

架空送電線の雷事故様相の再現に関する研究

川村 裕直^{*1}

1. はじめに

送電線事故の約6割を占める雷害は、大規模な停電や広範囲な瞬時電圧低下を引き起こすため、適切な雷害対策の実施により、送電線信頼度を維持・向上することが重要な課題となっている。送電線雷事故を低減させる合理的な耐雷設計を実現するためには、実際の事故様相を解明し、得られた知見に基づいて対策することが1つの有効な方法と考えられる。

これまでの送電線雷撃における事故様相を集約すると、上相および中相における1線地絡事故の頻度が高く、特に夏期の事故実績においては、中相の1線地絡事故の頻度が高く、上相の1線地絡事故の頻度を上回っている。また、多相事故においても中相の地絡を伴う事故が多い。

本報告においては、中相の地絡事故が高頻度で発生することを含めた275kV送電線における事故

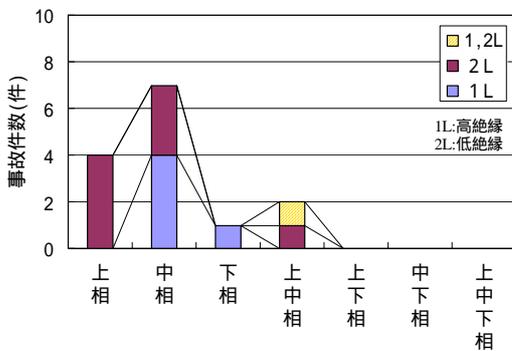
様相メカニズムの解明ならびに事故様相の再現結果について紹介する。

2. 送電線事故実績の調査

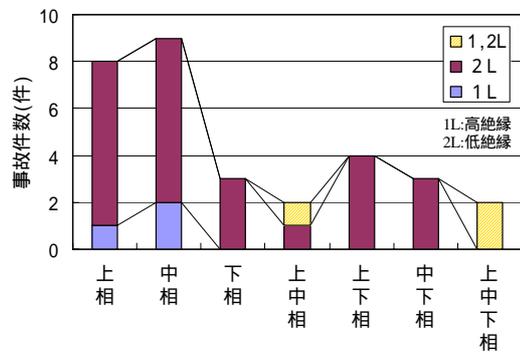
(1) 絶縁方式別の送電線事故様相

1991～2002年度における275kV送電線の事故様相について、絶縁方式別に分類した結果を第1図に示した。第1図(a)および(b)は不平衡絶縁方式の送電線における夏期および冬期の事故様相を示しており、第1図(c)および(d)は平衡高絶縁方式の送電線における夏期および冬期の事故様相を示している。

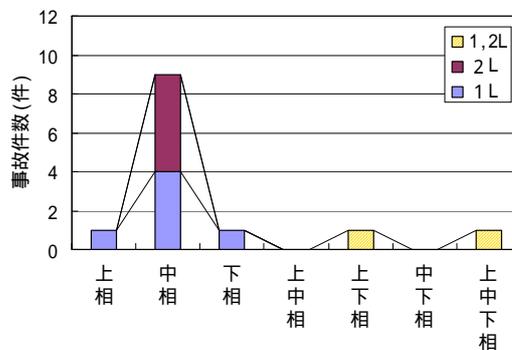
夏期は冬期と比べて、事故件数が少ないが、中相の1線地絡事故の比率が著しく高い。夏期は落雷頻度が高いが小電流雷が多く、送電線雷撃であっても、事故に至らないケースが多くなり、事故件数が少なくなると考えられる。また、冬期は夏期と比べて落雷頻度は低いですが、大電流雷の発生頻



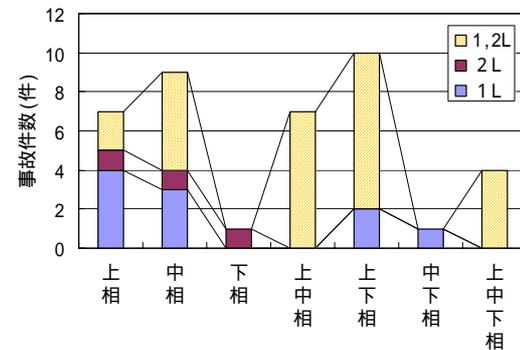
(a) 不平衡絶縁方式[夏期]



(b) 不平衡絶縁方式[冬期]



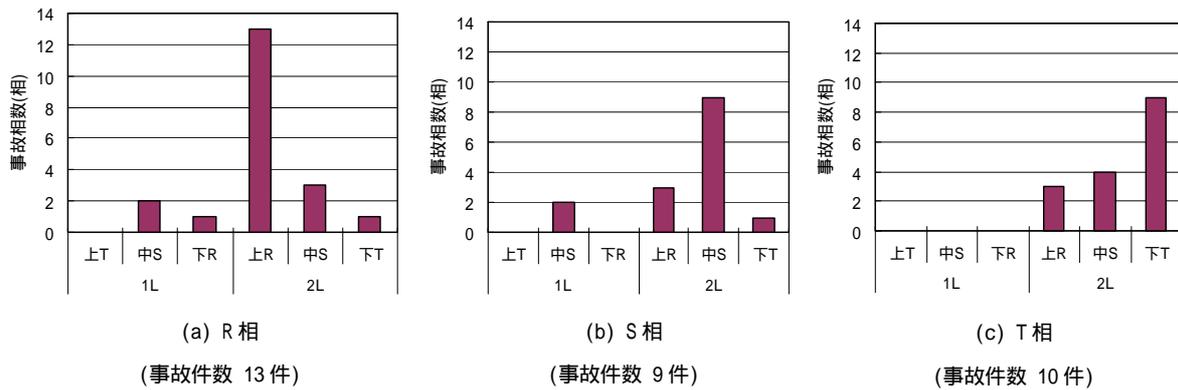
(c) 平衡高絶縁方式[夏期]



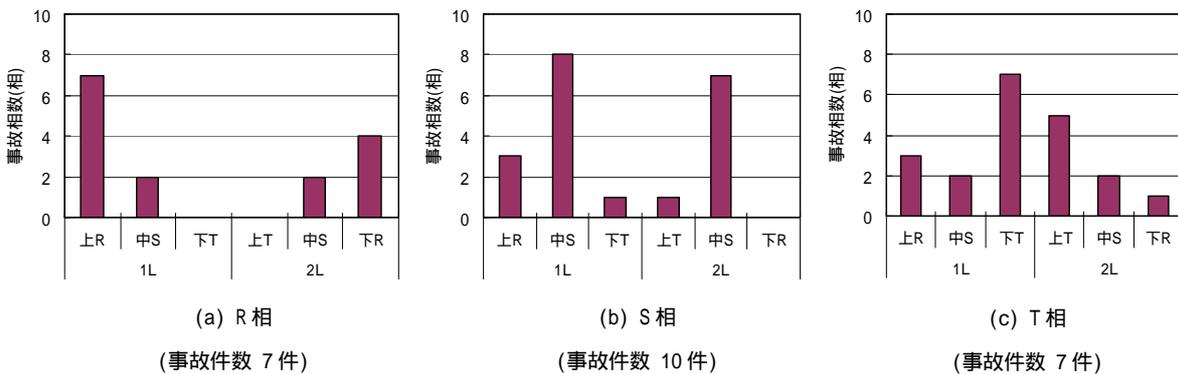
(d) 平衡高絶縁方式[冬期]

第1図 275kV送電線における絶縁方式別の事故様相

*1 技術開発研究所 電力品質チーム



第2図 事故発生時のホーン間電圧最過酷相と事故発生箇所
(送電線 A, 不平衡絶縁方式[高絶縁: 1L, 低絶縁: 2L])



第3図 事故発生時のホーン間電圧の最過酷相と事故発生箇所
(送電線 B, 平衡高絶縁方式)

度ならびに送電線雷撃率が高く、事故が多くなると考えられる⁽¹⁾。

不平衡絶縁方式において、1号線側は高絶縁であるにもかかわらず、1線地絡事故が発生しており、電力線直撃雷による事故である可能性が高い。一方、冬期においては、低絶縁である2号線側の事故が多く、大半が塔頂雷撃と考えられる。

平衡高絶縁方式における冬期の事故は、1・2号線両回線にまたがる場合が多い。

(2) 送電線事故発生時の商用電圧

雷事故発生時のオシロ波形に基づき、想定される鉄塔電位の極性に対して商用電圧が逆極性で最も大きな値となる相毎(ホーン間電圧の最過酷相毎)に分類して、事故箇所の集計を行い、結果を第2図および第3図に示した。第2図は不平衡絶縁方式の送電線 A、第3図は平衡高絶縁方式の送電線 B の集計結果を示している。ちなみに、本データは塔頂雷撃を対象としており、事故発生相、オシロ波形および LLS 標定データから、電力線直撃雷の可能性が高いと判断されるデータは除かれている。送電線 A および送電線 B とともに、商用電圧

の位相が事故様相を決定する主要な要素であることが確認できる。

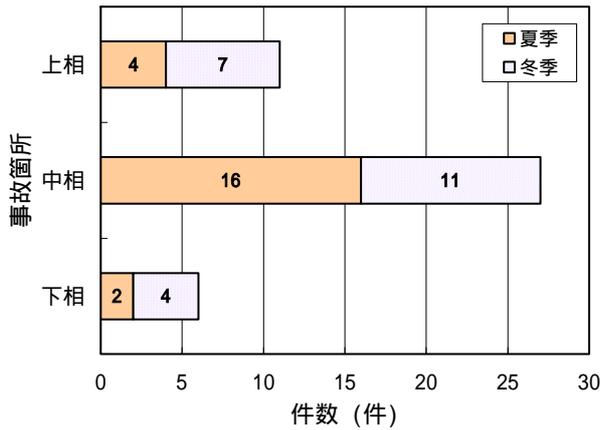
3. 電力線直撃雷の可能性調査

(1) 1線地絡事故の実績

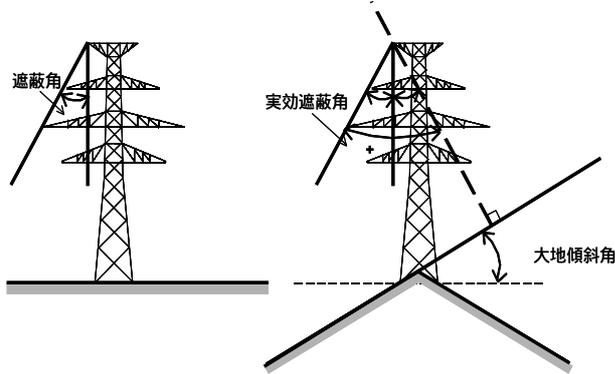
275kV 送電線の1線地絡事故においては、中相事故の頻度が高い。塔頂雷および架空地線雷撃であれば、雷サージは塔頂から地面へ向かって進展し、鉄塔上部から順に電位上昇が生じる。その後、雷サージは地面で負反射となるため、反射波が鉄塔下部から順に電位を抑制する。したがって、鉄塔上部の方が早く電位上昇が生じて、負反射による電位の抑制が遅いため、商用電圧の影響を考慮しなければ、上相のホーン間電圧が最も大きくなり、地絡箇所は上相が多くなることが想定される。

事故発生時の LLS 標定データおよび商用電圧から判断できる塔頂雷のデータ(上相7件、中相3件、下相0件)を除いた1線地絡事故の箇所別の件数を第4図に示した。第4図に電力線直撃雷が含まれていると考えられる理由を以下に記載する。

- ・塔頂雷撃に限定すれば、上相の1線地絡事故が



第4図 1線地絡事故の箇所別件数



第5図 建設地による送電線の実効遮蔽角の違い

最も多くなることが想定されるが、第4図では明らかに中相の1線地絡事故が多い。

- ・事故発生時の商用電圧から判断できる最も事故に至りやすい箇所と実際の事故箇所が異なる場合がある。
- ・事故発生時刻に事故鉄塔周囲で推定電流波高値が、20kA程度の小電流雷をLLSが標定している場合がある。
- ・超高压送電線は主に山岳部に建設されており、1線地絡事故が発生した鉄塔の実質的な遮蔽角⁽²⁾(実効遮蔽角[第5図])は、設計値を上回る傾向がある。

(2) 事故発生鉄塔の実効遮蔽角

第5図に示す1線地絡事故が発生した超高压送電鉄塔における事故回線側の大地傾斜角()を第1表に示す。超高压送電線は、主に山岳部の尾根沿いに建設されているため、鉄塔敷地は左右が開いた傾斜地となっている場合が多く、電力線直撃雷が発生しやすい地形と考えられる。

第1表のデータに基づいて、1線地絡事故が発生した回線側の大地傾斜角と鉄塔の遮蔽角を合わ

第1表 1線地絡事故発生鉄塔の事故回線側の傾斜角

事故状況 事故回線側 傾斜角	夏季			冬季			合計		
	上	中	下	上	中	下	上	中	下
-10°未満	1	6	1	3	6	1	4	12	2
0°~-10°	0	2	1	0	4	0	0	6	1
0°~+10°	2	5	0	0	0	0	2	5	0
+10°以上	0	0	0	1	0	0	1	0	0
不明	1	3	0	3	1	3	4	4	3

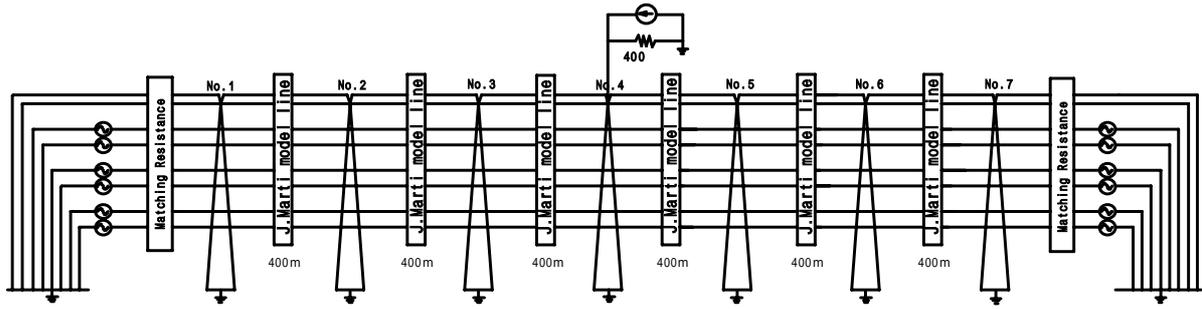
第2表 1線地絡事故発生箇所の実効遮蔽角

事故状況 事故発生箇所 実効遮蔽角	夏季			冬季			合計		
	上	中	下	上	中	下	上	中	下
0°未満	0	0	0	1	0	0	1	0	0
1°~20°	1	5	1	1	1	0	2	6	1
20°~40°	1	5	1	1	7	1	2	12	2
40°以上	1	3	0	1	2	0	2	5	0
不明	1	3	0	3	1	3	4	4	3

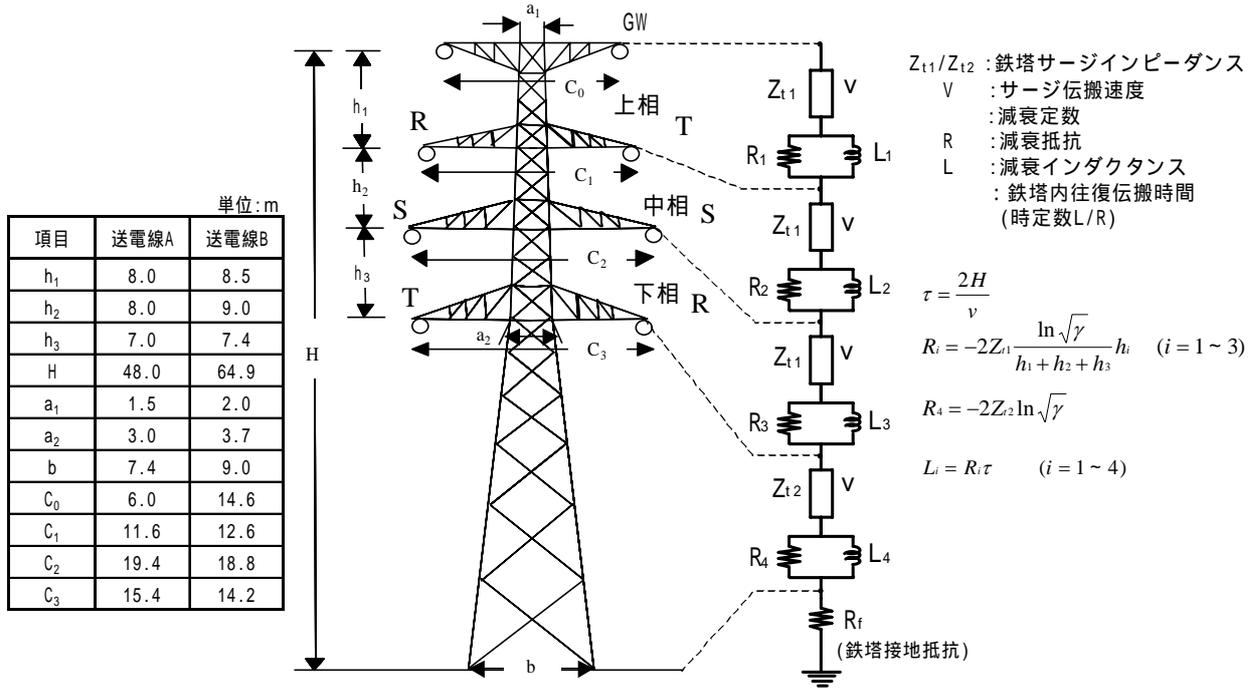
せた実効遮蔽角(+)を算出し、第2表に示した。超高压送電線の遮蔽角は一般的に10°以下で設計されているが、事故鉄塔においては実効遮蔽角が20°以上となる場合が約7割を占めている。遮蔽角が負角(0°未満)となる送電鉄塔においては、中相の1線地絡事故が1件も発生してい

第3表 解析条件

項目	送電線 A (不平衡絶縁)	送電線 B (平衡高絶縁)
雷撃電流波形	2 × 70 μs RAMP波	
雷道インピーダンス	400	
雷撃点(No.4鉄塔)	鉄塔塔頂	
鉄塔モデル化基数	7基	
鉄塔モデル	4段鉄塔モデル	
接地抵抗	10	
鉄塔サージインピーダンス	134	135
送電線モデル	J.MARTIモデル	
フラッシュオーバーモデル	V-t交差法	
径間長	400m	
電力線種類	ACSR 330mm ² × 2	ACSR 610mm ² × 2
導体間隔	0.4m	0.5m
地線種類	AC 120mm ² 2条	AC 150mm ² 2条
ホーン間隔	1L:2.4m 2L:1.6m	1・2L:2.65m
相配列	逆相順	



第6図 EMTD 解析回路



第7図 送電鉄塔モデル

ないことから、中相の1線地絡事故は、遮蔽失敗による電力線直撃雷が多いと考えられる。

4. シミュレーションによる事故様相の解析

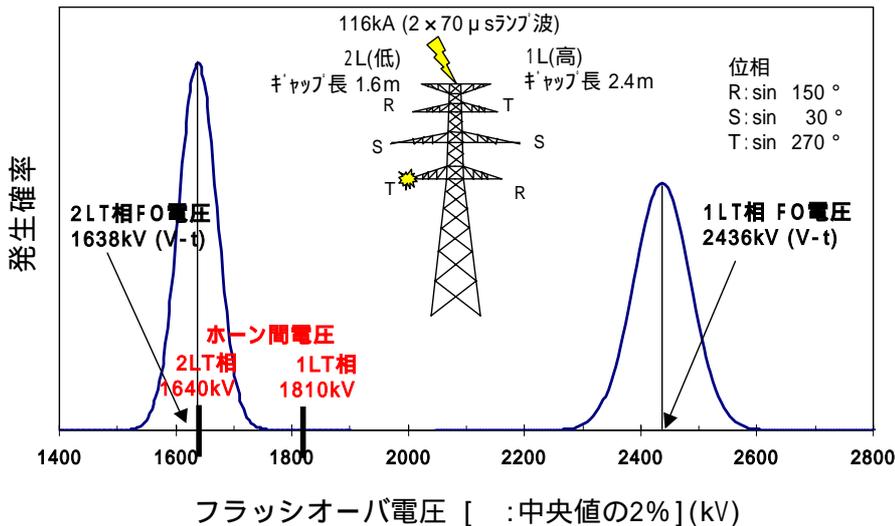
過渡現象解析プログラム(EMTP)を用いて、各事故様相に至るメカニズムについて検討する。シミュレーションの解析回路を第6図、送電線鉄塔モデルを第7図、解析条件を第3表に示す。フラッシュオーバーモデルはV-t交差法を用いており、フラッシュオーバー電圧のばらつきとして、フラッシュオーバー電圧の2%を標準偏差とする正規分布を考慮した⁽³⁾。

(1) 不平衡絶縁方式における1線地絡事故

不平衡絶縁方式の送電線Aにおける高絶縁側の1線地絡事故は、第1図(a), (b)の事故実績によると8件発生している。高絶縁側の1線地絡事故が

塔頂雷で生じる可能性を検討するため、高絶縁側で最も地絡に至りやすい上相において、商用電圧が地絡に至りやすい位相に設定し、シミュレーション解析を行った。高絶縁側上相は、低絶縁側で同相となる下相よりも上部にあり、鉄塔電位上昇がより大きくなるため、地絡しやすい。第8図に示すように塔頂へ雷撃電流波高値116kAを印加したところ、最も事故が発生しやすいT相の内、低絶縁側の下相で地絡が生じた。低絶縁側T相が地絡する瞬間の各回線のT相におけるフラッシュオーバー電圧のばらつきとホーン間電圧を示したが、高絶縁側のホーン間電圧(1LT相:1810kV)は、フラッシュオーバー電圧(2436kV)を大幅に下回っているため、高絶縁側で1線地絡が発生する確率は限りなく零に近い。

以上より、不平衡絶縁方式における高絶縁側の



第 8 図 高絶縁側における 1 線地絡事故の可能性

第 4 表 送電線 A の事故様相の再現 (不平衡絶縁方式)

No.	事故記録およびシロデータ									EMTP雷撃電流波高値 (kA)	再現性
	1号線 (高)			2号線 (低)			商用電圧 (kV)				
	上	中	下	上	中	下	R相	S相	T相		
1						T	-16.4	202.1	-185.7	120	
2				R			-211.6	40.9	170.7	110	
3					S		-27.0	-179.5	206.5	110	
4					S		125.9	-223.9	98.1	110	
5					S		27.0	179.5	-206.5	-110	
6	S		R	S			209.2	-175.2	-34.0	245	
7				R		T	88.1	-222.9	134.8	-165	
8				R		T	-185.7	202.1	-16.4	180	
9						T	133.2	89.9	-223.1	115	
10					S	T	133.2	89.9	-223.1	170	
11					S		-112.3	224.5	-112.3	-105	
12					R		-133.2	-89.9	223.1	-170	
13	S	R	R	S			133.2	89.9	-223.1	-280	
14	S		R	S			179.5	27.0	-206.5	-265	
15			R				-152.5	218.9	-66.4	115	
16			R				-161.8	-53.9	215.7	110	
17				S			222.9	-88.1	-134.8	120	
18				R			-206.5	27.0	179.5	110	
19				R	S		88.1	134.8	-222.9	-165	
20				R			202.1	-16.4	-185.7	-110	
21	S		R	S	T		44.8	-212.9	168.1	260	
22			R				-217.4	157.1	60.4	105	
23			R		T		134.8	88.1	-222.9	170	
24			R				-134.8	-88.1	222.9	115	
25				S	T		-199.9	11.4	188.5	-140	
26					T		-199.9	11.4	188.5	-120	
27			R				-179.5	-27.0	206.5	110	
28			R				216.6	-159.3	-57.3	-105	
29			R	S			-179.5	-27.0	206.5	180	
30				S	T		215.5	-53.2	-162.3	195	
31				S			-195.8	193.0	2.7	-110	
32				S			67.5	-219.2	151.7	105	

■ フラッシュオーバーの確率的な要素を考慮

1 線地絡事故の原因は、電力線直撃雷と判断される。

(2) 送電線 A および B の事故様相の再現

送電線 A および送電線 B における塔頂雷撃を対象とした事故様相をシミュレーションによって再現する。雷撃電流波形は $2 \times 70 \mu s$ ランプ波として、波高値を増加させて事故様相が実績と一致する値を算出する。

不平衡絶縁方式の送電線 A の検討結果を第 4 表に示す。不平衡絶縁方式の送電線の事故様相

は、商用電圧およびフラッシュオーバー電圧の確率的な要素を考慮することで、全 32 件の再現が可能であった。ちなみに、2 ケース (No.10, 13) は、非常に低い発生頻度で起こりうる現象であった。

平衡高絶縁方式の送電線 B の検討結果を第 5 表

第 5 表 送電線 B の事故様相の再現 (平衡高絶縁方式)

No.	事故記録およびシロデータ									EMTP雷撃電流波高値 (kA)	再現性
	1号線			2号線			商用電圧 (kV)				
	上	中	下	上	中	下	R相	S相	T相		
1	R					R	224.5	-112.3	-112.3	-240	
2	R		T				80.8	-221.8	141.0	-180	
3		S	T				27.0	179.5	-206.5		×
4					S		-88.1	222.9	-134.8	-170	
5	R		T	T		R	27.0	179.5	-206.5	305	
6	R	S			S		54.3	161.5	-215.8	-325	
7	R	S			S		148.2	72.0	-220.1	-340	
8			T	T			151.7	67.5	-219.2	245	
9		S			S		116.6	-224.4	107.8	170	
10	R				R		222.9	-88.1	-134.8	-240	
11		S	T	T	S		223.1	-89.9	-133.2	400	
12	R						220.1	-148.2	-72.0	-165	
13	R						-89.9	-133.2	223.1	175	
14		S			S		35.9	-209.9	174.0	170	
15		S					206.5	-179.5	-27.0	170	
16	R	S			S		54.3	161.5	-215.8	-325	
17		S	T	T	S		-217.4	60.4	157.1	-360	
18		S		T	S		-215.8	161.5	54.3	-325	
19			T	T			2.7	-195.8	193.0	-240	
20	R						-182.3	-22.3	204.6	170	
21	R				R		-179.5	206.5	-27.0	250	
22	R		T				-35.9	209.9	-174.0	235	
23		S			S		-53.9	-161.8	215.7	280	
24	R	S			S	R	134.8	88.1	-222.9	-400	

■ フラッシュオーバーの確率的な要素を考慮

に示す。平衡高絶縁方式の送電線の事故様相は、24 件の事故の内、1 ケース(No.3)を除いて、全て再現が可能であった。なお、3 ケース(No.2, 3, 22)は、非常に低い発生頻度で起こりうる現象であった。

(3) 塔頂雷撃による事故様相の実績値と理論値

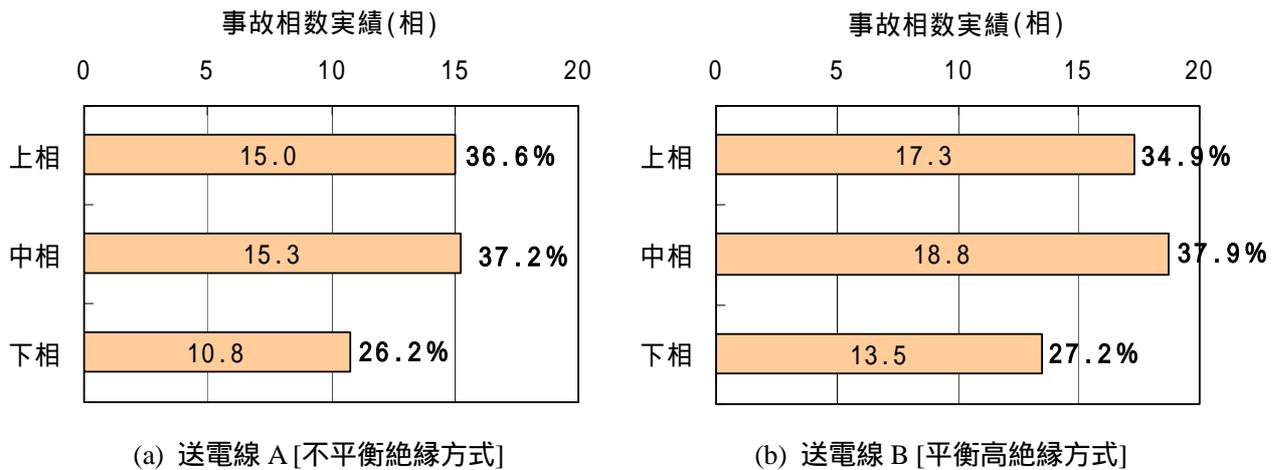
送電線 A および送電線 B の事故データの内、電力線直撃雷と想定されるデータならびに 4.(2)で示した発生頻度が低い現象を除き、さらに、第 2, 3 図で示した事故発生時の位相の偏りを補正した事故相数の実績について、第 9 図に示す。

塔頂雷撃において、商用電圧の影響を除けば、鉄塔上部であるほど電位上昇が大きく、ホーン間電圧も大きくなるため、上相の事故相数が多くなる。しかし、実績においては、中・上・下相の順で事故相数が多くなり、最も地絡しやすいと想定される上相よりも中相を伴う事故が多い。

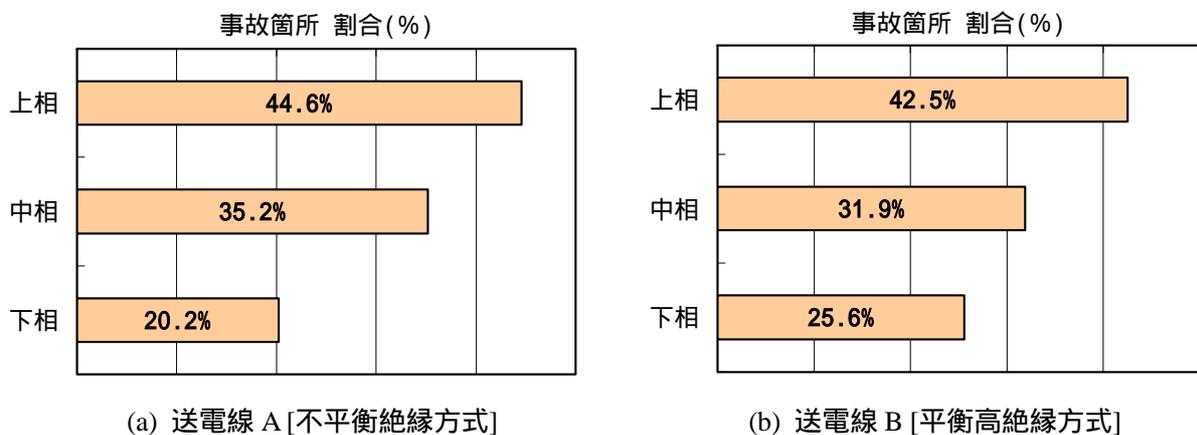
第 9 図(b)に示した平衡高絶縁方式の送電線 B において、中相の事故相数が最も多くなる理由とし

て、1・2 号線中相における同時フラッシュオーバの頻度の高さが考えられる。逆相順の超高圧送電線の中相は 1・2 号線ともに同相となるため、鉄塔電位上昇時のホーン間電圧は、両回線中相でほぼ同等となり、同時フラッシュオーバが起こりやすい。一方、上相および下相における同相のホーン間電圧は、位置配置の違いから上相のホーン間電圧の方が大きく、上相が先に地絡する可能性が高い。鉄塔内で 1 箇所でも地絡が生じると、残りの相におけるホーン間電圧も急激に低下するため、下相における地絡が起こりにくくなり、中相の同時フラッシュオーバの頻度に比べれば、上・下相の同相における同時フラッシュオーバは起こりにくい。以上が、塔頂雷撃においても、中相の事故相数が多くなる原因の 1 つと考えられる。

4. (2) の事故様相の再現においては、位置配置上で同じ高さにある中相のみで同時フラッシュオーバを想定した。しかし、平衡高絶縁方式の送電線 B においては、第 5 表に示すように、中相以外に



第 9 図 塔頂雷撃における事故相数と箇所別の割合 (補正後)



第 10 図 塔頂雷撃における事故相数の割合 (シミュレーションによる理論値)

においても同相事故となるケースが多く、位置配置上で高さが異なる場合においても、同時フラッシュオーバーが発生している可能性が高い。したがって、事故箇所の理論的な割合を算出するために、旧雷事故率予測計算プログラム⁽⁴⁾に従って、事故発生時のホーン間電圧が、フラッシュオーバー電圧の1.05倍を超えた上位2相で同時フラッシュオーバーが発生すると仮定した。シミュレーションで算出された事故箇所の割合を第10図に示す。シミュレーションにおいては、雷撃電流波高値の刻み幅を10kAとし、1つの電流波高値における商用電圧の位相は30°刻みとして算出した。ちなみに、各雷撃電流波高値の発生頻度は、雷撃電流頻度分布(冬季雷Aタイプ⁽⁵⁾)を用いている。

シミュレーションの結果は、実際の事故様相と異なり、上相の地絡を伴う事故の割合が大きい。実績に対して差異が生じた原因として、シミュレーションにおける上相と架空地線の結合効果が実際よりも小さく見積もられている可能性、雷放電路と各電力線における結合効果の影響、鉄塔の空間的広がりによる鉄塔内電位分布の違いおよび同時フラッシュオーバー現象の再現性の問題等が考えられる。

5. まとめ

中相事故が高頻度で発生する原因と事故様相メカニズムについて検討した。主な結果について以下に要約する。

- ・事故発生時のオシロ波形により、商用電圧が事故様相を決定する主要な要素の1つであることが確認された。
- ・超高圧送電線の大半は山岳部を通過しており、実効遮蔽角が20°以上となる場合も多く、中相への電力線直撃雷によって、中相事故が多くなると考えられる。
- ・不平衡絶縁方式におけるシミュレーション結果によると高絶縁側で1線地絡事故が発生する確率はほぼ零であるため、高絶縁側の1線地絡事故は電力線直撃雷である可能性が高い。
- ・送電線Aおよび送電線Bで発生している各事故様相は、フラッシュオーバー電圧の確率的な要素を考慮することで、56件の事故の内、1件を除いた全てケースで再現が可能であった。

今回、シミュレーション解析において、商用電圧を考慮することで、ほとんどの事故様相は再現可能であることが確認されたが、シミュレーション技術は不完全な箇所も多く、雷性状の把握も含めて、さらなる精度向上への取り組みが必要と考えられる。具体的には、同時フラッシュオーバーのメカニズムの解明とモデル化、緩波頭雷撃電流波形におけるV-t曲線の把握、鉄塔モデルの検証ならびに雷放電路が送電線に及ぼす影響の把握等が今後の課題である。

参考文献

- (1) 川村, 新庄:「送電線雷事故頻度と落雷頻度の関係について」, 電気学会, 電力エネルギー部門大会, No.462 (2007-9)
- (2) 電力中央研究所:「送電線耐雷設計基準要綱」, 研究報告, 71037 (1971-9)
- (3) 電気学会放電ハンドブック出版委員会:「放電ハンドブック」, 電気学会(1974-2)
- (4) 電力中央研究所:「送電線雷事故率予測計算法」, 研究報告, T87089 (1988-9)
- (5) 浅川, 三宅, 横山, 横田, 酒井:「冬季雷における放電進展様相と電流波形の特性」, 電中研報告: T93024 (1994-10)