

# Newton-Raphson 潮流計算法의 擴張 方案 研究

신 중 린 \* 임 한 석  
( 건국대학교 전기공학과 )

## An Extended Approach for Newton-Raphson Power Flow Calculation

Shin, Joong-Rin Yim, Han-Suck  
( Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University )

### Abstract

The power flow calculations are the most important and powerful tools in the various studies of power system engineering. Newton-Raphson method, among the various power flow calculation techniques, is normally used due to its rapidness of numerical convergency. In the conventional Newton-Raphson method, however, there are some unrealistic assumptions, in which all the system power losses are considered to be supplied by the slack bus generator.

Introducing the system power loss formula and augmenting the conventional Newton-Raphson power flow method, we can relieve the unrealistic assumption and improve the performance of power flow calculation. In this study, A new approach for handling the losses and augmenting the conventional power flow problem is proposed. The proposed method estimates the incremental changes of active power on each generation bus with respect to the change of total system power losses and the estimated value are used to update the slack bus power.

If some studies for more theoretical investigations and verifications are followed, the proposed approach will show some improvement of the conventional method and give lots of contribution to increase the performance of power flow techniques in power systems engineering.

### 1. 序論

潮流計算이란 각 母線에 대한 電力의 공급과 수요가 주어졌을때 電力 계통내 각 母線의 電壓이 어떻게 분포될 것인가를 찾는 문제이다. 電力潮流를 실제로 어떻게計算할 것인가 하는 문제는 1947年 던스턴( L. A. Dunstan)에 의하여 주어졌다. 그는 電子計算機를 電力潮流計算에 사용 할 수 있다는 것을 처음으로發表하였다. [1]

그 뒤, 1956年 워드(J. B. Ward)와 헤일(H. W. Hale)이 실제적인 解法과 可能性을 提示한 것[2] 을 시작으로 본격적인 研究가 進行되었으며 많은 사람들에 의하여 개선된 研究成果와 報告書들이 發表되었다. [3]-[8]

現在 쓰이는 여러가지 電力潮流計算方法의 性能은 計算 所要時間과 計算所要 記憶 容量, 收斂의 保障性 및 信頼性 등으로 가늠할 수 있는데, 이러한 조건들은 相互 排他的인 性向을 갖고 있으므로 모든 條件들을 滿足시키기는 곤란하나, 실제의 活用面에서 使用 目的과 대상 系統의 規模, 計算器의 記憶 容量 등에 의하여 最適의 計算方法을 摸索 할 수 있다.

電力潮流計算方法은 크게 Gauss-Seidel法과 Newton-Raphson法으로 區分할 수 있다. 먼저 Gauss-Seidel法은 論理가 單純하고 計算 프로그램 作成이 간단하며, 反復 계산 과정에서 계산기의 기억 容量이 적게 소요 된다는 長點이 있으나, 收斂까지의 反復 횟수가 다른 方法들에 비해 兪동히 많고, 解의 收斂性 및 信頼性이 良好하지 못한 缺點을 가지고 있어 現在는 거의 使用되지 않고 있다. 이에 반하여, Newton-Raphson 法은 收斂까지의 反復 횟수가 적고 收斂 特性이 비교적 優秀하다. 初期值나 Slack 모선의 選定에 따라 解의 收斂 特性이 敏感하다는 缺點을 가지고 있기는 하지만, 最終解를 얻기까지의 計算 時間이 짧기 때문에 現在의 電力潮流計算은 거의 전적으로 Newton-Raphson법에 기반을 두고 있다. [5]-[8]

潮流計算의 기본을 이루는 것은 電力方程式 (Power equation)이며 각 母線마다 有效 電力方程式과 無效 電力方程式이 하나씩 들어진다.  $n$ 개의 母線이 있는 電力系統이라면  $2n$ 개의 非線形 聯立 方程式이 들어진다. 이  $2n$ 개의 電力方程式은 각 모선마다 키르호프 第 1法則을 따르기 때문에  $2(n-1)$ 개의 式만이 독립이다. 現在 使用되고 있는 電力潮流計算에서는 從屬인 2개의 電力方程式에 해당하는 母線을 Slack 母線으로 定하여 送電 損失을 슬랙 母線이 擔當하는 것으로 가정하여 처리한다. [9]

大部分의 境遇에는 위와같은 現在의 方法으로서 充分하다. 그러나 실제의 電力系統 解析 問題에 있어서 사례에 따라서는 Slack 母線의 位置 選定에 따라서 slack 母線 出力이 심하게 변하는 境遇가 있어 어려울 경계된다. 이러한 現象은, 實際 系統 送電 損失을 모든 發電機가 系統 特性에 따라 分擔하게되는 것을 기존의 潮流計算에서는 풀이 技法上 Slack 母線이 損失을 全擔 하는 것으로 取扱하기 때문이다.

系統 損失을 制御 變數로 취급, 적당한 값을 指定하여 확장된 Newton-Raphson 反復計算을 施行하고 指定된 損失과 計算된 損失의 偏差가 적어지도록 送電 損失을 反復補整하는 方法을 擇하면 좀더 실제에 가까운 조류계산의 解를 얻을 수 있을 것이라 생각된다. 本 논문에서는 發電 母線 有效 電力 jacobian 계산식과 유사한 형태의  $\partial P_G/\partial v$ 과  $\partial P_L/\partial v$ 를 계산하여, 지정된 送電 損失과 바로 前 反復 과정에서 計算된 損失과의 偏差를 發電모선에 再 配分 시키는 효율적인 方法을 제안하고자 한다.

## 2. 潮流計算法의 一般 形態

電力 시스템에서의 모든 상태는 電力 方程式의 형태로 표현되는데, 그림은 임의의 母線 i에 대한 일반적인 構成을 보인 것이다.

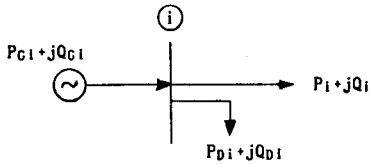


그림 1. 一般 母線의 表現  
Fig. 1. General Configuration of Bus i

이는 發電機로부터 電力이 유입되어, 일부의 電力이 負荷로 供給되고, 잔여분은 시스템의 다른 부분으로 傳送되는 것을 보이는 것으로 수식으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{Gi} - P_{Di} = P_i$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} = Q_i$$

단,  $P_{Gi}$ ,  $Q_{Gi}$ : i 母線의 有效 및 無效 發電出力  
 $P_{Di}$ ,  $Q_{Di}$ : i 母線의 有效 및 無效 負荷

또한 시스템으로 電送되는 皮相 電力은 有效 電力과 無效 電力의 합으로 아래와 같이 표시할 수 있고

$$S_i = P_i + jQ_i$$

이는 또한 i 母線의 電壓과 電流, 선로의 어드미탄스로

$$S_i = \dot{V}_i \dot{I}_i^* = \dot{V}_i \left\{ \sum_{j=1}^n (Y_{ij} \dot{V}_j) \right\}^* \quad (1)$$

와 같이 나타낼 수 있고, 다시 電壓의 크기와 위상각, 어드미탄스의 실수부와 허수부로 표시하면

$$S_i = V_i e^{j\delta_i} \sum_{j=1}^n (G_{ij} - jB_{ij}) V_j e^{-j\delta_j} \quad (2)$$

단,  $V_i$ ,  $V_j$ : i, j 母線의 電壓크기  
 $\delta_i$ ,  $\delta_j$ : i, j 母線의 電壓 위상각  
 $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$

이 식을 Euler 공식을 이용하여 電力의 有效분과 無效분으로 나누어 쓰면

$$P_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (3a)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (3b)$$

단,  $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$

이를 母線 電力 方程式 (Bus power equation) 이라 하며, 각 母線마다 한쌍씩 총 2n 個의 관계식을 얻는다.<sup>[9]</sup>

## 3. Newton-Raphson 潮流 計算法

$P_i$ ,  $Q_i$  식을 각각 有效 電力 方程式, 無效 電力 方程式이라 부른다. 뒷 식에서 母線 유입 電力  $P_k$ ,  $Q_k$ 는 각 母線의 發電量에서 負荷값을 뺀값이 된다. 각 線路의 어드미탄스 값  $G_{kj}$ 와  $B_{kj}$ 는 이미 알고 있는 값으로 보고 나머지를 모두 變數로 본다면 각 母線마다 4個의 미지수 ( $P_k, Q_k, V_k, \delta_k$ )가 존재하며 계통 전체로는 4n個의 미지수를 갖게된다. 따라서 주어진 식은 2n 個에 불과하므로 4n個 중 2n個의 미지수에 대하여는 값을 지정해 주어야 다른 미지수를 구할 수 있다.

일반적으로는 각 母線을 순 負荷 母線과 순 發電 母線으로 구분하여 순 負荷 母線에 대하여는 사용 負荷의 有效분과 無效분을 지정하고 순 發電機 母線에서는 發電 有效電力과 發電 電壓을 지정하여, 그때 각 母線의 電壓의 크기와 위상각을 구한다. 각 母線의 電壓이 알려지면 각 線路의 電力 潮流는 쉽게 얻을 수 있다. 이때 문제가 되는 것은 전력계통 내에서 발생하는 송전손실의 취급이다. 이 송전손실은 각 모선 전압크기와 위상각의 분포에 따라 결정되는데, 이들 전압크기와 위상각은 각 발전모선의 유효전력의 크기가 주어져야 구할 수 있다. 한편 계통 전체의 유효전력 총합은 계통의 송전손실이 계산되어야만 얻어진다. 즉, 解析的으로는 조류계산의 해가 존재하지 않는다. 이 것은 서론에서 설명한 바와 같이 2n개의 연립방정식 중 2개가 종속이기 때문에 생기는 불가피한 현상이다. 이러한 計算의 어려움을 극복하기 위하여 기존의 조류계산에서는 적어도 하나의 發電 母線의 出力을 지정하지 않고 나머지 發電 母線만의 出力을 지정하여 電壓과 계통 손실을 計算한 후, 負荷 母線의 有效 電力의 합에 손실을 더한 값에서 지정된 發電 出力의 합을 뺀 값을 出力을 지정하지 않은 發電 母線의 發電 出力으로 하는 방식으로 문제를 근사화하는 것이다.

또 한가지, 電力 方程式을 자세히 살펴보면 電壓 위상각은 모두  $\delta_k - \delta_j$  형태로 나타나 있기 때문에 각 위상각 사이의 상대값, 즉 위상각 차이가 중요할 뿐  $\delta$ 의 절대값은 의미가 없다. 따라서 위상각 차를 計算하기 위하여 하나의 기준 母線을 정하여 위상각을 지정해 주어야 한다. 위 두 가지 이유로 기존의 조류계산법에서는 發電 母線 중 하나를 선정하여 그 母線에서는 發電 出力과 電壓의 크기를 지정하는 대신 電壓의 위상각과 電壓의 크기를 지정한다. 이 母線을 슬랙 母線 (Slack bus)라고 부른다. 슬랙 母線을 선정하는 기준이 특별히 정해져 있는 것은 아니며 計算 조건에 따라 결정되어야 한다. 일반적으로는 發電 용량이 가장 큰 發電 母線을 택한다. 이와 같이 슬랙 母線을 결정해야 하는 것은 電力 계통을 母線 電力 方程式으로 표현하기 때문에 발생하는 정칙과 과정상의 假定일 뿐이며 電力 계통이 갖는 물리적 특성은 아니다.

실제로, 電力 계통내에서 발생하는 손실은 계통의 특성에 따라 모든 發電機가 공동으로 분담하는 것이며 하나의 發電機가 모든 손실을 감당하는 것은 아니므로, 潮流 計算에 있어서 슬랙 母線의 위치를 바꾸면 電力 계통의 구조적 특성에 따라 그 計算 결과가 약간 다르게 나타날 수 있다.

電力方程式은 삼각함수를 포함하는 비선형 方程式이므로 Slack 모선을 지정한다 하더라도 解가 쉽게 얻어지지 않는다. Newton-Raphson 潮流 計算法은 未知量에 적당한 크기의 초기치를 주고, 그 초기치로부터 Taylor 1차 근사식을 이용, 반복적인 計算 과정을 시행하므로서 미지수의 값을 개선해 나가다가 그 개선된 解가 미리 정해 놓은 基準에 도달하면 計算을 멈추는 방법을 택한다.

편의상 母線번호 1 - m 까지 가 負荷 母線이고 (m+1) - (n-1) 까지 가 發電 母線, 그리고 Slack 母線번호를 n 이라 하면, 潮流 計算은 아래와 같은 (n-1)\*m 個의 方程式으로부터 같은 數의 미지량  $V, \delta$ 를 구하는 문제로 귀착된다.

$$P_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (3a')$$

$$i = 1, 2, \dots, n-1$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (3b')$$

$$j = 1, 2, \dots, m$$

주어진 초기값 \$V\_0, \delta\_0\$ 근방에서 \$i\$ 모선에 대한 (3')식의 Taylor 1차 근사식은

$$\Delta P_i = P_i^s - P_i^c = \sum \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_j + \sum \frac{\partial P_i}{\partial V_l} \Delta V_l \quad (4a)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^s - Q_i^c = \sum \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_j + \sum \frac{\partial Q_i}{\partial V_l} \Delta V_l \quad (4b)$$

$$j = 1, 2, \dots, n-1$$

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

와 같이 된다. \$P\_i^s, Q\_i^s\$는 지정된 값을 표시하고, \$P\_i^c(k), Q\_i^c(k)\$ (\$k\$번째 계산값)은 전번 반복과정(\$k-1\$)에서 얻어진 \$V, \delta\$ 값을 이용하여 계산된 값이다. 식 (4)는 行列方程式의 형태로

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & M \\ N & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (5)$$

단, \$\Delta P\$: \$(n-1) \times 1\$ 次元의 벡터

\$\Delta Q\$: \$m \times 1\$ 次元의 벡터

\$\Delta \delta\$: 電壓의 位相角 偏差

\$\Delta V\$: 電壓의 偏差

\$H, M, N, L\$: 該當 變數 벡터에 대한 자코비안 小行列

와 같이 다시 표현된다. 식(5)는 位相角, 電壓 偏差와 有效, 無效 電力 偏差 사이의 線形 關係를 나타내는 式으로 이로부터 개선량 \$\Delta \delta, \Delta V/V\$ 값이 주어진다. 또한 여기서 얻어진 수정된 \$\delta\$ 와 \$V\$ 를 式 (3)에 대입하여 새로운 電送 電力 값을 計算한다. 式(5)에서 (4)式과는 약간 달리 電壓의 편차를 電壓으로 나눈값 (\$\Delta V/V\$) 을 사용한 이유는 후에 계수 행렬의 각 요소 값을 쉽게 計算하기 위한 것이다.

여기서 \$H, M, N, L\$ 의 각 요소는

$$H = \frac{\partial P}{\partial \delta} \begin{cases} H_{ii} = -Q_i - V_i^2 B_{ii} \\ H_{ij} = V_i V_j \{ G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \} \end{cases} \quad (6a)$$

$$M = \frac{\partial P}{\partial V} \begin{cases} M_{ii} = P_i + V_i^2 G_{ii} \\ M_{ij} = V_i V_j \{ G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \} \end{cases} \quad (7a)$$

$$N = \frac{\partial Q}{\partial \delta} \begin{cases} N_{ii} = P_i - V_i^2 G_{ii} \\ N_{ij} = -V_i V_j \{ G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \} \end{cases} \quad (8a)$$

$$L = \frac{\partial Q}{\partial V} \begin{cases} L_{ii} = Q_i - V_i^2 B_{ii} \\ L_{ij} = V_i V_j \{ G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \} \end{cases} \quad (9a)$$

와 같다. 式(5)로부터 다음식과 같이

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & M \\ N & L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (10)$$

이로부터, 개선된 電壓의 크기와 위상각은

$$V^{k+1} = V^k + (\Delta V/V)V$$

$$\delta^{k+1} = \delta^k + \Delta \delta$$

이며, 이를 반복적으로 수정하게 되는데, 이때의 收斂 判定 조건은 일반적으로 \$\max(|\Delta P\_i|, |\Delta Q\_i|) \le \epsilon\$ (허용편차) 를 사용한다.

#### 4. Slack 母線 電力 및 線路 潮流의 計算

이상의 計算 과정이 종료되면, 시스템의 변수 \$V, \delta\$ 가 모두 결정되었으므로 線路 潮流를 計算 할 수 있다. 母線 \$i\$ 와 \$j\$ 에 연결된 線路 1에서 母線 \$i\$ 에서 \$j\$ 쪽으로 흐르는 有效 및 無效 電力 潮流 \$P\_{ij}\$ 와 \$Q\_{ij}\$ 는

$$P_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) - V_i^2 G_{ij} \quad (11a)$$

$$Q_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) + V_i^2 (B_{ij} - b_{ij}/2) \quad (11b)$$

단, \$b\_{ij}\$: 모선 \$i, j\$ 간 선로의 대지 서셉턴스

와 같이 표현된다. 또한 Slack 母線 電力은 아래와 같이 計算된다.

$$P_n = \sum_{j=1}^n V_n V_j (G_{nj} \cos \delta_{nj} + B_{nj} \sin \delta_{nj}) \quad (12a)$$

$$Q_n = \sum_{j=1}^n V_n V_j (G_{nj} \sin \delta_{nj} - B_{nj} \cos \delta_{nj}) \quad (12b)$$

이 式에서 보는 바와 같이, Slack 母線의 有效 電力과 無效 電力은 右邊의 \$V, \delta\$ 에 의하여 결정된다. 즉, Slack 母線에서는

- 出力이 미리 指定되지 못하며
- 送電 損失이 모든 狀態가 決定된 後에 計算되므로
- 全系統의 送電 損失을 모두 擔當하게 된다.

이 결과는 대부분의 경우 실용상 지장이 없는 것으로 받아들여 지고 있으나, 실제 모든 發電 出力이 送電 損失을 擔當하고 있다는 점에서 볼때, 슬랙 母線이 送電 損失을 擔當하는 것은 이론상 엄밀하다 고는 할 수 없다.

#### 5. Newton-Raphson 法의 擴張

##### 5.1 系統 損失 및 Slack 有效電力의 計算

식 (10)에서 \$\Delta \delta\$ 는 \$(n-1) \times 1\$ vector 이며 \$\Delta V/V\$ 는 \$m \times 1\$ vector 이다. 따라서 미지수의 갯수는 총 \$n+m-1\$ 개이며 Jacobian 행렬은 \$(n+m-1) \times (n+m-1)\$ 이다.

여기서 \$n-1\$ 은 Slack 母線을 제외한 系統의 母線 數이며 \$m\$ 은 부하 母線 數인 것은 앞에서 설명한 바와 같다. 현재의 Newton-Raphson 법은 Slack 母線의 電壓과 위상각을 제외한 \$n-1\$ 개 母線의 有效 電力과 母線 電壓의 크기, \$m\$ 개 부하 母線의 無效 電力을 지정하여 式(10)과 같은 修整 方程式을 풀게 된다.

그 결과로 Slack 母線을 제외한 \$(n-1)\$ 개 母線의 새로운 電力각 \$\delta\_i\$ (Slack 母線의 電力각 = 0)와 \$m\$ 개 부하 母線의 電壓 크기를 구할 수 있다. 이렇게 모든 母線의 電壓과 위상각을 구한 다음이면 각 선로의 潮流와 損失을 구할 수 있고 따라서 전系統의 損失을 計算 할 수 있다. 이때 전系統의 送電 損失(\$P\_L\$)은 母線 電壓과 위상각의 함수로 다음과 같이 표시된다.

$$P_L = P_L(V, \delta) = \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n V_i G_{ij} (-V_i + V_j \cos \delta_{ij}) \quad (13)$$

다음 Slack 母線의 有效電力(\$P\_n\$)은 다음과 같이 計算하게 된다.

$$P_n = \sum_{i \in L} P_i + P_L(V, \delta) - \sum_{i \in G} P_i \quad (14)$$

단, \$L\$: 부하 母線의 집합

\$G\$: 發電 母線의 집합 (Slack 母線 제외)

이식은 표현은 다르지만 (12a)식과 같은 값을 갖게 된다. 즉, 系統에서 발생하는 系統損失은 앞장에서 말한바와 같이 모두 Slack母線이 담당하게 된다.

### 5.2 Newton-Raphson 법의 擴張

앞절에서와 같이 일반적인 潮流 計算 과정에서는 系統의 送電 損失에 해당하는 有效電力이 Slack 母線에 물리게 되는데 (13) 식을 이용하여 Newton-Raphson法을 擴張하면 이러한 현상을 완화 할 수 있다. [10]

기존의 Newton-Raphson 개념과는 달리 系統 損失 方程式을 연립 電力 方程式에 포함시키고 系統 損失을 제어 변수로서 지정하는 경우를 생각하자. 이때 Slack 母線의 電壓 크기를 새로운 상태 변수로 도입하면 이렇게 擴張된 연립 方程式의 rank 가 갖추어지므로 해를 구할 수 있을 것이다.

언어진 解로부터 電力 系統의 損失을 구할 수 있을 것이며 이 損失( $P_L^C$ )은 計算전에 지정한 損失 ( $P_L^*$ )과 분명히 차이가 있을 것이다. 그 이유는 자명한 것으로서, 상태 변수 (母線 電壓 크기 및 위상각)에 종속한 系統 損失을 지정하고 풀이기 때문이며 따라서 그렇게 구한 상태 변수값 또한 왜곡되어 나타났을 것이기 때문이다. 擴張된 방법은 바로 이러한 현상을 응용해 보고자 하는 것이다.

$P_L^*$  와  $P_L^C$  의 차이  $\Delta P_L = P_L^* - P_L^C$  를 計算하여 이 값을 알맞은 방법에 의하여 각 發電 母線 出力에 再配分하면 系統 損失을 새로이 지정한 셈이되며 다시 Newton-Raphson 計算 과정을 반복시키면  $P_L^*$  값을 원래의 시스템이 가져야 할  $P_L$  값에 수렴시킬 수 있을 것이다. 이것이 가능 하다면 기존의 Slack 母線 개념은 크게 완화될 것이다. 이 과정을 보다 자세히 설명하면 아래와 같다.

먼저,  $n+m-1$  차원의 電力 方程式 군(群) 식(3')에 系統 損失 표현식 (13)을 추가하고 Slack 母線의 電壓 크기  $V_n$  을 새로운 변수로 택하여 연립 方程式의 크기를  $(n+m)$ 차원으로 만든다. 이렇게 擴張된 연립 方程式에 대한 새로운 修整 方程式을 얻기 위하여는 Slack 母線 電力을 지정하여야 한다. Slack 母線의 有效 電力을 지정 하다는 것은 바로 系統 損失을 지정하는 것임을 의미한다. 擴張된 방법을 수식으로 다시 정리하면 아래와 같다.

$$P_i^* = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad i \in (G, L) \quad (15a)$$

$$Q_i^* = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad i \in L \quad (15b)$$

$$P_L^* = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n V_i G_{ij} (-V_i + V_j \cos \delta_{ij}) \quad (15c)$$

이때, 修整方程式은 다음의 형태를 갖는다.

$$\begin{bmatrix} H & M & n \\ N & L & 1 \\ h & m & (\partial P_L / \partial V_n) V_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V/V \\ \Delta V_n/V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta P_L \end{bmatrix} \quad (16)$$

단,  $h, m$ 은  $\frac{\partial P_L}{\partial \delta_k}, \frac{\partial P_L}{\partial V_k} V_k$  들로 이루어진 Row vector 이며

$n, 1$ 은  $\frac{\partial P_L}{\partial V_n} V_n, \frac{\partial Q_L}{\partial V_n} V_n$  들로 이루어진 Column vector이다.

즉, 기존의 H, M, N, L 외에 送電 損失에 대한 요소와 기존 母線에 대한 電壓 관련항이 첨가되어 자코비안이 擴張되었으며, 또한 미지수도 기존 母線에 대한 電壓의 증분이 포함되었고, 편차항에서도 送電 損失의 증분항이 첨가되었다. 여기서, 위상각에 대한 送電 損失의 증분과 電壓에 대한 送電 損失의 증분은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial P_L}{\partial \delta_i} = -2 \sum_{j=1}^n V_i V_j G_{ij} \sin \delta_{ij} \quad (17a)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n-1)$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial V_i} V_i = -2 \sum_{j=1}^n V_i^2 G_{ij} + 2 \sum_{j=1}^n V_i V_j G_{ij} \cos \delta_{ij} \quad (17b)$$

$$(i = m+1, \dots, n)$$

또한 기존 母線에 대한 有效, 無效 電力의 증분항은

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_n} V_n = V_i V_n (G_{in} \cos \delta_{in} + B_{in} \sin \delta_{in}) \quad (18a)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_n} V_n = -V_i V_n (B_{in} \cos \delta_{in} - G_{in} \sin \delta_{in}) \quad (18b)$$

$$\frac{\partial P_n}{\partial V_n} V_n = P_n + V_n^2 G_{nn} \quad (18c)$$

이다. 기존 電力 潮流 計算에서는 기존 母線의 電壓과 위상각을 지정하여 系統의 상태가 모두 결정된 후에 有效 및 無效 電力 값을 결정하게 된다. 따라서 기존 母線의 電壓 값은 이미 지정이 된 것이므로 計算 과정에서 제외되지만 擴張된 방법은 Slack 母線의 有效 電力과 위상각을 지정하였으며, 기존 母線의 電壓값  $V_n$ 은 미지수 이므로 計算 과정에 첨가되어야 한다.

擴張된 電力 修整 方程式으로 부터 다음과 같이 해를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V/V \\ \Delta V_n/V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & M & n \\ N & L & 1 \\ h & m & \frac{\partial P_L}{\partial V_n} V_n \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta P_L \end{bmatrix} \quad (19)$$

이로부터 개선된 電壓의 크기 ( $V^{k+1}, \delta^{k+1}$ ) 는

$$V^{k+1} = V^k + (\Delta V_n/V_n) V_n \\ \delta^{k+1} = \delta^k + \Delta \delta$$

이며, 이 값을 이용하여 새로운 系統 損失을 (13) 식에 의하여 計算 ( $P_L^C(k+1)$ )하고 주어진 損失값과의 차  $\Delta P_L^{k+1} = P_L^*(k) - P_L^C(k+1)$ 을 구한다. 이  $\Delta P_L$ 은 알맞은 방법에 의하여 각 發電 母線 出力에 再配分되어 다음 반복 計算에 들어가는데 이때 損失의 配分 원칙에 따라 擴張된 Newton-Raphson법의 수렴 특성이 크게 좌우될 것이다.

### 5.3 損失 配分 原則

앞절 끝에서 말한바와 같이 損失偏差 ( $\Delta P_L$ )을 각 發電 母線에 어떻게 配分 할 것이냐 하는 문제는 擴張된 Newton-Raphson법의 수렴 특성에 매우 큰 영향을 미칠 것이다. 왜냐하면 실제 電力 系統에서 각 發電기가 담당하는 損失의 配分을 정확히 計算한다는 것은 쉽지 않으며 따라서 인위적으로 配分한다면 그만큼 潮流 計算 결과를 왜곡

시킬 것이기 때문이다. 이 문제는 얼마만큼 실제 현상에 근사한 配分 원칙을 정할 수 있는가 하는 것이다. 그 配分 원칙은 또한 計算을 간단하게 하여 전체 수렴 시간을 크게 증가 시키지 말아야 할 것이다.

본 연구의 요점 및 특징은, 이러한 損失 配分에 있어서 計算이 간결하고 실제 상황에 근사한 새로운 配分 원칙을 찾아보고자 하는 것이다. 損失 配分 원칙은 관점에 따라 여러 방법이 있을 수 있을 것으로 생각되지만 본 연구에서는 각 發電 母線의 電壓 크기에 대한 有效 電力의 변화율을 산정하여 配分하는 원칙을 구성해 보고자 한다.

이러한 접근 방법이 가능할 것이라는 판단의 근거는, 만약 초기치 설정시 發電 母線의 크기를 달리 잡으면 計算된 損失 편차 ( $\Delta P_L$ )의 값이 변할 것이라는 사실에 둔 것이다. 지금  $\Delta P_L$  중  $i$  번째 發電 母線이 담당할 有效 電力 증분 ( $\Delta P_{Li}$ )은 미분의 Chain rule을 써서 다음과 같이 표현 할 수 있을 것이다.

$$\begin{aligned} \Delta P_{Li} &= \frac{\partial P_i}{\partial P_L} \Delta P_L \\ &= \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \frac{\partial V_i}{\partial P_L} \Delta P_L \\ &= \left[ \frac{(\partial P_i / \partial V_i) V_i}{(\partial P_L / \partial V_i) V_i} \right] \Delta P_L \quad i \in G_s \quad (20) \end{aligned}$$

단,  $G_s$ : Slack 母線을 포함한 發電 母線 집합

여기서  $(\partial P_i / \partial V_i) V_i$ ,  $(\partial P_L / \partial V_i) V_i$  은 發電 母線에 대한 것이므로 Jacobian 의 정보를 그대로 사용할 수는 없으나 그 計算 형태는 Jacobian 計算식과 같다. 즉,

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} V_i = P_i + V_i^2 G_{ii} \quad (21)$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial V_i} V_i = 2 \sum_{j=1}^n (-V_i^2 G_{ij} + V_i V_j \cos \delta_{ij}) \quad (22)$$

그러면, 다음번 반복 計算 ( $k+1$  번째)에서의 각 發電 母線의 有效 電力 지정치는 다음과 같이 바뀐다.

$$P_i^s(k+1) = P_i^s(k) + \Delta P_{Li} \quad (i \in G_s) \quad (23)$$

또 하나의 문제로 남는 것은  $k+1$  번째 반복 計算 과정의 損失 지정값  $P_L^s(k+1)$  을 어떤 값으로 둘 것인가 하는 것이다. 왜냐하면,  $P_L^s$  값은 매번 변화시켜야 하는 것이며 먼 저번 반복 과정  $k$  번째에서 얻은  $\Delta P_L(k+1)$  의 대부분을 각 發電 母線으로 再配分하였기 때문이다. 여기서는  $k+1$  번째의  $P_L^s$  값을 다음과 같이 둘 것을 제안한다.

$$P_L^s(k+1) = \sum_{i \in G_s} P_i^s(k+1) - \sum_{i \in L} P_i \quad (24)$$

즉, 각 發電 母線의 出力이 再配分 되었으나, 配分된 量의 합계  $\sum \Delta P_{Li}$ ,  $i \in G_s$  은  $\Delta P_L(k+1)$  과 어느 정도의 차이가 있을 것이므로 다음 반복 計算을 위한  $\Delta P_L(k+1)$  은 다음과 같이 다시 修整될 수 있을 것이다. 즉,

$$\Delta P_L(k+1) = P_L^s(k+1) - P_L^c(k+1) \quad (25)$$

바로 이러한 損失 配分 원칙을 제안함이 본 발표내용의 핵심이다.

지금까지 설명한 計算 과정을 흐름도로 나타내면 다음 Flow chart와 같다.

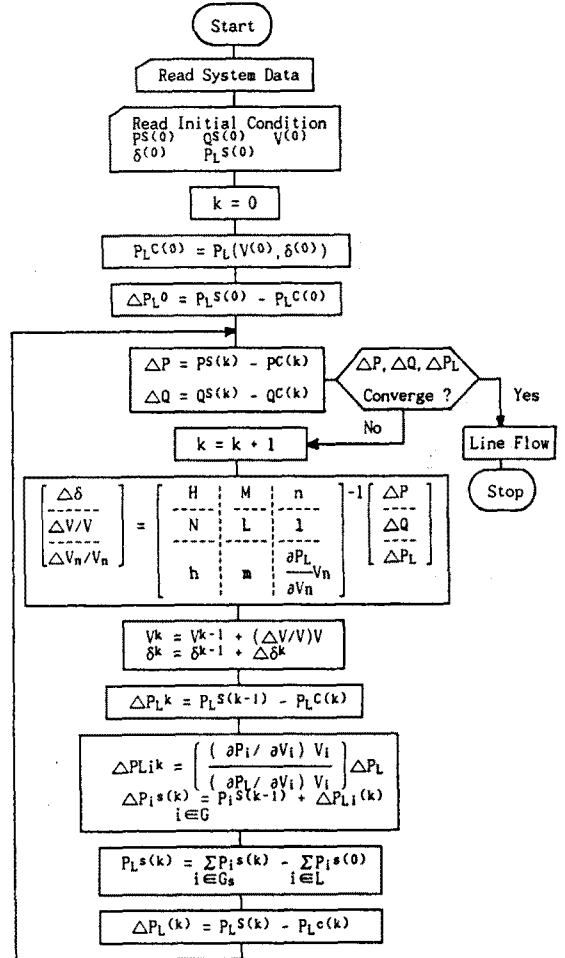


그림 2. 擴張된 潮流 計算 흐름도  
Fig.2. Flow Chart of the Extended Power Flow

## 6. 檢討 및 結論

本 발표에서는 기존 Newton-Raphson 조류계산법의 확장 및 개선을 위한 알고리즘만을 제시하였으며, 제시된 알고리즘의 실용성 입증은 사례연구는 현재 진행중에 있다. 사례연구에 대한 결론은 아직 내릴 수 없지만 지금까지의 진행결과와 실용성 입증에 대한 많은 가능성을 나타내고 있으므로 사례연구가 보완되면 곧 입증되리라 생각된다. 사례연구 결과는 곧 제시될 것이며, 본 발표의 主要 內容과 檢討 事項을 요약하면 아래와 같다.

(1) 電力 시스템의 送電 損失 方程式을 聯立 電力 方程式에 追加시켜 시스템 損失을 새로운 制御 變數로, 또한 Slack 母線 電壓의 크기를 새로이 상태 變數로 도입하므로써 기존의 Newton-Raphson 方法을 擴張하였다.

(2) 擴張된 Newton-Raphson 潮流 計算 문제에서 시스템 損失 편차를 發電 母線의 有效 出力에 配分하는 새로운 방

안을 제안 하였다. 제안된 방법은發電 母線의 電壓 크기에 대한 有效 出力과 시스템 損失의 Jacobian정보를 이용함으로써 실제 상황에 근사 할 뿐만 아니라 그 計算이 단순하다.

(3) 電力 시스템의 損失 편차를發電 母線에 配分하여 반복 計算시마다 電力 시스템 損失量, 母線의 有效, 無效 電力量 또한 電壓의 크기와 위상각을 동시에 修整함으로써 시스템 送電 損失이 Slack 母線에 집중되는 현상을 완화시켜 각 發電 母線에 분산 시킬수 있는 새로운 潮流 計算解 修整과정을 제시 하였다.

결론적으로, 앞으로 본 연구는 계속적인 연구를 통하여 많은 보완이 있어야 할 것이다. 본 발표는 개선 방안에 대한 제안을 중심으로 하였지만, 앞으로 보다 이론적인 면밀한 검토와 함께 사례 연구를 통한 실증이 뒷받침 될 것이다. 이러한 뒷받침이 수행된 후라면 본 연구에서 제시한 방법은 기존의 電力 潮流 計算법에 많은 변화를 줄 것이며 따라서 電力 시스템 해석에 새로운 시각과 기어가 주어질 것이다.

#### 參 考 文 獻

- [1] L. A. Dusan, *Digital Load Flow Studies*, (Trans. AIEE., Vol. 73, pt. IIIA, 1954), pp. 825 ~ 832.
- [2] J. B. Ward, H. W. Hale, *Digital Computer Solution of Power Flow Problems*, (AIEE Tran. - Power App. Sys. - Vol. 78, Aug., 1959), pp. 583 ~ 588.
- [3] J. E. Van Ness, *Iteration Methods for Digital Load Flow Studies*, (AIEE Trans. - Power App. Sys. - Vol. 78, Aug., 1959), pp. 583 ~ 588.
- [4] J. E. Van Ness, J. H. Griffin, *Elimination Methods for Load Flow Studies*, (AIEE Trans. - Power App. Sys. - Vol. 80, June, 1961), pp. 299 ~ 304.
- [5] W. E. Tinney, C. E. Hart, *Power Flow Solution by Newton Method*, (IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-86, Nov., 1967), pp. 1449 ~ 1456.
- [6] B. Stott, *Decoupled Newton Load Flow*, (IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-91, 1972), pp. 1955 ~ 1959.
- [7] B. Stott & O. Aissac, *Fast Decoupled Load Flow*, (IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-93, 1974), pp. 859 ~ 869.
- [8] B. Stott, *Review of Load-Flow Calculation Methods*, (IEEE, Vol. 62, NO. 7, July, 1974)
- [9] 신중린, "전문가 시스템을 응용한 최적 장기 송전 계획에 관한 연구" (서울대학교 대학원 전기공학과 박사학위 논문, 6월, 1989년)
- [10] Lee Jin, Shin Joong-Rin, et al., *Another Power Flow Approach based on Distributed T/L Loss Information and Suceptance Matrix*, (대한전기학회 전력계통연구회 춘계학술발표회, 1991. 4)