

## 전력계통 주파수의 고속 · 정밀측정을 위한 반복기법

남시복  
용인송담대학 전기정보과

### An Iterative Technique for Fast and Accurate Measurement of Power System Frequency

S.B.Nam  
Yong-In Song Dam College

**Abstract** - Frequency is an important operating parameter of a power system. Electric power systems sustain transient frequency swings whenever the balance between generation and load does not longer hold. To cope with this Constraints, it requires an accurate and high speedy frequency deviation estimation technique and suitable adjustment to obtain the power system energy balance.

This paper describes the design, computational aspects and implementation of an iterative technique for measuring power system. The rate change of the phase angle is used for estimation. To confirm the validity of the proposed algorithm, the simulation studies carried out on a typical 154[kV] double T/L system by using EMTP software. Some test results are presented in the paper.

**Key Words:** Power system frequency, EMTP, frequency deviation estimation

### 1. 서 론

주파수는 전력계통 운용의 중요한 파라미터이며 과거 마이크로프로세서를 이용한 디지털계전기에서 많은 수의 적정한 주파수 측정용 알고리즘이 제시되었다.

이 알고리즘들은 칼만필터, 최소자승법, 반복 페이저 상변환(recursive phasor phase change) 그리고 이산푸리에변환(Discrete Fourier Transform : DFT)을 포함하는 다양한 기법을 시도하였다.

주파수가 넓은 범위에서 추정되어져야하는 발전기보호에서, 적응 샘플링 간격기법이 제시되었으며 가변의 윈도우(window)길이 알고리즘과 적응알고리즘이 제시하였다. 그러나 이 알고리즘은 비정규주파수에서 고조파가 존재하면 반대로 영향을 받으며, 필터를 사용하면, 응답 속도가 더 느려지는 결과로 나타났다. 이 논문은 약 20ms이내에서 정확한 추정을 할 수 있는 주파수 추정 반복기법을 제시한다. 제안된 기법은 넓은 운전범위에서 주파수의 추정이 가능하고, 이론적인 기초, 분석, 실제적인 논점과 기법의 구현이 기술되어있다. 제안된 기법은 전력계통과 주파수발생장치로부터 얻어진 전압 신호를 사용하여 시험하였다. 제안된 기법의 성능 시험에 대한 시험결과도 본 논문에 포함되어 있다. 아울러 전자과도 해석프로그램인 EMTP(electromagnetic transients program)를 통해 얻은 데이터에 대하여, 기존의 디지털 주파수 추정 기법들에 의한 결과와 본 논문에서 제시한 알고리즘을 통해 추정된 결과를 비교해 함으로써 그 신뢰성을 입증하였다.

### 2. FIR, DFT 필터의 주파수 응답특성

FIR필터의 주파수 응답은 식(1), 식(2)와 같이 임펄스 응답을 Fourier 변환하여 얻을 수 있다.

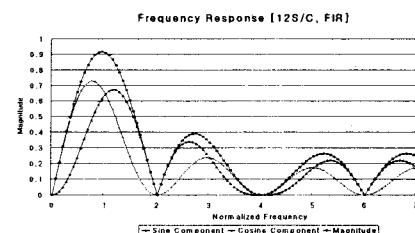
$$\begin{aligned} F_{SI}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} h_{SI}(t)e^{-j\omega t} dt \\ &= \int_0^{T/2} e^{-j\omega t} dt + \int_{T/2}^T e^{-j\omega t} dt \\ &= \frac{2}{j\omega} e^{-j\omega T/2} [\cos \frac{\omega T}{2} - 1] \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} F_{CI}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} h_{CI}(t)e^{-j\omega t} dt \\ &= \int_0^{T/4} e^{-j\omega t} dt - \int_{T/4}^{3T/4} e^{-j\omega t} dt + \int_{3T/4}^T e^{-j\omega t} dt \\ &= \frac{2}{\omega} e^{j\omega T/2} [\sin \frac{\omega T}{2} - 2\sin \frac{\omega T}{4}] \end{aligned} \quad (2)$$

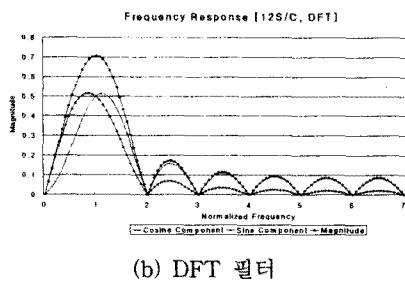
(  $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$  : 기본 주파수  $\omega_0$ 의 한주기 )

$F_{SI}(\omega)$ ,  $F_{CI}(\omega)$ 는 각각 sine성분 및 cosine성분 추출을 위한 FIR필터의 주파수 응답 특성을 나타낸다. 그림1은 기본파 추출을 위한 FIR필터와 DFT필터의 주파수 응답의 비교이다.

필터의 출력은 이산 입력 신호와 임펄스 응답간의 이산 콘벌루션(discrete convolution)을 이용하여 구할 수 있다. 임펄스 응답이 어떤 샘플링 순간에서도 1또는 -1값만을 가지므로 이산 콘벌루션 계산시의 입력 이산 신호와 임펄스 응답간의 곱은 단순히 부호의 변동으로 해결할 수 있다. 따라서 필터의 출력은 입력신호 한 주기가 지난 후 임펄스 응답에 따라 부호가 수정된 입력 샘플치의 합으로 얻어진다.



(a) FIR 필터



(b) DFT 필터

그림1. 주파수 응답 비교

이산 입력 신호와 임펄스 응답간의 이산 콘벌루션을 통해 얻은 필터의 출력은 식(3), 식(4)과 같다.

$$S_1 = \sum_{m=1}^{N/2} [x_m - x_{m+N/2}] \quad (3)$$

$$C_1 = \sum_{m=1}^{N/4} [x_m - (x_{m+N/4} + x_{m+N/2}) + x_{m+3N/4}] \quad (4)$$

예를 들어, 주기당 샘플수가 N=12인 경우 k번째 샘플링 순간에 과거 11개의 샘플치를 이용하여 추출된 기본파의 sine 및 cosine성분은 다음 식(5), 식(6)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} S_1 = & -(x_k + x_{k-1} + x_{k-2} + x_{k-3} + x_{k-4} + x_{k-5}) \\ & + x_{k-6} + x_{k-7} + x_{k-8} + x_{k-9} + x_{k-10} + x_{k-11} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} C_1 = & x_k + x_{k-1} + x_{k-2} + x_{k-3} - x_{k-10} - x_{k-11} \\ & - (x_{k-3} + x_{k-4} + x_{k-5} + x_{k-6} + x_{k-7} + x_{k-8}) \end{aligned} \quad (6)$$

$S_1$ ,  $C_1$ 은 2차 FIR필터를 통과한 기본 주파수를 갖는 sin, cosine성분을 나타내고,  $x_{kn}$ 은 입력신호의  $(k-N+n)$ 번째 샘플치를 나타낸다.

### 3. 반복기법을 이용한 주파수 추정 알고리즘

이 기법은  $f_0$ (Hz)의 기본주파수를 갖는 신호의 샘플이, 동기화된 샘플링의 사용해서 일정하게 유지해야 하며 신호의 기본주파수성분의 실수와 허수부분을 추출하기 위해 직교필터를 설계해야 한다.  $V_{rn}$ 과  $V_{in}$ 의 실수와 허수부분은, n번째 데이터 원도우에 부합하는 샘플을 사용해서 계산할 수 있고, 식(7)을 사용함에 따라 n번째 원도우에 해당되는 기본주파수페이지의  $\theta_n$ 의 위상각을 추정하는데 사용할 수 있다.

$$\theta_n = \tan^{-1} \left( \frac{V_{in}}{V_{rn}} \right) \quad (7)$$

연속되는 샘플이 들어오면, 그 데이터원도우는 한 샘플에 의해 이동된다.  $(n+1)$ 번째 원도우에 해당되는 기본주파수페이지의  $\theta_{n+1}$  위상각은 직교필터의 계수와  $(n+1)$ 번째 원도우로부터 데이터를 사용함으로써 계산되어진다.  $(\theta_{n+1} - \theta_n)$ 의 위상차(상차각)는 한 샘플 간격에서 페이지의

회전을 나타낸다.  $f_0$ 의 기본주파수를 가지고 있는 페이지의 회전은 다음과 같다.

$$\theta_{n+1} - \theta_n = \frac{2\pi f_0}{f_s} \quad (8)$$

$f_0$ 와 동등한 신호의 기본주파수를 가정함으로써 설계된 직교필터를 사용하여  $\theta_{n+1}$ 과  $\theta_n$ 의 위상차를 계산할 수 있다. 아래 식(9)와 같이 주파수 추정을 위한 기본식을 얻을 수 있게 된다.

$$f_e = \frac{2\pi f_0}{\theta_{n+1} - \theta_n} \quad (9)$$

일반적인 경우 주파수 추정에는 다음의 두 상황 중 하나는 반드시 존재 한다.

(A) 추정된 주파수는  $\theta_n$ 과  $\theta_{n+1}$ 의 위상각을 계산하기 위해서 사용한 직교필터의 기본주파수와 동일하다는 것이며 이러한 경우 추정된 주파수는 신호의 기본주파수라는 것을 의미한다.

(B) 추정된 주파수는 직교필터의 설계를 위해 가정한 기본주파수와 동일하지 않다. 이것은 추정된 주파수가 신호의 기본주파수와 같지 않다는 것을 의미하며 관계A를 얻기 위해서 위상각은 신호의 기본주파수와 동일한 기본주파수를 가정하여 설계되어진 직교필터를 사용한 계산이 필요하다. 이것은 다음과 같은 반복절차를 사용하여 달성을 수 있다.

(i) 식(9)로부터 얻어진 주파수를 최근에 추정한 것과 같은 신호의 기본주파수를 가정하여 새로운 직교필터를 설계한다.

(ii) 단계(i)에서 설계된 직교필터와 n에서 n+1까지의 원도우 데이터에 상응하는 샘플들을 사용하여  $\theta_n$ 과  $\theta_{n+1}$ 의 위상각을 계산한다.

(iii) 단계(ii)에서 계산된 위상각과 식(9)를 사용하여 주파수를 추정한다.

(iv) 단계(iii)에서 추정된 주파수와 단계(i)에서 필터를 설계하기 위해 가정한 기본주파수가 같은지를 확인한다. 만약 같다면, 단계(iii)에서 추정한 주파수는 신호의 기본주파수이고, 그렇지 않으면 과정은 단계(i)로 복귀한다.

주파수의 초기 추정은 첫 번째 과정을 시작하기 위해 가정되었다

### 4. 알고리즘의 모의 및 결과 검토

#### 4.1 사고 모의

제안된 기법의 성능을 평가하기 위한 모의 데이터들은 전자과도 해석프로그램인 EMTP를 이용하여 시뮬레이션을 이용하여 수집되었다. 그림2의 모델계통의 전원은 154[kV]인 160[km]의 궁장을 갖는 병행2회선 송전선으로써 선로정수는 표1과 같다.

표 1. 선로정수

	R[Ω/km]	X[Ω/km]	Y[Ω/km]
영상분	0.3088	3.4732	0.0038
정상분	0.1006	1.2380	0.0093
역상분	0.1006	1.2380	0.0093

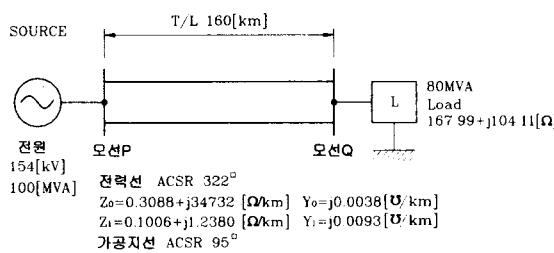


그림2. 모델 전력계통

### (1) 전압사고각 90°, 80[km]지점 A상 지락고장

그림3과 그림4는 정상상태가 2주기정도 지속되다가 약 33.33[ms]시점에서 전압사고각이 90°, 전원으로부터 80[km]지점에 1선지락고장이 발생한 경우의 전압과 전류신호이다. 그림 3은 고장회선의 전압신호로 고장거리가 증거리로 선로임피던스가 40[km]의 두배이므로 고장상의 전압감소가 40[km]고장에 비해 조금 작아 졌음을 알 수 있다.

그림4는 건전회선과 고장회선의 고장 상전류신호이다. 고장회선의 고장상 전류는 선로임피던스가 40[km]의 2배이므로 위상이 약 20°정도 지연되었음을 알 수 있고 전류의 크기는 임피던스에 반비례하므로 작아졌으나, 약 4[pu]까지 상승하였고 건전회선의 고장 상전류는 약 1.5[pu]까지 상승하여 임피던스 증가에 의해 건전회선의 고장상 전류는 현저히 줄었음을 알 수 있다.

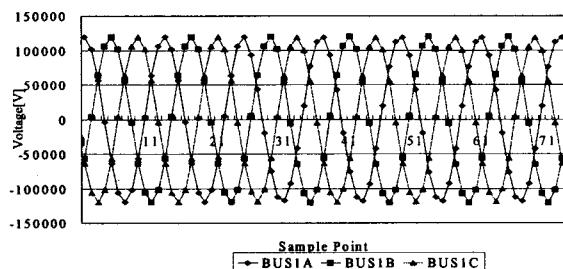


그림3. A상 지락고장시 고장회선 전압신호  
(전압사고각 90°, 80[km]지점 사고)

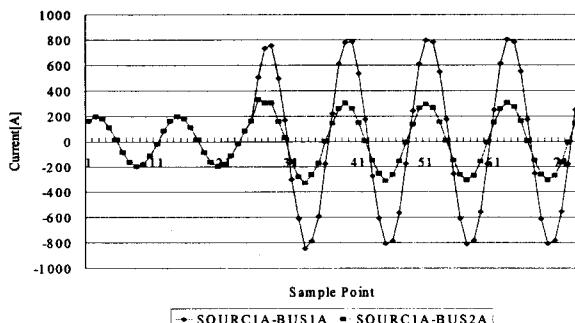


그림4. A상 지락고장시 건전회선과 고장회선의 A상 전류신호  
(전압사고각 90°, 80[km]지점 사고)

### (2) 전압사고각 0°, 80[km] 지점 A상 지락고장

그림5와 그림6은 정상상태가  $2\frac{1}{4}$  주기정도 지속되다가 약 37.5[ms]시점에서 전압사고각 0°, 전원으로부터 80[km]지점에서 1선지락이 발생한 경우의 전압과 전류신호이다. 전압사고각 90°고장과 비교하여 전압신호는 큰 차이가 없으나 직류 옵셋 성분이 더 커져 고장회선의 고장상은 약 6.0[pu]까지 상승하였고 건전회선의 고장상 전류는 상호유도작용으로 약 1.6[pu]까지 상승하였으나 임피던스의 영향으로 40[km]에 비해 현저히 줄었음을 알 수 있다.

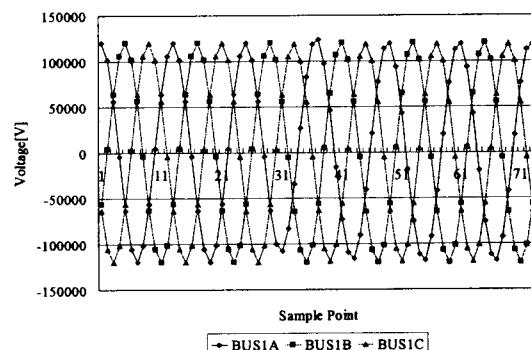


그림5. A상 지락고장시 고장회선 전압신호  
(전압사고각 0°, 80[km]지점 사고)

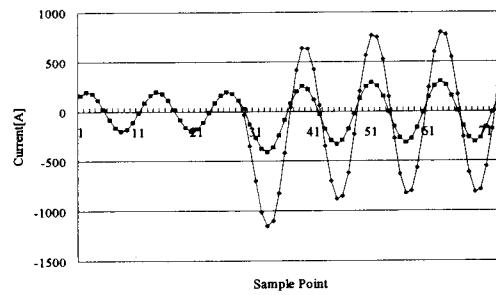


그림6. A상 지락고장시 건전회선과 고장회선의 A상 전류신호  
(전압사고각 0°, 80[km]지점 사고)

## 4.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

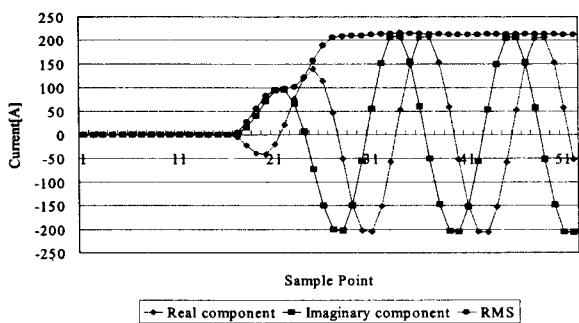
그림 7과 그림 8은 모선으로부터 거리가 80[km]지점, 전압사고각이 0°와 90°인 시점에서 A상 지락고장이 발생하였을 경우, 고장난 A상의 영상전류와 전압에 대하여 여러 가지 주파수 추정 기법을 적용한 결과이다. 제안된 기법의 최대추정오차가 전압사고각 0°에서는 2.432373[Hz], 전압사고각 90°에서는 2.654016[Hz]로 정상분 페이저기법의 5.395297[Hz], 6.25512[Hz]보다 작아 우수함을 알 수 있다. 40[km]사고와 비교하여 임피던스의 증가 및 영상전류의 감소로 최대측정오차가 감소함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

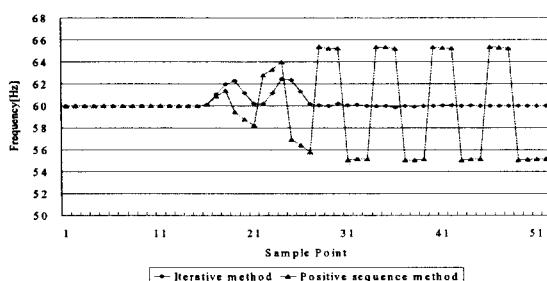
안정적인 전력공급을 도모하기 위해서는 발전량과 부하량사이의 평형을 유지해야한다. 그러나, 평형을 저해하는 여러 가지 요인이 존재하며, 그 가운데 주파수의 변화는 계통 불평형을 야기시키는 커다란 매개변수이다. 따라서 운전중인 전력계통주파수의 편이를 신속하게 계산하여, 적절한 대책을 수립함으로써 전력계통의 평형운전을 유지하는 것은 전력공급자의 커다란 책무이다.

본 연구에서는 전력계통의 운전 주파수를 측정하기 위해서 반복기법의 구현과 연산량의 관점, 설계, 실제적인 논점은 이 논문에 기술하였다. 제안된 기법은 근접정규, 정규, 비정규 주파수를 측정하기에 적합하다. 제안된 기법의 유익한 특징은 쉬운 구현과 고정된 데이터 창 크기, 고정된 샘플 비를 포함하고 있다. 고정된 샘플 비는 동기화된 측정시스템을 위해 이 기법을 매력적으로 사용할 수 있도록 만들었다. 이 기법의 부산물은 계통주파수가 정규주파수를 벗어날 때 페이저측정이 정확하다는 것이다. 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 직류음셋을 제거하는 직류음셋제거 필터와 입력신호로부터 기본파를 추출하는데, 연산을 간단하게 하는 FIR필터를 설계하여 적용하였다.
- 2) 종래의 디지털필터가 가지고 있던 연산 시간상의 문제점을 개선하여 보다 빨리 기본파 페이저를 추출할 수 있는 알고리즘을 제시하였다.
- 3) 간단한 수리적 연산을 이용하여 계통주파수를 추정할 수 있는 알고리즘을 제시하였다.
- 4) 제시한 알고리즘의 결과를 종래의 기법과 비교하여 보다 빠른 시간에 정확한 값으로 수렴됨을 입증하였다. 나아가 관련된 부분들을 하드웨어로 제작하여 실계통에 적용, 온라인으로 동작시킴으로써 실제 계통보호를 도모하는 과제가 더욱 연구되어야 할 것이다.



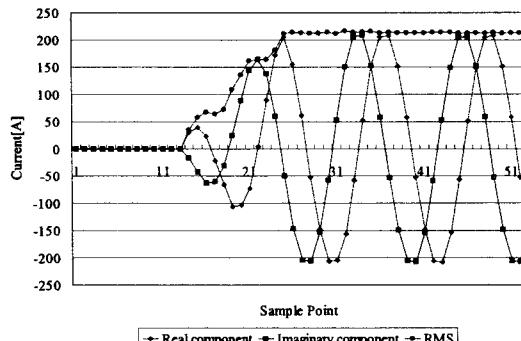
(a) Zero phase sequence current signal  
(fault distance : 80[km], fault angle : 0 degree)



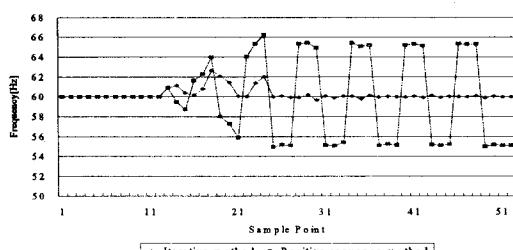
(b) Estimates of frequency for faulted voltage signal  
(under A phase ground fault at 0 degree)

그림7. 고장상태에서의 주파수 추정 기법의

비교(0°,80[km])



(a) Zero phase sequence current signal  
(fault distance : 80[km], fault angle : 90 degree)



(b) Estimates of frequency for faulted voltage signal  
(under A phase ground fault at 90 degree)

그림8. 고장상태에서의 주파수 추정 기법의

비교(90°,80[km])

## [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. T.S. Sidhu, "Accurate measurement of power system frequency using a digital signal processing technique", IEEE Trans. on I&M, Vol.48, No.1, pp.75-81, February, 1999.
4. M. M. Begovic, P. M. Djuric, S. Dunlap, and A. G. Phadke, "Frequency tracking in power networks in the presence of harmonics", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.8, Issue'2, pp.480-486, Apr. 1993.
5. 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.
6. A.A. Grgis, 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.
7. Jun-Zhe Yang, Chih-Wen Liu, "A new family of measurement technique for tracking voltage phasor, Local system frequency, harmonics and DC offset" IEEE Power Engineering society 2000 summer meeting, vol.3, pp. 1327-1332, 2000.