

시간영역에서 파라미터 추정과 전력계통의 저주파진동 해석

論 文

54A-3-3

A Parameter Estimation of Time Signal and Analysis of Low Frequency Oscillation in Power Systems

沈冠埴* · 南海鯤** · 金容求†

(Kwan-Shik Shim · Hae-Kon Nam · Yong-Gu Kim)

Abstract - This paper presents a novel approach based on Prony method to analysis of small signal stability in power system. Prony method is a valuable tool in identifying transfer function and estimating the modal parameter of power system oscillation from measured or computed discrete time signal. This paper define the relative residue of time signal and propose the condition to select low frequency oscillation in each generator. This paper describes the application results of proposed algorithm with respect to KEPCO systems. Simulation results show that the proposed algorithm can be used as another tools of power systems analysis.

Key Words : Parameter Estimation, Prony Method, Mode, Small Signal Stability, Damping, Power System

1. 서 론

오늘날 대규모 전력계통에서 안정도 해석은 계통의 안정 운전과 경제적 운용측면에서 매우 중요하고 특히 지속적이고 계획적으로 잘 개발된 전력계통에서는 미소신호안정도 문제가 과도안정도, 전압안정도 문제와 함께 중요한 문제가 되고 있다.

지금까지 전력계통의 안정도 해석에 다양하게 응용되고 있는 선형해석에서는 계통상태행렬의 고유치를 계산함으로써 안정도 해석에 필요한 진동모드를 쉽게 계산할 수 있고 많은 상용프로그램들이 개발되어 있다. 선형해석과 함께 1980년대 후반부터 최근까지 시간영역의 이산데이터에서 직접 계통의 진동모드를 추정하고 이를 계통의 안전성확보에 이용하려는 노력들이 진행되고 있다. 계통에서 발생하는 진동은 계통의 안전성에 직접 영향을 주는 요인으로 다른 안정도문제를 야기할 수 있는 개연성이 있다. 1996년 8월 발생한 WSCC 계통 고장[1]은 725초간 진동이 지속된 후 계통 붕괴로 이어졌는데, 이후 고장원인 분석에서는 관점에 따라서 저주파진동문제[2-3]와 전압문제[1]로 그 원인을 분석하였다. 문제는 충분히 긴 시간동안의 계통에 내재되어 있는 진동은 제어기를 포함한 계통 전체에 영향을 주고 정상적인 상태에서는 충분히 극복할 수 있는 작은 외란에 대해서도 대규모 계통붕괴로 이어질 수 있음을 시사하고 있다. 그러므로 계통에서 발생하는 잠재적인 진동을 예측하는 것은 계통

의 안전성을 유지하는데 필수적이다[4].

지금까지 시간영역에서 진동모드를 추정하는 많은 알고리즘들이 제안되고 있다. 계통해석에 적용된 대표적인 알고리즘들은 크게 두 부류로 나눌 수 있는데, 하나는 Prony 법 [5-7]이고 다른 하나는 이산푸리에변환[8-10]에 의한 진동모드 추정기법이다.

그러나 지금까지 계통해석에서 이산시간영역데이터의 파라미터 추정 방법은 FFT(fast Fourier transform)의 장점을 이용할 수 있는 DFT(discrete Fourier transform)법 보다 Prony 법이 우수한 것으로 평가되고 있고, 이를 전력계통 해석에 응용한 다양한 사례들이 보고되어 있다. 문헌 [5]에서 전력계통의 진동모드 계산에 처음 적용된 이래로 여러 개의 신호를 이용해서 한 모드를 추정하는 방법[6], Wiener-Hopf 예측 방정식으로부터 모드를 추정하는 방법[7] 등이 제안되었다. 또한 신호의 residue로 계통의 등가모델을 구하여 계통을 축약하는 방법[11-12]과 축약된 계통으로부터 PSS 제어기를 설계하는 방법[13-14], 네트워크 등가모델링[15], 선형해석 결과와 비교 평가[16-17] 등이 제안되었다. 이 밖에도 고장지점계산이나 계통의 정확한 주파수 계산 등 매우 계통의 다양한 분야에 적용되었으며, 최근에는 과도안정도평가 프로그램과의 결합에 의한 진동모드 추정[20]등에 적용되고 있다.

기본적으로 Prony 법은 등간격으로 샘플링 된 신호를 지수함의 선형조합으로 적합하는 기법으로 데이터의 형태에 따라 오차를 발생한다. 즉 잡음이 많은 데이터에서 대해서 Prony 법은 오차를 수반하여 최소자승법을 필요로 하며 정확한 해를 구하기 위해서는 특이값 분해 과정이나 QR-타입의 연산[21]을 한다.

이 논문에서는 선형해석에서 모드 방정식과 시간영역 데이터에서 복소모드 사이에 관계를 수학적으로 증명하고, 이산시간데이터에서 저주파진동해석에 필요한 진동모드와 파

† 교신저자, 正會員 : 木浦技能大 電氣計測制御科 專任講師 · 工博
E-mail : kimyg69@hanmail.net

* 正會員 : 全南大 工業技術研究所 先任研究員 · 工博

** 正會員 : 全南大 工大 電氣電子工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2004年 12月 29日

最終完了 : 2005年 2月 14日

라미터를 추정하여 선형해석 결과와 비교하였다. 선형해석의 중요한 결과들로 고유값과 고유벡터, 속도참여율(speed participation factor : SPF)을 생각할 수 있는데, 시간영역 데이터에 적용한 Prony 법에서 이들과 비교할 수 있는 파라미터들을 산출하였다. 또한 이산시간 데이터에서 고유값에 대응하는 진동모드를 추정하기 위한 진동모드 선택 기준을 제시하였다. 그리고 저주파진동해석에 필요한 상대적 residue를 정의하여 시간영역데이터에서도 선형해석의 모드 해석과 동일한 해석을 가능하게 하였다.

지금까지 Prony 법에 의한 진동모드 추정에서 가장 문제 시 되는 것 중에 하나는 ghost mode[6]의 출현이었다. 이 모드는 실제로는 존재하지 않으나 잡음에 의해서 Prony 법의 계산 결과에서 나타나는 모드로 이 논문에서는 상대적 residue를 적용해서 ghost mode와 같은 불필요한 모드를 제거하고 계통해석에 중요한 파라미터를 선택하였다.

계통에서 한 발전기의 진동은 다른 지역 출력에 어떤 형태로든지 영향을 끼친다. 이 논문에서 제한한 진동모드 선택 조건으로부터 몇 개의 중요 발전기에 대한 파라미터 추정에서 전체 계통의 중요 진동모드를 파악할 수 있음을 확인하였다. 이것은 계통 전체의 모든 발전기에 대한 해석을 하지 않고 국부적인 계통해석으로 계통 전체의 안정성을 파악할 수 있는데, 그 중요성이 있다.

이 논문에 적용된 모든 알고리즘을 한전계통에 적용하였으며, 그 결과를 선형해석 결과와 비교하여 알고리즘의 정확성을 확인하였다.

II. 신호 모델

전력계통을 구성하고 있는 다양한 기기들의 상태변수를 x 라 하고, 계통상태행렬을 A 라 할 때, 계통의 선형상태방정식은 $\dot{x} = Ax$ 로 표현할 수 있다. 상태행렬의 고유값과 고유벡터를 각각 λ , V 라 하고, 상태변수들 사이의 연관성을 제거하기 위하여 새로운 상태변수를 z 는 $\Delta x = Vz$ 로 정의한다. 새로운 상태변수 z 로 선형상태방정식을 표현하면 $\dot{z} = \Lambda z$ 로 나타낼 수 있다. 상태행렬 Λ 는 대각선에 상태행렬 A 의 고유치를 가지고 있는 대각행렬이므로 각 상태변수들은 $\hat{z}_i = \lambda_i z_i$ 와 같이 나타낼 수 있다[22].

새로운 상태변수들은 서로 독립적이므로 상태벡터 z_i 의 초기값을 $z_i(0)$ 라 할 때, 새로운 상태방정식의 해는 $z_i(t) = z_i(0)e^{\lambda_i t}$ 로 나타낼 수 있다. 변환행렬 V 는 상태행렬의 우고유벡터로 이 행렬의 역행렬을 W 라 하면 $z_i(0) = w_i \Delta x(0)$ 로 나타낼 수 있다. 그러므로 상태벡터 Δx 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta x(t) = \sum_{i=1}^n v_i c_i e^{\lambda_i t} \quad (1)$$

여기에서 상수 c_i 는 $c_i = z_i(0)$ 인 스칼라이고 v_i 는 벡터이다.

고유치가 복소수이면 고유벡터도 복소수이고 또한 공액복소수를 가지므로 식 (1)에서 i -번째 상태변수 $x_i(t)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta x_i(t) = \sum_{j=1}^n R_{ij} e^{\lambda_j t} \quad (2)$$

여기에서 R_{ij} 는 상태변수의 residue로 다음과 같이 정의된다.

$$R_{ij} = v_{ij} c_j = v_{ij} w_j \Delta x(0) \quad (3)$$

이 식은 각 상태변수들의 초기조건에 의해서 j -번째 모드가 상태변수 $x_i(t)$ 의 변화에 참여하는 정도를 나타낸다.

그리고 계통의 출력을 y 라 할 때, 출력방정식은 $\Delta y(t) = C \Delta x(t)$ 로 나타낼 수 있다. 그러므로 출력신호도 식 (2)와 유사하게 복소지수함수들의 합으로 표현할 수 있다.

$$\Delta y_i(t) = R_1 e^{\lambda_1 t} + R_2 e^{\lambda_2 t} + \dots + R_n e^{\lambda_n t} \quad (4)$$

여기에서 R_i 는 출력신호 미소변위의 residue로 각 상태변수에서 i -번째 모드의 residue에 출력행렬을 곱한 후, 모두 합한 값이다. 즉, c_{ij} 를 i -번째 출력벡터의 j -번째 요소라 하고, R_{ij} 를 각 상태변수에서 i -번째 residue라 하면, 출력신호의 residue는 다음과 같다.

$$R_k = \sum_{j=1}^n c_{kj} R_{jk} \quad (5)$$

지금까지 기술한 residue는 동작점(equilibrium point)에서 나타낸 상태변수와 출력신호의 residue로 선형모델에서는 한 개의 동작점을 가지고 있으나 비선형모델에서는 여러 개의 동작점이 포함된다. 만일 동일한 시간에서 신호 $y(t^+0)$ 를 해석한다면 $t=+0$ 에서 계통상태 변화가 동일하므로 한 개의 동작점으로 생각할 수 있다. 그러므로 식 (6)과 같이 표현되는 시간영역에서 출력신호 $y_i(t)$ 는 식 (4)와 같이 복소지수함수와 residue로 표현할 수 있다.

$$y_i(t) = y_i(t_0) + \Delta y_i(t) \quad (6)$$

측정되거나 계산된 시간영역데이터가 감쇄지수함수와 정현파 신호의 합이라 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_i = \sum_{i=1}^n A_i e^{a_i t} \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (7)$$

여기에서 A_i 는 i 번째 코사인함수의 진폭이고 a_i 는 감쇄정수이다. 복소모드 $z_i = e^{\lambda_i}$ 라 할 때, 식 (7)를 복소지수함수 형태로 변환하면 다음과 같다.

$$y_i = \sum_{i=1}^m B_i z_i^t, \quad B_i = \frac{1}{2} A_i e^{j\phi_i} \quad (8)$$

이 식은 이산데이터에서 각 데이터들이 복소모드 z_i 의 합으로 표현될 수 있음을 의미한다. 복소모드의 계수 B_i 는 복소모드 z_i 에 대응하는 값으로 식 (4)에서 R_i 에 대응하므로 이것이 신호 y_i 의 residue이다. 파라미터 A_i 나 B_i 는 동일한 신호의 residue이나 이 논문에서는 시간함수에 포함된 파라미터 A_i 로 결과들을 표시하였다. 복소모드의 residue $B_i = a_i + j b_i$ 가 복소수이므로 시간영역에서 각 모드에 대응하는 크기와 위상각은 다음과 같이 변환된다.

$$A_i = 2|B_i|, \quad \phi_i = \tan^{-1}(b_i/a_i) \quad (9)$$

III. Prony 법과 파라미터 추정

Prony 법은 임의의 신호를 복소 모드의 선형결합으로 적합(fitting)하는 방법으로 안정도 해석 프로그램의 출력데이터나 계통의 시험 또는 외란에 의해서 측정된 데이터에서 계통의 지배적 진동모드를 추정한다. 식 (7)과 같은 지수감쇠 코사인함수를 등간격주기 T 로 샘플링 할 때, 신호는 다음과 같은 이산치 형태로 표현된다.

$$y(kT) = \sum_{i=1}^m B_i z_i^k \quad (10)$$

여기에서, 복소 모드 $z_i = e^{\lambda_i T}$ 이고 B_i 는 이산신호의 residue이다.

Prony 법은 이산신호의 선형예측방정식 $A^T y = 0$ 에서 미지수를 계산하고, 이 미지수를 계수로 하는 식 (11)과 같은 선형예측다항식(linear prediction polynomial)으로부터 이산신호의 극점을 계산한다.

$$A(z) = \sum_{i=0}^p a_i z^{-i} = 0 \quad (11)$$

이와 같은 선형예측다항식의 근은 복소 평면에서 극점이므로 이 극점들을 시간영역에서 필요로 하는 복소모드로 변환해야 한다. 복소모드의 정의에 의해서 고유값 $\lambda_i = \ln(z_i) / T$ 로 계산한다.

그러므로 예측다항식 $A(z)$ 에서 이산 신호를 발생하는 시스템의 주파수와 계동계수를 결정한다. 신호의 나머지 파라미터인 residue의 크기와 위상각은 각 요소가 복소모드 z_i 로 구성된 Vandermonde 행렬 V 로 나타낸 모드방정식 $y = VB$ 에서 결정할 수 있다.

Prony 법은 데이터에 잡음이 없을 때는 정확하게 모드를 추정하나 잡음이 존재할 때는 부정확한 다항식 $A(z)$ 의 계수들로 인해서 복소 극점의 위치가 매우 민감하게 변화한다. 그러나 실제 데이터에서는 백색잡음을 비롯하여 다양한 잡음을 포함하고 있기 때문에 잡음의 영향을 고려해야 한다. 이러한 잡음을 영향은 선형예측행렬의 차수를 $n > 2p + 1$ 로 선택함으로써 제거할 수 있는데, 이 경우는 미지수 보다 방정식이 많은 시스템이 되고 $Ya = b$ 의 해를 구하기 위해서는 최소사승해법을 필요로 한다. 이 논문에서는 확장 Prony 법(extended Prony method[21])을 적용하여 결과들을 계산하였다.

IV. 시간응답의 모드 해석

계통에서 임의의 출력은 식 (4)와 같이 전체 계통에 존재하는 모드들의 조합으로 구성된다. 초기조건의 영향이 작으면 residue는 작은 값을 가지게 된다. 지역모드를 포함한 계통의 지배적 모드는 다른 발전기의 출력에 참여하고 있으나 한 발전기에서 중요 모드가 아니면 신호의 residue가 작은 값을 가지게 된다. 이것은 계통에서 중요 지배적 진동모드(고유치의 실수부가 허수축 근처에 있는 모드)라 할지라도 특정 발전기의 출력에 대한 파라미터 추정에서 residue가 작으면 그 출력에 끼치는 영향을 작아 추정된 파라미터에서

제외할 수 있음을 의미한다. 이로부터 시간영역함수에 포함된 상대적인 residue 비교를 통해서 중요 모드뿐만 아니라 동일한 지역 내의 지역간 모드일지라도 그 중요도를 산정할 수 있다.

지역모드는 한 지역의 발전기가 자체적으로 동요하는 것이다. 이것은 주로 발전기 제어시스템의 영향으로 발생한다. 선형해석에서 지역모드에 대한 우고유벡터에서 그 지역모드에 대응하는 고유벡터가 매우 큰 값을 가지고 있어 지배적인 진동모드에 대응하는 발전기를 선택할 수 있다. Prony 법에서 지역모드의 구분은 선형해석과 유사하게 할 수 있다. 특정한 모드에 대응하는 신호의 residue가 상대적으로 다른 값보다 큰 값을 가지고 있으면 지역모드로 생각할 수 있다. 식 (4)에서 k -번째 모드 λ_k 에 대응하는 residue R_k 가 상대적으로 다른 모드의 residue보다 크면 출력의 진동을 지배하기 때문이고 이때 식 (6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_i(t) \cong y_i(t_0) + R_k e^{\lambda_k t} \quad (12)$$

지역간 모드는 한 지역의 발전기가 다른 지역의 발전기와 일정한 위상차를 가지고 동요하는 것이다. 이것은 주로 발전기 제어시스템의 영향보다는 전력조류의 불일치로 발생한다. 선형해석에서 지역간 모드에 대한 고유벡터에서 지역간 모드에 참여하는 발전기들의 고유벡터 크기가 비슷한 값을 가지고 있고 180° 위상차로 동요하고 있다. 그리고 속도참여율에서 지역간 모드에 크게 영향을 주는 발전기들을 선택할 수 있다. Prony 법에서도 이와 비슷하게 지역간 모드를 구분할 수 있다. 만일 출력신호에서 k -번째 모드 λ_k 가 지역간 모드라 가정하면, 각 출력신호의 R_k 를 서로 비교하여 지역간 모드를 구별할 수 있다. 예를 들어 출력신호 p, q 에 지역간 모드 λ_k 가 포함되어 있으면 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_p(t) \cong y_p(t_0) + R_k^p e^{\lambda_k t} + \sum_{j=1, j \neq k}^n R_j^p e^{\lambda_j t} \quad (13)$$

$$y_q(t) \cong y_q(t_0) + R_k^q e^{\lambda_k t} + \sum_{j=1, j \neq k}^n R_j^q e^{\lambda_j t} \quad (14)$$

여기에서 출력신호 p, q 의 residue R_k^p, R_k^q 는 복소수이므로 식 (9)와 같이 크기와 위상으로 분리할 수 있다. 만일 λ_k 가 출력신호의 진동에 지배적으로 참여하고, R_k^p, R_k^q 의 위상차 180° 이면 신호 p, q 는 반대의 위상차로 진동한다. 선형해석에서 지역간 모드를 시간영역에서 판별할 때, 발전기 위상각의 위상차를 비교하는 것과 같다. 그러나 출력신호의 residue에는 계통상태의 초기조건이 포함되어 있으므로 선형해석에서 우고유벡터에 의한 지역간 모드와 차이가 있다. 즉, 입력신호(외란)에 따라서 다른 결과를 산출하므로 우고유벡터와 정확하게 같지는 않다. 우고유벡터는 선형화한 동작점에서 각 상태벡터들의 특성을 나타내는데, 신호의 residue는 비선형모델의 입력에 대한 출력의 상태를 나타낸다. 우고유벡터가 동작점에 한정되어 정상상태의 특성을 나타내는데 비하여 신호의 residue는 시간에 종속되지 않고 입력에 대해서 출력신호의 특성을 나타내므로 우고유벡터보다 더 정확하게 계통의 동적특성을 표현한다. 그러나

residue에 의해서 지역간 모드를 구분할 때, 그 특성이 시간에 종속되지 않기 때문에 각 신호에서 기준 시간은 동일하게 적용(시각동기화)해야 일관성 있는 결과를 얻을 수 있다.

4.1 진동모드 선택 기준

계통의 모든 출력은 어떤 형태와 경로를 따라서 다른 출력과 결합되어 있다. 전술한 바와 같이 지역모드는 다른 진동모드에 나타나지만 residue의 크기가 작고 비슷한 위상차를 가지며, 지역간 모드는 진동을 참여계통에서 분배해서 가지고 있기 때문에 비슷한 크기와 180°의 위상차를 가지고 있다.

실제적인 고려사항으로 Prony 법의 결과에서는 서론에서 기술한 ghost mode를 포함하여 많은 진동모드들을 산출한다. 이들 중에서 계통에 영향을 주는 진동모드들을 선별해야 한다. 따라서 진동모드들을 선택할 수 있는 기준이 필요하다. 먼저 고유치를 $\lambda = \alpha + j\beta$ 라 할 때, 제동비와 시정수는 다음과 같이 정의된다.

$$\zeta = -\frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \times 100, \quad \tau = \frac{1}{|\alpha|} \quad (15)$$

그리고 상대적 residue는 진동모드들의 residue의 합으로 각 모드에 대응하는 residue를 나눈 값으로 다음과 같이 정의한다. 진동모드가 n 개 선택되었다고 할 때, 상대적 residue는 다음과 같이 정의한다.

$$\%A = \frac{A_i}{A_\Sigma} \times 100, \quad A_\Sigma = \sum_{i=1}^n A_i \quad (16)$$

상대적 residue는 신호에서 각 모드가 차지하는 상대적인 비중을 나타내는 것으로 모드의 중요성을 판단할 때, 하나의 기준이 될 수 있다.

이 논문에서는 식 (15)-(16)에서 제시한 변수들을 이용하여 진동모드 선택 기준은 다음과 같이 설정한다.

조건 1. 주파수범위

$$0.2 \text{ Hz} < f < 2.5 \text{ Hz} \quad (17)$$

조건 2. 제동비와 시정수

$$\zeta < 10, \quad \tau > 2 \quad (18)$$

조건 3. 상대적 residue

$$A_i > 0.1 \% A \quad (19)$$

조건 1에서는 저주파진동에 관심 있는 주파수대역을 설정한다. 조건 2에서는 조건 1을 만족하는 모드들 중에서 제동비와 시정수를 만족하는 모드들을 선택한다. 조건 3에서는 조건1-2를 만족하는 모드들 중에서 상대적 residue가 큰 모드들만 진동모드로 선택한다. 보통 상용화된 고유치 프로그램에서 제동계수를 5%이하로 설정하고 있으나 여기에서는 넓은 범위의 모드를 포함하기 위해서 제동계수를 10% 이하로 설정하고 시정수를 2초로 제한하였다.

이 조건으로 전체 계통의 동일한 모드에 대해서 참여지역을 구분하고, 저주파진동 측면에서 결합의 정도를 파악할 수 있다. 예를 들면 울진지역과 영광지역에 동일한 모드 λ_i 가

존재할 때, 이 residue를 분석하면 서로 관계를 파악할 수 있고, 또한 전체 계통으로 확대하여 계통에 발생하는 진동을 구분할 수 있다.

Prony 법의 응용에서 진동모드만 중요한 변수가 아니다. 신호에서 그 모드가 차지하는 비중, 즉 residue도 중요한 변수가 되므로 이를 계산해서 모드의 중요성을 파악해야 한다.

V. 적용 결과

5.1. 시험함수

전 절에서 제안한 파라미터 추정과 진동모드 특성을 확인하기 위하여 식 (20)과 같은 지수감쇠 정현파함수를 시험함수로 정의한다. 두 개의 지수감쇠 정현파함수로 이루어진 시험함수는 제동계수 α 가 각각 0.10, 0.25이고 주파수 f 가 4.15, 6.28[rad/sec]이며 신호의 크기는 각각 3.0, 5.0을 가지고 있다. 이 함수에서 위상차가 서로 180°가 되도록 위상각을 각각 $\phi = \pi/3$ 와 $\phi = 4\pi/3$ 로 설정하고, 평균 0, 표준편차와 분산이 1인 랜덤잡음의 5%를 부가한 후, 시간응답을 구하여 그림 1에 나타내었다. Prony 법을 적용하기 위하여 샘플링 한 이산 신호의 구간 간격은 0.1초로 설정하고 시간 구간은 관심 있는 저주파진동의 최소 주파수인 0.2Hz를 기준으로 2주기를 갖도록 10초 동안 해석하였다. 그림 1에서 a , b 는 각각 위상 $\phi = \pi/3$, $\phi = 4\pi/3$ 일 때 시간응답으로 각 신호에 대해서 파라미터를 추정한 결과는 표 1에 나타내었다.

$$y_t = \sum_{i=1}^2 A_i e^{-\alpha_i t} \sin(\omega_i t + \phi) \quad (20)$$

$$\alpha_1 = 0.10, \quad A_1 = 3.0, \quad \omega_1 = 4.15$$

$$\alpha_2 = 0.25, \quad A_2 = 5.0, \quad \omega_2 = 6.28$$

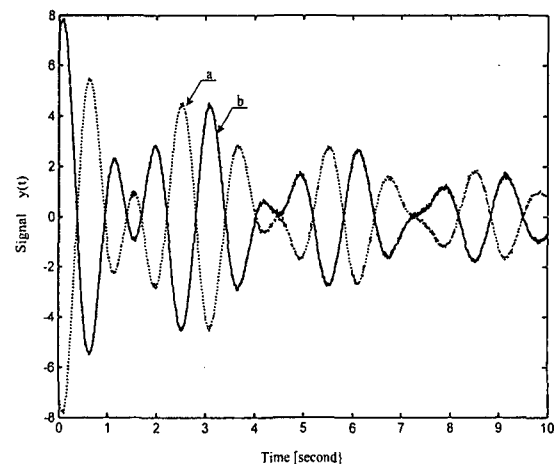


그림 1 시험함수의 시간응답
Fig. 1 Time response of test function

표 1 시험함수의 파라미터 추정 결과

Table 1 Estimated parameter of test function

No	Mode		ζ	f [Hz]	Ai	angle [deg]	Ai [pu]	%A
	Real	Imag						
1	-0.2471	6.2794	3.93	0.99	4.9787	-29.69	1.00	0.62
	-0.1005	4.1509	2.42	0.66	3.0081	-29.95	0.60	0.37
2	-0.2496	6.2771	3.97	0.99	5.0037	150.61	1.00	0.62
	-0.0989	4.1490	2.38	0.66	2.9789	150.21	0.59	0.37

표 1에서 ζ 와 f 는 각각 제동계수와 주파수를 의미하고 $|A_i|$, $angle$ 은 각각 신호 residue 크기와 위상각을 의미한다. 그리고 %A는 식 (16)에서 정의한 상대적 residue를 의미하고, 이것은 신호의 진동모드들 중에서 특정 모드가 차지하는 상대적인 비중을 나타낸다. 표에는 식 (17)-(19)에 있는 진동모드 선택기준인 조건 1-3을 만족하고 있는 모드들을 나타내었다.

Prony 법에 의한 파라미터 추정 결과와 초기에 주어진 정확한 파라미터를 비교한다. 표에서 추정된 모드들과 식 (20)에 주어진 정확한 모드들은 상대오차가 모두 5%이내에 존재한다. 예를 들면, 모드 0.99Hz의 정확한 값은 $-0.25+j6.28$ 이고 추정된 값은 $-0.2471+j6.2794$ 로 상대오차는 다음과 같이 계산한다.

$$\text{실수부 상대오차 } \%E = \frac{0.25 - 0.2471}{0.25} \times 100 = 1.16\%$$

즉 오차가 주어진 랜덤잡음 범위 5% 이내에 존재하므로 정확하게 모드를 추정하고 있음을 알 수 있다. 나머지 파라미터에 대해서 모두 동일하게 해석할 수 있는데, 신호 a에서 크기 A_1 과 A_2 는 각각 3.001(0.02%), 4.978(0.44%)로 추정되고 신호 b에서는 각각 5.003(0.06%), 2.978(0.44%)로 계산하여 오차율이 모두 5% 이내에 존재하여 랜덤 잡음의 부가된 신호 보다 작으므로 정확하게 추정하였음을 알 수 있다. 그리고 residue의 위상각도 서로 180° 위상차로 동요하고 있어 그림 1의 결과와 일치함을 확인할 수 있다.

만일 계통에서 얻은 임의의 신호가 그림 1과 같이 서로 180° 위상차로 동요하면 이들 모드는 지역간 모드라 구분할 수 있다. 표 1에 나타난 신호 residue의 위상각은 각각 -29.69° , 150.61° 로 정확하게 180° 위상차가 발생하므로 신호에서 지역간 모드를 구분할 수 있다.

5.2. 한전 계통에 적용

(가) 2003년 한전계통과 고유치해석

이 논문에서는 223기 발전기와 947 모선으로 구성되어 있는 총 부하 43,465MW인 2003년 침두부하 시 한전 계통데이터에 PSS/E에서 얻은 시간영역데이터에 Prony 법을 적용하여 파라미터를 추정하였다. 한전계통의 간단한 계통도는 그림 2에 나타나있다.

한전 계통에 대한 고유치 해석 결과는 표 2에 나타나 있다. 표에서 IM과 LM은 각각 지역간 모드와 지역모드를 의

미하고 SPF는 속도참여율의 의미한다. 고유치 해석 결과, 저주파 진동문제가 심각하게 나타나고 있는데, 이것은 이용한 데이터가 2003년에 대한 예상 데이터이고, PSS가 투입되어 있지 않는 상태이기 때문에 나타난 결과로 실제와는 차이가 있을 수 있다.

선형해석의 우고유벡터 분석에서 가장 제동계수가 작은 모드 1은 지역간 모드이고, 나머지 모드는 지역모드로 판명되었다. 모드 1은 영광-고리-울성을 축으로 하는 남쪽 발전기들과 울진-보령-태안을 축으로 하는 북쪽 발전기들이 서로 진동하고 있다[그림 5].

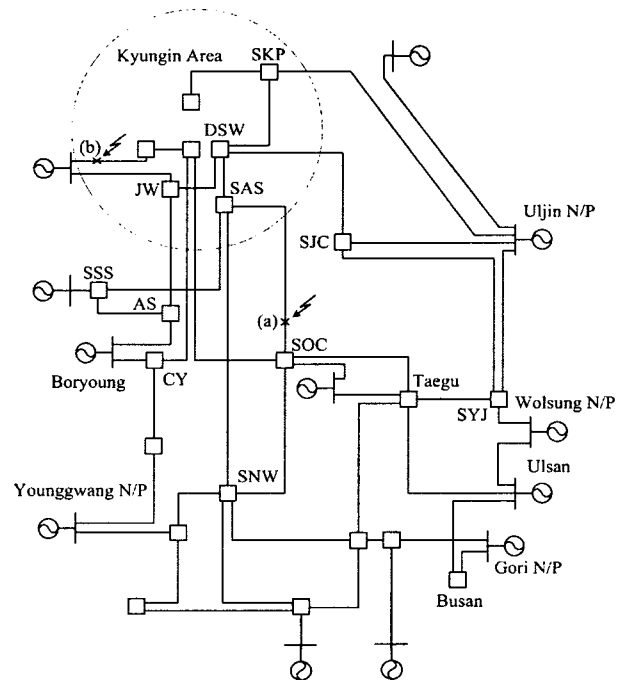


그림 2 한전계통의 간단한 계통도. Fig. 2 Simplified diagram of KEPCO systems

표 2 2003년 한전계통의 고유치

Table 2 Eigenvalues of KEPCO systems in the year 2003

No	Eigenvalue		ζ	f [Hz]	SPF	
	Real	Imag				
1	-0.10539	4.37994	2.4055	0.6971	영광,고리,울진	IM
2	-0.23325	5.45228	4.2741	0.8678	울진	LM
3	-0.28412	6.23786	4.5500	0.9928	한중	LM
4	-0.23578	6.86665	3.4317	1.0929	분당	LM
5	-0.47489	10.0117	4.7380	1.5934	동해	LM
6	-0.28850	10.3028	2.7991	1.6397	평택	LM

(나) 지역 모드 추정

Prony 법을 적용하여 2003년 한전계통의 파라미터를 추정하고, 그 결과를 표 3-6에 나타내었다. 표에서 파라미터 ζ , f 는 각각 제동계수와 주파수를 의미하고, $|A_i|$, $angle$ 은 각각 residue의 크기와 위상각을 의미한다. 그리고 %A는

상대적 residue로 진동모드들의 residue를 정규화 한 값이다. 그리고 표 3에 나타난 결과에서 진동모드 선별기준에 맞는 모드는 "o"로 나타내고, 맞지 않으나 선별조건에 맞는 모드들과 비교하기 위해서 나타낸 모드는 "x"로 표시하였다.

먼저 지역모드에 대한 파라미터 추정에 대해 기술한다. 표 2에 선형해석 결과에서 나타난 것과 같이 2003년 한전계통의 주요 지역모드는 모드 2 ~ 모드 6이다. 이 모드들 중에서 모드 2, 모드 3과 관련된 울진 3G와 한중 9G의 출력에 대한 시간응답에서 파라미터를 추정하였다. 초기 과도상태의 영향을 제거하기 위하여 3초부터 10초 동안 샘플링 한 데이터에 Prony 법을 적용하여 결과를 도출하였다. 데이터 샘플링을 3초에서 시작한 것은 1.0Hz 이상의 저주파진동이 초기에 외란에 의해서 영향을 받아 왜곡되는 현상을 제거하기 위함이다.

울진 3G에서 모드 U1의 %A가 90%를 차지하고 있으므로 울진 3G의 출력은 모드 U1이 지배하고 있다고 생각할 수 있고 따라서 이 모드를 울진 지역모드로 판단할 수 있다. 그리고 한중 9G에서는 신호의 residue가 매우 작는데, 이것은 발전기 출력이 작기 때문에 동요하는 진동도 작고 따라서 residue도 작은 값을 갖는다. 저주파 진동모드는 신호의 크기와 무관하게 발생한다. 한중 9G에서 모드 H1과 H2의 %A가 각각 41%, 35%를 차지하고 있어 이들 두 모드가 한중 9G의 출력을 지배하고 있음을 알 수 있다. 한편 선형해석결과에서 모드 H2는 지역간 모드(표 2의 모드 1)로 판명되었는데, 출력의 크기가 작은 한중 발전기에 크게 참여하고 있다. 결과적으로 신호가 작은 발전기는 상대적으로 지역간모드에 큰 영향을 받음을 알 수 있고, 이것은 선형해석에서 발전기의 제동특성에 우고유벡터의 크기보다는 속도참여율이 더 민감하다는 사실과 일치한다. 즉 표 2의 모드 3(모드 H1)의 우고유벡터 결과에서 한중 9G가 지배적으로 큰 값을 가지나 속도참여율에서는 고리 1G가 더 큰 값을 가진다.

또한 모드 U3는 울진 3G의 출력에서 추정된 모드로 실수부가 양수를 가지고 있어 심각한 문제로 생각할 수 있으나 %A가 매우 작은 값을 가지고 있어 선별조건을 만족하지 못하므로 무시할 수 있다. 그러나 주파수를 비교하면 이 모드는 한중 모드 H1이 울진 3G에 포함되어 추정되었다고 생각할 수 있다. 반대로 모드 H3는 울진 지역모드(U1)가 한중 9G의 출력에 포함된 모드로 생각할 수 있다.

결과적으로 식 (4)에서와 같이 계통의 한 발전기의 진동은 어떤 형태든지 다른 지역발전기의 진동에 참여하고 있음을 알 수 있다. 결국 계통의 모든 지역모드도 다른 발전기의 진동에 참여하고 있으나 전술한 것과 같이 residue가 작아서 이를 무시할 수 있다. 또한 진동모드는 허수부보다 실수부가 크게 작으므로 residue가 작은 경우, 허수부 보다는 실수부가 더 민감하게 변화해서 실수부에 상당한 오차를 수반할 수 있다.

지금까지는 확실한 지역모드를 가지고 있는 발전기에 대해서 해석을 하였다. 다음은 확실하게 지역모드를 가지고 있지 않으나 지역간모드에 크게 참여하고 있는 발전기인 고리 1G에 대해서 분석한다. 표 3에는 고리 1G 출력에 대한 파라미터 추정 결과를 포함하고 있는데, Prony 법의 진동모드 선택 조건 1-3을 만족하지 않으나 진동하고 있는 모드들도 함께 나타내었다. 울진이나 한중의 결과와 다르게 매우 다양

한 진동 모드가 신호에 포함되어 있으나 이들 모두가 고리 1G에 중요한 파라미터는 아니다. 즉 실제 고리 1G의 추정된 파라미터에서 모드 G1, G2만 조건 1-3을 만족한다. 신호의 상대적 residue %A로부터 모드 G1이 고리 신호의 46%를 차지하고 있고, 지역간 모드인 모드 G2가 17% 정도를 차지하고 있다. 그리고 모드 G3과 모드 G4가 각각 17%, 11%를 차지하고 있어 이들 4개의 모드가 고리지역 신호의 90% 이상을 차지하고 있다. 따라서 신호의 residue에서 이들 4개의 모드를 고리 1G의 주요 모드들로 생각할 수 있으나 모드 G3-G4는 제동계수가 커서 매우 빠르게 감쇠가 일어나 이들을 무시할 수 있다. 결과적으로 고리 발전기에는 모드 G1과 모드 G2가 중요한 모드로 판단할 수 있고 특히 residue가 큰 모드 G1을 지역모드로 판정할 수 있다.

나머지 %A가 작은 진동모드들은 고리 1G에 크게 영향을 주지 않으므로 다른 지역 발전기의 신호로 생각할 수 있다. 선형해석의 면밀한 관찰에서 모드 G2는 지역간 모드로 판명되었고 모드 G3은 울진지역 발전기의 지역모드로 판명되었다. 그리고 모드 G5는 평택지역 발전기의 지역모드로 판명되었으며 모드 G4, G6는 제동계수가 너무 커서 선형해석 결과와 비교할 수 없다. 전술한 바와 같이 전체계통에 중요한 진동모드는 다른 지역 발전기의 진동에 포함되어 있음을 알 수 있다. 다만 출력신호의 상대적 residue %A가 작으면 실수부가 크게 변화할 수 있어 실제 지역모드의 실수부와 크게 차이가 날 수 있다. 이것은 신호에서 차지하는 크기가 작고 모드의 실수부는 크기가 큰 허수부에 비해 민감하게 변화하기 때문이다. 그러므로 %A가 작은 모드의 실수부는 신뢰성이 작다.

그림 3에는 고리 1G 출력 신호와 푸리에(Fourier) 스펙트럼을 나타내고 있고, 그림 4에는 Prony법에서 추정된 파라미터를 이용해서 추정된 신호를 나타낸 그림으로 추정 파라미터가 정확함을 알 수 있다. DFT 결과에서 0.65Hz, 1.0Hz는 근처에 중요 모드가 있음을 알 수 있고, 실수부가 큰 0.86Hz 모드는 나타나지 않고 있다.

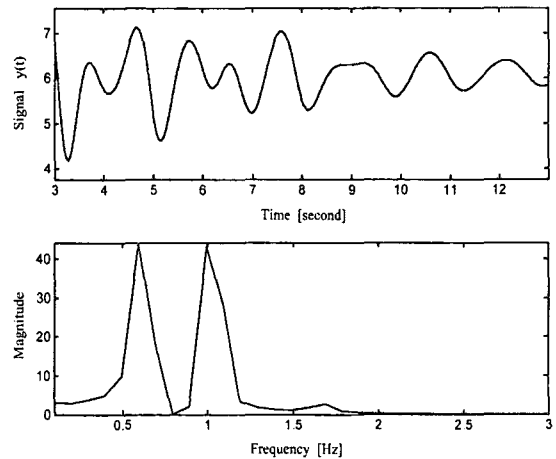


그림 3 고리 1G의 출력과 푸리에 스펙트럼
Fig. 3 Power and Fourier spectrum of Gori 1G

(다) 지역간 모드 추정

지역간 모드를 해석하기 위해서 전 절의 지역모드와 마찬가지로 각 발전기의 출력에 대한 시간응답에서 초기 과도상태를 제거하고 3초부터 10초 동안 샘플링 한 데이터에 Prony 법을 적용하여 파라미터를 추정하였다. 제 3절에서 기술한 것과 같이 신호에서 지역간 모드를 해석할 때는 시각동기화를 해야 하므로 모든 시간은 3초에서 시작하였다.

그림 5에는 선형해석에서 계산한 지역간 모드인 표 1의 모드 1(0.69Hz)에 대한 우고유벡터를 복소평면에 나타내었다. 모드 1의 정규화된 우고유벡터에서 한중 지역발전기가 가장 큰 값(1.0)을 가지고 있으나 속도참여율이 작기 때문에 전체계통에 주는 영향 또한 작다. 따라서 시간응답의 지역간 모드 해석에는 속도참여율이 큰 발전기들을 중심으로 파라미터를 추정하고 저주파진동을 해석하였다.

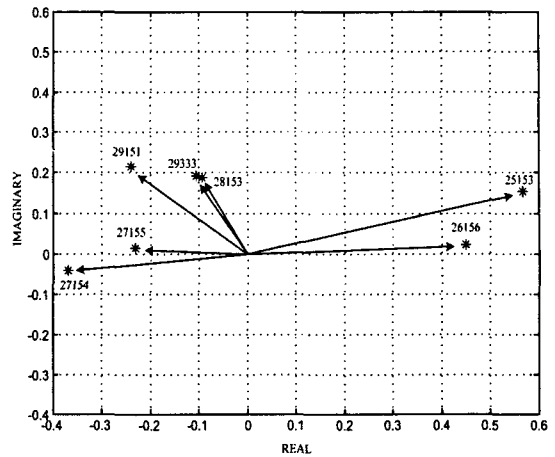


그림 5 지역간모드의 우고유벡터
Fig. 5 Right eigenvector of interarea mode

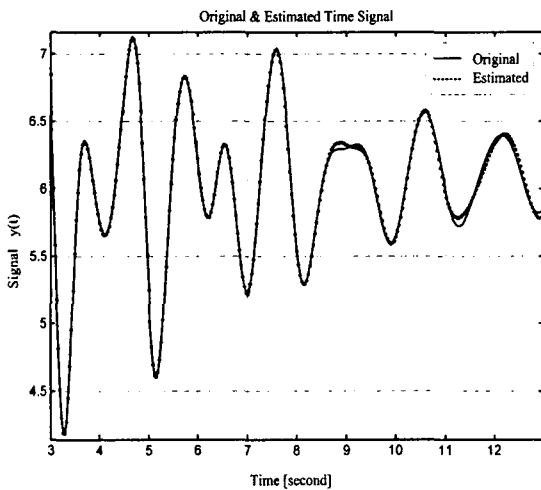


그림 4 출력과 추정된 출력
Fig. 4 Original and estimated power

그림 5의 결과에서 울진(25153)-보령(26156) 지역과 영광(27154-5)-고리(29151)지역 즉 남북으로 분리되어 계통이 진동하고 있음을 알 수 있다.

표 4에는 전 절에서 기술한 지역모드를 계산할 때 얻은 파라미터에서 모드 1(0.69Hz)과 관련된 모드들을 나타내었다. 즉, 각 발전기의 근처 선로에 각각 고장을 모의한 후, Prony 법과 조건 1-3을 적용하여 진동모드를 계산한 것이다. 그림 6에는 출력 신호의 residue를 복소평면에 나타낸 것으로 그림에서 고리(29151), 월성(28153) 지역과 보령(26156) 지역이 서로 진동하고 있고 울진(25153)-영광(27154)이 서로 180° 위상차로 진동하고 있는데 그림 5의 고유벡터와는 다소 차이가 있다.

이것은 특정 지역 발전기에 의해서 지배되는 지역모드와 달리 지역간 모드는 지역간의 발전기들에 의해서 영향을 받기 때문에 각 지역 발전기 근처 고장에 대해서 얻은 파라미터에서는 오차를 수반한다. 즉 시각동기화가 이루어지지 않고 계통의 초기조건이 다르므로 이와 같은 조건에서 신호의 residue로

표 3 지역모드의 파라미터 추정 결과

Table 3 Estimated parameter of local mode

Mode No	Mode		ζ	f [Hz]	A _i	angle [deg]	%A	remark	
	Real	Imag							
U1	-0.4962	5.3027	9.3180	0.8439	4.0514	-161.45	0.9088	o	울진 3G
U2	-0.1287	4.3600	2.9509	0.6939	0.3913	-78.20	0.0878	x	
U3	0.2272	6.2027	-3.6614	0.9871	0.0154	-26.14	0.0035	x	
H1	-0.1772	6.3123	2.8071	1.0046	0.0003	-103.25	0.4110	o	한중 9G
H2	-0.1294	4.3583	2.9697	0.6936	0.0002	-8.61	0.3562	o	
H3	-0.0072	5.1254	0.1407	0.8157	0.0001	56.78	0.1370	o	
H4	-0.5593	7.1840	7.7622	1.1433	0.0000	47.59	0.0959	x	
G1	-0.3867	6.4637	5.9724	1.0287	2.2537	94.67	0.4645	o	고리 1G
G2	-0.1002	4.0869	2.4529	0.6504	0.8290	19.06	0.1709	o	
G3	-0.5023	5.4362	9.2011	0.8652	0.8249	11.74	0.1700	x	
G4	-0.6973	7.5590	9.1858	1.2030	0.5504	-163.33	0.1134	x	
G5	-0.4050	10.6228	3.8100	1.6906	0.2162	-25.04	0.0446	x	
G6	-0.7947	9.8374	8.0520	1.5656	0.1280	107.42	0.0264	x	
G7	-0.3838	13.2109	2.9044	2.1025	0.0274	-6.65	0.0056	x	
G8	-0.5757	14.8895	3.8638	2.3697	0.0223	-105.23	0.0046	x	

지역간 모드를 선택하면 오차를 수반함을 알 수 있다. 표 5에는 비교적 한전계통의 중심선로인 그림 2에서 (a) 지점의 선로 4900-6600에 고장을 모의하여 얻은 각 발전기의 시간응답에서 파라미터를 추정한 것이다. 표 4에서 나타난 값보다 작은 residue를 가지고 있는데, 이것은 각 발전기 측면에서 고장지점이 멀리 있기 때문에 신호의 크기가 작고 residue도 작다. 영광 5G(27155)를 제외하면 울진-보령 발전기들과 다른 지역발전기들이 서로 진동하고 있음을 알 수 있다. 고장 위치에 따라서 각 발전기의 시간응답이 다르게 나타나 신호 residue의 크기를 좌우하므로 그림 5에 크기는 고장위치에서 다르게 나타난다.

한편 표에서 영광(27154-5), 울진(25153), 보령(26156) 발전기는 residue 크기가 작을 뿐만 아니라 상대적 residue도 작아서 조건 3을 만족하지 못한다. 이것은 이들 발전기의 출력신호에서 지역간 모드가 차지하는 비중이 작다는 것을 의미한다. 결과적으로 상대적 residue %A가 작으므로 영광

(27154-5), 울진(25153), 보령(26156) 발전기에서 추정된 지역간 모드는 오차가 포함되어 있어 신뢰성이 작다. 그러나 %A가 큰 고리(29151), 월성(28153), 울산(29333) 발전기들은 우고유벡터의 결과와 유사하게 서로 비슷한 위상차를 가지고 진동하고 있음을 알 수 있다.

표 6은 한전 부하가 집중되어있는 경인지역에서 서인천 발전소 근처 선로인 그림 2의 (b)지점 선로 3350-3360에 3상 단락 고장을 모의하고 파라미터를 추정하였다. 선로에 고장을 모의할 때, 임계상태에 근접하도록 고장제거시간을 크게 설정하여 그림 7에 나타난 결과보다 큰 값을 가지고 있다. 울진-보령과 다른 발전기들이 일정한 위상차를 가지고 진동하고 있어 상대적 residue도 모두 큰 값을 가지고 있다. 즉 대부분의 발전기들이 지역간 모드에 지배적인 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 표에 나타난 결과들은 모두 조건 1-3을 만족하고 있고 선형해석의 결과와 유사하게 지역간모드가 남북으로 진동하고 있음을 알 수 있다.

표 4 지역간모드의 파라미터 추정 결과
Table 4 Estimated parameter of interarea mode

Generator No	Mode		ζ	f [Hz]	A _i	angle [deg]	%A	remark
	Real	Imag						
29151	-0.1002	4.0869	2.4529	0.6504	0.8290	19.06	0.1709	고리 1G
28153	-0.0703	4.0898	1.7197	0.6509	0.5717	4.15	0.2412	월성 3G
29333	-0.1506	4.1507	3.6263	0.6606	0.2520	81.13	0.2735	울산 S2
27154	-0.1181	4.2562	2.7741	0.6774	0.2253	107.96	0.1398	영광 4G
27155	-0.0721	4.2729	1.6872	0.6800	0.1194	78.05	0.1194	영광 5G
25153	-0.1287	4.3600	2.9509	0.6939	0.3913	-78.20	0.0878	울진 3G
26156	-0.2171	4.4591	4.8642	0.7097	0.1510	-168.59	0.2051	보령 6G

표 5 지역간모드의 파라미터 추정 결과(line 4900-6600)
Table 5 Estimated parameter of interarea mode(line 4900-6600)

Generator No	Mode		ζ	f [Hz]	A _i	angle [deg]	%A	remark
	Real	Imag						
29151	-0.2821	4.4342	6.3490	0.7057	0.2457	77.83	0.4926	고리 1G
28153	-0.2386	4.3662	5.4564	0.6949	0.1544	92.66	0.3043	월성 3G
29333	-0.1981	4.3832	4.5148	0.6976	0.0455	81.29	0.2611	울산 G2
27154	-0.0517	4.2718	1.2103	0.6798	0.0368	56.02	0.0227	영광 4G
27155	-0.0131	4.5997	0.2856	0.7320	0.0253	-95.65	0.0829	영광 5G
25153	-0.0109	4.2286	0.2591	0.6730	0.0336	-105.83	0.0601	울진 3G
26156	0.0095	4.5046	0.2123	0.7169	0.0288	-119.47	0.0791	보령 6G

표 6 지역간모드의 파라미터 추정 결과(line 3350-3360)
Table 6 Estimated parameter of interarea mode(line 3350-3360)

Generator No	Mode		ζ	f [Hz]	Ai	angle [deg]	%A	remark
	Real	Imag						
29151	-0.1987	4.1939	4.7345	0.6674	0.7178	-45.51	0.5736	고리 1G
28153	-0.1666	4.1899	3.9752	0.6668	0.5104	-53.08	0.4434	월성 3G
29333	-0.1877	4.2176	4.4476	0.6712	0.0713	-66.88	0.4714	울산 G2
27154	-0.1830	4.2383	4.3145	0.6745	0.8086	-70.74	0.6184	영광 4G
27155	-0.1973	4.2548	4.6331	0.6771	0.6669	-99.45	0.7181	영광 5G
25153	-0.1982	4.2745	4.6334	0.6803	1.1520	101.27	0.5225	울진 3G
26156	-0.1988	4.2305	4.6941	0.6733	0.3380	164.83	0.5347	보령 6G

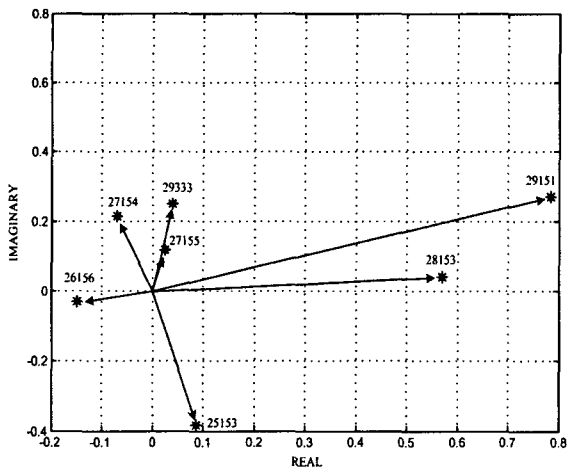


그림 6 지역간 모드의 residue
Fig. 6 Residue of interarea mode

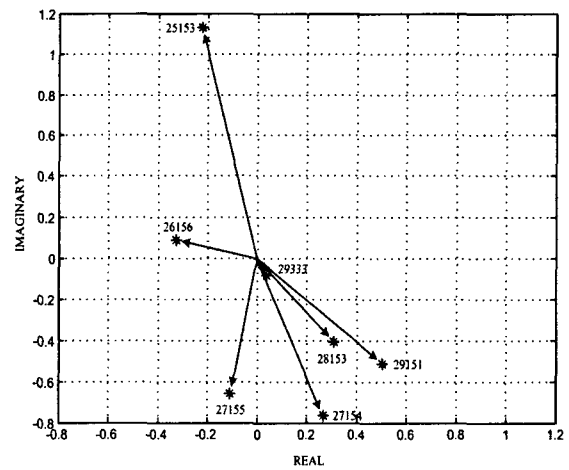


그림 8 지역간 모드의 residue(line 3350-3360)
Fig. 8 Residue of interarea mode(line 3350-3360)

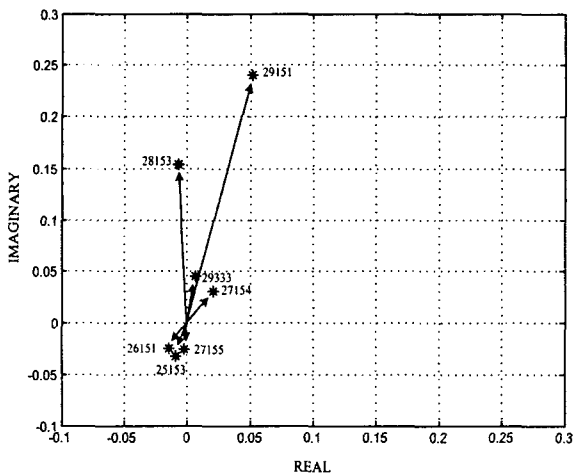


그림 7 지역간 모드의 residue(line 4900-6600)
Fig. 7 Residue of interarea mode(line 4900-6600)

한편 시간영역에서의 파라미터에 의한 진동 모드해석 결과는 선형해석에서 모드해석 결과와 정확하게 같을 수는 없다. 선형해석에서는 우고유벡터에 의해서 모드해석이 수행되지만 시간영역에서는 좌우고유벡터 뿐만 아니라 입력력의 영향도 포함하고 있는 residue에 의해서 모드해석이 수행되기 때문이다.

5.3. 결과

전력계통의 저주파진동을 해석하기 위하여 시간응답에 Prony 법을 적용한 결과를 다음과 같이 요약하였다.

(1) 신호의 상대적 residue %A의 크기를 비교해서 ghost 모드를 제거하고 계통에 중요한 영향을 주는 모드를 구분할 수 있다. 신호에서 상대적 residue %A가 작은 모드는 쉽게 변화하여 오차를 수반할 수 있으므로 저주파진동 해석에서 시간영역의 파라미터를 추정할 때, %A가 작은 파라미터는 모드의 진동여부나 실수부의 크기에 상관없이 제외하고 계통해석을 해야 한다. 그러나 허수부는 실수부에 비해 크기가 크기 때문에 실수부에 비하여 상대적으로 크게

변화하지 않으므로 다른 발전기의 모드를 판별할 때, 이용할 수 있다.

(2) 한 지역의 출력신호에서 다른 모드에 비해서 %A가 지배적으로 큰 모드가 존재하면 지역모드로 판별한다. 그리고 다른 지역모드와 %A가 비슷하면 지역간 모드로 판별한다. 이것은 선형해석에서 우고유벡터와 비슷하나 residue는 좌우고유벡터 뿐만 아니라 입출력의 영향도 포함하고 있다. 모드를 판별할 때, 고장 위치에 따라서 한 발전기의 출력 신호의 크기는 각각 다르므로 신호의 residue도 다르게 된다. 그러므로 지역간 모드에서 고장 위치에 따라서 다른 결과가 계산될 수 있어 크기보다는 위상각이 중요한 요소가 된다. 즉 발전기 저주파 진동 측면에서 어떤 형태로 그룹핑이 되는지 위상각을 관찰하면 알 수 있다. 그리고 지역간 모드를 판단하는데 있어서 각 발전기 출력신호에 지역간 모드가 차지하는 상대적 residue가 클 때, 가장 신뢰성 있는 결과도 출된다.

(3) 계통의 지배적인 모드는 다른 신호에 포함된다. 그러므로 계통의 몇 군데 중요 발전기의 출력에서 계통 전체의 주요 진동모드를 파악할 수 있다. 전술한 %A가 작은 모드는 해당 발전기 측면에서 무시할 수 있는 모드이나 계통 전체에서는 무시할 수 없다. 왜냐하면 한 발전기의 진동모드는 어떤 형태로든지 다른 발전기에 영향을 끼치므로 비록 %A가 작은 모드일지라도 특정 발전기에서는 중요 모드가 될 수 있기 때문이다. 따라서 몇 군데의 시간영역데이터에서 계통전체의 진동모드를 감지할 수 있는데, 이것은 실시간계통 해석 측면에서 매우 중요한 일이 될 것이다.

VI. 결 론

이 논문에서는 선형해석에서 모드와 시간영역에서 복소 모드 사이에 관계로부터 시간영역에서 저주파진동 해석을 선형해석과 유사하게 할 수 있는 방법을 제시하였다. 시간영역데이터에 Prony 법을 적용하여 계통해석에 필요한 파라미터를 추정하고, 추정된 파라미터에서 상대적 residue를 정의하고, 각 발전기에 영향을 주는 진동모드를 선택하는 기준을 제시하였다.

상대적 residue와 진동모드 선택 기준으로부터 중요모드를 판별하였으며, 추정된 파라미터에서 저주파진동해석에 필요한 지역모드와 지역간모드를 구분하였다. 또한 전체 계통에서 지배적인 진동모드는 다른 지역 발전기의 신호에 포함되어 나타남을 확인하였다. 이로부터 전체 계통에 지배적 진동모드는 몇 개의 중요 발전기의 출력에서 파악할 수 있는데, 이것은 실시간계통 해석 측면에서 매우 중요한 일이 될 것이다.

이 논문에 적용된 모든 알고리즘은 한전계통에 적용하였으며, 그 결과를 선형해석 결과와 비교하여 알고리즘의 정확성을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] D. N. Kosterev, C. W. Taylor and W. A. Mittelstadt, "Model Validation for the August 10, 1996 WSCC System Outage," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 14, No. 3, pp. 967-979, Aug. 1999.
- [2] K. Morison, S. Yirga and P. Kundur, discussion of reference 1.
- [3] J. F. Hauer, discussion of reference 1.
- [4] J. F. Hauer, D. Trudnowski, G. Rogers, B. Mittelstadt, W. Litzemberger, J. Johnson, "Keeping an eye on power system dynamics", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 10, pp. 50-54, Oct. 1997.
- [5] J. F. Hauer, C. J. Demeure, L. L. Scharf, "Initial Results in Prony Analysis of Power System Response Signals," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 5, pp.80-89, Feb. 1990.
- [6] D. J. Trudnowski, J. M. Johnson, J. F. Hauer, "Making Prony Analysis More Accurate using Multiple Signals," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 14, pp.226-231, Feb. 1999.
- [7] J. W. Pierre, D. J. Trudnowski, M. K. Donnelly, "Initial Results in Electromechanical Mode Identification from Ambient Data," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 12, pp.1245-1251. Aug. 1997.
- [8] K. P. Poon, K. C. Lee, "Analysis of Transient Stability Swings in Large Interconnected Power Systems by Fourier Transformation," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 3, pp.1573-1579, Nov. 1988.
- [9] D. R. Ostojic, "Spectral Monitoring of Power System Dynamic Performances," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 8, pp.445-451, May. 1993.
- [10] Peter O'Shea, "The Use of Sliding Spectral Windows for Parameter Estimation in Power System Disturbance Monitoring," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 15, pp.1261-1267, Nov. 1990.
- [11] J. F. Hauer, "Application of Prony Analysis to The Determination of Modal Content and Equivalent Models for Measured Power System Response," IEEE Trans. on Power Systems, vol.6, pp.1062-1068, Aug. 1991.
- [12] D. J. Trudnowski, "Order Reduction of Large-scale Linear Oscillatory System Models," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 9, pp.451-458, Feb. 1994.
- [13] D. J. Trudnowski, 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, pp.118-126, 1991.
- [14] A. Hasanovic, A. Feliachi, N. B. Bhatt, A. G. DeGroff, "Practical Robust PSS Design through Identification of Low-order Transfer Functions,"

IEEE Trans. on Power Systems, vol. 19, pp.1492-1500, Aug. 2004.

[15] J. H. Hong, J. K. Park, "A Time-domain Approach to Transmission Network Equivalents via Prony Analysis for Electromagnetic Transients Analysis," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 10, pp. 1789-1796, Nov. 1995.

[16] C. E. Grund, J. J. Paserba, J. F. Hauer, S. Nilsson, "Comparison of Prony and Eigenanalysis for Power System Control Design," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 8, Aug. 1993.

[17] J. J. Sanchez-Gasca, J. H. Chow, "Performance Comparison of Three Identification Methods for The Analysis of Electromechanical Oscillations," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 14, pp.995-1002, Aug. 1999.

[18] M. K. Donnelly, J. R. Smith, R. M. Johnson, J. F. Hauer, R. W. Brush, R. Adapa, "Control of a Dynamic Brake to Reduce Turbine-Generator Shaft Transient Torques," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 8, pp.67-73, Feb. 1993.

[19] K. E. Bollinger, W. E. Norum, "Time Series Identification of Interarea and Local Generator Resonant Modes," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 10, pp.273-279, Feb. 1995.

[20] D. Ruiz-Vega, A. R. Messina, M. Pavella, "Online Assessment and Control of Transient Oscillations Damping," IEEE Trans. on Power Systems, vol.19, pp.1038-1047, May 2004.

[21] L. L. Scharf, Statistical Signal Processing: Detection, Estimation, and Time Series Analysis, Addison-Wesley Publishing Company, New York, 1991.

[22] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, Inc., New York, 1994.

저 자 소 개



심관식(沈冠植)

1965년 8월 24일생. 1991년 전남대학교 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1997년~2004년 서남대 전기전자공학과 조교수
E-mail : k2sim@hanafos.com



남해곤(南海鯤)

1950년 10월 16일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 Univ. of Houston 졸업(석사). 1986년 Univ. of Texas at Austin 졸업(공학). 1975년-1978년 한국전력 원자력건설부 근무. 1986년-1988년 한국전기연구소 근무. 1988년-현재 전남대 전기공학과 교수
Tel : 062-530-1745, Fax : 062-530-1749
E-mail : hknam@chonnam.chonnam.ac.kr



김용구(金容求)

1969년 12월 29일생. 1995년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 목포기능대학 전기계측제어과 재직
Tel : 061-450-7292, Fax : 061-450-7294
E-mail : kimyg69@hanmail.net