

## 우리나라 계통에서의 상태추정 알고리즘 및 향후 개선방향

**전재룡**, 여현근, 송태용  
한국전력거래소

### State Estimation Algorithm in Korea Power System & Improvement Direction

Jae-Ryong Jeon, Hyun-Keun Ryu, Tae-Yong Song  
Korea Power eXchange(KPX)

**Abstract** - 전력계통이 커지고 복잡해짐에 따라 전력계통의 상태를 정확하게 파악하고 안정하게 운영하는데 EMS의 역할이 더욱 커지고 있다. EMS에서 상태추정은 다른 응용프로그램에 대한 기본 자료를 제공하므로 중요하다. 우리나라는 EMS와 MOS를 이용하여 전력계통을 안정하게 운영하고 있다. 본 논문에서는 EMS와 MOS의 상태추정 알고리즘을 소개하고 차이점을 비교하였다. 또한 상태추정 파라미터 운영현황을 분석하여 이를 바탕으로 앞으로의 개선방향을 제시하였다.

전력계통에서 상태추정은 전압과 위상각에 대하여 오차의 합을 최소로 하는 최적화 문제로 수식화 할 수 있다. 이 문제는 일반적으로 가장 최소자승법(WLS, Weighted Least Square)을 적용한다.

추정값  $f_i(X_1, X_2, \dots, X_{N_s})$ 가 선형함수라면

$$f_i(X_1, X_2, \dots, X_{N_s}) = h_{i1}X_1 + h_{i2}X_2 + \dots + h_{iN_s}X_{N_s} \quad (1)$$

$$f(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{x}) \\ f_2(\mathbf{x}) \\ \dots \\ f_{N_m}(\mathbf{x}) \end{bmatrix} = [H] \cdot \mathbf{X} \quad (2)$$

여기에서  $[H]$ : 함수  $f_i(\mathbf{x})$ 의 계수를 포함하는  $N_m \times N_s$  행렬  
 $N_m$ : 측정값 수,  $N_s$ : 추정해야 할 미지값 수

가중최소자승법을 이용한 상태추정의 목적함수는 식 (2)와 같다.

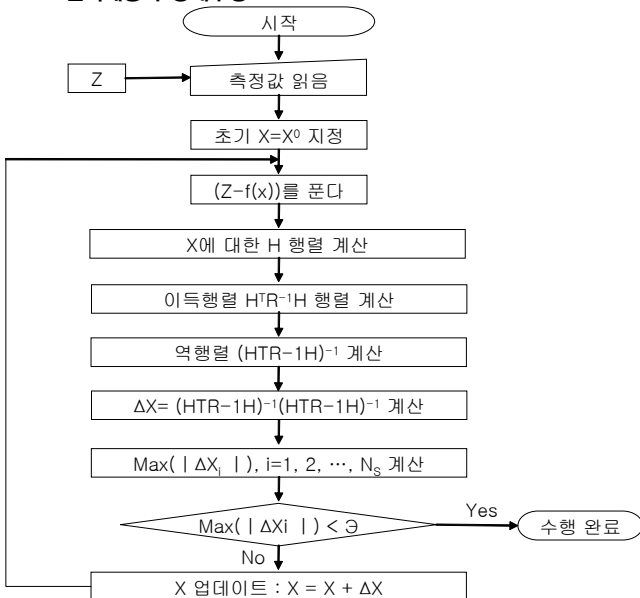
$$\min J(\mathbf{X}) = \frac{1}{2} [\mathbf{Z} - \mathbf{f}(\mathbf{X})]^T [R^{-1}] [\mathbf{Z} - \mathbf{f}(\mathbf{X})] \quad (3)$$

$$\text{여기에서 } R^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & & & \\ & \frac{1}{\sigma_2^2} & & \\ & & \dots & \\ & & & \frac{1}{\sigma_{N_m}^2} \end{bmatrix}$$

그림 1에 상태추정의 계산 순서도를 나타내었다.

## 2. 본 론

### 2.1 전력계통의 상태추정



<그림 1> 상태추정 순서도

### 2.2 EMS 상태추정

EMS에서 상태추정은 계통의 토폴로지와 상태추정을 제공하며, 모든 온라인 함수의 기본 해석 자료를 제공한다. SCADA에서 실시간으로 자료를 취득하고 토폴로지 처리를 통해 모선 구조를 결정한다. 상태추정으로 전압, 위상각, 탭 위치를 결정하며, 상태추정 결과로 경보, bias, 여러 한계값을 얻는다.

#### 2.2.1 개요

EMS 상태추정에서 입력자료는 SCADA 측정값을 우선 사용하며, 이 값을 사용할 수 없는 경우에 따라 모델링 값, 운전원이 입력한 값을 사용한다. 모델링 값과 운전원이 입력한 값을 의사측정(pseudo measurements)이라고도 한다.

EMS에서 상태추정 계산시 2종류의 방정식을 사용한다. 측정값을 이용한 방정식과 키르히호프의 전류법칙을 이용한 방정식(KCL)이다. 상태추정에는 미지값보다 측정값이 많다. 측정값이 많을수록 더 정확하게 계산할 수 있고, 틀린 측정값을 찾아낼 수 있다. 문제점은 잡음으로 인해 측정값이 틀리는 경우가 많다는 것이다. 이를 해결하기 위해 가중치를 도입해 영향도를 차별화한다. 가중치는 각각의 측정값과 방정식에 적용되는 통계적 불확실성모델로부터 계산된다.

#### 2.2.2 알고리즘

상태추정의 변수는 전압 위상각, 전압 크기, 변압기의 탭 위치, 임피던스가 0인 선로의 유효전력과 무효전력 크기이다. 상태를 추정하는데 사용하는 방정식은 두 가지 종류가 있다. 첫 번째는 SCADA에서 취득한 전압 크기, 유효전력과 무효전력 크기, 변압기의 탭 위치 측정값을 토대

로 한다.

$$Z_i^{meas} - f_i(x) = 0 \quad (4)$$

여기에서,  $Z_i^{meas}$ : i번째 모선의 측정값,  $f_i(x)$ : 계산값

두 번째는 계통모델을 기초로 한다. 이로부터 모선 등가 제약(각 모선의 유효전력과 무효전력의 합계는 0이어야 한다), 부하모델의 부하 주입량, 발전기 제어 모델의 발전력 주입량, 전압 위상각 조정 계획의 정보를 얻는다. 모선으로 유입/유출되는 유효전력과 무효전력의 합은 각각 0이어야 한다.

$$\text{Sum MWk}(V_i, V_j) + \text{Sum MWsh,k}(V_i) + \text{Sum MWi,k} = 0 \quad (5)$$

여기에서,  $\text{Sum MWk}(V_i, V_j)$ : i번째 모선에 연결된 선로의 조류  
 $\text{Sum MWsh,k}(V_i)$ : i번째 모선에 연결된 분로(分路)의 조류  
 $\text{Sum MWi,k}$ : i번째 모선으로 유입되는 전력

식 (1)과 (2)는 0이어야 한다. 식 (1)의 결과를 오차(residual)이라고 하고, 식 (2)의 결과를 불일치(mismatch)라고 한다.

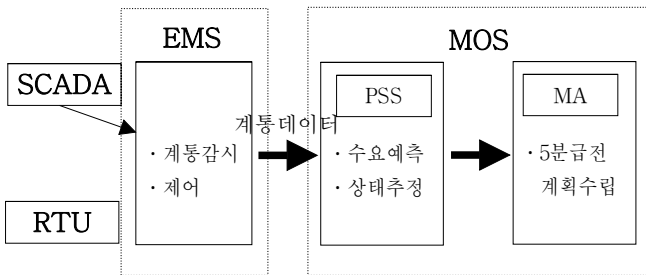
$$\mathcal{J}(X) = \sum_{i=1}^{N_m} \frac{(Z_i^{meas} - f_i(x))^2}{\sigma_i^2} \quad (6)$$

여기에서,  $Z_i^{meas}$ : i번째 모선의 측정값,  $f_i(x)$ : 계산값,  $\sigma_i$ : 표준편차

식 (6)에서  $\sigma_i^2$ 은 i번째 측정값의 분산이며  $\frac{1}{\sigma_i^2}$ 은 가중치이다. 따라서 식 (6)은 가중치가 부여된 2차 비용함수이다. 식 (6)이 최소값을 갖게 하는 계통 상태가 현재 계통정보와 가중치에 가장 부합한다. 해를 구하기 위해 뉴턴법을 사용한다. 구해진 최소값이 유효성 한계값보다 작으면 구해진 해는 유효하다. 만약 구해진 해가 유효성 한계값보다 크면 에러 분석을 통해 검출된 에러를 반영하도록 가중치가 조정된다. 계통 해는 가중치 변화를 반영하도록 갱신된다. 이 과정이 유효한 해를 구할 때까지 반복된다.

### 2.3 MOS 상태추정

MOS에서 상태추정은 현재 계통 모델, 사용가능한 측정값, 의사측정(스케줄 패턴 및 운전원 수동입력)을 이용해 현재 계통의 상태를 추정한다. 상태추정은 전체 전력계통의 실시간 정적 상태 정보를 제공하고 다른 실시간 계통 응용 프로그램에 기본 정보를 제공한다.



<그림 2> EMS - MOS 간 데이터 흐름

#### 2.3.1 입력자료

MOS 상태추정은 EMS SCADA로부터 유효전력, 무효전력, 전압, 차단기 상태 등의 계통정보를 제공받아 상태를 추정하고 MA에 5분 급전 계획 수립을 위한 데이터를 제공한다. 상태추정을 수행한 후 산출되는 데이터는 각 발전기별 상태추정 값, 각 부하별 상태추정 값, 각 스위치 상태이다. 이 3개의 상태추정 값을 5분에 1번씩 MOS MA로 전송한다. 그림1에 EMS - MOS 간 데이터 흐름을 나타냈다.

#### 2.3.2 알고리즘

MOS의 상태추정은 식 (7)과 같은 최적화 문제로 수식화할 수 있다.

$$\text{minimize } \mathcal{J}(x) = [z - h(X)]^T \times W \times [z - h(X)] \quad (7)$$

$$c(X) = 0$$

여기에서,  $\mathcal{J}(x)$ : 측정값 에러의 합을 나타내는 목적함수

$X$ : 모선 전압 벡터

$z$ : 측정값 벡터

$h(X)$ : 추정값 벡터

$W$ : 가중치 대각 행렬

$c(X)$ : 등호제약(유입량이 0인 모선의 조류 평형) 벡터

이 수식의 해를 구하는 데 blocked sparsity 알고리즘이 사용된다. 이 알고리즘을 사용하여 이득행렬(gain matrix)을 배열하고 factorization한다.

MOS 상태추정은 등호 제약식을 사용하여 수렴율을 향상시켰다. 또한 고속분할법(Fast Decoupled Method)을 사용하여 메모리 용량을 적게 차지하고 계산이 빠르다는 장점이 있다. 단점으로는 분할 가정에 맞지 않는 경우 부정확한 해를 제시하고, 전류 측정값을 사용하지 못한다는 점이다.

계통에서 충분한 측정값을 포함한 부분을 관측 계통(Observable Network), 포함하지 않은 부분을 비관측 계통(Unobservable Network)이라 한다. MOS SE는 관측 계통과 비관측 계통에 대해 해석을 실시하는데, 두 계통이 일관된 결과를 제시하여야 한다.

### 2.4 EMS/MOS 상태추정 차이점

EMS와 MOS 상태추정은 계산방법, 모선 KCL 처리방법, bad data 처리과정에서 차이가 있다. 표 1에 EMS와 MOS의 상태추정 차이점을 나타내었다.

<표 1> EMS - MOS 상태추정 차이점

	EMS	MOS
계산방법	뉴턴법 (Newton's Method)	고속분할법 (Fast Decoupled Method)
모선 KCL 처리방법	가중치를 조정하여 WLS 사용	등호제약을 적용하여 계산(수렴율 우수)
Bad Data 처리과정	민감도 계산후 가중치를 줄임. 연속해서 일정횟수(3회) 이상 정상일 경우 재사용	bad data 검출시 삭제하며 연속해서 일정횟수 이상 정상일 경우 재사용

### 2.5 EMS/MOS 파라미터 운영 현황

EMS 상태추정은 수렴율이 2006년 기준 99% 이상으로 매우 우수한 결과를 보여주고 있다. 또한 대부분의 미수렴이나 불일치(Solved with excess mismatch : 수렴은 되었지만, 특정모선에 오차가 많은 상태) 발생 원인이 데이터 취득 오류, 토폴로지 오류, 시스템의 fail over 등으로 나타났다.

MOS 상태추정은 2007년 수렴율이 95%로 EMS에 비해 다소 낮지만, 프로그램 다운 현상의 패치 적용 등을 통해 향후 수렴율이 향상될 것으로 전망된다. MOS 상태추정의 미수렴 원인은 모선 분리 변전소의 스위치 상태 오류, 시스템의 fail over, 프로그램 오류 등으로 나타났다.

### 2.6 향후 개선방향

EMS와 MOS 상태추정은 모두 수렴율이 매우 우수하며 미수렴 원인이나 불일치해 발생 원인이 데이터 취득 오류, 토폴로지 오류, 시스템 fail over 등으로 나타나 추가적인 수렴율 향상은 기대하기 힘들다. 계통 상태를 정확하게 파악하는 것이 상태추정의 목적이므로 상태추정에 영향을 미치는 관련 파라미터의 의미를 파악하고 파라미터 변경시 미치는 영향을 분석하는 것이 필요하다.

## 3. 결 론

EMS와 MOS 상태추정에 대해서 소개하고 차이점을 비교, 분석하였다. EMS와 MOS는 계산방법, 모선 KCL 처리방법, bad data 처리과정에서 차이가 있다. EMS와 MOS 상태추정은 수렴율이 높으므로 앞으로 수렴율 향상보다는 정확한 상태추정 기능 수행을 위해 관련 파라미터의 의미를 파악하고 변경시 미치는 영향을 분석할 것을 제안하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Allen J. Wood 외, "Power Generation, Operation, And Control", JOHN WILEY & SONS, INC.
- [2] Ali Abur 외, "Power System State Estimation", MARCEL DEKKER, INC.
- [3] AREVA, "EMS Functional Design Spec."
- [4] ABB, "MOS Functional Design Spec."