

E. M. T. P. を用いた屋外変電所における 雷サージ解析に関する一考察

宝 泉 和 明・岡 本 弘

A Study of Lightning Surge Analysis at Outdoor Substations using E. M. T. P. (Electro Magnetic Transient Program)

Kazuaki HOUSEN, Hiromu OKAMOTO

With the penchant for large capacity and high speed electronic computers, digital simulation has recently progressed remarkably. Lightning surge, which is the basic problem in transmission line lightning proof design of outdoor substation will be here analyzed by using an EMTP developed by Bonneville Power Administration in USA. since about 1980. This analysis has been carried out supposing that the leading-in towers of a 77kV out door substation were directly hit by lightning and the surge voltages were induced to the transmission lines from the earth line by back flashover.

1. ま え が き

雷サージについての解析は、送電線や屋外変電所における耐雷設計の基本として大変重要である。この解析は、従来雷サージ計算盤によって行われ、各点の雷インパルス耐電圧 (BIL) が定められている。

¹⁾最近は、電子計算機の著しい進歩により、サージ解析手法もデジタル化し、特に、アメリカのボンネビル電力局 (Bonneville Power Administration) で開発された過渡現象計算プログラム EMTP (Electro Magnetic Transients Program) は、電力系統における解析に利用されている。

最初は、電力系統のサージ解析であったが、最近は、発電機、サイリスタ制御系、ユニバーサルマシン等のモデルが加えられ、電力系統の SSR (Subsynchronous Resonance) や直流送電系統の解析まで扱える。

東京電力において 500 (kV) 屋外変電所の雷サージ解析を EMTP と従来の計算盤によって行ない、両結果について比較をしているが、雷サージ計算盤による結果より若干高めの結果が出されている。

しかし、入力条件が、正確に一致出来なかったきらいがあり、条件を一致させれば、比較的正

確な結果が得られるであろうと結論づけている。

2. 検 討 項 目

今回は、77 (kV) の屋外変電所の引込鉄塔に直撃雷を受け、送電線への逆フラッシュオーバーにより、雷サージが侵入するという仮定のもとで解析を行なう。

モデルは、S 化学 T 工場の屋外変電所である。

当変電所の地絡継電器 (GR) は、過去 3 年間に雷によって表一 1 のように動作している。

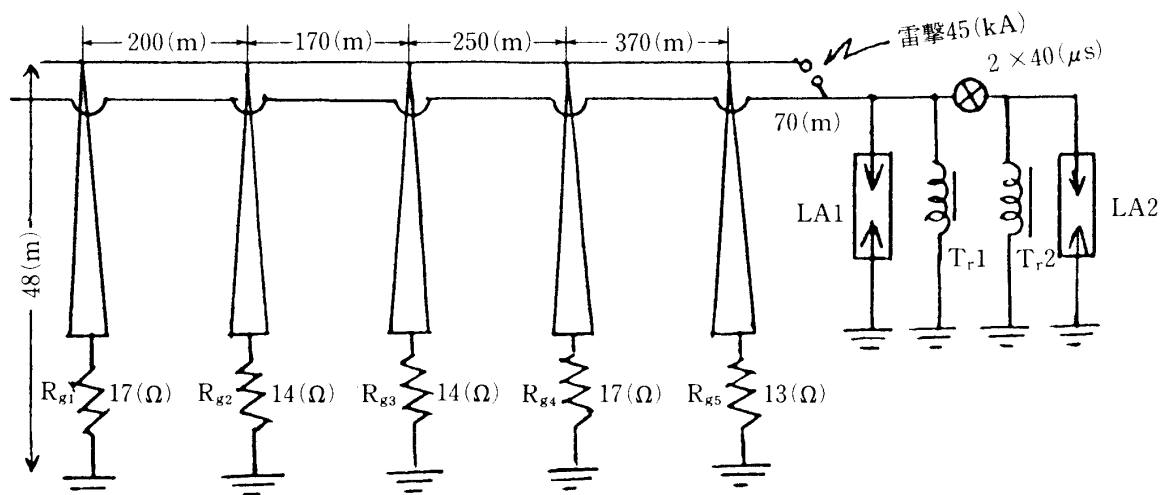
表一 1 S 化学 T 工場変電所における地絡継電器動作回数表

年 \ 月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	計
58	1	1	0	1	1	5	6	4	4	2	1	1	27
59	4	0	4	1	0	0	6	3	5	0	1	6	30
60	1	2	1	1	1	2	3	5	3	—	—	—	19
計(回)	6	3	5	3	2	7	15	12	12	2	2	7	76

年間約30回前後の誘導雷を記録している。当変電所は、36年1月に直撃雷(雷撃電流等は不明)を受けて避雷器を破損し、46年5月に、遮断器のブッシングを破損する雷害を受けている。

この変電所に、次の条件で雷撃を受けた場合の結果を EMTP にて求めてみた。

2. 1 系統概略図

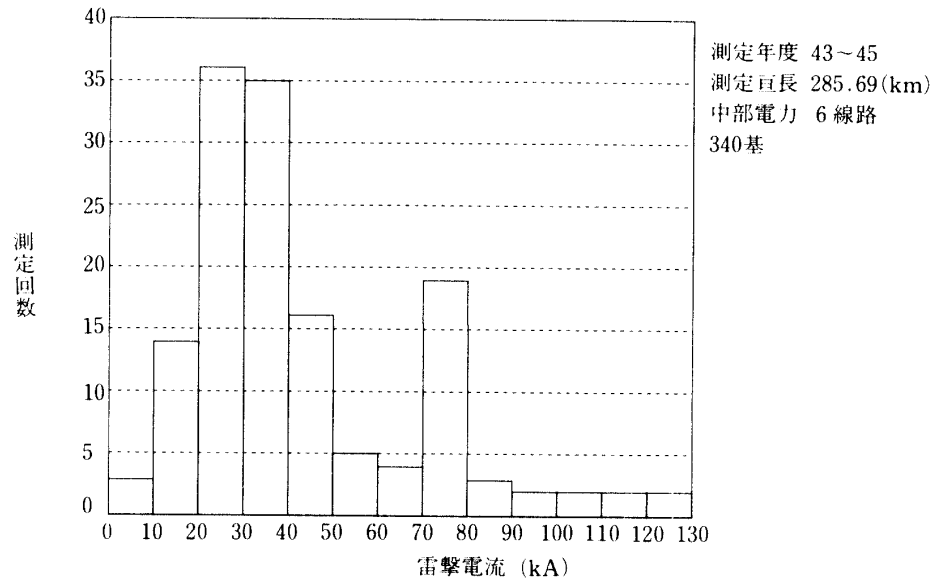


図一 1 S 化学 T 工場変電所の単線結線図

2. 2 雷撃電流

(i) 波高値

実際に雷の規模の想定は困難であるが、²⁾中部電力から発表されている実測した頻度表 (図一 2) を基に波高値を考慮すると、



図一 2 雷撃電流頻度分布のヒストグラム

平均値43 (kA), 最大130 (kA) を波高値として使用する。

(ii) 波頭長

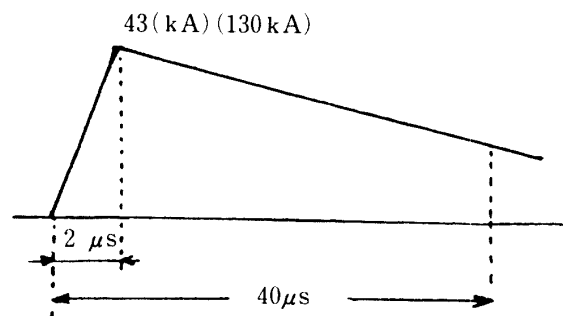
一般の地上への落雷の波頭長は²⁾, 2~8 (μ s) が観測されている。

耐雷設計に用いられているものは, 2 (μ s) が多い。但し, 測定上において問題もあり, 今後課題の一つである。

今回は, ²⁾一般的に使用されている 2 (μ s) を用いる。

(iii) 半波尾長

雷撃電流の半波尾長 (半波高時間) の変化範囲は, 普通²⁾30~50 (μ s) とみなされているために, ここでは, 半波尾長を40 (μ s) とする。



図一 3 雷撃電流波形

2. 3 雷道インピーダンス

雷雲から送雷線の雷撃点に至る雷放電回路のサージインピーダンスであるが, 実測することは, 出来ないために²⁾, $\infty(\Omega)$, $400(\Omega)$, $200(\Omega)$ と仮定されている。しかし, $400(\Omega)$ と仮定して, 解

析されている結果が最も多く、実情に近いため、今回も $400(\Omega)$ とする。

2. 4 線路定数

一般的に次の様に考えられている。

²⁾架空地線のサージインピーダンス： Z_G は1条の場合 $500(\Omega)$

送電線のサージインピーダンス： Z_L は $500(\Omega)$

鉄塔のサージインピーダンス： Z_T は $100(\Omega)$

サージの伝播速度は、光速に近いと考えて $300(m/\mu s)$ とする。

2. 5 送電線のインダクタンス並びに対地静電容量

$$D_{13} = D_{1'3'} = 12(m)$$

$$D_{12} = D_{23} = D_{1'2'} = D_{2'3'} = 6.2(m)$$

(i) 回路内電線間幾何平均距離 D

$$D = \sqrt[3]{12 \times 6.2 \times 6.2} \doteq 7.2(m)$$

$$D_{1g} = D_{1'g} \doteq 7.1(m)$$

$$D_{2g} = D_{2'g} \doteq 13.1(m)$$

$$D_{3g} = D_{3'g} \doteq 18.4(m)$$

(ii) 電線と地線間の幾何平均距離 D_g

$$D_g = \sqrt[3]{7.1 \times 13.1 \times 18.4} \doteq 12(m)$$

$$D_{11'} = 7.5(m) \quad D_{12'} = D_{1'2} = D_{23'} = D_{3'2} = 10.8(m)$$

$$D_{22'} = 10.7(m) \quad D_{13'} = D_{1'3} \doteq 14.1(m)$$

$$D_{33'} = 7.5(m)$$

(iii) 両回線電線間幾何平均距離 D_m

$$D_m = \sqrt[9]{7.5^2 \times 10.8^4 \times 14.1^2 \times 10.7} \doteq 10.5(m)$$

(iv) 電線地表上の高さの幾何平均距離 h

$$h = \sqrt[3]{30 \times 36 \times 42} \doteq 35.8(m)$$

(v) 地線地表上の高さ

$$h_g = 48(m)$$

$$^3) \text{インダクタンス } L = 0.05 + 0.4605 \log_{10} D/r (mH/km)$$

$$= 0.05 + 0.4605 \log_{10} 720/0.505$$

$$= 1.505(mH/km)$$

対地静電容量 C_g

$$C_g = \frac{0.02413}{\log_{10} \frac{64h^6}{rD^2D_m^3} - 6 \frac{(\log_{10} \sqrt{h \cdot h_g} / D_g)^2}{\log_{10} \frac{2h_g}{r_g}}} \doteq 0.0666(\mu F/km)$$

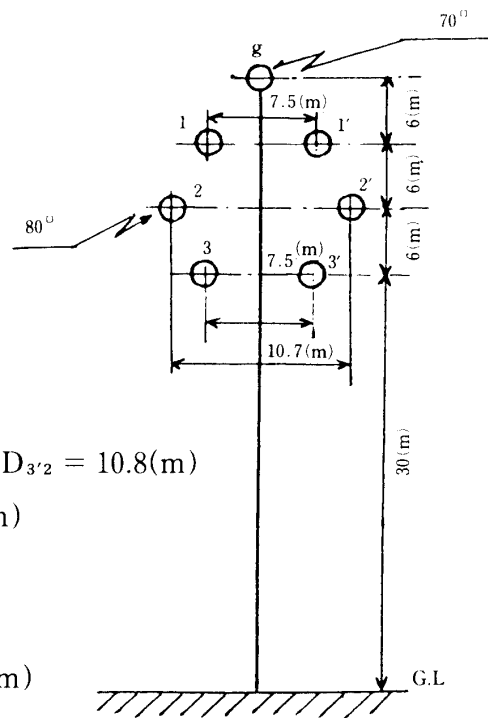


図-4 鉄塔上の導体配置図

2. 6 避雷器仕様 (LA 1, LA 2)
(表-2)

放電開始電圧		281 (kV)
制限電圧	5 (kA)	298 (kV)
	10 (kA)	328 (kV)

2. 7 主変圧器仕様 (T_r 1, T_r 2)
(表-3)

一次電圧	77 (kV)
二次電圧	6 (kV)
容 量	5,000 (kVA)
対地静電容量	2,000 (pF)
巻線間静電容量	2,000 (pF)

以上の結果を総合すると図-5が得られる。

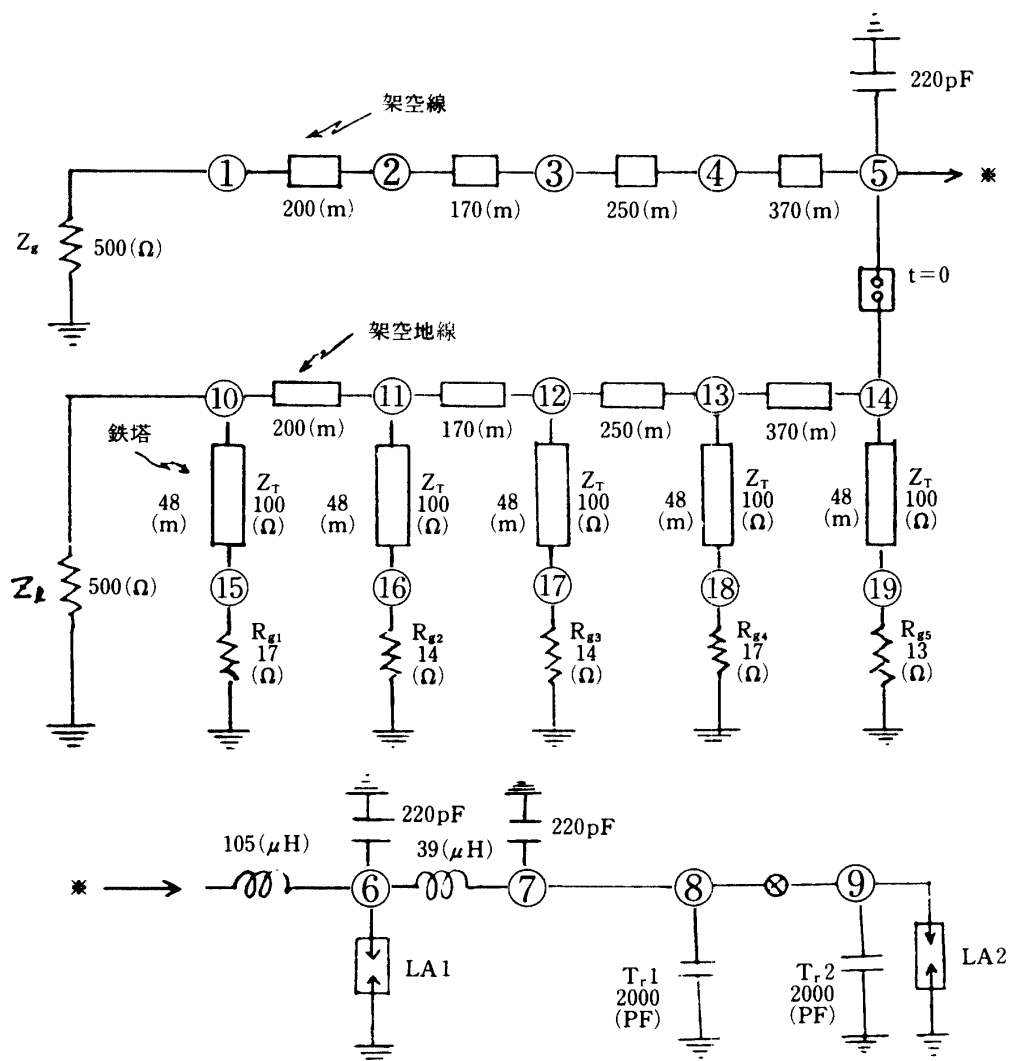


図-5 供試変電所の引込部単線結線図

3. 入力データ表 (一例)

表-4

プログラム名 EMTPM1				パスワード名 MCS			
YINPUT EMTPDATA,LIST=YES;							
EMTP MODE 1							
ノード名 02E-6 20.E-6 5				サージインピーダンス		伝播速度	鉄塔間隔
-11	2	ノード名		500.	300.E6	200.	1
-12	3			500.	300.E6	170.	1
-13	4			500.	300.E6	250.	1
-14	5			500.	300.E6	370.	1
-110	11	1	2	(Ω)	(m/s)	(m)	
-111	12	2	3				
-112	13	3	4				
-113	14	4	5	鉄塔	サージインピーダンス	伝播速度	鉄塔の高さ
-110	15			100.	300.E6	48.	1
-111	16	10	15	(Ω)	(m/s)	(m)	
-112	17	10	15				
-113	18	10	15				
-114	19	10	15				
15				17.	鉄塔の接地抵抗(Ω)		
16				14.	✱		
17				14.	✱		
18				17.	✱		
19				13.	✱		
1				500.	サージインピーダンス(Ω)		
10	1						
5				22.E-5 静電容量(F)			
6	5						
7	5						
5	6			11.E-2	インダクタンス(H)		
6	7			39.E-3	" (H)		
-17	8			500.	300.E6	20.	1
8				.0004	T _{r1} , T _{r2} 対地静電容量 (μF)		
14			400.	雷道インピーダンス (Ω)			
926	避雷器電流電圧特性 (LA1)		281.E3	放電開始電圧 (V)			
-100000.	-520000.						
-10000.	-314000.						
-5000.	-284000.						
5000.	284000.						
10000.	314000.						
100000.	520000.						
9999999.							
928	避雷器電流電圧特性 (LA2)		281.E3	放電開始電圧			
-100000.	-520000.						
-10000.	-314000.						
-5000.	-284000.						
5000.	284000.						
10000.	314000.						
100000.	520000.						
9999999.							
5	14	-1	1.	スイッチングノード名			
1314	-1	130000.	雷撃電流値	2.E-6	65000.	同50%値	40.E-6 同時間, ...
14	6	8	(出力電圧, ノード指定)				
CALCOMP PR							
1	4	31000000010000	100014	6	8		

4. 出力データ表 (一例)

表-5

STEP	TIME	14	6	8
	時間	雷撃点電位	T_{r1} 電位	T_{r2} 電位
0	0.000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
5	0.100E-06	0.33541E+06	0.17713E+05	0.12208E+01
10	0.200E-06	0.70622E+06	0.13387E+06	0.82961E+03
LIGHTNING ARRESTER "6" " TO " " DISCHARGED AT T= 0.2800E-06				
15	0.300E-06	0.10638E+07	0.51504E+05	0.16953E+05
20	0.400E-06	0.12042E+07	0.99465E+05	0.92136E+05
25	0.500E-06	0.11820E+07	0.15217E+06	0.18384E+06
30	0.600E-06	0.11877E+07	0.19723E+06	0.21486E+06
35	0.700E-06	0.11910E+07	0.25223E+06	0.23335E+06
LIGHTNING ARRESTER "8" " TO " " DISCHARGED AT T= 0.7800E-06				
40	0.800E-06	0.12743E+07	0.28717E+06	0.10216E+06
45	0.900E-06	0.13550E+07	0.29230E+06	0.52972E+05
50	0.100E-05	0.14245E+07	0.29425E+06	0.56623E+05
55	0.110E-05	0.14936E+07	0.29698E+06	0.53435E+05
60	0.120E-05	0.15452E+07	0.30307E+06	0.81952E+05
65	0.130E-05	0.15983E+07	0.31000E+06	0.12075E+06
70	0.140E-05	0.16530E+07	0.31433E+06	0.13101E+06
75	0.150E-05	0.17108E+07	0.31592E+06	0.12427E+06
80	0.160E-05	0.17680E+07	0.31845E+06	0.13859E+06
85	0.170E-05	0.18230E+07	0.32159E+06	0.17148E+06
90	0.180E-05	0.18792E+07	0.32432E+06	0.18814E+06
95	0.190E-05	0.19331E+07	0.32664E+06	0.18292E+06
100	0.200E-05	0.19863E+07	0.32947E+06	0.18583E+06
S				
870	0.174E-04	0.37037E+06	0.38063E+06	0.33166E+06
875	0.175E-04	0.38052E+06	0.38048E+06	0.33185E+06
880	0.176E-04	0.38700E+06	0.38030E+06	0.33194E+06
885	0.177E-04	0.38693E+06	0.38012E+06	0.33205E+06
890	0.178E-04	0.38215E+06	0.38002E+06	0.33225E+06
895	0.179E-04	0.36888E+06	0.37990E+06	0.33246E+06
900	0.180E-04	0.35514E+06	0.37969E+06	0.33258E+06
905	0.181E-04	0.34207E+06	0.37943E+06	0.33266E+06
910	0.182E-04	0.33026E+06	0.37920E+06	0.33282E+06
915	0.183E-04	0.32221E+06	0.37899E+06	0.33303E+06
920	0.184E-04	0.31603E+06	0.37873E+06	0.33318E+06
925	0.185E-04	0.31137E+06	0.37848E+06	0.33326E+06
930	0.186E-04	0.31077E+06	0.37810E+06	0.33338E+06
935	0.187E-04	0.31153E+06	0.37787E+06	0.33358E+06
940	0.188E-04	0.31143E+06	0.37762E+06	0.33376E+06
945	0.189E-04	0.31302E+06	0.37731E+06	0.33385E+06
950	0.190E-04	0.31546E+06	0.37700E+06	0.33394E+06
955	0.191E-04	0.31901E+06	0.37677E+06	0.33410E+06
960	0.192E-04	0.31935E+06	0.37658E+06	0.33430E+06
965	0.193E-04	0.31661E+06	0.37629E+06	0.33441E+06
970	0.194E-04	0.31438E+06	0.37599E+06	0.33448E+06
975	0.195E-04	0.31183E+06	0.37573E+06	0.33461E+06
980	0.196E-04	0.30804E+06	0.37550E+06	0.33480E+06
985	0.197E-04	0.30906E+06	0.37525E+06	0.33495E+06
990	0.198E-04	0.31200E+06	0.37495E+06	0.33502E+06
995	0.199E-04	0.31841E+06	0.37467E+06	0.33512E+06
1000	0.200E-04	0.32621E+06	0.37447E+06	0.33529E+06

5. 負荷条件を変えた場合における。(EMTP による計算結果)

5. 1 各ノード電位 (最大, 最少)

(i) LA 1, LA 2, on.(雷撃電流43kA) (引込鉄塔接地抵抗値13Ω)

Voltage \ node	雷撃点 (引込鉄塔)	LA 1	T _{r. 1}	LA 2	T _{r. 2}
Surge Voltage max. (time)	684(kV) (2 μs)	0.48μs 後	285(kV) (7.7μs)	1.6μs 後	283(kV) (10.6μs)
Surge Voltage min. (time)	203(kV) (19.6μs)	discharge (281kV)	227(kV) (20μs)	discharge (281kV)	235(kV) (20μs)

(ii) LA 1 on. LA 2 off.(雷撃電流43kA) (引込鉄塔接地抵抗値13Ω)

Voltage \ node	雷撃点 (引込鉄塔)	LA 1	T _{r. 1}	LA 2	T _{r. 2}
Surge Voltage max. (time)	688(kV) (2 μs)	0.48μs 後	308(kV) (8.0μs)	—	※401(kV) (3.1μs)
Surge Voltage min. (time)	234(kV) (18.5μs)	discharge (281kV)	286(kV) (20μs)	—	※240(kV) (18.9μs)

※1.2μs の周期で振動する。

 (iii) LA 1 on. LA 2, T_{r. 2} off.(雷撃電流43kA) (引込鉄塔接地抵抗値13Ω)

Voltage \ node	雷撃点 (引込鉄塔)	LA 1	T _{r. 1}	LA 2	T _{r. 2}
Surge Voltage max. (time)	690(kV) (2 μs)	0.6μs 後	307(kV) (8 μs)	—	—
Surge Voltage min. (time)	234(kV) (18.6μs)	discharge (281kV)	285(kV) (20μs)	—	—

(iv) LA 1 off, LA 2 on.(雷撃電流43kA) (引込鉄塔接地抵抗値13Ω)

Voltage \ node	雷撃点 (引込鉄塔)	LA 1	T _{r. 1}	LA 2	T _{r. 2}
Surge Voltage max. (time)	725(kV) (0.2μs)	—	488(kV) (1.9μs)	0.6μs 後 discharge	298(kV) (10.5μs)
Surge Voltage min. (time)	228(kV) (19.6μs)	—	263(kV) (19.6μs)	(281kV)	287(kV) (20μs)

(v) LA 1 on. LA 2 on.(雷撃電流130kA) (引込鉄塔接地抵抗値13Ω)

Voltage \ node	雷撃点 (引込鉄塔)	LA 1	T _{r. 1}	LA 2	T _{r. 2}
Surge Voltage max. (time)	1986(kV) (2 μs)	0.28μs 後	388(kV) (12.7μs)	0.78μs 後	335(kV) (20μs)
Surge Voltage min. (time)	308(kV) (19.6μs)	discharge (281kV)	374(kV) (20μs)	discharge (281kV)	52(kV) (0.9μs)

(vi) LA 1 on. LA 2 on.(雷撃電流130kA) (引込鉄塔接地抵抗値 5 Ω に仮定)

Voltage \ node	雷撃点 (引込鉄塔)	LA 1	T _{r. 1}	LA 2	T _{r. 2}
Surge Voltage max. (time)	1384(kV) (2 μs)	0.28μs 後	327(kV) (10.3μs)	0.78μ 後	314(kV) (20μs)
Surge Voltage min. (time)	266(kV) (18.5μs)	discharge (281kV)	322(kV) (20μs)	discharge (281kV)	49(kV) (0.9μs)

引込鉄塔より4番目の鉄塔（約590m離れた）を直撃した場合

(vii) LA 1, LA 2 on.(雷撃電流43kA)

Voltage \ node	雷撃点 (引込鉄塔)	LA 1	T _r . 1	LA 2	T _r . 2
Surge Voltage max. (time)	704 (kV) (2 μ s)	3.12 μ s 後に	105 (kV) (15.6 μ s)	3.2 μ s 後に	91 (kV) (16.6 μ s)
Surge Voltage min. (time)	114 (kV) (18.4 μ s)	discharge (281kV)	64 (kV) (20 μ s)	discharge (281kV)	70 (kV) (20 μ s)

6. 各ノード電位を大きさの順に並びかえて比較

(いずれも雷撃電流43kA, 引込鉄塔接地抵抗値13 Ω 雷撃点を引込鉄塔とする。)

(1) 引込鉄塔

負荷条件	Surge Voltage max.
LA1 off	725 (kV)
LA2, T _r 2 off	690 (kV)
LA2 off	689 (kV)
LA1, LA2 on	684 (kV)

(3) T_r2

負荷条件	Surge Voltage max.
LA2 off	401 (kV)
LA1 off	298 (kV)
LA1, LA2 on	283 (kV)
—	—

(2) T_r1

負荷条件	Surge Voltage max.
LA1 off	488 (kV)
LA2 off	308 (kV)
T _r 2, LA2 off	307 (kV)
LA1, LA2 on	285 (kV)

7. 結果の要約。

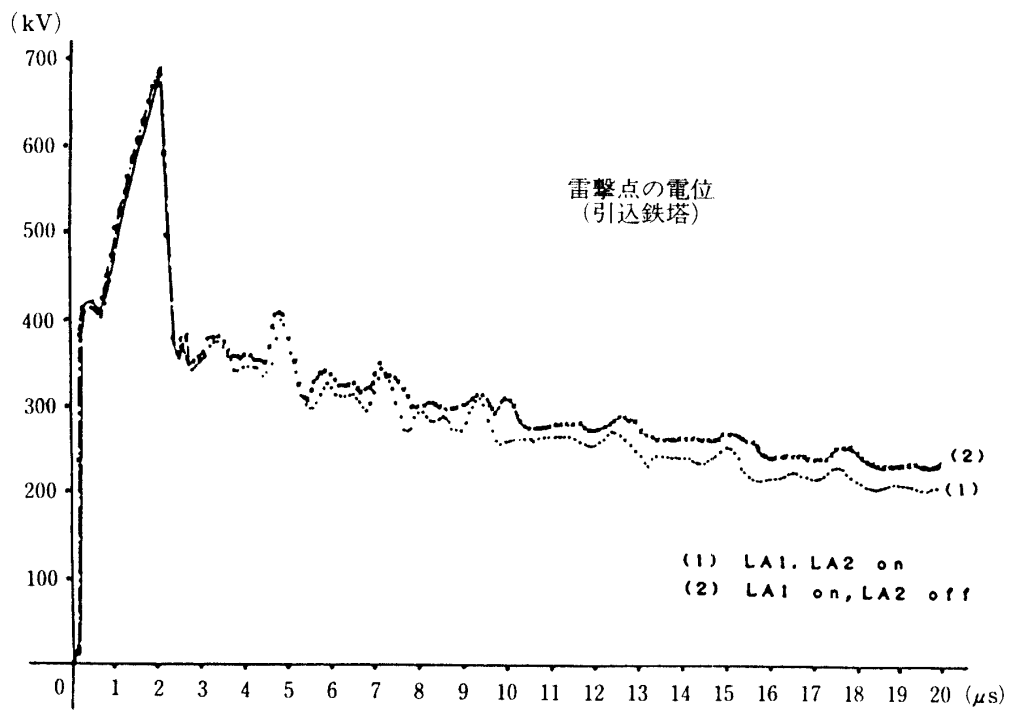
- (1) 直撃点においては、負荷の条件を変えてもそれ程サージ電圧に変化は見受けられない。(最大値と最少値の差は41(kV))
- (2) 変圧器の受電端においては、変圧器に一番近い避雷器の影響が当然ながら大きい。
Tr 1においては、203(kV)、LA 1を挿入した場合サージ電圧が低下している。Tr 2においても、LA 2を挿入した場合と線路から外した場合118(kV)の差がある。
このように避雷器の効果は、極めて大きく、放雷開始電圧が281(kV)の避雷器であるが大変効果的に動作している。
- (3) LA 2を線路から外した場合には、Tr 2のサージ電圧は、図一8に見られるように、約1.2(μ s)の周期をもって変動しながら減衰している。
この原因は、回路定数の抵抗が極めて小さい事と反射波の影響によるものと思われる。
- (4) 引込鉄塔の接地抵抗が、実測で13(Ω)になっているが、第一種抵抗値以内におさえた場合、夫々のノード電位は、次表のようになる。

表一6 引込鉄塔の接地抵抗と各ノード電位

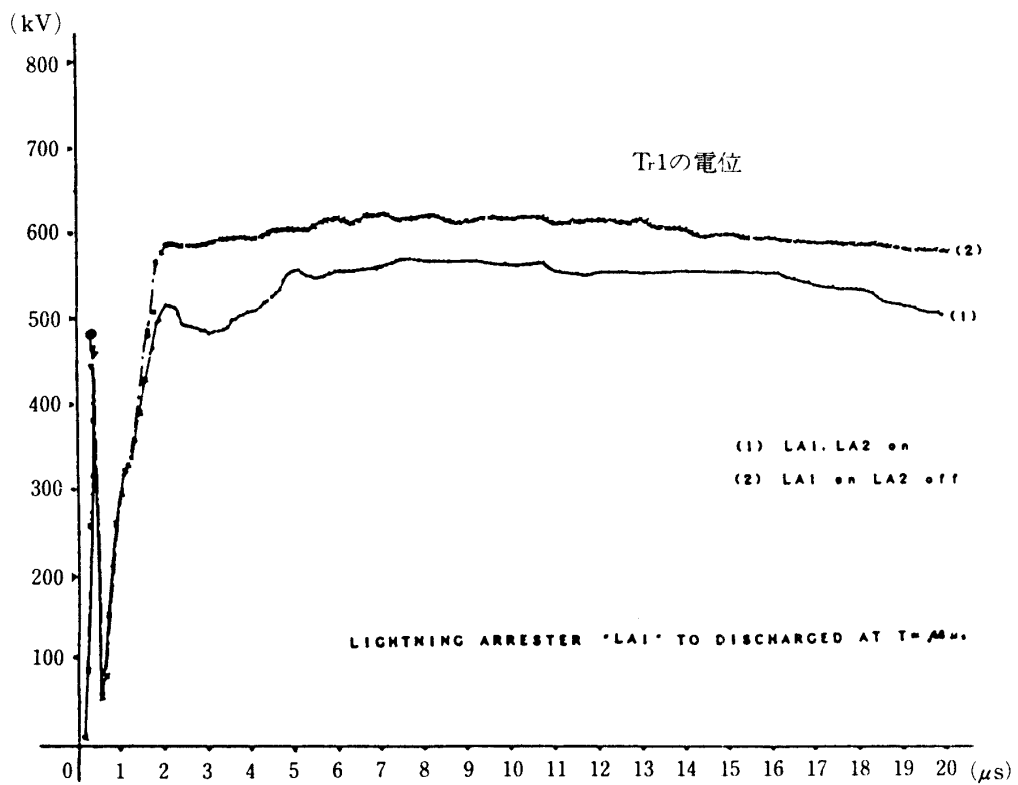
	雷撃点電位	Tr 1 電位	Tr 2 電位
引込鉄塔 接地抵抗 13(Ω)	684(kV)	285(kV)	283(kV)
引込鉄塔 接地抵抗 5(Ω)	389(kV)	173(kV)	272(kV)

引込鉄塔の電位が295(kV)、Tr 1の電位が112(kV)と40(%)近く遁減される。

- (5) 雷撃点を引込鉄塔より、約590(m)離れた4番鉄塔(図一5 node No.11)を直撃し、送電線に逆フラッシュ、オーバーしたと仮定をした場合には、引込鉄塔雷撃の場合のTr 1においては、約37(%)の105(kV)、Tr 2においても、約32(%)の91(kV)と非常に低くなっている。
- (6) 図一6は、雷撃点の電位についての結果をプロットしたものである。
(1)のグラフは、避雷器LA 1、LA 2、共に線路に投入した場合、(2)は、LA 1のみ線路に投入している場合であり電位の変化にそれ程差が見受けられない。
図一7は、変圧器Tr 1の電位についてプロットしたものである。
(1)は、LA 1、LA 2共にon、(2)は、LA 1をon、LA 2をoffの状態における電位の変化である。何れの場合でも雷撃後0.48(μ s)経過してLA 1は放電を開始し、同じ様な減衰曲線を経ていることが判かる。
図一8は、変圧器Tr 2の電位についてプロットしたものである。



図一 6 雷撃点の電位



図一 7 T_{r1}の電位

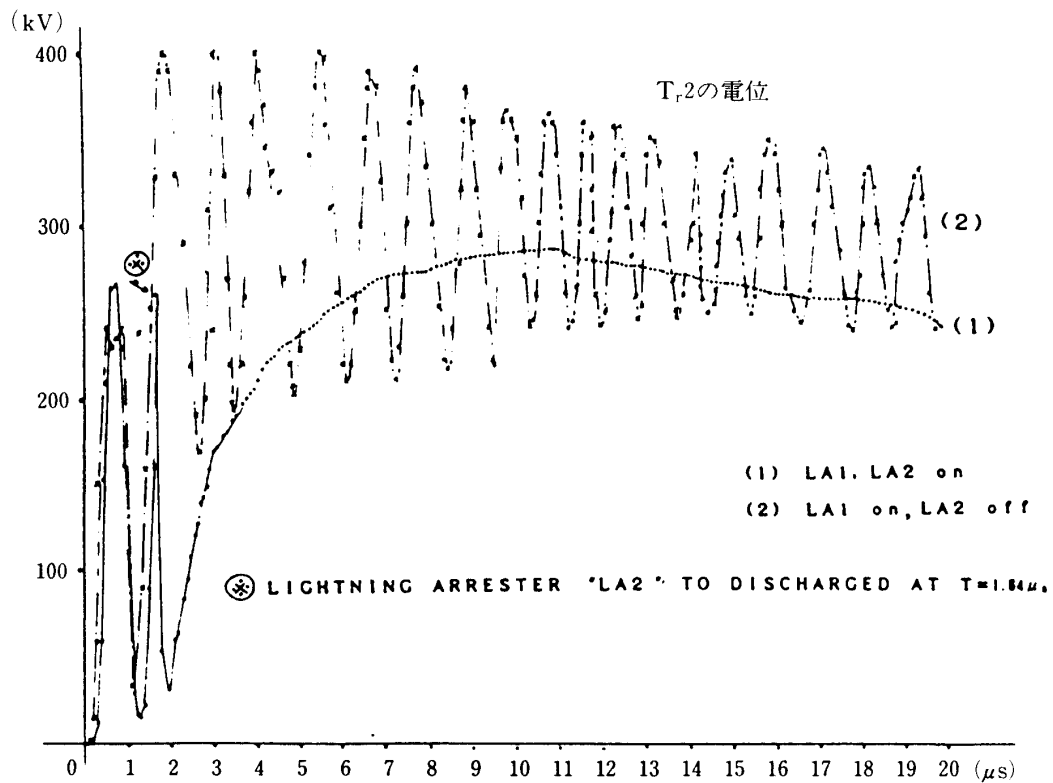


図-8 Tr2の電位

8. 結 言

本学に新しく導入された ACOS450を使用して、今回は、雷撃を受け、特にノード電位が、避雷器によってどの様に変化を受けるかという事を主眼に解析を進めた。

今後は、サージ電流の大きさ、エネルギーの大きさ等について解析を試みたい。

尚、解析を行なうにあたり、日新電機(株)大西氏、陰野氏、東京電力(株)道上氏に大変ご協力をいただき深基なる謝意を表わします。

参 考 文 献

- 1) 日新電機技報 Vol. 27, No1. ('82, 1)
- 2) 電力中央研究所報告 (昭和51年 3 月)
- 3) 安達遂, 小泉亮一郎: 送配電工学 学献社 (1976, 1)