

선로고장감도를 이용한 외부 전력계통 모델링 기법에 관한 연구

김흥래, 권형석
순천향대학교 정보기술공학부

A Study on the External System Modeling Using Branch Outage Sensitivity

Hongrae Kim, Hyung-Seok Kwon
Dept. of Electrical Engineering, SoonChunHyang University

Abstract - This paper addresses the issues of the external system modeling and power system state estimation with the external model. A set of significant branches is identified in the external system based on their branch outage sensitivities on the tie-lines. Measurements on these branches are transferred to internal system and updated in real-time. The state estimator is run for different loading conditions by using the actual measurements for the internal system and selected significant external system measurements while keeping the rest of the external system measurements at their base case values. Simulation results are presented using the IEEE 118 bus system as an example.

1. 서 론

연계된 전력계통은自社가 운영하는 내부계통(internal system)과 다른 전력회사들이 운영하는 외부계통(external system)으로 분류할 수 있다. 내부계통과 외부계통은 연계선로들(tie-lines)에 의해 서로 연결되어 있으며, 외부계통은 이 연계선로들을 흐르는 유·무효전력에 의해 내부계통에 영향을 주게 된다. 따라서, 인접한 전력계통의 운용상태에 대한 정보는 내부계통을 효율적으로 감시하고, 안전하게 운용하는데 반드시 필요하다.

우리 나라의 경우, 한국전력이 전국의 전력계통을 일괄 운영하고 있으며, 주변국가들의 전력계통에 대해 고립되어 있는 계통의 특성 때문에 외부계통에 관한 연구가 미진한 상황이다. 그러나, 세계적으로 전력공급의 민영화가 진행되는 추세에 따라 우리나라도 전력산업의 구조조정 계획이 진행중이며, 인접국가간의 전력용통제도(electricity sharing system)와 같은 지역 에너지협력체제가 확대될 가능성이 있다[1-4]. 따라서, 구조조정 후의 연계계통 운용이나, 북한 등 기타 인접국과의 계통연계가 가능해질 경우에 대비하여 장기적인 안목에서 외부계통에 대한 연구의 필요가 대두되고 있다.

실제 계통을 운용할 때, 외부계통의 토폴로지(topology) 정보나 여러 가지 측정데이터를 실시간에 이용하기는 사실상 불가능하며, 이러한 이유로 외부계통을 모델링하여 내부계통을 운용하는데 사용하려는 연구가 꾸준히 이루어져 왔다. 그러나, 이들은 대부분 조류계산을 위한 등가모델이나 온라인 안전도해석(on-line security analysis), 상정사고해석(contingency analysis)을 위한 것이었고[5-8], 상태추정을 목적으로 한 것은 아니었다.

80년대 중반 이후부터 데이터통신망을 통해 전력회사간에 데이터를 실시간으로 교환하려는 시도가 미국에서부터 시작되었고[9, 10], 이에 따라 내부계통의 상태추정

에 외부계통으로부터의 데이터를 이용하려는 연구가 활성화되어 왔다. 그러나, 전력회사간 데이터 교환기구(inter-utility data exchange scheme)가 구현된다하더라도 외부계통 내의 모든 측정데이터를 실시간에 이용할 수는 없으며, 따라서 내부계통에 크게 영향을 미치는 외부계통 내의 주요 설비를 결정하고 이에 대한 모델을 개발하는 것이 여전히 필요하다.

본 논문에서는 상태추정을 위한 외부계통모델을 제안하고, 현재의 상태추정 기법을 외부계통으로까지 확장하여 좀 더 효율적이고 안전한 계통 운용을 할 수 있는 토대를 마련하려 한다.

2. 본 론

2.1 외부계통 모델

전력회사간에 필요한 데이터를 실시간 교환하려는 시도가 활성화되고 있기는 하지만, 각 회사들이 필요로 하는 모든 외부계통 데이터를 실시간 교환하는 것은 현실적으로 어려움이 따른다. 따라서, 내부계통의 운용에 필수적인 외부계통 데이터를 결정하고, 이 데이터들만이라도 실시간에 전송받아 사용하는 것이 필요하다. 이러한 중요한 외부계통 데이터들의 변화는 연계선로들의 전력조류에 변화를 주게 되고, 따라서 내부계통의 운용에도 영향을 끼치게 된다.

한편, 내부계통의 운용의 관점에서 볼 때 연계선로의 전력조류에 많은 변화를 일으키지 않는 다른 외부계통 데이터들은 별로 중요하지 않다고 할 수 있다. 이러한 데이터들은 내부계통에 큰 영향을 끼치지 않으므로 내부계통으로의 실시간 전송의 필요가 적으며, 따라서 이 데이터들은 상태추정을 수행하는 과정에서 그 설계 기준값에 고정되게 된다.

본 논문에서는 외부계통 내 선로들의 고장감도(branch outage sensitivity)를 계산하여 내부계통의 운용에 영향을 미치는 외부계통 내의 주요 선로를 결정하고, 이러한 선로들과 관련이 있는 측정값들을 실시간으로 전송받아 전체 계통의 상태추정에 이용하는 방법을 사용한다.

2.2 선로고장감도 해석

그림 1과 같이 연계된 전력계통이 있을 때, 외부계통에 포함된 선로 중에서 내부계통에 많은 영향을 끼치는 선로들을 결정하기 위하여 선로고장감도 해석방법을 이용한다. 그럼에서 외부계통에 속한 임의의 선로 j 에 고장이 발생하여 그 선로를 흐르는 조류전력 f_j 가 0이 되었다고 가정했을 때, 그 조류전력의 변화(Δf_j)가 연계선로를 흐르는 조류전력에 얼마나 많은 영향(Δf_i)을 주는지 평가하는 것이 선로고장감도 해석이다. 선로 j 의 고장에 의한 연계선로 조류전력의 변화율 $\Delta f_i / f_i$ 를

외부계통 내 선로의 내부계통에 대한 영향력의 척도로 이용할 수 있으며, 내부계통의 운용에 중요한 영향을 끼치는 외부계통 내 주요 선로들을 결정할 수 있다. 이렇게 결정된 주요 외부계통 선로와 관련된 외부계통 측정 데이터는 내부계통의 운용에 많은 영향을 주게 되므로 이들 데이터는 실시간으로 전송받아 상태추정에 이용하여야 한다.

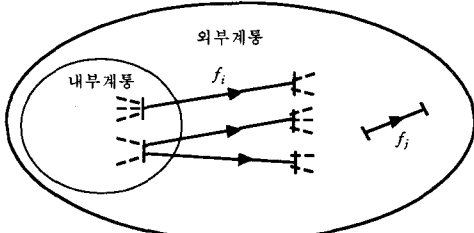


그림 1. 연계 전력계통

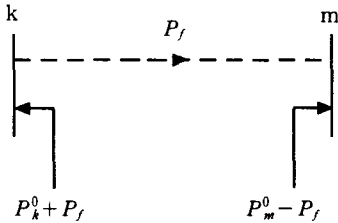


그림 2. 선로고장 모의

그림 2와 같이 선로의 양단 모선에 새로운 주입전력 (power injections)을 부가함으로써, 외부계통 내 선로의 고장을 모의할 수 있다. 내부계통에의 영향을 평가하기 위한 외부계통 선로에 그 선로를 흐르는 조류전력만큼의 전력을 양단 모선에 더하거나 빼주어서, 그 선로를 흐르던 전력조류가 다른 선로로 흐르게 함으로써 선로고장에 의한 타 선로 또는 내부계통에 대한 영향을 계산하는 것이다.

상태추정 연산을 위한 정규방정식(normal equation)은 다음과 같다.

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

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \Delta x^k &= x - x^k, \\ \Delta z^k &= z - h(x^k), \\ H(x^k) &= \partial h(x^k)/\partial x, \\ G(x^k) &= H^T(x^k)R^{-1}H(x^k). \end{aligned}$$

식 (1)에서 x 는 상태벡터, z 는 측정벡터, $h(x)$ 는 측정할 수 벡터, H 는 자코비안 행렬이다. z 의 측정데이터 중에서 선로고장을 가정하는 선로의 조류는 0으로 하고, 그 선로 양단 모선의 주입전력은 다음과 같은 식으로 대처함으로써 선로고장을 모의한다.

$$P_k = P_k^0 + (V_k V_m \cos \theta_{km} - V_k^2)G + V_k V_m B \sin \theta_{km} \quad (2)$$

$$P_m = P_m^0 + (V_k V_m \cos \theta_{km} - V_m^2)G - V_k V_m B \sin \theta_{km} \quad (3)$$

$$Q_k = Q_k^0 + (B - Y_k)V_k^2 - V_k V_m (G \cos \theta_{km} - B \sin \theta_{km}) \quad (4)$$

$$Q_m = Q_m^0 + (B - Y_m)V_m^2 - V_k V_m (G \cos \theta_{km} + B \sin \theta_{km}) \quad (5)$$

식 (2)-(5)에서 G 와 B 는 각각 모선 어드미턴스 행렬의 k 행 m 열의 유효 및 무효원소이며, Y_k 와 Y_m 는 각각 모선 k 측과 m 측의 line charging 어드미턴스이다.

2.3 실험 및 결과

IEEE 118모선 계통을 외부계통과 내부계통의 두 부분으로 나누어 시뮬레이션에 사용하였다. 내부계통은 36모선을, 그리고 외부계통은 82모선을 갖도록 구분하였으며, 이에 따라 두 계통을 연결하는 연계선로는 그림 3에 표시된 바와 같이 모두 8개로 결정되었다.

시뮬레이션을 위한 목적으로 전 계통에 걸쳐서 데이터를 측정한다고 가정하였다. 즉, 계통 내 모든 선로에서 전력조류를 측정하고, 모든 모선에 주입되는 전력도 측정되는 것으로 하였다. 전력조류와 모선 주입전력, 그리고 모선전압에 대해 공히 0.001의 측정 표준편차를 사용하였으며, 이를 이용하여 가중치를 결정하였다.

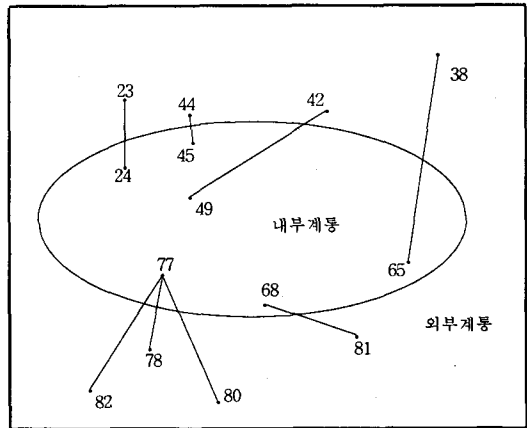


그림 3. 내·외부계통으로 분할된 IEEE 118모선 계통

2.3.1 외부계통 모델

외부계통 내의 주요 선로를 결정하기 위해서 각 선로의 고장감도를 우선 계산하였다. 외부계통 내의 선로 중에서 연계선로 전력조류에 기준 이상의 영향을 주는 선로를 찾아서 이들과 관련된 측정데이터를 실시간 전송받으려는 것이다.

기준값(threshold)을 크게 잡으면 선택되는 선로의 수가 적어져서 계산량은 줄어들지만 계산의 정확도는 떨어질 수 있고, 기준값을 작게 결정하면 상태추정의 결과는 정확하지만 상대적으로 많은 측정데이터를 실시간 전송해야 하며, 계산량이 늘어나서 계산시간이 길어지고 더 많은 메모리를 필요로 하는 단점이 있다. 이러한 장단점을 고려하여 본 연구에서는 이 기준값을 10%로 선택하였으며, 따라서 2.2절에서 설명한 연계선로의 조류변화율이 10% 이상이 되도록 영향을 주는 외부계통 내 선로를 주요선로로 결정하였다.

선로고장감도시험 결과 22개의 선로가 중요한 측정선로로 결정되었으며, 그 결과를 표 1에 요약하였다.

2.3.2 상태추정

선로고장감도계산에 의해 결정된 외부계통 내의 주요 선로에 대한 측정데이터를 이용하여 상태추정을 수행하였다. 내부계통의 데이터와 외부계통의 주요 측정데이터는 부하의 변화에 따라 실시간 전송되어 상태추정에 사용되며, 나머지 외부계통 데이터는 실제 기준값에 고정되어 계산에 이용되는 것으로 가정하였다.

시뮬레이션의 정확도를 판별하기 위해서 다양한 부하 상태를 고려하였으며, 그 중에서 150%의 과부하 상태에서의 상태추정 결과를 그림 4와 그림 5에 요약하였다. 선로고장감도계산에 의해 결정된 외부계통 모델과 그를

이용한 상태추정이 타당한 것인지를 확인하기 위해서 실제 계통의 모션전압들을 계산하여 비교하였다.

표 1. 외부계통 내의 주요 측정선로

연계선로	외부계통 주요선로
23 - 24	22-23, 23-25, 25-27, 26-30, 23-32
38 - 65	38-37, 30-38
42 - 49	40-42, 41-42
44 - 45	43-44, 34-43
78 - 77	78-79, 79-80
80 - 77	79-80, 81-80, 80-96, 80-97, 80-98, 80-99
81 - 68	81-80
82 - 77	82-83, 83-85, 82-96, 95-96
Total	22

그림 4와 5에 나타나 있는 모션들이 내부계통에 속해 있는 모션들이며, 실제 계통의 운용시 내부계통 운용자의 입장에서 내부계통의 현재 상태만이 관심의 대상이므로 외부계통의 모션들에 대한 결과는 생략하였다. 결과에서 볼 수 있는 것처럼 상태추정의 결과가 실제 모션의 정확한 전압과 큰 차이가 없으므로, 본 연구에서 제안한 감도계산에 의한 외부계통 모델과 이를 이용한 상태추정이 실제 계통에 적용되어 사용 가능함을 알 수 있다.

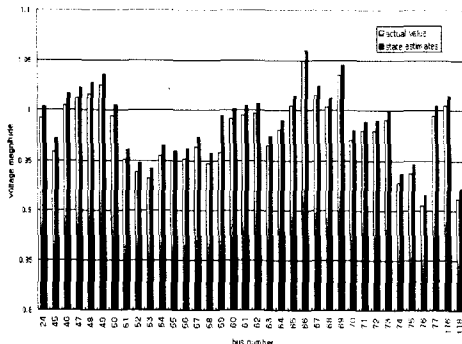


그림 4. 과부하시 실제 모션전압과 상태추정 결과

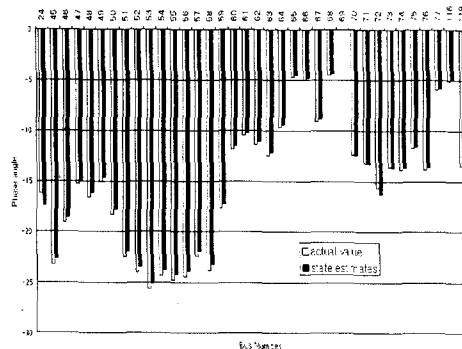


그림 5. 과부하시 실제 전압위상각과 상태추정 결과

3. 결 론

본 논문에서 사용한 선로감도해석 프로그램은 외부 전력계통 내의 주요 선로들을 결정할 수 있다. 이 프

로그램에 의해 결정된 주요 선로 및 측정데이터들은 전력회사 간의 협의나 계약에 따라 실시간으로 상호 교환되어야 하며, 이러한 데이터의 상호교환이 원활히 이루어지지 않을 경우 내부계통의 상태추정의 정확도가 저하될 수도 있다.

감도해석에 사용된 기준값은 특정 전력회사에서 필요로 하는 상태추정의 정확도나 컴퓨터의 계산속도, 메모리 용량 등에 따라 프로그램 내에서 변화시킬 수 있다. 물론, 외부계통에서 실시간으로 전송받을 수 있는 측정데이터의 수에 따라 이를 변화시켜야 하는 경우가 생길 수도 있다.

본 연구에서 개발된 프로그램은 내부계통과 외부계통에서 공통 표준 측정데이터와 계통계수(system parameter)를 사용함으로써 프로그램 사용자가 외부계통의 일부분 또는 전체에 속해 있는 선로나 모션의 감도를 측정하는 데에도 확장하여 사용할 수 있다.

또한, 프로그램에 사용된 이론과 공식은 상태추정 기법에 기초하였기 때문에, 외부계통의 토폴로지가 변화한 경우뿐만 아니라 데이터 측정 위치가 변화한 경우에도 전력회사가 쉽게 외부계통 모델을 개선할 수 있는 장점이 있다. 프로그램에서 얻어지는 선로감도는 계통의 토폴로지와 측정데이터 위치의 함수이므로 주어진 시점에서 이용가능한 측정데이터에 기초하여 수시로 변화할 수 있게 되는 것이다.

본 논문에서 제안한 선로감도해석 방법은 차후 더욱 정확한 외부 전력계통의 개발에 기초가 될 수 있을 것이며, 외부 전력계통 내의 토폴로지 에러를 판별하는 등의 연구에 그 기틀을 제공하는 의미가 있다. 향후, 이러한 외부계통을 포함한 상태추정이나 토폴로지 문제가 이 완벽하게 고려된 계통 운용이 실현되면 현대의 대형화된 연계 전력계통의 운용을 더욱 효과적이고 안전하게 할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 서주석, "한국의 전력정책 방안," 전기학회지 44권 11호, pp. 3-8, 1995.
- [2] 남정일, 윤갑구, "남·북한과 동북아시아 지역 전력계통 연계와 안전성 강화방안," 대한전기학회 하계학술대회 초청강연, 1997.
- [3] L. Belyaev, "동북아시아와 북아메리카의 전력연계의 효율성," 대한전기학회 하계학술대회 초청강연, 1997.
- [4] 김영창, 김용완, "한국전력의 구조개편," 전기학회지 48권 3호, pp. 37-43, 1999.
- [5] S. Deckmann, A. Pizzolante, A. Monticelli, B. Stott and O. Alsac, "Studies on Power System Load Flow Equivalencing," IEEE Trans. on Power Appar. and Syst., Vol. PAS-99, No. 6, pp. 2301-2310, 1980.
- [6] F.F. Wu and A. Monticelli, "Critical Review of External Network Modeling for Online Security Analysis," Electrical Power and Energy Systems, Vol. 5, No. 4, pp. 222-235, 1983.
- [7] A. Bose and K.A. Clements, "Real-Time Modeling of Power Networks," Proc. of the IEEE, Vol. 75, No. 12, pp. 1607-1622, 1987.
- [8] A. Bose, "Modeling of External Networks for On-Line Security Analysis," IEEE Trans. on Power Appar. and Syst., Vol. PAS-103, No. 8, pp. 2117-2125, 1984.
- [9] I. Dabbaghchi and L.S. VanSlyck, "Inter-Utility Data Exchange for State Estimation," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 3, pp. 1254-1262, 1988.
- [10] K. Kato, I. Dabbaghchi, J.J. Allemong, J.K. Robinson, J. Singh and R. Smith, "Real-Time Data Exchange for On-Line Security Assessment," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 3, pp. 1322-1332, 1992.