

전력계통에서 발생한 선로 토폴로지 에러의 실시간 판별

김홍래*, 권형석*, 한혁*, 송경빈**
 순천향대학교*, 대구호성기톨릭대학교**

Real-Time Identification of Branch Topology Errors in Electric Power Systems

Hongrae Kim*, Hyung-Seok Kwon*, Hyuk Han*, Kyung-Bin Song**
 SoonChunHyang University*, Catholic University of Taegu-Hyosung**

Abstract - This paper is about to the branch topology error identification in electric power systems. Topology errors may cause the state estimators to converge to a wrong solution or in some cases not to converge at all. The branch error identification is carried out as part of the state estimation procedure. The basic idea is that the estimates of these error variables will be insignificant if the branch is modeled correctly and they will be relatively large otherwise. A two step procedure for the identification of faulted branches is proposed.

1. 서 론

상태추정기(state estimator)는 EMS 내에서 전력계통의 안정된 운용을 위해 사용되는 중요한 기본설비의 하나로, 계통 내의 여러 측정점으로부터 얻어진 측정데이터들을 이용하여 전체 계통의 상태변수(모선전압의 크기와 위상각)를 추정하는 기능을 가진다. 상태추정의 결과로 얻어진 상태변수들을 이용하면 현재 계통의 운용상태를 알 수 있으며, 이를 토대로 계통의 안전도 해석(security analysis), 온라인 전력조류해석(on-line power flow analysis)등의 계통해석 기능을 수행할 수 있다 [1, 2].

상태추정에 이용되는 데이터는 크게 두가지로 분류할 수 있다. 한가지는 모선 전압의 크기, 모선 유입전력, 선로 조류전력, 선로전류와 같은 아날로그 측정데이터이고, 다른 한가지는 차단기나 스위치의 on/off 상태를 나타내는 디지털 데이터이다. 전자는 상태추정의 연산에 직접 이용되며, 후자는 현재 계통의 토폴로지, 즉 계통의 연결상태를 결정함으로써 계통의 현재 상태를 정확하게 판단하는 기준이 된다.

이 데이터들은 전송 중의 잡음이나 전송시스템의 오동작, 통신에러 등에 의하여 오차를 포함할 수 있으며, 이러한 오차는 상태추정의 결과를 부정확하게 하여 결과적으로는 전력계통의 운용에 장애를 초래할 수도 있다. 특히, 차단기나 스위치의 상태가 잘못 전송된 토폴로지 에러가 발생하면 실제 계통과 다른 잘못된 계통을 상태추정에 사용하게 되어 상태추정의 결과가 부정확하게 되며, 결국 계통의 안정된 운용에 장애를 일으키게 된다. 실제로 토폴로지 에러는 아날로그 측정데이터에 비해 상태추정의 결과에 더 큰 영향을 주게 되므로, 토폴로지 에러를 검출하여 정확한 계통의 모델을 찾아내는 것은 매우 중요한 일이다.

잘못된 측정 데이터를 찾아내어 제거하는 bad data processing 기법은 상태추정 기법의 연구와 함께 꾸준히 계속되어 왔으며, 이들은 대부분 상태추정을 수행한 후 측정 데이터들의 정규화오차를 계산함으로써 bad data를 판별해내는 방법을 사용하였다[3,4]. 이와 같은 방법들은 계통의 토폴로지를 정확하게 알고 있다는 가정 하에서 사용되었으며, 지금까지도 많은 전력회사들이 토

폴로지 에러를 고려하지 않고 계통을 운용하고 있는 것이 현실이다. 그러나, 실제 계통에서는 bad data와 토폴로지 에러가 동시에 발생할 가능성이 얼마든지 있으며, 이런 경우 계통 운용에 차질을 빚을 수도 있다.

이러한 이유에서 토폴로지 에러를 검출하는 방법에 대한 몇몇 연구가 최근에 발표되었다[5-10]. 이들은 대부분 WLS 상태추정기의 정규화오차를 사용하여 토폴로지 에러를 검출하는 방법을 사용하였으며, 계산에 사용하는 측정 데이터들은 bad data를 포함하고 있지 않다고 가정하였다. 이 경우 역시 앞서의 bad data processing 에서와 마찬가지로 두 종류의 에러가 동시에 발생한다면 그 타당성이 떨어지게 되며, 결국 WLS 추정기법으로 계산된 정규화오차를 이용하여 토폴로지 에러를 검출하는 데에는 어려움이 있다.

Wu와 Liu[7], Clements와 Davis[8] 등은 토폴로지 에러가 그에 상응하는 측정데이터의 형태로 표현될 수 있으며, 따라서 정규화 오차를 검사하여 토폴로지 에러를 판별할 수 있다고 하였다. Wu와 Liu는 정규화 오차와 선로조류 오차 간의 감도행렬(sensitivity matrix)을 유도하였으나, 이 경우는 단일 토폴로지 에러가 발생한 경우에만 타당성이 있어서 다중 토폴로지 에러의 경우는 이를 판별하는데 어려움이 있다. Clements와 Davis는 계통에 단일 토폴로지 에러가 발생한 경우, WM행렬에서 문제가 발생한 선로에 해당하는 열이 측정 오차 벡터에 colinear임을 보였다. 그러나, 이 방법은 critical branch에서 발생한 토폴로지 에러를 판별하는 데에는 어려움이 있다. 무엇보다, 이 두 가지 연구 역시 중요한 측정오차는 토폴로지 에러에 의해 나타난다는 가정을 기초로 하고 있다는 것이 토폴로지 에러의 판별에 있어 가장 큰 단점이 될 수 있다.

차단기를 통해 흐르는 조류전력(power flows)을 추정하여 계통의 토폴로지와 무관한 상태추정기를 개발한 연구들도 있었으나, 이 경우는 상태추정을 위해 계산해야 할 데이터의 양이 지나치게 많아져서 상태추정기의 실시간 운용이 어려워지는 단점이 있었다[9,10].

본 논문에서는 가중최소절대값(WLAV: weighted least absolute value) 알고리즘과 영 임피던스 선로의 개념을 상태추정에 적용함으로써, 아날로그 측정데이터와 토폴로지 에러가 공존하는 상황에서도 전력계통 내의 선로에 발생한 토폴로지 에러를 정확하게 판별하는 새로운 기법을 제안한다.

2. 본 론

본 논문에서는 토폴로지 에러를 찾아내고, 그 형태를 판별함으로써 현재 계통의 정확한 연결상태를 알아내기 위하여 2단계 과정을 사용한다. 먼저, WLAV 상태추정기를 이용하여 토폴로지 에러가 의심되는 선로를 찾아낸다. 다음 단계에서는 그 선로에 영 임피던스 선로를 도입하고 이 선로에 흐르는 조류전력을 새로운 상태변수로 지정하여 그 전력의 크기를 추정함으로써 선로의 토폴로지 에러 여부를 판별하는 것이다. 각 단계를 다음에 자

세하게 설명한다.

2.1 WLAV 상태추정 이론

WLAV 상태추정기의 목적함수는 다음과 같이 정의되며, 이 함수를 최소화하는 x 가 현재 계통의 상태를 나타낸다.

$$J(x) = \sum_{i=1}^n \omega_i |z_i - h_i(x)| \quad (1)$$

식 (1)에서 z_i 는 측정값, $h_i(x)$ 는 상태벡터 x 에 대한 측정함수이며, 이 목적함수는 다음과 같은 선형 프로그래밍(linear programming) 문제를 반복계산함으로써 최소화할 수 있다. 식에서 k 는 반복단계(iteration)를 표시한다

$$\min J(x) = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot (u_i + v_i) \quad (2)$$

$$\text{s.t. } \Delta z^k = H(x^k) \cdot \Delta x^k + u - v \quad (3)$$

여기서, $\Delta z^k = z - h(x^k)$

$$H(x^k) = \frac{\partial h}{\partial x} \text{ at } x = x^k,$$

ω_i 는 i 번째 측정값의 측정가중치,

u, v 는 slack variables.

WLAV 상태추정기는 interpolation property를 가지고 있어서 bad data는 식 (2, 3)의 계산과정에서 자동적으로 제거되고 정확한 측정데이터만으로 상태추정을 수행하게 된다. 따라서, 상태추정 연산이 완료된 후 어떤 선로와 관련된 측정 데이터들의 정규화 측정오차가 크게 나온다면 그 선로에 토폴로지 에러가 발생했음을 의심할 수 있다.

계통 내에 토폴로지 에러가 발생하였다면 WLAV 상태추정의 결과는 오류를 포함하게 된다. 따라서, 상태추정에 이용한 측정데이터 중에는 의미있는 정규화 오차를 가진 데이터가 포함되며, 이 데이터들이 관련되어 있는 선로들이 토폴로지 에러가 발생한 선로로 간주된다. 일단 토폴로지 에러가 의심되는 선로가 구해지면, 다음 단계에서는 이 선로를 흐르는 조류전력을 새로운 상태변수로 지정하여 새로운 측정함수를 정의하게 된다. 즉, 선로에 고장이 발생하여 그 선로의 운전이 중지되었을 때, 그 선로에서의 측정값들은 큰 잉여값을 가지게 되고, 이 경우 식 (2, 3)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\min J(x) = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot (u_i + v_i) \quad (4)$$

$$\text{s.t. } \Delta z = [H | M] \cdot \Delta y + u - v \quad (5)$$

여기서, M : 측정값 대 선로 incidence matrix[11],

$$\Delta y = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta f \end{bmatrix}.$$

Δf : 선로조류오차의 벡터.

위의 식 (4, 5)로부터 Δy 를 계산하고, $|\Delta f_i|$ 의 값을 이용하여 선로 i 에 토폴로지 에러가 발생하였는지의 여부를 판단할 수 있다. 이러한 방법은 아날로그 측정어러와 토폴로지 에러가 동시에 발생한 경우에도 그 강건성(robustness)을 유지할 수 있으며, 이때 대상 계통은 충분한 측정 여유도(measurement redundancy)를 확보할 수 있어야 한다.

2.2 토폴로지 에러 판별을 위한 2단계법

본 논문에서는 토폴로지 에러의 판별을 위해 2단계

방법을 제안한다. 첫 번째 단계에서는 선로조류에러 변수들을 포함하지 않고 WLAV 상태추정을 수행한다. 그 결과로 얻어지는 측정잉여값들을 정규화하고[3], 정규화된 잉여값이 큰 측정값들을 골라낸다. 이렇게 선택된 측정값들로부터 다음의 기준에 따라 토폴로지 에러가 의심되는 선로들을 결정한다.

● 선택된 측정값이 선로조류전력값이면, 그 선로를 토폴로지 에러가 의심되는 선로로 결정한다

● 선택된 측정값이 모선주입 전력값이면, 그 모선에 연결된 모든 선로들을 토폴로지 에러가 의심되는 선로로 결정한다.

두 번째 단계에서는, 상태벡터에 1단계에서 결정된 선로들에 대한 선로조류에러 변수들을 포함시켜서 식 (4, 5)를 구성하고, 다시 한번 상태추정을 수행한다. 2계산 결과에서 $|\Delta f|$ 값들을 얻을 수 있으며, 가장 큰 선로조류에러를 가지는 선로에 토폴로지 에러가 발생한 것으로 판별한다. 두 단계의 선형 프로그래밍 문제를 풀기 위하여 본 논문에서는 revised Simplex method를 사용하였다[12, 13].

2.3 모의실험 결과 및 고찰

상태추정을 위한 전력계통의 회로방정식은 행렬의 형태로 나타나게 되는데, 결국 상태추정이란 계통의 어드미턴스 행렬(Y-bus), 자코비안 행렬, 이득(gain) 행렬과 같은 여러 행렬에 대한 반복적인 연산과정이라 할 수 있다. 따라서, 상태추정 과정에서 얼마나 효율적으로 행렬들에 대한 연산을 하느냐가 매우 중요한 문제이다. 계통의 모선 수가 늘어남에 따라 계산해야 할 행렬요소의 수는 점점 늘어나게 되며, 이에 따라 연산시간은 점점 길어지고 컴퓨터 메모리의 사용도 증가하게 된다.

본 논문에서는 상태추정에 이용되는 행렬의 많은 부분이 0으로 채워져 있는 것을 고려하여, 행렬을 0이 아닌 값만 일차원으로 쪼개배열(optimal ordering)함으로써 행렬의 계산시간을 단축하고 메모리를 절감할 수 있는 sparse행렬법(sparse matrix method)[14]을 도입하여 효율적인 행렬연산을 수행하였다. IEEE 14모선 계통을 사용하여 토폴로지 에러가 발생한 경우를 모의하였다.

2.3.1 모의실험 1

흔히 bad data라고 부르는 아날로그 측정어러는 없고, 단일 선로에 토폴로지가 발생한 경우를 우선 고려하였다. 선로 2-5가 운전중지 상태이나, 이 선로가 운전 중인 것으로 잘못 구성된 계통에 대하여 상태추정을 수행하였다.

제안된 알고리즘에 따라 우선 1단계로 WLAV 상태추정을 수행하고 정규화오차(r_N)를 계산하였다. 그 결과, 정규화오차 중에서 큰 값(≥ 2.3)을 가지는 측정값들을 표 1과 같이 구하였고, 이를 바탕으로 토폴로지 에러가 의심되는 선로들을 앞서 설명한 규칙을 사용하여 결정하였다.

다음 단계에서 토폴로지 에러가 의심되는 선로들의 선로조류에러를 새로운 상태변수로 포함시킨 후, 다시 상태추정을 수행하였고 그 결과 표 2와 같은 선로조류에러들을 구하였다. 선로조류에러 중에서 가장 큰 값을 가지는 선로가 토폴로지 에러가 발생한 선로이므로, 이 경우 정확하게 실제 토폴로지 에러가 발생한 선로를 판별하였다.

표 1. 모의실험 1의 1단계 상태추정에 의해 구해진 정규화 오차

측정값	$ r_N $
2번 모선의 주입전력	19.7
5번 모선의 주입전력	18.2
3번 모선의 주입전력	16.1
4번 모선의 주입전력	8.5

표 2. 토폴로지 에러가 의심되는 선로들의 선로조류에러 추정값

선 로	$ Af $
2 - 5	0.658
2 - 3	0.024
2 - 4	0.018
1 - 2	0.000
1 - 5	0.000
4 - 5	0.000
5 - 6	0.000

2.3.2 모의실험 2

모의실험 1에서와 마찬가지로 선로 2-5에 토폴로지 에러가 발생하였고, 이와 동시에 선로 3-4에서 측정된 선로조류전력에 오차가 포함된 경우를 고려하였다. 표 3에서 볼 수 있는 것처럼 1단계 상태추정에서 WLAV 상태추정기는 모선 2와 5의 주입전력 뿐만 아니라 선로 3-4의 선로조류전력도 정확한 데이터가 아닌 것으로 판단하였다.

다음 단계에서 토폴로지 에러가 의심되는 선로들을 포함한 상태추정을 수행하였고, 그 결과로 구해진 선로조류에러값을 표 4에 요약하였다. 모의실험 1과 마찬가지로 선로 2-5의 선로조류에러가 가장 큰 값을 가지고 있으며, 따라서 본 논문에서 제안한 알고리즘은 토폴로지 에러와 측정에러가 동시에 발생한 경우에도 정확하게 토폴로지 에러가 발생한 선로를 판별할 수 있음을 알 수 있다.

표 3. 모의실험 2의 1단계 상태추정에 의해 구해진 정규화 오차

측정값	$ r_N $
선로 3-4의 조류전력	30.8
2번 모선의 주입전력	17.7
5번 모선의 주입전력	14.4

표 4. 토폴로지 에러가 의심되는 선로들의 선로조류에러 추정값

선 로	$ Af $
2 - 5	0.658
2 - 3	0.026
2 - 4	0.018
1 - 2	0.000
4 - 5	0.000
3 - 4	0.000

3. 결 론

본 논문에서는 WLAV 추정기를 이용하여 전력선로에 발생한 토폴로지 에러를 판별하는 새로운 방법을 제안하였다. 토폴로지 에러 판별을 위한 2단계 기법을 사용하였으며, 1단계에서 우선 토폴로지 에러가 의심되는 선로들을 찾아내고, 2단계에서는 선택된 선로들 중에서 토폴로지 에러가 발생한 선로를 최종적으로 결정하였다. 2단계에서는 일반적인 상태추정기에서 사용하는 전압 상태변수 외에 선로조류에러를 상태변수로 추가하여 새로운 전력조류방정식을 유도하고, 선형 프로그래밍 기법을 사용하여 그 해를 구하였다.

모의실험을 통하여 제안된 알고리즘의 타당성을 검증하였으며, 개발된 프로그램은 단일 토폴로지 에러뿐만 아니라 토폴로지 에러와 측정에러가 동시에 발생한 경우에도 정확하게 토폴로지 에러를 판별하였다. 따라서, 본 연구의 결과로 더욱 효율적이고 강건한 상태추정을 수행할 수 있을 것으로 기대된다. 상태추정을 이용하여 계통의 현재 운용상태를 실시간 감시하는 것이 가능해지면 계통 내의 다양한 설비들을 최적의 상태에서 제어, 운용할 수 있는 기틀을 마련할 수 있으며, 따라서 전력공급

의 신뢰성을 확보할 수 있다. 또한, 규모 확대와 복잡화가 계속되고 있는 전력계통에 자동화 시스템의 도입을 가속화하는 역할을 함으로써 보수, 운영의 효율화도 도모할 수 있을 것이라 기대된다.

본 논문에서는 다양한 통계기법이나 데이터 처리기법을 상태추정과 토폴로지 에러 판별을 위한 연산과정에 사용함으로써 차후 송, 배전 계통의 관리 및 제어를 위한 다양한 프로그램의 개발에 적용할 수 있는 토대를 마련하였고, 향후 다른 분야의 연구에도 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

본 논문에서는 선로에 발생한 토폴로지 에러(branch topology error)의 판별만을 다루었으며, 모선분할(bus split)이나 모선통합(bus merge)과 같은 substation 토폴로지 에러의 판별에 관한 연구가 향후 연구과제이다. 또한, 토폴로지 에러를 찾아낼 수 없는(undetectable) 경우나, 토폴로지 에러의 발생을 찾아내었으나 어느 선로에서 에러가 발생하였는지를 정확하게 판별할 수 없는(unidentifiable) 경우 등에 대한 체계적인 연구를 진행함으로써 이러한 경우들의 처리방법을 마련하는 것도 계속 연구되어야 할 과제이다.

[참 고 문 헌]

- [1] L. Holtan, et al., "Comparison of Different Methods for State Estimation," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 4, pp. 1798-1806, 1988.
- [2] F. Wu, "Power System State Estimation: A Survey," Electrical Power & Energy Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 80-87, 1990.
- [3] A. Abur, "A Bad Data Identification Method for Linear Programming State Estimation," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, pp. 894-901, 1990
- [4] E. Handschin, et al., "Bad Data Analysis for Power Systems State Estimation," IEEE Trans. on Power Appar. & Syst., Vol. PAS-94, pp. 329-337, 1975.
- [5] H. Koglin and H. Neisius, "Treatment of Topological Errors in Substations," Proc. of 10th PSCC, Graz, Austria, pp. 1045-1053, 1990.
- [6] R. Lugtu, D. Hackett, K. Liu and D. Might, "Power System State Estimation: Detection of Topological Errors," IEEE Trans. on Power Appar. and Sys., Vol. PAS-99, No. 6, pp. 2406-2411, 1980.
- [7] F. Wu and W. Liu, "Detection of Topological Errors by State Estimation," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 4, pp. 176-183, 1989
- [8] K. Clements and P. Davis, "Detection and Identification of Topology Errors in Electric Power Systems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, pp. 1748-1753, 1988.
- [9] B. Clewer, M. Sterling and M. Irving, "Topologically Independent Stat Estimation," Proc. of IFAC Symposium on Power Systems, Modeling and Control Applications, Brussels, 1988.
- [10] M. Irving and M. Sterling, "Substation Data Validation," IEE Proceedings part (c), Vol. 129, No. 3, pp. 119-122, 1982.
- [11] K. Clements, G. Krumpholz and P. Davis, "Power System State Estimation Residual Analysis: An Algorithm Using Network Topology," IEEE Trans. on Power Appar. and Syst., Vol. PAS-100, No. 4, pp. 1779-1787, 1981.
- [12] D. Luenberger, Linear and Nonlinear Programming, Addison and Wesley Publishing Co., 1984.
- [13] I. Barrodale and F. Roberts, "An Improved Algorithm for Discrete l_1 Linear Approximation," SIAM Journal on Numerical Analysis, Vol. 10, No. 5, pp. 839-848, 1973.
- [14] W. Tinney, et al., "Sparse Vector Method," IEEE Trans. on Power Appar. & Syst., Vol. PAS-104, pp. 295-301, 1985.