

계통 주파수 추정을 위한 디지털 알고리즘 간의 비교

이병현, 김철환  
성균관대학교

A comparison between digital algorithms for estimation of power system frequency

B.H. Lee, C.H. Kim  
Sungkyunkwan Univ.

**Abstract** - Estimation of power system frequency is an important task because frequency deviation is a good indicator of the system abnormal operating conditions. The algorithms, curve fitting, technique using Taylor series, deviation of phasor angle of fundamental waveform using DFT (Discrete Fourier Transform) and Prony method, are tested under operation of the frequency relaying by using EMTP MODELS. The performance of methods is compared with the simulation results.

1. 서 론

전력 계통에서 주파수는 계통의 상태를 알 수 있는 중요한 파라미터 중 하나이다. 주파수 추정은 전력 계통의 감시, 보호 및 제어를 위해 사용될 수 있으며, 따라서 정확하고 빠른 주파수의 계산이 실시간으로 이루어질 필요가 있다.

마이크로프로세서 기술의 사용은 계통 감시 및 보호, 제어 분야에서 많은 장점을 가지고 있다. 변화하는 계통 상태에 빠른 응답을 제공할 수 있는 마이크로프로세서의 연산 능력은 잘 알려져 있으며, 그에 따라서 계통 주파수의 추정 방식에 널리 사용되게 되었다. 그러므로 디지털 프로세서에 의한 주파수 추정에 대한 다양한 논문들이 발표되었으며 추정 방법 간의 비교가 이루어져 왔다. 그러나 전력 계통의 시뮬레이션 중 주파수 계전의 관점에서 추정 방법 간의 비교는 이루어지지 않았다.

따라서, 이 논문에서는 주파수 추정 알고리즘들 중 일부인 Taylor 급수를 이용한 곡선 점철법[1], DFT를 통과한 기본파의 위상각 편이를 이용한 방법[2], 그리고 Prony 방법[2]을 전력계통해석 프로그램인 ATP/EMTP MODELS를 이용하여 주파수 계전기의 주파수 추정 알고리즘으로 구현하고, 계통 비정상 주파수 상태를 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 주파수 계전기의 동작 시간 및 오차율, 표준편차를 비교하였다.

2. 전력 계통의 주파수 추정 알고리즘

2.1 Taylor 급수를 이용한 곡선 점철법[1]

정상 상태에서, 입력 정현파 전압 신호를 나타내면 다음 식 (1)과 같다.

$$v(t) = V_m \sin(\omega t + \theta) \tag{1}$$

일정한 주기 T마다 입력 신호를 샘플링 하고, 연속적인 5개의 샘플 간의 연산을 이용하여 식 (2)를 얻는다.

$$\cos(2\pi f T) = \frac{1}{2} \frac{v_{k+4} - v_k}{v_{k+3} - v_{k+1}} \tag{2}$$

테일러급수를 이용해서 neighborhood를  $f_0$ (정상 주파수)로 놓고  $\cos(2\pi f T)$ 를 전개한다. 여기서 T의 값이 매우 작다고 가정하여 전개식의 2항까지만 계산하도록 근사화 하고, 다시 식 (2)에 대입하면 식 (3)과 같다.

$$\frac{1}{2} \frac{v_{k+4} - v_k}{v_{k+3} - v_{k+1}} = 2\cos(2\pi f_0 T) - 2\pi T(f - f_0) \cdot \sin(2\pi f_0 T) \tag{3}$$

식 (3)을 f에 대한 식으로 정리하면 식 (4)와 같다.

$$f = f_0 + \left[ \cos(2\pi f_0 T) - \frac{1}{2} \frac{v_{k+4} - v_k}{v_{k+3} - v_{k+1}} \right] / [2\pi T \cdot \sin(2\pi f_0 T)] \tag{4}$$

샘플링에 의한 오차를 최소화하기 위하여, 식 (2)를 m번 계산하여 그 평균값을 이용하여 추정된 주파수는 식 (5)와 같다.

$$f = f_0 + \left[ \cos(2\pi f_0 T) - \frac{1}{2m} \sum_{k=1}^m \frac{v_{k+4} - v_k}{v_{k+3} - v_{k+1}} \right] / [2\pi T \cdot \sin(2\pi f_0 T)] \tag{5}$$

2.2 DFT를 통과한 기본파의 위상각 편이를 이용한 방법[2]

전압 신호에 DFT(Discrete Fourier Transform)을 이용하여 위상각을 계산할 수 있다. 이산 입력신호가  $v(k)$  이고 한 주기 동안의 샘플 수를 N이라고 하면, 이 신호를 이산푸리에변환(DFT) 한 식은 다음 식 (6)과 같다.

$$V(n) = \sum_{k=0}^{N-1} v(k) W_N^{nk} \quad (n=0, 1, 2, \dots, N-1) \tag{6}$$

여기서,  $W_N = e^{-j(2\pi/N)}$  이고,  $v(k)$ 는 전압의 샘플링 값이다.

$n=1$ 일 때, 기본파를 추출한 페이지 식은 다음 식 (7)과 같다.

$$V(1) = \sum_{k=0}^{N-1} v_k \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) - j \sum_{k=0}^{N-1} v_k \sin\left(\frac{2\pi k}{N}\right) \tag{7}$$

여기서,  $v_k = v[n - (N-1) + k]$  이다.

위상각의 각 주파수는 다음 식 (8)과 같다. 식 (8)과 같이 위상각의 변화율을 계산하여 주파수 성분을 추정할 수 있다.

$$f = \frac{\arg[V_k] - \arg[V_{k-1}]}{2\pi T} \tag{8}$$

여기서,  $\arg[V_k] = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}[V_k]}{\text{Re}[V_k]} \right\}$  이다.

2.3 Prony 방법[2]

Prony 방법은 어떠한 비선형 신호의 샘플 값을 통해 오차를 최소화하는 선형 다항식의 곡선을 fitting 하는 해석 모델이다. 이 방법은 DFT를 통과한 신호의 실수 부분을 정현파로서 근사화하고, 입력 신호와 근사화된 신호 간의 오차를 최소화하기 위해서 최소 자승법을 사용한다. 여기서 최소가 되는 값을 오차와 어떤 미지 계수를 가진 제차 방정식(difference equation)으로서 정의한다. Prony 방법의 중요한 특징은, 근사화된 정현파 신호의 복소 지수 형태로 나타낸 값을 입력 신호와 근사화된 신호 간의 오차 값을 최소화하는 해로서 사용한다는 것이다. 이 방식에서 계산된 주파수의 값은 식 (9)와 같다.

$$f = \frac{1}{2\pi T} \cos^{-1} \left\{ \frac{\sum_{m=2}^{M-1} (g_{m-1} + g_{m+1})^2}{2 \sum_{m=2}^{M-1} g_m (g_{m-1} + g_{m+1})} \right\} \tag{9}$$

3. 주파수 계전[3-4]

주파수 계전이란 전력 계통에서 발전량과 부하량의 불평형으로 인하여 계통 주파수가 비정상 주파수 상태가 되는 것을 막기 위해서, 발전기 트립 또는 부하 차단을 통해서 주파수를 안정시키는 계통 보호 방식을 말한다.

불평형의 주 원인은 부적절한 부하 예측, 또는 부족한 발전 용량

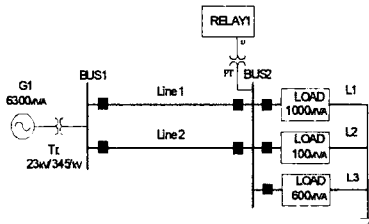
설정, 모선, 발전기 그룹, 계통에서 발전력과 부하량이 맞지 않을 때에 주로 발생하게 된다. 일반적으로 모든 발전기는 최대 발전량에서 동작하지 않는다. 그 이유는 발전기가 계통의 부하 변동에 견디면서 조속기를 통하여 회전자의 속도와 주파수 감소를 억제함으로써 과부하 상태를 조절할 수 있기 때문이다. 발전량과 부하량의 불균형이 작은 상태에서는 주파수의 변동이 작기 때문에, 발전기의 조속기에 의해 정상 주파수로의 회복이 가능하다. 반면, 심각한 과부하 상태에서는 발전량 부족에 의하여 계통의 주파수가 저하하게 되는데, 주파수가 저하되는 비율은 시간에 따른 다양한 함수의 형태로 나타나는데, 이것은 주로 과부하 정도, 계통 관성 상수등과 연관이 있다.

발전력 부족에 의한 저주파수의 경우, 계통의 안정도를 유지할 수 있는 해결책은 선택적인 부하 차단이다. 부하 차단은 주파수가 설정치 이하로 떨어질 때 이루어지며, 조속기에 의해 발전기가 반응할 수 있는 시간을 제공한다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

##### 4.1 시뮬레이션 방법

저주파수 계전기 동작 구현을 위해 시뮬레이션에 사용된 계통은 다음 그림 1과 같다. 계통 전압은 345kV이고 동기발전기 G1이 연결된 BUS 1에서 BUS 2를 향하여 조류가 흐른다. 부하 L1은 1000MVA, L2는 100MVA이며, L3은 600MVA로 설정하였다. 동기발전기 G1은 EMTP Type-59 동기기 모델과 TACS를 사용한 조속기, 여자기 모델을 사용하여 22kV 전압과 6300MVA 용량의 울진 N/P를 모델링 하였다. 동기발전기 G1의 초기 위상각은 20도로 설정하였다. 선로의 길이는 100km이고 기준용량은 100MVA로 계산하였다. 주파수 계전기의 주파수 추정은 EMTP에서 받은 전압값을 이용하여 MODELS 내에서 처리하였다.

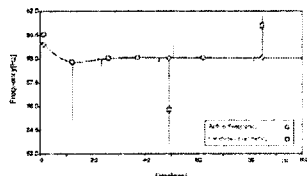


〈그림 1〉 계통 모델

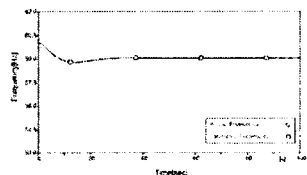
저주파수 계통의 모의를 위해 L1, L2 부하는 상시 연결되어 상태에서 시뮬레이션 시작 후 1초 후에 부하 L3가 BUS 2에 연결되어 부하량이 증가하고, 이로 인한 발전량과 부하량의 불균형에 의해 주파수가 저하하게 된다. 주파수 계전기는 추정된 주파수가 우리나라의 저주파수계전기의 첫 번째 부하차단단계인 58.8 Hz를 감지하면 0.1초 후에 트립 신호를 발생시켜 계통의 스위치를 제어하여 L2를 차단하여 58.8 Hz 이상으로 주파수를 회복시키게 하였다.

##### 4.2 시뮬레이션 결과

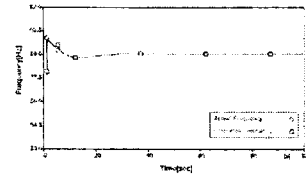
그림 2, 3, 4는 실제 발전기에서 출력되는 주파수 값과 각각의 주파수 추정 알고리즘을 통해 추정된 주파수를 보여주고 있다. 주파수 추정 값의 차이로 인하여 각각의 시뮬레이션에서 부하 차단 시간의 차이가 존재한다. 그림 2, 3, 4를 비교함으로써 Taylor 급수를 이용한 곡선 점철법에 의해 추정된 주파수가 가장 실제 주파수 값에서 큰 편이를 가지고 있는 것을 발견할 수 있다.



〈그림 2〉 Taylor 급수를 이용한 곡선 점철법에 의한 주파수 추정과 실제 주파수



〈그림 3〉 DFT를 통과한 기본파의 위상각 편이를 이용한 주파수 추정과 실제 주파수



〈그림 4〉 Prony 방법을 이용한 주파수 추정과 실제 주파수

오차율은 식 (10)으로써 계산되었고, 각각의 추정 방법에 대한 오차율의 총합과 평균은 표 1과 같다. 표 1을 통하여, Prony 방법에 의한 주파수 추정이 가장 낮은 오차를 갖는다는 것을 알 수 있다.

$$error\ rate = \left| \frac{actual\ frequency - estimated\ frequency}{actual\ frequency} \right| \quad (10)$$

〈표 1〉 추정 알고리즘들의 오차율의 총 합과 평균

	Taylor	Prony	DFT
Total	1573.4	286.8	631.77
Average	0.0219	0.0039	0.0088

(# Taylor: Taylor 급수를 이용한 곡선 점철법, Prony: Prony 방법, DFT: DFT를 통과한 기본파의 위상각 편이를 이용한 방법)

각각의 추정 방법에 의해 계산된 주파수에 따라서 부하 차단이 이루어진 시간은 표 2에 나타내었고, Prony 방법에 의한 주파수 계전기의 동작 시간이 가장 빠르다는 것을 알 수 있다.

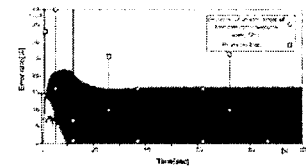
〈표 2〉 부하 차단 시간

	Taylor	Prony	DFT
Time[초]	12.386	12.09	12.433

표 3은 오차율의 표준편차를 나타내었다. 표 3과 그림 5를 통해서 Prony 방법에 의한 추정 방식은 낮은 오차율에 비하여 일시적으로 높은 오차율을 갖는다는 것을 알 수 있다.

〈표 3〉 오차율의 표준 편차

	Taylor	Prony	DFT
Standard Deviation	0.2048	0.0707	0.0093



〈그림 5〉 DFT와 Prony의 오차율의 비교

### 3. 결 론

디지털 시뮬레이션을 통하여 주파수 추정 방법 간의 비교가 이루어졌다. 본 논문에서는 비교를 위하여 오차율을 이용하여 평균과 표준 편차를 계산하였으며, 또한 계전기의 동작 시간을 비교하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 다른 주파수 추정 방법에 비하여 Prony 방법이 비정상 주파수 상태에서의 실시간 제어에 가장 효율적이고 적합하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업의 지원으로 수행되었음 (차세대전력기술연구센터)

#### [참 고 문 헌]

- [1] A.D. Wang, Y.Z. Ge, L.L. Lai, A.T. Johns, "A New Digital Algorithm for Power System Frequency Measurements", IEE Conference on Advances in Power System Control, 1993.
- [2] Tadeusz Lobos, Jacek Rezmer, "Real-Time Determination of Power System Frequency", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 46, No. 4, 1997.
- [3] H. Lee Willis, "Protective Relaying Principles and Applications", Marcel Dekker, pp495-496, 1998.
- [4] 보호계전기 정정기준 수립에 관한 연구, 한국전력거래소, 2003