しゃ断器のアーク延長等価試験法

研究部電力研究課　鈴　木　　誠

Synthetic Test Method of Arc Prolongation for Circuit Breaker

By Makoto Suzuki
(Electrical Power Researching Sect., Research Dep't.)

Synopsis

For the synthetic test of expansion circuit breaker, especially for extra high voltage, it is desirable to adopt an artificial arc prolongation method besides an ordinary one of combining high current and high voltage, because not only the characteristics of insulation recovery between poles but also the mechanical strength of the construction parts can be tested by this method. Necessary stages of current waves to be prolonged can be obtained by adding corresponding numbers of units of device for half wave prolongation. In this case an interlocking device shall be provided between each circuit to get adequate time delay for condenser discharge of auxiliary source. However, there is a limit for arc duration that the ratio of maximum arc voltage to the current source voltage is less than 0.3～0.4.

I. まえがき

電力需要の増大に伴い，逐次送電々力も増加の一途をたどり，したがって，しゃ断器の容量の増大化とともに，その方式にも新しいものが続出し，その進歩発達は実にめざましいものがある．それと同時に，その試験方法についても，研究が進められてきた．しかるに，しゃ断容量は増大するが，試験設備は必ずしもこれに歩調を合わせることはできない．したがって，当然小さい設備容量を以って大容量を推定する等価試験が発達せざるを得なくなる。

等価試験法については種々な案が公にされ，実用されているが，従来発表されてきた方式に共通な欠点とするところはしゃ断時におけるアークを人工的に制御することができないことである．特にアーク時間が比較的長いしゃ断器においては，ぜひとも本方式の併用が必要であってこれなくしては確実なしゃ断容量判定はむずかしい．半波を強制的に延長させる方法は CIGRE に発表されたが，その概略の公表に過ぎず，詳細な検討結果ではなかった。

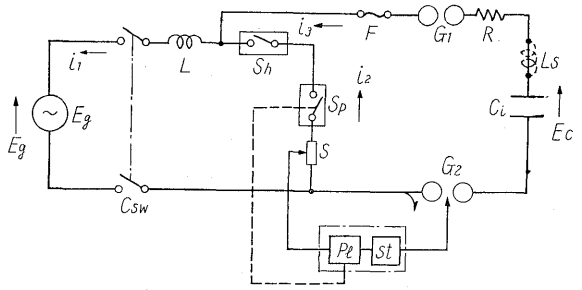
筆者は，等価試験の研究にあたってアーク延長法の併用につき長きにわたり考究中であったが，半波延長はいうに及ばず，2半波延長，ひいては数半波延長の可能性も確認し得るに至った．しかるに最近しゃ断器に要求される責務として，アーク時間は極力短いことを要求される段階にある．ゆえにアーク時間を強制的に2半波以上も延長することはあまり意味がなく，もし延長する必要に立ち至った場合であっても，その延長し得る条件さえ明らかであれば良く，この点に注目し，1半波，2半波延長の方式およびそれらの結果から，延長させ得る限界条件を目的として研究を進め，その目的を達成することができた．たとえば，定格電圧，定格しゃ断電流にて 1.0～ ではしゃ断できないが 1.5～ にアークが延びれば確実にしゃ断可能である場合があり，このようなしゃ断器を低電圧電流源を用いて試験すれば 1.0～ にてしゃ断ができる．しかして等価試験にて，しゃ断直後に規定の再起電圧を加圧すれば極間絶縁は破壊してしまう．この時 1.0～ にてしゃ断せずに，人工的にさらに半波延ばし 1.5～ にしてから規定再起電圧を印加すれば極間絶縁は破壊せず，所要の目的は達し得られるわけである。

アーク延長により，しゃ断電流の変歪などを生じない範囲内においては，前述のごとき比較も可能であるが，一般に大電流しゃ断の等価試験にてアーク延長を行なえば電流の変歪などは避け得ない．ここで考え方を変えてみることにする．しゃ断器の容量判定の場合にアークエネルギーが同一であれば，ストローク一定にて，機械的強度などの比較は充分に達成されるはずである．ゆえにアーク延長を行ないアークエネルギーの供給を充分に行なった時には，実負荷試験で同様なアークエネルギーが発生した場合と全く同等な機械的強度検証が可能となる．したがってアーク延長を行なうことによりこの面においては等価倍率を一段と増すことができる。

II. 半波延長法

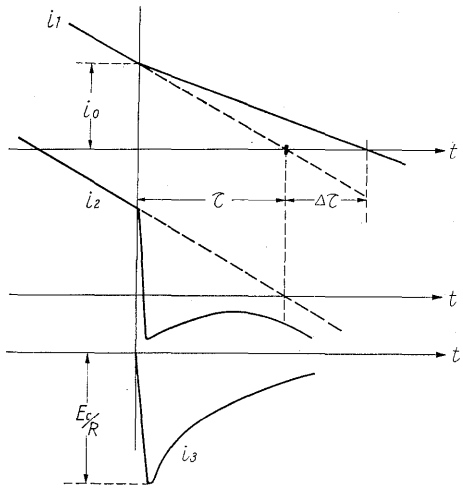
延長法の試験回路は第1図のとおりで，しゃ断電流の

最終半波の零値寸前を同期パルス発生装置にて検出し，しゃ断電流と逆方向の衝撃電流を供試器に流し，急激にしゃ断器を通る電流を反転させて，アーク時間をさらに半波延長させるものである。



E_g：短絡電流源発電機
E_c：補助電源電圧
C_{sw}：投入用スイッチ
L：短絡電流調整用リアクトル
S_h：直列補助しゃ断器
SP：被試験器
SH：短絡電流測定用分流器
F：ヒューズ
G_1：主ギャップ
G_2：起動用ギャップ
R：直列抵抗
L_s：漂遊リアクタンス
C_i：インパルス電流発生用蓄電器
S_t：C_i放電用パルス発生器
P_t：S_t起動用同期パルス発生器
i_1：発電機電流
i_2：しゃ断電流
i_3：補助電流

第1図 半波延長試験回路
Fig. 1. Test circuit for half wave prolongation



第2図 半波延長時の電流零点近傍
Fig. 2. Near current zero at half wave prolongation

補助電源は主電流 i_1 がゼロになる寸前に放電させる．その各部の電流変化は第2図に示す．破線は補助電源のない時の i_1, i_2 の電流変化である．i_1 は補助電源がそう入されることにより，ゼロになるまでの時間が $\Delta\tau$ だけ延長されるが，これは発電機電流が補助電源回路へも流入するからであって，しゃ断電流 i_2 はそのままの時間 τ でゼロとなる．ゆえに被試験器の電流零点の時は直列回路補助しゃ断器 S_h の電流 i_1 はゼロにならず，S_h, S_p 両者にて電流をしゃ断することにならない．補助電源の回路構成は放電ギャップ，3点ギャップ，ギャップ保護用ヒューズ，制限抵抗 R および電源用コンデンサ C_i である．ヒューズは C_i の放電々流だけで気化し，消弧能力のない G_1, G_2 を通じて C_i に発電機電流が流れ込むのを防止しておる．R は充分 $E_c/R>i_0$ を満足する値であって，しかも C_i とともに充分 $RC_i>\tau$ なるごとく選んでいる．E_c は電流源に侵入しても大事にならない程度の電圧に押える。

$i_2=I\sin\omega t$ において $t=\tau\doteqdot 0$ の時 $i_2=i_0=I\omega\tau$

$\therefore \omega\tau I<E_c/R$ また $E_c\doteqdot E_g$ にすれば発電機の絶縁がおびやかされることはない．$T=R\,C_i$ は大きいほどよいが，C_i が大き過ぎて不経済なので $T\doteqdot 2\tau$ にすることにした．以上の関係を考慮して計算してみると第1表のようになる。

しかして τ については

$$E_g+E_c=L\frac{di}{dt}=L\cdot i_0/\tau+\Delta\tau$$

$$\therefore \tau+\Delta\tau=i_0\cdot L/E_g+E_c$$

τ はできるだけ小さくする方が R, C_i, E_c が小さくてすむのであるが $\tau\doteqdot 0$ にすると，しゃ断器の絶縁回復時に C_i を放電させることになり，電流源回路に過電圧が侵入する恐れを生ずる．τ が大きいと C_i, R を非常に

第1表 $E_c=20$kV, $E_c/R=\omega\tau\ I$, の時の R, C_i の値
Table 1. R and C_i at $E_c=20$ kV , $E_c/R=\omega\tau\ I$

I	$\tau=1{,}000\ \mu s$			$\tau=500\ \mu s$			$\tau=250\ \mu s$		
	$\omega\tau=0.314$		$T=2\tau$	$\omega\tau=0.157$		$T=2\tau$	$\omega\tau=0.079$		$T=2\tau$
	$\omega\tau\ I$	R	C_i	$\omega\tau\ I$	R	C_i	$\omega\tau\ I$	R	C_i
$\sqrt{2}\cdot 20$ kA $=28.3$	8,900A	2.2Ω	910 μF	4,430A	4.5Ω	222 μF	2,230A	9Ω	55 μF
$\sqrt{2}\cdot 15$ $=21.3$	6,700	3.0	665	3,360	6.0	166	1,670	12	41.5
$\sqrt{2}\cdot 10$ $=14.1$	4,450	4.5	445	2,220	9.0	111	1,120	18	28
$\sqrt{2}\cdot 5$ $=7.05$	2,250	9.0	220	1,110	18.0	55	555	36	14

上表 I, τ, の各条件下にて R は表中の値より小なることを要し，C_i は逆に大なることを要す。

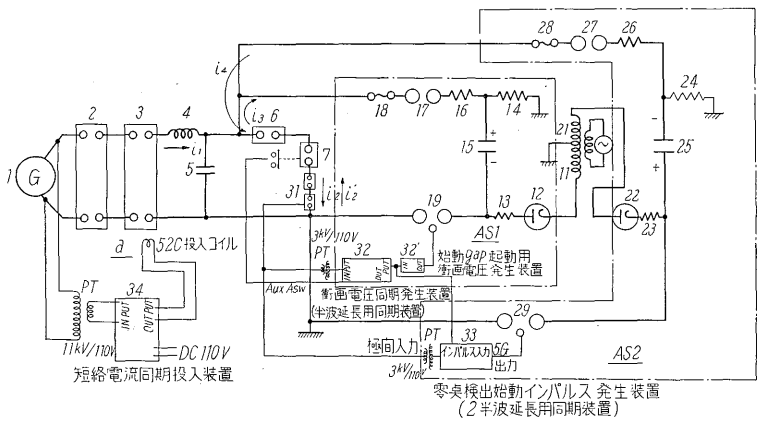
大きくしなければならないことになり不利である．τ の制御は S_p の補助接点から 1.0～ の範囲で時間の粗制御を行ない，さらに分流器からの信号を電圧にし，その傾斜と絶対値によって精密な制御を行なう．この補助電源は，しゃ断電流の最終半波の零値寸前を補助電源制御装置にて検出し，しゃ断電流と逆方向の衝撃電流を供試器に流すことによって S_p を通る電流を急激に反転させそのまま補助電源回路電流を主電流に引き継いで，アーク時間を延長させるものである。

III. 2半波延長法

IIにおいて1半波延長法を論じてきたが，次にアーク時間をさらに1半波延長し，つごう2半波延長させることについて記述する。

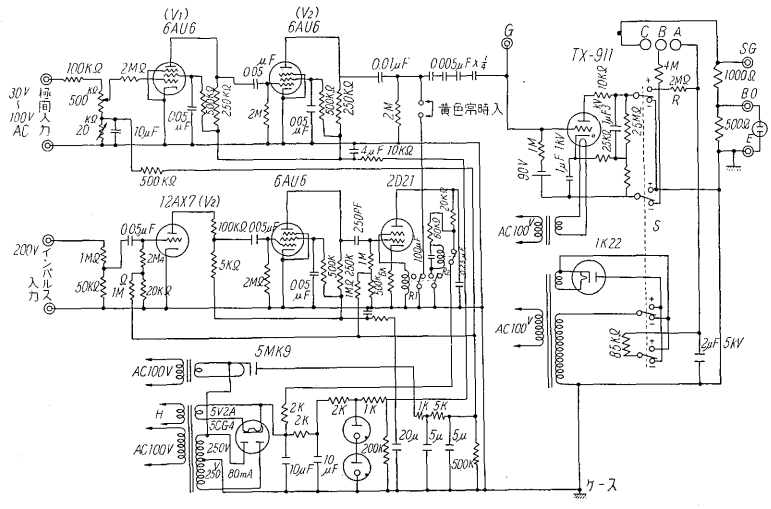
等価試験時絶縁回復の検証および消弧室のしゃ断時における機械的強度の確認等を行なう場合強制的に半波延長したのみでは不充分な場合がでてくる．そこでアーク時間を強制的に2半波延長することも必要となるのであるが，原理的には半波延長時の補助電源装置をさらに1段追加し，適当なる同期装置にて1段目と2段目の補助電源装置とを連結したものである．第3図は試験装置の接続図を示し，第4図はロック装置および同期装置の接続図を示し，第5図はこれらの動作を示す説明図である．第3図において $\underline{a}$ は電流源 A_{s1}，A_{s2} はともにアーク時間を延長するために付加された補助電源であり，A_{s1} は1回目の半波延長用であり，A_{s2} は2回目の半波延長用である。

電流源 $\underline{a}$ は短絡発電機 1，保護しゃ断器 2，投入用スイッチ 3，電流制限リアクトル 4，発電機保護用蓄電器 5，補助しゃ断器6からなり，供試しゃ断器7に発電機電流 i_1 を供給する．アーク時間延長用補助電源 A_{s1} および A_{s2} は直流電源 11，12，13，14 および 21，22，23，24，蓄電器 15，25，電流調整用抵抗 16，26，放電ギャップ 17，27，保護用ヒューズ 18，28，3点放電ギャップ 19，29 から成り補助しゃ断器6を経て供試器7に接続されている．なお 31 に供試しゃ断器のしゃ断電流を検出する分流器があり 32 はこの分流器と3点放電ギャップ19 の間にそう入された第1回目半波延長用同期装



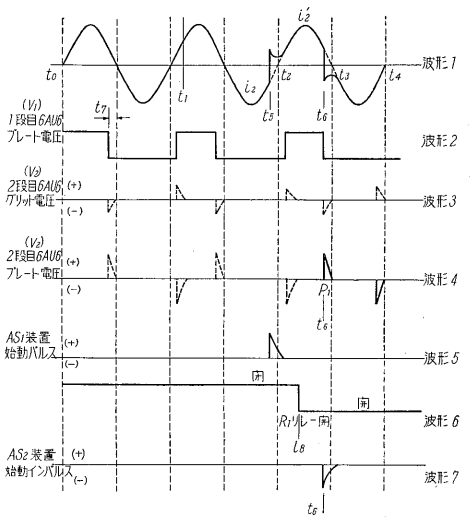
第3図　2半波延長試験回路

Fig. 3. Test circuit for half wave prolongation



第4図　零点検出，始動インパルス発生装置結線図

Fig. 4. Connection diagram of current zero inspection device and impulse generator



第5図　2半波延長同期装置（零点検出始動インパルス発生装置）動作説明図

Fig. 5. Operating explanation of synchronizing device for 2 half waves prolongation

置で，補助電源装置 A_{s1} の放電開始を制御する．または，同様に分流器 31 と，3 点放電ギャップ 29 との間にそう入された第2回目半波延長用同期制御装置で，31 よりのしゃ断電流と同期制御装置 32 によって制御され，補助電源装置 A_{s2} の放電開始を制御する．今第5図の時刻 t_0 において投入用スイッチ 3を投入すると交流電源1より保護しゃ断器 2，投入スイッチ 3，電流制限用リアクトル 4，補助しゃ断器6から，供試しゃ断器7を介して交流大電流 i_1 が流れる．時刻 t_1 において補助しゃ断器 6，供試しゃ断器7が開離を始めると，しゃ断器の極間はアークでつながれる．電源の電圧は比較的低いから，このアークは零点通過時，たとえば時刻 t_2 において消弧する．しかしながら t_2 の寸前，時刻 t_5 し，いて分流器31によって補助電源同期装置32が動作にお3点放電ギャップ 19 に始動パルスを与え，補助電源 A_{s1} を動作させ，発電機電流 i_1 と逆向きのインパルス電流 i_3 を A_{S1} 回路素子 14，16，17，18 を介して補助しゃ断器 6，供試しゃ断器7に供給し，しゃ断電流 i_2 を急激に反転させ，時刻 t_3 において所定の絶縁回復が得られない場合はさらにアーク時間を延長する必要を生じる．この時は，分流器 31 のしゃ断電流を同期制御装置 33 にそう入する．同期制御装置結線図を第4図に示す．第4図において分流器 31 の入力を変圧器を介して 30～ 10V に昇圧し，入力電圧，すなわちしゃ断電流と逆位相の電圧を極間入力端子に加え，100 kΩ および 500 kΩ の抵抗器を変化させ入力電圧の大きさを調整しこれを1段目の真空管6 AU 6 のグリッドに加え，さらに 20 kΩ の可変抵抗器により 6 AU 6 のバイアス電圧を調整することにより，第5図に示すごとく，しゃ断電流 i_2 より時刻 t_7 だけ位相の進んだ矩形波波形 2を得る．これは蓄電器 0.05 μF と抵抗器 2 MΩ により微分されたパルス波形3を得る．さらに2段目の真空管 6 AU 6 で増幅し反転したパルス波形 4を得る．また一方時刻 t_5 において同期制御装置 32 よりのパルス波形5を第4図のインパルス入力端子にそう入すると，真空管 12 AX 7 6 AU 6を介して真空管 2 D 21 が動作し，高速度継電器 R_1 が第5図の時刻 t_8 に，波形6のごとく開となり，これ以後第4図のサイラトロン放電管 TX 911 のグリッドが開放され，第5図において TX 911 グリッド開放後の第1回目のパルス波形4の P_1 により TX 911 が動作し，インパルス起動電圧7を得る．したがって時刻 t_6 までに補助電源装置 A_{s1} が動作した時にも A_{s2} は動作しない．波形7が時刻 t_6 に始動されて，初めて A_{s2} 回路は起動する．すなわち波形7により同期制御装置 33 より始動ギャップ 29 を起動し，蓄電器 25 より 26，27，28，を介し，補助しゃ断器 6，供試しゃ断器7に時刻 t_6 においてしゃ断電流 i_2' と逆向きのインパルス電流を流し，交流大電流を急激に反転させ，引き続いて第2回目の半波電流を時刻 t_4 まで続弧させる．よって本来ならば時刻 t_2 でアークが終了すべきを A_{s1} 装置にて時刻 t_3 まで延長でき，さらに A_{s2} 装置にて時刻 t_4 までアークを延長できる．2半波延長試験にあたって，実験上および調整上の問題点はⅡの半波延長時における諸問題と同様なことはもちろんであるが，アーク長が増大するのでアーク電圧が増加するため，Ⅱの理由でますます延長しにくくなってくる．また第3図において補助電源装置のギャップ 17 の放電によりギャップ 27 の誘発もでてくる．これは始動信号は，ロック装置によりロックされて印加されていなくても起こる問題で，原因としてはアースリードのインダクタンスにより，1段目のギャップ 17 が起動しサージ電流が流れる時の $L\,di/dt$ でギャップ 29 の接地側が浮き上がるためであり，19 ギャップと 29 ギャップの接地側を共通にして，しゃ断器の接地側に接続する時に生じる．したがってこれは第3図のごとくギャップ 19 とギャップ 29 の接地側リードを別々に，しゃ断器接地側に接続することにより解決できた。

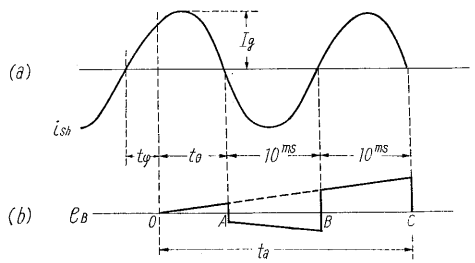
IV. 極間距離とアークエネルギーの関係

多くの試験結果からアーク時間，すなわち極間距離とエネルギーの関係（l_B と kWs の関係）を整理すると

1）消弧室が開かないうち

2) 消弧室が開口しアークが噴射した時

とで異なるはずであり前者の場合は，e_B が l_B に比例するとして理論的取り扱いにて大差ないものと考えられるが，開口してからはいかになるであろうかが問題である．多くの試験結果をプロットした結果から kWs$\doteqdot K I_B^3$ と見ることができる．ただし，K は開極の初期条件および i_{sh} にて異なる定数である．アーク噴射が特に強力に行なわれた時などは，指数は3以上にもなるようであるが大体の推定の kWs の算出には遠くない結果が得られる．しかして，強性的にアーク時間延長した場合も良く一致しているので，絶縁回復特性を得る上で強制的アーク延長を行なってもなんら差支えないことがうなづける．本件については後述する．まず開口する前，あるいはしゃ断電流が小さく，消弧室が開口動作をしない場合について考えて見るに，従来一般にいわれている，アーク電圧は極間距離に比例するという推定のもとに l_B と kWs の関係を求めて見る．一般にアーク電圧 e_B とアーク電流，すなわちしゃ断電流 i_{sh} とでアークエネルギーを表わすと $\int_0^{ta} e_B \cdot i_{sh}\, dt$ である。



第6図　短絡電流と電弧電圧

（a） 短絡電流　（b） 電弧電圧

Fig. 6. Short-circuit current and arc voltage

アーク電力は i_{sh} の瞬時値と e_B の瞬時値との積であり，エネルギーはこの総和である．ゆえにアークエネルギーE kWsは，OA 区間のエネルギー，AB 区間，BC 区間おのおのの電力の総和を求めればよい。

OA 区間のみを考えると

$$E_{0A}=\int_0^{t_\theta} I_g \sin(\omega t+\varphi)\cdot \alpha t\cdot dt$$

AB 区間について考えると

$$E_{AB}=\int_0^{10} I_g \sin \omega t\cdot(\alpha t_\theta+\alpha t)\, dt$$

BC 区間については同様に

$$E_{BC}=\int_0^{10} I_g \sin \omega t\cdot(\alpha t_\theta+\alpha\cdot 10+\alpha t)\, dt$$

以下同様にして電流半波ごとにエネルギーは

$$\int_0^{10} I_g \sin \omega t\cdot(\alpha t_\theta+20\,\alpha+\alpha t)\, dt$$

$$\int_0^{10} I_g \sin \omega t\cdot(\alpha t_\theta+30\,\alpha+\alpha t)\, dt$$

ゆえに求めるアークエネルギー E は以上の総和であるから

$$E=\int_0^{t_\theta} \alpha I_g\cdot t \sin(\omega t+\varphi)\, dt$$
$$+\int_0^{10} I_g\left[n\alpha t_\theta+10\times\frac{(n-1)n}{2}\alpha+n\alpha t\right]$$
$$\doteqdot 2\frac{\alpha}{\omega} I_g(5n^2+t_\theta n)$$

ここに　α：アーク電圧の上昇割合

ω：$2\pi f=100\pi$

n：$(t_a-t_\theta)/10$ ms

今アーク長をl_B(mm)，しゃ断器のしゃ断速度をv(m/ms)とすれば $l_B=v\,t_a$ ゆえに $n=\dfrac{\left(\dfrac{l_B}{v}-t\right)}{10}$

$$\therefore E=2\cdot\frac{\alpha}{\omega}\cdot I_g\left[\frac{\left(\dfrac{l_B}{v}-t_\theta\right)^2}{20}+\frac{\left(\dfrac{l_B}{v}-t_\theta\right)t_\theta}{10}\right]$$
$$=\frac{1}{10}\frac{\alpha}{\omega} I_g\left[\left(\frac{l_B}{v}\right)^2-t_\theta^2\right]$$

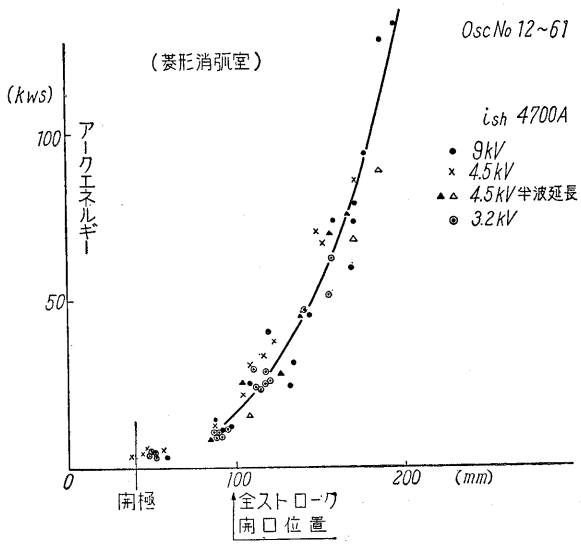
しゃ断器の一例について

$\alpha=40$ V/cm, $\omega=2\pi f$, $l_B=50$ mm, $v=3$ mm/ms

とすれば　$E=\dfrac{1}{10}\times\dfrac{4}{314}\times\dfrac{2{,}500}{9}\times i_{sh}$

ただし　$t_0\doteqdot 0$ とする．$i_{sh}=10$ kA ならば $E=5$ kWs，このようにして求めた値は，開口前のエネルギーの測定値とよく一致する。

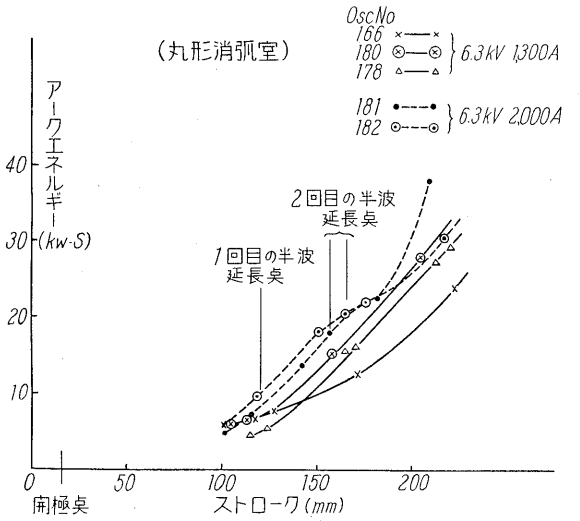
以上のように小電流しゃ断にて t_a が比較的長く，開口しない場合には $E\propto l_B^2$ と考えてもさしつかえないことがわかる．大電流しゃ断にて完全開口のときは当然状況が違うのであって，アークは開口により外部へ，ひどく



第7図　ストロークとアークエネルギーの関係

Fig. 7. Relation between arc energy and stroke

引き延ばされるに相違ない．消弧室の異なる2種類のものについての試験結果から l_B と kWs の関係を描いてみると，第7図のようになり，だいたい kWs∝ l_B^3 となる．ゆえに強制的にアーク延長を試みた場合でもアークエネルギーの値が同様関係にあるならば，エネルギー的にはアーク延長を行なっても，しゃ断後の絶縁回復特性に及ぼす影響はなんら異なることがないはずである．第7図の中で△印はアーク延長を行なった時のもので，やはり kWs∝l_B^3 の関係を保っている。



第8図 強制的に半波延長させたもののアークエネルギーとストロークの関係

Fig. 8. Relation between arc energy and stroke at 2 half waves prolongation

V. アーク延長し得る電流源の条件

アークを人工的に延ばすのは消弧寸前に逆方向にパルス電流を通じて，急激に短絡電流の極性を反転させる方法であることは，IV章に説明したとおりで，したがってその時の必要条件もまたおのずから明瞭である．しかし完全なパルス電流が加えられたにかかわらずアークが延長されない場合がある．これはパルス電源の諸条件が完全であるなら相手である短絡電流源が問題である．それは電源電圧と電流に影響する電流源容量である。

1) アークを延長させる場合，要求されるアーク時間を保持し得るアークエネルギーを供給できるかどうか。

2) アーク延長により当然大きくなるアーク電圧を供給できるかどうか。

3) 急激にアーク電圧が大になるために電流にひずみを生じる．したがって変歪した電流零点とパルス電流加圧の時との時差の狂い．以上3点である。

(1) アークエネルギー供給の可否

短絡後の回路に消費されるエネルギーは，短絡寸前に駆動機の入力をしゃ断するため発電機蓄積エネルギーの放出によるもので，このために発電機の速度は低下してゆく．速度の低下は短絡電流の周波数の変化となってあらわれるために，これが規定の変化内に入っていれば試験としては満足である．一方蓄積エネルギーは，蓄勢輪効果によるもので，すなわち GD^2 によって決定されるゆえに供給されるしゃ断までの総エネルギーは，発電機 GD^2 とスピードの低下により決定される．一方しゃ断器の電弧時間延長による所要エネルギーの推定は前記のように，l_B の3乗に比例するとしてあらかじめ算出できる．今回の実験に使用した 10 MVA 発電機の GD^2 から供給し得るエネルギーの概算をあたると次のとおりである。

短絡発電機回転体の直径 $D=0.7$ m

短絡発電機回転体の重量 $G=6{,}460$ kg

$\therefore GD^2=6.46\times0.7^2/2=1{,}580$ kgm² (回転体中空でない場合)

回転体エネルギー $=\frac{1}{2}\,mV^2$

$=\frac{1}{2}\cdot G/g\ (\pi DN/60)^2$

ただし $N=$rpm

$=1/2\times GD^2/9.8\times\pi^2N^2/3{,}600$

$=1/2\times1580\times\pi^2\times2{,}900^2/9.8\times3{,}600$

$=1{,}860\times10^3$ kgm²/s

$=1{,}860/102\times10^3$ ただし 1 kW=102 kgm/s

$=18.2\times10^3$ kWs

ゆえに 1% の速度変化にて放出されるエネルギーは

$$18.2\times10^3\left[1-\left(\frac{99}{100}\right)^2\right]=364\ \text{kWs}$$

0.5% の速度変化では

$$18.2\times10^3\left[1-\left(\frac{99.5}{100}\right)^2\right]=180\ \text{kWs}$$

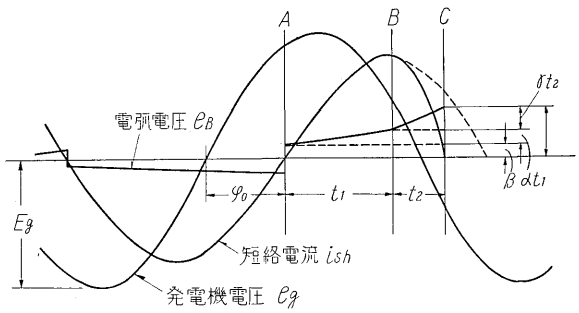
(2) アーク電圧を上回る充分な発電機電圧であること

すなわち回路の総インピーダンス電圧降下と，アーク電圧の総和より高い電圧を必要とすることは容易にうなづけることであるが，アークのダイナミックな状態などを考慮し，かつ短絡電流の変歪をおこさない充分な電圧であることが必要である．それにはアーク電圧の変化の状況が問題であり，これと回路定数との間にはなんらかの関係はないであろうか．たとえば 1.0～ のアーク時間のものを 1.5～ または 2.0～ と延長させ得るかどうかということになる．筆者は理論的考察を加えてその結果をもとに諸データを解析した．その結果はだいたい

$$\frac{\text{アーク電圧最大値}}{\text{発電機電圧最大値}}\leqq 0.3\sim0.4$$

でなければ人工的にアーク延長はできないことが判明し

た．まず理論的考察を行なう方法として，アークを強制的に延長させようとする電流零点を原点として関係式を導いてみる．アーク電圧の変化の状態は種々であるが一応第9図のように半波の間を AB, BC の2区間に分けて，おのおの上昇率の異なる2直線に置換する。



第9図　発電機電圧，短絡電流アーク電圧の関係
Fig. 9. Generator voltage, short-circuit current and arc voltage

$$\left.\begin{array}{ll} AB \text{ 間の電弧電圧} & \alpha t+\beta \\ BC \quad \text{〃} & \gamma t+\delta \end{array}\right\} \text{ より } \delta=\alpha t_1+\beta \cdots\cdots\cdots(1)$$

AB 間の電流を表わす式は(2)を解いた(3)式である。

$$L\frac{di_1}{dt}+\gamma i_1+(\alpha t+\beta)=E_g \sin(\omega t+\varphi_0) \cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

$$i_1=\frac{1}{r}\left(\frac{r}{Z}E_g \sin \omega t-\alpha t-\beta+\frac{\alpha L}{r}\right)+\frac{1}{r}\left(\beta-\frac{\alpha L}{r}\right)\varepsilon^{-\frac{r}{L}t} \cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

同様にして BC 間の電流 i_2 は(4)式より(5)式を得る。

$$L\frac{di_2}{dt}+ri_2+(\gamma t+\delta)=E_g \sin(\omega t+\omega t_1+\varphi_0) \quad \cdots(4)$$

$$i_2=\frac{1}{r}\left[\left\{\frac{r}{Z}E_g \sin(\omega t+\omega t_1)-\gamma t-\delta+\frac{\gamma L}{r}\right\}+\left\{\frac{L}{r}(\alpha-\gamma)-\alpha t_1-\beta+\delta+\left(\beta-\frac{\alpha L}{r}\right)\varepsilon^{-\frac{r}{L}t_1}\right\}\varepsilon^{-\frac{r}{L}t}\right] \cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

ただし(4)式の解 i_2 は $t=0$ にて i_{20} とし

$$i_{20}=\frac{1}{r}\left(\frac{r}{Z}E_g \sin \omega t_1-\alpha t_1-\beta+\frac{\alpha L}{r}\right)+\frac{1}{r}\left(\beta-\frac{\alpha L}{r}\right)\varepsilon^{-\frac{r}{L}t1}$$

B にて電流は最大であるから

$$\frac{di_1}{dt}_{(t=t1)}=\frac{1}{r}\left(\frac{\omega r}{Z}E_g \cos \omega t_1-\alpha\right)+\frac{1}{r}\left(-\frac{r}{L}\right)\left(\beta-\frac{\alpha L}{r}\right)\varepsilon^{-\frac{r}{L}t1}=0$$

$$\therefore \frac{\omega}{Z}E_g \cos \omega t_1-\frac{\alpha}{r}\left(1-\varepsilon^{-\frac{r}{L}t1}\right)-\frac{\beta}{L}\varepsilon^{-\frac{r}{L}t1}=0$$

$$E^{-\frac{r}{L}} \doteqdot 1 \qquad \therefore \frac{\omega E_g}{Z}\cos \omega t_1=\frac{\beta}{L}$$

$$\cos \omega t_1=\frac{\beta}{L}\cdot\frac{Z}{\omega E_g} \doteqdot \frac{\beta}{E_g} \cdots\cdots\cdots\cdots(6)$$

また(5)式において $\varepsilon^{-\frac{r}{L}t}=1$ であるから

$$i_2=\frac{1}{r}\left[\frac{rE_g}{Z}\sin(\omega t+\omega t_1)-\gamma t-\alpha t_1\right]$$

$$=\frac{E_g}{Z}\sin(\omega t+\omega t_1)-\frac{\gamma t+\alpha t_1}{r} \qquad t=t_2 \text{ にて } i_2=0$$

$$\therefore \sin(\omega t_1+\omega t_2)=\frac{\alpha t_1+\gamma t_2}{r}\cdot\frac{Z}{E_g}$$

$$\sin(\omega t_1+\omega t_2)=\frac{\alpha t_1+\gamma t_2}{E_g}\cdot\frac{Z}{r}$$

$\sin(\omega t_1+\omega t_2)$ の正の値をとると $\sin(\omega t_1+\omega t_2) \leqq 1$

$$\therefore \frac{\alpha t_1+\gamma t_2}{E_g}\cdot\frac{Z}{r} \leqq 1 \cdots\cdots\cdots\cdots(7)$$

$$\frac{\alpha t_1+\gamma t_2}{\gamma} \leqq \text{ish} \cdots\cdots\cdots\cdots(8)$$

また $\dfrac{\alpha t_1+\gamma t_2+\beta}{E_g}=k$ とすると(8)式に代入し

$$k \leqq \frac{\beta}{E_g}+\frac{r}{Z} \cdots\cdots\cdots\cdots(9)$$

もしまた α あるいは γ が非常に大きくなり(7)式が成立しないときは，i_{sh} が規定の値で存在することはできない．すなわちアークは持続不可能となる．いい換えれば(9)式が成立するような $\gamma t_2+\delta/E_g$ の適当な値の時のみ i_{sh} が持続され得る．(6)，(9)式における β/E_g はアークを延ばす時の電流零点におけるアーク電圧と，発電機誘起電圧最大値との比であり r/Z は短絡頭初の短絡力率である．延長した電流波形のひずみの最大値までの時間 t_1 は $t_1=\dfrac{1}{\omega}\cos^{-1}\dfrac{\beta}{E_g}$ で示される．短絡電流 i_{sh} 消弧寸前の傾斜とパルス電流傾斜について考えてみると i_2 の零点付近は近似的に(5)式より

$$i_2=\frac{E_g}{Z}\sin(\omega t+\omega t_1)-\frac{\gamma}{r}t-\frac{\alpha}{\gamma}t_1 \cdots\cdots(10)$$

i_2 の零点の付近の傾斜は

$$\frac{di_2}{dt}=\frac{\omega E_g}{Z}\cos(\omega t_1+\omega t_2)-\frac{\gamma}{r} \cdots\cdots\cdots\cdots(11)$$

また印加するパルス電流の零点付近の傾斜は

$$\frac{di_c}{dt}=\frac{E_c}{L_s} \cdots\cdots\cdots\cdots(12)$$

ここに i_c＝パルス放電電流，E_c＝パルス回路充電電圧，L_s＝パルス回路のインダクタンス，アークが延長可能となるためには

$$\frac{di_c}{dt}>\frac{di_2}{dt} \cdots\cdots\cdots\cdots(13)$$

$$\therefore \frac{\omega E_g}{Z}\cos(\omega t_1+\omega t_2)-\frac{\gamma}{r}<\frac{E_c}{L_s}$$

$$\frac{\gamma}{r}>\frac{r\omega E_g}{Z}\cos(\omega t_1+\omega t_2)-\frac{r}{L_s}E_c \cdots\cdots\cdots(14)$$

または $\gamma>\frac{r\omega E_g}{Z}\cos(\omega t_1+\omega t_2)-\frac{r}{L_s}E_c$ ……(15)

アークがしぼられないときは，$\omega t_1+\omega t_2 \fallingdotseq 180°$

$$\therefore \frac{\gamma}{r}>-\frac{E_g}{L}-\frac{E_c}{L_s}$$

発電機を保護することから一般に $E_c \leqq E_g$

$$\therefore \frac{\gamma}{r}>-\left(\frac{1}{L}+\frac{1}{L_s}\right)E_c \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(16)$$

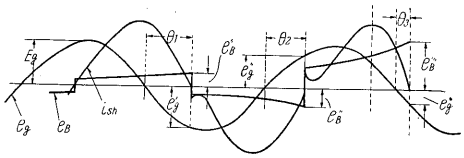
またアークがしぼられたとき $\omega t_1+\omega t_2 \fallingdotseq 90°$

$$\therefore \frac{\gamma}{r}>-\frac{1}{L_s}E_c$$

左辺はアーク電圧の傾斜方向で右辺はパルス電流の傾斜方向ゆえに相反している．ゆえに同じ向きに置き換えると

$$\frac{\gamma}{r}<\frac{E_c}{L_s} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(17)$$

という関係を要する．以上の考えの方針にしたがって単極モデルしゃ断器の試験データを整理してみる．第2表において No. 22～No. 151 に示されるように第1波は強制的に延ばし得たが，第2波は延ばし得ない．これは



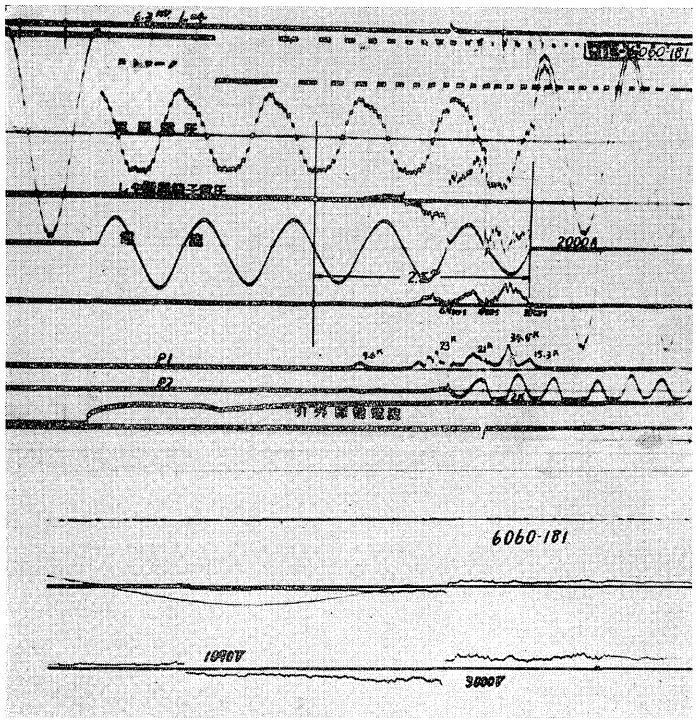
e_g：発電機電圧瞬時値　　i_{sh}：短絡電流
e_B：電弧電圧　　θ：短絡力率

第 10 図　発電機電圧，短絡電流，電弧電圧の関係
Fig. 10. Generator voltage, short-circuit current and arc voltage

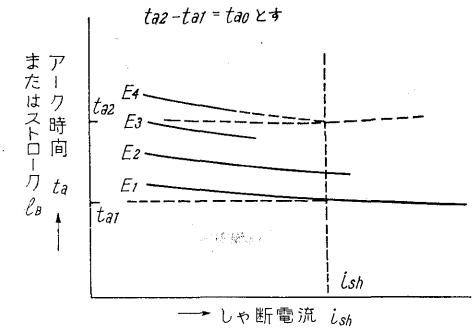
E_g が低いためという想定のもとに E_g を 9,000V に上げてまず半波延長を行なったものが No. 159, 156 などであるが，電弧時間 t_a が大となり危険を伴うのでさらに半波延長させることは中止した．次に 4,500V，9,000V の中間をねらって 6,300 V で試験を行ない No. 172～No. 179 を得たが，これらは安全を考慮して i_{sh} を下げて行なったので，消弧室の開口が明らかでないために i_{sh} を増して No. 181 より再び試験を行なった．その結果は2半波延長に成功したものと，1半波延長に成功したが，2半波目は延長不成功に終ったものがあり表中に示すとおりである．第 11 図に2半波延長に成功したオシログラムを示した．以上のデータを総合的に考慮して e_B''/E_g に限界があることが明らかであり，すなわち 0.3～0.4 以下であることが必要である。

第2表　単極モデルしゃ断器の試験データ
Table 2. Test data of single pole model circuit breaker

Osc No.	$E_g/\sqrt{2}$ eff. V	i_{sh} eff. V	θ_1	e_g'/E_g	e_B'/E_g	θ_2	e_g''/E_g	e_B''/E_g	θ_3	e_g'''/E_g	e_B'''/E_g
22	4.5 kV	4,660A	45	0.702	0.222	45	0.707	0.557	↑		
23	4.5	4,660	62.5	0.887	0.263	47	0.732	0.368			
34	3.2	4,470	52.5	0.793	0.225	37.5	0.68	0.415			
36	3.2	4,520	47	0.732	0.205	31.3	0.52	0.49	第二波延長不成功		
143	4.5	4,930	47	0.732	0.286	7.8	0.163	0.555			
148	4.5	4,860	41	0.656	0.414	24.5	0.415	0.445	↓		
151	4.5	5,020	47	0.732	0.414	20.7	0.354	0.429			
153	9.0	4,660	75	0.97	0.182	39	0.63	0.227			
156	9.0	4,930	47	0.732	0.195	39	0.63	0.24			
172	6.3	1,370	62.5	0.89	0.123	55	0.82	0.3			
173	6.3	1,370	55	0.82	0.105	55	0.82	0.236			
179	6.3	1,350	49	0.755	0.18	49	0.755	0.295			
183	6.3	2,820	47	0.732	0.347	23.5	0.4	0.43	第二波延長不成功		
185	6.3	2,880	47	0.732	0.195	41	0.656	0.333			
181	6.3	2,000	65.5	0.91	0.12	32.7	0.54	0.28	49	0.755	0.213
166	6.3	1,300	55	0.82	0.111	55	0.82	0.23	70.5	0.82	0.125
182	6.3	1,950	55	0.82	0.135	41	0.656	0.284	57	0.943	0.135
180	6.3	1,420	73.5	0.96	0.205	49	0.755	0.18	49	0.755	0.308
159	9.0	2,850	54	0.81	0.154	33	0.545	0.29			



第 11 図　2半波延長に成功したオシログラム
(a) 電磁オシロ　　(b) ブラウン管オシロ
Fig. 11. Typical oscillogram at 2 hal waves prolongation
(a) magnetic osc.　(b) cathod ray osc.



試験電圧を E_1, E_2, E_3,……とし $E_1<E_2<E_3<$……
上図において実線は実測，点線は推定を意味する

第 12 図　しゃ断電流ストロークの関係
Fig. 12. Relation between interrupting current and stroke

VI. 機械的強度検証法

短絡試験設備にて得られる実負荷試験の特性は，第12図のとおりである．すなわちしゃ断容量 $E_1 \cdot i_{sh}$ の試験を行なったとき，アーク時 t_{a1} とする．アーク延長を行なって同様容量の試験を行ない，この時のアーク時間を $t_{a1}+t_{a0}$ とし，この時のストロークを $l_{B1}+l_{B0}$ とすると

$$t_{a2}=t_{a1}+t_{a0} \qquad l_{B2}=l_{B1}+l_{B0}$$

アーク延長によって供給アークエネルギーを増して試験した結果は，ちようど試験電圧 E_4 にてしゃ断電流 i_{sh} の時の t_{a2}, l_{B2} なる条件に該当するものである．これは E_1 なる試験電圧で試験したのであるが，アーク延長しゃ断試験を行なったことにより，エネルギー的にはあたかも E_4 なる試験電圧にてしゃ断試験を行なったに等しく，したがって機械的な検証を等価的に行ない得たことになり，倍率は E_4/E_1 ということになる．そうして，

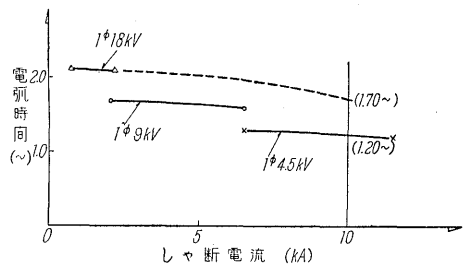
第3表　1半波，2半波延長時の諸数比較
Table 3. Supplied arc erergy at half wave, 2 half waves prolongation

Osc No.	試験電圧 kV	しゃ断電流 kA	t_{a1} ～	E_1 kW-s	t_{a2} ～	E_2 kW-s	E_2/E_1	t_{a3} ～	E_3 kW-s	E_3/E_2	C_1 μF	C_2 μF	
6060 151	4.5	5.02	1.7	52.5	2.19	109	2.08	—			19.2	43.2	$R_{s1}=10\,\Omega$　$R_{s2}=10\,\Omega$
153	9.0	4.66	1.77	34.3	2.37	109	3.18	—			19.2	43.2	
156	9.0	4.93	1.77	62.0	2.28	122	1.97	—			19.2	43.2	
159	9.0	2.85	1.77	20.0	2.26	72.9	3.64	—			19.2	43.2	
161	6	1.25	1.4	3.94	1.83	5.5	1.4	2.38	21.7	3.94	36	38.5	
166	6.3	1.3	1.53	7.8	2.0	12.5	1.6	2.55	24.0	1.92	36	38.5	
178	6.3	1.35	1.1	3.54	1.57	11.7	3.3	2.57	31.1	2.66	36	38.5	C_1, C_2 は半波または2半波延長コンデンサの容量，R_{s1}, R_{s2} は C_1, C_2 の外部抵抗
179	6.3	1.35	1.53	9.1	2.0	22.8	2.5	—			36	38.5	
180	6.3	1.42	1.53	6.7	2.1	10.8	1.61	2.52	28.8	2.67	36	38.5	
181	6.3	2.0	1.5	6.9	1.97	18.0	2.6	2.5	39.0	2.17	36	38.5	
182	6.3	1.95	1.56	9.4	2.05	20.5	2.18	2.56	30.5	1.49	36	38.5	
183	6.3	2.82	1.54	17.6	2.0	44.9	2.55	—			36	38.5	
184	6.3	2.88	1.6	10.6	2.08	35.5	3.35	—			36	38.5	

注）一線は t_{a3} なし，すなわち t_{a2} にてしゃ断完了

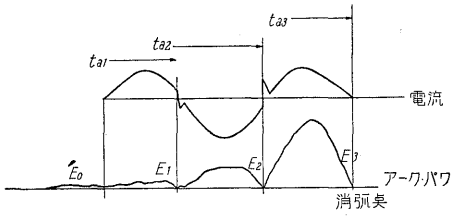
しゃ断直後に高電圧を極間に印加し，絶縁耐力を調べれば電気的の検証もあわせ実証することができる．もし $E_4<E_5$ なる電圧値に極間が耐えたとしても，絶縁回復上のばらつきの範囲であって，機械的強度に対しては，$E_5 \cdot i_{sh}$ なるしゃ断容量を保証することはできない。

第 13 図は小容量の試験設備をもって単相しゃ断器の実負荷試験を行なった時の特性であって，4.5kV 10,000 A しゃ断の時はアーク時間約 1.2～ であるが，これに強制的半波延長を試み 1.7～ でしゃ断した時の消弧室内の機械的に受けるストレスは，18kV，10,000A のしゃ断試験した時と同様である．ゆえに半波延長によって等価的に試験を行ない得た容量は，18 kV×10,000 A＝180MVA となり試験可能な倍率は，18/4.5＝4 であるということになる．強制的アーク延長により，供給し得たエネルギーについて例をあげてみると，第 3 表のとおりである。



第 13 図　24 kV ECB 実負荷しゃ断試験，しゃ断電流と電弧時間の関係

Fig. 13. Relation between interruption current and arc time for 24 kV ECB, full load interruption tests



t_{a3}：消弧までのアーク時間（＝アーク時間）
t_{a1}：消弧 2 半波前のアーク時間
t_{a2}：消弧 1 半波前のアーク時間
E_1, E_2, E_3：t_{a1}, t_{a2}, t_{a3} に相当するアークパワ

第 14 図　第 3 表の諸数の記号説明

Fig. 14. Explanation of symbol in table 3

VII. む　す　び

アーク延長等価試験を行なうにあたり回路定数と，しゃ断器のアーク電圧により，その成否は決定づけられ，半波延長回路（以下補助電源）のインダクタンスをできるだけ小さく，インパルス電流源の蓄電器の静電容量はなるべく大きく，換言すれば時定数を大きく取り，アーク電流を反転時において充分に維持し得るだけのエネルギー源を有することであるが，アーク電流零点に対しインパルス電流を適当な時期に印加すれば時定数を，いたずらに大きくしなくてもよく，これとのかねあいで補助電源の容量が決ってくる．またアーク電流の零点に対するインパルス電流の印加時期は，零点に対して前過ぎても，遅れ過ぎてもだめで，成功する場合は電流零点前約 $\tau=200\,\mu s$～$300\,\mu s$ 位の点に調整した場合が最適である．以上に対し $T \fallingdotseq 2\tau$ にした時，短絡電流約 20 kA の時は $R \fallingdotseq 15\Omega$，$C_i \fallingdotseq 50\,\mu F$ にて多少の調整が可能になるように設備すれば，20 kA 以下の時は問題ない．しかし短絡電流小なるほど R を大きくすることができ，したがって C_i は小にてよいことになる．試験施行にあたっては回路全体の巧みな同期化運転が必要であって，これが最も苦心するところでありいかなる同期装置を用いるかが，実験の難易を左右するのである．III．に当社の開発した同期装置を紹介した．また不成功の一原因として，しゃ断器のアーク電圧の増大に伴い，インパルス電流が一部発電機回路に流入し，このためにしゃ断器中を通る電流が少なくなり，半波延長が失敗に終ることもあり，対策としては発電機回路にインダクタンスをそう入してサージインピーダンスを高くとり，発電機側へパルス電流が流入するのを阻止するか，補助電源の蓄電器静電容量を大きくとるかである．しゃ断電流に直流分を含んだ場合は同期化することがむずかしいので，試験は原則として対称分で行なうよう，投入スイッチの同期投入装置を考え，これと被試験器の開極を同期させて行なうよう説明している。

以上のように半波延長時の諸問題を論じてきたが，等価試験時の絶縁回復の検証および消弧室のしゃ断時における機械的強度の確認などを行なう場合，半波延長のみでは不充分な場合がでてきて，アーク時間をさらに 1 半波，つごう 2 半波延長することも必要となってきたのでこれについても実験を行なった。

ここでは新たに開発したこれら装置の説明および 2 半波延長する場合の各装置の作用等について述べ，特に問題となる後段補助電源装置の起動用ギャップの誘発に対しての対策を述べた。

人工的にアークを延長させた場合，アークエネルギーが合致することが必要であって，またエネルギー自体は，ストロークの 3 乗に比例するようになっていることである．もし l_B と kWs の関係が延長したとき以後で 3 乗の曲線からはずれることがあれば，エネルギー源で

ある電源の容量が不足していることを意味する．比較的アーク時間の長いしゃ断器では，アーク時間を強制的に延長させることが，絶縁回復特性を得るためには必要であって，そのための電流源の容量には限度があって

$$\frac{\text{アーク電圧最大値}}{\text{その時の電流源電圧}} \leqq 0.3 \sim 0.4$$ なることを要する．

一方しゃ断時における機械的な問題を考えた場合には単にストロークとアークエネルギーを比較すれば充分であって，この時はアーク延長法を適用することによって，等価倍率を上げることができる．しかしてその倍率は低電圧にて大電流しゃ断しかつ強制的にアーク延長を行なった時のアーク時間と同じアーク時間で，同一大電流をしゃ断し得た高電圧を考えるとき，その電圧比を以って表わすことができる．以上アーク延長法とその所要条件および等価試験にアーク延長法を併用することにより絶縁回復特性のみならず，機械的強度の等価試験も行ない得ることを述べた．擱筆するにあたり，ご指導を頂いた東京工大教授中野博士，ならびにご助言，ご鞭撻を賜った当社専務取締役大富博士，顧問尾本博士，山口研究部長の諸氏ならびに設計部，研究部の関係各位に深甚の謝意を表する次第である。

参考文献

(1) H. Becker : CIGRE No. 117 (1956)
(2) N.M. Chernyshen : CIGRE No. 116 (1958)
(3) H. Kopplin, E. Schmidt : CIGRE No. 107 (1960)
(4) G.A.W. Rutgers, V.E. Bisht : CIGRE No. 106 (1960)
(5) 鈴木ほか：富士時報 **33** No. 4 (昭 35)

発明の紹介

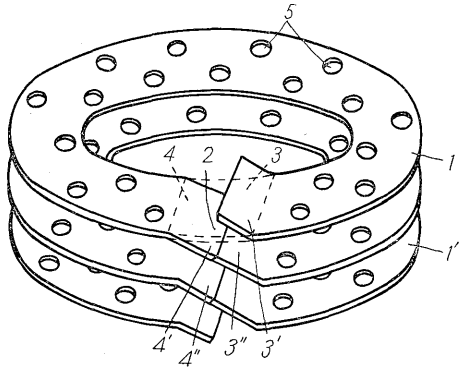
変圧器の巻線

(登録第 527764 号)

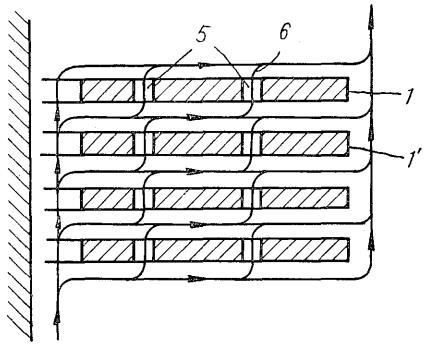
電気炉，整流器などの低電圧大電流用変圧器の巻線は，環状導体を1ターンとして構成し，その1個所を切断して，その切断端部を上下に屈曲して，隣接ターンとの接続部としております．一方鉄心の高さを低くし，油の量を少なくするために，環状導体の断面は，その高さより横幅が大きくなりますが，この幅と高さの比が1.5以上になると，この導体からの熱放散が非常に悪くなります．このため導体を複数個の並列導体に分割することも考えられますが，各並列導体を上下に配置すると変圧器の高さが大となり，油ダクトの数も増加し，資材的にも不利となります．一方並列導体を同心的配置とすることも，その組み立てあるいは巻線支持が複雑となってしまいます．したがって熱放散の悪いのをしのんで帯状の環状導体を使用するわけですが，導体幅が150あるいは200mmにもなると，導体の温度が過度に上昇して，これと接触する油の部分にスラッジを生じて，これを劣化させる事態にいたります。

この考案は，導体板に油の流通穴を設けることによって，導体の熱放散を良好にし，幅の広い導体の使用を可能にしたもので，図において，1は環状の導体板で，その一個所を2の部分で切断し，この切断端部をそれぞれ上下に屈曲して，上下の隣接導体との接続部とします．導体板には，本考案により油の流通穴5があけられ，この穴を通って油が矢印のように流れるようにします．この穴は打抜加工によって容易に形成することができます。

このようにして，横幅の充分広い導体を用いて，変圧器の経済的な設計をすることが可能となります。



第 1 図



第 2 図

(特許課　中平)

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。