

페이저 상차각 연산에 의한 전력계통 주파수 추정 알고리즘

남시복
용인송담대학 전기설비과

박현원
원주전문대학 전기과

신명철
성균관대학교 전기공학과

A Frequency Estimation Algorithm using Phase Angle Difference Calculation in Power System

S.B.Nam
Y.S Jr College

C.W.Park
W.J.Natl Jr. College

M.C.Shin
S.K.K. Univ

Abstract - Frequency and phasor are the most important quantities in power system operation because they can reflect the whole power system situation. This paper proposes a design and implementation using phase angle difference calculation for frequency measuring in power system. The process is considered to be complicated as compared to the present proposed method. Performance test results, using signals from Excel program, indicate that the proposed technique can provide accurate estimates within 16ms.

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

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

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

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 \overline{V}_n 의 페이저 형태의 신호로 표현할 수 있다.

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

여기서, V_m 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 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.

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

2. 본 론

2.1 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 표현할 수 있다.

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

단상 페이지 기법의 5.360366[Hz]보다 적어 우수함을 알 수 있다.

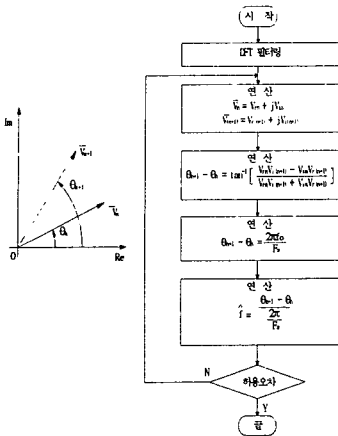
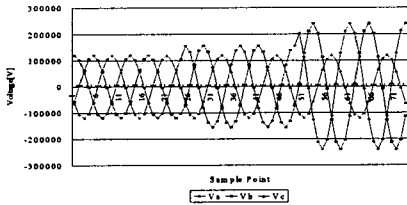


그림 2.1 페이지연산에 의한 주파수추정 기법의 흐름도

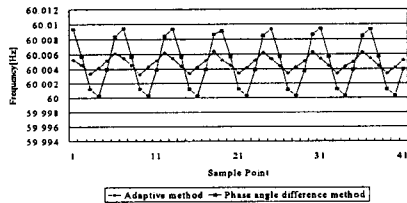
2.2 시뮬레이션

2.2.1 전압 크기 변화에 대한 주파수 추정 결과

그림 2.1은 전압 크기에 변화에 대한 제안된 기법의 성능을 평가하기 위한 입력 파형과 결과이다. 정상 상태의 전압 파형이 2주기 지속되다가 V_b 와 V_c 를 2주기는 1.3[pu], 그 다음은 2[pu] 변화되었을 경우 여러 가지 주파수 추정 기법을 적용한 결과이다. 그림 2.1(b)로부터 제안된 기법의 최대 추정 오차는 0.006373[Hz]인데 반해 단상 페이지 기법은 0.009383[Hz]로 제안된 기법이 우수함을 알 수 있다.



(a) Arbitrary voltage signal

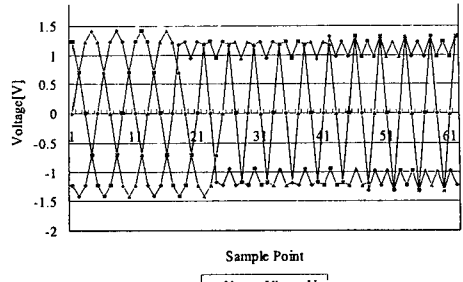


(b) Estimates of frequency for an arbitrary voltage signal

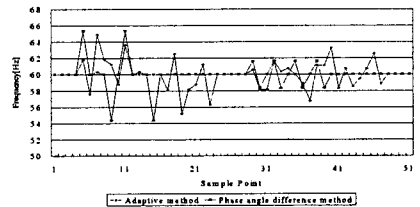
그림 2.1 전압 크기 변화에 대한 주파수 추정 기법의 비교

2.2.2 고조파 함유에 대한 주파수 추정 결과

그림 2.2는 고조파 함유에 대한 제안된 기법의 성능을 평가하기 위한 입력 파형과 결과이다. 정상 상태의 기본파 2주기와 다음 2주기는 기본파 + 3조파, 그 다음 2주기는 기본파 + 3조파 + 5조파를 합성하였을 경우 여러 가지 주파수 추정 기법을 적용한 결과이다. 그림 2.2(b)로부터 제안된 기법의 최대 추정 오차는 4.89904[Hz]로



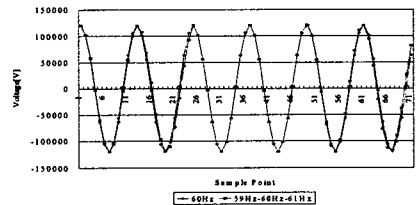
(a) Arbitrary voltage signal (under 60[Hz] + 3rd harmonic + 5th harmonic)



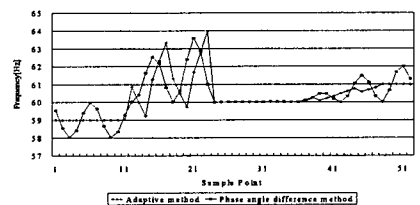
(b) Estimates of frequency for a voltage signal
그림 2.2 고조파 신호에 대한 주파수 추정 기법의 비교

2.2.3 주파수 변화에 대한 주파수 추정 결과 (59[Hz](2주기) + 60[Hz](2주기) + 61[Hz](2주기)로 변화)

그림 2.3은 주파수 변화에 대한 제안된 기법의 성능을 평가하기 위한 것으로 59[Hz]로 2주기, 다음은 60[Hz]로 2주기, 그 다음은 61[Hz]로 2주기 변화시켰을 경우 입력 파형과 여러 가지 주파수 추정 기법을 적용한 결과이다. 그림 2.3(b)에서 제안된 기법의 최대 추정 오차는 3.995918[Hz]인데 비해 단상 페이지 기법은 3.58262[Hz]로 우수한 것처럼 보이나 제안된 기법은 주파수 변화 직후에만 과도 진동할 뿐 즉시 정상 상태의 주파수를 잘 추정하나 단상 페이지 기법은 계속 진동함을 알 수 있다.



(a) A phase arbitrary voltage signal (under 59[Hz] + 60[Hz] + 61[Hz])



(b) Estimates of frequency for an arbitrary voltage signal
그림 2.3 주파수 변화에 대한 주파수 추정 기법의 비교 (59[Hz]+60[Hz]+61[Hz])

2.2.4 60[Hz]와 60 ± 0.01[Hz]에서의 주파수 추정 결과

그림 2.4는 60[Hz]와 60 ± 0.01[Hz]에서의 제안된 기법의 주파수 추정 결과이다. 계통 주파수가 ±0.01[Hz]범위로 변동하여도 허용 오차 범위 내로 수렴함을 알 수 있으며 부하 특성으로 인하여 59.99[Hz]의 최대 추정 오차 0.006188[Hz]가 60.01[Hz]의 0.006212[Hz]보다 작아 주파수 추정이 더 정확함을 알 수 있다.

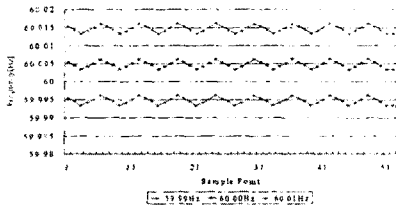


그림 2.4 주파수 추정 결과(60[Hz]와 60 ± 0.01[Hz])

2.2.5 60[Hz]와 60 ± 10[Hz]에서의 주파수 추정 결과

그림 2.5는 60[Hz]와 60 ± 10[Hz]에서의 제안된 기법의 주파수 추정 결과이다. 계통 주파수가 ±10[Hz]범위로 변동하여도 허용 오차 범위 내로 수렴함을 알 수 있으며 50[Hz]의 최대 추정 오차 0.005359[Hz]가 70[Hz]의 0.007468[Hz]보다 작아 주파수 추정이 더 정확함을 알 수 있다.

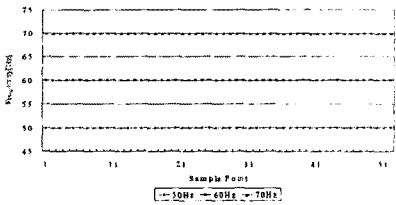


그림 2.5 주파수 추정 결과(60[Hz]와 60 ± 10[Hz])

2.2.6 주기 당 샘플링 수 16[s/c], 59.99[Hz], 60[Hz], 60.01[Hz]에서의 주파수 추정 결과

그림 2.6은 계통 주파수 59.99[Hz], 60[Hz], 60.1[Hz]에서 주기 당 샘플링 수를 16[s/c]로 변경하였을 경우 주파수 추정 결과이다. 59.99[Hz], 60[Hz], 60.01[Hz] 최대 추정 오차가 각각 0.02044[Hz], 0.020454[Hz], 0.021211[Hz]로 12[s/c]의 0.006188[Hz], 0.006197[Hz], 0.006212[Hz]보다 증가하여 주기 당 샘플링 수가 12[s/c]인 경우가 16[s/c]인 경우보다 우수함을 알 수 있다.

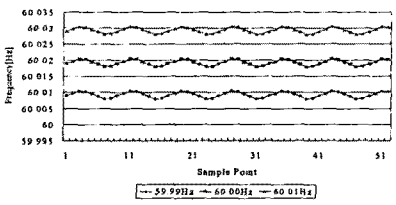


그림 2.6 주파수 추정 결과(16[s/c], 60 ± 0.01[Hz])

2.2.7 주기 당 샘플링 수 24[s/c], 50[Hz], 60[Hz], 70[Hz]에서의 주파수 추정 결과

그림 2.7은 계통 주파수 50[Hz], 60[Hz], 70[Hz]에서 주기 당 샘플링 수를 24[s/c](60[Hz]의 경우 샘플링 주파수는 1440[Hz])로 변경하였을 경우 주파수 추정 결과이다.

50[Hz], 60[Hz], 70[Hz] 최대 추정 오차가 각각 0.001797[Hz], 0.002408[Hz], 0.002507[Hz]로 12[s/c]의 0.005359[Hz], 0.006197[Hz], 0.007468[Hz]보다 작아 주기 당 샘플링 수 24[s/c]가 12[s/c]나 16[s/c]보다 우수함을 알 수 있다.

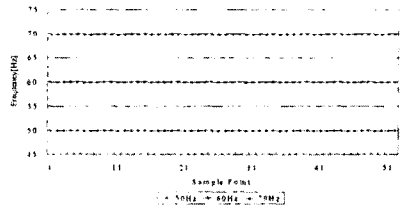


그림 2.7 주파수 추정 결과(24[s/c], 60 ± 10[Hz])

4. 결론

본 논문에서는 컴퓨터 소자를 사용하여 영점 통과와 시간을 연산하여 주파수를 측정하는 기존의 디지털 계전기에서 사용되는 방법과는 전혀 다른 방법으로 전적으로 소프트웨어 프로그램만으로 처리하는 디지털 주파수 추정 기법을 제안하였다. 모의하기 어려운 데이터들은 스프레드 시트 프로그램인 Excel을 이용하여 사용자 정의 임의 파형 데이터를 확보하였다. 제안된 기법은 C언어로 구현하였으며 제시한 기법은 유사 정규 주파수, 정규 주파수, 비정규 주파수를 측정하기에 적합하며 마이크로 프로세서를 이용한 계전기나 주파수 측정 계기에 유용할 것으로 판단된다.

제시한 디지털 적응형 주파수 추정 기법은 좁은 범위에서의 계통 에너지 불균형시 에너지 평형 상태로의 회복을 위한 주파수 계전기나 넓은 주파수 범위에서의 발전기 및 변압기 보호를 위한 전압/주파수 계전기 등과 같은 계통 제어 및 보호 장치 구현에 이용한다면 에너지 불균형시의 악영향을 감소시킬 수 있을 것으로 생각된다. 본 연구가 펜티엄 IV 850[MHz] PC를 사용하여 오프라인으로 수행되었으나 향후, 관련된 부분들을 DSP B/D 하드웨어로 제작하여 온라인 상에서 실시간으로 동작시킬으로써 실제 계통에 적용할 수 있는지의 여부를 확인할 것이다.

[참고 문헌]

1. P.J. Moore, A.T. Johns, "Frequency relaying ba instantaneous frequency measurement", IEEE Trans. Vol.11, No.4, pp.1737-1742, October, 1996.
2. P.T. Moore, R.D. Carranza, and A.T. Johns, System Tests on a New Numeric Method of Power Sy Frequency Measurement," IEEE Transactions on Delivery, Vol. 11, No. 2, pp. 696-701, Apr. 1996.
3. M.M. Giray, M.S. Sachdev "Off-nominal freq measurement in electric power system", IEEE Tran PD., Vol.4, No.3, pp.1573-1578, July, 1989.
4. A.G. Phadke, J.S. Thorp, "A new measurement te for tracking voltage phasor, local system frequency, a of change of frequency", IEEE Trans. on PAS., PAS-102, No.5, pp.1025-1034, May, 1983.
7. 남시복, 박철원, 신명철, "디지털신호처리 기법을 이용한 전력계통주파수 추정 기법에 관한 연구", 대한전기학회 2001년도 하계학술대회 논문집, pp.170-173, 2001년 7월.
8. 남시복, 박철원, 신명철의 1인, "FIR필터를 이용한 전력계통 주파수 추정에 관한 연구", 2001년도 대한전기학회 교육위원회의 학술대회 논문집, pp. 80-85, 2001. 7.
9. 남시복, "페이지 상차과 연산에 의한 적응형 전력계통 주파수 추정 알고리즘", 성균관대학교 박사학위 논문, 2001년