

論 文
35~7~1

電流測定成分과 不良情報 檢出을 考慮한 電力系統에서의 狀態推定에 관한 研究

State Estimation Considering Current Measurement Component and Bad Data Detection

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

Abstract

This paper describes a method for the state estimation considering current measurement component and detection of the bad data. The state values are estimated by weighted least square method in which measurement vector included bus injection current and line current. The bad data are detected using standardized variable of normal distribution and identified using sensitivity coefficients. When the bad data were occurred by the bad measurement values simply, the state estimation is performed through reinput of the modified measurement values, The results of the application to the model power system reveal the effectiveness of the presented algorithms.

1. 序 論

電力系統의 運用 및 制御의 自動化가 점점 이루어짐에 따라 그 基礎情報로서의 系統運用 및 構成狀態에 대한 精確한 파악이 더욱 精實하게 要求되고 있으며, 따라서 이에 대한 구체적인 연구가 활발히 進行되고 있다.^{1)~3)}

또한, 推定時의 不良情報發生은 測定時間帶數에 비해 매우 드물지만 다가올 時間帶로 볼 때에는 確實하게 發生하는 것이므로 狀態推定을 實用化할 경우에는 回避할 수 없게 된다. 따라서, On-line制御系統에 있어서 사용되는 測定值가 보다 精確한 狀態值를 추정하도록 하는 研究도 많이 이루어지고 있다.^{4)~6)}

그러나, 이들 推定法 대부분에 있어서의 測定值成分으로서의 母線注入電力, 線路潮流 및 母線電

壓을 이용하고 있고, 또한 系統의 狀態 및 潮流를 推定하는 것이며, 이 推定의 基本情報가 되는 系統構成狀態의 파악과 並行하는 推定에 대한 研究는 아직 적은 실정에 있다.

本 論文에서는 測定值成分으로서 기존의 자주 사용되는 測定成分에 母線注入電流 및 이미 發表되어 있는 線路電流成分을 포함시켜 構成함으로써 測定值의 選擇範圍를 擴張시켰으며, 이로부터 얻은 結果를 實際値와 比較, 檢討하였다.^{7)~9)} 또한, 不良情報의 檢出은 기존의 標準化變數로 하되 그 構成要素를 3 가지로 定義하여 각각의 경우를 適用시켰으며, 그로부터 가장 効率的인 現時間帶와 바로 前時間帶의 測定值推移로부터 얻은 標準化變數에 의한 檢出을 提案하였다.

한편, 檢出된 測定值가 단순히 不良情報에 의한 것인가, 또는 系統의 構成變化에 의한 것인가를 感度係數를 適用시킴으로써 識別하였다.^{10), 12)} 이 때, 不良情報는 測定值의 修正에 의한 새로운 測定值의 再入力으로 狀態推定하였으며,¹¹⁾ 이들 結果에 대한 効用성을 동시에 評價하였다.

* 正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 教授
 ** 正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 講師 · 工博
 接受日字 : 1985年 8月 17日

2. 測定値의 모델構成

系統의 運用 및 制御를 効果的으로 遂行할 수 있도록 정보를 제공하는 變數인 狀態値는 각 母線의 注入電力과 電壓 및 線路潮流 등으로 이루어져 있는 測定要素와 함께 다음과 같은 測定모델을 이루고 있다.

즉, 狀態變數 X 는 全母線의 電壓크기를 E , 位相角을 θ 라 할 때 n 母線系統에서 slack母線을 1이라 하면 X 는 $N(=2n-1)$ 개로 식 (1)과 같이 構成되어 있다.

$$X = [E_1, E_2, \dots, E_n, \theta_2, \dots, \theta_n]^T \quad (1)$$

또한, t 時點에서의 測定벡터 Z_t 는 이 測定値의 測定誤差가 Gauss分布에 따른다고 할 때 다음과 같이 構成된다.

$$Z_t = h_t(X_t) + V_t \quad (2)$$

$$E\{V_t, V_t^T\} = R_t \quad (3)$$

- 여기서, Z_t : $m \times 1$ 測定벡터
- X_t : $N \times 1$ 狀態벡터
- V_t : $m \times 1$, $N(0, \sigma_v^2)$ 의 測定誤差벡터
- $h_t(X_t)$: $m \times 1$ 非線型 벡터函數
- $E\{\cdot\}$: 期待值 演算子
- R_t : 測定分散 σ_v^2 을 對角要素로 하는 V_t 의 共分散行列

3. 電流測定成分을 포함한 加重最小自乘 推定法

價値函數를 設定하고 이를 最少化시키는 條件에서의 狀態値를 구하는 推定法으로서 測定値 Z_t 가 가장 정확히 되는 狀態値 X_t 를 구하기 위한 價値函數 $J(x_t)$ 는 식 (4)와 같이 設定한다.

$$J(x_t) = [Z_t - h_t(x_t)]^T R_t^{-1} [Z_t - h_t(x_t)] \quad (4)$$

여기서, $H_t(X_t)$ 를 推定 Jacobian行列이라 하면 구하고자 하는 狀態推定値 X_t 는 식 (5)와 같은 反復計算을 통하여 구하여진다.

$$X_t(\ell+1) = X_t(\ell) + [H_t(X_t)^T R_t^{-1} H_t(X_t)]^{-1} H_t(X_t)^T R_t^{-1} [Z_t - h_t(X_t(\ell))] \quad (5)$$

여기서, ℓ 은 反復回數이고, ϵ 을 許容誤差라 할 때 $\max |X_t(\ell+1) - X_t(\ell)| \leq \epsilon$ 이 될 때까지 反復計算을 行한다.

이 때, 測定벡터 Z_t 에서 자주 사용되는 構成要素는 母線의 注入電力, 線路潮流 및 母線電壓이나, 本論文에서는 이 構成要素외에 母線의 注入電流 및 이미 發表되어 있는 線路電流를 測定벡터에 포함시킴으로써 보다 넓은 測定벡터의 構成으로부터 狀態値를 推定하도록 하였다.

즉, 母線 i 에 注入되는 電流 \dot{I}_i 는 그림 1과 같은 母線構成으로부터 다음과 같이 구할 수 있다. 이 그림에서 \dot{Y}_{ik} 는 線路 어드미턴스를, \dot{Y}_{ii} 는 母線 i 와 大地사이의 어드미턴스를 나타낸 것이다.

$$\dot{I}_i = \sum_{k=1}^n \dot{Y}_{ik} \dot{E}_k \quad (6)$$

- 여기서, n : 母線總數
- \dot{E}_k : 母線電壓
- $\dot{Y}_{ik} (= -\dot{Y}_{ki})$: 相互 어드미턴스
- \dot{Y}_{ii} : 自己 어드미턴스
- G_{ik} : \dot{Y}_{ik} 의 實數分
- B_{ik} : \dot{Y}_{ik} 의 虛數分

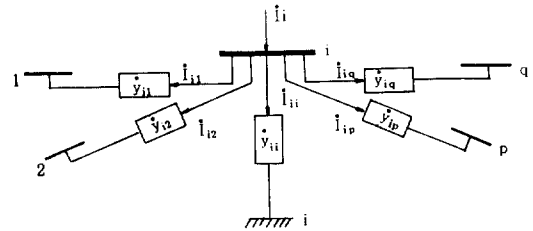


그림 1. 母線構成의 一例
Fig. 1. Example of the bus configuration.

이 때, 注入電流 \dot{I}_i 를 展開시키면 다음과 같이 實數部와 虛數部로 區分시킬 수 있다.

$$\dot{I}_i = \sum_{k=1}^n E_k \{ (G_{ik} \cos \theta_k - B_{ik} \sin \theta_k) + j (G_{ik} \sin \theta_k + B_{ik} \cos \theta_k) \} \quad (7)$$

그런데, 測定되는 電流는 絶對値이므로 이들 實數部와 虛數部를 각기 自乘하여 疊한 후 求取된다. 그러나, 이렇게 하면 電流成分의 推定 Jacobian 構成時 非効率的이고 複雜하게 되므로 注入電流를 식 (8)과 같이 $|I_i|^2$ 으로 變化시켜 測定値에 포함시키도록 하였다.

$$|I_i|^2 = \left[\sum_{k=1}^n E_k (G_{ik} \cos \theta_k - B_{ik} \sin \theta_k) \right]^2 + \left[\sum_{k=1}^n E_k (G_{ik} \sin \theta_k + B_{ik} \cos \theta_k) \right]^2 \quad (8)$$

이 때, K_1, K_2 를 다음과 같이 놓는다.

$$K_1 = 2 \left[\sum_{k=1}^n E_k (G_{ik} \cos \theta_k - B_{ik} \sin \theta_k) \right] \quad (9)$$

$$K_2 = 2 \left[\sum_{k=1}^n E_k (G_{ik} \sin \theta_k + B_{ik} \cos \theta_k) \right] \quad (10)$$

따라서, 注入電流의 推定 Jacobian 要素는 다음과 같이 이루어진다.

$$\frac{\partial |I_i|^2}{\partial E_i} = K_1 (G_{ii} \cos \theta_i - B_{ii} \sin \theta_i) + K_2 (B_{ii} \cos \theta_i + G_{ii} \sin \theta_i) \quad (11)$$

$$\frac{\partial |I_i|^2}{\partial E_k} = K_1 (G_{ik} \cos \theta_k - B_{ik} \sin \theta_k) + K_2 (B_{ik} \cos \theta_k + G_{ik} \sin \theta_k) \quad (12)$$

$$\frac{\partial |I_i|^2}{\partial \theta_i} = E_i (K_1 (-B_{ii} \cos \theta_i - G_{ii} \sin \theta_i) + K_2 (G_{ii} \cos \theta_i - B_{ii} \sin \theta_i)) \quad (13)$$

$$\frac{\partial |I_i|^2}{\partial \theta_k} = E_k (K_1 (-B_{ik} \cos \theta_k - G_{ik} \sin \theta_k) + K_2 (G_{ik} \cos \theta_k - B_{ik} \sin \theta_k)) \quad (14)$$

또한, 그림 2에서 b_{ik} 를 線路充電容量이라 할 때 線路電流 \dot{I}_{ik} 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

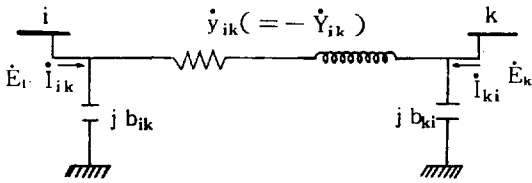


그림 2. π 型 等價回路
Fig 2. π -equivalent circuit.

$$\dot{I}_{ik} = -(G_{ik} + jB_{ik})(\dot{E}_i - \dot{E}_k) + j b_{ik} \dot{E}_i \quad (15)$$

따라서, 식 (15)도 實數部와 虛數部로 나누면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \dot{I}_{ik} = & [-G_{ik}(E_i \cos \theta_i - E_k \cos \theta_k) + B_{ik}(E_i \sin \theta_i \\ & - E_k \sin \theta_k) - b_{ik} E_i \sin \theta_i] + j \{ -G_{ik}(E_i \sin \theta_i \\ & - E_k \sin \theta_k) - B_{ik}(E_i \cos \theta_i - E_k \cos \theta_k) \\ & + b_{ik} E_i \cos \theta_i \} \end{aligned} \quad (16)$$

그리고, 이 線路電流도 注入電流와 같은 方法으로 하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} |I_{ik}|^2 = & [-G_{ik}(E_i \cos \theta_i - E_k \cos \theta_k) + B_{ik}(E_i \sin \theta_i \\ & - E_k \sin \theta_k) - b_{ik} E_i \sin \theta_i]^2 + [-G_{ik}(E_i \sin \theta_i \\ & - E_k \sin \theta_k) - B_{ik}(E_i \cos \theta_i - E_k \cos \theta_k) \\ & + b_{ik} E_i \cos \theta_i]^2 \end{aligned} \quad (17)$$

따라서, 이 때, 常數 $A_1 \sim A_4$ 을 각각

$$\begin{aligned} A_1 &= G_{ik}^2 + (B_{ik} - b_{ik})^2 \\ A_2 &= G_{ik}^2 + B_{ik}^2 \\ A_3 &= G_{ik}^2 + B_{ik}(B_{ik} - b_{ik}) \\ A_4 &= G_{ik} b_{ik} \end{aligned} \quad (18)$$

와 같이 놓으면 식 (17)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} |I_{ik}|^2 = & A_1 E_i^2 + A_2 E_k^2 - 2A_3 E_i E_k \cos(\theta_i - \theta_k) \\ & 2A_4 E_i E_k \sin(\theta_i - \theta_k) \end{aligned} \quad (19)$$

또한, 이 線路電流에 의하여 이루어지는 推定 Jacobian 要素들도 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial |I_{ik}|^2}{\partial E_i} = 2[A_1 E_i - A_3 E_k \cos(\theta_i - \theta_k) - A_4 E_k \sin(\theta_i - \theta_k)] \quad (20)$$

$$\frac{\partial |I_{ik}|^2}{\partial E_k} = 2[A_2 E_k - A_3 E_i \cos(\theta_i - \theta_k) - A_4 E_i \sin(\theta_i - \theta_k)] \quad (21)$$

$$\frac{\partial |I_{ik}|^2}{\partial \theta_i} = 2[A_3 E_i E_k \sin(\theta_i - \theta_k) - A_4 E_i E_k \cos(\theta_i - \theta_k)] \quad (22)$$

$$\frac{\partial |I_{ik}|^2}{\partial \theta_k} = 2[-A_3 E_i E_k \sin(\theta_i - \theta_k) + A_4 E_i E_k \cos(\theta_i - \theta_k)] \quad (23)$$

4. 不良情報의 檢出

收集된 情報에는 원래 測定器, 通信設備 등에 의한 雜音이나, 數學的 모델의 不確實性 등에 의해 誤差를 포함하고 있으며, 測定器, 通信設備 등의 故障頻發에 의해 큰 誤差를 포함하는 不良情報가 混入되는 경우가 있다. 따라서, 만일 이것을 測定值母集團으로부터의 情報로 오인하면 推定結果에 큰 誤差를 발생시킴으로 不良情報의 檢出은 매우 중요하다고 하겠다.

여기서는, 이들을 檢出하기 위하여 먼저 變化벡터를 設定하였으며, 이들 變化벡터의 要素들이 각 測定瞬間 모두 正規分布를 이룬다는 가정하에 標準化變數를 통하여 檢出하였다.

즉, 不良情報의 存在有無와 發生한 位置를 파악하기 위하여 다음과 같은 3개의 變化벡터를 設定하였다.

$$\begin{aligned} \text{(I)} \quad P_1 &= \{z_i - h_i(\hat{x})\} \quad (i=1, \dots, m) \\ \text{(II)} \quad P_2 &= \{(z_i - h_i(\hat{x}))/z_i\} \quad (i=1, \dots, m) \\ \text{(III)} \quad P_3 &= \{z_i(t) - z_i(t-1)\} \quad (i=1, \dots, m) \end{aligned} \quad (24)$$

위의 3가지 變化벡터중 어느 것을 선택하느냐에 따라 檢定情度에 영향을 주게 되는데 여기서는 (III)의 變化벡터가 후에 記述한 7節의 事例研究結果에 의하면 그중 가장 効率的이며, 이 때, 이에 대

한 棄却域은 다음과 같이 된다.

즉, 어느 한 時間帶에 있어서 平均值를 $\bar{K}_{i,a}$ ($a = 1, 2, 3$)라 하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \bar{K}_{i,1} &= \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m [z_i - h_i(\hat{x})] \\ \bar{K}_{i,2} &= \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m [(z_i - h_i(\hat{x})) / z_i] \\ \bar{K}_{i,3} &= \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m [z_i(t) - z_i(t-1)] \end{aligned} \quad (25)$$

따라서, 變化벡터의 각 要素가 正規分布 $N(\mu_i, \sigma_i^2)$ 에 따른다고 할 때 標準化變數 $T_{i,a}$ ($a = 1, 2, 3$)는 다음과 같이 된다.

$$T_{i,a} = \frac{P_{i,a} - \bar{K}_{i,a}}{\sigma_{i,a}} \quad (i = 1, 2, \dots, m, a = 1, 2, 3) \quad (26)$$

이 때, 有意水準을 α 라 하면, 다음의 確率을 만족하는 T_α 를 棄却限界로 정할 수가 있다.

$$Pr(|T_{i,a}| \geq T_\alpha) = \alpha \quad (27)$$

따라서, 棄却域 T_w 는 다음과 같이 된다.

$$T_w = \{T_{i,a} : |T_{i,a}| \geq T_\alpha\} \quad (28)$$

또한 分散 $\sigma_{i,a}$ ($a = 1, 2, 3$)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_{i,1}^2 &= \frac{1}{m-1} \sum_{t=1}^m |(z_i - h_i(\hat{x}_t)) - \bar{K}_{i,1}|^2 \\ \sigma_{i,2}^2 &= \frac{1}{m-1} \sum_{t=1}^m |(z_i - h_i(\hat{x}_t)) / z_i - \bar{K}_{i,2}|^2 \\ \sigma_{i,3}^2 &= \frac{1}{m-1} \sum_{t=1}^m |(z_{it} - z_{it-1}) - \bar{K}_{i,3}|^2 \end{aligned} \quad (29)$$

그러므로, 식 (26)의 標準化變數 絕對值인 $|T_{i,a}|$ 가 正規分布曲線에서 미리 정한 棄却域에 들어가는가 아닌가를 把握하여 棄却 및 採擇을 하며, 이로부터 不良情報의 存在有無 및 位置를 檢定하게 된다. 여기서, 棄却確率은 임의로 정해줄 수 있다.

5. 感度係數에 의한 不良情報의 系統構成 變化의 識別

檢出된 不良情報가 測定值의 誤情報인지 또는, 系統의 構成急變으로 인한 것인지를 그 즉시 파악할 수는 없다. 따라서 여기서는 系統의 感度係數를 導入하여 적용시킴으로써 이 두가지의 경우를 識別할 수 있도록 하였다.

그림 2로부터 直列抵抗을 무시하고 母線의 注入電力 및 線路潮流를 구하면 다음과 같이 된다.

즉, n 母線系統에서 母線 i 의 注入電力을 S_i 라 하면

$$\begin{aligned} S_i &= P_i + jQ_i \\ &= \sum_{k=1}^n E_i E_k (-jB_{ik}) e^{j(\theta_i - \theta_k)} + E_i^2 (-jB_{ii}) \\ &\approx \sum_{k=1}^n E_i E_k B_{ik} (\theta_i - \theta_k) + j \left[\sum_{k=1}^n E_i B_{ik} (E_i - E_k) - b_i E_i^2 \right] \end{aligned} \quad (30)$$

이 된다. 여기서, 각 母線電壓의 크기는 $V \approx 1.0$, 母線間의 位相差는 매우 작아서 $\sin(\theta_i - \theta_k) \approx 0$, $\cos(\theta_i - \theta_k) \approx 1$ 이라고 하며, 有效電力成分은 電壓의 位相差와, 無効電力成分은 電壓의 크기와 關連性이 크므로 그대로 놓으면 식 (30)은 다음과 같이 된다.

$$S_i \approx \sum_{k=1}^n B_{ik} (\theta_i - \theta_k) + j \left[\sum_{k=1}^n B_{ik} (E_i - E_k) - b_i \right] \quad (31)$$

여기서, $b_i = \sum_{k=1}^n b_{ik}$

또한, i, k 線路의 潮流를 S_{ik} 라 하면

$$\begin{aligned} S_{ik} &= P_{ik} + jQ_{ik} \\ &= E_i E_k (-jB_{ik}) e^{j(\theta_i - \theta_k)} - jE_i^2 [b_{ik} - B_{ik}] \\ &\approx E_i E_k B_{ik} (\theta_i - \theta_k) + j E_i [B_{ik} (E_i - E_k) - b_{ik} E_i] \end{aligned} \quad (32)$$

와 같이 되며, 여기서도, S_i 를 구할 때와 같은 가정을 적용시키면

$$\begin{aligned} S_{ik} &\approx B_{ik} (\theta_i - \theta_k) + j [B_{ik} (E_i - E_k) - b_{ik} (2E_i - 1)] \\ &\approx B_{ik} (\theta_i - \theta_k) + j [B_{ik} (E_i - E_k) - b_{ik}] \end{aligned} \quad (33)$$

이 된다.

한편, 母線 i 의 注入電流 $|I_i|^2$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} |I_i|^2 &= \left[\sum_{k=1}^n E_k (G_{ik} \cos \theta_k - B_{ik} \sin \theta_k) \right]^2 \\ &\quad + \left[\sum_{k=1}^n E_k (G_{ik} \sin \theta_k + B_{ik} \cos \theta_k) \right]^2 \\ &\approx \left[\sum_{k=1}^n E_k G_{ik} \right]^2 + \left[\sum_{k=1}^n E_k B_{ik} \right]^2 \\ &\approx \left[\sum_{k=1}^n E_k B_{ik} \right]^2 \end{aligned} \quad (34)$$

그리고, $|I_{ik}|^2$ 도 역시 식 (19)로부터

$$|I_{ik}|^2 \approx (B_{ik} - b_{ik})^2 E_k^2 + B_{ik}^2 E_k^2 - 2B_{ik} (B_{ik} - b_{ik}) E_i E_k \quad (35)$$

와 같이 된다.

入力되는 測定値는 狀態벡터와 線路構成要素에 關 계되어 있으므로 어떤 測定値에 變動이 發生하였을 경우 系統構成상 連系部分의 測定値에 影響을 미치게 된다. 따라서, 이러한 關係式은 식 (36)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta Z_{i(t)} = SC_{ik} \cdot \Delta Z_{k(t)} = \left(\sum_{j=1}^n \frac{\partial Z_{i(t)}}{\partial X_j} \cdot \frac{\partial X_j}{\partial Z_{k(t)}} \right) \Delta Z_{k(t)} \quad (i \neq k) \quad (36)$$

여기서, SC_{ik} : 感度係數

$\Delta Z_{k(t)}$: k側의 測定値 $Z_{k(t)}$ 의 變化分

$\Delta Z_{i(t)}$: $\Delta Z_{k(t)}$ 가 i側의 測定値 $Z_{i(t)}$ 에 미치는 影響

이로부터 感度係數를 算定하면 표 1과 같다.

표 1. 感度係數

Table 1. Sensitivity coefficients ($Z_i = SC_{ik} \cdot Z_k$).

$Z_i \setminus Z_k$	Q_k	Q_{ki}	E_k
Q_i	$\frac{B_{ii} + b_i}{b_k - B_{kk}}$	$\frac{B_{ii} - b_i}{B_{ki}}$	$-B_{ik}$
Q_{ik}	$\frac{B_{ik} - 2b_{ik}}{B_{kk} - b_k}$	$\frac{B_{ik} - 2b_{ik}}{B_{ki}}$	$-B_{ik}$
E_i	$\frac{1}{B_{ik}}$	$-\frac{1}{B_{ki}}$	$\frac{2b_{ik} - B_{ki}}{B_{ki}}$

$Z_i \setminus Z_k$	Q_i	Q_{ik}	E_i
Q_i	1	$\frac{B_{ii} - b_i}{2b_{ik} - B_{ik}}$	$b_i - B_{ii}$
Q_{ik}	$\frac{2b_{ik} - B_{ik}}{B_{ii} - b_i}$	1	$B_{ik} - 2b_{ik}$
E_i	$\frac{1}{b_i - B_{ii}}$	$\frac{1}{B_{ik} - 2b_{ik}}$	1
$ I_i ^2$			$2B_{ii}$
$ I_{ik} ^2$			$-2B_{ik}(B_{ik} - b_{ik})$

$Z_i \setminus Z_k$	P_k	P_{ki}
P_i	$\frac{B_{ii} - b_i}{b_k - B_{kk}}$	$\frac{B_{ii} - b_i}{B_{ki}}$
P_k	1	$\frac{b_k - B_{kk}}{B_{ki}}$
P_{ik}	$\frac{B_{ik}}{B_{kk} - b_k}$	-1
P_{ki}	$\frac{B_{ki}}{b_k - B_{kk}}$	1

만일, $Z_{i(t)}$ ($i=1, \dots, m$)이 標準化變數를 통하여 不良情報로 判定되었을 경우 $Z_{i(t)}$ 의 實際變化量은 不良情報에 의한 것일 수도 있고, 系統構成變化에 의한 것일 수도 있으며, 이들 각각에 대한 것들

위의 感度係數를 통하여 識別할 수가 있다. 즉, $\Delta Z_{i(t)}$ 가 不良情報이면 隣接系統 $Z_{k(t)}$ 에도 $\Delta Z_{k(t)}$ 가 發生된다. 또한, 感度係數로부터 推定變化量 $\Delta Z_{i(t)}^e = SC_{ik} \cdot \Delta Z_{k(t)}$ 이며, 이 $\Delta Z_{i(t)}^e$ 와 $\Delta Z_{i(t)}$ 가 거의 같은 變化量을 나타내게 되고, 그 評價基準值를 E_v 라 하면 식 (37)과 같이 된다.

$$E_v = \Delta Z_{i(t)} / \Delta Z_{i(t)}^e \quad (37)$$

標準化變數를 통하여 檢출된 不良情報 중에는 注入電力 및 電流와 線路潮流 및 電流, 그리고 母線電壓으로 이루어지는 測定値 중 어느 것이 되겠으나 系統의 受給條件에는 變化가 없다는 條件에서 볼 때에 注入電力에 나타나는 것은 不良情報로 判定할 수 있으나, 注入電流와 線路潮流, 電流 및 母線電壓에 대해서는 系統構成變化를 포함하는 두가지의 경우를 지니고 있다고 생각할 수 있다. 따라서, 이때는 위의 感度係數로부터 두 경우 중 어느 것인가를 다음과 같은 基準으로 識別한다.

(1) 測定地點으로부터 收集된 線路潮流 및 電流가 兩端사이의 感度係數와의 關係를 成立시키는가를 확인한다.

(2) 成立이 안될 경우에는 단순한 不良情報로 採擇될 수 있으나, 만일 成立이 될 경우에는 線路의 測定値와 母線注入 測定値와의 感度係數를 통한 評價基準值를 確認해 본다.

(3) (2)에서의 感度係數에 의한 評價基準值로부터 系統의 構成狀態가 變化되었음을 確認한다.

6. 測定値의 修正

5節에서 不良情報가 系統構成變化로 識別되었을 경우는 系統의 새로운 構成要素를 形成하여야 하나, 測定値의 단순한 誤情報인 경우는 그 測定値를 修正하여 入力시킴으로써 보다 精度있는 推定値를 얻을 수가 있다.

지금, 推定機差벡터 r 은

$$r = z - h(\hat{x}) \quad (38)$$

와 같이 되며, 動搖點에서의 殘差벡터를 r_1 이라 하면 다음과 같이 된다.

$$r_1 = r + \Delta r = z + \Delta z - h(\hat{x} + \Delta \hat{x}) \quad (39)$$

이 때, $h(\hat{x} + \Delta \hat{x}) \approx h(\hat{x}) + H(\hat{x}) \Delta \hat{x}$ 라 하면 식(39)로부터

$$\begin{aligned} \Delta r &= z + \Delta z - h(\hat{x}) - H(\hat{x}) \Delta \hat{x} - z + h(\hat{x}) \\ &= \Delta z - H(\hat{x}) \Delta \hat{x} \end{aligned} \quad (40)$$

와 같이 된다.

그러므로, 식 (40)에 식 (5)의 우변 제 2 항 $\Delta \hat{x}$ 를代入시키면 G 를 利得行列이라 할 때 Δr 은 다음과 같이 된다.

$$\Delta r = [I - H(\hat{x})G^{-1}H^T(\hat{x})R^{-1}] \Delta z \quad (41)$$

따라서, r 의 共分散行列 $W = R - H(\hat{x})G^{-1}H^T(\hat{x})$ 라 하면

$$\Delta r = W R^{-1} \Delta z \quad (42)$$

와 같이 바꾸어 표현할 수 있다.

또한, 修正測定値를 $Z_i(n)$ 이라 하면

$$Z_i(n) = Z_i + \Delta Z_i \quad (i=1, \dots, m) \quad (43)$$

가 되고, 修正殘差成分을 $r_i(n)$ 라 하면

$$r_i(n) = r_i + \Delta r_i \quad (i=1, \dots, m) \quad (44)$$

이 된다. 그러므로 이 Δz_i 는 $r_i(n)$ 이 0이 되도록 하는 값을 가져야 하므로 식 (42)로부터 구한 $\Delta z = (1/W R^{-1}) \Delta r$ 로부터 Δz_i 는 다음과 같이 된다.

$$\Delta z_i = (1/W_i R_i^{-1}) \cdot (-r_i) \quad (45)$$

따라서, 구하고자 하는 修正된 測定値는 식 (45)를 (43)에 代入시켜 다음과 같이 구하게 된다.

$$Z_i(n) = Z_i - r_i / W_i R_i^{-1} \quad (46)$$

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

7. 事例研究

本論文에서는 그림 4와 같은 25Bus 모델系統으로부터 電流를 포함한 각 測定値를 이용하여 그림 3의 過程에 따라 狀態値를 推定하였다.

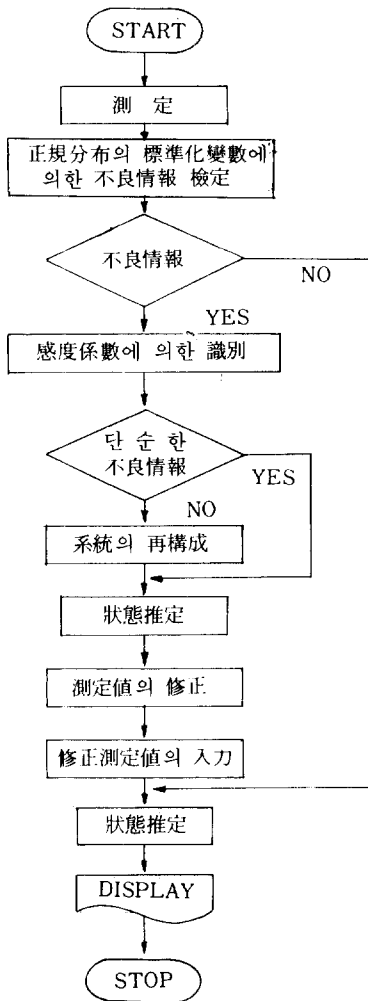


그림 3. 흐름도

Fig. 3. Flow chart for the state estimation.

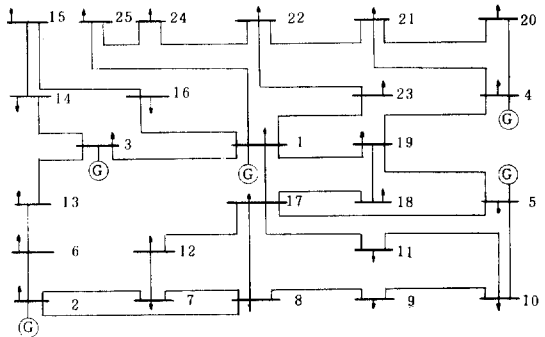


그림 4. 모델系統

Fig. 4. Model power system.

모델系統에서는 總 145개의 測定値로부터 48개의 狀態値를 推定하였으며, 이 때, 加重行列의 對角要素는 10^4 으로 하였고, 電流成分포함시 이 成分은 10^6 으로 設定하였다.

표 2는 電流測定成分을 除外하였을 경우의 推定値와 實際値를 誤差와 함께 比較한 것이며, 표 3은 同一測定値數하에서 電流測定成分을 고려하였을 경우의 推定値와 實際値를 誤差와 함께 比較한 것이다. 이로부터 推定한 結果의 最大誤差程度가, 電壓의 크기 및 位相角이 표 2에서는 0.0111[%], 0.1487[%]이며, 표 3에서는 0.0083[%], 0.1359

표 2. 電流測定成分을 除外하였을 경우의 推定値와 實際値 比較

Table 2. Comparison of estimated values and true values by exception of current measurement component.

BUS	MAG. TR.	MAG. ES.	ERL%]	ANG. TR.	ANG. ES.	ERL%]
1	1.000000	1.000000	0.0000	0.000000	0.000000	0.0000
2	0.830354	0.830414	0.0072	0.275461	0.275334	0.0461
3	0.923129	0.923145	0.0017	0.156939	0.157032	0.0593
4	0.836037	0.826093	0.0067	0.023534	0.023497	0.1487
5	0.821640	0.821715	0.0091	0.281574	0.281428	0.0519
6	0.857787	0.857833	0.0054	0.161340	0.161394	0.0335
7	0.822832	0.822889	0.0069	0.156901	0.156801	0.0637
8	0.823987	0.824053	0.0080	0.142927	0.142825	0.0714
9	0.810518	0.810594	0.0094	0.128719	0.128622	0.0759
10	0.818690	0.818781	0.0111	0.166184	0.166079	0.0632
11	0.829935	0.830017	0.0099	0.133068	0.132973	0.0714
12	0.831269	0.831326	0.0069	0.124954	0.124868	0.0488
13	0.869538	0.869579	0.0037	0.146129	0.146202	0.0500
14	0.905469	0.905450	0.0021	-0.028321	-0.028322	0.0035
15	0.914644	0.914624	0.0022	-0.051784	-0.051792	0.0154
16	0.937345	0.937333	0.0013	-0.050884	-0.050885	0.0020
17	0.843488	0.843553	0.0077	0.117992	0.117912	0.0678
18	0.829930	0.829992	0.0075	0.065458	0.065408	0.0744
19	0.841327	0.841380	0.0063	0.053688	0.053634	0.0949
20	0.827116	0.827166	0.0060	-0.032984	-0.032995	0.0334
21	0.841892	0.841932	0.0048	-0.068564	-0.068569	0.0071
22	0.864965	0.864975	0.0012	-0.098915	-0.098918	0.0030
23	0.941400	0.941417	0.0018	-0.061721	-0.061736	0.0243
24	0.899295	0.899195	0.0111	-0.135534	-0.135548	0.0103
25	0.923799	0.923697	0.0110	-0.125999	-0.126077	0.0619

표 3. 電流測定成分을 考慮하였을 경우의 推定値와 實際値 比較

Table 3. Comparison of estimated values and true values considering current measurement component.

BUS	MAG. TR.	MAG. ES.	ERL%]	ANG. TR.	ANG. ES.	ERL%]
1	1.000000	1.000000	0.0000	0.000000	0.000000	0.0000
2	0.830354	0.830401	0.0057	0.275461	0.275307	0.0559
3	0.923129	0.923140	0.0012	0.156939	0.156971	0.0204
4	0.836037	0.836035	0.0002	0.023534	0.023502	0.1359
5	0.821640	0.821674	0.0041	0.281574	0.281451	0.0437
6	0.857787	0.857811	0.0028	0.161340	0.161305	0.0217
7	0.822832	0.822877	0.0055	0.156901	0.156790	0.0707
8	0.823987	0.824037	0.0061	0.142927	0.142822	0.0735
9	0.810518	0.810572	0.0067	0.128719	0.128618	0.0785
10	0.818690	0.818748	0.0071	0.166184	0.166074	0.0662
11	0.829935	0.829990	0.0066	0.133068	0.132976	0.0691
12	0.831269	0.831309	0.0048	0.124954	0.124865	0.0712
13	0.869538	0.869555	0.0020	0.146129	0.146119	0.0068
14	0.905469	0.905458	0.0012	-0.028321	-0.028289	0.1130
15	0.914644	0.914632	0.0013	-0.051784	-0.051759	0.0483
16	0.937345	0.937335	0.0011	-0.050884	-0.050867	0.0334
17	0.843488	0.843524	0.0043	0.117992	0.117917	0.0636
18	0.829930	0.829944	0.0017	0.065458	0.065404	0.0825
19	0.841327	0.841325	0.0002	0.053688	0.053642	0.0857
20	0.827116	0.827104	0.0015	-0.032984	-0.033000	0.0485
21	0.841892	0.841898	0.0007	-0.068564	-0.068588	0.0350
22	0.864965	0.864960	0.0006	-0.098915	-0.098933	0.0182
23	0.941400	0.941417	0.0018	-0.061721	-0.061742	0.0340
24	0.899295	0.899220	0.0083	-0.135534	-0.135518	0.0118
25	0.923799	0.923755	0.0048	-0.125999	-0.125998	0.0008

(%)로서 결과가 두가지 모두 만족스러웠다.

표 4는 狀態推定結果로부터 구한 推定電流値와 實際値와의 比較를 나타낸 것으로서 最大誤差가 0.2576(%)인 양호한 結果를 얻었다.

따라서, 測定벡터成分에 母線의 注入電流와 線路電流를 포함시켜 狀態値를 推定하여도 거의 同一한

표 4. 電流成分의 推定値와 實際値 比較

Table 4. Comparison of estimated values and true values of current component.

CURRENT	TR. VALUES	ES. VALUES	ER[%]
(1)	3.768096	3.767742	0.0094
(2)	1.232799	1.231541	0.1020
(3)	1.193310	1.194034	0.0607
(4)	0.085269	0.085292	0.0270
(5)	4.984509	4.982267	0.0450
(6)	0.033977	0.033964	0.0383
(7)	0.036925	0.036933	0.0217
(8)	0.092053	0.092018	0.0380
(9)	0.038055	0.038047	0.0210
(10)	0.037299	0.037288	0.0295
(11)	0.003630	0.003627	0.0826
(12)	0.014472	0.014464	0.0553
(13)	0.091126	0.091122	0.0044
(14)	0.054765	0.054753	0.0219
(15)	0.119534	0.119533	0.0008
(16)	0.113815	0.113809	0.0053
(17)	0.562214	0.561939	0.0489
(18)	0.036296	0.036292	0.0110
(19)	0.035319	0.035410	0.2576
(20)	0.100713	0.100708	0.0050
(21)	0.063348	0.063295	0.0837
(22)	0.060014	0.060015	0.0017
(23)	0.028209	0.028202	0.0248
(24)	0.030913	0.030953	0.1294
(25)	0.080736	0.080746	0.0124
(1-3)	0.311124	0.311211	0.0280
(1-16)	0.295830	0.295798	0.0108
(1-17)	0.390611	0.390325	0.0732
(1-19)	0.141379	0.141361	0.0127
(1-23)	0.102798	0.102819	0.0204
(1-25)	0.131835	0.131857	0.0167
(2-6)	0.115894	0.115671	0.1924
(2-7)	0.155903	0.155809	0.0603
(2-8)	0.152236	0.152138	0.0644
(3-13)	0.113942	0.113943	0.0009
(3-14)	0.206329	0.206332	0.0015
(4-19)	0.219125	0.219004	0.0552
(4-20)	0.199965	0.199857	0.0540
(4-21)	0.093121	0.093108	0.0140
(5-10)	0.159069	0.159058	0.0069
(5-17)	1.220429	1.219867	0.0460
(5-19)	0.535208	0.534847	0.0674
(6-13)	0.058298	0.058175	0.2110
(7-8)	0.005957	0.005960	0.0504
(7-12)	0.025886	0.025859	0.1043
(8-9)	0.007854	0.007850	0.0509
(8-17)	0.025054	0.025022	0.1277
(9-10)	0.012077	0.012077	0.0000
(10-11)	0.015541	0.015531	0.0643
(11-17)	0.005502	0.005489	0.2363
(12-17)	0.005129	0.005127	0.0390
(14-15)	0.083046	0.083123	0.0927
(15-16)	0.107614	0.107615	0.0009
(17-18)	0.041423	0.041403	0.0483
(18-19)	0.005142	0.005138	0.0778
(20-21)	0.045902	0.045937	0.0763
(21-22)	0.099845	0.099783	0.0621
(22-23)	0.042669	0.042689	0.0469
(22-24)	0.046617	0.046501	0.2488
(24-25)	0.037244	0.037307	0.1692

結果를 얻는 것으로부터 이들 電流値를 測定벡터成分에 포함시켜 測定値選定에 사용할 수 있음을 알았다.

표 5는 不良情報의 檢出結果를 나타낸 것으로서 線路의 回線事故가 있는 경우를 포함한 CASE1~CASE5에 걸쳐 檢出을 시행하였다.

이 때에는 系統의 運用條件變化가 測定瞬間 미미하며, 線路事故에 의한 回線의 變化에서도 需給은 變하지 않는 것으로 하였다. 이 때, 檢出은 提示한 3개의 變化벡터에 의한 標準化變數를 통하여 遂行하였으며, 有意水準은 $\alpha=0.05$ 로 정하였고, 따라서, $|T_i|=1.96$ 을 棄却限界로 정하였다. 그리고, 이로부터 얻는 檢出結果를 볼 때에 (III)의 方法이 그 중 가장 効用性이 있음을 알 수 있었다. 또한, 線路潮流 및 線路電流가 不良情報로 檢出되었을 경우에는 感度係數를 兩端의 값들에 適用시켜 -1의 關係에 接近하는가를 확인하며, 이 때, 接近하는 것이 확인되었을 경우에는 다시 注入電力 및 電壓들과 比較하여 評價基準値가 얼마인가를 算定하였다. 이로부터, 線路의 回線變化가 發生한 부분은 그 兩端의 母線에 連結된 隣接線路和 함께 상당히 큰 값을 갖게됨을 알 수 있으며, 한편, 이 중 隣接線路는 事故線路보다는 적은 값을 갖게 되었다. 事故線路의 評價基準値 急上昇은 이미 이를 구하는 關係式이 事故前의 線路定數에 의해 이루어져 있는 感度係數로부터 구하기 때문이며, 隣接線路의 測定値變化보다는 回線變化線路의 測定値變化가 크기 때문이다. 그리고, 評價基準値도 事故線路의 값이 모두 ± 310 이상이었으며, 隣接線路는 ± 250 이하임을 알 수 있었다. 따라서, 이러한 評價基準値를 통하여 線路의 構成狀態變化도 파악할 수 있고, 아울러 더욱 많은 시뮬레이션에 의해 評價基準値를 구하면 더욱 적절하게 系統의 狀態를 파악할 수 있으며, 이에 대한 깊은 研究의 필요성이 요망된다.

한편, 識別된 情報가 단순한 不良情報라면 測定値의 修正을 통하여 推定함으로써 표 6과 같이 보다 實際値에 가까운 精度있는 推定値(*표시)를 얻을 수 있었다. 그리고, 지금까지의 모든 推定은 初期値를 $1<0$ 으로 정하였고, $|\Delta V|=0.001[\text{pu}]$, $|\Delta \theta|=0.001[\text{rad}]$ 으로 정하였다.

8. 結論

電力系統의 效果的인 運用에 필요한 狀態推定을 모델系統을 통하여 提示한 技法으로 실시해본 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

표 5. 不良情報의 檢出結果

Table 5. Results of the bad data detection.

CASE 1

實際不良情報位置	標準化變數 檢出結果			(III)의 評價基準值	確認된 不良情報
	(I)	(II)	(III)		
P(19) P(20)	P(19)=6.1892 P(20)=7.1731	Q(8)=4.8302 Q(11)=10.7221 Q(12)=2.2850	P(19)=10.6911 P(20)=5.4259	P(19)=495.20 P(20)=158.24	P(19) P(20)

CASE 2

實際不良情報位置	標準化變數 檢出結果			(III)의 評價基準值	確認된 不良情報
	(I)	(II)	(III)		
P(19) P(20) 線路(24-22) 2回線→1回線	P(4)=3.0355 P(19)=2.0662	Q(8)=9.8684 Q(12)=6.6819	P(19)=2.5279 P(20)=4.7314 P(24-22)=2.2414	P(19)=431.10 P(20)=250.21 P(24-22)=318.72	P(19) P(20) 線路(24-22)

CASE 3

實際不良情報位置	標準化變數 檢出結果			(III)의 評價基準值	確認된 不良情報
	(I)	(II)	(III)		
線路(1-25) 2回線→1回線	Q(1)=5.0837 Q(21)=3.0316 P(1-25)=2.6303 P(24-22)=3.2400 P(25-24)=2.2693 Q(16-1)=2.7920 Q(22-21)=2.0522	Q(11)=10.7349 Q(12)=3.2765	P(1-25)=2.9814 P(25-24)=3.2316 P(24-22)=3.1954 P(23-1)=2.4306 P(22-23)=1.9925 Q(1-25)=3.5434 Q(17-1)=2.8045 Q(19-1)=2.1544 I(1-19)=3.5103	P(1-25)=2652.90 P(25-24)=142.38 P(24-22)=212.50 P(23-1)=243.40 P(22-23)=127.91 Q(1-25)=-945.38 Q(17-1)=-217.30 Q(19-1)=-231.67 I(1-19)=237.66	線路(1-25)

CASE 4

實際不良情報位置	標準化變數 檢出結果			(III)의 評價基準值	確認된 不良情報
	(I)	(II)	(III)		
線路(20-21) 2回線→1回線	P(21)=2.4729 Q(1)=3.3907 Q(21)=4.2984 Q(22)=1.9919 P(4-19)=2.1495 Q(21-4)=3.1011 Q(4-20)=2.9632 I(9-10)=3.2122	Q(11)=11.3759	P(20-21)=2.4134 Q(4-19)=2.0051 Q(4-20)=3.2410 Q(20-21)=3.4291 I(20-21)=2.7754	P(20-21)=724.07 Q(4-19)=-76.43 Q(4-20)=-131.08 Q(20-21)=-515.66 I(20-21)=2155.40	線路(20-21)

CASE 5

實際不良情報位置	標準化變數 檢出結果			(III)의 評價基準值	確認된 不良情報
	(I)	(II)	(III)		
P(19) P(20) P(12-7)	P(7)=1.9890 P(12)=3.1118 P(19)=3.9630 P(20)=4.7432 P(12-7)=8.0419	Q(11)=10.8770	P(19)=7.8950 P(20)=4.1011 P(12-7)=7.0545	P(19)=495.16 P(20)=158.17 P(12-7)=323.06 (線路兩端間)	P(19) P(20) P(12-7)

표 6. 修正된 測定値의 再入力에 의한 推定結果

Table 6. Results of estimation by reinput of modified measurement values.

BUS	MAG. TR,	MAG. ES,	MAG.ES.*	ANG. TR,	ANG. ES,	ANG.ES.*
1	1.000000	1.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.830354	0.830779	0.830408	0.275461	0.274890	0.275292
3	0.923129	0.923250	0.923145	0.156939	0.157525	0.156981
4	0.836037	0.835270	0.836015	0.023534	0.020430	0.023439
5	0.821640	0.821982	0.821679	0.281574	0.280112	0.281419
6	0.857787	0.857976	0.857815	0.161340	0.161554	0.161308
7	0.822832	0.823273	0.822884	0.156901	0.156151	0.156768
8	0.823987	0.824457	0.824045	0.142927	0.142127	0.142801
9	0.810518	0.811194	0.810585	0.128719	0.127687	0.128592
10	0.818690	0.819425	0.818761	0.166184	0.164882	0.166045
11	0.829935	0.830654	0.830004	0.133068	0.131997	0.132950
12	0.831269	0.831609	0.831315	0.124954	0.124148	0.124842
13	0.869538	0.869696	0.869559	0.146129	0.146483	0.146125
14	0.905469	0.905393	0.905462	-0.028321	-0.027692	-0.028277
15	0.914644	0.914505	0.914634	-0.051784	-0.051280	-0.051749
16	0.937345	0.937209	0.937335	-0.050884	-0.050531	-0.050859
17	0.843488	0.843604	0.843526	0.117992	0.117029	0.117893
18	0.829930	0.828124	0.829907	0.065458	0.064267	0.065372
19	0.841327	0.839871	0.841292	0.053688	0.050510	0.053533
20	0.827116	0.826033	0.827071	-0.032984	-0.034456	-0.033022
21	0.841892	0.841852	0.841888	-0.068564	-0.069327	-0.068596
22	0.864965	0.865184	0.864957	-0.098915	-0.098949	-0.098927
23	0.941400	0.941388	0.941413	-0.061721	-0.061521	-0.061736
24	0.899295	0.899497	0.899220	-0.135534	-0.134871	-0.135500
25	0.923799	0.923860	0.923752	-0.125999	-0.125465	-0.125984

* : estimation by modified measurement values

(1) 推定理論에서의 一般的인 測定벡터成分에 母線의 注入電流 및 線路電流를 測定成分으로 포함시켜 推定한 結果 効用性있는 狀態値를 얻었으며, 따라서, 測定벡터의 選擇範圍를 擴張시켰고, 아울러, 狀態推定을 위하여 最適測定地點을 選定한다면 이 電流成分도 이용할 수 있도록 하였다.

(2) 不良情報를 時間帶에 따른 測定値의 變化벡터로부터 構成되는 正規分布의 標準化變數를 통하여 檢定하였고 동시에 그 位置를 파악함으로써 推定前에 不良情報를 檢定하도록 하였다.

(3) 把握된 不良情報位置가 測定値의 단순한 不良情報인가 系統構成變化에 의한 것인가를 感度係數를 適用하여 識別하였으며, 단순한 不良情報의 경우에는 推定殘差벡터를 통하여 測定値를 修正한 후 再入力시켜 보다 精度 높은 狀態値를 推定하였다.

한편, 여기에서는 線路의 回線事故時도 需給은 같다고 한 후 狀態値를 推定하였으나, 系統變化에 더욱 원활하게 대처하기 위해서는 需給도 아울러 變化될 때의 系統構成變化와 단순한 不良情報에 대한 識別機能에 대해 보다 세밀한 研究가 계속되어야 하겠다.

參考文獻

- 1) F. Zhuang, R. Balasubramanian; "A Transformation-Decoupled Estimator for Power System State Estimation", IEEE Trans. Vol. PAS-104, No. 7, July 1985.
- 2) N. D. Rao, L. Roy; "A Cartesian Coordinate Algorithm for Power System State Estimation", IEEE Trans. Vol. PAS-102, No. 5, May 1983.
- 3) A. Keyhani, A. Abur; "Comparative Study of Polar and Cartesian Co-ordinate Algorithms for Power System State Estimation Problems", IEE Proceedings, Vol. 132, Pt. C, No. 3, May 1985.
- 4) F. Zhuang, R. Balasubramanian; "Bad Data Suppression in Power System State Estimation with a Variable Quadratic-Constant Criterion", IEEE Trans. Vol. PAS-104, No. 4, April 1985.

- 5) R. L. Lugtu, D. F. Hackett, et al ; "Power System State Estimation : Detection of Topological Errors", IEEE Trans. Vol. PAS-99, No. 6, Nov/Dec 1980.
- 6) Wiley W. Kotiuga, M. Vidyasagar ; "Bad Data Rejection Properties of Weighted Least Absolute Value Techniques Applied to Static State Estimation", IEEE Trans, Vol, PAS-101, No. 4, April 1982.
- 7) Kenneth I, Geisler ; "Ampere Magnitude Line Measurements for Power System State Estimation", IEEE Trans. Vol. PAS-103, No. 8, August 1984.
- 8) Stagg and EI-Abiad ; "Computer Methods in Power System Analysis" McGraw-Hill, 1968.
- 9) J. Arrillaga, C. P. Arnold, B. J. Harker ; "Computer Modelling of Electrical Power Systems", Jone Wiley & Sons, 1983.
- 10) 深尾毅, 豊田淳一 : "電力系統へのコンピュータの応用", 産業図書, 1972.
- 11) A. Garcia, A. Monticelli, P. Abreu ; "Fast Decoupled State Estimation and Bad Data Processing", IEEE Trans. Vol. PAS- 98, No. 5 Sept./Oct. 1979.
- 12) 金俊鉉外 : "効果적인 不良情報除去法에 의한電力系統에서의 狀態推定에 관한 研究", 大韓電氣学会誌, Vol. 33, No. 9, 1984.