

線型變換分割 技法에 의한 새로운 狀態推定 알고리즘 開發에 관한 研究

A Study on the Development of New State Estimation Algorithm by the Decomposition Method of Linear Transformation

宋 吉 永* · 金 榮 漢** · 崔 祥 圭***
(Kil-Yeung Song · Young-Han Kim · Sang-Kyu Choi)

Abstract

This paper presents a new decoupled power system state estimation method. The decoupling is achieved via simple linear transformation on power measurements in contrast with the modified fast decoupled state estimation method which assumes decoupling by direct negligence of the off-diagonal blocks of the Jacobian of the observation functions. The new estimation method is compared with the modified decoupled state estimation method against IEEE-14 bus model power system and 25 bus model power system in several system conditions. It is observed that the proposed method shows better convergence performance and filtering performance than a modified fast decoupled state estimation.

1. 序 論

電力系統에 대한 狀態推定을 효율적으로 수행하기 위하여 1960년대말 이후부터 많은 연구가 이루어져 왔으며 현재에도 보다 신속하고 信賴性 있는 狀態推定器의 개발을 위한 노력이 집중되고 있다.¹⁾

먼저 개발되었던 加重最小自乘推定法^{2),3)}은 매 반복계산시마다 분할되지 않은 완전한 利得行列(full-sized information matrix)을 재계산해야 하는 동시에 역행렬도 구해야 한다는 문제 때문에 이것은 비록 信賴性 면에서는 우수한 것으로 평가되고 있기는 하나 한편 計算時間과 記憶容量 면에서는 만족할 만한 결과를 주지 못한다는 결점이 있

다. 그후 개발된 修正高速分割推定法⁴⁾은 記憶容量과 계산시간면에서 加重最小自乘推定法보다 우수한 방법이라고 평가되고 있지만 過負荷時나 R/X의 비율이 큰 系統에 대해서는 收斂特性이 크게 떨어진다는 단점이 있다. 이것은 주로 자코비안行列과 利得行列의 비대각블럭(off-diagonal block)들을 무조건 무시해서 P, Q 성분으로 분할한다는 계산절차를 채택한데 기인되는 것으로서 이의 수정내지 개선이 요망되고 있다. 本 研究에서는 이러한 修正高速分割推定法의 단점을 보완할 수 있는 알고리즘 개발에 力點을 두고 선형변환^{5),6)}(linear transformation)을 통하여 1차적으로 자코비안行列의 비대각블럭요소들 중 대부분의 요소들을 零要素로 만든 다음 分割하므로써 정상적인 系統은 물론이고 과부하시나 R/X의 비율이 큰 惡條件(ill-condition)의 系統에 대해서도 우수한 信賴性과 收斂特性을 갖는 새로운 狀態推定法을 개발하였다.

이 새로운 알고리즘을 IEEE-14 모선계통과 25 모선계통에 적용해 본 결과 그 유용성을 입증할 수

*正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 教授 · 王 博

**正 會 員 : 韓國電力公社 發電部 課長

***正 會 員 : 高麗大 大學院 電氣工學科 碩士課程

接受日字 : 1986年 1月 17日

있었으며 또한 당초 기대하였던 대로 좋은 결과를 얻을 수 있었으므로 以下 그 내용을 정리해서 소개하고자 한다.

2. 從來의 狀態推定法

2.1 加重最小自乘 狀態推定法

加重最小自乘 狀態推定(Weighted Least Square Estimation: WLSE)法은 測定値와 推定値와의 편차를 最小自乘法를 써서 最小화한다는 방침하에 식(1)과 같이 정의되는

$$J(\underline{x}) = [\underline{z} - \underline{h}(\underline{x})]^T W^{-1} [\underline{z} - \underline{h}(\underline{x})] \quad (1)$$

여기서, $W = E\{\underline{w}, \underline{w}^T\}$

\underline{z} : 측정벡터

$\underline{h}(\underline{x})$: 비선형함수

\underline{w} : 잡음벡터

W : 잡음벡터의 공분산

$E\{\cdot\}$: 期待値 演算子

\underline{x} : 狀態벡터

加重最小自乘函數 $J(\underline{x})$ 를 설정하고 Newton法에 의한 반복계산식을 이용하여 이 $J(\underline{x})$ 를 最小화시키는 最適 狀態推定値 \underline{x} 를 구하고자 하는 推定法이다.^{2,4)}

이때에 사용되는 기본반복계산식은 利得行列 G 와 자코비안行列 H 를 사용해서 다음과 같이 표현된다.

$$G \Delta \underline{x}^{k+1} = H^T(\underline{x}^k) W^{-1} [\underline{z} - \underline{h}(\underline{x}^k)] \quad (2)$$

여기서, 利得行列 G 와 자코비안行列 H 는 식(3)과 같이 되는데

$$G = [H^T(\underline{x}^k) W^{-1} H(\underline{x}^k)], \quad H = \frac{\partial \underline{h}}{\partial \underline{x}} \Big|_{\underline{x} = \underline{x}^k} \quad (3)$$

실제로 이것을 풀 경우에는 매반복계산 때마다 이 G 와 H 를 재계산해야 한다는 결점이 있다.

2.2 高速分割 狀態推定法

高速分割 狀態推定(Fast Decoupled State Estimation: FDSE)法은 식(2)의 자코비안行列 H 와 利得行列 G 를 基準電壓狀態($V=1, \theta=0$)에서 다음과 같이 常數行列로 근사화시키고 있다.⁶⁾

$$H = \begin{bmatrix} H_a & \underline{0} \\ \dots & \dots \\ \underline{0} & H_r \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} G_a & \underline{0} \\ \dots & \dots \\ \underline{0} & G_r \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{여기서, } H_a = -\frac{\partial \underline{h}_a}{\partial \underline{\theta}} \Big|_{\underline{\theta}=0, \underline{V}=1}, \quad H_r = \frac{\partial \underline{h}_r}{\partial \underline{V}} \Big|_{\underline{\theta}=0, \underline{V}=1}$$

$$G_a = H_a^T W_a^{-1} H_a, \quad G_r = H_r^T W_r^{-1} H_r \quad (5)$$

이 常數行列들을 이용하여 원래의 利得行列 G 와 자코비안行列 H 를

$$G_a \Delta \underline{\theta}^{k+1} = H_a^T W_a^{-1} [\underline{z}_a - \underline{h}_a(\underline{\theta}^k, \underline{V}^k)] \quad (6a)$$

$$G_r \Delta \underline{V}^{k+1} = H_r^T W_r^{-1} [\underline{z}_r - \underline{h}_r(\underline{\theta}^{k+1}, \underline{V}^k)] \quad (6b)$$

와 같이 有効, 無効部分으로 分割한 반복계산식으로 $\Delta \underline{\theta}$ 와 $\Delta \underline{V}$ 가 주어진 허용범위내에 收斂할 때까지 이 2개로 分割된 반복계산식을 서로 반복계산함으로써 最適狀態値를 구하도록하고 있다. 이 방법은 WLSE法보다 計算時間과 記憶容量면에서 우수한 방법이지만 한편, 자코비안行列 H 의 대각블럭 H_a, H_r 과 利得行列 G 의 대각블럭 G_a, G_r 의 각 요소들이 서로 다른 값을 가지므로 이들을 별도로 기억시켜야 한다는 단점이 있다.

2.3 修正高速分割 狀態推定法

修正高速分割 狀態推定(Modified Fast Decoupled State Estimation: MFDE)法은 FDSE法에서의 測定値의 無効電力成分에서 電壓벡터 성분을 제외시켜서 母線注入電力과 線路潮流 測定値만으로 有効, 無効部分에 해당되는 측정치의 수를 갈게끔 수정하고 有効, 無効加重係數行列 W_a^{-1}, W_r^{-1} 을 同一하게 구성하여 앞서 보인 식(6a), (6b)에서 $H_a = H_r, G_a = G_r$ 로 놓으므로서 FDSE法보다 記憶容量과 計算時間을 감소시키려는 推定法이다. 이때의 반복계산식은 다음과 같이 구성된다.

$$G_a \Delta \underline{\theta}^{k+1} = H_a^T W_a^{-1} [\underline{z}_a - \underline{h}_a(\underline{\theta}^k, \underline{V}^k)] \quad (7a)$$

$$G_a \frac{\Delta \underline{V}^{k+1}}{\underline{V}^k} = H_a^T W_a^{-1} [\underline{z}_r - \underline{h}_r(\underline{\theta}^{k+1}, \underline{V}^k)] \quad (7b)$$

이 방법은 R/X 의 비율이 작은 好條件(Well-Condition)의 系統에 대해서는 收斂特性이 아주 좋으나 자코비안行列의 비대각블럭 요소들을 무조건 무시해서 分割하고 있기 때문에 R/X 의 비율이 큰 이른바 惡條件(III-Condition)의 系統에 대해서는 그 收斂特性이 저하된다는 단점이 있다.

이상에서 본 바와 같이 從來에 사용되어 온 各 狀態推定法은 信賴性이나 계산속도, 記憶容量면 등에서 여러가지 문제점을 안고 있기 때문에 本 研究에서는 이러한 各 방법의 결점을 보완하기 위하여 다음에 소개하는 새로운 修正變型分割 狀態推定 알고리즘을 개발하였다.

3. 修正變型分割 狀態推定法

修正變型分割 狀態推定(Modified Transformation Decoupled Estimation:MTDE)法은 從來의 FDSE 法과 MFDE法과는 달리 한 쌍의 測定值P와 Q로부터 한 쌍의 代理 測定值(surrogate measurements) h_{sa} 와 h_{sr} 을 구성해서 P- θ 와 Q-V를 근사적으로 分割시키자는 것이다. 이것은 狀態推定을 위한 基本 반복계산식에서 사용되는 자코비안行列의 성질로부터 유도된다. 곧 $V=1, \theta=0$ 인 基準電壓 狀態에서 자코비안行列H의 각 요소는 아래처럼 구성되고 있다.

$$\begin{matrix} \Delta\theta_i & \Delta V_i & \Delta\theta_j & \Delta V_j \\ P_i \begin{bmatrix} -B_{ii} & G_{ii} & -B_{ij} & G_{ij} \\ -G_{ii} & -B_{ii} & -G_{ij} & -B_{ij} \end{bmatrix} \\ Q_i \begin{bmatrix} B_{ij} & -G_{ij} & -B_{ij} & G_{ij} \\ G_{ij} & B_{ij}-2Y_{sij} & -G_{ij} & -B_{ij} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

여기에서 한 쌍의 有効, 無効電力方程式과 관련된 2行4列의 行列에서 각 列은 근사적으로 平行(parallel)하거나 直교(orthogonal)한다는 것을 알 수 있다. 이런 성질을 이용하면 P, Q로 정의되는 평면상의 단순한 회전으로 두 자코비안행렬을 거의 완전하게 分割하는 것이 가능하게 된다. 이때에 사용되는 회전식은 다음과 같이 표현된다.⁹⁾

$$\begin{bmatrix} h_{sa} \\ \dots \\ h_{sr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 & T_2 \\ \dots & \dots \\ T_2 & -T_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ \dots \\ Q \end{bmatrix} \quad (8)$$

따라서 P- θ , Q-V의 分割은 식(8)에서 한 쌍의 代理 有効, 無効電力方程式(surrogate active and reactive power equations)의 변화량 dh_{sa} 와 dh_{sr} 이 각각 $\Delta\theta$ 와 ΔV 에 대해 독립적으로 結付되도록 變형행렬(Transformation Matrix)T의 요소인 T_1 과 T_2 를 선정하는 문제로 귀착될 것이다.

3.1 變型行列T의 구성

먼저 變型行列T의 구성부터 설명한다. MTDE法에서의 측정치벡터는 線路潮流와 母線注入電力에 관한 측정치로 이루어지므로 變型行列T의 각 요소들도 이 두가지 측정치를 사용해서 구성하게 된다.

3.1.1 潮流測定值에 대한 變型

식(8)로부터 代理 潮流電力方程式을 다음과 같이 線路潮流 P_{ij} 와 Q_{ij} 를 사용해서 구성하면

$$\begin{bmatrix} h_{sa,ij} \\ \dots \\ h_{sr,ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{L1} & T_{L2} \\ \dots & \dots \\ T_{L2} & -T_{L1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ij} \\ \dots \\ Q_{ij} \end{bmatrix} \quad (9)$$

代理 有効, 無効潮流方程式 $h_{sa,ij}$ 와 $h_{sr,ij}$ 는

$$h_{sa,ij} = T_{L1}P_{ij} + T_{L2}Q_{ij} = T_{L1}[V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - G_{ij} V_i^2] + T_{L2}[V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + (B_{ij} - Y_{sij}) V_i^2] \quad (10a)$$

$$h_{sr,ij} = T_{L2}P_{ij} - T_{L1}Q_{ij} = T_{L2}[V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) - G_{ij} V_i^2] - T_{L1}[V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) + (B_{ij} - Y_{sij}) V_i^2] \quad (10b)$$

로 표현될 것이다.

여기서, 식(10a)를 $\theta_i, \theta_j, V_i, V_j$ 에 대해서 각각 편미분한 다음 基準電壓狀態($V=1, \theta=0$)에서 근사화시키면 다음과 같이 된다.

$$\partial h_{sa,ij} / \partial \theta_i \cong T_{L1} B_{ij} + T_{L2} G_{ij} \quad (11a)$$

$$\partial h_{sa,ij} / \partial \theta_j \cong -T_{L1} B_{ij} - T_{L2} G_{ij} \quad (11b)$$

$$\partial h_{sa,ij} / \partial V_i \cong -T_{L1} G_{ij} + T_{L2} (B_{ij} - 2Y_{sij}) \quad (11c)$$

$$\partial h_{sa,ij} / \partial V_j \cong T_{L1} G_{ij} - T_{L2} B_{ij} \quad (11d)$$

한편, 實系統에서 대기정전어드미턴스는 통상 그 값이 아주 작으므로, 식(11c)에서 Y_{sij} 를 무시하면

$$\partial h_{sa,ij} / \partial V_i = \partial h_{sa,ij} / \partial V_j = 0$$

로 되게하는 T_{L1}, T_{L2} 는 식(11c), 식(11d)로부터

$$T_{L1} = B_{ij}, \quad T_{L2} = G_{ij} \quad (12)$$

로 된다는 것을 알 수 있다.

이 결과 有効, 無効潮流의 변화량 $dh_{sa,ij}$ 와 $dh_{sr,ij}$ 는 다음과 같이 각각, 위상각과 전압의 함수만으로 나타낼 수 있게 된다.

$$dh_{sa,ij} = (G_{ij}^2 + B_{ij}^2) \Delta \theta_i - (G_{ij}^2 + B_{ij}^2) \Delta \theta_j \quad (13a)$$

$$dh_{sr,ij} = -(G_{ij}^2 + B_{ij}^2 + 2B_{ij} Y_{sij}) \Delta V_i + (G_{ij}^2 + B_{ij}^2) \Delta V_j \quad (13b)$$

3.1.2 母線注入電力測定值에 대한 變型

식(8)로부터 代理 母線注入電力方程式을 다음과 같이 母線注入電力 P_i, Q_i 를 사용해서 구성하면

$$\begin{bmatrix} h_{sa,i} \\ \dots \\ h_{sr,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{b1} & T_{b2} \\ \dots & \dots \\ T_{b2} & -T_{b1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_i \\ \dots \\ Q_i \end{bmatrix} \quad (14)$$

代理 有効, 無効母線注入電力方程式 $h_{sa,i}$ 와 $h_{sr,i}$ 는

$$h_{sa,i} = T_{b1} \left[V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \right] + T_{b2} \left[V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \right] \quad (15a)$$

$$h_{sr,i} = T_{b2} \left[V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \right] - T_{b1} \left[V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \right] \quad (15b)$$

로 표현될 것이다.

여기서 代理 有効, 無効母線注人電力의 변화량 $dh_{sa,i}$ 와 $dh_{sr,i}$ 의 분할을 위한 T_{b1} 과 T_{b2} 의 결정은 여기서의 $dh_{sa,i}/V_i$ 와 $dh_{sr,i}/V_i$ 에 관한식이 전술한潮流測定値에서 식(11c), (11d)처럼 양식의 부호가 반대로 구성되지 않고 동일한 부호로 구성되기 때문에 앞서의 경우처럼 간단하게 해결되지 않는다. 따라서 이러한 경우에는 식(16)과 같은 基準方程式을 정의한 다음 이식이 최소로 되게끔 하는 T_{b1} 과 T_{b2} 를 결정해 나가도록 한다⁹⁾.

$$B_i = \sum_{j=1}^N \left[\left(\frac{\partial h_{sa,i}}{\partial V_j} \right)^2 + \left(\frac{\partial h_{sr,i}}{\partial \theta_j} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial h_{sa,i}}{\partial V_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial h_{sr,i}}{\partial \theta_i} \right)^2 \quad (16)$$

여기서 식(16)의 의미는 자코비안行列H의 비대각 요소의 값이 대각 요소의 값에 비해서 상대적으로 얼마만큼 작은가 하는 척도를 가리키고 있는 것이다.

한편, 앞서 나온 식(15a), (15b)로부터 基準電壓狀態 ($V=1, \theta=0$)에서는 다음과 같은 관계식을 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial h_{sa,i}}{\partial V_i} \Big/ \frac{\partial h_{sa,i}}{\partial \theta_i} = \frac{T_{b1}G_{ii} - T_{b2}B_{ii}}{-T_{b1}B_{ii} - T_{b2}G_{ii}} = \frac{1}{1 - \frac{T_{b2}}{T_{b1}} \Big/ \frac{B_{ii}}{G_{ii}}} = -\cotan(\theta_{ii} + \phi) \quad (17a)$$

$$[\because \tan \theta_{ii} = B_{ii}/G_{ii}, \tan \phi = T_{b2}/T_{b1}]$$

마찬가지로

$$\frac{\partial h_{sa,i}}{\partial V_j} \Big/ \frac{\partial h_{sa,i}}{\partial \theta_j} = \cotan(\theta_{ij} + \phi) \quad (17b)$$

$$\frac{\partial h_{sr,i}}{\partial \theta_i} \Big/ \frac{\partial h_{sr,i}}{\partial V_i} = \cotan(\theta_{ii} + \phi) \quad (17c)$$

$$\frac{\partial h_{sr,i}}{\partial \theta_j} \Big/ \frac{\partial h_{sr,i}}{\partial V_j} = \cotan(\theta_{ij} + \phi) \quad (17d)$$

이 유도된다.

이 관계식을 식(16)에 대입하면 基準方程式은 다음과 같이 정리된다.

$$B_i = 2 \sum_{j=1}^N \cotan^2(\theta_{ij} + \phi) + 2 \cotan^2(\theta_{ii} + \phi) = 2(c+1) \cotan^2(\theta_{ii} + \phi) \quad [\theta_{ij} = \theta_{ii} + \phi] \quad (18)$$

한편, 식(18)에서 B_i 는 $\phi + \theta_{ii} = \pi/2$ 일 때 최소로 되므로, 이로부터

$$\tan(\phi + \theta_{ii}) = \frac{\tan \phi + \tan \theta_{ii}}{1 - \tan \phi \tan \theta_{ii}} = \tan \frac{\pi}{2} = \infty \quad (19)$$

를 얻게 된다.

위의 관계식으로부터

$$\tan \phi = \cotan \theta_{ii} = T_{b2}/T_{b1} = G_{ii}/B_{ii} \quad (20)$$

로 되기 때문에 결국 T_{b1} 과 T_{b2} 는

$$T_{b1} = B_{ii}, \quad T_{b2} = G_{ii} \quad (21)$$

로 된다는 것을 알 수 있다.

3.1.3 變型行列T의 구성요소 定義

以上으로 變型行列T의 각 요소들은 식(12), 식(21)의 결과에 따라 다음과 같이 定義된다.

대각 요소의 정의

$$T_{pp} = \begin{cases} B_{ii} : p \text{ 번째 측정치가 한 쌍의 모선 } i \text{ 에 대한 주입전력의 유효부분인 경우} \\ -B_{ii} : p \text{ 번째 측정치가 한 쌍의 모선 } i \text{ 에 대한 주입전력의 무효부분인 경우} \\ B_{ij} : p \text{ 번째 측정치가 한 쌍의 선로 } i-j \text{ 에 대한 조류의 유효부분인 경우} \\ -B_{ij} : p \text{ 번째 측정치가 한 쌍의 선로 } i-j \text{ 에 대한 조류의 무효부분인 경우} \end{cases}$$

비대각 요소의 정의

$$T_{pq} = \begin{cases} 0 : p \text{ 번째와 } q \text{ 번째 측정치가 서로 한 쌍을 이루지 않는 경우} \\ G_{ii} : p \text{ 번째와 } q \text{ 번째 측정치가 모선 } i \text{ 에 대한 한 쌍의 주입전력인 경우} \\ G_{ij} : p \text{ 번째와 } q \text{ 번째 측정치가 선로 } i-j \text{ 에 대한 한 쌍의 선로조류인 경우} \end{cases}$$

3.2 修正變型分割 狀態推定法の 구성

전력방정식, 측정치, 자코비안행렬, 잡음벡터에 대한 대리 관계식은 위에서 정의한 變型行列T를 이용하여 다음과 같이 세울 수 있다.

대리 전력방정식벡터 $\underline{h}_s(\underline{x}) = T\underline{h}(\underline{x})$ (22)

대리 측정치벡터 $\underline{z}_s = T\underline{z}$ (23)

대리 자코비안행렬 $H_s(\underline{x}) = TH(\underline{x})$ (24)

대리 잡음벡터 $\underline{w}_s = T\underline{w}$ (25)

한편, 變型行列T는 正則行列이므로 식 (22), (23), (24)로부터 다음 관계식이 성립된다.

$H(\underline{x}) = T^{-1}H_s(\underline{x})$ (26)

$\underline{z} - \underline{h}(\underline{x}) = T^{-1}[\underline{z}_s - \underline{h}_s(\underline{x})]$ (27)

따라서 원래의 식 (2)로 정의된 상태추정을 위한 기본 반복계산식은 다음과 같이 변형된다.

$[H_s^T(\underline{x}^k)W_s^{-1}H_s(\underline{x}^k)]\Delta X^{k+1} = H_s^T(\underline{x}^k)W_s^{-1}(\underline{z}_s - \underline{h}_s(\underline{x}^k))$ (28)

여기서, $W_s = TWT$ 이다.

다음에는 이상의 결과를 사용해서 MTDE의 반복계산식을 유도하기 위하여 대리측정치벡터와 대리 전력방정식벡터를 다음과 같이 有效, 無効部分으로 分割하기로 한다.

$\underline{z}_s = \begin{bmatrix} \underline{z}_{sa} \\ \dots \\ \underline{z}_{sr} \end{bmatrix}$ $\underline{h}_s(\underline{x}) = \begin{bmatrix} \underline{h}_{sa}(\underline{x}) \\ \dots \\ \underline{h}_{sr}(\underline{x}) \end{bmatrix}$ (29)

한편, 대리 자코비안행렬에 대해서는 이것이 基準電壓狀態(V=1, $\theta=0$)에서 대각블럭요소 및 비대각블럭요소가 각각

대각블럭요소

$\partial h_{sa,i} / \partial \theta_i = -\partial h_{sr,i} / \partial V_i = B_{ii}^2 + G_{ii}^2$
 $\partial h_{sa,i} / \partial \theta_j = -\partial h_{sr,i} / \partial V_j = -B_{ij} B_{ij} - G_{ij} G_{ij}$
 $\partial h_{sa,i} / \partial \theta_i = -\partial h_{sr,i,j} / \partial V_i = G_{ij}^2 + B_{ij}^2$
 $\partial h_{sr,i,j} / \partial V_j = -\partial h_{sa,i,j} / \partial \theta_j = G_{ij}^2 + B_{ij}^2$

비대각블럭요소

$\partial h_{sa,i} / \partial V_i = \partial h_{sr,i} / \partial \theta_i = \partial h_{sa,i,j} / \partial V_j = \partial h_{sr,i,j} / \partial \theta_i = \partial h_{sr,i,j} / \partial \theta_j = 0$
 $\partial h_{sa,i} / \partial V_j = \partial h_{sr,i} / \partial \theta_j = \partial h_{sa,i,j} / \partial V_i = 0$

로 되어 有效, 無効블럭요소에서 서로 대응되는 요소의 절대치는 같고 부호만 반대로 되고 있다는 성질이 있기 때문에 대리 무효전력측정치벡터중전압측정치 요소를 제외시킨 다음 母線注入電力과

線路潮流로 有效, 無効部分에 해당되는 전압측정치수를 갖게끔 수정하고 동시에 代理 有效, 無効加重係數行列 W_{sa}^{-1} 와 W_{sr}^{-1} 를 동일하게 구성함으로써 代理 자코비안행렬과 代理 加重係數行列을 다음과 같이 分割할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} H_{sa} & \underline{0} \\ \dots & \dots \\ \underline{0} & -H_{sa} \end{bmatrix} W_s^{-1} = \begin{bmatrix} W_{sa}^{-1} & \underline{0} \\ \dots & \dots \\ \underline{0} & W_{sa}^{-1} \end{bmatrix}$$
 (30)

따라서, 최종적으로는 식 (28)로부터 다음식과 같은 MTDE의 반복계산식을 유도할 수 있다.

$A\Delta\theta^{k+1} = B[\underline{z}_{sa} - \underline{h}_{sa}(\theta^k, V^k)]$ (31a)

$A\Delta V^{k+1} = -B[\underline{z}_{sr} - \underline{h}_{sr}(\theta^{k+1}, V^k)]$ (31b)

여기서, $A = H_{sa}^T W_{sa}^{-1} H_{sa}$, $B = H_{sr}^T W_{sa}^{-1}$ 이다.

결국, MTDE는 식 (31a), (31b)를 서로 반복계산하면서 最適狀態推定值 \hat{X} 를 구하는 推定法이라고 요약할 수 있으며 그 구체적인 계산절차는 그림 1의 흐름도에 보인 바와 같다.

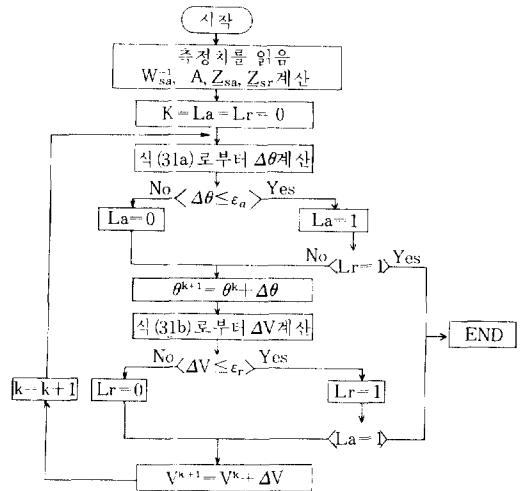


그림1. 수정 변형분할 상태추정법에 대한 흐름도
 Fig.1. Flow chart for a modified transformation decoupled state estimation.

4. 모델系統에 대한 適用

本 研究에서 提示한 MTDE의 유용성을 검증하기 위하여 이것을 모델계통에 적용하였다. 모델계통으로서는 그 동안 狀態推定 연구에서 소개된 바

표 1. 14모선 모델계통에 대한 수렴특성과 여과특성의 비교

Table 1. Comparison of convergence performance and filtering performance for 14bus model power system.

I / L	상태추정법	반복계산회수	계산시간(초)	SP(10 ⁻³)	SQ(10 ⁻³)	SPF(10 ⁻³)	SQF(10 ⁻³)	SV(10 ⁻³)
28/80	MTDE	4.5	19	9.13	10.82	15.08	19.9	1.36
	MFDE	7	23	9.92	11.08	18.03	18.3	1.37

[주 : 수렴허용범위 $|\Delta\theta| = |\Delta V| = 0.0001$]

여기서,

$$SP = \sum_{i=1}^{N_p} |(P_{bi} - P_{ei})| \quad SQ = \sum_{i=1}^{N_q} |(Q_{bi} - Q_{ei})| \quad SPF = \sum_{i=1}^{N_{pf}} |(PF_{bi} - PF_{ei})| \quad SQF = \sum_{i=1}^{N_{qf}} |(QF_{bi} - QF_{ei})|$$

$$SV = \sum_{i=1}^{N_v} |(V_{bi} - V_{ei})|$$

N_p = 유효 모선주입전력 측정치수 N_q = 무효 모선주입전력 측정치수 N_{pf} = 유효조류 측정치수

N_{qf} = 무효조류 측정치수 N_v = 전압측정치수 b = 기준치(base case)의 첨자

e = 추정치(estimated value)의 첨자 $I = N_p + N_q$ $L = N_{pf} + N_{qf}$

표 2. 25모선 모델계통에 대한 수렴특성과 여과특성의 비교

Table 2. Comparison of convergence performance and filtering performance for 25bus model power system.

I/L	상태추정법	반복계산회수	계산시간(초)	SP(10 ⁻³)	SQ(10 ⁻³)	SPF(10 ⁻³)	SQF(10 ⁻³)	SV(10 ⁻³)
48/42	MTDE	5.5	52	36.35	16.25	49.12	37.22	6.04
	MFDE	9	76	38.32	16.63	50.68	37.6	6.24

표 3. 14모선 모델계통에 대한 R/X의 비율에 따른 수렴특성과 여과특성의 비교

Table 3. Comparison of convergence performance and filtering performance as ratios of R/X for 14bus model power system.

I/L	R/X	상태추정법	반복계산회수	계산시간(초)	SP(10 ⁻³)	SQ(10 ⁻³)	SPF(10 ⁻³)	SQF(10 ⁻³)	SV(10 ⁻³)
28/80	0.1	MTDE	4	18	24.04	24.84	43.12	39.88	2.46
		MFDE	5	21	24.08	24.69	42.6	39.28	2.4
	0.3	MTDE	4.5	19	33.35	18.03	56.59	31.98	4.35
		MFDE	6	23	33.74	18.61	57.8	32.02	4.29
	0.6	MTDE	5	21	29.11	21.04	36.28	38.24	2.84
		MFDE	11.5	40	29.5	21.9	41.08	43.62	3.02

있는 그림 2·3의 IEEE-14 모선계통과 25모선계통을 택하였다. 먼저 MTDE法과 MFDE法の 收斂特性和 濾過特성에 관한 비교검토결과를 표 1, 2 및 표 3에 보인다. 여기에서 알 수 있는 바와 같이 MTDE法은 모든 系統運轉條件에 대해서 MFDE法보다 우수한 收斂特성을 보여주고 있으며 이런 특성은 다시 표 3과 그림 6에서 보인 것처럼 R/X의 비율이 증가할 수록 더욱 그 차이가 현저하게 나타나고 있다. 한편, MTDE法の 1회 반복계산시간은 MFDE法の 그것과 별차이가 없었으므로, 결국 표 1, 2 및 표 3에서 보인 바와 같이 반복계산회수가 줄어든 것만큼 狀態推定시간면에 있어서도 MTDE法은 MFDE法보다 훨씬 빠르다는 것을 알

표 4. 수렴특성의 비교(R/X=1인 선로 2개 포함된 경우)

Table 4. Comparison of convergence performance.

I/L	상태추정법	반복계산회수	계산시간(초)
28/80	MTDE	4.5	19
	MFDE	46	131

수 있다. 다음 표 4는 그림 2의 14모선계통에서 R/X의 비율이 큰(여기서는 그 값을 1로 가정하였음) 선로를 2개 포함시켜서 만든 이른바 惡條件(III-Condition)의 系統에 대해서 MTDE法과 MFDE法の 收斂特성을 비교해 본 것이다. 이에 따르면 MFDE法에서는 이러한 惡條件의 선로가

존재함에 따라 반복계산회수가 6 회에서 46 회로 대폭 증가한 반면 MTDE法에서는 이러한 惡條件 선로의 존재와는 관계없이 반복계산회수에 전혀 변함없는 것으로 보아 특히 이와같은 惡條件 (Ill-Condition)의 系統狀態에 대한 狀態推定에

서는 MTDE法이 MFDE法보다도 훨씬 우수하다는 것을 알 수 있다. 다음 濶過特性면을 살펴보면 표3에 보인 바와 같이 R/X의 비율이 작은 好條件 (Well-Condition)의 系統에 대해서는 MTDE法과 MFDE法은 별로 차이가 없으나 R/X의 비

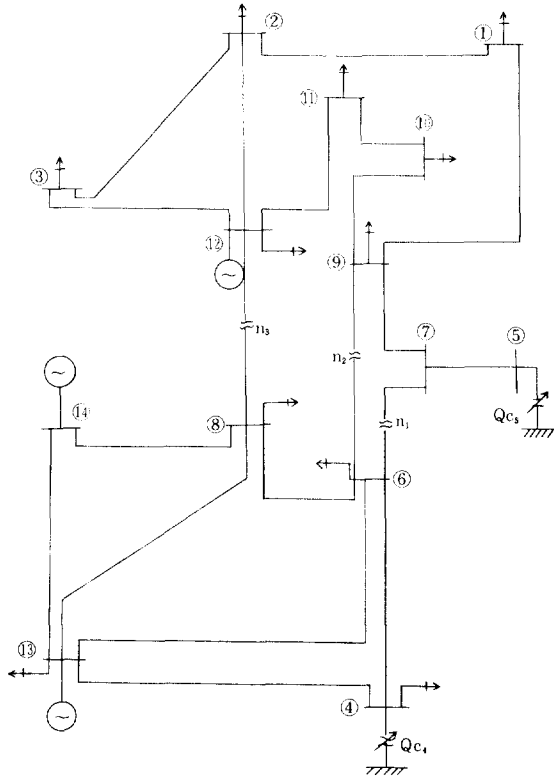


그림 2. IEEE-14모선 모델계통
Fig. 2. IEEE-14bus model power system.

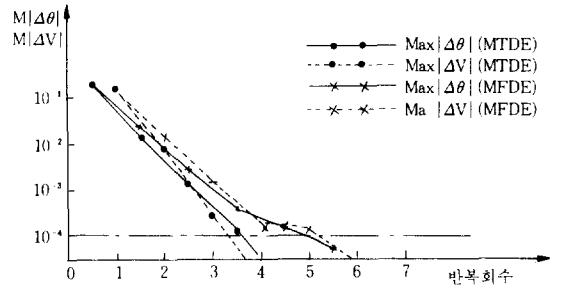


그림 4. 14모선계통에 대한 수렴특성
Fig. 4. Convergence performance for 14bus model power system.

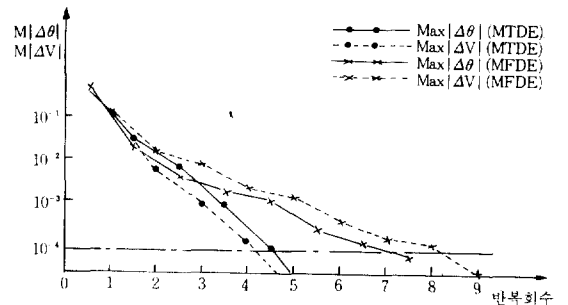


그림 5. 25모선계통에 대한 수렴특성
Fig. 5. Convergence performance for 25bus power system.

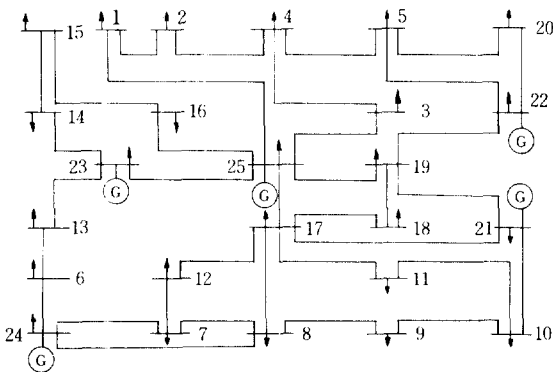


그림 3. IEEE-25모선 모델계통
Fig. 3. IEEE-25bus model power system.

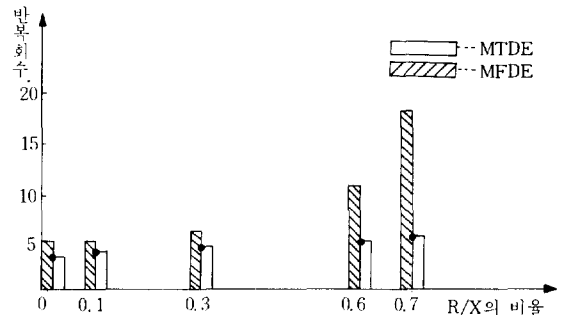


그림 6. 14모선계통에 대한 R/X의 비율에 따른 수렴특성
Fig. 6. Convergence performance as ratios of R/X for 14bus model power system.

율이 큰 시스템에서는 MTDE법의 慮過特性이 MFDE법의 그것보다 향상되고 있다는 것을 알 수 있다.

그림4, 5는 위에서 밝혀진 收斂特性을 位相角과 電壓크기로 나누어서 그려보인 것으로서 이러한 결과를 통하여 本 研究에서 제시한 MTDE법이 MFDE法보다 收斂特性이 우수하다는 것을 확인할 수 있을 것이다.

5. 結 論

本 研究에서는 從來의 狀態推定法보다 그 信賴性과 計算速度를 향상시킬 수 있는 새로운 狀態推定 알고리즘(MTDE)을 개발하였다. 이것은 종래의 기본반복계산식에서 사용되는 자코비안行列을 선형변환해서 효율적으로 P-θ와 Q-V를 분할하는 수법에 근거를 둔 것으로서 몇가지 모델系統에 이것을 적용해 본 결과

1. 從來의 修正高速分割 狀態推定法이 R/X의 비율이 작은 好條件의 系統에 대해서는 收斂이 빠른 반면 R/X의 비율이 큰 系統에 대해서는 收斂이 대폭 늦어지는 것과는 달리 本 研究에서 제시한 修正變型分割 狀態推定法은 好條件의 系統에 대해서는 물론이고 惡條件의 系統에 대해서도 우수한 收斂特性을 갖는다는 것을 확인할 수 있었다.

2. 濾過特性면에서도 修正變型分割 狀態推定法은 특히 R/X의 비율이 큰 惡條件의 系統에 대해서 修正高速分割 狀態推定法보다 그 성능이 우수하다는 것을 알 수 있었다.

3. 修正高速分割 狀態推定法은 記憶容量이 가장 적은 狀態推定法으로 평가되고 있으나 本 修正變型分割 狀態推定法도 비록, 代理 測定值 기억영역을 추가로 확보해야 한다는 문제가 있지만 실제로 이것은 거의 무시할 수 있을 정도의 것이기 때문에 記憶容量면에서도 本 알고리즘은 修正高速分割 狀態推定法の 그것과 별차이가 없는 것으로 평가할 수 있다.

本 研究에서는 불량정보(bad data)의 존재를 고려치 않고 상태추정을 실시하였는데 實系統에서는 불량정보의 발생을 무시할 수 없으므로 이의 검출(detect)과 동정(identification)에 관한 연구가 이루어져야 될 것으로 판단되며 앞으로 이 분야에 대해서도 계속 연구해 나갈 예정이다. 또한 本

알고리즘에서는 자코비안행렬H의 유효, 무효블럭 요소에서 서로 대응되는 요소의 절대치를 같게끔 구성하기 위하여 대지정전서셉턴스를 무시하고 자코비안행렬을 구성하였는데, 이런 이유로 대지정전서셉턴스의 값이 큰 계통에 대해서는 수렴속도가 늦어질 가능성이 있다. 따라서 앞으로 이러한 단점까지 보완할 수 있는 알고리즘의 개발에 대해서도 연구할 필요가 있다고 생각한다.

참 고 문 헌

- 1) 宋吉永 ; 電力系統의 解析 및 運用, 東逸出版社, 1984.
- 2) Fred C. Schweppe, J.Wildes, "Power System Static-State Estimation", IEEE Trans. vol.PAS-89, pp.125~135, 1970.
- 3) J.F. Dopazo, O.A., Klitin, L.S.Vanslyck, "State Caculation of Power System from Line Flow Measurement", IEEE Trans. vol. PAS-89,1970.
- 4) Rober E.Larson, William. F. Tinney, "State Estimation in Power System", IEEE Trans. vol.PAS 89, pp.353~363, 1970.
- 5) H.P.Horisberger, "A Fast Decoupled Static State-Estimator for Electric Power Systems", IEEE Trans. vol. PAS-95, 1976.
- 6) N. Sriuivasan K.S. Prakesa Rao, "Some New Algorithm for State Estimation in Power Systems", IEEE Trans. vol. PAS-103. 1984.
- 7) Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg ; "Power Generation, Operation, and Control", John Willey & Sons, Inc., 1984.
- 8) A.Garcia, A. Monticelli, "Fast Decoupled State Estimation and Bad Data Processing", IEEE Trans. vol. PAS-98,1979.
- 9) Fulin Zhuang, "A Transformation-Decoupled Estimator for Power System State Estimation", IEEE Trans. vol. PAS-104, 1985.
- 10) FRANK AYRES, JR., "Theory and Problems of Matrices", 1974.
- 11) E. Handschin, F.C. Scheppe, J.Kohlas and A. Fiechter, "Bad Data Analysis for Power System State Estimation", IEEE Trans. vol. PAS-94, pp.329~327, 1975.