

断路器の進み小電流しゃ断

永 田 秀 次

Small Capacitive Current Interruption by Air Disconnecting Switch

Shugi NAGATA

The air disconnecting switch interrupts small capacitive current with multiple restriking. As this switch cannot interrupt high frequency restriking current at its zero pause, the damping of high frequency current within a half cycle of fundamental frequency current is essential to successful interruption. The author analyzes the transient phenomena and shows that this damping is not assured by high arc resistance of switch but high frequency resistance of circuit elements in all switching conditions.

General features of dielectric recovery after interruption are also shown based on many interrupting tests.

1. ま え が き

JEC-196により、断路器は定格電圧において単に充電された電路を開閉するために用いられることとされている。単に充電された電路とは、無負荷変圧器、並列ループ回路、短い無負荷電路である。このうち無負荷変圧器の開閉はしゃ断器を省略した簡略形変電所のような特殊の場合にのみ要求され、並列ループ回路の開閉は複母線をもつ大変電所で要求されるものの、しゃ断条件はほとんど困難を伴わない。これに反し無負荷電路の開閉はすべての断路器で遭遇する条件であるが、もっとも過酷なしゃ断条件である。

もっとも重要な責務であるにもかかわらず、この開閉能力に関する検討はあまり行なわれていない。わが国の断路器規格は早くから開閉能力の参考値を示しており、JEC-196-1975には⁽¹⁴⁾表-1の標準値が定められている。この値は昭和24年以來実施された現地試験と工場試験の結果⁽¹⁾⁽³⁾にもとずいて定められたものであるが、その裏付けとなる資料はそれほど多くない。

断路器の無負荷電路（進み小電流）しゃ断の過程は基本的にはしゃ断器と同様で、接触子間の絶縁回復が最重要因子である。しかし消弧装置がなく多重切りを用いられない断路器は、この電流をしゃ断するには多数回の再点弧を繰返したのち最終しゃ断をする。しゃ断器と異なり高周波消弧をする能力のない断路器では、再点弧過渡電流が商用周波電流半波以内に減衰して、毎回商用周波電流零値で消弧できるようになることも重要である。

表-1 屋外用断路器の限界開閉能力標準値⁽¹⁴⁾

定 格 電 圧 (kV)	相間中心距離推奨値 (mm)		遅 れ 電 流 (A)	進 む 電 流 (A)
	水平一点切断断路器	その他の断路器		
7.2	800以上	400以上	4	2
12	800 "	600 "	4	2
24	1000 "	750 "	2	2
36	1000 "	900 "	2	2
72	1500 "	1500 "	2	1
84	1800 "	1700 "	2	1
120	2500 "	2200 "	3	1
168	3000以上		3	1
204	3500 "		3	0.5
240	4000 "		2	0.5
300	5000 "		2	0.5
550	8000 "		—	0.5

空気を媒体とする断路器で遅れ小電流をしゃ断するさいには、アークは電磁力と空気の流れて伸び高いアーク抵抗をつくり、これが回路力率を改善ししゃ断条件を緩和している⁽²⁾。従って進み電流しゃ断でも、このアーク抵抗は高周波電流の減衰に寄与していると考えられがちである。

本論文は回路解析により、進み小電流しゃ断に対するアーク抵抗の影響を明らかにするとともに、従来実施されてきた断路器の試験結果にもとづき空気中の絶縁回復特性を考察するものである。

2. 進み電流しゃ断過程の解析

2・1 等価回路

断路器の進み小電流しゃ断の単相等価回路は図-1のごとくである。 C_L はしゃ断される負荷（無負荷電路）の静電容量、 L はそのインダクタンス、 R は断路器アークの抵抗、 L_b 、 C_b 、 R_b は電源の等価インダクタンス、静電容量、抵抗である。

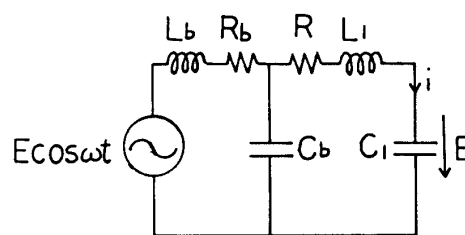


図-1 等価回路

断路器は進み小電流をしゃ断するさい、毎回電流零値で消弧し、その後接触子間電圧の上昇によって再点弧する。再点弧を繰返しつつ、接触子間隙が広がり絶縁耐力回復が充分になって最終しゃ断に達するので、最終しゃ断直前の再点弧は負荷 C_L が電源電圧波高値 E に充電され、電源電圧が逆極性の波高値付近にあるとき生ずると考えられる。図-1はこの状態を示す。

しゃ断器の再点弧のばあいには、 C_L が大きいので C_b を無視し、再点弧電流は L_b と C_L で定まる周波数の振動電流となるとして解析される。断路器では C_b と C_L はほとんど同じオーダとなるので C_b は無視できない。

図-1にもとづき、ラプラス変換して断路器の電流 $i(s)$ を求めれば、

$$i(s) = \frac{E\{2s^4 L_b C_b C_1 + 2s^3 R_b C_b C_1 + 2s^2(\omega^2 L_b C_b C_1 + C_1) + 2s\omega^2 C_1 R_b C_b + \omega^2 C_1\}}{(s^2 + \omega^2)\{s^4 L_b L_1 C_b C_1 + s^3(R L_b C_b C_1 + R_b L_1 C_b C_1) + s^2(L_b C_1 + L_b C_b + L_1 C_1 + R R_b C_b C_1) + s(R C_1 + R_b C_1 + R_b C_b) + 1\}} \quad \dots\dots(1)$$

となる。図-1より予想できるように、これは大きく異なる周波数をもつ3振動となる。若干の定数を無視して簡略回路に分離してもよいが、ここでは(1)式の分母の4次式の根を数値計算から求め、時間関数に変換した。

アーク抵抗 R について、E. Boehneは(2)式を提案している。⁽⁹⁾

$$R = \frac{10000}{i_p 1.4} \ell \quad \dots\dots(2)$$

R : アーク抵抗 [Ω]

i_p : アーク電流波高値 [A]

ℓ : アーク長さ [ft]

これは実験結果から導いたものであり、かなり信頼できるものであるので、これを用い初抵抗値を計算し定抵抗として取扱った。本来非直線特性であるため当然誤差は生ずるが、後に述べるようにその影響はあまり大きくない。

2・2 500kV試験回路

図-2は昭和42年8月超高圧電力研究所で試作断路器によって行なった500kV進み電流しゃ断試験のオシログラムの一部である。⁽¹¹⁾ だいたい規則的に半波ごとの再点弧が電源電圧最大値の近くで生じている。この試験は66kV系から変圧器を通して充電した500kV母線をしゃ断したもので、電源側の定数が不明である。そこでE. BoehneがSaxtonの試験を解析した定数を用い、同じしゃ断電流0.5Aの再点弧を解析した。⁽⁷⁾ 電源周波数60Hzで電源インダクタンス L_b に二つの値をとった。表-2に定数を示す。この二つの L_b は母線短絡

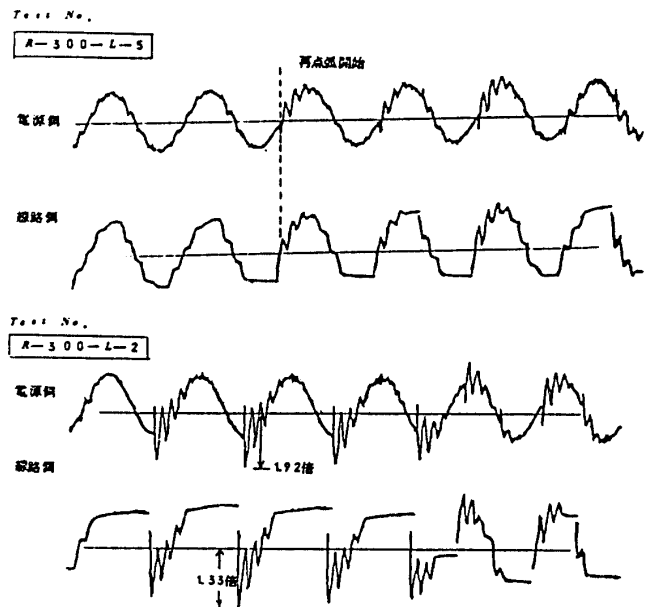


図-2 500kV断路器による進み電流しゃ断オシログラム(電圧)⁽¹²⁾

表-2 500kV回路の定数

L_b	0.133H	1.33H
C_b	10.3nF	5nF
R_b	820 Ω	3.7k Ω
L_i	0.565mH	0.565mH
C_i	4.6nF	4.6nF
短絡電流	6.3kA	630A

電流6.3kAと630Aに相当している。 R_b についてBoehneは変圧器と発電機の巻線抵抗を用いているが、後述するようにこれは再起電圧の減衰を定める等価抵抗である。再起電圧の振幅率を1.7と通常の条件より高くとして R_b を求めた。

Boehneは実際の解析に(2)式を用いず、1A以下のしゃ断電流に対し、50, 100, 250, 500 Ω の抵抗を仮定して計算し、実測値と比較しているが、この比較は開閉サージについて行なわれているので、抵抗値の仮定の正当性は評価されていない。

電流の計算に対してRの仮定は本質的な影響をもつ。計算の結果、再点弧瞬時の高周波電流の波高値は極めて高く、(2)式で求めたアーク抵抗は負荷回路の高周波抵抗に対して無視される値になることが知られた。そこでRに対して、0.5Aの進み電流に相当する約350mの線路の振動減衰係数から求めた10 Ω を用いた。電流が減衰しはじめるとアーク抵抗は急速に増加し、2~30 μ sで10 Ω をこえる。しかしアーク抵抗を考慮しなくても、この振動は2~300 μ sで完全に減衰し、抵抗を一定値として計算しても誤差は大きくない。

最初の振動が減衰したのち、等二の過渡振動が生ずるが、この周波数は電源の再起電圧周波数に近い、電流が減少しているため(2)式による抵抗は約5000 Ω となる。この二つの振動は周波数に大きな差があるため、二つの異なるRを用いて計算した結果を接続することが可能である。

図-3と図-4は表-2に相当する条件で計算した電流 i と、これを積分して求めた C_i の電圧（負荷側電圧）を示す。図は左と右で時間尺度を変え、電流に対しては電流値の尺度も変えている。電圧は電源電圧波高値Eの倍数として示した。

両図を比較すると L_b の差があるよ

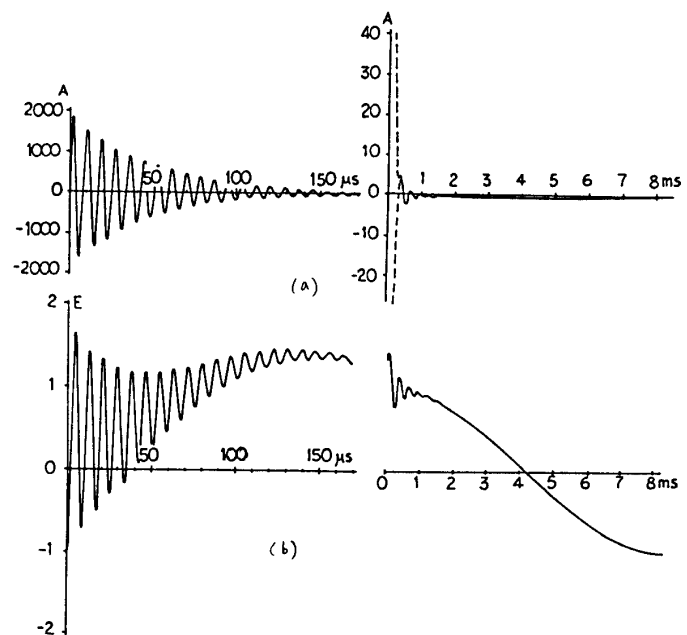


図-3 550kV断路器による0.5Aしゃ断のさいの
(a)再点弧電流と(b)負荷側過電圧
 $L_b = 0.133H$ $C_b = 10.3nF$

うに見えるが、実際は C_b の差である。再点弧瞬時に生ずる高周波振動は C_b と C_i の充電電圧の平衡であるから、 $(C_b - C_i)/(C_b + C_i) \cdot E$ を中心とした電圧に向かって振動が終息して行く。この値が $L_b = 1.33H$ では $0.04E$ 、 $L_b = 0.133H$ では $0.38E$ であるので、後者では最初の開閉サージは高くなる。しかしこの振動の終息したのちに生ずる振動は平衡した C_b と C_i の電圧と電源電圧の差によって生ずる振動であるので、逆に前者のほうが振幅が小さくなる。電流の振幅への影響も同じである。

断路器のしゃ断のような長時間にわたる現象では、再点弧直後の電流を測定することは困難であるので、電流の測定値は存在していない。電圧も波高値が測定されるのみである。図-2は第2の振動を測定したもので、振動の継続状態から見て電源インピーダンスの高い図-4に相当している。

第2の振動は $R = 5000\Omega$ として計算したが、この振動の減衰は R_b によってほとんど決定され、 R の影響は小さい。図-1から明らかなごとく、 L_b と C_b によって生ずる振動に対して R は C_i を通して並列になっているので、 C_i が小さいかぎり減衰効果は大きくない。

図-5は C_i が増大したとき、 $R = 1000, 100, 10\Omega$ に対する減衰係数と固有振動周波数の変化を計算したものであるが、抵抗は周波数には影響せず、減衰係数は $R = 1000\Omega$ のときのみ C_i の増加とともに増加傾向を示している。従って5A程度の進み電流をしゃ断するとすれば、固有振動周波数が低下することで主としてうず電流損失にもとづいている R_b の低下を、アーク抵抗の増加が補なうことになる。

図-6は5Aの進み電流に相当する負荷を、電源インダクタンス $L_b = 1.33H$ の条件でしゃ断したときの負荷側過電圧の計算結果である。 C_i が C_b よりはるかに大きくなったため、再点弧直後の振動の振幅は極めて小さく、また第2の振動の周波数は電源の再起電圧ではなく $1/(2\pi\sqrt{C_i L_b})$ に近づいている。この状態になればほぼしゃ断器と同じである。

上記のごとく、過渡電流は充分商用周波電流半波の内に減衰しうる。しかしこの減衰にアーク抵抗はほとんど影響することができない。

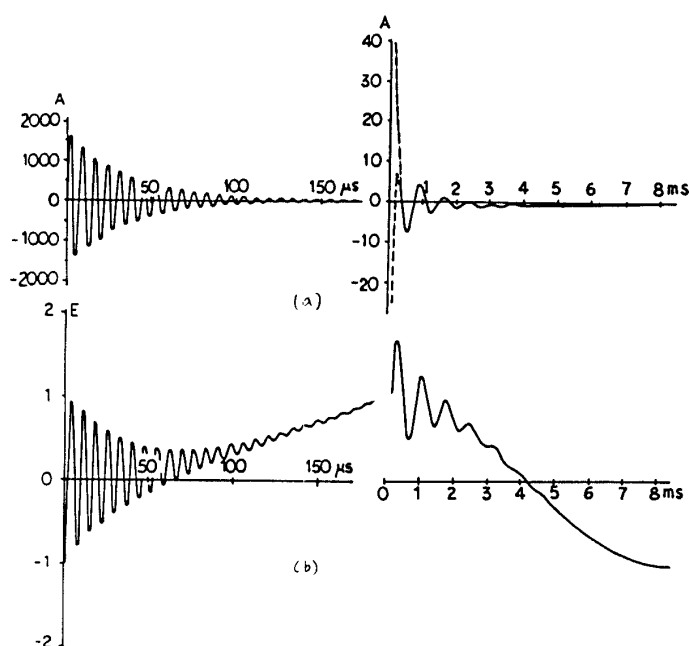


図-4 550kV断路器による0.5Aしゃ断のさいの
(a)再点弧電流と(b)負荷側過電圧
 $L_b = 1.33H$ $C_b = 5nF$

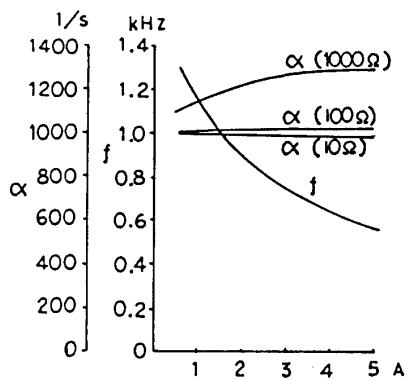


図-5 500kV回路の充電電流（定常値）と減衰係数(α)，振動周波数(f)の関係

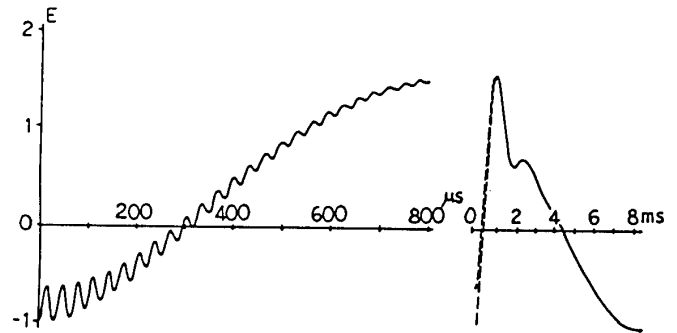


図-6 550kV断路器による5Aしゃ断のさいの負荷側過電圧

2・3 24kV試験回路

屋内用の小形断路器では，周囲の空気が静止しているため，アークの伸びは小さく抵抗は低い。図-7は24kV閉鎖開閉装置でしゃ断器の引出形断路部で85mAの進み電流をしゃ断したオシログラムである。断路部は電動機でしゃ断器を引出すことで開かれるので，極めて低速である。試験用電源は短絡試験設備で負荷はコンデンサである。表-3に回路定数を示す。電源側には安全のため大きな限流リアクトルがそう入され，一方負荷の L_i は結線のインダクタンスのみできわめて小さい。

計算の結果は500kVの場合と同様で，アーク抵抗は過渡電流の減衰にほとんど影響しない。図-8の計算では R は結線の高周波抵抗 1Ω ， R_b は再起電圧振幅率1.9に相当する値を用いている。アーク

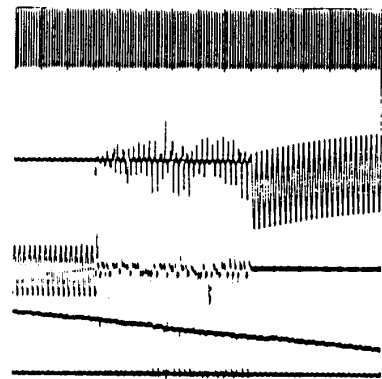
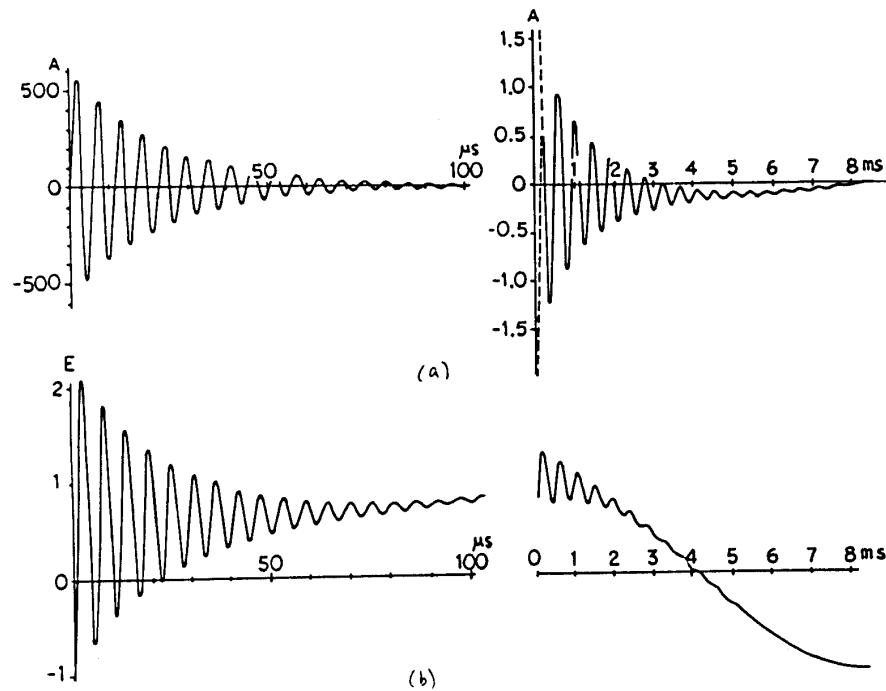


図-7 24kV引出形断路部による85mAしゃ断オシログラム
上より60Hzタイミング：接触
子間電圧：しゃ断電流：断路行程

表-3 24kV回路の定数

しゃ断電流	85mA	4mA
L_b	54.5mH	10H
C_b	75nF	800pF
R_b	55 Ω	10k Ω
L_i	0.06mH	0.68 μ H
C_i	7.1nF	758pF



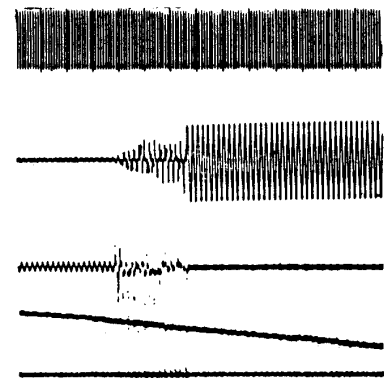
図－8 24kV断路部による85mAしゃ断のさいの(a)再点弧電流と(b)負荷側過電圧

抵抗は高周波電流の減衰とともに約 30μ sで数 Ω に達するので、減衰は図示したものよりずっと速やかである。 C_b が C_l の約4.7倍であるので、再点弧瞬時の負荷側過電圧は $2E$ をこしている。

図－9は同じ断路器でPT(計器用変圧器)を用いて4mAをしゃ断したオシログラムである。負荷は開閉装置本体の分布静電容量を用いている。表－3に回路定数を示す。 R_b はPTの等価巻線抵抗で高い値になっているが、 L_b も大きいので減衰係数は短絡試験設備を用いた場合よりも低い。導体は短いが再点弧瞬時の振動周波数が高いので、高周波抵抗 R は 0.1Ω と推定される。計算の結果によれば、再点弧直後の過渡振動も第2の振動も

長く継続し、図－10に示すごとく商用周波電流が零値に達するまで振動が残っている。図－9はしゃ断後の負荷側電圧が対称であり、しゃ断後負荷静電容量に残留電圧がほとんどないことを示している。すなわち最終しゃ断は商用周波電流の零値ではなく、電流波高値に近いところで生じている。これは図－10で4ms近傍で生ずる振動電流が作った零値であると判断される。

このような点でしゃ断されれば、しゃ断後の回復電圧は低く、短距離でしゃ断できる。通常気



図－9 24kV引出形断路部による4mAしゃ断オシログラム
上より60Hzタイミング：接触
子間電圧：しゃ断電流：断路行程

中断路器では高周波消弧は発生しないが、この場合は電流が小さく、高周波零値における電流傾度が120mAに対する商用周波電流の零値の傾度と同程度となっているため、しゃ断できたものと考えられる。ただし同一条件で繰返した数回のしゃ断で、このようなしゃ断は1回のみである。

電流が小さいため、アーク抵抗は最終的には10k Ω 程度に達するが減衰へは影響しない。

屋内用の小電流で工場試験した場合も、500kVの現地試験と同様にアーク抵抗はしゃ断条件の緩和には役立っていない。ただしPTを用いた試験は実使用条件とかなり異なる結果を生ずるおそれがある。

極めて異なる条件の解析結果のみを示したが、その他の電圧の断路器の解析結果も同様であり、進み電流しゃ断において過渡電流は回路条件によって商用周波半波内に充分減衰し、アークの伸びはしゃ断には影響しないと結論できる。

3. 絶縁回復

消弧装置をもたない断路器の絶縁回復は、回復速度がきわめて低く、またばらつきがきわめて大きい。図-11はとくにこの傾向の強い前述の屋内用24kV断路器について、試験結果から絶縁回復と断路距離の関係を求めたものである。絶縁回復は図-7のようなオシログラムから、接触子間電圧の再点弧発生時の値をとった。4mAしゃ断のさい絶縁回復はほぼ距離に比例して上昇しばらつきも少ないが、85mAと280mAではきわめてばらつきが多い。しかし最大値のみを比較すれば、電流による大きな差はない。すなわち絶縁回復は距離に関係するが、ある距離に達したのちは距離に関係なく偶発的特性を示し、その結果最終断路距離の大きなばらつきを生ずることを意味している。

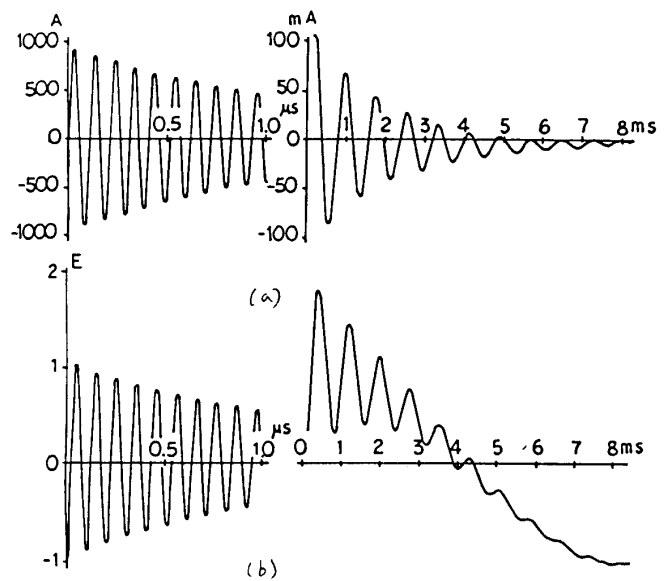


図-10 24kV断路部による4mAしゃ断のさいの
(a)再点弧電流と(b)負荷側過電圧

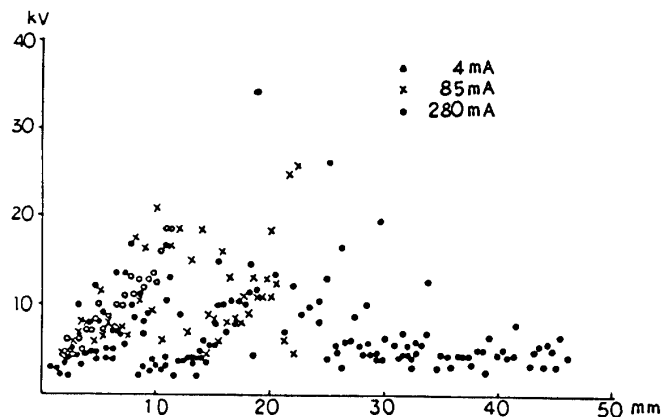


図-11 24kV断路部の絶縁回復(再点弧
瞬時電圧)と接触子関係

(133)

この傾向は屋外用断路器にも見られる。現地試験結果を整理すると、最小開離度(開離度はし

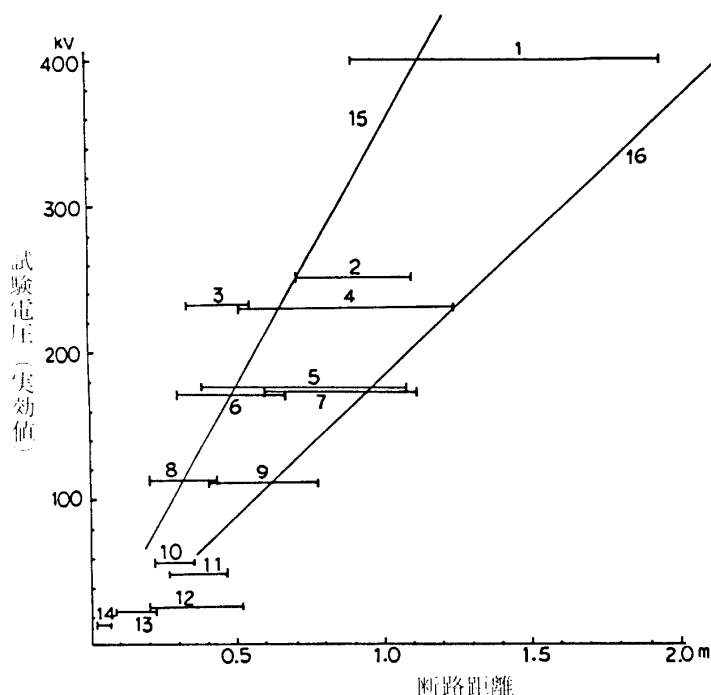


図-12 試験電圧(実効値)と断路距離

- | | | | |
|-----|----------------------|-----|---------------------------|
| 1. | 550kV断路器 | 1点切 | 0.8A ⁽¹³⁾ |
| 2. | 500kV断路器 | 1点切 | 0.2-0.5A ⁽¹²⁾ |
| 3. | 550kV断路器 | 2点切 | 0.2-0.3A ⁽¹⁰⁾ |
| 4. | 550kV断路器 | 1点切 | 0.15-0.6A ⁽¹⁰⁾ |
| 5. | 300kV断路器 | 1点切 | 0.4-1A |
| 6. | 550kV断路器 | 2点切 | 0.2-0.5A ⁽¹⁰⁾ |
| 7. | 550kV断路器 | 1点切 | 0.5A ⁽¹⁰⁾ |
| 8. | 550kV断路器 | 1点切 | 0.15-0.3A ⁽¹⁰⁾ |
| 9. | 550kV断路器 | 2点切 | 0.15-0.3A ⁽¹⁰⁾ |
| 10. | 84kV断路器 | 2点切 | 0.35-0.7A |
| 11. | 84kV断路器 | 2点切 | 0.35-0.7A |
| 12. | 36kV断路器 | 2点切 | 2A |
| 13. | 84kV断路器 | 1点切 | 0.5A |
| 14. | 24kV屋内用断路器 | 1点切 | 0.1A |
| 15. | 50%閃絡電圧に相当する棒間隙長さ | | |
| 16. | 50%閃絡電圧の2倍に相当する棒間隙長さ | | |

しゃ断のさいの断路距離と全開の断路距離の比)はしゃ断電流が変わってもほぼ同じであるが、電流が増加するに従って最大開離度のばらつきが大きくなることが示される。

図-12は、今まで発表されている試験結果からできるだけ同じようなしゃ断電流のものを選び、単相試験電圧(実効値)と最終断路距離の関係を示したものである。単相試験で断路距離を正確に記録した資料は比較的少ない。しかし断路器の寸法は試験電圧によって決定されるため、製造者間の差はあまり大きくなく開離度から断路距離を推定しても誤差はそれほど大きくはない。この推定値は図-12には示していないが、傾向は同様である。図示した棒は最小と最大断路距離の間を結んだものでばらつきを示している。しかしばらつきの範囲が少ないのは、試験回数の少なさによるもので、断路器の特性によるものではない。

断路器の一部には3柱2点切のものが含まれている。この断路器は中央柱の対地静電容量の存在のため、絶縁回復に対して2点の断路距離を合計すべきではないと考えられるが、1点のみを用いて1/2の電圧で試験してほぼ同一結果をえた例があるので、この図には二つの断路距離の合計を示している。

図の15と16は参考として示した試験電圧およびその2倍に相当する50%閃絡電圧をもつ棒間隙の距離である。断路距離がこの二つの直線間に入るといふ報告もあるが、図-12にはだいたいその傾向が見られる。ある距離以上増加すれば、絶縁回復は距離に関係せず偶発的な因子に左右されることを考えれば、断路器の絶縁回復特性を検討するには、最小断路距離のみを考えるべきである。この値はだいたい試験電圧値を50%閃絡値とする棒間隙の長さに近い。

断路器のしゃ断能力を高めるため弱い空気流を吹付ける手段が、わが国でも海外でも実施された例がある。これによれば大きな電流をしゃ断してもばらつきは少なくなる。充分な記録がない

ため図-12には示さないが、だいたい図-12の直線15の近くに分布する。

これらのことから、0.5～1 A程度の進み電流しゃ断のとき、最小しゃ断距離は電圧によって定められ、試験電圧値を50%閃絡値とする棒間隙の長さに近いと判断される。

断路距離は電圧に依存せずしゃ断電流によって定まるとの見解もあるが、その裏付けとなる試験内容は発表されていない。⁽¹²⁾ 今まで発表されている試験結果には、この点を検討できるものはない。

表-1のしゃ断電流標準値は、規格により開離度80%以内であることが定められている。絶縁回復がしゃ断電流が増すと増加することを考えると、36kV以下の断路器が2 Aを標準値としているのは問題があると考えられる。図-12の13には開離度100%に達したものをかなり含んでおり、現地試験でも同様のことが示されている。⁽¹³⁾

4. む す び

以上の検討結果を総括すれば、次のごとくである。

- (1) 進み電流しゃ断において、アーク抵抗は高い値に達するが、しゃ断条件の改善には役に立たない。従って遅れ電流しゃ断のように、いわゆるアーク・リーチ⁽¹²⁾としゃ断能力を結びつけることは正しくない。ただしアーク・リーチは他の電極または大地への絶縁破壊の危険を検討するため重要な因子であり、今後も資料を蓄積する必要がある。
- (2) 断路器の絶縁回復は距離の増大によって増加するが、偶発的な因子によって左右されることが多く、最終しゃ断時の断路距離の分散度は大きい。しかし最小しゃ断可能距離は、少なくとも1 A以下の電流では、棒間隙の50%閃絡距離の近くにあると考えてよい。ただしこの値以上の電流との関係は明確でなく、今後の検討を要する。
- (3) 断路器の進み小電流しゃ断能力を、開離度80%で規定するには、多数の試験により最大断路距離を確認する必要がある。36kVおよびこれ以下の電圧の断路器については、表-1の標準値を裏付けできる資料はない。

筆者はJEC-165-1964改訂の断路器小委員会の主査として表-1を定めたとき、進み電流しゃ断については資料がきわめて少ないことを知った。規格に今後工場試験・現地試験で記録の蓄積をはかることが望ましいことを付記したが、従来の試験結果を整理して今後の検討課題を明らかにすることが必要であると考えた。以後機会がなく今日に至った次第である。この論文に使用した資料の一部には、この小委員会でいただいた公表されていないものが含まれている。関係のかたがたに厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 遮断器標準特別委員会：電学誌，69，昭24，p.395～411
- 2) M. A. Anderson：El Wld，134，（25），1950，p.79～81，150
- 3) 遮断器標準特別委員会：電学誌，73，昭28，p.195～200
- 4) 大西ほか：日立評論，37，1955，p.1274～81
- 5) P. E. Richardson et al：EE，75，1956，p.712～7
- 6) 大森：富士時報，34，1961，p.321～5
- 7) A. Foti et al：IEEE Trans. PAS-83，1964，p.266～271
- 8) В. Д. Юренков и тд：Электрические Станции，1964，（4），46～53
- 9) E. W. Boehne：IEEE Trans. PAS-84，1965，p.906～23
- 10) 小山，竹科：昭43四学連大 629
- 11) 500kV送電実証試験研究会 機器専門委員会報告，昭44
- 12) E. Abilgaard et al：IEEE Trans. PAS-91，1972，p.412～21
- 13) 断路器小委員会資料 D-14
- 14) 電気規格調査会標準規格JEC-196-1975，断路器