

實用送電線工學

Chain

Practical Transmission Line Engineering

准會員 金 尙 哲

I 導線의種類와 寸法の選定

送電線 敷設費中 導線費는 普通 全費用의 40% 以上을 차지하는 가장 重要한 것임으로써 送電線 設定时에는 導線의種類 及 寸法을 選定하는것이 가장 深重히 研究하여야 할 問題이다.

그럼으로 實際로 送電線을 設計할때에 導線의 種類를 選擇하는것은 建設費를 節約할 點은 勿論이요 한겨름 더나가서 各種 導線材料의 電氣的 及 機械的 特性에對하여 그 優劣을 詳細히하고 各材料의 長所를 어디까지 하면 充分히 活用할수있는가 하는에 重點을 두지 않으면 안된다. 이것을 具體的으로 說明할 다면

- (1) 送電線의 重要程度
- (2) 送電電線의 大小와 電壓과의關係
- (3) 導線外徑의 大小에關한安全電流
- (4) 導線 Reactance 와 容許電壓降下率과의關係
- (5) 線路經過地의 높이에依던 Corona 電壓과의關係
- (6) 鐵塔用地價格과 鐵塔數의 關係
- (7) 經過地가 山間 平野 河川等으로因한標準 Span 의 採用關係
- (8) 經過地가 汚穢이나 化學工場地帶같이電氣를 腐蝕하는 有害한 區域이있는 特別地帶을 包含할때에는 導線의 耐蝕性
- (9) 經過地의 風壓의 大小
- (10) 經過地의 氷雪의 狀態
- (11) 導線의 震動現象과 耐震性
- (12) 導線取扱의 難易와 運搬上의 難易
- (13) 導線 觸의 難易
- (14) Arc 에 對한 熔斷의 難易
- (15) 國産品으로 材料를 自給할수있는가하는 問題

等 其他 여러가지 問題가있다. 實情은이 모은 設計條件을 充分히 加味하고 既設送電線과의關係 及 將來에 있어서의 發展系統과의 關係를 充分히 考慮한 線路經過地를 詳細히 調査하여 地域的實情을 把握하고 既設送電線의 貴重한經驗을 參考하여 아울러 製作者의 意를을 뜻는等, 充分히 研究하여야 할 것이다.

다음에 導線의寸法을 選定하는 點에 考慮하여야 할 點을 든다면

- (1) 經濟的인 許容電力損失 (Kelvin 法則)
- (2) 電線路의 電壓降下
- (3) 導線의 安全電流
- (4) 導線의 Corona 電壓
- (5) 機械的 強度

等이다.

(A) Kelvin 法則

電線의寸法을 決定하는 基本原理로써 Kelvin 法則이 있다. 卽 Kelvin 法則은 다음과같다.

電線路 1 km 內에서 一年間에 消耗되는 損失電力費를 그線路 1 km 建設費의 割子及償却의計와같이 할수있는 電線의 寸法이 가장 經濟的이다.

그中에서 導線의 電力損失이라는것은 I²R 損失 碍子損失 Corona 損失等 여러가지가있으나 I²R 損失에 比하면 다른損失은 無視하여도 相關이 없으리만큼 적음으로 電力損失을 最大送電電力 負荷率 負荷力率等を 適當히 考慮하여 I²R 損失만을 適當히 計算하면 된다.

또 電線이 굵어지면 이에따라 支持物의價格도 高價하여지고 相當히 複雜하여지는 關係로 支持物의價格은 電線의寸法과 無關係하다는 假定下에 計算하는것이 普通이다.

事實上 電線의 줄기에는 어느程度 餘裕를 두고 鐵塔을 設計하는故로 이假定은 實地에適合한것이다.

償却年限은 여러가지 意味에있어서 綫路壽命에依하여 決定되고 大体로 30乃至 40年을採用한다. 또 導線은 廢物이되여도 高價인것임으로 償却에있어서도 考慮하여야할 問題이다.

Kelvin 法則에 依하면 電線 1 Km 에對한가장 經濟的인 抵抗電壓降下 (Ohmic drop of Pressure) 即 IR 是 電力費와 電線費及利子 그리고 償却에依하여 決定되고 實地에 電壓이나 電流 送電力 電線數 電氣方式에는아오 相關이없다. 即

- M=電線1Kg 의價格(圓)
- N=電力1Kw年의價格(圓)
- P=一年用의利子와償却(%)
- A=電線의切斷面積 (mm²)
- Vr=抵抗電壓降下 (V)
- f=電流密度(A/mm²)

라하고 硬銅線에 關하여 計算하면 硬銅線의密度는

$$8.89 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}^3$$

固有抵抗은

$$1 \sim 55 \Omega \cdot \text{m} \cdot \text{mm}$$

電線 1m內의 損失電力은

$$(fA)^2 \times \frac{1}{55A} \times 10^{-3} \text{ (Km)}$$

電線 1m 의 重量은

$$8.89 \times 10^{-3} A \text{ (Kg)}$$

Kelvin 法則에依하여

$$(fA)^2 \times \frac{1}{55A} \times 10^{-3} \times N$$

$$= 8.89 \times 10^{-3} A \times MP \times 100$$

$$\therefore f = \sqrt{\frac{8.89 \times 55 MP}{N}}$$

$$Vr = fA \times \frac{1}{55A} = 59.7 \sqrt{\frac{PM}{N}}$$

即 Vr 은 電壓 或은 電流에關係없이 決定될수있다. 以上은 硬銅線에對하여 算한것인데 아리미늄線에 있어서는 다음과같다.

$$Vr(Ac) = 41.4 \sqrt{\frac{MP}{N}}$$

以上 說明하 經濟的抵抗電壓降下는 電線의 줄기를 選定하는 첫階段에있어 가장 重要한 要素의 하나이다. 그리고 送電力과 送電力壓이 決定되면 電流 I 는 決定되고 電線의抵抗도 따라서 固定됨으로 電線의 줄기는 決定되는것이다. 電流 I 를 平均送電力으로 計算하면 電力損失은 電流의自乘에 比例하는故로 最大電力送電時에는 損失電力은 훨씬 커진다 다시말하면 發電所의 Peak 出力은 그만큼 커어진다. 그러므로 發電所의 Peak 出力問題를 加味하면 送電線의 電線줄기는 Kelvin 法則에 서 決定된것보다 若干 줄게하면 有利하다.

(B) 電線路의 電壓降下

電線路의 許容電壓降下는 線路의長短 負荷의性質 電壓調整裝置의有無等 線路運用上의實情에 依하여 適當히 選定할수밖에없다. 電線路의 電壓降下에 對하여서는 導線이 가늘면 抵抗의大小에 影響을받으나 導線이 굵거지면 負荷力率에도 關係있지만 電線路의 Reactance 에 依하여 크게 左右된다.

電線路의 Reactance 를 減小하려면 아리미늄線이나 或은 中空導線等을 使用하면 같은導電率의 銅線보다 外徑이 크기때문에 Reactance 는 大略 5-7% 減小할수있으나 現在에있어서는 電壓降下率의調整을 導線의種類나 줄기에 求하기보다는 다른 方式으로 求하는것이 普通이다. 即 例를든다면 電線을 折半式나 두어 2回線으로하여 Reactance 를 折半으로 하든가 或은 Condenser 같은것으로 負荷力率을 調整하며 Reactance 로인한 電壓降下를 調整하는 등 여러가지 方式이있다.

何於間 電壓降下問題는 電線의材料나 或은 줄기를 選定하는때에 重要한 決定的要素는않이다.

(C) 導線의 安全電流

導線의 許容安全導流는 綫路設計又次後運用에있어 가장重要하고 主 計算方法도 簡單치않음으로 章을달리하여 說明키로한다.

(D) 導線의 Corona 電壓

F. W. Peck 氏에依하면 晴天時에 破壞極限電壓 (Disruptive critical voltage) E_0 는 다음式으로 計算된다.

$$F_0 = 2.302 M_0 g_0 \rho r \text{Log} \frac{S}{r} \text{KV} \text{實効値}$$

여기서

F_0 一線과 大地間의 破壞極限電壓(KV)

M_0 導線의 表面不規則率

(Irregularity factor)

= 0.8 新燃線

= 0.87 (어느程度使用된燃線)

= 0.95 (어느程度使用된單線)

g_0 25°C 때의 空氣의 破壞極限電位傾度

= 21.1 KV 實効値(一線과 大地間)

$$\rho = \frac{0.392 \times b}{273 + t}$$

= 海面부터의 高度(Altitude)와 溫度即空氣密度等으로 因한 定數

= 1 (25度C, 氣壓 76cm時)

b 大氣壓(mm)

t 溫度(°C)

s 等價線間中心距離 (Equivalent Spacing)

= $\sqrt{VA} \sqrt{BC}$ (各線間距離를 A B C 라고

假定할때 (mm))

= 1.26A (三相對稱 水平配置送電線)

r 導線의 半徑(mm) 이다.

다음 導線 1km 線에對하여 晴天時에 Corona 損失 P 는 다음式으로 計算된다.

$$P = \frac{241}{\rho} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{S}} (E - F_0)^2 \times 10^{-5} \text{kw}$$

여기에서

f = 周決數

F = 一線과 大地間의 使用電壓 (KV) 實効値이다.

以上 說明한 電壓은 中性點에對한 電壓이다 그러므로 兩線間의 電壓을 求할려면 三相式에 있어서는 1.73 倍 單相에 있어서는 2 倍를 하된다.

그리고 高地의 標準氣壓은 大略 다음表와 같다.

海面上부터 높이	b
0m	760
500m	711
1000m	668
1500m	627
2000m	590
3000m	521
3500m	489

暴風雨時에는 Corona 損失은 커지고 그破壞極限電壓은 晴天의 F_0 의 80% 可量이다.

Corona 現象에 關聯하여 導線의 寸기를決定할때에는 그使用電壓이 晴天時의 破壞極限電壓以下가 되도록 選擇하면 좋다.

Corona 가 發生하면 近處에 있는 電話線의 誘導로 말미암아 通信은 不能케 된다. 特히搬送電話는 이影響을 많이 받음으로 暴風雨가 甚한 地方에서는 重要한 問題의 하나이다.

最近에는 破壞極限電壓以下에 있어서도 Local Corona 가 發生하여 그損失도 적지 않은 것으로 注目되고 있다.

(F) 機械的 強度

日帝時代의 特別高壓送電線에對한 電氣工作物規定으로는 直徑 5mm (切斷面積 19.64mm²)의 硬銅線 或은 이와同等以上의 寸기를 가진 裸線을 使用하지 않으면 안되거나 使用導線의 寸기에는 最小限度가 있다.

一般으로 電線路의 許容最大 Span 은 導線의 寸기나 그抵抗力에 따라 커지거나 Long Span 이 많은 線路에는 多少 中間導線을 使用하는 것이 便利하다.

또 그電氣工作物規定에 있어서 導線의 機械的 張力에對한 設計安全率은 使用電壓 66KV 以上인 境界에는 銅線은 120 mm² 以上 鋼心아 루미늄線은 150 mm² 以上으로 하고 安全率이 2.0 부터 2.5 로 變하리 對하여는 注意하지 않으면 안된다.

以上 論하자는 單純한 送電系統에서 一定한 電力을 一定한 負荷曲線에依하여 輸送하는 境遇에는 相當히 適合한 斷定을 내릴수 있으나 一般送電系統에 있어서는 將次의 發電力增加 負荷의變動 他系統과의 聯繫 及 電力融通等 各種問題가 있어 線路의 利用率을 明確히 豫想하기 어려우니까 오히려 許細한 經濟的 比較에 徒勞하기보다는 送電系統의 大局을 把握하여 數種의 標準電線을 制定하며 必要에

依하여 그中 가장 모-든條件에 適合한線을 選擇하여 使用하는것이 設計上 購入上或은 保守上 便利한點이 많다.

II 導線의 安全電流

架空送電線에 있어서 導線의 安全電流를 아는것은 單只 導線의 굵기를 決定할때에 必要할뿐만 아니라 平素 線路運用하는때 있어 時時로 모-든狀態에對한 安全電流가 必要한것이다. 特히 現時같이 既設設備는 固定하고 需要는 增加하는때에는 各送電線의 安全電流를 充分히 研究하여 既設設備를 安全한 範圍內에서 充分히 活用하지 않으면 안된다.

架空線의 安全電流를 算出하는데 있어서 記憶하여야 할것은

- (1) 導線의 最大許容溫度
- (2) 導線의 無負荷溫度
- (3) 導線의 許容溫度上昇
- (4) 導線의 電流와 溫度上昇의 關係

(A) 導線의 最大許容溫度

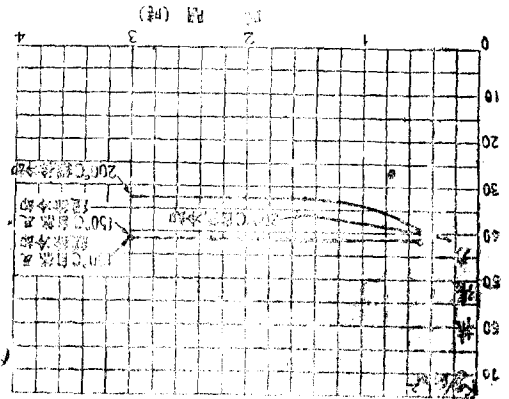
架空線의 最大許容溫度를 決定하려면 어-도 兩가지를 考慮하지 않으면 안된다. 第一은 導線自身의 溫度上昇에 依한 機械的性質의 變化이고 第二는 導線의 溫度上昇으로 인한 周圍의 影響이다.

導線은 어느 溫度以上 過熱하면 Annealing 되어 機械的強度가 떨어지는 傾向이 있다. 送電線에서 導線의 機械的強度는 生命이라 할 만치 重要한것이니까 萬若強度가 떨어지면 큰일이다.

硬銅線의 加熱溫度와 抗張力과의 關係는 日本 電氣試驗報告에 依하면 硬銅線은 大略 150°C 前後까지 加熱하여도 過히 抗張力에는 影響이 없다는것이 確實하다. 第1圖는 直徑 4.12 mm 線에對하여 加熱時間 加熱溫度及 冷却方式이 導線의 抗張力에 끼치는 影響을 調査한 것이다. 이에 依하면 加熱溫度 200°C 이라도 短時間이면 材料에는 큰 影響이 없으나 實用上으로는 150°C 를 安全限度라고 感覺되는바이다.

다음 導線의 上昇溫度가 周圍器具材料에 끼치는 影響인데 그中 導線에 近接되어 있는 絶緣物 即 碍子같은것은 相當히 加熱될 念慮가

있다. 一般內으로 絶緣物이라는것은 使用溫度가 높아가면 絶緣力이 低下한다는것은 새삼스러히 말할 必要도 없지만 特히 磁器에 있어서는 그 影響이 70-100°C 前後부터 急速히 甚하여 가기 때문에 設使 局部的인 加熱일지라도 避하여야 할것이다.



또 發變電所 開閉所 등에서 導線의 溫度上昇으로 인하여 이에 連絡되어 있는 變壓器나 油入 遮斷器 등의 Bushing 을 加熱하고 斷路器 등의 接觸面을 損傷시키고 Terminal 等の 接屬金屬을 軟化시키는 傾向이 있으나 充分히 警戒하여야 한다.

이런 點으로 본다면 導線溫度의 限度에는 여러 가지 議論이 있겠지만 大略 70°C 以下에 制限하는것이 安全할 것 같다.

導線의 使用溫度와 重大한 關係가 있고 送電線設計上 或은 運用上 特히 考慮하여야 할 問題는 導線의 弛度 (Droop) 에 끼치는 影響이다. 導線이 溫度上昇에 따라 伸張하는故로 線路의 弛度는 增加하여 導線과 地上物과의 間隔은 後章에서 說明하겠으나 그 間隔에는 許容最小限度가 있다. 그러므로 導線의 最高使用溫度를 높게 選定하면 그만큼 支持物의 높기도 높게 하지 않으면 안된다. 支持物의 建設費는 높이에 二乘이나 或은 三乘에 比例하여 끼치니까 導線의 最高溫度에도 經濟的 限度가 있다. 送電線設計時에는 大體로 最高溫度를 5)~70°C 로 하는것이 普通이다.

(B) 導線의 無負荷溫度

架空電線에 電流가 흐르지 않을때의 導線溫度를 便宜上 無負荷溫度라고 한다. 導線의 無負

荷溫度는 周圍空氣 溫度와 接密한 關係가 있다는 것은 勿論이다. 또 導線이 晝間太陽의 直射을 받으면 加熱作用으로 無負荷溫度는 周圍溫度보다도 若干 높다. 特히 夏節에 이現象이 顯著하다.

實驗結果에 依하면 無負荷溫度는 太陽熱의 吸收로 因하여 11°C 內外도 上昇하는 일이 있다. 太陽直射의 加熱效果는 導線에 電流가 흐르면 그現象의 相當히 變化한다는 것은 注目할 만한 事實이다.

即 어느 實驗結果에 있어서는 無負荷溫度가 周圍溫度보다 8°C 나 太陽直射로 加熱되었을 때에 溫度는 3°C 程度에 達하는 電流를 通하거나 溫度上昇은 不過 2-3°C 였다 한다.

(C) 導線의 許容溫度上昇

導線의 許容溫度上昇은 最高溫度와 無負荷溫度와의 差가 結局 無負荷溫度와 導線의 最高許容溫度만을 알면 된다.

無負荷溫度를 實地的으로 決定하려면 地方 實情에 따라 다른 것은 勿論, 그 線路運用上 最大電流가 흐르는 時期와 時間等을 參的하지 않으면 않된다. 普通 三伏 晝間에 最大電流를 通한다는 것은 勿論이고 大體 여름 저녁 周圍溫度가 떨어졌을 때에 흐른다.

그러므로 送電線設計에 있어서는 30°C 及至 40°C 를 導線의 溫度上昇으로 計算하면 適當하다고 生覺한다.

또 電流가 繼續的으로 變化할 때에는 溫度上昇은 좀더 樂載하여도 無關하다고 生覺한다.

(D) 導線의 電流와 溫度上昇과의 關係

導線에 電流가 흐를 때에 Chmic Loss 에 依한 熱量은 普通 對流 輻射로 因하여 放散되고 그 比率은 大略 二對一이다.

對流에 依하여 導線表面에서 放散하는 熱은 導線의 굵기 形狀 溫度 風速과 그 方向 氣壓等으로 因하여 變化한다.

輻射로 因하여 放散하는 熱은 導線溫度의 影響이 가장 크고 또 그 表面狀態에 依하여서도 다르다. 例를 들면 새 電線과 長時間使用하여 表面이 黑色으로 變化的한 導線과는 倍以上의 差가 있다.

導線의 電流와 溫度上昇과의 關係를 表示하는 數式은 理論的인 것과 實驗的인 것等 여러 가지가 있으나 그中 가장 實用的이고 簡便한 것은 G. F. Luke 氏의 實驗式이다.

即
$$I^2 R = \pi d L K T$$

- 여기서
- I = 安全電流 (A)
 - R = 最終溫度時에 Lmm의 導線의 抵抗(Ω)
但 直徑이 크면 表皮作用(Skin Effect)는 考慮할 必要가 있다.
 - d = 導線의 外徑 (mm)
 - L = 導線의 거리 (mm)
 - K = 放散係數 (Watt/mm²/°C)
 - T = 溫度上昇 (°C)

이다. 이식의 左邊은 電流에 依한 Ohimic Loss 이고 右邊은 電線의 表面에서 放散하는 熱量을 表示하는 것이다.

이兩者가 Balance 할 때가 即 導線의 溫度上昇이 落着하는 때다. 또 이 放散係數 K는 對流及 輻射에 依하여 放散하는 熱量을 表示하는 것인데 天氣 風速 導線의 外徑 溫度 表面狀態等에 依하여 相當히 變化하는 것이다. 그러므로 이를 簡單히 表示하기는 困難하다.

實地에 있어서 天氣는 一定치 않고 大略을 아는 데는 充分하다. 注意하여야 할 것은 같은 表面積이라도 外徑이 적을 수록 放散度는 커지는 것이다. 그리고 K는 導線의 種類에 依하여 큰 差異가 없으니 이 것으로서 普通 各導線의 安全電流를 計算할 수 있다.

다음表는 架空送電線用 硬銅機線과 銅心아류미늄線에 關한 機械的인 風度와 安全電流를 表示하는 것이다.

第一表 架空送電用硬銅熱線表

公稱切斷面積 (mm ²)	熱線構成 熱線數/素線直徑 (mm)	計算切斷面積 (mm ²)				一線最大거리 (m)	安全電流 T=40°C (A)
			重量 (kg/KM)	20°C時의 抵抗 (Ω/km)	抗張力 (kg)		
300	19/4.5	321	2719	0.05955	11460	500	910
240	19/4.0	238.8	2148	0.07531	9178	600	780
180	19/3.5	182.8	1645	0.09838	7115	800	650
150	19/3.2	152.8	1375	0.1177	5994	1000	590
125	19/2.9	125.5	1129	0.1433	4959	1200	510
110	7/4.5	111.3	1002	0.1616	4222	500	470
90	7/4.0	78.99	791.3	0.2044	3381	600	410
70	7/3.5	67.35	605.9	0.2670	2621	800	340
55	7/3.2	56.29	514	0.3195	2208	1000	300
45	7/2.9	46.24	416.0	0.3890	1827	1200	260
38	7/2.6	37.16	334.4	0.4840	1480	1200	230
31	7/2.3	29.09	261.7	0.6185	1167	1200	190
22	7/2.0	21.99	197.9	0.8178	888.9	1200	160

第二表 鋼心 아류미늄線表

公稱切斷面積 Circular mil	아류미늄 切斷面積 mm ²	相當硬 銅總面積 mm ²	熱線構成		直徑 mm	重量 kg/km	20°C時의 抵抗 Ω/km	抗張力 kg	安全電流 T=40°C A
			아류미늄 線數/外徑mm	鋼心 線數/外徑mm					
795000	402.8	253.3	54/3.08	7/3.08	27.72	1524	0.0712	11260	670
715500	362.6	227.8	54/2.92	7/2.92	26.28	1369	0.0790	10110	620
666600	337.7	212.4	54/2.82	7/2.82	25.38	1277	0.0853	9030	600
636900	323.1	202.7	54/2.76	7/2.76	24.84	1217	0.0889	8580	565
556500	282.0	177.3	26/3.72	7/2.89	23.55	1140	0.1020	10810	535
50000	253.3	159.2	30/3.28	7/3.28	22.96	1165	0.1138	9720	500
477300	241.7	152.0	26/3.44	7/2.68	21.80	977.3	0.1191	9570	480
397500	20.3	126.5	26/3.14	7/2.44	19.88	913.8	0.147	6210	433
333400	170.6	107.2	26/2.89	7/2.25	18.3	690.0	0.1689	5340	383
300000	152.2	95.80	26/2.73	7/2.12	17.28	614.4	0.1896	4750	360
266800	135.1	85.03	6/5.35	7/1.79	16.07	510.9	0.225	3780	330
0000	107.2	67.42	6/4.78	1/4.78	14.34	433.5	0.2676	3110	285
000	85.03	53.48	6/4.24	1/4.24	2.72	346.3	0.3335	2385	245
00	67.42	42.39	6/3.79	1/3.79	11.37	274.6	0.4244	2140	215
0	53.48	33.61	6/3.37	1/3.37	10.11	217.9	0.5376	1690	185