懸垂がい子連の同時せん絡

Coincidental Flashover of Insulator Strings

河 野 照 哉*
Teruya Kōno

内 容 梗 概

2回線せん絡事故が非常に多いので問題になっている。この原因を調べるため、懸垂がい子連を2連並列につり下げ、同時にせん絡する現象を検討したが、同時せん絡の割合は非常に高いことがわかった。同時せん絡現象は短かいがい子連でも発生する。現在、2回線せん絡を模擬して実際に近い状態で研究しているが、2回線せん絡事故の解明には大きな足がかりになると考える。

1. 緒 言

超高圧送電線の雷せん絡事故には今まで経験しなかったような雷害事故が多い。とくに、わが国の超高圧送電線では両回線あるいは2相以上にまたがる地絡事故が数多く発生している。

最近の統計によると⁽¹⁾、わが国の超高圧送電線路の雷せん絡のうち多重地絡は全体の半数に及び、その際高速度再閉路はいずれも失敗に終っている。米国の 345 kV 線路においても率こそ少ないが、たとえば OVEC (Ohio Valley Electric Corporation)系統では 1955,56 年の 2 箇年間に全せん絡事故70回中両回線せん絡が 5 回記録されており、いずれも再閉路の失敗となっている⁽²⁾。 138 kV 線路では 1年間のせん絡数 7 回のうち 4 回が両回線せん絡であった記録がある⁽³⁾。したがって、このような両回線同時せん絡現象の解明とその防止策の研究は超高圧送電線の信頼度を向上する上にも非常に重要であろう。

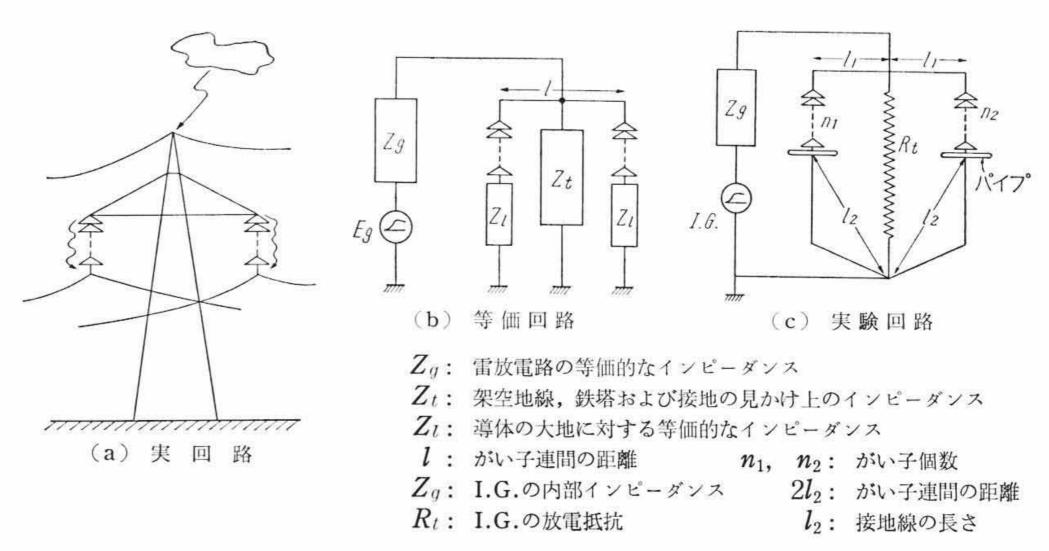
2回線同時せん絡を考える前に同時せん絡現象の 基礎解析として懸垂がい子連の同時せん絡について 実験的検討を行った^{(4)~(6)}。 実際の送電線において は鉄塔あるいは導体のサージ・インピーダンスが雷 せん絡に関係するが、それらについては引き続いて 研究するとして、ここに述べるような基礎的実験に おいても同時せん絡の様相がはっきり伺えるのは興 味深い。

2. 長がい子連の同時せん絡

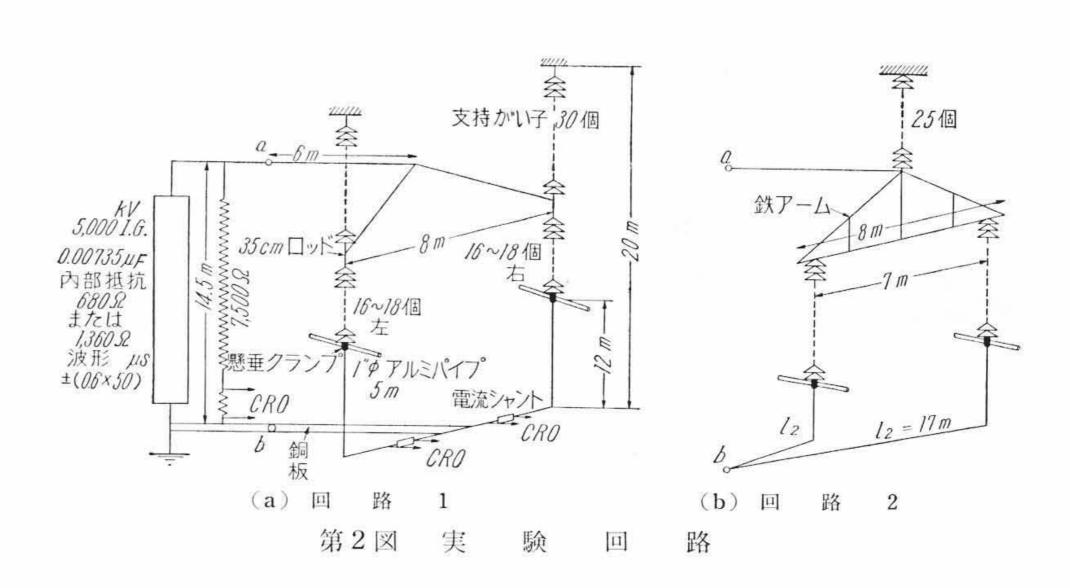
2.1 実 験 回 路

送電線路が雷撃を受けたとき、どのような機構によってがい子連がせん絡に至るかは非常に複雑で、多くの点が正確にわかっていない。2回線同時せん絡についても実際の条件を正確に模擬することは非常に難かしいが、一応第1図に示すような考え方である。

まず、第1図(a)のように2回線鉄塔の1つの鉄塔アームを考え、 両端の懸垂導体は同相の電圧が課電されているものとする。鉄塔頂 あるいは架空地線に雷撃をうけて鉄塔逆せん絡を起した場合を考え ると、第1図(a)は第1図(b)のような等価回路になる。 Z_g , Z_t , Z_t はそれぞれ雷放電路、鉄塔(架空地線を含む)、送電導体の等価 的なインピーダンスである。そのほかの回路の変数としては雷撃電 流波形、アームの長さ、がい子個数などが考えられる。とくに Z_g , Z_t



第1図 2回線同時せん絡の模擬



については現在のところ明らかではない。

実際の高圧実験室内の実験では第1図(c)のように配置した。ここで Z_g は衝撃電圧発生装置 (I. G.) の内部インピーダンスで雷放電路のインピーダンスを模擬している。放電抵抗 R_ℓ は Z_ℓ に対応する。 Z_ℓ は 200Ω 程度と考えられるがここでは模擬していない。しかし長さ I_2 の接地線によってある程度近似している。アルミパイプはがい子の電界分布が実際と同一になるように付けたもので懸垂クランプによって取り付けている。実験回路の詳細は第2図のとおりであるが,同図(b)は鉄塔アームを模擬してつり下げた。 I. G. の内部抵抗を I,360 Ω および I および I の I 2 通りに変えて実験した。

2.2 16 個連の同時せん絡率

第2図(a)の実験回路によって8mの間隔をおいて同一条件で左右につるしたがい子16個連の同時せん絡の確率は第1表に示すようになった。*印は第2図(b)の回路でのデータである。片側のみせん絡が左右のどちらか一方に片寄っている傾向があるが、これはがい子の特性のばらつき、近接物体の影響があるためだと考えられるが、

^{*} 東京大学工学部電気工学科

^{**} 日立電線株式会社電線工場

極	性			负	ħ	亟	性				ΙE	極	性	
印加貫	臣 圧 (kV)	1,400~ 1,600	$^{1,600}_{-800}$	$1,800 \sim 2,000$	$^{2,000}_{2,200}$	$^{2,200}_{2,400}$	$2,400 \sim 2,600$	$^{2,600}_{2,800}$	$2,800 \sim 3,000$	1,400~ 1,600	$1,600 \sim 2,000$	$2,000 \sim 2,400$	$^{2,400\sim}_{2,800}$	$2,800 \sim 3,000$
内部抵抗	印加回数	9			10		10 5		8		8	8	8	8
680Ω	同時せん絡	0			5		5 3		8		0	1	3	6
ALLEY DETROITED TO PE	左のみせん絡	6			5		5 0		0		2	0	0	0
(8月21日)	右のみせん絡	3			0		0 2		0		6	7	5	2
内部抵抗	印加回数	10	3	7		8		7		3	14	7	8	
$1,360\Omega$	同時せん絡	0	1	4		5		4		0	2	3	2	
SS-ACCHIVATES FLICE	左のみせん絡	7	2	1		1		0		0	2	0	5	
(6月26日)	右のみせん絡	3	0	2		2		3		3	10	4	1	
内部抵抗	印加回数	10	14	7	7		8	11						
$1,360\Omega$	同時せん絡	1	2	1	1		5	4						
	左のみせん絡	6	11	6	5		2	7						
(7月3日)	右のみせん絡	3	1	0	1		1	0		* Q E	18日 実験	美回路 2 (b)	

第1表 懸 垂 碍 子 16 個 連 の 同 時 せ ん 絡 率

その片寄りが正と負で違っていることは興味深い。

2.2.1 印加電圧の影響

一般に50%せん絡電圧付近では同時せん絡の起る機会は皆無ではないが非常に少なく、印加電圧が上昇するにつれて同時せん絡の確率が増す。印加電圧の極性によってその確率は異なるが、負極性では50%せん絡電圧の1.5倍にもなると半数以上が同時せん絡を起す。

同時せん絡率は電圧の低い部分では、日によってかなりばらついているが、全体の傾向としては変りがない。これらのデータのばらつき程度についてはもっとデータを集積する必要がある。

2.2.2 I.G. 内部抵抗の影響

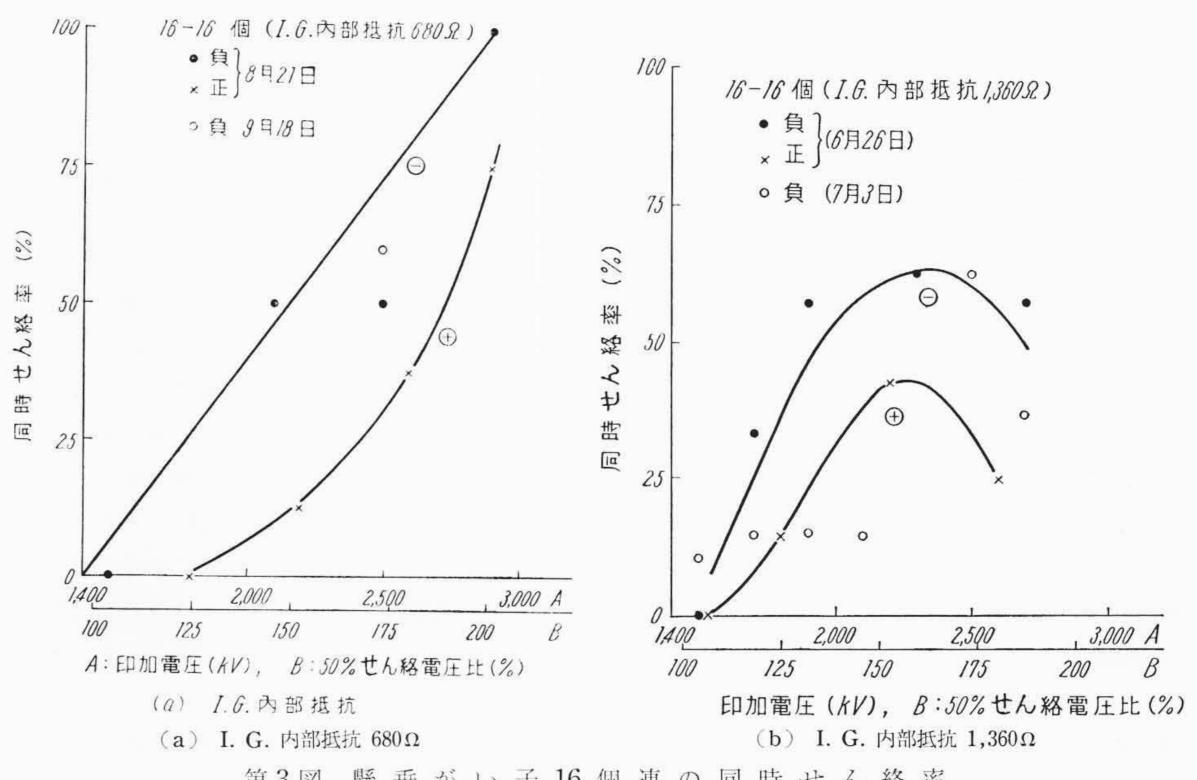
同時せん絡率は I.G. 内部抵抗に

よって大きく変動する。 第3図 (a), (b)は I.G. 内部抵抗が 680, 1,360 Ω におけるがい子 16-16 個の同時せん絡率の電圧特性 である。印加電圧が 50% せん絡電圧の 50~75% 増までは内部抵抗 680 Ω でも 1,360 Ω でも同じ傾向で、電圧の上昇とともに同時 せん絡率は上昇を続け、せん絡率の絶対値も負波では 680 Ω の方がやや多いのに正波では逆にやや少なくなるなど、きわだった差 はみられないが、電圧をさらに上昇すると、内部抵抗の小さい 680 Ω の時は同時せん絡率はそのまま上昇して50%せん絡電圧の 2 倍でほとんど全部同時せん絡になる。一方、内部抵抗 1,360 Ω では 電圧が75% 増以上になっても同時せん絡率は増えないで、むしろ減少する傾向がみられた。

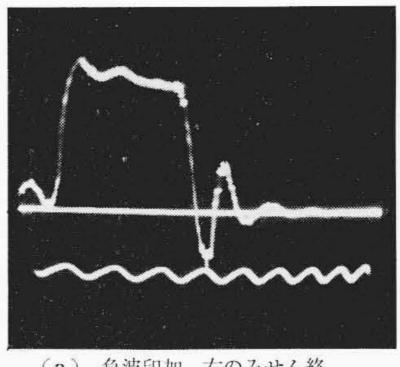
実際の雷放電路の等価的インピーダンスについては明確ではないが、一般にいわれているように数百 Ω とすれば、同時せん絡率は 680Ω の場合に近いか、あるいはもっと同時せん絡の機会が増加すると思われる。

2.2.3 極性の影響

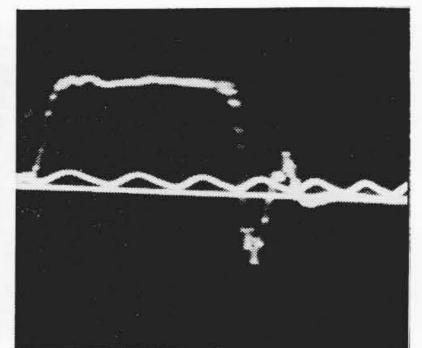
一般に、がい子キャップ側(鉄塔側)に負波を加えた場合の方が正波よりも同時せん絡率はやや高くなっているが、電圧に対してはどちらも同一の傾向をもっている。ただ、導体のサージ・インピーダンスとして 200Ω 前後を考慮した場合には同時せん絡率の極性差も変ってくることが考えられ、2回線せん絡に対しては鉄塔のサージ・インピーダンスとともに導体のサージ・インピーダンスを考慮しなければ十分なデータとはならないであろう。



第3図 懸垂がい子16個連の同時せん絡率



(a) 負波印加,右のみせん絡 V=1,510kV,t=2.7μs 内部抵抗680Ω(F.N.618)



(b) 負波印加,同時せん絡
 V=1,680kV, t=3.0μs
 内部抵抗 1,360Ω (F.N. 328)

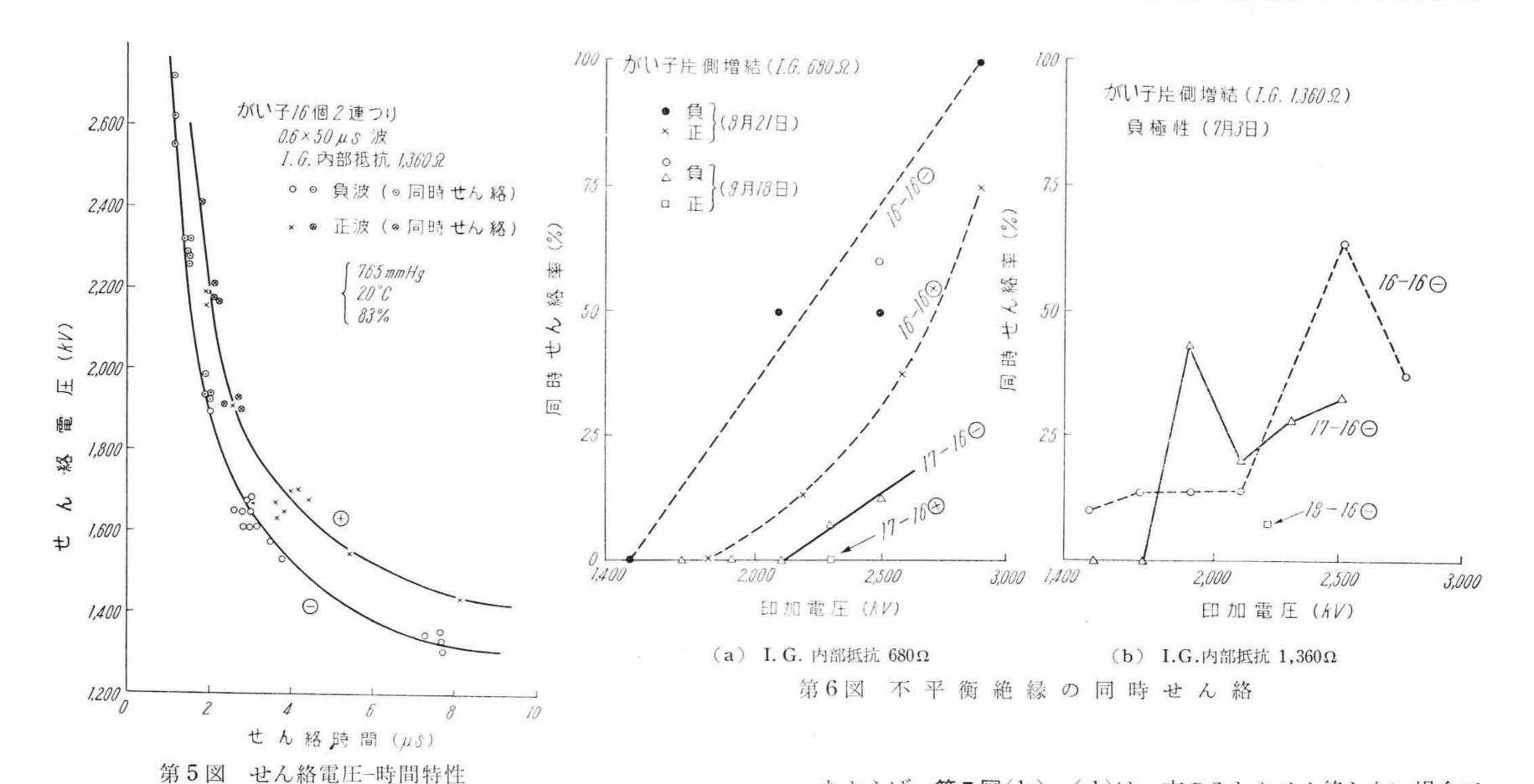
第4図 せん 絡 電 圧 波 形

せん絡時の波形は**第4**図(a),(b)に示すが,がい子の接地側にインピーダンスが入っていないので、片方がせん絡すればがい子端電圧は零になる。したがって、同時せん絡はほとんど同じ時間に起っていると考えられ、せん絡の位相差はほとんどなく、検出はきわめて難しい。この点導体インピーダンスがあれば電圧は零にならないので、もっと低い電圧から同時せん絡の起る確率がずっと増加するものと考えられる。

なお、せん絡電圧-時間特性は**第**5図に示すようで裸がい子16個1連のV-t曲線とほとんど同一である。

第1表をみると片側せん絡の場合,負波では左側,正波では右側が多くせん絡している。これは放電の統計的ばらつき以外に近

H



接物の影響あるいはがい子の個々の特性の差の影響があるためで あろうが理由はわからない。

2.3 不平衡絶縁の効果

同一条件で懸垂した2連のがい子に同一の衝撃電圧を印加した場合,かなり高い確率で同時せん絡が起ることがわかった。この同時せん絡を避ける方法の1つとして2連のがい子の一方を1~数個がい子増結することが考えられる。

この不平衡絶縁の効果を調べるため、第2図(a)および第2図 (b)の回路で、一方にがい子を1~2個増結した場合の同時せん絡 率を調べた。これを第6図(a), (b)に示す。第6図(a)は第2図 (b)のアームを使用した配置で16-17個にした場合の同時せん絡率 である。1個の増結によって同時せん絡率は大きく減少する。2回 線同時せん絡はこの場合とは各種の条件が大きく異なるけれども, 1ないし2個というわずかの不平衡によって同時せん絡軽減の可能 性があることを示していると考えられる。ただ、電線側の交流電圧 の位相が異なる場合にはその考慮も必要になる。これに対して, 第 6図(b)では印加電圧の低い部分でかえって1個増結した方が同時 せん絡率が高くなるようなデータが出ているが、これは左側が非常 に多くせん絡している事実(片側せん絡の場合,左のみが42回,右 のみが6回,同時せん絡14回)からみて,左側の絶縁が多少弱く,右 側1個増結によってかえって両がい子連の絶縁が平衡したためでは ないかと考えられる。16-17個(左側増結)で左17個側のみせん絡 77回,右16個側のみせん絡15回,同時せん絡9回になっている。第 6図(b)でも, 左17個側にさらに1個増結して18個にすると50% せん絡電圧の 1.5 倍の電圧で12回印加したうち同時せん絡はわずか に1回のみで不平衡絶縁の効果はやはり大きいものと考えられる。

3. せん絡の状況

第7図にせん絡時の放電路の状況を示した。これらはすべて解放 撮影である。

2連のがい子のうち片側のみしかせん絡しないときには途中まで 進行していた放電がほかの一方がせん絡して電圧が零になるためせ ん絡に至らず消滅してしまうことになる。これは放電の進行中の一 場面をとらえたのと同じことで放電路の進展の模様が解析できる。

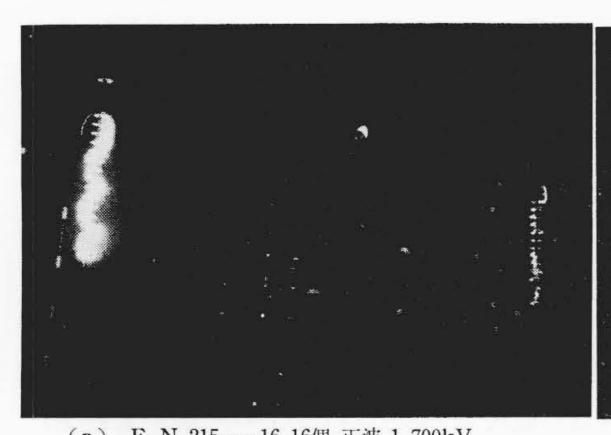
たとえば, 第7図(b), (d)は一方のみしかせん絡しない場合で あるが、(b)では下から11個、(d)では上から4個が細い放電路に よって橋絡されていて, 他方のせん絡によって印加されていた電圧 が急減するまでにこれだけ放電路が伸びていたことがわかる。(b) は正波印加の場合で、この時には正極側のがい子キャップから放射 状に放電路が出発して、これが下の負極(接地)側からがい子面をは って昇ってきた放電路と一致すると, (a)にあるような上部にクリ ヤーアーク(Clear Arc)を伴ったせん絡になる。このような正極キ ャップ側より放射状に気中に伸びる放電路はロッドでなしに(f)の ように鉄アームから直接がい子連をつり下げると、がい子キャップ の電界強度が緩和され、その代りにアーム先端の電界が集中するの で、アーム先端から発生するようになる。負波印加のときには正極 である下部接地端からは放電路はほとんど伸びない。せん絡路は負 極側からがい子面をはって降りてくる放電路だけでほとんど決定す る。したがって、負波印加では(c)、(e)のようにすべてがい子面 をはうカスケードアーク (Cascade Arc) になる。

これはせん絡までの時間遅れが長い50%せん絡電圧近くでもみられ、特に負波の場合はすべてカスケードアークになった。せん絡までの時間遅れが短かくなるにつれてクリヤーアークからカスケードアークに移って行くという文献でと異なっているのは招弧環の有無にも関係するが、がい子個数の少ない場合には正波では完全なクリヤーアークがみられることから、長いがい子連になると起るもので個々のがい子の分担電圧分布が関係するものであろう。しかし、キャップ側負波印加ではクリヤーアークはみられなかった。

(e)は左側18個,右側16個で同時せん絡した唯一の例であるが, このように不平衡にするとたとえ同時せん絡してもアークのエネル ギーの分配は非常に不平衡になって増結側はアークの輝度が弱い。 ただし、導体のサージ・インピーダンスがはいればせん絡電流はほとんど同じになるであろう。

4. 短がい子連における検討

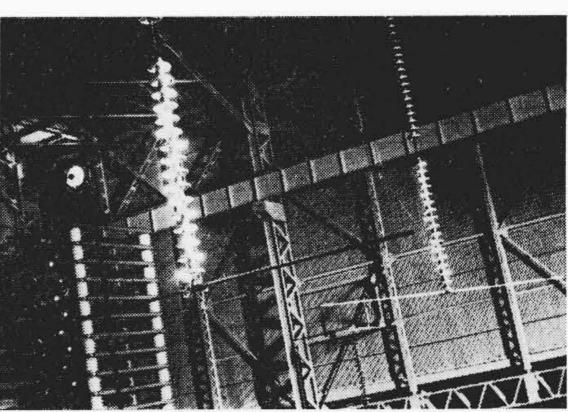
今までのべてきたような懸垂がい子連の同時せん絡は16個連というような長がい子連に固有の現象ではなく、1 個-1 個、2 個-2 個、3 個-3 個という組合せでも同じように起るので、取扱の簡単な2-2 個の組合せで基礎実験を行った。実験回路は\$8 図(a),(b)である。



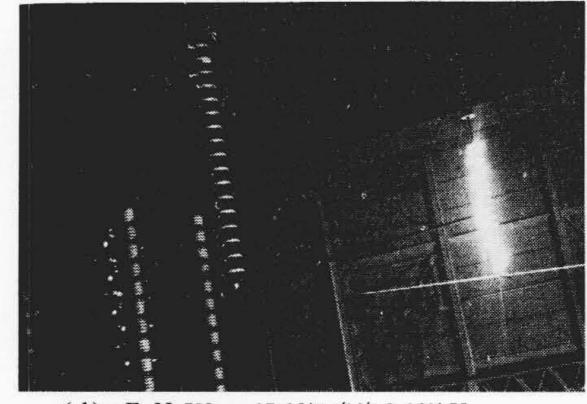
(a) F.N.215……16-16個 正波 1,700kV 6月26日 実験回路 2 (a) 1,360Ω 同時せん絡



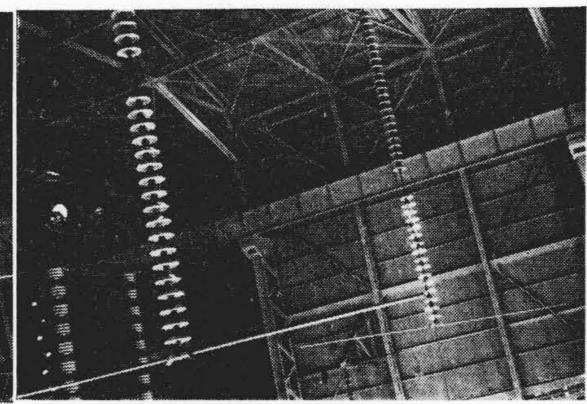
(b) F.N.232……16-16個 正波 2,210kV 6月26日 実験回路 2(a) 1,360Ω 右のみせん絡



(c) F.N.404……16-16個 負波 2,520kV 7月3日 実験回路 2 (a) 1,360Ω 同時せん絡



(d) F.N.509……17-16個 負波 2,060kV 7月3日 実験回路 2(a) 1,360Ω 右(16個)のみせん絡



(e) F.N.529……18-16個 負波 2,050kV 7月3日 実験回路 2(a) 1,360Ω 18-16個での同時せん絡の唯一の例



(f) F.N.921……16-16個 正波 2,300kV 9月18日 実験回路 2(b) 680Ω 同時せん絡

第7図 せ

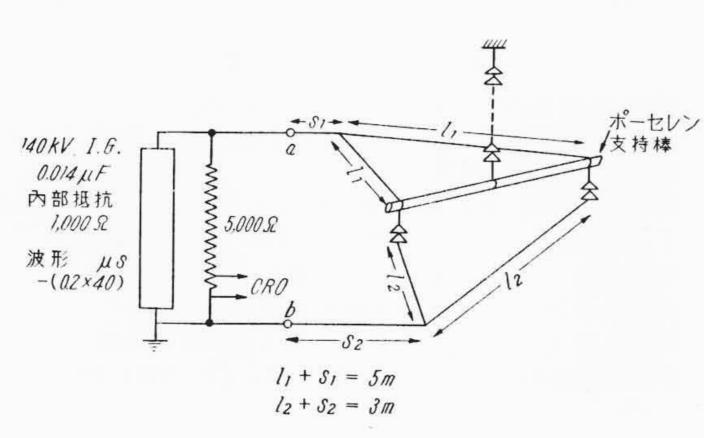
र्ने

2

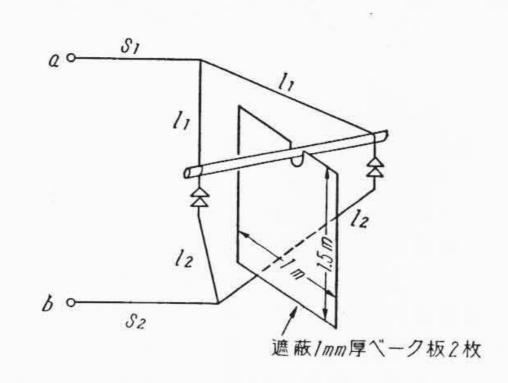
0

状

況



(a) 回路/



(b) 回路 2 (しゃへい板挿入) 第8図 実 験 回 路

4.1 がい子連間の距離の影響

同一条件でつり下げた2連のがい子に同一電圧を印加すれば、統計的ばらつきの程度の差で両者とも負極側より先行放電路が進みはじめ、どちらか先に正極あるいは正極からの放電路と接触すればそのがい子連はせん絡して印加電圧を短絡する。これががい子連間を結ぶリードあるいは鉄塔アームによって他方のがい子に伝わり、そのがい子に印加されている電圧を急に減少させる。したがって、電圧が急減する前にこのがい子でも放電路が十分伸びて正極と結ばれれば同時せん絡になる。がい子連間の距離によって情報が伝わる時

第2表 がい子連間の距離と同時せん絡率

<i>l</i> ₁ (m)	l_2 (m)	印加回数	同時閃絡回数	
1	1	10 10	1 0 2 3 6 7 6 6 6 6 3 6 2	
1	2	10		
2	1,	10		
2	2	10 10 10		
3 3 4	1 2 1	10 10 10		

 $2 l_1 \cdots$ がい子連間の高圧側をつなぐリードの長さ $2 l_1 \cdots$ がい子連間の接地側をつなぐリードの長さ

間に差ができるので、このような考え方が正しければがい子連間の距離によって同時せん絡率が異なるであろう。このことを確めるため第8図(a)のようにがい子連2個を1m離してつるし、 s_1+l_1 、 s_2+l_2 を一定に保ってI.G.への負荷条件を変えないようにし、50%せん絡電圧の約2倍の一定電圧を印加した。 l_1 , l_2 が変ったときの同時せん絡率は第2表になる。

この表によれば、同時せん絡率はがい子間の距離によって大きく変化する。接地側を結ぶリードの距離も高圧側を結ぶリードの距離も同じように影響しているが、両者のうち短い方の影響を受けているようである。距離が短かいほど同時せん絡が少ないのは上にのべた考え方が正しいとすれば納得できるが、この結果のように距離が2mと4mで大幅に変るとすれば同時せん絡になるかならないかは数mを電磁波が進む程度の時間によって決まることになる。したがって、同時せん絡の時間的ずれは非常に短いものと推定され、両がい子連の電流波形を比較しても時間的な差ははっきり測定できなかった。ただ、導体のサージ・インピーダンスがはいる場合には一方がせん絡しても電圧が残るので、その残留電圧が50%せん絡電圧を越

第3表 遮へい板の効果

遮へいの有無			遮へい	板なし	遮へい板あり		
実 駹	魚 順	序	印加回数	同時せん絡	印加回数	同時せん絡	
0 11 00 11	$\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$	$l_1 = l_2$	10	7	10	5	
8月23日	$\begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix}$	= 2 m	10	6	10	5	
24日 -	\int_{2}^{1}		10	6	19	6	
<i>2</i> 7H •	$\begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix}$	$l_1 = l_2$ $= 1 \text{ m}$	10	0	10	2	

印加電圧 50%せん絡電圧の2倍,負波

えていればかなり遅れて他方がせん絡するようになる。ここに2回 線せん絡との差が存在する。

4.2 遮へいの影響

第8図(b)のように第8図(a)でがい子連問に厚さ1mmのベーク板2枚をそう入して、一方のせん絡によって他方のがい子連のせん絡が助長されるかどうか検討した。第3表の結果では遮へい板による同時せん絡の差は大きくないので、一応、光あるいは光電子による影響はないと考えられるが、これだけからははっきり結論できない。

5. 結 言

- (1) 同じ個数よりなるがい子連を2連同一条件で並列に接続し、衝撃電圧を加えると、同時にせん絡する確率はかなり高く超高圧2回線鉄塔における2回線1相せん絡の機会がかなり多い事実の1つの裏ずけになる。
- (2) 16-16個を 7 ~ 8 mの間隔で並列に接続した実験によれば,同時せん絡率は I.G. の内部抵抗で大きく異なるが,内部抵抗 680, 1,360 Ω のとき,印加電圧が 50% せん絡電圧を少し越える ところから同時せん絡が起りはじめ,50% せん絡電圧の $50\sim75\%$ 増で半数以上同時せん絡になる。それ以上の電圧では,内部抵抗 680 Ω ではさらに上昇して 2 倍の電圧で同時せん絡率はほとんど 10 割になるが,1,360 Ω では逆に減少気味である。負波印加の方

が同時せん絡率がやや高いが、全体の傾向は正負とも同一である。

- (3) 2連のうち一方を1個ないし2個増結して不平衡絶縁を行うと同時せん絡率は大幅に減少する。このような方法で2回線事故を軽減できる可能性がある。
- (4) せん絡路を写真によって観察すると、同時せん絡に至らない場合でも負側より数個以上のがい子は放電路によって橋絡されている。交流電圧が重畳している場合この部分を続流が流れるかどうかは検討する必要がある。
- (5) 懸垂がい子連の同時せん絡はがい子 1~3 個でも起る。 2-2 個で検討したところ,がい子連間を結ぶリードの距離が同時 せん絡率に大幅に影響する。また,一方のがい子連のせん絡によってできる光そのほかの放射線が他方のがい子連のせん絡を助 長し,同時せん絡率に影響するとは考えられない。

以上、懸垂つりにしたがい子連のせん絡の同時性について検討したが、2回線せん絡とは回路の条件が大幅に異なるので、現在、鉄塔あるいは導体などのサージ・インピーダンスをそう入してできるだけ2回線せん絡の条件に近い状態で同時せん絡現象を研究している。アークホーンを付加した場合についても検討するつもりである。なお、各種気中間隙の同時せん絡から大気中放電の様相が見出されるかも知れない。

この研究は東京大学福田教授のご指示によるもので,日立電線株式会社研究部長久本博士,ならびに永野主任のご援助を感謝する。 実験には日立電線株式会社秋山,志賀両君のご助力を得た。

参 考 文 献

- (1) 川合: 電気四学会連合大会 903 (昭 35)
- (2) H. L. Rorden, E. S. Zobel, G. D. Lippert: T. A. I. E. E. 76 (3), 954–60 (1957)
- (3) R.W.Caswell, E.F.Koncel Jr., I.B.Johnson, N.R.Schultz: T. A. I. E. E. 76 (3), 1480–91 (1957)
- (4) 日立電線: 高電圧技術研究会資料 3-25
- (5) 河野, 沼尻: 高電圧技術研究会資料 4-10
- (6) 河野, 沼尻: 電気学会東京支部大会 252 (昭 35)
- (7) B. E. Kingsbury: T. A. I. E. E. 76 (3), 1321–29 (1957)



特 許 の 紹 介



特許 第268769号

田中春雄•秋田六郎吉田忠勇

ダブルクロー形チエン式プーラ装置

この発明は、並列に接続した2個の開閉器をプーラのクローおよび最前部炭車群の位置を検出する装置にそれぞれ連けいさせ、炭車だめに所定数の炭車が詰込まれたとき、前記開閉器の作動によりプーラをクローの水平状態において自動的に停止させるようにしたことを特長とする。

押しボタン6を押すと主開閉器5は閉路してモータ4が駆動して、スプロケット2bは回転しチェン2aを駆動させるから、クロー2cにより炭車群の各炭車軸1aを右方向に押圧して炭車を逐次炭車だめCへ押し込む。この際、クロー2cが水平状態になるとき開閉器8に作動してその接点8mを開放させるが、炭車だめCに設置した開閉器9の接点9mは閉じているからモータ4は停止しない。

炭車だめCに所定数の炭車が詰込まれて、最前部炭車群1'の車輪が位置検出装置3の踏板3aを踏むと、開閉器9は作動してその接点を開く。このときクロー2cが水平状態になれば、開閉器8の接点は開放されるからプーラは停止する。

炭車だめに詰込まれた炭車で1列車を編成するとディーゼルロコにより引出す。すると位置検出装置3の踏板3aはバネにより押し下げられるから、開閉器9の接点は閉じて元状態に復帰する。

この発明によれば、炭車だめに所定数の炭車が詰込まれたことを 確認することができ、列車の引出し時に炭車やディーゼルロコがクローに引掛る心配が全くなく安全に軌条上を通過できる。

(野 村)

X-X 斯 面 図

主 回 路 図

操作回路図

側 面 図

