

開閉 Surge에 처한 CFO 計算 Model

李弘植 / 電力系統研究室

I. 概 要

4m 이상의 air gap을 가진 전극배치에서 正極性 충격전압(수십~수천 μs 의 波頭長)을 가했을때의 放電現象을 物理的인 관점에서 연구한 論文을 많이 볼 수 있다.

開閉꺼어지에 대한 공극의 절연강도를 實規模 試驗에 의해 산출하는 것은 엄청난 비용이 들기 때문에 해석적 방법을 많이 시도하고 있는 것이다. 그러나 많은 모델이 제안되어 있지만 아직 送電線 絶緣設計에 사용하기에는 model에 不確實한 점이 많은 실정이다. 여기서는 Carrara와 Thione의 model을 소개하고자 한다.

Carrara와 Thione은 air gap의 形狀을 비슷한 電界分布를 갖는 두가지 群으로 나누었다. 즉 spherical symmetry를 갖는 전극(球, 棒, 導體端部 등)과 원통형 대칭성을 갖는 전극(導體-大地, 導體-鐵塔, 變電所 母線)인데 대부분의 실제적인 전극形狀을 대표할 수 있다.

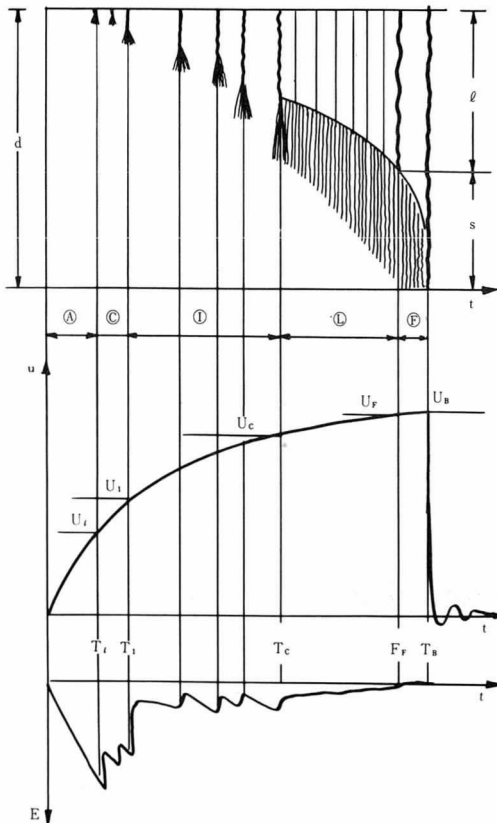
II. 物理的 現象

<그림 1>은 棒對平板 電極에서 正極性 개폐

꺼어지에 대한 放電現象을 단계적으로 표시한 것이다. 電壓印加 후 U_i (코로나開始電壓)까지는 아무런 현상도 나타나지 않는다. U_i 에서 전극표면의 전계강도가 떨어졌다가 두번째의 코로나가 나타날때까지 電界強度가 다시 상승한다(1次暗期). 시간이 조금더 경과하면 훨씬 밝은 channel과 함께 코로나가 발생한다(Leader의 發生). 이 시점과 전압(T_i 과 U_i)을 각각 leader개시시간, leader개시전압이라고 이후에 다시 이 현상이 사라졌다가(二次暗期) 時点 T_c 에서 연속적으로 成長하는 leader와 함께 코로나가 發生한다. 1,2次暗期(Dark period)는 여러번 반복될 수도 있다. 연속적으로 진행되는 leader의 先端은 streamer로 구성되어 있으며 그 길이는 leader의 進行에 따라 약간 증가한다. Streamer가 음극에 닿으면(時点 T_f) leader先端의 進行速度는 급격히 증가하여 10~20 μs 만에 leader의 先端이 음극에 닿아 완전한 絶緣破壞가 일어난다(Final jump).

III. 假 定

(1) 인가전압의 파두장이 臨界波頭長(가장 낮



〈그림 1a〉 棒-平板電極의 正極性 開閉꺼어지 에 대한 放電現象

- Ⓐ 아무런 現象이 없음
- Ⓒ 一次暗期
- Ⓓ 二次暗期
- Ⓔ leader의 連統的 進展
- Ⓕ final jump

〈그림 1b〉 印加電壓波形

- T_c , U_c = 코로나 開始
- T_i , U_i = Leader 發生
- T_c , U_c = Leader의 連統的 進展 開始
- T_f , U_f = final jump 開始
- T_B , U_B = 破壞

〈그림 1c〉 電極端部의 電界強度의 變化

은 CFO 를 갖는 파형의 파두장)보다 짧거나 같을 때에는 2次暗期는 나타나지 않는다. (즉 $T_c = T_i$, $U_c = U_i$)

(2) 전극의 半徑이 臨界值 이상일 때에는 1次暗期가 존재하지 않는다. (즉 $T_i = T_c$, $U_i = U_c$)

(3) 전극의 반경이 임계치보다 작으면 CFO는 임계반경의 CFO와 같다.

(4) 임계파두장의 전압을 인가하면 파괴는 T_{cr} 에서 일어난다. ($T_f = T_{cr}$, $U_B = U_f$)

(5) 最小閃絡電壓을 인가하였을 때에는 leader는 一定速度로 가장 짧은 길을 택하여 final jump 開始點까지 進行한다.

以上은 最小閃絡電壓을 산출하기 위한 가정이다. 最小 閃絡電壓이 계산되면 모든 단계에서의 放電過程의 分散을 고려하여 50% 閃絡電壓을 얻을 수 있다.

IV. 50%閃絡電壓의 算出

CFO는 다음 세가지 電壓의 合으로 생각한다

- 1) U_i : 연속적 leader개시전압
 - 2) ΔU_i : leader가 進行하는 동안 印加電壓波의 上昇分
 - 3) ΔU_σ : 最小閃絡電壓과 U_{50} (CFO)와의 차이로서 統계적인 전압상승요소
- U_i 을 산출하기 위해서는 임계전극 크기를 결정해야 하며 이때의 코로나 開始 電界強度를 계산해야 한다. 또 數值電界 計算을 통하여 코로나 開始 電界強度와 코로나 開始 電壓과의 관계를 구하여야 한다.

Leader의 進行時間, ΔT_i 은

$$\Delta T_i = l/V \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

l = leader의 길이 (Final jump 直前)
 $V = 1.5 \text{ cm}/\mu\text{s}$ (Leader의 進行速度)

$$l = d - S \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

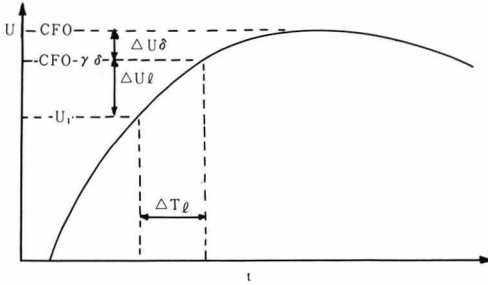
d = 갭 간격
 S = final jump 거리

$$S = U_T/E_s \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

U_T = leader先端과 음극과의 거리로서 보통 U_i 과 같다고 본다.

E_s = streamer내의 平均 電位경도
 (음극이 평판이면 4.1 kV/cm, 棒이면 5.5 kV/cm)

ΔU_i 은 <그림 2>에서 보는 바와 같이 ΔT_i 동안의 인가전압의 상승분이다.



<그림 2> CFO의 算出(臨界波頭長)

S가 d보다 크게 계산될 경우에는 S=d로 가정한다.

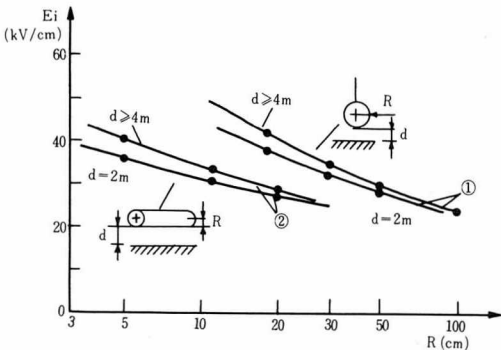
正極性 開閉시어지에 대한 침락電圧이 약 5%의 표준편차를 갖는다는 것은 잘 알려져 있다. 또 耐電壓值은 CFO 아래로 3σ를 잡고 있으므로

$$\Delta U \sigma = \gamma \sigma U_{50} = 0.15 U_{50} \dots\dots\dots ④$$

$$CFO = \frac{1}{1 - \gamma \sigma} (U_i + \Delta U_i) \dots\dots\dots ⑤$$

(* 相間絶緣에서는 $\sigma = 3\%$)

코로나 開始 電位傾度와 電極의 크기와는 <그림 3>과 같은 관계가 있다.



<그림 3> 電極半径에 대한 最小코로나 開始電位傾度

또 III·(3)에서 언급한 임계電極半径, R_c 에 관하여 Renardieres group은 다음 식을 제안하였다.

球-平板전극에서는

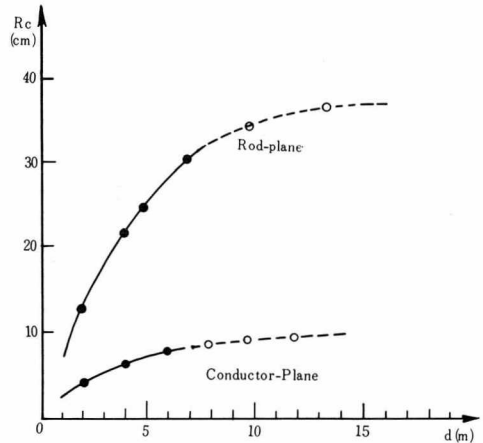
$$R_c = 38 (1 - 2.9 \alpha^{-500}) \text{ [cm]} \dots\dots\dots ⑥$$

Conductor-平板 전극에서는

$$R_c = 3.7 \ln (1 + d/100) \text{ [cm]} \dots\dots\dots ⑦$$

여기서 d = 갭 간격 [cm]

Carrara 와 Thione 은 <그림 4>를 제안하였다.



<그림 4> 갭 거리에 관한 臨界半径

이들은 R_c 를 실험을 통하여 구하였는데 <그림 5>와 같이 gap 간격과 전극반경을 변화시키면서 구한 CFO 값이 Gallet의 CFO 실험식

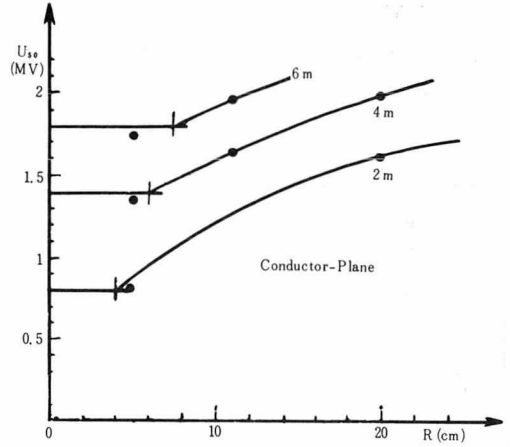
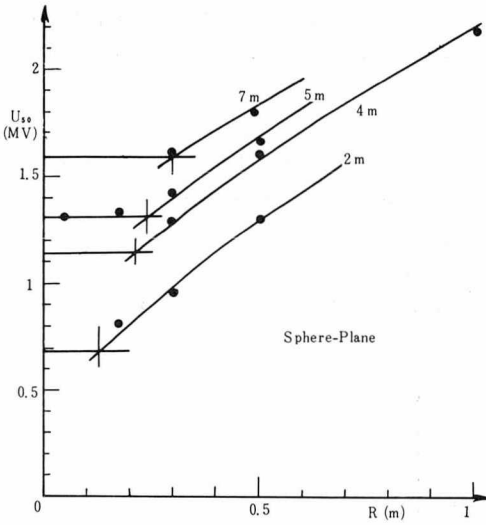
$$CFO = 3400 / (1 + 8/d) \text{ [kV, m]} \dots\dots\dots ⑧$$

와 일치할 때의 반경을 R_c 로 정하였다.

V. 기타 電極配置에 대한 適用

棒-平板 및 導體-平板 電極形狀에 대해 구한 R_c 와 ΔU_i 을 다른 전극배치에도 적용하기 위하여 이들은 전극배치를 다음 세가지 그룹으로 나누었다.

- (1) 棒 갭 → 等價의 棒-平板電極
 - (2) 導體갭 → 等價의 導體-平板電極
 - (3) 其他-(1), (2) 어디에도 속하지 않는 것
- (3)에 대하여는 아직 적용方法을 제시하지 않았다.



〈그림 5〉 電極半徑에 대한 CFO의 變化

1. Rc의 決定

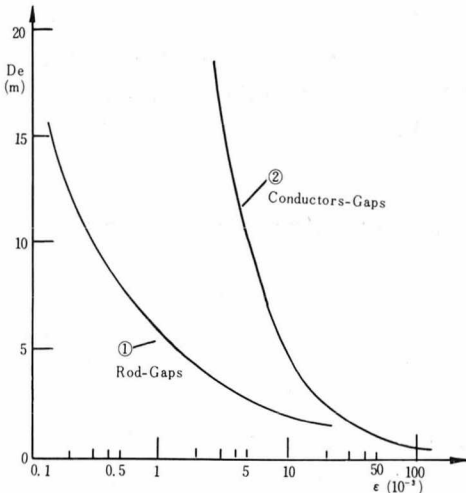
갯의 거리 D 인 검토하고자 하는 電極의 中心 線上에 전극으로부터 R₁ 및 R₂ (>R₁)만큼 떨어진 지점의 電界, E₁과 E₂의 比가 갯 거리 D_e인 基準電極에서 구한 E₁과 E₂의 比와 같다면 두 電極형상은 corona 開始부터 leader 發生까지의 現象에 관한 等價이다.

이들은 導體gap에 대하여는 R₁=5cm, R₂=15cm를, 棒gap에 대하여는 R₁=20cm, R₂=40cm를 제안하였다. 또 이들은 보조계수 ε을 도입하여

$$\epsilon = (E_2/E_1) \cdot (R_2/R_1)^n - 1 \dots\dots\dots \textcircled{9}$$

$$n = \begin{cases} 1 & \text{(導體 갯)} \\ 2 & \text{(棒 갯)} \end{cases}$$

ε으로부터 D_e의 값을 추정할 수 있게 하였다. (〈그림 6〉 참조)



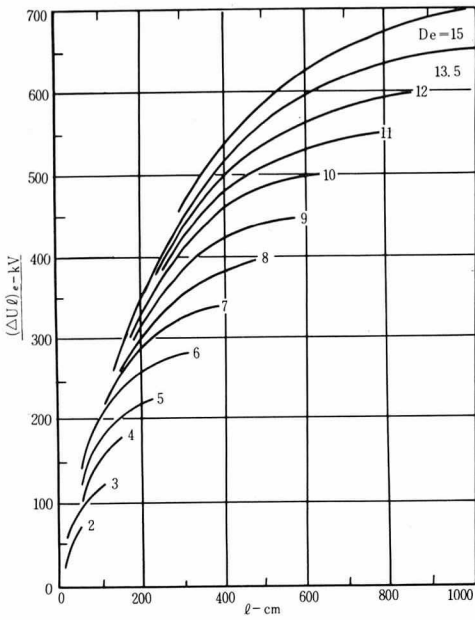
〈그림 6〉 電界分布係數ε과 等價갯 거리 De와의 關係

2. ΔU_i의 決定

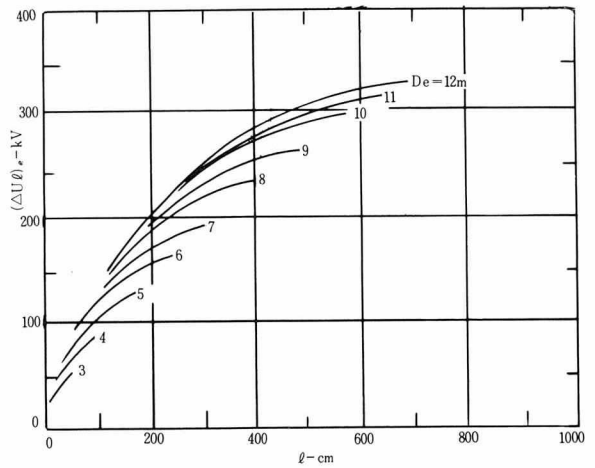
Leader 發生으로부터 final jump까지에 관하여 위에서 구한 等價電極에 임계電壓波形을 인가하였는데 電極上的 電荷의 증가량이 같다면 이 두 stress는 等價이다. ΔU_i은 등가인 두 전극형상에서 leader 전진중의 전하증가량을 같다고 둬므로써 구할 수 있다. 이들은 leader의 길이와 등가 갯 거리, D_e로부터 (ΔU_i)_e를 구하여 (〈그림 7〉 참조)

$$\Delta U_i = \beta (\Delta U_i)_e \dots\dots\dots \textcircled{10}$$

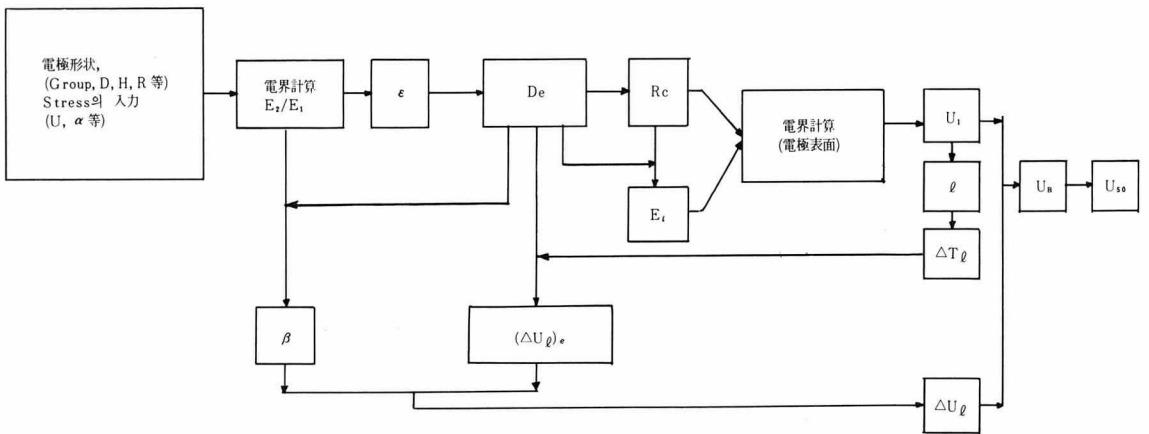
에 의해서 ΔU_i을 추정할 수 있게 하였다. 여기서 β는 基準電極에서의 電荷와 電壓間의 關係를 나타내는 係數와 實電極上的 電荷와 等價 stress間의 係數와의 比이다.



〈그림 7a〉 Leader가 進展하는 동안의 電圧上昇 (等価棒 - 平板電極)



〈그림 7b〉 Leader가 進展하는 동안의 電圧上昇 (等価導體 - 平板電極)



〈그림 8〉 CFO 計算 block diagram

전체적인 계산의 절차는 〈그림 8〉과 같다. 이 방법에 의한 平行導體 間의 CFO 계산결과를 GE High Voltage Laboratory (Pittsfield)의 試驗자료와 비교한 결과가 〈表 1〉인데 오차는 대개 6% 미만이었다.

1. CFO는 U_1 , ΔU_n , ΔU_o 의 세가지 성분
의 합으로 볼 수 있다.

2. Leader 開始電圧 U_1 이 세 성분中 가장 중요한 역할을 하며 物理的 觀點에서 더 연구 하여야 할 단계이기도 하다. 電極크기의 임계치 개념을 도입하여 U_1 을 U_i 로 대체하였다.

VI. 結 論

| D (m) | H (m) | α | He (m) | Rc (cm) | U_1 (kV) | ℓ (cm) | β | ΔU_ℓ (kV) | U_B (kV) | U_{50} (kV) | $U_{50}(\bullet)$ (kV) | Diff. (%) |
|----------|----------|----------|-----------|------------|---------------|----------------|---------|-------------------------|---------------|------------------|---------------------------|--------------|
| 5.1 | 5 | 0 | 5.0 | 6.8 | 1230 | 202 | 0.99 | 128 | 1358 | 1509 | 1610 | -6.2 |
| 5.1 | 5 | 0.25 | 4.8 | 6.7 | 1550 | 122 | 1.26 | 139 | 1689 | 1876 | 1990 | -5.7 |
| 5.1 | 5 | 0.47 | 3.5 | 5.6 | 1827 | 53 | 1.77 | 97 | 1924 | 2134 | 2140 | -0.3 |
| 2.1 | 7 | 0 | 3.2 | 5.3 | 1036 | - | - | - | 1036 | 1150 | 1090 | +5.5 |
| 6.4 | 7 | 0 | 7.0 | 7.9 | 1418 | 286 | 0.98 | 186 | 1604 | 1783 | 1910 | -6.6 |
| 6.4 | 7 | 0.24 | 6.3 | 7.6 | 1717 | 211 | 1.25 | 200 | 1918 | 2130 | 2230 | -4.5 |
| 6.4 | 7 | 0.42 | 4.9 | 6.7 | 2005 | 139 | 1.63 | 189 | 2194 | 2437 | 2360 | +3.5 |
| 4.2 | 9 | 0 | 8.0 | 8.3 | 1478 | 50 | 0.96 | 77 | 1555 | 1728 | 1820 | -5 |
| 4.2 | 9 | 0.26 | 4.5 | 6.5 | 1578 | 25 | 1.33 | 46 | 1624 | 1804 | 1910 | -5.5 |
| 4.2 | 9 | 0.5 | 2.3 | 4.3 | 1685 | - | - | - | 1685 | 1872 | 1980 | -5.5 |
| 5 | 9 | 0 | 8.6 | 8.5 | 1516 | 121 | 0.96 | 140 | 1656 | 1840 | 1960 | -6 |
| 5 | 9 | 0.24 | 5.6 | 7.2 | 1675 | 81 | 1.28 | 128 | 1803 | 2003 | 2080 | -3.7 |
| 5 | 9 | 0.45 | 3.2 | 5.3 | 1780 | 55 | 1.79 | 108 | 1888 | 2097 | 2200 | -4.7 |
| 6.1 | 9 | 0 | 9.0 | 8.6 | 1551 | 222 | 0.97 | 193 | 1745 | 1938 | 2050 | -5.5 |
| 6.1 | 9 | 0.23 | 6.6 | 7.8 | 1770 | 167 | 1.26 | 189 | 1959 | 2176 | 2200 | -1 |
| 6.1 | 9 | 0.43 | 3.9 | 6.0 | 1921 | 130 | 1.73 | 138 | 2060 | 2289 | 2300 | -0.5 |
| 7.8 | 9 | 0 | 9.0 | 8.6 | 1572 | 387 | 0.98 | 245 | 1817 | 2019 | 2100 | -3.8 |
| 7.8 | 9 | 0.21 | 8.3 | 8.4 | 1890 | 307 | 1.21 | 266 | 2156 | 2396 | 2370 | +1 |
| 7.8 | 9 | 0.40 | 6.3 | 7.6 | 2170 | 237 | 1.57 | 252 | 2422 | 2690 | 2520 | +6.7 |
| 6 | 12 | 0 | 10.5 | 8.9 | 1620 | 195 | 0.97 | 190 | 1810 | 2129 | 2000 | +6.4 |
| 6 | 12 | 0.33 | 4.9 | 6.8 | 1847 | 138 | 1.5 | 174 | 2021 | 2377 | 2420 | -1.8 |
| 8 | 12 | 0 | 12 | 9.1 | 1686 | 378 | 0.97 | 271 | 1957 | 2303 | 2200 | +4.7 |
| 8 | 12 | 0.35 | 6.3 | 7.6 | 2095 | 276 | 1.51 | 257 | 2352 | 2767 | 2750 | +0.6 |
| 8 | 12 | 0.45 | 5.1 | 6.9 | 2236 | 241 | 1.69 | 203 | 2439 | 2870 | 2945 | -2.5 |
| 8 | 12 | 0.53 | 4.2 | 6.2 | 2356 | 211 | 2.06 | 186 | 2542 | 2990 | 3085 | -3 |
| 10 | 12 | 0 | 12 | 9.1 | 1713 | 572 | 0.98 | 308 | 2021 | 2378 | 2270 | +4.7 |
| 10 | 12 | 0.30 | 9.5 | 8.7 | 2200 | 450 | 1.37 | 370 | 2570 | 3023 | 2990 | +1.1 |
| 10 | 12 | 0.48 | 6.2 | 7.6 | 2572 | 357 | 1.86 | 316 | 2888 | 3397 | 3410 | -0.4 |
| 12.5 | 12 | 0 | 12 | 9.1 | 1720 | 820 | 0.99 | 326 | 2046 | 2407 | 2310 | +4.1 |
| 12.5 | 12 | 0.36 | 11 | 9.0 | 2511 | 622 | 1.47 | 462 | 2973 | 3498 | 3395 | +3 |
| 12.5 | 12 | 0.43 | 10 | 8.8 | 2723 | 570 | 1.64 | 485 | 3208 | 3774 | 3730 | +1.1 |

〈表 1〉 平行導体間 CFO의 計算値와 實測定値와의 比較

D = 線 距 離, H = 地 上 高, $\alpha = U^- / U_{total}$

(0)는 實測值

3. ΔU_1 은 인가전압파형이 섬락전압에 미치는 영향을 나타내고 있다.

4. 두 가지의 기준전극 배치로 부터 다른 전극배치에 대한 CFO를 계산하기 위한 等価變換 방법을 제시함으로써 완전한 물리적인 model 개발의 방향을 보였다.

5. 이 方法으로 電極의 形狀과 stress의 變化가 CFO에 미치는 영향을 實規模試驗을 거치지 않고 예측할 수 있다.

參 考 文 獻

1. Carrara, G. & L. Thione. "Switching Surge Strength of Large Air Gaps: Physical Approach," *IEEE Trans. PAS*, Vol. 95, March/April, 1976, pp 512-524
2. LaForest, J. J. et al. *Transmission Line Reference Book 345kV and Above*, 2nd edition, EPRI, 1982 pp 539-541