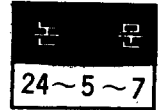


電子計算機에 依한 配電線路電線 斷面積의 經濟的 設計法



A Computer Method in Economical Design of Conductor Sizes of Distribution Lines

朴 永 文*
(Young Moon Park)

Abstract

This paper describes computational algorithms and a computer program for optimum determinations of wire conductor sizes of radial or tree-type distribution lines with given constraints. Here, The objective function is defined as the total summation of the volume or weight of respective conductor materials required for buildingup the entire distributing system.

Four categories of constraints are applied to the objective function. That is, on the respective load points constraint is imposed by a specified voltage drop limit, and the respective line elements are capable of carrying the current safely(safety current) and also must maintain the minimum thickness in viewpoint of mechanical strength and legal requirements. And finally, the conductor sizes have to be selected among the standardized size levels of the products.

These kinds of optimization problems cannot be solved by the ordinary optimization techniques such as the Linear Programming Method, SUMT Technique, etc..

This paper, therefore, successfully devised the powerful algorithms to solve the problem, using the particular properties or characteristics inherent to the radial or tree-type distribution system.

The computer program developed from the algorithms was applied to several sample systems and shown to be exact and very efficient.

1. 緒 論

本研究는 새마을 電化事業에 對한 技術支援計劃의 一環으로 樹枝式(tree system) 또는 放射式(radial system) 配電線路의 計劃時, 給電線, 幹線 및 分枝線의 電線 斷面積을 最經濟的으로 設計하는 電子計算機使用技法을 開發하는데 目的이 있다.

따라서, 本 研究는 上記 配電線路에 適用할 計算 알고리즘(computational algorithm)을 誘導하고, 이에 따른 計算프로그램(computer program)을 開發한 다음, 具體的인 事例研究를 通하여 本 研究結果의 實用性을 立證하는 過程을 밟는다.

여기서, 電線斷面積의 最經濟的 設計라 함은 어떤 주어진 配電線路의 構成經路와 주어진 最大 負荷狀態에

서, 線路 末端(複數個所)의 電壓降下 또는 電壓變動을 規定值 範圍內에 維持하는 條件下에서 全 配電線路의 電線投資費用을 最小로 하는 各 區間의 電線斷面積을 規格 電線 種目中에서 選擇 決定함을 意味한다.

2. 線路接續行列 線路電流 및 電壓降下

配電系統 中の 어느 한 線路要素(line element) n 의 等價임피던스(equivalent impedance) Z_n 은 다음과 같이 近似化할 수 있다.

$$Z_n(x_n) = \rho \cos\theta / x_n + 0.3768 \sin\theta \left\{ 0.2 \ln \frac{\sqrt{\pi} D}{\sqrt{x}} + 0.05 \mu \right\} \dots \dots \dots (1)$$

단, Z_n : 線路要素 n 의 等價 impedance [Ω /km]

ρ : 電線의 固有抵抗 [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$]

$\cos\theta$: 荷力率(小數)

D : 等價線間距離[mm]

* 正會員: 서울工大教授(工博) · 當學會編修理事
接受日字: 75年 8月 18日

μ : 電線透磁率

x_n : 線路要素 n 의 等價電線斷面積[mm²]

그리고, Z_n 의 x_n 에 對한 導函數는 다음과 같다.

$$\frac{dZ_n}{dx_n}(x_n) = -\{\rho \cos\theta/x_n + 0.03768 \sin\theta\}/x_n \dots (2)$$

線路의 接續狀態를 標準技法으로 나타내기 위하여 線路接續行列(line incidence matrix) $\delta_{l,n}$ 을 다음과 같이 導入한다[1].

卽, 各 線路要素에 一連番號를 附與하되, 番號順은 于先 負荷點(受電端)을 포함하는 分枝 線路要素부터 上昇順으로 附與한 後, 幹線이나 給電線은 順位가 낮게 한다. 그리고, 負荷點을 포함하는 線路要素의 番號順은 給電點(feeding point) 또는 變電所 引出口에서부터 分枝되는 단계가 낮을수록 附與番號가 앞서도록 한다. 그리고 給電點 또는 變電所 引出口에서부터 各 負荷點에 이르는 經路(l)를 定義하여 이 經路番號를 負荷點 分枝線 番號와 같이 附與한다(이 關係를 例示하면 그림 1과 같다).

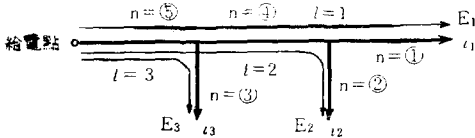


Fig. 1. Line connections

그림 1. 線路接續

이 경우, 式(3)과 같이 $\delta_{l,n}$ 을 定義한다.

$$\delta_{l,n} \triangleq \begin{cases} 1, & \text{經路 } l \text{이 線路要素 } n \text{을 通過할 경우} \\ 0, & \text{經路 } l \text{이 線路要素 } n \text{을 通過하지} \\ & \text{아니할 경우} \dots (3) \end{cases}$$

그림 3의 경우의 $\delta_{l,n}$ 은 다음과 같다.

$\delta_{l,n} =$	n	①	②	③	④	⑤ (3)
l	1	1	0	0	1	1	
	2	0	1	0	1	1	
	3	0	0	1	0	1	

이상과 같은 $\delta_{l,n}$ 의 導入으로 各 線路要素를 흐르는 電流 i_n 및 各 線路要素에서의 電壓降下 e_n 은 다음과 같이 便利하게 表示된다.

$$i_n = \sum_{l=1}^L \delta_{l,n} i_l \dots (4)$$

단, i_l : 負荷電流[A]

L : 電流 經路數 卽 負荷 個數

$$e_n(x_n) = Z_n L_n i_n \dots (5)$$

단, L_n : 線路要素 n 의 線路 길이[km]

單相 2 線式의 경우에는 線路길이의 2 倍 따라서 各 負荷點의 電壓降下 E_l 은 다음과 같이 表示된다.

$$E_l(x_1, x_2, \dots, x_N) = \sum_{n=1}^N \delta_{l,n} e_n(x_n) \dots (6)$$

단, N : 線路要素數

3. 目的函數, 制約式 및 最適解

여기서 目的 函數는 各 線路要素 電線 體積의 總合 計值 f 로서, f 는 다음과 같이 표시되며,

$$f(x_1, x_2, \dots, x_N) = \sum_{n=1}^N L_n x_n \dots (7)$$

이 f 를 最小로 하는 各 x_n 을 決定하되, 다음과 같은 制約式을 滿足시켜야 한다.

a) 各 負荷點의 電壓降下

$$E_l(x_1, x_2, \dots, x_N) = \sum_{n=1}^N \delta_{l,n} e_n \leq K \dots (8)$$

단, k : 最大電壓降下許容值[V]

$l = 1, 2, \dots, L$

b) 各 線路要素의 安全(許容)電流

$$x_n \geq S_a(i_n) \dots (9)$$

단 $n = 1, 2, \dots, N$

S_a : 安全電流斷面積[mm²]

c) 法規上 및 機械의 強度를 充足하는 最小斷面積

$$x_n \geq S_R \dots (10)$$

단, $n = 1, 2, \dots, N$

S_R : 法規 및 機械의 強度上의 最小斷面積[mm²]

이상 式(8)~(10)의 制約條件(constraints)下에서 式(7)을 最小로 하는 解 x_n 을 求하는 問題는 널리 알려진 線型計劃法(Linear Programming Method) 問題에 屬하나, 다음의 追加의 制約條件이 附加되므로, 線型計劃法, SUMT[2]等의 在來의 技法으로서는 解를 求할 수 없다.

즉, 電線의 斷面積은 몇 段階로 規格(標準)化되어 있기 때문에, 위의 解 x_n 도 이 規格化된 製品 種類中에서 選擇하여야 하기 때문이다. 卽

d) 電線規格

$$x_n \in S \{s_i | i = 1, 2, \dots, I\} \dots (11)$$

단 I : 規格電線 種類數

S : 規格電線 斷面積 集合

$$s_1 < s_2 < s_3 < \dots < s_I$$

따라서, 式(8)~(11)의 制約式을 滿足하는 式(7)의 最小值를 얻기 위한 알고리즘의 誘導가 本論文의 焦點이라 하겠다.

于先 A_n 과 σ_n 을 다음과 같이 定義 導入한다.

$$A_n(x_n) \triangleq I / \left\{ i_n \frac{dZ_n}{dx_n} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

$$\sigma_n(x_n) \triangleq Z_n L_n / \left\{ - \frac{dZ_n}{dx_n} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

그러면, 式 (8)은

$$E_l(x_1, x_2, \dots, x_N) = \sum_{n=1}^N \delta_{l,n} \frac{\sigma_n}{A_n} \leq K \dots\dots\dots (14)$$

와 같이 表示되고, 于先 式 (14)의 制約條件式만을 고려한 式(7)의 最小은 라그랑제常數法(Lagranges Multiplier Method)에 依하여,

$$F(x_1, x_2, \dots, x_N) = f(x_1, x_2, \dots, x_N) + \sum_{l=1}^L \lambda_l \left\{ K - \sum_{n=1}^N \delta_{l,n} \frac{\sigma_n}{A_n} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

단, λ_l ; 라그랑제常數

과 $\frac{\partial F}{\partial x_n} = 0$ 의 關係로부터

$$\hat{A}_n = \sum_{l=1}^L \delta_{l,n} \lambda_l \dots\dots\dots (16)$$

을 얻고, 式 (14)의 相互關係로부터

$$\hat{A}_l = \sigma_n / \left\{ \sigma_l / A_l + \sum_{n=L+1}^N \{ \delta_{l,n} - \delta_{l,n} \} \sigma_n / A_n \right\} \dots\dots\dots (17)$$

을 얻는다. 여기서,

$$y_l(x_1, x_2, \dots, x_N) \triangleq \hat{A}_l / A_l \dots\dots\dots (18)$$

단 $l=1, 2, \dots, L$

$$y_n(x_1, x_2, \dots, x_N) \triangleq \hat{A}_n / A_n \dots\dots\dots (19)$$

단 $l=L+1, L+2, \dots, N$

으로서 定義되는 새로운 變換數 y_l 및 y_n 을 導入하면, 式(14) 및 (7)만으로서는

$$y_1 = y_2 = \dots = y_{N-1} = y_N \dots\dots\dots (20)$$

이 成立한다. 그러나, 式 (9)~(11)의 條件을 同時에 充足하기 爲하여는 式 (20)이 반드시 成立하는 것이 아니다. 따라서, 式 (9)~(11)의 모든 制約條件을 充足하는 式 (7)의 最適解를 얻는 計算 알고리즘은 다음과 같은 過程을 밟는다.

- 1) i_n 을 計算한다[式 (4)], $n=L+1, L+2, \dots, N$
- 2) $S_n(i_n) = a + bi_n + ci_n^2$ 을 計算한다, $n=1, 2, \dots, N$
但, a, b, c 는 常數
- 3) $S_n(i_n)$ 과 S_R 중에서 큰 값을 各 線路要素斷面積의 下限值로한다.
即, $x_n|_{min} = \text{Max} \{ S_n(i_n), S_R \}, n=1, 2, \dots, N$
- 4) 各 線路要素 斷面積의 上限值는 規格電線中에서 斷面積이 最大인 것으로 한다.
即, $x_n|_{max} = S_1$
- 5) 各 線路要素 斷面積의 初期假定值 x_0^n 을 $x_n|_{min} \sim x_n|_{max}$ 범위內에 있는 電線規格斷面積 s_i 중에서 任

意로 取한다.

(事例研究에 依하면 $x_0^n = x_n|_{min}$ 으로 잡는 것이 有利함)

- 6) 假定한 各 斷面積으로 $Z_n, dZ_n/dx_n$ 을 計算한다[式 (1) 및 (2)], $n=1, 2, \dots, N$
- 7) A_n, σ_n 을 計算한다[式(12) 및 (13)]. $n=1, 2, \dots, N$
- 8) $\hat{A}_l, \hat{A}_{l,n}$ 을 計算한다[式 (16) 및 (17)]. $l=1, 2, \dots, L$
 $n=L+1, L+2, \dots, N$
- 9) y_l 및 y_n 을 計算한다[式(18) 및 (19)]. $l=1, 2, \dots, L$
 $n=L+1, L+2, \dots, N$
- 10) E_l 을 計算한다[式(14)]. $l=1, 2, \dots, L$
- 11) 各 E_l 이 모두 電壓降下 最大許容值 K 보다 작거나 같으면 12)의 過程으로, K 보다 큰 것이 적어도 하나라도 있으면 15)의 過程으로 移行한다.
- 12) f 를 計算한다[式(7)] 그리고 解答 f, x_n, i_n, E_l 을 인쇄한다. $n=1, 2, \dots, N$ $l=1, 2, \dots, L$
- 13) 以前의 f 와 比較하여[但, f 의 初期值는 ∞ 로 設定], 現在의 f 가 以前의 f 와 작거나, 크면 計算을 끝내고, 적으면 14)의 過程으로 移行한다.
- 14) 線路要素斷面積 x_n 이 下限值 $\text{Max} \{ S_n(i_n), S_R \}$ 이 아닌 모든 y_l 및 y_n 중에서 最小의 y_n 또는 y_l 을 探索(search)하여, 이 y_l 또는 y_n 에 對應하는 x_n 을 한층 낮은(작은) 水準의 規格斷面積 S_i 로 減小시

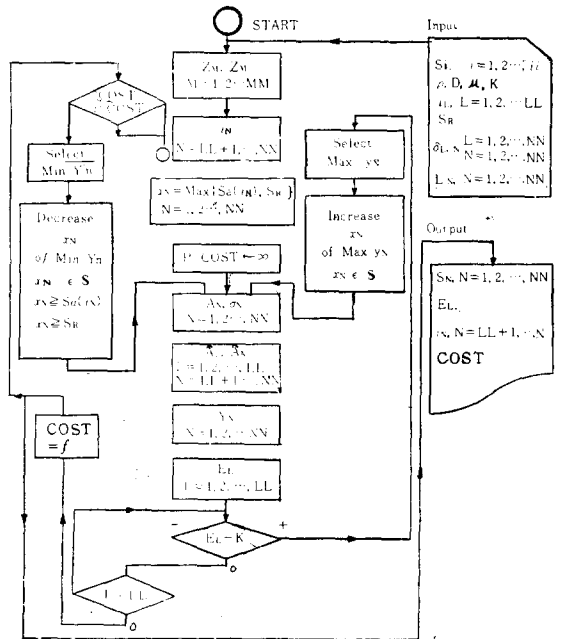


Fig. 2. Flowchart for computation.

그림 2. 計算過程 플로차트

킨후 7)의 過程으로 移行한다.

15) 線路要素 斷面積이 上限值 S_1 가 아닌 모든 y_n 및 y_l 중에서 最大의 y_n 또는 y_l 을 探索하여, 이 y_n 또는 y_l 에 對應하는 y_n 을 한층 높은(큰) 水準의 規格斷面積 x_n 로 增加시킨 후 7)의 過程을 밟는다.

이와 같은 計算過程을 플로차트로 表示하면 그림 2와 같다.

4. 事例研究 및 檢討

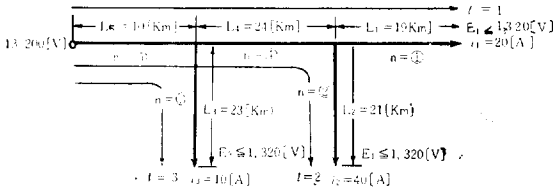


그림 3. 事例研究 對象 配電線路

Fig. 3. Distribution system for case study

前述한 알고리즘에 따라 標準프로그램을 開發하였는데 그 實用性を 檢討하기 위하여, 그림 3에 표시한 바와 같은 22.9/13.2-kV 3相線式 配電線路에 對하여 이 프로그램을 使用하여 事例研究을 行하였으며, 그 內容을 略述하면 다음과 같다

人力데이터 : 負荷地點數($L=3$), 線路要素數($N=5$), 電線種類數($I=8$), 等價線間距離($D=1007.92$ [m]), 力率($\cos\theta=0.8$), 最大電壓降下($K=1320$ [V]), 卽 10%), 電線固有抵抗($\rho=1000/55$ [$\Omega \cdot m$]), 電線透磁率($\mu=1$), 電線規格值($s_1=22$, $s_2=33$, $s_3=44$, $s_4=55$, $s_5=66$, $s_6=77$, $s_7=88$, $s_8=99$ [mm²])

出力解答 : 最適 斷面積($x_1=22$, $x_2=55$, $x_3=22$, $x_4=77$, $x_5=99$ [mm²]), 負荷點의 電壓降下($E_1=1241$,

$E_2=1319$, $E_3=472.7$ [V]), 所要 電線體積($f=4865$ [mm²·km]) 線路要素電流($i_1=20$, $i_2=40$, $i_3=10$, $i_4=60$, $i_5=70$ [A])

以上 計算結果는 斷面積 初期值를 過程5)에서 記述한 범위內에서 어느 값을 取하여도 同一하나, 計算收束速度의 觀點에서 x_n min으로 잡는 것이 가장 有利하다는 것이 實驗結果로 立證되었다. 그리고, 다른 몇가지의 事例 研究를 通하여도 本 技法을 適用함으로써 電線斷面積의 最適值를 決定할수 있음이 立證되었다.

5. 結 論

1. 複雑한 系統構成을 갖는 放射狀式 및 樹枝式 配電線路의 電線斷面積을 가장 經濟的으로 決定하는 計算 알고리즘과 電子計算 프로그램을 開發하였다
2. 事例研究를 通하여 이 프로그램의 實用性を 立證하였다.
3. 이 프로그램은 새마을 電化事業에 따른 配電線路의 經濟的 設計時에 適用되기를 期待한다.

끝으로, 本 研究는 產學財團의 支援으로 遂行한 “새마을 電化事業에 對한 技術支援”研究의 一部 成果임을 附記한다.

參 考 文 獻

1. G.W. Stagg and A. H. El-Abiad-Computer Methods in Power System Analysis, McGraw Hill, 1968, pp.27-59.
2. A.V. Fiacco and G.P. McCormick-Computational Algorithm for the Sequential Unconstrained Minimization Technique for Nonlinear Programming, Management Science, Vol.4, July, 1964