

# 韓電 765kV 系統의 開閉 過電壓에 對하여

김정부\* · 이동일\*\*

(\*한전 기술연구원 책임연구원, \*\*선임연구원)

抄錄: 開閉 過電壓에 對한 機器 絕緣強度는 飽和 特性이 있어서 500kV 系統 以上에서는 일반적으로 雷過電壓에 對한 所要 絕緣強度보다 더 높은 強度를 要求하고 있다.

本稿는 우리나라 765kV 送電線路 Model을 假定한 후 過渡電壓分析器(TNA)를 利用하여, 開閉 過電壓의 크기와 그 分布를 確率 統計學的으로 研究한 結果와 이의 絕緣設計時 經濟的인 方法을 紹介한 것이다.

## 1. 緒 論

韓電은 1976年 麗水—大田間 送電線路를 345kV로 運轉한 以來 繼續 系統이 擴張되어 1991年末 現在 345kV 送電線路 回線 亘長 5,000 C—Km, 345kV 變壓器容量이 約25,000 MVA가 되었다.

韓電에서는 앞으로 우리나라의 長期 電力需要豫測, 電源 開發계획, 機器 國產化 開發 및 系統의 信賴度等を 考慮하여 次期 系統昇壓 電壓을 1991年에 765kV로 定하였다.

한편 韓電에서는 1979年~1980年에 걸쳐서 765kV 送電의 全般的인 技術에 對한 海外研修를 美國 Westinghouse에서 實施하였고 1980年代 初부터 우리나라 與件에 맞는 765kV 送電線路의 實證研究를 始作하였다.

제1段階 研究로 電氣研究所 구내에 單相模擬試驗 設備인 Corona Cage[6m×6m×20m]를 建設하고 試

驗 變壓器로 電壓을 印加하며 注水時 實線路和 같이 電線表面 電界를 模擬, 試驗하여 最適候補 導體로 483mm<sup>2</sup> 6導體를 擇하였으며, 現在는 제2段階로 765kV 2回線 實規模試驗線路를 全北 高敞에 建設中에 있다.

1993年부터 765kV 電壓을 印加, 各種 環境 影響에 對한 研究를 遂行하여 이 導體에 對한 評價를 할 計劃이다. 이와 併行하여 系統 絕緣設計에 對한 研究를 進行하고 있으며, 이 중 重要한 事項中의 하나가 開閉 過電壓의 크기에 對한 研究이다.

開閉 過電壓의 倍數에 對한 研究는 Analog形인 過渡電壓分析器(TNA)를 利用하거나 Digital形인 電磁氣 過渡現象 프로그램(EMTP)를 利用하는데, 前者가 一般的으로 많이 쓰이며 後者는 補助的으로 利用되고 있다.

## 2. 開閉 過電壓과 系統 絕緣設計

1960年代 初 美國에서 550kV 送電線의 出現 以前에는 系統에서 發生하는 開閉 Surge에 對하여는 別로 知識이 없어서 設計絕緣強度는 雷衝擊電壓과 商用 周波電壓 強度에 依하여서만 正義되었다.

開閉 衝擊電壓(Switching Impulse)에 對한 絕緣強度의 基本的인 研究는 USSR의 Stakolinikov와 Alexandrov 研究家들에 依하여 이루어졌다. 이들은 空氣絕緣의 開閉過電壓 Impulse에 對한 強度는 雷 Impulse에 對한 強度보다 弱하다는 論文을 發表함으

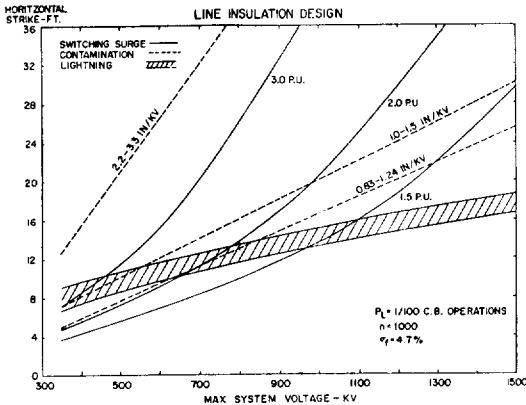


그림 1. 시스템 전압에 따라 概略의인 支持物의 絶緣距離

로서 그 當時 이 分野 技術者들을 놀라게 하였다. 이러한 發見이 있는 後, 550kV 支持物과 變電所에 對한 設計資料를 얻기 爲하며 美國에서 開閉 Impulse에 對한 試驗과 研究가 이루어졌다.

그 後 1960年代에 765kV 送電線이 蘇聯, 캐나다, 美國에서 運轉되기 始作되었고 1986년에는 蘇聯에서 1,150kV 送電線이 運轉되었으며 日本에서는 1988年 부터 1,000kV 送電線路를 建設하기 始作하였다.

그림1은 시스템 전압에 따라 所要(空氣)絶緣距離를 나타내는 것이다. 여기에서 보면 765kV 系統에서 開閉 Impulse를 2.0 P.U. 以下로 抑制하더라도 雷 Impulse보다도 더 큰 絶緣距離를 要求하고 있다.

765kV 系統에 對한 耐雷設計는 架空地線의 位置를 完全遮蔽로 設計하고 接地抵抗을 大幅 줄일 수 있으므로 雷 事故率을 設計 基準置 以下로 줄일 수 있으나, 2回線 同時事故에 對한 雷波形分析等 設計 對策이 必要하다.

### 3. 開閉 Impulse와 絶緣強度의 確率 統計 的 分布

開閉 Impulse에 對한 絶緣設計를 하기 爲하여는 우선 系統에서 發生하는 開閉 過電壓의 크기, 碍子連과 空氣 絶緣強度를 알아야 한다.

#### 3.1 開閉 過電壓의 確率 分布

開閉 過電壓의 크기는 系統에서 차단기를 高速으

로 再投入時 높은 倍數의 크기로 나타나고 任意의 크기로 發生한다. 보통 Analog Simulator를 利用하여 調査하고 이를 確率 統計의인 數式을 利用 近似 化시켜보면 그림2와 같이 보통 正規 分布로 近似 化시킬 수 있다.

여기에서  $\mu_0$ 는 過電壓의 平均值,  $\sigma$ 는 標準偏差, S는 過電壓의 크기, f(s)는 過電壓의 分布函數密度, F(s)는 過電壓의 累計分布函數, E<sub>2</sub>는 統計的인 開閉 過電壓(Statistical Switching Over Voltage)이라하며 이 값을 넘는 開閉 過電壓의 分布의 累計가 2% 임을 意味하다.

NORMAL (GAUSSIAN)

$$f(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{s-\mu_0}{\sigma_0}\right]^2}$$

$$F(s) = \int_{-\infty}^s \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} e^{-\frac{1}{2}\left[\frac{s-\mu_0}{\sigma_0}\right]^2} ds$$

그림3은 碍子連 또는 空氣의 絶緣強度를 開閉 過電壓의 크기에 따라 閃絡이 일어난는 確率을 나타내는 曲線이다. 이 曲線은 765kV 級에서는 屋外衝擊 電壓 發生裝置를 利用, 被試體에 Impulse를 印加하여 얻어진다.

그림3을 자세히 보면 S자를 아래위에서 잡아당긴 모양으로 되어 있어서 S形이라고 부르며, 正規 累計

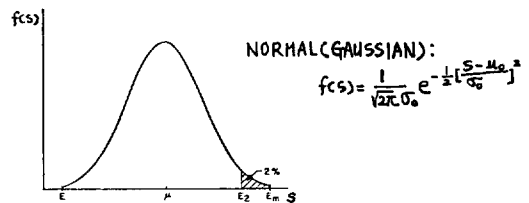


그림 2. 開閉過電壓 發生 確率 分布 曲線

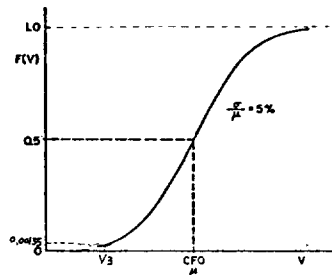


그림 3. 絶緣強度 曲線

分布函數로 나타낼 수 있다.  $\mu$ 는 臨界閃絡 電壓 (CFO)이 되며,  $V_3$ 는 開閉 Impulse에 對한 線路의 統計的 絕緣強度 (Statistical Switching Impulse Strength for line Insulation)라 하며 閃絡이 일어나는 確率은 (CFO- $3\sigma$ )에 해당되며 0.135%이다. 여기서  $\sigma$ 는 正規分布에서 標準偏差이며  $\sigma$ /CFO는 보통 5%로 본다.

아직까지 우리나라에서는 765kV에 對한 碍子連과 空氣絕緣 強度에 對한 試驗 Data는 없으므로 屋外 衝擊電壓 發生裝置를 導入하여, 여기에 對한 試驗이 요청되고 있다. 各나라에서 試驗한 Data는 氣候, 地理的 與件이 다르므로 조금씩 차이가 있다.

#### 4. 765kV 系統의 開閉過電壓 分析

앞으로 우리나라 765kV 系統 Model을 假定 1980年 및 1988년에 美國 Westinghouse의 過渡電壓分析器 (TNA)를 利用 여러경우 系統 條件을 考慮 開閉過電壓의 크기를 調査하고 이를 確率 統計的으로 分析하였다.

##### 4.1 系統 Model

그림 4와 같이 765kV Model를 假定하였으며, 이 중에서 가장 긴 線路는  $\alpha$ - $\beta$  變電所間이며 그 長은 310km로 定하였다. 우리나라에서 가장 긴 線路로 볼 수 있다.

그림 5는  $\alpha$   $\beta$  變電所間을 TNA로 Model하기 위하여 차단기, 변압기, 리액터와 전원배치를 개략적으로 나타낸 것이다.

A, B 電源에서 各各 345kV 2回線 線路로  $\alpha$  變電所까지 送電하고 이를 다시 765kV로 昇壓  $\beta$  變電所로 送電하는 것이다.

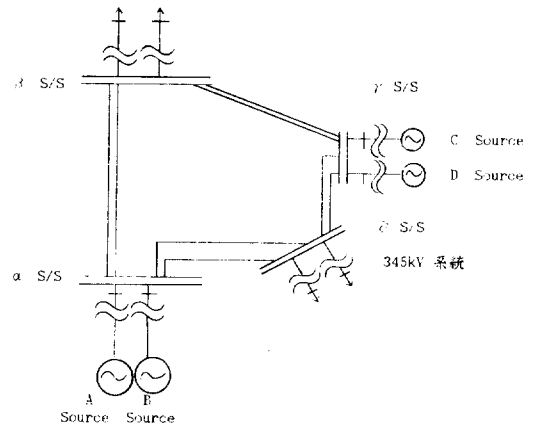


그림 4. 765kV 系統 Model

##### 4.2 過渡 電壓分析器(Transient Network Analyzer)

過渡電壓分析器는 3相 100V 電源을 사용하였으며 이의 素子는 電源, 變壓器, 分路리액터, 線路, 避雷器, 遮斷器 등이며 重要 素子인 線路, 遮斷器의 素子는 다음과 같다.

###### 4.2.1 線路表記[5]

線路表記는 非撚架로 假定하여 自己임피던스 및 相互임피던스, 導體相互間의 캐패시턴스 및 導體와 大地間 캐패시턴스를 계산하였으며 그림은 1個의  $\pi$  구간을 表現한 것이다.

###### 4.2.2 遮斷器表記

遮斷器表記는 그림 7, 8과 같으며 TNA에서 심장 부라 할 수 있다. 이 素子는 開閉찌지를 일으킬 때 실제 遮斷器 特性을 正確히 模擬하여야 되기 때문이

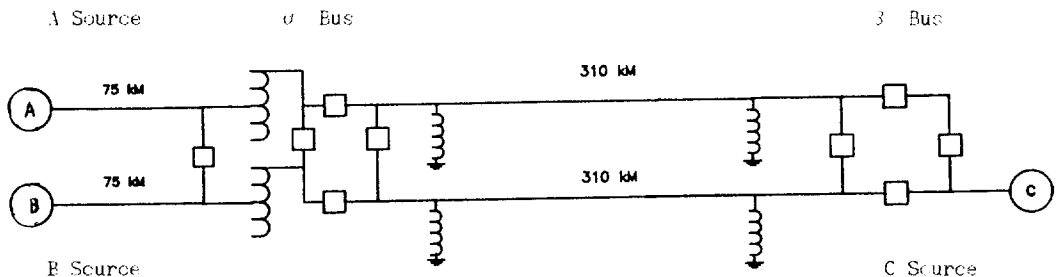


그림 5.  $\alpha$ - $\beta$  變電所間 線路 Model

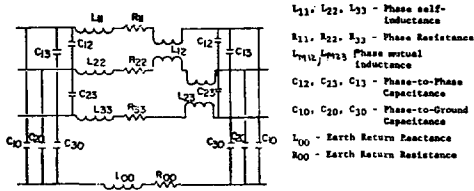


그림 6. 非燃架  $\pi$  區間 모델

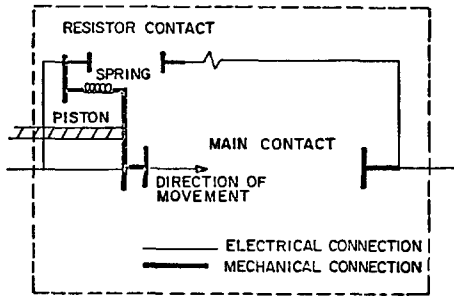


그림 7. 投入抵抗을 가진 遮斷器 모델

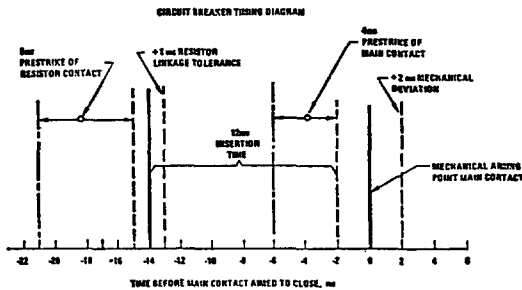


그림 8. 遮斷器 動作時間 Diagram

다. 이 遮斷器는 TNA 供給電壓과 同期해서 스위치를 電子的으로 制御하도록 되어 있으며, 또한 각 相의 개방 및 폐로시간을 조절할 수 있도록 相別로 調整이 可能하도록 되어있다.

抵抗接點은 그림 8과 같이 主接點이 機械的으로 閉路되기前에 閉路되어 機械的 結合이 되도록 되어 있다. 이 結合은  $\pm 1ms$  誤差를 가진다. 投入抵抗값은 調整이 可能하도록 되어 있다.

### 4.3 分析結果

그림 5와 같이  $\alpha$  變電所에서 차단기를 閉路하고,  $\beta$  變電所에서 閉路 過電壓을 測定하였다. 19경우 系

統條件을 模擬하였으며 보통의 경우는 차단기를 100 回 動作시키고 重要한 경우는 200回의 動作을 하도록 하였으며, 이를 統計的으로 그려보면 거의 正規 分布로 近似化할 수 있다. 그중 重要한 사항을 要約 하면 다음과 같다.

(1) 차단기 투입(Energization)과 재투입(Reenergization, Reclosing)

차단기 高速 再閉路時는 線路에 充電된 電荷가 放電될 時間的 餘裕가 없고 線路에 간혀지므로 이때 閉路過電壓이 投入時보다 높게 나타난다.

(2) 分路리액터의 線路 補償에 依한 過電壓

線路의 充電容量을 全然 補償하지 않을 때는 最大 過電壓이 2.6 P.U까지 나타나나, 70% 補償時는 1.7 P.U까지 抑制할 수 있다.

(3) 2回線과 1回線 運轉時

1回線으로 運轉時 閉路過電壓이 더 크게 나타난다.

(4) 電源에 依한 影響

$\alpha$  變電所에서 兩電源이 運轉될 때보다 1個 電源만 運轉될 때가 閉路過電壓이 더 크게 나타난다. 이는 系統이 擴張되면 過電壓이 적어짐을 意味한다.

(5) 차단기 投入抵抗의 크기에 依한 影響

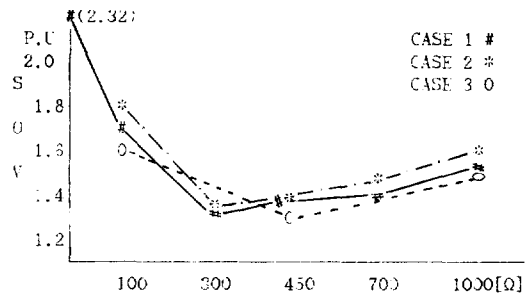


그림 9. 遮斷器 投入抵抗 크기에 依한 過電壓 分布

○ Case 1: Energizing, C—B Resistor preinsertion time 12ms (A Type Tower)

○ Case 2: Reclosig, C—B Res. Pes. Pre. In. time 12ms Reclosing time 40Cycle (A Type Tower)

○ Case 3: Energizing, C—B Resistor preinsertion time 12ms (B Type Tower)

\* A Type Tower: 垂直配列 2回線 支持物

\* B Type Tower: 水平配列 1回線 支持物

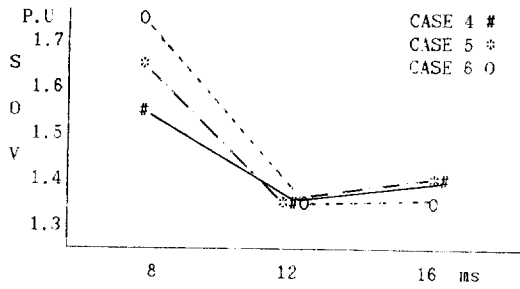


그림 10. 遮斷器 投入抵抗의 投入時間에 依한 過電壓 分布

- Case 4 : Energizing, S.R 340MVx2 (A Type Tower)
- Case 5 : Reclosing, S.R 340MVx2 (A Type Tower)
- Case 6 : Reclosing, S.R 340MVx2 (B Type Tower)

차단기 투입저항의 크기에 따라 開閉過電壓의 크기가 다르게 된다. 따라서 投入抵抗을 變化시켜 過電壓을 分析해 본 결과 그림 9와 같이 차단기 投入抵抗값이 300Ω~450Ω일 때 過電壓 크기가 가장 적게 나타났다.

(6) 차단기 投入抵抗의 投入時間에 依한 影響

차단기 投入抵抗의 投入時間을 變化시켜 過電壓 分布를 分析해본 결과 그림 10과 같이 차단기 投入時間이 12ms경우가 過電壓이 가장 적게 나타났다.

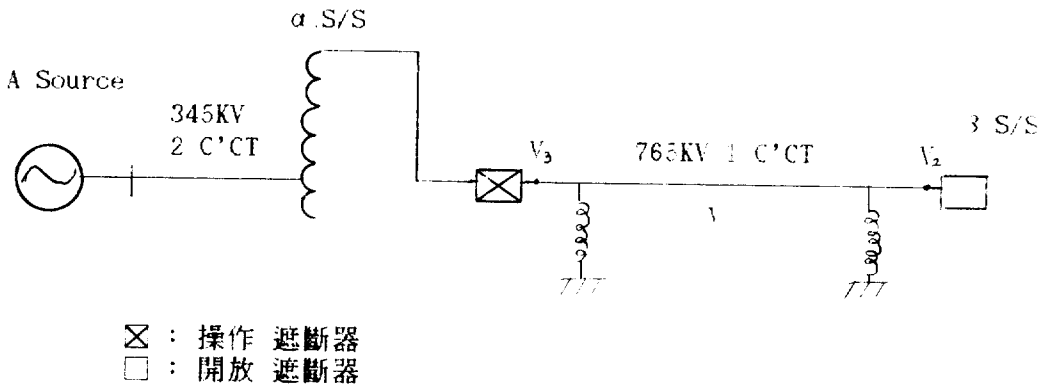


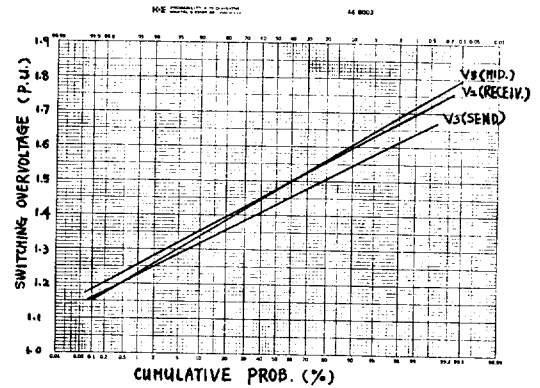
그림 11. 765kV 系統 開閉過電壓 解析 系統條件

(7) 위의 (1)~(6)의 事項을 考慮, 系統 設計에 利用될 수 있는 開閉過電壓을 求하기 爲하여 다음과 같이 系統條件을 假定하였다.

單獨電源, 765kV 1回線 運轉(線路길이 310km), 70% 補償 分路리액터 設置, 차단기 投入抵抗 450Ω, 遮斷期 投入時間 12ms로 假定하였으며, 이 때 系統 單線圖는 그림 11과 같다.

이 때 送電端의 開閉過電壓의 크기( $V_3$ )는 平均値가 1.44 P.U, 標準偏差가 0.085이며 최대과전압의 크기는 1.63 P.U이다.

線路中間에서 開閉過電壓의 크기( $V_3$ )는 平均値가 1.46 P.U 표준편차가 0.1, 최대치가 1.70 P.U로 나타났다. 受電端 開閉過電壓의 크기( $V_2$ )는 平均値가



(RECLOSING 30%, 310 Km LINE, PARALLEL OUT, 70% COMPENSATION)

그림 12. 開閉 系統過電壓 累計分布

1.46 P.U 표준편차가 0.096, 최대치가 1.69 P.U로 나타났다. 이 때遮斷器의 앵글을 조정하여 最大 過電壓을 調査하여 본 결과 그림 13과 같이 最大置가 1.90 P.U까지 나타났다.  $V_3$ ,  $V_5$ ,  $V_2$ 의 累計分布를 그려보면 그림 12와 같이 正規分布로 나타난다.

送電端의 過電壓이 受電端과 같이 거의 같게 나타나는 것은 勵磁變壓器의 突入電流가 主要原因이 되는 것이다. 變壓器의 勵磁飽和特性을 考慮하여 模擬하면 過電壓의 크기가 더 크게 된다[2]. 相間開閉 過電壓의 크기는 平均値가 2.60 P.U 標準偏差 0.148, 最大置가 2.90 P.U로 나타났다.

### 5. 開閉 過電壓에 對한 絕緣設計

開閉 過電壓에 對한 絕緣設計는 在來式인 決定論的方法(Deterministic Method)과 좀더 經濟的인 設計를 하는 確率論的方法(Probabilistic Method)이 있다.

#### 5.1 決定論的方法

系統에 나타나는 最大 開閉過電壓(그림 2에서

$E_m$ )의 크기와 그림 3의 絕緣強度에서  $V_3$ 를 같도록 絕緣強度를 定하는 方法을 決定論的方法이라 한다. 이를 數式으로 나타내면 다음과 같다.

$$V_3 = E_m \dots\dots\dots(1)$$

$$CFO - 3\sigma = E_m$$

$$CFO = \frac{E_m}{1 - \sigma/CFO} \approx 0.85E_m \dots\dots\dots(2)$$

여기에서 閃絡電壓値는 開閉過電壓 크기를 알면 設計할 수 있다. 이 方法으로 設計하면 過大하게 設計될 우려가 있다. 765kV 試驗線路의 空氣 絕緣距離와 碍子個數는 이 方法에 의하여 設計하여 본 結果에 의하여 空氣絕緣距離는 5250mm, 縣垂 碍子連個垂는 300KN 碍子(320mm×195mm) 33個로 設計되었다.

絕緣強度 曲線은 日本中央電力研究所의 試驗 Data를 利用하였으며, 이 資料는 1,000kV 送電線을 基準으로 試驗한 資料[4]이기 때문에 우리나라에서는 추후 別도의 試驗 Data가 있어야 되리라고 본다.

#### 5.2 確率論的方法 [3]

系統에서 開閉過電壓의 曲線과 試驗에서 絕緣強度

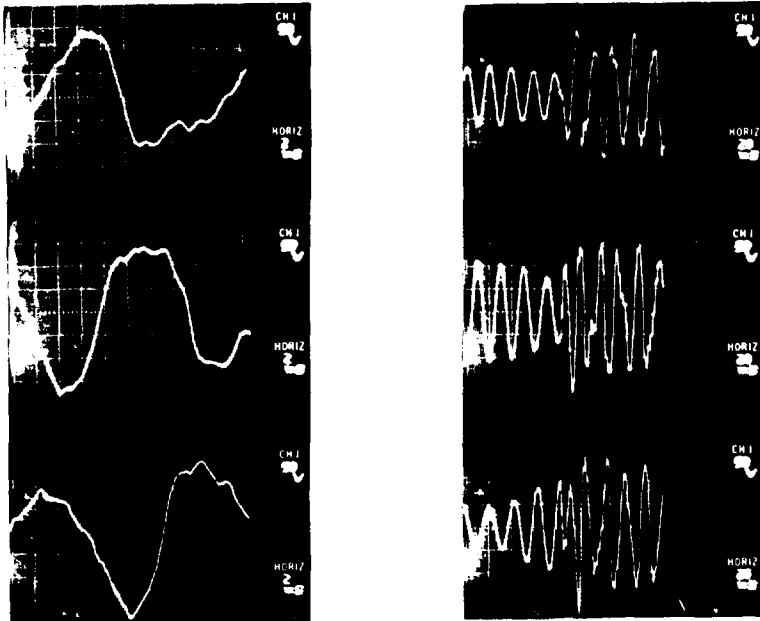


그림 13. TNA Oscillogram

曲線이 구해지면 그림 14와 같이 Stress-Strength Analysis에 의해서 故障確率(보통 차단기 100회 當 1회 또는 1000회 當 1회)에 의하여 絶緣強度를 定하는 方法이다. 그림 14와 같이 Strength가 Stress보다 적을때 故障이 일어나며 그 確率は (3)식과 같다.

$$P(S < S_1) = \int_{-\infty}^{s_1} f(s) ds \quad \dots\dots\dots (3)$$

Stress가 어느 특정한 값  $S_1$ 에서 故障確率は 다음과 같다.

$$dp = [f(s_1) ds] \times \int_{-\infty}^{s_1} f(s) ds \quad \dots\dots\dots (4)$$

그림 14에서 두 曲線이 만나는 부분을 확대하면 그림 15와 같이된다.

어느 系統에서 총 事故發生 確率は 다음과 같다.

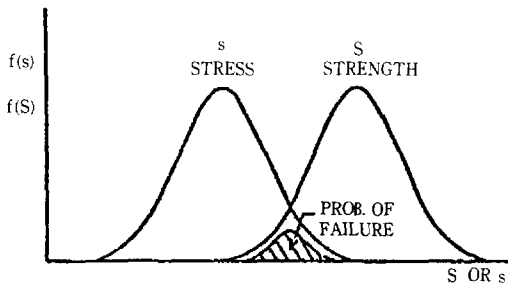


그림 14. Stress - Strength Curve

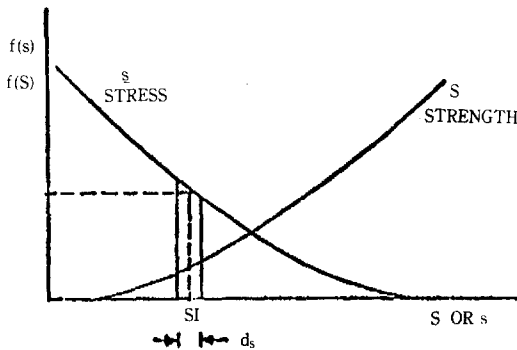


그림 15. 그림14의 Stress - Strength Curve의 交叉部分

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} f(s) \left[ \int_{-\infty}^s f(s) ds \right] ds \quad \dots\dots\dots (5)$$

4.3에서 求한 過電壓分布와 차단 100회 當 1회의 事故率을 算定, 確率論的 方法으로 支持物의 空氣 絶緣距離를 求하여 보면 海拔 1km 以下에서 4.3m 가 되므로 決定論的 方法으로 求한 것 보다 約 1m 가 적게 된다. 空氣 絶緣距離를 1m로 줄일 수 있을 경우 支持物의 크기는 大幅줄일 수 있다. 앞으로 이 부분은 더 研究하면 經濟的인 設計를 할 수 있다.

## 6. 結 論

本 研究는 韓電 765kV 系統의 開閉過電壓에 對한 豫備研究와 이의 設計方法과 그 例에 對하여 記述하였다. 765kV 系統에서는 線路充電容量을 補償하고 (70% 程度), 차단기에 投入抵抗을 삽입하면 開閉過電壓을 1.7 P.U~1.9 P.U 程度로 抑制할 수 있을 을 알 수 있다.

앞으로 系統計劃이 確定되어 實線路建設에 앞서 더 研究되어야 할 事項은 다음과 같다.

- (1) 正確한 系統을 TNA 또는 EMTP로 模擬하여 開閉過電壓分析研究
- (2) 汚損設計의 資料를 얻기 爲하여 一線地絡時 健全相 過電壓 分析[1]
- (3) 屋外 衝擊電壓 發生 裝置를 利用 支持物의 空氣 絶緣強度에 對한 試驗
- (4) 系統에 最適인 차단기 投入抵抗 크기 決定 等이다.

## 참 고 문 헌

- [1] UHV 送電特別委員會中間報告書 PP 86~95, 日本 電力中央研究所 UHV 送電特別委員會 1982年 5月
- [2] Arthur Hauspurg, Gregory S Vassell, "Overvoltages on the AEP 765kV system" IEEE Winter power meeting paper, pp 1329~1324, January 1969.
- [3] A · R · Hileman "Insulation coordination, Switching Surge Flashover Rate" pp. 2~7, September 1979.
- [4] UHV 交流送電 實證試驗委員會 報告書, 日本 電力中央研究所 1985年 3月
- [5] Switching Surge Studies using the ANACOM, M.D Perkins, W.H.



**김정부(金正夫)**

1943년 11월14일생

1971년 서울대 공대 전기공학과 졸업

1990년 동 대학원 졸업(공학)

1971년 한국전력 입사

1980년 미국 Westinghouse사에서 800kV 送電技術研修. 1992년 현재 한국전력공사 기술연구원 개통연구실 責任연구원



**이동일(李東一)**

1958년 3월15일생

1983년 인하대학원 전기공학과 졸업

1988년 미국 Westinghouse사에서

800kV 送變電絶縁設計 研修

1992년 현재 한국전력공사 기술연구원 계통연구실 선임연구원