

## 한국형 EMS를 위한 상태추정기 개발 II

김홍래\*, 장한성\*, 김병호\*, 권형석\*, 문영현\*\*, 민경일\*\*, 이효상#, 김선구#, 허성일#, 이육화###, 윤상운###, 조윤성###  
 \*순천향대학교, \*\*연세대학교, #전력거래소, ###LS산전

## State Estimator for Korean EMS II

Hongrae Kim\*, Han Sung Jang\*, Byoung Ho Kim\*, Hyung-Seok Kwon\*, Young-Hyun Moon\*\*, Kyung-II Min\*\*,  
 Hyo-Sang Lee#, Seon-Gu Kim#, Seong-II Hur#, Wook-Hwa Lee##, Sang-Yun Yun##, Yoon-Sung Cho##  
 \*Soonchunhyang Univ., \*\*Yonsei Univ., #Korea Power Exchange, ##LS Industrial Systems

**Abstract** - 전력 시스템의 안정적인 운용을 위해서는 현재 운전 중인 시스템에 대한 정확한 정보를 획득하는 것이 매우 중요하다. SCADA를 통해 수집된 측정데이터는 에러를 포함할 수 있으며, 이렇게 에러를 포함한 데이터를 bad data라고 한다. 상태추정기의 중요한 기능 중의 하나가 bad data의 처리이며, 이를 통해 EMS 내 각종 응용프로그램에 정확한 데이터베이스를 제공할 수 있다. 본 논문에서는 현재 개발 중인 한국형 EMS에 포함될 상태추정기의 bad data 처리 기법을 소개하고, 시험 계통에 대한 사례연구를 통하여 검증하였다.

### 1. 서 론

상태추정은 SCADA에 의해 수집된 여러 가지 측정데이터를 이용하여 현재 계통의 정확한 상태를 추정하는 기법이다. 상태추정의 결과는 EMS(Energy Management System) 내의 여러 가지 계통 운용 프로그램에 제공된다[1, 2]. 상태추정기의 기본 기능은 이용 가능한 측정데이터만으로 전체 계통의 상태를 추정함(가관측성 확보 전제)과 동시에 에러를 포함한 데이터(bad data)를 찾아내어 제거함으로써 계통의 정확한 상태를 추정하는 것이다.

이처럼, bad data 처리 기능은 가관측성 해석 기능과 함께 상태추정 연산 기능에 대한 가장 중요한 부기능(sub-function)이다. 본 논문에서는 한국형 EMS를 위해 개발 중인 상태추정기의 bad data 처리 기법을 소개하고, IEEE 14모선 시험계통에 대해 사례연구를 통해 bad data 처리에 대한 타당성을 검증하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 bad data 처리 이론

전력계통에서 흔히 bad data라 불리는 아날로그 에러는 데이터 통신 시스템이나 측정시스템의 고장, 오동작에 의해 주로 발생한다. 지난 30여 년의 연구 결과 Chi-square test를 통하여 bad data를 검출하는 방법과, 정규화 잉여오차 테스트(normalized residual test)나, 가설검증 판별법(hypothesis testing identification)을 통하여 bad data를 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 분포 곡선(자유도:  $(m-n)$ , 일정확률:  $p$ )보다 큰 값을 가진다면, 측정데이터군(set) 안에 bad data가 존재한다고 볼 수 있다[3]. 정규화 잉여오차 테스트는 가설검증 판별법을 포함한 다른 방법들 보다 가장 안정적인 bad data 처리기법으로 알려져 있다.

#### 2.2 정규화 잉여오차 테스트

Normalized residual test는 다음과 같은 절차를 걸쳐 실시한다. 우선, 선형화된 WLS 상태추정기는 식 (1), (2)와 같다.

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

$$\Delta \hat{z} = H \Delta \hat{x} = K \Delta z \quad (2)$$

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

$$r = \Delta z - \Delta \hat{z} = (I - K) \Delta z \quad (3)$$

$$= (I - K)(H \Delta x + e) = (I - K)e = Se$$

$S$  을 오차감도행렬(residual sensitivity matrix)이라 부르며, 오차의 공분산 행렬  $\Omega$  는 다음과 같이 표현된다.

$$E[rr^T] = \Omega = S \cdot E[ee^T] \cdot S^T = SRS^T = SR \quad (4)$$

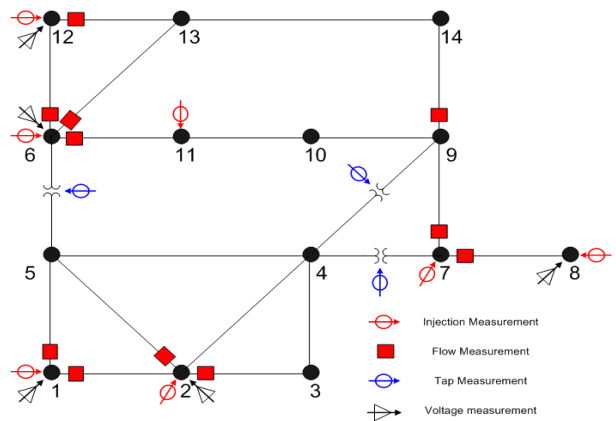
따라서,  $i$  번째 측정값의 정규화잉여오차  $r_i^N$ 는

$$r_i^N = \frac{r_i}{\sqrt{\Omega_{ii}}} = \frac{r_i}{\sqrt{R_{ii} S_{ii}}} \quad (5)$$

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

#### 2.3 사례연구

개발된 상태추정 프로그램은 IEEE 14모선 계통[4]을 이용한 사례연구를 통해 타당성과 효용성을 검증하였다. 이 계통으로부터 그림 1과 같은 데이터가 측정된다고 가정하였다.



<그림 1> 각 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, bad data의 판별한계치는 3.0이다. 측정된 데이터 중 bad data에 해당하는 데이터는 표 1과 같다.

<표 1> bad data의 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 2.2절에서 기술한 방법을 이용하여 bad data를 찾기 시작한다. 이때 정규화 잉여오차가 판별치보다 크면 가장 큰 데이터를 제거하고 판별치보다 낮으면 bad data 처리는 완료된다. 매 상태추정 수행 시 최대 정규화오차를 갖는 bad data가 하나씩 제거되며, 그 결과는 표 2에 정리하였다.

<표 2> bad data의 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
	P_flow 6-11	334.72133
	P_inj at 6	334.71971
	∴	∴
2	P_flow 1-5	251.47639
	Q_inj at 8	244.99683
	Q_flow 7-8	232.80757
	P_flow 2-5	178.86204
	P_inj at 1	104.98110
	∴	∴
3	Q_inj at 8	244.82534
	Q_flow 7-8	232.97830
	P_flow 2-3	39.52982
	P_inj at 2	39.52919
	Tap at 4-7	38.73299
	∴	∴
4	P_inj at 11	0.00000
	P_flow 9-14	0.00000
	Q_flow 9-14	0.00000
	Q_inj at 11	0.00000
	Tap at 4-9	0.00000

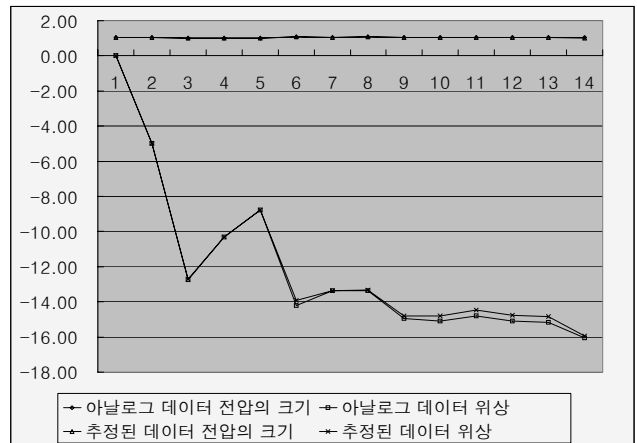
표 3은 상태추정기에 입력된 데이터와 상태추정을 통해 bad data가 보정된 결과 데이터를 비교한 결과이다. 이 결과를 통해 본 논문에서 개발한 상태추정기는 정확하게 bad data를 판별하고 보정하는 것을 알 수 있다.

<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

Bad data 처리 완료 후에 추정된 상태변수 즉, 전압의 크기와 위상은 실측된 아날로그 데이터와 일치하는 것을 확인하였다. 그림 2는 아날로그 그 데이터와 추정된 전압의 크기와 위상을 비교한 것이다.



<그림 2> 아날로그 데이터와 추정된 데이터 비교

### 3. 결 론

정규화 잉여오차를 이용하는 bad data 처리 프로그램을 개발하고, 사례연구를 통해 그 성능을 검증하였다. 정규화 잉여오차를 이용하여 bad data를 처리하는 기법은 bad data를 판별하는 특성이 가장 뛰어나지만, 연산시간이 과도한 단점이 있다. 따라서, 계통의 크기가 커질수록 실시간 적용에 문제점을 보이게 된다.

한국형 EMS를 위해 개발하는 상태추정기에는 실시간 적용이 가능하도록 연산시간을 획기적으로 줄일 수 있는 방법을 고려하고 있으며, 측정데이터의 가중치(weight)를 조정하여 빠른 시간 내에 수렴할 수 있도록 하는 re-weighting method를 함께 구현하였다. Re-weighting method는 시스템에 따라 weight의 크기를 조정(tuning)하여야 하는 등 특성이 좋지 않은 면이 있으나, 상태추정기의 실시간 운영 특성에 부합하기 위하여 부득이 사용을 고려할 수밖에 없는 상황이다. 정규화 잉여오차를 이용하는 방법과 re-weighting method를 상호 보조적으로 사용함으로써, 단점을 보완하고 장점을 극대화할 수 있도록 운용하는 방법을 고려할 수 있다.

#### [감사의 글]

본 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업연구개발사업(R-2005-1-398-004)으로 수행되었습니다.

#### [참고 문헌]

- [1] F. Wu, "Power System State Estimation: A Survey," Electrical Power & Energy Systems, Vol. 12, No. 2, pp.80-87, 1990.
- [2] 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.
- [3] A. Abur and A. Exposito, Power System State Estimation, Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [4] <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>