

WLAV 상태추정에 의한 전력계통 파라미터 에러 추정에 관한 연구

論 文
49A-9-4

Identification of Parameter Errors in Electric Power Systems by WLAV State Estimation

金 鴻 來* · 權 亨 錫** · 金 東 浚***

(Hong Rae Kim · Hyung-Seok Kwon · Dong-Jun Kim)

Abstract - This paper addresses the issues of the parameter error detection and identification in electric power systems. In this paper, the parameter error identification and estimation is carried out as part of the state estimation. A two stage estimation procedure is used to detect and identify the parameter errors. The suspected parameters are identified by the WLAV state estimator at the first stage. A new WLAV state estimator adding the suspected system parameters in the state vector is used to estimate the exact values of parameter errors. Supporting examples are given by using IEEE 14 bus system.

Key Words : Power System State Estimation, Topology Errors, Weighted Least Absolute Value, Linear Programming

1. 서 론

안정적이고 경제적인 계통의 운용을 위해 사용되는 경제급전(economic dispatch), 상정사고해석(contingency analysis), 자동발전제어(AGC: automatic generation control), 안전도해석(security analysis), 온라인 조류계산(on-line load flow)과 같은 응용 프로그램들의 성능 및 정확도 등은 그 계산에 사용되는 데이터의 질에 상당히 영향을 받게 된다. 상태추정(state estimation)은 원방감시제어시스템(SCADA: supervisory control and data acquisition system)에 의해 수집된 여러 가지 측정데이터와 계통 파라미터(parameter) 값에 대한 정보를 이용하여 현재 계통의 정확한 상태 데이터를 제공하게 되며, 이렇게 구축된 데이터베이스는 계통운용 프로그램의 계산에 기초 데이터로 사용된다. 세계적으로 전력 산업의 구조개편이 이루어지고 있는 현재와 같은 상황에서는 지역 한계비용(locational marginal price) 등의 계산을 위하여 상태추정기에 의한 정확한 실시간 전력조류 계산의 필요성이 더욱 크게 부각되고 있다[1].

전력계통 상태추정은 1969년 Fred Schweppe에 의해 처음으로 전력계통에 응용되기 시작하였으며[2], 현재는 EMS내에서 전력계통의 안정된 운용을 위하여 사용되는 중요한 기본기능의 하나가 되었다[3, 4]. 상태추정의 주요 기능은 측정데이터로부터 에러를 여과하고(data purifier) 계통의 상태(voltage profile)를 추정함으로써 현재 계통에 대한 정확한

데이터베이스를 구축하는 것으로 그 동안 다양한 연구와 개발이 이루어져 왔다[5-8]. 그런데, SCADA가 제공하는 데이터는 측정과정이나 전송과정에서 에러를 포함할 수 있으며, 이 데이터를 이용하여 계산된 실시간 교류 조류(real-time AC load flow)는 부정확할 가능성이 있다. 따라서 이러한 에러를 포함한 데이터를 이용하여, 정확한 실시간 교류 조류계산을 전제로 운용되는 EMS 내의 기능들을 운용하는 것은 어려움이 있다. EMS내의 계통운용기능들은 상태추정기에 의해 제공되는 데이터베이스를 이용하여 그 기능을 수행할 수 있다. 상태추정의 연산에는 선로의 임피던스, 변압기 탭의 위치 등과 같은 파라미터 데이터와 모선전압, 모선전력, 조류전력 등에 대한 실시간 측정데이터가 필요하다. 따라서, 현재 계통의 상태를 정확하게 추정하는 데에는 파라미터 데이터와 측정데이터의 정확도가 그 관건이 된다.

아날로그 측정데이터는 측정과정이나 데이터의 전송과정에서 잡음의 영향을 받거나 오차가 생길 수 있으며, 이를 흔히 불량데이터(bad data)라고 부른다. 불량데이터의 처리에 대해서는 그 동안 많은 연구가 이루어져 왔으며, 현대의 EMS 내에서 이러한 불량데이터의 처리는 상태추정의 부기능(sub-function)으로 사용되고 있다[9-12]. 그러나, 전력계통에 파라미터 에러가 발생하였을 때, 그 에러가 상태추정의 결과에 미치는 영향은 불량데이터가 측정데이터에 포함된 것 이상으로 커질 수 있음에도 불구하고, 이의 처리에 대한 연구는 매우 부진한 상태이다.

파라미터 에러 처리에 관한 초기 연구는 Merrill과 Schweppe에 의해 이루어졌으며, 이들은 상태추정에서 사용하는 상태벡터에 계통 파라미터를 새로운 상태벡터로 추가하여 상태추정을 수행함으로써 계통 파라미터를 추정하였다[13]. 그러나, 이 방법은 추정하고자 하는 파라미터와 관련된 측정데이터의 여유도(redundancy)가 상당히 커야 하고, 새로

* 正 會 員 : 順天鄕大 情報技術工學部 助教授 · 工博

** 正 會 員 : 順天鄕大 電氣電子工學科 博士課程

*** 正 會 員 : 淸州大 電子 · 情報通信 · 半導體工學部
助教授 · 工博

接受日字 : 2000年 6月 19日

最終完了 : 2000年 7月 24日

운 상태벡터가 추가됨으로써 상태추정의 연산이 매우 복잡해지고 연산시간이 길어지는 큰 단점이 있다. 또한, 불량데이터가 측정데이터에 포함된 상황에서는 파라미터의 추정이 거의 불가능하다.

Debs는 Kalman filter를 이용한 순환 알고리즘(recursive algorithm)을 적용하여 계통 파라미터를 추정하는 방법을 제안하였다[14]. 이 방법에서는 계통의 파라미터를 상수로 취급하여 연산에 사용하였으나 실제 계통에서 계통의 파라미터는 시간에 따라 변할 수 있으므로 제안된 알고리즘에 타당성이 결여되어 있다고 할 수 있다. 더욱이 대형계통에 이 알고리즘을 적용할 경우, 상태추정의 연산과정에서 수렴성의 문제가 생길 가능성도 있다. 90년대에 들어서 Liu 등이 상태추정의 결과로부터 계산되는 측정 잉여오차(measurement residuals)에 근거한 파라미터 추정기법을 제안하였다. 이들은 상태추정과 파라미터 추정의 과정을 분리하여 계산하거나[15], 파라미터의 추종(tracking)기법[16]을 사용하였으나, 두 가지 방법 모두 Merrill과 Schweppe의 방법과 마찬가지로 높은 측정여유도를 필요로 하기 때문에 계통의 가관측성(observability) 확보에 어려움이 예상된다.

국내의 경우, 상태추정에 관련된 연구가 있어 왔으나[17, 18] 크게 활성화되지 못하였고, 계통 파라미터의 판별과 추정에 관한 연구는 아직 시도되지 못하고 있는 실정이며, 지금까지 대부분의 전력회사들은 계통의 파라미터에 대한 데이터는 정확한 것으로 가정한 상태에서 상태추정을 수행하고 있다. 그러나, 잘못된 선로정수나 변압기 탭의 위치 등을 상태추정에 이용할 경우 그 결과는 부정확하게 되며, 따라서 상태추정의 결과로 구성된 데이터베이스를 이용되는 EMS 내의 다양한 기능들이 비효율적으로 운용되거나 최악의 경우 전력계통에 장애를 일으키는 제어 동작을 하게 될 가능성이 있다.

본 논문에서는 전력계통의 파라미터 에러를 처리할 수 있는 새로운 상태추정 알고리즘을 제안하였다. 탭 절환 변압기(tap changing transformer)를 모델링하고 탭에 대한 상태변수(state variable)를 포함한 새로운 선로 조류전력(line power flows), 모선 주입전력(bus power injections)의 측정함수를 유도하였다. 또한, 자코비안 행렬의 모든 원소에 대한 방정식도 이 측정함수들을 이용하여 새롭게 유도하였으며, 개발된 전력계통 파라미터 에러 추정 알고리즘을 시험계통에 적용하여 모의실험을 함으로써 그 타당성을 검증하였다.

2. WLAV 상태 추정

Irving, Owen, Sterling에 의해 가중 최소절대치(WLAV: weighted least absolute value)를 이용한 상태추정기가 개발된 이후[19]에는 이에 대한 여러 가지 연구가 이루어져 왔다. 이 추정기의 최대의 장점은 측정 데이터에 불량 데이터들이 포함되어 있는 경우에도 매우 안정적인 추정값들을 계산해 낼 수 있다는 것이다. 단, 포함된 불량 데이터가 leverage point인 경우에는 이 추정기도 상태추정 결과에 에러를 포함할 가능성이 있다. Leverage point는 측정 데이터의 가중치에 심한 불균형이 있거나, 짧은 송전선과 긴 송전선이 같은 모선에 연결된 경우, 여러 개의 선로들이 연결된 모선의 모선유입 전력을 측정 데이터에 포함시킨 경우 등에서 나타날 수

있으며, 이에 의한 영향을 배제하고 상태추정의 강건성을 확보하려는 연구가 진행되어 왔다[20, 21].

WLAV 상태추정이 WLS(weighted least square) 상태추정에 비해 불량 데이터 처리나 수렴성 확보에 있어서 뛰어난 성능을 보인다는 결과가 계속 발표되고 있으나, 좀 더 많은 계산시간과 컴퓨터 메모리가 필요하다는 약점이 있었다. 그러나, 이는 기술적인 문제이며, 특히 최근에는 내부점 계산법(interior point method)을 이용하여 선형계획문제(linear programming)의 해를 구함으로써 연산시간을 현저히 감소시킬 수 있는 WLAV 상태추정기 연구 등 다양한 연구가 이루어져서 실시간 적용에 전혀 무리가 없는 상황이 되었다.

상태추정의 수학적 모델은 다음의 식과 같이 계통에서 측정된 데이터와 상태벡터 간의 관계에 기초한다.

$$z = h(x) + e \tag{1}$$

여기서, z : 차수 $(m \times 1)$ 의 측정벡터,
 x : 차수 $(n \times 1)$ 의 상태벡터,
 $h(x)$: 비선형 측정함수,
 e : 차수 $(m \times 1)$ 의 측정잡음벡터,
 m : 측정 데이터의 수,
 n : 상태변수의 수.

식 (1)에 기초한 WLAV 상태추정기의 목적함수는 다음과 같이 정의되며, 이 함수를 최소화하는 x 가 현재 계통의 상태를 나타낸다.

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \omega_i |z_i - h_i(x)| \tag{2}$$

식 (2)의 목적함수는 다음의 선형계획 문제를 반복계산함으로써 최소화할 수 있다[22, 23].

$$\min J(x) = \sum_{i=1}^m \omega_i \cdot (u_i + v_i) \tag{3}$$

$$s.t. \quad \Delta z^k = H(x^k) \cdot \Delta x^k + u - v \tag{4}$$

여기서, $\Delta z^k = z - h(x^k)$,
 $H(x^k) = \partial h / \partial x$ at $x = x^k$,
 $\omega_i = i$ 번째 측정값의 측정 가중치,
 $u, v =$ 음이 아닌 잉여변수(slack variables),
 $(u-v)$ 는 측정 오차(measurement residuals)를 나타냄.

WLAV 상태추정기의 interpolation property에 의해 계산결과에 대한 불량데이터의 영향은 식 (3)과 (4)의 계산과정에서 자동적으로 제거되고 정확한 측정데이터만으로 상태추정을 수행하게 된다. 따라서, 상태추정이 완료된 후 계산한 잉여오차가 허용한계보다 큰 측정데이터와 관련되어 있는 계통 파라미터에는 에러가 포함되었음을 의심할 수 있다.

3. 파라미터 에러의 추정

전력계통에 발생한 파라미터 에러를 추정할 때 고려해야 할 중요한 사항은 계통의 가관측성을 확보하는 것과 불량데이터가 포함된 측정데이터를 처리하는 방법이다. 서론에서 설명한 것처럼 계통의 파라미터를 추정하기 위하여 모든 파라미터에 대한 새로운 상태벡터를 상태방정식에 포함시킬 경우, 연산에 필요한 측정데이터를 충분히 확보하는데 상당한 어려움이 있게 되며, 따라서 가관측성 확보에도 어려움이 생기게 된다. 또한, 불량데이터와 파라미터 에러가 동시에 발생하면 상태추정의 결과에 나타난 오차가 불량데이터에 의한 것인지 파라미터 에러에 의한 것인지를 구별할 수 없으므로 이러한 경우에 대한 고려도 있어야 한다.

본 논문에서는 이러한 두 가지 문제점을 해결하면서 계통 내에 발생한 파라미터 에러를 판별하고, 그 정확한 값을 추정하기 위하여 2단계 방법을 사용한다. 먼저, 불량데이터에 영향을 받지 않는 특성을 가진 WLAV 상태추정기를 이용하여 상태추정을 수행한 후, 정규화 잉여오차(normalized residual)를 계산함으로써 파라미터 에러가 의심되는 변압기를 결정한다. 계통 내에 파라미터 에러가 발생한 경우에도 WLAV 상태추정기는 훌륭한 수렴성을 보이며, 계산된 잉여오차는 파라미터 에러가 발생한 선로와 관련된 인근의 측정 데이터들이 불량데이터인 것으로 판정하게 된다. 상태추정 연산의 특성상 파라미터 데이터는 정확한 것이고, 측정데이터가 정확하지 않은 것으로 인식하는 것이다. 따라서, 상태추정에 이용한 측정데이터 중에서 파라미터 에러가 발생한 선로와 관련된 데이터에 중대한 오차가 동시에 포함되어 있지 않다면, 정규화 오차가 큰 측정데이터들이 집중적으로 관련된 파라미터에 에러가 있는 것으로 간주할 수 있다.

일단 에러가 의심되는 파라미터가 구해지면, 다음 단계에서는 에러가 의심되는 파라미터에 대한 새로운 상태변수 p 를 기존의 상태변수 x 에 추가함으로써 식 (1)을 다음과 같은 새로운 함수로 정의한다.

$$z = h(x, p) + e \tag{5}$$

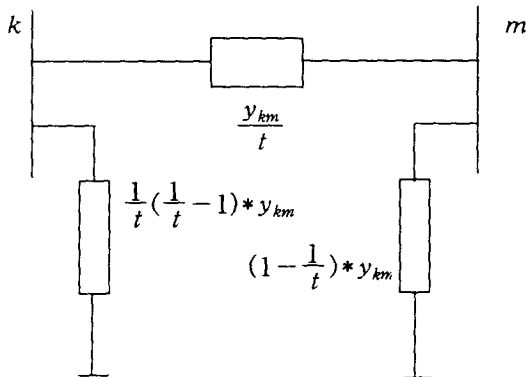


그림 1 탭 절환 변압기의 모델
Fig. 1 Model of Tap Changing Transformer

식 (5)를 이용하여 1단계의 상태추정과 같은 연산과정을 거치면 그 계산의 결과로부터 에러가 의심되는 파라미터의 값을 추정할 수 있으며, 추정된 파라미터의 값으로부터 파라미터 에러의 발생유무를 최종적으로 판단할 수 있다. 식 (5)의 새로운 계통모델을 이용하여 상태추정을 수행하기 위해서는 추가된 파라미터에 대한 상태변수를 측정함수와 자코비안 행렬 등의 연산에 고려하여야 하며, 새롭게 유도된 측정함수 및 자코비안 행렬 등을 다음에 정리하였다.

3.1 변압기 모델

전력계통에서 탭 절환 변압기는 부하의 변화에 따라 변압기의 탭을 조정함으로써 모선의 전압을 일정하게 유지하도록 운전된다. 이러한 변압기 탭의 위치 변화에 대한 정보가 부정확하면 이를 이용하여 계산한 상태추정의 결과는 부정확하게 된다. 부정확한 상태추정의 결과는 계통운영에 필요한 기타 응용 프로그램의 결과를 부정확하게 하며, 결과적으로 계통운영 전반에 영향을 주어 계통의 신뢰도 및 안정도를 유지하는데 장애를 일으킬 수 있다.

모선 k 와 m 간의 탭 절환 변압기는 그림 1과 같이 모델링할 수 있다. 그림에서 y_{km} 은 두 모선간의 어드미턴스이고, t 는 탭 비이다. 그림 1과 같은 계통의 모선 어드미턴스 행렬을 구하면 다음과 같다.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} \frac{y_{km}}{t} + \frac{1}{t} \cdot (\frac{1}{t} - 1)y_{km} & -\frac{y_{km}}{t} \\ -\frac{y_{km}}{t} & \frac{y_{km}}{t} + (1 - \frac{1}{t})y_{km} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{y_{km}}{t^2} & -\frac{y_{km}}{t} \\ -\frac{y_{km}}{t} & y_{km} \end{bmatrix}$$

3.2 측정 함수(measurement functions)

3.2.1 모선 주입전력

n 개의 모선을 가진 계통에서 임의의 모선 k 에 주입되는 유효전력 및 무효전력에 대한 측정함수는 다음과 같다.

$$P_k = \sum_{m=1}^n V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \tag{6}$$

$$Q_k = \sum_{m=1}^n V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \tag{7}$$

여기서, V_k : 모선 k 의 전압의 크기,
 V_m : 모선 m 의 전압의 크기,
 θ_{km} : 모선 k 와 모선 m 간의 전압 위상각의 차,
 G_{km}, B_{km} : 모선 어드미턴스 행렬의 k 행과 m 열의 유효 및 무효 원소값.

변압기에 연결된 모선의 경우 탭에 대한 상태변수를 추정하기 위해서는 탭을 고려한 새로운 측정함수를 유도하여야

한다. i 번 모선과 j 번 모선 사이에 변압기가 설치되어 있다고 가정했을 때 유효 및 무효 모선 주입전력에 대한 측정함수는 다음과 같다.

$$P_i = P_{i1} + P_{i2} \quad (8)$$

$$Q_i = Q_{i1} + Q_{i2} \quad (9)$$

여기서, $P_{i1} = \sum_{m=1}^n V_i V_m (G_{im} \cos \theta_{im} + B_{im} \sin \theta_{im})$,

$$P_{i2} = V_i V_m (G_{im} \cos \theta_{im} + \frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}} \sin \theta_{im}),$$

$$Q_{i1} = \sum_{m=1}^n V_i V_m (G_{im} \sin \theta_{im} - B_{im} \cos \theta_{im}),$$

$$Q_{i2} = V_i V_m (G_{im} \sin \theta_{im} - \frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}} \cos \theta_{im}),$$

x_{ij} : i 번 모선과 j 번 모선간의 리액턴스,

t_{ij} : i 번 모선과 j 번 모선간의 탭 비.

위의 식에서, P_{i1} 과 Q_{i1} 은 $m=j$ 인 경우를 제외한 주입전력의 측정함수이고, P_{i2} 와 Q_{i2} 는 $m=j$ 인 경우의 측정함수이다. 위의 식들에 쓰인 i 와 j 는 임의의 모선에 대한 일반적인 표현이므로, j 번 모선에 대한 모선 주입전력의 측정함수는 i 번 모선에 대한 측정함수의 식을 그대로 이용할 수 있다.

3.2.2 선로 조류전력

모선 k 에서 모선 m 의 방향으로 흐르는 선로 조류전력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} S_{km} &= V_k \cdot I_{km}^* + V_m \cdot I^* \\ &= V_k [V_{km}^* (-G_{km} - jB_{km})^*] \\ &\quad + V_m V_k^* (G_{km} + jB_{km})^* \\ &= V_k [(V_k - V_m)^* \cdot (-G_{km} - jB_{km})^*] \\ &\quad + V_m V_k^* (G_{km} + jB_{km})^* \end{aligned}$$

여기서, G_{km} , B_{km} : 선로 충전 어드미턴스의 1/2.

위의 식으로부터 유효 조류전력과 무효 조류전력에 대한 측정함수의 식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{km} = V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) - V_k^2 (G_{km} - G_{km}) \quad (10)$$

$$Q_{km} = V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) + V_k^2 (B_{km} - B_{km}) \quad (11)$$

선로 조류전력의 경우에도 변압기 선로에 대해서는 모선 주입전력의 측정함수에서와 마찬가지로 탭을 고려한 새로운 상태변수를 유도하여야 한다. 이 경우, 변압기 선로는 그림 1에서 볼 수 있는 것처럼 모선 k 와 모선 m 의 선로 충전 어드미턴스가 서로 다르므로, 모선 k 에서 m 쪽으로는 선로조류와 모선 m 에서 k 쪽으로는 선로조류에 대한 측정함수를 각각 유

도하여야 한다.

① 모선 k 에서 모선 m 으로 흐르는 선로조류의 측정함수

$$P_{km} = V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + \frac{1}{x_{km}} \cdot \frac{1}{t_{km}} \sin \theta_{km}) - V_k^2 (G_{km} - G_{km}) \quad (12)$$

$$Q_{km} = V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - \frac{1}{x_{km}} \cdot \frac{1}{t_{km}} \cos \theta_{km}) + V_k^2 \cdot \left[\frac{1}{x_{km}} \times \frac{1}{t_{km}} + \frac{1}{x_{km}} \times \left(\frac{1}{t_{km}^2} - \frac{1}{t_{km}} \right) \right] \quad (13)$$

② 모선 m 에서 모선 k 로 흐르는 선로조류의 측정함수

$$P_{km} = V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + \frac{1}{x_{km}} \cdot \frac{1}{t_{km}} \sin \theta_{km}) - V_m^2 (G_{km} - G_{km}) \quad (14)$$

$$Q_{km} = V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - \frac{1}{x_{km}} \cdot \frac{1}{t_{km}} \cos \theta_{km}) + V_m^2 \cdot \left[\frac{1}{x_{km}} \times \frac{1}{t_{km}} + \frac{1}{x_{km}} \times \left(1 - \frac{1}{t_{km}} \right) \right] \quad (15)$$

3.3 자코비안 행렬

자코비안 행렬 $H(x)$ 의 원소들은 측정함수를 전압의 크기와 그 위상각 그리고 변압기 탭에 대하여 편미분함으로써 구할 수 있으며, 그 개략적인 형태는 다음과 같다.

$$H(x) = \begin{bmatrix} 0 & \partial V_k / \partial V & \partial V_k / \partial t \\ \partial P_k / \partial \theta & \partial P_k / \partial V & \partial P_k / \partial t \\ \partial Q_k / \partial \theta & \partial Q_k / \partial V & \partial Q_k / \partial t \\ \partial P_{km} / \partial \theta & \partial P_{km} / \partial V & \partial P_{km} / \partial t \\ \partial Q_{km} / \partial \theta & \partial Q_{km} / \partial V & \partial Q_{km} / \partial t \end{bmatrix} \quad (16)$$

변압기와 관련이 없는 모선과 선로에 대한 자코비안 원소의 경우에는 탭에 대해 편미분한 값은 모두 0이 되고, 모선 주입전력과 선로 조류전력에 대해 편미분하여 얻은 자코비안 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \partial P_k / \partial \theta_m &= V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}), \quad k \neq m \\ \partial Q_k / \partial \theta_m &= -V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}), \quad k \neq m \\ \partial P_k / \partial \theta_k &= -(Q_k + V_k^2 B_{kk}) \\ \partial Q_k / \partial \theta_k &= P_k - V_k^2 G_{kk} \\ \partial P_k / \partial V_m &= V_k (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}), \quad k \neq m \\ \partial Q_k / \partial V_m &= V_k (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}), \quad k \neq m \\ \partial P_k / \partial V_k &= (P_k + V_k^2 G_{kk}) / V_k \\ \partial Q_k / \partial V_k &= (Q_k - V_k^2 B_{kk}) / V_k \\ \partial P_{km} / \partial \theta_k &= V_k V_m (B_{km} \cos \theta_{km} - G_{km} \sin \theta_{km}) \\ \partial P_{km} / \partial \theta_m &= -\partial P_{km} / \partial \theta_k \\ \partial Q_{km} / \partial \theta_k &= V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \\ \partial Q_{km} / \partial \theta_m &= -\partial Q_{km} / \partial \theta_k \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial P_{km} / \partial V_m &= V_k (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \\ \partial P_{km} / \partial V_k &= (V_m / V_k) \cdot (\partial P_{km} / \partial V_m) \\ &\quad - 2 V_k \cdot (G_{km} - G_{km}) \\ \partial Q_{km} / \partial V_m &= V_k (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \\ \partial Q_{km} / \partial V_k &= (V_m / V_k) \cdot (\partial Q_{km} / \partial V_m) \\ &\quad + 2 V_k \cdot (B_{km} - B_{km}) \end{aligned}$$

변압기에 연결된 모선과 변압기 선로의 경우에는 측정함수의 식에서와 마찬가지로 탭에 대한 상태변수를 고려하여 자코비안 원소의 식을 유도하여야 한다. 모선 i 와 모선 j 사이에 변압기가 설치되어 있다고 가정하고 식 (8), (9)와 식 (12)-(15)를 전압의 크기와 위상각, 탭에 대하여 편미분하면 다음의 식들을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \partial P_i / \partial \theta_j &= V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - \frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \cos \theta_{ij}), \quad i \neq j \\ \partial Q_i / \partial \theta_j &= -V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + \frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \sin \theta_{ij}), \quad i \neq j \\ \partial P_i / \partial \theta_i &= -\left[Q_i + V_i^2 \cdot \left(\frac{1}{t_{ij}^2} \cdot \left(-\frac{1}{x_{ij}} \right) + TEMP \right) \right] \\ \partial Q_i / \partial \theta_i &= P_i - V_i^2 \cdot G_{ij} \\ \partial P_i / \partial V_j &= V_i (G_{ij} \cos \theta_{ij} + \frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \sin \theta_{ij}), \quad i \neq j \\ \partial Q_i / \partial V_j &= V_i (G_{ij} \sin \theta_{ij} - \frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \cos \theta_{ij}), \quad i \neq j \\ \partial P_i / \partial V_i &= (P_i + V_i^2 G_{ij}) / V_i \\ \partial Q_i / \partial V_i &= \left[Q_i - V_i^2 \cdot \left(\frac{1}{t_{ij}^2} \cdot \left(-\frac{1}{x_{ij}} \right) + TEMP \right) \right] / V_i, \end{aligned}$$

$$TEMP = \sum_{m=1}^n B_{im} \quad (j \neq m)$$

$$\begin{aligned} \partial P_{ij} / \partial \theta_i &= V_i V_j (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \cos \theta_{ij}) \\ \partial P_{ij} / \partial \theta_j &= -\partial P_{ij} / \partial \theta_i = -V_i V_j (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \cos \theta_{ij}) \\ \partial Q_{ij} / \partial \theta_i &= V_i V_j (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \sin \theta_{ij}) \\ \partial Q_{ij} / \partial \theta_j &= -\partial Q_{ij} / \partial \theta_i = -V_i V_j (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \sin \theta_{ij}) \\ \partial P_{ij} / \partial V_j &= V_i (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \sin \theta_{ij}) \\ \partial P_{ij} / \partial V_i &= V_j (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \sin \theta_{ij}) \\ \partial Q_{ij} / \partial V_j &= -V_i (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \cos \theta_{ij}) \\ \partial Q_{ij} / \partial V_i &= 2 V_i \cdot (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2}) - V_j (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \cos \theta_{ij}) \\ \partial Q_{ij} / \partial V_j &= 2 \cdot V_i \cdot \frac{1}{x_{ij}} - V_i (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \cos \theta_{ij}) \\ \partial P_i / \partial t &= -V_i V_j (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \sin \theta_{ij}) \\ \partial Q_i / \partial t &= -2 V_i^2 (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^3}) + V_i V_j (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \cos \theta_{ij}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial Q_j / \partial t &= V_i V_j (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \cos \theta_{ij}) \\ \partial P_{ij} / \partial t &= -V_i V_j (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \sin \theta_{ij}) \\ \partial Q_{ij} / \partial t &= V_i V_j (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \cos \theta_{ij}) - 2 \cdot V_i \cdot \frac{1}{t_{ij}} \\ \partial Q_{ij} / \partial t &= V_i V_j \cdot \frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \cos \theta_{ij} \end{aligned}$$

4. 사례연구

상태추정을 위한 전력계통의 회로방정식은 행렬의 형태로 나타나게 되는데[24, 25], 결국 상태추정이란 계통의 어드미턴스 행렬(Y-bus), 자코비안 행렬, 이득(gain) 행렬과 같은 여러 행렬에 대한 반복적인 연산과정이라 할 수 있다. 따라서, 상태추정 과정에서 얼마나 효율적으로 행렬들에 대한 연산을 하느냐가 매우 중요한 문제이다. 계통의 모선 수가 늘어남에 따라 계산해야 할 행렬요소의 수는 점점 늘어나게 되며, 이에 따라 연산시간은 점점 길어지고 컴퓨터 메모리의 사용도 증가하게 된다. 본 논문에서는 상태추정에 이용되는 행렬의 많은 부분이 0으로 채워져 있는 것을 고려하여, 행렬을 0이 아닌 값만 일차원으로 최적배열(optimal ordering)함으로써 행렬의 계산시간을 단축하고 메모리를 절감할 수 있는 소행렬법(sparse matrix method)을 도입하여 효율적인 연산을 수행하였다[26, 27].

개발된 파라미터 에러 추정 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 그림 2와 같은 IEEE 14모선 계통에 파라미터 에러가 발생한 경우를 상정하여 모의실험을 실시하였다. 시험계통 각 선로의 임피던스와 서셉턴스는 표 1과 같으며, 변압기가 연결된 모선번호와 탭 비를 표 2에 정리하였다. 모선 전압의 크기와 모선 주입전력, 선로 조류전력의 측정데이터는 각각 표 3과 표 4와 같다.

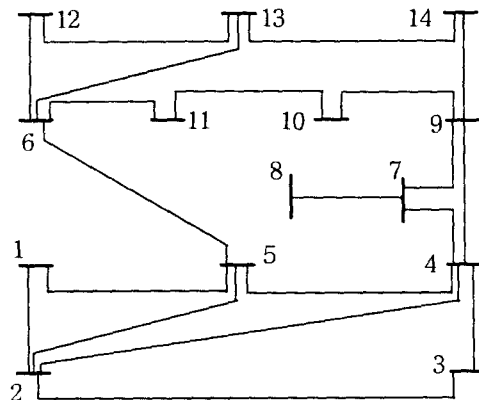


그림 2 IEEE 14모선 시험계통
Fig. 2 IEEE 14-Bus Test System

표 1 IEEE 14모선 계통의 각 선로 임피던스와 서셉턴스
Table 1 Line Impedances and Susceptances of IEEE 14-Bus System

선로번호	시작모선	끝모선	임피던스 (R, X)	서셉턴스
1	1	2	.01938, .05917	.02640
2	1	5	.05403, .22304	.02460
3	2	3	.04699, .19797	.02190
4	2	4	.05811, .17632	.02190
5	2	5	.05695, .17388	.01700
6	3	4	.06701, .17103	.01730
7	4	5	.01335, .04211	.00640
8	4	7	.00000, .20912	.00000
9	4	9	.00000, .55618	.00000
10	5	6	.00000, .25202	.00000
11	6	11	.09498, .19890	.00000
12	6	12	.12291, .25581	.00000
13	6	13	.06615, .13027	.00000
14	7	8	.00000, .17615	.00000
15	7	9	.00000, .11001	.00000
16	9	10	.03181, .08450	.00000
17	9	14	.12711, .27038	.00000
18	10	11	.08205, .19207	.00000
19	12	13	.22092, .19988	.00000
20	13	14	.17093, .34802	.00000

표 2 IEEE 14모선 계통의 변압기 탭 측정데이터
Table 2 Transformer Tap Ratio of IEEE 14-Bus System

탭 번호	시작모선	끝모선	탭 비
1	4	7	.97800
2	4	9	.96900
3	5	6	.93200

표 3 IEEE 14모선 계통의 모선전압크기와 모선주입전력의 측정데이터
Table 3 Measurement Data of Bus Voltage Magnitudes and Bus Power Injections in IEEE 14-Bus System

모선 번호	전압의 크기	모선 주입전력	
		P	Q
1	1.06000	2.32385	-0.15996
2	1.04454	0.18300	0.28300
3	1.01000	-0.94200	0.04747
4	1.01844	-0.47800	0.03900
5	1.02008	-0.07600	-0.01600
6	1.07000	-0.11200	0.04849
7	1.06187	0.00000	0.00000
8	1.09000	0.00000	0.17407
9	1.05627	-0.29500	-0.16600
10	1.05126	-0.09000	-0.05800
11	1.05705	-0.03500	-0.01800
12	1.05522	-0.06100	-0.01600
13	1.05043	-0.13500	-0.05800
14	1.03575	-0.14900	-0.05000

표 4 IEEE 14모선 계통의 선로 조류전력 측정데이터
Table 4 Line Power Flow Measurement Data of IEEE 14-Bus System

선로 번호	시작 모선	끝 모선	선로 조류전력	
			P	Q
1	1	2	1.568213	-0.195804
2	1	5	0.755645	0.035880
3	2	3	0.731986	0.033237
4	2	4	0.561268	-0.024501
5	2	5	0.415055	0.005963
6	3	4	-0.233226	0.029142
7	4	5	-0.612158	0.156751
8	4	7	0.280832	-0.094704
9	4	9	0.160872	-0.003414
10	5	6	0.440697	0.127374
11	6	11	0.073448	0.034887
12	6	12	0.077829	0.024943
13	6	13	0.177423	0.071794
14	7	8	0.000000	-0.169584
15	9	7	-0.280832	-0.049919
16	9	10	0.052356	0.042898
17	10	9	-0.052225	-0.042551
18	9	14	0.094349	0.036554
19	10	11	-0.037740	-0.015449
20	11	10	0.037898	0.015738

상태추정은 반복연산법(iterative method)을 사용하므로 최초의 반복연산 단계에서 상태변수의 초기값을 지정해 주어야 하며, 모든 모선에서 전압의 크기와 전압 위상각에 대한 초기값으로 1.0 p.u.와 0°를 각각 사용하였다. 파라미터 에러의 추정을 위한 두 번째 상태추정 연산에서는 탭 비에 대한 초기값이 필요하다. 본 논문을 통해 개발된 상태추정기는 이 탭 비에 대한 초기값에 상당한 유연성을 가지고 있는 것이 모의실험 결과 확인되었으며, 0.99를 초기값으로 사용하였다.

모의실험은 두 가지 경우를 가정하여 실시하였다. 첫 번째는 변압기의 탭에 대한 정보에만 오차가 발생한 경우이고, 두 번째는 변압기 탭 오차뿐만 아니라 불량 데이터가 동시에 발생한 경우를 가정하였다. 두 경우에 대한 실험결과를 다음 두 개의 절에 요약하였다.

4.1 사례연구 1(변압기 탭의 정보에만 에러가 발생한 경우)

4번 모선과 7번 모선, 4번 모선과 9번 모선을 연결하는 변압기의 정확한 탭 비는 0.978, 0.969인데 여기에 5%(0.92, 0.9291)와 10%(0.87, 0.8801)의 오차가 각각 발생한 경우를 설정하고 모의실험을 수행하였다. 정규화 오차가 3.0이상인 측정데이터들을 찾아서 그들이 관련된 변압기를 결정하고 그 변압기의 탭 비를 새로운 상태변수로 추가하여 다시 한번 상태추정을 함으로써 정확한 탭 비를 추정하였다. 추정된 탭 비를 입력하여 상태추정을 수행하고 정규화오차를 검사함으로써 추정된 탭 비의 정확도를 검증하였다. 이 과정을 표 5와 표 6에 정리하였다. 탭 비를 새로운 상태변수로 지정하여 상태추정을 수행할 때 모든 경우에서 3, 4회의 반복계산으로 정확한 탭 비를 추정하였다.

$$\begin{aligned} \partial P_{km} / \partial V_m &= V_k (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \\ \partial P_{km} / \partial V_k &= (V_m / V_k) \cdot (\partial P_{km} / \partial V_m) \\ &\quad - 2 V_k \cdot (G_{km} - G_{km}) \\ \partial Q_{km} / \partial V_m &= V_k (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \\ \partial Q_{km} / \partial V_k &= (V_m / V_k) \cdot (\partial Q_{km} / \partial V_m) \\ &\quad + 2 V_k \cdot (B_{km} - B_{km}) \end{aligned}$$

변압기에 연결된 모선과 변압기 선로의 경우에는 측정함수의 식에서와 마찬가지로 탭에 대한 상태변수를 고려하여 자코비안 원소의 식을 유도하여야 한다. 모선 i 와 모선 j 사이에 변압기가 설치되어 있다고 가정하고 식 (8), (9)와 식 (12)-(15)를 전압의 크기와 위상각, 탭에 대하여 편미분하면 다음의 식들을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \partial P_i / \partial \theta_j &= V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - \frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}} \cos \theta_{ij}), \quad i \neq j \\ \partial Q_i / \partial \theta_j &= -V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + \frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}} \sin \theta_{ij}), \quad i \neq j \\ \partial P_i / \partial \theta_i &= -\left[Q_i + V_i^2 \cdot \left\{ \frac{1}{t_{ij}^2} \cdot \left(-\frac{1}{x_{ij}}\right) + TEMP \right\} \right], \\ \partial Q_i / \partial \theta_i &= P_i - V_i^2 \cdot G_{ii} \\ \partial P_i / \partial V_j &= V_i (G_{ij} \cos \theta_{ij} + \frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}} \sin \theta_{ij}), \quad i \neq j \\ \partial Q_i / \partial V_j &= V_i (G_{ij} \sin \theta_{ij} - \frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}} \cos \theta_{ij}), \quad i \neq j \\ \partial P_i / \partial V_i &= (P_i + V_i^2 G_{ii}) / V_i \\ \partial Q_i / \partial V_i &= \left[Q_i - V_i^2 \cdot \left\{ \frac{1}{t_{ij}^2} \cdot \left(-\frac{1}{x_{ij}}\right) + TEMP \right\} \right] / V_i, \\ TEMP &= \sum_{m=1}^n B_{im} \quad (j \neq m) \\ \partial P_{ij} / \partial \theta_i &= V_i V_j (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}} \cos \theta_{ij}) \\ \partial P_{ij} / \partial \theta_j &= -\partial P_{ij} / \partial \theta_i = -V_i V_j (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}} \cos \theta_{ij}) \\ \partial Q_{ij} / \partial \theta_i &= V_i V_j (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}} \sin \theta_{ij}) \\ \partial Q_{ij} / \partial \theta_j &= -\partial Q_{ij} / \partial \theta_i = -V_i V_j (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}} \sin \theta_{ij}) \\ \partial P_{ij} / \partial V_j &= V_i (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}} \sin \theta_{ij}) \\ \partial P_{ij} / \partial V_i &= V_j (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}} \sin \theta_{ij}) \\ \partial Q_{ij} / \partial V_j &= -V_i (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}} \cos \theta_{ij}) \\ \partial Q_{ij} / \partial V_i &= 2 V_i \cdot (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2}) - V_j (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}} \cos \theta_{ij}) \\ \partial Q_{ij} / \partial V_j &= 2 \cdot V_j \cdot \frac{1}{x_{ij}} - V_i (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}} \cos \theta_{ij}) \\ \partial P_i / \partial t &= -V_i V_j (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \sin \theta_{ij}) \\ \partial Q_i / \partial t &= -2V_i^2 (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^3}) + V_i V_j (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \cos \theta_{ij}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial Q_j / \partial t &= V_i V_j (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \cos \theta_{ij}) \\ \partial P_{ij} / \partial t &= -V_i V_j (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \sin \theta_{ij}) \\ \partial Q_{ij} / \partial t &= V_i V_j (\frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \cos \theta_{ij}) - 2 \cdot V_i \cdot \frac{1}{t_{ij}} \\ \partial Q_{ij} / \partial t &= V_i V_j \cdot \frac{1}{x_{ij}} \cdot \frac{1}{t_{ij}^2} \cos \theta_{ij} \end{aligned}$$

4. 사례 연구

상태추정을 위한 전력계통의 회로방정식은 행렬의 형태로 나타나게 되는데[24, 25], 결국 상태추정이란 계통의 어드미턴스 행렬(Y-bus), 자코비안 행렬, 이득(gain) 행렬과 같은 여러 행렬에 대한 반복적인 연산과정이라 할 수 있다. 따라서, 상태추정 과정에서 얼마나 효율적으로 행렬들에 대한 연산을 하느냐가 매우 중요한 문제이다. 계통의 모선 수가 늘어남에 따라 계산해야 할 행렬요소의 수는 점점 늘어나게 되며, 이에 따라 연산시간은 점점 길어지고 컴퓨터 메모리의 사용도 증가하게 된다. 본 논문에서는 상태추정에 이용되는 행렬의 많은 부분이 0으로 채워져 있는 것을 고려하여, 행렬을 0이 아닌 값만 일차원으로 최적배열(optimal ordering)함으로써 행렬의 계산시간을 단축하고 메모리를 절감할 수 있는 소행렬법(sparse matrix method)을 도입하여 효율적인 연산을 수행하였다[26, 27].

개발된 파라미터 에러 추정 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 그림 2와 같은 IEEE 14모선 계통에 파라미터 에러가 발생한 경우를 상정하여 모의실험을 실시하였다. 시험계통 각 선로의 임피던스와 서셉턴스는 표 1과 같으며, 변압기가 연결된 모선번호와 탭 비를 표 2에 정리하였다. 모선 전압의 크기와 모선 주입전력, 선로 조류전력의 측정데이터는 각각 표 3과 표 4와 같다.

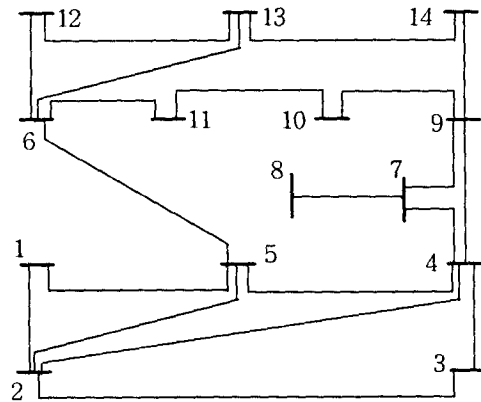


그림 2 IEEE 14모선 시험계통
Fig. 2 IEEE 14-Bus Test System

표 1 IEEE 14모선 계통의 각 선로 임피던스와 서셉턴스
Table 1 Line Impedances and Susceptances of IEEE 14-Bus System

선로번호	시작모선	끝모선	임피던스 (R, X)	서셉턴스
1	1	2	.01938, .05917	.02640
2	1	5	.05403, .22304	.02460
3	2	3	.04699, .19797	.02190
4	2	4	.05811, .17632	.02190
5	2	5	.05695, .17388	.01700
6	3	4	.06701, .17103	.01730
7	4	5	.01335, .04211	.00640
8	4	7	.00000, .20912	.00000
9	4	9	.00000, .55618	.00000
10	5	6	.00000, .25202	.00000
11	6	11	.09498, .19890	.00000
12	6	12	.12291, .25581	.00000
13	6	13	.06615, .13027	.00000
14	7	8	.00000, .17615	.00000
15	7	9	.00000, .11001	.00000
16	9	10	.03181, .08450	.00000
17	9	14	.12711, .27038	.00000
18	10	11	.08205, .19207	.00000
19	12	13	.22092, .19988	.00000
20	13	14	.17093, .34802	.00000

표 2 IEEE 14모선 계통의 변압기 탭 측정데이터
Table 2 Transformer Tap Ratio of IEEE 14-Bus System

탭 번호	시작모선	끝모선	탭 비
1	4	7	.97800
2	4	9	.96900
3	5	6	.93200

표 3 IEEE 14모선 계통의 모선전압크기와 모선주입전력의 측정데이터
Table 3 Measurement Data of Bus Voltage Magnitudes and Bus Power Injections in IEEE 14-Bus System

모선 번호	전압의 크기	모선 주입전력	
		P	Q
1	1.06000	2.32385	-0.15996
2	1.04454	0.18300	0.28300
3	1.01000	-0.94200	0.04747
4	1.01844	-0.47800	0.03900
5	1.02008	-0.07600	-0.01600
6	1.07000	-0.11200	0.04849
7	1.06187	0.00000	0.00000
8	1.09000	0.00000	0.17407
9	1.05627	-0.29500	-0.16600
10	1.05126	-0.09000	-0.05800
11	1.05705	-0.03500	-0.01800
12	1.05522	-0.06100	-0.01600
13	1.05043	-0.13500	-0.05800
14	1.03575	-0.14900	-0.05000

표 4 IEEE 14모선 계통의 선로 조류전력 측정데이터
Table 4 Line Power Flow Measurement Data of IEEE 14-Bus System

선로 번호	시작 모선	끝 모선	선로 조류전력	
			P	Q
1	1	2	1.568213	-0.195804
2	1	5	0.755645	0.035880
3	2	3	0.731986	0.033237
4	2	4	0.561268	-0.024501
5	2	5	0.415055	0.005963
6	3	4	-0.233226	0.029142
7	4	5	-0.612158	0.156751
8	4	7	0.280832	-0.094704
9	4	9	0.160872	-0.003414
10	5	6	0.440697	0.127374
11	6	11	0.073448	0.034887
12	6	12	0.077829	0.024943
13	6	13	0.177423	0.071794
14	7	8	0.000000	-0.169584
15	9	7	-0.280832	-0.049919
16	9	10	0.052356	0.042898
17	10	9	-0.052225	-0.042551
18	9	14	0.094349	0.036554
19	10	11	-0.037740	-0.015449
20	11	10	0.037898	0.015738

상태추정은 반복연산법(iterative method)을 사용하므로 최초의 반복연산 단계에서 상태변수의 초기값을 지정해 주어야 하며, 모든 모선에서 전압의 크기와 전압 위상각에 대한 초기값으로 1.0 p.u.와 0°를 각각 사용하였다. 파라미터 에러의 추정을 위한 두 번째 상태추정 연산에서는 탭 비에 대한 초기값이 필요하다. 본 논문을 통해 개발된 상태추정기는 이 탭 비에 대한 초기값에 상당한 유연성을 가지고 있는 것이 모의실험 결과 확인되었으며, 0.99를 초기값으로 사용하였다.

모의실험은 두 가지 경우를 가정하여 실시하였다. 첫 번째는 변압기의 탭에 대한 정보에만 오차가 발생한 경우이고, 두 번째는 변압기 탭 오차뿐만 아니라 불량 데이터가 동시에 발생한 경우를 가정하였다. 두 경우에 대한 실험결과를 다음 두 개의 절에 요약하였다.

4.1 사례연구 1(변압기 탭의 정보에만 에러가 발생한 경우)

4번 모선과 7번 모선, 4번 모선과 9번 모선을 연결하는 변압기의 정확한 탭 비는 0.978, 0.969인데 여기에 5%(0.92, 0.9291)와 10%(0.87, 0.8801)의 오차가 각각 발생한 경우를 상정하고 모의실험을 수행하였다. 정규화 오차가 3.0이상인 측정데이터들을 찾아서 그들이 관련된 변압기를 결정하고 그 변압기의 탭 비를 새로운 상태변수로 추가하여 다시 한번 상태추정을 함으로써 정확한 탭 비를 추정하였다. 추정된 탭 비를 입력하여 상태추정을 수행하고 정규화오차를 검사함으로써 추정된 탭 비의 정확도를 검증하였다. 이 과정을 표 5와 표 6에 정리하였다. 탭 비를 새로운 상태변수로 지정하여 상태추정을 수행할 때 모든 경우에서 3, 4회의 반복계산으로 정확한 탭 비를 추정하였다.

표 5 사례연구 1의 과정(4번과 7번 모선간의 탭 비에 오차가 발생한 경우)

Table 5 The Procedure of Case Study 1 (Tap Ratio Error between Bus 4 and 7)

탭의 오차 추정 과정	오차를 포함한 탭	
	0.9291(5% 오차)	0.8801(10% 오차)
$r_N > 3.0$	10.319(Qflow 7-4) -9.462(Qflow 4-7) 8.770(Qinj 7) -3.914(Qinj 4)	25.676(Qflow 7-4) -21.996(Qflow 4-7) 19.718(Qinj 7) -6.731(Qinj 4)
추정된 탭 비	0.97803	0.97803
탭 수정후 최대 r_N	-2.193(Qflow 11-6)	

표 6 사례연구 1의 과정(4번과 9번 모선간의 탭 비에 오차가 발생한 경우)

Table 6 The Procedure of Case Study 1 (Tap Ratio Error between Bus 4 and 9)

탭의 오차 추정 과정	오차를 포함한 탭	
	0.92(5% 오차)	0.87(10% 오차)
$r_N > 3.0$	3.0278(Qflow 9-4)	9.462(Qflow 9-4) 8.056(Qinj 9) -7.887(Qflow 4-9)
추정된 탭 비	0.96899	0.96899
탭 수정후 최대 r_N	-1.789(Qflow 14-13)	

표 7 사례연구 2의 1단계 계산에 의한 r_N (모선 4-7간 탭 비와 선로 6-12 조류 측정값에 오차가 발생한 경우)

Table 7 r_N Calculated in Step 1 of Case Study 2(Tap Ratio Error between Bus 4 and 7 and Bad Line Power Flow Measurements in Line 6-12)

측정데이터	계산된 r_N
Pflow 6-12	-14.207
Qflow 7-4	16.817
Qinj 7	14.299
Qflow 4-7	-14.198
Qinj 4	-7.666
Qflow 6-12	-3.824
Qflow 11-6	-2.573

4.2 사례연구 2 (변압기 탭 에러와 불량데이터가 동시에 발생한 경우)

사례연구 1의 탭 오차 외에 선로 6-12의 조류 측정값도 오차를 포함한 경우를 모의하였다. 이 경우 조류 측정값의 극성이 반대로 전송된 경우를 상정하였다. 1단계 상태추정을 통해 표 7과 8에 요약된 측정 데이터들이 불량데이터로 검출되었으며, 4번과 7번 모선, 4번과 9번 모선간의 변압기 탭 비에 오차가 있음이 확인되었다. 2단계 탭 추정과정에서 탭 비는 0.97796, 0.96892로 결정되었으며, 이 탭 비는 실제의 탭 비와 비교하여 0.01%보다 작은 오차를 포함하는 정확한 값이

며, 이 경우에도 3, 4번의 반복계산만으로 정확한 탭 비를 성공적으로 추정하였다

표 8 사례연구 2의 1단계 계산에 의한 r_N (모선 4-9간 탭 비와 선로 6-12 조류 측정값에 오차가 발생한 경우)

Table 8 r_N Calculated in Step 1 of Case Study 2(Tap Ratio Error between Bus 4 and 7 and Bad Line Power Flow Measurements in Line 6-12)

측정데이터	계산된 r_N
Pflow 6-12	-13.208
Qflow 9-4	13.679
Qflow 4-9	-11.761
Qinj 9	3.597
Qflow 6-12	-3.490
Qinj 4	-2.340

5. 결 론

계통의 현재 운용상태를 정확하게 추정하는 데에는 측정데이터와 파라미터 데이터의 정확도가 그 관건이 된다. 오차를 포함한 측정데이터 즉 불량데이터의 처리에 대해서는 그동안 많은 연구가 이루어져 왔으나, 파라미터 데이터의 오차처리 문제는 몇몇 연구자에 의해서 한정적으로 수행된 것이 사실이다.

본 논문에서는 오차가 의심되는 탭 비를 새로운 상태변수로 지정하여 측정함수와 자코비안 행렬을 유도하고, 정확한 탭의 비를 추정하는 알고리즘을 개발하였다. 완성된 상태추정기는 시험계통에 대한 모의실험을 통해 알고리즘의 타당성을 검증하였으며, 그 결과 탭의 오차뿐만 아니라 불량데이터가 포함된 경우에 있어서도 훌륭한 수렴특성과 정확도를 보여 주었다.

전력계통의 구조개편 또는 규제개혁이 세계적인 추세인 현 상황에서 계통의 운용상태를 정확하게 파악하는 일은 계통의 안정된 운용, 전력의 매매 및 가격의 결정, 운영의 효율화 등에 필수적인 일이며 따라서 상태추정기의 역할은 매우 중요하다. 본 논문의 결과로 오차를 포함한 탭의 비를 정확하게 추정할 수 있게 됨으로써 좀 더 정확하고 신뢰도가 높은 상태추정이 가능하게 되었으며, 계통의 현재 운용상태에 대한 더욱 정확한 정보를 제공할 수 있는 기초를 마련하였다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동 연구소 주관으로 수행되었음. (관리번호: 98-041)

참 고 문 헌

[1] PJM Interconnection, L.L.C., *PJM Open Access Transmission Tariff*, 1999.
 [2] F. Schweppe and J. Wildes, "Power System Static State Estimation, Part I: Exact Model," *IEEE Trans. on Power Appar. & Syst.*, Vol. PAS-89, No.1, pp. 120-125, 1970.
 [3] T. Dy Liacco, "The Role and Implementation of State

Estimation in an Energy Management System," *Electric Power and Energy Systems*, Vol. 12, No. 2, pp. 75-79, 1990.

[4] F. Wu, "Power System State Estimation: A Survey," *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 12, No. 2, pp. 80-87, 1990.

[5] M. Filho, A. Silva and D. Falcao, "Bibliography on Power System State Estimation (1968-1989)," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 5, No. 3, pp. 950-961, 1990.

[6] L. Holten, et al., "Comparison of Different Methods for State Estimation," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 3, No. 4, pp. 1798-1806, 1988.

[7] A. Monticelli and A. Garcia, "Fast Decoupled State Estimator," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 5, No. 2, pp. 556-564, 1990.

[8] A. Abur and M. Celik, "A Fast Algorithm for the Weighted Least Absolute Value State Estimation," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 6, pp. 1-8, Feb. 1992.

[9] K. Clements and P. Davis, "Multiple Bad Data Detectability and Identifiability: A Geometric Approach," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 1, pp. 355-360, 1986.

[10] E. Handschin, et al., "Bad Data Analysis for Power Systems State Estimation," *IEEE Trans. on Power Appar. & Syst.*, Vol. PAS-94, pp. 329-337, 1975.

[11] A. Abur, "A Bad Data Identification Method for Linear Programming State Estimation," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 5, pp. 894-901, 1990.

[12] H. Koglin, Th. Neisius, G. Beissler and K. Schmitt, "Bad Data Detection and Identification," *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 12, No. 2, pp. 94-103, 1990.

[13] H. Merrill and F. Schweppe, "On-line System Model Error Correction," *IEEE/PES Winter Meeting*, Paper No. C73106-2, New York, New York, 1973.

[14] A. Debs, "Estimation of Steady-State Power System Model Parameters," *IEEE Trans. on Power Appar. & Syst.*, Vol. PAS-93, pp. 1260-1268, 1974.

[15] W. Liu, F. Wu and S. Lun, "Estimation of Parameter Errors from Measurement Residuals in State Estimation," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 81-89, 1992.

[16] W. Liu and S. Lim, "Parameter Error Identification and Estimation in Power System State Estimation," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.10, No. 1, pp. 200-209, 1995.

[17] Y. M. Park, Y. H. Moon, J. B. Choo and T. W. Kwon, "Design of Reliable System for State Estimation," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 3, No. 3, pp. 830-836, 1988.

[18] 김홍래, 권형석, 송경빈, "배전계통 상태추정기의 개발에 관한 연구," *대한전기학회 논문지*, 제 47권, 제 12호, pp. 2078-2086, 1998.

[19] M. Irving, R. Owen and M. Sterling, "Power System State Estimation Using Linear Programming," *Proceedings of IEE*, Vol. 125, pp. 879-885, 1978.

[20] M. Celik and A. Abur, "A Robust WLAV State Estimator Using Transformations," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 106-113, 1992.

[21] M. Celik and A. Abur, "Use of Scaling in WLAV Estimation of Power System States," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 7, No. 2, pp. 684-692, 1992.

[22] D. Luenberger, *Linear and Nonlinear Programming*, Addison and Wesley Publishing Co., 1984

[23] Bernard Kolman, Robert E. Beck, *Elementary Linear Programming with Applications*, Academic Press, 1995

[24] M. Chen and W. Dillon, "Power System Modeling," *Proc. of the IEEE*, Vol. 62, No. 7, pp. 901-915, 1974.

[25] V. Brandwajn, et al., "Matrix Representation of Three-Phase N-Winding Transformers for Steady-State and Transient Studies," *IEEE Trans. on Power Appar. & Syst.*, Vol. PAS-101, No. 6, pp. 1369-1378, 1982.

[26] A. Gomez and L. Franquelo, "An Efficient Ordering Algorithm to Improve Sparse Vector Methods," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 3, pp. 1538-1544, 1988.

[27] W. Tinney, et al., "Sparse Vector Method," *IEEE Trans. on Power Appar. & Syst.*, Vol. PAS-104, pp. 295-301, 1985.

저 자 소 개



김 홍 래 (金 鴻 來)

1963년 10월 9일생. 1986년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 Texas A&M 대학교 전기공학과 졸업(공학). 1995년~ 현재 순천향대 공대 정보기술공학부 조교수

Tel : 041-530-1336, Fax : 041-530-1373

E-mail: hongkim@sch.ac.kr



권 형 석 (權 亨 錫)

1973년 1월 25일생. 1998년 순천향대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정

Tel : 041-530-1333

E-mail : hopaoman@hanmail.net



김 동 준 (金 東 浚)

1963년 4월 14일생. 1988년 연세대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 청주대 전자·정보통신·반도체공학부 조교수

Tel : 043-229-8460, Fax : 043-229-8460

E-mail : djkim@chongju.ac.kr