

交直連繫系統을 포함한 電力系統에서의 狀態推定에 관한 研究

State Estimation in Power Systems with Interconnected AC/DC System

金 俊 鉉* · 朴 健 洙** · 李 鍾 範***
(Joon-Hyun Kim · Kon-Soo Park · Jong-Bum Lee)

ABSTRACT

This paper describes a method for the state estimation in power systems with interconnected AC / DC system. The state values in interconnected AC / DC system are estimated using measurement values with the pseudo measurement so that the number of telemetering measurement can be reduced. Especially, the state values in AC system are estimated through hierarchical method after system decomposition including superposition bus was formed for the state estimation in large-scale power systems.

The results of the application to the two model power systems show the effectiveness of the presented algorithms.

1. 序 論

電力系統의 運用 및 制御의 自動化가 계속 이루어짐에 따라 그 基本情報로서의 系統運用 및 構成 狀態에 대한 精確한 파악이 絶실히 要求되고 있으며,^{1) - 5)} 특히, 근래 直流送電方式의 利點을 감안하여 복잡한 交流系統에 直流系統을 連繫시킨 交直混合系統이 外國 여러나라에서는 이미 구성되어 있어 이러한 交直混合系統에서의 狀態值에 대한 精確한 파악은 더욱 중요한 의미를 갖고 있다. 따라서, 발표수는 적지만 지금까지 M. Sheikoleslami, D. M. Falcao등으로부터 이러한 系統에서의 狀態 推定技法이 발표되었으므^{6) - 8)}, 아울러 여기서는 狀態벡터의 선정에 제한을 두고 있으므로 이에 대한 확장

이 要求되고 있다.

直流送電은 送受電端의 安定度문제 없이 大電力을 장거리로 送電하기가 가능하고, 潮流制御의 신속 및 저렴한 건설비뿐만 아니라 系統의 連繫特性이 좋아 케이블送電으로서 많이 이루어지고 있다.⁹⁾ 우리나라에서는 아직 實現되지 않고 있으나 장차 제주도 의 海低케이블을 통한 直流送電도 計劃 및 實施豫定에 있으므로 交流系統뿐만 아니라 直流系統 및 交直連繫部分의 狀態를 測定情報를 통해 얻음으로써 전반적인 系統運用 및 制御의 向上을 기할 수가 있을 것이다.

本 論文에서는 全系統을 交流系統, 直流系統 및 交直連繫系統으로 區分한 후 各 系統에서의 狀態벡터를 정의하였으며 특히, 交直連繫系統에서는 狀態벡터를 順變換器와 逆變換器側 양쪽에서 順·逆變換器 브릿지에 印加되는 電壓, 順·逆變換器의 制御角 및 餘裕用, 그리고 順·逆變換器變壓器의 卷線比외에 추가로 브릿지에 인가되는 電壓과 이곳에 흐르는 電流와의 位相差로 정의하여 系統運用 및 制御의 情報를 增加시켰다. 한편, 測定値는 傳送測定値와 假想測定値를 이용하였다.

*正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 教授
**正 會 員 : 東洋工業專門大 電氣科 副教授
***正 會 員 : 韓國電氣研究所 研究員 · 工博

接受日字 : 1987年 5月 7日
1次修正 : 1987年 9月 10日
2次修正 : 1987年 12月 20日

또한, 大規模 電力系統에서의 效率의 推定을 위하여 系統을 分割하되 部分系統사이에는 重疊母線을 만들도록 分割하였다. 따라서, 連繫線및 이에 따른 連繫系統이 발생하지 않아 部分系統 들에서만 的 推定值로 系統協調를 하여 推定함으로써 全系統의 狀態值를 보다 效率的으로 推定하였으며, 事例研究를 통하여 얻은 結果를 實際值와 비교·검토함으로써 提示한 技法에 대한 效用性을 評價하였다.

2. 測定 Model 設定

系統의 運用 및 制御를 效果的으로 수행할 수 있도록 情報를 제공하는 變數인 狀態值 \underline{x} (이하 \underline{x} 를 표시한 문자는 行列을 나타냄)는 각 母線의 注入電力, 電壓, 線路潮流 및 기타 成分으로 이루어져 있는 測定要素와 함께 다음과 같은 測定 Model을 이루고 있다.

먼저, t 時點에서의 測定벡터 \underline{Z}_t 는 이 測定值의 測定誤差가 Gauss 分布에 따른다고 할 때 다음과 같이 구성된다.

$$\underline{Z}_t = \underline{h}_t(\underline{x}_t) + \underline{v}_t \quad (1)$$

$$E\{\underline{v}_t, \underline{v}_t^T\} = \underline{R}_t \quad (2)$$

여기서, \underline{Z}_t : $m \times 1$ 測定벡터

\underline{x}_t : $N \times 1$ 狀態벡터

\underline{v}_t : $m \times 1, N(0, \sigma_v^2)$ 의 測定誤差 벡터

$\underline{h}_t(\underline{x}_t)$: $m \times 1$ 非線形벡터函數

$E\{\cdot\}$: 期待值 演算子

\underline{R}_t : \underline{v}_t 의 共分散行列

여기서, 狀態벡터를 推定하기 위하여서는 加重最小自乘 推定法을 사용하였으며, 이 때 目的函數 $J(\underline{x}_t)$ 는 다음과 같이 設定된다.

$$J(\underline{x}_t) = [\underline{Z}_t - \underline{h}_t(\underline{x}_t)]^T \underline{R}_t^{-1} [\underline{Z}_t - \underline{h}_t(\underline{x}_t)] \quad (3)$$

그리고, 이 目的函數는 AC系統과 DC系統 및 AC/DC系統에서의 각 $J(\underline{x}_t)$ 의 합으로 이루어져 있으므로 다음과 같이 된다.

$$J(\underline{x}_t) = J(\underline{x}_{At}) + J(\underline{x}_{Dt}) + J(\underline{x}_{A/Dt}) \quad (4)$$

여기서, $J(\underline{x}_{At})$: AC系統에서의 目的函數

$J(\underline{x}_{Dt})$: DC系統에서의 目的函數

$J(\underline{x}_{A/Dt})$: AC/DC系統에서의 目的函數

한편, 구하고자 하는 狀態벡터 \underline{x}_t 는 식 (5)와 같은 反復計算을 통하여 구하여진다.

$$\underline{x}_{t(i+1)} = \underline{x}_{t(i)} + [\underline{G}_t(\underline{x}_{t(i)})]^{-1} [\underline{H}_t(\underline{x}_{t(i)})^T \underline{R}_t^{-1} [\underline{Z}_t - \underline{h}_t(\underline{x}_{t(i)})]] \quad (5)$$

$$\underline{G}_t(\underline{x}_{t(i)}) = [\underline{H}_t(\underline{x}_{t(i)})^T \underline{R}_t^{-1} \underline{H}_t(\underline{x}_{t(i)})]$$

여기서, $\underline{H}_t(\underline{x}_{t(i)})$ 는 推定 Jacobian 이고, $\underline{G}_t(\underline{x}_{t(i)})$ 와 l 은 利得行列 및 反復回數이며, ϵ 을 許容誤差라 할 때 $\max |\underline{x}_{t(i+1)} - \underline{x}_{t(i)}| \leq \epsilon$ 이 될 때까지 反復計算을 행한다.

3. 交流系統에서의 狀態推定

交流系統에서의 狀態值 \underline{x}_a 는 각 母線의 電壓크기 E_a , 位相角을 θ 라 할 때 n 母線系統에서 slack母線을 1이라 하면 $N (=2n-1)$ 개로 식 (6)과 같이 구성된다.

$$\underline{x}_a = [E_{a1}, E_{a2}, \dots, E_{an}, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n]^T \quad (6)$$

이러한 狀態值를 얻기 위하여서는 2장에서도 언급한 바와같이 測定벡터成分은 각 母線의 注入電力과 電壓 및 線路潮流 등으로 이루어져 있으며, 식 (5)를 통하여 구하게 된다.

4. 直流系統에서의 狀態推定

直流系統에서의 狀態벡터는 각 母線의 位相이 同相이므로 母線數가 K 개일 경우 K 개의 電壓만으로 구성된다.

$$\underline{x}_d = [Ed_1, Ed_2, \dots, Ed_r]^T \quad (7)$$

한편, 이들 狀態벡터를 구하기 위한 測定벡터成分으로서의 母線電壓, 線路潮流 注入電力 및 電流가 있으며, 이러한 測定벡터는 그림 1로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

(1) 母線 i 의 注入電力

$$Pd_i = Ed_i \sum_{j=1}^K G_{ij} Ed_j \quad (8)$$

(2) 母線 i, j 간의 線路潮流

$$Pd_{ij} = Ed_i G_{ij} (Ed_j - Ed_i) \quad (9)$$

(3) 母線 i, j 사이의 線路電流

$$Id_{ij} = G_{ij} (Ed_j - Ed_i) \quad (10)$$

(4) 母線 i 에서의 注入電流

$$Id_i = \sum_{j=1}^K G_{ij} Ed_j \quad (11)$$

(5) 母線 i 의 電壓

$$Ed_i \quad (12)$$

여기서, G_{ij} 는 G_{BUS} 의 ij 要素이다. 한편, 推定 Jacobian도 다음과 같이 구성된다.

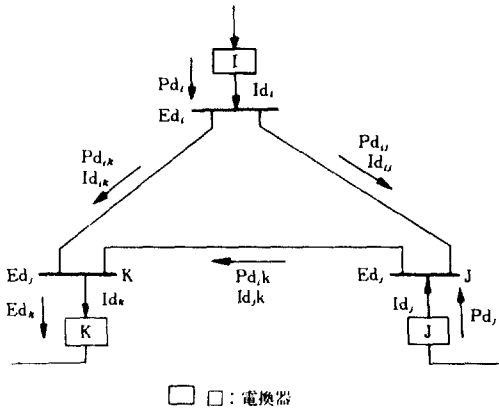


그림1. 直流系統의 一例
Fig.1. Example of the DC system.

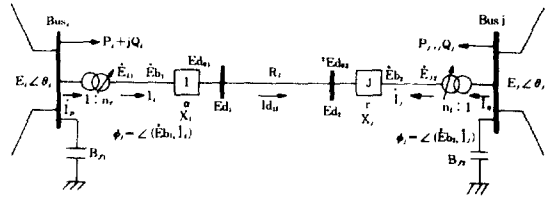


그림2. 交直連繫系統
Fig.2. AC/DC interconnection system.

$$\frac{\partial Pd_i}{\partial Ed_i} = 2Ed_i G_{ii} + \sum_{j \neq i}^k G_{ij} Ed_j \quad (13)$$

$$\frac{\partial Pd_i}{\partial Ed_j} = Ed_i G_{ij} \quad (i \neq j)$$

$$\frac{\partial Pd_{ij}}{\partial Ed_i} = (Ed_i - 2Ed_j) G_{ij} \quad (14)$$

$$\frac{\partial Pd_{ij}}{\partial Ed_j} = Ed_i G_{ij} \quad (i \neq j)$$

$$\frac{\partial Id_{ij}}{\partial Ed_i} = -G_{ij} \quad (15)$$

$$\frac{\partial Id_{ij}}{\partial Ed_j} = G_{ij} \quad (i \neq j)$$

$$\frac{\partial Id_i}{\partial Ed_i} = G_{ii} \quad (16)$$

$$\frac{\partial Id_i}{\partial Ed_j} = G_{ij} \quad (i \neq j)$$

$$\frac{\partial Ed_i}{\partial Ed_i} = 1 \quad (17)$$

$$\frac{\partial Ed_i}{\partial Ed_j} = 0 \quad (i \neq j)$$

따라서, 위와 같은 測定벡터와 推定 Jacobin을 갖고 식 (5)와 같은 反復計算을 통하여 直流系統의 狀態值를 推定하게 된다.

5. 交直連繫系統에서의 狀態推定

AC/DC 連繫系統은 간략화하여 그림 2와 같이 구성되어 있으며 기호의 설명은 부록 2에 기술하였다.

本 論文에서는 각 連繫系統에서의 狀態벡터를 다음과 같이 정의하였다.

$$X_{iA/D} = [Eb_1, \phi_1, \alpha, n_r]^T \quad (18)$$

$$X_{jA/D} = [Eb_2, \phi_2, r, n_r]^T \quad (19)$$

한편, 이들을 구하기 위한 測定벡터는 測定值 및 假想測定值를 포함하여 다음과 같이 구성시킬 수가 있다.

먼저, 順變換器側에서의 測定值는

$$h_{A/D}(x_{A/D})_{i_1} : Ed_{01} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} Eb_1 \cos \phi_1 \quad (20)$$

$$h_{A/D}(x_{A/D})_{i_2} : (Id_{12} X_i)^2 = \frac{\pi^2}{18} (n_r^2 E_i^2 - Eb_1^2 - \frac{6\sqrt{2}}{\pi} Eb_1 Id_{12} X_i \sin \phi_1) \quad (21)$$

$$h_{A/D}(x_{A/D})_{i_3} : (Id_{12} X_i)^2 = \cos^2 \alpha \left(2Eb_1^2 + \frac{36}{\pi^2} (Id_{12} X_i)^2 + \frac{12\sqrt{2}}{\pi} Eb_1 Id_{12} X_i \sin \phi_1 \right) - 2Eb_1 \cos \phi_1 (Eb_1 \cos \phi_1 + \sqrt{2} Id_{12} X_i) \quad (22)$$

$$h_{A/D}(x_{A/D})_{i_4} : P_i = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} Id_{12} Eb_1 \cos \phi_1 \quad (23)$$

$$h_{A/D}(x_{A/D})_{i_5} : Q_i = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} Id_{12} Eb_1 \sin \phi_1 + \frac{18}{\pi^2} X_i Id_{12}^2 \quad (24)$$

와 같으며, 逆變換器側에서의 測定值도 다음과 같이 구성된다.

$$h_{A/D}(x_{A/D})_{j_1} : Ed_{02} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} Eb_2 \cos \phi_2 \quad (25)$$

$$h_{A/D}(x_{A/D})_{j_2} : (Id_{12} X_j)^2 = \frac{\pi^2}{18} (n_r^2 E_j^2 - Eb_2^2 - \frac{6\sqrt{2}}{\pi} Eb_2 Id_{12} X_j \sin \phi_2) \quad (26)$$

$$h_{A/D}(x_{A/D})_{j_3} : (Id_{12} X_j)^2 = \cos^2 \alpha \left(2Eb_2^2 + \frac{36}{\pi^2} (Id_{12} X_j)^2 + \frac{12\sqrt{2}}{\pi} Eb_2 Id_{12} X_j \sin \phi_2 \right) - 2Eb_2 \cos \phi_2 (Eb_2 \cos \phi_2 + \sqrt{2} Id_{12} X_j) \quad (27)$$

$$h_{A/D}(x_{A/D})_{j_4} : P_j = -\frac{3\sqrt{2}}{\pi} Id_{12} Eb_2 \cos \phi_2 \quad (28)$$

$$h_{A/D}(x_{A/D})_i = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} Id_{12} Eb_2 \sin \phi + \frac{18}{\pi^2} X_j Id_{12}^2 \quad (29)$$

여기서, Ed_{01} , Ed_{02} 및 P_i , P_j , Q_i , Q_j 는 傳送받는 測定値이지만 $(Id_{12} X_i)^2$, $(Id_{12} X_j)^2$ 은 定電流制御時 一定値인 假想測定値로서, 傳送받지 않아도 되는成分이며, 한편, 식 (20)~(22) 및 (25)~(27)의 유도과정은 부록에 수록하였다. 또한, 推定 Jacobian $H_{A/D}(x_{A/D})$ 는 다음과 같이 구성된다.

$$H_{A/D}(x_{A/D})_i =$$

Ed_{01}/Eb_1	Ed_{01}/ϕ_i	Ed_{01}/α	Ed_{01}/n_r
$(Id_{12} X_i)^2/Eb_1$	$(Id_{12} X_i)^2/\phi_i$	$(Id_{12} X_i)^2/\alpha$	$(Id_{12} X_i)^2/n_r$
P_i/Eb_1	P_i/ϕ_i	P_i/α	P_i/n_r
Q_i/Eb_1	Q_i/ϕ_i	Q_i/α	Q_i/n_r

(30)

$$H_{A/D}(x_{A/D})_i =$$

Ed_{02}/Eb_2	Ed_{02}/ϕ_j	Ed_{02}/r	Ed_{02}/n_t
$(Id_{12} X_j)^2/Eb_2$	$(Id_{12} X_j)^2/\phi_j$	$(Id_{12} X_j)^2/r$	$(Id_{12} X_j)^2/n_t$
P_j/Eb_2	P_j/ϕ_j	P_j/r	P_j/n_t
Q_j/Eb_2	Q_j/ϕ_j	Q_j/r	Q_j/n_t

(31)

따라서, 連繫系統에서의 狀態値는 위에서 기술한 測定値와 推定 Jacobian을 갖고 식 (5)의 反復計算을 통하여 구하도록 하였다.

6. 系統分割에 의한 交流系統에서의 狀態推定

大規模 電力系統의 狀態値를 全系統으로 다루어 推定한다는 것은 計算 및 情報處理面으로 볼 때에非 效率的이므로 이를 몇개의 部分系統으로 分割하여 각 部分系統별로 狀態値를 推定한 후 이들의 相互 協調에 의하여 全系統의 狀態値를 推定한다면 計算 時間과 記憶容量의 節減, 그리고 情報傳送系統의 縮小 등 매우 效率的일 수 있다. 그리고, 이렇게 分割하여 구한 推定値가 하나의 系統으로 다루어 구한 推定値와 比較하여 情報供給에 있어서 차이가 없다면 더욱 効果的이라고 할 수 있겠다.

本 論文에서는 分割時 기존의 방법과 같이 連繫線과 境界母線으로 구성되는 連繫系統을 형성하지 않고 그림 3과 같이 部分系統에 重疊母線만 형성

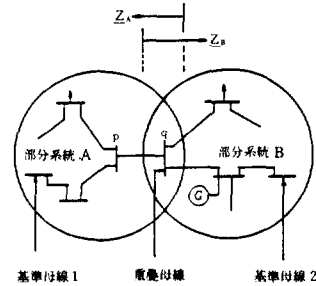


그림 3. 系統分割圖

Fig. 3. Diagram of system decomposition.

되도록 分割한 후 이를 狀態推定에 이용하도록 하였다.

狀態推定時는 각 部分系統마다 基準母線을 정하고 이 部分系統으로부터 全系統의 狀態値를 구하게 된다.

먼저, 部分系統 A와 部分系統 i ($i=B, C, \dots, P, \dots, S$)와의 基準母線사이의 電壓位相差는 다음과 같다.

$$\theta = [\theta^{B/A}, \theta^{C/A}, \dots, \theta^{P/A}, \dots, \theta^{S/A}]^T \quad (32)$$

그리고, 部分系統 A, B에서의 狀態値는 다음과 같은 각각의 目的函數를 설정하여 구하게 된다.

$$J(x_A) = [Z_A - h_A(x_A)]^T R_A^{-1} [Z_A - h_A(x_A)] \quad (33)$$

$$J(x_B) = [Z_B - h_B(x_B)]^T R_B^{-1} [Z_B - h_B(x_B)] \quad (34)$$

$$J(x) = J(x_A) + J(x_B) \quad (35)$$

이 때, 全系統의 각 母線電壓크기는 部分系統별로 推定한 값을 그대로 적용하며, 位相角만 相互 協調를 통하여 구하게 된다. 또한, 推定時 重疊母線 q_i 에 관계된 부분의 測定値는 注入成分을 제외하고 q_i 母線에 연결된 線路成分만을 이용하도록 한다.

重疊母線은 1개를 만들 수도 있으며, 만일 n 개를 만들었을 경우는 각 重疊母線의 電壓位相差 θ_{q_i} 는 다음과 같이 된다.

$$\theta_{q_i} = (\theta_{q_i}^A - \theta_{q_i}^B) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (36)$$

여기서, $\theta_{q_i}^A$: 部分系統 A에서 推定된 重疊母線 q_i 의 位相角

$\theta_{q_i}^B$: 部分系統 B에서 推定된 重疊母線 q_i 의 位相角

따라서, 部分系統 A, B간의 基準母線사이의 電壓位相差 $\theta_{A,B}$ 는 다음과 같이 된다.

$$\theta_{A(B)} = 1/n \sum_{i=1}^n \theta_{qi} \quad (37)$$

이로부터 全系統으로 볼 때 部分系統 B에 있는 각 母線의 電壓位相角도 基準母線의 位相角이 정해졌으므로 식 (38)로부터 간단히 구할 수 있다.

$$\theta_{K(B)} = \theta_{A(B)} + \delta_{K(B)} \quad (38)$$

여기서, $\theta_{K(B)}$: 部分系統 A의 基準母線에 대한 部分系統 B의 k母線 電壓位相角

$\delta_{K(B)}$: 部分系統 B에서의 K母線 電壓位相角

이러한 방법은 系統分割時 連繫系統이 형성되지 않으며, 따라서, 連繫系統에서의 狀態를 별도로 推定할 필요가 없어 간편한 代數的方法으로 狀態值를 推定할 수가 있다.

系統分割에 의한 狀態推定の 構造를 圖示하면 그림 4와 같다

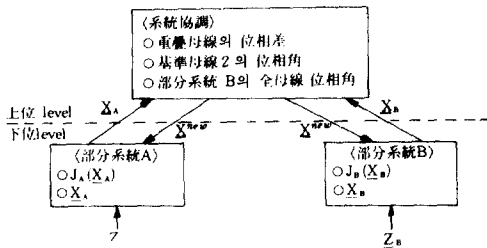


그림4. 系統分割에 의한 階層的 推定法의 構造

Fig. 4. Structure of hierarchical estimation method by system decomposition.

지금까지의 推定過程을 흐름도로 나타내면 그림 5, 6과 같다.

7. 事例研究

本 論文에서는 그림 5.6과 같은 過程으로 그림 7과 같은 DC系統을 포함한 14Bus 모델系統(모델系統 I)과 이것을 2개로 分割한 모델系統(모델系統 II)인 그림 8로부터 각 系統別 測定值를 이용하여 狀態值를 推定하였다. 모델系統 I에서는 총 54개의 測定值를 이용하여 狀態值를 推定하였으며, 이때 加重行列의 대각요소값을 10^4 으로 가정하여 입력시켰다.

표1은 모델系統 I에서 推定한 狀態值를 實際值와 비교한 것이며, 이로부터, 推定結果의 最大誤差

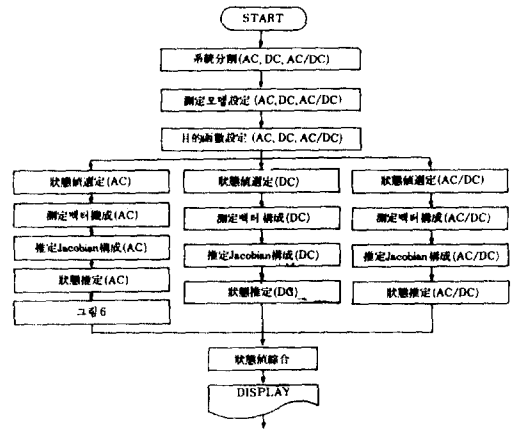


그림5. 각 系統別 狀態推定 흐름도

Fig. 5. Flow chart for the state estimation in each system

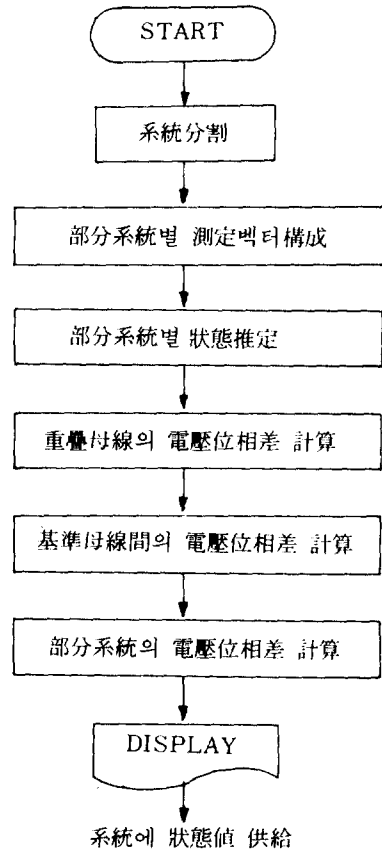


그림6. 系統分割後의 交流系統 狀態推定 흐름도

Fig. 6. Flow chart for the state estimation in AC system after system decomposition.

표 1. 모델 시스템 I 에서의 狀態推定値와 實際値 比較

Table 1. Comparison of the estimated values and true values in model system I.

BUS	MAG. TR.	MAG. ES.	ER(%)	ANG. TR.	ANG. ES.	ER(%)
1	1.06000	1.05900	0.09434	0.00000	0.00000	0.00000
2	1.04500	1.04452	0.04593	-0.08692	-0.08700	0.09200
3	1.01000	1.00933	0.06634	-0.22201	-0.22216	0.06756
4	1.01900	1.01803	0.09519	-0.18029	-0.18039	0.05547
5	1.02000	1.01925	0.07353	-0.15324	-0.15346	0.14357
6	1.07000	1.06904	0.08972	-0.24819	-0.24849	0.12088
7	1.06200	1.06133	0.06309	-0.23335	-0.23359	0.10285
8	1.09000	1.08955	0.04128	-0.23318	-0.23342	0.10292
9	1.05600	1.05502	0.09280	-0.26075	-0.26098	0.08821
10	1.05100	1.05001	0.09420	-0.26354	-0.26387	0.08348
11	1.05700	1.05602	0.09272	-0.25813	-0.25837	0.09298
12	1.05500	1.05402	0.09289	-0.31538	-0.31560	0.06976
13	1.05000	1.04903	0.09238	-0.26459	-0.26478	0.07181
14	1.03600	1.03499	0.09749	-0.27995	-0.28003	0.02858

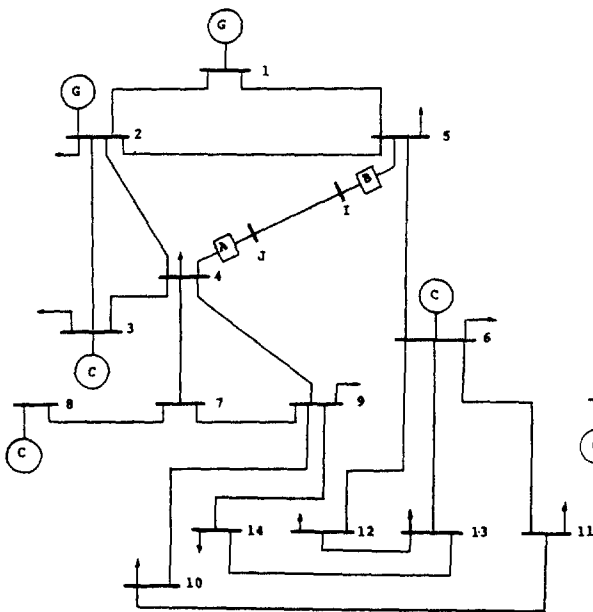


그림7. 14 BUS 모델 시스템 (모델 시스템 I)

Fig.7. 14 Bus model power system (Model system I).

가 電壓의 크기 및 位相角이 각각 0.09749(%), 0.14357(%)임을 알 수 있다. 단, 여기서 첨자 TR. 및 ES.는 實際値와 推定値이며, 이하 同一하다.

표 2는 系統을 分割한 모델 시스템 II 에서 部分系統 A, B 別로 狀態推定을 실시한 후 部分系統들의 推定値를 갖고 系統協調에 의하여 全系統으로서의 狀態

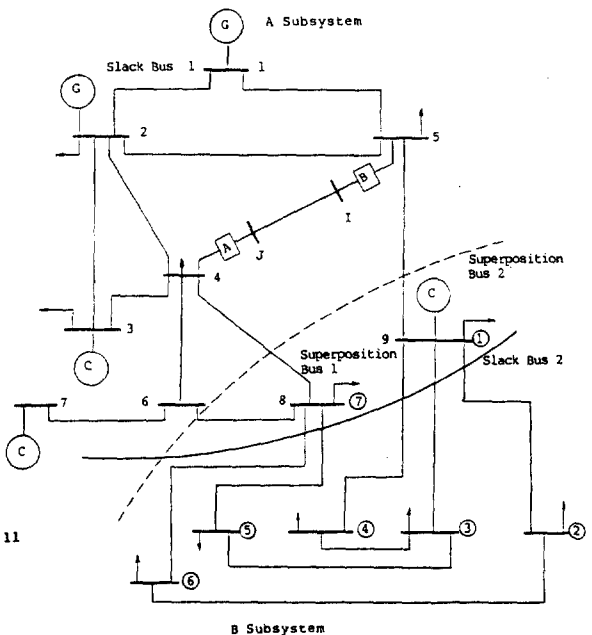


그림8. 分割한 14 BUS 모델 시스템 (모델 시스템 II)

Fig.8. Decomposed 14 Bus model power system (Model system II).

値를 推定한 것과 實際値를 비교한 것이다. 이때, 部分系統 A는 총 29개의 測定値로 17개의 狀態値를 B는 총 28개의 測定値로 13개의 狀態値를 推定하였으며, 部分系統 B에서는 基準母線을 그림 8에서와 같이 모델 시스템 I에서의 Bus 6으로 선정하였고,

표 2. 모델시스템Ⅱ에서의 시스템분割에 의한 狀態推定値와 實際値 比較

Table 2. Comparison of the estimated values and true values by system decomposition in model system II.

BUS	MAG. TR.	MAG. ES.	ER[%]	ANG. TR.	ANG. ES.	ER[%]
1	1.06000	1.05916	0.07925	0.00000	0.00000	0.00000
2	1.04500	1.04418	0.07847	-0.08692	-0.08696	0.04602
3	1.01000	1.00920	0.07921	-0.22201	-0.22208	0.03153
4	1.01900	1.01820	0.07851	-0.18029	-0.18031	0.01109
5	1.02000	1.01913	0.08529	-0.15324	-0.15348	0.15662
6	1.07000	1.07116	0.10841	-0.24819	-0.24851	0.12893
7	1.06200	1.06120	0.07533	-0.23335	-0.23347	0.05142
8	1.09000	1.08922	0.07156	-0.23318	-0.23330	0.05146
9	1.05600	1.05718	0.11174	-0.26075	-0.26099	0.09204
10	1.05100	1.05219	0.11323	-0.26354	-0.26376	0.08348
11	1.05700	1.05820	0.11353	-0.25813	-0.25840	0.10460
12	1.05500	1.05622	0.11564	-0.31538	-0.31537	0.00317
13	1.05000	1.05104	0.09905	-0.26459	-0.26484	0.09449
14	1.03600	1.03705	0.10135	-0.27995	-0.28009	0.05000

基準母線의 電壓크기까지 狀態値로서 선정하여 推定하였다.

한편, 重疊母線으로서는 그림 8 과 같이 2 개를 선정하였으며, 따라서 推定時에는 連繫系統이 형성되지 않으므로 連繫系統에서의 位相의 推定이 필요 없이 바로 系統協調를 간단히 할 수가 있었고, 이로부터 推定結果의 最大誤차가 電壓의 크기 및 位相角이 각각 0.11564[%], 0.15662[%]로서 分割前과 比較하여 거의 차이가 없음을 보이고 있다. 그리고, 計算機의 記憶容量도 全系統으로 다룰시 113.33[kB], 分割時에는 部分系統 A, B가 각각 42.03

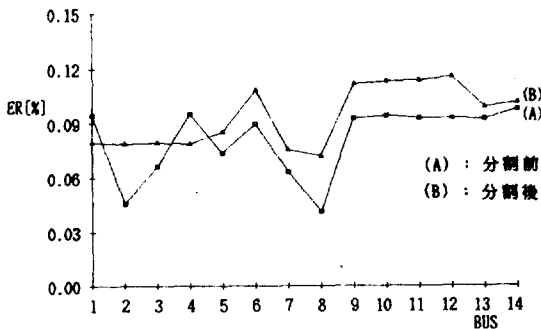


그림9. 系統分割前後에서의 電壓크기에 대한 推定値誤差 比較

Fig.9. Comparison of errors about the estimated values of voltage magnitudes at before and after system decomposition.

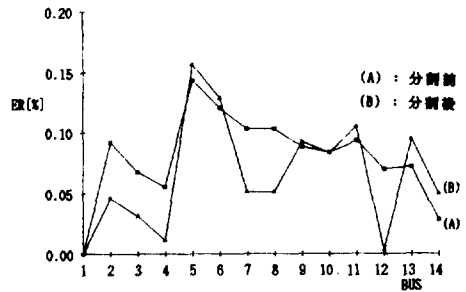


그림10. 系統分割前後에서의 電壓位相角에 대한 推定値誤差 比較

Fig.10. Comparison of errors about the estimated values of voltage phase angles at before and after system decomposition.

[kB] 29.69[kB]로서 系統의 規模로 볼 때 分割에 의한 推定이 計算機의 記憶容量, 計算遂行 및 情報處理面에서 훨씬 効率的이었다.

그림 9, 10은 위에서 기술한 分割前後의 두 推定에서 각 母線의 電壓크기 및 位相角의 誤차를 서로 비교한 것으로서 (A)는 分割前, (B)는 分割後를 나타낸 것이며, 이로부터 誤차의 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

표 3은 DC系統에서의 狀態推定結果를 나타낸 것으로 母線이 2개(Bus4, 5)인 이 系統에서 測定値는 線路潮流 및 電流를 이용하였으므로, 電壓의

표 3. DC 시스템에서의 상태 추정 결과

Table 3. The results of state estimation in DC system.

BUS	Ed _k , TR.	Ed _k , E _s	ER(%)
I	1.28552	1.28648	0.07468
J	1.28400	1.28496	0.07477

크기만인 상태값의 추정 결과는 최대誤차가 0.07477 (%) 인 매우 좋은 결과를 얻었다.

한편, 표 4는 AC/DC 連繫系統에서 상태 추정을 실시한 결과로서, 順, 逆變換器側에서 각각 傳送測定值 3 개 및 假想測定值 2 개를 이용하여 추정한 결과 順變換器側과 逆變換器側 모두 最大誤차가 각각 0.1821(%), 0.1539(%)인 매우 좋은 결과를 얻었으며, DC 및 AC/DC 系統에서의 추정 결과를 그림으로 나타내면 그림 11과 같다.

표 4. AC/DC 連繫系統에서의 상태 추정 결과

Table 4. The results of state estimation in AC/DC system.

STATE	BUS	5 - I	STATE	BUS	4 - J
Eb ₁ , TR.		1.0382	Eb ₂ , TR.		1.0409
Eb ₁ , ES.		1.0392	Eb ₂ , ES.		1.0418
ER(%)		0.0963	ER(%)		0.0865
φ ₁ , TR.		0.4106	φ ₂ , TR.		0.4192
φ ₁ , ES.		0.4108	φ ₂ , ES.		0.4193
ER(%)		0.0487	ER(%)		0.0239
α, TR.		0.3905	r, TR.		0.4053
α, ES.		0.3908	r, ES.		0.4054
ER(%)		0.0768	ER(%)		0.0247
n _r , TR.		1.0434	n _l , TR.		1.0395
n _r , ES.		1.0453	n _l , ES.		1.0411
ER(%)		0.1821	ER(%)		0.1539

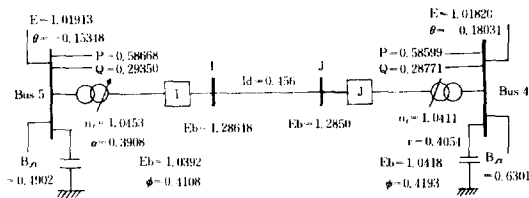


그림 11. DC 및 AC/DC 시스템에서의 상태 추정 결과

Fig. 11. The results of state estimation in DC and AC/DC system.

또한, 지금까지 추정한 상태값에 이용된 測定值의 平均絶對誤差 및 目的函數值은 표 5 와 같으며,

지금까지의 추정에서는 $|\Delta E| = 0.001[\text{pu}]$, $|\Delta \theta| = 0.001[\text{RAD}]$, 기타의 상태值에서도 $|\Delta X| = 0.001[\text{pu}]$ 로 정하였다.

위에서 나타낸 이 모든 결과를 토대로 하여 評價하여 볼 때 本 論文에서 提案한 技法들이 交直混合 系統에서의 각 系統별 狀態推定에 매우 効用性이 있음을 立證하였다. 그러나, 만일 實系統適用 시에는 最適測定地點 및 개수선정과 분할해야 할 線路 및 重疊母線의 선정등이 함께 연구되어야 할 것으로 사료된다.

표 5. 각 系統에서의 測定值 誤差 및 目的函數值

Table 5. Errors of measurement value and objective function values.

TERM	절대측정오차[%]	OBJ. FUNCTION
AC계통	0.05000	0.01250
분할계통A	0.05320	0.02030
분할계통B	0.06270	0.01800
DC계통	0.07320	0.00017
AC/DC, I측	0.10550	0.00017
AC/DC, J측	0.07090	0.00030

8. 結 論

電力系統의 運用 및 制御에 필수적인 狀態推定을 모델系統인 交直混合系統에 提案한 技法을 적용시켜 실시해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 系統을 分割한 후 推定精度를 유지하며 보다 迅速하게 狀態值를 推定하였으며, 分割時는 連繫系統을 형성하지 않고 重疊母線만 만들므로써 連繫系統의 狀態推定이 필요없이 간단한 系統協調에 의하여 全系統의 狀態值를 推定하도록 하였다.
- (2) 交直混合系統에서의 狀態推定을 각 系統별로 구분하여 실시하였으며, DC 系統에서는 간결한 推定技法으로 DC 系統의 母線電壓을 推定하였다.
- (3) AC/DC 連繫系統에서는 狀態值의 선정을 확장시킨 후 假想測定值를 이용함으로써 적은 傳統測定值로 狀態推定을 실시하여 系統制御를 위한 情報로서 이용토록 하였다.

REFERENCE

1) F. Zhuang, et al. : "A Transformation - Decoupled Estimator for Power System state Estimation." IEEE Trans., Vol. PAS-104, pp. 1738-1744, No. 7, July 1985.

- 2) J.W.Wang, V.H.Quintana : "A Decoupled Orthogonal Row Processing Algorithm for Power System Estimation." IEEE Trans., Vol. PAS-103, pp, 2337-2344 No. 8, Aug. 1984.
- 3) N.D.Rao, L.Roy : "A Cartesian Algorithm for Power System State Estimation.", IEEE Trans., Vol. PAS-102, pp. 1070-1082, No. 5, May 1983.
- 4) Th. Van Cutsem, et al. : "A Two-Level Static State Estimator for Electric Power Systems.", IEEE Trans., Vol. PAS-100, pp. 3722-3731, No. 8, Aug. 1981.
- 5) Y.M.El - Fattain, et al. : "Hierarchical State Estimation", Int. Journal of Electrical Power Energy Systems, Vol. 2, pp. 70-80, April 1980.
- 6) M. Sheikoleslami, et al. : "State Estimation of Interconnected HVDC / AC Systems.", IEEE Trans., Vol. PAS-102, pp. 1805-1810, No. 6, June 1983.
- 7) D.M. Falcão, et al. : "State Estimation for Integrated Multi - Terminal DC / AC Systems.", IEEE Trans., Vol. PAS-104, No. 9, Sep. 1985.
- 8) H.R. Sirisena, et al. : "Inclusion of HVDC links in AC Power - System State Estimation.", IEE Proc., Vol. 128, Pt. C, No. 3, May 1981.
- 9) 關根泰次 : 電力系統過渡解析論, 1984.

(附錄 1)

本文中식 (20)은

$$Eb_1 = \frac{\pi Ed_{01}}{3\sqrt{3} \cos \phi_1}$$

으로부터

$$Ed_{01} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} Eb_1 \cos \phi_1$$

가 얻어진다. 한편, 本文의 식 (21)은

$$\frac{E_{i1}}{E_i} = n_r$$

$$= \frac{1}{E_i} Eb_1 \sqrt{1 + 3 \left(\frac{I_i X_i}{Eb_1} \right)^2 + 2\sqrt{3} \left(\frac{I_i X_i}{Eb_1} \right) \sin \phi_1}$$

에서

$$n^2 = \left(\frac{Eb_1}{E_i} \right)^2 \left(1 + 3 \left(\frac{I_i X_i}{Eb_1} \right)^2 + 2\sqrt{3} \left(\frac{I_i X_i}{Eb_1} \right) \sin \phi_1 \right)$$

가 되며, 이 식을 다시 정리하면

$$3(I_i X_i)^2 = n^2 E_i^2 - Eb_1^2 - 2\sqrt{3} Eb_1 I_i X_i \sin \phi_1$$

가 된다. 따라서,

$$I_i = \frac{\sqrt{6}}{\pi} Id_{12}$$

이므로

交直連繫系統을 포함한 電力系統에서의 狀態推定에 관한研究

$$(Id_{12} X_i)^2 = \frac{\pi^2}{18} \left(n^2 E_i^2 - Eb_1^2 - \frac{6\sqrt{2}}{\pi} Eb_1 Id_{12} X_i \sin \phi_1 \right)$$

가 성립하게 된다.

또한, 本文의 식 (22)는

$$\cos \alpha = \frac{\cos \phi_1 + \frac{Id_{12} X_i}{\sqrt{2} Eb_1}}{\sqrt{1 + \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{Id_{12} X_i}{Eb_1} \right)^2 + 2 \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{Id_{12} X_i}{Eb_1} \right) \sin \phi_1}}$$

로부터

$$\cos^2 \phi_1 + \frac{\sqrt{2} Id_{12} X_i}{Eb_1} \cos \phi_1 + \frac{(Id_{12} X_i)^2}{2Eb_1^2}$$

$$= \cos^2 \alpha \left(1 + \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{Id_{12} X_i}{Eb_1} \right)^2 + \frac{6\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{Id_{12} X_i}{Eb_1} \sin \phi_1 \right)$$

가 되며, 이 식을 정리하면 다음과 같이 된다.

$$(Id_{12} X_i)^2 = \cos^2 \alpha \left(2Eb_1^2 + \frac{36}{\pi^2} (Id_{12} X_i)^2 + \frac{12\sqrt{2}}{\pi} Eb_1 Id_{12} X_i \sin \phi_1 \right) - 2Eb_1 \cos \phi_1 + (Eb_1 \cos \phi_1 + \sqrt{2} Id_{12} X_i)$$

기타 식 (25)~(27)은 각각

$$Ed_{01} \rightarrow Ed_{02}, \quad \phi_1 \rightarrow \phi_2, \quad n_r \rightarrow n_l$$

$$Eb_1 \rightarrow Eb_2, \quad X_i \rightarrow X_j, \quad \alpha \rightarrow r$$

로 변수를 바꾸어 위와 동일한 방법으로 구할 수 있다.

(附錄 2)

□□ : 順, 逆變換器

Id₁₂ : 直線路電流

Ed₁, Ed₂ : 順, 逆變換器側에서의 直線路電壓

Ed₀₁, Ed₀₂ : 順, 逆變換器의 直線發生電壓

R₁ : 直線路抵抗

X_i, X_j : 順, 逆變換器의 轉流리액턴스

α : 順變換器의 制御角

r : 逆變換器의 餘裕角

Eb₁, Eb₂ : 順, 逆變換器 브릿지에 인가되는 電壓

I₁, I₂ : 順, 逆變換器變壓器의 2次側 電流

E₁₁, E₁₂ : 順, 逆變換器變壓器의 2次側 發生 電壓

B_{r1}, B_{r2} : filter 係數

n_r, n_l : 順, 逆變換器變壓器의 卷線比

P₁, P₂ : 變換器用變壓器의 1次側 有効電力

Q₁, Q₂ : 變換器用變壓器의 1次側 無効電力

I_p, I_q : 順, 逆變換器變壓器의 1次側 電流

φ₁, φ₂ : Eb₁ - I₁ 및 Eb₂ - I₂ 間의 位相差