

**PMU 데이터를 이용한 전력계통 상태추정**

김홍래, 권형석  
순천향대학교 정보기술공학부

**Electric Power System State Estimation with PMU Data**

Hongrae Kim, Hyung-Seok Kwon  
School of Information Technology Engineering, SoonChunHyang University

**Abstract** - 전력계통의 안정적인 운용을 위해서는 현재 운전 중인 계통의 운용데이터를 수집하여 분석하고 그에 따라 적절한 제어를 하는 것이 매우 중요한 일이다. EMS가 이러한 일을 처리하고 있으며, 여기서 상태추정기는 정확한 계통 운용 데이터베이스를 제공하는 역할을 한다. 지금까지 모든 데이터는 동시에 측정이 되었다는 가정 하에 상태추정 연산을 하였으나, 실제로 모든 데이터 측정의 동기성을 확보하는 것은 사실상 불가능하다. 최근 인공위성에 의해 동기화된 PMU(phasor measurement unit)가 전력계통 운용에 사용되고 있다. 본 논문에서는 PMU로부터 얻을 수 있는 전압 및 전류 데이터를 상태추정에 이용하는 방법을 개발하였다. 위성에 의해 동기화된 페이저 측정데이터는 데이터 측정의 동기성 확보뿐만 아니라, 데이터의 정밀도 및 위상각의 직접적인 측정이라는 등의 여러 가지 면에서 매우 효용성이 높은 데이터이다. 본 연구를 통해 개발된 상태추정 프로그램은 IEEE 30모선 시험계통을 이용하여 그 타당성을 검증하였다.

한다. 상태추정의 결과로 얻어진 상태변수들을 이용하여 현재 계통의 운용상태를 알 수 있으며, 이를 토대로 다양한 계통해석 기능을 수행할 수 있다. 상태추정은 전력계통을 실시간으로 감시하고 제어하는데 중요한 역할을 함으로써 현대의 전력계통 운용에 있어서 필수적인 기능이 되었으며, 우리나라에서도 적극적인 운영이 모색되고 있다[7].

일반적인 상태추정기의 경우 각 모선으로 유입되는 bus 전력이나 선로의 조류전력과 같은 측정데이터를 주로 연산에 이용하고, 전압이나 전류는 위상각에 대한 정보 없이 그 크기만을 연산에 이용하고 있다. 또한, 모든 데이터가 동시에 측정되었다는 가정 하에 상태추정 연산을 수행하지만 실제로는 각 데이터의 취득 시점에 대한 정확한 동기(synchronization)를 확보하기는 불가능하다고 할 수 있다.

본 논문에서는 인공위성을 사용하여 정확하게 동기화된 전압 및 전류 페이저 측정데이터를 상태추정에 추가하여 연산을 수행함으로써 기존의 상태추정기가 가지고 있는 문제점을 해결하는 동시에, 상태추정의 강건성 확보, 정확도 개선, 연산의 효율성 제고 등의 효과를 얻고자 하였다.

**1. 서 론**

1990년대 중반 이후 전 세계적으로 진행되어 온 전력산업의 구조개편은 전력산업에 많은 영향을 끼쳐왔다. 온라인 안정도, 계통 신뢰도 등과 관련된 연구가 활성화되고 있으며, 전력거래를 감시하고 정상하는 일이 매우 중요하게 되었다. 최근에는 GPS 기술을 응용하여 광역계통에 대한 안정도 평가를 위하여 PMU(phasor measurement unit)를 이용하는 기술이 개발되었다[1-6].

위성을 이용하여 시각 동기된 페이저 측정데이터를 취득하고, 이렇게 측정된 페이저 데이터를 전력계통의 운용에 활용하고자 하는 것이다. 2003년 발생하였던 미국/캐나다 광역전선사고의 주요 원인 중 하나가 연계 전력계통(interconnected power system)에 대한 정보공유의 부재였던 것으로 나타남에 따라, 인공위성에 의해 동기화된 PMU 등을 이용한 광역계통 감시와 신속한 보호제어 명령 체계의 구축 등이 주요 이슈가 되고 있다.

시각동기 페이저 측정데이터는 전력계통에 대한 귀중한 정보를 제공할 뿐만 아니라, 현재 전력계통 내에서 얻을 수 있는 여러 가지 측정데이터 중에서 가장 정밀도가 높은 측정데이터라는 점에 주목할 필요가 있다. 안정적인 계통운용과 거래정산 등을 위한 정확한 데이터베이스가 필요하게 된 최근의 전력계통에서 상태추정에 대한 관심은 과거에 비해 많이 커지는 것이 당연하다. 본 논문에서는 정밀도가 높은 전압 및 전류 페이저 측정데이터를 전력계통의 상태추정에 사용함으로써 전체 계통의 현재 운용 상황을 정확하게 파악하고, 계통 안전도 해석(security analysis) 및 상정사고 해석 등에 사용할 수 있는 데이터 제공의 기초를 마련하고자 하였다.

전력계통의 상태추정(state estimation)은 EMS 내에서 수행되는 중요한 기본기능으로, 계통 내의 여러 측정점으로부터 얻어진 측정데이터를 이용하여 전체 계통의 상태변수(모선전압의 크기와 위상각)를 추정하는 역할을

**2. 본 론**

**2.1 PMU**

PMU는 당초 전력계통 보호를 위한 계전기나 계통 안전도 판단을 위한 목적으로 전력계통에 설치되었으며 [8-10], 우리나라에서도 계통의 온라인 안전성 평가를 위하여 일부 대용량 원자력발전소와 주요 345kV 전력소에 페이저 측정 장비가 설치되어 시운전을 완료한 상태이다 [11]. 이 시스템의 경우 GPS를 이용한 시각동기 계통 운전데이터를 실시간으로 측정하고, 광역사고 판단 및 사고 데이터의 기록, 과도안전도의 온라인 평가 등의 역할을 하도록 설계되었다.

이와 같이, 시각동기 페이저 측정데이터에 관련된 연구는 지금까지 계통 보호 및 안전성 판단을 위해 이루어졌으며, 본 연구에서는 이러한 목적으로 이미 확보되어 이용 가능한 페이저 측정데이터를 상태추정에 이용하고자 하는 것이다.

**2.2 상태추정**

우리나라에서 상태추정에 대한 연구가 활발하게 이루어져 왔다고 할 수는 없으나 최근의 구조개편 논의와 더불어 필요성이 대두되고 있으며, 시각동기 페이저 측정 시스템의 계통 운용 연구도 최근에 많은 관심이 쏠리고 있다[12-14]. 페이저 측정데이터는 기본적으로 계통 안전도 해석을 위한 목적으로 측정되는 것이지만, 이를 상태추정에 이용하는 기술을 확보할 경우 전력공급의 신뢰성 확보, 안정성 향상 등의 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

상태추정의 수학적 모델은 계통 내에서 측정된 데이터와 상태벡터 간의 관계에 기초하여 다음과 같은 측정 벡

터  $z$ 의 식으로 쓸 수 있다[15].

$$\begin{aligned} z &= \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ h_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ h_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix} \\ &= h(x) + e \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $x_i$ 는 계통 상태벡터,  $h_i(\cdot)$ 는 비선형 측정함수,  $e_i$ 는 측정오차벡터.

WLS(weighted least square) 상태추정에서는 여러 가지 측정데이터의 실제 측정값과 추정값 간의 오차를 최소화하기 위하여 다음과 같은 2차 목적함수를 사용한다.

$$\begin{aligned} J(x) &= \{z - h(x)\}^T R^{-1} \{z - h(x)\} \\ &= \sum_{i=1}^m \frac{1}{\sigma_i^2} \{z_i - h_i(x)\}^2 \end{aligned} \quad (2)$$

목적함수  $J(x)$ 를 최소화하기 위한 최적조건은 다음의 식 (3)과 같으며, 이 식에서  $H(x)$ 는 측정함수의 자코비안 행렬로 측정함수를 상태벡터에 대하여 편미분함으로써 구할 수 있다.

$$\partial J / \partial x = H^T(x) R^{-1} \{z - h(x)\} = 0 \quad (3)$$

새로운 상태추정기의 구현을 위해서는 비선형 측정함수  $h(x)$ 를 유도하여야 하며, 그에 상응하는 자코비안 행렬  $H(x)$ 도 유도하여야 한다. 기존의 상태추정에서 사용한 전압 및 전압에 대한 측정함수와 자코비안 행렬은 [16]을 참조할 수 있으며, 새롭게 도입된 전압 및 전류 페이지에 대한 측정방정식과 자코비안 원소도 간단하게 표현할 수 있다.

현재 전력계통 내에서 위상각 측정데이터를 구하는 일반적인 방법은 선로 양단의 모선전압 위상각을 비교하는 방식으로, 상태추정을 위한 전압 위상각의 측정함수는 다음 식 (4)와 같이 두 모선 간의 위상의 차이로 표현될 수 있다. 전체 계통에 걸쳐 동일한 기준모선을 설정하고 그 모선에 대한 상대각으로 위상각 측정데이터를 구성하는 경우에도 동일한 식을 사용할 수 있다.

$$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j \quad (4)$$

전류 측정데이터에 대한 측정방정식은 다음과 같은 과정으로 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{km}^* &= \frac{S_{km}^*}{V_k^*} = \frac{P_{km} - jQ_{km}}{|V_k|(\cos \theta_k - j \sin \theta_k)} \\ &= \frac{1}{V_k} [(P_{km} \cos \theta_k + Q_{km} \sin \theta_k) \\ &\quad + j(P_{km} \sin \theta_k - Q_{km} \cos \theta_k)] \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 전류 측정데이터의 유효성분과 무효성분을 구분하면 각각 다음의 식 (6), (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$I_{km}^r = \frac{1}{V_k} (P_{km} \cos \theta_k + Q_{km} \sin \theta_k) \quad (6)$$

$$I_{km}^x = \frac{1}{V_k} (P_{km} \sin \theta_k - Q_{km} \cos \theta_k) \quad (7)$$

전압 및 전류 페이지 측정데이터를 포함하는 자코비안 행렬은 다음과 같이 구성된다.

$$H(x) = \begin{bmatrix} 0 & \partial |V_k| / \partial |V| \\ \partial P_k / \partial \theta & \partial P_k / \partial |V| \\ \partial Q_k / \partial \theta & \partial Q_k / \partial |V| \\ \partial P_{km} / \partial \theta & \partial P_{km} / \partial |V| \\ \partial Q_{km} / \partial \theta & \partial Q_{km} / \partial |V| \\ \partial \theta_{km} / \partial \theta & 0 \\ \partial I_{km}^r / \partial \theta & \partial I_{km}^r / \partial |V| \\ \partial I_{km}^x / \partial \theta & \partial I_{km}^x / \partial |V| \end{bmatrix} \quad (8)$$

자코비안 행렬 원소들 중에서 본 연구를 통해 새롭게 유도된 전류 측정데이터에 대한 방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{km}^r}{\partial \theta_i} &= \frac{1}{V_k} \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_i} \cdot \cos \theta_k + P_{km} \cdot \frac{\partial \cos \theta_k}{\partial \theta_i} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_i} \cdot \sin \theta_k + Q_{km} \cdot \frac{\partial \sin \theta_k}{\partial \theta_i} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{km}^x}{\partial \theta_i} &= \frac{1}{V_k} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta_i} (P_{km} \sin \theta_k - Q_{km} \cos \theta_k) \\ &= \frac{1}{V_k} \left[ \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_i} \cdot \sin \theta_k + P_{km} \cdot \frac{\partial (\sin \theta_k)}{\partial \theta_i} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_i} \cos \theta_k - Q_{km} \cdot \frac{\partial (\cos \theta_k)}{\partial \theta_i} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{km}^r}{\partial V_i} &= \frac{\partial}{\partial V_i} \left( \frac{1}{V_k} \right) \cdot (P_{km} \cos \theta_k + Q_{km} \sin \theta_k) \\ &\quad + \frac{1}{V_k} \cdot \frac{\partial}{\partial V_i} (P_{km} \cos \theta_k + Q_{km} \sin \theta_k) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{km}^x}{\partial V_i} &= \frac{\partial}{\partial V_i} \left( \frac{1}{V_k} \right) \cdot (P_{km} \sin \theta_k - Q_{km} \cos \theta_k) \\ &\quad + \frac{1}{V_k} \cdot \frac{\partial}{\partial V_i} (P_{km} \sin \theta_k - Q_{km} \cos \theta_k) \end{aligned} \quad (12)$$

식 (9)-(12)는  $i$ 가  $k$ 일 때,  $m$ 일 때, 그리고 그 외의 경우로 나누어 각각의 경우에 대한 자코비안 방정식을 구하여 프로그램 하여야 한다.

### 2.3 사례 연구

개발된 상태추정 프로그램은 그림 1과 같은 IEEE 30 모선 계통[17]을 이용한 사례연구를 통해 타당성과 효용성을 검증하였다. 이 계통에 대하여 다음과 같은 세 가지 측정데이터 군을 가지고 사례연구를 수행하였다. Case 1은 아날로그 측정데이터만으로 구성되었으며, case 2와 3은 case 1의 측정데이터에 PMU에 의한 전압 페이지와 전류 페이지 데이터가 추가된 경우이다.

- 1) Case 1
  - 모선 전압 크기: 모선 1, 4, 10, 15, 24, 27
  - 모선 주입 전력(P, Q): 모든 모선

- 2) Case 2
  - 모선 전압 크기: 모선 1, 24
  - 모선 주입 전력(P, Q): 모든 모선
  - 전압 페이지: 4, 10, 15, 27

- 3) Case 3
  - 모선 전압 크기: 모선 1, 24
  - 모선 주입 전력(P, Q): 모든 모선
  - 전압 페이지: 4, 10, 15, 27
  - 전류 페이지: 4, 10, 15, 27 모선 연결 모든 선로

### 3. 결 론

시각동기 페이저 측정데이터는 인공위성에 의해 동기화된 측정데이터이므로 현재 전력계통의 운용상황에 대한 정확한 snap shot을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 기존의 전력 측정데이터 등에 비해 훨씬 뛰어난 정확성을 가지고 있으므로 상태추정 연산의 정확도를 높일 수 있다. 상태추정 연산에 사용하는 페이저 측정데이터는 이미 계통 내에 설치되어 있는 시각동기 페이저 측정 장비를 이용하여 취득할 수 있다. 따라서, 추가 비용의 소요 없이 정밀한 데이터를 상태추정 연산에 사용할 수 있는 장점이 있다. 상태추정의 연산과정에서 불량데이터를 검출하고 연산결과의 정확성을 유지하기 위해서는 적절한 여유도(redundancy level)의 확보가 필수적인데, 페이저 측정데이터를 사용함으로써 여유도 향상의 효과를 얻을 수 도 있다.

본 연구는 한국학술진흥재단 지역대학 우수과학자 지원사업(D00310)의 지원으로 수행되었음.

#### [참 고 문 헌]

- [1] B. Bhargava, "Synchronized Phasor Measurement System Project at Southern California Edison Co.," IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1, pp. 16-22, 1999.
- [2] R. Burnett et al., "Power System Applications for Phasor Measurement Units," IEEE Computer Applications in Power, Vol. 7, Issue 1, pp. 8-13, 1994.
- [3] T. Cease and B. Feldhaus, "Real Time Monitoring of the TVA Power Systems," IEEE Computer Applications in Power, Vol. 7, Issue 3, pp. 47-51, 1994.
- [4] B. Fardanesh et al., "Multifunctional Synchronized Measurement Network," IEEE Computer Applications in Power, Vol. 11, Issue 1, pp. 26-30, 1998.
- [5] C. Liu, "Phasor Measurement Applications in Taiwan," IEEE Transmission and Distribution Conf. and Exhibition, Vol. 1, pp. 490-493, 2002.
- [6] A. Phadke, "Synchronized Phasor Measurements - A Historical Review," IEEE Transmission and Distribution Conf. and Exhibition, Vol. 1, pp. 476-479, 2002.
- [7] 송태용 외, "한국 전력 계통에서의 상태추정 알고리즘 적용," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2003.
- [8] G. Denegri et al., "A Security Oriented Approach to PMU Positioning for Advanced Monitoring of a Transmission Grid," Proc. of PowerCon 2002, Vol. 2, pp. 798-803, 2002.
- [9] R. Schulz, L. VanSlyck and S. Horowitz, "Applications of Fast Phasor Measurements on Utility Systems," Power Industry Application Conference, pp. 49-55, 1989.
- [10] J. Wu et al., "Dynamic Monitoring and Control System Based on Synchronized Phasor Measurement in Heilongjian Eastern Power System," IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 3, pp. 1689-1693, 2000.
- [11] 전동훈 외, "GPS를 이용한 전력계통 온라인 안정성 감시, 분석시스템 개발 및 실제용 적용," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2003.
- [12] 전진홍 외, "실시간 계통제어를 위한 동기위상측정장치 개발," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 85-87, 2000.
- [13] 김재훈 외, "전력계통의 페이저 측정기 최적배치," 대한전기학회 논문지, 49권, 7호, pp. 313-322, 2000.
- [14] 이경극 외, "동기위상 측정 장치를 이용한 전력계통 위상각 측정," 대한전기학회 추계학술대회, pp. 55-57, 2000.
- [15] A. Abur and A. Exposito, Power System State Estimation, Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [16] 김홍래 외, "WLAB 상태추정에 의한 전력계통 파라미터 에러 추정에 관한 연구," 전기학회 논문지, 49권, 9호, pp. 451-458, 2000.
- [17] <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>

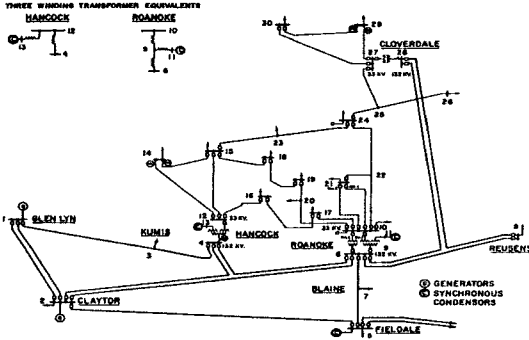


그림 1 IEEE 30모선 계통

연산에 사용된 측정데이터들은 오차를 포함하는 것으로 가정하여 Gaussian noise를 첨가하였고, 전압, 주입전력, PMU 측정데이터에 추가된 오차의 표준편차를 각각 0.004, 0.01, 0.0001로 설정하였다. 상태추정의 결과에서 볼 수 있는 작은 오차는 이와 같이 측정잡음 등을 가정한 오차의 부가에 기인하는 것이다.

그림 2와 3은 세 가지 경우에 대한 상태추정 결과가 잘 수렴하고 있음을 보여 주고 있으며, 표 1은 각 case에서 구해진 상태추정 결과(전압의 크기와 위상각)와 참값과의 오차를 제공하여 모두 합한 값을 나타내고 있다. 표에서 볼 수 있는 바와 같이 페이저 측정 데이터가 상태추정에 사용됨으로써 상태추정의 정확도가 향상되었음을 알 수 있다.

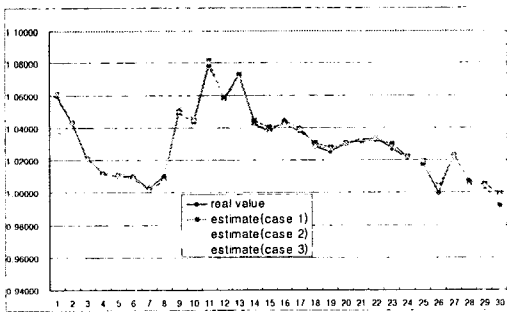


그림 2 전압 크기 추정값의 비교

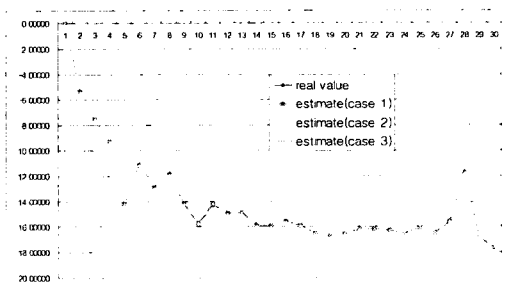


그림 3 전압 위상각 추정값의 비교

표 1 Case별 추정 에러의 자승합

	Case 1	Case 2	Case 3
전압의 크기	$1.5961 \times 10^{-4}$	$1.0076 \times 10^{-4}$	$0.1718 \times 10^{-4}$
위상각	0.114764	0.054188	0.042157