

저주파진동 해석을 위한 다구간 파라미터 추정 방법

A Parameter Estimation Method of Multiple Time Interval for Low Frequency Oscillation Analysis

심관식* · 김상태** · 최준호* · 남해곤* · 안선주†
(Kwan-Shik Shim · Sang-Tae Kim · Joon-Ho Choi · Hae-Kon Nam · Seon-Ju Ahn)

Abstract - In this paper, we propose a new parameter estimation method that can deal with the data of multiple time intervals simultaneously. If there are common modes in the multiple time intervals, it is possible to create a new polynomial by summing the coefficients of the prediction error polynomials of each time interval. By calculating the roots of the new polynomial, it is possible to estimate the common modes that exist in each time interval. The accuracy of the proposed parameter estimation method has been proven by using appropriate test signals.

Key Words : Oscillation mode, Parameter estimation, Multiple interval, Prony method, Prediction error polynomial

1. 서론

대규모 전력계통은 발전기와 여자기, 터빈을 비롯한 다양한 종류의 제어기로 구성되어 있는데, 항상 부하변동이나 선로고장과 같은 외란에 노출되어 있다. 이와 같은 외란에 대해서 안정적으로 전력을 공급하기 위하여 터빈/조속기 시스템이나 여자시스템의 적절한 제어동작을 필요로 한다. 대규모 전력계통에서는 각 발전기의 진동과 함께 광역의 저주파진동이 계통의 안전운전을 위협할 수 있다. 그러므로 저주파진동모드를 정확히 추정하는 것은 계통운용에 있어서 하나의 중요한 요소이다.

전력계통에서 발생하는 중요 진동 모드는 주로 2.5Hz 이하의 저주파 영역에서 발생하는데, 특히 광역진동 모드는 1.0Hz 이하에서 발생한다. 지역모드는 몇 개의 발전기들이 진동하지만 광역모드는 많은 발전기들이 동시에 진동한다. 그러므로 계통의 고유한 진동 특성을 반영하여 진동 모드를 추정해야 한다. 지금까지 전력계통에서 진동 모드해석은 선형모델에 기반을 둔 고유치 해석에 의하여 주로 수행되고 있다 [1]. 그러나 선형모델을 이용한 고유치해석은 급변하는 계통환경을 정확히 반영하지 못하고, 모델링 오류 가능성 등 한계가 있다.

1990년도 이후 디지털 기술과 통신네트워크 기술의 급속한 발달과 함께 전력계통에서는 실측데이터에서 진동모드를

추정하기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 전력계통해석에 적용된 저주파진동 파라미터 추정법은 데이터의 샘플링 간격과 잡음에 대해서 민감하다 [2]. 그러므로 정확한 진동 모드를 추정하기 위해서는 많은 경험과 노력이 필요하다.

지금까지 취득한 계통 데이터에서 진동모드를 추정하기 위한 목적으로 다양한 알고리즘들이 제안되었다. 계통 해석에 가장 많이 적용된 알고리즘으로 Prony 해석이 있다. 참고 문헌 [3]에서 전력계통의 진동모드 계산에 처음 적용된 이래로 여러 개의 신호를 이용해서 한 모드를 추정하는 방법[4], Wiener-Hopf 예측 방정식으로부터 모드를 추정하는 방법[5] 등이 제안되었다. 또한 신호의 residue로 계통의 등가 모델을 구하여 계통을 축약하는 방법[6-7]과 축약된 계통으로부터 PSS 제어를 설계하는 방법[8-9], 네트워크 등가모델링[10], 선형해석 결과와 비교 평가[11-12] 등이 제안되었다. 이 밖에도 고장지점계산이나 계통의 정확한 주파수 계산 등 매우 다양한 계통의 분야에 적용되었으며, 과도안정도 평가[13] 등에도 적용되고 있다.

본 논문은 다양한 시간구간을 동시에 고려할 수 있는 다구간(multiple time interval) 파라미터 추정 방법에 대해서 기술하고 있다. 계측된 시계열 데이터에서 선형예측방정식을 얻을 수 있다. 그리고 선형예측방정식을 풀면 예측오차다항식의 계수들을 얻을 수 있다. 만일 차수가 같은 다수의 다항식에 동일한 근이 포함되어 있다면, 이 다항식들의 동류항 계수들을 합한 새로운 다항식에도 동일한 근이 포함되어 있다. 그러므로 다수의 시계열 데이터에서 얻은 예측오차다항식들의 차수가 같으면 각 다항식의 계수들을 합하여 새로운 선형예측다항식을 얻을 수 있다.

계통에서 취득한 신호에서 동일한 진동모드가 포함되어 있다면 일정하게 분리한 각 시간구간에도 동일한 진동모드가 포함되어 있다. 그러므로 각 시간구간에서의 예측오차다항식의 차수를 동일하게 선택하고, 각각의 예측오차다항식의 계수를 합하면 하나의 예측오차다항식을 형성할 수 있다.

* Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University, Korea

** Institute of Electric Power IT, KEPCO KDN Co. Ltd, Korea

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University, Korea

E-mail : sjahn@jnu.ac.kr

Received : November 15, 2013; Accepted : June 24, 2014

이와 같은 예측오차다항식은 다수의 시간구간을 고려한 다구간 예측오차다항식이다. 이 방정식의 해는 다수의 시간구간에 포함된 진동모드이므로 한 번의 미지수 계산에서 다수의 시간구간에 동시에 포함된 진동모드를 추정할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 신호와 modal decomposition에 대해서 기술하고, 제 3장에서는 다구간 예측오차다항식에 대해서 기술한다. 그리고 제 4장에서는 본 논문에서 제안한 알고리즘을 시험함수에 적용한 결과를 기술하며, 제 5장에서는 결론을 기술한다.

2. 신호와 Modal Decomposition

측정된 이산 신호가 n -개의 지수감쇠코사인함수의 합으로 구성되어 있다면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_t = \sum_{i=1}^n A_i e^{\alpha_i t} \cos(\omega_i t + \phi_i), \quad t=0,1, \dots, N-1 \quad (1)$$

여기에서 파라미터 A_i 와 ϕ_i 는 i 번째 코사인함수의 진폭과 위상이고, α_i 와 ω_i 는 각각 제동계수와 주파수이다. 그리고 N 은 측정된 신호의 개수이다.

제동계수와 주파수를 각각 실수부와 허수부에 갖는 복소모드를 $\lambda_i = \alpha_i + j\omega_i$ 라 하고, 샘플링 주기를 T 라 할 때, 새로운 복소모드 z_i 를 다음과 같이 정의한다.

$$z_i = e^{\lambda_i T} \quad (2)$$

만일 행렬 V 가 복소모드 z_i 의 거듭제곱을 행렬요소 가지고 있는 Vandermonde 행렬이라 하면, 예측한 이산신호는 다음과 같이 분해할 수 있다.

$$y_t = VB \quad (3)$$

여기에서 Vandermonde 행렬 V 의 차수는 $N \times p$ 이고, 벡터 B 의 차수는 $p \times 1$ 이다. 그러므로 등간격주기 T 로 샘플링 한 이산신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(kT) = \sum_{i=1}^p B_i z_i^k \quad (4)$$

이산신호는 임펄스들의 집합으로 표현되어 있으므로 샘플링구간의 크기가 너무 작으면 중요모드에 대한 정수배의 모드들이 계산될 수 있다. 반면에 샘플링구간의 크기가 너무 크면, 스펙트럼이 중첩되는 aliasing 현상이 발생한다. 또한 시간구간이 너무 크면 선형예측행렬의 차수가 커져서 계산하는데 부담이 될 뿐만 아니라 부정확한 결과를 산출할 수 있다. 그러므로 이산신호에서 파라미터를 추정할 때, 적절한 샘플링구간과 시간구간 선택은 매우 중요하다.

3. 다구간 예측오차 다항식

3.1 예측오차 다항식

계측된 이산신호 y_t 의 ARMA(autoregressive moving average) 모델은 다음과 같은 차분방정식으로 표현할 수 있다 [14].

$$\sum_{n=0}^p a_n y_{t-n} = \sum_{n=0}^p b_n u_{t-n}, \quad a_0 = 1 \quad (5)$$

입력신호 u_t 가 임펄스 신호라 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(z)y_t = B(z)\delta_t \quad (6)$$

이 식으로부터 a_i 를 미지수로 하는 선형예측방정식을 얻을 수 있고, 다음과 같은 공분산방정식(linear prediction covariance equation)을 얻을 수 있다.

$$Ya = 0 \quad (7)$$

여기에서 p 를 미지수의 개수라 하면, 행렬 Y 의 차수는 $N \times p$ 이고 a 의 차수는 $p \times 1$ 이다. 선형예측의 LMMSE(linear minimum mean-squared error) 추정으로부터 미지수를 계수로 하는 예측오차다항식(prediction error polynomial)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(z) = \sum_{i=0}^p a_i z^{-i} = 0, \quad a_0 = 1 \quad (8)$$

이와 같은 예측오차다항식의 해를 계산하여 복소모드를 추정할 수 있다.

3.2 다구간 예측오차 다항식

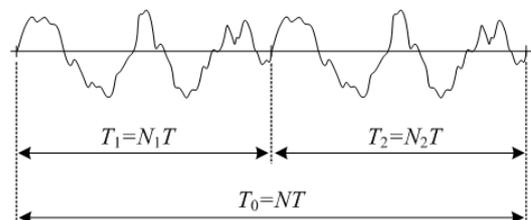


그림 1 단일 시간 구간과 다구간
Fig. 1 Single and multiple time interval

임의의 신호에서 정확한 파라미터를 추정하기 위해서는 다양한 샘플링 구간에 대한 분석과 많은 경험을 필요로 한다. 파라미터 추정 결과에 영향을 주는 중요한 요소로 미지수의 수(p)와 샘플링 구간(T), 시간구간 크기(T_0), 데이터 수

(N)가 있다. 시간구간은 샘플링 구간과 데이터 수의 곱이므로 전체 시간구간 $T_0 = NT$ 로 나타낼 수 있다. 그리고 다른 시간구간은 그림 1에 나타난 것과 같이 데이터 수에 따라서 다르게 설정할 수 있다.

시간구간 T_0 에서 신호가 WSS(wide sense stationary) process일 때, 그림 1에 나타난 시간구간 T_1 과 T_2 에 동일 모드 z_0 가 포함되어 있다고 가정한다. 그러면 시간구간 T_1 에 대한 예측오차다항식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_1(z) = \left(\sum_{i=0}^{p-1} a_i z^{-i} \right) (1 - z_0 z^{-1}) = 0 \quad (9)$$

$$\Leftrightarrow a_0 + \sum_{i=0}^p (a_i - a_{i-1} z_0) z^{-i} = 0, a_0 = 1, a_p = 0 \quad (10)$$

여기에서 p 는 미지수의 개수이고, $A_1(z)$ 는 시간구간 T_1 에 대응하는 예측오차다항식이다. 이와 유사하게 시간구간 T_2 에 대한 예측오차다항식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_2(z) = \left(\sum_{i=0}^{p-1} b_i z^{-i} \right) (1 - z_0 z^{-1}) = 0 \quad (11)$$

$$\Leftrightarrow b_0 + \sum_{i=1}^p (b_i - b_{i-1} z_0) z^{-i} = 0, b_0 = 1, b_p = 0 \quad (12)$$

차수가 동일한 여러 개의 다항식에 동일한 근이 하나 이상 포함 되어 있다고 하면, 각 다항식의 계수들을 합한 새로운 다항식에도 동일한 근이 포함되어 있다. 그러므로 식 (10)과 식 (12)의 동류항(similar terms) 계수들끼리 합한 새로운 오차다항식에도 모드 z_0 가 포함되어 있다. 두 예측오차다항식의 계수들을 합한 새로운 예측오차다항식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_2(z) = a_0 + b_0 + \sum_{i=1}^p [(a_i + b_i) - (a_{i-1} + b_{i-1}) z_0] z^{-i} = 0 \quad (13)$$

$$a_0 + b_0 = 2, a_p + b_p = 0$$

이 식은 동일 모드가 존재하는 두 개의 시간구간에 대한 예측오차다항식으로 각 시간구간에 대한 예측오차다항식의 계수들을 합하면 새로운 오차다항식을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 따라서 이 식으로부터 여러 시간구간을 동시에 고려할 수 있는 다구간 예측오차 다항식의 일반화된 식을 유도할 수 있다. 시간 구간이 n 개 주어질 때, 각 시간구간에 대한 예측오차 다항식의 해가 동일하면 다음식이 성립한다.

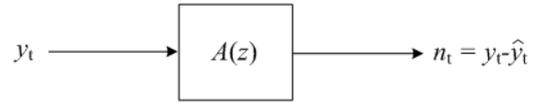
$$M_n(z) = m_0 + \sum_{i=1}^p (m_i - m_{i-1} z_0) z^{-i} = 0 \quad (14)$$

$$m_i = \sum_{j=1}^n a_{i,j}, m_0 = n, m_p = 0$$

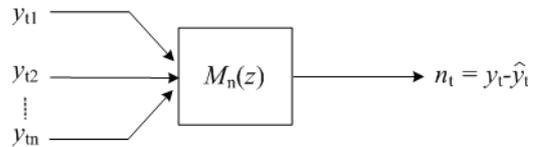
이 식에서 m_i 는 각 시간구간에 대한 예측오차다항식들의 i -번째 계수들의 합이다. 식 (14)에서 $n=1$ 인 경우, 전체 시간구간에 대한 예측오차 다항식이 된다. 그러므로 미지수를

p 로 고정하면, 다양한 시간구간에 대한 예측오차다항식을 구성하는 것이 가능하다.

그림 2에서는 선형예측의 예측오차필터를 나타내고 있다. 그림 2(a)는 원래 예측오차필터를 나타내고 있고, 그림 2(b)는 다구간 예측오차필터를 나타내고 있다.



(a) single linear prediction



(b) multiple linear prediction

그림 2 단일구간 및 다구간 선형 예측
Fig. 2 Single and multiple time interval linear prediction

4. 사례연구 및 결과

본 논문은 새로운 파라미터 추정 알고리즘에 관한 것이다. 제안한 알고리즘의 정확성을 검증하는데 정확한 해를 알 수 없는 실제 계통에서 취득한 데이터에 적용하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 실제 계통에서 취득한 신호와 유사하고 정확한 해를 알고 있는 식 (15)에 나타나있는 시험함수에 제안한 다구간 파라미터 추정방법의 알고리즘 적용하였다.

한전계통에는 잠재적으로 0.68 [Hz]와 1.0 [Hz] 부근의 모드가 존재하는 것으로 알려져 있다. 따라서 이와 유사하게 시험함수를 2개의 지수감쇠 정현파함수로 구성하였다. 각 함수는 각각 3.8[rad/sec], 6.2[rad/sec]의 주파수(ω_i)를 가지고 있다. 그리고 각 함수의 크기(A_i)는 모두 10.0으로 설정하였으며, 위상(ϕ_i)은 각각 30°, 60°로 설정하였다. 또한 시험함수의 전체 시간구간을 10초로 설정하고, 잡음 비율과 샘플링간격, 계통계수를 각각 변화하면서 파라미터를 추정하였다.

$$y_t = \sum_{i=1}^n A_i e^{\alpha_i t} \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (15)$$

샘플링은 1/60 [s]와 1/10 [s], 계통계수(α_i)는 -0.1, -0.01로 각각 변화하며 파라미터를 추정하였다. 그리고 각 함수에 랜덤잡음 5%와 30%를 부가한 후, 취득한 신호에서 저주파진동 파라미터를 추정하였다. 알고리즘의 정확성을 비교하기 위하여 모든 경우에 대해서 각각 10회씩 파라미터 추정을 반복하였다. 반복할 때마다 설정된 비율로 신호에 랜덤 잡음이 부가되므로 반복하면서 얻은 모든 결과들은 다르

다. 그리고 이 논문에서 파라미터를 추정할 때 모든 경우에 모델의 차수를 20차로 설정하고 파라미터를 추정하였다.

그림 3에는 샘플링과 제동계수를 각각 1/60 [s]와 -0.01로 설정하고, 잡음을 5%를 부가한 신호를 나타내고 있다.

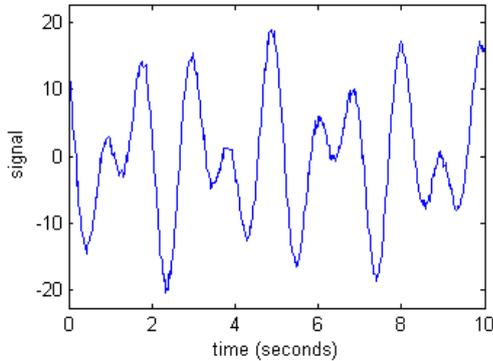


그림 3 샘플링 1/60 [s], 제동계수 -0.01, 잡음 5%인 신호
Fig. 3 Signal with sampling 1/60s, noise 5%, damping -0.01

표 1과 표 2에는 다양한 경우에 대해서 파라미터 추정 결과를 나타내고 있다. 표에서 “ExPRO”는 extended Prony method[3, 14]를 적용해서 얻은 결과를 의미하고, “MuPRO”는 본 논문에서 제안한 다구간 예측오차방정식을 적용해서 파라미터를 추정한 결과를 의미한다. 그리고 “exact”는 신호에 잡음이 포함되지 않은 초기에 주어진 정확한 파라미터들이다. 또한 표에서 ‘Mode’는 추정한 복소모드를 나타내고, ‘Damping’은 제동비를 의미한다. 그리고 ‘f’와 |Ai|는 각각 주파수와 모드의 크기를 나타내고 있으며, ‘Angle’은 모드의 위상각을 의미한다.

표 1은 제동계수가 -0.01인 경우에 대한 파라미터 추정

결과들인데, 잡음과 샘플링 비율에 따라서 각각 다른 결과들이 추정되었다.

먼저 잡음이 5%인 경우, 전체적으로 두 방법 모두 오차범위 이내에서 정확하게 파라미터를 추정하였다. 샘플링이 큰 경우에는 ExPRO가 더 정확하게 파라미터를 추정하였으나 반대로 샘플링이 작은 경우에는 MuPRO가 더 정확하게 파라미터를 추정하였다.

잡음이 30%인 경우에도 샘플링이 큰 경우에는 ExPRO가 더 정확하게 파라미터를 추정하였고, 작은 경우에는 MuPRO가 더 정확하게 파라미터를 추정하였다. 그러나 샘플링 구간이 작을 때, MuPRO에서는 비교적 정확하게 파라미터를 추정하였으나 ExPRO에서 추정한 결과는 큰 오차를 포함하고 있다. 잡음 30%, 샘플링 1/60 [s]인 경우, ExPRO에서 추정한 제동비는 각각 4.12 [%], 1.95 [%]인 반면에 MuPRO에서 추정한 제동비는 각각 0.18 [%], 0.47 [%]를 추정하였다. 그러므로 MuPRO가 훨씬 정확하게 모드를 추정하였음을 알 수 있다.

신호에 30% 랜덤 잡음이 포함되어 있으므로 초기 10으로 설정된 모드 크기의 범위는 7~13이다. 표에서 잡음 30%, 샘플링 1/60 [s]일 때, ExPRO에서는 16.37, 15.74를 추정한 반면, MuPRO에서는 9.41과 11.02를 추정하였다. 결과적으로 ExPRO에서 추정한 모드 크기는 오차범위를 벗어난 반면 MuPRO는 오차범위 내에서 모드크기를 추정하였음을 알 수 있다.

표 2는 제동계수를 -0.1로 설정하고 잡음과 샘플링을 변화하면서 파라미터를 추정한 결과들이다. 표에서 잡음이 5%인 경우, 전체적으로 두 방법 모두 오차범위 이내에서 정확하게 파라미터를 추정하였다. 이 경우에도 제동계수 -0.01인 경우와 마찬가지로 샘플링이 큰 경우에는 ExPRO가 더 정확하게 파라미터를 추정하였고, 작은 경우는 MuPRO가

표 1 제동계수 -0.01인 경우 시험함수의 파라미터 추정 결과
Table 1 Estimated parameter for the test function with $\alpha=-0.01$

Method	Noise	Sampling	Mode		Damping (%)	f [Hz]	Ai	Angle [deg]
			real	imag				
exact	-	-	-0.1	3.80	0.263	0.604	10.0	30
			-0.1	6.20	0.161	0.986	10.0	60
ExPRO	5%	1/60s	-0.012	3.800	0.321	0.605	10.122	29.770
			-0.012	6.202	0.197	0.987	10.115	59.214
		1/10s	-0.011	3.799	0.312	0.604	10.102	29.924
			-0.011	6.200	0.180	0.986	10.085	59.775
MuPRO	5%	1/60s	-0.010	3.798	0.273	0.604	10.044	30.349
			-0.011	6.200	0.186	0.986	10.075	59.739
		1/10s	-0.012	3.799	0.319	0.604	10.107	29.936
			-0.012	6.202	0.200	0.987	10.156	59.155
ExPRO	30%	1/60s	-0.159	3.854	4.120	0.613	16.372	15.812
			-0.122	6.273	1.949	0.998	15.739	45.492
		1/10s	-0.006	3.789	0.251	0.603	9.816	31.450
			-0.017	6.201	0.383	0.987	10.171	58.297
MuPRO	30%	1/60s	0.002	3.781	0.178	0.601	9.407	34.572
			-0.029	6.191	0.475	0.985	11.023	62.156
		1/10s	0.010	3.794	0.610	0.603	8.869	29.461
			-0.021	6.196	0.569	0.986	10.425	59.452

표 2 제동계수 -0.1인 경우 시험함수의 파라미터 추정 결과

Table 2 Estimated parameter for the test function with $\alpha = -0.1$

Method	Noise	Sampling	Mode		Damping (%)	f [Hz]	Ai	Angle [deg]
			real	imag				
exact	-	-	-0.1	3.80	2.630	0.604	10.0	30
			-0.1	6.20	1.612	0.986	10.0	60
ExPRO	5%	1/60s	-0.106	3.801	2.808	0.605	10.263	29.440
			-0.108	6.205	1.744	0.987	10.309	59.093
		1/10s	-0.099	3.800	2.627	0.605	10.013	29.741
			-0.101	6.199	1.629	0.986	9.956	59.341
MuPRO	5%	1/60s	-0.105	3.798	2.760	0.604	10.235	30.426
			-0.100	6.199	1.616	0.986	10.028	60.256
		1/10s	-0.099	3.798	2.613	0.604	9.969	30.106
			-0.098	6.196	1.594	0.986	9.837	60.208
ExPRO	30%	1/60s	-0.436	3.914	11.067	0.623	17.716	10.663
			-0.391	6.359	6.143	1.012	18.445	46.447
		1/10s	-0.100	3.751	2.677	0.596	10.202	39.771
			-0.144	6.191	2.339	0.985	11.628	62.388
MuPRO	30%	1/60s	-0.092	3.806	2.430	0.605	9.732	29.585
			-0.102	6.190	1.660	0.985	10.077	62.728
		1/10s	-0.111	3.840	2.911	0.611	10.714	24.917
			-0.111	6.217	1.780	0.989	10.029	56.204

더 정확하게 파라미터를 추정하였다.

잡음이 30%이고 샘플링 구간이 작을 때, MuPRO에서는 정확하게 파라미터를 추정하였으나 ExPRO에서 추정한 결과는 큰 오차를 포함하고 있다. 잡음 30%, 샘플링 1/60 [s]인 경우, ExPRO에서 추정한 제동비는 각각 11.06 [%], 6.14 [%]인 반면에 MuPRO에서 추정한 제동비는 각각 2.43 [%]와 1.66 [%]을 추정하였다. 그러므로 MuPRO가 훨씬 정확하게 모드를 추정하였음을 알 수 있다.

신호에 잡음이 부가되기 전에 모드 크기는 10으로 설정하였다. 신호에 30% 랜덤 잡음이 포함되어 있으므로 추정한 모드 크기의 범위는 7~13이다. 표에서 잡음 30%, 샘플링 1/10 [s]일 때는 두 방법 모드 허용범위에서 모드 크기를 추정하였다. 그러나 샘플링 1/60 [s]일 때, ExPRO에서는 17.72, 18.45를 추정한 반면, MuPRO에서는 9.73과 10.08을 추정하였다. 결과적으로 MuPRO는 오차범위 이내에서 모드 크기를 추정한 반면에 ExPRO는 오차범위를 벗어난 모드 크기를 추정하였다.

이로부터 전체적인 파라미터 추정 정확도에서 다구간을 이용한 파라미터 추정법이 더 정확함을 알 수 있다. 두 방법 모두 제동계수 변화에는 크게 민감하지 않았으나 잡음과 샘플링 변화에는 매우 민감하였다. 잡음이 크고 샘플링이 작을 때, ExPRO는 파라미터를 추정하지 못하거나 큰 오차를 포함하고 있는데, MuPRO는 모두 오차범위 내에서 파라미터를 추정하였다.

표 3에는 각 경우에 대해서 파라미터를 정확하게 추정한 횟수를 나타내고 있다. 대부분 정확하게 파라미터를 추정하였으나 ExPRO의 경우 잡음 30%이고 샘플링 1/60 [s]인 경우, 10회 반복 중 2회를 추정하지 못하였고, 샘플링 1/10 [s]인 경우, 10회 반복 중 3회를 추정하지 못하였다. 그러나 MuPRO는 모든 경우에 대해서 파라미터를 추정하였다. 이

로부터 MuPRO가 ExPRO 보다 잡음과 샘플링에 대해서 신뢰성 있게 결과를 추정함을 알 수 있다.

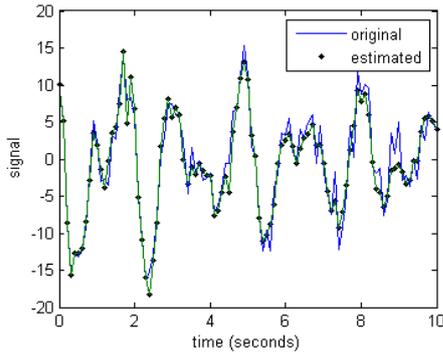
표 3 파라미터 추정 반복 시험 결과

Table 3 Results of repeated parameter estimation test

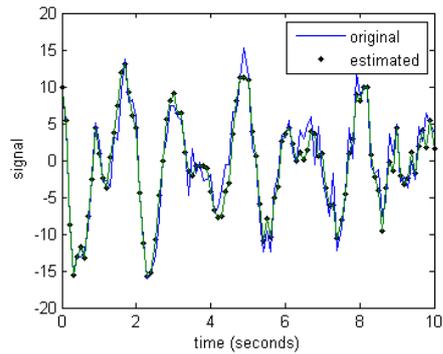
Method	Noise	Sampling	Damping	Estimation / Iteration
ExPRO	5%	1/60s	-0.01	10/10
			-0.10	10/10
		1/10s	-0.01	10/10
			-0.10	10/10
	30%	1/60s	-0.01	8/10
			-0.10	8/10
1/10s		-0.01	7/10	
		-0.10	7/10	
MuPRO	5%	1/60s	-0.01	10/10
			-0.10	10/10
		1/10s	-0.01	10/10
			-0.10	10/10
	30%	1/60s	-0.01	10/10
			-0.10	10/10
		1/10s	-0.01	10/10
			-0.10	10/10

그림 4 및 5에는 잡음 30%, 미지수 20개로 동일하게 설정하고 추정한 신호와 원래 신호를 비교한 것이다. 샘플링이 1/10 [s]인 그림 4에서는 두 방법 모두 비슷하게 파라미터를 추정하고 있음을 알 수 있다. 그러나 샘플링이 1/60 [s]인 그림 5에서 MuPRO는 거의 정확하게 원래 신호를 추정한 반면, ExPRO는 상당한 오차를 포함하고 있음을 알 수 있다.

그림 6 및 7은 파라미터를 추정한 모드와 모드 크기를 나타내고 있다. 그림에서 “*”는 잡음이 없을 때 정확한 모드를 나타내고 “O”와 “X”는 각각 MuPRO와 ExPRO에서 추정한



(a) ExPRO



(b) MuPRO

그림 4 추정된 신호와 시험함수의 비교(샘플링 1/10[s], 잡음 30%, 제동계수 -0.1인 경우)

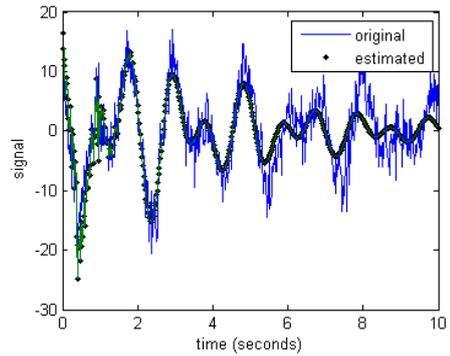
Fig. 4 Comparison of original and estimated signal(sampling 1/10[s], noise 30%, damping -0.1)

파라미터를 그림에 나타낸 것이다. 그림 6(b)와 7(b)에 나타낸 모드 크기는 추정된 모드 크기(A_i)와 정확한 모드 크기(A_b)의 비를 나타낸 것으로 다음과 같이 계산하였다.

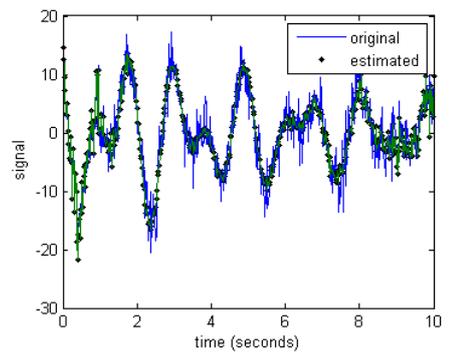
$$R_{i,norm} = (A_i / A_b) e^{j\phi_i} \quad (16)$$

그림 6에는 잡음 30%, 샘플링 1/10s, 제동계수 -0.1일 때, 모드와 정규화된 모드 크기를 나타내고 있다. MuPRO와 ExPRO에서 추정된 파라미터들이 거의 동일한 영역에 분포되어 있음을 알 수 있다. 이 경우는 비교적 잡음이 많이 포함되어 있으나 샘플링이 비교적 적절하게 선택되어 두 방법 모두 정확한 파라미터를 추정하고 있음을 알 수 있다. 그림 7에는 잡음과 제동계수는 동일하고 샘플링만 1/60 [s]로 설정한 경우, 모드와 정규화된 모드 크기를 나타내고 있다. 그림에서 MuPRO가 ExPRO 보다 훨씬 정확하게 결과를 추정하고 있음을 알 수 있다. 이 경우에서 잡음이나 제동계수보다 샘플링 비율에 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

이상에서 다양한 시험 조건에서 제안된 다구간 파라미터 추정법을 적용한 결과를 요약하면 다음과 같다. 먼저 다구간 파라미터 추정법(MuPRO)이나 extended Prony method(ExPRO) 모두 제동계수 변화에 대해서 크게 민감하지 않았



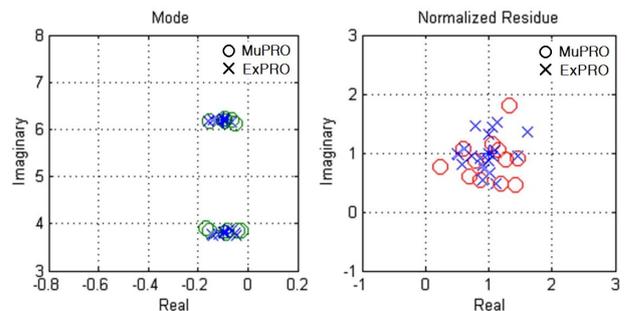
(a) ExPRO



(b) MuPRO

그림 5 추정된 신호와 시험함수의 비교(샘플링 1/60[s], 잡음 30%, 제동계수 -0.1인 경우)

Fig. 5 Comparison of original and estimated signal(sampling 1/60[s], noise 30%, damping -0.1)



(a) mode

(b) normalized residue

그림 6 추정된 모드 및 정규화된 모드 크기 분포(샘플링 1/10[s], 잡음 30%, 제동계수 -0.1인 경우)

Fig. 6 Distribution of estimated mode and normalized residue(sampling 1/10[s], noise 30%, damping -0.1)

다. 또한 잡음에 대해서도 두 방법 모두 허용범위 이내에서 파라미터를 추정하였다. 그러나 신호에 잡음이 크게 포함된 경우, ExPRO에서는 파라미터를 추정하지 못한 경우가 있는 반면에 MuPRO에서는 정확하게 파라미터를 추정하였다. ExPRO에서는 샘플링이 1/10 [s]와 1/60 [s]인 경우, 각각 10회중 3번과 2번을 추정하지 못하였다. 샘플링 변화에 대해서 잡음이 작을 때는 두 방법 모두 정확하게 파라미터를

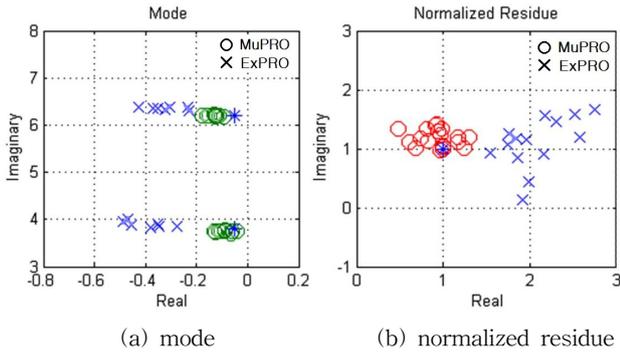


그림 7 추정된 모드 및 정규화된 모드 크기 분포(샘플링 1/60[s], 잡음 30%, 제동계수 -0.1인 경우)

Fig. 7 Distribution of estimated mode and normalized residue(sampling 1/60[s], noise 30%, damping -0.1)

추정하였다. 그러나 잡음이 크고, 샘플링이 작을 때는 ExPRO에서 추정한 파라미터는 큰 오차를 포함한 반면에 MuPRO는 거의 오차범위 내에서 파라미터를 추정하였다.

이로부터 본 논문에서 제안한 다구간 파라미터 추정법은 잡음과 샘플링 변화에 보다 강인하게 파라미터를 추정함을 알 수 있다. 대부분 전력계통에서 취득한 신호는 랜덤잡음이 포함된 신호들이다. 그리고 모든 계통에는 고유의 저주파진동이 존재하므로 취득한 데이터는 WSS 신호들이다. 또한 임의의 계통이 가지고 있는 지역모드와 지역간 모드를 정확하게 알지 못하므로 최적의 샘플링을 선택하기 어렵다. 그러므로 전력계통에서 추정한 신호들로부터 저주파진동 파라미터를 추정할 때, 잡음과 샘플링에 대해서 강인한 다구간 파라미터 추정법이 더욱 신뢰성이 있을 것으로 생각된다.

5. 결론

본 논문은 다수의 시간구간을 동시에 고려할 수 있는 파라미터 추정에 관한 것이다. 차수가 같은 다수의 다항식에 동일한 근이 포함되어 있을 때, 다항식들의 동류항 계수들을 합한 새로운 다항식에도 동일한 근이 포함되어 있다. 그러므로 계통에서 취득한 다른 시간구간에 동일 모드가 존재하면, 각 시간구간에 대한 예측오차다항식들의 계수들을 합하여 새로운 다구간 예측오차다항식을 형성할 수 있다. 다구간 예측오차 다항식의 해에는 각 시간구간에 포함된 중요 모드가 포함되어 있다. 한 번의 미지수 계산에서 다수의 시간구간에 포함된 중요 파라미터를 추정할 수 있다.

다구간 파라미터 추정법은 정확성과 신뢰성 측면에서 매우 효율적인 알고리즘이며, 전력계통의 실시간 저주파진동 해석에 적합한 알고리즘이다. 본 논문에서 제안한 다구간 파라미터 추정 방법의 알고리즘을 시험함수에 적용한 결과, 정확하게 중요 파라미터를 추정하였고, 알고리즘 성능 측면에서도 효율적임을 확인하였다. 현재 한계계통에 지속적으로 PMU를 설치하여 데이터를 취득하고 있으므로 향후 본 논문에서 제안한 알고리즘을 실제 계통 취득 데이터에 적용하여 검증할 계획이다.

References

- [1] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, Inc., New York, 1994.
- [2] M. A. Johnson, I. P. Zeraafonitis, M. Calligris, "Prony Analysis and Power System Stability-Some Recent Theoretical and Applications Research," IEEE PES summer meeting 2000, pp. 1918-1923, 2000.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] D. J. Trudnowski, "Order Reduction of Large-scale Linear Oscillatory System Models," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 9, pp.451-458, Feb. 1994.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] A. Hasanovic, A. Feliachi, N. B. Bhatt, A. G. DeGross, "Practical Robust PSS Design through Identification of Low-order Transfer Functions," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 19, pp.1492-1500, Aug. 2004.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.

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

[15] R. W. Wies, J. W. Pierre, D. J. Trudnowski, "Use of ARMA Block Processing for Estimating Stationary Low-frequency Electromechanical Modes of Power Systems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 18, pp.167-173, Feb. 2003.

[16] 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.

[17] A. B. Leirbukt, J. H. Chow, J. J. Sanchez-Gasca, and E. V. Larsen, "Damping Control Design Based on Time-domain Identified Models," IEEE Trans. on Power System, vol. 14, pp. 172-178, Feb. 1999.

[18] A. Hasanovic, A. Feliachi, N. B. Bhatt, A. G. DeGross, "Practical Robust PSS Design through Identification of Low-order Transfer Functions," IEEE Trans. on Power Systems, vol. 19, pp.1492-1500, Aug. 2004.

[19] 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.

저 자 소 개



심관식 (沈冠植)

1991년 전남대학교 전기공학과 졸업.
 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).
 1997년~2004년 서남대학교 전기공학과 조교수. 현재 전남대학교 전기공학과 계약교수.
 Tel : 062-530-1740
 Fax : 062-530-1749
 E-mail : simgong@chonnam.ac.kr



김상태 (金尙泰)

1996년 명지대학교 전기공학과 졸업.
 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(석사).
 2003년 동대학원 전기공학과 졸업(박사).
 현재 한전KDN(주) 전력IT연구원 차장.
 Tel : 031-420-0751
 Fax : 031-420-0759
 E-mail : jesteka@kdn.com



최준호 (崔竣豪)

1996년 숭실대학교 전기공학과 졸업.
 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).
 현재 전남대학교 전기공학과 교수.
 Tel : 062-530-1741
 Fax : 062-530-1749
 E-mail : joono@chonnam.ac.kr



남해근 (南海鯤)

1975년 서울대학교 전기공학과 졸업.
 1980년 Univ. of Houston 졸업(석사).
 1986년 Univ. of Texas at Austin 졸업(박사).
 1975년-1978년 한국전력 원자력 건설부 근무.
 1986년-1988년 한국전기연구소 근무.
 1988년-현재 전남대학교 전기공학과 교수.
 Tel : 062-530-1745
 Fax : 062-530-1749
 E-mail : hknam@chonnam.ac.kr



안선주 (安善柱)

2002년 서울대학교 전기공학부 졸업.
 2004년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(석사).
 2009년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(박사).
 현재 전남대학교 전기공학과 조교수.
 Tel : 062-530-1738
 Fax : 062-530-1749
 E-mail: sjahn@jnu.ac.kr