

## 전력계통 주파수의 고속측정을 위한 기법

남 시 복, 김 진 수, 마 석 범  
 용인송담대학 조명인테리어과

### A Technique for Fast 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 no 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

본 논문은 전력계통의 정상운전시 뿐만 아니라 1선지락 고장시에 있어서 넓은 주파수 범위의 측정을 필요로 하는 발전기의 V/F 계전기와 좁은 범위의 주파수 측정을 필요로 하는 UFR(under frequency relay : 저주파수 계전기) 등의 전력계통 주파수추정에 적용할 수 있는 최적의 주파수 추정기 개발을 시도한 것이다. 특히 계통의 과도상태나 넓은 영역의 주파수변동 뿐만 아니라 미소한 주파수 변동에도 적용할 수 있는 추정기법에 초점을 두고 연구하였다.

발전기 및 송변전계통에서 정확하고 신속한 주파수 검출로 인해 계통의 과도 안정도 향상에 기여하며 정상상태나 고장시 특히 주파수 유지율의 향상으로 전압 조정이 용이할 뿐 아니라 발전기의 조속기에 의한 속도조정이 용이해지며 최근 대용량 화력발전소에 있어서는 속도조정이 안정화됨으로써 보일러, 터빈의 열의 흐름을 원활하게 해서 열응력의 문제 등을 경감시킬 수 있으며 터빈 축의 기계적 진동문제를 경감시키고자 한다.

우선, 종래의 디지털 신호처리기법에 의한 주파수 추정알고리즘들을 비교연구하여 장단점 등을 파악한다. 주파수 추정에 사용될 계전신호에 대한 디지털필터를 도입하고 계통 정상운전시 넓은 범위의 변동, 좁은 범위의 변동뿐만 아니라 고장시에도 추정시간의 단축 및 추정오차를 줄이는 방향으로 연구하였으며 연구 내용을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 적응 주파수 추정기법을 위한 계전신호 자료의 전처리단계에서 고장으로 인하여 왜곡된 계전신호로부터 기본파를 추출하기 위하여 주파수 응답이 양호하며 정확하고 신속한 직류오프셋 제거(DC-offset removal) 필터와 DFT 필터를 선택·적용하였다.

둘째, 새로운 디지털 적응 주파수 추정기법의 개발을

위한 종래의 주파수 추정기법에 대한 장단점을 파악하였다.

셋째, 정상상태에서의 입력신호로부터 정확하고 신속하게 주파수를 추정하는 기법을 모색한 결과, 대칭좌표법(symmetrical component method)을 이용하여 정상분 전압을 추출하여 고정페이저(fixed phasor)에 의하여 주파수를 추정하였다.

넷째, 고장 등 과도상태에서도 주파수 추정에 대한 오차가 최저인 기법을 연구한 결과, 고장상의 전압으로부터 상차각 차이(phase angle difference)에 따른 페이저를 추출하여 고장시 주파수를 추정하였다.

다섯째, 제안된 적응 알고리즘(adaptive algorithm)을 Turbo C 프로그램으로 구현하였다.

여섯째, 제시된 적응 알고리즘에 의한 주파수 추정기법의 우수성을 입증한다. 먼저, 전자과도해석 프로그램인 EMTP(electro-magnetic transients program)를 이용하여 모델 전력계통을 구성한 후, 시뮬레이션을 수행하여 출력데이터 파일을 수집하고, 또한 스프레드 시트(spread sheet) 프로그램인 Excel을 이용해 임의의 파형 데이터를 확보하였다. 그리고, 제안된 기법의 성능을 올바르게 평가하기 위하여 고장의 종류 및 고장발생각을 가변 하는 것은 물론이고 갑작스런 최대치의 변화와 정규(nominal) 및, 전자과도해석 프로그램인 비정규 주파수(non-nominal frequency)를 변화시켜서 시험하였다.

#### 2. 종래 디지털 주파수 계전기

근래에 들어 개발되고 있는 디지털 계전기와 주파수 측정 장치에서는, 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 포인트가 이동하거나 중복적인 영점통과를 나타나게 되어 측정에 많은 오차를 포함하게 되는 단점이 있다.

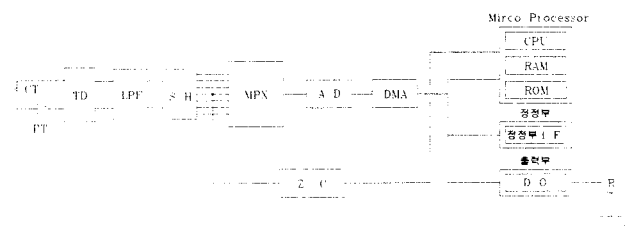


그림 1. 종래 디지털 주파수 계전기의 구성도

여기서, S/H : Sampling 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. 페이지 연산을 이용한 주파수 추정 알고리즘

전력계통에서 연속적인 전압, 전류를  $x(t)$ 로 나타내  
 고, 이  $x(t)$ 를 한 상에서 직교되는 두 개의 성분으로 분  
 해한다.

$$x_1(t) = X \sin(2\pi ft + \phi) \quad (1)$$

$$x_2(t) = X \cos(2\pi ft + \phi) \quad (2)$$

여기서 아래첨자 1,2는 개개의 성분을, X는 크기를, f  
 는 신호  $x(t)$ 의 주파수를,  $\phi$ 는 임의의 위상을 나타낸다.  
 (1), (2)식을 시간에 대하여 미분하면 (3), (4)와 같이  
 된다.

$$\frac{d[x_1(t)]}{dt} = 2\pi f X \cos(2\pi ft + \phi) = x_1'(t) \quad (3)$$

$$\frac{d[x_2(t)]}{dt} = -2\pi f X \sin(2\pi ft + \phi) = x_2'(t) \quad (4)$$

방정식 (1)에서 (3)를 다시 정리하면 (5)식과 같다.

$$\begin{aligned} x_2(t)x_1'(t) - x_1(t)x_2'(t) \\ = 2\pi f X^2 \cos^2(2\pi ft + \phi) + 2\pi f X^2 \sin^2(2\pi ft + \phi) \\ = 2\pi f X^2 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 진폭의 제곱과 주파수의 곱에 비례함을 알 수  
 있으며 진폭에의 의존성을 제거하기 위하여 (6)식과 같  
 이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_1^2(t) + x_2^2(t) &= X^2 \cos^2(2\pi ft + \phi) + X^2 \sin^2(2\pi ft + \phi) \\ &= X^2 \end{aligned} \quad (6)$$

그러므로 (5), (6)식을 결합하여 (7)식을 산출할 수  
 있다.

$$\begin{aligned} x_2(t)x_1'(t) - x_1(t)x_2'(t) &= 2\pi f [x_1^2(t) + x_2^2(t)] \\ f &= \frac{x_2(t)x_1'(t) - x_1(t)x_2'(t)}{2\pi [x_1^2(t) + x_2^2(t)]} \end{aligned} \quad (7)$$

위 방정식은 주파수함수와 두 개의 직교 구성요소로  
 부터  $x(t)$ 의 주파수를 구할 수 있는 해석식이다. (8)번  
 방정식은  $x(t)$ 를  $x(n\Delta T)$ 로 바꿈으로서 디지털신호에

적용된다. 여기서  $\Delta T$ 는 샘플링 시간이며  $\Delta T = \frac{1}{f_s}$ ,  $f_s$   
 는 샘플링 주파수이다. 여기서  $x(n\Delta T)$ 는  $x(n)$ 으로 간단  
 히 표현하고 디지털신호  $x(n)$ 은 sine과 cosine 임펄스  
 응답을 사용한 FIR필터의 계수는 다음 (8), (9)식과 같  
 다.

$$H_s(k) = \sin\left(\frac{2\pi k}{N} + \frac{\pi}{N}\right) \quad (8)$$

$$H_c(k) = \cos\left(\frac{2\pi k}{N} + \frac{\pi}{N}\right) \quad (9)$$

여기서  $K = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ,  $N = \frac{f_s}{f_0}$ ,  $f_0$  : 정  
 격주파수이다.

$x(n)$ 의 2개의 직교성분은 콘벌루션에 의해 (10),  
 (11)식으로 나타낼 수 있다.

$$x_1(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(n-k)H_s(k) \quad (10)$$

$$x_2(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(n-k)H_c(k) \quad (11)$$

직교성분의 시간함수를 계산하기 위해 신호들 사이의  
 구간선형성은 역차분 방정식을 사용하여 가정할 수 있  
 다.

$$x'(n) = \frac{[x(n) - x(n-1)]}{\Delta T} \quad (12)$$

(9)식은  $x(n)$ 의 두 직교 성분에 적용될 수 있으며 이  
 것로부터 발생하는 오차는 보정해야 한다. 그러므로  
 (7)식의 등가 이산 시간은 다음과 같이 주어진다.

$$f \approx \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\left(\frac{x_2(n)+x_2(n+1)}{2}\right)x_1'(n) - \left(\frac{x_1(n)+x_1(n-1)}{2}\right)x_2'(n)}{\left(\frac{x_1(n)+x_1(n+1)}{2}\right)^2 + \left(\frac{x_2(n)+x_2(n+1)}{2}\right)^2} \quad (13)$$

간략하게 하면 아래와 같다.

$$f \approx \frac{1}{\pi T} \cdot \frac{(x_2(n)+x_2(n+1))x_1'(n) - (x_1(n)+x_1(n-1))x_2'(n)}{(x_1(n)+x_1(n-1))^2 + (x_2(n)+x_2(n+1))^2} \quad (14)$$

여기서 필터이득보상은 (15), (16)식을 사용하여 얻을  
 수 있으며 정확한 주파수를 추정하기 위해서는 피드백  
 루프에서 보상공정을 삽입하는 것이 필요하다.

$$|H_s(f)| = \frac{2 \sin(\pi f_0/f_s) \sin(\pi N f/f_s) \cos(\pi f/f_s)}{\cos(2\pi f/f_0) - \cos(2\pi f_0/f_s)} \quad (15)$$

$$|H_c(f)| = \frac{2 \cos(\pi f_0/f_s) \sin(\pi N f/f_s) \sin(\pi f/f_s)}{\cos(2\pi f/f_s) - \cos(2\pi f_0/f_s)} \quad (16)$$

다음 계산함수를 만들 때 각 샘플링 간격에서 구간 선  
 형성을 가정했기 때문에 주파수 추정에서 (17)식과 같

이 보상해야 한다.

$$f_{err} = \frac{2\pi^2 f^3 \Delta T^2}{3} \quad (17)$$

따라서 주파수 추정은  $f_{err}$ 를 더하면 된다.

$$f = f + f_{err} \quad (18)$$

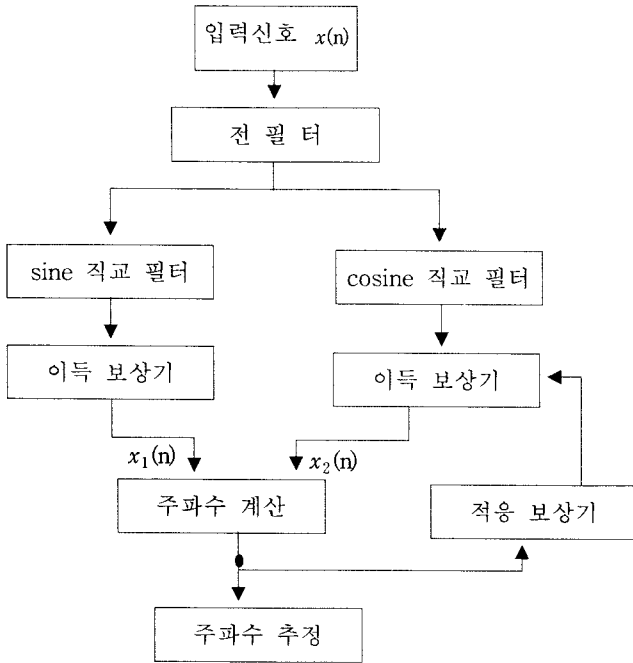


그림 2 주파수 추정 알고리즘의 구조

Fig. 2 structure of the frequency measurement algorithm

#### 4. 알고리즘의 모의 및 결과 검토

##### 4.1 사고 모의

제한된 기법의 성능을 평가하기 위한 모의 데이터들은 전자과도해석프로그램인 EMTP를 이용하여 시뮬레이션을 이용하여 수집되었다. 그림3의 모델계통의 전원은 154[kV]인 160[km]의 공장을 갖는 병행2회선 송전선로로써 선로정수는 표1과 같다.

표 1. 선로정수

	R[Ω/km]	X[Ω/km]	Y[ S/km]
영 상 분	0.3088	3.4732	0.0038
정 상 분	0.1006	1.2380	0.0093
역 상 분	0.1006	1.2380	0.0093

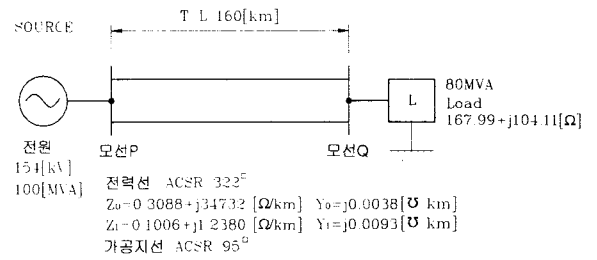


그림3. 모델 전력계통

#### (1) 전압사고각 90°, 80[km]지점 A상 지락고장

그림4와 그림5는 정상상태가 2주기정도 지속되다가 약 33.33[ms]시점에서 전압사고각이 90°, 전원으로부터 80[km]지점에 1선지락고장이 발생한 경우의 전압과 전류신호이다. 그림 4는 고장회선의 전압신호로 고장거리가 중거리로 선로임피던스가 40[km]의 두배이므로 고장상의 전압감소가 40[km]고장에 비해 조금 작아 졌음을 알 수 있다.

그림5는 건전회선과 고장회선의 고장 상전류신호이다. 고장회선의 고장상 전류는 선로임피던스가 40[km]의 2 배이므로 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.

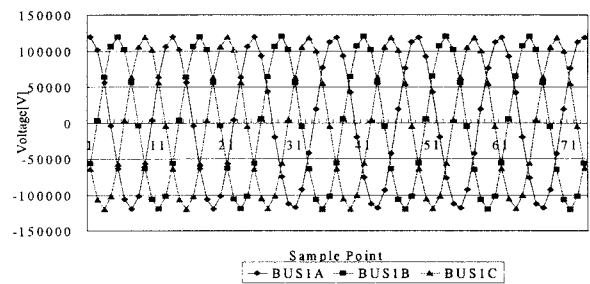


그림4. A상 지락고장시 고장회선 전압신호  
(전압사고각 90°, 80[km]지점 사고)

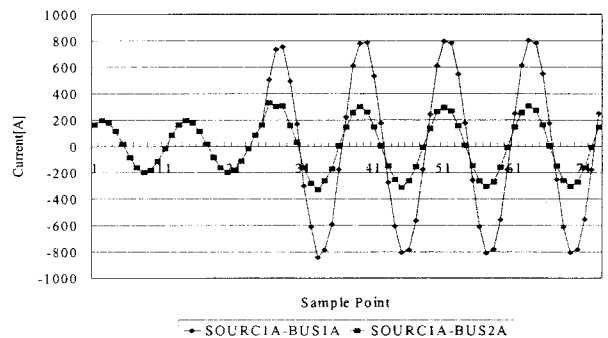


그림5. A상 지락고장시 건전회선과 고장회선의 A상 전류신호  
(전압사고각 90°, 80[km]지점 사고)

(2) 전압사고각 0°, 80[km] 지점 A상 지락고장

그림8과 그림9는 정상상태가  $2\frac{1}{4}$  주기정도 지속되다가 약 37.5[ms]시점에서 전압사고각 0°, 전원으로부터 80[km]지점에서 1선지락이 발생한 경우의 전압과 전류 신호이다. 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.

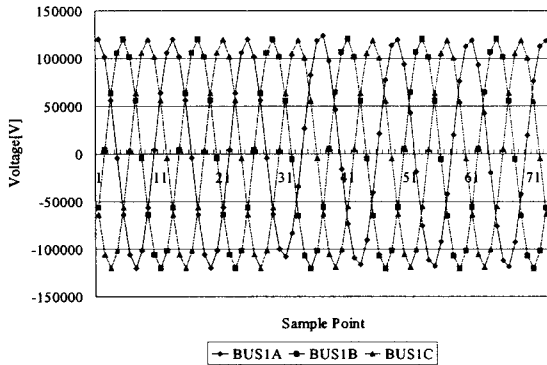


그림6. A상 지락고장시 고장회선 전압신호 (전압사고각 0°, 80[km]지점 사고)

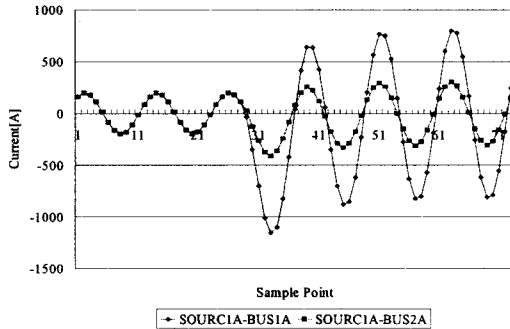
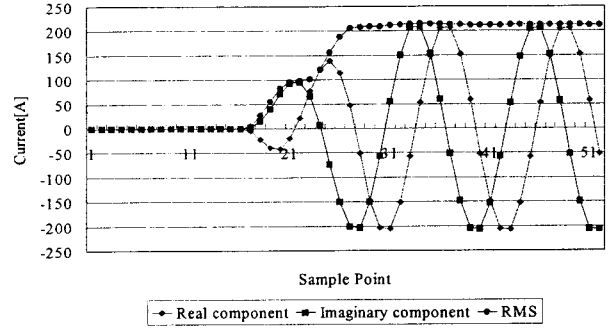


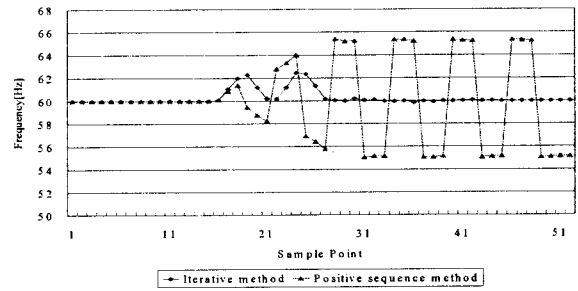
그림7. A상 지락고장시 건전회선과 고장회선의 A상 전류신호 (전압사고각 0°, 80[km]지점 사고)

4.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

그림 7과 그림 8은 모선으로부터 거리가 80[km]지점, 전압 사고각이 0°와 90°인 시점에서 A상 지락고장이 발생하였을 경우, 고장난 A상의 영상전류와 전압에 대하여 여러 가지 주파수 추정 기법을 적용한 결과이다. 제안된 기법의 최대추정오차가 전압사고각0°에서는 2.432373[Hz], 전압사고각90°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 최대추정오차가 감소함을 알 수 있다.

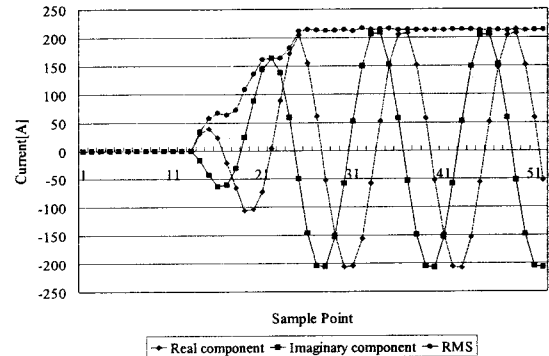


(a) Zero phase sequence current signal (fault distance : 80[km], fault angle : 0 degree)

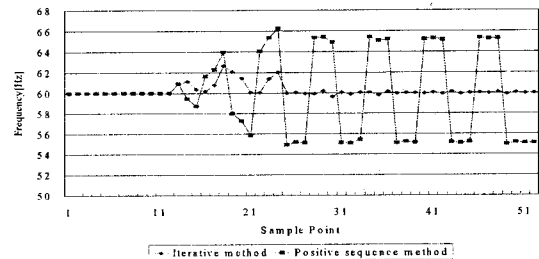


(b) Estimates of frequency for faulted voltage signal (under A phase ground fault at 0 degree)

그림8. 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)

그림9. 고장상태에서의 주파수 추정 기법의 비교(90°,80[km])

## 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 운전 중인 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 페이지측정이 정확하다는 것이다. 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 직류옴셋을 제거하는 직류옴셋제거 필터와 입력신호로부터 기본파를 추출하는데, 연산을 간단하게 하는 FIR 필터를 설계하여 적용하였다.
- 2) 종래의 디지털필터가 가지고 있던 연산 시간상의 문제점을 개선하여 보다 빨리 기본파 페이지를 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 실제 계통에 적용, 온라인으로 동작시킴으로써 실제 계통보호를 도모하는 과제가 더욱 연구되어야 할 것이다.

## [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. 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.
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.