

선형계획법을 이용한 견실한 상태추정기의 개발에 관한 연구

임 재섭 권 형석 김 홍래
 순천향대학교 정보기술공학부

Development of The Robust State Estimator using Linear Programming

Jae-sup Lim Hyung-seok Kwon Hongrae Kim
 School of Information Technology Engineering, Soonchunhyang University

Abstract - This paper presents a robust power system state estimator using linear programming(LP). LP state estimators minimize the weighted sum of the absolute values of the measurement residuals. In this paper, WLS(weighted least square) and WLAV (weighted least absolute value) state estimators are run with same measurement sets including bad data in order to compare the robustness to bad data and convergence characteristics of the two methods. Simulations with three test cases are performed and the results are presented, using IEEE 14 bus system.

Keywords: State estimation, WLS, WLAV, Linear programming

1. 서 론

현대 산업의 발달로 인하여 공급전력의 고급화가 요구되고 전력수요의 증가와 더불어 전력계통은 대규모, 복잡화되어 고도의 계통운전 기술의 필요성이 증대되고 있다. 현대의 전력계통에서 안정적이고 경제적인 계통의 운용을 위해 사용하는 응용프로그램들의 성능 및 정확도 등은 계산에 사용되는 데이터의 질에 상당히 영향을 받게 된다. 대형화된 전력계통을 최적의 상태로 제어, 운용, 분석하기 위해서 EMS(Energy Management system)가 사용되고 있으며, 현대의 전력계통의 운용에 있어서 중요한 역할을 하는 계통운용설비 중의 하나이다.

1969년 Fred Schweppe에 의해 처음으로 전력 계통에 응용되기 시작한 상태추정은(1) SCADA에 의해 수집된 여러 가지 측정데이터와 계통 파라미터(parameter)값에 대한 정보를 이용하여 에러를 여과하는 동시에(data purifier) 계통의 상태를 정확하게 추정함으로써 계통에 대한 정확한 데이터베이스를 구축하는 기법이다. EMS내의 계통운용 기능들은 상태추정기에 의해 제공되는 데이터베이스를 이용하여 그 기능을 수행할 수 있게 되어, 상태추정은 전력계통 운용에 있어서 필수적인 기능이 되었다.

기존의 전력회사들이 사용하고 있는 상태추정기는 대부분 가중 최소 자승법(WLS: Weighted Least Square Method)을 사용하고 있으며 이 추정기는 측정 잡음을 필터링하는 특성이 뛰어나고 계산시간이나 계산에 필요한 컴퓨터 메모리를 효율적으로 사용하는 장점이 있다. 그러나, 측정값에 포함된 불량데이터의 영향에 매우 민감해서 계통의 정확한 상태를 추정하는데 어려움이 생기는 단점도 있다. 반면, 가중 최소 절대값(WLAV: weighted least absolute value)을 이용한 상태추정기는(2-3) 측정 데이터에 불량 데이터들이 포함되어 있는 경우에도 매우 안정적인 추정값들을 계산해 낼 수 있다. WLAV 상태추정은 WLS 상태추정에 비해 좀 더 많은 계산 시간과 컴퓨터 메모리가 필요하지만 불

량 데이터 처리나 수렴성 확보에 있어서 뛰어난 성능을 보이는 장점이 있다. WLAV 상태추정기는 측정값과 계산값과의 차의 절대값을 최소로 하는 목적함수를 사용한다. 선형계획법(Linear Programming)은 이 목적함수를 최소화시키기 위해 사용하며, 측정데이터에 에러가 포함되어 있을 경우, 선형계획법을 이용한 상태추정기는 불량데이터(bad data)에 대해 WLS보다 강건성을 보인다.(4)

본 논문에서는 불량데이터에 강건한 선형계획법을 이용한 WLAV 상태추정기를 개발하였다. WLAV 상태추정기는 본 논문에서 제시한 단일, 다중, 상호작용 불량데이터에 대하여 WLS 상태추정기보다 불량데이터 처리 및 수렴성 확보에 효율성과 정확성을 보여주고 있다.

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 테일러 급수로 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 거의 0이며 가우시안(Gaussian) 분포를 가지는 독립 랜덤 변수들의 벡터로 가정한다. 이때, 측정 에러 e_i 의 분산 σ_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 비

선형함수이므로 선형 함수로 근사화 한 후 방정식을 반복계산함으로써 최종적인 상태벡터를 구하는 것이다.

상태추정기가 갖추어야 할 중요한 특성은 상태추정의 결과가 통계적으로 강건성(statistical robustness)을 가져야 하며 온라인 수행을 위해서 계산의 효율성(computational efficiency)을 가져야 한다. 불량데이터에 대해 강건한 상태추정기의 개발을 위하여 WLS나 WLAV 상태추정 이외에도 LSM(least median squares)와 같은 시도도 있었으며[5], 이러한 여러 가지 방법들을 효율적으로 계산하기 위하여 계통 분할(network decomposition)을 이용한 연구들도 있었다.

2.2 WLS 상태추정

WLS 상태추정의 목적함수는 다음과 같다.

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

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

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.

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

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

$$h(x) \cong h(x^k) + H(x^k)(x - x^k) \quad (5)$$

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

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

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 최소로 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.

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

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

여기서, $\Delta z^k = z - h(x^k)$,

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

$w_i = i$ 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.

3. 사례연구

WLAV 상태추정기와 WLS 상태추정기의 불량데이터 처리 특성을 비교하기 위하여 사례연구를 수행하였다. 사례연구는 그림 1과 같은 IEEE 14모선 계통을 이용하여 수행되었다. 계통 내 일부 측정기의 고장을 가정하고 다음 세 가지의 사례를 비교하였다. 사례연구에 이용한 측정데이터는 표 1과 같다.

사례연구1 : 단일 불량데이터(Single bad data)

사례연구2 : 다중 불량데이터(Multiple bad data)

사례연구3 : 상호작용 불량데이터(Interacting bad data)

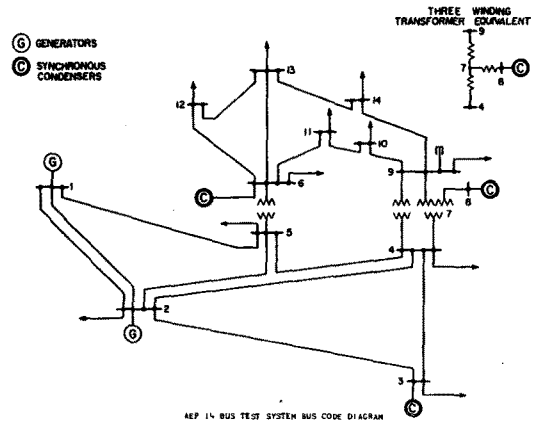


그림 1. IEEE 14 모선 계통

표 1. 사례연구에 이용한 측정데이터

측정데이터	데이터측정 모선 및 선로
전압의 크기	1, 2, 3, 6, 8
모선 주입전력	1, 2, 3, 6, 8, 9, 10, 11, 12
선로 조류전력	1-2, 1-5, 2-3, 2-4, 2-5, 3-4, 4-5, 4-7, 4-9, 5-6, 6-11, 6-12, 6-13, 7-8, 9-7, 9-10, 10-9, 9-14, 10-11, 11-10, 12-13, 13-14

3.1 사례연구 1

불량데이터가 한 개인 경우, 즉 6번 모선의 측정기의 고장으로 인하여 6번 모선의 주입전력을 0으로 상정하고 사례연구를 수행하였다. WLAV 상태추정기가 WLS 상태추정기에 비해 정확한 수렴성을 보이고 있다.

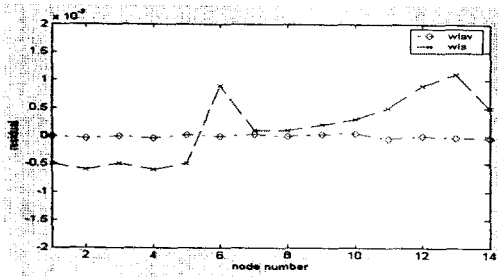


그림 2. 사례연구 1의 전압크기 오차

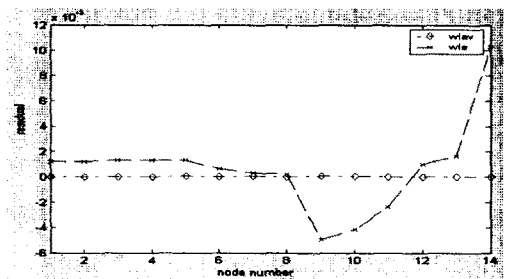


그림 6. 사례연구 3의 전압크기 오차

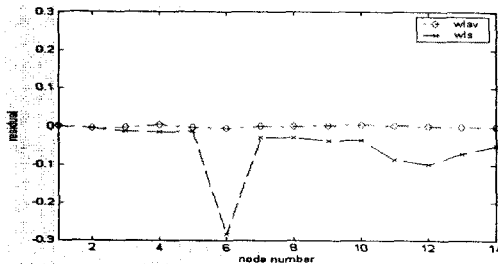


그림 3. 사례연구 1의 위상각크기 오차

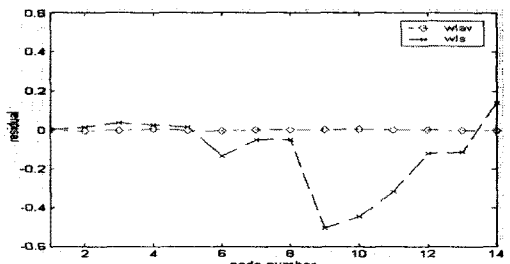


그림 7. 사례연구 3의 위상각크기 오차

3.2 사례연구 2

불량 데이터가 두 개 이상인 경우, 즉 6번 모선의 주입전력과 4번-9번 모션간 조류전력의 값을 0으로 상정하여 사례연구를 수행하였다.

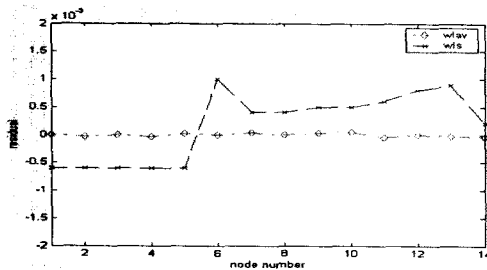


그림 4. 사례연구 2의 전압크기 오차

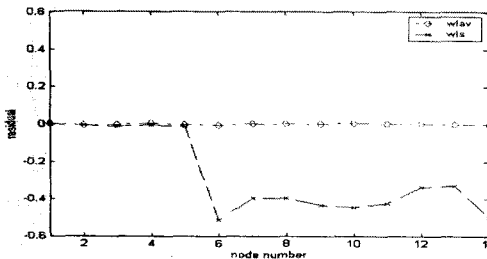


그림 5. 사례연구 2의 위상각크기 오차

3.3 사례연구 3

상호작용 불량데이터인 경우, 즉 9번 모선의 주입전력과 이와 연계된 9번-10번 모션간 조류전력의 값을 0으로 상정하여 사례연구를 수행하였다.

4. 결론

현재 계통의 운용상태를 정확하게 추정하는 데에는 측정데이터의 정확도가 가장 핵심이 된다. 본 논문에서는 WLS와 WLAV 상태추정기의 불량데이터 처리특성을 비교하였다. WLAV 상태추정기는 단일 불량데이터나 다중 불량데이터뿐만 아니라 상호작용 불량데이터가 포함된 경우에도 훌륭한 수렴성과 정확성을 보여주었다. 전력계통 구조개편이 이루어지는 현 시점에서 불량데이터에 강건성을 보이는 효율적인 상태추정기의 확보는 매우 중요한 일이며, 이러한 관점에서 볼 때 WLAV 상태추정기는 계통의 운용상태를 정확하게 추정하고 신뢰도가 높은 상태추정이 가능하게 함으로써 운용중인 계통에 대한 정확한 데이터베이스를 구축하여 계통운용의 신뢰도 확보에 기여할 수 있으리라 사료된다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-1-30200-007-1) 지원으로 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

[참고 문헌]

- [1] 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.
- [2] M. Irving, R. Owen and M. Sterling, "Power System State Estimation Using Linear Programming," *Proceedings of IEE*, Vol. 125, pp. 879-885, 1978.
- [3] Ali Abur "A Bad Data Identification Method for Linear Programming State Estimation," *IEEE Trans on power system*, VOL. 5, NO. 3, pp. 894-901, 1990.
- [4] R. Zivanovic, "An Algorithm for Bad Data Processing in a Linear Programming Based State Estimation," *IEEE/KTH stockholm Power Tech Conference*, pp. 158-163, 1995.
- [5] L. Mili, V. Phaniraj and P. Rousseeuw, "Least Median of Estimation in Power System," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 6, No. 3, pp. 511-523, 1991.