

디지털 신호처리기법을 이용한 전력계통 주파수 추정 기법에 관한 연구

남시복 박철원 신명철
 용인송담대학 전기설비과 원주대학 전기과 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과

**A study on the Estimation Technique of Frequency in the Power System
 using Digital Signal Processing**

S.B. Nam C.W. Park M.C. Shin
 Y.S. College W.J. National College S.K.K. Univ.

Abstract - Frequency and phasor are the most important quantities in power system operation. Frequency reflects the dynamic energy balance between load and generating power. To estimate of power system frequency, an accurate digital tracking algorithm by using phasor angle difference is presented. For an evaluation of the proposed technique, simulations by EMTP have been performed. Test results were showed the algorithm's accuracy under the effect of noise and changes in frequency and amplitude on the input signal.

1. 서 론

계통의 에너지 균형이 깨지면 계통주파수의 변화가 유발되며, 특히 발전기의 갑작스러운 변동이나 부하의 급증으로 발전력이 이를 충당 할 수 없는 경우에는 계통주파수의 급격한 감소를 일으키게 되어 심한 경우에는 연쇄적인 계통의 붕괴까지 이르게 될 수도 있다. 이를 방지하기 위해서는 계통의 전력불균형 현상시 동반되는 계통주파수의 변화를 신속하고 정확히 추정하여 계통을 평형상태로 복구하는 것이 필요하다. 따라서 원하는 측정 영역에 걸쳐서 정확한 전압의 크기와 주파수 편차(frequency deviation : 이하 주파수 편차)를 추정하는 것은 발전량과 부하사이의 균형을 도모하여 전력계통을 보호가 안정적으로 운용하는데 필수적이다[1].

최근에는 마이크로프로세서의 발달에 따라 아날로그 주파수 측정기의 단점을 보완하고, 계통 신호를 샘플링하여 얻은 전압 신호에 디지털신호처리기법(DSP)을 도입함으로써 주파수를 추정하는 디지털 주파수 추정 알고리즘들이 제안되었다. 1982년 A.G.Phadke 등은 DFT를 통해 전압의 기본주파수(fundamental frequency : 이하 기본파) 페이저를 추출하고, 전압의 정상분(positive sequence component) 페이저의 페이저각(phasor angle)의 변화율을 이용하여 계통내의 주파수 및 주파수 변화율을 추정할 수 있는 기법을 발표하였다. M.S.Sachdev 등은 계통 주파수 추정에 최소자승법(LES)을 이용하였으나, 테일러 급수의 절단오차(truncation error)로 인해 편이량이 늘어나면 측정 윈도우의 크기에 따라 측정에 많은 오차를 포함하게 되는 단점이 있었다. C.T.Nguyen 은 입력 신호의 연속적이 레벨 크로싱(lever-crossing) 시간 간격을 이용하였는데 전압 신호에 대한 임의의 샘플치 몇 개만 있으면 주파수의 측정이 가능하므로 측정 속도가 빠른 장점이 있긴 하나, 이 역시 편이량이 커지면 많은 오차를 포함하게 된다[2,3]. 또, A.A.Girgis 등에 의해 FFT의 누설계수(leakage coefficient)와 주파수 편이량 사이의 선형적 관계를 이용한 방법과 주파수 추정을 위한 기본파 전압페이저의 추출을 위해 2차 칼만필터를 이용한 기법들이 제시되었으며, A.T.Johns 등은 수리적 기법(numerical method)에 의한 고속 FIR(finite impulse response)필터를 이용한 주파수 추정기법을 발표하였다[4,5]. 2000년에는 Wen와 Liu등의 스마트한 이산푸리에

기법(SDFT : smart discrete Fourier transform)를 이용한 주파수 추정기법들이 제시되기도 하였다[6].

본 논문에서는 종래 주파수 추정 알고리즘들이 가졌던 연산속도상의 문제점과 정확성의 문제점들을 개선 위하여, 잡음과 왜곡에도 충분한 정확성을 가지고 미세한 편이뿐만 아니라 광역편이에 대해서도 신뢰성 있는 고속의 추정을 할 수 있는 주파수 추정 기법을 연구하였다. 제안한 알고리즘의 타당성을 입증하기 위하여, EMTP를 이용하여 모델계통을 구성 한 후, 시뮬레이션을 수행하였다. 제안된 기법은 Turbo C 프로그램으로 구현하였고, 수집된 EMTP 출력데이터와 Excel에 의한 사용자 임의 조합 파형을 활용하여 여러 가지 고장 상태 및 갑작스런 최대치의 변화 그리고, 정규 및 비정규주파수를 변화시켜서 시험되었다.

2. 종래 디지털 주파수 계전기

근래에 들어 개발되고 있는 디지털 계전기와 주파수 측정장치에서는, 대부분 입력 신호를 영점통과 검지기(zero-crossing detector) 소자를 통과시켜, 연속적인 두 개의 영점통과사이의 시간을 이용하여 주파수를 계산하고 있다. 그림 1은 종래의 디지털 주파수 계전기의 구성도이다. 이는 소자의 노화나 온도 등에 의한 파라미터의 변화로 정확하고 신속한 응답을 얻는데 한계가 있으며, 고조파 잡음이나 왜곡 등으로 입력 신호의 영점통과 포인터가 이동하거나 중복적인 영점통과를 나타나게 되어 측정에 많은 오차를 포함하게 되는 단점이 있다.

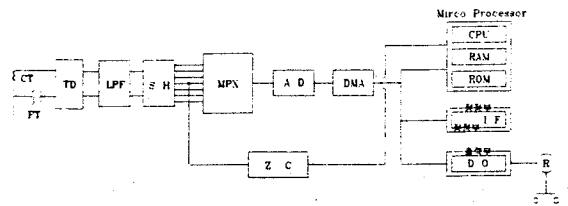


그림 1. 종래 디지털 주파수 계전기의 구성도

- 여기서, TD : Transducer, LPF : Low Pass Filter
 S/H : Sample and Holder 회로
 MPX : Multiplexer
 A/D : Analogue Digital 회로
 DMA : Direct Memory Access
 RAM : Random Access Memory
 CPU : Central Processing Unit
 DI : Digital Input
 DO : Digital Output
 ZC : Zero-crossing detector

3. 페이저 연산을 이용한 주파수 추정 알고리즘

고조파와 잡음이 포함된 입력신호로부터 기본 주파수 성분의 실수부와 허수부를 추출하기 위해 DFT 디지털 필터를 사용한 주파수 응답은 식 (1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$H(Z) = \sum_{k=0}^{N-1} v_k Z^{-k} \quad (1)$$

기본주파수에 상응하는 실수부와 허수부의 2개의 주파수 응답으로 표현하면 식 (2),(3)이 된다.

$$R_e[H(e^{-j\frac{2\pi}{F_s}})] = \sum_{k=0}^{N-1} v_k R_e[e^{-j\frac{2\pi}{F_s}}] \quad (2)$$

$$I_m[H(e^{-j\frac{2\pi}{F_s}})] = \sum_{k=0}^{N-1} v_k I_m[e^{-j\frac{2\pi}{F_s}}] \quad (3)$$

여기서, R_e 와 I_m 은 각각 실수부와 허수부를 나타내는 연산자이고, F_s 는 샘플링 주파수이다.

DFT를 통과한 전압 신호에서 n 번째 데이터 윈도우에 대응되는 샘플의 실수부와 허수부는 식 (4)와 같이 \bar{V}_n 의 페이저 형태의 신호로 표현할 수 있다.

$$\bar{V}_n = V_{rn} + jV_{in} \quad (4)$$

여기서, V_{rn} 과 V_{in} 은 n 번째 데이터 윈도우로부터 얻어진 샘플들을 사용하여 계산된 기본파의 실수부와 허수부이다. 그리고 $(n+1)$ 번째 데이터 윈도우에 대응되는 샘플의 실수부와 허수부는 $\bar{V}_{(n+1)} = V_{r(n+1)} + jV_{i(n+1)}$ 로 표시된다.

페이저각 차이(phasor angle difference)는 페이저의 회전으로 표현할 수 있다. 그림 2의 왼쪽과 같이 기하학적인 해석을 통하여 페이저각 차이 $\theta_{n+1} - \theta_n$ 는 식 (5)와 같이 $(n+1)$ 번째 데이터 윈도우와 n 번째 데이터 윈도우에 대응하는 페이저의 실수부와 허수부를 사용하여 추정할 수 있다.

$$\theta_{n+1} - \theta_n = \tan^{-1} \left[\frac{V_{rn}V_{i(n+1)} - V_{in}V_{r(n+1)}}{V_{rn}V_{r(n+1)} + V_{in}V_{i(n+1)}} \right] \quad (5)$$

기본주파수 f_0 를 갖는 페이저의 회전은 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\theta_{n+1} - \theta_n = \frac{(2\pi f_0)}{F_s} \quad (6)$$

페이저각 차이는 입력신호의 기본파 f_0 와 같도록 가정하여 설계된 DFT 필터를 사용하여 계산된다면 추정주파수 f 는 식 (7)이 될 수 있다.

$$f = \frac{\theta_{n+1} - \theta_n}{\frac{2\pi}{F_s}} \quad (7)$$

4. 모델 전력 계통구성과 시뮬레이션

4.1 모델 전력계통

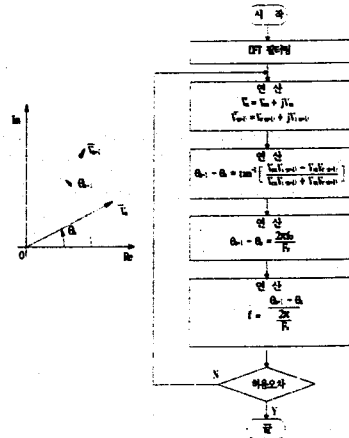


그림 2. 페이저연산에 의한 주파수추정 기법의 흐름도

제시한 기법의 타당성을 검증하기 위하여 그림 3과 같은 최대 160 [km]의 공장을 갖는 3 Φ 154 [kV] 1회선 송전선로를 EMTP로 사고데이터를 모의하였다. 샘플링주파수는 720[Hz] 로서 주기당 12 샘플링의 데이터(12 c/s)를 얻기 위하여 EMTP에서는 시간 간격을 1.389 [msec]로 하였다.

시뮬레이션은 정상상태를 비롯하여 여러 가지 고장을 모의하였는데, 직류 오프셋(DC Offset) 영향과 고조파 성분 그리고 그 크기를 검토하기 위하여, 고장발생 전압사각각은 0°, 90° 로 선정하여 검토하였다.

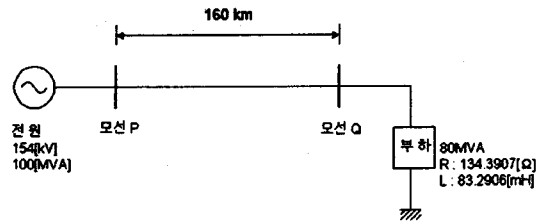


그림 3. 모의 계통도

4.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

그림 4와 5는 전압사각각이 0° 와 90° 에서 A상 지락 고장이 발생했을 경우, 고장난 A상의 전압에 대하여, 여러 가지 주파수 추정기법을 적용한 결과이다. 고장이 발생된 경우에도 제안된 기법은 과도상태의 전압신호로부터 계통 주파수를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다.

그림 4와 5로 부터, 전압사각각이 90° 이 경우에서의 주파수 추정이 0° 인 경우 보다 동요가 더 있는 것을 알 수 있다.

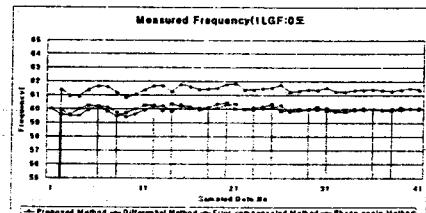


그림 4. 여러 가지 주파수 추정기법의 비교 (A상 지락고장, 전압사각각 0도)

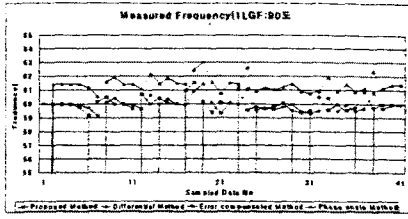


그림 5. 여러 가지 주파수 추정기법의 비교 (A상 지락고장, 전압사고각 90도)

그림 6은 3상 전압·전류에 대한 제안된 기법의 주파수 추정결과이다. 직류음셋이 포함된 전류신호에 대하여 주파수 추정이 지연되는 것을 알 수 있다.

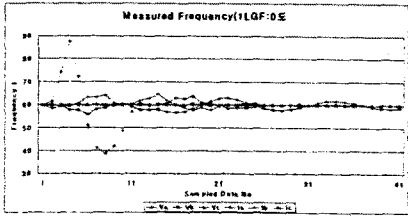


그림 6. 제안된 기법의 주파수 추정결과 (A상 지락고장, 전압사고각 0도)

그림 7은 정상상태에서의 A상 전압에 여러 가지 주파수 추정기법을 적용한 결과이다.

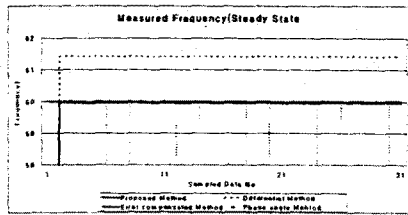


그림 7. 여러 가지 주파수 추정기법의 비교 (정상상태)

그림 8은 정상상태에서의 A상 전압·전류에 대하여 제안된 기법에 의한 주파수 추정결과이다.

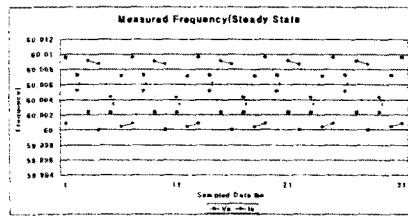


그림 8. 제안된 기법의 주파수 추정결과 (정상상태)

그림 8로부터 정상상태에서의 제안된 기법의 주파수 추정 평균치는 약 60.00476[Hz]이다. 그림 9는 전압사고각이 90°에서 A상 지락고장이 발생했을 경우, 고장난 A상의 전압·전류에 대하여 제안된 기법에 의한 주파수

추정 결과이다.

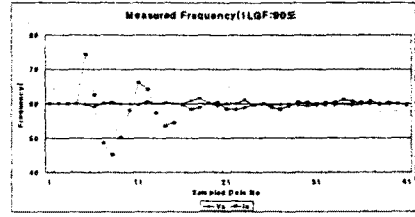


그림 9. 제안된 기법의 주파수 추정결과 (A상 지락고장, 전압사고각 90도)

5. 결 론

본 논문에서는 영점통과 검지기 소자를 사용하지 않고 소프트웨어적으로 정확하고 신속하게 주파수 추정이 가능한 기법을 제안하였다. 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 전압 페이저각 차이를 이용하여 계통주파수를 추정할 수 있는 알고리즘을 제시하였다.
- 2) 제시한 기법의 알고리즘의 결과를 종래의 기법에 의한 결과와 비교하여 보다 빠른 시간에 정확한 값으로 수렴하는 것을 입증하였다.
- 3) 제시한 기법은 유사정규주파수, 정규주파수, 비정규주파수를 측정하기에 적합하며 전력계통측정에 필요한 마이크로프로세서를 이용한 계전기나 측정계기를 설계하는데 유용할 것으로 판단된다.
- 4) 제안된 기법은 잡음과 고조파가 존재할 때도 정확한 주파수의 추정이 가능하다.

제시한 주파수 추정기법을 부하차단(load shedding) 계전기나 발전기 및 변압기를 보호를 위한 전압-주파수 계전기 등에 이용한다면 전력불균형시의 악 영향을 감소시킬 수 있을 것이다. 현재 오프-라인으로 전압신호만을 이용하였으나 향후에는, 전류신호도 함께 이용할 수 있는 기법을 개발하고, 나아가 기법을 DSP B/D에서 구현하여 실제통에서 온라인으로 시험할 예정이다.

[참 고 문 헌]

1. P.J. Moore, A.T. Johns, "Frequency relaying based on instantaneous frequency measurement", IEEE Trans. on PD., Vol.11, No.4, pp.1737-1742, October, 1996.
2. P.T. Moore, R.D. Carranza, and A.T. Johns, "Model System Tests on a New Numeric Method of Power System Frequency Measurement," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, pp. 696-701, Apr. 1996.
3. M.M. Giray, M.S. Sachdev "Off-nominal frequency measurement in electric power system", IEEE Trans. on PD., Vol.4, No.3, pp.1573-1578, July, 1989.
4. A.G. Phadke, J.S. Thorp, "A new measurement technique for tracking voltage phasor, local system frequency, and rate of change of frequency", IEEE Trans. on PAS., Vol. PAS-102, No.5, pp.1025-1034, May, 1983.
5. A.A. Girgis, W.L. Peterson, "Adaptive estimation of power system frequency deviation and its rate of change for calculating sudden power system overload", IEEE Trans. on PD., Vol.5, NO.2, pp.585-594, July, 1990.
6. Jun-Zhe Yang, Chih-Wen-Liu, "A precise calculation of power system frequency and phasor", IEEE Trans. PD, Vol. 15, No. 2, pp. 494-499, April, 2000.