかに比例し、約 1 V/kA である。 E_{af} はほ

第12図
スパイラル電極によるアーク電圧

Fig. 12. Arc voltage of spiral electrodes.

第13図 縦磁界電極とスパイラル電極の分流不平衡

Fig. 13. Sharing current unbalance using axial magnetic field type electrodes or spiral type electrodes.

とんど存在しない。これに対し第12図のスパイラル電極のアーク電圧は、 $R_0 I$ が約 4 V/kA であり、 E_{af} は最大で 100 V にも達する変動電圧となっている。前記したアーク電圧による分担電流の減少分 $V_a \cdot t_a / 2 L_a$ の関係から、このスパイラル電極のように高いアーク電圧でしかも極めて不安定な場合は縦磁界電極に比べ極めて不利であることは明らかである。参考として2並列の計算回路による両電極の分流状態の比較を第13図に示す。スパイラル電極におけるスパイク電圧は変動幅 0.5 ms 、変動電圧 50 V として示した。この結果ではスパイラル電極による分流はもはや並列しゃ断を行なう状態にないことを示している。

〈5・2〉電流平衡作用について 第3章で一たん発生した分担電流の不均衡な状態は、そのまま電流の零点まで継続されることがわかった。しかし転流電流が重畳した後に、各分岐に接続した可飽和リアクトルの効果として非常に興味深い現象が起きている。第6図の計算結果において転流電流が重畳されると、分担電流の少ない分岐はさきに可飽和リアクトルのインダクタンス変動点に達し、この分岐は急激に高インピーダンス回路となる。この結果インダクタンス変化点に達していない他の分岐では転流電流の分担電流が増加し、電流変化率 $[di/dt]_m$ が増して、インダクタンス変化点に到達する時間が早められる。このような作用は各分岐のインダクタンス変化点の値が異り、このために転流電流の分担が異なる場合でも、また、一方の分岐が先にしゃ断した場合でも同様に起る(第6図A部)。このような電流平衡作用があることは、しゃ断器を並列にして回路をしゃ断しようとする場合極めて都合がよい。すなわち、仮りに不平衡な状態が発生し

てもこれを制御して、強制的に各分岐に電流零点を作りしや断動作を成功に導びく結果となる。但しこの効果により大幅な分担電流の改善を望むことはできず、基本的には開極時間の不ぞろいを抑えなければならないことに変わりはない。

〈5・3〉試験の等価性について 一般に行なわれる交流しや断器の等価試験では、この試験が実機での責務と等価である条件として以下の3点をあげている。

①アーク期間中に供給する電流にひずみが起らないこと。②電流源と電圧源とを接続する電流重畳の期間では本来の電流波形を乱さないこと。③回復電圧の期間では電流のしや断前から、電圧が印加される過程までが間断なく移行すること。

第10図での等価試験回路では、電流源として短絡発電機を用いており、供給した電圧は補助しや断器も含めた全アーク電圧の10倍以上である。従ってアーク電圧が供給した電流に影響することはない。電流源と電圧源を重畳させる期間では、幸い本直流しや断器が転流電流を重畳させ電流をしや断するとともに、転流コンデンサの残留電圧が、しや断電流とは逆極性の回復電圧として印加するため、この期間での等価性はまったく実機と同一にすることができる。ここで留意したいのは、補助しや断器と直流しや断器のしや断部が2点を形成してしや断したように思われるが、しや断部が処理した電流は実機とまったく同一であり、電流しや断後の電圧がしや断部のみに印加すれば、しや断部の責務は同等であるといえる。本試験では補助しや断器はしや断部と同時に電流回路を切りはなし、転流コンデンサの残留電圧は補助しや断器と並列するバイパスコンデンサを通してしや断部に印加される。またこれと同時に電流源側の全インダクタンス（約2mH）に蓄えられたエネルギーは抵抗を通して放電するが、この抵抗の端子電圧はちょうどJT-60の変流器コイル端子電圧と同意義の回復電圧としてバイパスコンデンサを通してしや断部に印加する。但し電流源のインダクタンスはJT-60の変流器コイルに比べ小さいため実機より早く減衰してしまう。このため本試験では電圧源コンデンサからこの電圧に重ねるように一定の電圧を印加している。以上のように本試験では電流をしや断した後の再起電圧はすべてしや断部のみに印加するようになっている。次にしや断部に接続されたインピーダンスについて検討してみる。

第9図に示すように試作した直流しや断器には再起電圧調整用のコンデンサと抵抗がしや断部と並列に接続しているが、この値は合計すると $0.5\mu\text{F}$ — $20\sim 80\Omega$ である。これに対してバイパスコンデンサの容量は

$27\mu\text{F}$ であり、再起電圧調整用コンデンサに比べ十分に大きな容量である。従って、バイパスコンデンサや電圧源コンデンサの容量が小さいために、しや断部の責務が軽減するようなことはまったくない。またバイパスコンデンサが等価性に与える影響をみるため、補助しや断器を短絡し電圧源を切り離して試験を行なった。むろん何んらの問題もなくしや断しており、バイパスコンデンサの存在が等価性に影響しないことが確かめられた。

以上のように本試験ではしや断部の開極から電流のしや断までのアーク期間中、実機に等しい電流を供給でき、しや断過程が進行するにつれ、電流零点につづいて再起電圧が直ちに印加され、これら再起電圧が実機を正しく再現している。

6. ま と め

この研究で明らかになったことは次の点である。①真空しや断器を並列に用いて直流大電流をしや断することは可能である。しかし経済性を考慮した場合一般に使用されているいわゆるスパイラル形の電極を用いたものは並列運転に適せず、軸方向に磁界を加えた縦磁界方式の真空しや断器が理想的である。②不成功の鍵はここ並列分流にある。このためには並列を構成する各分岐の開極時間の不ぞろいを極力小さく抑えなければならない。③可飽和リアクトルを用いることにより分流の不平衡を是正する分流平衡作用を期待することができる。④本研究で用いた試験法は等価性が極めて高く、これらの大電流直流しや断器の試験法として有効である。⑤試作した直流しや断器では44—130kAの直流をしや断することが可能である。

本研究は名古屋大学鬼頭教授の御指導、日本原子力研究所 森核融合統括部長、吉川 JT-60 第一開発室長および東京芝浦電気重電技術研究所 山本所長ならびに村野副所長の御指導によって完成したものであり、ここに謝意を表したい。

(昭和53年3月24日受付、同54年3月9日再受付)

文 献

- (1) 嶋田, 他: 日本原子力研究所内部報告 JAERI-M7294 (1976)
- (2) P. Dokopoulos, et al.: *Sonderdruck aus Elektrotechnische zeitschrift etc.* H 8, 499-506 (1976)
- (3) S. Yanabu, et al.: Third International Symposium on Switching Arc Phenomena: (Sept. Poland) 222 (1977)
- (4) 相馬, 他: 昭 53 電気学会大全 No. 1279
- (5) H. Okumura, et al.: International Conference on Developments in Distribution Switchgear IEE 20 Nov. (1978)
- (6) 池田, 他: 電気学会論文誌 (554・7・B 分冊 425)
- (7) M. P. Peece: *Proc. Inst. Elect. Engrs* 110, No. 4, 793 (1963)