

상태추정의 모션별 부하분포계수에 관한 연구

이명준, 문영현
연세대학교 전기전자공학부

A Study on Bus Load Distribution Factor of State Estimation

Myoung-Jun Lee, Young-Hyun Moon

School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University

Abstract - 전력계통의 안정적 운용을 위한 EMS (Energy Management System)에서 현재 운용중인 계통의 상태를 추정하는 상태추정기는 매우 중요한 역할을 지닌다. 그러나 간혹 측정된 데이터가 잘못된 정보이거나, 데이터가 전송되지 않는 경우 가관측성이 확보되지 않게 될 수 있는데 이때는 의사측정값(pseudo measurements)을 이용하여 가관측성을 확보해 주어야 한다. 본 연구에서는 상태추정의 부하 데이터의 부재시 사용하기 위한 모션별 부하분포계수(Bus Load Distribution Factor)에 관하여 소개하며, 그 오차를 최소한으로 줄이기 위해 사용하는 평활법에 대해 소개한다.

2. 본 론

2.1 전력계통에서의 상태추정

전력계통의 상태추정은 상태변수에 대하여 잔류편차의 합을 최소화하는 최적화 문제로 수식화 할 수 있다. 최적화 문제로 수식화 된 상태추정의 평가함수는 일반적으로 가중 최소자승 오차법(Weighted Least Square)을 사용하며 계통 측정 모델에서 측정 벡터 z 는 계통 상태 추정을 위한 측정량으로서 모션전압 크기, 선로 유효 및 무효전력 조류, 그리고 모션주입 유효, 무효전력으로 구성한다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.[5]

1. 서 론

현재 우리나라의 전력수요는 지속적으로 증가하고 있다. 이에 따라 전력계통의 규모는 대형화, 복잡화 되고 있으며, 전력계통의 안정적 운용과 양질의 전력 공급을 보장하기 위해 EMS(Energy Management System)를 사용하여 계통운영에 있어 안정적, 효과적 제어를 기하고 있다. 그러나 전력계통의 측정 데이터에는 각종 잡음이 혼입되어 있을 수 있으므로, 상태추정기를 이용하여 EMS로 관리되는 계통운영의 정확성을 판단하고, 보장한다.[1]

상태추정은 실시간 계통해석의 초기단계에 해당하는 부분으로 계통구성요소의 상태와 계통 내의 여러 측정점에서 측정되는 상태추정 데이터는 계통을 구성하고, 상태 해를 제공함으로써 실시간 계통해석의 기반이 된다. 이에 현재 운용중인 EMS에서도 상태추정 프로그램을 실계통에 도입하여 계통의 안정운용을 기하고 있는 중이다.[2]

그러나 만일 측정된 데이터가 결정적 오류를 포함한 데이터이거나, SCADA로부터 실시간 데이터가 계속적으로 누락되어 전송되지 않는 경우에 간혹 상태추정기의 가관측성이 확보되지 않게 되어 상태추정 과정에서 심각한 오류를 발생시켜 상태추정이 불가능한 상황에 이를 수도 있다. 따라서 가관측성이 확보되지 않았을 경우에는 이전 단계의 조류계산 및 상태추정 데이터를 기반으로 한 의사측정값(pseudo measurements)을 이용하여 가관측성을 확보해 주어야 한다.[3][4]

본 논문에서는 상태추정의 기본 이론과 각 모션의 부하 데이터의 부재시에 사용하는 의사측정 부하 데이터 모델을 만들어내기 위한 모션별 부하분포계수 확립방법에 관하여 알아보고, 부하분포의 변화에 따른 예측오차를 최대한으로 줄이기 위해 일반적으로 사용되는 단순 지수 평활법(simple exponential smoothing)에 대해 알아본다.

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ h_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ h_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_m \end{bmatrix} = h(x) + e \tag{1}$$

여기서, $h_i(x)$ 는 비선형 함수, x_i 는 계통 상태벡터, e_i 는 측정오차 벡터.

가중 최소자승 오차법(WLS)을 이용한 상태추정의 목적함수는 다음과 같다.

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

여기서, $R = \text{diag}[\sigma_1^2 \dots \sigma_m^2]$

목적 함수를 최소화하기 위하여 식 (2)의 목적함수의 기울기가 0으로 되는 상태 해를 얻는다. 그러므로 측정 함수를 상태벡터에 대해 편미분하면

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

최종 상태추정의 수렴은 반복계산 중 상태변수의 증감이 규정된 오차범위를 만족할 때에 얻을 수 있다. 식 (2)의 잔류편차의 합의 제곱의 크기로부터 추정치에 대한 신뢰도 검증과 불량정보 유무를 판정할 수 있다.

자코비안 행렬 $H(x)$ 는 다음과 같이 구성된다.

$$H(x) = \left[\frac{\partial h(x)}{\partial x} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{inj}}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{flow}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{flow}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{flow}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{flow}}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{mag}}{\partial \theta} & \frac{\partial I_{mag}}{\partial V} \\ 0 & \frac{\partial P_{inj}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (4)$$

이득행렬(gain matrix)은 다음과 같이 구성되는데

$$G(x) = H^T R^{-1} H \quad (5)$$

P_{inj}, Q_{inj} 입력이 없다면 자코비안 행렬구성에 문제가 생겨 이득행렬이 가관측성을 확보하지 못하게 된다.

2.2 지수평활법

만일 분포계수의 값이 시간의 흐름에 따라 변하게 되면, 일정 시간대별로 관측된 분포계수에 동등한 가중값을 부여하지 않고, 현재에 가까운 관측값들에 더 많은 가중값을 두는 것이 타당하다고 볼 수 있으며, 따라서 이동평균법이 아닌 지수평활법을 사용하는 것이 더 유리하다고 볼 수 있다. 지수평활법은 관측값들에 각각 다른 가중값을 주는 예측 방법으로 단기 예측에 대해서 충분한 신뢰성을 바탕으로 부하예측관련 연구에 많이 사용되어 왔다.[6-8] 단, 부하예측은 각각의 일정 시간대별 전체 부하량 예측에 중점을 두는 반면, 부하분포계수는 총 부하량 중 각 모션별로 차지하는 부하 비율 파악에 중점을 둔다는 차이점이 있어서 부하예측에 비해 그 변화량이 크지 않고, 추세가 복잡하지 않아 지수평활법과 다른 방식의 다양한 조합을 사용하여 예측하는 부하예측에 비해 쉽게 접근할 수 있다는 장점이 있다.

지수평활법은 최근의 관측값과 과거의 관측값에 대한 가중치를 서로 다르게 부여하기 위해 각 관측값에 어느 정도의 가중값을 부여할지 결정하는 평활계수(smoothing constant)를 사용하여 가장 최근 관측값이 가장 큰 가중값을 부여받으며, 먼 과거에 해당하는 관측값일수록 가중값이 지수적으로 작아지게 되어 지수평활법이라 불린다. 이 방법을 통해 모션별 부하분포 추정값을 최신화시켜 부하분포계수의 변화를 탐색할 수 있다.

일반식으로[8]

$$F_1 = \alpha Z_0 + (1-\alpha)F_0$$

$$F_2 = \alpha Z_1 + (1-\alpha)F_1$$

$$F_3 = \alpha Z_2 + (1-\alpha)F_2$$

⋮

$$F_n = \alpha Z_{n-1} + (1-\alpha)F_{n-1} \quad (6)$$

여기서, F_n 은 현재의 부하분포계수 예측값, Z_{n-1} 은 직전단계의 측정값(상태추정 결과값), α 는 평활계수, F_{n-1} 은 직전단계의 부하분포계수 예측값.

(6)을 역으로 전개하면

$$\begin{aligned} F_n &= \alpha Z_{n-1} + (1-\alpha)F_{n-1} \\ &= \alpha Z_{n-1} + (1-\alpha)[\alpha Z_{n-2} + (1-\alpha)F_{n-2}] \\ &= \alpha Z_{n-1} + \alpha(1-\alpha)Z_{n-2} \\ &\quad + (1-\alpha)^2[\alpha Z_{n-3} + (1-\alpha)F_{n-3}] \\ &= \alpha Z_{n-1} + \alpha(1-\alpha)Z_{n-2} + \alpha(1-\alpha)^2 Z_{n-3} \\ &\quad + \alpha(1-\alpha)^3 Z_{n-4} + \dots + (1-\alpha)^n F_0 \end{aligned} \quad (7)$$

으로 전개할 수 있으며 (7)에 의해 F_n 에는 초기값 F_0 의 정보가 포함되어 있다는 것을 알 수 있다. 이 기법은 직전단계의 예측값에 과거의 데이터가 포함되어 있으므로 과거의 데이터를 유지할 필요성이 없어 매우 적은 양의 데이터 저장 공간으로도 시스템을 유지할 수 있는 이점을 가진다.

평활계수 α 의 범위는 0에서 1사이의 값을 사용한다. 최근 관측값에 멀리 떨어져 있는 관측값들이 영향을 주는 정도는 평활계수인 α 의 크기에 따라 달라지며 α 가 작을수록 잡음에 덜 민감하게 반응하여 필터링에 유리하고, 클수록 최근의 관측값에 가중치를 두게 되므로 시스템의 변화에 영향을 많이 받게 되므로[8] 적절한 값을 선택하여 사용한다.

2.3 모션별 부하분포계수

상태추정과정에서 부하 데이터가 입력되지 않을 경우의 사측정값을 이용하여 가관측성을 확보해 주어야 상태 추정이 진행될 수 있다. 각 모션별 부하의 의사측정값은 전체 총 부하량에 대해 각 지역별, 구획별, 모션별 부하의 비율로써 결정되는데 이 비율이 모션별 부하분포계수(BLDF)이다.

부하분포계수는 지역별, 구획별, 모션별로 각기 계수를 관리하며, 계절별, 시간대별로 관리된다.

2.3.1 부하분포계수 계산

- Step 1) 상태추정 및 발전 스케줄을 통해 전체 부하량에 대한 모션별 부하량의 비율을 구한다.
- Step 2) 전체 부하량에 모션별 계수를 곱해 해당 모션의 의사측정값(pseudo measurements)을 구할 수 있다.
- Step 3) 상태추정이 끝나면 현재의 부하분포계수와 상태추정에 의한 부하분포계수를 종합하여 해당일의 타입에 대한 적절한 평활계수를 선택해 지수평활법을 통해 분포계수를 갱신한다.
- Step 4) 모션별, 구획별, 지역별 계수의 부분합은 언제나 각각 1을 만족해야 하므로 전체 부하에 대해 표준화 하여 최종 갱신한다.

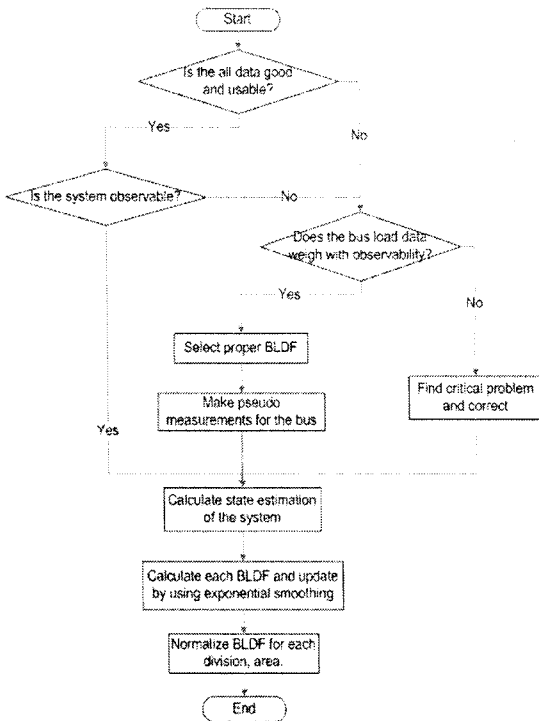


그림 1. 부하분포계수 기본 개념도

3. 결 론

짧은 시간 안에 정확한 계산이 마무리 되어야 하는 상태추정에서 데이터의 부재로 인한 문제 발생은 의사측정값을 즉각적으로 대체함으로써 처리해야 한다.

본 논문에서는 상태추정시 사용되는 의사측정값을 위한 모션별 부하분포계수의 계산방법 및 이후의 계수 예측을 위한 지수평활법에 대하여 알아보았다. 향후 더 빠르고 정확한 계수과와 알고리즘에 관한 연구가 추가로 요구된다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. J. Monticelli, "Electric power system state estimation", Proceedings of the IEEE, Vol. 88, Issue 2, pp. 262~282, 2000
- [2] 송태용 외, "한국 전력 계통에서의 상태추정 알고리즘 적용", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 89~91, 2003
- [3] S. Maheshwarapu, "An effective root based algorithm for power system topological observability", TENCON '98. 1998 IEEE Region 10 Int. Conference on Global Connectivity in Energy, Computer, communication and Control, Vol. 2, pp. 596~600, 1998
- [4] H. Wang and N. N. Schulz, "A load modeling algorithm for distribution system state estimation", 2001 IEEE PES Meeting, Vol.1, pp. 102~105, 2001
- [5] A. Abur and A. G. Exposito, Power System State Estimation, Marcel Dekker Inc., 2004
- [6] I. Moghram and S. Rahman, "Analysis and evaluation of five short-term load forecasting techniques", IEEE

- Trans on Power Systems. Vol. 4, Issue 4, pp. 1484~1491, 1989
- [7] K. B. Song, et al., "Hybrid load forecasting method with analysis of temperature sensitivities", IEEE Trans on Power Systems. Vol.21, Issue 2, pp. 869~876, 2006
 - [8] I. Komprej and P. Zuncko, "Short term Load forecasting", IEEE Electrotechnical conference, Vol.2, pp. 1470~1473, 1991
 - [9] 장경, 최신 예측이론과 활용, 교우사, 2003