送電線路雷事故率의 簡略化計算

論 文
32～5～3

Simplified Calculation for Lightning Performance of Transmission Lines

池 哲 根* · 李 弘 植**
(Chol-Kon Chee · Hong-Sik Lee)

Abstract

A simplified method for the estimation of lightning performance of transmission Lines is described. Only one stroke current wave shape was used and the potentials of tower top and crossarms were computed at the two time points to obtain the critical stroke current for insulator flashover.

Variation of the critical stroke current due to power frequency voltage was also taken into account. An applied example on 345 KV Line model was shown and the calculated result was compared with the estimating curve suggested by Clayton & Young.

1. 序 論

雷擊에 對한 送電線路의 應答은, 급격히 變化하는 電磁場現象과 코로나에 의한 線路 및 鐵塔써지 임피던스의 비선형특성, 주파수와 電流 크기의 함수인 塔脚接地抵抗 그리고 복잡한 電極形狀에서의 기체방전현상 等을 포함하고 있어 정확한 해석이 지극히 곤란하다.[1] 또한 雷擊빈도와 波形 그 자체도 정확한 예측을 할 수가 없다. 따라서 송전선로의 雷사고율을 예측하기 위해서는 제반 현상들을 간략화 하여야 한다.

Monte Carlo 法은 雷擊파형과 뇌격지점, 뇌격각도, 탑각접지저항, 기상상태를 통계적으로 처리하여 컴퓨터로 random sampling 하여 雷차폐이론과 진행파이론을 적용함으로써 사고율을 예측하는 것인데 실제의 뇌격현상을 가장 적절히 모의하는 방법으로 널리 쓰이고 있으나 많은 계산시간을 요한다. 본 논문에서는 한 가지의 per unit 뇌격파형을 사용하고 응답을 두 시점에서만 계산하여 역섬락을 위한 임계뇌격전류치를 구한 다음 상용주파전압을 고려하여 뇌격전류치 分布통계로부터 역섬락율을 구하는 방법을 사용하였다. 차폐실패율의 계산은 Armstrong과 Whitehead의 이론을 적용하였다. 역섬락율의 계산결과를 Clayton과 Young의 추정곡선과 비교하여 검토하였다.

2. 簡略化를 위한 仮定[1)~4)]

(A) 뇌격전류의 누적확률분포는 Anderson의 분포를 사용

$$P(I) = 1/\{1 + (I/31)^{2.6}\} \quad (1)$$

(B) 大地雷擊密度

$$N_{GR} = 0.12\,(IKL)\ 〔回/年 \cdot km^2〕 \quad (2)$$

(C) 線路雷擊回數

$$N_L = 0.1\,N_{GR}\,(b + 4\,h^{1.09})\ 〔回/年 \cdot 100\,km〕 \quad (3)$$

b = 架空地線간격

* 正 會 員 : 서울大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
** 正 會 員 : 韓國電氣通信研究所 研究員
接受日字 : 1983年1月21日

h = 가공지선의 평균높이

(D) 뇌격거리

$$S = 10\, I^{0.65} \qquad (4)$$

(E) 뇌격은 모두 수직으로 내려오는 것으로 가정

(F) 大地경사각은 0°

(G) 애자련의 섬락전압

$$V_C = (400 + 710/t^{0.75})\, l \cdot [\mathrm{KV}] \qquad (5)$$

t = 섬락까지의 시간〔μs〕

l = 애자련 길이〔m〕

(H) 線路뇌격회수 中 철탑뇌격은 60%로 가정(徑間 역섬락은 무시[5])

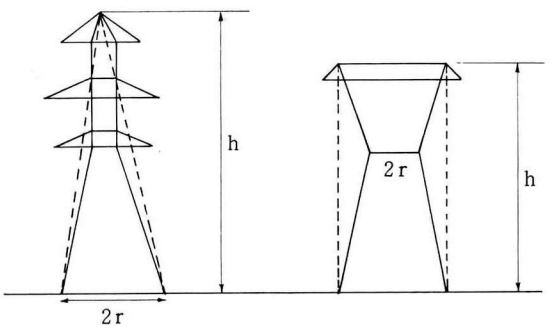
(I) 철탑의 써지 임피던스는 Darveniza가 제시한 등가임피던스를 사용(그림 1)

(J) 선로에의 뇌격거리 S에 대한 大地뇌격거리의 比, β는 0.8로 가정

(K) 뇌격파형은 2μs 파두장의 ramp function 사용

(L) 氣象補正은 고려하지 않음

(M) 탑각접지저항은 surge reduced valve 사용



$$Z_T = 30\, l_n \frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \qquad Z_T = 60\{ l_n \sqrt{2}\, \frac{2h}{r} - 1 \}$$

(2회선 수직배열 철탑) (일회선 수평배열 철탑)

그림 1. 鐵塔의 等價 써지 임피던스

Fig. 1. Equivalent tower surge impedance

3. 차폐실패율의 계산

애자련 섬락을 일으킬 수 있는 최소의 뇌격전류는

$$I_{min} = 2\, V_C / Z_\phi \qquad (6)$$

Z_ϕ = 코로나를 고려한 相導體의 surge impedance[6]

그림 2에서 차폐되지 않은 원호의 수평폭 Xs는

i) $\beta S > Y_\phi$ 이면

$$X_S = S\{\cos\theta + \sin(\alpha - \omega)\} \qquad (7)$$

$$\theta = \sin^{-1}(\beta S - Y_\phi)/S$$

$$\omega = \cos^{-1}(F/2S)$$

$$\alpha = \tan^{-1}(X_\phi - X_C)/(Y_C - Y_\phi)$$

ii) $\beta S \leqq Y_\phi$ 이면

$$X_S = S\{1 + \sin(\alpha - \omega)\} \qquad (8)$$

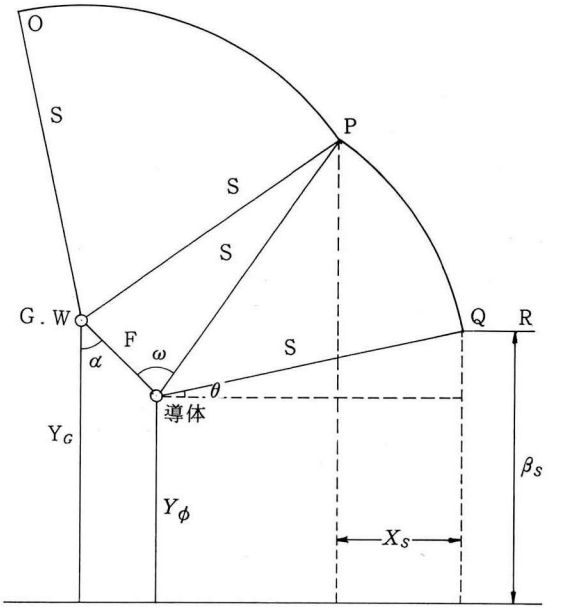


그림 2. 非遮蔽幅

Fig. 2. Unshielded area

그림 2에서 S가 충분히 커지면 호 PQ가 없어지게 되는데 이때의 뇌격거리, S_{max}는 $OP \approx S_{max}$임을 이용하여

$$S_{max} \approx \frac{Y_G + Y_\phi}{2(\beta - \sin\alpha)} \qquad (9)$$

를 얻는다.

S_{max}에 대응하는 I_{max}와 I_{min}사이의 뇌격전류만이 섬락을 일으키므로 차폐실패율 N_{SF}는

$$N_{SF} = \frac{N_{GR}}{10} \int_{I_{min}}^{I_{max}} X_S(I) \cdot dP(I)$$

〔回/年·100 km〕 (10)

4. 역섬락율의 계산

4.1 塔頂電位

가공지선의 철탑과 뇌격점에서 본 합성 써지 임피던스는

$$Z_I = \frac{Z_S Z_T}{Z_S + 2Z_T} \tag{11}$$

뇌격전류의 철탑으로의 分流比는

$$\delta_T = Z_I / Z_T \tag{12}$$

塔底에서의 전류파 반사계수를 β_R,

塔頂에서의 전류파 반사계수를 β_S,

塔頂에서의 上向電流波 투과계수를 α_T라 하면 進行波이론으로부터 다음과 같이 탑정전위를 계산할 수 있다.[7]

$$V_T(t) = Z_I I(t) - \frac{Z_S}{2}\delta_T \beta_R \alpha_T \sum_{n=1}^{N} I(t-2n\tau_T)(\beta_R \beta_S)^{n-1}$$

$$= Z_I I(t) - Z_W \sum_{n=1}^{N} I(t-2n\tau_T)\varphi^{n-1} \tag{13}$$

여기서 $Z_W = \frac{Z_S}{2}\delta_T \beta_R \alpha_T$

$\varphi = \beta_R \beta_S$

$N = t/2\tau_T$를 넘지 않는 최대의 整數

$I(t) = At$ 이면 식 (13)은

$$V_T(t) = At\{Z_I - Z_W \frac{1-\varphi^N}{1-\varphi}\} \; 2A\tau_T Z_W \{\frac{1-\varphi^N}{(1-\varphi)^2} - \frac{N\varphi^N}{1-\varphi}\} \tag{14}$$

4.2 塔底와 Crossarm에서의 電位

Crossarm에서의 電位는 탑정전위와 탑저전위로부터 補間으로 구하였다.

탑저전위는 보간을 行하기 위하여 $t+\tau_T$에 대해 계산하였다. 탑저에서의 전압파 반사계수를 $\bar{\beta}_R$, 탑정에서의 반사계수를 $\bar{\beta}_S$, 下向電壓波의 塔却接地抵抗을 통한 투과계수를 $\bar{\alpha}_R$라 하면 탑저전위는

$$V_R(t+\tau_T) = \bar{\alpha}_R Z_I \sum_{n=0}^{N} I(t-2n\tau_T)(\bar{\beta}_R \bar{\beta}_S)^n \tag{15}$$

여기서 $I(t) = At$이면 식 (15)는

$$V_R(t+\tau_T) = \bar{\alpha}_R Z_I A\left[\frac{1-\varphi^{n+1}}{1-\varphi}t - 2\varphi\tau_T \{\frac{1-\varphi^N}{(1-\varphi)^2} - \frac{N\varphi^N}{1-\varphi}\}\right] \tag{16}$$

n相의 crossarm 전위는 보간에 의해

$$V_{pn}(t+\tau_{pn}) = V_R(t+\tau_T) + \frac{\tau_T - \tau_{pn}}{\tau_T}\{V_T(t) - V_R(t+\tau_T)\} \tag{17}$$

4.3 隣接鉄塔으로 부터의 반사파

인접철탑으로부터의 반사파는 徑間의 길이에 따라 雷擊電流 波高點보다 前에 도착할 수도 있고 그 후일 수도 있다. 또 이것은 進行波의 코로나에 의한 감쇠와 왜곡 때문에 정확히 계산하는 것은 매우 곤란하다.[8] 여기서는 인접철탑의 등가 임피던스 (철탑과 탑각접지저항의 합성치)와 같다고 가정하였다. 그리고 코로나에 의한 파고치의 감쇠계수 K_S는

$$K_S = \frac{1}{0.0002\,S\,V_T + 1}$$

S = 徑間長〔km〕

를 사용하였다.[8,9]

$Z(t)$를 가공지선과 시간에 따라 변하는 철탑의 임피던스 $Z_T'(t)$와의 병렬합성 임피던스라 하면

$$Z_T'(t) = \frac{Z_S Z(t)}{Z_S - 2Z(t)} \tag{18}$$

식 (18)과 진행파 이론으로부터, 인접철탑으로부터의 반사파는

$$V_T'(t) = -4K_S\{1 - 2\frac{Z(t)}{Z_S}\}^2 V_T(t-2\tau_S) \tag{19}$$

뇌격전류의 파두장을 t_f라 하면

$Z(t_f) = V_T(t_f)$이므로 1P.U뇌격전류에 대해서는 $Z(t_f) = V_T(t_f)$

따라서 식 (19)는 다음과 같이 된다.

$$V_T'(t_f) = -4K_S\{1 - 2\frac{Z_T(t_f)}{Z_S}\}^2 \cdot V_T(t_f) \quad (t_f - 2\tau_S)/t_f \tag{20}$$

단 $2\tau_S \geqq t_f$이면 $V_T'(t_f) = 0$

4.4 역섬락율

1P.U 뇌격전류에 대한 애자련의 전압은

$$V_{sn}(t) = V_{pn}(t) - K_n \cdot V_T(t) \tag{21}$$

K_n = 가공지선의 n相에 대한 結合率

$t = 2\,\mu s$와 $t = 6\,\mu s$에서만 계산하여 식 (22)와 같이 임계뇌격전류를 구한다.

$$I_{cn}(t) = V_c(t) / V_{sn}(t) \qquad (22)$$

둘 중 낮은 쪽을 택하여 임계뇌격전류로 한다. 여기서 商用周波電壓을 고려하면

$$I_{cn}' = I_{cn} - \frac{V_{L-G}}{V_{sn}} \sin(\theta - \alpha_n) \qquad (23)$$

V_{L-G} = 對地線路電壓(波高値)

α_n = n相의 立相角

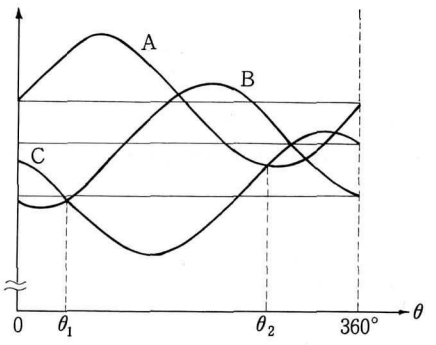


그림 3. 商用周波電壓을 고려한 임계뇌격 전류

Fig. 3. Critical stroke current with the effect of power freguency voltage

θ가 0°에서 360°까지 변하는 동안의 각 時間구분에서의 임계뇌격전류가 가장 작은 相이 섬락하게 된다. 예를들어 그림 3에서 N번의 철탑뇌격에 대하여 C相이 섬락할 회수는 식(23)과 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$BFO_C = \frac{N}{2\pi}\int_{\theta_1}^{\theta_2} P(I_{cn}')\,d\theta$$

$$N = 0.6\,(N_L - N_{SF})$$

5. 적용 model 및 결과

이상의 방법으로 작성한 컴퓨터 프로그램을 그림 4와 같은 대표적인 345 KV 선로에 적용한 결과는 표 1과 같으며 계산시간은 IBM 370으로 3.4초가 소요되었다.

그림 4에서

가공지선의 도체반경 = 0.45 cm

各 相의 素導體반경 = 1.48cm

復導體 直徑 = 45.7cm (2도체)

弛度 = 7 m (相도체 및 가공지선)

塔底幅 = 10 m

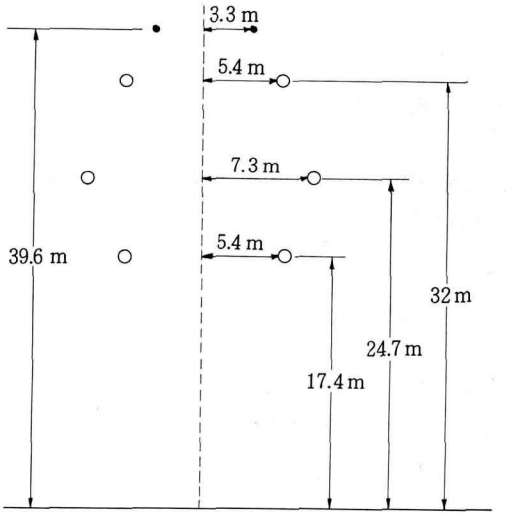


그림 4. 적용 model

Fig. 4. Applied model

표 1. model에 대한 계산결과

Table 1. Calculated result for the model

N_I \ R (Ω)		5	10	15	20	40	70	100
14	SF	.104	.104	.104	.104	.104	.104	.104
	BFO	.29	.79	1.57	2.58	7.99	16.04	21.77
	TOT	0.4	0.9	1.67	2.69	8.1	16.2	21.9
16	SF	.097	.097	.097	.097	.097	.097	.097
	BFO	.20	.53	1.06	1.76	5.66	12.15	17.36
	TOT	.30	.63	1.16	1.86	5.76	12.25	17.5
18	SF	.083	.083	.083	.083	.083	.083	.083
	BFO	.14	.38	.76	1.25	4.13	9.28	13.8
	TOT	.22	.46	.84	1.33	4.21	9.36	13.9
20	SF	.065	.065	.065	.065	.065	.065	.065
	BFO	.10	.28	.56	.93	3.10	7.18	10.99
	TOT	.17	.35	.62	.99	3.17	7.25	11.1

IKL = 30

R = 塔脚接地抵抗

N_I = 碍子数 (254 × 146 mm)

$1 \leqq \tau_s \leqq 3$의 범위인 徑間長에 대하여는 경간의 변화가 역섬락율에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났는데 이것은 $2\,\mu s$의 파두장을 가진 뇌격파형만을 사용하였기 때문이다. 실제로는 경간이 짧아질수록 역섬락율도 약간 감소한다. 따라서 보다 긴 파두장

을 병용한 방법에 대해 더 연구할 필요가 있다고 본다. 相配列을 super-bundle型으로 하였을 때에는 역섬락율이 약간 감소함을 알 수 있었다. 계산결과를 Clayton과 Young이 제시한 추정곡선과[10] 비교하여 보면 그림 5, 6, 7, 8과 같다.

6. 結 論

雷擊現象을 간략화시켜 계산결과를 Clayton과 Young의 추정곡선과 비교하므로써 다음과 같은 간략화 방법으로 송전선로의 雷事故率을 예측할 수 있음을 보였다.

(1) 大地경사각과 수직방향에 대한 뇌격각도를 0°로 가정한다.

(2) 雷擊전류치 및 파형을 random sampling 하여 각각의 뇌격에 대하여 차폐실패 여부를 판정함으로써 차폐실패율을 구하지 않고 차폐실패를 일으키기에 필요한 최소 및 최대뇌격전류치를 구하고 그 사이의 각 전류치에 대한 비차폐 면적을 고려하여 차폐실패율을 구할 수 있다.

(3) 뇌격전류치 및 파형을 random sampling하여 각각의 뇌격에 대하여 역섬락 여부를 판정하여 역

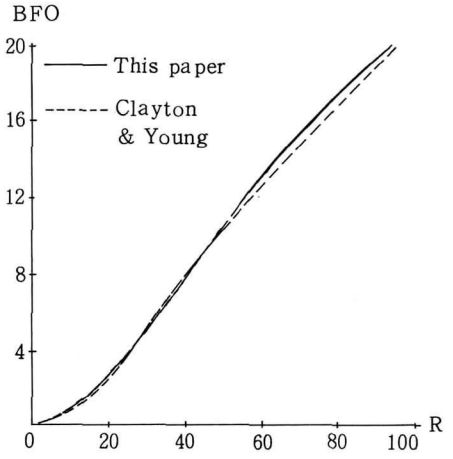


그림 5. 애자수 14개에 대한 역섬락율
Fig. 5. BFO for 14 insulators

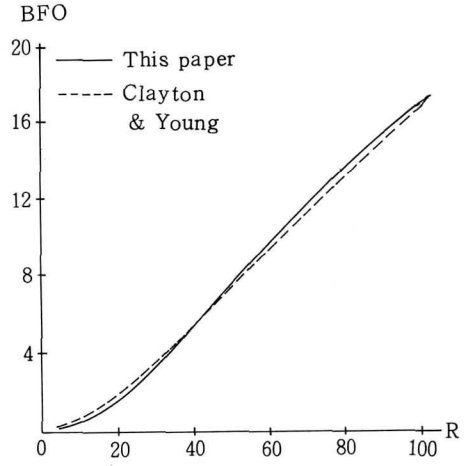


그림 6. 애자수 16개에 대한 역섬락율
Fig. 6. BFO for 16 insulators

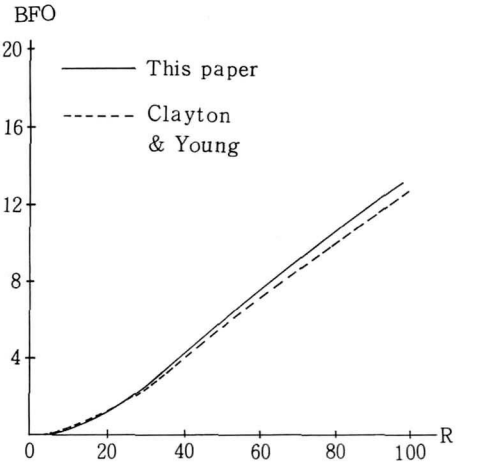


그림 7. 애자수 18개에 대한 역섬락율
Fig. 7. BFO for 18 insulators

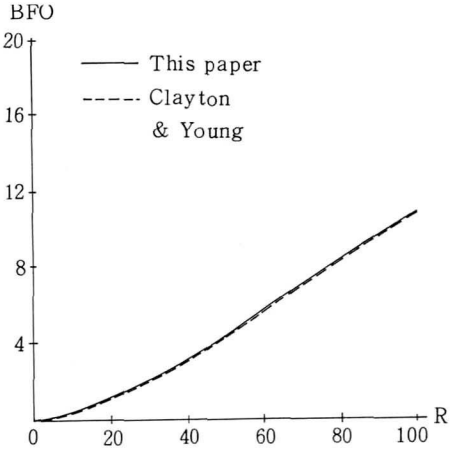


그림 8. 애자수 20개에 대한 역섬락율
Fig. 8. BFO for 18 insulators

섬락율을 계산하지 않고 크기가 1KA이고 파두장 2㎲인 ramp function의 뇌격파형을 사용하여 임계뇌격전류치를 구함으로써 1회의 계산으로 역섬락율을 구할 수 있다.

(4) 애자련의 volt-time 곡선 특성상 6㎲ 이후에는 섬락이 일어나지 않는다고 가정하여 6㎲와 파고점인 2㎲에서만 애자련 전압을 계산하여도 정확한 결과를 얻을 수 있다.

參 考 文 獻

1) J.J. La Forest et al.; "Transmission line reference book" 2nd Edition, pp. 545~596, 1982

2) M.A. Sargent, M. Darveniza; "Tower surge impedance", IEEE Trans. PAS. vol. 88, pp. 680~687, 1969

3) Liew Ah Choy, M. Darveniza; "A sensitivity Analysis of lightning performance calculation for transmission lines", IEEE Summer Power Meeting Paper, 1970

4) 日本 UHV送電特別委員會 絶縁部會 報告書, "UHV送電系統の 絶縁", pp. 199~233, 1982

5) C. F. Wagner, A. R. Hileman; "Predischarge current characteristics of parallel electrodes", IEEE Trans. PAS vol. 66, pp. 1236~1242, 1964

6) G.D. Mc Cann; "The effect of corona on coupling factors between ground Wires and phase conductors," AIEE Trans. PAS, vol. 62, pp. 818~826, 1943

7) L.V. Bewley; "Traveling waves on transmission systems", 2nd Ed., Dover Publications, 1963

8) C.F. Wagner et al; "High voltage impulse tests on transmission lines", AIEE PAS, pp. 196~210, April, 1954

9) W. Diesendorf; "Insulation coordination in high voltage electric power system", Butterworths, pp. 47~82, 1974

10) J.M. Clayton, F.S. Young; "Estimating lightning performance of transmission lines", IEEE Trans. PAS, vol. 83, pp. 1102~1110, Nov., 1964