UDC 621.316.57.001.4

超高圧しゃ断器の3電源方式による4パラメータ合成短絡試験法

New Three-circuit Arrangement for Testing High Voltage Circuit Breakers under Four-parameter Transient Recovery Voltage

中村 博* Hiroshi Nakamura　森田 公* Tadashi Morita
武田 毅* Takeshi Takeda　西條 喜一* Kiichi Saijo

I. まえがき

近年のいちじるしい電力需要の増大と送電容量の増加にともなって，保護機器たるしゃ断器も超高圧大容量のものが要求されるようになってきた。

このような背景から最近は1サイクル同期式空気しゃ断器およびガスしゃ断器のようにすぐれたしゃ断性能をもつしゃ断器が出現してきている．しかもこれらしゃ断器の単位しゃ断点あたりのしゃ断容量も，いちじるしく大容量のものが製作可能となり，500kVしゃ断器の直列しゃ断点が4点と，空気しゃ断器開発当初の300kV，8点と比較すると昔日の感がある。

このような大しゃ断容量を直接試験で検証することは試験設備の経済的負担が大きくもはや不可能となっている。

したがって一般にはしゃ断電流源と再起電圧および回復電圧とをおのおの別電源としたいわゆるワイル回路による電流重畳合成試験法が理論的にも最も高い信頼性をもつことから，最近の合成短絡試験法は内外を問わずこの方法に集約されている．当社でも超高圧電力研究所主催の合成試験研究委員会に参加してその等価性について実証を行なってきており[1]，現在では多くの開発試験や商用試験に適用している。

一方合成試験の信頼度が高まるにつれ，その適用がJEC-181（1971）で規格化され，また1972年にはIECでも試案が提出され6か月ルールにて承認された[2]。

しかし単位しゃ断容量が増大した結果従来の合成試験設備では試験容量的に不足をきたしている。

また系統容量の増大化にともない内外で実系統における再起電圧の見直し調査をした結果[3]高い電圧範囲の再起電圧特性が多重周波となっていることが判明し120kV以上の定格電圧のしゃ断器には4パラメータ再起電圧を適用することなり，さらに再起電圧のおくれ時間t_dも加味することとなった。

これらの問題に対処するため当社では昭和45年から研究に着手し47年には試験設備の増強なしで実用的な方法を開発するに至った[4][5]。

この方法で本年6月に米国BPA向け550kV 4点切り38GVAの1サイクル同期式空気しゃ断器の単位しゃ断部の合成試験を顧客立会で無事終了することができた。

以下これまでの試験経験にもとづき一般的な合成試験における等価性の問題に簡単に触れ，これまで提案されてきた4パラメータ再起電圧の合成試験回路構成と当社提案の回路構成，動作，試験結果，えられた再起電圧波形の検討と4パラメータ再起電圧を適用するすべての定格電圧範囲における回路定数などの計算結果，ならびにしゃ断特性の理論計算などにつき述べることとする。

II. 新しく規格化された再起電圧と試験実施上の問題

1. 規格の再起電圧

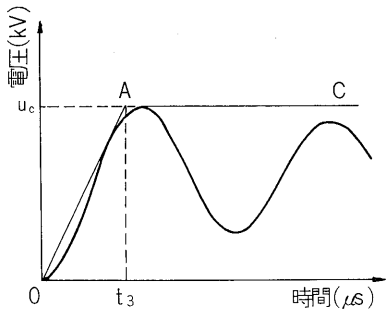
JEC, IEC, ANSI などに規定された再起電圧(Transient Recovery Voltage 以下TRVと略す）は2パラメータと4パラメータで表現され，これにおくれ時間 t_d が導入されている．第1図から第3図にその波形の一例を示す（JEC-181の例)。

TRV波形が単一周波のものは最大値 u_c とその到達時間 t_3 の2パラメータで示され，二重周波以上のものは初期波高値 u_1 と時間 t_1 および最大波高値 u_c と到達時間 t_2 の4パラメータで表現される．またおくれ時間 t_d とはTRVの初期立上り部分の停滞の仕方をあらわすもので，定格電圧によってその値が異なっている。

2. 問題点

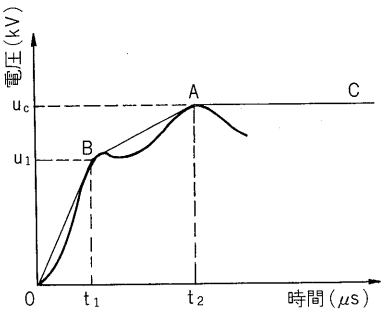
2パラメータTRVについては一般にワイル合成試験回路で実施されており波形発生上の技術的問題点はない。

* 川崎工場静止器部



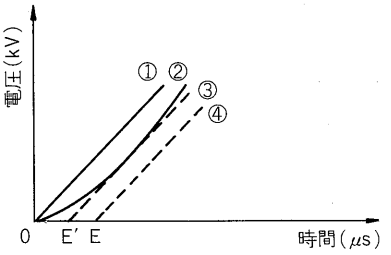
84kVまでの短絡しゃ断（10～100%I），異相地絡，近距離線路故障，脱調しゃ断 120～550kVまでの短絡しゃ断（10～60%I）に適用

第1図　2パラメータTRV波形
Fig. 1.　2 parameter TRV wave



120～550kV までの（100%I のみ）短絡しゃ断，異相地絡，近距離線路故障，脱調しゃ断に適用

第2図　4パラメータTRV波形
Fig. 2.　4 parameter TRV wave



①：規格のTRV初期上昇率
②：試験のTRV初期部分
③：①と平行で②に内接する線分
④：①と平行の線分
OE：規格のおくれ時間 t_d
OE′：試験TRVのおくれ時間 t_d'

第3図　おくれ時間 t_d
Fig. 3.　Time delay t_d

しかし4パラメータTRV波形についてはどのような回路構成でそれを発生させるかが問題である。

まず回路構成上の条件として直接試験回路に対する等価性があげられる．一般的な合成試験回路の等価性については，かねてから内外で研究が進み，最近これらを集約した形で報告が行なわれたので[(6)]ここでは簡単に触れることにする。

1)　電流波形に対する等価性：以下の四つの条件が直接試験の場合と比較して実用的に許容できる範囲内において一致していなければならない，すなわちアーク電流最終半波の零値近傍以前では，

(1)　アーク電圧による電流波高値の減少が8％以内。

(2)　アーク電圧による電流半波時間の減少が10％以内。

(3)　上記(1)(2)項にともなう電流零値における巨視的な電流傾斜（di/dt）の変化が100～110％であること。

電流零値近傍では

(4)　アーク電圧の急変による電流波形の変歪が直接試験と比較してほぼ一致すること。

2)　電圧波形に対する等価性としては直接試験と同じTRV波形を発生することが必要であるが，特に以下の二つが重要である。

(1)　残留電流期間のTRV波形が直接試験と合致していること。

(2)　所要の残留電流が供試しゃ断器を通過しえるような回路構成であること。

上記条件を満足する回路としては電流注入方式の代表例としてワイル回路があげられる，この方式での等価性については過去に多くの検証結果があり，一般的にも認められている[(7)(8)]。

このようなワイル方式を基本にして数年前から内外の研究機関で4パラTRV発生回路の研究が進められているがいまだに実用的な方法が見いだされていない。

その理由は理論的実験的には可能であっても，実際のしゃ断器特に超高圧大容量しゃ断器のしゃ断性能検証にまでそれらを適用しようとすると結局ぼう大な設備費用（主としてコンデンサ容量）を要し経済的に実現困難となるからである。

III.　最近発表された4パラメータTRV合成試験回路

最近の例を二，三紹介する。

第4～7図の(a)は回路方式を，同じく(b)はおのおのの回路でえられる二重周波のTRV波形を示す。

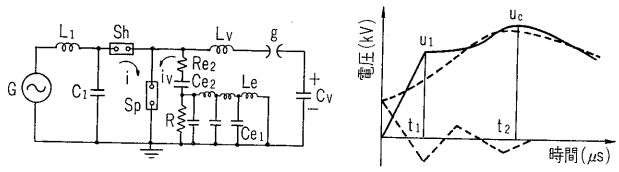
これらはすべて電圧源回路に電流注入方式（ワイル回路の応用）を採用している点で共通であり，基本的に等価性を具備した回路であると考えられる．すなわち電圧源用コンデンサ C_V の電荷をインダクタンス L_V を通して供試器 Sp に供給し，大電流 i と C_V, L_V の共振電流 i_V を Sp でしゃ断した後二重周波のTRVを発生させるものでTRVの発生様式が多少異なる。

二重周波TRVの高周波分は第4図と5図の場合[(9)(10)]，近距離線路故障しゃ断試験用の多段 L_e と C_{e1} で，第6図と7図では L_{V1} または L_V と C_{e1} で発生させる[(11)(12)]。

低周波分はすべて L_V または L_{V2} と C_{e2} とで発生させる（第7図は t_1 時点でギャップ g_2 を放電する方式）。そして高周波と低周波のTRVを重畳して供試器 Sp の極間に二重周波の電圧を印加するものである。

第4，6，7図は168kV 1点切り 31.5kA または 120 kV 1点切り25kAのガスしゃ断器で端子短絡しゃ断（BTF）に使用されている．またこれ以外にも国外で発表されている例もあるが大同小異である[(13)(14)]。

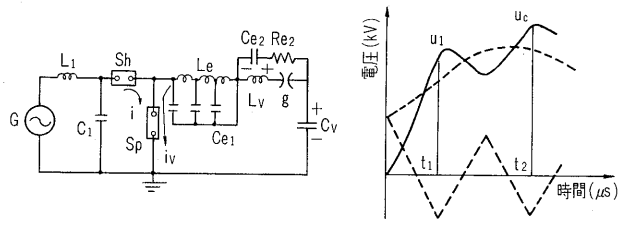
以上の回路では個々に注入電流波形 i_V のひずみを抵抗 R_{e2} で是正したり（第4，5，6図），充電装置またはコントロールギャップを二つ設けたりするので（第7図）試験上制御が繁雑となるなどの問題点があるがこれらは技術的に解決できよう．しかし根本的な問題として4パラメータTRVの場合規格上 t_1 と t_2 の比は3であり，かつ t_1 と t_2 の絶対値も電圧の高いしゃ断器ほど大



(a) $C_{e2}=2\,C_{e1}$　　(b)
$C_V=3\,C_{e2}$

第4図　4パラメータTRV合成短絡試験回路および波形（その1）

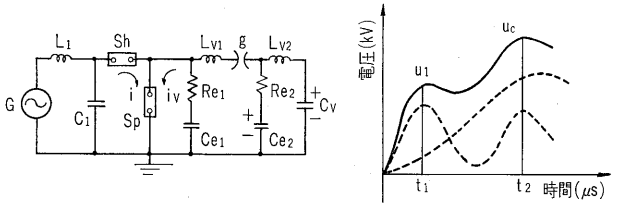
Fig. 4. 4 parameter TRV synthetic testing circuit and wave



(a) $C_{e2}=2.3\,C_{e1}$　　(b)
$C_V=2\,C_{e2}$
C_V と同極に C_{e2} も充電

第5図　4パラメータTRV合成短絡試験回路および波形（その2）

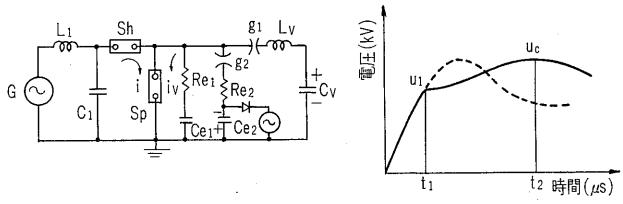
Fig. 5. 4 parameter TRV synthetic testing circuit and wave



(a) $C_{e2}=9\,C_{e1}$　　(b)
$C_V=2.5\,C_{e2}$
C_V と同極に C_{e2} も充電

第6図　4パラメータTRV合成短絡試験回路および波形（その3）

Fig. 6. 4 parameter TRV synthetic testing circuit and wave



(a) $C_{e2}=8\,C_{e1}$　　(b)
$C_V=2.5\,C_{e2}$
C_V と逆極に C_{e2} を充電

第7図　4パラメータTRV合成短絡試験回路および波形（その4）

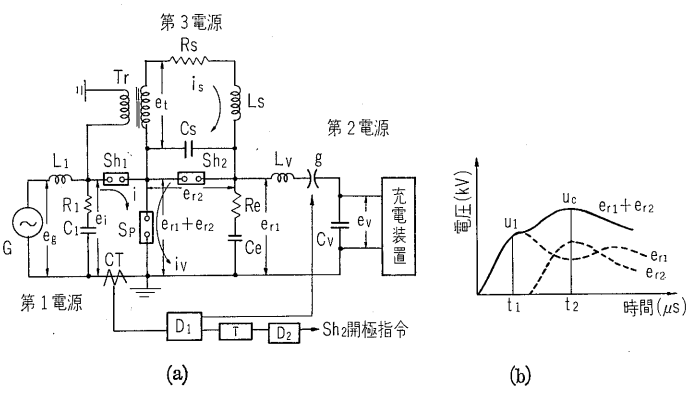
Fig. 7. 4 parameter TRV synthetic testing circuit and wave

きくなるので一つの電圧源から低周波TRVまでも供給しようとすると高周波TRV発生用 C_{e1} に比べ低周波TRV発生用 C_{e2} が最低2～3の容量を必要とし，電圧源用コンデンサ C_V は C_{e2} のさらに2～3倍必要となる。

またTRV波高値 u_C を m 倍にするには C_V の充電電圧を m 倍とせねばならないがコンデンサ1個当たりの耐電圧には限度があるから m 倍の個数を直列にする必要を生じ，C_V の容量を一定に保つには直列倍数と同一の m 倍だけさらに並列とするから全体として m^2 倍のコンデンサ個数が必要となる．特に超高圧しゃ断器の脱調しゃ断試験などを4パラメータTRVで規格どおり実施する場合 u_C, t_2 とも大きいため上記の回路ではコンデンサ容量がぼう大となり経済的に試験が不可能となる。

かりに限られたコンデンサ容量で試験を行ない u_1, u_C は規定どおりだし得たとしても，t_1, t_2 特に t_2 が短くなり供試しゃ断器には必要以上に苛酷なTRVを与えることになる。

したがって等価性を維持し，かつ経済的に実施できる4パラメータTRVの合成試験法の開発がぜひとも必要となった。



(a)　　(b)

第8図　4パラメータ3電源合成短絡試験回路および波形

Fig. 8. 4 prameter TRV of 3 circuit synthetic Testing circuit and wave

IV. 新しい合成試験回路

1. 回路構成

今回開発された合成試験回路を第8図(a)に，えられたTRV波形を第8図(b)に示す。

この回路によれば従来提案されてきた回路の欠点であるコンデンサ容量の増大をさけることができる。

すなわちこの回路は大電流 i を与える電流源回路（第1電源）と，注入電流 i_V および高周波TRV（e_{r1}）のみを与える第1電圧源用ワイル回

路（第2電源）ならびに低周波TRV(e_{r2})を供給する第2電圧源（第3電源）より構成された3電源回路方式である。

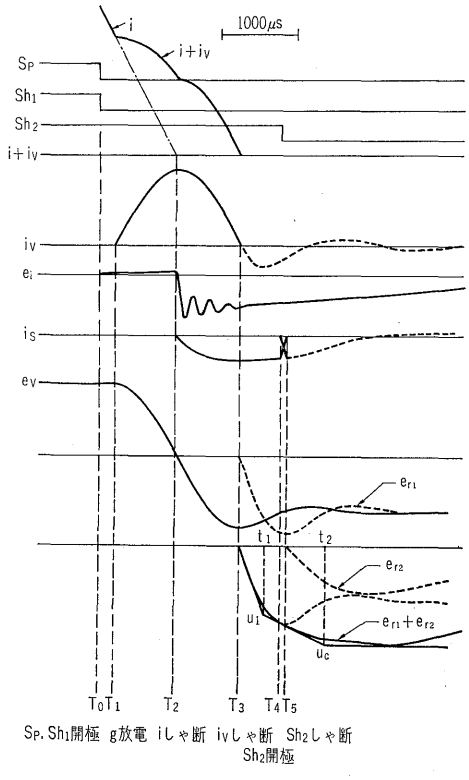
ここで第1電源と第2電源は従来実施してきた2パラメータTRVのワイル方式をそのまま適用したものであるが，従来の方式と異なる点は第3電源と第2補助しゃ断器 Sh_2 を設けたことである。

第3電源は昇圧変圧器 Tr と高抵抗 R_S インダクタンス L_S, コンデンサ C_S よりなるが Tr は短絡試験所に設置されている短絡用変圧器でもよいし，第3電源を環流する電流 i_S が20A程度しか必要としないのでほかの適当な中容量変圧器でもよい。

第2補助しゃ断器 Sh_2 は電流しゃ断能力は必要としないが，開極時間が早く，ばらつきの少ない，そして動作後の極間絶縁回復特性の早いものが必要である．当社の場合では1サイクル同期式空気しゃ断器（以下 ABBs と略す）が最もこの用途に適していることからそれを使用した。

2. 回路の動作と特長

この回路で4パラメータTRVの合成試験を実施する手順を第8図と第9図の試験シーケンスで説明する。



第9図　試験シーケンス

Fig. 9. Test sequence

1) あらかじめ充電装置で第2電源のコンデンサ C_V を所要電圧 e_V まで充電する。

2) つぎに目標の商用周波短絡電流 i を発電機Gより第1補助しゃ断器 Sh_1 と供試しゃ断器 Sp に直列に通電する。

3) 短絡電流の最終半波を Sh_1 と Sp で直列にしゃ断するが，i の零点前 T_1 の時点で制御間隙 g を放電し，第2電源から注入電流 i_V を第2補助器 Sh_2 と供試器 Sp に直列に通電する．したがってSpには $i+i_V$ が重畳して流通する。

なお g の放電時点の制御は変流器CTと制御装置D_1で行なう。

4) 一方第1補助器 Sh_1 には大電流 i のみが流入しているから時刻 T_2 で i は Sh_1 によりしゃ断され，第1電源の低再起電圧 e_i が Sh_1 の極間に加わる，この時点で第3電源の昇圧変圧器 Tr の一次巻線は e_i で励磁される。

5) しかし Tr の二次側は Sh_2 で短絡されているから，Tr の二次誘起電圧 e_t と高抵抗 R_S, インダクタンス L_S で決まる商用周波数の小電流 i_S が時刻 T_2 から第3電源回路中を環流し始める。

6) やがて時刻 T_3 で i_V の電流零点が到達するので i_V は Sp によりしゃ断され，第2電源の充電電圧 e_V, 電源コンデンサ C_V, インダクタンス L_V, 初期TRV波形調整用コンデンサ C_e および低抵抗 R_e などで決まる電圧 e_{r1} が Sp の極間に印加され始め4パラメータTRVの初期TRV u_1 と t_1 を与える。

7) つぎに制御装置D_2によって第2補助しゃ断器 Sh_2 が時刻 T_4 で開極指令を受け第3電源の環流電流 i_S をしゃ断する．この場合 Sh_2 のしゃ断電流処理能力に比し i_S はきわめて小さいので i_S は自然零点をまたずに時刻 T_5 で Sh_2 により截断される．この際截断の異常電圧は並列コンデンサ C_S が吸収し，かつ Sh_2 の絶縁回復性能も高いため截断時に固有な異常電圧やこれに起因する再発弧電流の発生なしに転流しゃ断の形で円滑に截断が完了する。

8) i_S が時刻 T_5 で截断されると昇圧変圧器 Tr の二次電圧 e_t と R_S, L_S, C_S で決まる TRV (e_{r2}) が Sh_2 の極間に印加される．この場合 e_{r2} は R_S が高抵抗のため非振動の波形となる．また e_{r2} の印加時刻 T_5 は e_{r1} の波高値付近になるよう調整しておく。

9) 上記の過程を経て供試器 Sp の極間には e_{r1} と e_{r2} が重畳して印加され，所望の4パラメータTRV波形をえることができる。

この回路の最大の利点は第4～7図の u_C, t_2 を与える低周波TRVの発生用 C_{e2} を必要としないこと，したがって C_{e2} の容量によって必要となる C_V の容量増大がさけられること，さらに C_V の充電電圧をTRVの初期波高値 u_1 相当まで下げられるので，C_V の直列容量はむしろ減少させることができ全体のコンデンサ容量を大幅に低下できることである。

ちなみに前者の回路方式に必要な C_V, C_{e2}, C_{e1} の充電エネルギ $C \cdot V^2/2$ で比較すると，提案の方式は第4図および第5図のほぼ1/3，第6図および第7図の1/7ですむ。

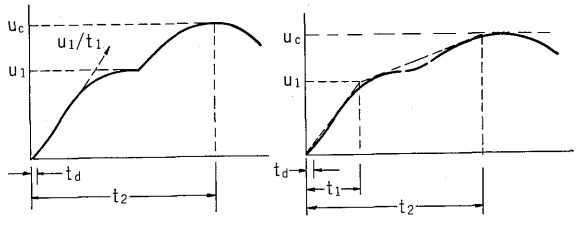
また電圧源回路の等価性を保持する条件の一つである残留電流の供給に関してはＴＲＶの t_1 に相当する時間，すなわち 150 μs から 650 μs (120kV端子短絡および550kV脱調に対する ＪＥＣ-181の t_1 の値) 程度まで第2電源から供給できるから問題ないと考えられる。

一般的に残留電流の流通期間は数 10 μs 以下であり，当社の実器による実測例では 30 μs である[15]．また第2補助器 Sh_2 をしゃ断しても第2電源は並列容量 C_S で接続されており C_S を経てなお残留電流は供給される．一般的に C_S 値は 50 nF 以上あれば充分であるといわれている[16]。

第1表　ＴＲＶ規格値と試験結果 (550kV，¼しゃ断点)
Table. 1　TRV Standard Values and Test Results

試験種類	項　目	4パラメータ再起電圧値			
		ＡＮＳＩ 550 kV K=1.5	ＩＥＣ 525 kV K=1.5	ＪＥＣ-181 550 kV K=1.3	試験結果 550 kV K=1.5
短絡しゃ断 (100%I)	u_1 (kV)	※ 177	168	154	162～175
	t_1 (μs)	——	640	※ 325	190～210
	u_1/t_1 (kV/μs)	0.42	0.262	※0.472	0.77～0.92
	u_c (kV)	※ 254	236	214	243～276
	t_2 (μs)	1,325	1,920	※ 975	1,060～1,200
	t_d (μs)	5.4	12.8	※ 5.0	≃ 0
脱調しゃ断 (25%I)		——	525kV K=2	550kV K=2	550kV K=2
	u_1 (kV)	——	225	※ 236	240～257
	t_1 (μs)	——	1,280	※ 650	460～500
	u_1/t_1 (kV/μs)	——	0.176	※0.363	0.48～0.56
	u_c (kV)	——	281	※ 295	294～321
	t_2 (μs)	——	3,840	※1,950	1,920～2,050
	t_d (μs)	——	——	※ 10	8

注) 1)　ＡＮＳＩのみのＴＲＶ表現が異なる第10図参照
　　2)　K：相係数
　　3)　※印：試験目標値　　4)　電圧分担係数=1.05



(a)　ＡＮＳＩ C37, 072, 0722-1971　　(b)　ＩＥＣ 17A C075および 17A CO52 JEC181

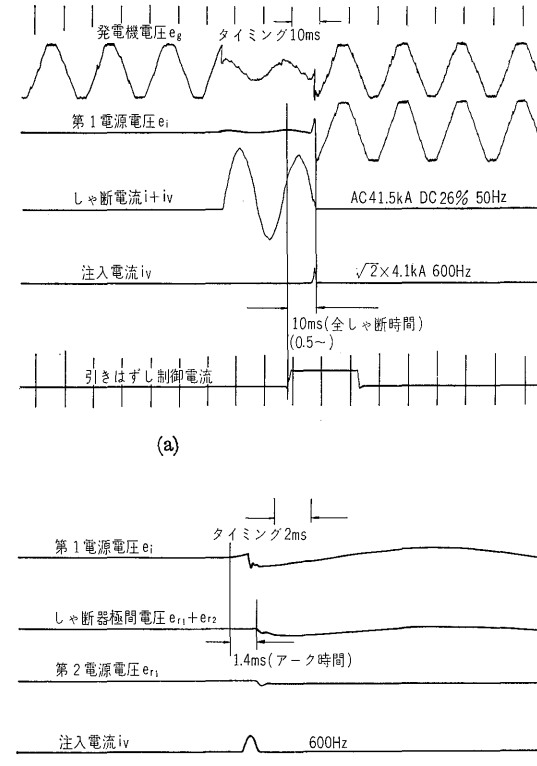
第10図　4パラメータＴＲＶのＡＮＳＩ と ＪＥＣの比較
Fig. 10.　Comparison of 4-parameter TRV

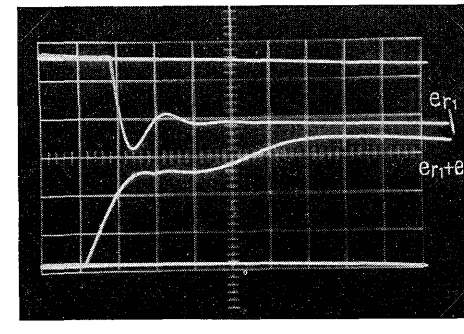
3. 試　験　結　果

ＢＰＡ向け550kV 4点切り38 GVA ABBs の端子短絡で最大しゃ断電流 41kA，および脱調しゃ断試験で 10kA の1点分割試験をこの方式の合成試験回路で実施した。

試験は ANSI, JEC, IEC の各規格のＴＲＶをすべて満足する値で行なうよう考慮したので，試験の目標値はこれら規格値を組合せて最も苛酷なＴＲＶとした。

各規格のＴＲＶから抽出した目標値 (※印) と試験結果を第1表に示す．またえられたオシログラムを第11図と第12図に，おのおのの4パラメータ表示によるＴＲＶ試験値のまとめを第13図，第14図に示す．図は端子短絡しゃ断15回，脱調しゃ断8回の結果よりえられた最大と最小値を示すが，ＴＲＶ波形のばらつきは±6％以内で





(c)　タイミングスケール　e_{r1}：500 μs/div
　　$e_{r1}+e_{r2}$：200 μs/div
　　u_1：175 kV　　u_c：252 kV
　　t_1：210 μs　　t_2：1,180 μs

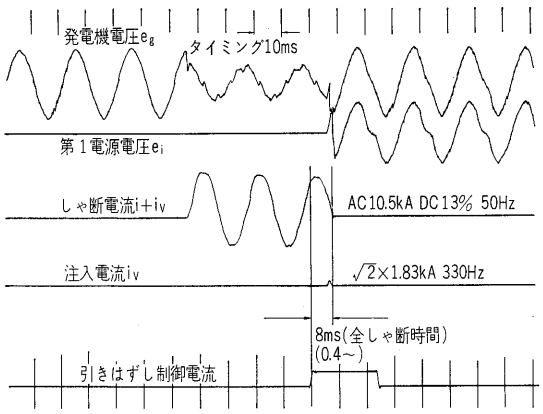
第11図　41kA端子短絡しゃ断時のオシログラム
Fig. 11.　Oscillograms of short circuit interrupting test (41 kA)

ある．これは第3電源の TRV e_{r2} を印加するための第2補助器 Sh_2 の開極位置とアーク時間のばらつきが少ないことを意味するものである。

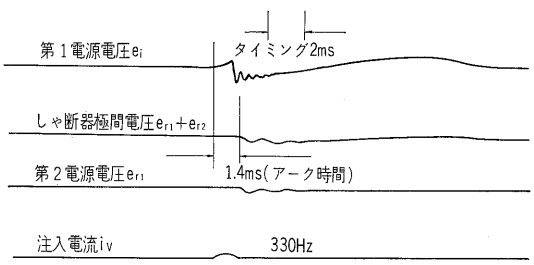
ここに Sh_2 はＢＰＡ向けとは別の試作用550kV 4点切り ABBs のしゃ断部を2点直列とし，第1補助器 Sh_1 と供試器 SP にはＢＰＡ向け器の1しゃ断点をおのおの使用したものである。

第15図に供試しゃ断器½相の外観を示す．また試験実施時の回路定数を第2表に示した。

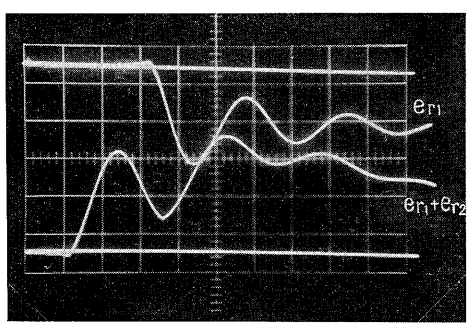
この方式での試験の成否は Sh_2 の開極制御と i_s しゃ断後の絶縁回復特性に依存するところ大である．Sh_2 は使用しゃ断断器が ABBs であるところから開極指令後約 100 μs でコンタクトが開離動作を始め，その動作原理からほとんどばらつきのないこと，開極指令は制御間



(a)



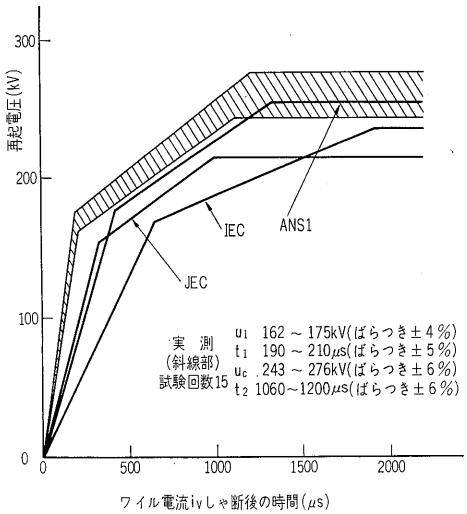
(b)



(c) タイミングスケール　e_{r1}：500 μs/div
$e_{r1}+e_{r2}$：500 μs/div
u_1：240 kV　u_c：294 kV
t_1：480 μs　t_2：2,000 μs

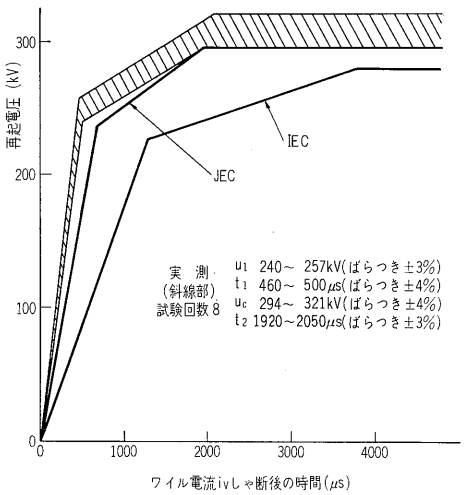
第12図　脱調しゃ断時のオシログラム

Fig. 12. Oscillograms of out-of-phase interrupting test (10 kA)



第13図　41kA 端子短絡しゃ断試験結果

Fig. 13. Test results of short circuit interrupting (41 kA)



第14図　10kA 脱調しゃ断試験結果

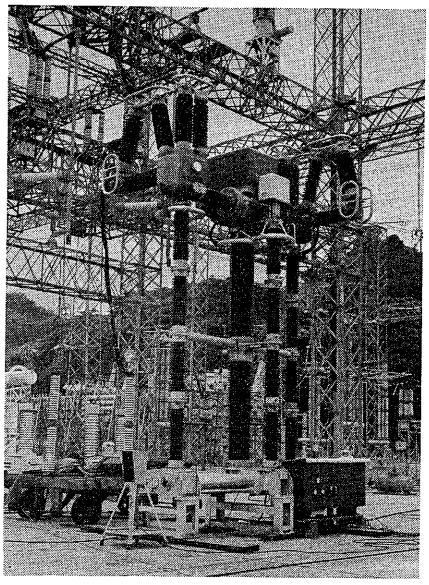
Fig. 14. Test results of out-of-phase interrupting (10 kA)

第2表　試験時の回路定数

Table. 2 Test circuit constants

電　源	項　　目	短絡しゃ断 (100%I)	脱調しゃ断 (25%I)
第1電源	E_g (kV)	11.5	13.8
	I (kA)	41.5	10.5
第2電源	C_v (μF)	11.3	7.0
	L_v (mH)	6.48	35.3
	C_e (μF)	3.0	1.44
	R_e (Ω)	33	44
	e_V (kV)	147	173
第3電源	T_{r1} タップ	12.7kV/100kV	12.7kV/100kV
	Tr_2 タップ	11kV/22kV	——
	L_s (H)	1.0	1.2
	C_s (μF)	0.1	0.1
	R_s (kΩ)	6.0	6.0
	E_t (kV)	114	109

注）E_g, I, E_t は実効値を示す。



第15図　BPA向け 550kV 4点切り 38 GVA ABBs ½相分の外観

Fig. 15. View of 550 kV 38 GVA ABBs for BPA

隙 g の制御装置D_1を起点としてタイマTを経て，開極指令発信器D_2を作動させているので e_{r1} の波形との相対関係は常に一定に保たればらつきを少なくしている．また Sh_2 のコンタクト初開離速度は 1しゃ断点当たり約 10 m/s であり，2しゃ断点で倍の速度がえられるのできわめて絶縁回復が早く，かつSh_2と並列の C_S が有効に作用し波形ひずみのない4パラメータTRV波形をえることができた。

なお 168kV，31.5kA パッファ形ガスしゃ断の脱調しゃ断試験にもこの回路方式を適用し充分満足な結果がえられている。

4. 電子計算機による回路定数の計算

以上，新合成試験回路の構成，試験結果などにつき述べた．この回路を各電圧階級のしゃ断器に適用するための回路定数は電子計算機により求めた．計算は第8図に示した回路を使用した。

1) 計　算　式

計算はつぎの領域に分類して行なった。

(1) i_v が流れ出してから，i がしゃ断されるまで

(2) i のしゃ断により i_S が流れ出してから，i_v がしゃ断されるまで

(3) i_v がしゃ断されて，Sh_2 がしゃ断するまで

(4) Sh_2 がしゃ断した以降

以上の計算にはアーク電圧は無視した．また，しゃ断器のしゃ断特性としては，残留抵抗は電流しゃ断直後に無限大になるとした。

各領域の計算式はつぎのとおりである。

(1) ワイル電流 i_v

$T_1 \leq T \leq T_3$ に対しては

$$\frac{1}{C_v}\int i_v dt + R_v \cdot i_v + L_v \cdot \frac{di_v}{dt} = 0 \quad \cdots\cdots(1)$$

(2) 第2電源（ワイル回路）TRV e_{r1}

$T_3 \leq T$ に対して

$$\frac{1}{C_v}\int i_v dt + \frac{1}{C_e}\int i_v dt + (R_v + R_e)\cdot i_v + L_v \cdot \frac{di_v}{dt} = 0 \quad \cdots\cdots(2)$$

$$e_{r1} = \frac{1}{C_e}\int i_v dt + R_e \cdot i_v \quad \cdots\cdots(3)$$

(3) 第3電源電流 i_S

$T_2 \leq T \leq T_5$ に対して

$$e_g = L_1 \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_1}\int (i - i_S) dt + R_1 \cdot (i - i_S) \quad \cdots(4)$$

$$0 = -L_S \frac{di_S}{dt} - R_S \cdot i_S + \frac{1}{C_1}\int (i - i_S) dt + R_1 (i - i_S) \quad \cdots\cdots(5)$$

(4) 第3電源（第2補助しゃ断器極間）TRV e_{r2}

Sh_2 しゃ断後に対して（T_5 以降）

$$e_g = L_1 \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_1}\int (i - i_S) dt + R_1 (i - i_S) \quad \cdots\cdots(6)$$

$$0 = L_S \cdot \frac{di_S}{dt} + i_S \cdot R_S + \frac{1}{C_S}\int i_S dt - \frac{1}{C_1}\int (i_S - i) dt - R_g \cdot (i_S - i) \quad \cdots\cdots(7)$$

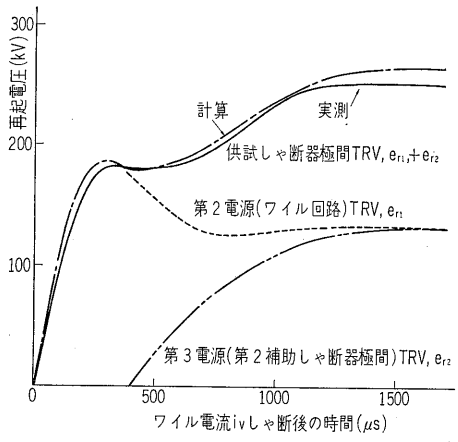
$$e_{r2} = \frac{1}{C_S}\int i_S dt \quad \cdots\cdots(8)$$

以上の式を各時間に応じて連立して解いた．また，Sh_2 しゃ断後（T_5 以降）の供試器の極間電圧は $e_{r1} + e_{r2}$ として，両者の和が印加される。

2) 実測と計算の比較

以上の計算回路を検討するために第2表に示した回路定数で計算を行ない両者の比較を行なった。

第16図および第17図は実測波形と計算波形を重ねて示



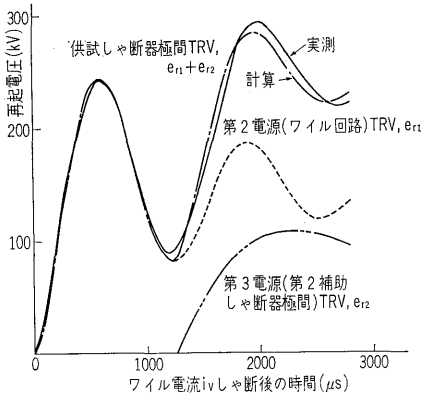
第16図　41kA端子短絡試験波形の比較（550kV，¼しゃ断点）

Fig. 16. Comparison of restriking voltages for 41 kA interruption

した．第16図は端子短絡しゃ断の場合で，第17図は脱調しゃ断の場合である．計算では Sh_2 の開極直後のアーク時間は考えていない．実測では 50～100 μs のアーク時間があるが，比較的良く合致している．このことから計算は充分信頼性のあることが判明した。

3) JEC-181の各電圧階級試験用回路定数

JEC-181に新しく，120kV以上のしゃ断器に対しては，いわゆる，4パラメータ法による試験の実施が規定されているが，この試験を行なうための回路定数の計算を行なった。



第17図　10kA脱調試験波形の比較（550kV，¼しゃ断点）

Fig. 17. Comparison of restriking voltages for out-of-phase at interrupting 10 kA

第3表　JEC-181の各電圧階級の試験回路定数（全点しゃ断の場合）

Table. 3 Constants for each voltage class according to JEC-181

定　数		電圧（kV）JEC-181					
		120	168	204	240	300	550
C_v (μF)		16.38	12.02	11.07	9.006	13.59	10.34
L_v (mH)		6.187	8.431	9.151	11.25	11.65	27.22
e_v (kV)		109.9	149.8	162.6	199.9	258.9	604.6
f_v (Hz)		500.0	500.0	500.0	500.0	400.0	300.0
f_r (kHz)		2.0	1.5	1.4	1.2	0.94	0.6
γ		1.3	1.35	1.33	1.28	1.25	1.16
C_e (μF)		1.092	1.502	1.619	1.892	3.004	3.447
R_e (Ω)		55.87	47.21	49.57	56.81	49.74	89.78
C_s (μF)		0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.1
R_s (kΩ)		6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
L_s (H)		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
E_g (kV)		20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
I_g (kA)		40.0	40.0	40.0	40.0	50.0	50.0
f_g (kHz)		5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
N	1点切り	2.63	(4.3)	(4.6)	(6.05)	(8.41)	(17.1)
	2点切り	(1.31)	2.15	2.3	3.02	4.21	(8.55)
	4点切り	—	—	(1.15)	(1.51)	2.11	4.28
	6点切り	—	—	—	—	—	2.85
T_5-T_3 (μs)		225	340	340	440	500	625
所用タップ		20kV/42-58-85kV					

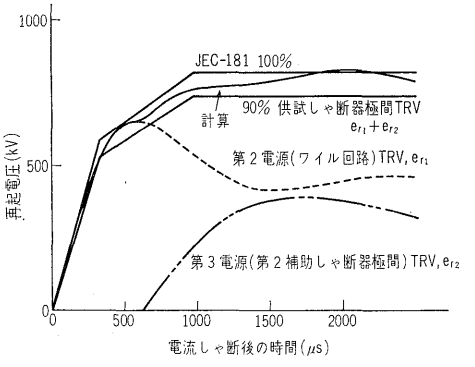
第3表には各電圧階級に対する全点しゃ断回路定数の計算結果を示す。

これらの定数の決定には，JEC-181でTRVの許容値として0.9倍が認められているので，計算波形による各数値がTRVの100～90%に入るようにして求めた。

第18図は550kV，50kAの場合の例である．図示したものは1点切りとなっているが，多点切りの場合には分圧比を考慮して，$1/n$ 倍する（n は直列しゃ断点数）．この計算結果は1例であって，とくに，ワイル回路定数は振幅率，TRV周波数などの多種の組合せが考えられる。

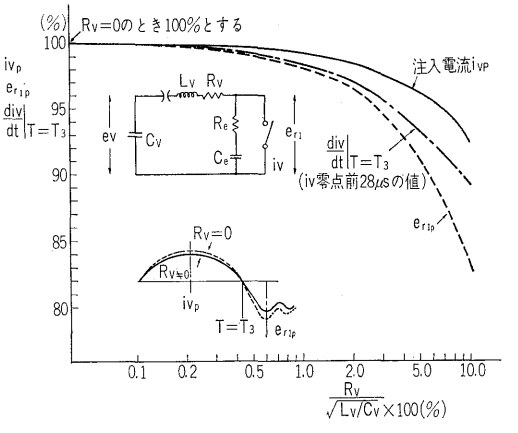
この回路には第3電源用の変圧器が要求されるが，これらは第3表の最下段に示すように，発電機電圧を20kVとすると，タップ比は20kV/42/58/85kV の比較的中容量のもので良い．第3表のタップ比 N の（　）は非標準として，今回は考慮していない。

第19図はワイル回路で，R_Vの存在が電流傾斜およびTRVにおよぼす影響について検討したものである．ワイル回路の定数としては第3表の値を使用し，$R_v/\sqrt{L_v/C_v}$ が0.1，0.2，0.5，1.0，2.0，5.0，10.0%として求めた．注入電流の減衰としてはワイル電流の波高値部分お



第18図　550kV用の計算波形例（全点しゃ断）

Fig. 18. Calculated results of restriking voltage for 550 kV



第19図　R_V の電流傾斜およびTRVに及ぼす影響

Fig. 19. Influence of R_V on i_v, $\left.\frac{di}{dt}\right|_{T=T_3}$ and e_{r1}

よび i_V 電流零点前 28 μs の傾斜を比較した．TRV e_{r1} については第1波高値の比較である．$R_v/\sqrt{L_v/C_v}$ が10%のとき e_{r1} の波高値部分が120～550kV定格で0.5%程度異なるが，ほぼ同じと考えて良い．i_{VP} および $\left.\frac{di_V}{dt}\right|$ については差はない。

V. しゃ断特性理論計算

以上，新合成試験回路につき構成，試験結果などにつき述べた．第2補助しゃ断器 Sh_2 の開極時間によっては，供試器のしゃ断特性に影響を与えることも考えられるので，以下しゃ断理論的に検討を行なう。

1. 消弧理論およびアーク時定数 (17)(18)(19)(20)

しゃ断理論の発端は1920年代後半に米国の Slepian がしゃ断器のしゃ断特性は電流しゃ断後の極間の絶縁回復特性と極間に印加される電界強度との時間的競争であるとの考え方を発表して理論解析が出発した。

この考え方に立脚し多くの論文が提唱され，世界各国で研究するところとなり，現在では，一般に，電流しゃ断直後にまだ残留しているコンダクタンスをつうじてエネルギが極間に注入され，絶縁破壊が熱的に左右される熱破壊領域とこの期間を無事通り抜けた後では，電界によりエネルギが注入される誘電破壊領域に進行して行くとの見方がなされている．ここでは，Sh_2 の開極位相が問題となる熱破壊領域について述べる。

熱的破壊領域のアークの動特性を決定する最も重要な要因は，電流しゃ断直後の空間の残留コンダクタンスの時間的変化率を与えるアーク時定数 τ およびアーク空間より外部への熱の放散度合あるいはアークに対するしゃ断器の消弧力を示す N_0 であることは今日常識となっている．すなわち，電流零点近傍のエネルギの平衡を論ずることにより，しゃ断特性を求めることが可能であることを示唆するもので，これらは式としては比較的簡単に時間の一階の微分方程式として

$$\frac{dQ}{dt}=e\cdot i-N_0 \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(9)$$

として与えられる．ここに，Q は空間に蓄積されるエネルギ，$e\cdot i$ はアーク電圧，電流による入力，N_0 はアーク損失である。

とくに，ＡＢＢの場合には N_0 は次式で与えられる。

$$N_0=\mathrm{div}\, k\nabla T-\rho C_P q\nabla T+q\nabla P-S+\partial P/\partial t \cdots\cdots(10)$$

ただし，k：熱伝導率，T：温度，ρ：密度，C_P：定圧比熱，q：流速，P：圧力，S：輻射損，V：gradient である。

式(9)を解くためには，N_0 および $e\cdot i$ の状態量への依存性が解明されなければならない。

重要な状態量は温度である．すなわち，しゃ断直後の空間の諸量が時間的に変化する経過を掌握することができるならば，しゃ断特性を求めることが可能である。

しかるに，温度の関数として完全に表現することは不可能であり，また実用的ではないために，一般にはつぎの二つの考え方で近似表現されている．第一は，Lichtbogenkern（弧心）に対するもので，空間の電離は完全であり，導電度は温度に比較的依存度が少なく，エネルギの増減は断面積の変化で行なわれる領域で Cassie 形アークモデルといわれるものである．第二は，Lichtbogenberg（電弧外炎）に対するもので導電率とアーク温度の関係が exponential（指数関数）で成立する領域で mayr 形アークモデルといわれるもので，今日零点近傍の解析にはもっぱら使用されている。

mayr モデルは数式としては

$$\frac{1}{R_a}\cdot\frac{dR_a}{dt}=\frac{1}{\tau}\left(1-\frac{e\cdot i}{N_0}\right) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(11)$$

ただし，R_a はアーク抵抗である。

式(11)は，N_0, τ を与えることにより，アークの動作特性は解析されることを示している．また逆に，e, i の測定により，N_0, τ は求められる．とくに，アーク時定数は

$$\tau^{-1}=\frac{1}{R_a}\cdot\left.\frac{dR_a}{dt}\right|_{e\cdot i=0} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(12)$$

として与えられる量で，しゃ断特性を論ずる場合には最も重要な量である。

τ の圧力，しゃ断電流および電極の形状，配置への依存性を求めるために，モデル器を使用して，多くの実験を行なった．この結果 τ は

$$\tau\propto dI/dt/\sqrt{P}\cdot\left(\frac{q}{P}\cdot\nabla P\right)^{3/2} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(13)$$

であることが判明した．ここに，dI/dt はしゃ断電流傾斜，P は圧力，q は流速，∇ はgradient である．

τ はしゃ断電流に比例して大きくなり，逆に $1/\sqrt{P}$ で小さくすることができる．最も重要なことは，電極の形状および配置に大きく作用されることである．またこのことは，ABBs では常に最終ストローク以前の点で電流をしゃ断するために，τ は一般的に小さな値であること，すなわち，しゃ断特性がすぐれていることの理論的根拠ともなる．詳細は別途発表する予定である。

2. 電子計算機によるしゃ断特性の計算 (21)(22)(23)(24)

以上，重要なアーク時定数について述べた．しゃ断特性を求めるためには，回路と組合せた計算を行なわなければならない．つぎに示す三つの目的のために，新しくプログラムを開発し，ディジタル電子計算機を使用して，しゃ断特性を検討した。

第一は，従来しゃ断器のしゃ断特性の回路条件への依存性を求めるには，電流しゃ断時のＴＲＶの振幅率は2倍とし，なんら振幅率の制限はないとして解析されていた．しかし，JEC, ANSI などの験試条件としては振幅

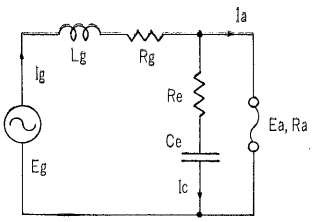
率1.5倍あるいはそれ以下として与えられるので，験試回路構成上，振幅率を抑制するために抵抗をそう入した場合電流しゃ断後のTRV初期上昇率が高くなり，しゃ断特性上苛酷となる。

第二は，近時しゃ断時間が短縮の傾向にあり，しゃ断電流に直流分が含まれている場合には，しゃ断が容易になることが考えられる。

第三は，熱破壊領域から誘電破壊領域への変化を検討することにより，新合成試験回路の第2補助しゃ断器 Sh_2 の開極位相が誘電破壊領域で行なわれるようにして，供試器への Sh_2 の影響をなくすることである。

1) 回路および計算式

第20図には計算回路を示す．E_g は発電機電圧，L_g は電源のインダクタンス，R_g は直流分の減衰を考慮するための抵抗，I_g は発電機電流，R_e はTRV振幅率調整用抵抗，C_e は再起電圧周波数調整用キャパシタンス，I_c は R_e～C_e 回路に分流する電流，I_a はアーク電流，E_a はアーク電圧，R_a はアーク抵抗である。



第20図　しゃ断特性計算回路

Fig. 20. Calculated circuit

アークの動特性式および回路を考慮した，しゃ断特性を求めるための式はつぎのようになる。

回路方程式としては，

$$\left.\begin{aligned} &\sin\left(\frac{\omega}{\omega_0}\cdot\theta+\varphi\right)=\frac{di_g}{d\theta}+r_g\cdot i_g+e_a \\ &e_a=i_a\cdot r_a \\ &\frac{de_a}{d\theta}=r_r\cdot\frac{di_c}{d\theta}+i_c \\ &i_g=i_c+i_a \end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(14)$$

となる。

アーク動特性としては

$$\frac{1}{r_a}\cdot\frac{dr_a}{d\theta}=\frac{1}{\omega_0\tau}\left(1-\frac{e_a\cdot i_a}{n_0}\right)\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(15)$$

となる．以上では式を規準化するために以下の変換を行なった．ω を商用周波角周波数として，

$\hat{I}_g=\hat{E}_g/\omega\cdot L_g$, $I_g=\hat{I}_g\cdot i_g\cdot\omega/\omega_0$, $I_c=\hat{I}_g\cdot i_c\cdot\omega/\omega_0$,

$I_a=\hat{I}_g\cdot i_a\cdot\omega/\omega_0$, $E_a=\hat{E}_a\cdot e_a$: $Z=\sqrt{L_g/C_e}$, $R_g=Z\cdot r_g$,

$R_a=Z\cdot r_a$, $R_e=Z\cdot r_r$, $\omega_0=1/\sqrt{L_gC_e}$, $d/dt=\omega_0\cdot d/d\theta$

および $N_0=n_0\cdot\hat{E}_g\cdot\hat{I}_g\cdot\omega/\omega_0$ とした。

これらの解を求めるためにはつぎのステップにより計算した。

(1) 第1ステップとして第 n 番目の電源の零点を求める．これは直流分の残り具合としゃ断特性の関係を求めるためである．短絡電流の解は判明しているのでNewton-Raphson 法により任意の精度で求めることができる。

(2) 第 n 番目の電流零点の前後 $10\times\tau$（τ：アーク時定数）の範囲でアーク現象の解析を行なった。

(3) 初期値はつぎのとおりとした。

$$\frac{dE_a}{dt}=0,\ E_a=N_0/I_a,\ I_c=0,\ \frac{dI_c}{dt}=0,\ \frac{dR_a}{dt}=0$$

これらにより，式(14)，(15)を連立して解を求めた。

2) 計　算　結　果

計算にはつぎの値を使用した。

$E_{geff}=40$ kV, $I_{geff}=30$ kA, 直流分減衰時定数＝100 ms, $\omega=2\pi\cdot60$ rad, $N_0=200$ kW, $\tau=2\ \mu$s の値で，振幅率への依存性，TRV周波数への依存性および直流分含有率への依存性につき求めた。

第4表には計算結果を示す．この結果から，TRVの振幅率が小さくなるにしたがって，しゃ断が困難になる傾向にある．これは，投入位相がいずれの場合でも振幅率 $\gamma=1.5$ でしゃ断できても，$\gamma=1.3$ とするとしゃ断失敗し，しゃ断条件はより苛酷になっていることが判明する。

第4表　計　算　結　果

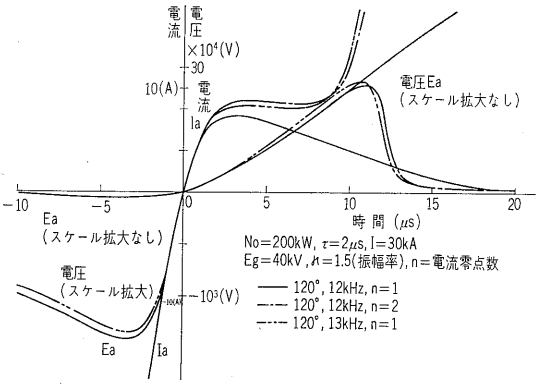
Table. 4 Calculated results

投入位相 θ	振幅率	電流零点 No.	$N_0=200$ kW, $\tau=2\ \mu$s, $E_G=40$ kV, $I_g=30$ kA 再起電圧周波数（kHz） 7	8	9	10	11	12	13	14	15
90°	1.3	1	○	×	×	×	×	—	—	—	—
	1.5	1	○	○	○	○	○	×	×	×	×
	1.8	1	○	○	○	○	○	○	○	×	×
	1.9	1	—	—	—	—	—	○	○	○	×
120°	1.3	1	○	○	○	×	×	—	—	—	—
	1.5	1	○	○	○	○	○	○	×	×	×
	1.5	2	—	—	—	—	—	×	—	—	—
60°	1.3	1	○	○	×	×	×	—	—	—	—
	1.5	1	○	○	○	○	○	×	×	×	×

注　○はしゃ断成功，×はしゃ断失敗
直流分減衰時定数＝100 ms, 電算機 FACOM 230-50

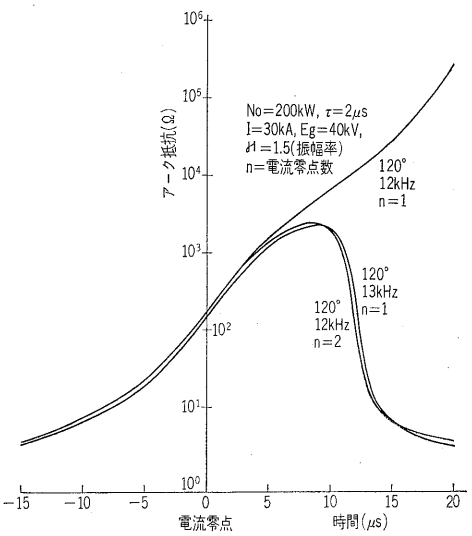
つぎに直流分の影響であるが，直流分＝零の場合に対して，投入位相を ±30° 変化した場合の条件で計算を行なった．この結果では直流分を多く含んでいる場合の方がしゃ断に成功する率が大きくなることを示している．このことは，高速度しゃ断により，短い事故時間でしゃ断した場合に予想される直流分の影響は ABBs ではノズルの閉塞がないのでしゃ断特性の面からは楽になることを示している。

第21図にはアーク電圧および電流の計算結果の波形例を示す．$\gamma=1.5$，投入位相＝120°，TRV周波数が 13



第21図　計算によるアーク電圧，電流の波形例

Fig. 21.　Calculated arc voltage and current



第22図　計算によるアーク抵抗の変化

Fig. 22.　Variation of arc resistance

kHzの場合には電流第1零点でしゃ断，12kHzの場合には電流第1零点および第2零点でしゃ断した例である．電圧波形は電流零点前後で座標の目盛を変化した。

第22図には第21図と同一条件のアーク抵抗の変化を示した。

アーク時定数は $\tau=\left(\frac{1}{R_a}\cdot\frac{dR_a}{dt}\bigg|_{e\cdot i=0}\right)^{-1}$ として与えられるが，この計算結果からも $\tau\simeq 2\,\mu s$ となり，計算は充分信頼性のあるものと考えられる．しゃ断成功の場合の抵抗値は 20 μs 後には$10^6\,\Omega$と非常に大きな値となり，いわゆる，熱破壊領域はほぼ $10\cdot\tau$ の短い時間内で終了すると考えられる。

このことから，先に述べたように，Sh_2 の開極位相として，ワイル電流しゃ断後 150 μs 以上で行なっている新合成試験回路では，Sh_2 の存在が供試験のしゃ断特性に影響をおよぼすことはまったくないと考えられる。

これらの考えは，今回ＢＰＡに納入した 550 kV ABBs の開発にも適用され，充分に目的を達成することができた。

VI. む　す　び

4パラメータ表示によるしゃ断条件に対処するために新しく合成試験法を開発し，これをＢＰＡ向け同期式1サイクル空気しゃ断器に適用した結果つぎの結論が得られた。

1) 新合成試験回路は第2補助しゃ断器として同期式1サイクル空気しゃ断器を使用することによって達成できた。

2) 新合成試験回路には第3電源用変圧器として，比較的中容量でタップ20kV/42/58/85kVを設ければ良い．(発電機電圧20kVとしたとき)

3) 550kV，50kA 4点切りを考慮した場合でも，ワイル電源用コンデンサ容量 C_V は 473 kJ でよい。

4) ＢＰＡ向け同期式1サイクルしゃ断器は JEC, ANSI および ＩＥＣのいずれも満足している。

5) 第2補助しゃ断器の開極位相はワイル電流しゃ断後 150 μs 以上であるため，供試器の熱破壊領域でのしゃ断性能に影響を与えることはない。

6) このことはアークの理論解析を行なった結果からも推測される。

7) 新合成試験回路のＴＲＶのばらつきは6％以内であった。

参考文献

(1) 大山ほか：富士時報 **41** No. 8 (昭43年)
(2) IEC 17 A (CO) 94, March 1972
(3) IEEE : pp. 64-474
(4) 中村ほか：昭46年電気東京支部大会 No. 184
(5) 中村ほか：昭47年電気全国大会 No. 890
(6) 西條ほか：昭47年電気シンポジウム S15-4
(7) J.G.P. Anderson ほか：P.I.E.E. Vol. 113, No. 4, April 1966
(8) 超高研：研究報告書 (6802), 1968
(9) 藤井ほか：昭47年電気全国大会 No. 891
(10) 日立：超高研等価試験設備委員会 No. 107
(11) 中村ほか：昭46年電気全国大会 No. 759
(12) T. Ushio ほか：I.E.E.E. Conference Record p. 33～41, 1971
(13) R. Ballada ほか：I.E.E.E. Conference Record, p. 111～119 1971
(14) E. Maury ほか：I.E.E.E. Conference Record, p. 181～188 1971
(15) 中村ほか：昭40年電気連合大会 No. 906
(16) Kopplin ほか：CIGRE Rep. No. 13-05, 1970
(17) A.M. Cassie : GIGRE No. 102, 1939
(18) O. Mayr : Archiv für Elektrotechnik 37, 1943
(19) B.W. Swanson ほか：Tr. I.E.E.E, Vol. PAS-90, No. 3, 1971
(20) 清国ほか：富士時報 **40** No. 7 (昭42)
(21) H. Kopplin : Archiv für Elektrotechnik 47, 1962
(22) E. Schmitd : VDE-Velag (Berlin) 1958
(23) 等々力：電気試験所研究報告 第651号
(24) 中西ほか：昭44 連大 No. 770

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。