

**한국형 EMS용 모선별 부하분포계수(BLF) 산정 프로그램 개발
- 가관측성을 고려한 상태추정에서의 응용 -**

정지훈*, 최영진*, 민경일*, 문영현*, 김홍래**, 이육화#, 윤상윤#, 김선구##, 허성일##
*연세대학교, **순천향대학교, #LS산전, ##전력거래소

Bus Load Distribution Factor Program Development in K-EMS

Chi-Hoon Jung*, Young-Jin Choi*, Kyung-Il Min*, Young-Hyun Moon*, Hong-Rae Kim**, Wook-Hwa Lee#, Sang-Yun Yun#, Seon-Gu Kim##, Seong-Il Hur## *Yonsei Univ., **Soonchunhyang Univ., #LS Industrial System, ##Korea Power Exchange

Abstract - 전력계통 규모가 대형화, 복잡화됨에 따라 전력계통의 안정적 운용과 양질의 전력공급을 보장하기 위해 EMS(Energy Management System)를 사용, 에너지 시스템 운용에 있어 안정적, 효과적 제어를 기하고 있다. 그러나 전력감시제어설비(SCADA)로부터의 실시간 데이터 누락, 또는 측정데이터의 오류가 발생할 경우 시스템상의 가관측성이 확보되지 않게 되어 상태추정이 불가능 할 수 있다. 이에 상태추정의 가관측성을 제공하기 위해 현재 한국형 EMS (K-EMS : Korea Energy Management System)의 응용프로그램 중 하나인 BLF(Bus Load distribution Factor) 산정 프로그램을 개발중에 있으며, 본 논문에서는 BLF 산정 프로그램을 통한 가관측성 확보방안과 프로그램에 대한 알고리즘에 대해 설명하고자 한다.

하는 동시에 계통의 상태(voltage profile)를 추정함으로써 현재 계통에 대한 정확한 데이터베이스를 구축하는 것이 목적이며, 상태추정의 계산은 광범위한 지역에 분포된 측정기기로부터 전송된 측정데이터에 의존하는데 이 측정 데이터에는 모선전압, 모선주입 유무 초 전력, 모선전류 등이 포함된다. 그러나 상태추정을 위한 측정 데이터가 부분적으로 충분하지 않아서 시스템의 올바른 상태추정이 불가능할 수 있다. 가관측성의 해석은 시스템의 가관측성 여부를 판별하고 가관측하지 못할 경우 적절한 의사추정치를 추가하여 시스템의 가관측성을 확보하고자 하는 것이다. 일반적으로 상태추정시에는 가중 최소자승법(WLS : Weighted Least Square method)을 이용하는데 이 방법은 측정잡음을 필터링하는 특성이 뛰어나고 계산시간이나 계산에 필요한 컴퓨터 메모리를 효율적으로 사용할 수 있는 장점이 있다. 가중 최소자승법은 여러 측정데이터의 실제 측정값과 상태값들 간의 오차를 최소화하기 위해 다음과 같은 2차 목적함수를 사용한다.

1. 서 론

1990년대 이후 전력산업 구조개편으로 발전과 송전, 배전/판매 부문이 일부 또는 전부 분할됨에 따라 전력시장개념이 도입되었다. 기존의 수직통합적인 환경에서 생산부분과 판매부분이 나누어짐에 따라 쌍방 간의 거래가 생기게 되었으며, 그에 따라 기존의 전력계통운용을 위한 기존의 EMS에 부가하여 전력시장운영시스템(MOS : Market Operating System)이 필요하게 되었고 이런 정보시스템은 보다 높은 신뢰도와 정확성을 요구하게 되었다. 이에 따라 현재 한국전력거래소에서는 전력계통 운영 기능과 전력시장 운영기능이 상호 유기적으로 결합된 시스템 구축사업인 한국형 EMS(K-EMS : Korea Energy Management System)개발을 국책사업으로 추진 중에 있다.[1] 그러나 전력계통의 측정데이터에는 각종 잡음이 혼입되어 있을 수 있으므로, 상태추정(SE : State Estimation)을 통해 EMS로 관리되는 계통운용의 정확성을 판단하고 보장하게 된다.[2]

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

* z : 차수 ($m \times 1$)의 측정벡터, x : 차수 ($n \times 1$)의 상태벡터, $h(x)$: 비선형 측정 함수, m : 측정 데이터의 수, n : 상태 변수의 수

목적함수 $J(x)$ 를 최소화하기 위한 최적조건은 식(2)와 같으며 $H(x)$ 는 측정함수의 자코비안 행렬로 측정함수를 편미분하여 구하게 된다.

$$\partial J / \partial x = H^T(x) R^{-1} \{z - h(x)\} = 0 \quad (2)$$

$$\text{단, } H(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \theta} & \frac{\partial P_i}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_i}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V} \\ 0 & \frac{\partial |V_i|}{\partial V} \end{bmatrix}$$

그러나 만일 측정된 데이터의 오류 또는 전력감시제어설비(SCADA)로부터의 실시간 데이터의 누락이 발생할 경우 상태추정의 가관측성이 확보되지 못해 상태추정이 불가능 할 수도 있다.

모선별 부하분포계수(BLF : Bus Load distribution Factor) 산정 프로그램은 정상상태시 상태추정(SE)의 부하추정결과를 누적하여 상태추정이 가관측하지 않을 경우 적절한 의사추정치를 상태추정 데이터에 제공함으로써 시스템의 가관측성을 제공하기 위해 개발 중인 것으로써 본 논문에서는 가관측성 판정이론 및 BLF 프로그램의 알고리즘에 대해 서술하고자 한다.

Newton-Raphson법을 사용하여 식(2)의 해를 구할시에 추정해를 x_0 라 하면 Taylor 급수전개에 의해 식(2)로부터 다음과 같은 근사식을 얻을 수 있다.

$$G(x_0) = H^T(x_0) R^{-1} \{z - h(x_0)\} \quad (3)$$

$$\text{단, } G(x_0) = H^T(x_0) R^{-1} H(x_0)$$

2. 본 론

2.1 전력계통 상태추정 관련 가관측성 판정이론
전력계통의 상태추정은 측정데이터로부터 에러를 여과

상태추정의 가관측성은 식(2)에서 Δx 를 계산할 수 있는냐와 직결되어 있으며 $G(x_0)$ 가 Singular이면 관측불능이고 Nonsingular이면 관측가능으로 판정된다. 즉

$G(x_0)$ 의 rank가 n 이면 관측가능이고 n 보다 적으면 관측 불능으로 판정하게 된다. $G(x)$ 의 rank는 일반적으로 계통상태 x 가 변하더라도 일정한 값을 가지므로 특정한 상태 x_0 에서 rank를 계산함으로써 측정시스템의 가관측성이 결정될 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 Topological observability 판정법이 개발되어 있다. 그러나 본 연구에서는 주어진 operating point x_0 에서 $G(x_0)$ 의 rank를 이용하여 가관측성을 판정하는 방법을 사용한다. 결국 시스템 가관측성의 판단은 가중 최소자승법(WLS)의 해가 존재하는지 여부로 결정되게 된다. K-EMS내의 상태추정기에서 사용하는 가관측성 해석 알고리즘은 Numerical method를 사용하며 이는 자코비안 행렬로부터 얻어지는 이득행렬(gain matrix)을 factorization하는 과정에서 0의 값을 갖는 대각원소(pivot)가 나타나면 가관측 불능으로 판정하게 된다.[3]

2.2 상태추정용 부하분포계수(BLF)의 일괄적 관리

상태추정의 측정데이터는 잡음에 의해 오염될 수 있으며 EMS 운용서 간혹 전력감시제어설비(SCADA)에서 측정데이터가 대량으로 누락되는 되는 경우가 있어 시스템의 잉여성이 충족되지 않게 된다. 이는 올바른 상태추정이 불가능하게 한다. 따라서 시스템이 관측불능 상태라면 지속적으로 업데이트된 부하분포계수(BLF)를 이용하여 적절한 의사측정값을 선정, 상태추정 데이터에 추가함으로써 가관측성을 확보해야 한다. 모선별 부하분포계수(BLF)는 일정한 시간대에 전체 계통 부하량에 대해 각 부하모선이 차지하는 부하량의 비율을 나타낸 것으로 먼저 상태추정 및 발전 스케줄을 통해 전체 계통의 부하량을 파악하고, 육지와 제주 두 개의 지역(Area)별 부하모선의 부하량의 합을 전체계통의 부하량으로 나눈다. 또한 각 지역은 다시 관리처(Division)로 나뉘어 관리되는데, 육지지역은 11개의 관리처로 나뉘며 제주지역은 1개의 단일 관리처로 관리된다. 이 관리처에 대한 모선별 부하의 비율은 최종적인 모선별 부하분포계수(LBLF)로 정의한다.[4] 이를 수식으로 나타내면 식(4)과 같으며, 동일한 방식으로 ABLF(지역별) 및 DBLF(관리처별)가 선정된다.

해당 Load의 BLF

$$LBLF_k = \frac{Load\ MW_k}{Division\ Load\ MW_j} \quad (4)$$

$$\text{단, } \sum_{k=1}^l Load\ MW_k = Division\ Load\ MW_j$$

$$\sum_{k=1}^l BLF_k = 1$$

* l : j 번째 Division에 속하는 Bus의 총 개수

* ABLF(Area BLF), DBLF(Division BLF), LBLF(Load BLF)

또한 매년 많은 수의 신규/제거부하가 생기므로 부하분포계수 계산시 보다 정확한 계산을 위해 신규/제거 부하에 대한 고려가 필요하게 된다. 신규부하의 추가시 신규부하의 정보가 식별되도 이전 정보가 없기 때문에 새로운 산정방법이 필요하게 된다. 뒤에 설명되었지만 본 프로그램의 부하분포계수는 총 864개의 타입을 가지고 있다. 따라서 전체적으로 보면 신규부하 정보는 현재 식별된 타입의 정보 한가지 밖에 가지지 못하므로 이후 수행되는 계수 산정 및 업데이트에 문제가 발생하게 된다. 이에 본 프로그램에서는 신규부하의 864개 타입에 대한 임시 부하분포계수 값을 부하의 계약용량 기준으로 산정하여 계산하게 된다. 아래 식(5)와 (6)은 신규/제거 부하 발생시 부하분포계수 산정에 적용되는 식이다.

신규부하 BLF 보정

- 기존 Load의 BLF

$$LBLF_new_i = (1 - \text{신규부하} LBLF_Tmp) \times LBLF_i$$

- 신규 Load의 BLF

$$LBLF_new_i = \text{신규부하} LBLF_Tmp \quad (5)$$

제거부하 BLF 보정

- 제거 Load를 제외한 Load의 BLF

$$LBLF_new_i = \frac{1}{1 - LBLF_타입} \times LBLF_i$$

- 제거 Load의 BLF

$$LBLF_new_i = 0 \quad (6)$$

* $LBLF_Tmp$: BLF의 임시저장값

표 1은 신규부하 추가시 식 (4)를 이용하여 부하분포계수를 보정한 것으로 각 열의 합이 1이 되어 올바른 부하분포계수가 선정된 것을 확인할 수 있다.

부하분포계수의 업데이트는 4개월, 4요일(토, 일, 월, 주중) 타입, 24시간대 타입별로 부하분포계수값을 지수평활화(Exponential smoothing)를 통해 누적시키고, 20(신정, 구정, 삼일절 등) 공휴일에 대하여는 계절과 요일 타입에 관계없이 24시간대로만 나눠 누적시키는 방법을 사용하였다. 이러한 방법을 적용시키면 총 864개의 타입이 생기게 된다.

여기서 사용된 지수평활법은 과거의 관측값을 이용하여 미래의 값을 예측할 때 최근의 자료에 더 많은 가중치를 부여하는 것으로 가중치를 지수적으로 부과하여 평균을 내는 방식이다. 부하분포계수가 시간의 흐름에 따라 서서히 변한다고 가정하면 과거에 계산된 값보다 최근에 계산된 값에 가중치를 더 두는 것이 타당하다.

표 1 신규부하 추가시 BLF 보정

Load No.	old_LBLF	new_LBLF	Temporary_LBLF
1	0.15	0.135542	0.131564
2	0.14	0.126506	0.125487
3	0.24	0.216867	0.212459
4	0.11	0.099398	0.098453
5	0.07	0.063253	0.065146
6	0.03	0.027108	0.028912
7	0.12	0.108434	0.103215
8	0.03	0.027108	0.025756
9	0.09	0.081325	0.083655
10	0.02	0.018072	0.028967
11	-	0.096386	0.096386
Total	1	1	1

따라서 부하분포계수 산정시 지수평활법을 적절한 예측방법으로 볼 수 있다. 지수평활법의 일반식은 다음과 같다.

$$\bar{y}_1 = \alpha y_1 + (1 - \alpha) \bar{y}_0 \quad (7)$$

$$\bar{y}_2 = \alpha y_2 + (1 - \alpha) \bar{y}_1$$

$$\bar{y}_3 = \alpha y_3 + (1 - \alpha) \bar{y}_2$$

$$\vdots$$

$$\bar{y}_t = \alpha y_t + (1 - \alpha) \bar{y}_{t-1}$$

* \bar{y} : 부하분포계수 예측값

y : 부하분포계수 측정값

α : 평활계수(Smoothing Constant)

초기치는 일반적으로 $\bar{y}_0 = y_0$ 으로 둔다. 식(7)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{y}_t &= \alpha y_t + (1-\alpha)\bar{y}_{t-1} & (8) \\ &= \alpha y_t + (1-\alpha)[\alpha y_{t-1} + (1-\alpha)\bar{y}_{t-2}] \\ &= \alpha(1-\alpha)^0 y_t + \alpha(1-\alpha)^1 y_{t-1} + \alpha(1-\alpha)^2 y_{t-2} \\ &\quad \dots + \alpha(1-\alpha)^{t-1} y_1 + (1-\alpha)^t \bar{y}_0 \end{aligned}$$

(8)의 식에서 가중치(1-α)가 지수적으로 감소함을 볼 수 있으며, 평활계수 α의 값은 0~1사이의 값을 사용한다. α가 작을수록 잡음에 덜 민감하게 반응하여 필터링에 유리하고, 클수록 최근의 관측값에 가중치를 두게 되므로 시스템의 변화에 영향을 많이 받게 되므로 적절한 값을 선택하여 사용한다.[5] 본 프로그램은 0.2~0.3사이의 평활계수를 사용하였다.

이 기법은 적전단계의 예측값에 과거의 데이터가 포함되어 있으므로 과거의 데이터를 유지할 필요성이 없어 매우 적은 양의 데이터 저장 공간으로도 시스템을 유지할 수 있는 이점을 가진다.

이러한 과정을 거쳐 BLF 산정 프로그램은 네트워크의 관측 가능한 부분에 있는 모든 모선들의 부하분포계수를 계산할 수 있어야 하고 적합한 부하분포계수를 제공하기 위해 미리 계산된 분산계수를 가지고 그것을 지수함수적으로 간략화 할 수 있어야 한다.

2.3 가관측성 판정에 기초한 의사측정치 선정방안
일반적으로 상태추정에 사용되어지는 측정데이터의 종류는 보통 3종류(모선전압의 크기, 모선 주입전력, 선로 조류전력)로 구분할 수 있다. 가관측성 판정시 이득행렬에 Zero pivot이 발생한 모선이 부하모선일 경우에는 유효 및 무효전력 부하에 대한 의사측정데이터를 사용한다. 이 데이터는 최종 업데이트된 부하분포계수값과 5분 수요예측값을 이용하여 부하별 의사측정값을 화면에 출력한다. 이를 개별부하에 관한 식으로 나타내면 다음과 같다. 지역별, 관리처별 의사측정값 산정 방식도 이와 동일하다.

해당 Load Point의 부하량 계산

$$LoadMW_k = DivisionLoadMW_j \times BLF_k \quad (9)$$

※ 무효전력에 대한 의사측정값은 시스템상의 역률 정보를 이용해 계산하게 된다.

만약 Zero pivot이 발생한 모선이 발전기 모선의 경우에는 유효전력 발전량과 모선전압의 의사측정데이터를 이용하게 된다. 발전량은 경제급전(ED), 기동정지계획(UC) 등으로부터 구할 수 있으며, 모선을 소유하고 있는 회사의 부하함수에 근거하여 모선전압에 대한 의사측정 데이터를 선정하게 된다.

2.4 BLF 프로그램 알고리즘

Step 1) BLF 타입설정

- 프로그램 구동 시의 시간정보를 바탕으로 현재 BLF 타입을 결정한다.

Step 2) 데이터 입력

- BLF 프로그램의 입력 데이터는 ACM (Application Common Model) DB내의 SE (State Estimation) 데이터(Area, Division, Load별 MW값)와 계통데이터(Area, Division, Load간 링크데이터)로 구성된다.

Step 3) BLF 계산

- 각 Load point마다 4계절, 4Day, 24시간대, 20공휴일에 대한 타입별 BLF 값과 Area, Division, Load별 BLF 값을 계산한다.

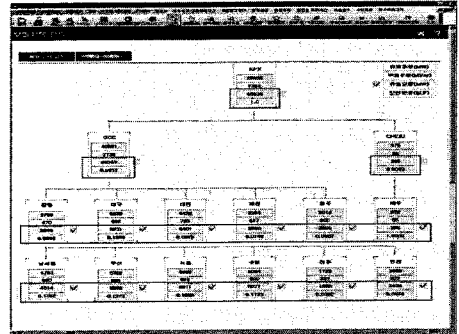
Step 4) BLF 업데이트

- BLF 이전값의 시간정보가 현재 시간대와 일치하는지 확인 후 일치하지 않을 경우 업데이트 할 BLF 타입을 설정하고 BLF값(ABLF, DBLF, LBLF)을 업데이트한다. 만약 시간대가 일치할 경우 현재시간을 저장 후 BLF 계산을 종료한다.

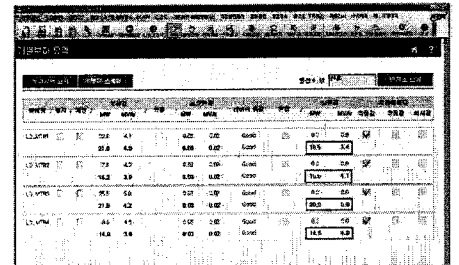
Step 5) 의사측정값 계산 및 업데이트

- 계산된 BLF값을 바탕으로 의사측정값을 계산 및 업데이트한다.

그림 1과 2는 프로그램 구동모습으로 부하지역별 또는 개별부하별로 부하분포계수 산정값과 의사측정값을 제공하며 실제 전력데이터와 비교가 가능함을 확인할 수 있다.



<그림 1> 부하지역 요약



<그림 2> 개별부하 요약

3. 결 론

전력계통 규모가 대형화, 복잡화됨에 따라 전력계통의 안정적 운용과 양질의 전력공급 보장을 위한 EMS의 중요성이 강조되고 있다. 이러한 EMS의 안정적이고 정확한 운용을 위해서는 항상 시스템에 대한 가관측성의 확보하는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 모선별 부하분포계수(BLF) 산정 프로그램을 이용한 가관측성 확보 방안 및 프로그램 알고리즘에 대해 서술하였으며, 최종적으로 각 부하에 대해 의사측정치치를 제공할 수 있음을 확인하였다.

본 논문은 지식경제부에서 시행한 전력산업 연구개발사업(과제번호 : R-2005-1-398-004)으로 수행되었습니다. 관계자분들께 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이진수 외, "전력거래소의 한국형EMS 개발계획", 대한전기학회 하계학술대회, 2007
- [2] A. J. Monticelli, "Electric power system state estimation", Proceedings of the IEEE, Vol. 88, Issue 2, pp. 262-282, 2000
- [3] B. Gou and A. Abur, "A Direct Numerical Method for Observability Analysis, IEEE, Vol. 14, NO. 2, MAY 2000
- [4] 이명준, 문영현, "상태추정의 모선별 부하분포계수에 관한 연구", 대한전기학회 전력기술논문회 추계학술대의 논문집, pp. 311-313, 2006
- [5] I. Moghram and S. Rahman, "Analysis and evaluation of five short-term load forecasting techniques", IEEE Trans on Power System. Vol. 4, Issue 4, pp. 1484-1491, 1989