

— 차 례 —

- 1. 序 論
- 2. 運轉電壓 및 送電容量
- 3. 運農電壓 및 商用周波過電壓
 - 3.1 運轉電壓의 變動
 - 3.2 商用 周波數 過電壓
- 4. 送電線의 코로나 放電과 導體設計
- 4.1 코로나 雜音과 導體設計
- 5. 送電線의 絕緣設計
 - 5.1 耐開閉서어지
 - 5.2 耐雷設計
 - 5.3 耐汚損設計
- 6. 結 論

1. 序 論

日本에서는 送電電壓 500kV 이상의 電壓에 의한 送電을 超超高壓送電이라고 부르고 있다. 1952年 新北陸幹線이 超高壓 275kV로 運轉開始한 이래 1973年 超超高壓 500kV 房總幹線이 運轉開始하기까지의 約 20年間 超高壓 275kV 送電이 主幹線으로서 활약하였다.

500kV 送電을 실현하는데 있어서 解明해 두어야 할 技術的 問題에는 여러가지가 있겠지만 우선 送電電壓이 275kV의 2倍가까이 昇壓되므로 여기에 따른 送電線路 및 變電所의 外部絕緣 및 變壓器의 絕緣問題등이 큰 問題로 될 것이다.

여기서는

- 1. 運轉電壓과 送電容量에 대해서
- 2. 運轉電壓 및 商用周波過電壓에 대해서
- 3. 送電線의 코로나放電과 導體設計에 대해서
- 4. 送電線의 絕緣設計에 대해서

의 네가지 問題에 焦點을 맞추어 그 내용을 간단히 설명하여 보기로 한다.

2. 運轉電壓 및 送電容量

運轉電壓은 아래의 점을 검토해서 결정되었다.

(1) 日本의 送電電壓은 다음의 2系列로 되고 있다.

주

66(77)kV→154kV→275kV……→500kV

66kV→110kV→220kV……→500kV

(2) 美國 및 歐洲에 있어서의 主要送電電壓의 系列은 다음과 같다.

美國 : 115kV→230kV→345kV→500kV→750kV

歐洲 : 220kV→380(400)kV……→765kV

(3) 需要電力과 送電電壓에 대해서

送電電力 P_0 , P 에 대한 送電電壓을 V_0 , V 라고 하면

$$V = \alpha_P V_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

또 需要電力量 W_0 , W 에 대한 送電電壓을 V_0 , V 라고 하면

$$V = \alpha_W V_0 \left(\frac{W}{W_0} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

但 α_P , α_W 는 比例定數로서 1923년에 154kV가 運轉開始하고 1952년에 275kV가 運轉開始하였으므로 그間의 送電電力과 需要電力量에 의거해서 α_P , α_W 를 算定하면 $\alpha_P = \alpha_W = 0.74$ 이다. 그림 1은 이 關係를 보인 것이다.

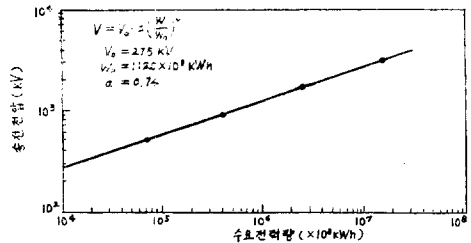


그림 1. 需要電力量과 送電電壓과의 관계

(4) 送電電壓과 送電設備의 經濟性

過去の 實績에 의거해서 變電所容量에 대한 變電所設備單價는 그림 2에 보인것처럼 scale merit가 있다는 것을 알수 있다. 또 送電線路에 대해서도 똑같은 scale merit의 效果가 있다.

(5) 送電電壓과 送電容量

送電容量의 決定에 關與하는 要素는 送電電壓, 線路의 굵기와 그 許容電流, 電壓變動, 電力損失, 調相設備容量, 安定度등이다. 線路長이 100km이하의 경우

* 日本京都大學教授(工博)·日本電氣學會副會長
本稿는 지난 8月 2日 韓電講堂에서 열린 當學會 電力系統研究會主催의 特別講演會에서 發表된 內容을 技術解説로서 要約한 것이다.

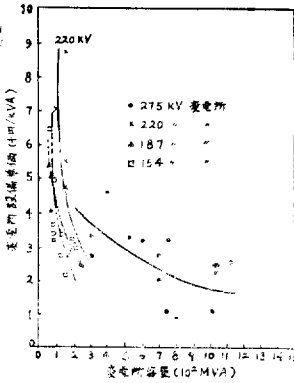


그림 2. 變電所容量에 대한 變電所 設備單價

에는 送電容量은 電線의 굵기와 그 許容電流에 의 존하지만 100km를 넘을 경우에는 安定度에 의존 하게 된다. 275kV 2回線의 送電容量은 亘長 100km에서는 1,300MW, 200km에서는 650MW, 300km에서는 350MW이기 때문에 이것을 근거로 해서 送電電壓을 파라미터로해서 2回線送電線의 線路亘長과 送電容量의 關係를 나타낸것이 그림 3이다.

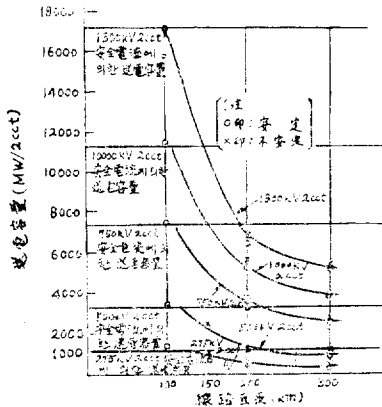


그림 3. 2回線送電線의 線路亘長과 送電容量²⁾
 送電容量 = (275kV 送電容量) × $\left(\frac{V}{275}\right)^2$

3. 運轉電壓 및 商用周波數過電壓

表 1. 2回線 遮斷時結果一覽表

線路名	亘長(km)	定常時里側電壓(kV)	遮斷時的電壓上昇(山側)(%V)(kV)	525kV抑制用所要리액터(MVA)	550kV抑制用所要리액터(MVA)	里側電壓 100%V 保持에 必要한 調整用調相設備(MVA)	
						peak時	off-peak時
水力幹線(I)	210	500	118.0(590)	450	270	SC 50	ShL 300
原子力線(II)	"	"	121.0(605)	490	340	ShL 10	"
原子力線(I)	120	"	115.0(575)	250	120	ShL 280	ShL 50

(注) 發電線 리액턴스는 x_d'

3-2-2 1線地絡時的 電壓上昇

直接接地系統에서는 1線地絡時的 健全相電壓上昇은 1.3倍이하로서 일반적으로 작기 때문에 絕緣上 問題 되는 일은 거의 없다. 그러나 가령 線路가 電源에 접

3-1 運轉電壓의 變動

275kV 送電線의 運轉電壓變動에 대해서 運轉開始當初부터 1965年度에 있어서의 off-peak(15時) 晝間 peak(11時) 및 저녁 peak(18~20時)의 3時點을 대상으로 해서 東京電力, 關西電力, 中部電力 3社에서 조사한 결과에 의하면

(1) 運轉開始當初의 275kV 運轉電壓을 一般적으로 약 10kV 낮지만 점차 運轉電壓은 높아지고 있다.

(2) 運轉電壓의 變動幅은 1965년에 가까워 질수록 減少해서 安定된 運轉電壓으로 되고 1965년에는 3社 綜合해서 電壓變動의 標準編差는 1.35%(약 3.6kV) 였다.

이들의 要因으로서는 (i) 系統의 運轉實績의 누적에 의해서 機器絕緣 및 코로나雜音등의 面에서 運轉電壓을 높이는 데에 確信을 갖게끔 되었다는 것과 (ii) 系統의 擴大에 의해서 定常時的 電壓變動이 적어졌다는 것을 들수 있다.

上記의 275kV의 運轉實績에 기초해서 500kV의 運轉電壓에 대해서 추정해본 결과 運轉電壓을 500kV로 했을 때 運轉電壓이 525kV를 넘을 確率은 약 0.5%이며 525kV로 했을 경우 550kV를 넘을 確率은 약 0.7%이다.

3-2 商用周波數過電壓

500kV 系統의 商用周波數過電壓으로서 (i) 線路遮斷時的 電壓上昇(ferranti effect) (ii) 1線地絡時的 電壓上昇 (iii) 遠方負荷遮斷時的 機壓上昇이 있다.

3-2-1 線路遮斷時的 電壓上昇, 12月 peak時에

있어서 2回線水力幹線 및 原子力幹線이 2回線 遮斷되었을 때의 ferranti效果에 의한 電壓上昇을 검토하고 동시에 電壓上昇을 525kV, 550kV에 억제하는데 필요한 리액터를 算出した 결과를 表 1에 보인다.

속된 상태에서 全負荷가 脫落되었을 때 1線地絡事故가 발생하면 發電機의 機壓上昇과 ferranti 效果에 의한 電壓上昇이 겹치게 되므로 이경우의 電壓上昇은 絕緣上 문제가 된다. 前節에서의 水力幹線, 原子力幹線을 對象

으로 電壓抑制用 리액터를 機壓上昇 및 ferranti 効果로 生기는 各所 電壓이 105% (525kV) 이내에 유지되게끔 미리 系統에 設置했다는 조건에서 1線地絡時의 電壓上昇을 算定해 본결과 電壓上昇이 130% 前後로 되는 것은 開放線路末端의 故障點附近의 健全相의 電壓上昇이 있으며 그밖의 경우에는 105% 以下 였었다.

다음에 $|Z_0/Z_1|$ 과 1線地絡時 健全相 電壓의 關係에 대해서 說明해 본다.

a相 1線地絡時의 健全相對地 電壓 V_b, V_c 는 다음式으로 표현된다.

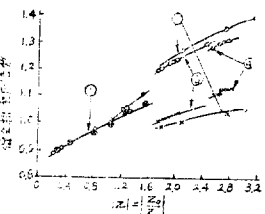
$$\left. \begin{aligned} V_b &= \frac{(a^2-1)\dot{Z}_0 + (a^2-a)\dot{Z}_2}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \cdot \dot{E}_a \\ V_c &= \frac{(a-1)\dot{Z}_0 + (a-a^2)\dot{Z}_2}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \cdot \dot{E}_a \end{aligned} \right\} (3.1)$$

지금 $|Z_0/Z_1| = |\dot{Z}|$ 라 하고 $\dot{Z}_1 = \dot{Z}_2$, $|\dot{N}_b| = \dot{V}_b/\dot{E}_a$, $|\dot{N}_c| = \dot{V}_c/\dot{E}_a$ 라 두면

$$N_b = 1 + a \frac{1-\dot{Z}}{2+\dot{Z}} \quad N_c = 1 + a^2 \frac{1-\dot{Z}}{2+\dot{Z}} \dots\dots (3.2)$$

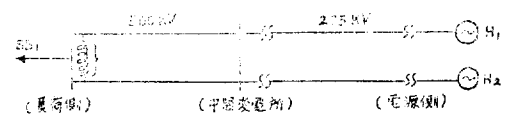
로 된다. 이때 \dot{Z}_0, \dot{Z}_1 이 다같이 리액턴스분일 경우에는 \dot{Z} 는 實數로 되고 $|\dot{N}_b| = |\dot{N}_c|$ 로 된다. 그러나 一般的

으로는 \dot{Z}_0 는 \dot{Z}_1 보다도 더 많은 抵抗分을 포함하게 되므로 \dot{Z} 는 僅少한 負의 偏角을 가지게 되고 이경우에는 $|\dot{N}_b| > |\dot{N}_c|$ 로 된다. $|\dot{Z}|$ 와 $|\dot{N}_b|, |\dot{N}_c|$ 의 關係를 그림 4에 보인다.



3-2-3 遠方負荷遮 그림 4. $|Z_0/Z_1|$ 과 健全相 電壓倍數의 關係

系統으로서는 그림 5에 보인 바와 같은 水力幹線을 對象으로 2回線遮斷時의 發電機의 電機子反作用 및 回轉數上昇에 의한 機壓上昇을 검토한 결과를 表 2에 보인다.



*Tap regulation 線路 亘長
그림 5. 모델 系統

表 2. 各所 端子 電壓의 計算結果一覽表

補償用分路 리액터量(%)	端 子	端 子 電 壓				端子電壓이最大로된 時間(S)
		瞬 時	5사 이 클	10사 이 클	最 大 值	
0	發 電 機	1,110p.u.	1,161p.u.	1,187p.u.	(1,324)	(2.1)
	梓川 275kV側	1,196	1,251	1,281	(1,496)	"
	梓川 500kV側	1,241	1,290	1,332	(1,584)	"
	第 2 中 東 京	1,259	1,319	1,352	(1,619)	"
50	發 電 機	1,074	1,112	1,135	1,246	1.1
	梓川 275kV側	1,112	1,154	1,180	1,333	1.6
	梓川 500kV側	1,132	1,176	1,204	1,381	1.8
	第 2 中 東 京	"	"	1,265	1,390	"
100	發 電 機	1,044	1,067	1,086	1,305	1.1
	梓川 275kV側	1,042	"	1,089	1,234	1.2
	梓川 500kV側	"	1,068	1,091	1,249	"
	第 2 中 東 京	1,027	1,053	1,076	1,238	"

(注) (1) 線路充電容量 330MVAR (2) 變壓器飽和特性考慮 (3) AVR Gain은 1.0 最大速度上昇値는 30%로 했음 (4) ()의 값은 推定值

이상의 결과를 총괄해서 日本에서는 500kV系統의 基準電壓으로서 表 3에 보인 바와 같은 內容을 채택하기로 하였다.

4. 送電線의 코로나放電과 導體設計

送電電壓이 높아지면 送電線의 電線表面電位의 傾度가 높아져서 드디어는 코로나放電이 발생하고 그 결과

코로나雜音障害, 코로나損失을 일으키게 된다. 이 코로나雜音障害, 코로나損失을 減少시키기 위한 導體設計가 중요하게 된다.

日本電力中央研究所에서는 栃木縣鹽原町關谷이라는 곳에 그림 6과 같은 亘長 1410m 設計電壓 450kV의 2回線試驗電線을 설치해서 코로나雜音 및 코로나損失에 관한 연구를 1961년부터 개시하며 1966年경에 一次

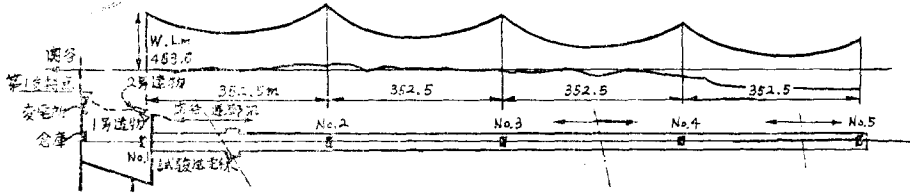


그림 6. 試驗送電線路縱橫斷面圖

設計電壓：450kV.
 回線數：2(3相垂直配置).
 互長：1,410m.
 鐵塔：基數 5. 앵글鐵塔 2基, 垂直鐵塔 3基(이중 MC
 鋼管鐵塔 1基)
 徑間：352.5m, 徑間數 4.

導體：330mm² ACSR (4.3.2.1導體)
 架空地線：120mm² IACSR, 外徑 17.5mm, 條數 2
 磚子：1號線—280mm 볼소켓 三角形懸垂磚子, 20個連. 2
 號線—8A形長幹磚子(胴徑 105mm), 3個連. 懸
 垂裝置 1連, 耐張裝置 2連.

表 3. 基準電壓의 內容

呼稱	適用分野	500kV 系推獎案	(參考)現行 275kV系
公稱電壓		500kV	275kV(JEC)
最高電壓	鹽害, 開閉 서어지, 코 로나雜音, 靜電誘導	525kV	287.5kV (JEC)
最高許容電壓	機器絕緣	525kV/ 550kV	300kV
超時間最高電壓	遮斷器充電 電流遮斷性 能 避雷器定格 電壓 機器短時間 耐壓	母線機器 700kV 線路 720kV (引入口機器 를 포함)	

的으로 導體設計를 確立하게 된 것이다.

4-1 코로나 雜音과 導體設計

電力中央研究所의 澤田博士는 長期間에 걸쳐 上記의 試驗送電線 및 275kV 送電線에 의한 코로나雜音測定結果를 기초로 해서 解析한 結果를 要約하면 다음과 같다.

(1) 晴,曇天時의 코로나 雜音레벨은 雷線의 最大表面電位인 傾度 G_{max} 에 거의 正比例해서 增大하고 素導體數에는 관계하지 않는다. 한편 G_{max} 는 다음과 같은 式으로 부터 얻을수 있다.

$$G_{max} = \frac{18cV}{nr} \left(1 + \frac{r}{s}K\right) \text{ [kV/cm]} \dots\dots (4.1)$$

但 V: 複導體의 對地電壓(kV)

c: 複導體의 作用靜電容量($\mu\text{F}/\text{km}$)

n: 素導體數

r: 素導體半徑(cm)

s: 素導體間隔(cm)

$$k = 2(n-1)\sin\frac{\pi}{n}$$

(2) 降雨時의 雜音레벨은 降雨量이 一定 할 경우 電線下面의 鉛道方向의 電位傾度 G_p 에 비례해서 增大하고 素導體數하고는 關係가 없다. G_p 는 아래式으로 求해진다.

$$G_p = \frac{18CV}{nr} \left(1 + \frac{r}{s}k \cos\theta\right) \text{ (kV/cm)} \dots\dots (4.2)$$

但 θ : G_{max} 方向이 鉛直線과 이루는 角

(3) 降雨時의 雜音레벨은 印加電壓 一定일때 降雨量

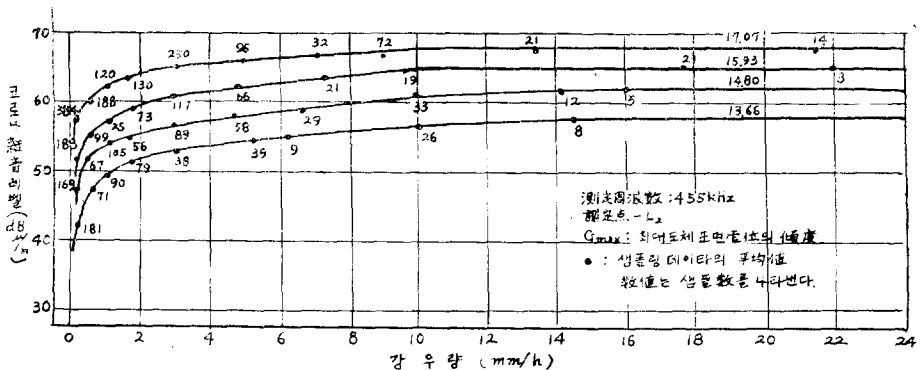


그림 7. 4×330mm²의 코로나 雜音降雨量特性

數 mm/kV까지는 급격히 증대하지만 그 이상에서는 차츰 飽和해서 一定值에 접근한다. 1例로서 그림에 330 mm² 4 導體의 코로나 雜音降雨量特性을 보인다.

(4) 電線의 表面電位傾度가 같은 경우에는 코로나雜音레벨은 거의 電線의 굵기의 2乘에 比例한다.

이상의 事項에 근거해서 實用送電線에 대한 晴天, 曇天時의 코로나雜音레벨(N_d)는 아래式으로 주어진다.

$$N_d = (3.7G_{max} - 12.2 + K_D) \pm 3.0 [dB, \mu V_m = 0dB] \dots\dots(4.3)$$

여기서 간단히 이(4.3)式에서 사용된 定數에 대해서 설명한다. 330mm² ACSR의 4.3.2導體 및 單導體의 晴天時 코로나 雜音의 電位傾度特性을 그림 8에 보인 것처럼 直線으로 되고 있다. 또 이들 導體의 G_{max} 에 대한 50% 코로나 雜音레벨은 3.7[kV/cm]였었다. 다음에 이때의 測定點에 관한 換算關係 및 周波數스펙트럼의 換算關係로 부터

$$K_D = 40 \log_{10} \frac{2r}{2.53} [dB] \dots\dots(4.4)$$

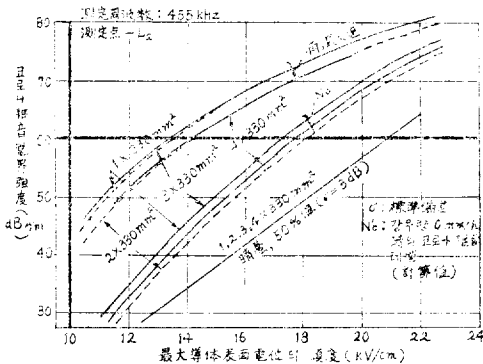


그림 8. 코로나 雜音電位の 傾度特性

다시 여기에 $\pm 3.0(dB)$ 의 換算偏差를 감안해서 (4.3) 式의 計算式이 完成된 것이다. 참고로 表 4에 晴天時 코로나 雜音레벨의 50%值와 標準偏差의 關係를 보인다.

日本에서는 晴天時의 코로나雜音레벨을 라디오雜音障害를 억제한다는 立場에서 45~50[dBu/m]로 잡기로 하고 있기 때문에 (4.3)式으로부터 G_{max} [kV/cm]와 素導體의 半徑 r [cm]이 任意로 定해지게 된다. 一般적으로는 G_{max} 를 15[kV/cm] 이하로 잡고 있는 것이다.

4-2 코로나 損失

4.1에서 설명한 바와 같이 最大導體表面電位の 傾度 G_{max} 를 15[kV/cm] 이하로 잡고 있는 관계상 晴天時의 코로나損失은 導體抵抗에 의한 抵抗損의 數10분의 1 이하이기 때문에 거의 問題로 되지 않는다. 그러나

表 4. 晴天時 코로나 雜音레벨의 50%值와 標準偏差

導體 種類	G_{max} (kV/cm)	코로나雜音레벨		測定值의 標本數
		50%值 (dB μ /m)	標準偏差 (dB)	
4×330mm ²	14.80	37.0	3.0	2,202
	15.94	42.0	3.0	3,868
	17.07	46.0	3.0	2,993
3×330mm ²	14.91	38.0	3.0	1,993
	17.08	46.0	3.0	2,543
	18.97	53.0	3.0	2,177
2×330mm ²	15.46	40.0	3.0	1,732
	17.09	46.0	3.0	3,740
	18.90	53.0	3.0	3,224
1×330mm ²	15.04	38.5	3.0	1,253
	17.07	46.0	3.0	1,493
	19.10	53.5	3.0	1,713
4×330mm ²	16.36	41.5	3.0	140
	17.62	46.5	3.0	970
	18.88	50.5	3.0	981

雨天時등에는 코로나損失이 증가하게 되므로 送電損失과의 關係로 부터 코로나 損失을 알아 둔다는 것은 필요하다. 그래서 鹽原試驗場의 試驗送電線을 對象로 해서 코로나 損失을 검토한 결과에 대해서 有働博士, 杉本氏의 研究成果를 要約해 보면 表 5에 보는 바와 같다.

表 5. 코로나損의 推定值

導體의 種類	最大表面 電位 의 傾度 [kV/cm]	코로나損(kW/km ; 3φ)					
		降雨時 (1mm/h) P_{c3}	晴天時 P_{c1}	高濕度時 P_{c2}	負荷 端側	電源 端側	負荷 端側
4×330mm ²	16.0	6.9	10.2	0.7	1.0	1.4	2.0
4×410mm ²	14.3	3.6	5.1	0.4	0.5	0.7	1.0
4×610mm ²	12.6	2.2	2.9	0.2	0.3	0.4	0.6

$W_c = P_{c1}T_1 + P_{c2}T_2 + P_{c3}R_e$ (kWh/km, 1φ)
 W_c : 年間の 코로나損電力量
 P_{c1}, P_{c2} : 晴天時, 高濕度時의 코로나損降雨量時의 코로나 (kWh/km, 1φ)
 P_{c3} : 降雨量 1mm/hr時의 코로나損(kW/km, 1φ)
 T_1, T_2 : 晴天時 및 高濕度時의 年間延時間(hr)
 R_e : 年間總降雨量(mm)

이表中 負荷端側の 相對空氣密度 $\delta=1$, 山岳地帶의 그것은 $\delta=0.955$ (平均氣溫을 13.5°C 로 했을 경우 標高約 550cm 에 相當)로 假定한 것이다.

5. 逆電線의 絕緣 設計

超超高壓送電線의 絕緣設計의 基本이 되는 기둥은 耐開閉서어지, 設計, 耐污損設計, 耐雷設計로서 275kV 이하의 送電線과 基本적으로는 다름이 없지만, 信賴度를 높이고, 동시에 經濟性을 추구한다는 면에서 신중히 고려하지 않으면 안된다.

5.1 耐開周서어지

絕緣設計의 第1段은 商用周波電壓에 常時 견뎌낼 뿐만 아니라 商用周波過電壓(持續性異常電壓이라고도 부른다)과 開閉서어지에 견딘다는 것이다. 所要碍子個數는 開閉서어지에 의해서 결정되므로 經濟的 設計를 위해서는 系統에 發生하는 開閉서어지를 될 수 있는 낮은 값으로 抑制함이 필요하다. 이제까지 (275kV 에

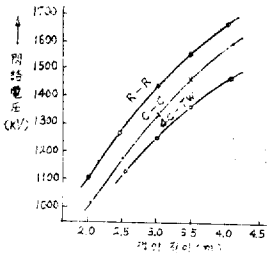


그림 9. 各種개폐의 開閉서어지 閃絡特性

서는 開閉서어지 倍數를 2.8로 잡고 왔다) 超超高壓送電系統에 있어서는 開閉서어지에 대해서 필요한 氣中絕緣間隔은 그림 9에 보인것 처럼 非直線的으로 增大하게 되므로 開閉서어지 抑制는 經濟上 重要해진다.

開閉서어지는 遮斷서어지와 投入서어지로 나누어진다. 近年 遮斷器는 無點孤遮斷이 可能하게 되었으므로 遮斷서어지는 問題없지만 投入서어지를 억제한다는 것이 필요하다. 특히 事故時에 行하는 3相再投入이 가장 큰 서어지를 發生하므로 이의 억제가 중요하다.

投入서어지抑制를 위해서 그림 10에 보인것 처럼 直列抵抗을 插入한 2段投入이 실시되고 있는데 이 경우의 서어지値는 抵抗値의 크기에 따라 大幅적으로 變化한다.

이의 抑制效果를 개념적으로 圖示한 것이 그림 11인데, 이 그림에서 A曲線은 s_1 投入時의 서어지, B曲線을 s_2 投入時의 서어지이며, 그림 12는 보다 구체적으로 보

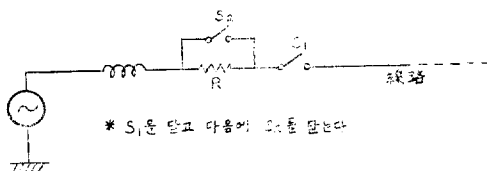


그림 10. 直列抵抗 挿入 2段投入 回路

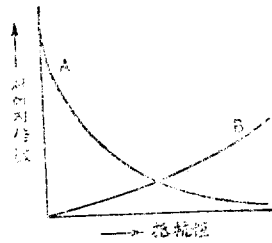


그림 11. 抵抗投入時의 서어지(A曲線)와 抵抗短絡時의 서어지(B曲線)

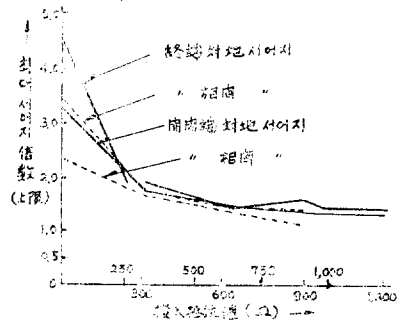


그림 12. 投入抵抗値와 最大서어지 倍數上限值의 關係
 델系統을 사용해서 TNA(Transient Network Analyzer)등으로 解析한 結果를 정리한 것이다.

이 그림은 3相非同時再投入의 것이며 插入抵抗의 抵抗値가 $600\sim 1200\Omega$ 사이에서는 終端最大서어지의 最大는 1.6倍를 넘지 않는다. 또 投入으로 부터 抵抗短絡까지의 時間은 10ms 정도로 충분하다.

開閉서어지 倍數에 관계하는 上記 以外の 要素에는 開閉線 線路의 길이, 電源임피던스 및 電源에 存在하는 線路의 영향이 있으나 이들에 대해서 要約하면 다음과 같다.

(1) 線路의 길이 $60\sim 240\text{km}$ 의 범위에서는 開閉서어지 倍數의 差는 거의 없다.

(2) 電源임피던스(短絡容量)이 $2\sim 10\text{GVA}$ 의 범위에서는 短絡容量의 증대와 함께 서어지가 커지는 수가 많다. 한편 短絡容量이 1GVA 까지 그 이하일 경우에는 오히려 더 큰 서어지가 發生하는 수가 있다.

(3) 電源側에 線路가 존재할 경우에는 開閉서어지는 작아지는 傾向이 있다.

이상의 3項은 投入抵抗이 없을 때에는 뚜렷하게 나타나지만 어느정도 投入抵抗이 挿入되어 있을 때에는 이들의 영향이 나타나기가 힘들게 되고 있다.

이상에서 설명한 바와 같이 投入抵抗插入形遮斷器에 의한 開閉서어지 倍數는 2.0이하이라는 實績에 의거해서 最近의 耐開閉서어지設計에는 開閉서어지倍數의 2.0을 채용하고 있다.

投入 및 再投入時의 서어지는 上述한바와 같이 投入抵抗을 插入시키므로써 開閉서어지倍數 1.5이하로 하는 것은 可能하다. 그러나 1線地絡時의 健全相서어지라던가 地絡故障서어지를 1.5倍 以下로 억제한다는 것은 일반적으로 용이 하지 않다. 따라서 1000kV 送電에 대해서는 이들의 諸點에 대해서 研究開發할 需要가 있다. 또한 1000kV 送電에 있어서는 開閉서어지를 處理하는 避雷器의 續流遮斷能力을 증대시키는 研究開發이 필요할 것이다.

5.2 耐雷設計

超超高壓送電에 있어서의 耐雷設計는 275kV에서의 그것과 本質的으로 다른점은 없지만 送電容量이 워낙 크기 때문에 그만큼 信賴度를 높인다는것이 實질히 要求된다. 信賴度를 높이기 위한 구체적인 課題는 (1) 架空地線에 의한 直擊雷의 防止, (2) 雷擊時의 鐵塔電位上昇에 의한 逆入絡(flash over) 發生의 抑制, (3) 2回線同時閃絡에 의한 2回線停止의 回避등이다. 이들의 具體的인 課題의 研究를 이제까지 막아온 것은 아직껏 雷의 本質을 論理적으로 解析못하고 있다는 것이다. 따라서 假設에 의거해서 이제까지의 實績을 토대로 暗中摸索을 앞으로도 계속해 나가지 않으면 안된다.

以下 耐雷設計로서 採用되고 있는 技術에 대해서 간단히 설명한다.

5.2.1 架空地線에 의한 直擊雷의 防止, 架空地線의

表 6. 2回線送電線雷害事故

(1955年 4月~1965年 3월에 걸친 全國主要送電線路雷害事故)

電壓(kV) 事故內容		66	154	275
1線만의 事故	上線	262(41)	279(43)	25(33)
	中線	207(32)	200(31)	43(57)
	下線	173(27)	179(26)	7(10)
	計	642(100%)	648(100%)	75(100%)
2線이 상의 事故	上線을포함	764	267	13
	中線 "	715	222	10
	下線 "	574	209	11
	計	915	330	21
合 計	1,557	979	96	
1線만의 事故의 比率		41%	66%	75%

(註) 1線事故, 2線이상의 事故로 分類

遮蔽效果에 대해서는 여러가지 說이 있고 日本에서는 종래 三田氏의 「吸引空間理論」이 一般적으로 채용되어 왔지만 表 6에 보인것처럼 275kV 送電線의 雷害事故는 中線事故가 많았다는 점, 그 原因은 架空地線의 遮蔽失敗가 아닌가 해서 현재 再檢討中에 있다. 또 275kV 送電線에서는 架空地線과 上線의 結合이 코로나의 發生때문에 增加되어서 逆閃絡이 어려운것이 아닌가 하는 意見도 있다.

最近의 遮蔽角計算法은 Armstrong, Whitehead 兩氏(IEEE Vol PAS-87 Jan. 1968)이 發表한 內容에 의거해서 실시하고 있으며 日本에서는 이것을 A-W理論이라고 부르고 있다.(자세한 內容은 위 論文을 参照 바람).

5.2.2 鐵塔電位上昇에 의한 逆閃絡의 抑制, 雷擊點電位上昇은 鐵塔直擊 및 經間中央部를 雷擊點으로해서 格子圖 또는 雷서어지 計算盤에 의해서 算出한다. 計算에 사용하는 定數는 實測 또는 計算에 의해서 얻어진 값을 사용하게 되는데 비교적 잘 쓰이는 것은 다음과 같은 값이다.

- 雷道임피던스 : $Z_0=400(\Omega)$
- 架空地線서어지임피던스 : $Z_0=350(\Omega)$ (2條一括)
- 鐵塔서어지 임피던스 : $Z_T=100(\Omega)$
- 傳播速度로서는 架空地線→ $300(m/\mu s)$
- 鐵塔→ $210(m/\mu s)$
- 傳播減衰係數로서는 鐵塔 $T_T=2\mu s$ 에 대해서 $r_T=0.8$
- $T_T=4\mu s$ " $r_T=0.9$
- 架空地線 350m經間 $r_0=0.85$

鐵塔接地抵抗 : 時間에 대해서 抵抗은 不變 雷擊電流波長 $2\mu s$ 또는 $4\mu s$

이상의 諸定數를 사용해서 鐵塔直擊時의 塔頂電位上昇을 그림 13에 보인다.

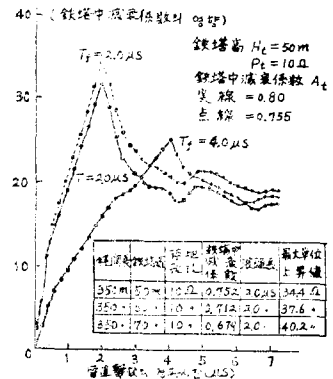


그림 13. 塔頂電位上昇波形的 例

그리고 接地抵抗의 變化에 의한 塔頂電位의 變化를 그림 14에 보인다.

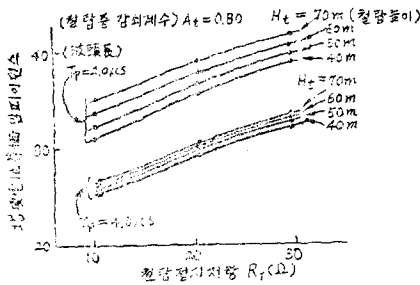


그림 14. 鐵塔直擊時 塔頂電位上昇

한편 500kV用 鐵塔은 大型化하고 있기 때문에 塔頂 間이 아니고 上, 中, 下 各 arm의 電位上昇을 확인해 풀 필요가 있다.

經間中央雷擊의 경우에 있어서의 雷擊點電位上昇은 주로 架空地線의 條數, 橋의 有無와 經間長에 영 향을 받게 된다.

鐵塔逆閃絡發生의 雷擊電流 I_{LT} 는 다음 式으로 주어 진다.

$$I_{LT} = \frac{(k/\alpha)V_{50} - \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}V_m}{(k-c)Z_T} \text{ (kA)} \dots\dots\dots(5.1)$$

但 V_{50} : 標準條件下의 碼子裝置의 標準波形에 대한 50(%) 閃絡電壓(kV)

V_m : 最高電壓(kV)

c : 結合率

k : 波形係數

α : 氣象係數

k : 鐵雷閃各部電位分布係數

Z_T : 塔頂電位上昇 임피던스(Ω)

이들의 定數는 500kV에서는 아래와 같다.

(i) $V_{50} = 550l + 80$ (kV)

但 l 는 arc horn의 gap長(m)

가령 $l = 3.96$ (m)라 하면 $V_{50} = 2253$ (kV)

(ii) $(1 \times 40)\mu s$ 를 基準으로 하면 $(2 \times 5)\mu s$ 는 $k = 1.31$

(iii) α 는 標高 1000(m) 이하에서는 一般地域으로서 의 氣象變動을 고려해서 $\alpha = 1.1$

(iv) $V_m = 525$ (kV)

(v) 架空地線과 上線의 結合率 $c = 0.3$

(vi) $k = 0.9$ (接地抵抗 10(Ω) 정도로 함)

(vii) 接地抵抗 13(Ω), 鐵塔高 65(m) 徑間長 350(m) 의 경우 $Z_T = 34$ (Ω)

이상의 數值를 (5.1)式에 代入하면

$$I_{LT} = \frac{1.31}{1.1} \times 2,253 - 525 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}}{(0.9 - 0.3) \times 34} = 110 \text{ (kA)}$$

經間逆閃絡發生의 雷擊電流 I_{LS} 는 다음式으로 주어 진다.

$$I_{LS} = \frac{(k/\alpha)V_{50}}{(1-c)Z_S} \dots\dots\dots(5.2)$$

但 Z_S : 經間中央의 電位上昇임피던스

(Ω, 1A當의 電位上昇)

지금 500kV 送電線에 대해서 다음 數值를 주어 본 다.

(i) $V_{50} = 9.8$ (MV)

(ii) $k = 1.30$ (推定)

(iii) $Z_S = 10 > \Omega$

따라서

$$I_{LS} = \frac{1.3}{1.1} \times 9.8 \times 10^6}{(1 - 0.3) \times 10^7} = 154 \text{ (kA)}$$

V_{50} 이 9.8(MV)로 되면 結合率은 코르나에 의해서 增加하는 것으로 생각된다.

이 경우에는 I_{LS} 는 增大하게 되어 上相導體에 의 逆 閃絡은 어렵게 된다. 곧 逆閃絡에 필요한 I_{LS} 는 200 (kA)정도로 推定된다.

5.2.3 2回線 同時閃絡에 의한 2回線停止의 回避

日本의 基幹送電線은 주로 2回線이기 때문에 1回의 雷擊에 의해서 2回線에 걸친 雷害事故를 發生하게 되 므로 이것을 극력 1回線內에 그치도록 하기 위한 方法 으로서 不平衡絕緣方式이 川合氏에 의해서 開發되었다

不平衡絕緣에 있어서는 雷擊에 의한 閃絡을 1回線에 그치도록 하기 위해서 低絕緣側의 3相閃絡한 後에 高 絕緣側이 閃絡되도록 할 필요가 있다. 이때문에 低絕 緣側의 閃絡에 의한 結合率의 增加와 鐵塔電位의 低下 등을 고려에 넣어서 低絕緣側의 어느 相보다도 高絕緣 側의 全相이 높은 絕緣強度로 되겠끔 2回線間에 格差 를 둘 필요가 있다.

低絕緣側은 보통 開閉서지耐壓으로 부터 결정되는 horn間隔으로 하고 高絕緣側은 다음 式으로 부터 求 하게 된다.

$$V_H = \frac{V_L + 1.22E \frac{\alpha}{k}}{1 - \beta} \dots\dots\dots(5.3)$$

但, V_H : 高絕緣側 horn 50% 閃絡電壓(標準條件) (kV)

V_L : 低 " " " " (kV)

E : 交流對地電壓(實効值) (kV)

β : 不平衡係數, 5~15%

(275kV-5%, 500kV-10%)

所要交流絕緣格差는 電壓位相을 고려해서 $\sqrt{2}/\sqrt{3}$

$\times 1.5E = 1.22E$ 로 된다.

表 7. 絕緣方式과 鐵塔逆閃絡事故率의 比較
(單位: 件/100km·年)

電 壓 階 級 (kV)	1cct 事故	標準絕緣		不平衡絕緣		平衡高絕緣	
	2cct 事故	(S-S)		(L-H)		(H-H)	
	計	事故率 (%)	(%)	事故率 (%)	(%)	事故率 (%)	(%)
154 (同相)	1cct	0.283	(100)	2.203	(778)	0.171	(60)
	2cct	1.948	(100)	0.722	(37)	1.385	(71)
	計	2.231	(100)	2.925	(131)	1.556	(70)
275 (逆相)	1cct	0.416	(100)	1.054	(253)	0.210	(50)
	2cct	0.282	(100)	0.060	(21)	0.115	(42)
	計	0.698	(100)	1.114	(160)	0.325	(47)
500 (逆相)	1cct	0.289	(100)	0.787	(272)	0.156	(54)
	2cct	0.096	(100)	0.017	(17)	0.029	(30)
	計	0.385	(100)	0.804	(209)	0.185	(48)
275 (同相)	1cct	0.091	(100)	1.058	(1113)	0.060	(65)
	2cct	0.499	(100)	0.056	(11)	0.214	(42)
	計	0.590	(100)	1.114	(189)	0.274	(46)

註 1. %는 各各의 電壓階級の 標準絕緣을 100으로 한 場合의 比率

註 2. 鐵塔型은 懸垂, 耐張別個로 計算하고 그平均을 취했음

註 3. 電流強度는 曲線 N=2을 使用, 鐵塔雷擊比率은 1/3로 했음

이후 이 方法은 널리 採用되면서 동시에 여러가지로 檢討가 加해지고 있다. 各種絕緣方式과 鐵塔逆閃絡事故率과의 比較를 한 結果의 1例를 表 7에 보인다.

500kV 送電線에서 標準絕緣의 horn 間隔長은 $s = 3,200(\text{mm})$, 不平衡絕緣方式의 低絕緣의 horn 間隔長 $L = 2,400(\text{mm})$, 高絕緣의 horn 間隔長 $H = 3,950(\text{mm})$ 로서 平衡高絕緣에서는 $H = 3,950(\text{mm})$ 이다.

5.3 耐汚損設計

鹽害事故의 發生頻度는 雷害에 比較하면 훨씬 적지만 반면에 이것이 한번 발생하면 영향을 받는 범위가 넓고 또 長時間의 停電을 가져오므로 社會的影響이 크다고 하겠다. 이 鹽害에 대해서는 오래동안 研究되어 오고 있지만 여전히 過絕緣方式이 채용되어 技術者로서는 아주 애먹게되는 課題이다.

日本에서의 500kV 送電線의 耐汚損設計로서는 대체로 表 8과 같은 方法에 따르고 있다.

또 500kV 變電所에서는 屋內方式이 채용되기도 하고 콤팩트方式의 開發研究가 추진되고 있다. 屋外方式에서는 洗淨裝置를 驅使하고 있다.

6. 結 論

超超高壓送電技術은 새로운 것은 없지만 放電現象, 絕緣破壞現象등 아직 理論的으로 確立되고 있지 않기 때문에 技術者는 고성을 거듭해 오고 있다. 이상에서 설명한 外에도 超超高壓送電의 技術問題로서 靜電誘導 變壓器의 絕緣, 遮斷器의 耐量, 絕緣協調, 安定度, 地中送電, 直流送電등이 있다.

表 9. 所要碍子個數 計算例

계	이	스	I	II	III	IV	V
想定鹽分付着 密度 ⁽¹⁾ (mg/cm ²)	250mm	懸垂碍子	0.03	0.063	0.125	0.25	0.5
	280mm	"	0.024	0.050	0.100	0.20	0.4
	320mm	"	0.023	0.047	0.094	0.19	0.38
	320mm	스모그碍子	0.02	0.041	0.081	0.16	0.33
	LC 8021	相當普通形	0.039	0.082	0.163	0.325	0.65
	LC 8024	相當普通形	"	"	"	"	"
設計耐電任 (kV/個)	250mm	懸垂碍子	11.2	9.5	8.2	7.1	6.3
	280mm	"	13.6	11.4	9.9	8.6	7.5
	320mm	"	—	12.7	10.9	9.4	8.5
	320mm	스모그碍子	—	15.6	13.5	11.7	10.1
	LC 8021	相當普通形	67.9	60.4	55.6	52.2	49.8
	LC 8024	相當普通形	80.3	71.4	65.6	61.7	58.9
			78.3	69.7	64.1	60.2	57.5
			94.2	83.9	77.1	72.5	69.2

계	이	스	I	II	III	IV	V
所要碍子數	250mm	懸垂碍子	33	39	45	52	58
	280mm	"	28	32	37	43	49
	320mm	"	—	29	34	39	44
	320mm	스모그碍子	—	24	27	31	36
	LC 8021	相當普通形	6	6	7	7	8
			5	6	6	6	7
	LC 8024	相當普通形	5	6	6	7	7
		4	5	5	5	6	

註 (1) 耐電壓 目標値는 1線地絡時의 健全相電壓 上昇率을 1.2로 해서 $525 \times \frac{1}{\sqrt{3}} \times 1.2 = 364kV$ 를 취했다.



研究會行事案內

當 學會 計測制御 시스템 研究會 第4回 發表會와 電氣機器研究會 第4回 發表會를 아래와 같이 開催하오니 會員 여러분의 積極的인 參與있으시기 바랍니다.

1. 計測制御 시스템 研究會(第4回 發表會)

日 時 : 1976年 10月22~23日(2日)

場 所 : 아카데미 하우스(수유리)

今番 發表會에는 Maker側(日本의 후지덴끼, 요코가와(株)를 비롯하여 國內의 金星計電株式會社, 聯合鐵鋼株式會社 等)에서 많은 發表와 參與가 있으며 日本 東京大學의 Senichi Masuda 博士의 招請講演이 있습니다.

大韓電氣學會 計測制御시스템 研究會 幹事長 高明三

2. 電氣機器研究會(第4回 發表會)

日 時 : 1976年 10月末(日程이 確定되는 데로 追後 通知)

場 所 : 馬山 昌源工業團地內 東洋重電(株)工場

見 學 會 : 東洋重電(株)昌源工場, 株式會社 金星社 昌源工場, 馬山輸出自由工團

發表 및 參與하실 會員은 大韓電氣學會 事務局 (27-0213)이나, 吳兢烈幹事長(成均館大 電氣工學科教授 72-2721~5), 任達鎬幹事(漢陽工大 電氣工學科教授 52-4111~5), 趙哲濟幹事(釜山大工 大電氣工學科教授(釜山 52-0171~5)로 連絡하시기 바랍니다.

大韓電氣學會 電氣機器研究會 幹事長 吳兢烈