

論 文
18-6-2

共通中性線 3相4線式 配電線路의 中性線 電位上昇에 關한 研究

Researches on the Potential Rises on the Neutral Line in Three-Phase, Four-Wire Distribution Line Systems

朴 永 文*
(Young Moon Park)

[ABSTRACT]

The thesis has derived the formulas and computational algorithms useful for predicting and constraining the potential rises on the neutral line in 3-phase, 4-wire distribution line systems in the case of contact faults and single-line grounding faults.

In addition it has suggested economically optimal designing conditions herewith of the distribution line systems in conjunction with the potential restraining cost functions.

序 論

우리나라의 現行 3相3線式 配電線路는 1차 13.2/22.9 KV, 2차 220/380V로 昇壓함과 동시에 電氣方式도 1차 및 2차 모두 3相4線式으로 變更하게 되었다.

이에 특히 問題가 되는 것은 異常狀態에 있어서의 需用家 中性線의 電位上昇과 通信線路에 對한 電磁誘導障害이다. 中性線의 電位上昇을 어느 許容限界值 以下로 억제하기 위하여 中性線에는 多重接地를 施行하고 1次 中性線과 2次 中性線은 柱上變壓器 位置에서 共通으로 連結하게 되어 있다.

中性線에 電位上昇이 發生하는 原因으로서는

- a) 高低壓 混觸
- b) 1次電壓線의 地絡
- c) 2次電壓線과 中性線間의 混觸
- d) 2次電壓線의 地絡
- e) 負荷의 不平衡에 의하여 中性線을 흐르는 零相電流
- f) 直擊雷 및 誘導雷
- g) 開閉 surge

등을 들 수 있다.

그런데, 中性線의 電位上昇은人命의 安全과 財産의 保護와 密接한 關係가 있으므로 되도록이면 最小值로 억제하는 것이 좋겠으나 配電線路의 經濟性과는 相反되므로, 經濟性을 考慮한 合理的인 電位上昇最高許容值를 決定하는 것이 問題의 焦點이 되고 있다.

이 電位上昇最高許容值를 豫測하는 方法으로는

- 1. 實系統에서의 實測 方法
- 2. A.C. board 또는 D.C. board 등의 模擬回路에 의

한 Simulation 方法

3. 純解析的 方法

4. 위의 3方法의 1部 또는 全部를 組合한 方法 등이 있다. 그런데 1의 方法은 가장 初步的이라 하겠으며, 2의 方法은 模擬回路에서 分布相互 inductance를 實現하는데 難點이 있으므로 結果值에 正確을 期할 수 없다.

따라서 本 研究에서는 3의 方法으로 주어진 配電系統에 對하여 中性線의 最高電位上昇值를 豫測하는 解析法 (analysis)과 最高許容電位上昇值가 주어졌을 경우 가장 經濟的인 線路設計를 達成하는 條件(synthesis)를 究明하는데 있다.

그러나 于先 本 研究에서는 線路의 單位長當 多重接地值가 線路에 따라 均一하고, 單位長當 多重接地費用도 平均的으로 一定하다는 가정하에 理論을 展開하고 아울러 이에 의한 計算 algorithm을 提示하는데 그치고 그렇지 아니하는 보다 一般的인 경우에 對한 것은 다음 機會에 發表하기로 한다.

本 論

1. 回路定數의 決定

그럼 1에서 大地歸路의 單位長當 電壓線 自己 impedance를 Z_p , 中性線 自己 impedance를 Z_n , 電壓線, 中性線間의 相互 impedance를 Z_m 라 할 때,

$$Z_p = R_p + j\omega L_p \dots\dots\dots(1)$$

$$Z_n = R_n + j\omega L_n \dots\dots\dots(2)$$

$$Z_m = j\omega M \dots\dots\dots(3)$$

이며, 각 inductance는 Carson-Pollaczek의 公式에 의하여

$$L_p = \left[\left\{ 2l_n \frac{2}{Kr_p} - 0.1544 + 0.5\mu_c + \frac{4}{3} \sqrt{2} kh \right\} \right]$$

*正會員 : 서울工大電氣工學科助教授

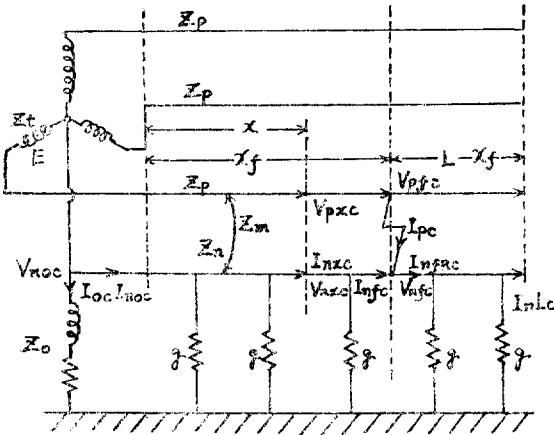


그림 1. 高低壓 混觸 回路圖
Fig. 1. Circuit for Contact Fault in Three-Phase, Four-Wire Distribution Line

$$-j \left[\frac{\pi}{2} - \frac{4}{3} \sqrt{2} h \right] \times 10^{-4} [\text{H/km}] \dots\dots\dots (4)$$

$$L_n = \left[2 l_n \frac{2}{kr_n} - 0.1544 + 0.5 \mu_c + \frac{4}{3} \sqrt{2} kh \right]$$

$$-j \left[\frac{\pi}{2} - \frac{4}{3} \sqrt{2} h \right] \times 10^{-4} [\text{H/km}] \dots\dots\dots (5)$$

$$M = \left[2 l_n \frac{2}{kd} - 0.1544 + \frac{4}{3} \sqrt{2} h \right]$$

$$-j \left[\frac{\pi}{2} - \frac{4}{3} \sqrt{2} kh \right] \times 10^{-4} [\text{H/km}] \dots\dots\dots (6)$$

但, r_p, r_n, d : 電壓線, 中性線의 半徑[m] 및 電壓線과 中性線間의 기하학적 平均距離[m]

$$\kappa = \sqrt{4\pi 6\omega} \times 10^{-7}$$

σ : 大地導電率[v/m]

h : 配電線의 地上高[m]

μ_c : 導線의 比導磁率

와 같다.

主變壓器의 impedance Z_i 는

$$Z_i = R_i + j\omega L_i \dots\dots\dots (7)$$

但, L_i : 變壓器의 零相 reactance[H]

$$Z_0 = R_0 + j\omega L_0 \dots\dots\dots (8)$$

但, R_0 : 中性點等價挿入抵抗[Ω]

L_0 : 中性點等價挿入 reactance[H]

主變壓器에서 引出되는 回線이 單一回線인 경우에는 $L_0=0$ 이나 多回線인 경우에는 實際로 中性點挿入된 抵抗値가 R'_0 이라든 等價 impedance는 $R_0 + j\omega L$ ($R_0 < R'_0$)가 된다.

II. 高低壓混觸

A. 電位上昇式 및 混觸電流式의 誘導

主變壓器地點을 原點으로 한 x 거리의 電壓線 및 中性

線의 電位를 V_{px}, V_{nx} 電流를 I_{px}, I_{nx} 라 할 때,

$$\frac{dV_{px}}{dx} = -Z_p I_{px} - Z_m I_{nx} \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{dI_{px}}{dx} = 0 \dots\dots\dots (10)$$

$$\frac{dV_{nx}}{dx} = -Z_n I_{nx} - Z_m I_{px} \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{dI_{nx}}{dx} = -g V_{nx} \dots\dots\dots (12)$$

의 聯立微分方程式이 成立하고, 이의 中性線電位 및 電流解는

$$V_{nx} = A_{0x} V_{n0} - B_{0x} I_{n0} - E_{0x} I_p \dots\dots\dots (13)$$

$$I_{nx} = -C_{0x} V_{n0} + D_{0x} I_{n0} + F_{0x} I_p \dots\dots\dots (14)$$

여기서, 定數 $A_{0x}, B_{0x}, C_{0x}, D_{0x}, E_{0x}, F_{0x}$ 는 Z_n 와 g 가 一定한 경우에는

$$A = \cosh \sqrt{Z_n g x} \dots\dots\dots (15)$$

$$B = \sqrt{\frac{Z_n}{g}} \sinh \sqrt{Z_n g x} \dots\dots\dots (16)$$

$$C = \sqrt{\frac{g}{Z_n}} \sinh \sqrt{Z_n g x} \dots\dots\dots (17)$$

$$D_{0x} = A_{0x} \dots\dots\dots (18)$$

$$E_{0x} = \frac{Z_m}{Z_n} B_{0x} \dots\dots\dots (19)$$

$$F_{0x} = \frac{Z_m}{Z_n} (A_{0x} - 1) \dots\dots\dots (20)$$

이다. 그런데 高低壓 混觸抵抗을 無視하면, 中性點, 混觸點, 末端에 있어서의 境界條件에 의하여 다음 式들이 成立한다.

$$I_{0c} = -\frac{V_{n0c}}{Z_0} \dots\dots\dots (21)$$

$$I_{0c} + I_{n0c} + I_{pc} = 0 \dots\dots\dots (22)$$

$$I_{pc} + I_{nfc} = I_{nfc} \dots\dots\dots (23)$$

$$I_{nlc} = 0 \dots\dots\dots (24)$$

$$V_{pfc} = V_{nfc} \dots\dots\dots (25)$$

따라서 混觸地點 및 中性點의 中性線上昇 V_{nfc} 및 V_{n0c} 와 混觸電流 I_{pc} 는 式(13), (14)와 式(21)~(25)의 境界條件으로부터 풀면 다음과 같이 된다.

$$I_{pc} = \frac{E}{Z_{fc} + Z_{0c} + [Z_s + Z_i + (Z_p - \frac{Z_m}{Z_n})x_f - \frac{Z_m}{Z_n}(Z_{fc} + Z_{0c})]} \dots\dots\dots (26)$$

但, E : 相電壓[V]

$$V_{nfc} = E \times \frac{Z_{fc}}{H} \dots\dots\dots (27)$$

$$V_{n0c} = E \times \frac{-Z_{0c}}{H} \dots\dots\dots (28)$$

여기서, Z_{fc} 및 Z_{0c} 는 x_f 地點에서 高低壓混觸이 發生하였을 경우 中性線의 混觸地點 및 主變壓器 中性點의 等價合成 impedance로서 다음과 같다.

$$Z_{fc} = \frac{Z_0(A_{0f} + A_{0f}F_{0f} - C_{0f}E_{0f} - 1)}{\frac{C_{fL}}{D_{fL}}(A_{0f}Z_0 + B_{0f})} + \frac{(B_{0f} + B_{0f}F_{0f} - D_{0f}E_{0f})}{(C_{0f}Z_0 + D_{0f})} \dots\dots\dots(29)$$

$$Z_{0c} = Z_0 \left\{ \frac{C_{fL}}{D_{fL}}(B_{0f} - E_{0f}) + (D_{0f} - F_{0f} - 1) \right\} \dots\dots\dots(30)$$

$$\frac{C_{fL}}{D_{fL}}(A_{0f}Z_0 + B_{0f}) + (C_{0f}Z_0 + D_{0f})$$

그런데, 여기서 $A_{0f} \sim F_{0f}$ 는 送電端에서 混觸地點까지, $A_{fL} \sim F_{fL}$ 는 混觸地點에서 線路末端까지의 一般回路定數로서 Z_n, Z_m, g 가 均一할 경우에는

$$A_{0f} + A_{fL}F_{0f} - C_{0f}E_{0f} - 1 = \frac{Z_n - Z_m}{Z_n}(A_{0f} - 1) \dots\dots\dots(31)$$

$$\left\{ \begin{aligned} B_{0f} + B_{0f}F_{0f} - D_{0f}E_{0f} &= \frac{Z_n - Z_m}{Z_n} B_{0f} \\ B_{0f} - E_{0f} &= \frac{Z_n - Z_m}{Z_n} B_{0f} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(32)$$

$$D_{0f} - F_{0f} - 1 = \frac{Z_n - Z_m}{Z_n}(A_{0f} - 1) \dots\dots\dots(33)$$

의 關係가 成立하므로 式(29) 및 (30)은 다음과 같은 간단한 形이 된다.

$$Z_{fc} = \frac{Z_n - Z_m}{Z_n} \times \frac{(A_{0f} - 1)Z_0}{\frac{C_{fL}}{A_{fL}}(A_{0f}Z_0 + B_{0f})} + \frac{B_{0f}}{(C_{0f}Z_0 + A_{0f})} \dots\dots\dots(34)$$

$$Z_{0c} = \frac{Z_n - Z_m}{Z_n} \times \frac{Z_0 \left\{ \frac{C_{fL}}{A_{fL}} B_{0f} + (A_{0f} - 1) \right\}}{\dots\dots\dots} \dots\dots\dots(35)$$

但, $A_{0f} = \cosh(\sqrt{Z_n g} x_f) \dots\dots\dots(36)$

$$B_{0f} = \sqrt{\frac{Z_n}{g}} \sinh(\sqrt{Z_n g} x_f) \dots\dots\dots(37)$$

$$C_{0f} = \sqrt{\frac{g}{Z_n}} \sinh(\sqrt{Z_n g} x_f) \dots\dots\dots(38)$$

$$A_{fL} = \cosh\{\sqrt{Z_n g}(L - x_f)\} \dots\dots\dots(39)$$

$$C_{0f} = \sqrt{\frac{g}{Z_n}} \sinh\{\sqrt{Z_n g} x_f\} \dots\dots\dots(40)$$

따라서 電位上昇의 最高値는 x_f 를 變化하던서 式(27), (28), (34)~(39)로부터 얻어지는 V_{nfc} 및 V_{noc} 중 그 絶對値가 가장 큰 것을 擇하면 된다. 그리고 主變壓器 中性點挿入 抵抗 R_0 의 費用을 別途로 考慮할 경우(實際로 그렇게 하는 것이 經濟的이다). 多重接地費用 W_g 는 그 單位 conductance $[v/km]$ 當 單價를 $C_g [원/v]$ 라 할 때

$$W_g = C_g g L [원] \dots\dots\dots(40)$$

로 표시되고, 中性線 導體斷面積의 增加費 W_c 는 導體重量單價를 $C_c [원/kg]$, 導體比重을 S 라 할 때

$$W_c = C_c S \pi(r_a^2 - r_{am}^2) L \times 10^4 [원] \dots\dots\dots(41)$$

이다. 따라서 電位上昇抑制 總費用 W 는

$$W = W_g + W_c = \{C_g g + C_c S \pi(r_a^2 - r_{am}^2)$$

$$\times 10^4\} L [원] \dots\dots\dots(42)$$

단, r_{am} : 電位上昇을 不考慮할 경우의 中性線의 最小 半徑[m]

가 되며, W_g 가 一定할 경우 r_a 와 g 의 關係는

$$g = \frac{1}{C_g} \left\{ \frac{W}{L} - C_c S \pi(r_a^2 - r_{am}^2) \times 10^4 \right\} [v/km] \dots\dots\dots(43)$$

로서 표시된다. 여기서 中性點의 接地費用을 考慮하지 아니한 것은 R_0 는 오히려 地絡電流의 條件으로부터 결정되는 경우가 많고, 變壓器 및 線路의 絕緣費를 考慮하지 아니한 것은 混觸에 의한 健全相의 電位上昇이 有效接地範圍를 滿足하는 것으로 가정 하였기 때문이다.

計算時 $\sqrt{Z_n}$ 및 $\frac{1}{\sqrt{Z_n}}$ 의 複素演算은 다음 式에 의한다.

$$\sqrt{Z_n} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{R_n^2 + w^2 L_n^2} + R_n} + j \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{R_n^2 + w^2 L_n^2} - R_n} \dots\dots\dots(44)$$

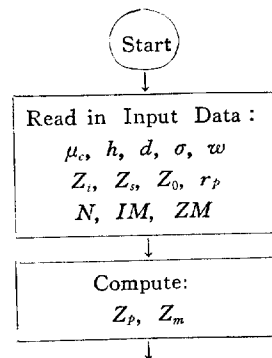
$$\frac{1}{\sqrt{Z_n}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\sqrt{R_n^2 + w^2 L_n^2} + R_n}{R_n^2 + w^2 L_n^2}} - j \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\sqrt{R_n^2 + w^2 L_n^2} - R_n}{R_n^2 + w^2 L_n^2}} \dots\dots\dots(45)$$

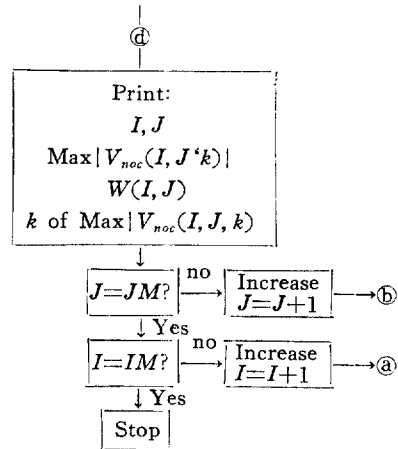
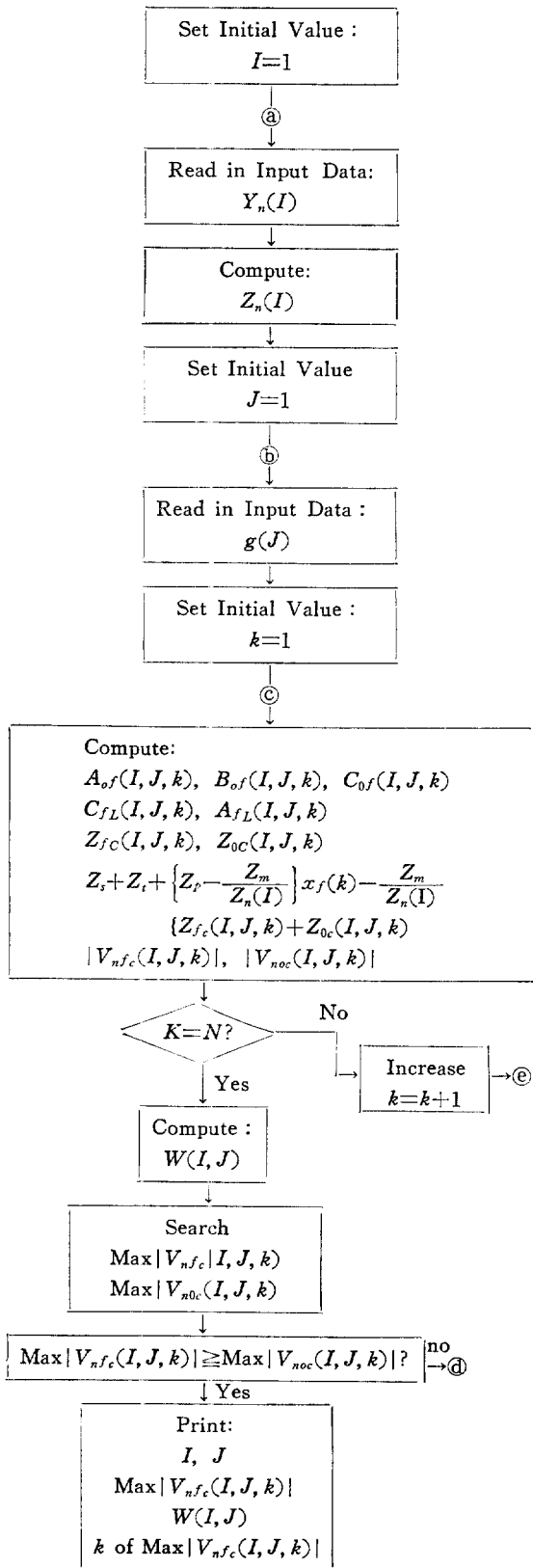
B. 中性線 굵기와 多重接地抵抗値가 주어졌을 경우의 中性線 最高電位上昇値 및 그 抑制費用의 豫測
여러 種類의 中性線 半徑 $r_n(i)$ [$i=1, 2, \dots, im$ 但 $r_n(1) = r_{am}$]와 여러 종류의 單位長當 conductance $g(j)$ [$j=1, 2, \dots, j_m$]에 對한 中性線 最高電位上昇値 $V_{nfc}(i, j)$ 또는 $V_{noc}(i, j)$ 및 그 抑制總費用 $W(i, j)$ 를 1A에서 誘導한 式을 使用하여 電子計算機로 풀어서 豫測하는 過程을 flow chart로 表示하면 다음과 같다.

配電線路를 N 간격으로 等分하여 各 區分點에 對하여야만 計算을 하기 위하여 混觸地點 x_f 는 다음 式에 의한다.

$$x_f(k) = \frac{L}{N} k \dots\dots\dots(46)$$

但 $k=1, 2, \dots, N$





Flow Chart I. 一定中性線 굵기와 多重 접지 저항값이 주어졌을 경우의 最高電位上昇値의 豫測計算順序.

Computational Algorithm for Predicting Voltage Rise in Neutral Line with Neutral Conductor sizes and Multiple Earthing Conductance Values given.

C. 中性線 굵기(또는 多重 접지 저항값)와 中性線 最高許容電位上昇値가 주어졌을 경우의 多重 접지 저항값(또는 中性線 굵기)의 決定

中性線의 굵기가 미리 決定되면 그 最高許容電位上昇値를 어느 一定値 $|V_{nm}|$ 로 억제하기 위하여는 多重 접지 conductance g 를 求하여야 하고, g 가 미리 決定되면 中性線의 굵기 r_n 을 求하여야 한다.

이상에서 誘導한 公式를 써서 電子計算機로 이 計算을 行하는 Algorithm은 다음과 같다.

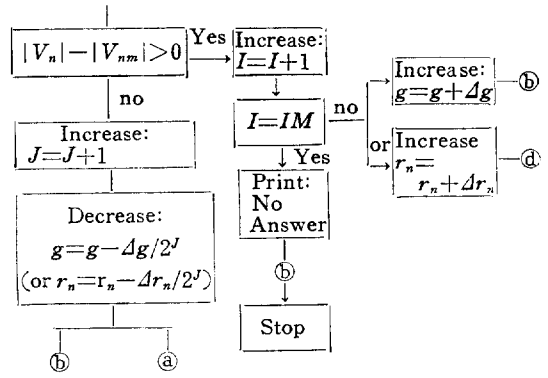
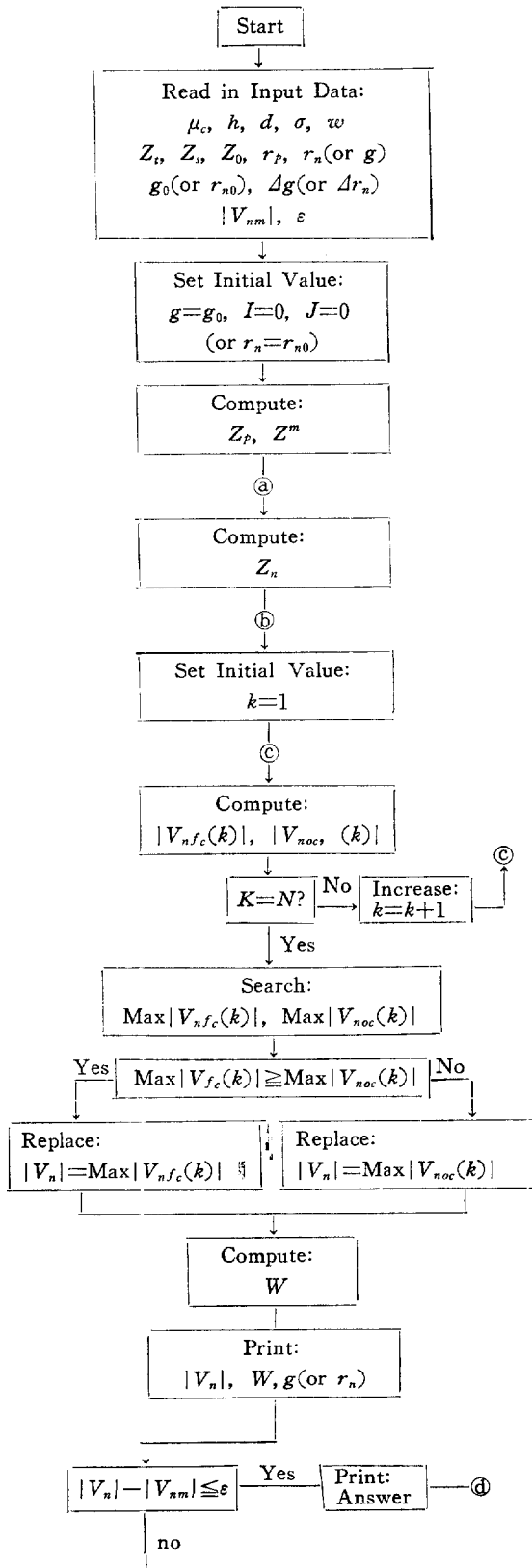
즉 g 의 初期值 g_0 (또는 r_n 의 初期值 r_{n0})를 셋트하여 各 混觸 位置 $x_f(k)$ 에 對한 混觸 位置 및 中性點의 電位上昇의 絕對值 $|V_{nfc}(k)|$ 및 $|V_{noc}(k)|$ 를 모두 計算한 후, 이 가운데 最大値 $|V_n|$ 를 탐색한다. 그리고 許容 誤差 ϵ 에 對하여

$$||V_n| - |V_{nn}|| \leq \epsilon$$

를 만족시킬 때까지 g 를 Δg (또는 r_n 을 Δr_n)만큼씩 증가시켜서 計算을 反復시켜 나가되, $|V_n| < |V_{nn}|$ 이면 도리어 g 를

$$\frac{\Delta g}{2}, \frac{\Delta g}{4}, \frac{\Delta g}{8} \dots (\text{또는 } r_n \text{을 } \frac{\Delta r_n}{2}, \frac{\Delta r_n}{4}, \frac{\Delta r_n}{8}, \dots)$$

만큼씩 감소시켜서 反復計算을 行하면 드디어 $|V_n|$ 은 收束하게 된다. 이를 flow chart로 表示하면 다음과 같다.

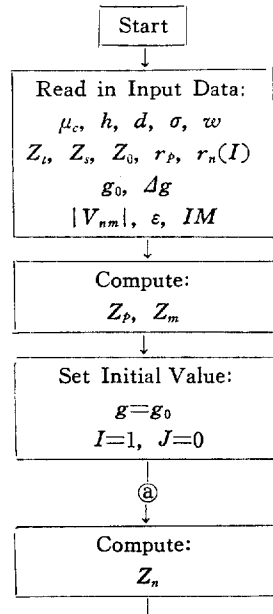


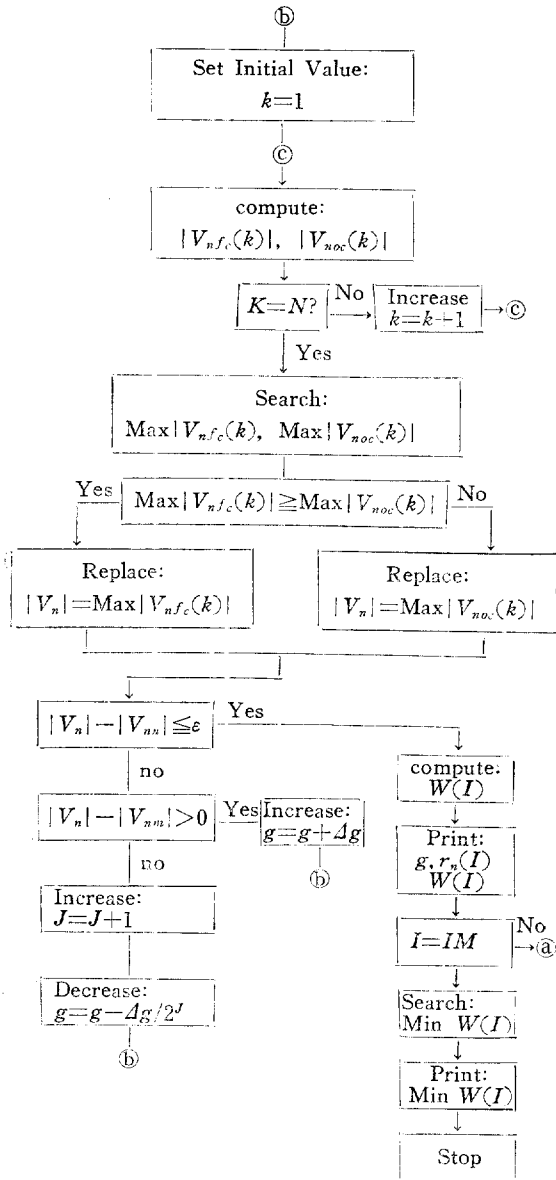
Flow Chart 2. 最高許容 電位上昇値와 中性線 굵기(또는 多重接地抵抗値)가 주어졌을 경우의 多重接地抵抗値(또는 中性線의 굵기)의 決定計算 順序

Computational Algorithm for Determining Multiple Earthing Resistance Value (or Conductor size) with Conductor size (or Multiple Earthing Resistance Value) and Maximum Allowable Potential Rise given.

D. 中性線 最高許容 電位上昇値가 주어졌을 경우의 經濟的 中性線 굵기 및 多重接地 抵抗値의 組合.

中性線 最高許容 電位上昇値가 주어졌을 경우, 가장 經濟的인 r_n 과 g 의 組合이 있을 것이다. 이를 求하는 algorithm은 다음과 같다. 즉, 實用 可能的 中性線의 굵기 階級 數種 $r_n(i)$ ($i=1, 2, 3, \dots$ 但, i 가 증가 할수록 $r_n(i)$ 는 증가함)에 對하여 $|V_{nm}|$ 이 되는 $g(i)$ 와 電位上昇 抑制費用 $W(i)$ 를 각각 計算한 후 最小의 $W(i)$ 를 탐색하게 되는 데 이를 위한 flow chart는 다음과 같다.





Flow Chart 3. 最高許容 電位上昇値가 주어졌을 경우의 經濟的 中性線 굵기 및 多種接地抵抗值的 決定計算順序

Computational Algorithm for Determining Optimal Conductor size and Multiple Earthing Resistance Value with Maximum Allowable Potential Rise given.

III. 2次電壓線과 中性線間的 混觸

A. 2次電壓線과 中性線間的 混觸時의 電位上昇式 및 混觸電流式의 誘導

앞으로 220/380V로 昇압되는 경우, 구라파에서 보편화되고 있는 Nullung 方式의 적용이 우리나라에서도 문

제시되고 있는 바, 이의 타당성 여부는 2次側 中性線의 多重接地抵抗 費用의 經濟性에 左右된다.

즉 混觸이나 地絡時에 發生하는 中性線의 電位上昇을 最高許容 接觸電壓(독일에서는 65[V], 우리나라에서는 45[V])이하로 억제 하기 위한 多重接地工事的 工事費推算을 하여야 하는 데, 이를 위한 電位上昇 豫測式을 아데에 誘導한다.

2次 配電線과 引込線, 屋內 配電線은 굵기가 가늘고, 공간이 짧기 때문에 inductance는 모두 無視하고, 다만, 柱上變壓器의 impedance Z', 柱上變壓器의 中性點에서 引込線의 等價接地 impedance Z', 一次側 電源 impedance Z' 등은 그 inductance를 고려하기로 한다.

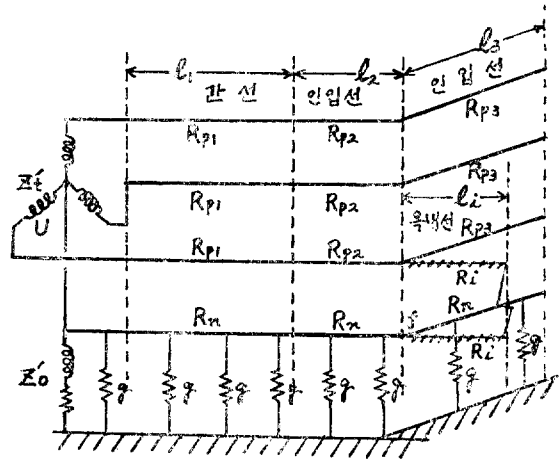


그림 2. 2次電壓線, 中性線間 混觸 回路圖
Fig 2. Circuit for Contact Fault in Indoor Secondary Line.

그림 2에서

R_{p1}, R_{p2}, R_{p3} : 3相선 및 인입선의 電壓線의 單位長 當 電壓線抵抗 [Ω/m]

R_n : 3相선 및 인입선의 中性線의 單位長當 電壓線抵抗 [Ω/m](3相선과 인입선의 굵기는 같은 것이 좋다)

R_i : 옥내의 電壓線 및 中性線의 單位長當 電壓線抵抗 [Ω/m]

g' : 多重接地 conductance [Ω/m]

U : 柱上變壓器 2次側 相電壓 [V]

l_1 : 3相선의 길이 [m]

l_2 : 3相선에서 인입구까지의 인입선길이 [m]

l_3 : 인입구에서 인입선 말단까지의 인입선 길이 [m]

l_i : 옥내선의 혼촉 지점까지의 길이 [m]

라 할 때, 混觸地點의 混觸電流 I_{fc} [A는]

$$I'_{p_c} = \frac{U}{Z'_{f_c} + Z'_{0c} + [Z'_s + Z'_t + R_{p1}l_1 + R_{p2}l_2 + 2R_n l_1]} \dots (47)$$

로서 표시되고(증명 생략), 混觸 地點 및 柱上變壓器 中性點의 電位上昇 V_{nfc} 및 V_{noc} 는 다음과 같다.

$$V_{nfc} = U \times \frac{Z_{f_c} + R_n}{Z'_{f_c} + Z'_{0c} + [Z'_s + Z'_t + R_{p1}l_1 + R_{p2}l_2 + 2R_n l_1]} \dots (48)$$

$$V_{noc} = U \times \frac{-Z_{0c}}{Z'_{f_c} + Z'_{0c} + [Z'_s + Z'_t + R_{p1}l_1 + R_{p2}l_2 + 2R_n l_1]} \dots (49)$$

여기서,

$$Z'_{f_c} \equiv \frac{(A'_{of} - 1)Z'_0 + B'_{of}}{C'_{fL}(A'_{of}Z'_0 + B'_{of}) + (C'_{of}Z'_0 + A'_{of})} \dots (50)$$

$$Z'_{0c} \equiv \frac{Z'_0 \{ \frac{C'_{fL}}{A'_{fL}} B'_{of} + (A'_{of} - 1) \}}{C'_{fL}(A'_{of}Z'_0 + B'_{of}) + (C'_{of}Z'_0 + A'_{of})} \dots (51)$$

但, $A'_{of} = \cosh \sqrt{R_n g'}(l_1 + l_2) \dots (52)$

$$B'_{of} = \sqrt{\frac{R_n}{g}} \sinh \sqrt{R_n g'}(l_1 + l_2) \dots (53)$$

$$C'_{of} = \sqrt{\frac{g'}{R_n}} \sinh \sqrt{R_n g'}(l_1 + l_2) \dots (54)$$

$$A'_{fL} = \cosh(\sqrt{R_n g'}l_3) \dots (55)$$

$$C'_{fL} = \cosh(\sqrt{R_n g'}l_3) \dots (56)$$

그리고 電位上昇抑制總費用 W' 는

$$W' = \{ (C'_s g' + C'_e S \pi (r_a'^2 - r_{am}'^2) \times 10^{-3}) (l_1 + l_2 + l_3) \dots (57)$$

但, r_a, r_{am} : 電位上昇을 고려할 경우와 불고려 할 경우의 中性線의 半徑 [mm]

C'_s, C'_e : 接地 conductance의 費用單價 [원/v] 및 導體單價 [원/kg]

이다. Z'_0 는 1次側 線路 條件에 의하여 決定되는 impedance로서 다음 式으로 計算된다.

$$Z'_0 = \frac{Z_{0L} Z_{iL}}{Z_{0L} + Z_{iL}} \dots (58)$$

但, $Z_{0L} \equiv \frac{Z_0 \cosh(\sqrt{Z_n g}l) + \sqrt{\frac{Z_n}{g}} \sinh(\sqrt{Z_n g}l)}{Z_0 \sqrt{\frac{g}{Z_n}} \sinh(\sqrt{Z_n g}l) + \cosh(\sqrt{Z_n g}l)} \dots (59)$

$$Z_{iL} \equiv \frac{\cosh \{ \sqrt{Z_n g}(L-l) \}}{\sqrt{\frac{g}{Z_n}} \sinh \{ \sqrt{Z_n g}(L-l) \}} \dots (60)$$

l : 1次 線路의 變電所, 柱上變壓器間의 길이 [km]

L : 1次 線路의 全 길이 [km]

위의 여러 式을 써서 計算하는 algorithm과 flow chart는 II 節의 경우와 大同小異하므로 여기서는 省略 하겠다.

IV. 1次 電壓線의 地絡

A. 電位上昇式 및 地絡電流式의 誘導

1차 電壓線이 地絡되던 中性線에 電位가 上昇하게 되는데, 이 경우의 電位上昇值 및 地絡電流를 豫測하기 위하여 그림 3의 회로를 생각한다.

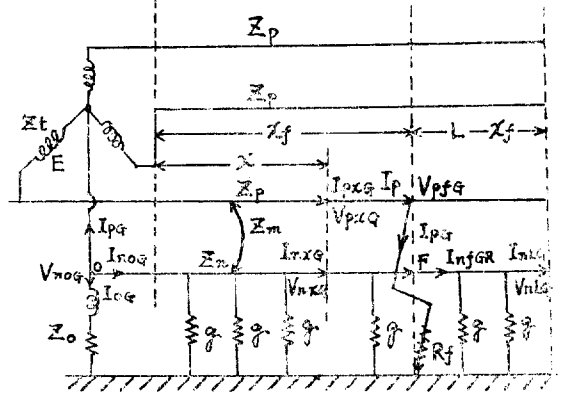


그림 3. 1線地絡 回路圖
Fig. 3. One Line Grounding Fault Circuit

이 경우, 式 (9)~(12)의 系統微分方程式과 中性點, 地絡點, 線路末端의 境界條件

$$I_{0G} = \frac{V_{n0G}}{Z_0} \dots (61)$$

$$I_{0G} + I_{n0G} + I_{pG} = 0 \dots (62)$$

$$I_{nFG} = I_{nFGR} \dots (63)$$

$$I_{nLG} = 0 \dots (64)$$

$$V_{pFG} = I_{pG} R_f \dots (65)$$

但, R_f : 地絡抵抗 [Ω]

로부터, 地絡電流 I_{pG} 및 主變壓器 中性點의 電位上昇 V_{n0G} 는

$$I_{pG} = \frac{E}{Z_{0G} + R_f + [Z_s + Z_t + (Z_p - \frac{Z_m}{Z_n})x_f + \frac{Z_m}{Z_n}(A + \frac{B}{R} - 1)Z_{0G}] \dots (66)$$

$$V_{n0G} = E \frac{-Z_{0G}}{Z_{0G} + R_f + [Z_s + Z_t + (Z_p - \frac{Z_m}{Z_n})x_f + \frac{Z_m}{Z_n}(A + \frac{B}{R} - 1)Z_{0G}] \dots (67)$$

$$\text{但, } Z_{0G} \equiv \frac{Z_0 \{ (D_{of} - F_{of}) + \frac{C_{fL}}{D_{fL}} (B_{of} - E_{of}) \}}{\frac{C_{fL}}{D_{fL}} (A_{of}Z_0 + B_{of}) + (C_{of}Z_0 + D_{of})} \dots (68)$$

가 된다. 만일 g 와 Z_n 이 一定한 경우에는, 式 (18~20)의 關係에 의하여

$$Z_{0G} \equiv \frac{Z_n - Z_m}{Z_0} \times \frac{Z_n \{ \frac{C_{fL}}{A_{fL}} B_{of} + A_{of} \}}{\frac{C_{fL}}{A_{fL}} (A_{of}Z_0 + B_{of}) + \dots}$$

$$\frac{+ \frac{Z_m}{Z_n - Z_m}}{(C_{0f}Z_0 + A_{0f})} \dots (69)$$

와 같은 간단한 형이 된다.

電壓線 地絡에 있어서 가장 尤甚한 電位上昇이 發生하는 경우는 送電端 即 $x_f=0$ 에서 混觸될 때 中性點에 나타나는 電位上昇이므로(이 경우가 地絡電流가 最大이기 때문), 最大電位上昇은 式(67)에 $x_f=0$ 를 代入함으로써 구할 수 있다. 즉

$$\max |V_{n0G}| = E \left| \frac{-Z_0 \cdot \frac{A_{0L}}{C_{0L}} / \left(Z_0 + \frac{A_{0L}}{C_{0L}} \right)}{\left\{ Z_0 \cdot \frac{A_{0L}}{C_{0L}} / \left(Z_0 + \frac{A_{0L}}{C_{0L}} \right) \right\} + R_f + Z_s + Z_i} \right| \dots (70)$$

그리고, 이 때의 地絡電流는

$$\max |I_{pG}| = E \left| \frac{1}{\left\{ Z_0 \cdot \frac{A_{0L}}{C_{0L}} / \left(Z_0 + \frac{A_{0L}}{C_{0L}} \right) \right\} + R_f + Z_s + Z_i} \right| \dots (71)$$

$$\text{但, } A_{0L} \equiv \cos h(\sqrt{Z_n g L}) \dots (72)$$

$$B_{0L} \equiv \sqrt{\frac{Z_n}{g}} \sinh(\sqrt{Z_n g L}) \dots (73)$$

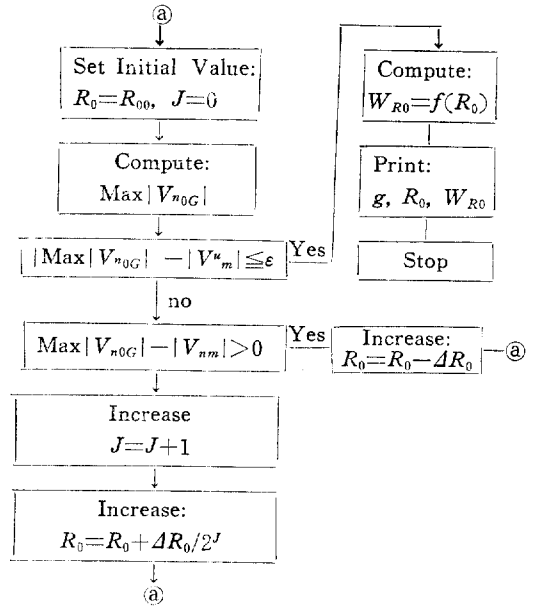
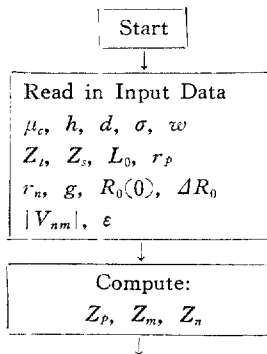
$$C_{0L} \equiv \sqrt{\frac{g}{Z_n}} \sinh(\sqrt{Z_n g L}) \dots (74)$$

이다. 式 (70)에 依하면 中性線 굵기 r_n 이 주어졌을 경우, 最大電位上昇値를 억제하기 위하여는 g 를 증가시키거나 Z_0 의 抵抗 R_0 를 감소시켜야 하는데 經濟的인 觀點에서는 R_0 를 감소시켜야 한다. 따라서, 最大許容電位上昇値 $|V_{nm}|$ 과 中性線 굵기 r_n 이 주어졌을 경우 이를 만족시키는 R_0 는 어떤 初期值 R_{00} 를 선택하여 $\max |V_{n0G}|$ 를 計算한 후, $|V_{nm}|$ 보다 크면 ΔR_0 만큼 R_0 에서 감소시켜서 逐次 計算을 $|\max |V_{n0G}| - |V_{nm}| \leq \epsilon$ 에 收束할 때까지 行한다. 그리고 主變壓器 中性點接地費用을 W_{R0} 라 하면

$$W_{R0} = f(R_0) \dots (75)$$

로서 表表된다.

B. 中性線 最高許容電位上昇値와 中性線 굵기가 주어졌을 경우의 主變壓器 接地抵抗의 決定 이 경우의 flow chart는 다음과 같다.



Flow Chart 4. 地絡事故에 의한 最高許容電位上昇値와 中性線 굵기가 주어졌을 경우의 變電所 接地抵抗値의 決定計算順序

Computational Algorithm for Determining Neutral Grounding Resistance with given Maximum Allowable Potential Rise in Case of One-Line Grounding Fault.

V. 2次 電壓線의 地絡

2次 電壓線의 地絡時의 電位上昇式도 비슷한 方法으로 誘導되나, 地絡時 一般的으로 R_f 의 値가 매우 커서 混觸의 경우 보다 電位上昇이 적다. 따라서 別로 使用될 기회가 드물기 때문에 여기서는 省略하기로 한다.

VI. 高低壓混觸과 1次 電壓線 地絡을 同時 考慮한 經濟的 中性線 電位上昇 抑制費用

一般的으로 地絡抵抗 R_f 는 22.9[kV]系統에서 地絡條件과 地面條件에 따라 광범위하게 變化하나 大部分의 경우는 數 10[Ω] 이상이므로 高低壓混觸의 경우가 1線 地絡의 경우에 비해서 中性線의 電位上昇値가 높다. 그러나 R_f 가 數[Ω] 이하의 낮은 값이 되면 오히려 反對가 되는 경우가 있다. 따라서 電位上昇値의 豫測에는 이 2종류의 故障 경우를 同時에 考慮하여야 할 것이다. 그런데 이미 記述한 바와 같이 地絡의 경우에는 主變壓器의 中性點接地抵抗 R_0 를 낮추는 것이 g 를 증가시키는 편이 훨씬 經濟적이나 高低壓混觸의 경우에는 線路가 매우 짧지 아니하는 限 R_0 를 낮추면 오히려 電位가 上昇하므로 결국 前者의 경우는 R_0 로서 억제하고, 後者의 경우는 g 를 증가시켜서 억제한다. 그리고 中性線의 굵기를 증가시키는 것도 한 抑制 方法이 된다.

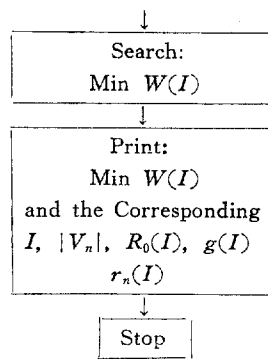
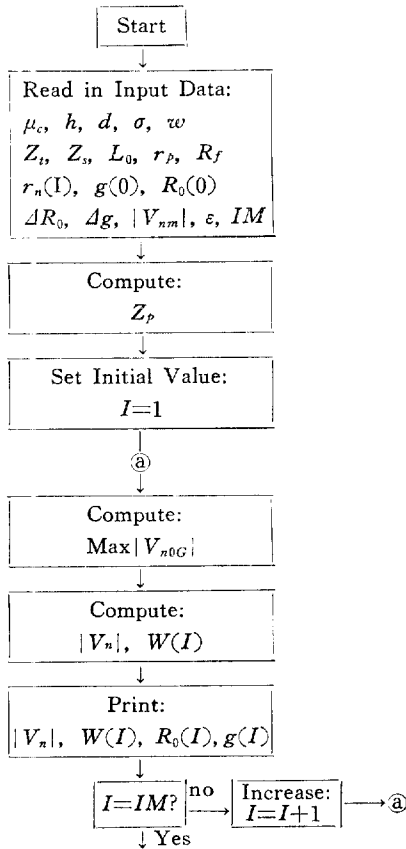
다음에는 어느 1次 配電系統에 있어서 最大許容電位 上昇値 $|V_{nm}|$ 이 주어졌을 경우 가장 經濟的인 中性線 굵기 $r_n(i)$, 多重接地 conductance g 및 中性點接地抵抗 R_0 와 總體的인 電位上昇 抑制費用을 計算하는 方法을 提示한다.

이를 위하여는 式(42)의 W 에 式(75)의 W_{R0} 까지를 포함한

$$W = W_g + W_c + W_{R0} = [(C_g g + C_s \pi (r_a^2 - r_{am}^2) \times 10^4) L + f(R_0)] \dots \dots \dots (76)$$

의 式으로 修正하여야 한다.

于先 가장 가느른 $r_n(i)$ 와 g , R_0 를 固定해 두고, 地絡 時의 $\text{Max}|V_{n0G}|$ 를 式(71)과 flow chart 4에 의하여 求하여 R_0 를 감소시키면서 $\text{Max}|V_{n0G}|$ 가 $|V_{nm}|$ 에 收束할 때까지 逐次計算을 行하고 드디어 收束되면 이때의 R_0 를 $R_0(i)$ 로 셋트한 후, 다음에는 式(27), (28)과 flow chart 3에 의하여 經濟적인 $r_n(i)$ 및 $g(i)$ 와 式(76)의 $W(i)$ 를 計算한다. 그 다음에는 $g(i)$ 와 1次급 굵은 $r_n(i)$ 를 다시 셋트한 후 위의 計算을 反復한다. 이렇게 함으로써 $W(1), W(2), W(3) \dots \dots, W(n)$ 을 연계 하는데, 이 중 最小인 $\text{min } W(i)$ 를 탐색한 후 이에 對應하는 $R_0(i)$ 및 $g(i)$ 도 탐색하여 이를 最終解答으로 取한다. 이를 flow chart로 表示하면 다음과 같다.



Flow Chart 5. 高低壓混觸과 地絡事故를 同時 考慮한 경우의 經濟的 電位上昇抑制費用의 計算 順序

Computational Algorithm for Computing Economical Potential Rise Restraining Cost in Consideration of both Contact Fault and One-Line Grounding Fault.

VII. 誘導式 및 算法에 對한 檢討

本論에서 誘導한 諸式 및 計算 algorithm의 理論的 穩當性과 具體的 實用性을 立證할 目的으로 高低壓混觸 時 電位上昇式에 對하여 檢討해 본다.

韓國電力會社에서 慶北 若木-尙州間 8[km]間的 13.2/22.9[kV] 試驗線路에 對하여 高低壓混觸에 의한 電位 上昇을 豫測하기 爲하여 D.C board를 使用하여 얻은 結果值와 II A의 誘導式으로 計算한 結果值를 比較하면 다음 表와 같다. 그런데 韓電結果值는 D.C board의 使用 條件때문에 回路定數를 모두 實數로 近似化하여 얻은 것으로 相互比較를 爲하여 本 計算值도 모두 實數로 近似 化한 回路定數에 依存하였다.

表 I. 模擬回路에 依한 電位上昇測定值와 本方法에 의 한 計算值와의 比較
中性線 및 電壓線 22°
上值: 韓電結果值, 下值: 本方法에 의 한 計算值

多重接地 抗 抗 1/g [Ω/km]	中性點 抗 抗 R ₀ [Ω]	各混觸地點 x _f [km]의 電位上昇[V]			
		1	4	7	8
2.5	2.5	785	1020	1020	1175
		895	1013	771	1374
	5.0	508	944	870	1035
		764	965	739	1040
	7.5	368	915	855	1040
		678	931	731	961
2.5	0	2390	2090	1845	2040
		2217	2060	2055	2380
	2.5	1300	1530	1560	1825
		1254	1495	1730	2065

7.5	5.0	875	1340	1530	1740
		944	1320	1605	1960
	7.5	686	1190	1485	1690
		786	1240	1556	1930

上記表에 의하면, 2個所를 除外한 나머지 結果値는 大略 約10% 内外의 偏差로 相互一致함을 알 수 있다. 偏差가 생기는 主理由는 筆者와 韓電이 線路定數의 推定을 조금씩 달리한데 基因한다. 그 밖에도 韓電에서 試驗線路에서 實測한 結果와 復素回路定數에 의하여 本誘導式으로 精密計算을 行한 結果는 매우 잘 符合됨이 立證되었으므로, 現在 斷片的으로는 電子計算機에 의한 計算結果가 實際로 配電線路의 設計條件에 應用되고 있으며, 보다 効率的인 應用을 위하여 總括的인 program의 開發이 筆者에 의하여 目下 進行中에 있다.

2次電壓線, 中性線間의 混觸, 地絡事故時의 電位上昇式에 對한 檢討結果도 그 穩當性과 實用性이 證明되었으나, 紙面關係로 詳論하지 아니하기로 한다.

結論 및 總括

1. 共通中性線 3相4線式 1次 및 2次 配電線路의 中性線 電位上昇 原因을 記述하고, 多重接地抵抗値의 分布가 均一한 경우의 高低壓混觸, 2次電壓線, 中性線間의 混觸, 1線地絡時의 最大電位上昇値를 豫則하는 公式을 誘導하였다.
2. 中性線의 最高許容 電位上昇値가 주어졌을 경우 이를 滿足시키는 經濟的 多重接地抵抗値, 中性線 굵기, 變

電所 主變壓器 中性點 接地抵抗値를 統一的으로 決定하는 algorithm을 提示하였다.

3. 이상 諸公式으로 求한 結果値는 韓國電力會社에서 模擬回路로 測定한 結果와(10% 程度의 偏差로) 一致하여 그 正確性이 立證되었으므로 現在 實用化되고 있다.
4. 本論에 提示한 flow chart에 의한 電子計算 program은 部分的으로는 이미 實際計算에 適用되어 그 效能이 立證되고 있으므로, 곧 總括的인 program이 完成될 것이다.
5. 앞으로는 多重接地抵抗의 分布가 다를 경우에 對한 電位上昇의 豫測式과 接地個所에 따라 接地抵抗工事費用이 다른 경우에 對한 費用函數를 誘導할 豫定이다. 그리고 最大許容電位上昇値가 미리 주어졌을 경우 가장 經濟的인 多重接地抵抗의 分布狀態와 中性線 굵기 및 主變壓器 中性點 接地抵抗을 決定하는 algorithm도 誘導할 豫定인데 이 algorithm으로 系統을 設計하면 線路建設費가 莫大하게 節減될 것으로 期待된다.

參 考 文 獻

1. 配電電壓 昇壓問題에 關한 講習會豫稿. 1968. 3. 大韓電氣學會
2. 誘導調整委員會報告書 1963. 6 日本電氣學會
3. 電氣試驗所報(第1報)……1967.