

特殊条件下における新形空気遮断器の遮断性能

Interrupting Ability of New Type Air-blast Circuit Breaker in Abnormally Severe Conditions

細川 正 男* 白木 寿 一 郎*
 Masao Hosokawa Juichirō Usuki
 伊藤 忠 二 郎* 山崎 精 二**
 Chūjirō Itō Seiji Yamazaki

内 容 梗 概

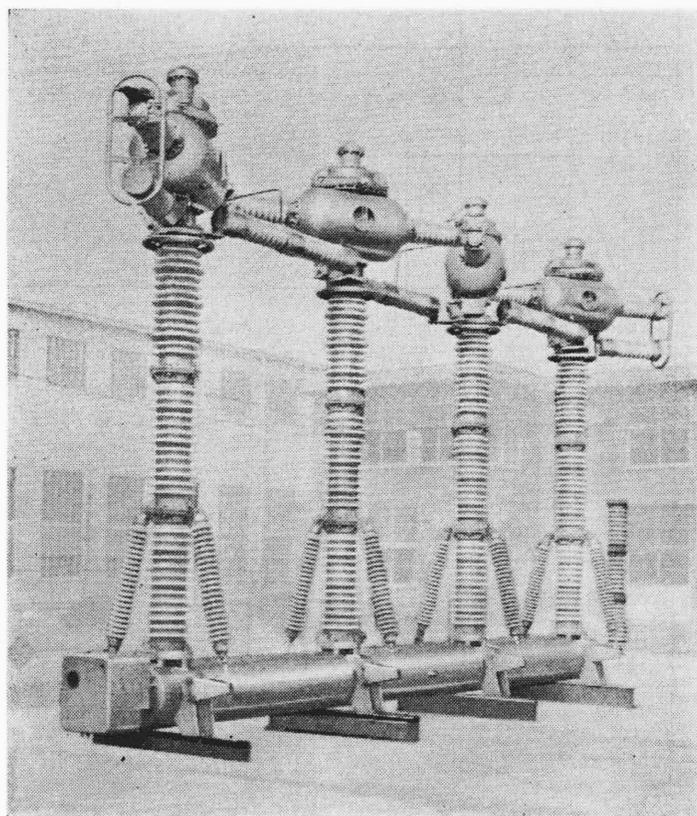
常時内部充気式の新形空気遮(しゃ)断器について JEC-145 以外の特殊な過酷条件下における遮断性能を検討したものである。脱調および異相地絡時の遮断は現在世界各国での審議中の試験案より過酷な条件でも問題なかった。近距離線路故障遮断については試験法の検討を種々実施し、単位試験により最過酷と考えられる定格遮断容量の80% MVAに相当する条件で遮断可能であるとの結論を得た。わが国およびイギリスで特に問題になっている塩害汚損時の絶縁特性は一線地絡時 0.05 mg/cm² 以上の塩分汚損状態で使用でき、短絡遮断も支障ない結果である。

1. 緒 言

日立製作所では今回常時充気式の新形空気遮断器（以下 ABB と略称する）を開発し、その概略についてはすでに発表した⁽¹⁾。遮断特性についてもその要点はふれているが、遮断器の性格上規格に定められている項目以外の過酷な条件下における性能を十分検討しておく必要があった。規定項目については十分余裕ある性能であるので、今回特に脱調時、異相地絡時、また最近特に問題になっている近距離線路故障時、および海岸地区における塩害汚損時の四条件下における遮断性能を検討した。これらの故障を考えた場合の試験条件についてはいずれも現在世界各国で検討中あるいは未検討の状態であるが、極力過酷な条件を想定して実施したものである。第1図は新形 ABB の外観である。

2. 脱調遮断および異相地絡遮断性能

脱調状態にある系統を分離する脱調遮断、あるいは遮断器をはさ



第1図 OPG形 300 kV 2,000 A 15,000 MVA 空気遮断器

む異相地絡遮断の場合は一般の三相遮断時の遮断初相（回復電圧は相電圧の1.5倍）より回復電圧が高くなり、遮断が過酷となる。これらはまれな事故であり、また一般の遮断器にとって遮断条件が過酷すぎ、そのため処理できなくともやむを得ないと考えるのが通念であった。しかし、新形 ABB では、これらの遮断性能をも保証するため試験を実施した。

2.1 試験条件

脱調遮断時の試験条件としては規格には定められておらず、現在 IEC で各国の意見を求め審議中の段階で、各国の系統構成、保護方式の違いなどから必ずしも一致していない。脱調遮断試験条件としては世界各国過半数の意見では試験電圧は相電圧の2倍、遮断電流は定格遮断電流の25%、再起電圧は定格遮断電流における値の単相試験を実施する案となっている。しかし、故障電流が25%を越える場合が皆無とはいえないので最悪値をとることにして、試験電圧は相電圧の2倍、遮断電流は定格遮断電流の50%、再起電圧は定格遮断電流における値を用いることにした。

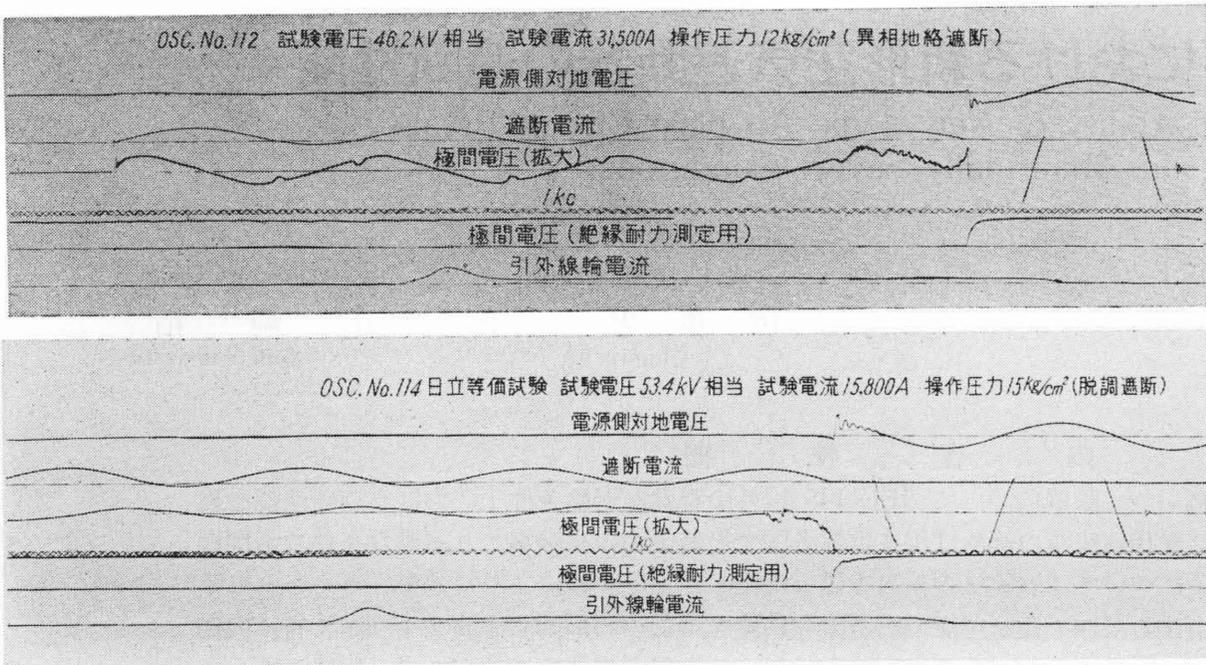
一方、異相地絡遮断時の試験条件としては、やはり電流値を大きくとり、試験電圧は線間電圧、遮断電流は定格遮断電流、再起電圧は定格遮断電流における値を用いた。日立大容量系列（OPG形）ABB 72~300 kV について求めると第1表の試験内容となる。

第1表 脱調および異相地絡時試験条件

| 項 目 | 定 格 | 72 kV (2 遮断点) 3,500 MVA | 84 kV (2 遮断点) 3,500 MVA | 168 kV (4 遮断点) 7,500 MVA | 300 kV (8 遮断点) 15,000 MVA |
|--------------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| | 遮断電圧 (kV) | | 83 | 97 | 194 |
| 1 遮断点当たりの試験電圧 (kV) | *1 | 41.5 | 48.5 | 48.5 | 43.3 |
| | *2 | 45.2 | 53.4 | 53.4 | 47.5 |
| 遮断電流 (A) | *3 | 14,050 | 12,050 | 12,900 | 14,450 |
| | *4 | 15,300 | 13,100 | 14,050 | 15,750 |
| 異相地絡遮断 | 試 験 電 圧 (kV) | 72 | 84 | 168 | 300 |
| | 1 遮断点当たりの試験電圧 (kV) | *1 | 36 | 42 | 42 |
| | *2 | 39.6 | 46.2 | 46.2 | 41.2 |
| 遮断電流 (A) | *3 | 28,100 | 24,100 | 25,800 | 28,900 |
| | *4 | 30,600 | 26,200 | 28,100 | 31,500 |
| 再起電圧 | 周 波 数 (kc/s) | 0.9 | 0.8 | 0.5 | 0.36 |
| | 振 幅 率 (%) | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 1.3 |
| | 瞬時回復電圧 (%) | 90 | 90 | 90 | 90 |

*1 電圧分布を均等とした場合
 *2 電圧分布を不均等とし、補正係数 1.1 を用いた場合
 *3 定格遮断電流を基準にした値
 *4 最大遮断電流を基準にした値

* 日立製作所日立研究所
 ** 日立製作所日立研究所 工博



第2図 遮断試験時のオシログラム

2.2 試験方法

試験は従来から実施している日立等価試験回路を用いて実施した。新形 OPG 系列 ABB は 72~300kV とまったく同一構造の遮断部を用いているので、300kV ABB の 2 遮断点を用いて試験した。遮断部は 2 遮断点が一対構造であるため、片方を供試、他方を補助遮断部として用いた。

2.3 試験結果

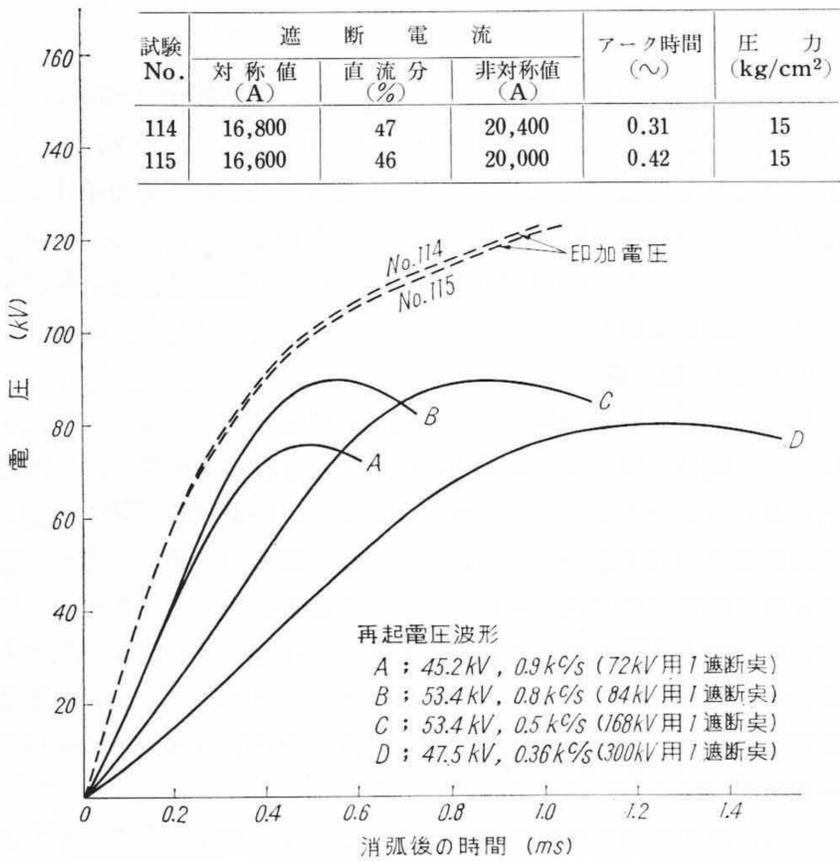
代表的なオシログラムを第2図、結果を第3、4図に示す。遮断電流は第1表の値以上であり、一方電流遮断後の絶縁回復特性も第1表の再起電圧波形を上回り、脱調遮断、異相地絡遮断とも十分な余裕をもって遮断することが検証された。

3. 近距離線路故障遮断に対する検討

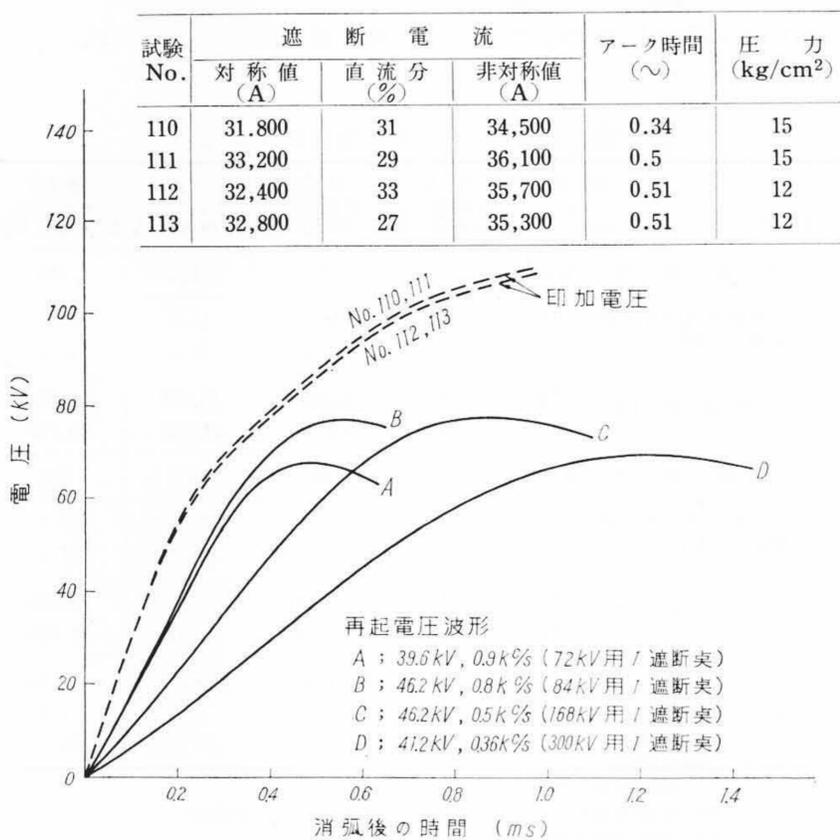
3.1 一般的考察

大容量母線に接続された遮断器で数 km 先の架空送電線に発生した短絡故障を遮断することが過酷な条件になることが 1957 年の G. E. 社の短絡実験所で実証された⁽²⁾。この現象が近距離線路故障と呼ばれるもので、遮断時の再起電圧上昇率の影響を大きく受ける ABB において特に近時問題になっており、CIGRE (大電力送電網国際会議) の研究委員会、また国内でも電気学会専門委員会において盛んに研究がすすめられている。

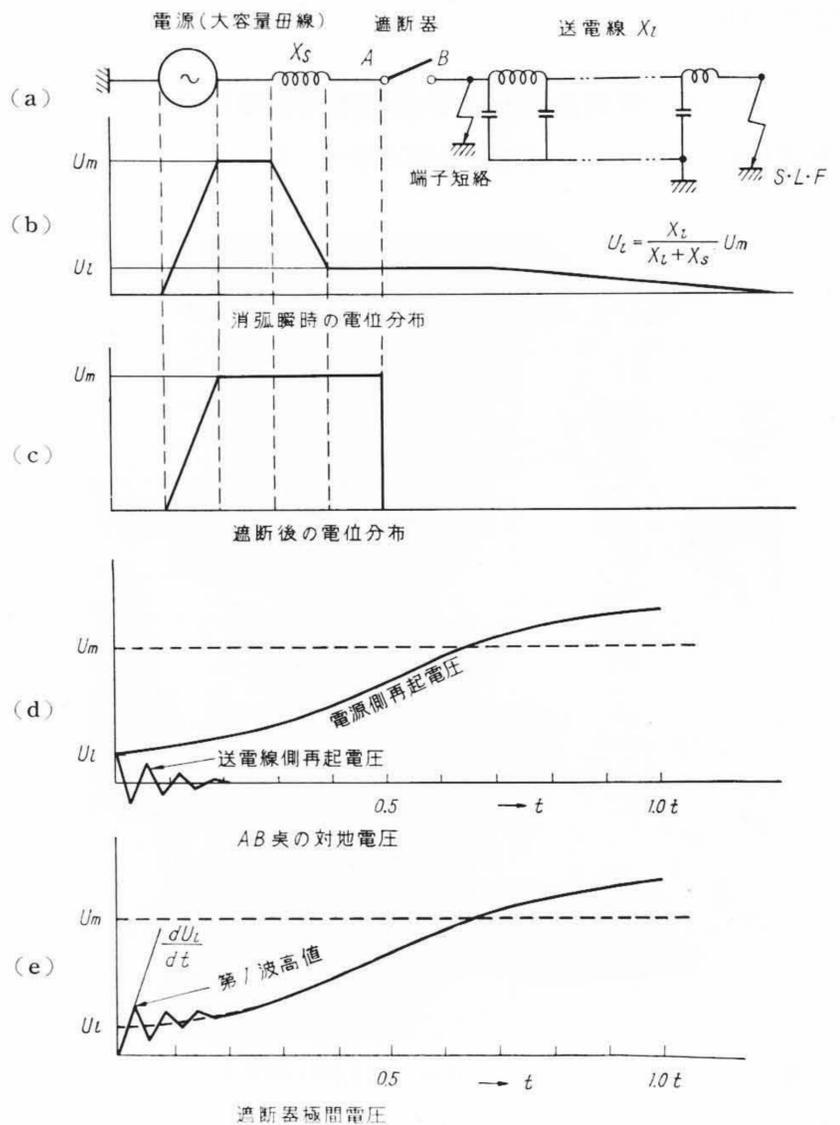
以下、この近距離線路故障 (以下 S. L. F. と略称する) 遮断に関して従来の研究成果を基礎とし、日立製作所で予備的に研究した事項を中心にして、S. L. F. 遮断性能を判定する試験法を一応とりまとめ、この ABB に適用した。



第3図 脱調遮断時における日立等価試験結果



第4図 異相地絡遮断における日立等価試験結果



第5図 近距離線路故障時の電圧波形

第5図(a)のような大容量母線に接続される遮断器では遮断器端子の短絡故障が最大遮断電流である。短絡故障点までの線路が長くなるにしたがって電流は減少する。今、遮断瞬時の線路の電位分布を考えると S. L. F. を問題とする数 km 程度の線路では第5図(b)に示すように、大部分は電源側のインピーダンスによる電圧降下で線路側電圧降下としてはわずかであるが、この線路の電荷は消弧後ほぼ光速で線路を往復する進行波となって除々に減衰するもので、その電圧波高値は線路長に比例し振動数は線路長に逆比例するものである。一方、電源側再起電圧は線路側のそれに比べ波高値としては大きい、振動数はゆっくりしたものである。したがって消弧瞬時の遮断器には第5図(e)のような電源側再起電圧波形と線路側波形の差の電圧が印加され、遮断器にとって初期部分の高周波振動のため、ある線路長の故障が非常に過酷な条件になる。遮断器の過酷度 F を Pouard の提案⁽³⁾にしたがって遮断電流、初期再起電圧波高値および再起電圧上昇率の関数で表わすと

$$F = I^\alpha \cdot A^\beta [V/\mu s]^\gamma \dots\dots\dots (1)$$

I : 遮断電流

A : 初期再起電圧波高値

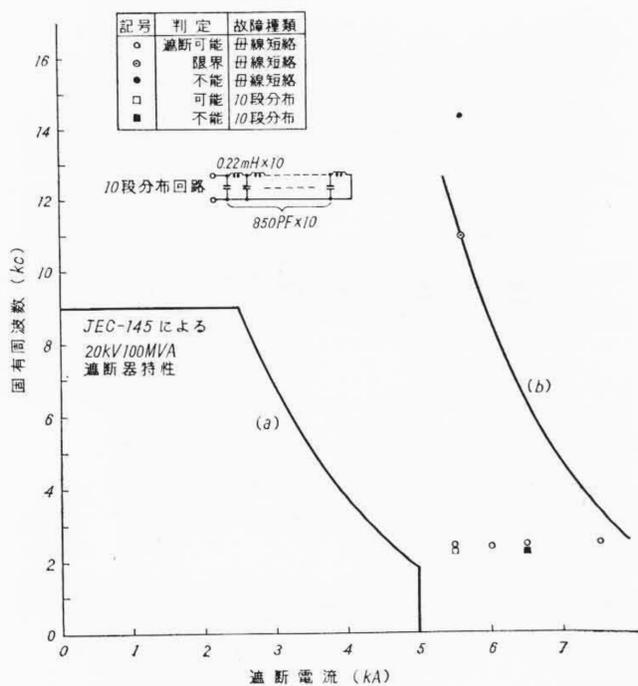
$[V/\mu s]$: 初期再起電圧上昇率

α, β, γ は遮断器によって定まる定数で $\alpha \approx 1, \beta \approx 1 \sim 2, \gamma \approx 0.5 \sim 1$ の範囲である。 $\alpha = \beta = \gamma = 1$ の場合 F_{max} は母線短絡容量の 66% の点である。しかし、(1)式は端子短絡時の過酷度を考慮していないので、この点を加味すると母線短絡容量(定格遮断容量に等しいとする)の 70~90% MVA に相当する S. L. F. が最も過酷になる条件と考えられる。

3.2 S. L. F. の予備的検討

3.2.1 ABB による端子短絡と S. L. F. 性能の比較

前節で述べたように S. L. F. では線路側の高周波振動波形が遮断器に印加されるため過酷な条件になることがわかったが、最過酷条件をもっと具体的に検討するため、小容量 ABB と模擬送電線で遮断試験を行なって確認した。供試遮断器は単相 20~24kV, 100 MVA, 7 kg/cm² 操作圧力の ABB で規定の遮断電流と固有周波数の関係は第6図の(a)曲線に示される。この ABB の実測した性能は曲線(b)と第2表に示されているが、規定をかなり上回った性能を持っている。一方、模擬送電線は 0.22 mH と 850 pF をセクションとした 10 段 Γ 形分布回路で構成され、そのサージインピーダンスは 510 Ω と実送電線よりやや高い値になっているが、固有振動数のみ考えると実測結果 57 kc で、これは送電線長



第6図 母線短絡性能と S. L. F. 性能

第2表 母線端子短絡と S. L. F. 試験結果

| 遮断条件 | 遮断電流 (A) | 3,200 | 3,600 | 4,800 | 5,500 | 6,000 | 6,500 | 7,500 |
|------------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| S. L. F. 10段分布回路 | | 4/4 | — | 12/12 | 4/4 | — | 0/8 | — |
| S. L. F. 集中回路 | | — | — | 9/9 | 5/9 | 5/7 | 2/4 | — |
| 母線短絡 $f_n: 2.2 \sim 2.45$ kc | | — | 1/1 | — | 3/3 | 4/4 | 4/4 | 4/4 |
| 母線短絡 $f_n: 11 \sim 14.3$ kc | | — | 4/4 | — | 3/5 | — | — | — |

試験電圧 20 kV (遮断成功回数 / 全試験回数)

約 1 km の振動数に相当する。

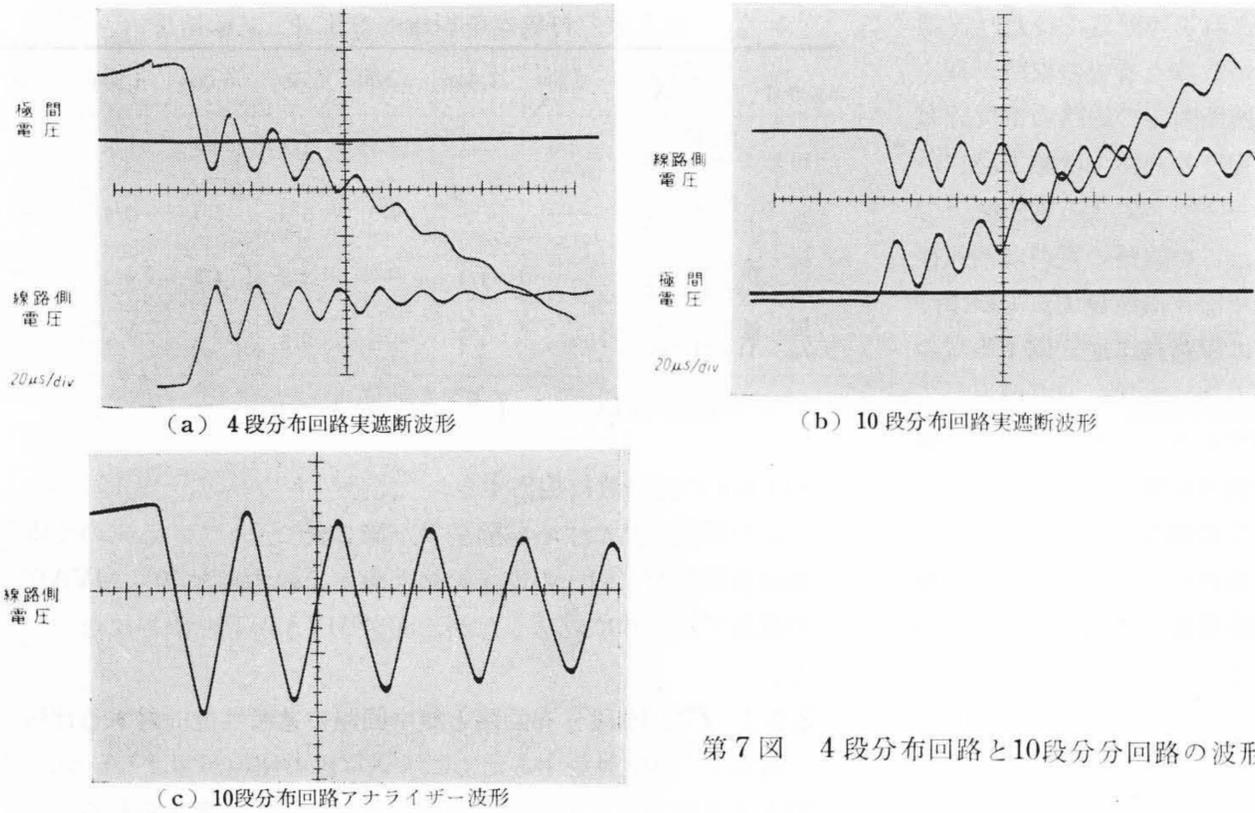
この模擬回路による試験結果が第2表に示してあるもので電源側固有振動数が同一の端子短絡性能と比較すると 70% MVA 相当の電流では遮断に成功したが、80% MVA が遮断限界になっている。

3.2.2 Γ 形 10 段分布回路と集中回路の遮断性能に対する比較

S. L. F. の検討をするために実送電線の使用が望ましいが、實際上不可能であるので当然模擬送電線の使用が考えられる。送電線はインダクタンスとキャパシタンスの分布回路であるのでコイルとコンデンサにおきかえることができる。多分割が望ましいが、最小何段に分割できるかを検討するために、理論的に完全分布と数%の誤差で一致する 10 段 Γ 形回路と同一 L. C. を集中させたものの 2 者で、実遮断試験によって比較を行なった。これは 0.22 mH と 850 pF をセクションとしたもので固有振動数は実測結果 57 kc で約 1 km の線路長に相当するものである。一方、集中定数回路は 10 段分割したものをそのまま集中させたもので、サージインピーダンス Z は同じであるが、固有振動数は 37.5 kc の正弦波である。したがって線路側再起電圧上昇率は固有振動数の高い 10 段分布回路のほうが大きい。第2表にみられるように、分布回路で全部良好であるのは 5,500 A で、6,500 A では 8 回全部不能となっているのに対し、集中回路では全部良好であるのは 4,800 A で、5,500 A では約半分不ぐあい、6,500 A でも 4 回中 2 回遮断でき、分布回路ほど明確な遮断限界になっていないが、一応上限と考えられる。したがって、本試験結果より 10 段分布回路は同じサージインピーダンスの集中回路よりも過酷とはなっておらず両者はほとんど同じといえる。

3.2.3 Γ 形 10 段分布回路と Γ 形 4 段分布回路の再起電圧波形

前節では 10 段分布回路と集中回路とで遮断性能上大きな差はみられなかったので、模擬送電線は必ずしも 10 段分割の構成の必要はないと考えられる。つぎに Γ 形 4 段分布回路を構成し、実遮断時の再起電圧波形が 10 段分布回路のそれと、どの程度異なるかを両方の回路で比較した。 Γ 形 4 段分布回路は 0.22 mH と 5,000 pF をセクションとしたものでサージインピーダンス 213 Ω 固有振動数 55 kc で 84 kV 3,500 MVA 系用 1 相 2 点の ABB 1 点あたりに換算すると 80% MVA に相当する線路長 1.25 km の S. L. F. に対応する。実測波形は第7図(a)に示すようにほぼ三角波になっているが、頂上にやや丸味をおびている。振動数は実測値 57 kc で集中のそれに比べ 1.4 倍の周波数になっている。 Γ 形 10 段分回路のものでは計算結果⁽⁴⁾でも、第7図(c)のアナライザの結果でもほとんど完全な三角波になっているが、実遮断時に得られた波形では第7図(b)に示すように 4 段の場合と同様頂上部分がかなり丸味をおびている。振動周波数は 57 kc で集中回路に比べ 152%、完全分布回路と比較すると 97% で基本周波は完全に分布した状態になっている。これらの試験結果より、理論値およびアナライザ結果では分布回路の場合 10 段以上に分割しなければぐあいが悪いが、実遮断時の波形からみれば残留電流などで減衰するため、4



第7図 4段分布回路と10段分分回路の波形

3.2.5 三相試験時の電源側再起電圧

前節のように理論計算では三相故障第1相遮断時電源側に現われる波高値および上昇率は非遮断の残り二相の線路振動により第3表のようになる。しかし、実回路定数に即した中西氏の計算⁽⁵⁾では上記電源側にあらわれる線路振動は無視できる結果となっている。そこでS.L.F.遮断に他相がどのような影響を及ぼすかを実遮断試験によって検討した⁽⁶⁾。試験回路は第8図に示すように送電線をLとCの集中定数で構成し、電源を非接地として実施した。このときのオシログラムは第9図(a)で第1相遮断時の電源側再起電圧波形に

段分布も10段分布も同じようになっている。したがって、遮断試験の模擬送電線としてはI形4段分布回路で十分と考えられる。

3.2.4 三相試験時の線路側再起電圧

今までは主として単相回路について述べてきたが、ここで三相故障遮断について考察しておく。各種S.L.F.遮断時の再起電圧波形の初期上昇率の計算結果によれば⁽³⁾、故障電流も考慮すると直接接地系では三相非接地故障の第1相遮断と三相接地故障の第1相遮断が最高の上昇率で、非接地系では三相非接地故障を除外すれば三相接地故障の第1相が最高となる。いずれの場合も三相短絡電流をIとしたとき、初期上昇率は

$$\frac{3Z_0}{Z+2Z_0} \cdot Z\omega I \sqrt{2} \dots\dots\dots (2)$$

で表わされる。ここにZ₀は故障点からみた零相サージインピーダンス、Zは同じく正相サージインピーダンス、ZとZ₀の標準値は

単導体系 Z₀=700Ω, Z=400Ω

複導体系 Z₀=530Ω, Z=330Ω

になっている。したがって初期上昇率は

単導体系では 464ωI√2.....(3)

複導体系では 376ωI√2.....(4)

他方、再起電圧の初期波高値eは遮断器端子から故障点までの線路長をl(km)、単位長当たりのリアクタンスをωL₀(Ω/km)とすれば簡単に考えて

$$e = K_A K_S \sqrt{2} \omega L_0 l I \dots\dots\dots (5)$$

ここで、L₀は単導体系では1.27mH/km、複導体系では0.96mH/kmとした。またωは適用角周波数で50系として314を採用した。K_Aは非接地系では1.5、直接接地系では1.1となり、K_Sとしては振幅率で1.5を採用した。第3表は(3)~(5)式から計算した値を示したものである。

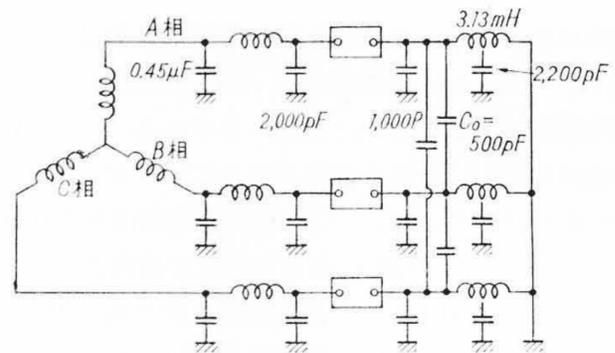
第3表 三相故障遮断の最過酷相の第1波波高値と上昇率

| | 初期上昇率 (V/μs) | | 初期波高値 (kV) | | Z (kΩ) |
|--------------|--------------|-------|------------|--------|--------|
| | 計算値 | 修正値 | 計算値 | 修正値 | |
| 単導体系 (非接地系) | 368ZI | 333ZI | 1.5×0.85II | 0.85II | 0.4 |
| 複導体系 (直接接地系) | 378ZI | 332ZI | 1.1×0.65II | 0.65II | 0.33 |

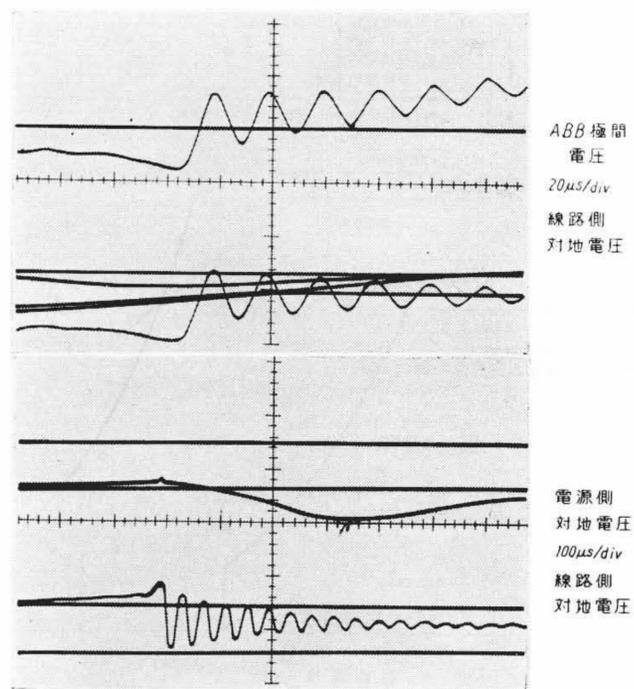
ただし I: 故障電流 (kA)
 l: 故障点までの距離 (km)
 Z: 故障点からみた正相サージインピーダンス (kΩ)

は線路側の高周波振動はまったく認められない。このときの他相の線路側再起電圧は第9図(b)のオシログラムに示されるように電源側の再起電圧と同じ周期で振動する非常にゆっくりした波形になっている。第4表の第1相遮断時の実測値では極間電圧波高値は線路側のその約10%増になっているが、電源側再起電圧波形の傾斜のために極間電圧は大きくなっている所以他相の影響ではない。一方、電源側再起電圧は端子短絡と同様相電圧のほぼ1.5倍になっている。

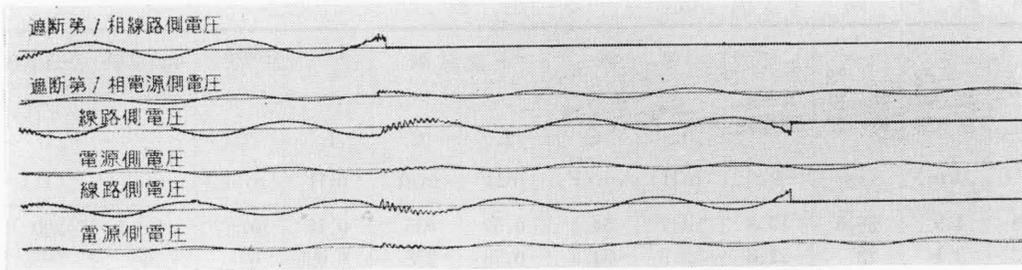
以上の試験結果から他相の影響を考えた(2)式を修正すると第3表の修正値が得られ、三相回路のS.L.F.を単相回路で行なう



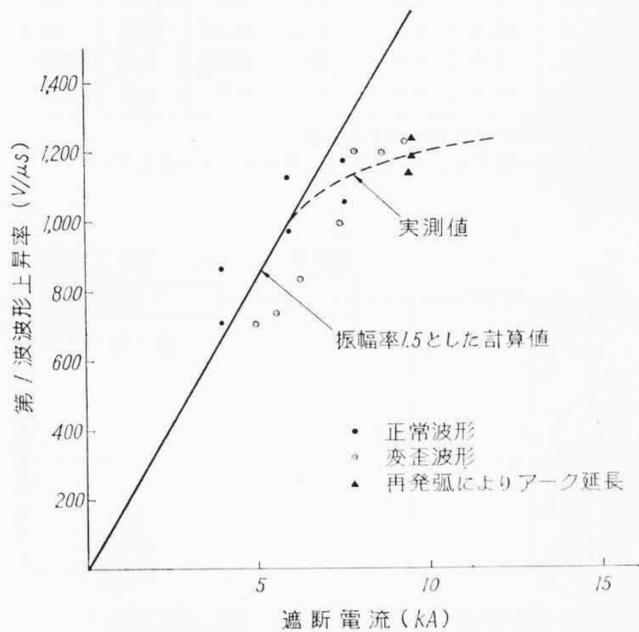
第8図 三相S.L.F.試験回路



第9図(a) 三相S.L.F.第1相遮断波形



第9図(b) 三相S.L.F.遮断時の各相電圧波形



第10図 電流と極間電圧上昇率の実測値

第4表 三相S.L.F.第1相遮断結果

| オンロ No. | 線路側再起電圧振動数 (kc) | 遮断第一相電圧波高値 | | 極間電圧 | | 備考 |
|---------|-----------------|------------|------------|---------|---------|------------------|
| | | 線路側対地 (kV) | ABB極間 (kV) | 線路側対地電圧 | 線路側対地電圧 | |
| 5 | 50 | 8.2 | 9.1 | 1.10 | 1.10 | C ₀ 無 |
| 6 | 50 | 7.8 | 8.6 | 1.09 | 1.09 | C ₀ 無 |
| 7 | 50 | 6.9 | 7.5 | 1.09 | 1.09 | C ₀ 無 |
| 17 | 44 | 6.9 | 7.4 | 1.05 | 1.05 | C ₀ 有 |
| 18 | 44 | 9.8 | 10.6 | 1.08 | 1.08 | C ₀ 有 |
| 19 | 44 | 8.8 | 10.0 | 1.13 | 1.13 | C ₀ 有 |

ときは電源電圧を相電圧の1.5倍、送電線は単相回路を使用すればよい。

3.2.6 ABBの遮断限界と線路側再起電圧の状態

3.2.3節で述べたように実遮断時の線路側再起電圧は頂上部に丸味をもっているが、遮断電流が増加し、限界付近ではどのような波形になるかを単相試験で検討した。試験送電線は第6図の10段分布回路である。第10図に示すように電流の小さい範囲ではサージインピーダンスZと遮断電流Iから計算される理論上昇率 $(\frac{K_s Z \omega \sqrt{2} I}{2})$ と合っているが、ある値以上の電流になると波形の減衰が急に大きくなるため、上昇率は飽和してくる。電圧波形は第11図(a)のように、電流の小さい時はほぼ三角波形になっているが、電流が大きいものでは第11図(b)に示すように急激に減衰する波形になっている。さらに電流が大きいときは第11図(c)のように極間電圧も100μsにわたってほとんど平坦になっていて、ついに発弧に至っている。これは残留コンダクタンスによる熱的再発弧とみられる。これらの試験結果から線路側再起電圧波形に注目するならば、これが三角波状に振動しているときは残留コンダクタンスは存在していないので、性能上十分余裕がある。波形が若干ひずんでもアークが延長するには至らず、性能上余裕がある。波形が極端にひずみ、不規則な波形で極間電圧もほとんど増加しないときはアークの延長がみられるが、遮断は可能でさらに大きな電流を遮断したときにはじめて不能が発生すると考えてよい。したがって線路側再起電圧波形に注目した場合、波

形がひずんでもこれが極端なものでないかぎり遮断限界でないといえる。

3.3 送電線模擬回路の構成法

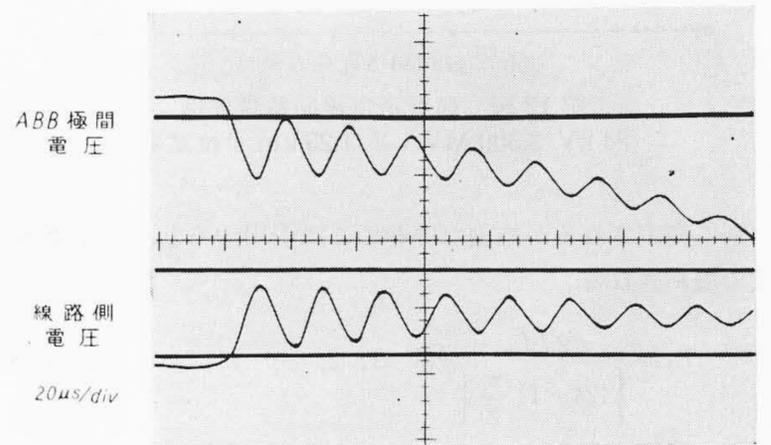
3.3.1 均一分布回路構成法

理論的には10段以上の分布回路が理想的であるが、実遮断による結果では(3.2.3に一例をのべたように)4段回路で十分であるのでその線にそって構成方法を述べる。

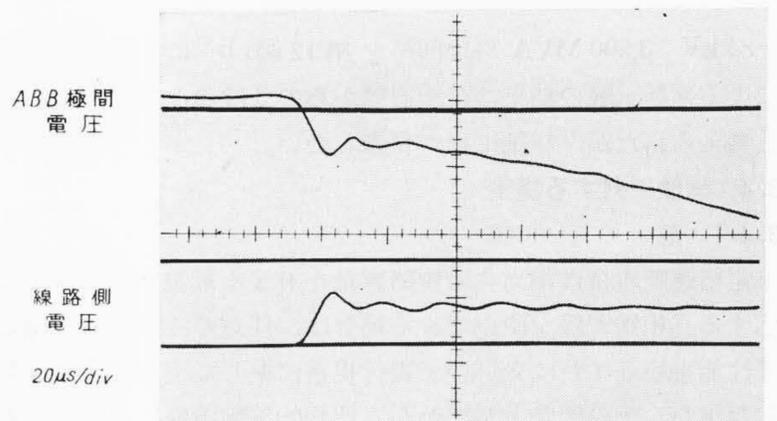
ABBの高圧階級と遮断点数の関係は84kVは2点、168kVは4点、300kVは8点で構成されていて、1点当たりの線路電圧分布が均一であるとし、S.L.F.は80% MVAの遮断電流となる線路長が最も過酷な条件とする。次に線路を4段セクションで模擬したときの固有振動数は集中のその140%であるので、初期上昇率を合わせるようにサージインピーダンスを調整する。これらを考慮して構成した回路定数が第5表である。具体的に示したのが第12図(a)で84kV、3,500 MVA系1遮断点当たりの1.25 km先の故障を模擬してある。

3.3.2 graded L.C 回路⁽⁷⁾

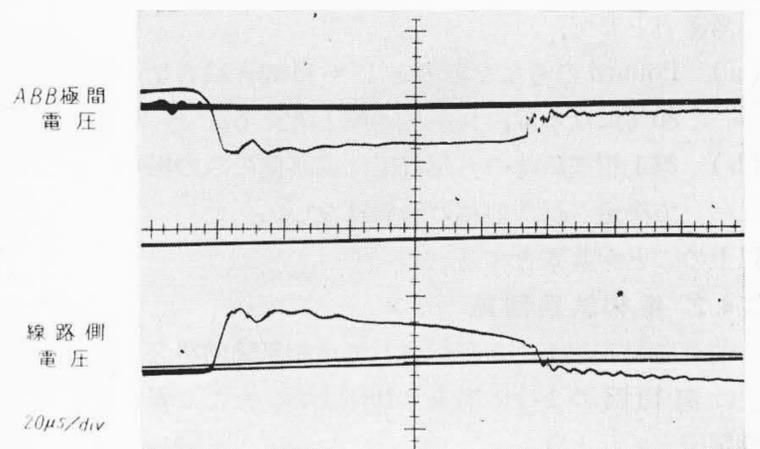
分布回路を並列回路の直列接続におきかえたものであって、本回路は電気試験所、等々力氏の提案されたもので、前記均一回路に比して少ない段数で理想的な三角波形になる特長がある。詳細



(a) 正常



(b) 減衰大



(c) 再発弧後遮断

第11図 線路側電圧波形のひずみ

第 5 表 送 電 線 模 擬 回 路 を 構 成 す る 定 数

| 順 番 | 定 格 電 圧 (kV) | 定 格 MVA | 遮 断 点 数 | 80% MVA | 同 左 電 流 (kA) | 線 路 側 | | *1 第 一 波 高 値 (kV) | 同 左 (一 点) (kV) | *2 障 害 距 離 (km) | *3 復 時 間 (μs) | 対 応 周 波 数 (kc) | 等 価 | | 単 位 試 験 | | 4 段 Γ 形 回 路 セ ク シ ョ ン | | 単 位 試 験 サージイ ンピーダ ンス (Ω) | 全 点 試 験 サージイ ンピーダ ンス (Ω) |
|--------|--------------------|------------|------------|------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------------|----------------------|--------------------------|------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|-----------|------------|--------------------------|------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | | | | | | リアク タ ンス (Ω) | 電 圧 降 下 (kV) | | | | | | L ^{*4} (mH) | C ^{*5} (mμF) | L (mH) | C (mμF) | L (mH) | C (mμF) | | |
| ① | 300 | 15,000 | 8 | 12,000 | 23.2 | 1.46 | 34.6 | 73.5 | 9.2 | 4.9 | 36.5 | 13.8 | 4.7 | 54.4 | 0.59 | 435 | 0.15 | 107 | 36.4 | 290 |
| ② | 300 | 25,000 | 8 | 20,000 | 38 | 0.93 | 34.6 | 73.5 | 9.2 | 3.1 | 23 | 21.8 | 3.0 | 34.8 | 0.38 | 278 | 0.095 | 69 | 37 | 295 |
| ③ | 240 | 10,000 | 6 | 8,000 | 19.2 | 1.4 | 27.6 | 58.5 | 9.74 | 3.5 | 26 | 19.2 | 4.5 | 30 | 0.75 | 120 | 0.19 | 29.5 | 79 | 316 |
| ④ | 204 | 10,000 | 4 | 8,000 | 22.6 | 1.02 | 23.6 | 49.5 | 12.4 | 2.55 | 19 | 26.5 | 3.3 | 21.4 | 0.83 | 85 | 0.21 | 21 | 98.5 | 394 |
| ⑤ | 168 | 7,500 | 4 | 6,000 | 20.6 | 1.0 | 19.4 | 41.2 | 10.3 | 2.5 | 18.5 | 27 | 3.2 | 21.2 | 0.8 | 85 | 0.2 | 21.2 | 94 | 376 |
| ⑥ | 168 | 10,000 | 4 | 8,000 | 27.4 | 0.71 | 19.4 | 41.2 | 10.3 | 1.8 | 13.5 | 37.5 | 2.3 | 15.4 | 0.57 | 61.5 | 0.14 | 16.5 | 96.3 | 385 |
| ⑦ | 84 | 5,000 | 2 | 4,000 | 27.4 | 0.37 | 9.7 | 20.6 | 10.3 | 0.92 | 7 | 73.5 | 1.2 | 7.6 | 0.6 | 15.2 | 0.15 | 3.8 | 200 | 400 |
| ⑧ | 84 | 3,500 | 2 | 2,800 | 19.3 | 0.5 | 9.7 | 20.6 | 10.3 | 1.25 | 9.5 | 54 | 1.6 | 10.6 | 0.8 | 21.2 | 0.2 | 5.3 | 195 | 390 |

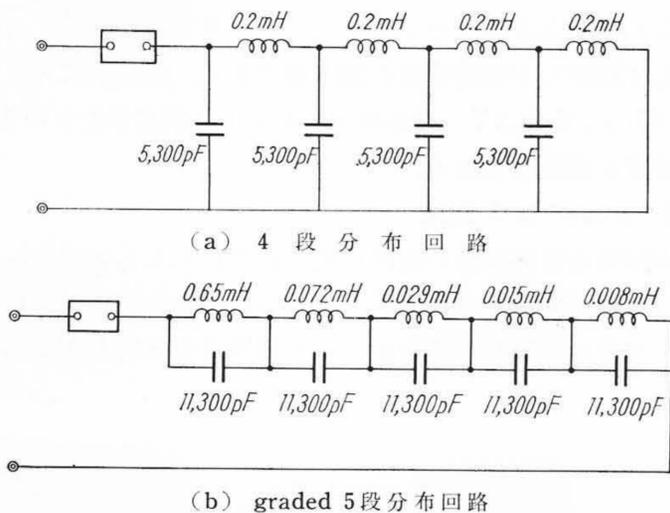
*1 振幅率 1.5 とする。

*2 300 kV 系=0.96 mH/km その他 1.27 mH/km (再起電圧報告書より)

*3 線間波伝搬速度は光速の 90%

*4 電流値と電圧降下が一致する条件

*5 周波数が一致するように選定 (4 段セクションとして)



第 12 図 模 擬 送 電 線 回 路 構 成 例
(84 kV 3,500 MVA 系 1.25 km 単 位 試 験)

は別に発表されるが結論だけをここに引用すると、構成要素は次式で表わされる。

$$L_k = \frac{2lL_0}{\left\{ (2k-1) \frac{\pi}{2} \right\}^2} \quad (k=1, 2, \dots) \quad (8)$$

$$C_k = \frac{lC_0}{2} \quad (9)$$

84 kV 3,500 MVA 対象回路を第 12 図 (b) に示す。この回路による遮断試験の結果は遮断器側からの 3 段のみで十分であろうと考えられたが、詳細は別に報告したい。

3.4 試験に対する提案

3.4.1 前 提

定格遮断容量に相当する短絡容量を有する電源と定格電圧に対応する三相送電線を使用できる場合は、任意の故障条件を選定して性能を検証すればよいので現行規格に準じて実施できる。しかしながら、実際問題としてかかる理想的試験設備は不可能に近いので次に一般に認められている試験法について述べる。

考え方として、

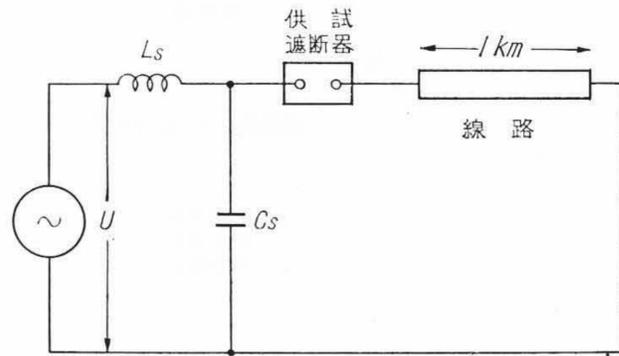
- (a) Pouard の考えを参考として母線短絡容量の 80% になる線路長が最過酷と考える。
- (b) 第 1 相遮断時の再起電圧は線路側のみの振動で決定され、他相の影響はない。

以上のことを基本とする。

3.4.2 単相試験回路

前章に記載したことを総合して単相試験回路としては第 13 図のように構成すればよい。ただし E を相電圧としたとき、

$$U = 1.5E \quad \dots \dots \dots \text{非接地系の三相短絡接地ならびに直接接地系の非接地}$$



第 13 図 単 相 試 験 回 路

短絡の場合

$U = 1.1E$ 直接接地系の三相短絡接地の場合

I : 三相 S. L. F. 時の短絡電流

L_s : I が上記条件を満足するように調整

C_s : 電源側固有振動が JEC 145 の 100% MVA に対応する固有周波数以上になるよう調整

l : 故障点までの線路長

線路 : 実線路または模擬線路

この場合、固有の初期上昇率、初期波高値は第 3 表以上であることを必要とする。

3.4.3 単 位 試 験

前章記載の単相試験は小容量の遮断器以外は通常実施できないが、供試品が多重遮断点構造であるときは母線短絡遮断の検証と同様、単位試験が可能である。

いま一相直列遮断点数を n とし、第 6 表のように 1 点当たりの電源電圧を $1/n$ の大きさとし、線路側の電圧は遮断電流に対し、 $1/n$ になるようにインピーダンスを合わせる。これは同じ特性の線路を n 個並列にするか、または 1 本の線路を $1/n$ の長さにしておく。線路側の固有振動は全点試験のそれと同一であるのでサージインピーダンスを低くするため、 $1/n$ 距離の線路のときは単位長当たりの C を n^2 倍とする。電圧分布が均一でないときは線路

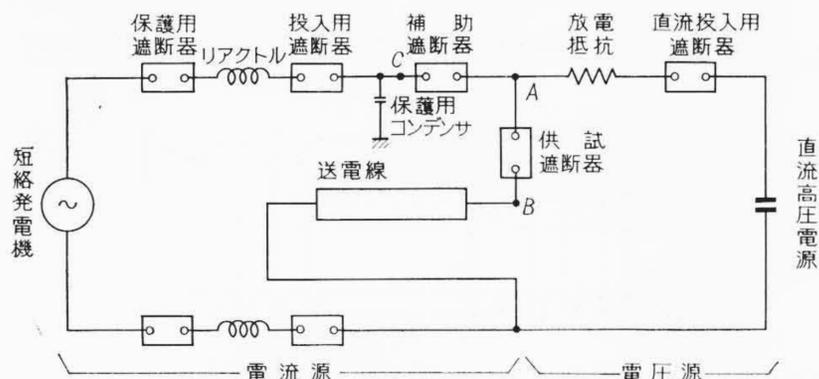
第 6 表 単 位 試 験 回 路 構 成 法

| 同一長、同一特性の線路を使用する | 単位長 L の特性をもった線路を 1 本使用する | 同一長の線路を 1 本使用 |
|-----------------------------------|--|---------------------------------|
| | | |
| 線路は Z, l, L_0, C_0 のものを n 本並列 | 線路は $Z/n, l/n, L_0, n^2 C_0$ のもの、 C_0 は分布させる | 線路は $Z/n, L_0/n, n C_0$ のもの 1 本 |

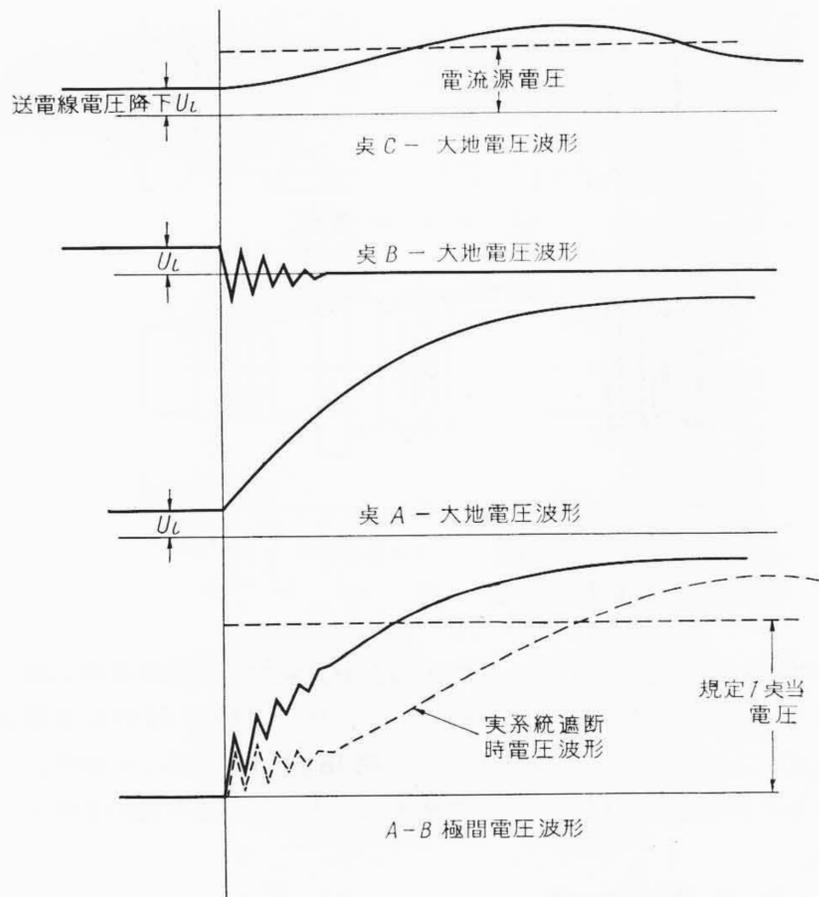
第7表 日立新形 ABB に対する S. L. F. 試験結果

| 試験 No. | フィルム No. | 供 試 遮 断 器 | 送電線回路 | 試験法 | 試験電圧 (kV) | 遮断電流 (A) | アーク時間 (s) | 送電線側再起電圧 | | | 電源側再起電圧 | |
|--------|----------|-------------------------------------|------------|------|-----------|----------|-----------|-----------|------------|----------|----------|--------|
| | | | | | | | | 第1波高値 (V) | 上昇率 (V/μs) | 振動数 (kc) | 振動数 (kc) | 振幅率 |
| 1 | 3 | 300 kV 15,000 MVA 系で 4.9 km 先の故障を対象 | Γ形 4 段分布 | 近似試験 | 12 | 22,700 | 0.47 | 7,000 | 700 | 55 | 2.5 | 1.3 |
| 2 | 6 | | | 近似試験 | 12 | 23,200 | 0.39 | 7,400 | 780 | 55 | 2.5 | 1.3 |
| 3 | 7 | | | 近似試験 | 12 | 23,200 | 0.37 | 8,700 | 720 | 55 | 2.5 | 1.3 |
| 4 | 17 | 84 kV 3,500 MVA 系で 0.92 km 先の故障を対象 | graded 5 段 | 近似試験 | 12.3 | 24,700 | 0.34 | 7,100 | 880 | 72 | 4.1 | 1.39 |
| 5 | 18 | | | 近似試験 | 12.3 | 24,500 | 0.33 | 7,900 | 1,050 | 72 | 4.1 | 1.39 |
| 6 | 19*1 | | | 近似試験 | 12.3 | 24,300 | 0.69 | 6,100 | 580 | 72 | 4.1 | 1.39 |
| 7 | 20*1 | | | 近似試験 | 12.3 | 25,200 | 0.50 | 6,700 | 770 | 72 | 4.1 | 1.39 |
| 8 | 116 | 84 kV 3,500 MVA 系で 1.25 km 先の故障を対象 | Γ形 4 段分布 | 近似試験 | 12 | 24,300 | 0.41 | 9,600 | 710 | 55 | 2.5 | 1.3 |
| 9 | 117 | | | 近似試験 | 12 | 24,000 | 0.42 | 9,600 | 707 | 55 | 2.5 | 1.3 |
| 10 | 10 | 168 kV 7,500 MVA 系で 2.5 km 先の故障を対象 | Γ形 4 段分布 | 合成試験 | 36.5相当 | 24,700 | 0.58 | 9,600 | 440 | 28 | 0.5 以上 | 1.30以上 |
| 11 | 11 | | | 合成試験 | 36.5相当 | 24,000 | 0.55 | 9,400 | 390 | 28 | 0.5 以上 | 1.30以上 |
| 12 | 12 | | | 合成試験 | 36.5相当 | 22,300 | 0.47 | 8,800 | 380 | 28 | 0.5 以上 | 1.30以上 |
| 13 | 13 | | | 合成試験 | 36.5相当 | 24,700 | 0.58 | 9,600 | 415 | 28 | 0.5 以上 | 1.30以上 |

*1 操作圧力 12 kg/cm², その他は 15 kg/cm²



第14図 S. L. F に対する日立等価試験法

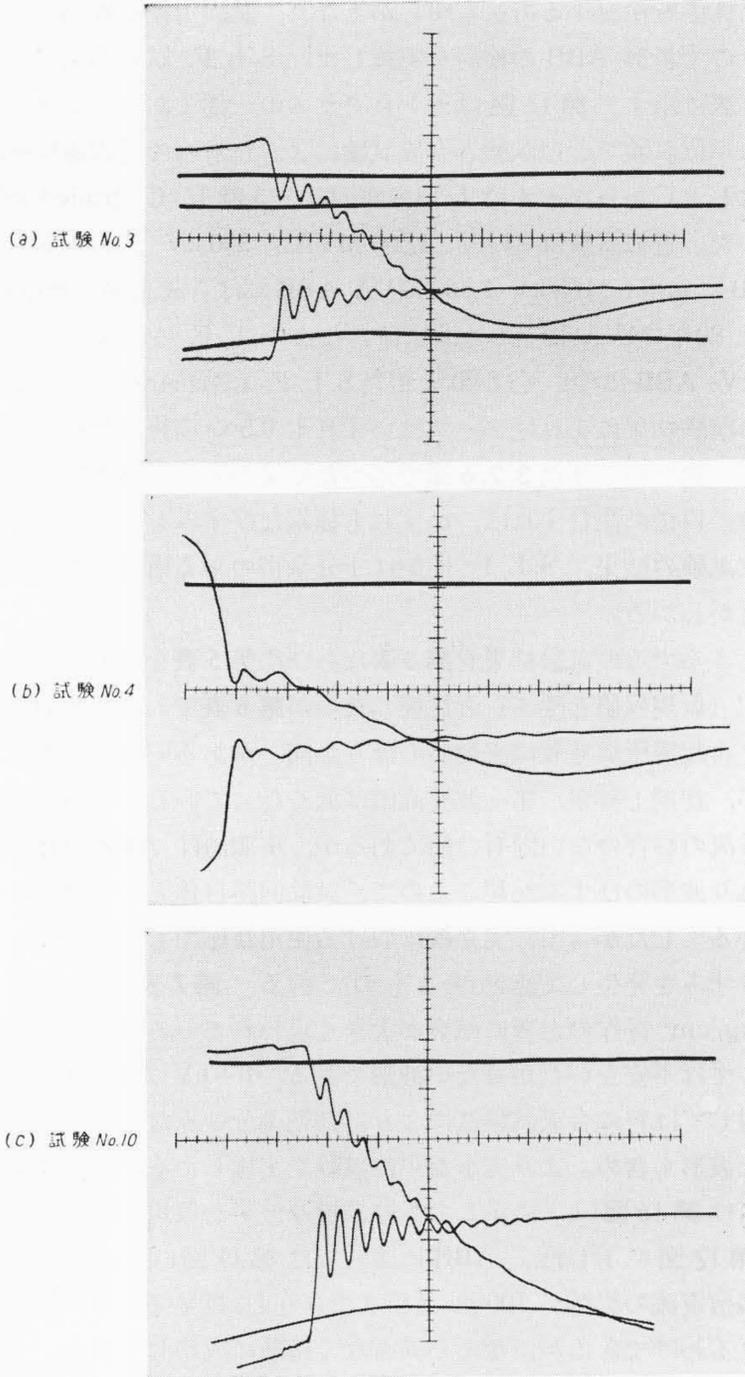


第15図 S. L. F に対する日立等価試験時の電圧

特性と同時に電源側特性も変えなければならない場合もある。その他、一相 2 点構成の遮断器の単位試験、あるいは並列低抵抗付遮断器では近似的な簡便法も考えられている。

3.4.5 試験設備不足時の近似試験法

単位試験法にても容量不足で、正規試験電圧で S. L. F. 対応の遮断電流が得られない場合は、S. L. F. 回路を低電圧規定値で試験して初期波形のみを合わせ、次に端子短絡回路で正規電圧、正規 S. L. F. 電流にて試験すると一応近似的試験となる。



第16図 新形 ABB に対する S. L. F 試験のオシログラム

3.4.6 合成試験法

今度、S. L. F. 検証のために新しく開発した試験法である。従来、母線短絡性能検証に使用してきた日立等価試験法と同じく第14図のように電源を電圧源と電流源に分けて構成するが、電流源にて短絡電流と S. L. F. 時の線路側再起電圧を印加し、電圧源にて母線側再起電圧を印加する。送電線回路の電圧降下分は高周波振動となって、消弧後の供試遮断部へ印加される。ここで電源側電圧波形を母線側の規定固有再起電圧波形を上回るものを選定し、送電線の特性を単位試験時のそれに合わせておけば小容量の

第8表 新形ABB試験結果と目標規定値との比較

| 供試遮断器 | 遮断電流 (kA) | | 初期上昇率 (kV/μs) | | 再起電圧周波数 (kc) | | 第一波波高値 (kV) | |
|-------------------------------|-----------|----------------|---------------|----------------|--------------|-----|-------------|--------------|
| | 仮規定値 | 実測値 | 仮規定値 | 実測値 | 仮規定値 | 実測値 | 仮規定値 | 実測値 |
| 84 kV 3,500 MVA 2点/相 | 19.3 | 24.1~ 24.5 | 1.24 | 0.51 | 54 | 55 | 10.3 | 6.85 |
| 168 kV 7,500 MVA 4点/相 | 20.6 | 22.3~ 24.7 | 0.69 | 0.38~ 0.44 | 27 | 28 | 10.3 | 8.8~ 9.6 |
| 300 kV 15,000 MVA 8点/相 | 23.2 | 22.7~ 23.2 | 0.32 | 0.7~ 0.78 | 13.8 | 55 | 9.2 | 7~ 8.7 |
| 84 kV 3,500 MVA 0.92 km 当操 | 21.5 | *24.3~ 24.7 | 1.38 | *0.88~ 1.05 | 73.5 | *77 | 8.3 | *7.1~ 7.9 |

* 12 kg/cm² 操作時の結果は除く

電源容量で数倍の大容量 S. L. F. 試験が可能である。この試験時各部の電圧電流波形の説明を第15図に掲げた。

3.5 S. L. F. に対する新形 ABB の性能

上述したように予備的検討の結果、現段階において妥当な S. L. F. 遮断性能を検討する方法も明らかとなり、試験用模擬線路も設備されたので新形 ABB の検討を実施した。S. L. F. 試験結果の一部を第7表に示す。第16図はオシログラムの一部である。試験はいずれも単位試験で近似試験と合成試験によったもので送電線模擬回路には L と C からなる4段 I 形分布回路と5段 L. C. graded 回路を用いた。近似試験は 84 kV 3,500 MVA と 300 kV 15,000 MVA の ABB に適用し、168 kV 7,500 MVA ABB には合成試験を適用した。また 80% MVA 相当の遮断電流となる S. L. F. を対象としたが、84 kV ABB については 90% 相当 S. L. F. もあわせ検討した。これらの試験結果によればアークはいずれも 0.5~ 前後で遮断しているので問題ない。また 3.2.6 節で述べた結果から、線路側電圧波形の減衰の様態に注目すれば、いずれも極端なひずみをしていないので単位試験の結果、S. L. F. 性能は十分余裕のある構造になっていることがわかる。

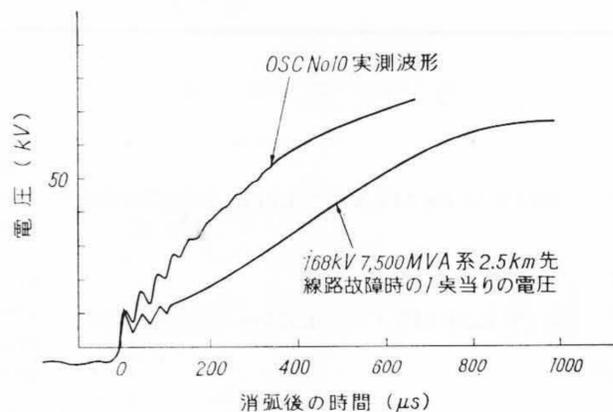
ところでこの試験結果を第3表ならびに第5表を基準として考えた値（仮規程値と呼ぶ）と比較したのが第8表である。遮断電流および再起電圧周波数は実測値のほうが同一かあるいは高くなっているが、初期上昇率、第一波波高値は低くなっている。仮規程値は残留電流の影響のない固有の値であるが、実測値は ABB 自体の特性により波形のひずみが起こるので、試験回路自体としては高くなっている。したがって、実系統における使用状態でもこのような若干のひずみを発生して遮断するものである。第7表、No. 6, 7 の 12 kg/cm² 操作のときに減衰が大きく現われているが、遮断可否については不安をいだかせない波形である。168 kV 7,500 MVA, ABB に対しては特に合成試験法により、初期部分のみならず電源側再起電圧波形も含め、より完全な単位試験を実施したもので、オシログラムは第16図(c)に示してあり、模写波形を仮規程波形と比較して第17図に示した。ABB によっては第11図(c)に示したように残留電流の影響が 100 μs 近傍まで存在し、再発弧することも考えられるわけであるが、なんら異常なく遮断に成功している。

以上、今回開発した新形 ABB が S. L. F. 遮断に対しても優秀な性能を有することを述べたが、仮に規程した値、あるいは試験法自体についても、今後の検討により変更すべき点もあるかと考えており、本 ABB の性能もなお詳細な検討を重ねている。

4. 汚損時のせん絡特性ならびに遮断特性

4.1 供試 A B B

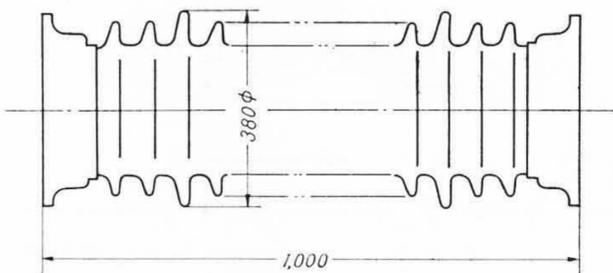
日立製作所では塩害汚損による屋外機器の外部絶縁を重視して、汚損時の特性を研究し、その結果の一部はすでに発表した⁽⁸⁾。今回開発した 84~300 kV OPG 形 ABB も耐塩害を考慮して製作されたもので、その耐汚損特性を検討するに当たり、完全組立状態にある



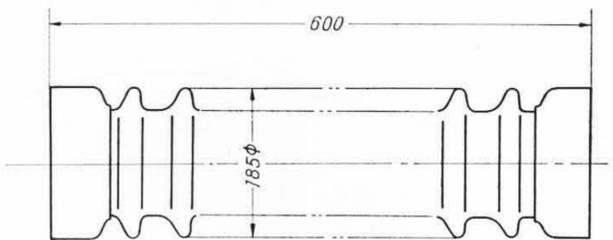
第17図 S. L. F 等価試験結果

第9表 一相分当たりのがい子数

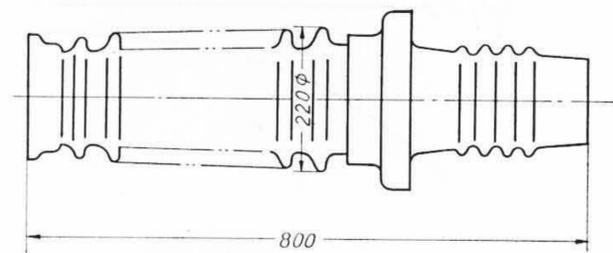
| 定格電圧 (kV) | がい子名 | 送気がい管 (No. 1) | コンデンサがい管 (No. 2) | ブッシング (No. 3) |
|-----------|------|---------------|------------------|---------------|
| 84 | | 1 本 | 2本直列 (水平) | 2本直列 (水平) |
| 168 | | 2本直列2併立 | 4本直列 (水平) | 4本直列 (水平) |
| 300 | | 3本直列4併立 | 8本直列 (水平) | 8本直列 (水平) |



(1) がい管 No.1



(2) がい管 No.2



(3) ブッシング No.3

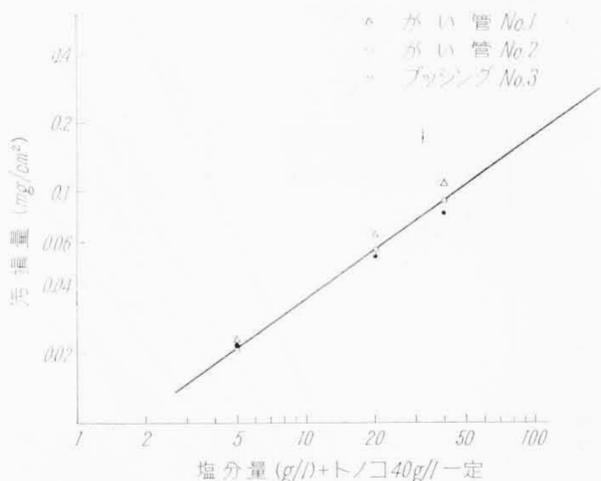
第18図 供試がい子

OPG 形 ABB を供試対象として等価霧中試験および活線洗浄試験、さらにはがい子汚損時の遮断試験を実施した。OPG 形 ABB に使用されている個々のがい子の形状寸法を第18図(1)~(3)に示す。これらのがい子は定格電圧別に第9表に示すように組み合わせられている。

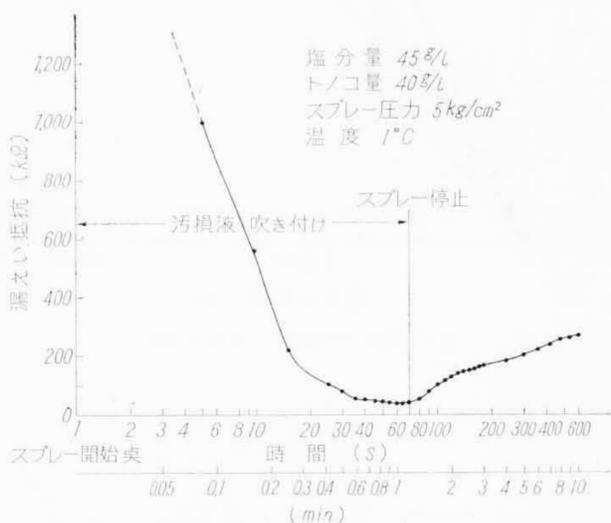
4.2 試験方法

4.2.1 塩分量と汚損量の関係

あらかじめ適当の割合に計量した食塩と、トノコからなる汚損液をがいし表面漏えい抵抗が飽和するまで吹き付け、3分後の汚損液を採取して、がい子の塩分量と汚損量の関係を求めた。第19図は個々のがい子を組み合わせた一相分完全組立状態における 300 kV ABB の塩分量と汚損量の関係を示したもので、図中の実線は個々のがい子の総合平均値を示したものである。なお、第20図に 300 kV ABB の対地間を対象にしたスプレー時のがい子表面漏えい抵抗の時間的変化を示したが、スプレーを開始すると表面漏えい抵抗は急激に低下し、約 35 秒で飽和点に達する。したがっ



第19図 がい子の塩分量対汚損量の関係



第20図 汚損液吹付時の漏えい抵抗変化

て本報の等価霧中試験の際はスプレー開始点から停止までの時間を40秒としている。

4.2.2 等価霧中試験

等価霧中試験は突印法および電圧上昇法による。電圧上昇法は ABB 対象がい子の表面漏えい抵抗が飽和するまで吹き付け、湿潤状態にある 30 秒後に予想せん絡の 70% 電圧を印加、逐次せん絡まで 2.5kV/μs の速度で上昇した。供試 ABB としては 300kV ABB 一相完全組立状態を使用し、84kV、168kV ABB 対象時は配線と接地のみ、そのたびごとに変更し、電圧は第9表のがい子組み合わせにのみ印加するようにした。また試験回数は汚損1条件について 10~20 回を基準としている。

4.2.3 活線洗浄試験

洗浄方式としては古くから実施されているジェット洗浄および日立製作所推奨の固定ノズル洗浄の2方式で実施した。第21図に固定方式による洗浄状況写真を示す。電圧印加および洗浄操作の時間調整を第22図、洗浄条件を第10表に示す。

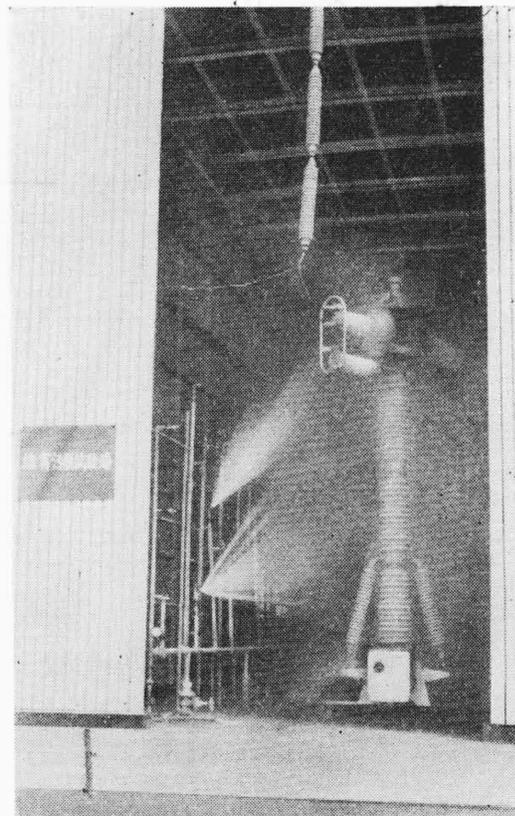
4.2.4 がい子汚損時の遮断試験

一相完全組立状態の空気遮断器を完全に等価霧中試験と同じ要領で汚損させ、吹付終了1分後に普通一般の短絡遮断試験を実施した。

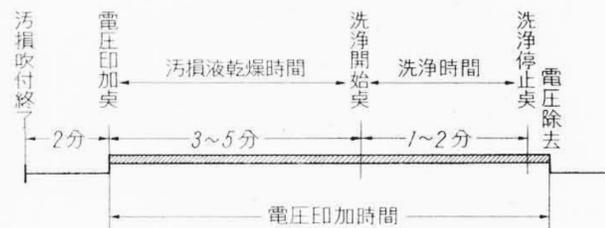
4.3 等価霧中試験結果

前述の試験方法によって実施した 84, 168, 300kV ABB の等価霧中法の汚損特性を第23~26図に示す。

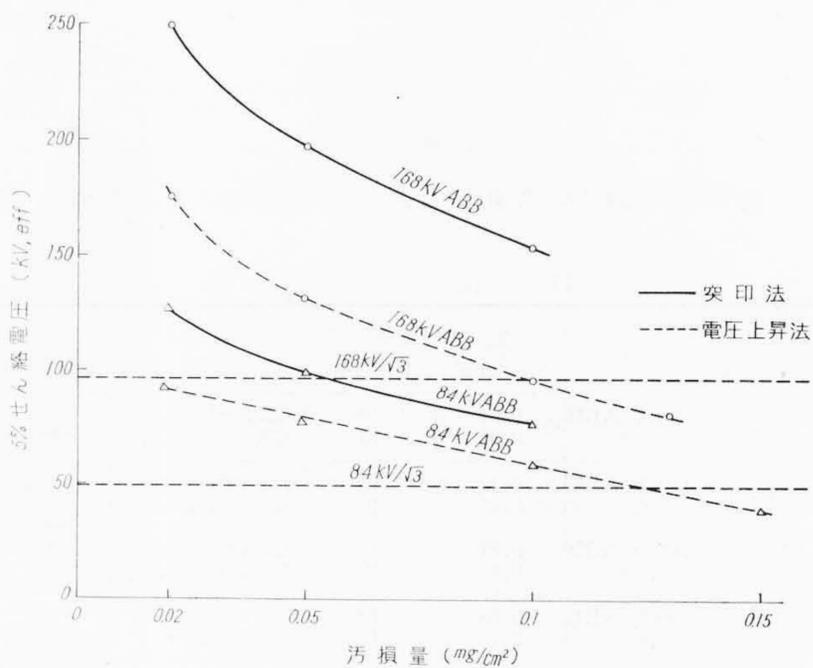
等価霧中法におけるせん絡電圧は、がい子形状の差および気象条件の影響が若干あるが、平均直径と漏えい距離でほぼ決定される。第26図(a)のように突印法ではほぼ比例するが、上昇法では飽和傾向があり、いわゆる連効率を考慮する必要がある。しかし第26図(b)の水平配置の極間せん絡電圧は上昇法でも突印法でもほぼ漏えい長に比例する。



第21図 固定方式洗浄ノズルによる洗浄状況



第22図 電圧印加と洗浄操作の時間調整

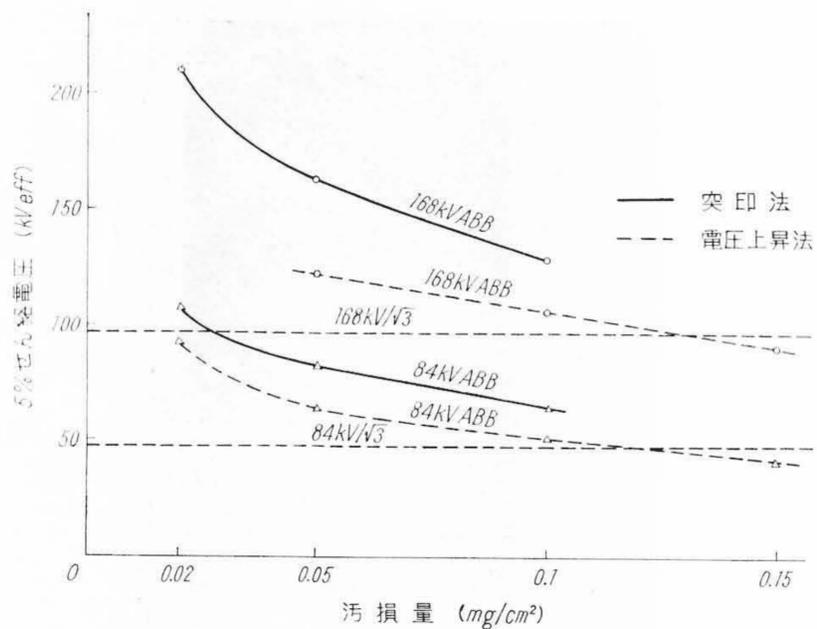


第23図 84kV、168kV ABB 対地の汚損量とせん絡電圧

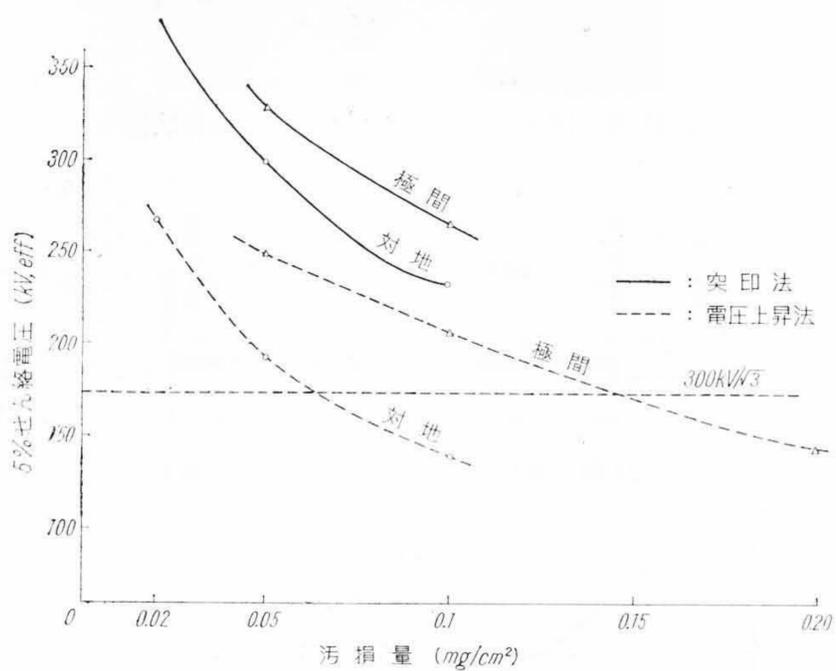
第10表 洗浄条件

| 条件 | 方式 | ジェット洗浄 | 固定式洗浄 |
|----------------|----|------------|---------------------------------|
| 洗浄距離(m) | | 7 m | 2.5 m |
| ノズルの仕様 | | ノズルの口径 16φ | FS-3-Eノズル (能美防災製) |
| 洗浄水圧(kg/cm²) | | 10 | 10 |
| 洗浄水の固有抵抗(Ω-cm) | | 5,000 | 5,000 |
| 洗浄ノズル数(個) | | 1 | 84kV 空気遮断器: 4 168kV 空気遮断器: 8 |

次に各 ABB の相電圧を基準にした対地、極間の限界汚損量は、いずれも 0.15 mg/cm² 以上である。かりに電圧上昇法のデータでも 300kV ABB 対地が 0.065 mg/cm²、300kV 極間ならびに 168kV、84kV 対地極間はいずれも 0.1 mg/cm² ないしそれ以上で、汚損地



第24図 84kV, 168kV ABB 極間の汚損量とせん絡電圧



第25図 300kV ABB 対地、極間の汚損量とせん絡電圧

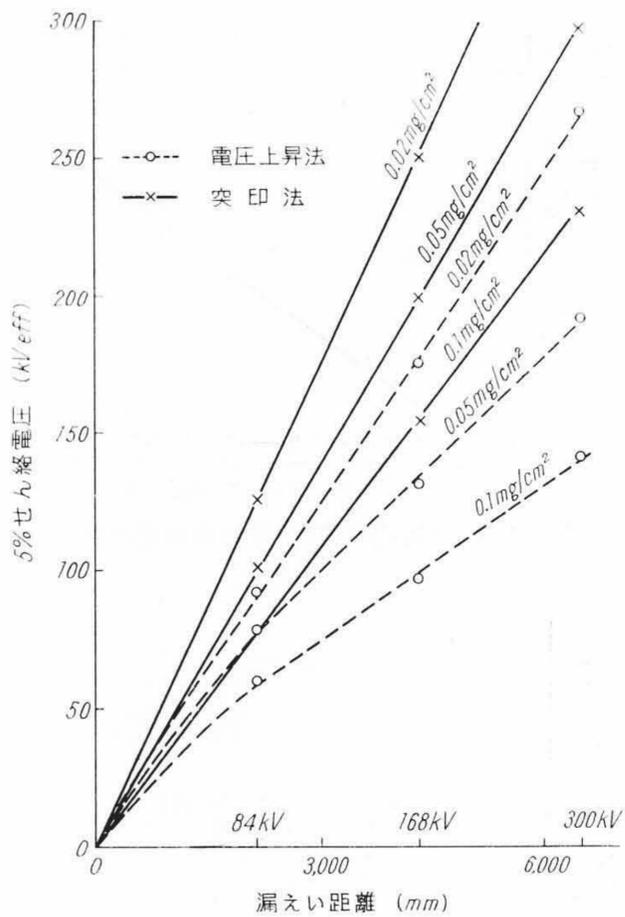
第11表 洗 浄 特 性

| 洗浄条件 洗浄方式 | 洗浄対象 供 試 品 | 汚 損 量 (mg/cm ²) | 洗浄水圧 (kg/cm ²) | 試験電圧 (kV) | せん絡回数 試験回数 |
|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------|---------------|
| ジェット洗浄 (口径 16φ) | 300kV ABB (対地) | 0.04 | 10 | 173(300kV/√3) | 0/4 |
| | | 0.05 | 10 | 173(300kV/√3) | 2/4 |
| ジェット洗浄 (口径 16φ) | 300kV ABB (極間) | 0.12 | 10 | 173(300kV/√3) | 0/4 |
| | | 0.15 | 10 | 173(300kV/√3) | 2/6 |
| スプレー洗浄 (移動式) (噴霧状ノズル) | 300kV ABB (対地) | 0.08 | 10 | 173(300kV/√3) | 0/4 |
| | | 0.1 | 10 | 173(300kV/√3) | 3/4 |
| スプレー洗浄 (固定方式) (FS-3-E ノズル) | 168kV ABB (対地) | 0.05 | 10 | 160 | 0/4 |
| | | 0.1 | 10 | 130 | 0/4 |
| | 84kV ABB (対地) | 0.05 | 10 | 98 | 0/4 |
| | | 0.1 | 10 | 80 | 0/4 |

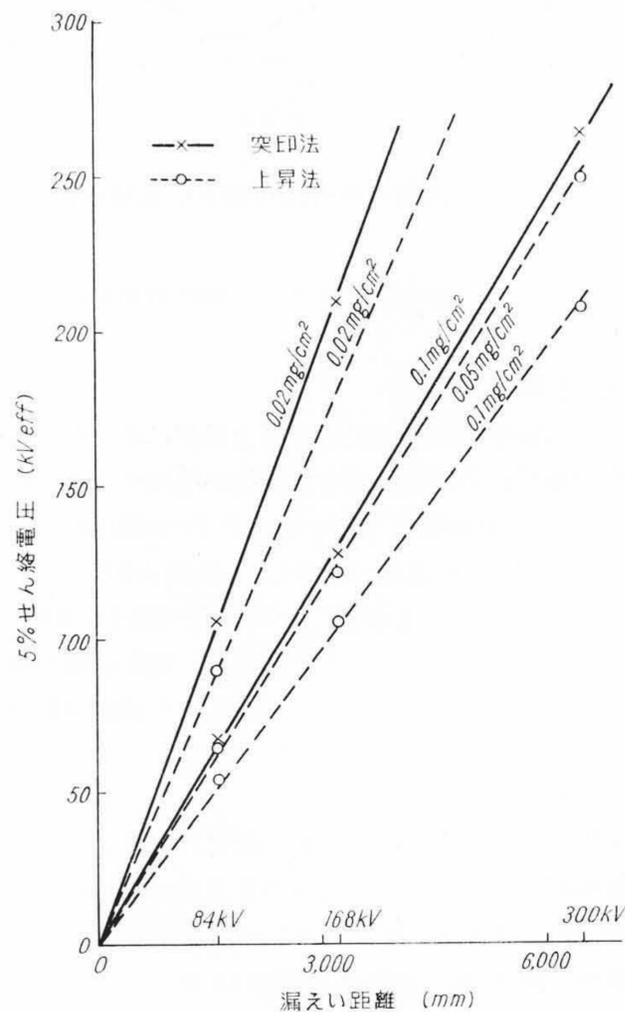
域での適用が十分可能である。

4.4 活線洗浄試験結果

ジェット洗浄と固定式洗浄による洗浄特性の比較を第11表に示す。洗浄試験を実施して4回の不せん絡値を一応耐電圧と見なすと口径16φのジェット洗浄による300kV ABBの対地の洗浄限界汚損量は0.04 mg/cm²である。また極間の洗浄限界汚損量は0.12~0.13 mg/cm²である。対地は垂直配置であるのに対し極間は水平配置であるので水切りがよく洗浄性能の向上に大きく影響している。また洗浄対象 ABB に対し今回の洗浄試験は斜方向からの注水であったが、せん絡が洗浄対象がい管からのみ発生し、そのほかのがい管では1回もなく、したがって洗浄水のしぶきによる他、がい管へのせん絡波及の危険はないと考えて差しつかえない。なお、噴霧状



(a) 対地 (突印法, 電圧上昇法)



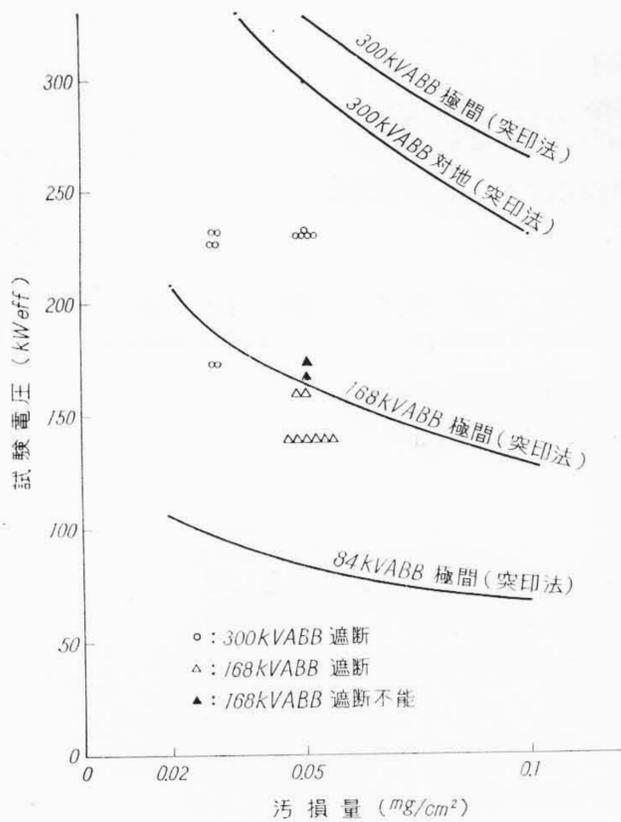
(b) 極間 (突印法, 電圧上昇法)

第26図 漏えい距離と5%せん絡値

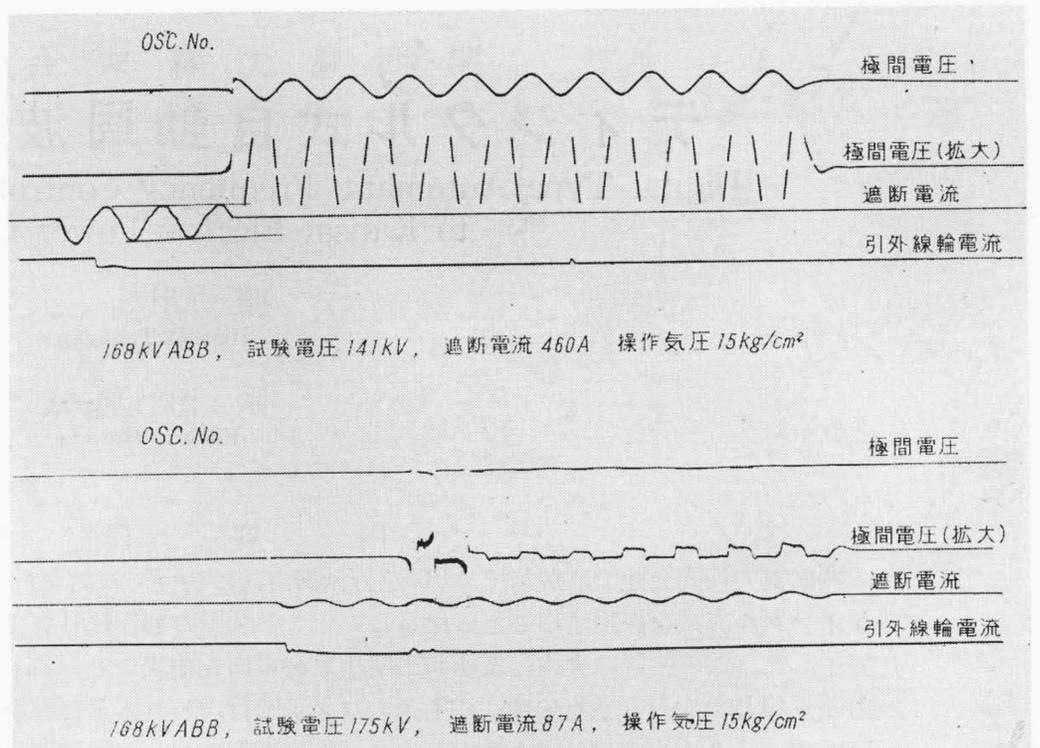
ノズルを使用した試験結果では、対地は0.08 mg/cm²の汚損まで洗浄可能となり、ジェット洗浄に比し約2倍程度まで向上している。次に168kV ABBについてジェット洗浄可能な限界汚損量は対地0.06 mg/cm²、極間は0.1 mg/cm²以上であると推定された。日立推奨洗浄法を試みた84kV ABB, 168kV ABBの対地に対する洗浄は等価霧中法の耐電圧値まで洗浄可能であることを再確認した。

4.5 汚損時の遮断試験結果

ABBの外部絶縁がい子が汚損の被害を受けた場合、がい子表面の漏えい抵抗が低くなり、不均一な電圧分布となって、遮断性能の低下をきたすことが考えられる。



第 27 図 がい子汚損時の遮断限界



第 28 図 短絡遮断試験時のオシログラム
(a) 168kV ABB 141kV 遮断試験
(b) 168kV ABB 175kV 遮断試験

今回は汚損量 0.03, 0.05 mg/cm² の 2 条件で, ABB の対地, 極間を完全に汚損状態にして短絡遮断試験を実施した。がい子汚損時の遮断限界を第 27 図, 短絡遮断試験の代表的オシログラムを第 28 図に示す。300 kV ABB に対しては汚損量 0.05 mg/cm², 試験電圧は相電圧(E) の 1.3 倍まで実施したが, 遮断可能で外見上もまったく問題ない。また 168 kV ABB は汚損量 0.05 mg/cm² 試験電圧は相電圧(E) の 1.5~1.8 倍まで実施したが, 1.65 E が限界で高压側 1 点の並列コンデンサがい管にコロナを発生したのが認められたが異常なく遮断している。しかし 1.73 E 以上ではコンデンサ外部で外面せん絡し, 遮断不能となった。図中に示した曲線は等価霧中突印法の 5% せん絡電圧値で遮断限界とよく一致している。ABB の遮断時は極間電圧が零から瞬時に回復電圧が印加されるので突印法のデータと一致するのは十分理由のあることである。したがって普通の短絡遮断は 0.05 mg/cm² の条件でも可能である。しかし脱調遮断は 300 kV ABB は 0.03 mg/cm², 168, 84 kV ABB は 0.02 mg/cm² の汚損条件まで可能である。これに対しては前述の活線洗浄を適用する必要がある。

5. 結 言

以上を要約すると下記のとおり結論できる。

- (1) 脱調遮断特性は IEC 案の 2 倍の遮断電流でも問題ない。
- (2) 異相地絡遮断特性は定格遮断電流でも問題ない。
- (3) 近距離線路故障遮断特性を検討するため単相試験法, 送電

線模擬回路, 単位試験法および合成試験法の合理性を明らかにして妥当な試験法を確立した。

- (4) 単位試験により新形 ABB は母線短絡容量が定格遮断容量に等しい系統における近距離線路故障を十分処理できる。
- (5) 塩害汚損時の耐電圧特性は相電圧を基準にして限界汚損量がいずれも 0.15 mg/cm² 以上で, 汚損地域での適用が十分可能である。
- (6) 汚損時の活線洗浄可能電圧値は洗浄法によって変化するが, 等価霧中耐圧値まで上昇させることができる。
- (7) 汚損条件下の遮断性能は等価霧中突印法耐圧値の回復電圧まで支障なく, 0.05 mg/cm² の汚損までは正規遮断性能を有する。終わりに近距離線路故障遮断の検討に横浜大学中西教授, 電気試験所等々力技官の研究成果を引用させていただいたことに対し深く謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 仲野, 平田, 細川: 日立評論 45, 1055 (昭 38-7)
- (2) W. F. Skeats ほか: AIEE Conference Paper, 57-727 (1957)
- (3) M. Pouard: S. F. E., 95, 748 (1958)
- (4) J. Jussila et W. Rieder: A. S. E., 53, 451 (1962)
- (5) 中西: 電気学会遮断器専門委員会資料 No. 18-4 (1962)
- (6) 山崎: 昭 38 電気四学会連大 No. 755 (昭 38-4)
- (7) 等々力ほか: 昭 38 電気四学会連大 No. 754 (昭 38-4)
- (8) 山崎, 伊藤: 日立評論 45, 1072 (昭 38-7)