UDC 621.316.57.024.1.062.1:621.3.064.3.
621.3.014.31

論 文

54-B 72

直流電流の並列しゃ断時における アーク電流の分流について

正 員 鬼 頭 幸 生 (名 大)

正 員 金 子 英 治 (名 大)

准 員 宮 前 清 文 (名 大)

正 員 嶋 田 隆 一 (日本原子力研)

1. ま え が き

将来のエネルギー源として開発の急がれている技術として核融合がある。核融合炉として実用化されるまでには多くの問題があるが、トカマク形にあっては、プラズマループの起動時の加熱がその一つである。このために、従来コンデンサの放電電流を利用する方式が採用されていたが、加熱に必要なエネルギーが 10 MJ を越えるこの方式は、コンデンサ容量が巨大になりすぎて不適当とされている。そこでプラズマループと電磁的に結合している一次側変流器コイルの電源を急激にしゃ断することによって、二次側プラズマループに電磁誘導作用で大きなエネルギーを移すシステム (Inductive Energy Storage System, 略して IES システム) が有望とされている。従来のコンデンサ法が回路を「閉じる」のに対し、IES システムでは回路を「開く」ところに特徴がある。

現在、原子力研究所で計画中の JT-60 臨界プラズマ試験装置においても、本方式が採用されることになっている。ここにおけるしゃ断器には、92kA, 25kV, 10分間隔連続 5 万回の繰返ししゃ断能力が要求されている。

JT-60 における特徴は、しゃ断電流が現在の電力用しゃ断器において、最高レベルとみなされる 60 kA に比べて約 2 倍であることと、しゃ断ひん度が極めて

高いことである。このような大電流のしゃ断に対してはしゃ断器を並列に接続して、一点あたりの電流に対する責務を軽減することが考えられる。最も単純に考えて電気機器が並列に運転できるためには、その端子電圧、電流の特性が正特性でなければならない。現用のしゃ断器の中で、真空しゃ断器に用いられるバルブは、アーク電圧-電流特性が弱いながらも正特性をもち、基本的に好ましい特性を具備している。このほか真空バルブはアーク電圧が低い、電流しゃ断時の絶縁回復特性が速い、安定した絶縁耐力をもつ、しゃ断時に高温ガスを生じない、電極輝点が分散移動してアークによる接点損傷が小さい、可動距離が小さいなどの特徴をもつ。

このような特殊な責務を実現するために、縦磁界を加えた真空バルブ⁽¹⁾ 4 個を並列接続し、それを 2 組直列に接続した真空しゃ断器が試作され、総合的しゃ断試験 (合成しゃ断試験) において、最高 130 kA, 再起電圧 44 kV, 再起電圧上昇率 300 V/μs におけるしゃ断に成功した⁽²⁾。

一般に開閉保護装置を並列動作させて効果があがるためには、並列接続された複数の電極が開離した後、アークを通して各しゃ断点に電流が均一に分流し続けるかどうか第一義的な問題となる。また、現実には、各しゃ断器の機械的な不ぞろい開極、あるいはしゃ断点に生ずるアークの特性には変動分を必ず伴うので、これが電流の分流に及ぼす影響も考えておかなければならない。

本論文は、これらの点について真空バルブを用いることを前提として、直流しゃ断の場合について回路論的な立場から検討し、そのような原因が基本的には分流を損わないことを述べたものである。

まず、配電用小形真空しゃ断器を用いて小規模の並列しゃ断試験を行ない、不ぞろい開極などがあって

Current Sharing between Two Vacuum Circuit Breaker Units in Parallel Operation for Large Direct Current Interruption. By Yukio Kito, Member, Eiji Kaneko, Member, Kiyofumi Miyamae, Member (Department of Electrical Engineering, Nagoya University.) & Ryuichi Shimada, Member, (Japan Atomic Energy Research Institute.)

鬼頭幸生: 正員, 名古屋大学工学部電気工学教室

金子英治: 正員, 名古屋大学大学院工学研究科博士課程 (現在東京芝浦電気株式会社)

宮前清文: 准員, 名古屋大学大学院工学研究科博士課程

嶋田隆一: 正員, 日本原子力研究所東海研究所

も、各極に電流がほぼ均一に分流することを示した。また真空しゃ断器のアーク電圧はアーク電流に対してわずかな正特性をもつとはいえ、不規則な変動分があるので、それを組込んだ計算方法で電流の分担状況を求め、実験と比較し、ほぼ近い結果を得ることを確かめた。その後にJT-60、あるいは直流回路の短絡電流などに想定されるような、数万A程度の直流電流しゃ断時の分流状況について検討を行なう。

2. 小規模回路における並列しゃ断試験

〈2・1〉 試験回路 コンデンサバンク (730 μ F, 20 kV) を電源として、配電系統に用いられている普通の真空しゃ断器を用い、小規模並列しゃ断試験を行なった。真空しゃ断器は定格電流 600 A, 定格電圧 7.2 kV, 定格しゃ断電流 12.5 kA である。

試験回路を第1図に示す。並列のしゃ断点には真空しゃ断器の三相分のうち二相分のバルブを用いた。あらかじめ充電装置によってコンデンサバンクCを適当な電圧に充電しておき、これを投入器によってコイルLを通して放電させることによってしゃ断点へ電流を供給した。本試験においては、なるべくアーク期間を長くして、電流の並列分流状況をできるだけ長時間にわたって観測できるように、現有設備で発生し得る最低の周波数 27 Hz で試験を行なった。充電電圧は最高 20 kV であり、これによって第1半波の波高値として最大 2,400 A 程度の電流を得ることができる。

電極が閉じているときの分流を確実にし、しかも不ぞろいを含む開極後の分流の均衡を図るために、各しゃ断点に直列にリアクトルを接続した。

〈2・2〉 供試真空しゃ断器の特性

(1) 開極不ぞろい 本試験で使用した真空しゃ断器の操作は単一の機構で行なわれているが、各電極間に 0.2~1.2 ms の開極不ぞろいがある。この開極の不ぞろい時間はほぼ一定しており、三相の電極の中の開極順は変わらなかった。

(2) アーク電圧-電流特性 アーク電圧の測定

第1図 小規模並列しゃ断試験回路

Fig. 1. A small scaled parallel breaking test circuit, where two vacuum circuit breaker units are used.

第2図 供試真空バルブのアーク電圧-電流特性

Fig. 2. Arc voltage versus arc current characteristic curve in the adopted vacuum valves.

は分流試験に用いたと同様の回路で行なった。電流値を広い範囲にわたってとる必要があるので、電源用コンデンサの充電電圧や真空しゃ断器の開極位相を変えて繰返し測定を行なった。第2図に測定結果を示す。アーク電圧には不規則変動分があるので、一本の曲線で表わすことはできないので、採録したデータを打点で示した。この図から供試真空しゃ断器のアーク電圧は、アーク電流 1,200 A までの範囲において全体として緩やかな正特性をもつことがわかる。この解析ではこのアーク電圧特性を三つの成分からなるものとみなすことにした。まず測定点のばらつきの下限近くに図のように直線を描き、16 V の一定電圧成分および電流に比例する成分で、その傾きが約 3 m Ω の成分を想定する。このうに不規則に変動する電圧成分が重なっているとみなす。その振幅は最大約 2 V, オシログラムからその変動周期は平均 0.1 ms とした。

〈2・3〉 試験結果 実施した並列しゃ断試験例を第3図(a)に示す。

2個のしゃ断点の開極に不ぞろいがあるために、初

(a) 実験で得た電流波形

(b) 計算で得た電流波形

しゃ断電流 1バルブ当たり 600 A (波高値)
 $LS1 = LS2 = LS$ 8 μ H
 $RS1 = RS2 = RS$ 8 m Ω
 開極不ぞろい時間 8.77 ms
 0.47 ms

第3図 配電用真空しゃ断器による並列しゃ断(1)

Fig. 3. Current wave forms in both parallel operated vacuum valves in the small scaled test (1).

めに時刻 t_1 において片方の真空バルブ 1 が開極すると、電流はまだ閉じている真空バルブ 2 へ急速に移行し、真空バルブ 1 の電流は減少する。 t_2 において、真空バルブ 2 が開極するまでの間に両バルブに流れる電流の差は急速に大きくなる。説明上この期間 t_2-t_1 を「開極不ぞろい期間」と表わすこととする。真空バルブ 2 が開極すると広がった電流差は急速に収束を始める。このときの電流の変化は、アーク電圧が不規則に変動しているため、滑らかでないが、明らかに収束に向っている。開極不ぞろい期間が長いほど t_2 における電流の不均衡が大きくなり、収束して均衡するまでの時間は長くなる。直列インダクタンスの効果として L_s ($L_{s1}=L_{s2}=L_s$ とする) が大きいと、開極不ぞろい期間中における電流の不均衡が広がるのも緩やかで電流差も小さいが、その後の両真空バルブが開極した後における収束も遅い。このような例が第 4 図 (a) である。

以上のような試験結果から、かなりの開極の不ぞろいであっても、ごく普通の真空しゃ断による並列しゃ断が可能であることが示された。開極の不ぞろいによって、一時的に両極に流れる電流に不均衡が生じ、第 2 の真空バルブが開極するときに電流の差は最大に達する。この大きさは、しゃ断器に直列に入れたインダクタンス L_s によって抑制することができる。

〈2.4〉 小規模試験のシミュレーション計算 前項で述べた小規模しゃ断試験を、アーク電圧の不規則変動まで考慮したシミュレーションによって再現できるかどうかを検討した。そのシミュレーション結果と

第 4 図 配電用真空しゃ断器による並列しゃ断 (2)

Fig. 4. Current wave forms in both parallel operated vacuum valves in the small scaled test (2).

試験で得られた波形とが一致すれば、このシミュレーションをするに当たっての仮定および方法が妥当であるとみなすことができ、その手法を大規模 IES システムのしゃ断の解析に適用できる可能性がでてくる。

第 2 図に示すようにアーク電圧は、アーク電流に対して総体的に正特性をもっているが、一方の真空バルブのアーク電圧が高くなり、他方のそれが低くなる期間があれば、両バルブの電流の不均衡が大きくなるおそれがあるので、この点を解析の中へ考慮することとした。

(1) システムの方程式 第 1 図の回路について回路方程式を立てて整理すれば、

$$\left. \begin{aligned} \frac{dI_1}{dt} &= \frac{L_{s2}(V_c - E_{a1} - R_{s1}I_1)}{L L_{s1} + L L_{s2}} * \\ &\quad * \frac{-L(E_{a1} - E_{a2} - R_{s1}I_1 - R_{s2}I_2)}{+L_{s1}L_{s2}} \\ \frac{dI_2}{dt} &= \frac{L_{s1}(V_c - E_{a2} - R_{s2}I_2)}{L L_{s1} + L L_{s2}} * \\ &\quad * \frac{-L(E_{a2} - E_{a1} - R_{s2}I_2 - R_{s1}I_1)}{+L_{s1}L_{s2}} \\ \frac{dV_c}{dt} &= -\frac{I_1 + I_2}{C} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、添字 1, 2 は、それぞれ真空バルブ 1 および真空バルブ 2 を含む枝路を表わす。

$$\left. \begin{aligned} E_{a1} &= R_{a1}I_1 + E_{a01} + E_{af1} \\ E_{a2} &= R_{a2}I_2 + E_{a02} + E_{af2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

E_{a1}, E_{a2} は 2 個の真空バルブのアーク電圧で、右辺各項の内容については次の (2) で述べる。また $L, C, L_{s1}, L_{s2}, R_{s1}, R_{s2}$ については第 1 図、それらの大きさについては第 3 図および第 4 図を参照されたい。

(2) アーク電圧の模擬 各真空バルブ開極後のアーク期間における電流の並列分流状況には、真空バルブのアーク電圧特性が影響を与える。これをシミュレーションに導入するために次のように単純化することにした。

第 2 図の測定結果から、アーク電圧はアーク電流に比例する成分と、定数成分とに分けることができる。比例定数はアーク抵抗に相当するが、これを R_a 、定数成分を E_{a0} とすればアーク電圧 E_a は、

$$E_a = R_a I + E_{a0} \dots\dots\dots (3)$$

と表わすことができる。ここで、 I はアーク電流である。

アーク電圧には、このほかに不規則な周期で変動する成分が重なっており、これを不規則変動成分 E_{af} と

して(3)式に加えると、アーク電圧は次式のようになる。

$$E_a = R_a I + E_{a0} + E_{af} \dots\dots\dots (4)$$

ここでの計算においては R_a および E_{a0} は一定で、両真空バルブにおいて等しいとし、第2図から次の値とした。

$$\left. \begin{aligned} R_a &= R_{a1} = R_{a2} = 3 \text{ m}\Omega \\ E_{a0} &= E_{a01} = E_{a02} = 16 \text{ V} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

不規則変動成分 E_{af} については時間間隔

$$\Delta t = 0.1 \text{ ms} \dots\dots\dots (6)$$

ごとに

$$E_{af} = E_{af1} = E_{af2} = 2 \text{ V} \dots\dots\dots (7)$$

の大きさの変動成分の発生の有無を等確率の2値乱数を用いて決定し、アーク電圧に加えた。このことは変動が 0.1 ms 周期で起こるということを意味するのではなく、計算過程で変動が起こるかどうかの判定を、0.1 ms ごとに行なっているわけであるから、乱数列によってはその何倍かの期間、この変動分が持続して存在することもある。

(3) シミュレーション 回路方程式(1)を解いて各真空バルブ中の電流値の推移を求める。アーク電圧 E_{a1} , E_{a2} はそれぞれの電極が閉じている間は零、電極が開極後直ちに(2)式で決まる電圧が発生するとした。また、不規則変動成分 E_{af1} , E_{af2} は各真空バルブで独立に決定し、これらを含めて計算機を用いて解いた。なお小規模並列しゃ断試験が不ぞろい開極の並列しゃ断であるので、シミュレーションも不ぞろい開極の場合について行なった。

(4) シミュレーション結果 第3図および第4図(b)は、それぞれ試験結果(a)に対応して計算で求めた電流の波形である。試験結果と同様に、真空バルブ1が開くと電流差は急速に大きくなり、真空バルブ2が開くと電流は均衡へと向っている。計算の方がやや電流の収束が速いものの、この傾向は試験結果とほぼ一致している。またアーク電圧の不規則変動はシミュレーションのほうがむしろ激しいにもかかわらず、電流の収束を乱すまでには至っていない。この回路においては、アーク電圧の不規則変動によってアーク電圧の高いほうから低いほうへ電流が一方的に移行して、電流の分流の均衡が破れてしまうということはないことがわかった。

〈2・5〉 小規模並列しゃ断試験の検討 一般的技術として、開閉保護装置の並列動作は行なわれていないが、普通に市販されている 6 kV 配電系統用真空しゃ断2極を並列に用いた、波高値 2,000 A 程度の小規模しゃ断試験において、電極開離後の電流は、一方に

偏ることなく均等に分流し続けることがわかった。これは真空アークの正のアーク電圧-電流特性に原因しているとみなしてよい。電極の開離に不ぞろいがあったとしても、両真空バルブに電流が残っておれば、真空バルブ2が開極してから、電流は均衡の方向に向う性質がある。もし真空バルブ2の開極までに真空バルブ1の電流が零に達してしまう場合には、真空バルブ2が開極した後再び流れ始めるということはないので、並列しゃ断は失敗する。

これは各真空バルブに直列のインダクタンスが小さくて、開極不ぞろい期間中に電流の不均衡が著しく急速に拡大するとき起きやすい。開極不ぞろい期間中に電流が不均衡に向う速さは、各真空バルブに直列に接続してあるインダクタンス L_a が大きいほど緩やかとなり、真空バルブ2の開極時における電流の不均衡は小さくなるが、その後の収束速度も緩やかとなる。この実験回路では 1 ms の不ぞろいがある場合、 $L_a = 8 \mu\text{H}$ で 1,200 A の不均衡が起きるのに対し、 $20 \mu\text{H}$ で約 1/2 に低下した。

3. 大電流領域における並列開極中の電流分担

〈3・1〉 しゃ断回路 前章で検討したような電流領域を越えて、数万 A の電流を並列しゃ断しようとするときの、両極への電流の分流状況を検討するに当たり、外部回路として JT-60 用変流器回路に近いものを想定することとした。これが第5図である。

すなわち、直流 600 V の電源によって変流器コイルに相当する $L = 30 \text{ mH}$, $R = 15 \text{ m}\Omega$ に直流電流を供給する。電源投入後電流は、この L と R によって決まる時定数で指数関数的に立上がる。後述のように真空バルブ1個あたり 10 kA に達したとき両真空バルブを開極するものとした。この章では、それに引続くアーク期間における電流の分流状況を考察する。しゃ断部は基本的に2回路並列とし、各真空バルブに直列にインダクタンス L_{s1} , L_{s2} (共に等しく総括する

第5図 大規模並列しゃ断回路

Fig. 5. A large scaled parallel breaking test circuit.

ときは L_s と示す) を接続し、このインダクタンスの値は数10 μH のオーダとした。このコイルはかなりの電流容量をもたせなければならぬので、抵抗は無視してある。

(3・2) 直流大電流並列分流通シミュレーション

(1) システムの方程式 第5図のように、それぞれの真空バルブに流れる電流を I_1, I_2 とし、これについて回路方程式を立て、整理すると、

$$\left. \begin{aligned} \frac{dI_1}{dt} &= \frac{L_{s2}(V - E_{a1} - RI_1 - RI_2) - L(E_{a1} - E_{a2})}{L L_{s1} + L L_{s2} + L_{s1} L_{s2}} \\ \frac{dI_2}{dt} &= \frac{L_{s1}(V - E_{a2} - RI_1 - RI_2) - L(E_{a2} - E_{a1})}{L L_{s1} + L L_{s2} + L_{s1} L_{s2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ここで添字 1, 2 は並列の 2 個の真空バルブを含む各枝路に対応する。 E_{a1}, E_{a2} はアーク電圧であり、第2章で述べたと同様な表わし方によって(8)式を解いた。但し、本章で対象としているような大電流領域における真空バルブのアーク電圧特性を知る必要がある。

(2) 大電流領域における真空バルブの電圧特性

このような大電流領域における真空バルブの電圧特性を、不規則変動分まで含めて発表された例は少ないが、ここでは Mitchell 氏の文献を参照した⁽⁹⁾。そこに示されたアーク電圧のオシログラムによれば、基本的に(3)式に示す特性をもつことは明らかであるが、変動の大きさは、小規模並列しゃ断試験を行なった真空しゃ断器のアーク特性と比較すると、かなり大きいことがわかる。変動分を大きくとることはむしろ過酷側の条件となるので、これを引用することにした。

最終的に(4)式の定数を

$$\left. \begin{aligned} R_a = R_{a1} = R_{a2} &= 2.13 \text{ m}\Omega \\ E_{a0} = E_{a01} = E_{a02} &= 22 \text{ V} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

不規則変動成分 E_{af} については、電流の大きさによって2段階に変化するものとした。すなわち

$$\left. \begin{aligned} E_{af} = E_{af1} = E_{af2} &= 12 \text{ V} \quad I < 18 \text{ kA} \\ E_{af} = E_{af1} = E_{af2} &= 56 \text{ V} \quad I \geq 18 \text{ kA} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

この不規則変動成分の大きさは、JT-60 などに、実際に用いられる真空バルブにおけるものよりもかなり大きな値であると思われる。電圧変動が生じても並列分流通が可能であるかどうかの検討をする場合に、変動分が大きいめの検討を行ない、それでも安定した並列分

流が成立すると判定し得るならば、現実に変動分が、これより小さければ分流可能とみなせる。また E_{af} の発生の周期については 0.1 ms とした。

(3) 計算方法 第5図のしゃ断システムに電源を投入後、負荷の時定数によって電流が増大し、真空バルブ1個あたりの電流が10 kAに達した時点で、2個の真空バルブが同時に開極するとし、開極と同時に(4)式で表わすアーク電圧が直ちに発生するとした。真空バルブ開極後の20 msのアーク期間における電流の変化を計算機で求めた。

また開極が不ぞろいの場合には、1個あたり10 kAに達した時点でまず真空バルブ1が開極し、このバルブ内にアーク電圧が発生する。ここでは、まだ他方のバルブは金属接触しており、アーク電圧は発生していない。その後5 ms経過後遅れて真空バルブ2が開極し、このバルブにも同じ特性のアーク電圧が直ちに生ずるとし、速い方のバルブ開極から起算して20 msの間の電流の状況を求めた。

この5 msの開極の不ぞろいは、現在のしゃ断器の動作性能からすると幾分大きめの値であるが、これも先ほどと同様の過酷側での考察を行なった。

(4) シミュレーション結果 シミュレーション結果の一例を第6図(a), (b)に示す。(a)図は同時開極の場合、(b)図は不ぞろい開極の場合である。いずれも直列インダクタンスは20 μH を想定した。同時開極であってもアーク電圧の不規則変動成分の影響で、電流は両真空バルブ間で変動するが、不均衡が拡大せずにはほぼ等分された電流が持続する。不ぞろい開極の場合真空バルブ2が開く瞬間に両枝路の電流差は最大となる。しかし、その後電流差は減少し、均衡する方向へ向っている。

このような電流の不均衡の度合を表現するために、両枝路の電流差 $\Delta I = I_1 - I_2$ について次のような処理を行なった。同時開極の場合は、開極後20 msのアーク期間を等時間間隔0.05 msで400に分割し、401個の分割点における電流差 ΔI_i ($i=1, 2, \dots, 401$) を求める。不ぞろい開極の場合は、最初の真空バルブの開極から起算して20 msの期間について同様に求める。

$$\text{不均衡最大値} = \max_{1 \leq i \leq 401} (|\Delta I_i|) \dots\dots\dots (11)$$

$$\text{不均衡絶対平均値} = \frac{\sum_{i=1}^{401} |\Delta I_i|}{401} \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{不均衡二乗平均値} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{401} (\Delta I_i)^2}{401}} \dots\dots\dots (13)$$

第 6 図 大電流領域における開極後の電流波形 ($L_{s1}=L_{s2}=20 \mu\text{H}$)

Fig. 6. Estimated current wave forms in both parallel operated vacuum valves in the large scaled test.

第 7 図 直列インダクタンスによる電流不均衡抑制効果 (同時開極の場合)

Fig. 7. Effect of the series reactors on suppression of current unbalance between both valves.

これらの値はアーク電圧変動成分によって変化するので、数回の異なった乱数列についてのシミュレーションから平均値を求めた。

第 8 図 直列インダクタンスによる電流不均衡抑制効果 (不ぞろい開極の場合, 第 2 極開極時における電流の不均衡も含めた数値)

Fig. 8. Effect of the series reactors on suppression of current unbalance between both valves.

〈3・3〉 結果の検討

(1) 直列インダクタンス L_s の効果 第 7 図, 第 8 図は横軸に L_s の値を対数でとり, 縦軸に平均電流 (この場合は全電流の 1/2) に対する不均衡の割合を対数で示したもので, 直列インダクタンス L_s の値が大きいくほど, 不均衡を抑える効果が大いことがわかる。同時開極の場合 $L_s=100 \mu\text{H}$ で不均衡は約 1% と十分小さく抑えられている。また 5 ms に及ぶかなり大きな不ぞろい開極があっても, $100 \mu\text{H}$ で約 20% とかなり抑制することができる。

一方の真空バルブが開極したとき, ここにアーク電圧が生ずるので, これが電流の不均衡をもたらす原因である。この開いた真空バルブからみた回路のインピーダンスが, その後の電流分布を決める。すなわち, 他方の真空バルブはまだ閉じているので, 外部回路のインピーダンスに比べて並列枝路を一巡するインピーダンスが小さければ, 後者が分流状況に大きく作用する。外部回路は負荷を含むので, ほとんどの場合この条件が成立する。従って第 7 図, 第 8 図の結果は, 第 5 図の回路について求めたものであるが, それ以外の回路についても適用することができるものである。第 7 図から不ぞろい開極がなければ 30~100 μH , 第 8 図から不ぞろい開極期間が 5 ms の場合においても, 100 μH 程度の直列インダクタンスによって電流の不均衡がかなり抑制される。

不ぞろい開極の場合, 統計的観点から電流差は第 8 図の各指標のように抑制されるが, 電流差の時間的推移に留意する必要がある。すなわち, 第 9 図に示すように L_s が小さいほど不ぞろい開極期間中に両真空バルブに流れる電流は急速に不均衡となり, 電流差は大

第 9 図 電流差の時間的推移 (開極の
不ぞろい期間: 5 ms)

Fig. 9. Transition of current unbalance between both valves.

きくなるが、真空バルブ 2 が開極すると急速に収束に向かう。 L_s の値が大きい場合、不ぞろい期間の末期において電流差はあまり大きくならず、 $L_s=6\mu\text{H}$ の場合に比べれば、 $L_s=100\mu\text{H}$ の場合、約 1/10 に抑制されている。しかしその後、収束するのは遅いことがわかる。 L_s が小さいときには、真空バルブ 1 の開極後電流が急速に不均衡となるので、真空バルブ 2 が開極する以前に零を切るようなことがあると、並列しゃ断は失敗に終わる。

以上のような結果から、直列インダクタンス L_s の値として $100\mu\text{H}$ 程度が妥当である。ここでの検討では、更に大きな直列リアクトルを用いれば、電流の不均衡は一層抑制されると予想されるが、現実には、この並列しゃ断を何に適用するかによって、直列リアクトルの上限値がおのずから決まってくると予想される。JT-60 のようなシステムならば、一次変流器コイルに蓄えられる磁気エネルギーとの兼ね合いとか、電力回路なら電圧変動などとの関連がでてくると考えられる。

(2) 両真空バルブのアーク電圧特性の差異の影響
しゃ断動作が多ひん度で行なわれる場合、個々の真空バルブの特性が経時変化し、差異を生じてくる可能性も考慮しておく必要があろう。ここでは、そのようなアーク電圧特性の差異が生じたとした場合の並列分流への影響を同時開極の場合について検討する。直列インダクタンスの大きさは上述の考察から、(a)、(b)については $100\mu\text{H}$ をとっている。

(a) アーク電圧の E_{a0} 成分の差異 $E_{a01}=22$

第 10 図 E_{a0} の差異によってもたらされる
電流不均衡 (同時開極の場合)

Fig. 10. Current unbalance induced by difference between E_{a01} and E_{a02} .

第 11 図 R_a の差異によってもたらされる
電流不均衡 (同時開極の場合)

Fig. 11. Current unbalance induced by dissimilarity between R_{a1} and R_{a2} .

V を固定し、 E_{a02} が 11V (50% 減) から 33V (50% 増) までの範囲で変化したときもたらされる電流の不均衡の指標を第 10 図に示す。 E_{a02} の 50% の増減に対し、不均衡の指標は 1% から 10% になるに過ぎない。

(b) アーク抵抗 R_a の差異 $R_{a1}=2\text{m}\Omega$ を固定し、 R_{a2} が 50% 減から 50% 増までの範囲で変化したときの、電流の不均衡の状況を第 11 図に示す。この場合も R_a の 50% の増減に対し、不均衡の指標は 10% 程度に増加するにすぎない。

(c) アーク電圧変動成分 E_{af} の影響 E_{af} の値は 12V (但し 18kA 以下) としてきたが、その影響をみるために $E_{af}=6\text{V}$ (50% 減の場合)、および 24V (100% 増の場合) について計算したアーク電流波形の例を第 12 図に示す。変動が特に激しくなる例として、この項については $L_s=2\mu\text{H}$ の場合を例示した。また、比較の便のため、同じ乱数列でアーク電圧

第 12 図 アーク電圧変動分の大きさによって
もたらされる電流不均衡
($L_{s1} = L_{s2} = 2 \mu\text{H}$)

Fig. 12. Current wave forms affected by magnitude of the fluctuated component of arc voltage.

を変動させた波形を示してある。 E_{af} が大きいほど電流不均衡の瞬時値は増大するものの、発散してしまうことはないことがわかる。

4. 結 論

しゃ断器における並列しゃ断動作は、常識的には不可能とされている。しかし現在、日本原子力研究所で開発中の臨界プラズマ試験装置 JT-60 のように、92 kA に及ぶ直流電流を単独のしゃ断点で繰返ししゃ断することは、電極の消耗が著しく恐らく不可能であ

る。このような必要性から並列しゃ断が導入された。しかし、当面は直流電流のしゃ断に限って考えられている。この場合、並列のしゃ断部が開極した後電流が、各しゃ断点に均一分流するかどうか最も根本的な必要条件となる。

本論文は、真空しゃ断器用の真空バルブ 2 個を、並列動作させたときの電流の分流状況について検討している。普通に市販されている配電用真空しゃ断器を対象として、かなり容易に並列しゃ断ができることをバルブ 1 個あたり 1,200 A までの小規模試験で示した。この分流状況を模擬する手法を開発して、JT-60 級の回路定数について、大規模な並列しゃ断の可能性を計算した。その結果真空バルブに $100 \mu\text{H}$ 程度の直列インダクタンスを用いることが、かなりの不ぞろい開極があっても電流の均衡に有効なこと、また真空バルブのアーク特性が、当初の値から $\pm 50\%$ 程度変化するようなことが万一起ったとしても、なお電流の不均衡は同時開極の場合 $\pm 10\%$ 程度にとどまることを示した。

(昭和 53 年 9 月 28 日受付)

文 献

- (1) Murano, Yanabu & Tamagawa: Interruption Ability of Vacuum Arc, Proc. 3rd Int. Conf. on Gas Discharges, 3, 648 (1974)
- (2) 嶋田・柳父: 「臨界プラズマ試験装置 JT-60 用直流しゃ断器」電学誌 98, 6, 545 (昭 53)
- (3) G. R. Mitchell: "High-current Vacuum Arcs", Proc. Instn. Elect. Engrs 117, 12, 2315 (1970)