

# 최소절대값 상태추정에 의한 전력계통 선로 토폴로지 에러의 추정

論 文

49A-6-2

## Estimation of Branch Topology Errors in Power Networks by WLAV State Estimation

金 鴻 來\* · 宋 敬 彬\*\*

(Hongrae Kim · Kyung-Bin Song)

**Abstract** - The purpose of this paper is to detect and identify topological errors in order to maintain a reliable database for the state estimator. In this paper, a two stage estimation procedure is used to identify the topology errors. At the first stage, the WLAV state estimator which has characteristics to remove bad data during the estimation procedure is run for finding out the suspected branches at which topology errors take place. The resulting residuals are normalized and the measurements with significant normalized residuals are selected. A set of suspected branches is formed based on these selected measurements; if the selected measurement is a line flow, the corresponding branch is suspected; if it is an injection, then all the branches connecting the injection bus to its immediate neighbors are suspected. A new WLAV state estimator adding the branch flow errors in the state vector is developed to identify the branch topology errors. Sample cases of single topology error and topology error with a measurement error are applied to IEEE 14 bus test system.

**Key Words** : Power System State Estimation, Topology Errors, Weighted Least Absolute Value

### 1. 서 론

현대의 전력계통은 전력수요의 증가에 따라 꾸준히 대형, 복잡화되고 있으며, 전체 계통을 안정적으로 유지하고 전력공급의 신뢰성을 확보하기 위해서는 전체 계통의 운용상태를 온라인(on-line)으로 감시, 제어하는 것이 필수적이다. 이와 같은 전력계통의 실시간 감시, 분석, 제어를 위하여 EMS (energy management system)가 사용되고 있으며, 이 EMS는 현대의 전력계통 운용에 있어서 가장 중요한 역할을 하는 계통운용설비 중의 하나가 되었다. 상태추정기(state estimator)는 이러한 EMS내에서 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 두 가지로 분류할 수 있다. 한가지는 모선 전압의 크기(bus voltage magnitudes), 모선 유입전력(bus power injections), 선로 조류전력(line power flows), 선로전류(line currents)와 같은 아날로그 측정

데이터이고, 다른 한가지는 차단기(circuit breakers)나 스위치의 on/off 상태를 나타내는 디지털 데이터이다. 전자는 상태 추정의 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 측정 에러에 비해 상태추정의 결과에 더 큰 영향을 주게 되므로, 토폴로지 에러를 검출하여 정확한 계통의 모델을 찾아내는 것은 매우 중요한 일이다.

전력계통의 상태추정 이론이 1969년 미국의 Fred Schweppe에 의해 처음 소개된 후[3], 이에 대한 다양한 연구와 개발이 이루어져 왔다[2,4,5]. 잘못된 측정 데이터를 찾아내어 제거하는 불량데이터 처리기법도 상태추정 기법의 연구와 함께 꾸준히 계속되어 왔으며, 이들은 대부분 상태추정을 수행한 후 측정 데이터들의 정규화오차(normalized residuals)를 계산함으로써 불량데이터를 판별해내는 방법을 사용하였다[6,7]. 이와같은 방법들은 계통의 토폴로지를 정확하게 알고 있다는 가정하에서 사용되었으며, 지금까지도 많은 전력회사들이 토폴로지 에러를 고려하지 않고 계통을 운용하고 있는 것이 현실이다. 그러나, 실제 계통에서는 불량데이터와 토

\* 正 會 員 : 順天郷大 情報技術工學部 助教授 · 工博

\*\* 正 會 員 : 啓明大 工大 電子工學科 專任講師 · 工博

接受日字 : 1999年 11月 6日

最終完了 : 2000年 5月 15日

폴로지 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[8-15]. 이들은 대부분 가중최소자승(WLS: weighted least square) 상태추정기의 정규화오차를 사용하여 토폴로지 에러를 검출하는 방법을 사용하였으며, 계산에 사용하는 측정 데이터들은 불량데이터를 포함하고 있지 않다고 가정하였다. 이 경우 역시 앞서의 불량데이터 처리에서와 마찬가지로 두 종류의 에러가 동시에 발생한다면 그 타당성이 떨어지게 되며, 결국 WLS 추정기법으로 계산된 정규화오차를 이용하여 토폴로지 에러를 검출하는 데에는 어려움이 있을 수 있다.

Wu와 Liu[10], Clements와 Davis[11] 등은 토폴로지 에러가 그에 상응하는 측정에러의 형태로 표현될 수 있으며, 따라서 정규화 오차를 검사하여 토폴로지 에러를 판별할 수 있다고 하였다. Wu와 Liu는 정규화 오차와 선로조류 오차간의 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 측정오차 벡터에 colinear임을 보였다. 그러나, 이 방법은 critical branch에서 발생한 토폴로지 에러를 판별하는데에는 어려움이 있다. 무엇보다, 이 두 가지 연구 역시 중요한 측정 오차는 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[12,13]. 국내의 경우, 상태추정에 관한 연구가 있기는 했으나[16] 크게 활성화되지 못하였고, 특히 토폴로지 에러에 관한 연구는 토폴로지 에러가 계통운용에 큰 영향을 끼치게 됨에도 불구하고 거의 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 가중최소절대값(WLAV: weighted least absolute value) 알고리즘과 영 임피던스 선로의 개념을 상태추정에 적용함으로써, 아날로그 측정에러와 토폴로지 에러가 공존하는 상황에서 전력계통 내의 선로에 발생한 토폴로지 에러를 정확하게 판별하는 새로운 기법을 제안하였다. 본 연구를 통해 개발된 선로의 토폴로지 에러 판별 알고리즘은 기존의 상태추정 알고리즘을 개선하여 토폴로지 에러의 판별에 사용함으로써 기존의 상태추정 데이터를 그대로 사용할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다. 토폴로지 에러 판별을 위한 새로운 WLAV 상태추정 알고리즘과 2단계 판별과정을 2장에서 소개한다. 3장에서는 모의실험 방법과 그 결과를 고찰하며, 연구의 결론을 4장에서 정리한다.

## 2. 연구방법 및 이론

본 연구에서는 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 이 선로에 흐르는 조류전력을 새로운 상태변수로 지정하여 그 전력의 크기를 추정함으로써 선로의 토폴로지 에러 여부를 판별하는 것이다. 각 단계를 다음에 자세하게 설명한다.

### 2.1 WLAV 상태추정 이론

상태추정의 수학적 모델은 측정값 벡터  $z$ 와 상태벡터  $x$ 의 관계에 기초하게 되며 그 식은 다음과 같다.

$$z = h(x) + e \tag{1}$$

여기서,  $z$  :  $(m \times 1)$  측정벡터,  
 $x$  :  $(n \times 1)$  상태벡터,  
 $h(x)$  : 측정값을 표현하는 비선형 함수,  
 $e$  :  $(m \times 1)$  측정오차 벡터,  
 $m$  : 측정 데이터의 수,  
 $n$  : 측정변수의 수.

식(1)에 기초하여 목적함수를 정의하고, 그 목적함수를 최소화하는 상태벡터  $x$ 를 구하는 것이 상태추정의 과정이다. 이때, 측정함수  $h(x)$ 가 비선형 함수이므로, 이 함수를 선형함수로 근사화한 후 방정식을 반복 계산함으로써 최종적인 상태벡터를 구하는 것이 일반적인 기법이다[1, 2].

임의의  $x_0$ 에서의  $h(x)$ 를 테일러 급수로 전개한 후 1차항만을 써서 근사화하면, 식 (1)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\Delta z = H \cdot \Delta x + e \tag{2}$$

여기서,  $\Delta z = z - h(x_0)$ ,  
 $H = \frac{\partial h}{\partial x}$  at  $x_0$ ,  
 $\Delta x = x - x_0$ .

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

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \omega_i |z_i - h_i(x)| \tag{3}$$

식 (3)의 목적함수는 다음과 같은 선형계획(linear programming) 문제를 반복 계산함으로써 최소화할 수 있다[17]. 식에서  $k$ 는 반복단계(iteration)를 표시한다.

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

$$\text{s.t. } \Delta z^k = H(x^k) \cdot \Delta x^k + u - v \tag{5}$$

여기서,  $\Delta z^k = z - h(x^k)$

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

$\omega_i$  :  $i$ 번째 측정값의 측정가중치

$u, v$  :  $(u-v)$ 가 측정잉여값일 때의 음이 아닌 잉여변수.

WLAV 상태추정기의 interpolation property에 의해 식 (4, 5)의 계산과정에서 불량데이터는 상태추정의 결과에 영향을 끼치지 못하며, 정확한 측정데이터만에 의해 상태추정이 수행되게 된다. 따라서, 상태추정 연산이 완료된 후 어떤 선로와 관련된 측정 데이터들의 정규화 측정오차(normalized measurement residual)가 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)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\Delta z = H \cdot \Delta x + M \cdot \Delta f + e \quad (6)$$

여기서,  $M$  : measurement to branch incidence matrix ( $m \times \ell$ )[18],  
 $m$  : 측정데이터의 수,  
 $\ell$  : 계통 내 선로의 수.  
 $\Delta f$  : 선로조류오차의 벡터( $\ell \times 1$ ).

선로에 토폴로지 에러가 발생하지 않은 경우라면  $\Delta f$  는 0 이고, 식 (6)은 식(2)와 같아진다. 선로조류오차 벡터  $\Delta f$  를 선형 프로그래밍 문제에 포함시키면 식 (4, 5)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\min J(x) = \sum_{i=1}^m \omega_i \cdot (u_i + v_i) \quad (7)$$

$$\text{s.t. } \Delta z = [H | M] \cdot \Delta y + u - v \quad (8)$$

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

계통이 완전하게 가관측하고 측정 데이터의 수( $m$ )가 측정 변수의 수와 계통 내 선로의 수를 합한 것( $n + \ell$ ) 이상이면, 식 (8)은 다음과 같이 분할하여 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 & M_1 \\ H_2 & M_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1 - v_1 \\ u_2 - v_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (10)에서 측정값의 최초  $n$ 개의 행을 가관측한 집단으로

구성하여, 정방행렬  $H_1(n \times n)$ 이 정칙(nonsingular)이 되도록 측정값들을 정렬하면, 식 (9)는 다음과 같은 형태로 다시 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & M_1 \\ 0 & M_{red} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1 - v_1 \\ u_2 - v_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서,  $M_1 = H_1^{-1} \cdot M_1$

$$M_{red} = M_2 - H_2 \cdot H_1^{-1} \cdot M_1$$

$$\Delta z_1 = H_1^{-1} \cdot \Delta z_1$$

$$\Delta z_2 = \Delta z_2 - H_2 \cdot H_1^{-1} \cdot \Delta z_1$$

$$r_1 = H_1^{-1} \cdot r_1$$

$$r_2 = r_2 - H_2 \cdot H_1^{-1} \cdot r_1$$

$$r_i = u_i - v_i, \quad i = 1, 2$$

$$r_i = u_i - v_i, \quad i = 1, 2$$

식 (7, 8)로 표현된 선형계획 문제의 해를 구하는 과정에서, 선형 독립인 행렬  $M_{red}$ 의 열만이 기저(basis)에 포함되는 것을 식 (10)으로부터 알 수 있다. 위의 식 (7, 8)로부터  $\Delta y$ 를 계산하고,  $|\Delta f_i|$ 의 값을 이용하여 선로  $i$ 에 토폴로지 에러가 발생하였는지의 여부를 판단할 수 있다. 이러한 방법은 아날로그 측정에러와 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 연구에서는 토폴로지 에러의 판별을 위해 2단계 방법을 제안하였다. 첫 번째 단계에서는 선로조류에러 변수들을 포함하지 않고 WLAV 상태추정을 수행한다. 그 결과로 얻어지는 측정잉여값들을 정규화하고[6], 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 모선주입전력값이면, 그 모선에 연결된 모든 선로들을 토폴로지 에러가 의심되는 선로로 결정한다.

두 번째 단계에서는, 상태벡터에 1단계에서 결정된 선로들에 대한 선로조류에러 변수들을 포함시켜서 식 (7, 8)을 구성하고, 다시 한번 상태추정을 수행한다. 그 계산 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 수정단체법(revised Simplex method)을 사용하였다[17, 19]. 단, 판별할 수 없는 토폴로지 에러의 경우를 고려하기

위하여 단계연산의 프로그램을 작성하는 과정에서 다음과 같이 약간의 수정을 하였다.

- (1) 1단계(phase I): 단체법 규칙에 따라 행렬  $H$ 의 열을 기저에 넣거나, 가관측성 판별 과정을 이용하여  $H_i$ 의 행에 상응하는  $n$ 개의 가관측한 측정집단을 결정함으로써 초기 기저를 결정한다.
- (2) 중간단계(intermediate phase): 2단계(phase II)를 수행하기에 앞서 행렬  $M$ 의 열을 기저에 넣는다. 이 단계에서 두 가지의 경우가 발생할 수 있다.
  - a) 행렬  $M$ 에 남아 있는 열 중에서 음(negative)의 값을 갖는 상대 cost가 전혀 없다. 이 경우, 단체법 규칙은 무시되고, 행렬  $M$ 의 나머지 열들은 임의의 순서로 기저에 넣는다.
  - b) 기저에 들어가도록 결정된 행렬  $M$ 의 열이 기저에 들어 있는 기존의 열과 선형 종속(linearly dependent)이다. 이것은 기저에 들어가기로 결정된 열에 해당하는 선로가 critical branch인 것을 의미하며, 이 경우 상응하는 변수  $\Delta f_i$ 는 비기저(nonbasic) 즉,  $\Delta f_i = 0$ 으로 처리된다.
- (3) 2단계(phase II): 1단계에서 기저로 들어간  $H$ 와  $M$ 의 열은 그대로 두고, 다음과 같이  $\ell_1$  선형 근사화(linear approximation) 문제를 푼다

$$[H | M] \Delta y \approx \Delta z$$

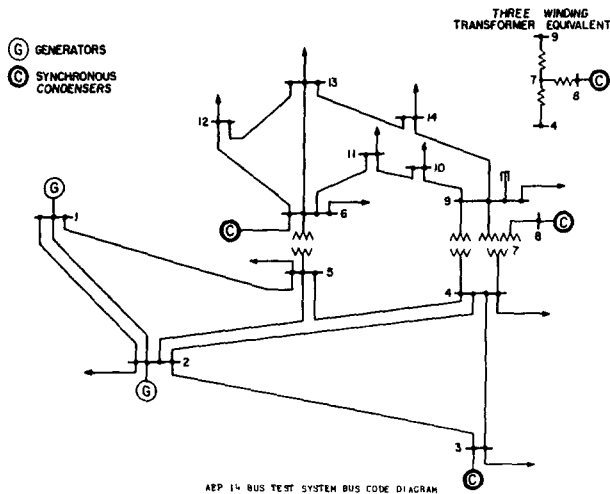


그림 1 IEEE 14모선 계통  
Fig. 1 IEEE 14-bus system

### 3. 결과 및 고찰

상태추정을 위한 전력계통의 회로방정식은 행렬의 형태로 나타나게 되는데[20-23], 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 연구에서는 상태추정에 이용되는 행렬의 많은 부분이 0으로 채워져 있는 것을 고려하여, 행렬을 0이 아닌 값만 일차원으로 최적배열(optimal ordering)함으로써 행렬의 계산시간을 단축하고 메모리를 절감할 수 있는 소행렬법(sparse matrix method)[24]을 도입하여 효율적인 행렬연산을 수행하였다.

2장에서 설명한 바와 같이 선로조류에러를 상태변수에 포함시키는 새로운 WLAV 상태추정 프로그램을 개발하여 토폴로지 에러를 판별하는데 사용하였으며, 토폴로지 에러가 발생한 세가지 경우를 그림 1과 같은 IEEE 14모선 계통에 적용하여 모의실험을 수행하였다. 상태추정의 연산에 사용된 측정데이터는 표 1과 같다.

#### 3.1 모의실험 1: 단일 토폴로지 에러 발생, 측정에러는 없는 경우

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

표 1 IEEE 14모선 계통의 측정데이터  
Table 1 Measurement data for IEEE 14-bus system

측정모선, 선로	측정 형태	크기(p.u.)
1	전압의 크기	1.06000
2	"	1.04500
3	"	1.01000
6	"	1.07000
8	"	1.09000
10	"	1.05133
13	"	1.05044
1	모선주입전력(P, Q)	2.32378, -0.16889
2	"	0.18300, 0.29691
3	"	-0.94200, 0.04390
4	"	-0.47800, 0.03900
5	"	-0.07600, -0.01600
9	"	-0.29500, -0.16600
12	"	-0.06100, -0.01600
14	"	-0.14900, -0.05000
1-2	선로조류전력(P, Q)	1.568278, -0.203914
1-5	"	0.755506, 0.035038
2-3	"	0.731859, 0.035653
2-4	"	0.561370, -0.022876
3-4	"	-0.233310, 0.028084
4-5	"	-0.612174, 0.156689
4-7	"	0.280863, -0.094208
4-9	"	0.160895, -0.003212
5-6	"	0.440624, 0.128241
6-11	"	0.073410, 0.034722
6-13	"	0.177399, 0.071709
7-8	"	0.000000, -0.169097
7-9	"	0.280863, 0.057972

제안된 알고리즘에 따라 우선 1단계로 WLAV 상태추정을 수행하고 정규화오차를 계산하였다. 그 결과, 정규화오차 중에서 큰 값( $\geq 2.3$ )을 가지는 측정값들을 표 2와 같이 구하였고, 이를 바탕으로 토폴로지 에러가 의심되는 선로들을 2장에서 설명한 규칙을 사용하여 결정하였다.

다음 단계에서 토폴로지 에러가 의심되는 선로들의 선로조류 에러를 새로운 상태변수로 포함시킨 후, 다시 상태추정을 수행하였고 그 결과 표 3과 같은 선로조류에러들을 구하였다. 선로조류에러 중에서 가장 큰 값을 가지는 선로가 토폴로지 에러가 발생한 선로이므로, 이 경우 정확하게 실제 토폴로지 에러가 발생한 선로를 판별하였다.

표 2 모의실험 1의 1단계 상태추정에 의해 구해진 정규화 오차

Table 2 Normalized residuals of the first stage state estimation in simulation case 1

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

표 3 토폴로지 에러가 의심되는 선로들의 선로조류 에러 추정값

Table 3 Estimated branch flow errors for the suspected branches

선 로	$ df $
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

3.2 모의실험 2: 단일 토폴로지 에러 발생, 측정에러 동시 발생 경우

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

다음 단계에서 토폴로지 에러가 의심되는 선로들을 포함한 상태추정을 수행하였고, 그 결과로 구해진 선로조류에러값을 표 5에 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 4 모의실험 2의 1단계 상태추정에 의해 구해진 정규화 오차

Table 4 Normalized residuals of the first stage state estimation in simulation case 2

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

표 5 토폴로지 에러가 의심되는 선로들의 선로조류 에러 추정값

Table 5 Estimated branch flow errors for the suspected branches

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

3.3 모의실험 3: 다중 토폴로지 에러의 경우

모의실험 1에서 고려했던 선로 2-5외에 선로 3-4에도 토폴로지 에러가 발생한 경우를 상정하여 다중 토폴로지 에러에 대한 알고리즘의 적용성을 살펴 보았다. 두 개의 선로가 정상적으로 운전 중인 것으로 가정하여 잘못된 계통 상태 데이터를 이용하여 상태추정을 수행하였다. 그 결과 표 6과 같은 정규화 오차가 계산되었으며, 그에 따라 표 7과 같이 토폴로지 에러가 확인되었다. 표에서 볼 수 있는 것처럼 토폴로지 에러를 포함한 두 개의 선로 중에서 선로 2-5가 가장 큰 에러를 보이고 있으며, 이 단계에서 선로 3-4는 아직 토폴로지 에러가 확인되지 않고 있다.

다음 단계로, 토폴로지 에러가 확인된 2-5를 제외하고 전체 과정을 다시 반복하였으며, 그 결과를 표 8과 9에 정리하였다. 표 9에 나타난 토폴로지 에러 추정 결과를 보면, 실제 에러가 발생한 선로 3-4 대신 선로 2-3에 토폴로지 에러가 발생한 것으로 결정되었다. 이것은 선로 2-3과 3-4가 critical pair이기 때문에 발생하는 것으로, 이러한 경우에 개발된 프로그램은 둘 중 하나의 선로를 토폴로지 에러가 발생한 선로로 판별하게 된다. 이러한 경우를 흔히 판별할 수 없는 선로 에러(unidentifiable branch error)라고 하며, 현재까지는 이러한 에러를 판별할 수 있는 알고리즘은 개발되지 않고 있다.

표 6 모의실험 3의 1단계 상태추정에 의해 구해진 정규화 오차

Table 6 Normalized residuals of the first stage state estimation in simulation case 3

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

표 7 토폴로지 에러가 의심되는 선로들의 선로조류 에러 추정값

Table 7 Estimated branch flow errors for the suspected branches

선로	$ Δf $
2 - 5	0.558
2 - 4	0.015
2 - 3	0.422
3 - 4	0.000
1 - 2	0.000
4 - 5	0.000

표 8 모의실험 3에서 선로 2-5를 제거한 후 1단계 상태추정에 의해 구해진 정규화 오차

Table 8 Normalized residuals of the first stage state estimation in simulation case 3 after eliminating the branch 2-5

측정값	$ r_N $
3번 모선의 주입전력	16.1
4번 모선의 주입전력	8.8
5번 모선의 주입전력	1.5
선로 2-4의 조류전력	1.2

표 9 선로 2-5를 제거한 후 토폴로지 에러가 의심되는 선로들의 선로조류 에러 추정값

Table 9 Estimated branch flow errors for the suspected branches after eliminating the branch 2-5

선로	$ Δf $
3 - 4	0.000
2 - 3	0.376
4 - 9	0.021
2 - 4	0.015
4 - 7	0.000
4 - 5	0.000

#### 4. 결론

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

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(981-0901-005-1) 지원으로 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- [1] L. Holten, 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] F. Schweppe and J. Wildes, "Power System Static State Estimation, Part I: Exact Model," IEEE Trans. on Power Appar. & Syst., Vol. PAS-89, No. 1, pp. 120-125, 1970.
- [4] A. Abur and M. Celik, "A Fast Algorithm for the Weighted Least Absolute Value State Estimation,"

IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, pp. 1-8, Feb. 1992.

[5] A. Monticelli and A. Garcia, "Fast Decoupled State Estimator," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, No. 2, pp. 556-564, 1990.

[6] A. Abur, "A Bad Data Identification Method for Linear Programming State Estimation, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, pp. 894-901, 1990.

[7] 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.

[8] H. Koglin and H. Neisius, "Treatment of Topological Errors in Substations," Proc. of 10th PSCC, Graz, Austria, pp. 1045-1053, 1990.

[9] 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.

[10] F. Wu and W. Liu, "Detection of Topological Errors by State Estimation," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 4, pp. 176-183, 1989.

[11] 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.

[12] B. Clewer, M. Sterling and M. Irving, "Topologically Independent State Estimation," Proc. of IFAC Symposium on Power Systems, Modeling and Control Applications, Brussels, 1988.

[13] M. Irving and M. Sterling, "Substation Data Validation," IEE Proceedings part (c), Vol. 129, No. 3, pp. 119-122, 1982.

[14] K. Clements and A. Costa, "Topology Error Identification Using Normalized Lagrange Multipliers," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, No. 2, pp. 347-353, 1998.

[15] L. Mili, G. Steeno, F. Dobraca, and D. French, "A Robust Estimation Method for Topology Error Identification," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 14, No. 4, pp. 1469-1476, 1999.

[16] Y. M. Park, Y. H. Moon, J. B. Choo, and T. W. Kwon, "Design of Reliable Measurement System for State Estimation," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 3, pp. 830-836, 1988.

[17] I. Barrodale and F. Roberts, "An Improved Algorithm for Discrete  $\ell_1$  Linear Approximation," SIAM Journal on Numerical Analysis, Vol. 10, No. 5, pp. 839-848, 1973.

[18] 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.

[19] D. Luenberger, Linear and Nonlinear Programming,

Addison and Wesley Publishing Co., 1984.

[20] J. Arrillaga and B. Harker, "Fast-Decoupled Three-Phase Load Flow," Proc. of IEE, 125(8), pp. 734-740, 1978.

[21] K. Birt, et al., "Three Phase Load Flow Program," IEEE Trans. on Power Appar. & Syst., Vol. PAS-95, No. 1, pp. 59-65, 1976.

[22] V. Brandwajn, et al., "Matrix Representation of Three-Phase N-Winding Transformers for Steady-State and Transient Studies," IEEE Trans. on Power Appar. & Syst., Vol. PAS-101, No. 6, pp. 1369-1378, 1982.

[23] M. Chen and W. Dillon, "Power System Modeling," Proc. of the IEEE, Vol. 62, No. 7, pp. 901-915, 1974.

[24] W. Tinney, et al., "Sparse Vector Method," IEEE Trans. on Power Appar. & Syst., Vol. PAS-104, pp. 295-301, 1985.

저 자 소 개



김 홍 래 (金 鴻 來)

1963년 10월 9일생. 1986년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 Texas A&M 대학교 전기공학과 졸업(공학박). 1995년~ 현재 순천향대 공대 정보기술공학부 조교수

Tel : 0418-530-1336

E-mail : hongkim@sch.ac.kr



송 경 빈 (宋 敬 彬)

1963년 9월 15일생. 1986년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 Texas A&M 대학교 전기공학과 졸업(공학박). 1995년~1996년 LG-EDS Systems 전문과장. 1996년~1998년 한전 전력연구원 선임연구원. 1998년~2000년 대구효성가톨릭대 자동차공학부 전임강사. 2000년~ 현재 계명대 전자공학과 전임강사

Tel : 053-580-5926

E-mail : kbsong@kmu.ac.kr