

345 KV 送電線의 過渡安定度計算(I)

技術解說

18-1-1

A study on transient stability of 345 KV power transmission line

李 在 淑*
(Chae Sook Lee)

This is a preliminary study concerning the future construction and operation of 345 KV power transmission line in Korea which will be added to the existing 161 KV power system by the end of 1970 in order to increase the power carrying capacity between Seoul and Pusan area; 350 kilo meters apart, in accordance with the ambitious second five years power development schedule of Korea Electric Company.

The result of this study says that an intermediate switching station should be installed at the middle position of the line to improve the transient stability of the system, considerable amount of capacitors or synchronous condenser are to be installed to reduce the voltage drop at receiving end of line during the heavy load hours, and also in some measure to avoid the voltage rise by self-excitation of power generators during the light load hours and while energizing the line.

This is the first attempt to realize the EHV power transmission line in Korea so that the additional study is necessary on the kind and size of conductors, the necessary number of insulators and the suitable clearance distances between conductor and steel tower or earth from the technical and economical view points.

These are necessary steps to be taken by the writer before getting into the calculation on the transient stability of the power system.

目 次

1. 序 論
2. 電線設計
3. 絶緣設計
4. 線路定數
5. 系統構成
6. 送電容量
7. 過渡安定度(其一)
8. 過渡安定度(其二)
9. 商用周波異常電壓
10. 結 論

1. 序 論

今年들어, 우리나라 發電設備總容量도 우리가 苦待하던 一百萬KW 라는 數值를 突破하는 驚異的發展을 가져왔으며, 來년에는 發電機單位容量도 250 MW 로 그리

고 發電所單位容量도 500 MW 를 凌駕할 趨勢에 놓여있다. 送電設備도 既設 154 KV 로서는 不充分하다는 것은 韓電技術部에서 檢討한 冊子 “第2次5個年計劃期間에 있어서의 系統問題 1968.4”에서 指摘되어 있는 바와 같으며,

送電容量의 增大, 系統安定度の 改善, 送電損失의 減少 및 送電部門에 對한 投資의 效率性向上을 爲해서 1970年末까지는 300 KV 級 超高壓送電施設을 一部地域에는 完工해야 한다는 結論을 내리고 있다.

既存 154 KV 以上の 超高壓으로서 將次 우리나라에 採擇할 수 있다고 생각되는 電壓階段은 美國에서 쓰이고 있는 345 KV, 歐羅巴에서 쓰이고 있는 380 KV, 最近先進各國에서 쓰기 始作한 500 KV, 또는 700 KV 등이 있으나, 韓國의 既存最高送電電壓이 154 KV 라는點 將次的 電源開發計劃에 隨伴하는 發電所位置選定과 電力需要地의 推定, 早期過剩投資의 抑制, 國土의 狹少性 比較的 偏在性을 떠우고 있으나 規模가 그다지 크지않은 水力發電電源等面에서 多角度로 檢討하면, 于先 345 KV

* 正會員: 韓電 送變電 技術役

로 超高壓電壓을 決定하여 將次的 送電網幹線으로서 活
 役케 하는 것이 妥當하다고 判定 될 수 있다.

送電線電壓을 345 KV 라는 超高壓을 選擇하면, 送電
 容量은 果然 어느程度가 되는지 送電線의 過渡安定度面
 에서 主로 研究해 보기로 한다.

研究對象이 되는 線路는 京仁和 嶺南地區를 連結하는
 直長 350 KM, 2 回線이며, 本檢討에 앞서 必要한 決定
 事項은 將次的 345 KV 送電線路의 電線種類, 導體方式,
 碍子個數, 線間距離, 送受電端變壓器容量等이다.

超高壓線路의 導體種類는 各種이 있으나 本線路에 對
 해서는 世界의 趨勢에 따라 經濟的으로 有利한 鋼心아
 루미線을 使用키로 하였으며 그 寸數는 主로 Corona 雜
 音 및 Corona Loss 面에서 許容되는 最少外徑의 것을
 擇하기로 하였다.

導體方式은 經濟的 또는 技術面에서 優秀한 束導體即
 多導體方式을 採擇키로 하였다. 束導體는 從來一相當導
 體가 一條라는 것이 常例였으나 이것이 2, 3, 또는 4 條
 까지 늘어가는 것이며, 現在 先進國에서는 4 條方式이
 多數採用되고 있으나 우리나라에서는 이러한 束導體方
 式의 實現은 始初의 試圖이며, 一相當導體數가 많을 수
 록 技術面 또는 施工面에 難點이 많으므로 一相當 2 條의
 導體를 使用하는 複導體方式을 採擇키로 하였다.

다음, 南北間의 融通電力을 500 MW 以上으로 推定하
 던 回線數는 2 回線이라야 한다는 判斷이 나오며, 이것
 을 2 Route 로 하는 것이 落雷事故等의 波及을 抑制하는
 面 即 信賴度面에서는 有利하나 鐵塔材節約 또는 用地活
 用面 即 經濟面에서는 不利하므로 2 回線併架用的 鐵塔
 을 使用한 即 2 回線 1 Route 方式을 採擇키로 하였다.

다음 送受電端變壓器는 그 電壓이 345/154 KV 인
 Auto-Transformer 300 MVA 3 臺를 設置하는 것으로 推
 定하였다.

大略 以上の 檢討順序에 따라 345 KV 超高壓線路의
 大要를 決定하고 다음에 本論인 過渡安定極限電力을 算
 出하고자 한다.

2. 電線設計

公稱斷面積 954 MCM(482mm²)와 795 MCM(403mm²)
 의 두 種類의 ACSR 가 比較對象이 되었으며, 以下 計算
 에서 나타나는 바와같이 後者를 擇하여도 Corona noise
 level, Corona 損 電流送電容量面에서 別支障이 없다는
 것이 判明되었다.

(2.1) 電線特性

954 MCM ACSR(cardinal)

Al 54/3.37 mm St 7/3.37 mm
 計算切斷面積 482 mm²
 外 徑 30.4 mm

抵 抗(25°C) 0.0611 Ω/KM
 (50°C) 0.0702 Ω/KM
 安全電流(100°C) 1.010 A
 795 MCM ACSR(Drake)
 Al 26/4.45 mm St 7/3.45 mm
 計算切斷面積 403 mm²
 外 徑 28.2 mm
 抵 抗 (25°C) 0.0729Ω/km
 (50°C) 0.0802Ω/km
 安全電流 (100°C) 900 A

(2.2) 送電線直下の 雜音 Level

晴雨天時에 있어 下段電線直下の Corona 雜音電界強
 度를 推定하는데는 大略 다음 順序에 依하였다.

(1) 電位傾度

$$E = \frac{18CV}{nr} (1 + \frac{r}{s} K_2) \quad (\text{KV/cm}) \quad \dots\dots(2.1)$$

여기서

- E : 導體表面의 最大電位傾度 (KV/cm)
- V : 對地電壓 (KV)
- n : 一相當의 導體數
- r : 導體半徑 (cm)
- s : 束導體의 素導體間隙 (cm)
- C : 線路의 作用容量

$$C = \frac{0.02413}{\log_{10} D/r_e} \quad (\mu F/km)$$

여기서

- D : 等價線間距離 (cm)
- r_e : 等價半徑 (cm)
- r_e = $\sqrt[n]{rs^{n-1}} K_1$

$$K_1 = \sqrt[n]{n / (2 \sin \frac{\pi}{n})^{n-1}}$$

K₂ : 定 數

$$K_2 = 2(n-1) \sin \frac{\pi}{n}$$

表 2.1 K₁ 및 K₂의 값

n	1	2	3	4
K ₁	1	1	1	1.09
K ₂	0	2.00	3.46	4.24

(2) 晴天時의 Corona 雜音 Level(地上高 10m 周波數 1MC)

$$N = N_s + 3.5(E - 15) + N_d \quad (\text{db}) \quad \dots\dots(2.2)$$

여기서

N : 導體外徑 d(束導體에서는 素導體半徑)의 電
 線의 E KV/cm 에 있어서 Corona 雜音 Level
 (db)

N_s : 導體外徑 30 mm 의 電線의 15 KV/cm 에 있어서 Corona 雜音 Level=43±2 (db)

N_d : 導體外徑에 따르는 補正量 (db) 圖 2.1 參照

(3) 雨天時의 Corona 雜音 Level(地上高 10 m 周波數 1MC)

(2.2)式에 의한 값에 10~20 db, 最高 25 db 를 加하면, 雨天時의 값을 求할 수 있다. 即 詳細한 것은 다음式에 依한다.

$$N' = N_s + 3.5(E - 15) + N_d' + N_e + N_r \dots (db) \quad (2.3)$$

여기서

N' : 導體外徑 d 의 電線의 E KV/cm 에 있어서 雨天時의 Corona 雜音 Level (db)

N_d : 導體外徑에 依한 雨天時의 補正量, 그림 2.1 參照

N_e : 導體表面電代點度에 對한 補正量 그림 2.2 參照

N_r : 雨天時의 Corona 雜音 增加量 普通 10~20db, 最高 25 db.

地上高 h (m), 周波數 F (mc)의 雜音 N_{hf} 로 換算하는 데는 다음 式에 依한 補正量 ΔN 를 上記值에 加算해야 한다.

$$N_{hf} = N + 20 \log_{10} \left(\frac{10}{h} \right) - 20 \log_{10} f \quad (db) \dots (2.4)$$

(4) 線路와 直角方向의 雜音 Level

線路直下에서 水平距離 x m 떨어진點의 雜音 Level 는 다음 式에 依하여 求한다.

$$N_x = N_0 \frac{100}{1 + (x/h)^2} \quad (db/m) \dots (2.5)$$

여기서, N_0 , N_x 는 各各 線路直下 및 x_m 떨어진點의 雜音 Level(db/m), h 는 電線地上高(m), 그리고 三相送電線에서는 各相의 電線에 對하여 N_0 및 N_x 의 計算을 하고, 水平距離 x 에 對해서는 第一 큰相의 N_x 의 값을 取한다.

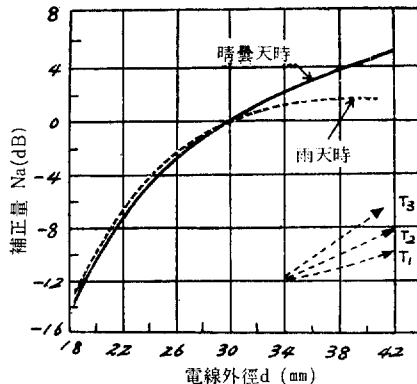


그림 2.1 補正量 N_a (db)

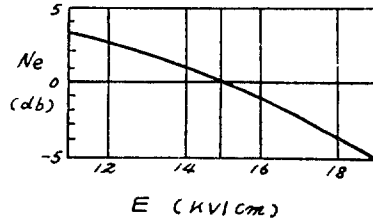


그림 2.2 補正量 N_e

(5) 計算結果(Corona 雜音 Level)

前記公式을 使用하여 各導體의 Corona 雜音을 推定結果는 아래 表 2.2 와 같으며, 許容基準值 40~70 db 範圍內에 들어간다.

表 2.2 ($h=10$ m, $f=1$ MC, $\delta=1$)

系統 電壓	345 KV	345 KV
導體種類(mm ²)	2×482	2×403
導體外徑(mm)	30.4	28.2
等價半徑(cm)	7.8	7.52
作用容量10 ⁻² (μF)	1.15	1.14
最大表面電位傾度 (KV/cm)	14.5	15.5
Corona (晴天時(db))	43	45
雜音 (雨天時(db))	64	65

(2.3) Corona 損

超高壓送電線의 Corona 損의 推定에 있어, 束導體 特別히 3 乃至 4 導體에 對해서는 現在不明確한 點이 많으나 複導體에 對해서는 下記의 計算式이 比較的 正確하게 適用될 수 있다.

(1) 晴및雨天時의 Corona 損

Corona 區界電位傾度 E_0 및 等價表面電位傾度는 各各 다음 式에 依하여 計算한다.

$$E_0 = 21.1 \delta^{2/3} \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{r}} \right) \quad (KV/cm) \dots (2.6)$$

$$E = \frac{18 CV}{nr} \left(1 + \frac{r}{S} \cdot \frac{K^2}{2} \right) \quad (KV/cm) \dots (2.7)$$

여기서 C, V, n, r, S, K_2 는 前記 2.1 式에서와 같음. 그리고 其他는,

$$\delta: \text{相對空氣密度 } \delta = \frac{0.386 b}{273 + t}$$

$$b: \text{氣壓(mmHg)} \quad t: \text{氣溫 } ^\circ\text{C}$$

晴天時의 Corona 損은 다음 式에 依한다.

$$P = 1.34 f r^2 n \sum^{8.6} \frac{E}{E_0} \times 10^{-5} \quad (KW/km 1\phi) \dots (2.8)$$

$$E/E_0 \leq 0.75$$

여기서 P : Corona 損 (KW/km 1φ)

f : 電源周波數 (∞)

그리고 高濕度時는 2 倍 即 $2 \times P$ (KW/km 1φ) 이다.

雨天時의 Corona 損은 다음式에 依하여 1時間當 降雨量이 1mm 인 境遇를 計算할 수 있다.

$$P_R = 2fr^2n(E/E_0 - 0.43)^2 \text{ KW/km}1\phi \dots (2.9)$$

$$E/E_0 > 0.55$$

(2) 年間 Corona 損 및 最大 Corona 損

年間 Corona 損은 多雨, 多雪地域을 除外하고는 一般의인 地域의 送電線路에 對해서는 다음式에 依하여 計算된다.

$$W = P.T + 2P.T + P_R \cdot R \text{ (KWh/km } 1\phi) (2 \cdot 10)$$

따라서 年平均 Corona 損 P_{ave} 는 다음과 같이 求해진다.

$$P_{ave} = W/8,760 \text{ (KW/km, } 1\phi)$$

여기서

W : 年間 Corona 損 (KWh/km 1ϕ)

T_1 : 晴天時의 年間時間 8,760-24×b

T_2 : 高濕度時의 年間時間 24(b-a)

R : 年間降水量 (mm)

a : 1mm 以上の 年間降水日數(口)

b : 0.1mm 以上の 年間降水日數(日)

(3) 計算結果

1966年 中央觀象臺 Annual Report에 依據하여 1mm 以上の 年間降水日數는 109日, 0.1mm 以上の 年間降水日數는 83日로 推定하는 同時에 線路經過地標高는 500m, 氣壓 741(mm·Hg) 氣溫 15°로 定하여 晴天, 高濕度 및 雨天時의 Corona Loss와 年平均 Corona Loss를 算出한 結果는 아래 2,3表와 같다.

表 2.3 年平均 Corona 損

系統電壓(KV)	345/345	345/345
導體種類(mm ²)	2×482	2×403
等價表面電位傾度(KV/cm)	14.1	15
Corona 臨界電度(KV/cm)	26.3	26.46
Corona 損(KW/KM-1φ)		
晴天時	0.375	0.416
高濕度時	0.75	0.832
雨天時	6.32	8.91
年平均 Corona 損(kW/KW-3φ)	3.96	5.34

(2.4) Ohm 損

電線의 溫度上昇值를 100° C 까지 許容하는 安全電流面에서 본 最大送電容量은 954MCM, ACSR 를 使用한 境遇는 2,410 MW(複導體, 2回線)이고, 795 MCM, ACSR 를 使用한 境遇는 2,140 MW 이다. 그리고 後記하는 바와 같이 長距離送電時 그 送電容量은 800 MW 이므로 1回線故障時에 殘餘 1回線에 全負荷가 걸리더라도, 上記檢討에서 判斷되는 바와 같이 電線熔斷等事故를 誘發치 않는다. 800 MW送電時의 Ohm 損은 前者에 있어 82.6 KW/KM-2ct 이고 後者に 있어서는 98.6

KW/KM-2ct 이다.

以上 各種計算結果를 綜合하면 다음表와 같으며, 電線 Size 가 작은 795 MCM ACSR 를 本 345 KV 送電線에 採擇하여도 아무런 支障이 없다는 結論을 내릴 수 있다.

表 2.4 各種損失 및 Corona Noise Level

電線	電流送電容量 MW	Ohm 損 KW		年平均 Corona 損 KW		全損失		Corona 雜音 db	
		KM-3	全體	KM-3φ	全體	KW	晴天	雨天	
954MCM	2,410	41.328	860	3.96	2,760	31,620	43	64	
795 "	2,140	49.334	400	5.34	3,720	38,120	45	65	

1. Ohm 損은 電線溫度를 25°C로 假定한 電氣 抵抗值에서 算出함.
2. Corona 雜音 Level는 最惡에 가까운 數值이며, 普通은 2~5 db 낮은 數值일 것임.
3. 線間距離는 9,820 mm, 複導體間隙은 400 mm로 確定함.
4. 定電壓送電方式이며 送受電電壓은 같은 345 KV 임

3. 絕緣設計

本項에서는 耐雷設計全般에 關한 것이 아니고, 앞으로 線路定數計算에 必要한 線間距離를 定하는데 關係하는 것만 限해서 檢討기로 한다.

(3.1) 絕緣間隙

(1) 對地絕緣間隙(Clearance)

線路의 開閉고 因하여 誘起되는 開閉 Surge 의 크기를 系統電壓의 最高值의 2.5 倍로 推定하여, 線路異常電壓에 견디도록 設計하였다.

Clearance 所要絕緣強度는 아래와 같은 方法으로 求할 수 있다.

$$345KV \times 1.05 \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} (\text{最高許容 對地運轉電壓}) \times 1.1 (\text{標高에 依한 低下係數}) \times 1.11 (\text{鐵塔取付影響等으로 因한 低下係數}) \times 1.15 (50\% \text{ Flash Over Voltage 와 耐壓과의 比}) \times 1.15 (\text{全體의 裕度}) \times 2.5 (\text{開閉 Surge 倍數} = 1,180 \text{ KV})$$

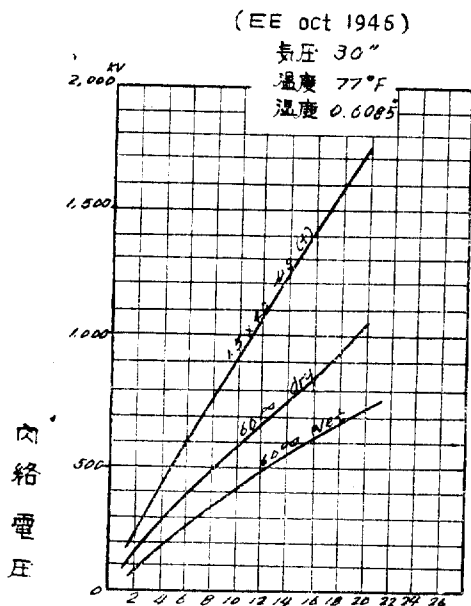
本所要絕緣強度 1,180 KV 에 該當하는 Clearance 距離를 求하면 그림 3.2에서 1,900 mm 가 된다.

所要碍子個數는 碍子連의 間隙能率로서 0.75를 取하면 18個가 된다. 그리고 碍子連길이에 該當하는 距離를 標準 Clearance 距離로서 採擇하면 그 값은 2,700 mm 가 된다.

本碍子個數는 1~2個의 餘備를 勘案한 數字라고 看做할 수 있으나 海岸地帶를 通過하는 線路로서 鹽害의 影響을 받은 地帶에 對해서는 碍子個數를 좀더 增加해야 할 것이다.(表 3.1 參照)

表 3.1

系統電壓 (E) (KV)	碍子所要絶緣強度(KV)	所要碍子個數 (個)	碍子電波衝擊閃絡電壓(KV)	絶緣裕度	Clearance 所要絶緣強度 (KV)	所要間隙 (mm)	最小間隙 (mm)	標準間隙 (mm)
345	1,400	18	1,610	1.15	1,180	1,900	1,900	2,700



碍子連括個數

그림 3.1 254×146 mm 碍子個數와 閃絡電壓

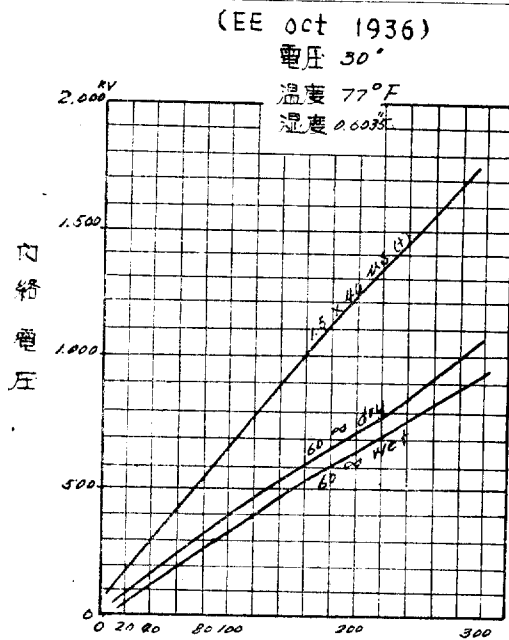
그리고 18개의 碍子連의 注水時의 60~異常電壓에 對한 耐壓強度는 그림 3.1에서 680 KV이며 $2\sqrt{2} \times 345 \text{ KV} / \sqrt{3}$ 의 2.2 배에 該當하므로 後記 60~異常電壓에 對한 檢討에서 判明되는 바와 같이 그 배數는 2.0 배以下이므로 本角度에서 檢討하여도 18個의 碍子連은 充分한 耐壓度를 가진 것을 알 수 있다.

그리고 鐵塔設計에 있어 電線橫振이 20度 未滿에서는 標準間隙을, 50°에서는 最小間隙을 採擇하여 線間距離를 定하였다.

(2) 線間距離

線間距離는 強風이 불어 電線이 振動하는 最惡條件下 即 相互間의 間隙이 가장 接近하였을時, 異常電壓이 發生하여도 線路運轉에 支障이 없어야 한다. 最近 Bellashi 가 線間에 對한 閉閉 Surge 로서 最高運轉電壓의 4 배값을 考慮하여 最小線間距離를 提案하고 있는데 380 KV 에 對하여 4.4 m 를 推薦하고 있다.

345 KV 鐵塔에 있어 線間距離를 檢討해보면, 其他送電電壓用鐵塔에 있어서와 마찬가지로 對地絶緣間隙(即 Clearance Diagram)에서 決定되는 線間距離로서 充分하면, 即 이 距離는 上記値보다 相當한 餘裕가 있는 數值



間隙長 (Cm)

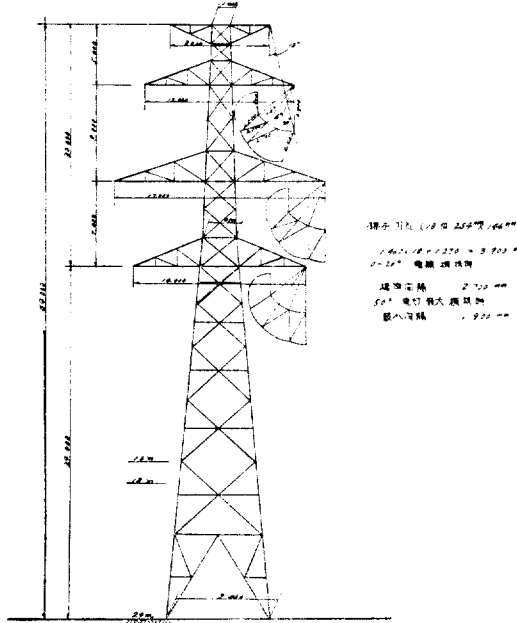
그림 3.2 棒間隙의 閃絡電壓

가 된다.

(3) 電線地上高

既設 154 KV 送電線의 道路 또는 隧道橫斷個所에 있어 最低높이는 6 m 를 許容하고 있다. 154 KV 에 있어 消弧線輪中性點接地時는 750 KV 의 BIL 가 所要되고 對地最小絶緣間隙은 150 cm 이고, 中性點 直接接地時는 650 KV 의 BIL 가 所要되고 對地最小絶緣間隙은 130 cm 가 된다. 그리고 345 KV 의 對地最小絶緣間隙은 190 cm 이고 한便 外國의 380 KV 送電線의 地上高許容値는 9 m 를 推薦하고 있으므로 將次 우리나라에 建設될 345 KV 線路의 道路 또는 軌道橫斷個所의 最低電線 높이도 9 m 로서 充分하다고 본다.

以上의 絶緣間隙檢討에 따라 345 KV 送電用鐵塔의 腕金寸數 및 地線높이等 決定하면 付圖 I 과 같으며, 架空地線의 鐵塔位置에서의 遮蔽角은 13度이며 等價線間距離는 9,750 mm 이다. 그리고 束導體의 素導體間의 間隙은 外國의 實例에 따라 400 mm 치를 採擇하였다. (實地計算에 使用된 等價線間距離는 上記數値와 別差가 없는 始初 決定한 數値인 9,820 mm 를 採擇하였다. 對數로서 計算結果에 影響을 미치므로 計算結果에 큰 差異



附圖 I 345 KV 2回線, 複導體 A型
標準徑間 300~350 m scale=1/200

는 없다)

4. 線路定數

前記한 檢討結果에 따라, 345 KV의 使用電線은 AC-SR 795 MCM 로 定하고 等價線間距離는 9,750 mm 複導體의 素導體間隙은 400 mm 로 決定하여, 線路定數를 計算한다.

(4.1) Inductance 의 計算

使用公式

$$L_n = \frac{1}{n} \left(0.05 + 0.4605 \log_{10} \frac{S^n}{r_n m^{n-1}} \right) \text{ (mH/KM)}$$

여기서

n : Bundle Conductor 數	2
S : Geometrical Mean Distance	9,750 mm
m : Conductor Spacing	400 "
r_n : Radius of conductor	14.1 "

따라서

$$L_n = \frac{1}{2} \left(0.05 + 0.4605 \log_{10} \frac{9,750^2}{14.1 \times 400} \right) = 1.00 \text{ (mH/KM)}$$

따라서 Reactance(x)는

$$x = 2\pi f L_n \times 10^{-3} = 2\pi \times 60 \times 1.00 \times 10^{-3} = 0.376 \text{ (}\Omega/\text{KM)}$$

그리고 Impedance(z)는 (電線溫度 50°C 의 抵抗值를 取함)

$$z = r + j\omega L = 0.04005 + j0.376 \text{ (}\Omega/\text{KM)}$$

(4.2) Capacitance 의 計算

使用公式

$$C_n = \frac{0.02413 n}{\log_{10} \frac{S^n}{r_n m^{n-1}}} \text{ (}\mu\text{F/KM)}$$

여기서 諸定數의 數値는 前記 Inductance 計算式에서 와 同一함.

따라서

$$C_n = \frac{0.02413 \times 2}{\log_{10} \frac{9,750^2}{14.1 \times 400}} = 0.0114 \text{ (}\mu\text{F/KM)}$$

따라서 Susceptance(b)는

$$b = 2\pi f C = 2\pi \times 60 \times 0.0114 \times 10^{-6} = 4.30 \times 10^{-6} \text{ (}\Omega/\text{KM)}$$

따라서 Admittance(g)는 (但 Leakage conductance는 通例에 따라 零으로 봄)

$$g = 0 + j\omega c = 0 + j4.30 \times 10^{-6} \text{ (}\Omega/\text{KM)}$$

(4.3) 零相 Inductance

大地歸路의 零相 Inductance 의 값은 相當大地面 깊이에 따라 變化하며, 또 相當 大地面 깊이는 地質에 따라 變化하므로 正確한 Inductance 의 값은 實測에 依한 方法以外에는 大端히 求하기 힘들다.

2回線인 境遇의 6線一括大地歸路即零相 自己 Reactance(x_{06})는 1回線의 3線一括大地歸路 自己 Reactance(x_{03})와 兩回線間의 零相相互 Reactance(x_{0m})와의 間에 다음 關係式이 成立된다.

$$x_{06} = \frac{1}{2} (x_{03} + x_{0m})$$

따라서 美國의 345 KV 超高壓線路에 關한 線路定數集에서 가장 가까운 條件下에 있는 x_{03} 와 x_{0m} 의 값을 求하면 $x_{03} = 1.071 \Omega/\text{KM}$, $x_{0m} = 0.492 \Omega/\text{KM}$ 이므로 따라서 $x_{06} = 0.782 \Omega/\text{KM}$ 가 된다.

多角度로 檢討한 結果 過渡安定度計算에서는 本數値를 採擇하였다.