

상태추정을 이용한 고 신뢰도 측정데이터 확보방안 연구

김홍래^{1*}

Preparation of Reliable Measurement Data by Using State Estimation

Hongrae Kim^{1*}

요 약 전력시스템을 안정적이고 경제적으로 운영하기 위하여 EMS(energy management system)와 SCADA(supervisory control and data acquisition) 시스템이 사용되고 있다. EMS 내의 조류계산, 상정고장해석, 안전도해석과 같은 다양한 기능들의 신뢰성을 높이기 위해서는 정확한 데이터의 확보가 필수적이다. EMS 내에서 상태추정이 이와 같은 역할을 수행할 수 있으며, 본 논문에서는 정확한 상태추정을 위한 가관측성 해석 및 불량데이터 처리 프로그램을 개발하였다. 기본적인 알고리즘을 설명하고 사례연구를 통해 제안된 기법의 타당성을 검증하였다.

Abstract EMS(energy management system) and SCADA(supervisory control and data acquisition) systems are used for reliable and efficient operation of electrical power systems. Various functions in EMS such as power flow, contingency analysis, security analysis essentially need accurate data set for reliable operation. State estimation can be a tool for providing these data. In this paper, programs for observability analysis and bad data processing are developed. Fundamental algorithms are introduced and validity of the proposed techniques is inspected with test cases.

Key words : 상태추정, EMS, 가관측성 해석, 불량데이터 처리

1. 서론

현대의 전력시스템에서 EMS (Energy Management System)는 계통운영에 필수적이고, 관련 산업에의 연관 효과도 매우 크다. 하지만 국내의 경우 전력계통 및 전력 시장 운영시스템의 시장규모가 적어, 자체개발보다는 외국제품을 도입, 설치 운영해 왔다. 이와 같은 기술의 해외 의존도 심화 및 외화 유출을 방지하고, 전력산업의 정책 변화에 신속히 대응할 수 있는 체계를 구축하는 등의 효과를 얻기 위하여 최근에는 국내에서도 산업자원부의 지원으로 한국형 EMS의 연구개발이 진행되고 있다[1].

상태추정은 EMS의 기능 중 한 부분으로서 계통의 상태를 파악하고, 전체 응용 프로그램에 데이터를 제공하는 중요한 역할을 한다[2, 3]. 따라서 신속·정확한 상태추정을 위해 실제 설비의 특성을 정확히 반영할 수 있도록 정

확한 모델링이 필요하고, 측정 데이터의 정도 개선 및 가관측성의 확보, 최대한 정확하고 효율적인 행렬 연산 기법의 도입을 중요하게 고려해야 한다.

상태추정기의 기본 기능은 이용 가능한 측정데이터만으로 전체 계통의 상태를 추정함과 동시에 에러를 포함한 데이터(bad data)를 찾아내어 제거함으로써 계통의 정확한 상태를 추정하는 것이다. 이때 계통의 가관측성(observability)이 확보되어야 한다는 전제가 필요하다. 본 논문에서는 상태추정의 기본 기능이며 가장 중요한 두 가지 기능인 불량데이터 처리와 가관측성 해석을 위한 알고리즘을 구현하고, 시험계통에 대한 사례연구를 통하여 그 타당성을 검증하였다.

2. 가관측성 해석

2.1 가관측성 해석 이론

가관측성 해석은 시스템의 가관측성을 결정하고, 시스템이 가관측하지 않을 경우, 관측할 수 없는 선로와 관측 가능한 지역을 판별한다. 또한 적당한 위치에 의사측정

이 논문은 2005학년도 순천향대학교 학술연구조성비 일반연구과제(과제번호: 20050072)로 지원을 받아 수행하였음
¹순천향대학교 전자정보공학과

*교신저자: 김홍래(hongkim@sch.ac.kr)

이터(pseudo-measurement)를 추가하여 전체 시스템의 가관측성을 확보한다.

전통적으로 계통의 가관측성 해석을 위해 topological method와 numerical method를 사용해 왔다. Topological method는 계통의 연결 상태, 즉 토폴로지를 탐색함으로써 그 계통이 관측가능한지를 판별한다. Numerical method는 자코비안 행렬로부터 얻어지는 이득행렬(gain matrix)의 factorization을 수행하는 과정에서 그 pivot들이 0의 값을 가지게 되는지를 판별하여 가관측성을 결정한다[4].

시스템의 가관측성은 선로정수 또는 계통의 운영 상태와는 별개의 문제이다. 따라서 모든 선로의 임피던스를 $j1.0$ p.u., 모든 모선의 전압의 크기를 1.0 p.u.로 가정하고 가관측성 해석을 수행할 수 있다. 그렇게 하면 계통 내 선로를 흐르는 직류 전력 조류를 다음 식 (1)과 같이 쓸 수 있다[5].

$$P_b = C\theta \tag{1}$$

여기서, P_b : vector of branch flows,
 C : branch-bus incidence matrix,
 θ : vector of bus voltage phase angles.

모든 측정데이터가 0이라면, 완전히 가관측한 시스템의 선로조류는 모두 0이 된다. 선로조류 중에 0이 아닌 값을 갖는 것이 있다면, 그 선로는 가관측하지 않다. 분할된 선형 측정 모델 $H_{AA}\theta = z_A$ 를 사용하면, θ 에 대한 WLS(Weighted Least Square) 상태추정 값은 다음 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\theta} = (H_{AA}^T H_{AA})^{-1} H_{AA}^T z_{AA} \tag{2}$$

$H_{AA}\hat{\theta} = 0$ 이고 $P_b = C\hat{\theta} \neq 0$ 이면, $\hat{\theta}$ 는 가관측하지 않은 상태라 한다. 어떤 선로 i 에서 $P_b(i) \neq 0$ 이면, 그 선로는 가관측하지 않은 선로라 한다. 다음 식 (3)과 같은 선형 분할 모델을 고려해 보자.

$$\begin{aligned} (H_{AA}^T H_{AA})\hat{\theta} &= 0 \\ G_{AA}\hat{\theta} &= 0 \end{aligned} \tag{3}$$

이득행렬(Gain matrix) G_{AA} 가 정칙행렬(nonsingular matrix)이면, 시스템은 완전히 가관측하다. 그러나, G_{AA} 가 비정칙행렬(singular matrix)이면, 행과 열의 치환으로

다음 식(4)와 같은 행렬로 바꿀 수 있다.

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_a \\ \hat{\theta}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

여기서 G_{11} 은 정칙행렬이고, $\hat{\theta}_b$ 에 임의의 값을 지정한 $\hat{\theta}_b$ 를 이용하려면 여러 개의 가능해 중 하나인 $\hat{\theta}_a$ 를 다음 식(5)와 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\theta}_a = -G_{11}^{-1} G_{12} \hat{\theta}_b \tag{5}$$

이렇게 구해진 해 $(\hat{\theta}_a, \hat{\theta}_b) = \hat{\theta}^*$ 에 대응되는 선로조류는 다음 식(6)과 같이 계산된다.

$$C\hat{\theta}^* = P_b^* \tag{6}$$

$P_b^*(i) \neq 0$ 인 i 번 선로는 가관측하지 않은 선로로 판별된다. 이상의 내용을 기반으로 한 가관측성해석 프로그램의 흐름도는 다음 그림 1과 같다. 계통의 가관측성 확보 여부는 측정데이터에 대한 자코비안 행렬(Jacobian matrix)로부터 계산한 이득 행렬을 이용한다. 이득행렬의 대각원소 중에 0이 포함되어 있으면, 행렬은 정칙행렬이며 상태추정 연산에 의해 모든 상태벡터의 해를 구할 수 없는 상태가 된다. 즉, 계통의 가관측성을 확보하지 못한 것이다.

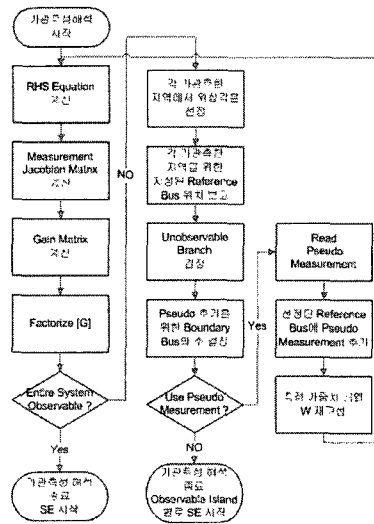


그림 1. 가관측성 해석 흐름도

이 경우에는 관측가능하지 않는 선로(unobservable branch)와 발생한 island의 경계모선(boundary bus)들을 결정한 후, 해당 모선에 대한 의사측정치(pseudo measurement)가 확보되어 있는지의 여부를 확인한다. 의사측정치가 있으면 측정데이터 군에 의사측정치를 추가함으로써 계통의 가관측성을 확보하고 전체 계통에 대해 상태추정 연산을 수행한다. 만약 의사측정치가 없다면, 각 island별로 상태추정을 수행하게 되면, 이 경우에는 각 island별로 슬랙모선(slack bus)을 선정하여 위상각의 기준으로 삼게 된다.

2.2 사례연구

Numerical method를 이용하는 가관측성 해석의 타당성을 검증하기 위해 14모선 시험계통[6]을 이용하였다. 측정데이터가 부족하여 island가 발생하고, 프로그램이 자동으로 이용 가능한 pseudo 측정데이터를 적용하여 island가 해소되는 과정을 모의하였다.

첫 번째 가관측성 해석 결과 그림 2와 같이 3개의 island가 발생한 것을 확인하였다. 프로그램은 자동으로 이용가능한 의사측정데이터를 모선 2에 추가함으로써 그림 3과 같이 하나의 island를 해소하였다. 계통은 여전히 측정데이터의 부족으로 인해 2개의 island로 구분되어 있으며, 이를 확인한 프로그램은 또 다른 의사측정데이터를 추가하여 island를 해소하였다. 최종적으로 그림 4와 같이 전체 계통의 가관측성을 확보하였다. 이상에서 보는 바와 같이 측정데이터의 부족으로 인한 전체 계통의 가관측성이 확보되지 않았을 때, 이용 가능한 의사측정데이터를 이용해 가관측성을 확보할 수 있음을 확인하였다.

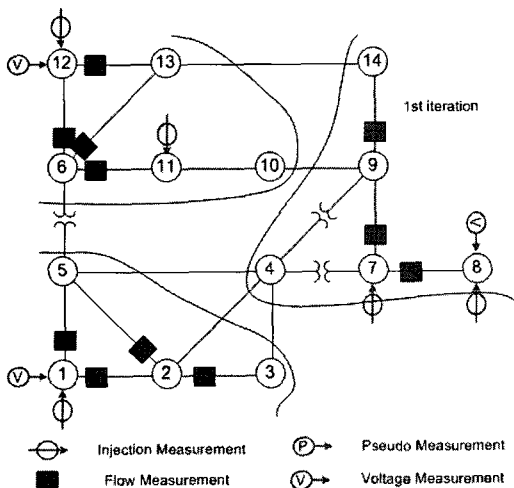


그림 2. 최초 가관측성 해석 결과

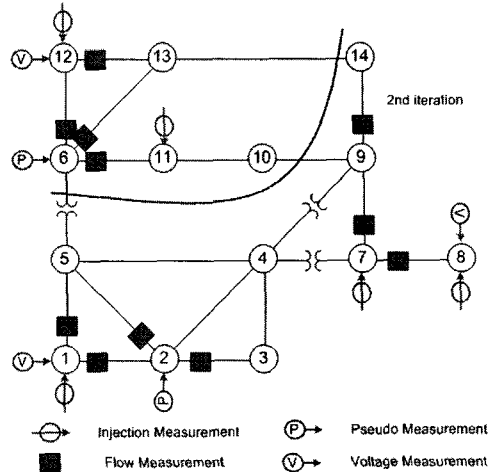


그림 3. 1차 의사측정데이터 추가 경우

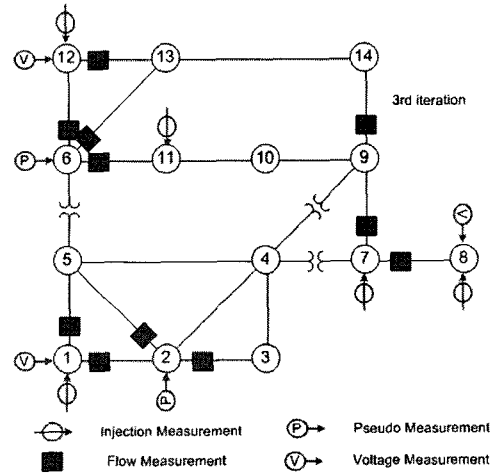


그림 4. 최종 가관측 계통

3. 불량데이터 처리

3.1 불량데이터 처리 이론

전력계통에서 흔히 불량데이터(bad data)라 불리는 아날로그 에러는 데이터 통신 시스템이나 측정시스템의 고장, 오동작에 의해 주로 발생한다. 지난 30여 년의 연구 결과 Chi-square test를 통하여 불량데이터를 검출하는 방법과, 정규화 잉여오차 테스트(normalized residual test)나, 가설검증 판별법(hypothesis testing identification)을 통하여 불량데이터를 판별하는 기법이 개발되었다.

Chi-square test는 표준정규분포를 따르는 독립 랜덤변수의 제곱의 합은 카이스퀘어 분포를 가진다는 것을 전제로 한다. 먼저 WLS(weighted least square) 상태추정을

수행하고 목적함수 $J(x)$ 를 계산한다. 이 목적함수는 자유도가 $(m-n)$ 인 카이스퀘어 분포를 가진다 (m : 측정데이터의 수, n : 상태 변수의 수). 테스트 결과 목적함수가 카이스퀘어 분포곡선(자유도 : $(m-n)$, 일정확률 : p)보다 큰 값을 가진다면, 측정데이터군(set) 안에 불량데이터가 존재한다고 볼 수 있다[5]. 정규화 잉여오차 테스트는 가설검증 판별법을 포함한 다른 방법들 보다 가장 안정적인 불량데이터 처리기법으로 알려져 있다.

3.2 정규화 잉여오차 테스트

정규화 잉여오차 테스트는 다음과 같은 절차를 걸쳐 실시한다. 우선, 선형화된 WLS 상태추정기는 식 (7), (8)과 같다[5].

$$\Delta \hat{x} = (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} \Delta z \quad (7)$$

$$\Delta \hat{z} = H \Delta \hat{x} = K \Delta z \quad (8)$$

여기서, x : 상태벡터(모선전압의 크기, 위상각)

z : 측정벡터

H : 자코비안 행렬

$R = E[ee^T]$: 측정잡음의 공분산행렬

$K = H(H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1}$

: hat matrix,

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

위 식의 S 는 오차감도행렬(residual sensitivity matrix)이라 부르며, 다음과 같은 특성을 갖는다[5].

- ① 오차의 공분산이 모두 같은 경우에만 대칭(symmetric)이다.
- ② $S \cdot S \cdot S \cdots S = S$
- ③ $S \cdot R \cdot S^T = S \cdot R$

오차(r)의 공분산 행렬 Ω 는 위에 설명한 내용을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Omega = E[rr^T] = S \cdot E[ee^T] \cdot S^T = SRS^T = SR \quad (9)$$

따라서, i 번째 측정값의 정규화 잉여오차 r_i^N 는

$$r_i^N = \frac{r_i}{\sqrt{\Omega_{ii}}} = \frac{r_i}{\sqrt{R_{ii} S_{ii}}} \quad (10)$$

식 (10)에서 r_i 는 i 번째 측정데이터와 상태추정에 의해 계산된 추정값과의 차이로, 이를 오차의 표준편차로 정규화(normalize)한 것이 정규화 잉여오차이다. 상태추정을 수행한 후 모든 측정데이터의 정규화 잉여오차를 계산한다. 정규화 잉여오차가 정해진 판별한계치보다 크면 불량데이터로 간주한다. 전체 측정값들 중에 이 측정값을 제거한 후 상태추정을 다시 수행하며, 모든 불량데이터가 측정데이터 군에서 제외될 때까지 이 과정을 반복한다.

3.3 사례연구

개발된 상태추정 프로그램은 IEEE 14모선 계통[6]을 이용한 사례연구를 통해 타당성과 효용성을 검증하였다. 이 계통으로부터 그림 5와 같은 데이터가 측정된다고 가정하였다.

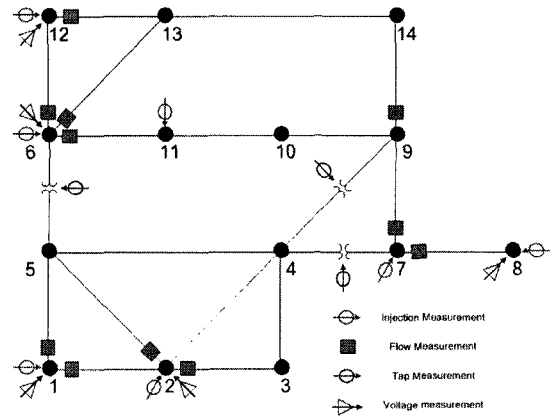


그림 5. 데이터의 측정 위치

이용 가능한 데이터의 수는 총 44개이고 계통 전체의 가관측성은 확보되었다. 단, 가관측성이 확보되지 않을 경우 프로그램 내의 가관측성 해석 기능으로 자동으로 필요한 위치에 pseudo measurement를 추가하여 가관측성을 확보할 수 있다. 여유도는 약 1.63이고, 불량데이터의 판별한계치는 3.0이다. 측정된 데이터 중 불량데이터에 해당하는 데이터는 표 1과 같다.

표 1. 불량데이터의 종류 및 위치

종류	위치	good data(pu)	bad data(pu)
Q Injection measurement	8	0.17357	-0.17357
P flow measurement	1-5	0.75552	0.45552
Tap ratio	5-6	0.93200	0.63200

이러한 측정 데이터를 이용하여 본 논문에서 개발한 상태추정 프로그램을 실행하면 3.2절에서 기술한 방법을 이용하여 불량데이터를 찾기 시작한다. 이때 정규화 잉여 오차가 판별치보다 크면 가장 큰 데이터를 제거하고 판별치보다 낮으면 불량데이터 처리는 완료된다. 매 상태추정 수행 시 최대 정규화오차를 갖는 불량데이터가 하나씩 제거되며, 그 결과는 표 2에 정리하였다.

표 2. 불량데이터의 Iteration별 정규 오차 검사 결과

Iteration	측정 데이터	정규 오차
1	Tap at 5-6	334.81564
	Q_flow 6-11	334.73765
	Q_inj at 6	334.73605
	⋮	⋮
2	P_flow 1-5	251.47639
	Q_inj at 8	244.99683
	Q_flow 7-8	232.80757
	⋮	⋮
3	Q_inj at 8	244.82534
	Q_flow 7-8	232.97830
	P_flow 2-3	39.52982
	⋮	⋮
4	P_inj at 11	0.00000
	P_flow 9-14	0.00000
	Q_flow 9-14	0.00000
	⋮	⋮

표 3은 상태추정기에 입력된 데이터와 상태추정을 통해 불량데이터가 보정된 결과 데이터를 비교한 결과이다. 이 결과를 통해 본 논문에서 개발한 상태추정기는 정확하게 불량데이터를 판별하고 보정하는 것을 알 수 있다. 불량데이터 처리 완료 후에 추정된 상태변수 즉, 전압의 크기와 위상은 실측된 아날로그 데이터와 일치하는 것을 확인하였다. 그림 6은 아날로그 데이터와 추정된 전압의 크기와 위상을 비교한 것이다.

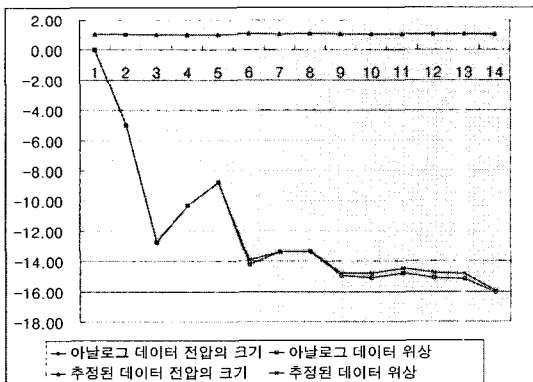


그림 6. 아날로그 데이터와 추정된 데이터 비교

표 3. 입력 데이터와 상태추정 결과 비교

Measurement	Measured Value	Estimated Value
Pflow 1-5	0.45552	0.75522
Pflow 7-8	0.00000	0.00000
Pflow 7-9	0.28085	0.28085
Pflow 12-13	0.01610	0.01609
Pflow 6-13	0.17736	0.17736
Pflow 6-11	0.07339	0.07339
Pflow 9-14	0.09438	0.09438
Pflow 2-3	0.73186	0.73186
Pflow 2-5	0.41513	0.41489
Pflow 6-12	0.07780	0.07780
Pflow 1-2	1.56828	1.56790
Qflow 1-5	0.03504	0.03503
Qflow 7-8	-0.16910	-0.16909
Qflow 7-9	0.05795	0.05796
Qflow 12-13	0.00743	0.00742
Qflow 6-13	0.07161	0.07161
Qflow 6-11	0.03465	0.03465
Qflow 9-14	0.03665	0.03665
Qflow 2-3	0.03565	0.03564
Qflow 2-5	0.00762	0.00766
Qflow 6-12	0.02487	0.02489
Qflow 1-2	-0.20391	-0.20390
Pinj 7	0.00000	0.00000
Pinj 8	0.00000	0.00000
Pinj 1	2.32283	2.32313
Pinj 11	-0.03500	-0.03500
Pinj 12	-0.06100	-0.06099
Pinj 2	0.18300	0.18300
Pinj 6	-0.11200	-0.11200
Qinj 7	0.00000	-0.00001
Qinj 8	-0.17357	0.17355
Qinj 1	-0.16888	-0.16888
Qinj 11	-0.01800	-0.01800
Qinj 12	-0.01600	-0.01598
Qinj 2	0.29648	0.29649
Qinj 6	0.04720	0.04720
Vmag 1	1.06000	1.05998
Vmag 12	1.05520	1.05521
Vmag 8	1.09000	1.09003
Vmag 2	1.04500	1.04499
Vmag 6	1.07000	1.06999
Tap 4-7	0.97800	0.97803
Tap 5-6	0.63200	0.93201
Tap 4-9	0.96900	0.96900

4. 결론

본 연구를 통해 개발된 상태추정기의 특성 및 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 상태추정기를 위한 가관측성 해석 프로그램을 개발하고, 시험계통을 이용하여 검증하였다. 개발된 가관측성 해석 기능은 numerical method를 적용하여 구현하였으며, 측정데이터가 충분하지 않아서 island가 발생하는 경우 관측가능하지 않은 선로와 경계 모선들을 정확하게 판별하였다. 계통이 가관측성을 확보하지 못한 경우 의사측정데이터를 이용하여 전체 계통의 가관측성을 확보하고 상태벡터 즉 모선전압의 크기와 위상각들을 계산하는 기능도 구현하여 상태추정기의 수행능력을 향상시켰다. 개발된 상태추정기는 우리나라의 육지계통과 제주계통 같이 물리적으로 분할되어 있는 계통뿐만 아니라, 물리적으로 연결되어 있으나 측정데이터의 부족으로 인한 island들에 대해서도 견실한 상태추정이 가능하다.

(2) 정규화 잉여오차를 이용하는 불량데이터 처리 프로그램을 개발하고, 가관측성 해석의 경우와 마찬가지로 사례연구를 통해 그 성능을 검증하였다. 정규화 잉여오차를 이용하여 불량데이터를 처리하는 기법은 불량데이터를 판별하는 특성이 매우 좋다는 것이 사례연구를 통해 확인되었다. 정규화 잉여오차를 이용하는 기법은 계통의 크기가 커질수록 계산시간이 증가하는 문제점이 있어서, 측정데이터의 가중치로 사용되는 표준편차를 조정하여 수렴특성을 향상시키고 연산의 정확도를 확보하는 기능도 추가하였다. 이와 같이 정규화 잉여오차와 측정데이터의 가중치를 조정하는 기법을 동시에 구현한 것은 매우 특별하다고 할 수 있다.

현재 우리나라 계통의 실시간 데이터를 이용하여 상태 추정 프로그램을 테스트하고 있으며, 전체 EMS의 국산화에 기여할 수 있을 것으로 기대한다. 향후 상태추정 분야의 지속적인 연구를 통해 SCADA를 통해 중앙으로 전송된 데이터에서 불량데이터를 제거하고, 신뢰성 높은 데이터베이스를 EMS에 제공하여야 한다. 결국 최종적으로는 정확한 데이터를 이용하여 EMS 내의 각종 소프트웨어들이 정확하고 효율적인 동작을 수행함으로써, 전체 전력계통 운영의 정확성, 효율성, 경제성, 안전성 등을 확보하는 기틀을 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] 송석하, "한국형 에너지관리시스템(K-EMS) 개발", Journal of Electrical World, 2006.
- [2] F. Wu, "Power System State Estimation: A Survey," Electrical Power & Energy Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 80-87, 1990.
- [3] 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.
- [4] B. Gou and A. Abur, "A Direct Numerical Method for Observability Analysis," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 14, No. 2, 2000.
- [5] A. Abur and A. Exposito, Power System State Estimation, Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [6] <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>

김 홍 래(Hongrae Kim)

[정회원]



- 1986년 2월 : 연세대학교 전기공학과(공학사)
- 1989년 2월 : 연세대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
- 1995년 5월 : Texas A&M 대학교 전기공학과(공학박사)
- 1995년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 전자정보공학과 교수

<관심분야>

전력시스템에 대한 컴퓨터 응용 해석 및 운영