

# 電力系統安定度 計算 알고리즘의 改善에 關한 研究

論 文

29-3-3

## A New Algorithm for Power System Stability Calculations

朴 永 文\*  
(Young-Moon Park)

### Abstract

A new algorithm for power system transient stability calculations is developed which considers the nonlinear state equations of 8 state variables for each generator dynamics, expolynomial load models in respect to bus voltages for nonlinear loads, network equations expressed in terms of bus-injected current sources, various kinds of generator and transmission line outages, abrupt changes in loads, and operations of various kinds of protective relaying systems such as distance relaying, reclosing, load shedding by under-frequency relays.

In the algorithm are included efficient and reliable schemes for solving network equations by means of the Newton-Raphson iterative method and the Optimally-Ordered Triangular Factorization Technique, and simple procedures for determining fault-point negative and zero sequence impedances for unbalanced line faults.

An application of the Optimally-Ordered Triangular Factorization Techniques results in remarkable savings in computing time and memory requirements.

### I. 緒 論

電力系統의 安定度の 解析은 電力系統의 運用 및 計劃에 必須的이므로, 그 效果的 計算方法이 至今까지 거의 半世紀 동안 많이 研究되어 왔으며 近年, 電子 計算機의 活用普及에 따라, 그 計算方法도 括目할 發展을 거듭하고 있다.

그럼에도 不拘하고, 如前히 이 分野에 대하여 研究의 努力이 시들기는 커녕 더욱 拍車가 加해지고 있는 所以는 그 計算方法의 實用性에 基因한다고 보겠다.

計算方法의 實用性은 計算精度, 計算速度 및 計算機의 所要 記憶容量에 의하여 評價되는 바, 지금까지 提示된 여러 研究結果는 各其 上述한 어느 部分에만 置重하고 있어, 活用側에서는 用途에 맞게 適切한 方法을 選定하여 適用하고 있는 實情이다.

본 論文은 計算精度面에서 最優先을 두되, 可能한限 計算速度를 短縮하고 所要記憶容量을 節減하는 새 일

고리즘을 提示하는 데 있다.

본 論文에서는 計算精度를 向上하기 위하여 發電機의 動特性을 發電機動搖 2階, 發電機 2階, 電壓調整器 2階, 調速機 2階, 都合 8階의 微分方程式으로, 負荷는 非線型指模型으로 表現하였고, 非對稱故障에 대한 逆相 및 零相인피던스值를 嚴密한 計算法으로 計算하였고, 繼電器의 動作 및 負荷遮斷狀態, 線路途中에서의 故障, 變壓器의 軋, 充電電流의 影響까지도 嚴密하게 反映시켰다.

計算速度의 向上을 위해서 過去 가우스-사이달法(Gauss-Seidel method) 등에 의한 線路方程式의 解法을 母線電流源(current source)概念으로 構成한 非線型線路方程式을 뉴우튼-라프슨法(Newton-Raphson method)에 의하여 풀되, 最適配置三角因數化技法과 初期值線型負荷假定法의 適用으로 計算時間의 顯著한 短縮과 그 收束의 安定性을 期할 수 있었다.

記憶容量은 電力潮流計算에 所要되는 자코비안行列(Jacobian matrix)뿐만 아니라, 逆相 零相母線에 드미턴스行列의 倒置에도 前述한 最適配置三角因數化技法의 導入에 의하여 大幅 節減되어, 中型의 計算機로

\* 正會員: 서울大 工大 電氣工學科 教授·工博  
接受日字: 1980年 2月 12日

서도 不平衡 故障時의 安定度 精密計算이 可能하게 되었다.

따라서, 본 論文에서 提示된 알고리즘은 오프라인 電力系統安定度 精密計算用으로서는 既存 알고리즘과 比較할때 計算精度, 速度 및 所要記憶容量面에서 進一步한 것으로 생각되며 그것은 韓電系統에 대한 事例研究로 立證되었다.

II. 發電氣, 電壓調整器 및 調速機 數理模型

*i*發電機의 動特性 數理模型은

$$\frac{dE'_{qi}}{dt} = \frac{1}{T'_{di}} \{V_{fi} - E'_{qi} - (X_{di} - x'_{di}) I_{di}\} \quad (1)$$

$$\frac{dE'_{di}}{dt} = \frac{1}{T'_{qi}} \{-E'_{di} - (X_{qi} - x'_{qi}) I_{qi}\} \quad (2)$$

但,  $E'_{di}, E'_{qi}$ : 發電機의 過渡內部起電力의 直軸 및 橫軸分

$X_{di}, X_{qi}, x'_{di}, x'_{qi}$ : 發電機의 正常 및 過渡直軸 및 橫軸 리액턴스

$I_{di}, I_{di}$ : 發電機電流의 直軸 및 橫軸成分

$T'_{di}, T'_{qi}$ : 發電機界磁回路의 開放時定數의 直軸 및 橫軸分

$V_{fi}$ : 界磁回路의 印加電壓

와 같이 表示된다. [1]

그런데 *i*發電機의 廻轉子 位置  $\delta_i$ 를 同期軸을 基準로 表示할 때

$$\begin{bmatrix} I_{di} \\ I_{qi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\delta_i & -\cos\delta_i \\ \cos\delta_i & \sin\delta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Di} \\ I_{Qi} \end{bmatrix} \quad (3)$$

但,  $I_{Di}, I_{Qi}$ : 同期軸에 대한 發電機電流의 軸成分 및 軸直角成分

의 關係가 있으므로, 式(1) 및 (2)는 다음과 같이 變形 된다.

$$\frac{dE'_{qi}}{dt} = \frac{1}{T'_{di}} \{V_{fi} - E'_{qi} - (X_{di} - x'_{di}) (I_{Di} \sin\delta_i - I_{Qi} \cos\delta_i)\} \quad (1')$$

$$\frac{dE'_{di}}{dt} = \frac{1}{T'_{qi}} \{-E'_{di} - (X_{qi} - x'_{qi}) (I_{Di} \cos\delta_i + I_{Qi} \sin\delta_i)\} \quad (2')$$

그리고, 發電機의 動搖狀態는

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \Delta\omega_i \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} (\Delta\omega_i) = \frac{1}{M_i} (-D_i \Delta\omega_i + P_{mi} - P_{ei}) \quad (5)$$

但,  $\Delta\omega_i, M_i, D_i$ : 發電機의 角速度變化, 慣性定數 및 制動係數

$P_{mi}, P_{ei}$ : 發電機의 入力 및 出力으로서 주어지나, *i*發電機가 *j*母線電壓  $V_{Dj} + jV_{Qj}$ 에 變壓器임피던스  $R_{ji} + jX_{ji}$ 를 통하여 連結되고, 發電機의 內部抵抗을  $R_{ai}$ 라

할 때,  $I_{Di}, I_{Qi}$ 는

$$\begin{aligned} I_{Di} = & \frac{1}{\Delta_i} \{ (R_{ai} + R_{ti}) \sin\delta_i - (X'_{di} + X_{ti}) \cos\delta_i \} \\ & E'_{di} + \{ (R_{ai} + R_{ti}) \cos\delta_i + (X'_{di} + X_{ti}) \sin\delta_i \} E'_{qi} \\ & - \frac{1}{\Delta_i} \{ (R_{ai} + R_{ti}) + (X'_{di} - X_{ti}) \sin\delta_i \cos\delta_i \} V_{Dj} \\ & + \{ (X'_{qi} + X_{ti}) \sin^2\delta_i + (X'_{di} + X_{ti}) \cos^2\delta_i \} V_{Qj} \\ = & D_i - R_i V_{Dj} - S_i V_{Qj} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} I_{Qi} = & \frac{1}{\Delta_i} \{ -(R_{ai} + R_{ti}) \cos\delta_i + (X'_{di} + X_{ti}) \sin\delta_i \} E'_{di} \\ & + \{ (R_{ai} + R_{ti}) \sin\delta_i - (X'_{di} + X_{ti}) \cos\delta_i \} E'_{qi} \\ & - \frac{1}{\Delta_i} \left[ -\{ (X'_{qi} + X_{ti}) \cos^2\delta_i + (X'_{di} + X_{ti}) \sin^2\delta_i \} \right. \\ & \left. V_{Dj} + \{ (R_{ai} + R_{ti}) - (X'_{qi} - X'_{di}) \sin\delta_i \cos\delta_i \} V_{Qj} \right] \\ = & D'_i - R'_i V_{Dj} - S'_i V_{Qj} \end{aligned} \quad (7)$$

但,  $\Delta_i \triangleq (R_{ai} + R_{ti})^2 + (X'_{di} + X_{ti}) (X'_{qi} + X_{ti})$  (8)

$D_i, D'_i, R_i, R'_i, S_i, S'_i$ : 發電機의 狀態變數에 의해 서만 可變되는 值로서 表示되고 [1, 2], 同期軸을 基準으로 하는 發電機端子電壓의 軸成分 및 軸直角成分  $V_{Di}, V_{Qi}$ 는

$$V_{Di} = V_{Di} + R_{ti} I_{Di} - X_{ti} I_{Qi} \quad (9)$$

$$V_{Qi} = V_{Qi} + X_{ti} I_{Di} + R_{ti} I_{Qi} \quad (10)$$

의 關係가 成立하므로 *i*發電機出力

$$P_{ei} = V_{Di} I_{Di} + V_{Qi} I_{Qi} + R_{ti} (I_{Di}^2 + I_{Qi}^2) \quad (11)$$

는 결국 母線電壓  $V_{Dj} + jV_{Qj}$ , 發電機過渡內部起電力  $E'_{di} + jE'_{qi}$  및 廻轉子 位置  $\delta_i$ 의 代數函數로서 주어진다.

式(1')의  $V_{fi}$  및 式(5)의  $P_{mi}$ 는 電壓調整器(voltage regulator) 및 調速機(governor)이 影響을 無視할 때에는 一定值이나, 이를 考慮하면 다음과 같다. 즉,  $V_{fi}$ 의 경우, 그 動特性은

$$\frac{dV_{fi}}{dt} = \frac{1}{T_{vi}} (\mu_{vi} V_{vi} - V_{fi}) \quad (12)$$

$$\frac{dV_{vi}}{dt} = \frac{\mu_{vi}}{T_{vi} T_{si}} (\mu_{vi} V_{vi} - V_{fi}) - \frac{V_{vi}}{T_{si}} \quad (13)$$

但,  $V_{vi}$ : 微分安定信號

$T_{vi}, T_{si}$ : 主勵磁機 및 微分安定 루우프 時定數

$\mu_{vi}, \mu_i$ : 調整器開 루우프 및 微分安定 루우프 利得

$V_{vi}$ : 調整器入力 (리미터出力)

로서 주어지고,  $V_{vi}$ 는

$$V_{vi} = V_{Di} - V_i - V_s \quad (14)$$

但,  $[V_{vi}]_{\min} \leq V_{vi} \leq [V_{vi}]_{\max}$

$$V_i \triangleq \sqrt{V_{Di}^2 + V_{Qi}^2}$$

$V_{Di}$ : 電壓調整裝置基準電壓

이다. 그런데 發電機端子電壓  $V_i$ 는 式(9) 및 (10)에서 부터

$$V_{ti} = V_{Dj}^2 + V_{Qj}^2 + (R_{ti}^2 + X_{ti}^2)(I_{Dj}^2 + I_{Qj}^2) + 2R_{ti}(V_{Dj} I_{Dj} + V_{Qj} I_{Qj}) + 2X_{ti}(V_{Qj} I_{Dj} - V_{Dj} I_{Qj}) \quad (15)$$

의 關係가 있으므로 亦是 母線電壓, 發電機過度內部起電力 및 廻轉子 位置의 代數函數이다.

調速機의 경우에는 그 數理模型이 火力과 水力이 다른데, 火力의 경우,

$$\frac{dP_{mi}}{dt} = P'_{mi} \quad (16)$$

$$\frac{dP'_{mi}}{dt} = \frac{1}{T_{si} T_{hi}} \left\{ -P_{mi} - (T_{si} + T_{hi})P'_{mi} + P_{ti} \right\} \quad (17)$$

但,  $T_{si}, T_{hi}$ : 調速機 및 터빈時定數

$P_{ti}$ : 調速器入力(리미터 出力)

로서 주어지고,  $P_{ti}$ 는

$$P_{ti} = -\mu_{si} \Delta W_i + P_{oi} \quad (18)$$

但,  $[P_{ti}]_{\min} \leq P_{ti} \leq [P_{ti}]_{\max}$  (19)

$\mu_{si}, P_{oi}$ : 調速機利得 및 基準入力

이다. 水力의 경우에는

$$\frac{dP_{mi}}{dt} = \begin{cases} \frac{2}{T_{wi}} \frac{\Delta w_i}{w_o} + 2 \left( \frac{1}{T_{wi}} + \frac{\sigma_i}{T'_{si}} \right) (P'_{mi} - P_{oi}) - \frac{2}{T_{wi}} (P_{mi} - P_{oi}) \\ \text{但, } [P'_{mi}]_{\min} \leq P'_{mi} \leq [P'_{mi}]_{\max} \quad (20) \\ \frac{2}{T_{wi}} ([P'_{mi}]_{\max} - P_{mi}), \text{ 但 } P'_{mi} > [P'_{mi}]_{\max} \\ \frac{2}{T_{wi}} (P_{mi} - [P'_{mi}]_{\min}), \text{ 但 } P'_{mi} < [P'_{mi}]_{\min} \end{cases}$$

$$\frac{dP'_{mi}}{dt} = \begin{cases} \frac{1}{T'_{si}} \left\{ -\frac{\Delta w_i}{w_o} + \sigma_i (P_{oi} - P'_{mi}) \right\} \\ \text{但, } [P'_{mi}]_{\min} \leq P'_{mi} \leq [P'_{mi}]_{\max} \quad (21) \\ 0 \text{ 但, } P'_{mi} > [P'_{mi}]_{\max} \text{ 또는 } P'_{mi} < [P'_{mi}]_{\min} \end{cases}$$

但,  $w_o$ : 同期角速度

$T_{wi}, T'_{si}$ : 水車 및 水門時定數

$\sigma_i, P_{oi}$ : 퍼어머넌트투루프 및 調速機基準入力

로서 주어진다. 따라서, 發電機의 動特性은  $\delta_i, \Delta w_i, V_{fi}, V_{si}, P_{mi}, P'_{mi}, E'_{di}, E'_{qi}$ 를 狀態變數로 할때 그 初期值와 母線電壓  $V_{Dj} + jV_{Qj}$ 만 알면, 非線型微分의 解로 決定된다.

### III. 負荷의 數理模型 및 母線電流式

負荷의 模型으로서는 그 非線型性을 勘案하여 母線電壓에 關한 指數模型을 導入하여 [1, 2, 3],  $j$ 母線에 連結된 有効 및 無効負荷  $P_{ij}, Q_{ij}$ 는

$$P_{ij} = U_j (V_{Dj}^2 + V_{Qj}^2)^{g/2} \quad (22)$$

$$Q_{ij} = W_j (V_{Dj}^2 + V_{Qj}^2)^{h/2} \quad (23)$$

$U_j, W_j$ 는 基準電壓에 있어서의 有効 및 無効電力을

基準電壓의  $g$ 乘 및  $h$ 乘으로 나눈 값으로서 주어지며,  $g$  및  $h$ 는 非線型性을 表示하는 指數이며,  $g=h=2$ 이면 負荷를 線型으로 보는 경우이다. 그러나 實際로는  $h=1.6 \sim 2.5$   $g=2.5 \sim 3.5$ 이다.

$j$ 母線에서 線路側으로 流入하는 母線電流  $I_{Dj} + jI_{Qj}$ 는 이 母線에 連結된 發電機電流의 合計와 負荷電流의 合計로 이루어져 있으므로 式(6), (7), (22) 및 (23)으로부터

$$I_{Dj} = \sum_{i \in \Omega_j} I_{Di} + I_{Dj} = D_j - R_j V_{Dj} - S_j V_{Qj} - U_j V_{Dj} (V_{Dj}^2 + V_{Qj}^2)^{(g-2)/2} - W_j V_{Qj} (V_{Dj}^2 + V_{Qj}^2)^{(h-2)/2} \quad (24)$$

$$I_{Qj} = \sum_{i \in \Omega_j} I_{Qi} + I_{Qj} = D'_j - R'_j V_{Dj} - S'_j V_{Qj} - U_j V_{Qj} (V_{Dj}^2 + V_{Qj}^2)^{(g-2)/2} + W_j V_{Dj} (V_{Dj}^2 + V_{Qj}^2)^{(h-2)/2} \quad (25)$$

但,  $\Omega_j$ :  $j$ 母線에 連結된 發電機集合

$$D_j \triangleq \sum_{i \in \Omega_j} D_i, \quad D'_j \triangleq \sum_{i \in \Omega_j} D'_i, \quad R_j \triangleq \sum_{i \in \Omega_j} R_i,$$

$$R'_j \triangleq \sum_{i \in \Omega_j} R'_i, \quad S_j \triangleq \sum_{i \in \Omega_j} S_i, \quad S'_j \triangleq \sum_{i \in \Omega_j} S'_i$$

로서 주어진다 [1].

### IV. 母線電壓計算알고리즘

[母線電流벡터] = [母線에 드미턴스行列] [母線電壓벡터]의 關係와 式(24) 및 (25)로부터 母線電流벡터를 消除하면, 다음 行列式을 얻을 수 있다.

$$D = YV \quad (26)$$

但,  $n$ : 母線數

$$D \triangleq [D_1, D_1', D_2, D_2', \dots, D_j, D_j', \dots, D_n, D_n']^T$$

$$V \triangleq [V_{D1}, V_{Q1}, V_{D2}, V_{Q2}, \dots, V_{Dj}, V_{Qj}, \dots, V_{Dn}, V_{Qn}]^T$$

$$Y \triangleq \begin{pmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1k} & \dots & Y_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{j1} & \dots & Y_{jk} & \dots & Y_{jn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{nk} & \dots & Y_{nn} \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$Y_{jk} \triangleq \begin{pmatrix} Y_{Djk} & -Y_{Qjk} \\ Y_{Qjk} & Y_{Djk} \end{pmatrix} \quad j \neq k \quad (28)$$

$$Y_{jj} \triangleq \begin{pmatrix} Y_{Djj} + R_j + U_j (V_{Dj}^2 + V_{Qj}^2)^{(g-2)/2} \rightarrow \\ Y_{Qjj} + R'_j - W_j (V_{Dj}^2 + V_{Qj}^2)^{(h-2)/2} \rightarrow \\ \rightarrow -Y_{Qjj} + S_j + W_j (V_{Dj}^2 + V_{Qj}^2)^{(h-2)/2} \\ \rightarrow Y_{Djj} + S'_j + U_j (V_{Dj}^2 + V_{Qj}^2)^{(g-2)/2} \end{pmatrix} \quad (29)$$

$Y_{Djk}, Y_{Qjk}$ : 母線에 드미턴스行列의  $(j, k)$ 要素

따라서, 各 母線電壓  $V_{Dj} + jV_{Qj}$ 는  $Y$ 의 逆行列을 얻을 수 있으며

$$V = Y^{-1}D \quad (30)$$

의 關係로부터 얻어진다. 그런데, 이와 關聯해서 2가지 問題가 提起된다. 즉, 非線型的 경우( $g \neq 2, h \neq 2$ )에는  $Y$ 가  $V$ 의 函數라는 事實과  $Y$ 의 逆行列을 効率的으로 計算하는 問題이다. 後者의 것은 電力潮流計算에 널리 採用되고 있는 最適配置三角因數化技法(Optima-

lly-ordered triangular factorization technique)의 導入으로 쉽게 解決되었다. 電壓函數인  $Y$ 는 假定한 初期值  $V$ 를  $Y$ 에 代入하여 近似  $Y$ 를 얻고 式(30)으로 改善된  $V$ 를 計算하고, 이를 다시  $Y$ 에 代入함으로써  $Y$ 를 改善하는 逐次計算方式을 利用할 수밖에 없으나 非線型的 경우에는 그 收束性이 특히 問題가 된다. 본 研究에서는 이 點에 力點을 두어 여러가지의 實驗的 考察을 行한 結果에 따르면 첫 逐次過程에서는  $g=h=2$ 로 놓고 線型的 경우처럼 計算을 行한 후, 第2逐次過程以後부터 實際의  $g$ 와  $h$ 를 使用하면 收束性이 保障될 뿐만 아니라 逐次反復回數도 대개는 2,3회로서 끝나는 극히 만족스러운 母線電壓을 얻을 수 있었다.

V. 故障시뮬레이션 알고리즘

故障의 原因으로서는 發電機脫落, 負荷急變, 線路 또는 母線事故로 大別되며, 線路 또는 母線事故의 種類로서는 3相短絡, 1線地絡, 2線地絡, 線間短絡의 경우를 취급하였으며, 繼電遮斷方式에 있어서는 單一遮斷方式 뿐만 아니라 再開路方式과 低周波繼電器(UFR)의 動作 狀態까지도 알고리즘에 自動反映케 하도록 하여, 本 研究에서 開發된 알고리즘은 그 機能上 實質적으로 모든 경우를 考慮한 셈이 된다.

1) 發電機脫落:

發電機의 脫落은 該當 發電機分의  $D_i, D_i', R_i', S_i, S_i'$ 를 式(24) 및 (25) 또는 (26)에서 除外함으로써 쉽게 反映된다.

2) 負荷急變 또는 遮斷:

$j$ 母線에서의 負荷急變 또는 遮斷은 그 有効 및 無効減少率을  $F_j$  및  $F_j'$ 라 하면,

$$U_j \leftarrow (1-F_j) U_j \tag{31}$$

$$W_j \leftarrow (1-F_j') W_j \tag{32}$$

로 代替함으로써 쉽게 反映된다.

3) 線路 및 母線事故:

$j, k$ 母線間에 連結된  $m$ 線路의 線路正相에드미턴스를  $y_m$ , 線路의 正相充電에드미턴스를  $y_{cm}$ ,  $j$ 側 및  $k$ 側變壓器의 非公稱比를  $T_{mj}, T_{mk}$ 라 할때, 線路途中에서 接地에드미턴스  $y_{gm}$ 을 통하여 接地되는 경우의 等價回路는 그림 1과 같이 表示될 수 있으며,  $y_{gm}, y_{am}$  및  $y_{bm}$ 은 다음과 같이 計算된다. ( $\pi$ 회로 等價化함)

$$y_{am} = \frac{y_{Am}y_{Bm}/(T_{mj}T_{mk})}{y_{gm}+y_{cm}+y_{Am}+y_{Bm}} \tag{33}$$

$$y_{bm} = \frac{y'_{jm}y_{Bm}/T_{mj}}{y_{gm}+y_{cm}+y_{Am}+y_{Bm}} + \frac{\alpha_m y_{cm}}{2T_{mj}^2} + \frac{1}{T_{mj}} \left( \frac{1}{T_{mj}} - 1 \right) y_{Am} \tag{34}$$

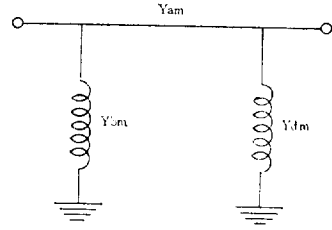


그림 1. 故障時의 送電線路等價回路  
Fig. 1. Equivalent circuit of a faulted transmission line.

$$y_{cm} = \frac{y'_{gm}y_{Bm}/T_{mk}}{y_{gm}+y_{cm}+y_{Am}+y_{Bm}} + \frac{(1-\alpha_m)y_{cm}}{2T_{mk}^2} + \frac{1}{T_{mk}} \left( \frac{1}{T_{mk}} - 1 \right) y_{Bm} \tag{35}$$

但,  $y_{Am} = \begin{cases} 1/(z_{mj} + \alpha_m/y_m), & \text{고장점 } \neq j, k \\ \infty, & \text{고장점 } = j \end{cases} \tag{36}$

$$y_{Bm} = \begin{cases} 1/(z_{mj} + Z_{mk} + 1/y_m), & \text{고장점 } = k \\ 1/(Z_{mj} + (1-\alpha_m)/y_m), & \text{고장점 } \neq j, k \\ 1/(Z_{mj} + Z_{mk} + 1/y_m), & \text{고장점 } = j \\ \infty, & \text{고장점 } = k \end{cases} \tag{37}$$

$\alpha_m$ :  $j$ 점에서 고장점까지의  $m$ 線路의 길이를  $j, k$ 間의  $m$ 線路의 全길이로 나눈값

$$y'_{gm} = y_{gm} + y_{cm} + y_{Am} + y_{Bm} - (y_{Am}/T_{mj} + y_{Bm}/T_{mk}) \tag{38}$$

따라서, 故障前의 母線에드미턴스中  $Y_{jj}, Y_{kk}, Y_{jk}$  및  $Y_{kj}$  複素數은 故障로 인하여 다음과 같이 修正된다.

$$Y_{jj} \leftarrow \begin{cases} Y_{jj} + y_{am} + y_{bm} - (y_m + y_{cm}/2)/T_{mj}^2, & \text{고장점 } \neq j, k \\ Y_{jj} + y_r, & \text{고장점 } = j \\ Y_{jj}, & \text{고장점 } = k \end{cases} \tag{39}$$

$$Y_{kk} \leftarrow \begin{cases} Y_{kk} + y_{am} + y_{cm} - (y_m + y_{cm}/2)/T_{mk}^2, & \text{고장점 } \neq j, k \\ Y_{kk}, & \text{고장점 } = j \\ Y_{kk} + y_r, & \text{고장점 } = k \end{cases} \tag{40}$$

$$Y_{ki} = Y_{ik} \leftarrow \begin{cases} Y_{ki} + y_m/(T_{mi}T_{mk}) - y_m, & \text{고장점 } \neq j, k \\ Y_{ki}, & \text{고장점 } = j, k \end{cases} \tag{41}$$

線路 또는 母線事故 ( $\alpha_m=0$ 의 경우)의 種類에 따라 接地에드미턴스  $y_{gm}$ 의 값이 定하여지는데, 故障點에서 本逆相 및 零相임피던스를  $Z_{f2}, Z_{f0}$ 라 할때, 다음式으로 주어진다.

$$y_{gm} = \begin{cases} 0, & \text{3相短絡} \\ 1/(Z_{f2} + Z_{f0} + 3R_e), & \text{1線地絡} \\ 1/Z_{f2}, & \text{線間短絡} \\ 1/Z_{f2} + 1/(Z_{f0} + 3R_e), & \text{2線地絡} \end{cases}$$

VI. 逆相임피던스 計算 알고리즘

線路와 變壓器의 逆相임피던스는 正相임피던스와 같

아서 그대로 사용할 수 있으나, 이에 發電機와 그 附屬變壓器의 逆相임피던스는 追加되어야 하므로, 逆相에드미턴스行列은 正相에드미턴스行列의 對角線要素만을 다음과 같이 修正함으로써 記憶容量을 發電機數만큼의 근소한 增加에 의하여 쉽게 얻어진다.

$$Y_{ij} \leftarrow Y_{ij} + \sum_{a=1}^n \{1/(Z_{a12} + Z_{a21})\} \quad (43)$$

但,  $Z_{a12}$  :  $i$  發電機의 逆相임피던스

故障點에서 본 逆相等價임피던스  $Z_{f2}$ 는 以上 修正된 逆相에드미턴스行列의 逆行列(三角因數表)에서  $(j, j)$ ,  $(k, k)$ ,  $(k, j)$  및  $(j, k)$  要素인  $Z_{jj2}$ ,  $Z_{kk2}$ ,  $Z_{kj2}$  및  $Z_{jk2}$ 를 引出하고, 故障線路  $m$ 의 에드미턴스  $y_m$ 와 故障距離  $\alpha_m$ 을 使用함으로써 다음 式으로 주어짐이 證明된다. [3]

$$Z_{f2} = (1 + y_{Am} V'_{mj} / T_{mj} + y_{Bm} V'_{mk} / T_{mk}) / (y_{Am} + y_{Bm} + y_{Cm} / 2) \quad (44)$$

$$\text{但, } V'_{mj} = (y_{Am} Z_{jj2} / T_{mj} + y_{Am} Z_{jk2} / T_{mk}) / (y_{Am} + y_{Bm} + y_{Cm} / 2) \quad (45)$$

$$V'_{mk} = (y_{Am} Z_{kj2} / T_{mj} + y_{Bm} Z_{kk2} / T_{mk}) / (y_{Am} + y_{Bm} + y_{Cm} / 2) \quad (46)$$

### VII. 零相임피던스 計算 알고리즘

零相임피던스는 變壓器의 그것을 除外하고는 正相 또는 逆相임피던스와 다르므로 零相에드미턴스行列(發電機 및 그 附屬變壓器 包含)은 따로 構成하여야 하는데 그 構成을 위하여는 線路間의 相互임피던스의 存在, 變壓器의 結線狀態, 中性點接地的 與否 및 그 接地值 등을 모두 考慮하여야 하므로 매우 複雜한 알고리즘이 所要된다. 그 알고리즘에 관해서는 紙面上 省略하기로 하고, 여기서는 零相에드미턴스行列이 記憶되어 있다고 할때, 故障點에서 본 零相等價임피던스  $Z_{f0}$ 를 導出하는 알고리즘에 대하여만 記述하기로 한다.

故障線路  $m$ (兩端母線  $k, l$ )이 線路  $r$ (兩端母線  $j, k$ )과 磁氣的으로 相互임피던스  $Z_{mr}$ 과 結合되어 있고, 故障點  $f$ 의 距離를  $\alpha_m$ , 變壓器의 임피던스를  $Z_{mi}$ ,  $Z_{mk}$ ,  $Z_{ri}$ ,  $Z_{rj}$ , 線路의 零相自己임피던스를  $Z_{m0}$ ,  $Z_{r0}$ 라 할때

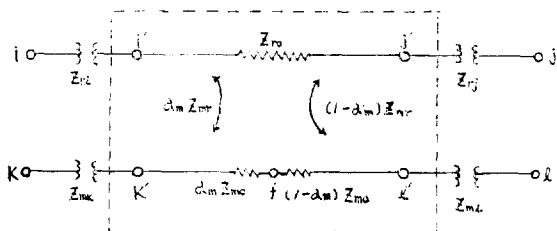


그림 2. 故障點을 包含한 部分零相임피던스圖  
Fig. 2. Partial zero sequence impedance diagram including a fault location.

線路變壓器의 公稱變比와 零相充電에드미턴스를 無視하면(零相充電에드미턴스는 實로 매우 적음), 그 零相임피던스回路는 그림 2와 같다.

그림 2의 點線部分에 대한 等價回路는 그림 2과 같음이  $i', j', k', l, f$  節點에 대한 母線에드미턴스行列을 構成함으로써 쉽사리 證明된다.

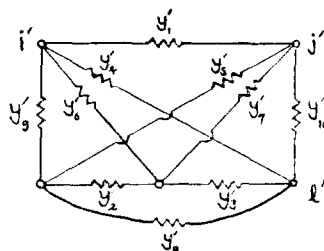


그림 3. 線路만의 故障點部分 零相에드미턴스圖  
Fig. 3. Equivalent partial zero sequence admittance diagram including a faulted location for lines only.

그림 3에서 各 等價線路에드미턴스는 다음과 같다.

$$y_{i'} = \alpha_m (1 - \alpha_m) Z_{m0} / D \quad (47)$$

$$y_{j'} = (1 - \alpha_m) (Z_{m0} Z_{r0} - Z_{mr}^2) / D \quad (48)$$

$$y_{k'} = \alpha_m (Z_{m0} Z_{r0} - Z_{mr}^2) / D \quad (49)$$

$$y_{l'} = y_{j'} = -\alpha_m Z_{m0} Z_{mr} / D \quad (50)$$

$$y_{f'} = y_{i'} = 0 \quad (51)$$

$$y_{i0'} = \alpha_m (1 - \alpha_m) Z_{m0}^2 / D \quad (52)$$

$$y_{j0'} = y_{i0'} = \alpha_m (1 - \alpha_m) Z_{r0} Z_{mr} / D \quad (53)$$

$$\text{但, } D \triangleq \alpha_m (1 - \alpha_m) Z_{m0} (Z_{m0} Z_{r0} - 2Z_{mr}^2) \quad (54)$$

그리고, 그림 2의 點線 外部의 等價回路는 그림 4와 같다.

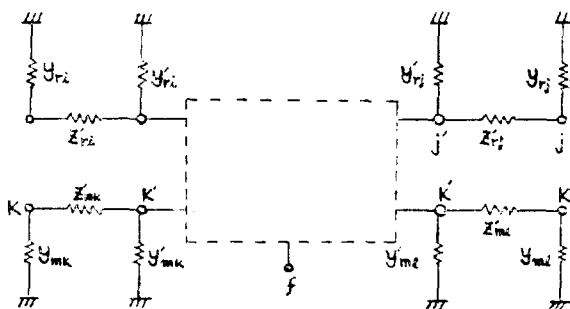


그림 4. 線路變壓器結線에 따른 部分零相에드미턴스圖  
Fig. 4. Equivalent partial zero sequence admittance diagram for line transformer connections.

그림 4에서, 變壓器의 結線狀態와 中性點接地值에 따라  $Z'_{pq}$ ,  $y_{pq}$  및  $y'_{pq}$  ( $p=m, r, q=i, j, k, l$ )의 값이 定해진다. 例를 들면 線路  $m$ 의 側  $p$ 에서 變壓器가  $Y-Y$ 로 直接接地方式을 採用하고 있다면,  $Z'_{pq} = Z_{pq}$ ,  $y'_{pq} =$

$y'_{pq}=0$ 이며  $Y-\Delta$ 로  $Y$ 側(母線側)이 抵抗  $R_0$ 를 통하여 接地되어 있다면,  $Z'_{pq}=\infty$ ,  $y'_{pq}=0$ ,  $y_{pq}=1/(Z_{pq}+3R_0)$ 이며,  $\Delta-\Delta$ 이면  $Z'_{pq}=\infty$ ,  $y_{pq}=y'_{pq}=0$ 이다. 그리고 變壓器가 없을 경우에는  $y_{pq}=y'_{pq}=Z'_{pq}=0$ 이다.

그림 3과 4를 一括한 母線側( $i, j, k, l$ )에서 본 그림 2의 等價回路는 그림 5와 같다. 그림에서  $Y'_{pq}$  ( $p, q=i, j, k, l$ )는 이 部分回路만이 系統과 分離되어있다고 보았을 경우의 母線애드미턴스이며,  $Y'_{pq}$ 의 行列  $Y'_{fmr}$ 은 다음 式으로 주어진다.

$$Y'_{fmr} = [U_{mr} + Y'_{fmr} Z']^{-1} Y'_{fmr} + Y_{mr} \quad (55)$$

但,  $U_{mr} : Z'_{ri}, Z'_{rj}, Z'_{rk}, Z'_{rl}$ 을 對角要素로 하는 對角行列

$Y_{mr} : y_{ri}, y_{rj}, y_{rk}, y_{rl}$ 을 對角要素로 하는 對角行列  
 $Y'_{fmr} :$  그림 3의 等價回路의 母線애드미턴스의 對角要素의 各各에,  $y'_{ri}, y'_{rj}, y'_{rk}, y'_{rl}$ 를 加한 行列.

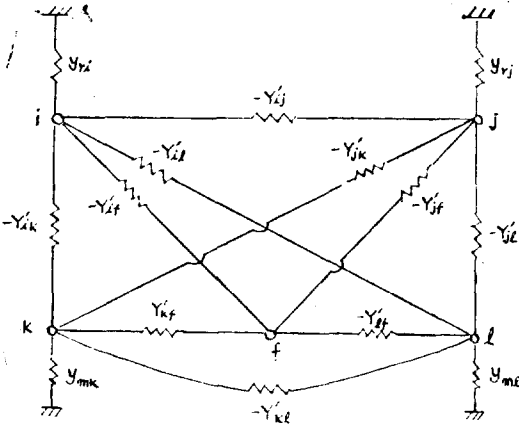


그림 5. 故障點을 包含한 等價部分 零相애드미턴스圖  
 Fig. 5. Equivalent partial zero sequence admittance diagram including a fault location

그리고 求하고자하는 故障點  $f$ 에서 본 等價零相임피던스  $Z_{fo}$ 는 다음式으로 주어진다.

$$Z_{fo} = (1 + Y'_{if} V'_i + Y'_{jf} V'_j + Y'_{kf} V'_k + Y'_{lf} V'_l) / Y'_{ff} \quad (56)$$

$$\text{但, } V'_p = (Y'_{if} Z_{pio} + Y'_{jf} Z_{pjo} + Y'_{kf} Z_{pko} + Y'_{lf} Z_{plo}) / Y'_{ff} \quad (57)$$

$Z'_{poo}$ : 全系統 零相임피던스行列의 ( $p, q$ )要素  
 따라서,  $Z_{fo}$ 는 記憶해둔 零相애드미턴스行列의 逆行列에 對應하는 三角因數表에서부터  $Z_{poo}$  ( $p, q=i, j, k, l$ )을 引出하여 式(55), (56) 및 (57)을 計算함으로써 얻어지게 된다.

### VII. 線路遮斷 알고리즘

故障線路的 遮斷類型은 保護繼電方式에 따르며, 單純한 距離繼電器의 경우는 故障發生後 一定한 遲延時間後에 遮斷되나, 再閉路繼電方式에서는 一定한 時間隔을 두고서 遮斷과 投入이 反復된다. 그리고 永久故障時에는 이와같은 反復後에 遮斷되는 反面 一時故障時에는 回復後의 다음 過程에서 投入된다. 이와 같은 쉬퀀스가 本研究에서 自動反映하였다. 그러나, 母線故障의 境遇에는 母線結線方式(單母線, 二重母線)에 따라 複數個의 線路가 遮斷, 投入될 수 있으며, 이를 自動 反映하기가 困難한 관계로 그 遮斷, 投入對象線路를 入力으로서 指定하였다.

母線  $j, k$ 間에 接續된 線路  $m$ 의 遮斷알고리즘은 이 線路에 된 母線애드미턴스를 다음과 같이 修正하기만 하면 充分하며, 再投入는 이들 애드미턴스를 原狀回復시키면 된다.

$$Y_{jj} \leftarrow Y_{jj} - (y_m + y_{cm}/2) / T^2_{mj} \quad (58)$$

$$Y_{kk} \leftarrow Y_{kk} - (y_m + y_{cm}/2) / Y^2_{mk} \quad (59)$$

$$Y_{jk} \leftarrow Y_{jk} - Y_{jk} + y_m / (T_{mj} \cdot T_{mj}) \quad (60)$$

### IX. 低周波 繼電器에 依한 負荷 自動遮斷 시뮬레이션 알고리즘

$j$ 母線의 電壓位相角을  $k$  計算스텝에서 (計算스텝時間隔  $\Delta t$ )  $\delta^k_j (= \tan^{-1}(V^k_{oj} / V^k_{Dj}))$ 라 할때, 그때의 母線周波數  $f_j^k$ 는

$$f_j^k = f_o + (1/2\pi) \frac{d\delta^k_j}{dt} = f_o + (1/2\pi) (\delta_j^k - \delta_j^{k-1}) / \Delta t \quad (61)$$

로써 주어지고,  $f_j^k$ 가  $j$ 母線에 設置된 低周波繼電器의 整定動作周波數以下가 되면, 그 動作지연時間  $t_j$ 에 대하여

$$t_j (\Delta t \cdot n_j) \leq 1 \quad (62)$$

을 滿足하는 最初의 時刻에서 式(31) 및 (32)에 依하여 ( $F_j$  및  $F'_j$ 는 미리 指定된) 負荷遮斷이 行해진다. 式(62)에서  $n_j$ 는 周波數  $f_j^k$ 가 動作周波數以下가 되면 計算스텝마다 1씩 增加하고, 以上이 되면 1씩 減少하며  $n_j$ 의 最少值은 0이다.

### X. 安定度 自動判別基準

安定度判別基準은 觀點에 따라 相異하며, 一般적으로 널리 採用되고 있는 方式으로는 發電機位相의 時間的變化나 發電機間의 位相角差의 時間的變化에 依據

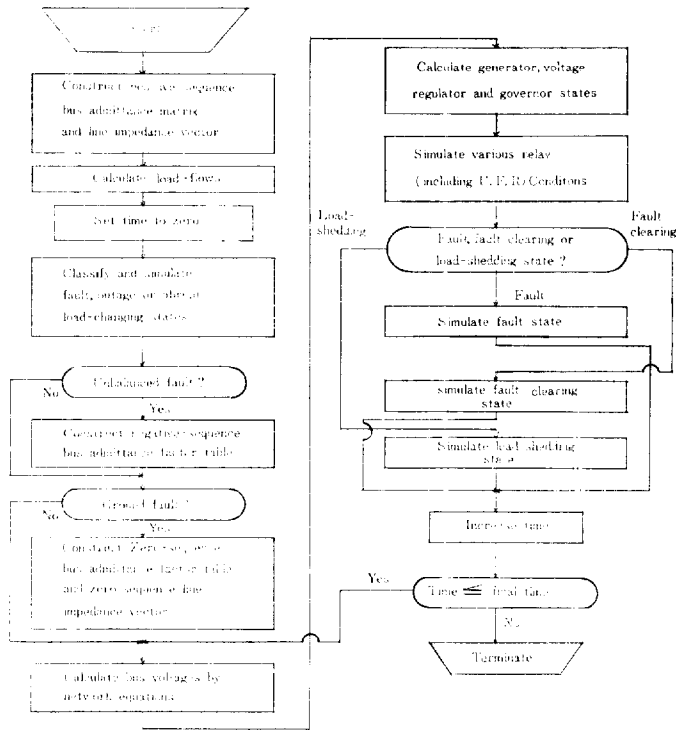


그림 6. 安定度計算過程圖  
Fig. 6. Flowchart for Stability Calculations.

하고 있다. 그러나, 본 研究에서는 適切한 計算時間隔(動遙時區間)中 發電機의 周波數(廻轉數를 換算함)가 주어진 範圍(예를들면, 1Hz)를 벗어나면 不安定한 것으로 判定하여, 安定 또는 不安定 與否가 自動印刷가 되도록 알고리즘에 反映하였다.

XI. 安定度 計算順序 및 事例研究

以上 記述한 알고리즘에 따른 安定度 計算順序를 流通圖로서 略示하면, 그림 6과 같다.

本 研究에서 提示한 알고리즘의 實用性을 評價하기 위하여, 轉電實系統(51母線, 101線路, 55發電機)에 대하여 電源脫落, 負荷脫落, 母線 및 線路事故(3相短絡, 線間短絡, 1線接地, 2線接地)의 경우에 對하여 再開路 繼電方式, 低周波繼電器의 動作, 調速機 및 電壓調整器의 效果, 變壓器의 損, 負荷의 非線型性까지도 考慮한 精密計算을 行한 結果, 記憶容量 61K바이트(非對稱故障의 경우를 제외하면 47K바이트)가 所要되었으며, FACOM 230計算機로 計算所要時間은 負荷를 非線型으로 보는 경우 計算스텝당 4.35[秒/스텝], 線型負荷의 경우 1.5[秒/스텝]이 소요되었다. 따라서, 計算스텝을 0.05[秒]로 하니 3.5[秒]동안의 動遙 期間을 考

察하는데 前者의 경우 340秒의 計算時間이 所要되어, 本 研究에서 開發한 알고리즘의 高速性이 立證되었다. 發電機의 動特性을 表現하는 微分方程式을 푸는데 亂게 쿨타法(Runge-kutta method)을 使用하였는데, 萬一 오일러法(Euler method)등을 使用하면, 計算精度는 低下하나 計算時間은 훨씬 短縮될 것이 分明하다.

事例研究의 代表的例를 들자면, 345-KV沃川母線에서 3相短絡이 發生하여 6사이클後 遮斷器가 1回線을 遮斷하고, 24사이클後 再開路되고, 30사이클에 再開路되는 永久故障의 경우, 主로 關東地方과 嶺南地方 以外の 發電機는 不安定하여 78사이클에서 負荷가 低周波繼電器의 動作으로 自動遮斷됨을 보여주고 있으며, 西서울, 沃川間의 345-KV의 中間地點에서 永久 1線地絡이 發生하는 경우에는 모든 發電機가 安定함을 보여 주고 있다.

XII. 結 論

以上の 研究結果를 要約하자면 다음과 같다.

1. 電力系統安定度의 精密計算用 새 알고리즘을 提示하였다.
2. 이 알고리즘에는 電源 및 負荷脫落, 母線 및 線路

의 平衡 및 不平衡 事故等 實質的으로 거의 모든 系統 異常狀態에 對하여 各種繼電方式, 發電機의 凸極性, 電壓調整器, 調速機, 變壓器 탭, 負荷의 非線型性, 母線의 周波數變動의 影響을 고려하였다.

3. 非線型線路方程式의 解(母線電壓計算)를 위한 새 알고리즘은 所要記憶容量과 計算時間의 觀點에서 優秀할뿐만 아니라, 收束性이 良好하다.

4. 이 알고리즘에는 低周波繼電器에 의한 自動負荷遮斷과 安定度自動判別 機能에 包含되어 있다.

5. 이 알고리즘에는 非對稱故障時에 適用되는, 故障點에서 본 等價逆相 및 零相 임피던스를 所要記憶容量과 計算時間의 觀點에서 效率的으로 計算하는 機能이 包含되어 있다.

끝으로 本 研究를 支援해주신 韓國電力 및 아산學術財團側에 謝意를 表한다.

參 考 文 獻

1. 朴永文, “電力系統의 動態安定度計算 프로그램開發에 관한 研究”. 서울工大 生産技術研究所報告書, 1978年, 12月, pp.1~122.
2. 朴永文, “小型電子計算機에 依한 多機電力系統의 動的 安定度 解析” 大韓電氣學會誌 第24卷 第1號 1974年 1月, pp.73~78.
3. IEEE Committee Report, “System Load Dynamics”, IEEE. Trans. on PAS, Vol. PAS-92, No. 2, March/April, 1973, pp.600~609.