

電力系統에서의 修正高速分割 推定法과 系統分割에 의한 階層的 狀態推定에 關한 研究

論 文
34~5~5

Hierarchical State Estimation in Power System by Modified Fast Decoupled State Estimation Method and System Decomposition

金 俊 鉉* · 李 鍾 範**
(Joon-Hyun Kim · Jong-Bum Lee)

Abstract

This paper describes a method for the state estimation by a modified fast decoupled estimation method and system decomposition.

The state values are gained by using the weighted least square estimation method, fast decoupled estimation method, and modified fast decoupled estimation method. The estimated values of each method were compared about effectiveness of state values, respectively.

This paper investigated the effects of impedance of well-condition or ill-condition into lines.

The characteristics of state estimation were gained through hierarchical state estimation.

Each method was applied to three model power systems, and, the results of test for the proposed method are given.

1. 序 論

電力系統의 安定한 運用 및 制御에 필요한 系統의 狀態值를 精確하고, 安穩하게 把握하는 狀態推定理論이 계속 크게 대두되고 있으며, 外國에서는 이미 여러나라에서 實用化되어 있고¹⁾, 國內에서도 實用化할 段階에 있다.

따라서, 이러한 狀態值를 보다 精確하게 供給하기 위하여 計算機 高速化의 발달에 힘입어 靜的 및 動的 狀態推定에 걸쳐 많은 研究가 行하여지고 있다²⁾.

그런데, 電力系統의 狀態值는 무엇보다도 不良 情報의 影響을 받으면 非正常의 狀態值로 變化하여 供給되므로 系統의 위험을 초래하게 되기때문에 이들의 發生抑制 및 檢出·識別문제에 대해서도 활발한 研究가 進行되고 있다^{3,4)}.

또한, 系統의 狀態推定은 모델링한 推定器가 높은 信賴度와 迅速하고도 低記憶容量으로 高精度의 狀態值를 供給해야 하므로 이들에 關한 効用性이

는 여러가지 推定技法도 제안되고 있는데, 특히 系統이 점점 巨大化, 復雜化되어짐에 따라 系統의 狀態值를 적절히 파악하는 것은 經濟配分, 事故分析, 信賴度制御등에 있어서 매우 重要한 事項으로 취급되고 있다⁵⁾. 따라서, 이러한 大電力系統의 狀態值를 보다 効率的으로 推定하기 위해 系統을 몇개의 系統으로 分割하여 階層的으로 推定하기도 한다⁶⁻⁸⁾.

本 論文에서는 系統의 狀態值를 기존방법인 加重最小自乘 推定法²⁾, 高速分割 推定法⁹⁾과, 이 高速分割 推定法에서 推定 Jacobian成分중 有效, 無效成分을 同一次元의 同一값으로 修正시켜 利得行列을 하나로 만들므로써 計算効率을 增大시키도록한 修正高速分割 推定法¹⁰⁾으로부터 狀態值를 推定한 후 이들은 서로 比較함으로써 修正高速分割 推定法의 効率的인 推定結果를 제시하였다. 또한, 이로부터 推定한 狀態值가 線路狀態의 好條件, 惡條件에 따라 어떻게 變化하는가를 特性比較를 통하여 제시하였다. 그리고 이들 狀態值가 系統을 分割한 후 部分系統과 連系系統으로부터 階層的으로 推定한 것^{11,12)}과, 또한 全體系統으로 推定한 것을 각 技法을 통하여 比較·검토함으로써 각각에 대한 効用性을 評價, 提示하였다.

*正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 教授

**正 會 員 : 漢陽大 大學院 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 1985年 1月 29日

2. 系統의 狀態推定法

巨大化되어있는 系統의 狀態值를 全系統으로 다루어 推定한다는 것은 非合理的이므로 이를 몇개의 部分系統으로 分割하여 各部分系統별로 推定한 후 이들의 相互協調로 全系統의 狀態值를 推定하면 效率의 일 수 있다. 그리고, 이 推定值가 全系統으로 취급한 것과 情報供給에 있어서 별이상이 없다면 더욱 效果의 이라 할 수 있겠다.

따라서, 電力系統은 어떤 기준에 의한 적절한 技法으로 分割하면 全系統은 몇개의 部分系統과 이 部分系統에 相關된 連系系統이 그림 1과 같이 이루어지게 된다. 이때의 狀態는 먼저 部分系統에서의 狀態를 推定한 후, 이를 바탕으로 連系系統에서의 狀態值를 推定하여 전체의 狀態量을 구하게 되는데, 여기서는 全系統과 部分系統에서의 狀態值를 기존방법들과 修正高速分割 推定法(I, II)으로 推定하여 비교하며, 이 모든 방법에 基礎하여 連系系統에서의 狀態值를 推定한 후 全系統으로의 推定狀態值와 비교함으로써 각 技法 및 分割前後의 系統狀態值에 대한 特性和 效用성을 검토하였다.

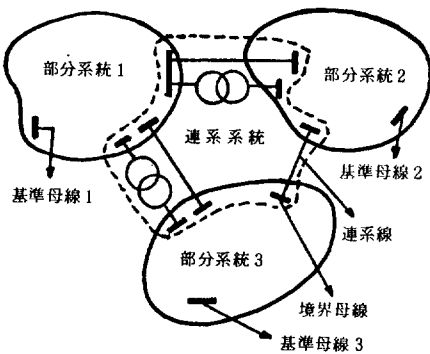


그림 1. 系統分割圖

Fig.1. Principle of system decomposition.

3. 部分系統의 狀態推定

3.1 測定모델

系統의 運用·操作의 確實성을 유지하기 위해 有用한 정보를 제공하는 必須의인 變數인 各母線 電壓의 크기 및 位相角으로 構成되어있는 狀態值는 各 母線의 注入電力, 線路潮流, 母線電壓등으로 이루어지는 測定值와 더불어 다음과 같은 測定

모델을 갖는다.

먼저, 狀態變數를 X 라 할 때 記述한 바와 같이 全母線의 電壓크기 V 및 位相角 θ 로서 N 母線系統에서 基準母線을 1이라 한다면 X 는 $n(2N-1)$ 次元의 벡터로서 다음과 같이 된다.

$$X = [V_1, V_2, \dots, V_N, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_N]^T \quad (1)$$

이 때, k 時點에서의 測定벡터 Z_k 는 測定誤差가 Gauss分布에 따른다고 할 때 다음과 같이 된다.

$$Z_k = h_k(X_k) + V_k \quad (2)$$

$$E\{V_k, V_k^T\} = R_k \quad (3)$$

여기서,

Z_k : $m \times 1$ 測定벡터

X_k : $n \times 1$ 狀態벡터

V_k : $m \times 1$, $N(0, \sigma_v^2)$ 의 測定誤差벡터

$h_k(X_k)$: $m \times 1$ 非線型 b 벡터函數

$E\{\cdot\}$: 期待值 演算子

R_k : 測定分散 σ_v^2 을 對角要素로 하는 V_k 의 共分散行列

3.2 加重最小自乘 및 高速分割 推定法

이 加重最小自乘 推定(Weighted Least Square Estimation: WLSE)法은 價値函數를 설정하고 이 函數를 最小化시키는 조건에서의 狀態值를 구하는 推定法으로서, 식(2)의 測定值 Z_k 가 가장 정확히 되는 狀態值 X_k 를 구하기 위한 價値函數 $J(X_k)$ 는 다음과 같이 놓는다.

$$J(X_k) = V_k^T R_k^{-1} V_k = [Z_k - h_k(X_k)]^T R_k^{-1} [Z_k - h_k(X_k)] \quad (4)$$

이 때, 狀態推定值 X_k 는 價値函數 $J(X_k)$ 를 最小로 하는 조건에서의 X_k 로 되며, 여기서, H_k 를 $m \times n$ 次元의 推定 Jacobian行列이라 하면, 狀態推定值 X_k 는 식(5)와 같은 反復計算을 통하여 구하여진다.

$$X_k(l+1) = X_k(l) + [H_k^T R_k^{-1} H_k]^{-1} H_k^T R_k^{-1} [Z_k - h_k(X_k(l))] \quad (5)$$

여기서, l 은 反復回數이고, ϵ 을 許容誤差라 할 때, $\text{Max}|X_k(l+1) - X_k(l)| \leq \epsilon$ 이 될 때까지 反復計算한다.

그러나, 實際, 電力系統의 特性은 P,V와 Q, θ 와는 서로 關連性이 약하므로(Weak coupled) 推定 Jacobian行列을 P- θ 와 Q-V만의 關連으로 限定하여 近似化시킴으로써 全體의인 計算의 效率을

向上시킬 수 있다. 따라서 이 때, 식(2)의 測定 모델은 다음과 같이 分割하여 표현할 수 있다.

$$\mathbf{Z}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{Ak} \\ \mathbf{Z}_{Rk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{Ak}(V, \theta) \\ \mathbf{h}_{Rk}(V, \theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{Ak} \\ \mathbf{V}_{Rk} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서,

\mathbf{Z}_{Ak} : 有効電力 測定成分

\mathbf{Z}_{Rk} : 無効電力 測定成分

이 때, 推定 Jacobian 行列은 다음과 같이 된다.

$$\mathbf{H}_k(V, \theta) = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{h}_{Ak}}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{h}_{Ak}}{\partial \mathbf{V}} \\ \frac{\partial \mathbf{h}_{Rk}}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{h}_{Rk}}{\partial \mathbf{V}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{k11} & \mathbf{H}_{k12} \\ \mathbf{H}_{k21} & \mathbf{H}_{k22} \end{bmatrix}$$

여기서, $\mathbf{H}_{k11} \gg \mathbf{H}_{k12}$, $\mathbf{H}_{k22} \gg \mathbf{H}_{k21}$ 의 성질로부터 각 成分의 加重行列을 각각 \mathbf{R}_{Ak} , \mathbf{R}_{Rk} 라 하면, 利得行列은 다음과 같이 된다.

$$\mathbf{G}_{k(i, v)} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{Ak\theta} & \mathbf{G}_{AkV} \\ \mathbf{G}_{Rk\theta} & \mathbf{G}_{RkV} \end{bmatrix} \quad (8)$$

따라서, 이러한 과정을 통하여 系統의 狀態值는 電壓의 크기와 位相角을 分割하여 다음과 같은 反復計算으로 구하게 된다.

$$\theta_k(l+1) = \theta_k(l) + [\mathbf{H}_{k11}^T \mathbf{R}_{Ak}^{-1} \mathbf{H}_{k11}]^{-1} \mathbf{H}_{k11}^T \mathbf{R}_{Rk}^{-1} \{ \mathbf{Z}_{Rk} - \mathbf{h}_{Rk}(V_k(l), \theta_k(l)) \} \quad (9)$$

$$V_k(l+1) = V_k(l) + [\mathbf{H}_{k22}^T \mathbf{R}_{Rk}^{-1} \mathbf{H}_{k22}]^{-1} \mathbf{H}_{k22}^T \mathbf{R}_{Rk}^{-1} \{ \mathbf{Z}_{Rk} - \mathbf{h}_{Rk}(V_k(l), \theta_k(l)) \} \quad (10)$$

그런데, 이 때도 역시 매反復時마다 식(7)의 推定 Jacobian 行列要素중 $[\mathbf{H}_{k11}]$, $[\mathbf{H}_{k22}]$ 를 계산

로 計算過程상 두부분의 推定 Jacobian 行列要素를 별도로 기억해야 되며, 아울러 利得行列의 $\mathbf{G}_{Ak\theta}$, \mathbf{G}_{RkV} 도 별도로 계산해야 되는 불편이 따르게 된다. 따라서, 여기서는 다음과 같은 修正高速分割 推定(Modified Fast Decoupled Estimation: MFDE)法(I, II)을 이용하여 解를 구하므로써 기존방법과의 効用性を 비교·검토하였다.

3.3.1 修正高速分割 推定法(I)

高速分割 推定法에서의 $[\mathbf{H}_{k11}]$, $[\mathbf{H}_{k22}]$ 및 $[\mathbf{G}_{Ak\theta}]$, $[\mathbf{G}_{RkV}]$ 를 적절한 測定벡터를 선택하여서 同一次元의 同一값으로 하여 構成한 후 推定함으로써 計算量의 축소를 도모하였다. 즉 FDE法은 推定 Jacobian 行列과 利得行列의 각 要素가 서로 다른 값이므로 計算過程상 별도의 계산이 필요하다. 여기서는 測定值의 無効電力成分에서 電壓벡터 成分을 제외시키고 基準母線 以外の 母線注入電力 및 線路潮流로서 同數의 測定值를 構成하므로 兩 測定成分에 해당하는 推定 Jacobian 行列 및 利得行列을 모두 같게 하였다. 따라서, 1回 計算值의 有効電力 測定成分에 해당하는 推定 Jacobian 行列 및 利得行列을 구하여 이것을 常數로 한 후 電壓의 크기 및 位相角 推定에 無効電力 測定成分에 해당하는 推定 Jacobian 行列 및 利得行列의 計算을 할 필요없이 직접 有効電力 測定成分것을 적용시킴으로써 推定할 수 있도록 하였다.

우선, 有効電力成分의 Jacobian 行列 $[\mathbf{H}_{k11}]$ 중 母線 i 의 注入電力 및 母線 i, k 간의 線路潮流를 P_i , P_{ik} 라 하면

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} \cong \sum_{k=1}^n V_i V_k B_{ik}, \quad \frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta_i} \cong V_i V_k B_{ik} \quad (11)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} \cong -V_i V_k B_{ik}, \quad \frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta_k} \cong -V_i V_k B_{ik} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
 V_k \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} &\cong -2 V_k V_i B_{ii} - V_k \sum_{p=1}^n V_p B_{ip} \\
 &\cong -2 V_k V_i B_{ii} + V_k V_i B_{ii} \\
 &\cong -V_i V_k B_{ii}
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
 V_k \frac{\partial Q_{ik}}{\partial V_i} &\cong 2 V_i V_k B_{ik} - V_k^2 B_{ik} - 2 b_{ik} V_i V_k \\
 &\cong 2 V_i V_k B_{ik} - V_k^2 B_{ik}
 \end{aligned} \tag{16}$$

여기서, 식(15)의 $\sum_{p=1}^n V_p B_{ip} \cong -V_i B_{ii}$ 이며, $\tag{17}$

식(16)의 b_{ik} 는 생략하였다. 또한

$$V_k \frac{\partial Q_i}{\partial V_k} \cong -V_i V_k B_{ik}, \quad V_k \frac{\partial Q_{ik}}{\partial V_k} \cong -V_i V_k B_{ik}$$

이며, $V_k = 1$ [pu], V_i 는 mismatch 벡터에 포함시키면, 식(16)~(18)은 근사적으로 다음과 같이 된다.

$$V_k \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \cong -B_{ii}, \quad V_k \frac{\partial Q_{ik}}{\partial V_i} \cong B_{ik} \tag{18}$$

$$V_k \frac{\partial Q_i}{\partial V_k} \cong -B_{ik}, \quad V_k \frac{\partial Q_{ik}}{\partial V_k} \cong -B_{ik} \tag{19}$$

따라서, 식(13), (14)와 (18), (19)를 비교해 볼 때

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = V_k \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \cong -B_{ii} \tag{20}$$

$$\frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta_i} = V_k \frac{\partial Q_{ik}}{\partial V_i} \cong B_{ik} \tag{21}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} = V_k \frac{\partial Q_i}{\partial V_k} \cong -B_{ik} \tag{22}$$

$$\frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta_k} = V_k \frac{\partial Q_{ik}}{\partial V_k} \cong -B_{ik} \tag{23}$$

이로부터, $[H_{k11}]$, $[H_{k22}]$ 요소는 다음과 같이 된다. $[H_{k11}] = [H_{k22}] =$

	1	2	...	i	...	k	...	N-2	N-1	
1	$-B_{22}$	$-B_{23}$	$-B_{2N-1}$	$-B_{2N}$				(24)
2	$-B_{32}$	$-B_{33}$	$-B_{3N-1}$	$-B_{3N}$				
...				
N-1	$-B_{N2}$	$-B_{N3}$	$-B_{NN-1}$	$-B_{NN}$				
K+N-1	0	0	$B_{ik} \dots 0$	$\dots B_{ik}$	0	0			0	

* K : 線路測定數

따라서, 식(24)로부터 식(8)의 利得行列要素는 다음과 같이 되어

$$G_{Ak\theta} = G_{RAV} \tag{25}$$

最終的으로 구하고자 하는 狀態值는 WLSE法과 같은 許容誤差하에 다음의 反復計算을 통하여 얻

게 된다.

$$\theta_k(l+1) = \theta_k(l) + G_{Ak\theta}^{-1} H_{k11}^T R_{Ak}^{-1} [Z_{Ak} - h_{Ak}(X_k(l))] \tag{26}$$

$$V_k(l+1) = V_k(l) + V_k(l) [G_{Ak\theta}^{-1} H_{k11}^T R_{Ak}^{-1} [Z_{Rk} - h_{Rk}(X_k(l))] \tag{27}$$

3.3.2 修正高速分割 推定法(II)

FDE法과 같이 $V_i \cong 1$ (pu), $\theta_{ik} \cong 0$ (rad) 이라는 가정하에서 推定 Jacobian 行列要素를 구성하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \cong -B_{ii} \tag{28}$$

$$\frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta_i} = \frac{\partial Q_{ik}}{\partial V_i} \cong B_{ik} \tag{29}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_k} \cong -B_{ik} \tag{30}$$

$$\frac{\partial P_{ik}}{\partial \theta_k} = \frac{\partial Q_{ik}}{\partial V_k} \cong -B_{ik} \tag{31}$$

따라서, 推定 Jacobian 要素는 식 (24)와 同一하게 되며, 이 때, 狀態值는 다음과 같은 反復計算을 통하여 얻게 된다.

$$\theta_k(l+1) = \theta_k(l) + G_{Ak\theta}^{-1} H_{k11}^T R_{Ak}^{-1} [Z_{Ak} - h_{Ak}(X_k(l))] \tag{32}$$

$$V_k(l+1) = V_k(l) + G_{Ak\theta}^{-1} H_{k11}^T R_{Ak}^{-1} [Z_{Rk} - h_{Rk}(X_k(l))] \tag{33}$$

이 때의 許容誤差도 WLSE法과 동일하다.

4. 連系系統의 狀態推定

大電力系統은 그림 1과 같이 S 개의 部分系統이 몇개의 連系線으로 連系되어 있고, 이 連系線과 各 部分系統의 境界母線을 포함하여 連系系統이 성립하게 된다. 따라서, 全系統의 狀態推定은 各 部分系統의 基準母線을 정하고, 이로부터 얻은 推定值와 이에 따른 連系系統의 狀態推定值와의 協調로 하게 된다.

먼저, 部分系統 1과 i 번째 部分系統과의 基準母線 사이의 電壓位相差는 다음과 같다.

$$\theta = [\theta^{2/1}, \theta^{3/1}, \dots, \theta^{i/1}, \dots, \theta^{S/1}]^T \tag{34}$$

또한, i 와 (i-1) 번째의 部分系統사이의 連系線이 T_j 개로 구성되어 있다면, 이 連系線 사이에 있어서 各 境界母線사이의 電壓位相角은 다음과 같이 된다.

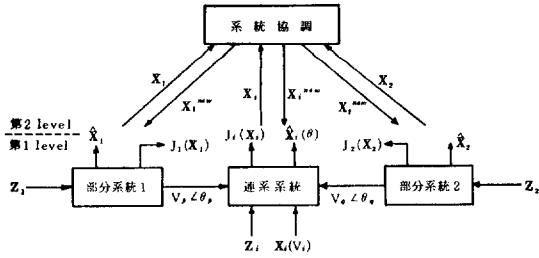


그림 2. 全系統 狀態推定의 階層的 構造
Fig. 2. Hierarchical structure of total system state estimation.

$$\delta^{ii-1} = [\delta_1^{ii-1}, \delta_2^{ii-1}, \dots, \delta_k^{ii-1}, \dots, \delta_{T_j}^{ii-1}]^T \quad (35)$$

여기서는 두개의 部分系統과 境界母線 p,q사이 에 1개의 連系統으로 連系統되어 있는 것으로 한다 면 각 部分系統과 連系統의 狀態值, 價値函數 및 測定值와의 關係는 그림 2와 같이 된다.

이 때, 連系統에서의 狀態推定은 部分系統의 推定值에 의한 境界母線의 電壓크기를 不變值로 하고, 連系統 兩端의 測定所로부터 傳送된 有効·無効潮流成分으로부터 連系統 接續母線간의 電壓位相差를 식(5)에 의하여 다음과 같이 구하게 된다.

$$\delta_k(l+1) = \delta_k(l) + [H_k(\delta_k(l))^T R_k^{-1} H_k(\delta_k(l))]^{-1} H_k(\delta_k(l))^T R_k^{-1} [Z_{ik} - h_k(\delta_k(l))] \quad (36)$$

여기서, δ_k : 連系統 接續母線간의 電壓位相差
 Z_{ik} : 連系統에서의 測定成分

따라서, 部分系統간의 基準母線사이의 電壓位相差는 다음과 같이 된다.

$$\theta_{1^2} = \delta_1 + \delta_{1^2} - \delta_2 \quad (37)$$

여기서, θ_{1^2} : 部分系統 1, 2의 基準母線간의 位相差

δ_1 : 部分系統 1의 境界母線 位相角

δ_2 : 部分系統 2의 境界母線 位相角

δ_{1^2} : 連系統에서의 電壓位相差

그러므로, 部分系統 2에서의 각 母線에 대한 電壓位相角은 이 系統의 基準母線 位相角이 정해졌으므로 다음의 간단한 식으로부터 구할 수 있다.

$$\Theta_k^2 = \theta_{1^2} + \delta_k^2 \quad (38)$$

여기서, Θ_k^2 : 部分系統 1의 基準母線에 대한 部分系統 2에서의 k 母線 電壓位相差

δ_k^2 : 部分系統 2에서의 k 母線 電壓位相角

部分系統간에 連系統이 몇개가 接續되어 있는 경우에도 그 가운데 가장 信賴度가 높은 하나의 連系統으로부터 推定한 位相差로 部分系統 S와 k간의 基準母線간의 位相差인 θ_k^S 를 쉽게 구할 수 있다.

지금까지의 狀態推定에 대한 計算過程을 흐름도 로 나타내면 그림 3과 같다.

5. 事例研究

本 論文에서는 그림 4, 5와 같은 5 Bus 모델 系統(모델系統 I)과 25 Bus 모델系統(모델系統 II)으로부터 각 測定值를 이용하여 記述한 計算過程으로 狀態值를 推定하였다.

우선, 모델系統 I은 MFDE法(I, II)의 特性을 파악하기 위하여 적용되었으며, 이 때, 線路의 임피던스값에 의한 系統의 好條件(Well-Condition)과 惡條件(Ill-Condition)으로 나타내지는 R/X의 비율에 따라 狀態值가 어떻게 변화하는가를 검토·평가하였다.

또한, 모델系統 II를 하나의 系統으로 推定하는 경우로 하고, 각 技法를 통하여 각 母線에서의 電壓의 크기와 位相角을 구한 후 다시 이를 그림 6과 같은 두개의 部分系統으로 分割한 후 각 系統의 推定에 의하여 全體母線의 狀態值를 推定한 경우와 비교함으로써 提案된 修正高速分割 推定法과 系統分割에 의한 狀態推定이 각 狀態值의 誤差 및 効用性을 검토함으로써 훨씬 効率의임을 提示하였으며, 여기서 그림 6은 系統의 最適分割技法에 의한 것이 아니고, 分割後의 推定効率을 알기 위하여 다만 連系統數를 적게 하는 동시에 두 部分系統의 母線數 및 發電機臺數의 비가 거의 同數가 되도록 하는 조건에서 임의적으로 分割하였다.

이 때, 測定所로부터 傳送되는 測定值를 入力로 각 測定所의 測定에 따른 誤差의 標準偏差는 모두 0.01로 가정하였으며, 여기에 사용된 값들은 100 [MVA]를 기준으로 한 것이고, 部分系統 및 連系統 모두 不良情報는 고려하지 않았다.

한편, 狀態推定은 初期值를 $1 \angle 0$ [rad]로 정

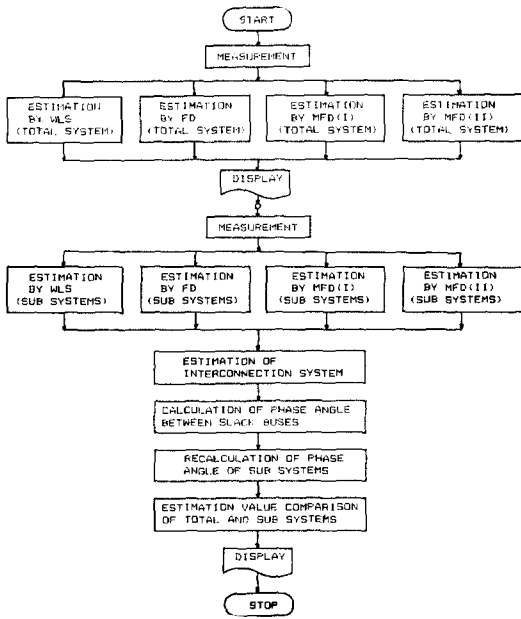


그림 3. 흐름도

Fig.3. Flow chart for state estimation.

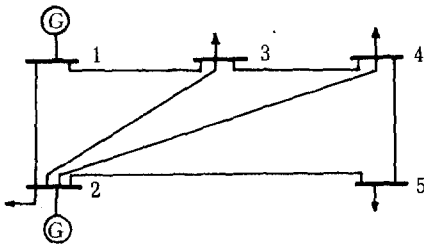


그림 4. 5母線 모델系統 (모델系統 I)

Fig.4. 5Bus model power system.

하고, 許容誤差를 $|\Delta V| = 0.001(\text{pu})$, $|\Delta \theta| = 0.001(\text{rad})$ 으로 정하였으며, 連系統에서는 $|\Delta \theta| = 0.0001(\text{rad})$ 으로 정하여 수행하였다.

표 1은 모델系統 I에서 WLSE法 및 MFDE(I, II)法과의 推定値에 대한 誤差 및 그 특성을 나타낸 것이며, 표 2는 MFDE(I, II)法에 의한 推定値의 誤差 및 그 특성이 線路의 임피던스 成分의 R/X비율에 따라 어떻게 변화하는가를 나타낸 것이다.

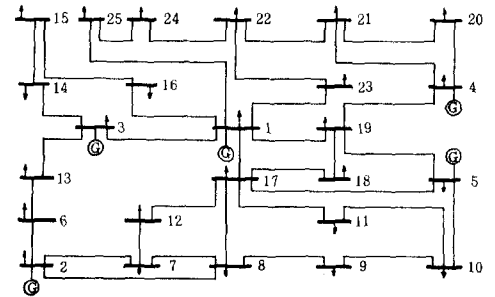


그림 5. 25母線 모델系統 (모델系統 II)

Fig.5. 25 Bus model power system.

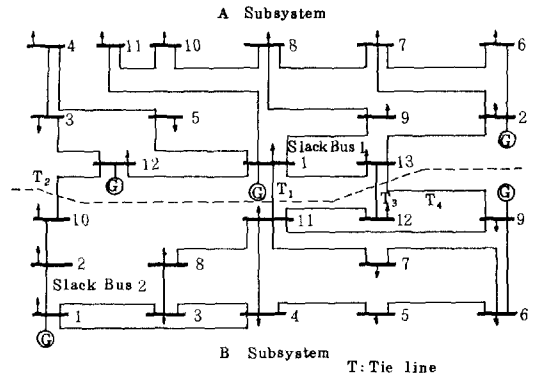


그림 6. 25母線 모델系統의 分割 (모델系統 III)

Fig.6. 25 Bus decomposition model system.

따라서 표 1로부터 MFDE(I, II)法이 WLSE法보다 誤差는 다소 크나 計算時間이 1회 反復時의 계산에 의한 推定 Jacobian 및 利得行列의 값을 常數로 갖고 수행하므로 WLSE法에 비해 훨씬 効用성이 있음을 알 수 있고, 표 2로부터는 이 MFDE(I, II)法이 R/X의 비율이 작은 好條件 線路일수록 推定誤차가 적어지며, 反復回數도 작아짐을 알 수 있다. 그러나 惡條件일 경우에는 反復回數가 늘어나고 誤差도 增大되는데 이것도 計算時間으로 볼 때에는 WLSE法보다 훨씬 빨리 수렴함을 알 수 있다. 즉 이 MFDE法은 好條件의 線路이면 일 수록 解에 빨리 수렴하며, 보다 精度있는 狀態値를 공급할 수 있다고 하겠다.

한편, 修正高速分割 推定法과 系統分割에 의해 구한 狀態値의 推定效率를 提示하기 위하여 먼저 連系統의 狀態推定으로부터 표 3과 같이 모델系統 III에서 基準母線 및 境界母線間的 電壓位相差를 나타내었으며, 이 때 測定對象 連系線은 A,B

표 1. 5母線系統에 대한 WLSE法과 MFDE I, II)法과의 推定值比較

Table 1. Estimation value comparison by WLSE and MFDE(I, II) method into 5 bus model power system.

Term	Bus No	True value	WLSE		MFDE (I)		MFDE (II)	
			Est. value	Error (%)	Est. value	Error (%)	Est. value	Error (%)
Mag.	2	1.04748	1.04749	0.0010	1.04735	0.0124	1.04741	0.0067
	3	1.02424	1.02425	0.0010	1.02411	0.0127	1.02414	0.0098
	4	1.02361	1.02362	0.0010	1.02348	0.0127	1.02351	0.0098
	5	1.01798	1.01797	0.0010	1.01782	0.0157	1.01784	0.0138
Ang.	2	-0.04898	-0.04896	0.0408	-0.04908	0.2042	-0.04909	0.2246
	3	-0.08724	-0.08714	0.0802	-0.08718	0.0688	-0.08721	0.0344
	4	-0.09302	-0.09299	0.0323	-0.09298	0.0430	-0.09301	0.0108
	5	-0.10736	-0.10730	0.0559	-0.10727	0.0838	-0.00729	0.0652

Unit [Mag. : pu]
[Ang. : rad]

표 2. R/X比率에 따른 狀態推定值의 각 特性比較

Table 2. Characteristics comparison of estimation value as ratios of R/X.

Ratio (%)	Method	Cost function	Iteration number	Max. error (%)	Mean error (%)	Min. error (%)
R/X = 33.3	MFDE I	2.547	6	0.2042	0.0567	0.0124
	MFDE II	2.103	6	0.2246	0.0469	0.0067
R/X = 20	MFDE I	6.068	4	0.1633	0.0455	0.0153
	MFDE II	5.596	4	0.1837	0.0399	0.0086
R/X = 10	MFDE I	0.343	4	0.0279	0.0093	0.0010
	MFDE II	0.251	4	0.0279	0.0082	0.0010

표 3. 모델系統III에서 基準母線 및 境界母線間의 電壓位相差.

Table 3. Voltage phase angles of between slack buses and boundary buses in model system III.

Term	Tr. values	WLSE	FDE	MFDE (I)	MFDE (II)
Tie line (1)	0.10001	0.09995	0.09992	0.09992	0.09992
Tie line (2)	-0.01309	-0.01279	-0.01401	-0.01398	-0.01400
Tie line (3)	0.01082	0.01191	0.01067	0.01073	0.01058
Tie line (4)	0.19724	0.19844	0.19666	0.19675	0.19667
Slack bus (A-B)	0.23894	0.23895	0.23812	0.23805	0.23804
Cost function	—	0.00149	0.02045	0.01992	0.02058

部分系統의 1-11線路를 택하였다.

또한, 표 4와 같이 모델系統III을 記述한 각 技法을 이용하여서 하나의 系統으로 취급하여 推定한 狀態值 (A)와, 모델系統III과 같이 分割하여 階層的으로 推定한 狀態值 (B)를 비교하여 나타내었다. 이 때, 部分系統 A, B의 母線番號는 그림 6과 같이 정하였으며, 각 系統의 境界母線 注入電力은 入力에서 除外시켰다. 표 4에 의하면 系統分割 前과 後의 推定值는 系統運用 및 制御에 필요한 情報提供에 거의 영향이 없는 誤差들을 서로 보이고

있으나, 復雜한 系統의 觀點으로부터 볼 때 計算 修行상에 있어서는 分割에 의해 全系統의 狀態值를 推定하는 (B)方法이 훨씬 效率의임을 알 수 있다. 또한 部分系統의 推定은 다른 技法보다 修正高速分割 推定法으로 함으로써 WLSE法이나, FDE法과 같이 有效·無効 測定成分의 계산을 별도로 할 필요없이 1회의 反復計算值를 갖고 效率의으로 解를 구함으로써 計算上의 簡便性을 보여주고 있으므로 다른 技法보다도 더욱 效果의임을 알 수 있다. 그리고, MFDE I, II法은 電壓의 크기를

的 狀態推定이 分割前後의 여러技法을 통하여 推定한 결과와 비교, 검토해 봄으로써 훨씬 效率의임을 알 수 있었다.

여기에, 系統의 적절한 測定所 位置選定 및 系統의 最適分割技法과 더욱 원활한 連系系統의 推定法을 첨가한다면 더 좋은 結果가 나올 것으로 사료된다.

參考文獻

- 1) Dy Liacco, TE ; 'State Estimation in Control Centers', Dy Liacco, Corp., U. S. A.
- 2) F.C.Schweppe, et al. ; 'Power System Static State Estimation'IEEE Trans. Vol. PAS-89, 120, 1970.
- 3) H.M.Merrill and F.C. Schweppe ; 'Bad Data Suppression in Power System Static State Estimation' IEEE Trans. Vol. PAS-90, pp. 2718-2725 Nov./Dec. 1971.
- 4) 金俊鉉, 李鍾範 ; '效果的인 不良情報除去法에 의한 電力系統에서의 狀態推定에 관한 研究', 大韓電氣學會誌, Vol.33, No.9, 1984.
- 5) Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg ; 'Power Generation, Operation, and, Control' pp. 391-439, John Wiley & Sons, 1984.
- 6) H. Kohayashi, s. Narita, and M.S.A.A. Hammam ; 'Model Coordination Method Applied to Power System Control and Estimation Problems' Proc 4 th IFAC/IFIP Int. Cont Digital Computer Applications to Process

- Control, Zurich, Vol. 1 , pp.114-128, 1974.
- 7) J.F.Marsh and R.Cristi ; 'State Estimation on Electric Power Systems Using Partitional Network Models'. Proc IFAC Symp Computer Applications in Large-Scale Power Systems, New Delli, Vol. 1 , pp.97-103, 1979.
- 8) Th. Van Cutsem, J.L. Horward, M. Ribbens-Pavella and Y.M. El-Fattah ; 'Hierarchical State Estimation'. Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 2 , pp. 70-80, April 1980.
- 9) H.P. Horisberger, et al ; 'A Fast Decoupled Static State-Estimation for Electric Power Systems', IEEE Trans. Vol. PAS-95, No.5, pp.208-218, Jan./Feb. 1976.
- 10) M. Srinivasan, et al ; 'Some New Algorithms for State Estimation in Power Systems', IEEE Trans. Vol. PAS-103, No. 5 , pp. 982-987, May 1984.
- 11) Y.M. El-Fattah and M. Ribbens-Pavella ; 'Multi-Level Approach to State Estimation in Electric Power Systems', Proc 4th IFAC Symp Identification and system Parameter Estimation, Tbilisi, Paper 6.1, 1976.
- 12) M. Kurzyn ; 'Real-Time State Estimation for Large Power Systems Using Multicomputer Systems', Int. Journal on Computers and Electrical Engineering, Vol. 8 , pp.301-306, December 1981.