

# 시각동기 위상측정데이터를 이용한 전력계통 상태 추정

## Electric Power System State Estimation with Time Synchronized Phasor Measurement Data

權 亨 錫\* · 張 翰 誠\*\* · 金 鴻 來†

(Hyung-Seok Kwon · Hansung Jang · Hongrae Kim)

**Abstract** - In modern EMS, state estimation is used as a tool for monitoring how the power system operates. A state estimator iteratively calculates the voltage profile of the currently operating power system with voltage, current, and power measurements gathered from the entire system. It is usually assumed that all the measurements are obtained simultaneously. It, however, is not practically possible to maintain the synchronism of the measurements data. Recently, phasor measurements synchronized by satellites are used for the operation of the power systems. This paper describes the state estimator modified to support the processing of synchronized phasor measurements. Synchronized phasor measurements are found to provide synchronism of measurement data and improve the accuracy/redundancy of the measurements data for state estimation. The details of the developed state estimation program and some numerical results of running it are presented.

**Key Words** : Power System, State Estimation, Phasor Measurement, PMU.

### 1. 서 론

최근 인공위성(GPS)을 이용하여 시각 동기된 페이저 측정 데이터(synchronized phasor measurements)를 취득하는 기술이 개발되었으며, 이렇게 측정된 페이저 데이터를 전력계통의 운용에 활용할 수 있게 되었다[1-6]. 2003년 발생하였던 미국/캐나다 광역정전사고의 주요 원인 중 하나가 연계 전력계통(interconnected power systems)에 대한 정보공유의 부재였던 것으로 나타남에 따라, 인공위성에 의해 동기화된 위상 측정 장비(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 전력계통 해석에 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 전력계통을 실시간으로 감시하고 제어하기 위한 데이터베이스를 제공하는 역할을 함으로써 현대의 전력계통 운용에 있어서 필수적인 기능이 되었으며, 우리나라에서도 적극적인 운용이 모색되고 있다[7]. 일반적인 상태추정기의 경우 각 모선으로 유입되는 복소 전력이나 선로의 조류전력과 같은 측정데이터를 주로 연산에 이용하고, 전압이나 전류는 위상각에 대한 정보 없이 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.

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.

### 2. 시각동기 측정데이터

시각동기 페이저 측정장비는 전력계통에 설치되어 계통의 상태변수인 전압, 전류의 크기와 위상각을 측정하는 것으로서, 당초에는 전력계통 보호를 위한 계전기나 계통 안전도 판단을 위한 목적으로 전력계통에 설치되었다[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 측정

† 교신저자, 正會員 : 順天鄉大 情報技術工學部 教授 · 工博

E-mail : hongkim@sch.ac.kr

\* 正會員 : 順天鄉大 情報技術工學部 · 工博

\*\* 學生會員 : 順天鄉大 電氣工學科 碩士課程

接受日字 : 2006年 6月 5日

最終完了 : 2006年 8月 23日

하고, 광역사고 판단 및 사고 데이터의 기록, 과도안정도의 온라인 평가 등의 역할을 하도록 설계되었다. 외국의 경우에도 온라인 페이지 감시와 송전선로 fault locator, 전압 불안정성 감소 등을 위한 정밀한 데이터 획득의 목적으로 PMU를 설치, 운전 중이다[12, 13].

### 3. 전력계통 상태추정

전력계통 상태추정은 1969년 Fred Schweppe에 의해 처음으로 전력계통에 응용되기 시작되었으며[14], 현재까지 상태추정을 위한 다양한 방법들이 소개되었다[15-19]. EMS 내의 계통운용 기능들은 상태추정기에 의해 제공되는 데이터베이스를 이용하여 그 기능을 수행할 수 있으며, 따라서 상태추정은 현대의 EMS 내에서 전력계통의 안정된 운용을 위한 기본 기능의 역할을 하게 되었다[19, 20].

우리나라에서 상태추정에 대한 연구가 활발하게 이루어져 왔다고 할 수는 없으나 최근의 구조개편 논의와 더불어 필요성이 대두되고 있으며, 시각동기 페이지 측정시스템의 계통운용 연구도 최근에 많은 관심이 쏠리고 있다[21-23]. 페이지 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 상태추정 간의 관계에 기초하여 다음과 같은 측정 벡터  $z$  간의 관계에 기초한다[24].

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

여기서,  $x$  : 차수 ( $n \times 1$ )의 상태벡터,  
 $h(x)$  : 비선형 측정 함수,  
 $e$  : 차수 ( $m \times 1$ )의 측정잡음 벡터,

전통적으로 많은 전력회사들이 사용하고 있는 상태추정기는 가중최소자승법(WLS: weighted least square method)을 이용하는 것으로, 이 추정기는 측정 잡음을 필터링하는 특성이 뛰어나고 계산시간이나 계산에 필요한 컴퓨터 메모리를 효율적으로 사용할 수 있다는 장점이 있다. WLS 상태추정에서는 측정값과 추정값 간의 오차를 최소화하기 위하여 다음과 같은 2차 목적함수를 사용한다.

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

목적함수  $J(x)$ 를 최소화하기 위한 최적조건은 다음의 식(3)과 같으며, 이 식에서  $H(x)$ 는 측정함수의 자코비안 행렬로  $\frac{\partial h(x)}{\partial x}$ 를 계산함으로써 구할 수 있다.

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

페이지 측정데이터를 이용하는 새로운 상태추정기의 구현

을 위해서는 기존의 비선형 측정함수  $h(x)$ 에 PMU 데이터를 위한 측정함수를 새롭게 유도하여야 하며, 그에 상응하는 자코비안 행렬  $H(x)$ 도 유도하여야 한다. 기존의 상태추정에서 사용한 전력 및 전압에 대한 측정함수와 자코비안 행렬은 [25]를 참조할 수 있으며, 새롭게 도입된 전압 및 전류 페이지에 대한 측정방정식과 자코비안 원소도 간단하게 표현할 수 있다.

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

$$\theta_{km} = \theta_k - \theta_m \tag{4}$$

전류 측정데이터에 대한 측정방정식은 다음과 같은 과정으로 유도할 수 있다.

$$S_{km} = V_k \cdot I_{km}^* \Rightarrow I_{km} = \frac{S_{km}^*}{V_k^*} \tag{5}$$

여기서,  $S_{km} = P_{km} + jQ_{km}$

$$I_{km} = \frac{S_{km}^*}{V_k^*} = \frac{P_{km} - jQ_{km}}{|V_k|(\cos \theta_k - j \sin \theta_k)} \tag{6}$$

$$= \frac{1}{V_k} [(P_{km} \cos \theta_k + Q_{km} \sin \theta_k) + j(P_{km} \sin \theta_k - Q_{km} \cos \theta_k)]$$

식(6)에서 전류 측정데이터의 유효성분( $I_{km}^r$ )과 무효성분( $I_{km}^x$ )을 구분하면 각각 다음의 식(7), (8)과 같이 쓸 수 있다.

$$I_{km}^r = \frac{1}{V_k} (P_{km} \cos \theta_k + Q_{km} \sin \theta_k) \tag{7}$$

$$I_{km}^x = \frac{1}{V_k} (P_{km} \sin \theta_k - Q_{km} \cos \theta_k) \tag{8}$$

전압 및 전류 페이지 측정데이터를 포함하는 자코비안 행렬의 원소들은 측정함수를 전압의 크기와 그 위상각에 대하여 편미분함으로써 구할 수 있으며, 그 개략적인 형태는 다음과 같다.

$$H(x) = \begin{bmatrix} 0 & \partial |V_k| / \partial |V| \\ \partial P_k / \partial \theta & \partial P_k / \partial |V| \\ \partial Q_k / \partial \theta & \partial Q_k / \partial |V| \\ \partial P_{km} / \partial \theta & \partial P_{km} / \partial |V| \\ \partial Q_{km} / \partial \theta & \partial Q_{km} / \partial |V| \\ \partial \theta_{km} / \partial \theta & 0 \\ \partial I_{km}^r / \partial \theta & \partial I_{km}^r / \partial |V| \\ \partial I_{km}^x / \partial \theta & \partial I_{km}^x / \partial |V| \end{bmatrix} \tag{9}$$

자코비안 행렬의 원소 중에서 모선 주입전력과 선로 조류

전력 측정값에 대한 행렬 원소들은 측정함수를 직접 편미분함으로써 구할 수 있으며[25], 본 논문을 통해 새롭게 유도된 전류 측정데이터에 대한 방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial I_{km}^r}{\partial \theta_i} = \frac{1}{V_k} \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_i} \cdot \cos \theta_k + P_{km} \cdot \frac{\partial \cos \theta_k}{\partial \theta_i} + \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_i} \cdot \sin \theta_k + Q_{km} \cdot \frac{\partial \sin \theta_k}{\partial \theta_i} \right) \quad (10)$$

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

$$\frac{\partial I_{km}^r}{\partial V_i} = \frac{\partial}{\partial V_i} \left( \frac{1}{V_k} \right) \cdot (P_{km} \cos \theta_k + Q_{km} \sin \theta_k) + \frac{1}{V_k} \cdot \frac{\partial}{\partial V_i} (P_{km} \cos \theta_k + Q_{km} \sin \theta_k) \quad (12)$$

$$\frac{\partial I_{km}^x}{\partial V_i} = \frac{\partial}{\partial V_i} \left( \frac{1}{V_k} \right) \cdot (P_{km} \sin \theta_k - Q_{km} \cos \theta_k) + \frac{1}{V_k} \cdot \frac{\partial}{\partial V_i} (P_{km} \sin \theta_k - Q_{km} \cos \theta_k) \quad (13)$$

i)  $i = k$  일 때

$$\frac{\partial I_{km}^r}{\partial \theta_i} = \frac{1}{V_k} \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} \cdot \cos \theta_k - P_{km} \cdot \sin \theta_k + \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_k} \cdot \sin \theta_k + Q_{km} \cdot \cos \theta_k \right) \quad (14)$$

$$\frac{\partial I_{km}^x}{\partial \theta_i} = \frac{1}{V_k} \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} \cdot \sin \theta_k + P_{km} \cdot \cos \theta_k - \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_m} \cdot \cos \theta_k - Q_{km} \cdot \sin \theta_k \right) \quad (15)$$

$$\frac{\partial I_{km}^r}{\partial V_i} = -\frac{1}{V_k^2} (P_{km} \cos \theta_k + Q_{km} \sin \theta_k) + \frac{1}{V_k} \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} \cos \theta_k + \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_k} \sin \theta_k \right) \quad (16)$$

$$\frac{\partial I_{km}^x}{\partial V_i} = -\frac{1}{V_k^2} (P_{km} \sin \theta_k - Q_{km} \cos \theta_k) + \frac{1}{V_k} \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} \sin \theta_k - \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_k} \cos \theta_k \right) \quad (17)$$

ii)  $i = m$  일 때

$$\frac{\partial I_{km}^r}{\partial \theta_i} = \frac{1}{V_k} \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} \cdot \cos \theta_k + \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_m} \sin \theta_k \right) \quad (18)$$

$$\frac{\partial I_{km}^x}{\partial \theta_i} = \frac{1}{V_k} \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} \cdot \sin \theta_k - \frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_m} \cdot \cos \theta_k \right) \quad (19)$$

$$\frac{\partial I_{km}^r}{\partial V_i} = \frac{1}{V_k} \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} \cdot \cos \theta_k + \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_m} \cdot \sin \theta_k \right) \quad (20)$$

$$\frac{\partial I_{km}^x}{\partial V_i} = \frac{1}{V_k} \left( \frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} \cdot \sin \theta_k - \frac{\partial Q_{km}}{\partial V_m} \cdot \cos \theta_k \right) \quad (21)$$

iii) 그 외의 경우

$$\frac{\partial I_{km}^r}{\partial \theta_i} = \frac{\partial I_{km}^x}{\partial \theta_i} = \frac{\partial I_{km}^r}{\partial V_i} = \frac{\partial I_{km}^x}{\partial V_i} = 0 \quad (22)$$

전력계통에서 흔히 불량데이터라 불리는 아날로그 에러는 데이터 통신 시스템이나 측정시스템의 고장, 오동작에 의해 주로 발생한다. 지난 30여 년의 연구 결과 Chi-square test, 정규화 잉여오차 테스트(normalized residual test), 가설검증 판별법(hypothesis testing identification) 등의 불량데이터 처리 기법이 개발되었다.

Chi-square test는 표준정규분포를 따르는 독립 랜덤변수의 제곱의 합은 카이스퀘어 분포를 가진다는 것을 전제로 한다. 먼저 WLS 상태추정을 수행하고 목적함수  $J(x)$ 를 계산한다. 이 목적함수는 자유도가  $(m-n)$ 인 카이스퀘어 분포를 가진다. 테스트 결과 목적함수가 카이스퀘어 분포곡선(자유도 :  $(m-n)$ , 일정확률 :  $p$ )보다 큰 값을 가진다면, 측정데이터 군(set) 안에 불량데이터가 존재한다고 볼 수 있다.

정규화 잉여오차 테스트는 다음과 같은 절차를 걸쳐 실시한다. 우선, 선형화된 WLS 상태추정기는 식 (23), (24)와 같다.

$$\Delta \hat{x} = (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} \Delta z \quad (23)$$

$$\Delta \hat{z} = H \Delta \hat{x} = K \Delta z \quad (24)$$

여기서,  $K = H(H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1}$  : hat matrix

$$\begin{aligned} r &= \Delta z - \Delta \hat{z} = (I - K) \Delta z \\ &= (I - K)(H \Delta x + e) = (I - K)e = Se \end{aligned} \quad (25)$$

S를 오차민감도행렬(residual sensitivity matrix)이라 부르며, 오차의 공분산 행렬  $\Omega$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$E[rr^T] = \Omega = S \cdot E[ee^T] \cdot S^T = SRS^T = SR \quad (26)$$

따라서,  $i$ 번째 측정값의 정규화잉여오차  $r_i^N$ 는

$$r_i^N = \frac{r_i}{\sqrt{\Omega_{ii}}} = \frac{r_i}{\sqrt{R_{ii} S_{ii}}} \quad (27)$$

상태추정을 수행한 후 정규화 잉여오차 중 최대값을 찾는다. 이 값이  $c$ (판별한계치)보다 크면 불량데이터로 간주한다. 전체 측정값들 중에 이 측정값을 제거한 후 상태추정을 다시 수행한다.

#### 4. 사례 연구

개발된 전압 및 전류 페이저 측정 데이터를 이용한 상태추정기의 타당성·정확성 그리고 효율성을 검증하기 위하여 IEEE 시험계통을 사용하였다[26]. 표 1, 표 2와 같은 측정데이터 및 PMU 데이터 군을 가지고 사례연구를 실시하였다. 각각의 사례는 설치된 PMU의 수를 전체 모선수의 10%, 20%, 30%, 40%로 점차 증가시키면서 상태추정의 결과에 미치는 영향을 검토한 것이다.

연산에 사용된 측정데이터들은 오차를 포함하는 것으로 가정하여 Gaussian noise를 첨가하였고, 전압, 주입전력, 조류전력 및 PMU 데이터에 추가된 오차의 표준편차는 표 3과 같

다. 상태추정의 결과에서 볼 수 있는 작은 오차는 이와 같이 측정 잡음 등을 가정한 오차의 부가에 기인하는 것이다.

페이지 측정데이터가 추가되어 상태추정의 정확성이 향상되었음을 검증하기 위하여 상태변수의 공분산을 계산하였다. 추정된 상태변수의 공분산은 식 (28)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} Cov(\hat{x}) &= Cov((H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} z) \\ &= Cov(G^{-1} H^T R^{-1} z) \end{aligned} \quad (28)$$

측정벡터(z)의 공분산은 다음과 같다.

$$Cov(z) = Cov(h(x) + e) = Cov(e) = R \quad (29)$$

식 (28)과 식 (29)로부터

표 1 측정데이터 및 PMU데이터 입력수(IEEE 30모선 계통)  
Table 1 Number of Input Meas. & PMU Data(IEEE 30 bus system)

	전압	주입 전력	조류 전력	PMU	I	θ
Case 1	1	28	12	0	0	0
Case 2	4			3	10	2
Case 3	7			6	19	5
Case 4	10			9	31	8
Case 5	13			12	40	11

표 2 측정데이터 및 PMU데이터 입력수(IEEE 118모선 계통)  
Table 2 Number of Input Meas. & PMU Data(IEEE 118 bus system)

	전압	주입 전력	조류 전력	PMU	I	θ
Case 1	1	30	179	0	0	0
Case 2	13			12	20	11
Case 3	25			24	48	23
Case 4	36			35	68	34
Case 5	48			47	81	46

표 3 측정데이터 및 PMU데이터 표준편차  
Table 3 Standard Deviations for Measurement Data & PMU Data

전압 크기	모선 주입전력	선로 조류전력	PMU
0.004	0.01	0.008	0.00001

$$\begin{aligned} Cov(\hat{x}) &= (G^{-1} H^T R^{-1}) Cov(z) (G^{-1} H^T R^{-1})^T \\ &= (G^{-1} H^T R^{-1}) R ((H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1})^T \\ &= (G^{-1} H^T R^{-1}) R (H^T R^{-1})^T ((H^T R^{-1} H)^{-1})^T \\ &= (G^{-1} H^T R^{-1}) R R^{-1} H H^{-1} R (H^T)^{-1} \\ &= G^{-1} H^T R^{-1} R (H^T)^{-1} = G^{-1} \end{aligned} \quad (30)$$

그러므로, 이득행렬의 역행렬( $G^{-1}$ )이 상태변수의 공분산이 된다.  $G^{-1}$ 의 제곱근인 표준편차를 이용하여 PMU 유·무 또는 개수에 따라 상태추정 결과(전압의 크기와 위상각)의 정확성이 어떻게 향상되는지 확인하였다.

각 case별 상태추정 연산 결과를 그림 1~4에 정리하였다. 모든 경우에 수렴하였으며, 설치된 PMU의 수가 증가할수록 상태추정 결과의 정확성이 향상되었다. 표 4는 각 Case 별 전압 크기와 전압 위상각에 대한 평균 표준편차를 나타낸 것으로, 설치된 PMU의 수가 늘어날수록 평균 표준편차가 작아짐을 볼 수 있다. 즉, 상태추정 연산의 정확성이 향상되었음을 알 수 있는 것이다.

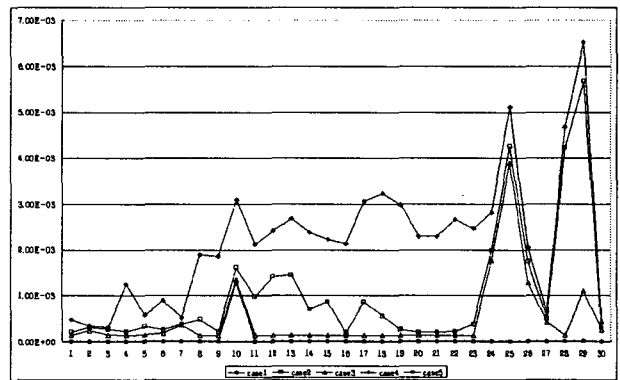


그림 1 IEEE 30모선 시험계통 공분산계산 결과 - |V|  
Fig. 1 Covariance results of IEEE bus system - |V|

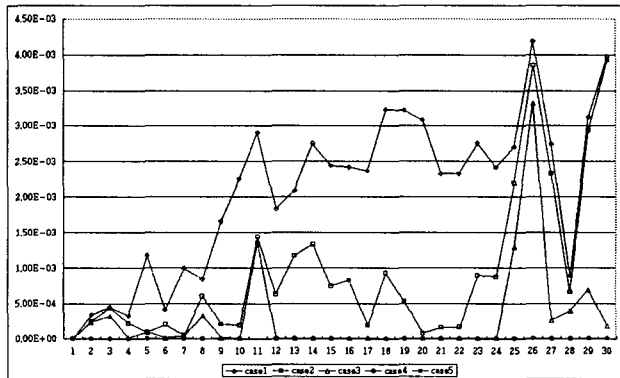


그림 2 IEEE 30모선 시험계통 공분산계산 결과 - θ  
Fig. 2 Covariance results of IEEE 30 bus system - θ

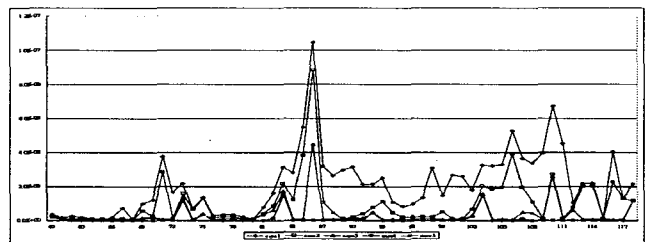


그림 3 IEEE 118모선 시험계통 공분산계산 결과 - |V|  
Fig. 3 Covariance results of IEEE 118 bus system - |V|

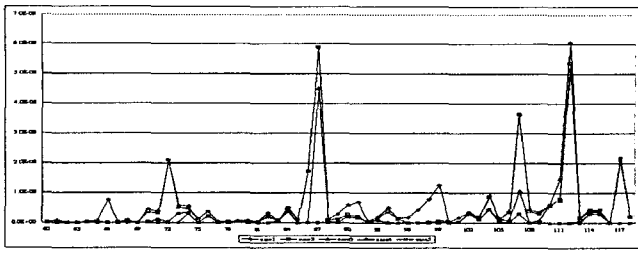


그림 4 IEEE 118모선 시험계통 공분산계산 결과 -  $\theta$   
 Fig. 4 Covariance results of IEEE 118 bus system -  $\theta$

표 4 각 Case별 평균 표준편차  
 Table 4 Average Standard Deviations in Each Case

	평균 표준편차			
	30모선		118모선	
	$ N $	$\theta$	$ N $	$\theta$
case 1	2.21E-03	2.08E-03	2.11E-08	5.57E-09
case 2	1.04E-03	9.36E-04	9.95E-09	4.14E-09
case 3	4.55E-04	2.88E-04	4.33E-09	2.27E-09
case 4	4.87E-05	4.77E-05	1.93E-09	8.17E-10
case 5	4.76E-05	4.71E-05	1.58E-09	6.20E-10

PMU가 설치될 경우 측정여유도가 증가함으로써, 상태추정 연산의 정확성 개선 효과뿐 아니라 신뢰성 향상 효과도 얻을 수 있다. 가령 PMU가 설치되지 않은 상태에서, IEEE 14모선 계통[26]의 선로 10-11의 조류전력을 측정하는 장비에 고장이 발생하여 이 측정데이터를 취득할 수 없다고 가정해 보았다. 이 경우, 모선 9에서 측정한 주입전력 측정 데이터는 critical measurement가 된다. 즉, 이 측정 데이터가 없을 경우 이 계통은 관측가능하지 않고, 따라서 전체 계통에 대한 상태추정연산이 불가능해지는 것이다.

만약 이 데이터가 불량데이터일 경우에는 정규오차 검사 등의 불량데이터 검사에 의해 오차를 검출할 수 없으며, 따라서 전체 상태추정 연산이 부정확하게 된다. 물론 운용 중인 계통의 상태를 다른 해석 프로그램에 제공할 수 없으므로 계통 운용에 차질이 생길 수도 있다.

표 5 정규오차 검사 결과  
 Table 5 Results of Normalized residuals Test

측정 데이터	정규오차
P 9	62.02
$I_{real}$ 9-10	-50.37
$I_{reactive}$ 9-10	48.84
Q 9	34.09
$I_{real}$ 9-14	-29.0
$I_{real}$ 9-7	-28.77
$I_{reactive}$ 9-14	25.53
$I_{reactive}$ 9-7	17.05
⋮	⋮

그러나 이 모선에 PMU가 설치되어 있다면 PMU가 제공하는 추가적인 데이터에 의해 여유도가 개선되고, 모선 9에

서의 주입전력 측정데이터는 더 이상 critical measurement가 아니다. 따라서, 정규오차 검사를 통해 불량데이터로 검출할 수 있게 된다. 표 5는 모선 9의 주입전력이 오차를 포함한 불량데이터일 때의 정규오차 검사결과이다. 페이지 측정장비가 설치되어 측정 여유도가 개선된 결과 모선 주입전력 측정 데이터의 정규오차가 가장 큰 것으로 계산되었고, 이 데이터를 불량데이터로 처리, 정확한 상태추정 연산이 가능해지는 것이다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 인공위성에 의해 동기화된 시각동기 페이지 측정데이터를 상태추정에 이용하는 기법을 제안하였다. 전압 및 전류 페이지를 이용한 상태추정기를 구현하기 위해서 pmu로부터 구한 측정데이터에 대한 측정방정식과 그에 상응하는 자코비안 행렬을 새롭게 유도하였다.

본 논문을 통해 개발된 상태추정기에 대하여 다양한 시험 계통을 이용하여 사례연구를 실시하였으며, 개발된 프로그램은 훌륭한 수렴성과 정확성을 확보하였음을 확인하였다. 상태추정 연산의 결과로 구한 상태변수의 정확성을 각 상태변수의 공분산을 구함으로써 평가하였다. 페이지 측정데이터를 기존의 측정데이터에 추가할 경우 페이지 데이터 없이 상태추정을 수행한 경우에 비해 더욱 정확한 상태추정 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 상태추정의 연산과정에서 불량데이터를 검출하고 연산결과의 정확성을 유지하기 위해서는 적절한 여유도(redundancy level)의 확보가 필수적인데, 페이지 측정데이터를 사용함으로써 여유도 향상의 효과를 얻을 수 있음도 확인하였다.

시각동기 위상측정데이터는 위성에 의해 동기화된 측정데이터이므로 이를 상태추정에 이용할 경우, 현재 전력계통 운용상황의 정확한 snap shot을 얻을 수 있다. 따라서, 전력계통에 대한 신속하고 정확한 해석과 제어를 할 수 있고, 계통의 안정적인 운용에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

### 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 실계통 적용," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2003.

[12] Chih-Wen Liu, "Phasor Measurement Applications in Taiwan," IEEE PES T&D Conference and Exhibition 2002, pp. 490-493, 2002.

[13] Magnus Akke, Daniel Karlsson, "Phasor Measurement Applications in Scandinavia," IEEE T&D Conference and Exhibition 2002, pp. 480-484, 2002.

[14] 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.

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

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

[17] 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.

[18] 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.

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

[20] T. Dy Liacco, "The Role and Implementation of State Estimation in an energy Management System," Electrical Power and Energy Systems, Vol. 12, No. 2, pp.75-79, 1990.

[21] 전진홍 외, "실시간 계통제어를 위한 동기위상측정장치 개발," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 85-87, 2000.

[22] 김재훈 외, "전력계통의 페이지 측정기 최적배치," 대한전기학회 논문지, 49권, 7호, pp. 313-322, 2000.

[23] 이경극 외, "동기위상 측정 장치를 이용한 전력계통 위상 각 측정," 대한전기학회 추계학술대회, pp. 55-57, 2000.

[24] A. Abur and A. Exposito, Power System State Estimation, Marcel Dekker, Inc., 2004.

[25] 김홍래 외, "WLAV 상태추정에 의한 전력계통 파라미터 에러 추정에 관한 연구," 대한전기학회 논문지, 제 49 권, 제 9호, pp. 451-458, 2000.

[26] <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>

## 저 자 소 개

### 권형식 (權亨錫)



1973년 1월 25일생. 1998년 순천향대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(박사).  
E-mail : psse73@sch.ac.kr

### 장한성 (張翰誠)



1980년 12월 16일생. 2006년 순천향대 공대 전기전자공학부 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 대학원 석사과정.  
E-mail : bluehs7@nate.com

### 김홍래 (金鴻來)



1963년 10월 9일생. 1986년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 Texas A&M 대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 순천향대학교 공대 정보기술공학부 교수.  
Tel : 041-530-1336  
Fax : 041-530-1548  
E-mail : hongkim@sch.ac.kr