

電力潮流計算의 改善에 關한 研究

An Improved Fast Decoupled Newton Raphson Load Flow Study

論 文
26~2~4

朴 永 文* · 白 榮 植**
(Young Moon Park Young Sik Baick)

Abstract

The Newton-Raphson method has now gained widespread popularity in Load-flow calculations. In this paper programming is developed with aims to improve the convergence characteristics, speed and memory requirements in the above method. The method of Load-flow calculations is performed by employing the MW-O/MVAR-V decoupling principle. To reduce the memory requirements and improve the speed of calculation the programming of the Optimally Ordered Triangular Factorization method is developed. Besides this, other measures are taken to reduce memory requirements and computing time and to improve reliability.

KECO'S 48 Bus system was tested and the method suggested in this paper was proved to be faster than any other methods.

1. 緒 論

電力系統의 運用, 制御 및 計劃의 基本이 되는 電力潮流의 計算方法은 2次大戰以後 電子計算機의 活用과 더불어 여러 사람에 의하여 漸次로 發展되어 왔으며, 이에 關聯된 研究論文이나 報告書는 數百編에 이르며, 現在도 繼續 改良되고 있는 實情이다.

電力潮流計算 알고리즘의 良否의 尺度는 計算所要時間의 長短, 記憶容량의 大小, 收束性 및 信賴性 良否에 依存한다. 그러나 이것들은 相互 排他的이므로, 이들 要件들을 同時에 充足시키는 最良의 알고리즘은 理論上 存在할 수 없다. 그러나, 使用目的, 系統規模 및 電子計算機의 記憶容량을 前提로 한 實際 活用面에서의 最良의 알고리즘은 생각될 수 있다. 電力潮流計算의 효시적 方法이라 할 수 있는 가우스法(Gauss Method)은 한 反復計算 過程에서 各 母線電壓의 絕對值 또는 位相角만을 修正하므로 프로그램 作成이 簡單하고, 記憶容량이 가장 적게 所要되는 長點이 있으나, 計算時間이 가장 많이 所要되고, 收束性 및 信賴性이 不良한 缺點을 지니고 있다.⁶⁾

이를 改良한 워드-헤일法(Ward-Hale Method)은 한 反復計算過程에서 各 母線電壓의 絕對值와 位相을 同時 修正하므로, 前述한 方法보다는 有利하나 本質의 으로는 前述한 方法의 長短點을 그대로 지니고 있다.⁶⁾ 그 以後에 開發된 뉴우튼-라프슨法(Newton-Raphson Method)은 計算速度 및 收束性 面에서는 優秀하나, 2次元의 자코비안 行列을 記憶하여야 하므로 많은 記憶容량이 所要되는 缺點이 있다.¹⁾ 以上の 方法과는 別個로 非線形計劃法에 依한 알고리즘이 最近 많이 研究되고 있으나, 이 方法 역시 所要記憶容량의 觀點과 알고리즘 自體의 未定性 때문에 母線數가 많은 大電力系統에 온라인용으로 適用하려면 아직 相當한 時日이 所要될 것으로 보고 있다.²⁾

最近의 動向으로는, 前述한 뉴우튼-라프슨法을 改良하는 方向으로 研究의 焦點이 集中되고 있으며, 그 主要目標은 記憶容량의 節減을 위한 分割法³⁾(Decoupling Method)과 자코비안 行列의 逆行列과 同一한 效果를 갖는 因數表(Factor Table)에 依한 直接法 및 母線番號 再配列法의 研究에 두고 있다.

本 研究도 이 分割法과 直接法을 더욱 改良하는데 焦點을 두었으며, 아래와 같은 點에 特히 留意하여 프로그램을 開發하였다.

* 正會員: 서울대工大副教授(工博當·學會事業理事)

** " " 大學院

接受日字: 1977年 1月 24日

- a) 計算速度를 分割法과 같은 水準으로 維持한다.
- b) 記憶容量을 最大限 節減한다.
- c) 收束特性 및 信賴度를 向上시킨다.

2. 母線어드미턴스 構成 알고리즘

그림 1과 같이 線路 i 의 兩端에 母線 j 및 k 가 接續되어 있고 線路의 j 側 및 k 側에 非公稱變比(off-nomial tap ratio) t_{ij} 및 t_{ik} 의 變壓器가 있고, i 線路의 임피던스가 $R_i + jX_i$, 어드미턴스가 jb'_i 라할때 母線어드미턴스 行列 $[G + jB]$ 는 다음式으로 表示된다.

$$\begin{aligned} G_{jk} &= G_{kj} = -\sum_{i \in S} \{g_i / (t_{ij}t_{ik})\} \\ B_{jk} &= B_{kj} = -\sum_{i \in S} \{b_i / (t_{ij}t_{ik})\} \\ G_{ij} &= \sum_{i \in S} \{g_i / t_{ij}^2\} \\ B_{ij} &= \sum_{i \in S} \{(b_i + 0.5b'_i) / t_{ij}^2\} \end{aligned} \quad (1)$$

但, $S = j, k$ 母線에 接續된 線路集合

$$g_i = R_i / (R_i^2 + X_i^2)$$

$$b_i = -X_i / (R_i^2 + X_i^2)$$

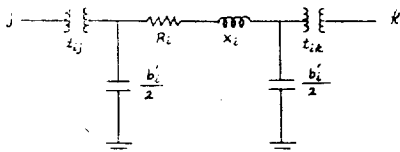


그림 1. j 및 k 母線에 接續된 i 線路
Fig. 1. Line i connected between busses j and k

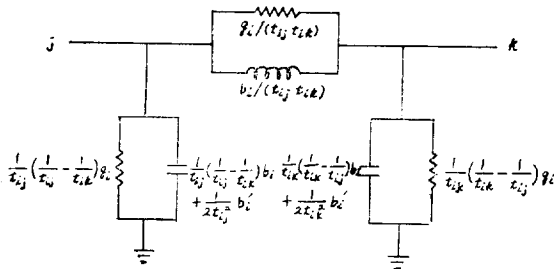


그림 2. 그림 1의 等價回路
Fig. 2. Equivalent circuit of Fig. 1.

式(1)의 行列을 計算, 記憶, 引用하는데 있어서 가장 問題가 되는 것은 그 記憶容量과 引用時間이다. 그런데 이 行列은 매우 스퍼스(Sparse)하므로 本 研究에서는 非零要素(nonzero element)만을 1次元으로 配列함으로써 記憶容量을 大幅 減少시켰고(母線어드미턴스 構成時에 1次元配列했음), 母線電力이나 자코비안 行列의 計算時에 高速으로 引用하기 위해서 非零要素만

을

$$G_{11}, G_{12}, G_{14} \dots G_{jk} G_{lm} \dots G_{nn}$$

$$B_{11}, B_{12}, B_{14} \dots B_{jk} B_{lm} \dots B_{nn}$$

但, $j \leq l, k \leq m (j=l$ 에

의 順으로 즉, 行順으로 配列하고, G_{jk} (또는 B_{jk})에서 j 의 값이 增加할 때마다 그 G_{jk} (또는 B_{jk})의 位置를 1次元 配列의 NJ 에 記憶시키고, 이와 別途의 1次元 配列 NK 에는 母線番號 k 를 차례로 記憶시킴으로써 必要한 母線어드미턴스를 高速으로 引用할 수 있도록 하였다.

3. 電力潮流 計算 基本 알고리즘

j 母線에서의 有効 및 無効電力 편차(mismatch) $\Delta P_j, \Delta Q_j$ 는

$$\Delta P_j = PS_j - P_j = PS_j V_j \sum_{k \in S} V_k (G_{jk} \cos \theta_{jk} + B_{jk} \sin \theta_{jk}) \quad (2)$$

$$\Delta Q_j = QS_j - Q_j = QS_j - V_j \sum_{k \in S} V_k (G_{jk} \sin \theta_{jk} - B_{jk} \cos \theta_{jk})$$

但, $PS_j, QS_j = j$ 母線의 指定 有効 및 無効電力

$P_j, Q_j = j$ 母線의 計算 有効 및 無効電力

$$\theta_{jk} = \theta_j - \theta_k$$

$\theta_j, \theta_k = j$ 및 k 母線의 電壓 位相角

$V_j, V_k = j$ 및 k 母線의 電壓 絕對值

$S = j$ 母線에 接續된 線路의 他端 母線集合

$G_{jk}, B_{jk} =$ 母線어드미턴스 行列의 j 行 k 列의 有効 및 無効分으로서 NJ, NK 에 의해서 1次元 配列로부터 쉽게 引用될 수 있다.

와 같고, 잘 알려진 뉴턴-라프슨법은

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H' & N' \\ J' & L' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3)$$

但, $\Delta P, \Delta Q, \Delta \theta, \Delta V =$ 有効 및 無効電力, 電壓位相角 및 絕對值 偏差

$$H'$$
의 jj 要素 $H_{jj}' = -B_{jj}V_j^2 - Q_j$

$$H'$$
의 jk 要素 $H_{jk}' = V_j V_k (G_{jk} \sin \theta_{jk} - B_{jk} \cos \theta_{jk}), j \neq k$

$$L'$$
의 jj 要素 $L_{jj}' = -B_{jj}V_j + Q_j/V_j$

$$L'$$
의 jk 要素 $L_{jk}' = H_{jk}'/V_j$

(4)

의 式(3)에서 부터

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H' & N' \\ J' & L' \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (5)$$

와 같이 各 偏差 $\Delta \theta, \Delta V$ 를 逐次的으로 改善하는 方法이다.

그리고 分割법은 行列 N' 및 J' 의 各 要素를 近似的으로 零으로 간주하여 式(5)를

$$[\Delta\theta] = [H']^{-1}[\Delta P] \quad (6)$$

$$[V] = [L']^{-1}[\Delta Q] \quad (7)$$

와 같이 分割함으로써 자코비안의 記憶容量을 約 1/4로 減少시키고, 所要 計算時間을 短縮시키는 方式이다 그리고 最近에는 $[H']^{-1}$, $[L']^{-1}$ 를 求하는 데에 母線番號 最適配定 三角因數法(Optimally Ordered Triangular Factorization Technique)을 使用함으로써 計算時間을 현저하게 短縮시키고 있다.

그런데 本 研究에서는 式(6) 및 (7)을

$$[V\Delta\theta] = [H]^{-1}[\Delta P/V] \quad (8)$$

$$[\Delta V] = [L]^{-1}[\Delta Q/V] \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{但 } H_{ij} &= -B_{ij} - Q_j/V_j^2 \\ H_{jk} &= G_{jk}\sin\theta_{jk} - B_{jk}\cos\theta_{jk} \\ L_{jj} &= -B_{jj} + Q_j/V_j^2 \\ L_{ik} &= H_{ik} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

와 같이 變形하므로써 $[H]$, $[L]$ 行列의 計算時間을 短縮하였다. 또 (10)式에서의 $\sin\theta_{jk}$ 및 $\cos\theta_{jk}$ 는 이것을 母線어드미턴스의 配列과 一致시켜 配列하므로써 쉽게 引用될 수 있도록 하였다.

4. 母線 및 線路의 有効 및 無効電力計算 알고리즘

a) 母線 有効 및 無効電力의 計算

$$P_j = V_j \sum_{i=NJ(i)}^{NJ(i+1)-1} V_k (G_i \cdot C_i + B_i \cdot S_i) \quad (11)$$

$$Q_j = V_j \sum_{i=NJ(i)}^{NJ(i+1)-1} V_k (G_i \cdot S_i - B_i \cdot C_i)$$

但, $k = NJ(i)$ (NJ 는 2에서 說明한 바와 같음)

$G_i, B_i = 1$ 次元으로 配列된 G_{ik}, B_{ik}

$S_i, C_i = 1$ 次元으로 配列된 $\sin\theta_{ik}, \cos\theta_{ik}$

b) 線路 有効 및 無効電力의 計算

i 線路의 j 에서 k 로 흐르는 有効 및 無効電力 $PL_{i(j-k)}$ 및 $QL_{i(j-k)}$ 는

$$\left. \begin{aligned} PL_{i(j-k)} &= V_j \cdot V_k (g_i \cdot c_i + b_i S_i) / t_{ij} \cdot t_{ik} + \\ & \quad V_j^2 \cdot g_i / t_{ij}^2 \\ QL_{i(j-k)} &= V_j \cdot V_k (b_i \cdot c_i - g_i \cdot S_i) / t_{ij} \cdot t_{ik} - \\ & \quad V_j^2 (b_i + 0.5b_i') / t_{ij}^2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

但, $l = NK(p)$ (但 $p = NJ(j) \sim NJ(j+1) - 1$) 中에서 $NK(p) = k$ 와 一致하는 p 의 값

5. 電壓調整 母線의 無効電力 上下限值

負荷電力만이 接續되어 있는 母線의 無効電力은 指定이 되나, 發電機나 또는 調相機가 接續되어 있는 母線의 無効電力은 그 上下限值 QU_j 및 QL_j 가

$$\left. \begin{aligned} QU_j &= QGU_j + QCU_j + QR_j \\ QL_j &= QGL_j + QCL_j + QR_j \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

但, $QGU_j, QGL_j =$ 發電所 無効電力의 上下限值
 $QCU_j, QCL_j =$ 調相機 容量 上下限值
 $QR_j =$ 負荷의 無効成分

로서 주어지는데 $QR_j, QCU_j, QGL_j, QCL_j$ 는 미리 定해져 있으나 QGU_j 는 可能 最低力率 $\cos\phi_j$ 및 發電所 有効出力 PS_j 에 依하여 制限된다. 즉

$$QGU_j \leq PG_j \cdot \sqrt{1 - \cos^2\phi_j} / \cos\phi_j = X_j \quad (14)$$

$$QGU_j \leq \sqrt{M_j^2 - PG_j^2} = Y_j \quad (15)$$

但, $M_j = j$ 母線에 接續, 稼動中에 있는 發電機의 最高許容 皮相電力의 合計

의 兩式을 同時에 充足시키는 값 中에서 最小의 것을 擇하여야 한다.

6. 母線 有効 및 無効電力 편차 計算 알고리즘

스택 母線을 除外한 母線의 有効電力 PS_j 와, 負荷만이 接續되어 있는 母線의 無効電力 QS_j 는 指定이므로 그 偏差는 式 (2) 및 (11)에 依하여 計算되나, 電壓調整 母線의 QS_j 는 不指定이므로 그 偏差는

$$Q_j' = Q_j \cdot VS_j / V_j \quad (16)$$

但, $VS_j = j$ 母線의 電壓 絕對值 指定值로서 주어지는 Q_j' 에 대하여 無効電力偏差 ΔQ_j 는

$$\Delta Q_j = \begin{cases} QU_j - Q_j & \text{if } Q_j' > QU_j \\ 0 & \text{if } QU_j \geq Q_j' \geq QL_j \\ QL_j - Q_j & \text{if } Q_j' < QL_j \end{cases} \quad (17)$$

와 같이 計算된다.

7. 電壓絕對值의 豫備修正 알고리즘

電壓位相角의 修正은 後述하는 자코비안과 因數表로 計算된 $\Delta\theta$ 에 依하나, 電壓絕對值의 修正은 이에 앞서 一次的인 修正을 거치도록 하였다. 그 첫째 理由는 從來의 分割法에 依한 反復回數를 줄여서 計算速度를 向上시킬수 있고, 다음 理由로서 電壓調整 母線의 調整 容量을 보다 正確하게 求하는데 있어 이 豫備修正의 效果가 크다는 것이 實驗結果로 立證되었기 때문이다.

즉 發電機나 調相設備가 있는 母線의 電壓絕對值는 電壓指定值 VS_j 에 對應하는 母線 無効電力 Q_j' 가 調整 上限值 QU_j 보다 크면 現在의 電壓 V_k 를 QU_j 에 對應하는 電壓에 近接하도록 修正하고, 調整下限值 QL_j 보다 적으면 QL_j 에 對應하는 電壓에 近接하도록 修正하고 $QU_j \sim QL_j$ 區間內에 있으면 VS_j 로 修正한다는 것이다. QU_j 및 QL_j 에 近接하는 V_j' 는 다음 式으로 구한다.

于先 V_j' 의 計算時 다른 母線의 電壓은 不變으로 간

주할때 식 (11)로 부터 V_j' 는

$$QU_j(\text{or } QL_j) = a_j V_j'^2 + b_j V_j' \quad (18)$$

但, a_j, b_j = 母線 어드미턴스 및 電壓에 依하여 決定되는 상수

로서 주어지는데, 이는 V_j' 에 대한 2次式이므로 計算時間의 단축을 위하여 本 研究에서는

$$QU_j(\text{or } QL_j) \approx V_j \sum_{i=N_j(j)}^{N_j(j+1)-1} V_k (G_i \cdot S_i - B_i C_i) \quad (19)$$

但, $k = NK_i$ 의 값, $V_j = V_j'$

로 놓고 이 式으로 부터

$$V_j' \approx \left\{ \sum_{i=N_j(j)}^{N_j(j+1)-1} \{V_k (G_i \cdot S_i - B_i C_i)\} \right\} / B_i \quad (20)$$

但 l = 驅動 어드미턴스 虛數部로서 $NK_i = j$ 의 條件을 充足시키는 i 의 값

을 取하되, 그대로를 取하면 反復過程의 惡條件에서는 發散할 경우가 있으므로 適當한 減速係數 α 를 고려하여 V_j 를

$$V_j'' = V_j + \alpha (V_j' - V_j) \quad (21)$$

로서 주어지는 V_j'' 로 修正하였다. 그리고 實驗에 依하면 韓電系統에서는 $\alpha = 0.5$ 가 適合하였다.

8. 母線番號 再配定 三角因數法(Optimally Ordered Triangular Factorization method)에 依한 冢코비안의 倒置(inverse)

式(8) 및 (9)를 求하는 때에는 $[H]$ 및 $[L]$ 行列을 倒置하여야 하기때문에, $[H]$ 및 $[L]$ 行列의 各 要素들을 記憶해둘 必要가 있다. 따라서 많은 記憶容量을 必要로 하며 이것이 뉴튼-라프슨法에서의 記憶容量의 大部分을 차지하므로 前부터 이것을 줄이기 위하여 많은 研究가 되어 왔다. 本 研究에서는 아래와 같은 알고리즘에 의한 프로그램을 開發하므로써 이 問題를 解決하였다.

우선 $[H]$ 및 $[L]$ 行列은 母線어드미턴스와 같이 零要素가 大部分을 차지하므로 이 要素들 中에서 非零要素만을 그림 3과 같은 스템으로 1次元 配列하여 記憶容量을 大幅 省감한다. 그러나 이렇게 配列하여도 이 行列을 三角因數로 分解하는 途中에 非零要素가 나타나므로, 母線番號를 再配列하므로써 非零要素가 最少로 나타나도록 하였다.

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & a_{15} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & a_{35} & 0 \\ 0 & a_{42} & 0 & a_{44} & 0 & a_{46} \\ 0 & 0 & a_{53} & 0 & a_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{64} & 0 & a_{66} \end{pmatrix}$$

Loc	Diagonal	Upper Diagonal	Lower Diagonal
1	a_{11}	a_{12}	a_{21}
2	a_{22}	a_{15}	a_{51}
3	a_{33}	a_{24}	a_{42}
4	a_{44}	a_{35}	a_{53}
5	a_{55}	a_{46}	a_{64}
6	a_{66}		

그림 3. 行列의 1次元 配列스켄

Fig. 3. Compact memory ordering scheme.

冢코비안의 倒置方法을 說明하면 식(8) 및 (9)를 $[A]x = b$ 로 나타내면, 行列 $[A]$ 를 三角因數로 分解하여

$$[L][U]x = b \quad (22)$$

이 式에서 未知數 x 는, $[L]y = b$ 에서 y 를 求한後 $[U]x = y$ 의 式에서 求한다. 母線番號 再配列法은 參考文獻^{3,4,5}을 참조하고, 이것을 간단히 소개하면

a) 線路가 가장 적게 연결되어 있는 母線부터 母線番號를 配定해 나가는方法(가우스消去 途中에 나타나는 非零要素를 고려 안했으나 配列이 쉬움)

b) a)方法으로 해 나가되 各 段階마다 다음의 母線番號를 指定할때 線路가 가장 적게 연결되어 있는 母線을 고른다. (즉 이미 配定해 놓은 母線은 없는것으로 간주한 그래프에서 a)方法을 行한다)

c) 各 段階에서 實際 가우스 消去(三角因數分析)途中에 나타날 수 있는 非零要素가 最小인 母線을 고른다.

이 方法들은 a), b), c)順으로 母線을 配列하기가 複雜해지나 b)方法으로도 충분한 成果를 얻을 수 있었다.

9. 電壓位相角 및 絕對值 修正 알고리즘

8의 結果로 얻어지는 V_j, θ_j 및 ΔV_j 의 값으로 부터 $C_i = \cos \theta_{jk}$, $S_i = \sin \theta_{jk}$ 및 V_j 를 $C_i' = \cos \theta_{jk}'$, $S_i' = \sin \theta_{jk}'$ 및 $V_j' = V_j + \Delta V_j$ 로 修正하게 된다. V_j 의 修正은

$$V_j' = V_j + \Delta V_j \quad (23)$$

로 簡單히 計算할 수 있으나, C_i 및 S_i 의 修正에 關해서 本 研究에서는 다음 2가지의 特徵이 있다.

a) 三角函數 計算의 近似化

三角函數의 計算에는 많은 時間이 所要되므로

$$\begin{aligned} C_i' &= \cos(\theta_{jk} + \Delta \theta_j - \Delta \theta_k) \\ &\approx C_i \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{2} (\Delta \theta_j - \Delta \theta_k)^2 + \frac{1}{24} (\Delta \theta_j - \Delta \theta_k)^4 \right\} \\ &\quad - S_i \cdot \left\{ (\Delta \theta_k - \Delta \theta_j) - \frac{1}{6} (\Delta \theta_j - \Delta \theta_k)^3 \right\} \quad (24) \\ S_i' &\approx S_i \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{2} (\Delta \theta_j - \Delta \theta_k)^2 + \frac{1}{24} (\Delta \theta_j - \Delta \theta_k)^4 \right\} \end{aligned}$$

$$+ C_i \cdot \left\{ (\Delta\theta_j - \Delta\theta_k) - \frac{1}{6} (\Delta\theta_j - \Delta\theta_k)^3 \right\} \quad (25)$$

의 近似式으로 計算하였다.

b) C_i 의 範圍

θ_{jk} 는 電力系統 安定度の 觀點에서 $-\frac{\pi}{2} \leq \theta_{jk} \leq \frac{\pi}{2}$ 의 範圍에 머물러 있어야 하고 電力潮流計算의 信賴性を 保障하기 위해서도 이 範圍에 있어야 한다. 그러므로 位相角修正 過程에서 $C_i < 0$ 의 경우가 發生하면 지금까지의 計算을 포기하고 다시 原點에서 부터 $\Delta P/V$ 의 값을 1/2배로 減少시켜 再計算을 行하고 反復回數가 어느 程度 進行된 다음 $\Delta P/V$ 의 값을 그대로 取하는 方法을 使用하였다. 이렇게 함으로써 重負荷時等 惡條件의 電力潮流 計算에서 通常으로 發散하는 경우에도 이 方法의 導入으로 收束이 可能하였음이 實驗의 으로 立證되었다.

10. 電力潮流計算 順序 및 收束特性

至今까지의 計算過程을 플로우차트로 圖示하면 그림

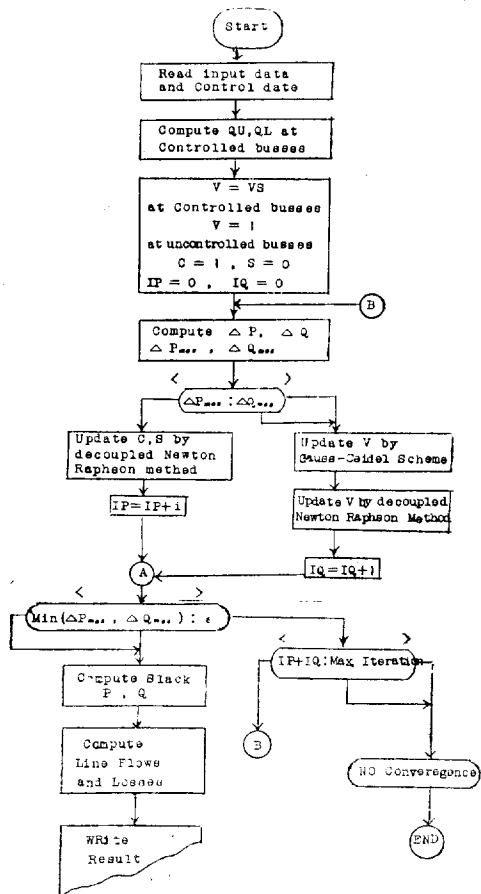


그림 4. 電力潮流計算 플로우차트
Fig. 4. Flowchart for Load-flow calculation.

4와 같다.

最近까지의 文獻에 依하면 分割潮流計算過程에서 $P-\theta$ 修正과 $Q-V$ 修正의 順序를 定하는 問題가 많이 論議되어 왔으며, 소토티-알색크(Stott Alsac)²⁾는 $P-\theta$ 修正과 $Q-V$ 修正을 번갈아 行하였고, $P-\theta$ 修正 2回後 $Q-V$ 修正 1回等 各各 相異한 主張들이 있으나 本 研究의 實驗結果에 依하면 電壓調整 母線의 比率이 큰 系統에서는 오히려 $Q-V$ 修正回數가 많은 것이 바람직 하고, 系統이 다르면 또 다른 法則을 定하여야 하기 때문에 一律的으로 交互順序를 定할 수가 없다는 結論을 얻었다. 따라서 本 研究에서는 이 交互順序를 미리 定하기 보다는 有效 및 無效電力 最大偏差 ΔP_{max} 및 ΔQ_{max} 를 相互比較하여 큰 쪽에 對하여 다음 順序로 修正을 行하도록 하였으며, 이 結果는 全 計劃時間을 短縮하는데 매우 有效하다는 것이 立證되었다. 韓電系統(48母線, 93線路)에 對한 事例 計算結果로 얻어진 收束特性을 圖示하면 그림 5와 같다.

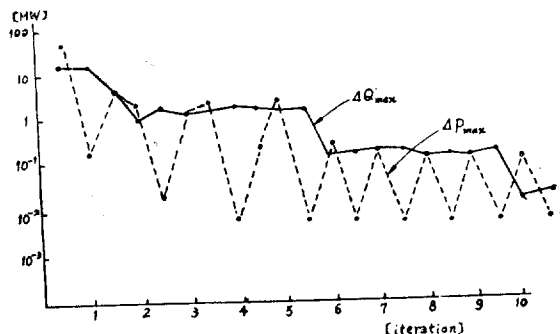


그림 5. 韓電系統의 電力潮流計算 收束特性
Fig. 5. Convergence characteristics in load flow calculation of KECO system.

11. 結論

a) 至今까지 우리나라에서 使用해온 가우스-사이델 法이나 워어트-헤일法에 比해 分割潮流計算法과 母線番號 最適配定法과 最適配定 三角因數化法에 依한 直接法을 導入한 本 研究의 알고리즘 및 프로그램은 計算速度가 10倍以上(韓電의 48母線, 93線路系統에서 CPU 時間 7秒 이 時間은 母線어드미턴스의 계산시간도 포함되었으며 韓電의 FACOM 230 OS2/VS計算機에 의 하였음)向上되고, 記憶容量은 若干 增加하는 程度로 斷然優秀하다.

b) 母線어드미턴스 $\cos\theta_{jk}$ 및 $\sin\theta_{jk}$ 를 非零要素만을 1次元으로 配列하고 이를 高速으로 引用하기 위한 스킴을 研究하므로써 記憶容量의 節減 및 計算時間의 短縮이 可能하였다.

c) 電壓調整 母線에서 1회의 가우스-사이델 스킴을

上記 a)法과 併行 使用하므로써 結果的으로 計算時間을 短縮시켰다.

d) 從前에서와 같이 $P-\theta$ 修正과 $Q-V$ 修正을 事前에 決定하지 아니하고 最大 電力偏差가 큰 쪽을 다음修正 順序로 定함으로써 修定回數를 短縮하여 結果的으로 計算時間을 短縮시켰다.

e) 線路의 兩端에 變壓器가 接續되어 있는 線路에 對한 等價回路의 알고리즘을 誘導하여, 母線어드미턴스 計算方法을 標準化시켰다.

參 考 文 獻

- (1) William F. Tinney, "Power Flow Solution by Newton's method", IEEE PAS-86, No.11 NOV. 1967, pp. 1449~1460.
- (2) Brian Stott, "Decoupled Newton Load Flow", IEEE PAS-91 Set/Oct 1972, pp. 1955~1959.
- (3) William F. Tinney and John W. Walker, "Direct Solutions of Sparse Network Equation's by Optimally Ordered Triangular Factorization", Proceedings of the IEEE, Vol. 55, No.11 NOV. 1967, pp. 1801~1809.
- (4) William F. Tinney and W. Scott Meyer, "Solution of Large Sparse Systems by Ordered Triangular Factorization", IEEE AC-18, No. 4 AUG. 1973, pp. 333~345.
- (5) E.C Ogbuobiri, William F. Tinney, John W. Walker, "Sparsity Directed Decomposition for Gaussian Elimination on Matrices", IEEE PAS-89, No. 1, JAN. 1970, pp. 141~150.
- (6) 關根泰次, "電力系統解析理論," 電氣書院, 1971.
- (7) Albert M. Sasson, "Nonlinear Programming Solutions for Load Flow, Minimum-Loss, and Economic Dispatching Problem", IEEE PAS-88, APR. 1969, pp. 339~408.