

한국 전력 계통에서의 상태추정 알고리즘 적용

송태용, 송석하, 여현근, 강형구 강부일
한국전력거래소

Application and Experience of State Estimation
in Korea Power System

Song, Tae Yong Song, Seuk-Ha Rju, Hyun-Keun Kang, Hyung-ku Kang, Bu-il
Korea Power Exchange (KPX)

Abstract - 최근 들어 전력 계통은 점차 복잡해지고 계통 규모 역시 빠른 속도로 성장하고 있다 이러한 환경 하에서 전력계통 운영을 담당하고 있는 한국전력거래소가 계통의 현 상태를 정확하게 파악하고 가능한 상정 고장에 대비하여 전력계통을 안정적으로 운영하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다. 이를 위해 기존의 스카다를 사용하여 계통의 상황을 파악하는 방법은 통신상의 잡음 및 측정값의 부정확성으로 인해 계통을 전체적으로 정확하게 파악하고 실시간 상정고장 분석과 같은 검토를 하는데 한계가 있다. 따라서 차세대 에너지 관리 시스템(NEMS)을 구축하는 단계에서 한국전력거래소는 상태추정 및 관련 응용프로그램을 실제계통에 도입하여 전력 계통의 안정 운영에 기여하려 하고 있다. 상태추정이란 에러를 포함하고 있는 측정값과 네트워크 모델을 사용하여 현 계통의 전압, 위상각, 조류 등의 실제 상태를 추정하는 방법으로 상태추정을 사용하여 현 상태 감시 및 실시간 상정고장 분석, 안전도 개선과 같은 기능을 수행할 수 있다. 본 논문에서는 차세대 EMS에 적용된 상태추정을 설명하고 실제계통에 적용하여 파악한 상태추정의 기능을 보여주고 있다.

1. 서 론

현재와 같이 계통규모가 점차로 증가하고 복잡해지고 있는 상황에서 전력계통의 현 상태를 정확하게 파악하여 조류 및 전압 등을 감시하는 것이 계통의 안전도 유지에 매우 중요하다고 할 수 있다. 이를 위해 기존 에너지 관리 시스템에서 스카다를 이용하여 계통 상황을 감시해 왔으나 측정 장치의 에러 및 통신 장비의 장애 잡음 등으로 현 상태를 정확하게 파악하는 데 제약을 받고 있다. 따라서 이러한 제약을 해결하기 위해 차세대 에너지 관리 시스템에서 상태추정 기능을 도입하였다. 상태추정이란[1][3] 특정규칙에 따라 시스템의 측정값에 근거하여 미지 시스템의 상태를 파악하는 처리 절차라 할 수 있다. 여기서 말하는 특정규칙에는 여러 가지 수학적 방법을 사용할 수 있으나 일반적으로 가중최소자승법이 가장 널리 사용되고 있으며 차세대 에너지관리 시스템의 상태추정에서도 가중최소자승법을 기본으로 사용하고 있다. 가중최소자승법이란 추정값과 측정값의 차(Residual)를 제공한 뒤 가중치를 그 Residual 제공에 곱하여 그 값을 최소화하는 방법이다. 이 가중최소자승법은 19세기부터 기본 이론이 알려져 사용되었으며 항공우주분야에서 이어 현재 전력계통의 상태를 파악하고 감시하는데 사용되고 있다. 본 논문에서는 이러한 상태추정의 기본 이론과, 차세대 에너지관리 시스템(NEMS)에 도입된 상태추정에 대해 설명하고 있다. 다음으로 우리나라 계통에 어떻게 적용하였는지에 대해 설명한 뒤 실제 적용하였을 때 얻어진 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 마지막으로 상태추정을 도입하여 얻은 이점과 향후 연구과제에 대해 설명하고 있다.

2. 전력계통의 상태추정

전력계통에 상태추정을 도입하기 위해서 먼저 가중치에 대해 설명하도록 한다[2]. 모든 측정값은 식(1)과 같이 참값에 표준정규분포를 따르는 에러(e)가 더해진 값으로 볼 수 있다.

$$Z^{meas} = Z^{true} + e \tag{1}$$

이 에러가 표준 정규분포를 따른다고 가정하였으므로 측정값의 표준편차에 따라 측정값의 정확도를 파악할 수 있다. 표준편차가 크면 측정값은 상대적으로 부정확한 값이며 표준편차가 작다면 정확하게 측정된다고 볼 수 있다. 따라서 이 표준편차를 제곱의 역수를 상태추정에서 가중치로 사용한다. 이 가중치를 사용한 가중최소자승법은 다음과 같다.

$$\min J(X) = \sum_{i=1}^{Nm} \frac{(Z_i^{meas} - f_i(X))^2}{\sigma_i^2} \tag{2}$$

위 수식에서 Z는 측정값, f(X)는 측정값에 해당하는 상태 계산식, $1/\sigma^2$ 은 측정값의 가중치, X는 상태변수로서 전압크기, 위상각, 변압기 탭 등을 나타낸다. 위 식에서와 같이 계산에 사용된 모든 측정값에 대해 측정값과 추정값의 차를 제공한 뒤 가중치를 곱하여 그 값을 최소화하는 상태변수 X를 구하는 것이 상태 추정의 기본이라 할 수 있다. 이때 J(X)를 Cost라고도 하며 이 값을 이용하여 에러 처리과정 시 수렴 여부를 판별한다. 위 식을 최소화 하는 것은 $\nabla J(X) = 0$ 을 만족시키는 X를 구하는 것이다.

$$\nabla J(X) = \begin{bmatrix} \frac{\partial J(X)}{\partial x_1} \\ \frac{\partial J(X)}{\partial x_2} \\ \vdots \end{bmatrix} = -2 \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{1}{\sigma_1^2} & 0 & \dots \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & 0 & \frac{1}{\sigma_2^2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 - f_1(x) \\ z_2 - f_2(x) \\ \vdots \end{bmatrix} \tag{3}$$

위 식에서

$$\frac{\partial f(X)}{\partial X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} = H, \quad \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & & \\ & \frac{1}{\sigma_2^2} & \\ & & \ddots \\ & & & \frac{1}{\sigma_{Nm}^2} \end{bmatrix} = R^{-1} \text{ 라면}$$

$$\nabla J(X) = -2H^T R^{-1} [Z - F(X)] \tag{4}$$

로 나타낼 수 있다. 이때 뉴턴법을 사용하여 위 수식을 풀면

$$\Delta X = \left[\frac{\partial \nabla J(X)}{\partial X} \right]^{-1} [-\nabla J(X)] \tag{5}$$

수식 (4)을 수식 (5)에 대입하면

$$\Delta X = 0.5(H^T R^{-1} H)^{-1} (2H^T R^{-1} (Z-F(X))) \\ = (H^T R^{-1} H)^{-1} (H^T R^{-1} (Z-F(X))) \quad (6)$$

이렇게 구해진 ΔX 를 이용하여 ΔX 가 수렴 한계값보다 작아질 때까지 식 (7)과 같이 계속 업데이트한다.

$$X^{i+1} = X^i + \Delta X \quad (7)$$

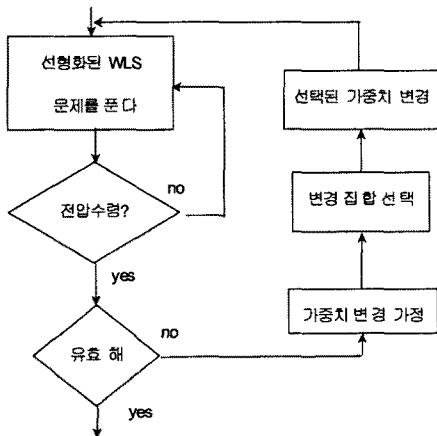
이러한 상태추정을 이용하여 전압, 부하량, 발전량, 선로 조류의 가장 가능성 높은 추정값을 계산하게 된다. 이렇게 계산된 상태추정을 이용하여 네트워크의 현재 상태를 파악하여 계통 운전제약 위반 사항을 알려줄 수 있다. 또한 잘못된 측정값을 발견하고 그 값을 수정하는데 도움이 된다. 계통의 일부분이 측정되지 않거나 측정값이 전송되지 않을 때라도 의사 측정값 등을 사용하여 상태추정을 수행할 수 있다.

3. 에러 처리과정

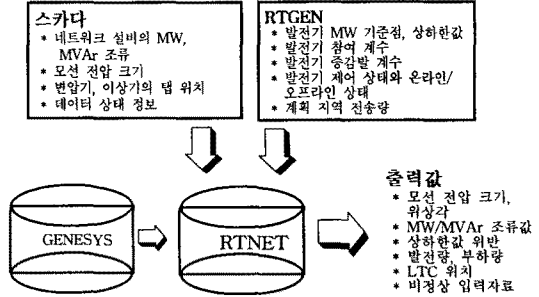
위에서 설명한 상태추정에 더하여 NEMS 상태추정에서는 에러 처리과정[4]이 추가되어 있다. 상태추정이 수렴되었을 때 측정값과 추정값의 차(Residual)가 큰 경우 일반적으로 관련된 측정값에 에러나 비정상적인 값이 있다고 생각할 수 있다. 즉 허용 가능한 Residual보다 더 큰 측정값이 있을 때 이 측정값의 가중치를 조정하여 이 측정값이 해에 미치는 영향을 줄일 수 있다. NEMS 상태추정에서는 먼저 표준편차의 3배보다 큰 차이거나 RESIDUAL을 갖는 측정값들에 대해 그 가중치를 변경했을 때의 민감도를 계산한다. 계산된 민감도가 미리 설정한 값보다 클 경우 이들 민감도가 큰 측정값에 대해 가중치를 줄인 뒤 다시 가중최소자승을 만족하는 상태변수를 계산한다. 에러 처리과정을 수렴한계 내에 들어올 때까지 수행한다. 그림1에서 에러처리 과정을 적용한 상태추정 과정을 보여주고 있다.

4 NEMS 상태추정 관련 기능

NEMS에서의 계통해석은[4][5] 크게 실시간(Real Time) 모드와 검토(Study) 모드로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 실시간 모드와 관련된 기능을 설명하도록 한다. 실시간 해석기능은 실시간 상태추정(RTNET), 상정고장 분석(RTCA), 안전도 개선(RTSENH)으로 나눌 수 있다. 각 기능을 살펴보면 다음과 같다.



<그림1> 에러 처리과정을 적용한 상태추정 수렴 과정



<그림2> 실시간 상태추정 입출력 요소

4.1 상태추정(RTNET : SE)

상태추정은 실시간 계통해석의 초기 단계에 해당한다. 이 단계에서 계통을 구성하고 상태를 제공하여 다음에 설명할 실시간 계통해석의 기반이 된다. 상태추정에서 먼저 입력값으로 스카다로부터 계통 구성요소의 상태와 측정값, RTGEN으로부터 발전기 상하한 값 등의 발전기 데이터, GENESYS로부터 계통의 모델을 받아들이는 것이다. 이들 입력요소 중 차단기 상태 정보 등을 이용하여 계통을 구성한다. 다음으로 스카다 아날로그 측정값 및 계통 모델을 사용하여 상태추정을 수행한다. 상태추정을 통해 측정값의 에러를 제거하여 모션 전압 및 위상각, 유효전력 및 무효전력의 조류값, 발전력, 부하 등의 상태를 결정할 수 있다. 그리고 운영한계 감시 기능을 사용하여 제약사항 위반을 감시할 수 있다. 상태추정에 관한 입출력 사항은 그림2에서 볼 수 있다.

4.2 상정고장 분석 (RTCA : Real time Contingency Analysis)

상정고장 분석은 상태추정에서 계산된 계통 추정값과 상정고장정보의 정보를 이용하여 실시간으로 상정고장을 수행하는 것이다 이 분석을 통해 기본 계통의 위반사항 및 각 상정고장의 계통 상태를 분석할 수 있고 상정고장 시 발생할 수 있는 한계값 위반사항 등을 분석할 수 있다. 위반 정도에 따라 상정고장 사례를 지정하여 정밀 분석을 수행할 수 있다.

4.3 안전도 개선(RTSENH : Real time Security Enhancement)

이 기능은 상태추정에서 계산된 계통 추정값과 상정고장정보 및 제어 정보를 이용하여 현재의 계통상태와 상정고장 계통상태에 대한 안전성을 평가하여 안정적, 경제적인 계통운용 방안 제시해 준다. 즉 상태추정 결과 현재계통에서 과부하가 존재하면 그 해소방안 및 최적 제어 방안을 제시해 주며 또한 상정고장 계통에서의 계통 안정운영 방안 및 사전 조치 방안, 최적 제어 방안을 제시해 준다.

5 적용 계통 모델링

현재 NEMS 상태추정에서는 765kV, 345kV, 154kV의 모선이 모델 되어 있으며 일부 소규모 발전기를 제외한 전 발전기가 모델 되어 사용되고 있다. 부하는 대규모 개별 수용가부터 154kV-23kV 변압기 2차 측까지 모델 되어 있다. 전 모선은 차단기 중심으로 모델 되어 있어 상태추정 시 이 차단기 및 스위치의 상태 정보를 이용하여 토폴로지 처리 과정을 통해 모선을 구성하여 상태추정을 하고 있다. 부하 및 발전량이 측정되지 않거나 취득되지 않을 경우 상태추정에 미리 만들어 놓은 모델값이 사용된다. 의사 측정값(Pseudo Measurement)이 사용될 경우 그 가중치는 정상적인

<표 1> 측정값과 추정값 비교, Cost = 33179

| 선로(MW) | 측정값 | 추정값 | 선로(MW) | 측정값 | 추정값 |
|---------|-------|-------|---------|-------|-------|
| 신안성-신서산 | 2109 | 2096 | 서서울-청양 | 999 | 985 |
| 의정부-울진 | 1097 | 1016 | 화성-아산 | 2898 | 2741 |
| 동서울-신계천 | 1049 | 1018 | 신용인-청원 | 832 | 764 |
| 전압(PU) | 측정값 | 추정값 | 전압(PU) | 측정값 | 추정값 |
| 의정부 | 1.025 | 1.043 | 신안성 765 | 1.005 | 0.985 |
| 동서울 | 1.029 | 1.041 | 신서산 765 | 1.010 | 0.992 |
| 서서울 | 1.017 | 1.022 | 신광주 | 1.013 | 1.033 |
| 화성 | 1.011 | 1.024 | 북부산 | 1.034 | 1.039 |
| 신용인 | 1.027 | 1.032 | 신옥천 | 1.015 | 1.023 |

측정값보다 작은 가중치를 주어 추정하게 된다. 현재 매 5분마다 자동으로 상태추정을 계산하고 있으며 자유도(Degree of Freedom)는 약 7700 정도이다.

6 상태추정 기능 시뮬레이션

본 논문에서 상태추정의 기능을 보이기 위해 다음과 같이 실험을 하였다. 전국 계통 중 북상선로 6개 선로의 MW와 그 해당 변전소 및 기타 3개 변전소의 전압 크기 측정값과 추정값을 함께 대비하여 보여주었다. 본 실험은 5월 15일 오후 4시경 실제 계통의 측정값들을 이용하여 실험하였다.

6.1 측정값과 추정값

표 1에서 볼 수 있듯이 상태추정을 통해 유효 해를 얻었다. 이 경우 대다수 모선의 경우에도 조류와 전압에 있어 측정값과 추정값이 유사한 것을 확인할 수 있었다. 상태추정 정도를 보여주기 위해 표 1을 살펴보면 대체로 유효전력과 전압이 측정값과 유사하게 추정되고 있다는 것을 알 수 있다. 현재 상태추정 안정화 중이기 약 2% 내로 오차가 존재하는 것을 볼 수 있다. 위의 실험에 추가하여 에러 처리과정을 적용하지 않았을 경우를 보면 해의 수렴 정도를 나타내는 Cost가 66,908로서 에러 처리과정을 적용한 표 1의 경우 Cost 33,179의 2배 정도가 되었다. 에러 처리과정을 제외했을 경우 에러를 포함한 측정값을 잘 보정하지 못하였다.

6.2 측정값의 부호가 틀릴 경우

이 실험에서는新安성-신서산 간 조류의 측정값의 부호가 바뀌어 측정되었을 경우를 살펴보았다. 이 경우 표 2와 같이 측정값의 잘못된 정보를 상태추정에서 보정하는 것을 볼 수 있었다.

<표 2> 측정값의 부호가 틀릴 경우

| 선로(MW) | 측정값 | 추정값 | 선로(MW) | 측정값 | 추정값 |
|---------|-------|-------|---------|-------|-------|
| 신안성-신서산 | -2117 | 2112 | 서서울-청양 | 1007 | 987 |
| 의정부-울진 | 1092 | 1008 | 화성-아산 | 2883 | 2766 |
| 동서울-신계천 | 1038 | 994 | 신용인-청원 | 804 | 733 |
| 전압(PU) | 측정값 | 추정값 | 전압(PU) | 측정값 | 추정값 |
| 의정부 | 1.027 | 1.045 | 신안성 765 | 1.007 | 0.987 |
| 동서울 | 1.031 | 1.043 | 신서산 765 | 1.012 | 0.993 |
| 서서울 | 1.020 | 1.024 | 신광주 | 1.014 | 1.034 |
| 화성 | 1.009 | 1.026 | 북부산 | 1.034 | 1.037 |
| 신용인 | 1.028 | 1.034 | 신옥천 | 1.015 | 1.024 |

<표 3> 측정값을 취득하지 못했을 경우

| 선로(MW) | 측정값 | 추정값 | 선로(MW) | 측정값 | 추정값 |
|---------|-----|-------|---------|-----|-------|
| 신안성-신서산 | | 2060 | 서서울-청양 | | 974 |
| 의정부-울진 | | 1000 | 화성-아산 | | 2701 |
| 동서울-신계천 | | 994 | 신용인-청원 | | 728 |
| 전압(PU) | 측정값 | 추정값 | 전압(PU) | 측정값 | 추정값 |
| 의정부 | | 1.046 | 신안성 765 | | 0.988 |
| 동서울 | | 1.043 | 신서산 765 | | 0.994 |
| 서서울 | | 1.027 | 신광주 | | 1.036 |
| 화성 | | 1.028 | 북부산 | | 1.041 |
| 신용인 | | 1.035 | 신옥천 | | 1.026 |

6.3 측정값이 누락 경우 상태추정

6개 북상선로의 MW 측정값과 해당 변전소의 전압을 측정하지 못했을 경우 상태추정의 결과를 표 3에서 보여주고 있다. 표 3에서 볼 수 있듯이 해당 모선의 전압 및 북상선로의 MW 조류를 측정하지 못하더라도 상태추정을 이용하여 계통의 상태를 추정할 수 있었다. 표 1과 표 3을 비교해 보면 실제 측정값이 있는 경우에 비해 측정값이 없는 경우 전압이 높게 추정되는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 측정값이 누락되어도 상태추정을 할 수 있고 그 경우 추정값이 변화하는 것을 확인할 수 있다.

7. 결 론

본 논문에서는 먼저 일반적인 상태추정의 기본이론에 대해 설명한 뒤 NEMS에서 적용한 상태추정의 내용 및 관련 응용프로그램의 기본기능에 대해 살펴보았다.

또한 NEMS의 상태추정을 실제 계통에 적용하여 상태추정의 에러 수정 기능을 확인하였고 스카다 미취득시에도 계통의 상태값을 계산할 수 있었다. 이렇게 계산된 값을 이용하여 계통의 한계값 위반 시 그 위반 사항을 감시할 수 있었다.

상태추정을 새로 도입하는 과정에서 계통의 여러 모델을 수정하였고 많은 스카다 오류 등을 수정하여 실제 계통에 이용할 수 있는 수준까지 끌어올렸다. 상태추정을 계통에 도입하여 스카다의 정도가 향상되었고 그로인해 상태추정의 정도 역시 향상되는 효과를 얻을 수 있었다.

향후 추진과제는 NEMS의 상태추정 기능 중 상정고장 분석 및 안전도 개선과 같은 응용프로그램을 적용하기 위해 관련 기능을 파악하고 필수 입력 자료를 입력하여 그 기능을 사용하는 것이다. 따라서 조만간 NEMS의 상태추정을 통해 계통을 파악하고 상정고장을 계산한 뒤 안전도 개선 기능을 사용하게 되면 계통을 안정하게 운영 하는데 도움이 될 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg "Power Generation, Operation, And Control", 2판, 12장, 1996
- [2] John J. Grainger, William D. Stevenson, "Power System Analysis", 15장, 1994
- [3] O. Alsac, N. Vempati, B. Stot, A. Monticelli, "Generalized State Estimation", IEEE Tran. on Power Systems, Vol. 13, No. 3, 1069-1075, August 1998
- [4] Alstom, "Network/Functional Design Specification", Ver EMP 2.1.0, 1999
- [5] Alstom, "Network/User Documentation", Ver EMP 2.1.0, 1999