

전력시스템 고조파 상태 추정에 관한 연구

박희철, 이정필, 왕응필, 정형환
 동아대학교 전기전자컴퓨터 공학부 전력시스템 연구실

Harmonic State Estimation in Power System

H.C. Park, J.P. Lee, Y.P. Wang, H.H. Chong
 Electrical Power System Research, Dong-a University

Abstract - Electrical power system has very complexity problem that it is plan measurement system to achieve Harmonic State Estimation (HSE). This complexity problem depends on discord of necessary accuracy, certainty of noise that exist in data communication damage and converter, adaptability of network modification and minimum of expense size of system, estimated monitoring. Also, quantity of available measurement equipment for harmonic measurement has been limited. Therefore, systematic method that choose measurement location for harmonic state estimation.

This paper is that see proposed HSE that use Observability Analysis(OA) for harmonic state estimation of electrical power system. OA depends on measurement number, measurement location and measurement form here, it is analysis method that depend on network form and admittance of the system.

OA used achieve harmonic state estimation that it is Applied to New Zealand electrical power system to prove validity of HSE algorithm that propose. This study result about harmonic state estimation of electrical power system displayed very economical and effective method by OA.

1. 서론

전력시스템에서 고조파 상태 추정(Harmonic State Estimation : HSE)은 모선과 선로의 부분 혹은 전체를 선택하여 고조파를 측정함으로써 실제 시스템의 고조파 정보를 얻을 수 있는 효과적이고 경제적인 기법이다. 고조파 상태 추정과 기본 주파수 상태추정의 차이점은 측정의 형태와 회로망 해석에 있다. 기본 주파수에 의한 관측 가능한 해석은 이미 광범위하게 연구되고 있다.

전력시스템의 HSE를 수행하기 위하여 측정 시스템을 설계하는 것은 매우 복잡한 문제이다. 이런 복잡한 문제는 시스템의 크기, 측정기에 필요한 정확도의 불일치, 데이터 통신고장과 변환기에 존재하는 노이즈의 확실성, 네트워크 형태 변화의 적응성과 비용의 최소화에 의존한다. 또한 고조파 측정을 위한 사용 가능한 측정 장비의 수량은 제한되어

있다. 그러므로 고조파 상태 추정을 위한 측정위치를 선정하는 체계적인 방법이 필요로 하다.

따라서 본 논문에서는 전력시스템의 고조파 상태 추정을 위해 관측 가능한 해석(Observability Analysis : OA)을 이용한 HSE를 제안하였다. 여기서 OA는 측정 수, 측정 위치 및 측정 형태에 의존하고 또한 회로망 형태와 그 시스템의 어드미턴스에 의존하는 해석방법이다. 제안한 HSE알고리즘의 타당성을 입증하기 위해 뉴질랜드 전력시스템에 OA를 이용하여 고조파 상태 추정을 수행하였다. 본 연구 결과 전력시스템의 고조파 상태 추정에 있어서 OA 방법은 매우 경제적이고 효과적인 방법임을 나타내었다.

2. 관측 가능한 해석 방법

전력 시스템의 고조파 상태 추정을 위한 관측 가능한 해석 방법(Observability Analysis : OA)에는 수치적 방법, 위상적 방법, 및 기호화 방법으로 나눌 수 있다.

1) 수치적 방법은 행렬 삼각 분할법을 이용하여 전력시스템의 측정 행렬의 계수를 평가하는 것이다. 이 방법은 대규모 시스템에서 상태 추정 방정식을 표현하기 위하여 사용된다. 그러나 행렬의 불량조건과 유한 정밀 등차에 의한 수학적 오차가 발생한다. 이 삼각 분할법은 간단하지만 수치적으로 라운드 오프 오차를 발생한다.

2) 위상적 방법은 전력시스템에서 그래프이론을 사용하여 모선에 주입되는 정보를 이용하는 방법이다. 그러나 그 위상적 방법은 상태추정계산을 필요로 하지 않기 때문에 상당한 계산시간을 필요로 한다.

3) 기호화 방법은 전력시스템의 측정 행렬을 기호화하여 고조파 상태 추정을 수행하는 것이다. 관측 가능한 해석에 사용된 측정 행렬에 1 또는 0을 기입함으로써 측정 위치를 선정하는 것이다. 이 방법은 간단하고 계산시간이 단축될 수 있다. 또한 이 방법은 가 관측하는 방법이므로 측정 위치가 중복됨을 피할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 전력 시스템 고조파 추정을 위하여 기호화 방법을 토대로 한 관측 가능한 방법을 이용하고자 한다.

3. 부분적 관측 가능한 HSE

고조파 상태 추정에 있어서 고가인 고조파 측정 장비의 비용으로 인해 시스템의 전체를 추정 할 수 없다. 따라서 관측 가능한 위치를 선정하여 측정 시스템 행렬을 $[A]x=b$ 로 구성한다. 또한 A가 정칙행렬이 아닌 경우에는 특정치 분해(Singular Values Decomposition :SVD)를 이용한다. 이러한 과정을 통해 라운드 오프 오차가 발생한다면 널 공간 벡터를 이용하여 그 오차를 제거할 수 있다. 따라서 기호화한 방법을 이용한 관측 가능한 해석방법에는 널 공간 벡터를 포함하게 된다.

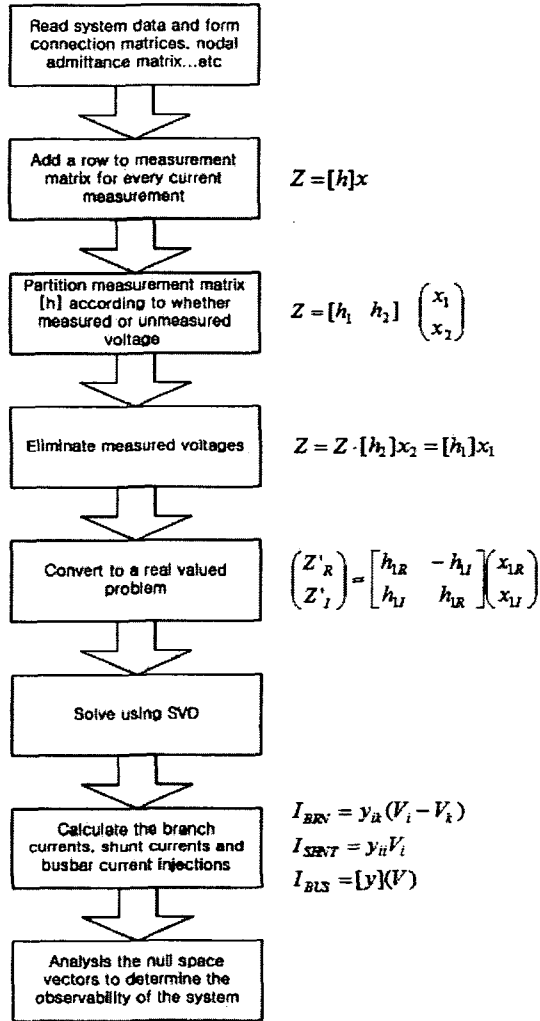


Fig.1 고조파 상태 추정 흐름도

전력시스템 고조파 추정을 위한 측정 방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z=[H]X+E \quad (1)$$

식(1)의 측정방정식을 변화하면 다음 방정식과 같다.

$$X=X_R+jX_I$$

$$Z=Z_R+Z_I$$

$$H=H_R+jH_I$$

$$E=E_R+jE_I$$

측정 방정식의 행렬이 비 정칙인 경우 고조파 추

정과정을 그림 1에 나타내었다. 여기서 SVD를 사용함에 있어 비 관측 시스템을 제거하여야 한다. 즉 미지의 값(u), 기지의 측정 값(k), 측정이 불필요한 전류 입력 추정(n)으로 분할하여 식 (2)와 같이 구성한다.

$$\begin{pmatrix} Y_{1u} & Y_{1k} \\ Y_{2u} & Y_{2k} \\ Y_{3u} & Y_{3k} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_u \\ V_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{bu} \\ I_{bk} \\ I_{bn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

식 (2)에서 최소 제곱법을 이용하여 I_{bu} 의 해를 식(3)에서 구할 수 있다.

$$I_{bu} = Y_{1u}Y_{2u}^{-1}I_{bk} + (Y_{1k} - Y_{1u}Y_{2u}^{-1}Y_{2k})V_k \quad (3)$$

여기서 Y_{2u}^{-1} 는 의사 역행렬이다.

4. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 논문에서 제안한 기호화한 관측 가능한 해석 방법을 적용하여 전력시스템 고조파 상태 추정을 위해 그림 2와 같은 3기 9모선 뉴질랜드 전력 시스템을 사용하였다. 또한 고조파 상태 추정을 위해 랜덤한 초기 측정 위치 중에 임의로 하나를 선정하여 그림 2에 나타내었다. 여기서 전압 측정 수는 4, 고조파 입력 전류 측정 수 5이다. SVD만을 수행한 경우와 SVD와 널 공간 벡터를 수행경우의 전압, 전류를 표 1, 2에 각각 나타내었다. 이상의 결과에서 SVD만을 수행한 경우에는 1, 2모선에 전압 오차가 발생하였고, 또한 1, 2, 5, 6 모선에서는 전류 오차가 발생하였다. 이 고조파 상태 추정 결과 라운드 오프 오차가 포함되어 있다. 따라서 전압 및 전류 오차를 현저히 감소시키기 위하여 널 공간 벡터를 수행하였다. 그 결과 전압 오차는 발생하지 않고, 단지 적은 전류오차만 발생하였다.

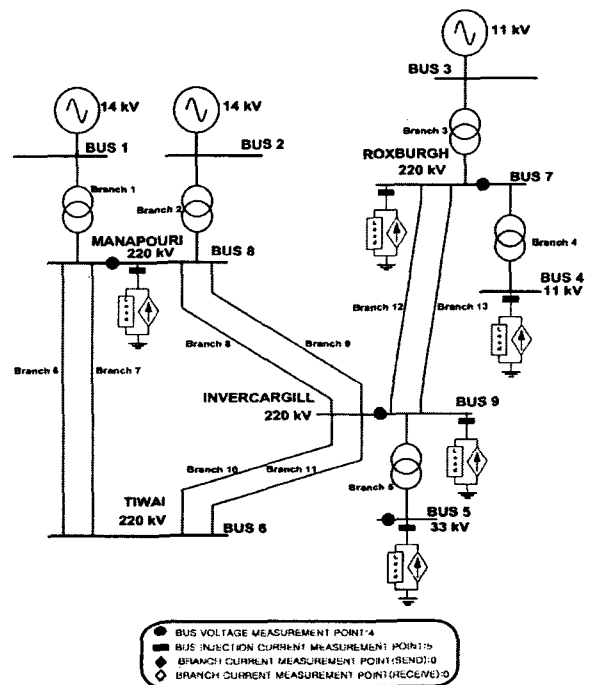


Fig. 2 초기의 측정위치

표 1. 전압 및 전류(SVD만을 수행한 경우)

Bus Voltage	Actual		Estimated		Error (%)
	Mag (P.U.)	Angle (Deg.)	Mag (P.U.)	Angle (Deg.)	
1 Bus	0.0050	27.1910	0.0050	27.1661	0.05
2 Bus	0.0050	27.1412	0.0050	27.1661	0.05
3 Bus	0.0050	26.1934	0.0050	26.1934	0.00
4 Bus	0.0050	26.8744	0.0050	26.8744	0.00
5 Bus	0.0050	28.0049	0.0050	28.0049	0.00
6 Bus	0.0050	27.5383	0.0050	27.5383	0.00
7 Bus	0.0050	26.8744	0.0050	26.8744	0.00
8 Bus	0.0050	27.2322	0.0050	27.2322	0.00
9 Bus	0.0050	27.3778	0.0050	27.3778	0.00
Injection Current	Actual		Estimated		Error (%)
	Mag (P.U.)	Angle (Deg.)	Mag (P.U.)	Angle (Deg.)	
1 Bus	0.0000	0.0000	0.0003	-126.2948	99.9900
2 Bus	0.0000	0.0000	0.0003	53.7574	99.9900
3 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5 Bus	0.0090	25.0000	0.0090	25.0002	0.0004
6 Bus	0.0050	10.0000	0.0050	10.0000	0.0017
7 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

표2. 전압 및 전류(널 공간 벡터를 포함한 SVD)

Bus Voltage	Actual		Estimated		Error (%)
	Mag (P.U.)	Angle (Deg.)	Mag (P.U.)	Angle (Deg.)	
1 Bus	0.0050	27.1910	0.0050	27.1910	0.00
2 Bus	0.0050	27.1412	0.0050	27.1412	0.00
3 Bus	0.0050	26.1934	0.0050	26.1934	0.00
4 Bus	0.0050	26.8744	0.0050	26.8744	0.00
5 Bus	0.0050	28.0049	0.0050	28.0049	0.00
6 Bus	0.0050	27.5383	0.0050	27.5383	0.00
7 Bus	0.0050	26.8744	0.0050	26.8744	0.00
8 Bus	0.0050	27.2322	0.0050	27.2322	0.00
9 Bus	0.0050	27.3778	0.0050	27.3778	0.00
Injection Current	Actual		Estimated		Error (%)
	Mag (P.U.)	Angle (Deg.)	Mag (P.U.)	Angle (Deg.)	
1 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5 Bus	0.0090	25.0000	0.0090	25.0002	0.0004
6 Bus	0.0050	10.0000	0.0050	10.0000	0.0017
7 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

다음은 전력시스템 고조파 상태 추정을 위한 최적 위치를 선정한 경우를 그림 3에 나타냈다. 여기서 전압 측정 수는 2, 고조파 입력 전류 측정 수 7이다. 이상에 측정 위치에는 SVD만을 수행하여도 전압, 전류의 오차가 발생하지 않았다. 그 결과를 표 3에 전압과 전류를 비교하여 나타내었다. 이상의 결과, 제안한 방법인 기호화 관측 가능한 해석

방법이 우수함을 알 수 있다.

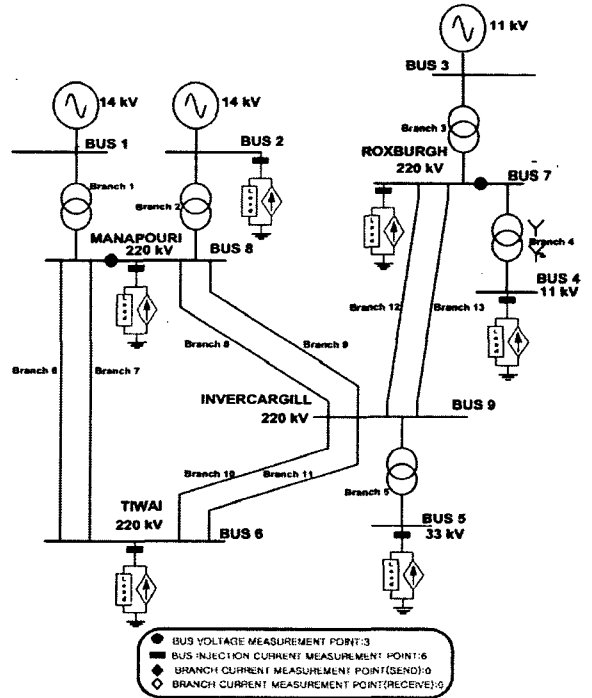


Fig.2 최적인 측정위치

표.3 전압 및 전류(SVD를 수행한 최적위치)

Bus Voltage	Actual		Estimated		Error (%)
	Mag (P.U.)	Angle (Deg.)	Mag (P.U.)	Angle (Deg.)	
1 Bus	0.0050	27.1910	0.0050	27.1910	0.00
2 Bus	0.0050	27.1412	0.0050	27.1412	0.00
3 Bus	0.0050	26.1934	0.0050	26.1934	0.00
4 Bus	0.0050	26.8744	0.0050	26.8744	0.00
5 Bus	0.0050	28.0049	0.0050	28.0049	0.00
6 Bus	0.0050	27.5383	0.0050	27.5383	0.00
7 Bus	0.0050	26.8744	0.0050	26.8744	0.00
8 Bus	0.0050	27.2322	0.0050	27.2322	0.00
9 Bus	0.0050	27.3778	0.0050	27.3778	0.00
Injection Current	Actual		Estimated		Error (%)
	Mag (P.U.)	Angle (Deg.)	Mag (P.U.)	Angle (Deg.)	
1 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5 Bus	0.0090	25.0000	0.0090	25.0002	0.0004
6 Bus	0.0050	10.0000	0.0050	9.9998	0.0003
7 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9 Bus	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

5. 결론

본 논문에서는 전력시스템의 고조파 상태 추정을 위해 관측 가능한 해석(Observability Analysis : OA)을 이용한 HSE를 제안하였다. 제안한 HSE알고리즘의 타당성을 입증하기 위해 뉴질랜드 전력시스템에 OA를 이용하여 고조파 상태 추정을 수행하였다. 본 연구결과는 다음과 같다.

1) 전력시스템의 고조파 상태 추정에 있어서 OA방법은 매우 경제적이고 효과적인 방법임을 나타내었다.

2) HSE알고리즘은 신뢰성 있는 고조파 상태추정을 했고 측정 장소를 최소화하는 결과를 보여주었다. 이로 인해 추정하기 위해 드는 비용도 최소화 할 수 있다.

향후 본 논문에서 제안한 방법을 수정하여 단상 및 삼상 전력시스템에 대한 고조파 상태 추정 및 최적화 기법을 이용한 최적 측정의 위치 선정에 관한 연구가 이루어질 것으로 사료된다.

6. 참고문헌

- [1] G.T. HEYDT, "Identification of harmonic sources by a state estimation technique", IEEE Trans, PWRD-4, (1), pp.569-576, 1989
- [2] M. NAJJAR, G.T. HEYDT, "A hybrid nonlinear-least squares estimation of harmonic signal levels in power systems", IEEE Trans, PWRD-6, (1), pp.282-288, 1991
- [3] H.M. BEIDES, G.T. HEYDT, "Dynamic state estimation of power system harmonics using Kalman filter methodology", IEEE Trans, PWRD-6, (4), pp.1663-1670, 1991
- [4] A.P.S. MELIPOULOS, F. ZANG, S. ZELLINGER, "Power system harmonic state estimation", IEEE Trans, PWRD-9, (3), pp.1701-1709, 1994
- [5] Z.P. DU, J. ARRILLAGA, N.R. WATSON, "Continuous harmonic state estimation of power systems", Proc. IEE, C, 143, (4), pp.329-336, 1996,
- [6] C.D. Roger, F.M. Mark, H. Wayne Beaty, "Electrical Power systems Quality.", 2000
- [7] J. Arrillaga, N.R. Watson, S.Chen, "Power system quality Assessment". 1996
- [8] W.H. PRESS, B.P. FLANNERY, S.A. TEUKOLSKY, W.T. VETTERLING, "Numerical recipes: the art of scientific computing (FORTRAN version)" Cambridge University Press, 1990