

이 응 혁\* 꺾 노 흥 본 영 현  
연 세 대 학 교 전 기 공 학 과

Reliability Analysis of Measurement System by Observability  
Identification technique

Lee Eung Hyuk\* Kwak No Hong Moon Young Hyun  
Yonsei Univ. Dept. of Electrical Eng.

ABSTRACT

This paper deals with the topological observability analysis and the derivation of a reliability evaluation formula of a measurement system for state estimation.

An analogy of the DC power flow method to the DC circuit analysis is introduced, and all the relationship between power flows and phase angles are replaced by the corresponding current-voltage relation. As a result, a set of topological measurement equation expressed in the form of the incidence matrix is derived for the topological analysis, and the observability test is carried out by examining the rank of the measurement matrix.

The reliability evaluation formula was derived experimentally by testing the observability of sample systems of IBBE-14, IEEB-30, IEEB-57.

1. 서론

가관측성에 관한 연구는 주어진 측정데이터를 사용하여 계통의 상태파악이 가능한지를 조사하는 것이며, 가관측성은 측정점의 수와 그 독립성에 의하여 결정된다.

전력계통의 시스템은 항상 가관측하게 설계되어 있으나 일시적인 계통의 구조변경이나 측정데이터의 유실 등으로 계통이 관측불가능하게 될 수도 있다. 이러한 경우에도 계통의 일부본은 상태추정이 가능할 수 있으며 그 가능한 지역을 가관측지역

이라 한다.

가관측성 해석은 Clements [1] 등에 의해서 체계화되었다. 이들의 알고리즘은 만약 계통이 가관측하면 적어도 하나의 가관측한 트리(observable spanning tree)가 존재한다는 것에 근거를 두고 있다. 그러나 이 알고리즘은 조사해야 할 트리의 수가 너무 많기 때문에 복잡하고 많은 계산시간이 소요된다.

한편, Wu [2,3] 등은 상태추정시 반복계산의 이득행렬을 삼각인수화해서 해석하는 방법을 제시한 바 있고, Horrisberger [4]는 가관측성 결정트리(observability decision tree)를 이용하여 가관측 지역을 확장해 나가는 알고리즘을 제시하였다.

본 논문에서는 직류조류계산법에서의 전력을 전류에 위상각을 전압에 대응시켜 가관측성 해석을 계통의 전압, 전류 관계로 해석하고자 하며 온 라인(on-line) 적용을 위하여 간단하고도 효과적인 알고리즘을 제시하고자 한다. 또한, 대규모 계통적용을 위하여 일차원배열기법을 사용하여 컴퓨터의 소요기억용량과 계산시간을 절감하였다.

측정시스템의 신뢰도는 수집된 데이터로부터 계통의 상태파악이 가능한 확률로 정의할 수 있으며 가관측성판정 알고리즘을 샘플시스템에 적용하여 얻은 데이터를 통하여 대략적인 측정시스템의 신뢰도식을 유도하고자 한다.

2. 가관측성에 대한 고찰

본 논문에서는 직류 조류계산법에서의 선로 조류불 전류에 모선전압의 위상각을 전압에 대응시키면 모선에서의 전력평형조건이 키르히호프의 전류 법칙에 대응하고 위상각에 대한 페로 방정식이 전압

에 대한 페로방정식에 대응된다는 점에 착안하여 가관측성을 계통의 전압, 전류관계로 해석하고자 하며 그 결과에 의거 위상학적 가관측성(topological observability) 해석 방법을 유도하고자 한다. 가관측성 판정을 위한 측정행렬  $M_{\theta}$  를 구성하면 다음과 같다. (참고문헌 5참조)

$$M = \begin{pmatrix} A_{11}^T & \dots & A_{1n}^T \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m1}^T & \dots & A_{mn}^T \end{pmatrix} \quad (1)$$

따라서 n-모선 계통에 대한 측정시스템은 식 (1)의 행렬  $M_{\theta}$ 의 rank가 n-1이 되면 가관측하고 그 미만이면 관측불능이라 할 수 있다. 여기서 행렬의 rank는 가우스소거법으로써 간단하게 구할 수 있다. 그러나 행렬  $M_{\theta}$ 는 접속행렬로 구성되어 있기 때문에 모두 정수 성분만을 가지고 있으므로 정수 프로그램을 사용하여 계산의 정확도를 증가시킬 수 있다.

3. 측정시스템의 신뢰도 계산

측정시스템은 계통의 상태파악을 위해 필요한 데이터를 계속하는 측정계기들과 측정된 데이터를 처리하여 전송하는 통신설비 원격소단말장치 등과 이들을 감시제어하는 중앙제어 컴퓨터로 정의한다. 한편, 측정시스템의 신뢰도는 수집된 데이터로부터 계통의 상태파악이 가능한 확률로 정의할 수 있다. 측정시스템은 원래 가관측하게 설계되어 있으나 측정계기의 고장및 통신 설비의 고장등으로 인하여 정보를 유실하는 경우 계통은 관측불능의 상태가 될 수도있다. 이때 계통의 가관측한 정도로서 측정시스템의 신뢰도를 구할 수 있다.

K.A Clement, G.R. Krumpholz [6] 등은 측정상태 열거알고리즘(measurement state enumeration algorithm) 을 제시하였는데 이는 상태트리(state tree traversal) 를 구성하고 각 상태별로 가관측성을 판정하여 가관측한 확률로서 신뢰도를 계산하는 방법이다. 그러나, 이 알고리즘은 계통이 커질 경우 과도한 측정상태가 존재하여 계산 부담이 급격히 증가하여 대규모계통 적용에는 적합하지 않게된다. 대규모계통의 측정시스템 신뢰도를 정확하게 구한다는 것은 불가능하기때문에 본 고찰에서는 근사적인 신뢰도 계산 방법을 연구하였다. 본 연구를 위해서는 다음의 사항들을 고려해야 한다.

- (1) 상태추정을 수행하는 경우 고려할 점은 다음과 같다.
  - a. n 개의 RTU가 설치된 경우, n 개의 RTU로부터 정보가 중앙제어소에 도달하는 경우
  - b. n 개의 RTU중 어느 한개의 RTU 정보가 중앙제어소에 도달 하지않는 경우
  - c. 계통에 있어 인접하고 있지 않는 두개의 RTU 로 부터 동시에 정보가 중앙제어소에 도달하지 않는 경우

이 경우 충분한 여유도가 보장되면 a,b항의 경우는 항상 가관측하게되고 c항의 경우는 인접하지 않은 경우는 대체로 가관측하게되고 인접한 경우는 대체로 관측불능의 상태가 되며 인접 RTU 세계의 동시 고장 경우는 그 경우의 수가 극히 적으므로 여기서는 고려하지 않는다.

- (2) 각각의 RTU 와 중앙제어소 사이에는 단일 정보전송로가 존재하고 그들 사이에 발생하는 고장은 상관관계가 없다.
- (3) 계통의 구성과 RTU사이의 인접관계는 기지의 사실이다.

위의 고려사항을 확률로서 처리하여 전체적인 신뢰도식을 유도하면, 신뢰도 U는 다음과 같이 표시된다.

$$U = P_0 \left( \prod_{i=1}^n P_{oi} + \sum_{j=1}^n (1-P_{oi}) \left( \prod_{i=1}^n P_{ji} \right) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (1-P_{oi}) (1-P_{ji}) \left( \prod_{k=1}^n P_{ki} \right) \right) * 100$$

위에서 구한 신뢰도 계산식 U를 대규모 계통에 적용할 경우 계통이 복잡하여 모든 경우의 확률을 다 고려할 수 없으므로 대규모계통의 적용시에는 각 RTU가 건전할 확률은 모두 같다고 가정한다. 또한 인접한 두 RTU 고장시에도 항상 관측 불능의 경우만 발생하는 것은 아니며, 인접하지 않은 경우 두 RTU 고장시에도 관측불능의 경우도 존재하므로 이를, 가관측성 판정데이터를 이용하여 확률적인 근사식으로 표시하였다. 또한 인접하지 않은 RTU의 고장발생의 임의성을 강조하기 위하여 랜덤수를 발생시켜 처리하였다.  $k_1$ 는 랜덤수 발생에 의한 임의의 인접하지 않은 두 RTU 고장시 가관측할 확률을 나타내고,  $k_2$ 는 인접한 두 RTU 고장시 관측불능의 확률을 나타낸다.  $k_1$  과  $k_2$  를 계통의 크기 와 RTU 수와의 관계를 이용하여 나타내면 다음과 같다.

1

$$k_1 = \frac{1}{1 + (1 - (n/N)^2)^{0.5}}$$

$$k_2 = 1 - \sqrt{n/N} * ((n-0.5)(n-1)/n^2)$$

(N 은 계통의 크기를 표시한다)

계통의 각 RTU 상호 인접관계는 K 로 표시한다.

$$K = \frac{\text{인접 RTU 수}}{n(n-1)}$$

이를 대입하여 신뢰도식 U를 표시하면 다음과 같다.

$$U = P_0 (P^n + n(1-P)P^{n-1} + 0.5n(n-1)(k_1 - k_2 k_2)(1-P)^2 P^{n-2})^{0.5}$$

여기서  $k_1, k_2$ 를 구하기 위하여 샘플계통을 통해 얻은 실험값들을 도표로 표시하면 다음과 같다. 여기서 두 RTU의 인접관계는 인접한 두 RTU와 인접하지 않은 두 RTU의 경우로 나누어 가관측성 판정을 하였으며 인접하지 않은 경우는 임의의 사고발생을 고려하여 랜덤수를 발생시켜 사용하였다.

표1.14모선의 가관측성 판정 데이터

RTU수	14	12	10	8	6
인접RTU 2쌍시 관측불능일 확률	0.050	0.063	0.122	0.429	0.600
임의의 두 RTU 2쌍시 가관측 확률	1	1	0.998	0.933	0.921

표2.30모선의 가관측성 판정 데이터

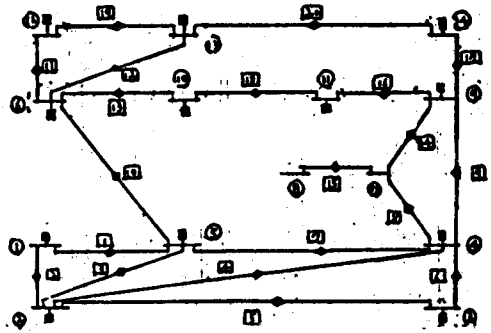
	30	27	21	18	15
인접RTU 2쌍시 관측불능일 확률	0.050	0.086	0.080	0.150	0.186
임의의 두 RTU 2쌍시 가관측 확률	1	1	0.985	0.998	0.982

표3. 57모선의 가관측성 판정 데이터

RTU수	57	52	47	42	37
인접RTU 2쌍시 관측불능일 확률	0.013	0.031	0.098	0.114	0.156
임의의 두 RTU 2쌍시 가관측 확률	1	1	1	1	0.984

5. 적용사례

14-모선 계통의 측정계기 및 RTU 설치위치가 그림2와 같을때 가관측성판정 및 신뢰도계산 결과는 다음과 같다.



○ : 전압계  
□ : 전류계  
△ : 전력계  
그림 2. 14-모선계통

행렬  $M_{11}$ 의 계수(rank)를 판정하면 13이 되므로 가관측하게되며, 이 샘플계통의 신뢰도를 계산하면 다음과 같다.

이때  $P = 0.995, P = 0.9995$  로 가정한다.

30-모선 및 57-모선계통에서 측정계기가 모든 모선 및 모든 선로에 설치되어있는 경우 앞에서 구한 신뢰도계산식을 사용하여 대략적인 신뢰도를 계산하면 다음표와 같다.

표4. 샘플계통의 신뢰도

계통크기	14	30	57
$k_1$	0.220	0.094	0.049
$k_2$	1	1	1
$k_3$	0.108	0.048	0.052
U (%)	99.4	99.8	99.8

6. 결론

본 논문에서 제시한 가관측성 판정 알고리즘 및 이 결과로부터 얻은 데이터들 통하여 대략적인 신뢰도를 계산하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 계통의 가관측성을 판정하기 위하여 본 논문에서는 위상학적인 해석 방법을 사용하였으며, 측정행렬의 계수를 판정함으로써 가관측성을 판정하였다.

2) 대규모 계통적응을 위하여 접속행렬을 이용한 효과적인 알고리즘을 개발하였으며, 일차원 배열 기법을 도입하여 대규모 계통 적응의 문제점을 해결하였다.

3) 가관측판정의 결과를 통하여 대략적인 측정시스템의 신뢰도를 계산하였으며, 측정시스템의 설계시 신뢰도 고려방향에 이용될 수 있다.

5. 참고 문헌

1. K. A. Clements, G. R. Krumpholz and P. W. Davis, "Power System Observability: A Practical Algorithm Using Network Topology", IEEE, Trans. PAS., Vol. PAS-99, No. 4, 1980.
2. A. Monticelli and F. F. Wu, "Network Observability: Theory", IEEE Trans. PAS., Vol. PAS-104, No. 5, 1985
3. A. Monticelli and F. F. Wu, "Network Observability: Identification of Observable Islands and Measurement Placement" IEEE, Trans. PAS., Vol. PAS-104, No. 5, 1985
4. H. P. Horrisberger, "Observability Analysis for Power Systems with Measurement Deficiencies", IFAC Electric Energy Systems, Rio De Janeiro, Brazil, 1985.
5. Young-Hyun Moon, "Observable Island Identification for State Estimation Using Incidence Matrix", IFAC Beijing, 1986
6. K.A. Clement, G.R. Krumpholz, P.W. Davis "State Estimator Measurement System Reliability Evaluation — An Efficient Algorithm based on Topological Observability Theory", IEEE Trans. PAS., Vol. PAS-101, No. 4 1982
7. 전력중앙연구소(일본), "전력중앙연구보고서".  
참조보고:102