

트리전압해석에 의한 가관측지역 판정

Observable Island Identification by Tree
Voltage Analysis

이 태 식* 연 세 대 학 교
이 근 준 한 전 기 술 연 구 원
문 영 현 연 세 대 학 교

1. 서 론

가관측가능(Observable)이란, 상태추정(state estimation)시 고려되어야 하는 모든 계통의 상태를 결정할 수 있는 것을 말한다. 가관측성은 측정점의 갯수와 그 독립성에 의하여 결정되며 이것은 측정미터의 기하학적 배치와 직접적인 관련이 있다.

가관측성 해석방법은 가관측성의 수치해석법과 위상학적 가관측성 해석법⁽¹⁾으로 나누어진다. 수치적 가관측성은 측정방정식의 자코비안(Jacobian) 행렬의 계수(rank)를 계산하거나 정보행렬의 행렬식을 계산함으로써 가관측성은 판정한다.

가관측성의 위상학적 해석방법은 측정시스템의 위상학적인 상태에 따라 측정방정식군의 독립방정식 수를 유추하는 방법이다.

전력계통의 측정시스템은 항상 관측가능하게 설계되어 있으나 일시적인 계통 구조변경이나 측정 데이터 유실 등으로 인해서 계통이 관측불가능하게 될수도 있다. 이러한 경우에도 계통의 일부는 상태추정이 가능할 수 있으며 그 가능한 지역을 가관측 지역⁽²⁾이라 한다.

본 논문에서는 위상학적인 가관측성을 고려하기 위해서 직류 조류 계산법에서의 선로조류를 전류에 모션전압의 위상각을 전압에 대응시켜 모션에서의 전력 평형조건이 키르히호프 전류법칙에 또 위상각에 대한 페로방정식이 전압에 대한 페로방정식에 대응된다는 점에 착안하여 가관측성을

계통의 전압, 전류관계로 해석하였다.⁽³⁾

2. 트리전압에 의한 가관측성 해석

P-θ 모델에 대한 가관측성 해석은 위상각 θ를 전압 V에 그리고 유효전력 P를 전류 I에 대응시킴으로써 가관측성을 유추해석하는 방법을 사용한다.⁽⁵⁾

측정된 모션전류를 I_{B1}, 측정되지 않은 미지의 모션 전류를 I_{B2}라 하면,

$$\begin{bmatrix} I_{B1} \\ I_{B2} \end{bmatrix} = [Y_{BUS}] \underline{V}_B \dots\dots\dots (1)$$

단, \underline{V}_B ; 모션전압

또한 선로전류중 측정된 선로전류를 I_{e1}, 측정되지 않은 미지의 선로전류를 I_{e2}라 하면,

$$\begin{bmatrix} I_{e1} \\ I_{e2} \end{bmatrix} = [y] \underline{V}_e = [y] A^T \underline{V}_B$$

$$= \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ \vdots & \vdots \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11}^T & A_{21}^T \\ \vdots & \vdots \\ A_{12}^T & A_{22}^T \end{bmatrix} \underline{V}_B \dots\dots (2)$$

단, y : 원시 어드미턴스 행렬
A : 접속행렬

또, $I_B = A I_e$ 이므로,

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \underline{I}_{B1} \\ \underline{I}_{B2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{21} \end{bmatrix} \underline{I}_{e1} + \begin{bmatrix} A_{12} \\ A_{22} \end{bmatrix} \underline{I}_{e2} \\ &= \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{21} \end{bmatrix} \underline{I}_{e1} + \begin{bmatrix} A_{12} \\ A_{22} \end{bmatrix} \{ y_{21} A_{11}^T + y_{22} A_{12}^T : \\ &\quad y_{21} A_{21}^T + y_{22} A_{22}^T \} \underline{V}_B \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

식 (3)에서 \underline{I}_{B1} 에 관한 식과, 식 (2)에서 \underline{I}_{e1} 에 관한 식을 연립하여 하나로 쓰고 위상학적 가관측성을 고려하기 위해서 원시 어드미턴스 행렬 y 를 단위행렬로 놓으면 다음을 얻는다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \underline{I}_{e1} \\ \underline{I}_{B1} - A_{11} \underline{I}_{e1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{11}^T & A_{21}^T \\ A_{12} A_{11}^T & A_{12} A_{21}^T \end{bmatrix} \underline{V}_B \dots\dots\dots(4) \\ &= \begin{bmatrix} I & O \\ O & A_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11}^T & A_{21}^T \\ A_{12}^T & A_{22}^T \end{bmatrix} \underline{V}_B \end{aligned}$$

한편, 가지전압 \underline{V}_e 를 트리가지 전압과 링크 전압으로 나타내면 다음 관계가 있다.

$$B \underline{V}_e = [I : B_{12}] \begin{bmatrix} \underline{V}_l \\ \underline{V}_t \end{bmatrix} = 0 \dots\dots\dots(5)$$

단, B ; 기본메로행렬
따라서 링크전압 \underline{V}_l 은

$$\begin{aligned} \underline{V}_l &= -B_{12} \underline{V}_t \dots\dots\dots(6) \\ \underline{V}_e &= A^T \underline{V}_B \text{ 이므로 식 (6)을 식 (4)에 대입하면} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \underline{I}_{e1} \\ \underline{I}_{B1} - A_{11} \underline{I}_{e1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & O \\ O & A_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I} \\ -B_{12} \end{bmatrix} \underline{V}_t \\ = M_t \underline{V}_t \end{aligned}$$

행렬 M_t 의 계수가 $n-1$ 이 되면 가관측하고 그 미만이면 관측불능이라 할 수 있다. 이때 행렬 M_t 의 계수는 가우스 소거법으로써 구할 수 있다. M_t 가 접속행렬로 구성되어 있고 모두 정수 성분을 가지고 있으므로 정수 프로그램을 사용해서 계산을 명확히 할 수 있다.

3. 트리결정방법

주어진 선로와 모선에 관한 정보로써 트리를

결정하는 방법이다. 이때, 모든 모선을 포함하며 트리가지의 수는 부스수보다 한개가 적으면 완전한 트리 (Full tree) 가 된다.

모선에 번호를 부여하면서 번호중 작은 수를 택한다. 이 번호는 트리가 결정되어 나감에 따라 그 선로의 번호에 관계없이 결정순서인 번호를 그 선로의 양단모선에 부여하는 방식이다. 선택하고자 하는 모선에, 앞서 택하여 트리로 되어서 번호가 들어 있으면, 이전 번호와 지금의 번호를 비교하여 작은 수를 택한다. 만일 이때에 두 모선의 번호가 이전의 번호와 모두 일치하면 이는 폐로를 형성하는 것이 된다. 따라서 무관측정치가 있으면 이를 제거하고서 다시 계속 수행을 한다.

트리를 정하는 순서에는 선로측정치가 있는 것, 모선측정치가 있는 것, 모선 측정치가 없는 것의 순서로 행한다.

4. 병합가능에 관한 정리

정의

두개의 모선 i, j 가 하나의 가관측지역내에 포함될 수 있으면 모선 i, j 는 병합가능 (mergeable) 하다고 한다. 그리고 두개의 모선 i, j 가 하나의 가관측지역내에 포함될 수 없으면 모선 i, j 는 병합불가능 (immergeable) 하다고 한다.

정리 1

두 모선 i, j 를 선로 k 가 연결하고 있다고 하자. 모든 측정치가 영이라는 가정하에서 선로 k 에 가해지는 전압 V_k 가 반드시 영이어야 한다면 모선 i 와 j 는 병합가능 (mergeable) 하다. 만약 V_k 가 부정 (indefinite) 으로 영이 아닌 값을 취할 수 있으면 모선 i, j 는 병합불가능 (immergeable) 하다.

정리 2

모선 i 와 j 가 병합가능 (mergeable) 하고 모선 j 와 k 가 병합가능 (mergeable) 하다면 모선 i 와 k 도 역시 병합가능 (mergeable) 하다.

여기서 유의할 것은 모선 i 와 j 그리고 모선 j 와 k 가 병합불가능 (immergeable) 하다고 할지라도 모선 i 와 k 가 병합불가능 (immergeable) 하다고 할 수 없다는 점이다.

5. 알고리즘

트리전압해석에 의한 가관측지역판정 알고리즘은 다음과 같다.

- (1) 측정된 선로로서 이루어지는 모든 폐로에서 하나의 선로측정미터를 제거함으로써 측정된 선로에 의한 폐로를 제거한다. 모선과 선로 순서를 재배치하고 분할된 접속행렬을 구성한다.
- (2) 측정미터가 설치된 모든 선로를 포함할 수 있도록 적당한 트리를 선정한다. 그리고 모든 부스를 포함하는 초기부스 그룹 G_0 를 선정한다.
- (3) 기본컷셋행렬 (fundamental cutset matrix)에 대한 부분행렬 Q_{f11} 을 계산하고 트리 측정행렬 (tree measurement matrix)인 M_t 를 구성한다. 단, Q_{f11} 은 다음식으로 계산된다.

$$Q_{f11} = -B_{f12}^T = A_2^{-1} A_1$$

단, $A = [A_1 : A_2]$
 링크수 트리수

- (4) 트리가지 전압중 정해지지 않은 가지전압을 모음으로써 축소된 트리전압벡터 (reduced tree voltage vector) \hat{V}_t 를 구성한다. 그리고 트리측정행렬 M_t 의 열 중에서 전압이 영인 트리가지에 해당하는 열을 제거함으로써 축소된 트리측정행렬 \hat{M}_t 를 구성하라.
- (5) 방정식 $\hat{M}_t^T \hat{M}_t \hat{V}_t = 0$ 를 정수 가우스 소거법에 의하여 풀어낸다. 여기서 영주축 (zero-pivot)이 생길 때마다, 이에 해당하는 트리가지 전압을 1로 지정한다.
- (6) 트리가지전압이 영인 선로에 의하여 연결되는 모선그룹을 하나의 모선그룹으로 병합시킴으로써 모선그룹핑 (Bus grouping)을

행하라. 각 모선그룹은 하나의 가관측지역을 형성한다.(그러나 이들 가관측지역은 최대 가관측지역이 아니다.)

- (7) 정리1 및 정리2를 사용하여 병합가능표 (mergeable table)을 구성한다. 병합가능성 (mergeability)이 결정되지 않은 모선그룹이 존재하는가? 만약 존재하지 않으면 (10)번 단계로 간다.
- (8) 병합가능표를 사용하여 무관측정치 (irrelevant measurement)를 제거하고 트리측정행렬 M_t 를 수정하라. (병합불가능한 모선그룹 (immergeable bus group)을 연결하는 선로의 양단모선에서의 측정치는 (irrelevant measurement)이다.)
- (9) 병합가능성 (mergeability)이 결정되지 않은 모선그룹을 연결하는 선로를 트리에 우선적으로 포함시킴으로써 적당한 트리를 선정하고 (4)번으로 간다.
- (10) 모선그룹을 출력하고 계산을 중단한다.(각 모선그룹은 최대 가관측지역을 형성한다.)

6. 결 론

본 연구에서 개발된 알고리즘을 이용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 위상학적 가관측성해석을 위한 트리행렬을 사용한 새로운 해석방법이 제시되었다.
- (2) 트리행렬을 사용한 가관측지역 (observable island) 판정법이 개발되었으며 모선그룹핑 (Bus grouping)에 의한 방법을 적용함으로써 계산시간의 절감을 기할 수 있었다.
- (3) 가관측성 회복을 위한 최소의 측정장치를 찾아내는 알고리즘을 개발하였으며 종래의 방법에 비하여 계산효율을 현저히 증가시켰다.
- (4) 임의로 트리를 구성하는 효율적인 방법을 제시하였다.

【참고문헌】

1. Krumpolz G.R., K.A. Clements and P.W. Davis, "Power System Observability : A Practical Algorithm Using Network Topology," IEEE Trans, Vol. PAS-99, No. 4, pp. 1534-1542, July/Aug. 1980.
2. Horisberger H.P., "Observability analysis for power systems with measurement deficiencies," Proc. of the IFAC Symp., pp. 51-58, Summer 1985.
3. Van Custem Th. "Power system observability and related functions : Derivation of appropriate strategies and algorithms," Journal of E. P. E. S., Received : 10 April 1984.
4. Bargiela A., M. R. Irving and M. J. H. Sterling, "Observability Determination in Power System State Estimation using a Network flow technique," IEEE/PES Summer meeting, 85-SM 474-2, Summer 1985.
5. 김석주, 문영현, 박영문, "전력계통의 가관측성 판정에 관한 연구," 대한전기학회 전력계통연구회 학술연구발표회 논문집, 제 20 회, pp. 37-39, 1986년 5월.