

PRONY 해석을 사용한 전력계통 저주파 진동모드의 온라인 추정

이기영*, 심관식**, 남해곤*
* 전남대학교, ** 서남대학교

On-line Estimation of Low Frequency Oscillation Mode Using Prony Analysis in the Power System

K. Y. LEE*, K. S. SHIM**, H. K. NAM*
* Chonnam national univ. ** Seonam univ.

Abstract - This paper presents a mode estimation for the analysis of small signal stability in power system.

The low frequency oscillation mode estimation is based on Prony method that is able to accurately compute the modal parameters (frequency and damping) of oscillation mode from time series. The time series or time domain data is obtained in TSA process.

The method applied to a large scale power systems and compared on the eigenanalysis results.

이 과정에서 보다 정확한 해를 구하기 위해서는 특이값 분해(singular value decomposition)과정이 필수적이다(4).

본 논문의 목적은 과도 안정도를 시간영역에서 반복 온라인 평가하는 SIME법(13)이나 EEAC법(12)과 같은 과도안전도 평가(TSA) 과정의 결과인 시간영역 데이터로부터 저주파 진동모드를 추정하는데 있다. 추정된 진동모드로부터 저주파진동 해석에 필요한 지역모드와 지역간모드를 구분하고, 각각의 발전기에 가장 지배적인 모드를 찾아내는 알고리즘을 개발하였다.

제안된 저주파 진동모드의 온라인 추정 알고리즘은 한 전계통에 적용되었으며 그 결과를 선형해석 결과와 비교하여 알고리즘의 정확성을 확인하였다.

1. 서 론

오늘날 대규모 전력계통에서 안정도 해석은 계통의 안전 운전 및 경제적 운용측면에서 매우 중요하고 특히 잘 개발된 전력계통에서 제동토크의 부족으로 발전기가 0.1-2 Hz로 지속적으로 진동하는 미소신호안정도가 전압안정도와 함께 심각한 문제로 대두되고 있다. 특히 구조 개편으로 불확실성이 증대되고 있는 전력계통에서 안정도를 온라인으로 평가하고 대책을 마련하는 것이 계통의 안전운전에 중요한 관건으로 되고 있다.

저주파 진동문제는 미소외란에 대한 계통해석이므로 선형제어이론을 적용할 수 있으며 다양한 고유치 계산 알고리즘과 SSAT(1)를 비롯한 다수의 상용화된 소프트웨어들이 있다.

미소신호안정도는 일반적으로 고유치 계산을 통한 해석이 가장 널리 사용되고 있으며, 대규모 전력계통에 대해 고유치 해석을 적용하기 위해서는 선형모델의 개발과 전기 기계적 진동모드를 계산하여야 하는데, 모든 고유치를 계산하는 것은 많은 계산 시간과 특별한 계산 알고리즘을 필요로 한다. 본 논문에서는 과도안전도 평가(transient security assessment, TSA)에서 얻은 시간영역 데이터를 프로니 해석법을 이용하여 전력계통의 저주파 진동모드를 추정하는 방법을 제안하였다.

최근 들어 시간영역 데이터로부터 직접 모드를 추정하는 알고리즘들이 제안되고 있는데, 계통해석에 적용된 알고리즘으로는 프로니(Prony)법(2-3), Hankel 행렬의 특이값 분해에 기초한 ERA(eigenvalue realization algorithm)법(5), 또 입출력 샘플데이터에서 등가전달함수를 계산하고 진동모드를 추정하는 Steiglitz-McBride 알고리즘(5), 그리고 널리 알려진 푸리에 변환법(Fast Fourier transform)등이 있다. 지금까지 전력계통의 진동모드 추정을 위한 시간영역 분석에는 프로니 법이 가장 우수한 것으로 평가되고 있으며 이를 응용한 사례로는 등가모델에 의한 계통 축약, PSS 및 TCSC 설계, 터빈-발전기의 축 진동 문제, 그리고 네트워크 등가모델링 등이 있다(4, 7-10).

프로니법은 기본적으로 등간격의 샘플링된 신호를 지수함수로 이루어진 목적함수로 적합하는 기법으로서 잡음이 많은 데이터에서는 최소자승법(6)을 필요로 하며

2. 과도안전도 평가

최근 전력계통에서는 대규모 외란으로 인한 계통고장 발생 및 긴급 상태에서 계통의 안전성 확보를 위한 노력의 일환으로 온라인 동적안전도평가(dynamic security assessment, DSA)에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 동적안전도 평가에서 TSA는 계통에서 발생할 수 있는 심각한 상정사고를 선택하고 선택된 사고에 대해서 과도안전도 평가 및 안전도 한계 마진을 계산하는 것으로 안전도 평가를 위한 지표로 각 발전기가 동기화력을 상실하지 않는 임계고장제거 시간(critical clearing time, CCT)을 계산하는 것이다.

다기계통에서는 주어진 상정사고에 대해서 모든 발전기의 출력과 위상각에 대한 시간영역해석을 수행한 후 발전기들을 안정 또는 불안정한 2개의 그룹으로 나누어 1기 무한모션으로 축약한 다음, 등면적법을 적용하여 불안정한 발전기들의 CCT를 계산한다.

이 과정은 고장제거시간을 변화하면서 반복해야하므로 많은 시간영역 데이터를 산출하게 된다.

다기계통의 TSA과정에서 얻어지는 회전자 위상각에 대한 시간영역의 예는 그림 1에 나타나 있다.

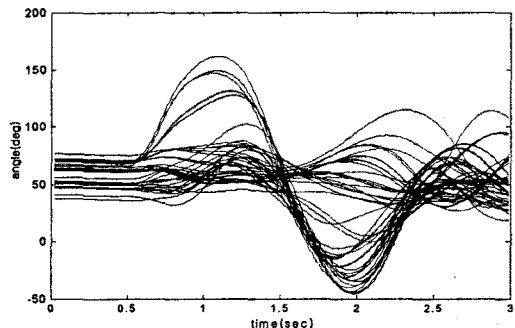


그림 1. 회전자위상각에 대한 시간영역 해석

3. 선형예측과 프로니법

시계열분석과 신호처리에서는 데이터의 검출과 추정 이 중요한 요소이고 특히 시스템동정이나 신호모델링에서 선형예측(linear prediction)은 중요한 기법 중 하나이다. 프로니법은 선형예측에 지수함수를 적용한 것으로 이론적으로 이미 많은 연구결과[2-12]들이 보고되어 이 논문에서는 간단하게 그 과정만 기술한다.

측정되거나 계산된 데이터가 정현신호의 합이라 가정 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_t = \sum_{i=0}^m A_i \rho_i^t \cos(\omega_i t + \phi_i); \quad t=1, \dots, N \quad (1)$$

여기에서 A_i 는 i 번째 코사인함수의 진폭이고 ρ_i 는 감쇠정수이다. 그리고 시간함수 y_t 는 복소수 m 개의 합인 이산치 시간형태로 나타내면

$$y_t = \sum_{i=1}^m B_i z_i^t \quad (2)$$

로 나타낼 수 있으며, 식 (1)-(2)의 변수들 사이에 관계는 다음과 같다.

$$z_i = \rho_i e^{j\omega_i T}, \quad B_i = \frac{1}{2} A_i e^{j\phi_i} \quad (3)$$

또한 전달함수 $H(z) = B(z)/A(z)$ 에 임펄스함수를 입력으로 인가했을 때, 출력 y_t 는

$$y_t = H(z)\delta_t = \sum_{i=1}^m \frac{B_i}{1 - z_i z^{-1}} \delta_t = \sum_{i=1}^m B_i z_i^t \quad (4)$$

또는

$$A(z)y_t = B(z)\delta_t \quad (5)$$

$$A(z) = \sum_{i=0}^n a_i z^{-i}; \quad a_0 = 1 \quad (6)$$

나타낼 수 있고, 이를 선형예측행렬 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} 0 & & & y_1 & y_2 \\ & \ddots & & & \\ & & \ddots & & \\ y_1 & y_2 & & y_m & \\ \vdots & & & \vdots & \\ y_{N-m} & & & y_N & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_m \\ \vdots \\ a_1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

그리고 식 (6)으로부터 특성방정식은

$$z^n + (a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \dots + a_n) = 0 \quad (8)$$

이 되며, 특성방정식의 해를 구하면 식(3)으로부터 모드의 주파수와 제동계수를 구할 수 있으며 식 (2)는 모드 방정식 $y = VB$ 로 나타낼 수 있으므로 이로부터 B_i 를 계산할 수 있다.

3.1 최소자승법

주어진 시계열 데이터에 잡음이 없다면 식 (7)에서 선형예측행렬차수가 $N = 2m + 1$ 에서도 모드를 정확히 추정한다. 그러나 실제 이산데이터에서는 최소한 백색잡음을 포함하고 있기 때문에 잡음의 영향을 고려해야 한다. 이러한 잡음을 영향을 선형예측행렬의 차수를 $N > 2m + 1$ 로 선택함으로써 제거할 수 있는데 이 경우는 미지수 보다 방정식이 많은 시스템이 되고 최소자승해법을 필요로 한다.

3.2 모델차수 선택

선형예측모델의 차수가 m 이면 m 개의 복소해가 계산된다. 계산시간과 정확한 모델축약에 따라서 적절한 차수의 선택이 필요하다. 최소자승오차로 신호 대 잡음비를 다음과 같이 정의할 수 있다[6].

$$SNR = -20 \log \left(\frac{|\hat{y}_i - y_i|}{|y_i|} \right) \quad (9)$$

3.3 멀티신호 프로니법

한 모드가 여러 개의 신호에 내포되어 있을 때, 여러 신호들로부터 동시에 포함된 모드를 추정할 수 있다. 시간영역에서 멀티신호를 $y_m(t)$ 라 할 때,

$$y_m(t) = \sum_{i=1}^m B_{mi} z_i^t \quad (10)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 멀티 신호에서 모드를 추정하기 위한 모든 계산과정은 단일신호과정과 동일하다. 그러나 단일신호에서보다 선형예측행렬의 차수가 크게 증가해서 계산부담이 늘어난다.

이 논문에서는 각 모션에 연결된 발전기 출력에 멀티신호 프로니법을 적용해서 모드를 추정하였으나 저주파 진동 모드에서는 멀티신호를 적용하는 것보다 모델차수와 적절한 시간구간의 선택이 보다 모드의 정확도에 큰 영향을 주는 것으로 판단되어 이 논문에서는 멀티신호 결과를 기술하지는 않았다.

4. 적용 결과

4.1 선형해석

이 논문에서는 215기, 791모션, 1575선로로 구성되어 있는 대규모 시스템인 한전계통의 데이터를 사용하여 개발한 저주파 진동모드 추정 알고리즘을 시험하였다. 선형해석법인 고유치계산법으로 모드를 추정한 결과 다음과 같은 진동모드를 구하였다.

- mode 1 : -0.08617+j5.55808
- mode 2 : -0.10414+j4.42496
- mode 3 : -0.20000+j7.22496

고유벡터 결과로부터 모드 1은 울진 지역모드이고 모드 2는 보령, 태안, 서인천 등 서해안발전기와 고리, 월성 등 동남해안 발전기가 서로 진동하고 있는 지역간 모드이며 모드 3은 영광지역과 월성지역이 서로 진동하고 있는 지역간 모드이다.

4.2 과도안전도 과정에서의 시간응답

주어진 상정사고에 대해서 시간영역해석을 반복적으로 수행하는 SIME법 같은 알고리즘은 실행 과정에서 각 발전기에 대한 많은 정보들을 산출한다.

시험계통의 주요 발전기들에 대한 출력의 시간응답을 그림 2에 나타내었다.

그림의 결과에서는 고장모의 지점을 각각 다르게 설정한 경우로 지역모드를 파악하기 위해서 울진 근처 선로에 고장을 모의하였으며 지역간모드를 살펴보기 위해서 무주-신옥천 선로에 고장을 모의하였다. 모의한 고장은 3상 단락사고로 10cycle후 고장을 제거하였다.

그림 3은 울진발전기(#1) 출력에 대한 FFT를 계산한 결과로 지배적 모드의 주파수가 0.8Hz 부근에 존재함을 알 수 있다.

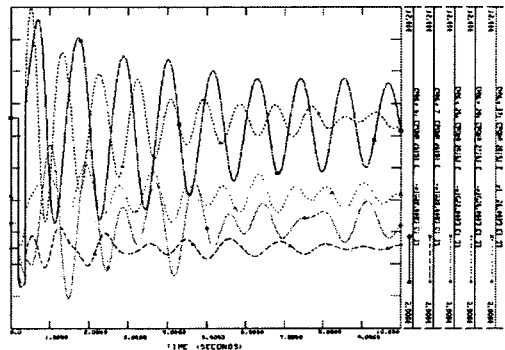


그림 2. 주요 발전기들의 출력에 대한 시간응답

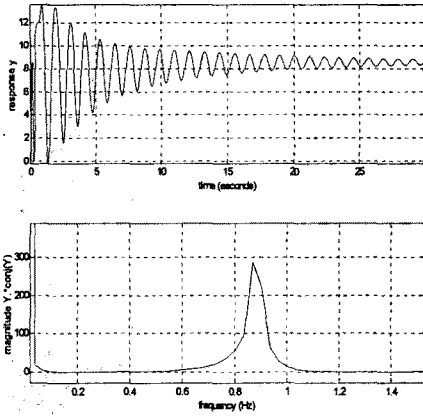


그림 3. 울진발전기(#1)의 출력과 FFT

4.3 진동모드추정

발전기 출력에 대한 시간응답으로부터 계산한 시험계통의 진동모드는 표 1에 나타내었다. 표에서 mode는 추정 계산한 진동모드를 의미하고 B_i , ϕ_i 는 각각 식 (3)의 크기와 위상차이다. 그리고 SNR은 신호 대 잡음비를 나타내고 있으며 계산부담이 되지 않으면서 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 70db 이상은 되어야 실수부가 정확하게 계산된다.

표에서 모든 결과가 선형해석결과와 거의 일치함을 알 수 있다. 표 1에서 지역모드인 모드 1은 울진 지역 발전기 출력에 대해서만 추정되었고 다른 발전기 출력에서는 나타나지 않았다. 고리, 영광, 월성 지역발전기들에 대한 해석에서는 0.8Hz, 1.1Hz의 2개 모드가 동시에 추정되었다. 선택적인 고유치계산법에서는 지배적 진동 모드부터 계산하므로 지배적 모드인 0.8Hz 모드는 쉽게 계산되지만 1.1Hz 모드는 주의 깊게 선택해야만 계산할 수 있는 모드다. 이와 같이 프로니법에 의한 진동모드 추정은 각 발전기의 중요 모드를 발전기 별로 독립적으로 판단할 수 있어 일괄적으로 전체 계통의 고유치 계산하는 선형해석법과는 차별화 된다.

모드 2에 대한 신호는 고리, 보령 지역의 발전기 출력을 비롯한 월성, 영광 발전기 출력에도 포함되어 있다. 특히 이들의 위상각 ϕ 를 비교하면 거의 180°의 차이가 있어 이들은 지역간모드로 생각할 수 있다. 대표적으로 보령-영광의 서해안 발전기 그룹과 월성-고리의 동남해

안 발전기들이 부분적으로 서로 진동하고 있음을 알 수 있다. 프로니법에 의한 지역모드와 지역간 모드의 구별은 이와 같이 위상각 ϕ 를 비교하면 쉽게 알 수 있다. 프로니법에 의한 추정 결과와 주어진 데이터를 비교한 것을 그림 4에 도시하였는데 전 시간구간에 대해서 정확함을 알 수 있다.

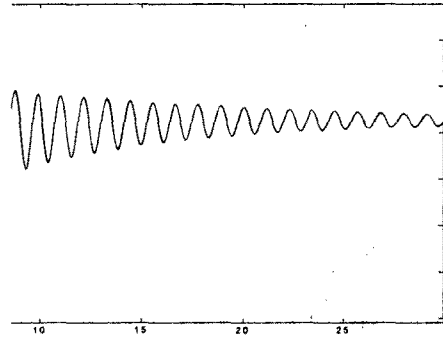


그림 4. 실제 데이터와 추정 결과 비교

5. 결과 요약

미소신호안정도 해석을 위해서 TSA 과정에서 진동모드를 추정하기 위한 프로니법을 적용한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 정확하게 지역모드와 지역간모드 추정
- (2) 고장제거 초기상태인 과도상태를 제거하면 저차에서 더욱 정확하게 모드 추정
- (3) 잡음 영향을 고려하여 최소자승법 적용
- (4) SNR을 이용하여 등가모델의 차수를 결정
- (5) 위상각을 비교함으로써 지역간모드 구별
- (6) 각각의 발전기에 대한 지배적 진동모드 결정
- (7) 몇 개의 발전기에 대한 모드추정에서 전체 계통의 진동모드 추정이 가능하다.

6. 결론

이 논문은 저주파 진동모드를 온라인으로 추정하기 위하여 선형예측에 기반을 두고 있는 프로니법을 적용하고 그 결과를 기술하였다.

적용 결과 저주파진동모드를 정확하게 추정하였으며 추정치와 주어진 데이터를 비교하여 추정된 모델이 정확

표 1. 각 발전기의 출력으로부터 추정된 저주파 진동모드

No.	Generator	Mode	B_i	ϕ_i	SNR	Mode No.	description
1	울진 #1	-0.08974+j5.55410	-1.05211+j1.46730	123.64	85.4	mode 1	local mode
2	보령 #1	-0.10495+j4.42651	0.02011+j0.06300	72.30	101.0	mode 2	interarea mode
3	고리 #1	-0.10536+j4.42601	-0.12433-j0.17172	-125.91	103.8	mode 2	interarea mode
4	영광 #1	-0.10770+j4.42542	-0.02459-j0.01566	-147.51	98.1	mode 2	interarea mode
		-0.26461+j7.03299	-0.38413-j0.17878	-155.04	98.1	mode 3	interarea mode
5	월성 #1	-0.10558+j4.42549	-0.06266-j0.09184	-124.30	105.3	mode 2	interarea mode
		-0.25875+j6.99099	0.34082+j0.30101	41.451	97.87	mode 3	interarea mode

함을 확인하였다. 또한 모든 모드를 탐색해야하는 일반적인 고유치계산법과는 달리 각 발전기의 출력에 포함된 모든 모드를 계산할 수 있어 각각의 발전기를 통하여 존재하는 모드를 모두 찾을 수 있다.

계통 해석 및 제어에 필수적인 선형해석법과 함께 개발한 알고리즘은 계통운영에 중요한 도구가 될 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Powertech, Small Signal Stability Tools (SSAT). User manual, Version 1.2, 2001.
- [2] J. F. Hauer, C. J. Demeure, and L. L. Scharf, "Initial Results in Prony Analysis of Power System Response Signals," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 5, no. 1, pp. 80-90, 1990.
- [3] Trudnowski, D. J., J. R. Smith, T. A. Short, and D. A. Piene, "An Application of Prony Method in PSS Design for Multimachine Systems," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 6, no. 2, pp. 118-126, 1991.
- [4] Hong, J. H., and Park, J. K., "A Time-domain Approach to Transmission Network Equivalents via Prony Analysis for Electromagnetic Transients Analysis," Trans. on Power Systems, vol. 10, no. 4, pp. 1789-1796, 1995.
- [5] Bollinger, K. E., W. E. Norum, "Time Series Identification of Interarea and Local Generator Resonant Modes," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 10, no. 1, pp. 273-279, Feb. 1995.
- [6] Louis L. Scharf, "Statistical Signal Processing" Addison-Wesley Publishing Company, 1991.
- [7] D. J. Trudnowski, J. R. Smith, T. A. Short, and D. A. Pierre, "An Application of Prony Methods in PSS Design for Multimachine Systems," IEEE Transaction on Power Systems, vol. 6, No. 1, February 1991.
- [8] R. Gorondin, I. Kamwa, L. Soulieres, J. Potvin, and R. Champagne, "An Approach to PSS Design for Transient Stability Improvement through Supplementary Damping of the Common Low-Frequency," IEEE Transaction on Power Systems, vol. 8, no. 3, August 1993.
- [9] M. K. Donnelly, J. R. Smith, R. M. Johnson, J. F. Hauer, R. W. Brush, and R. Adapa "Control of a Dynamic Brake to Reduce Turbine-Generator Shaft Transient Torques," IEEE Transaction on Power System, vol. 8, no. 1, February 1993.
- [10] Carl E. Grund, George Sweezy, and John F. Hauer "Dynamic System Monitoring (DSM) for HVDC Modulation Control," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no. 3, July 1993.
- [11] 남해곤, 송성근, 심관식, 문영환, 최홍관, 남궁재용, "고유치감도 해석에 의한 전압안정도의 상정사고 선택," 대한전기학회 2000년도 하계 학술대회 논문집 A, pp. 66-68, 2000. 7.
- [12] Y. Xue, M. Pavella, "Extended Equal-Area Criterion : An Analytical Ultra-Fast Method for Transient Stability Assessment and Preventative Control of Power System," Int. J. Electrical Power & Energy System, vol. 11, No. 2, pp 1312-1349.
- [13] Y. Zhang, L. Wehenkel, P. Rousseaux, M. Pavella, "SIME: A Hybrid Approach to Fast Transient Stability Assessment and Contingency Selection", Int. J. Electrical Power & Systems, vol. 19, no. 3, pp 195-208.
- [14] 남해곤, 송성근, "새로운 전력계통 운영 환경에서의 온라인 동적안정도 평가의 역할", 대한전기학회지 vol. 49, no. 3, pp 4-11, 2000. 3.