

技 術 展 望

800KV級 超高壓 格上 技術

—電壓選定 및 系統構成, 絕緣레벨選定, 送電線導體選定—

李 吉 淳* · 李 仁 圭**

※ 資 料 ※

3. 800KV級 設備의 絕緣協調

4. 800KV級 送電線 導體選定

<第31卷 第1號 p. 29에서 계속>

3. 800KV級設備의 絕緣協調

絕緣協調調節次를 보면 먼저 絕緣에 附加되는 過電壓의 計算부터 始作된다. 過電壓에는 商用周波, 開閉써지, 및 雷擊써지의 3種類로 分類되며 開閉써지過電壓은 系統電壓이 300KV以上이 되면 그 重要性이 대두되며 그 以下の 電壓에서는 雷擊써지 過電壓이 重要한 役割을 하게 된다.

이는 開閉써지 過電壓은 系統電壓이 增加함에 따라 增大되나, 雷擊써지 過電壓은 實際로 一定하게 나타나기 때문이다. 이와같은 過電壓이 決定되면 所要絕緣耐壓(Required Insulation Withstand Voltage)는 在來式方法(Conventional Method)과 統計的方法(Statistical Method)에 의하여 決定될 수 있는데, 在來式方法은 經驗을 기준한 一定한 裕度(Margin)을 適用하는 보다 簡單한 方法으로서 開閉써지 過電壓의 最大值와 絕緣耐壓值間에 普通 10~20%程度의 裕度を 適用하며 15%가 보편적으로 適用되고 있고 雷擊써지 過電壓에 대하여는 20~40% 程度의 裕度を 適用하며 25%가 보편적으로 適用되고 있다. 在來式方法은 系統電壓이 300KV以下인 系統, 즉 絕緣耐력을 維持시키기한 費用이 比較的 적게 드는 系統에서 適用되고 있다. 系統電壓이 이보다 높아지게 되면 絕緣耐力(Insulation Requirement)가 높게 되어 絕緣費가 增加하므로 相當한 正確性(Accuracy)을 갖는 絕緣設計가 要請되고 있어 새로운 絕緣協

調方式인 統計的方法(Statistical Method)이 導入되었으며 IEC에서도 이 方法을 추천하고 있고(IEC 71-1, 2, 1976참조). 그리고 이와같은 統計的 絕緣協調方法은 外部絕緣(Airinsulation)에만 適用될 수 있으나 內部絕緣(變壓器卷線絕緣)에는 統計值를 구하기 어려워서 適用시킬 수 없다. 統計的方法은 統計的으로 絕緣破壞確率(Risk-of-Insulation Failure)을 구하는 것으로서 絕緣破壞率을 낮추기 위하여는 過電壓을 抑制시키던가 絕緣레벨을 올리어야 한다. 過電壓分布와 絕緣耐력을 統計的으로 規定하기 위하여는 相當히 많은 回數의 計算, 測定, 및 試驗이 必要하며 IEC規定에 따라 過電壓分布와 絕緣破壞分布은 定規分布曲線(Normal Distribution Curve)를 適用했다. SSPB는 開閉써지 過電壓을 求하기 위하여 TNA(Transient Network Analyzer)와 BPA의 EMTP Computer Program을 利用하였으며 計算結果에 의하면 開閉써지 過電壓平均値는 1.4 Pu, 標準偏差는 0.1 Pu로 나타났다. 단 遮斷器에는 投入抵抵 400Ω을 取附하고, 70%의 shunt compensation을 考慮하였다. 이와같은 資料에 基準하여 開閉써지 過電壓分布曲線 $\phi(u)$ 은 定規分布로 보고 $\phi(u) =$

$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(u-\bar{u})^2}{2\sigma^2}} / 2 \left(\begin{matrix} \bar{u} : \text{平均値} \\ (1.4\text{Pu}) \end{matrix} \right) \left(\begin{matrix} \sigma : \text{標準偏差} \\ (0.1\text{Pu}) \end{matrix} \right)$ 로 表示됨으로 曲線은 아래와 같다(그림 12 參照). 이때의 最大值(U_{max})는 2% 超過確率을 갖는 크기의 過電壓을 갖으므로 $\int_0^{U_{max}} \phi(u) du = 1 - 2\%$ 에서 U_{max} 는 1.6 Pu이다.

過電壓에 대한 變電機器의 絕緣放電確率(Insulation Discharge Probability)은 Gauss分布로 表示되어 $\phi(u) =$

* 正會員 : 韓國電力公社 電源計劃部
 ** 正會員 : 韓國電力公社 電源計劃部

$\int_0^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{u-50\%}{\sigma}\right)^2/2} \cdot du$ (U50% : 50% discharge voltage, σ : 標準偏差)로 나타낼 수 있으므로 U50%를 2.5Pu로 보고, 標準偏差는 實驗室測定結果에 의하면 6%程度, 現場測定結果에 의하면 8%程度임을考慮하여 標準偏差는 8%(2.5Pu \times 0.08=0.2Pu)로 하였다.

$$\text{따라서 } \phi(u) = \int_0^{\infty} \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{u-2.5}{0.2}\right)^2/2} \cdot du = \int \frac{1}{\sqrt{2\pi}}$$

$e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ (단 $t = \frac{u-2.5}{0.2}$)로表示되며 아래 그림과 같 (그림 13 參照)

다음으로 開閉써지 過電壓에 의한 絶緣破壞率(Risk of Failure)을 아래와 같이 計算된다.

$$R = \int \phi(u') \phi(u) du' du \quad \left(\begin{array}{l} \phi(u) : \text{開閉써지 過電壓發生率} \\ \phi(u') : \text{變電所機器故障確率} \end{array} \right)$$

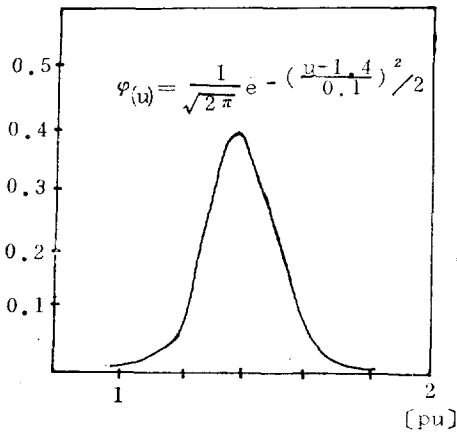


그림 12. 開閉써지 過電壓分布

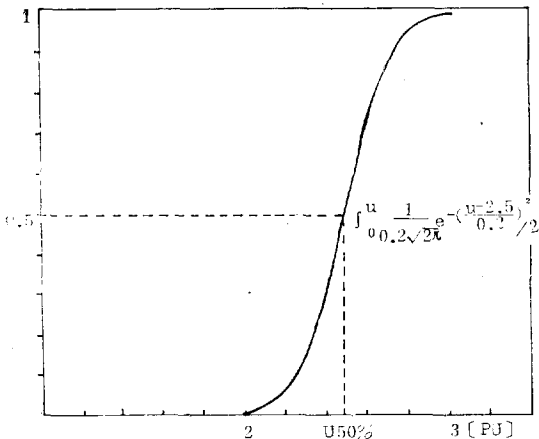


그림 13. 變電機器絶緣放電確率

$$= \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{u-1.4}{0.1}\right)^2/2} \int_0^{u'} \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{u'-2.5}{0.2}\right)^2/2} du' du$$

로表示되며 그림의 斜線部分에 該當된다(그림 14 參照)

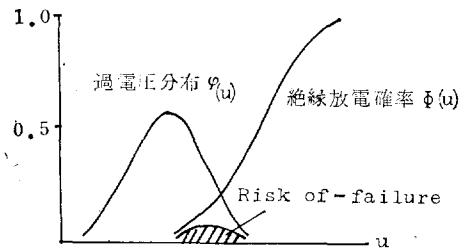


그림 14. Risk-of-failure

斜線部分의 面積을 구하기 위하여는 먼저 等價正規 分布曲線(Equivalent Normal Distribution (curve) $\phi'(u)$)를 아래와 같이 구했다(그림 15 參照)

$$U \text{ (equivalent)} = |U \text{ switching overvoltage} - U \text{ insulation 50\% discharge}| = |1.4Pu - 2.5Pu| = 1.1Pu$$

$$\sigma \text{ (equivalent)} = \sqrt{\sigma^2 \text{ switching overvoltage} + \sigma^2 \text{ insulation discharge}} = \sqrt{0.1^2 + 0.2^2} = 0.22$$

$$\therefore \phi' = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{u-u_0}{\sigma}\right)^2/2} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{u-1.1}{0.22}\right)^2/2} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} \quad \left(t = \frac{u-1.1}{0.22} \right)$$

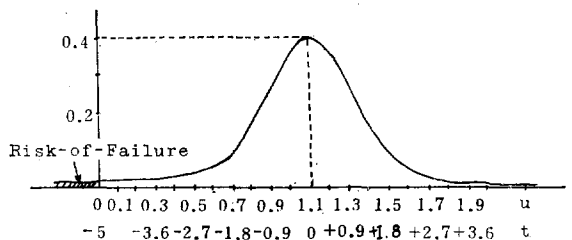


그림 15. Risk-of-failure equivalent distribution

Risk-of-Failure는 上記 曲線의 斜線部分 面積에 該當되므로 $\int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{u-1.1}{0.22}\right)^2/2} du = \int_{-\infty}^{-5} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt = 3 \times 10^{-7}$ 이다. 變電所機器이 N個이면 變電所全體에 대한 絶緣破壞率은 $R(\text{total}) = 1 - [1 - R]^N$ 로表示된다. 따라서 SSPB의 800KV 變電所機器群을 170個로 보고 800KV 變電所全體의 絶緣破壞率(Risk-of-failure)을 아래와 같이 구했다.

50% discharge voltage	2.1pu	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6
Risk-of-failure	2×10^{-2}	2.5×10^{-3}	1×10^{-3}	2×10^{-4}	5×10^{-5}	1×10^{-6}

다음으로는 Risk-of-Failure의 適正值를 選定하는 段階로서 SSPB는 800KV變電所에서 800KV T/L 3回線이 引出되며 亘長은 平均 150km로 보았고, 送電線路의 事故率은 0.04回/100km年, 開閉過電壓에 의한 變電所 絕緣破壞發生은 1回/1000年(0.001年) 보았으므로 Risk-of-failure= $(0.001) / (\frac{1}{2} \times T/L/150km \times 3回線 \times 0.04/100km年) = 1.1 \times 10^{-2}$ 이다. 따라서 Risk-of-Failure를 1.1×10^{-2} 로 하기 위하여는 機器絕緣의 50% Discharge Voltage가 2.15Pu(1404KV)가 된다. 또한 開閉써지 過電壓에 대한(Switching Impulse Withstand level, SIWL)은 IEC Pub 71에 의거 10% discharge value, 즉 90% withstand value로 規定되었으므로 SIWL= $U(50\% discharge) (1-1.3 \times \sigma (standard deviation)) = 2.15Pu (1-1.3 \times 8\%) = 2Pu(1306KV)$ 이다. IEC의 標準 SIWL은 最大運轉電壓에 765KV에서 1,300KV, 1,425KV, 1,550KV의 3個等級이 있으므로 SSPB의 SIWL은 1,425KV에 該當되나, SSPB는 最大運轉電壓을 800KV로 보고 1段階上位인 1,550KV를 選定하였다. 雷擊過電壓에 대한(Lightning Impulse Withstand Level, LIWL)의 選定에는 雷擊過電壓의 計算이 困難하여 統計的方法을 適用할 수 없으나 EHV나 UHV系統의 SIWL/LIWL의 比가 普通 0.8程度를 나타내고 있으므로 LIWL=SIWL/0.8= $1,550KV/0.8 = 1,939KV$ 가 되어 이에 該當되는 IEC standard level은 1,950KV이다. 따라서 避雷器에 의하여 保護를 받는 變壓器나 shunt reactor의 LIWL은 1,950KV로 하고, 保護를 받지 아니하는 遮斷器, 斷路器類의 LIWL은 1段階上位의 2,100KV로 選定하였다.

애자런 걸연레벨 (50% discharge voltage)	2.2pu	2.3pu	2.4	2.5	2.6
Risk-of-failure	2×10^{-1}	1×10^{-1}	4.5×10^{-2}	2×10^{-2}	5×10^{-3}

示했다.

送電線碼子連絕緣破壞率(Risk-of-failure)은 變電所絕緣協調檢討에 對하여 適用한 方法을 利用 구했으며 結果는 위와 같다.

Risk-of-Failure의 適定值는 T/L亘長 150km, 事故率 0.04回/100km年, 그리고 變電所母線事故率 1回/1000年, 開閉써지過電壓에 의한 送電線絕緣破壞許用值는 1/1,000年(0.001年)로 보고 Risk-of-failure= $(1/1000年)/(T/L 150km \times 0.04/100km年 + 1/1000年) = 1.6 \times 10^{-2}$ 이

機 器	SIWL	LIWL
變 壓 器	1,550KV	1,950KV
Shunt Reactor	1,550KV	1,950KV
遮 斷 器	1,550KV	2,100KV
斷 路 器	1,550KV	2,100KV
CT	1,550KV	2,100KV
CPD	1,550KV	2,100KV

800KV變電所의 相間, 對地間 離隔距離는 $U50\% discharge = K \times 500 \times d^{0.8}$ (K : gap factor, 1.2)式에 의하여 구할 수 있으며 $U50\%$ 은 앞에서 구한대로 2.15Pu(1,404KV)를 適用하면 d 는 4.3m가 되어 따라서 對地間離隔距離는 5m로 하였다. 또한 相間離隔距離의 選定에 있어서는 相間開閉써지 過電壓은 CIGRE SC33에 의하면 $1.9 \times$ 對地間開閉써지 過電壓이며, 그리고 gap factor는 1.8로 보았다. 相間離隔距離(d)는 $1.9 \times 1,404KV = 1.8 \times 500 \times d^{0.8}$ 에서 6.5m로 나왔다. SSPB는 실제로는 裕度를 20% 程度로 考慮하여 對地 間離隔距離는 5m, 相間離隔距離는 7.5m로 選定하였다.

SSPB의 800KV 送電線絕緣設計는 아래와 같다. 開閉써지過電壓平均値는 1.5Pu, 標準偏差는 0.15Pu로 計算했으며 開閉써지過電壓分布曲線은 $\phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(u-1.5)^2}{2 \times 0.15^2}}$ 로 表示했고, 800KV T/L의 亘長은 300km 程度로 碼子連個數는 1000個로 보았다. 800KV碼子連의 開閉써지 過電壓에 대한 50% Discharge Voltage를 2.5Pu로 가정시, 標準偏差는 8%로 보고 碼子連放電 確率分布曲線은 $\phi(u) = \int \frac{1}{0.2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(u-2.5)^2}{2 \times 0.2^2}} / 2du$ 로 表

다. 따라서 碼子連의 50% discharge voltage는 2.25 [Pu]에 該當된다. 그러므로 碼子連所電所絕緣레벨(SIWL)= $U50\% (1-1.3\sigma) = 2.55Pu (1-1.3 \times 8\%) = 2.3Pu (1,502KV)$ 이다. 이와같은 絕緣耐力를 갖기 위하여 碼子連의 碼子個數는 다음과 같이 구해진다.

Air gap distance (d); $U50\% discharge = 1.2 \times 500 \times d^{0.8} \rightarrow d = 5.4m$

內陸地域; IEC U300使用 (190mm(H) \times 320mm(D))
 $(5.4m/190mm) \times (1 + safety\ margin\ 20\%) = 34$ 個

反面 定常運轉電壓基準時

內陸地域 : creepage distance 20mm/KV適用

U300(minimum creepage dist. 370m/m
實際品 425mm)

$$\therefore \frac{\text{最大運轉電壓 } 800\text{KV} \times 20\text{mm/KV}}{425\text{mm}} = 38\text{個}$$

海岸地域 : creep age distance 32mm/KV適用

U300 fog (minimum creepage dist. 670mm)

$$\therefore \frac{800\text{KV} \times 32\text{mm/KV}}{670\text{mm}} = 38\text{個}$$

以上の 檢討結果 開閉せ지過電壓絶緣耐力을 維持하기 위한 碍子個數보다 定常運轉電壓에 대한 creepage distance를 維持하기 위한 碍子個數가 10%程度 많은 것

으로 判明되어 定常運轉電壓과 開閉せ지過電壓에 同時에 전디기 위하여 보다 많은 數量를 擇했으며 內陸地域에 建設되는 800KV線路碍子個數는 38個(U300(normal)), 海岸地에 建設되는 경우는 U300(fog)×38個로 決定하였다. 그리고 碍子連은 V string으로 하였다.

4. 800KV級送電線導體選定

系統電壓이 높아짐에 따라 導體는 經濟的인 電流密度에 의하여 決定되는 것보다 RI(Radio Inteference, 電波障害)나 AN(Audible Noise, 騒音公害)에 의하여 決定되는 추세이다. 海外 800KV級 送電線의 經濟的인 電流密度는 1~0.9 A/mm²以下로 보고 있으며, 實際의

國名 電力會社	系統電壓 KV	基準送電電力 MW	導體				
			Number Type	Diam. mm	Area mm ²	Current density A/mm ²	Spacing cm
Canada HQ	735	1,700	4	35	685	0.5	45
Brazil CEB	765	2,100	Bluejay	32	564	0.7	45
USA AEP	765	2,250 (SIL)	Rail	29.5	483	0.9	45
USA AEP	765	2,250 (SIL)	Dipper	35	685	0.6	45
Sweden SSPB	750	4,000	Falcon	39.2	806	0.95	60

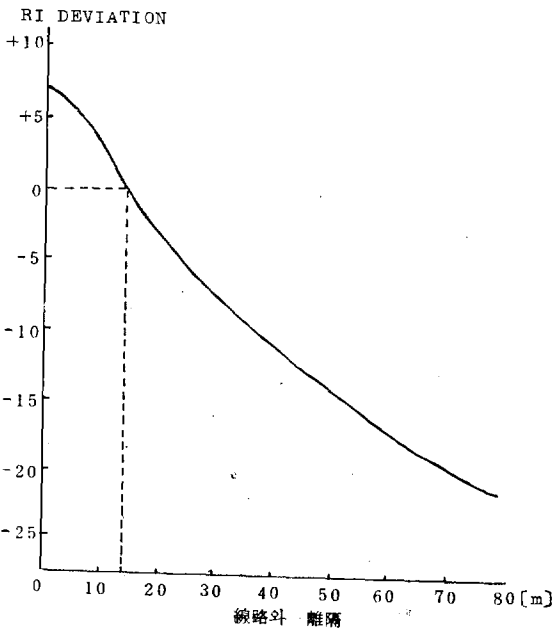


그림 16. RI減衰特性

電流密度는 0.5A/mm²로 낮추었는데 이는 RI나 AN을 抑制하기 위함이었다. 즉 美國 AEP 765KV 送電線의 크기는 初期에는 經濟電流密度 0.9A/mm²을 基準으로 하여 ACSR 483mm²을 選定하였으나 RI 및 AN가 問題가 되어 現在는 685mm²로 增大시켰다.

이와같은 送電線路의 RI나 AN은 코로나에 의하여 일어나며 코로나는 Current Pulse를 發生시킨다. 이 Pulse는 周波數 크기가 Random 特性을 갖고 있으며 MHz 범위내에 있다. 그리고 線路에서 멀리 傳播됨에 따라 減衰되며 Distort된다(그림 16, 17 參照). 따라서 이와같은 코로나 Pulse는 Radio Frequency Band (0.15~30MHz)內에 있게되어 Radio청취가 어렵게 되고 이와같은 現象을 電波障害(Radio Interference)라 한다.

RI를 數式的으로 解析하여 보면 먼저 코로나電流(J)는

$$J = \rho EV$$

ρ : 코로나에 의하여 發生된 電荷

E : 電荷가 位置한 場所의 電界強度 $\left(\frac{C}{2\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r}\right)$

따라서 $J = \rho \cdot \frac{C}{2\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} \cdot V$

그리고 電線의 경우는 다음식이 成立된다.

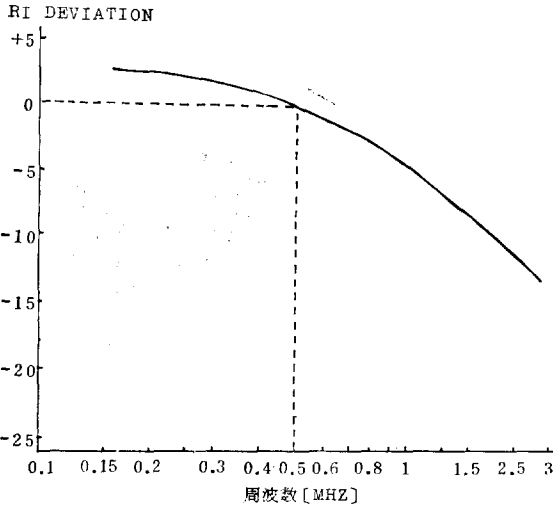
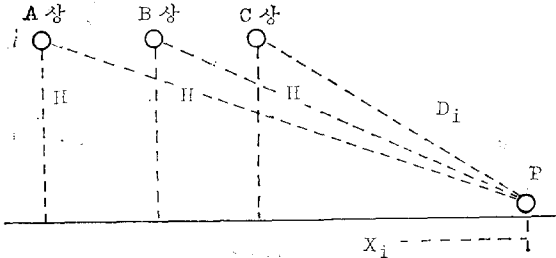


그림 17. RI周波數特性

$$\frac{d}{dx} [V] = -[Z][I]$$

$$\frac{d}{dx} [I] = -[Y][V] + J$$

送電線路에서 $x[m]$ 떨어진 地點의 RI를 구해보면



코로나電流 $[J]$ 에 의한 P點의 電界 $E_i = \frac{120H}{H^2 + X_i^2} J$ [V/m]로 Radio受信에 간섭을 일으키어 雜音이 나타난다. 스웨덴電力廳은 이와같은 雜音의 크기를 CIGRE RI分析方法(1974)에 의거, 아래와 같이 나타내었다.

$$NP_i(\text{Noise Power})[dB] = 3.5gm + 12r - 33\log_{10} D/20 - 30 \left[\text{정의 } NP_i = 10\log_{10} \frac{P_i}{P_0} \right]$$

gm : 導體表面電位傾度 [KV/cm]

r : 素導體半徑 [cm]

D : 導體와 離隔距離 [m]

Dry weather 0.5MHz

測定地點 = 外相에서 1.5m

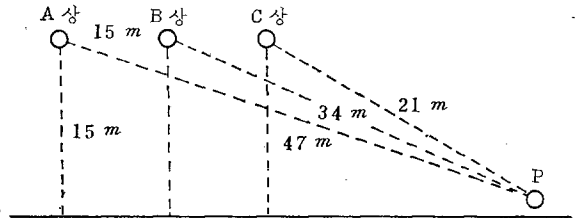
기준 frequency : 500KHz (ANSI 1000KHz)

SSPB의 800KV 계통의 RI計算結果는 아래와 같다

送電線導體 4×Al 910mm² 사용시 (r=1.74cm)

$$NP_i = 3.5gm + 12r - 33\log_{10} D_i/20 - 30$$

送電線路 : 地上高 15m
相間 15m
測定地點 外相에서 15m, 地上 2m



gm : 外相 16.29KV/cm

中央相 17.44KV/cm

$$NP_1 = 3.5 \times 16.29 + 12 \times 1.74 - 33 \log_{10} \frac{21}{20} - 30 = 48$$

$$NP_2 = 3.5 \times 17.44 + 12 \times 1.74 - 33 \log_{10} \frac{34}{20} - 30 = 46$$

$$NP_3 = 3.5 \times 16.29 + 12 \times 1.74 - 33 \log_{10} \frac{47}{20} - 30 = 36$$

$$\text{따라서 } RI = 10 \log_{10} (10^{48/10} + 10^{46/10} + 10^{36/10}) = 41dB$$

導體 4×Al 770mm² (기존 400KV T/L 사용도체)
사용시 (r=1.57) : RI=55dB

導 體	4×Al 910mm ²	4×Al 770mm ²
測定地點	外相에서 15	"
RI	Fair Weather시	55dB
	Foul Weather시	75dB

스웨덴의 400KV T/L 運轉經驗에 의하면 外相에서 15m 지점에서 RI가 Foul Weather 시 70dB를 초과하면 Radio聽取障害가 심한 것으로 나타나서 800KV送電線導體로서 Al 770mm²×4B는 곤란하며 Al 910mm²×4B는 장해상 별문제가 없는 것으로 나타났다.

다음으로 스웨덴電力廳은 코로나에 의한 騒音(Audible Noise, AN)을 다음과 같이 計算하였다.

$$AN[dB/P_0] = 42 + 85\log_{10} gm/15 + 45\log_{10} d/3.15 + 18\log_{10} n + 10\log_{10} \frac{20}{D}$$

gm : 導體表面電位傾度 [KV/cm]

d : 素導體直徑 [m]

n : 複導體數

D : 導體離隔距離

P₀ : Base sound pressure (0.0002μBar/1000MHz)

Weather : heavy rain

Al910mm²×4B 사용시 : 9m 16.29KV/cm, 17.44KV/cm, d : 3.48cm

$$AN_1 = 42 + 85\log_{10} 16.29/15 + 45\log_{10} 34.8/3.15 + 18\log_{10} 4 + 10\log_{10} 20/29 = 55.8$$

$$AN_2 = 42 + 85 \log_{10} 17.44/15 + 45 \log_{10} 3.48/3.15 + 18 \log_{10} 4 + 10 \log_{10} 20/43 = 57.8$$

$$AN_3 = 42 + 85 \log_{10} 16.29/15 + 45 \log_{10} 3.48/3.15 + 18 \log_{10} 4 + 10 \log_{10} 20/57 = 53.2$$

$$\therefore AN = 10 \log_{10} (10^{55.8/10} + 10^{57.8/10} + 10^{53.2/10}) = 60\text{dB}$$

導 體		Al 960mm ² ×4B	Al 770mm ² ×4B
AN	Foul Weather시	59dB	66dB
	Fair Weather시	39dB	46dB
測 定 地 點		外相에서 25m	外相에서 25m

送電線路에 의한 騒音(AN)은 60dB가 넘으면 장해 불평이 가중되고 있는 것이 나타나서 800KV T/L 주변에 대한 AN을 60dB이하로 하기 위하여는 Al 770mm²×4B로는 곤란하여 Al 910mm²×4B로 하고, 800KV T/L과 往居地帶는 25m 이상으로 離隔이 필요하게 된다. 이상의 RI 및 AN 分析比較結果 기준 400KV T/L에 사용되고 있는 導體 Al 770mm²를 사용하면 RI 및 AN면에서 적합치 못하고, Al 910mm² 사용하면 RI 및 AN면에서 별문제가 없는 것으로 판명되어 Al 910mm²×4複導體를 채택하였다. Al 910mm²×4B를 使用할때 電流密度는 0.95A/mm²(Loading : 4,000MW)로 經濟的인 送電線導體 size로도 볼 수 있었다.

参 考 文 獻

- [1] Electric power transmission in the USA looking ahead to the year 2000
- [2] American Gas and Electric Company 330KV system; Analysis of system economics, choice of voltage, basic elements of system design
- [3] Experience with AEP 765KV system
- [4] Development of AEP transmission network from 345KV to 765KV to UHV
- [5] Studies regarding future transmission voltages in

- Sweden
- [6] The Swedish 800KV system
- [7] Increasing fault levels in the Swedish network from 70 to 400KV and 800KV
- [8] EHV and UHV power transmission
- [9] Selection of voltage level for the Venezuelan new transmission system
- [10] Progres report on system studies of the venezuelan 800KV transmission system
- [11] Development of the Venezuelan transmission system up to the year 2000
- [12] Feasibility study of the Brazil Itaipu transmission
- [13] An account of long term transmission system development in Brazil
- [14] Switching overvoltages to be expected in the future Swedish 800KV network
- [15] Insulation of the Swedish 800KV system
- [16] Guide for application of insulation to withstand switching overvoltages
- [17] The statistal approach for the insulation of substation equipments
- [18] Insulation coordination for system voltages of 52KV to 800KV
- [19] Corona and field effects on high voltage transmission lines IEEE/PES special course
- [20] Interferences produced by corona effect of electric systems: description of phenomena and practical guide for calculation (CIGRE 1974)
- [21] Long term audible noise and radio noise performance of AEP 765KV lines
- [22] Comparison of radio noise prediction methods with CIGRE/IEEE survery results
- [23] The Swedish 800KV transmission lines
- [24] The Swedish 800KV GIS
- [25] Design of substation for the systems operating at 765KV and 1050KV