

論 文
34~11~1

迅速한 想定事故解析 알고리즘에 관한 研究

A Study of Fast Contingency Analysis Algorithm

文 永 鉉*
(Young-Hyun Moon)

Abstract

With the rapid increase of contingency cases due to complication of power system, the reduction of computation time in contingency analysis has become more significant than ever before. This paper deals with the development of a fast contingency analysis algorithm by using a matrix decomposition method.

The proposed matrix decomposition method of contingency analysis yields an accurate solution by using the original triangular factor table. An outstanding feature of this method is of no need of factor table modification for network changes due to contingency outages. The proposed method is also applicable to multiple contingency analysis with remarkable reduction of computation time.

The algorithm has been tested for a number of single and multiple contingencies in 17-bus and 50-bus systems. The numerical results show its applicability to practical power systems.

1. 緒 論

大規模 系統에서는 많은 수의 想定事故가 있으며 제한된 시간내에 이들 모든 想定事故를 解析 한다는 것은 거의 불가능하며 가능한 많은 수의 想定事故를 고려할 수 있도록 하기 위하여 想定事故 解析 計算時間 단축에 많은 노력이 경주되고 있다.

現在까지 문헌에 발표된 想定事故 解析法으로는 Brown¹⁾, Stagg, 등이 제시한 DC-flow 法에 의한 想定事故 解析法과 Daniels²⁾ 등이 提案한 Newton Raphson 潮流計算의 Jacobian 行列修正에 의한 想定事故 解析法으로 大別될 수 있으며 Peterson³⁾은 후자의 方法에 計算時間 단축을 위하여 最適三角因數法을 適用한 方法을 제시하고 있으며 이후에도 관련 논문이^{4)~7)} 발표된 바 있으나 이론적으로 특기할만한 진전은 없는 것으로 생각된다.

Peterson 등의 알고리즘은 Jacobian matrix를 사용한 近似化된 모델을 採用하고 있으며 三角因數表

의 修正을 要하지 않기 때문에 想定事故 解析速度가 빠르고 解의 正確度도 상당히 좋은 것으로 評價된다. 그러나 Jacobian matrix의 變化分 ΔH 의 對稱性을 假定하기 때문에 解의 正確度에 改善의 여지가 있으며 多重事故解析에 應用될 수 없는 短點이 있다.

從來에는 多重想定事故는 發生確率이 매우 낮다는 이유로 考慮對象에 除外되어 왔으나 最近 系統의 大規模化에 따라 特定한 突發事故는 系統의 特殊條件에 따라 또 다른 事故 즉 二次事故(secondary outage)를 發生시킬 可能性이 매우 높아지고 있다. 뿐만 아니라 二次事故의 發生은 系統에 큰 損傷을 입히는 경우가 많다. 따라서 發生確率이 매우 적은 一般的인 多重想定事故는 考慮해야 할 必要가 없으나, secondary outage를 수반할 可能性이 큰 想定事故에 대해서는 多重想定事故解析을 行해야할 必要性이 提起되고 있으며⁸⁾ 이를 위한 多重想定事故解析 알고리즘의 開發이 要求되고 있다.

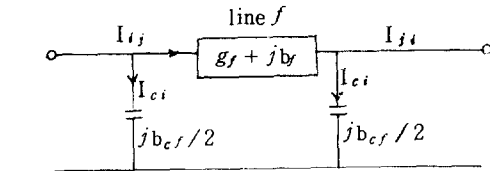
本 研究에서는 Peterson 方法을 改善하여 ΔH 를 symmetry를 假定하지 않고 正確하게 分解(decomposition)한 후 故障前의 三角因數表를 引用함으로써 想定事故解析을 신속하게 遂行할 수 있는 알고리즘을 開發하고 multiple contingency에의 擴張適用方案을 研究하였다.

*正 會 員: 延世大 工大 電氣工學科 助教授·正博
接受日字: 1985年 7月 4日

2. 單純想定事故解析

想定事故는 單純想定事故와 多重想定事故로 大別될 수 있으며 本節에서는 單純想定事故解析法을 取扱한다. 單純想定事故는 線路事故(line outage)와 母線事故로 다시 分類하여 線路事故解析에 대하여 먼저 記述하고 母線想定事故解析을 從來의 方法과 同一하므로 간략히 記述하기로 한다.

線路想定事故解析에 있어서 母線 i 와 j 를 연결하고 있는 線路 f 가 開放되는 想定事故를 考慮해 보자. 그러면 線路開放에 따라 電力潮流가 變化되며 故障後의 電力潮流는 다음 過程에 의하여 計算될 수 있다. 그림 1은 線路 f 의 π 等價回路 및 線路整數를 나타낸다.



$y_f = g_f + j b_f$: 線路 f 의 admittance

$y_{cf} = j b_{cf}$: 線路 f 의 充電 admittance

그림 1. 線路의 π 等價回路

Fig. 1. π -equivalent circuit of transmission line.

想定事故가 발생하면 故障狀態에 따라 分割潮流計算式(decoupled load flow equation) $\Delta P = [H] \Delta \theta$, $\Delta Q = [L] \Delta V$ 에서 Jacobian 行列 $[H]$ 의 要素중 4개가 다음과 같이 變化한다.

$$\begin{aligned} h'_{ii} &= -B'_{ii} V_i^2 - Q'_i \\ &= h_{ii} - V_i V_j \{ g_f \sin \theta_{ij} - (b_f + 0.5 b_{cf}) \cos \theta_{ij} \} \\ h'_{ij} &= -V_i V_j \{ G'_{ij} \sin \theta_{ij} - B'_{ij} \cos \theta_{ij} \} \\ &= h_{ij} + V_i V_j \{ g_f \sin \theta_{ij} - b_f \cos \theta_{ij} \} \\ h'_{ji} &= -V_j V_i \{ G'_{ji} \sin \theta_{ji} - B'_{ji} \cos \theta_{ji} \} \\ &= h_{ji} + V_j V_i \{ g_f \sin \theta_{ji} - b_f \cos \theta_{ji} \} \\ h'_{jj} &= -B'_{jj} V_j^2 - Q'_j \\ &= h_{jj} - V_j V_i \{ g_f \sin \theta_{ji} - (b_f + 0.5 b_{cf}) \cos \theta_{ji} \} \\ K'_{kl} &= h_{kl} \text{ if } k \notin \{i, j\} \text{ or } l \notin \{i, j\} \end{aligned} \quad (1)$$

단 prime 이 붙은 文字는 修正된 後의 admittance matrix 의 element 를 表示함

이상에 의하여 變化된 Jacobian 行列은 $[H'] = [H'_{ij}]$ 로 주어진다. $[L']$ 도 類似하게 求해될 수 있으나 想定事故解析에 있어서는 다음의 이유로 考慮되지 않는다. 故障에 의하여 bus 電壓變化가 超來될 수 있으나 受用家側에서 電壓變化에 따라 電壓調整用 con-

denser 를 投入 또는 適斷하여 Bus 電壓을 一定值로 유지하려고 한다. 따라서 無効電力은 中央集中制御보다는 分散制御되고 있는 實情이어서 各 母線에서 無効電力變化量算定이 困難하다. 뿐만 아니라 故障에 의하여 變化된 無効電力潮流變化분만큼 各 bus condenser 또는 受用家 condenser 調整에 의하여 積極的に 補償된다고 假定하여도 實用上 별 지장이 없으므로 同상 各 母線에서의 無効電力과 母線電壓의 變化는 거의 없는 것으로 간주할 수 있기 때문이다.

여기서 事故에 의한 Jacobian 行列變化分(incremental Jacobian matrix)을 다음과 같이 定義한다.

$$\Delta H = H' - H \quad (2)$$

그러면 考慮되고 있는 單純線路事故에 대한 ΔH 는 다음과 같은 形態를 갖는다.

$$\Delta H = \begin{matrix} \textcircled{i} & & \textcircled{j} \\ \vdots & & \vdots \\ \cdots & \Delta h_{ii} & \cdots & \Delta h_{ij} & \cdots \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \textcircled{j} & \cdots & \Delta h_{ji} & \cdots & \Delta h_{jj} & \cdots \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \end{matrix} \quad (3.a)$$

$$\begin{aligned} \text{단) } \Delta h_{ii} &= h'_{ii} - h_{ii} = -V_i V_j \\ &\quad \{ g_f \sin \theta_{ij} - (b_f + 0.5 b_{cf}) \cos \theta_{ij} \} \\ \Delta h_{ij} &= h'_{ij} - h_{ij} = V_i V_j \{ g_f \sin \theta_{ij} - b_f \cos \theta_{ij} \} \\ \Delta h_{ji} &= h'_{ji} - h_{ji} = V_j V_i \{ g_f \sin \theta_{ji} - b_f \cos \theta_{ji} \} \\ \Delta h_{jj} &= h'_{jj} - h_{jj} = -V_j V_i \\ &\quad \{ g_f \sin \theta_{ji} - (b_f + 0.5 b_{cf}) \cos \theta_{ji} \} \end{aligned} \quad (3.b)$$

上記 式에서 留意할 점은 ΔH 가 非對稱 이라는 점이다.

想定事故解析에서의 潮流計算은 修正된 Jacobian 行列 $[H']$ 의 逆行列計算을 필요로 하며 特別한 方法을 使用하지 않고 $[H']$ 의 逆行列計算을 直接計算하면 많은 計算時間이 所要되므로 Peterson 等은 $g_f \sin \theta_{ij} \ll b_f \cos \theta_{ij}$ 인 점을 利用하여 $[\Delta H]$ 가 近似的으로 對稱이라고 假定함으로써 ΔH 를 다음과 같이 分解(decomposition)하였다.

$$\Delta H \approx m_{ij} [\Delta h] m_{ij}^T \quad (4)$$

단 $m_{ij} = [0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0, -1, 0, \dots, 0]^T$: n -dimensional vector

$$\Delta h = V_i V_j b_f \cos \theta_{ij}$$

$n = N - 1$: slack bus 를 제외한 全 母線數

N : 系統의 總母線數

그러나 線路의 R/X 의 비가 크고 重負荷인 경우 $g_f \sin \theta_{ij}$ 의 影響을 無視한다면 상당한 計算誤差를 發生할 우려가 있다. 本 研究에서 ΔH 를 正確하게 分解(decomposition)할 수 있는 効果적인 方法이 考

案되었으며 ΔH 의 分解을 利用함으로써 $[H']$ 의 逆行列計算을 원래의 Jacobian 行列 H 에 대한 三角因數表를 使用하여 간단히 處理할 수 있는 알고리즘이 開發되었다.

ΔH 를 分解(decomposition)하기 위하여 matrix $\Delta \hat{H}$ 와 M_{ij} 를 다음과 같이 定義한다.

$$\Delta \hat{H} = \begin{bmatrix} \Delta h_{ii} & \Delta h_{ij} \\ \Delta h_{ji} & \Delta h_{jj} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$M_{ij} = \begin{bmatrix} \textcircled{i} & \textcircled{j} \\ 0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0, \dots, 0 \\ 0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0 \end{bmatrix} = [e_i, e_j]^T \quad (6)$$

단 $e_k = [0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]^T$: n -dimensional unit vector (7)

式(5)에서 特記할 것은 ΔH 의 determinant를 式(3b)를 代入하여 計算하면 零이 되므로 ΔH 가 singular matrix 이라는 점이다.

以上の 定義를 使用하면 ΔH 는 다음과 같이 分解(decomposition)될 수 있다.

$$\Delta H = M_{ij} \Delta \hat{H} M_{ij}^T \quad (8)$$

그러면 修正된 Jacobian 行列 H' 는 다음과 같이 表示된다.

$$H' = H + \Delta H = H + M_{ij} \Delta \hat{H} M_{ij}^T \quad (9)$$

여기서 H' 의 逆行列計算을 위하여 擴張된 Sherman-Morrison 公式를 使用하면 편리하다.⁹⁾

$$[A + BCB^T]^{-1} = A^{-1} - A^{-1}B [I + CB^T A^{-1}CB^T]^{-1} A^{-1} \quad (10)$$

그러고 式(10)을 利用하면 $[H']$ 의 逆行列은 다음과 같이 計算된다.

$$\begin{aligned} [H]^{-1} &= [H + \Delta H]^{-1} = [H + M_{ij} \Delta \hat{H} M_{ij}^T]^{-1} \\ &= H^{-1} - H^{-1} M_{ij} [I + \Delta \hat{H} M_{ij}^T H^{-1} M_{ij}]^{-1} \\ &\quad \Delta \hat{H} M_{ij}^T H^{-1} \end{aligned} \quad (11)$$

상기식은 ΔH 가 singular 일 때도 成立하는 것이 특징이다.

式(11)에서 각 term에 대한 dimensionality를 考慮해 보면 H^{-1} 는 $(n \times n)$ matrix로서 이에 等價의 技能을 갖는 $[H]$ 에 對한 三角因數表(factor table)를 使用할 수 있으며 $H^{-1} M_{ij}$ 의 計算은

$$H^{-1} M_{ij} = H^{-1} [e_i, e_j] = [H^{-1} e_i, H^{-1} e_j] \quad (12)$$

로 變形하여 三角因數表를 使用, 간단히 計算할 수 있다. 이 結果를 利用하여 $\Delta H M_{ij}^T [H^{-1} M_{ij}]$ 를 計算하면 matrix 演算結果는 (2×2) matrix가 됨을 알 수 있다. 따라서 $[I + \Delta \hat{H} M_{ij}^T H^{-1} M_{ij}]^{-1}$ 의 計算은 dimensionality가 적으므로 一般의 方法에 의

하여서도 간단히 處理될 수 있으며 이 結果는 事故發生時 潮流計算에 利用된다.

다음은 考慮되고 있는 想定事故解析 枝 母線 i, j 사이에 連結되어 있는 線路 f 에 開放事故가 發生하였을 때 潮流分布計算에 대하여 考察한다.

系統의 故障以前 運轉狀態(pre-fault operating state)를 (V^0, θ^0) 로 表示하면 故障以後의 運轉狀態(post-fault operating state)는 前述한 바와 같이 事故가 發生하였을 경우에도 無効電力의 變化가 없으며 bus 電壓도 變動없이 規定值로 유지된다는 假定하에서 故障後의 運轉狀態는 (θ, V^0) 로 表示될 수 있다.

線路 k 를 通하여 bus i 에서 bus j 로 그리고 bus j 에서 bus i 로 흐르는 有効電力潮流를 각각 F_{ij}^k 및 F_{ji}^k 로 표시하면

$$\begin{aligned} F_{ij}^k &= (V_i^0)^2 g_f - V_i^0 V_j^0 [g_f \cos \theta_{ij}^0 + b_f \sin \theta_{ij}^0] \\ F_{ji}^k &= (V_j^0)^2 g_f - V_j^0 V_i^0 [g_f \cos \theta_{ji}^0 + b_f \sin \theta_{ji}^0] \end{aligned} \quad (13)$$

를 얻으며 分割潮流計算法(Decoupled Load Flow Method)로 부터 다음과 같은 $\Delta \theta$ 에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta P = [H'] \Delta \theta \quad (14.a)$$

$$\Delta P = [0, 0, \dots, 0, -F_{ij}^k, 0, \dots, 0, -F_{ji}^k, 0, \dots, 0]^T \quad (14.b)$$

故障후의 運轉狀態는 上記式으로부터 $\Delta \theta$ 를 구하여 返復的으로 θ 를 修正함으로써 求할 수 있으며 式(9)을 代入하면 $\Delta \theta$ 는 다음식에 의하여 計算될 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta \theta &= [H]^{-1} \Delta P - H^{-1} M_{ij} [I + \Delta \hat{H} M_{ij}^T \\ &\quad H^{-1} M_{ij}]^{-1} \Delta \hat{H} M_{ij}^T H^{-1} \Delta P \end{aligned} \quad (15)$$

上記식의 計算에서 $H^{-1} \Delta P$ 는 H 의 三角因數表를 使用함으로써 간단히 計算될 수 있으며 $H^{-1} M_{ij}$ 및 $[I + \Delta \hat{H} M_{ij}^T H^{-1} M_{ij}]^{-1}$ 도 前述한 바와 같이 간단히 計算되므로 式(15)에 의하여 $\Delta \theta$ 는 迅速하게 計算될 수 있다. 다음은 이 $\Delta \theta$ 에 의하여 $\theta = \theta_0 + \Delta \theta$ 로 位相角을 修正한 후 解 (V_0, θ) 에 의거하여 母線注入電力을 計算한다. 이때 母線注入電力計算值 P_k 와 母線注入電力指定值(specified bus injection power) P_{ks} 와의 誤差가 一定值이하로 되면 解로 간주하고 誤差가 크다고 判定되면 ΔP 를 다음식에 의하여 計算하고

$$\Delta P_k = P_{ks} - V_k^0 \sum_{j=1}^N V_j^0 [G'_{kj} \cos \theta_{kj} + B'_{kj} \sin \theta_{kj}] \quad (16)$$

式(15)에 의하여 誤差가 一定值이하가 될 때까지 θ 를 修正할 수 있다. 그러나 想定事故解析에 있어서는 빠른 計算速度를 要하므로 통상 θ 의 修正은 1회에 그치도록 하는 알고리즘을 使用하고 있다.

以上에서 求해진 系統運轉狀態(V^0, θ)에 의하여 各 線路에 흐르는 電力을 計算할 수 있다.

母線想定事故解析에 있어서는 系統 network 變化가 없기 때문에 Jacobian 行列變化는 없고 母線注入電力(bus injection power)만 變化하므로 故障狀態에 따라 母線注入電力 ΔP 를 計算하면 θ 의 修正은 式(14)에 의하여 간단히 遂行될 수 있으며 이것은 從來의 方法(4)과 같으므로 상세한 記述은 省略한다.

끝으로 本 研究에서 提示한 알고리즘과 從來의 알고리즘을 計算速度 및 解의 正確度 面에서 考察해 보기로 한다.

從來의 알고리즘中 Peterson 이 提示한 알고리즘은 ΔH 의 非零要素가 모두 Δh 로 같다고 간주하고 式(4)와 일반적인 Sherman-Morrison 公式를 使用하면 $\Delta \theta$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \Delta \theta &= (H + \Delta H)^{-1} \Delta P = (H + m_{ij} \Delta h m_{ij}^T)^{-1} \Delta P \\ &= \{H^{-1} - H^{-1} m_{ij} [\Delta h + m_{ij}^T H^{-1} m_{ij}]^{-1} m_{ij}^T H^{-1}\} \Delta P \quad (17) \end{aligned}$$

(단 $m_{ij} = (0 \cdots 0 \ 1 \ 0 \cdots 0 \ 1 \ 0 \cdots 0)^T$)

따라서 이 方法에서는 Jacobian 行列(H)의 三角因數表에 의한 forward-backward elimination 回數가 $H^{-1} m_{ij}$ 에 1회, $H^{-1} \Delta P$ 에 1회, 都合 2회가 必要하나 本 研究에서 提示한 方法에 의하면 式(15)에서 보는 바와 같이 $H^{-1} M_{ij}$ 計算에 2회, $H^{-1} \Delta P$ 計算에 1회, 都合 3회가 要求된다. 따라서 提示한 알고리즘은, 計算速度 面에서는 Peterson 方法에 比하여 뒤진다고 볼 수 있으나 前述한 바와같이 計算의 正確度 面에서는 우수하다. 그러나 提示한 方法의 特徵은 多重事故解析에서 나타난다.

3. 多重想定事故解析

多重想定事故는 理論적으로는 二重, 三重事故 등으로 分類될 수 있으나 일반적인 多重事故는 그 發生確率이 극히 낮으므로 考慮대상에서 除外되고 있다. 그러나 多重事故의 發生確率은 적지만 한번 發生하면 系統에 막대한 損傷을 입히게 되므로 比較的 發生可能性이 높은 二次事故(secondary outage)에 따르는 二重想定事故를 解析하고 그 結果를 系統

運用に 適用시키고자 하는 것이 最近이 研究 趨勢이다.

本 研究에서는 二次事故에 따르는 二重想定事故를 二重線路事故, 母線-線路事故, 二重母線事故, 線路-母線事故로 分類하여 解析方法을 研究하였다.

3.1 二重線路想定事故解析

系統에 있어서 線路 f_1 이 落雷등의 어떤 原因에 의해서 遮斷되고 線路 f_1 이 負擔하고 있던 負荷가 갑자기 線路 f_2 에 轉嫁됨으로써 線路 f_2 가 二次의 遮斷된 경우를 考慮해 보자.

線路 f_1 은 母線 i, j 사이에, 線路 f_2 는 母線 k, l 사이에 連結되어 있다고 하자 그러면 母線 admittance 行列은 線路의 開放에 따라 다음과 같이 變化한다.

$$Y'_{BUS} = Y_{BUS} + \Delta Y_{BUS} \quad (18)$$

위식의 ΔY_{BUS} 는 故障線路의 連結狀態에 따라 다음의 3가지 경우에 대하여 Y_{BUS} 구성 알고리즘에 의하여 구성될 수 있다.

- Case 1) 母線 i, j, k, l 이 各各 다른 경우
- Case 2) i 와 k 가 같고 j 와 l 이 서로 다른 경우
- Case 3) i 와 k 가 같고 j 와 l 이 같은 경우

그러나 여기서는 ΔY_{BUS} 를 보다 체계적으로 構成하는 方法을 考察하였으며 이 方法은 후후에 ΔH 構成에 適用된다.

線路 f_1, f_2 가 開放되었을때 matrix y_{f1}, y_{f2} 를 다음과 같이 定義한다.

$$y_{f1} = \begin{bmatrix} y_{f1} + 0.5 y_{c f1} & -y_{f1} \\ -y_{f1} & y_{f1} + 0.5 y_{c f1} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$y_{f2} = \begin{bmatrix} y_{f2} + 0.5 y_{c f2} & -y_{f2} \\ -y_{f2} & y_{f2} + 0.5 y_{c f2} \end{bmatrix} \quad (20)$$

그러면 二重線路故障의 어느 경우에 대해서도 ΔY_{BUS} 는 다음에 의하여 計算될 수 있다.

$$\Delta Y_{BUS} = -M_{ij} \{y_{f1}\} M_{ij}^T - M_{kl} \{y_{f2}\} M_{kl}^T \quad (21)$$

(단 M_{ij}, M_{kl} 은 式(6)에 定義된 바와 같다.)

예로서 式(20)를 case 2에 適用시켜 보면

그 結果는 일반적 方法에 의하여 構成된 ΔY_{BUS} 와

값이 쉽게 보여질 수 있다.

線路開放에 의하여 Y_{BUS} 가 變化하면 이에 따라 Jacobian matrix 를 修正하여야 한다.

Jacobian matrix H의 element 는

$$\begin{aligned} H_{ii} &= -B_{ii} V_i^2 - Q_i \\ H_{ij} &= -V_i V_j [G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}] \quad (i \neq j) \end{aligned} \quad (22)$$

에 의하여 주어지므로 故障후의 Jacobian matrix H' 의 element 는 다음과 같이 計算된다.

$$\begin{aligned} H'_{ii} &= -B'_{ii} V_i'^2 - Q_i \\ H'_{ij} &= -V'_i V'_j [G'_{ij} \sin \theta'_{ij} - B'_{ij} \cos \theta'_{ij}] \end{aligned} \quad (23)$$

그러나 上記式에 대한 H' 의 計算은 故障후의 運轉狀態가 計算된 후에 正確히 計算될 수 있으므로 빠른 計算速度를 要하는 想定事故解析에는 Y_{BUS} 變化만을 考慮하고 故障후의 運轉狀態는 故障 前의 運轉狀態와 近似的으로 같다고 간주함으로써 Jacobian matrix 를 近似的으로 計算하여 使用한다. 뿐만 아니라 各 母線 또는 受用家에 있는 調相容量 母線無効電力 變化나 電壓變動은 無視하여도 實系統適用에 별 支障이 없음을 前述한 바와 같으므로 故障후의 Jacobian matrix 는 다음과 같이 近似的으로 計算된다.

$$\begin{aligned} H'_{ii} &\approx -B'_{ii} V_i'^2 - Q_i = -(B_{ii} + \Delta B_{ii}) V_i^2 - Q_i \\ &= H_{ii} - \Delta B_{ii} V_i^2 \\ H'_{ij} &\approx -V_i V_j [G'_{ij} \sin \theta_{ij} - B'_{ij} \cos \theta_{ij}] \\ &= -V_i V_j [(G_{ij} + \Delta G_{ij}) \sin \theta_{ij} \\ &\quad - (B_{ij} + \Delta B_{ij}) \cos \theta_{ij}] \\ &= H_{ij} - V_i V_j (\Delta G_{ij} \sin \theta_{ij} - \Delta B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{aligned} \quad (24)$$

여기서 Jacobian matrix의 變化分 $\Delta H = H' - H$ 로 定義하면 ΔH 의 element 는

$$\begin{aligned} \Delta H_{ii} &= H'_{ii} - H_{ii} \approx -\Delta B_{ii} V_i^2 \quad (i = 1, \dots, n) \\ \Delta H_{ij} &= H'_{ij} - H_{ij} = -V_i V_j (\Delta G_{ij} \sin \theta_{ij} - \Delta B_{ij} \cos \theta_{ij}), \quad i \neq j \end{aligned} \quad (25)$$

로 쓸 수 있으며 多重線路事故에 대한 ΔH 를 體系의 構成할 수 있는 방법도 式(21)에 의한 ΔY_{BUS} 計算과 類似한 방법으로 開發할 수 있다.

線路 f_1 이 母線 i, j 사이에 連結되어 있고 線路 f_2 는 母線 k, l 에 連結되어 있다고 하면 ΔH_{f_1} , ΔH_{f_2} 를 다음과 같이 定義한다.

$$\Delta H_{f_1} = \begin{pmatrix} V_i^2 (b_{f_1} + 1/2 b_{c_{f_1}}), V_i V_j [g_{f_1} \sin \theta_{ij} - (b_{f_1} + 1/2 b_{c_{f_1}}) \cos \theta_{ij}] \\ V_i V_j [g_{f_1} \sin \theta_{ij}, V_j^2 (b_{f_1} + 1/2 b_{c_{f_1}}) \\ -(b_{f_1} + 1/2 b_{c_{f_1}}) \cos \theta_{ij}] \end{pmatrix} \quad (26. a)$$

$$\Delta H_{f_2} = \begin{pmatrix} V_k^2 (b_{f_2} + 1/2 b_{c_{f_2}}), V_k V_l [g_{f_2} \sin \theta_{kl} - (b_{f_2} + 1/2 b_{c_{f_2}}) \cos \theta_{kl}] \\ V_l V_k [g_{f_2} \sin \theta_{lk}, V_l^2 (b_{f_2} + 1/2 b_{c_{f_2}}) \\ -(b_{f_2} + 1/2 b_{c_{f_2}}) \cos \theta_{lk}] \end{pmatrix} \quad (26. b)$$

그러면 線路 f_1, f_2 의 開放에 따른 Jacobian matrix 變化分 ΔH 는

$$\Delta H = -M_{ij} \Delta H_{f_1} M_{ij}^T - M_{kl} \Delta H_{f_2} M_{kl}^T \quad (27)$$

로 計算되며 위 式은 어떠한 경우의 線路連結狀態에 대해서도 成立한다는 것이 特徵이다. 여러가지의 線路連結狀態에 대하여 式(27)이 適用될 수 있음을 確認할 수 있으며 例로서 線路連結狀態가 case 2와 같은 경우에 適用시켜 보자.

case 2에서는 i 와 k 가 같으므로 式(26), (27)로부터 ΔH 는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \Delta H &= -M_{ij} \Delta H_{f_1} M_{ij} - M_{kl} \Delta H_{f_2} M_{kl} \\ &= -M_{ij} \Delta H_{f_1} M_{ij} - M_{ij} \Delta H_{f_2} M_{ij} \end{aligned}$$

$$= \begin{pmatrix} & i & & j & & l \\ & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \dots & \Delta H_{ii} & \dots & \Delta H_{ij} & \dots & \Delta H_{il} & \dots \\ & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \dots & \Delta H_{ji} & \dots & \Delta H_{jj} & \dots & \Delta H_{jl} & \dots \\ & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \dots & \Delta H_{li} & \dots & \Delta H_{lj} & \dots & \Delta H_{ll} & \dots \\ & \vdots & & \vdots & & \vdots \end{pmatrix} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \Delta H_{ii} &= -V_i^2 (b_{f_1} + b_{f_2} + 0.5 (b_{c_{f_1}} + b_{c_{f_2}})) \\ \Delta H_{ij} &= -V_i V_j [g_{f_1} \sin \theta_{ij} - (b_{f_1} + 0.5 b_{c_{f_1}}) \cos \theta_{ij}] \\ \Delta H_{il} &= -V_i V_l [g_{f_2} \sin \theta_{il} - (b_{f_2} + 0.5 b_{c_{f_2}}) \cos \theta_{il}] \\ \Delta H_{ji} &= -V_j V_i [g_{f_1} \sin \theta_{ji} - (b_{f_1} + 0.5 b_{c_{f_1}}) \cos \theta_{ji}] \\ \Delta H_{jj} &= -V_j^2 (b_{f_1} + 0.5 b_{c_{f_1}}) \\ \Delta H_{jl} &= -0 \\ \Delta H_{li} &= -V_l V_i [g_{f_2} \sin \theta_{li} - (b_{f_2} + 0.5 b_{c_{f_2}}) \cos \theta_{li}] \\ \Delta H_{lj} &= -0 \\ \Delta H_{ll} &= -V_l^2 (b_{f_2} + 0.5 b_{c_{f_2}}) \end{aligned}$$

上記 結果는 일반적인 Jacobian 행렬 구성법에 의한 ΔH 와 일치함을 알 수 있다.

結論으로 事故에 따른 Jacobian 行列變化分 ΔH 는 式(26), (27)에 의하여 構成될 수 있으며, 多重線路事故에 대해서도 線路的 連結狀態에 상관없이 體系的으로 ΔH 를 構成할 수 있다는 것이 이 方法의 特徵이다.

以上에서와 같이 ΔH 가 構成되면 分割潮流計算法에 의해 故障후의 運轉狀態(V, θ)를 計算할 수 있다.

故障후의 母線電壓은 前述한 바와 같이 故障前의 母線電壓과 같다고 볼 수 있으며 位相角 θ 는 單一線路事故解析에서와 類似한 方法으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta P = [H'] \Delta \theta = [H + \Delta H] \Delta \theta \quad (30)$$

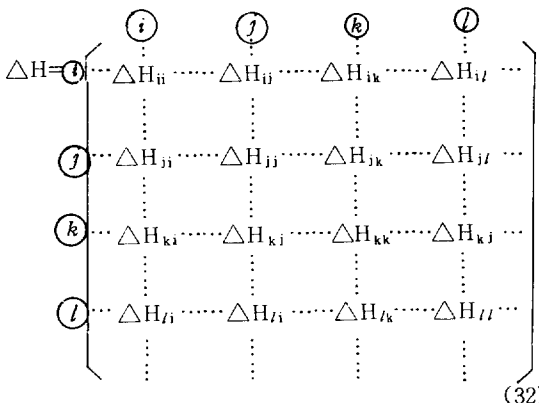
$$\Delta P = [0, \dots, 0, -F_{ij}^{f1}, 0, -F_{ij}^{f1}, 0, \dots, 0]^T + [0, \dots, 0, -F_{kl}^{f2}, 0, \dots, 0, -F_{kl}^{f2}, 0, \dots, 0]^T \quad (31)$$

$$F_{mn}^f = V_m^2 g_f - V_m V_n g_f \sin \theta_{mn} - (b_f + 0.5b_{cf}) \cos \theta_{mn}$$

}: 線路f을 통하여 bus m에서 bus n으로 흐르는 有效電力

式(31)로부터 $\Delta \theta$ 는 單純線路事故에서와 類似한 方法으로 ΔH 를 分解(decomposition)함으로써 H에 대한 三角因數表를 使用하여 간단히 計算할 수 있다.

二重線路事故에서는 式(28)을 考慮해 보면 ΔH 의 element ΔH_{ij} 는 index i, j 가 모두 故障線路가 連結되어 있는 母線일 경우는 零이 아니며 그 외의 ΔH_{ij} 는 零임을 알 수 있다. 따라서 ΔH 의 非零要素의 數는 (4×4) 개를 넘지 못하며 다음과 같은 nonzero scheme을 갖는다.



그리고 위의 ΔH 는 다음과 같이 分解(decomposition)될 수 있다.

$$\Delta H = [M_{ijkl}] [\Delta \hat{H}] [M_{ijkl}]^T \quad (32)$$

$$\text{단 } M_{ijkl} = [e_i, e_j, e_k, e_l] \quad (34)$$

i, j, k, l : ΔH 의 nonzero element가 있는 column 또는 row의 번호

$$\Delta \hat{H} = \begin{bmatrix} \Delta H_{ii} & \Delta H_{ij} & \Delta H_{ik} & \Delta H_{il} \\ \Delta H_{ji} & \Delta H_{jj} & \Delta H_{jk} & \Delta H_{jl} \\ \Delta H_{ki} & \Delta H_{kj} & \Delta H_{kk} & \Delta H_{kl} \\ \Delta H_{li} & \Delta H_{lj} & \Delta H_{lk} & \Delta H_{ll} \end{bmatrix} \quad (35)$$

式(33)의 行列分解(matrix decomposition)을 利用하면 式(30)으로부터 $\Delta \theta$ 를 다음과 같이 計算할 수 있다.

$$\Delta \theta = [H + \Delta H]^{-1} \Delta P = \{H + [M_{ijkl}] \Delta \hat{H} [M_{ijkl}]^T\}^{-1} \Delta P = \{H^{-1} - H^{-1} [M_{ijkl}] [I + \Delta \hat{H} [M_{ijkl}]^T H^{-1} [M_{ijkl}]]^{-1} \Delta \hat{H} M_{ijkl} H^{-1}\} \Delta P \quad (36)$$

새로운 運轉狀態에서 母線位相角 θ 는 $\theta = \theta^0 + \Delta \theta$ 로 計算된다. 式(36)에서 H의 三角因數表(factor table)에 의한 forward-backward elimination 回數를 計算해 보면 $H^{-1} \Delta P$ 에 1회 $H^{-1} M_{ijkl}$ 計算에 4회 都合 5회의 forward-backward elimination 으로서 $\Delta \theta$ 가 計算된다.

이 方法은 Jacobian 行列[H]의 factor table을 再構成하거나 修正하는 方法에 비하여 計算時間을 현저히 短縮시킬 수 있다. 그리고 $[I + \Delta \hat{H} M_{ijkl}^T H^{-1} M_{ijkl}]^{-1}$ 의 dimensionality는 (4×4) 이므로 逆行列計算에 의한 計算時間의 增加는 無視될 수 있을 정도이다.

3.2 기타 二重想定事故解析

二重想定事故는 二重線路事故(double line outage), 二重母線事故(double bus outage), 母線事故에 二次事故로 線路事故가 수반되는 경우 및 線路事故에 母線事故가 수반되는 경우 등으로 分類될 수 있으며 二重線路事故는 前節에서 記述한 바와 같다. 여기서는 二重母線事故 및 線路-母線復合事故의 解析을 취급하며 이들의 二重事故는 單一事故解析技法을 適用함으로써 간단히 解結되므로 다음에 간단히 記述하고자 한다.

二重母線事故가 發生하면 母線注入電力(bus injection power)만 變化한다. 一次母線事故에 의한 母線注入電力變化분과 二次母線事故에 의한 母線注入電力變化分을 合하면 總母線注入電力變化분이 되며 線路狀態의 變化가 없으므로 Jacobian 行列은 變化가 없다. 따라서 故障후의 새로운 運轉狀態는 다음 式에 의하여 求해진다.

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{primary} + \Delta P_{secondary} \quad (37. a)$$

$$\Delta P_{total} = [H] \Delta \theta \quad (37. b)$$

$$\theta = \theta^0 + \Delta \theta = \theta^0 + [H]^{-1} \Delta P_{total} \quad (37. c)$$

단 $\Delta P_{primary}$: primary fault 에 의한 母線有效電力變化分

$\Delta P_{secondary}$: secondary fault 에 의한 母線有效電力變化分

線路—母線復合事故解析에 있어서는 線路事故에 母線事故가 隨伴되는 경우 母線事故에 線路事故가 수반되는 경우의 어느경우에 있어서나 最終 母線注入電力과 系統線路狀態가 同一하다면 故障後의 最終潮流狀態는 同一하게 된다. 母線事故에 의하여 變化하는 母線注入電力을 ΔP_{bus} 라 하고 事故線路番號는 k 번 線路이며 母線 i, j 사이에 連結되어 있다고 하자. 線路事故에 따르는 Jacobian 行列變化分을 ΔH 라 하면 ΔH 는 單—線路事故에서와 같이 構成될 수 있으며 式(8)의 形態로 分解(decomposition)될 수 있다. 線路事故에 따르는 母線電力不平衡(bus power mismatch)은 式(13) 및 式(14.b)에 의하여 결정되며 母線事故에 의한 母線電力變化를 考慮하면 새로운 運轉狀態 $[V, \theta]$ 는 다음과 같이 計算된다.

$$\Delta P = [H + \Delta H] \Delta \theta \quad (38. a)$$

$$\text{단 } \Delta P = \Delta P_{BUS} + [0, \dots, 0 - F_{ij}^k, 0, \dots, -F_{ji}^k, 0, \dots, 0]^T \quad (38. b)$$

F_{ij}^k : 故障前 線路 k 를 통하여 bus i 에서 j 로 흐르는 有效電力潮流

F_{ji}^k : 故障前 線路 k 를 통하여 bus j 에서 i 로 흐르는 有效電力潮流

식(38)의 解는 ΔH 의 分解(decomposition)에 의하여 II節에 記述된 바와 같이 간단히 求解될 수 있으며 母線位相角 θ 는 $\theta = \theta^0 + \Delta \theta$ 에 의하여 修正된다.

이상에서 기술한 想定事故解析 알고리즘을 요약하면 그림 2와 같은 flow chart 로 나타낼 수 있다.

4. 數值結果

本 研究에서 제시된 想定事故解析 알고리즘은 8—bus 시스템, 17—bus 시스템 및 50—bus 시스템에 대하여 테스트 되었으며 17—bus 시스템과 50—bus 시스템에 대한 系統構成圖는 그림 3 및 그림 4에 주어진 바와 같다. 數值解析에 있어서는 計算時間의 단축을 위하여 位相角修正을 1회로 한정시키는 방법을 채택하였으며 그 結果는 計算精度와 計算時間면에서 考察되었다.

제안된 想定事故解析 알고리즘은 多數의 單純想定事故 및 二重事故의 解析에 適用되었으며 計算精度면에서는 종래의 방법보다 상당히 개선된 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 位相角의 반복수정회수를 늘리면 計算時間이 크게 증가하므로 본 연구에서 位相角修正회수를 1회로 제한시켰으며 이때의 평균계산오차는 5%정도로써 실제 適用이 가능함이 밝혀졌다.

想定事故解析에 所要되는 平均計算時間은 表 1에 주어져 있으며 종래의 방법에 비하여 計算時間이 현

표 1. 想定事故 해석 평균 소요시간

Table 1. Everage computation time for contingency analysis.

(單位: 秒)

想定事故CASE	17 - BUS SYSTEM	50 - BUS SYSTEM
單純母線事故	0.03	0.05
單純線路事故	0.04	0.07
二重母線事故	0.03	0.06
線路—母線事故	0.05	0.10
二重母路事故	0.05	0.11

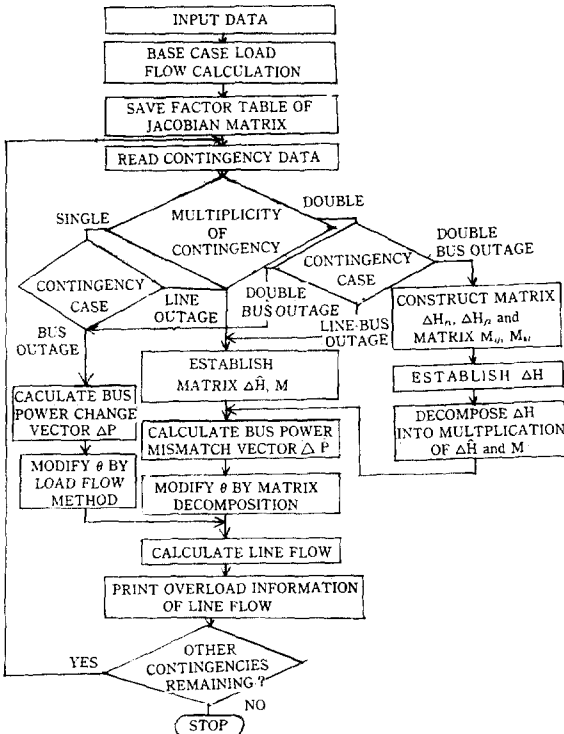


그림 2. 想定事故 해석 플로우차트

Fig. 2. Contingency analysis flow chart.

저히 단축된 것을 보여 준다. 二重想定事故解析에 있어서도 가장 심각한 경우로 고려되는 二重線路事故解析에 소요되는 計算時間이 50-bus 시스템에 대

하여 평균 0.11초로서 二次事故(secondary outage)에 따르는 二重想定事故의 解析을 통한 実系統運用에의 適用可能性이 立證되었다. 本 研究에서의 數值解析은 延世大 보유 電算機 CYBER NOS 5에 의하여 처리된 결과이다.

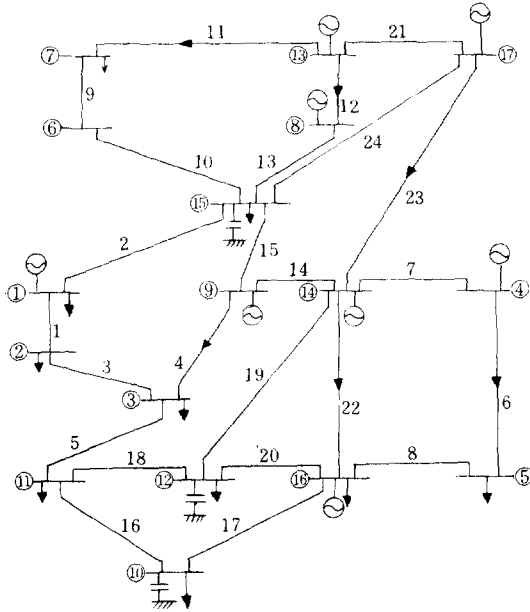


그림 3. 17-母線 系統 構成圖
Fig. 3. 17-Bus system configuration.

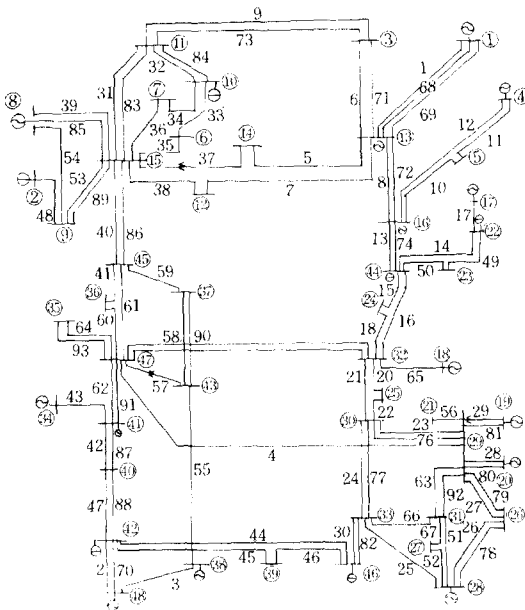


그림 4. 50-母線 系統 構成圖
Fig. 4. 50-Bus system configuration

5. 結 論

본 研究에서는 想定事故의 신속한 解析을 위하여 行列分解法(matrix decomposition method)를 사용한 새로운 알고리즘을 개발하였고 二次事故(Secondary outage) 발생시의 二重想定事故解析에도 적용될 수 있는 多重想定事故解析技法을 제시하였으며 結論을 요약하면 다음과 같다.

1. 行列分解法(matrix decomposition method)을 사용함으로써 事故에 따르는 Jacobian 行列 변화를 정확히 반영시킴으로써 解의 正確度와 計算速度를 改善시킬 수 있었다.
 2. 二次事故(secondary outage) 발생에 따르는 二重想定事故에 대한 體系的解析方法과 간편한 電算處理 알고리즘을 제시하였다.
 3. 提示된 多重想定事故解析 알고리즘은 想定事故評價에 있어서 二次事故(secondary outage) 발생 影響을 考慮하는데 유용하게 사용될 수 있다.
 4. 본 研究에서는 母線無効電力變化를 무시하였으나 精確한 想定事故解析을 위하여는 無効電力變化에 대한 考慮가 있어야 하며 이를 위하여 事故에 대한 母線無効電力變化推定에 관한 研究가 있어야 할 것으로 생각된다.
 5. Model 系統에 대한 檢證을 통하여 提示된 알고리즘의 實系統適用可能性을 立證하였다.
- 끝으로 본 연구는 과학재단의 연구비 지원으로 이루어졌음을 밝히며 관계자 제위께 감사드리는 바이다.

參 考 文 獻

- 1) H.E. Brown; "Contingencies evaluated by a Z-matrix method", IEEE Trans., Vol. PAS-88, No. 4 pp. 409-412, April 1969
- 2) G.W. Stagg et al; "Techniques for the real-time Monitoring of Power System Operations," ibid. Vol. PAS-89, No. 4 pp. 545-555, April 1970
- 3) H. Daniels and M.S. Chen; "An Optimization Techni-

- que and Security Calculations for Dispatching Computers”, IEEE Trans. Vol. PAS-91, pp. 883-888, May/June 1972
- 4) N.M. Peterson, W.F. Tinney and D.W. Bree; “Iterative Linear AC Power Flow Solution for fast Approximate Outage Studies” *ibid*, Vol. PAS-95, pp. 2048-2056, 1974
- 5) M.K. Enns, J.J. Quada and B. Sackett; “Fast Linear Contingency Analysis”, *ibid*, Vol. PAS-101 No. 4, pp. 783-791, April 1982
- 6) A.A. Fouad et al; “Contingency Analysis Using the transient Energy Margin Technique”, *ibid*. Vol. PAS-101, No. 4, pp. 757-766, April 1982
- 7) F. Aboytes; “Stochastic Contingency Analysis”, *ibid*. Vol. PAS-97, No. 2, pp. 335-339, March/April 1978
- 8) S. Vemuri and R.E. Usher; “On-line Automatic Contingency Selection Algorithms”, *ibid*, Vol. PAS-102, No. 2, pp. 346-354, February 1983
- 9) 文永鉉, 金堯喜; “ ΔY_{bus} -decomposition 法에 의한 故障電流計算”, 電氣學會論文誌 제 33권, 제 11호 pp. 447 - 455, 1984년 11월