

전력계통 상태추정을 위한 leverage point 판별에 관한 연구

이 광기, 임 재섭, 권 형석, 김 흥래  
 순천향대학교 전기공학과

Identification of Leverage Points for Power System State Estimation

Koangkee Lee, Jaesub Lim, Hyung-seok Kwon, Hongrae Kim  
 Dept. of Electrical Engineering, Soonchunhyang University

**Abstract** - Existence of leverage points was claimed to be the reason for the WLAV estimator failing to reject bad data in the measurements. This paper presents an impact of leverage points on the result of power system state estimation. State estimator is run with measurement sets with gross error and leverage point. Three test cases are performed and the results are presented using IEEE 30 bus system.

1. 서 론

현대의 power system control center에서는 전력계통 상태추정기를 사용하여 계통 운용에 필요한 데이터베이스를 구성하는 방법이 보편적으로 사용되고 있다. 따라서, 전력계통 상태추정기는 전력계통의 실시간 운용과 구조개편 상황에서의 정확한 전력요급의 정산을 위하여 반드시 필요한 기능이 되었다.

상태추정기는 계통 내에서 측정된 전압, 전류, 전력 등의 측정 데이터를 사용하여 계통의 전압 프로파일을 계산하게 되는데, 측정 데이터 중에 leverage point가 포함되어 있는 경우 상태추정의 결과에 중대한 오류가 발생할 가능성이 있게 된다. 본 논문에서는 측정 데이터 중에 leverage point를 판별하고, leverage point가 상태추정의 결과에 어떤 영향을 미치는지를 고찰한다.

측정 데이터에 단순한 불량 데이터가 포함된 경우와 leverage point인 데이터에 불량 데이터가 포함된 경우를 비교함으로써 leverage point의 영향을 검사하였으며, 시험계통으로 IEEE 30모선 계통을 사용하였다.

2. 본 론

2.1 상태추정 이론

상태추정의 수학적 모델은 측정 벡터  $z$ 와 상태벡터  $x$ 의 관계에 의해 결정되며, 그 식은 다음과 같다.

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

- $z$ : 차수  $(m \times 1)$ 의 측정 벡터,
- $x$ : 차수  $(n \times 1)$ 의 상태 벡터,
- $h(x)$ : 비선형 측정 함수,
- $e$ : 차수  $(m \times 1)$ 의 측정 잡음 벡터,
- $m$ : 측정 데이터의 수,
- $n$ : 상태 변수의 수,
- $m/n$ : 측정 여유도.

임의의  $x_0$ 에서의  $h(x)$ 를 테일러급수로 전개한 후 1차 항만을 써서 간략히 하면, 식(1)은 다음과 같이 쓸

수 있다.

$$\Delta z = H \cdot \Delta x + e \tag{2}$$

여기서,  $\Delta z = z - h(x_0)$ ,

$$H = \frac{\partial h}{\partial x} \text{ at } x_0,$$

$$\Delta x = x - x_0.$$

식(1)에서 사용된 오차벡터  $e$ 는 평균이 0이며 가우시안(Gaussian) 분포를 가지는 독립 랜덤 변수들의 벡터로 가정한다. 이때, 측정 에러  $e_i$ 의 분산  $\sigma_i^2$ 은 측정값의 정확도를 표시하게 되므로, 분산이 작으면 그 측정값은 정확한 것이고 분산이 큰 값을 가지면 그 측정값은 덜 정확한 것으로 간주된다. 식(1)에서 목적함수를 정의하고 그 목적함수를 최소화하는 상태벡터  $x$ 를 구하는 것이 상태추정의 과정이다. 측정함수  $h(x)$ 가 비선형 함수이므로 선형 함수로 근사화 한 후 방정식을 반복계산함으로써 최종적인 상태벡터를 구하는 것이다.

2.2 WLS 상태추정

WLS 상태추정의 목적함수는 다음과 같다.

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

$$= \sum_{i=1}^m \frac{1}{\sigma_i^2} \{z_i - h_i(x)\}^2$$

목적함수  $J(x)$ 를 최소화하기 위한 조건은 식(4)와 같으며, 자코비안 행렬  $H(x)$ 는  $\partial h(x)/\partial x$ 를 계산함으로써 구할 수 있다.

$$\partial J/\partial x = H^T(x) R^{-1} \{z - h(x)\} = 0 \tag{4}$$

비선형 측정함수  $h(x)$ 를 선형함수로 근사화 하면 식(5)와 같다.

$$h(x) \cong h(x^k) + H(x^k)(x - x^k) \tag{5}$$

식(5)를 식(4)에 대입하여 다음의 정규 방정식을 구할 수 있으며 반복계산법을 사용하여 방정식의 해를 구할 수 있다.

$$H^T(x^k) R^{-1} H(x^k) \Delta x^k = H^T(x^k) R^{-1} \{z - h(x^k)\} \tag{6}$$

식(6)을 다시 정리하면,

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

여기서,  $\Delta x^k = x - x^k$ ,  
 $G(x^k) = H^T(x^k) R^{-1} H(x^k)$   
 $\Delta z^k = z - h(x^k)$

상태벡터가 정확한 수렴오차 내에 들면 ( $|\Delta x^k| < \epsilon$ ) 그 값을 최적 상태벡터  $\hat{x}$ 로 결정한다.

### 2.3 WLAV 상태추정

WLAV 상태추정기의 목적함수는 다음과 같이 정의되며, 이 함수를 최소화 하는  $x$ 가 현재의 계통을 나타낸다.

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \omega_i |z_i - h_i(x)| \quad (8)$$

식(8)의 목적함수는 다음과 같은 선형 계획법 문제를 반복 계산함으로써 최소화 할 수 있다. 이 식에서  $k$ 는 반복단계를 표시한다.

$$\min J(x) = \sum_{i=1}^m \omega_i \cdot (u_i + v_i) \quad (9)$$

$$\text{s.t. } \Delta z^k = H(x^k) \cdot \Delta x^k + u - v \quad (10)$$

여기서,  $\Delta z^k = z - h(x^k)$ ,

$$H = \frac{\partial h}{\partial x}, \text{ at } x_0.$$

$\omega_i = i$ 번째 측정값의 측정가중치,

$u, v =$  음이 아닌 잉여변수(slack variables),  
 $(u-v)$ 는 측정 오차를 나타냄.

WLAV 상태추정기는 그 특성상 계산결과에 대한 불량데이터의 영향은 식(9)과 (10)의 계산과정에서 자동적으로 제거되고 정확한 측정데이터만으로 상태추정을 수행하게 된다.

### 2.4 Leverage point

$$z = H \cdot x + e \quad (11)$$

$$\hat{x} = (H^T H)^{-1} H^T z \quad (12)$$

(12)식을 (11)식에 대입하면

$$\begin{aligned} \hat{z} &= H \cdot \hat{x} \\ &= H(H^T H)^{-1} H^T z \\ &= K \cdot z \end{aligned} \quad (13)$$

$$K_{ii} = h_i(H^T H)^{-1} h_i^T \quad (14)$$

$K_{ii}$ 는 흔히 hat matrix라고 하며,  $0 \leq K_{ii} \leq 1$ 의 값을 가진다.  $K_{ii}$ 의 값을 검사함으로써 그 측정 데이터가 leverage point인지의 여부를 판단할 수 있으며, 다음과 같은 값을 갖는 측정 데이터를 leverage point로 결정하는 것이 일반적이다.

$$K_{ii} \geq 2 \frac{n}{m} \quad (15)$$

여기서,  $n$ : 상태변수의 수,  $m$ : 측정데이터의 수.

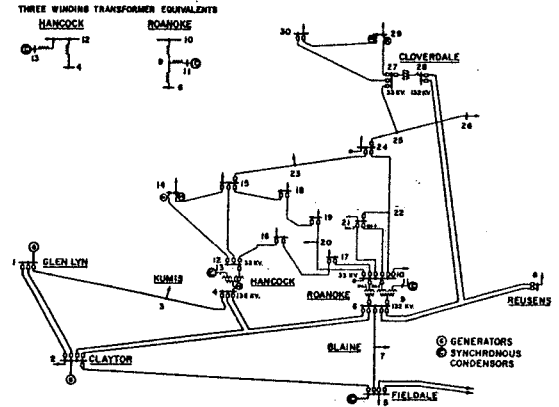


그림 1. IEEE 30 모선 계통

Leverage point인 측정 데이터의 잉여오차(residual)는 아주 작은 값을 가지게 되며, 따라서 불량 데이터로 판별하는데 어려움이 생기게 된다. 일반적으로 다음과 같은 경우의 측정 데이터가 leverage point의 원인이 된다.

- ① 비교적 짧은 선로의 말단에서의 유입전력과 전력 조류 측정값
- ② 여러 개의 선로들이 연결된 모선의 모선 유입전력 측정값

### 3. 사례연구

그림 1과 같은 IEEE 30모선 계통에서 leverage point를 판별하고 그 영향을 평가하였다. 계통 내 일부 측정기의 고장을 가정하고, 다음과 같은 세 가지 경우에 대하여 bad data의 영향을 고찰하였다. 사례연구에 이용한 측정데이터는 표 1에 정리하였다.

- 사례 1 : leverage point에 bad data 발생
- 사례 2 : leverage point가 아닌 불량 측정 데이터
- 사례 3 : leverage point와 leverage point가 아닌 측정 데이터에 모두 에러가 발생한 경우

표 1. 사례연구에 이용한 측정데이터

데이터 종류	데이터 측정 모선 및 선로
전압의 크기	1, 2, 5, 8, 11, 13
모선 주입전력	1, 2, 4, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 30
선로 조류전력	1-2, 1-3, 2-4, 3-4, 2-5, 2-6, 4-6, 5-7, 6-7, 6-8, 6-9, 6-10, 9-11, 9-10, 4-12, 12-13, 12-14, 12-15, 12-16, 14-15, 16-17, 15-18, 18-19, 19-20, 10-20, 10-17, 10-21, 10-22, 21-22, 15-23, 22-24, 23-24, 24-25, 25-26, 25-27, 28-27, 27-29, 27-30, 29-30, 8-28, 6-28

### 3.1 Leverage point 판별

식 (15)의 판별식을 이용하여 측정데이터가 leverage point인지의 여부를 판별하였다. 다음의 식에서 계산되는 바와 같이 0.92이상의 값을 갖는 측정 데이터를 leverage point로 결정하였고, 그 결과 표 2에 정리한 다섯 개의 측정 데이터가 leverage point임을 확인하였다.

$$K_{ii} = 2 \times \frac{59}{6 + 2 \times 20 + 2 \times 41} = 0.921875$$

표 2. Hat matrix 계산 결과

Measurement		$K_{ii}$
No	Type	
9	PIIn 4	0.954721
56	PF1 6-8	0.953969
95	QF1 5-7	0.928119
96	QF1 6-7	0.964861
97	QF1 6-8	0.966881

### 3.2 사례 1

표 2에 정리한 다섯 개의 leverage point 중에서 6번 모선과 8번 모선을 연결하는 선로를 흐르는 유효전력 조류 측정 데이터인 PF1 6-8에 오차를 포함시켜 상태추정을 수행하였다. 그 결과를 표 3에 정리하였으며, 표에서 볼 수 있는 것처럼 정규화 오차(normalized residual) 검사에서는 실제 불량 데이터인 PF1 6-8은 정상 데이터로 인식된 반면 정확한 데이터인 PF1 8-28을 불량 데이터로 판별하였다.

### 3.3 사례 2

이번에는 leverage point가 아닌 선로 6-10을 흐르는 유효 조류전력값에 불량 데이터를 도입하여 상태추정을 수행하였다. 표 2에서 볼 수 있는 것처럼 정규화 오차 검사는 정확하게 불량 데이터를 판별하였다. 측정 데이터가 leverage point가 아니라면 WLAV 상태추정기는 불량 데이터를 판별하여 측정 데이터의 영향을 상태추정 결과에서 배제할 수 있는 훌륭한 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

### 3.4 사례 3

세 번째 사례에서는 leverage point인 데이터와 leverage point가 아닌 데이터에 모두 불량 데이터를 도입하여 상태추정을 수행하였다. 상태추정 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 leverage point가 아닌 PF1 6-10은 정확하게 불량 데이터로 판별되었으나, leverage point인 PF1 6-8은 불량 데이터로 판별되지 못하였다. 대신에 인근의 측정 데이터인 PF1 8-28이 불량 데이터로 결정되었다.

## 4. 결 론

사례연구를 통하여 leverage point가 전력계통 상태추정의 결과에 어떤 영향을 미치는지를 검토하였다. Leverage point가 아닌 측정 데이터에서의 측정오차는 상태추정 과정에서 배제되고 정확한 상태추정을 수행할 수 있었으나, 불량 데이터가 leverage point에 발생한 경우 상태추정의 결과는 부정확할 수 있다는 것을 확인하였다.

이상의 결과에 따라 강건한 상태추정의 수행을 위하여 leverage point를 영향을 줄일 수 있는 상태추정기의 개발에 대한 후속 연구를 진행할 계획이다.

표 3. 사례연구에 따른 Normalized Residuals 값

Measurement No.	Type	Normalized Residuals (WLAV)			$K_{ii}$
		사례 1	사례 2	사례 3	
5	V11	1.15562	1.153579	1.153586	0.01947
16	PIIn 16	1.35397	1.186928	1.186827	0.605202
30	QIn 9	1.21711	1.254892	1.254935	0.546183
43	QIn 26	1.18188	1.182964	1.182989	0.367909
51	PF1 2-5	-1.62135	-1.61348	-1.61357	0.713054
52	PF1 2-6	1.68837	1.736895	1.736780	0.047082
56	PF1 6-8	0	0	0	*0.953969
58	PF1 6-10	0	-132.781	-132.780	0.021221
65	PF1 12-16	1.013940	1.057320	1.057327	0.316552
79	PF1 24-25	1.033138	1.094885	1.094709	0.230502
80	PF1 25-26	-2.01473	-2.01370	-2.01374	0.399136
86	PF1 8-28	-57.1998	0	-57.2015	0.1083
92	QF1 2-5	1.733698	1.739716	1.739706	0.266657
97	QF1 6-8	0	0	0	*0.966881
99	QF1 6-10	0	-2.40228	-2.40228	0.090794
108	QF1 16-17	1.520449	1.507774	1.507728	0.29423
118	QF1 22-24	-1.78022	-1.82596	-1.82614	0.22929
119	QF1 23-24	1.023569	1.027589	1.027290	0.147585
124	QF1 27-30	1.671020	1.670199	1.670196	0.295622
127	QF1 8-28	18.22818	0	18.22833	0.111573

#### 감사의 글

본 연구는 기초전력공학공동연구소의 지원으로 수행되었음. (관리번호: 01-jung-04)

#### (참 고 문 헌)

- [1] L. Mili, M. G. Cheniae, N. S. Vixhare, P. J. Rousseeuw, "Robustification of the Least Absolute Value Estimator by means of Projection Statistics", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 1, February 1996.
- [2] L. Mili, G. Steeno, F. Dobraca, D. French, "A Robust Estimation Method for Topology Error Identification", IEEE Trans. on Power System, Vol. 14, No. 4, November 1999.
- [3] Mehmet K. Celik, Ali Abur "Use of Scaling in WLAV Estimation of Power System States", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 2, May 1992.
- [4] Mehmet K. Celik, Ali Abur "A Robust WLAV State Estimator Using Transformations", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 1, February 1992.
- [5] Mehmet K. Celik, W. H. Edwin Liu "An Incremental Measurement Placement Algorithm for State Estimation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, No. 3, August 1995.
- [6] L. Mili, V. Phaniraj, P. J. Rousseeuw, "IEEE Trans. on Power Systems, Vol 6, NO. 2, May 1991.