

시계열 데이터를 이용한 새로운 온라인 미소신호안정도 평가 방법과 적용

김동준, 문영환  
한국전기연구원

A New Method for Assessing On-line Small-signal Stability and its Application

Dong-Joon Kim, Young-Hwan Moon  
KERI

**Abstract** - This paper describes new on-line small signal stability assessment and its application using the time series simulated phasor measurement data. Using FFT technique and optimization method, the suggested method can effectively identify all of mode frequencies involved in measured data and calculate the damping ratio with accuracy.

1. 서 론

대형 전력회사에서는 계통에서 발생하는 외란에 대한 전력진동을 억제하기 위해서 많은 비용을 투자하고 있다. 지속적인 전력진동은 안정적인 계통운용을 방해하고 송전전력을 제한할 수 있다. 따라서 전력회사는 외란 발생시 나타나는 전력 진동 (Power Oscillation)의 감쇠(Damping) 정도를 정확히 수치적으로 계산해야 하며, 만약 전력감쇠 정도가 크지 않다면 발전소나 계통 중요 장치에 제동 제어를 설치하여 전력진동 감쇠율(Damping Ratio)을 허용 한계 값 이내로 잡아 두도록 해야 한다. 따라서 전력진동의 감쇠를 쉽고 정확히 계산할 수 있는 방법은 전력계통의 안정운전에 있어서 중요하다.

본 논문은 전력시스템에서 패이스 감시 장치에서 측정되는 이산치 시간영역 데이터를 최적화 기법을 적용하여 전력진동의 댐핑율을 계산하는 방법을 이용하여 온라인 동요 모드 계산 방법을 소개한다. 이 방법은 전력진동의 댐핑율을 계산하기 위해서 전력계통 실회차 감시 장치에서 측정된 이산치 시간영역 데이터를 1) FFT 분석하여 데이터에 포함되어 있는 차수를 결정하고; 2) 외란 조건을 판별해서 3) 결정된 모드 주파수와 차수를 이용하여 측정된 데이터를 최적화 기법으로 적합(Fitting)해서 바로 전력진동 댐핑율을 계산하는 단계로 이루어진 것을 그 특징으로 한다. 기존의 Prony 해석법에 비해서 계산법이 더 간단하고, 현장의 디지털 전력진동 감시 장치나 혹은 인터넷 같은 네트워크를 통해서 전송된 데이터를 전력회사의 EMS(Energy Measurement System)에서 빠르게 댐핑율을 계산할 수 있는 장점이 있다.

2. 본 론

2.1 기존의 방법: Prony 해석법

전력계통의 전력(Power) 댐핑율 계산방법으로는 Prony 해석법[1,2]이 발표 되었다. 이 기법은 선형 예측(linear prediction) 모델을 이용하여 전력진동(Power Oscillation)의 댐핑율(Damping ratio)를 계산하는 방법이다. Prony 해석법의 계산 알고리즘은 다음과 같다[2].

선형, 시불변 다이내믹 시스템이 시간  $t_0$ 인 초기 상태  $x(t_0)=x_0$ 에 있다고 가정하자. 다음으로, 입력을 제거하고 어떠한 외란도 없다고 했을 때, 다음의 미분 방정식으로 표현된다.

$$p\dot{x} = Ax \tag{1}$$

여기서,  $p=d/dt$ ,  $x$ 는 시스템의 상태변수의 벡터이고  $n$ 은  $x$  벡터의 차수이다.  $\lambda_i$ ,  $p_i$ ,  $p_i T$ 를 각각  $A(n \times n)$ 행렬의 고유값, 우고유벡터, 그리고 좌고유벡터 라고 하자. 그러면 식 (1)은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$x(t) = \sum_{i=1}^n (q_i^T x_0) p_i \exp(\lambda_i t) \tag{2a}$$

$$= \sum_{i=1}^n R_i x_0 \exp(\lambda_i t) \tag{2b}$$

여기서  $R_i = p_i q_i^T$ 는  $(n \times n)$  residue 행렬이다. 이때  $q_i^T x_0$ 는 상수 값이다.  $x_0$ 가 고유치  $\lambda_i$ 와 관련된 모드의 응답을 결정하지만,  $x$  요소의 모델응답 분포는 전적으로 우고유 벡터에 의해서 결정된다. 결과적으로,  $p$ 에 대한 정보는  $x(t)$ 에 대한 모달 분해(Modal Decomposition)에 의해서 추출할 수 있다. 간단하게 하기 위해서, 시스템에 하나의 출력이 있다고 가정하면 이것의 형태는 다음과 같다.

$$y(t) = Cx(t) \tag{3}$$

프로니 방법과 이것의 수정법은 식 (2a)의 지수항과, 또는, 식 (3)의 파라미터를 직접적으로 추정하도록 설계되었다. 이것은 식 (4)를 측정된  $y(t)$ 에 적합(fitting)함으로써 계산되어 진다. 이렇게 하는데 있어서, 이질적인 요소나 잡음 그리고 옴셋을 모델링하는 것도 필요하다.

$$\bar{y}(t) = \sum_{i=1}^Q A_i \exp(\sigma_i t) \cos(2\pi f_i t + \phi) \tag{4}$$

측정된 시간영역 데이터  $y(t)$ 가  $N$ 개의 샘플링으로 이루어졌다고 가정하자. 그러면,  $y(t_k)=y(k)$ ,  $k=0,1,\dots,N-1$ 이고, 이때 시간 간격은 등 가격이고  $\Delta t$ 이다. 프로니 해석결과를 얻는 전략은 아래와 같이 요약할 수 있다:

- Step 1 : 이산 선형예측 모델(Linear Prediction Model, 이하 LPM)을 구성한다.
- Step 2 : Step 1의 LPM의 다중 특성근을 찾는다
- Step 3 : Step 2의 근을 이용하여 각 모드에 대한 진폭(Amplitude)과 위상(Phase)을 결정한다.

이러한 절차들은  $z$ -domain에서 이루어 진다. 전력계통 응용에서, 이 고유값들은 보통  $s$ -domain으로 변환된다. 프로니의 주요 공헌은 스텝 1에 있다. 초기 목적을 달성하기 위해서,  $N=2n$ 으로 가정하고 측정된 신호는 무잡음(noise-free)라고 하자. 식 (4)를 다시 식 (5)처럼 지수형태로 놓는다면 표식법은 간단해진다.

$$\bar{y}(t) = \sum_{i=1}^p B_i \exp(\lambda_i t) \tag{5}$$

샘플 시간  $t_k$ 에서, 이 식은 아래와 같이 압축된다.

$$\bar{y}(t) = \sum_{i=1}^p B_i z_i^k \tag{6a}$$

$$z_i = \exp(\lambda_i \Delta t) \quad (6b)$$

최종 목적은 모든  $k$ 에 대해서  $\bar{y}(k) = y(k)$ 하도록 하는  $B_i$ 와  $z_i$ 를 찾는 것이다. 이 찾는 방법은 위에서 설명한 3 단계를 이용하면 찾을 수 있다. LPM 행렬을 구성하는 방법은 참고문헌 [2]의 식 (7A)-식 (11)과 관련되어 기술되어 있다. 여기서 자세한 해명은 생략한다. 프로니 방법의 주요 문제점은 실제 시스템의 차수가 알려져 있지 않거나, 혹은 너무 커서 적합되는 모델이 저차로 간략화해야 한다는 것에 있다. 부차적인 차수는 신호의 DC 오프셋 (offset)이나 잡음을 적합하기 위해서 필요할 수 있다. 재구성된 신호  $y(t)$ 는 보통 측정된 신호  $y(t)$ 를 완전하게 적합하지는 않는다.

## 2.2 최적화 기법을 이용한 댐핑을 계산 방법

최적화 기법을 이용한 온라인 댐핑을 계산 방법은 그림 1과 같다. 프로니법의 차수 문제를 해결하기 위해서 최적화 기법은 측정된 시계열 데이터를 먼저 washout 회로에 의해서 필터링하고 FFT를 이용하여 각 모드 주파수를 찾는다. 여기서 결정된 모드 주파수 개수가 바로 측정된 파형에 포함되어 있는 실제 시스템 차수가 된다.

그림 1의 단계 1과 같이 페이지 측정장치에서 측정된 이산치 유효전력 데이터 개수와 페이지 장치에서 측정된 이산치 데이터의 나이퀴스트 조건(Nyquist Criterion) 주파수를 결정한다. 만약, 기본 주파수  $f_0=60\text{Hz}$ 를 갖는 페이지 장치에서 측정된 유효전력이 1초에 120개의 데이터를 계산 출력한다면, 나이퀴스트 조건 주파수는 60Hz가 된다. 즉, 측정된 시간영역 이산치 데이터는 60Hz 이내의 동요모드 정보를 포함하고 있다고 생각할 수 있다.

다음 단계로 단계 2처럼 워시아웃 (Washout) 회로를 이용하여 DC 오프셋 (offset) 성분을 제거하기 위해서 상태변수를 초기화 한다. 여기서, 워시아웃 시정수  $T_w$ 는 1.0-10sec로 설정할 수 있다. 다음으로 단계 3과 같이 워시아웃 회로를 이용하여 DC 오프셋을 제거한다. 이때,  $\Delta t$ 는 샘플링 시간 간격과 같다.

단계 4에서 측정된 이산치 시간영역 유효전력에서 포함되어 있는 진동 주파수를 구하기 위해서, 단계 3에서 DC 오프셋이 제거된 신호를 FFT 분석한다. FFT의 결과는 실수값, 허수값으로 계산결과가 나오므로 두 값의 절댓치도 계산한다. 그리고 계산된 FFT는 샘플링 개수에 의해서만 연관되었기 때문에 주파수 축인 x축에 시간간격을 고려하여  $1/\Delta t$ 를 곱한다. 이와 같이 FFT 계산된 결과를 분석하여 진동 주파수를 찾는다.

온라인 또는 실시간 모드에 전력진동 모드는 큰 외란이 발생하지 않는 한 대부분의 시간은 정상상태 조건이 된다. 따라서 외란이 없는 대부분의 측정된 데이터를 최적화 기법을 적용하는 것은 계산 낭비일 수 있다. 이러한 이유로 단계 5처럼 외란 조건을 두어 각 모션에서 측정된 데이터가 이 조건에 부합되는 경우 부합되는 모션의 데이터만 최적화 기법에 적용되어 댐핑을 찾게 된다. 외란조건에 부합되어 트리거 되는 경우 측정된 데이터는 트리거 전의 데이터를 어느 정도 포함해서 분석한다.

최적화 정식화는 식 (7)와 같이 최소 자승법으로 나타낼 수 있다. 최종적으로 최적화 기법을 적용하여 식 (7)를 최소로 하는 댐핑을, 진폭, 그리고 위상을 계산한다. 최적화 기법은 수렴속도가 빠른 Gauss-Newton법을 사용한다.

$$\text{Minimize} \sum_{i=0}^Q \sum_{k=0}^{N-1} \frac{1}{2} (y'(t_k) - \bar{y}_i(t_k))^2 \quad (7)$$

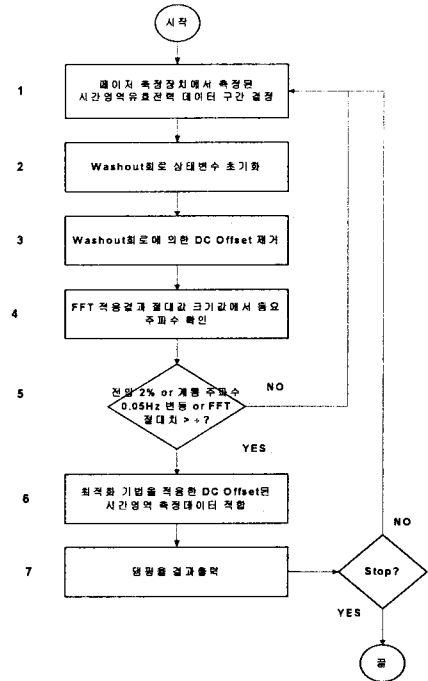


그림 1 최적화 기법을 적용한 온라인 댐핑을 계산 방법

## 2.3 최적화 기법을 적용한 댐핑을 계산 방법 적용

최적화 기법을 이용한 온라인 댐핑을 계산법을 실제 계통에 적용하는 것을 모의하기 위해서, 정상상태에서 발전기 출력이  $P_e=300\text{MW}$ 일 때 갑자기 계통에 사고가 발생해서 아래와 같은 전력진동이 발생했다고 가정하자.

$$\Delta P = \sum_{i=1}^Q A_i \exp(\sigma_i t) \cos(2\pi f_i t + \phi_i) \quad (8)$$

여기서,

$Q=3$

초기진폭:  $A_1=10.0, A_2=30.0, A_3=15.0$

감쇠율:  $\sigma_1=-0.10, \sigma_2=-0.15, \sigma_3=-0.03$

동요주파수:  $f_1=40.34\text{ Hz}, f_2=1.56\text{ Hz}, f_3=0.80\text{ Hz}$

위상:  $\phi_1=0.0\text{ rad}, \phi_2=1.57\text{ rad}, \phi_3=-3.14\text{ rad}$

식 (8)에서 40.34Hz의 진동은 발전기 축 비틀림 모드, 1.56Hz는 발전기 모드, 그리고 0.80 Hz는 광역 모드 (Interarea mode)라 생각할 수 있다. 이 동요 모드에 대한 측정된 파형은 그림 2와 같이 모의할 수 있다.

그림 2를 본 최적화 방법에 의해서 전력진동 감쇠율을 계산하면 다음과 같다. 먼저 그림 2에서 사고발전기 30초간의 3600개의 데이터를 분석 데이터로 결정한다. 그리고, 워시 아웃 회로를 이용하여 DC 오프셋(DC offset)을 제거한다. 본 사례에서는  $T_w=1.0\text{ sec}$ 로 가정하였다. 워시아웃 회로의 z-domain 상태변수 초기화는 사고전의 정상상태 발전기 출력 300 MW로 결정한다.

다음으로 워시아웃 회로로 직류성분을 제거한다. 다음으로 직류성분이 제거된 데이터를 FFT 분석하여 실수부(Real\_FFT)와 허수부(Imag\_FFT)의 계산결과를 절댓값으로 나타내고, FFT 분석시 샘플링 시간을 고려하지 않았기 때문에 FFT의 주파수 축 x축에 120을 곱해준다. FFT 결과의 절댓치 크기는 값이 매우 크기 때문에 아래의 dB를 이용하여 y축으로 도시하면 그림 3과 같다.

$$Y_{\text{FFT}} = 20 \cdot \log_{10} (\text{Mag}(\text{Real}_{\text{FFT}}, \text{Imag}_{\text{FFT}})) \quad (9)$$

그림 3에서 진동 주파수를 거의 정확하게 결정할 수 있다. 결정된 주파수는 40.33Hz, 1.56Hz, 그리고 0.80Hz로 식 (10)의 참값과 거의 같았다. 마지막으로 식 (8)의 최소자승법을 이용해서 그림 25의 직육성분이 제거된 데이터를 적합한다. FFT 분석에서 계산된 진동 주파수를 제외한 진폭, 댐핑율, 그리고 위상은 임의로 합리적인 값으로 선정해야 하나 여기서는 아래와 같은 값으로 초기값을 설정한다.

$$\text{초기진폭: } A_1=10.0, A_2=10.0, A_3=10.0 \quad (12)$$

$$\text{감쇠율: } \sigma_1 = -0.10, \sigma_2 = -0.10, \sigma_3 = -0.10$$

$$\text{위상: } \phi_1 = 0.0\text{rad}, \phi_2 = 0.0\text{rad}, \phi_3 = 0.0\text{rad}$$

적합에 사용된 최적화 기법은 Matlab의 Gauss-Newton법과 탐색 방법은 Mixed Polynomial Interpolation법을 적용하였다. 계산 결과는 그림 4와 같다. 최적화 기법을 적용해서 수렴된 결과는 다음과 같다.

$$\text{진폭: } A_1=9.1216, A_2=-26.1809, A_3=14.1371 \quad (13)$$

$$\text{감쇠율: } \sigma_1 = -0.1001, \sigma_2 = -0.1503, \sigma_3 = -0.0296$$

$$\text{위상: } \phi_1 = -0.2942\text{rad}, \phi_2 = 0.5010\text{rad}, \phi_3 = 1.2844\text{rad}$$

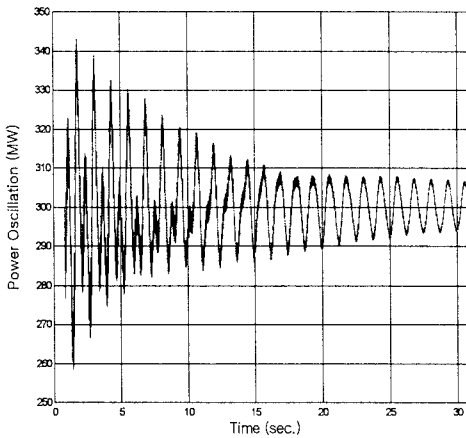


그림 2 외란시 측정된 발전기 출력 모의 데이터

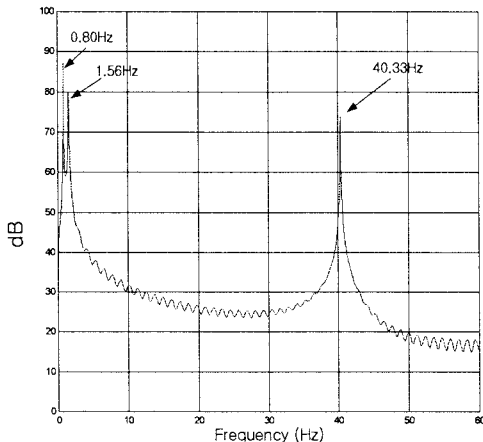


그림 3 FFT 분석에 의한 모드 주파수

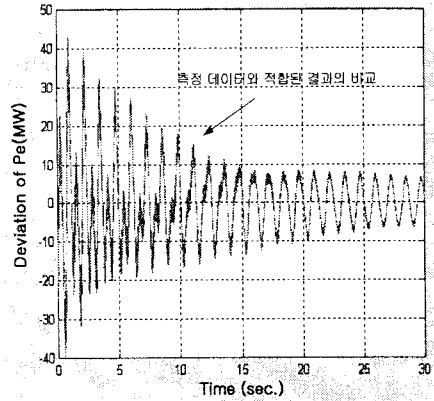


그림 4 최적화 기법을 적용한 동요모드 적합

식 (8)의 참값 진폭과 수렴된 진폭은 약간의 차이를 보이나 허용할 만하다. 수렴된 전력진동 감쇠율 값은 식 (8)의 참값과 거의 일치하고 있다. 수렴된 위상값과 식 (8)의 위상값이 다른 데 그 이유는 도 2에서 계통 사고가 0.83 sec에서 발생했을 때의 위상값은 식 (8)의 위상값과 다르기 때문이다. 따라서 식 (12)의 수렴된 위상값들이 실제 사고 발생시의 위상값과 거의 같은 값이라고 생각할 수 있다. 위의 결과를 얻기 위한 계산 시간은 Pentium 4 프로세서를 장착한 Notebook 컴퓨터로 9.8초밖에 걸리지 않았다. Matlab을 사용하지 않고 IMSL라이브러리를 사용할 경우 계산 시간은 더 단축될 것이다.

### 3. 결 론

본 논문은 최적화 기법을 이용한 댐핑을 계산방법을 이용하여 on-line 미소신호안정도를 평가할 수 있는 방법에 대해서 제안하였다. 제안된 방법은 다중의 모드가 포함된 모의된 시계열 파형을 이용하여 효율적이면서 정확하게 각 모드의 댐핑율을 계산하는 것을 확인하였다. 제안된 방법은 전력진동 댐핑율을 기존의 프로니 해석 방법보다 간편하고 빠르게 계산할 수 있는 방법으로 아래와 같은 특징을 갖는다.

- 1) 위시아웃을 이용한 FFT 분석방법을 사용하기 때문에 측정된 유효전력으로부터 쉽게 전력진동 주파수를 파악할 수 있다.
- 2) FFT로 확인된 모드를 최적화 기법으로 댐핑율을 찾기 때문에 기존의 프로니 해석법에 비해서 계산 속도가 빠르고 신뢰도 있게 각 모드에 댐핑율을 찾을 수 있다.

결론적으로 제안된 계산 알고리즘은 쉽고 명백하기 때문에 페이지 측정장치에 이 알고리즘을 쉽게 이식할 수 있어 온라인 또는 실시간으로 전력진동 댐핑율을 계산할 수 있고, 인터넷 같은 네트워크가 연결된 시스템인 경우에는 전력회사의 EMS에서 전송된 데이터를 이용하여 전력진동 댐핑율을 쉽고 빠르게 계산할 수 있다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 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, No.5, August 1991
- [2] J.F.Hauer, C.J. Demeure, L.L. Scharf, "INITIAL RESULTS IN PRONY ANALYSIS OF POWER SYSTEM RESPONSE SIGNALS", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 5, No.1, February 1990.
- [3] 김동준, 문영환, 김춘경, 허진, 최적화 기법을 적용한 전력진동 댐핑을 계산방법, 국내특허 등록번호:제0464119호