

전력설비의 정밀주파수진단을 위한 기법

남시복 , 이훈구
용인송담대학

A Technique for Accurate Measurement of Power System Frequency

S. B. Nam , H. G. Lee
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

계통에서 발전량과 부하사이의 전력 불균형 현상 시 일어나는 주파수의 변화를 찾아내기 위한 계통주파수의 추정 은 아직까지 대부분 아날로그 측정 장치에 의존해 왔다[3,4]. 근래에 들어 디지털 형태의 주파수계전기가 개발되고는 있으나 이러한 주파수계전기에서 이용하고 있는 주파수 측정 방식도 대부분 컴퍼레이터 (comparator)를 이용하여 입력 신호의 연속적인 두 개의 영점통과(zero-crossing)사이의 시간을 이용하고 있기 때문에 그 특성에 있어 문제점이 제기되고 있다. 즉, 온도 등에 의한 소자의 파라미터 변화로 정확하고 일정한 응답을 얻는데 한계가 있을 뿐만 아니라 잡음에 의하여 입력 신호의 영점통과 포인터가 이동하거나 중복적인 영점 통과로 인하여 측정 오차가 발생할 수 있다[5,6].

최근에는 반도체 기술 및 마이크로프로세서의 발달과 더불어 이러한 아날로그 방식이 가지는 단점을 보완하고 자 계통 신호를 샘플링하여 얻은 디지털화된 전압 신호에 신호처리 기법을 도입함으로써 주파수를 추정하는 디지털 주파수 추정 알고리즘들이 제안되었다. 1982년 A.G. Phadke와 J.S. Thorp등이 DFT(discrete Fourier transform)를 통해 전압의 기본주파수(fundamental frequency : 이하 기본파) 페이저를 추출하고 전압의 정상분(positive sequence component) 페이저 위상각 (phasor angle)의 변화율을 이용하여 계통내의 주파수 및 주파수 변화율을 추정할 수 있는 기법을 발표한 이래 현재까지 이와 관련된 연구가 활발히 진행되어 오고 있

다[7,8].

본 논문에서는 잡음과 왜곡에도 충분한 정확성을 가지고 미세한 편이뿐만 아니라 계통에서 발생할 수 있는 광역의 편이에 대해서도 신뢰성 있는 정확도로 고속의 추정을 해낼 수 있는 주파수 추정 기법의 개발을 시도하였다. 마이크로프로세서의 기억 용량 및 연산 부담을 줄이고 잡음이 섞인 왜곡된 신호로부터 정확한 정상분 페이저의 추출을 위해 입력신호 샘플치의 부호변동만을 이용하는 덧셈 연산만으로 출력을 얻을 수 있도록 FIR 필터 (finite duration impulse response filter)를 설계하여 전압의 기본파를 추출하고, 페이저 위상각의 시간당 변화율을 통해 계통 주파수의 편이를 추정함으로써 보다 정확한 주파수의 추정을 가능하게 하였다. 아울러 전자과 도해석프로그램인 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.

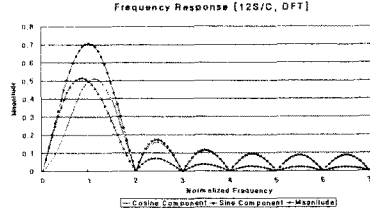
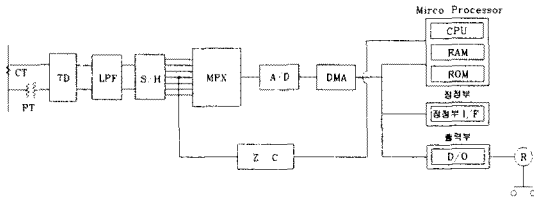
주파수는 전력계통 운용의 중요한 파라미터이며 과거 마이크로프로세서를 이용한 디지털계전기에서 많은 수의 적정한 주파수 측정용 알고리즘이 제시되었다. 이 알고리즘들은 칼만필터, 최소자승법, 반복 페이저 상 변환(recursive phasor phase change) 그리고 이산푸리에 변환(Discrete Fourier Transform : DFT)를 포함하는 다양한 기법을 시도하였다.

2. 종래 디지털 주파수 계전기

근래에 들어 개발되고 있는 디지털 계전기와 주파수측정장치에서는, 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, 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



(b) DFT 필터

ZC : Zero-crossing detector

3. FIR, DFT 필터의 주파수 응답특성

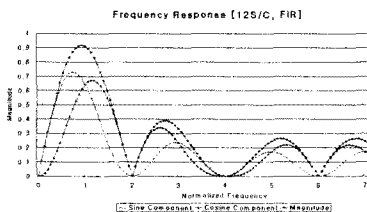
FIR필터의 주파수 응답은 식(1), 식(2)와 같이 임펄스 응답을 Fourier 변환하여 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F_{S1}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} h_{S1}(t)e^{-j\omega t} dt \\
 &= \int_0^{T/2} e^{-j\omega t} dt + \int_{T/2}^T e^{-j\omega t} dt \quad (1) \\
 &= \frac{2}{j\omega} e^{-j\omega T/2} \left[\cos \frac{\omega T}{2} - 1 \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{C1}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} h_{C1}(t)e^{-j\omega t} dt \\
 &= \int_0^{T/4} e^{-j\omega t} dt - \int_{T/4}^{3T/4} e^{-j\omega t} dt + \int_{3T/4}^T e^{-j\omega t} dt \quad (2) \\
 &= \frac{2}{\omega} e^{j\omega T/2} \left[\sin \frac{\omega T}{2} - 2\sin \frac{\omega T}{4} \right] \\
 (T = \frac{2\pi}{\omega_0} : \text{기본 주파수 } \omega_0 \text{의 한주기})
 \end{aligned}$$

$F_{S1}(\omega)$, $F_{C1}(\omega)$ 는 각각 sine성분 및 cosine성분 추출을 위한 FIR필터의 주파수 응답 특성을 나타낸다. 그림1은 기본과 추출을 위한 FIR필터와 DFT필터의 주파수 응답의 비교이다.

필터의 출력은 이산 입력 신호와 임펄스 응답간의 이산 컨벌루션(discrete convolution)을 이용하여 구할 수 있다. 임펄스 응답이 어떤 샘플링 순간에서도 1 또는 -1값만을 가지므로 이산 컨벌루션 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

그림2. 주파수 응답 비교

이산 입력 신호와 임펄스 응답간의 이산 컨벌루션을 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.

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

$$\begin{aligned}
 C_1 &= x_k + x_{k-1} + x_{k-2} + x_{k-9} - x_{k-10} - x_{k-11} \\
 &\quad - (x_{k-3} + x_{k-4} + x_{k-5} + x_{k-6} + x_{k-7} + x_{k-8}) \quad (6)
 \end{aligned}$$

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

4. 페이지 연산을 이용한 주파수 추정 알고리즘

고조파와 잡음이 포함된 입력신호로부터 기본 주파수 성분의 실수부와 허수부를 추출하기 위해 DFT 디지털 필터를 사용한 주파수 응답은 식 (7)과 같이 표현 할 수 있다.

$$H(Z) = \sum_{k=0}^{n-1} v_k Z^{-k} \quad (7)$$

기본주파수에 상응하는 실수부와 허수부의 2개의 주파수 응답으로 표현하면 식 (8),(9)이 된다.

$$R_e[H(e^{-j \frac{2\pi}{F_s}})] = \sum_{k=0}^{n-1} v_k R_e[e^{-j \frac{2\pi}{F_s}}] \quad (8)$$

$$I_m[H(e^{-j \frac{2\pi}{F_s}})] = \sum_{k=0}^{n-1} v_k I_m[e^{-j \frac{2\pi}{F_s}}] \quad (9)$$

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 (10)과 같이 \overline{V}_n 의 페이저 형태의 신호로 표현할 수 있다.

$$\overline{V}_n = V_{rn} + jV_{in} \quad (10)$$

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 $\overline{V}_{(n+1)} = V_{r(n+1)} + jV_{i(n+1)}$ 로 표시된다.

페이저각 차이(phasor angle difference)는 페이저의 회전으로 표현할 수 있다. 그림 3의 왼쪽과 같이 기하학적인 해석을 통하여 페이저각 차이 $\theta_{n+1} - \theta_n$ 는 식 (11)과 같이 $(n+1)$ 번째 데이터 윈도우와 n 번째 데이터 윈도우에 대응하는 페이저의 실수부와 허수부를 사용하여 추정할 수 있다.

$$\theta_{n+1} - \theta_n = \tan^{-1} \left[\frac{V_{rn}V_{i(n+1)} - V_{in}V_{r(n+1)}}{V_{rn}V_{r(n+1)} + V_{in}V_{i(n+1)}} \right] \quad (11)$$

기본주파수 f_0 를 갖는 페이저의 회전은 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$\theta_{n+1} - \theta_n = \frac{(2\pi f_0)}{F_s} \quad (12)$$

페이저각 차이는 입력신호의 기본파 f_0 와 같도록 가정하여 설계된 DFT 필터를 사용하여 계산된다면 추정주파수 f 는 식 (13)이 될 수 있다.

$$f = \frac{\theta_{n+1} - \theta_n}{\frac{2\pi}{F_s}} \quad (13)$$

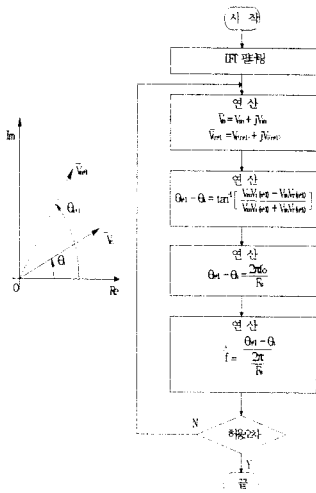


그림 3. 페이저연산에 의한 주파수추정 기법의 흐름도

5. 알고리즘의 모의 및 결과 검토

5.1 사고 모의

제안된 기법의 성능을 평가하기 위한 모의 데이터들은 전자과도해석프로그램인 EMTP를 이용하여 시뮬레이션을 이용하여 수집되었다. 그림4의 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

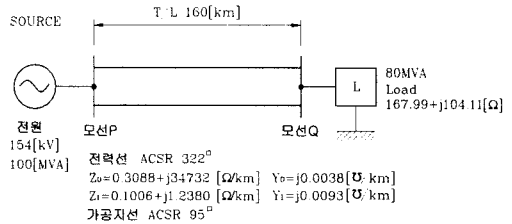


그림4. 모델 전력계통

(1) 전압사고각 90°, 80[km]지점 A상 지락고장

그림5와 그림6은 정상상태가 2주기정도 지속되다가 약 33.33[ms]시점에서 전압사고각이 90°, 전원으로부터 80[km]지점에 1선지락고장이 발생한 경우의 전압과 전류신호이다. 그림 5는 고장회선의 전압신호로 고장거리가 증가하면 선로임피던스가 40[km]의 두배이므로 고장상의 전압강소가 40[km]고장에 비해 조금 작아 졌음을 알 수 있다.

그림6은 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.

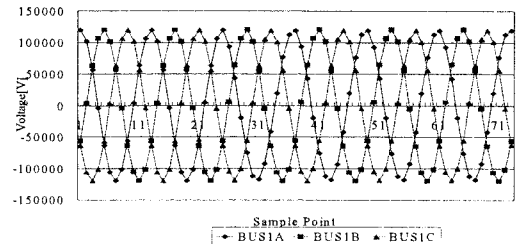


그림5. A상 지락고장시 고장회선 전압신호 (전압사고각 90°, 80[km]지점 사고)

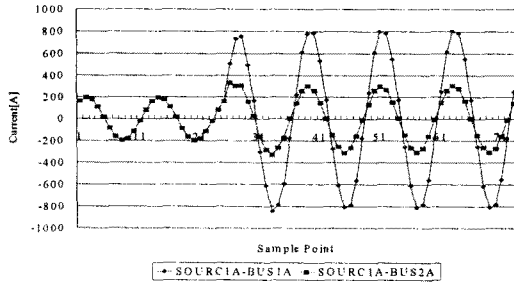


그림6. A상 지락고장시 건전회선과 고장회선의 A상 전류신호 (전압사각각 90°, 80[km]지점 사고)

(2) 전압사각각 0°, 80[km] 지점 A상 지락고장

그림7과 그림8은 정상상태가 $2\frac{1}{4}$ 주기정도 지속되다가 약 37.5[ms]시점에서 전압사각각 0°, 전원으로로부터 80[km]지점에서 1선지락이 발생한 경우의 전압과 전류 신호이다. 전압사각각 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.

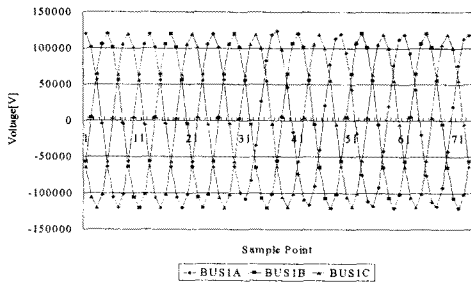


그림7. A상 지락고장시 고장회선 전압신호 (전압사각각 0°, 80[km]지점 사고)

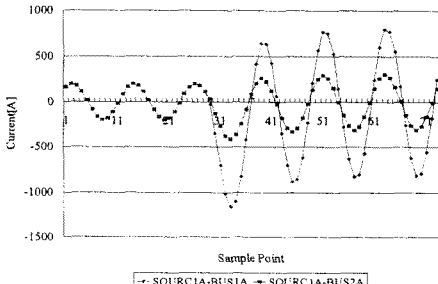
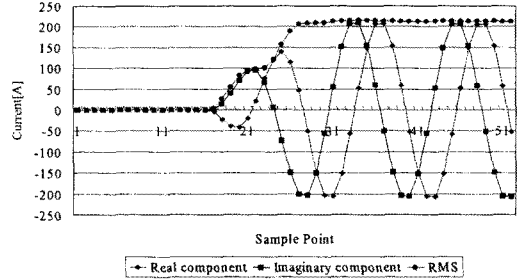


그림8. A상 지락고장시 건전회선과 고장회선의 A상 전류신호 (전압사각각 0°, 80[km]지점 사고)

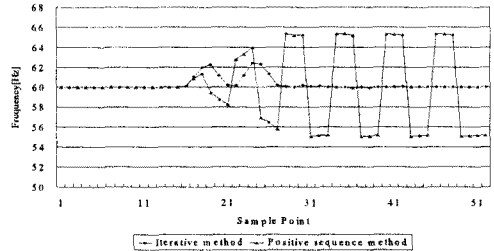
5.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

그림 9과 그림 10은 모션으로부터 거리가 80[km]지점, 전압사각각이 0°와 90°인 시점에서 A상 지락고장이 발생하였을 경우, 고장난 A상의 영상전류와 전압에 대하여 여

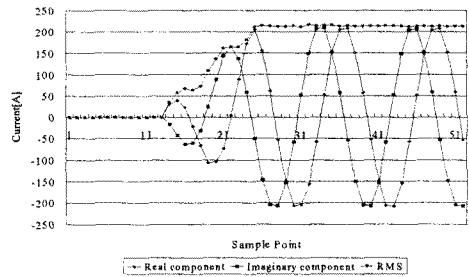
러 가지 주파수 추정 기법을 적용한 결과이다. 제안된 기법의 최대추정오차가 전압사각각0°에서는 2.432373 [Hz], 전압사각각90°에서는 2.654016[Hz]로 정상분 페이저 기법의 5.395297[Hz], 6.25512[Hz]보다 작아 우수함을 알 수 있다. 40[km]사고와 비교하여 임피던스의 증가 및 영상전류의 감소로 최대추정오차가 감소함을 알 수 있다.



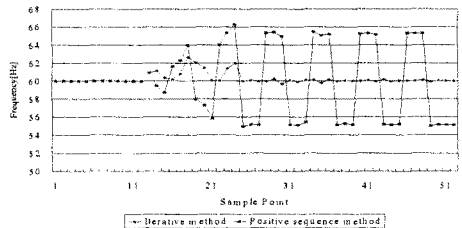
(a) Zero phase sequence current signal (fault distance : 80[km], fault angle : 0 degree)



(b) Estimates of frequency for faulted voltage signal (under A phase ground fault at 0 degree) 그림9. 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) 그림10. 고장상태에서의 주파수 추정 기법의 비교(90°,80[km])

6. 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 논문에서 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) 직류오프셋을 제거하는 직류오프셋제거 필터와 입력신호로부터 기본파를 추출하는데, 연산을 간단하게 하는 FIR 필터를 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 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.43, 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.