

계전기를 위한 고속의 주파수 계측 알고리즘

김병진, 이창호,
현대중공업(주)

박종찬
오산대학 전기시스템제어과

The Study of Fast Frequency Measurement Technique for Protection Relay

Beung-Jin Kim, Chang-Ho Lee
Hyundai Heavy Industries Co.,Ltd.

Jong-Chan Park
OSan College

Abstract - In this paper, the frequency compensator for digital protective relay is introduced. Due to sudden appearance of generation-load or fault in power system, the frequency can deviate from its nominal value. The Orthogonal filter adopted to digital protective relay is exposed to the problem. Therefore, the frequency variation makes a difficult to protective function and power measurement in digital protective relay.

The essential property of the proposed algorithm presented is its outstanding immunity to both signal orthogonal component magnitudes and DFT filter gain variations which ensures below 0.05Hz accuracy of estimation. Additionally, the proposed method has excellent characteristics with low signal sampling rate. Based on the frequency estimation, author design under frequency protection relay for generator and verifies its performance with several experimental tests.

야하며 0.01[ms]의 응답속도를 가져야 한다. 또한 전압의 크기에 따라서 계전기의 동작 특성이 변화해야하므로 주파수에 변동에도 무관한 정밀한 전압계측이 수행되어야 한다. 이와 더불어 현장에서 자주 발생하는 역상결선의 오류에도 무관하게 동작하기 위해 단상전압(single-phase voltage) 신호를 이용하여 정밀한 계측이 이루어져야 한다.

이와 같은 제약을 만족하기 위해서 본 연구에서는 주파수 변동에 따른 주기 벡터의 차이를 이용하여 위상변동을 검출하는 방식의 고속(fast)의 주파수 검출방식을 이용하였으며 위상검출에 사용된 DFT 필터의 주파수 변동보상을 위한 보상을 설계하여 정밀도(accuracy)를 향상시켰다. 제안된 방식을 현대중공업 디지털보호계전기(HMAP)에 실제 적용하여 저주파수 보호계전기의 기본 알고리즘으로 채택하였다.

1. 서 론

전원주파수는 시스템의 정상상태 여부를 판단할 수 있는 중요한 지표이다. 특히 발전기 병렬운전이나 전력계통 연계지점에서의 정밀한 주파수 검출은 분산전원이 증가되고 있는 현재 중요시 여겨지고 있다. 만약 계통에서 측정된 전압과 전류 신호가 순수한 정현파(sinusoidal) 형태를 갖는다면 주파수 계측은 용이하고 정확한 결과를 가질 수 있다. 그러나 실제 현장에서 계측되는 신호들은 고조파에 의해서 왜곡되면서 시간적으로 왜곡 상태가 바뀌는 특성(time-varying)을 갖는다.

대부분의 전기설비가 마이크로프로세서를 기반으로 한 디지털보호계전기 형태로 변화하여 디지털 신호처리를 이용한 계측이 내부적으로 이뤄지고 있다. 여러 계측요소 중에 주파수 계측은 정밀성과 속응성을 갖춰야하는 문제 때문에 마이크로프로세서에 많은 연산 부담을 준다. 지금까지 제안된 주파수 계측에 관한 대표적인 연구로는 영점검출 방법(zero-crossing)이 있다[1,2]. 이 방법은 간단하지만 많은 양의 데이터가 필요하고 연산시간이 많이 소요되는 단점을 갖고 있다. DFT필터를 기반으로 샘플링 주기를 조절하여 시스템 주파수를 찾아가는 방법도 제안되었지만 샘플링 주파수를 무한히 나눌 수 없는 이유로 오차를 갖는다. 이외에 적응관측기법(adaptive estimation)기법을 이용한 방법이 제시되었지만 정밀도가 관측에 필요한 데이터의 양에 비례하여 감소되는 단점을 갖는다[3].

본 연구에서는 디지털보호계전기의 저주파수 보호계전기(UFR)를 위한 주파수 계측 알고리즘을 개발하였다. 계전기에 사용되는 제한된 샘플링 주파수(720Hz)를 가진 조건에서도 계측 오차가 0.05[Hz] 이하의 정밀도를 가져

2. 본 론

2.1 주파수 계측 알고리즘

직교필터와 병렬로 구성된 주파수 관측기(frequency observer)는 한 주기 차이 벡터의 위상차를 이용하여 구할 수 있다. 먼저 전류는 부하변동에 따라 크기가 변화하고 고조파의 영향을 많이 받으므로 선간 전압을 이용하여 주파수를 관측하는 것이 유리하다.

그림 1에서 알 수 있듯이 주파수의 변동이 발생하면 두 샘플링 데이터 $x(k)$ 와 $x(k-12)$ 사이에 차이 ϕ 가 발생하게 된다. 여기서 주기당 12 샘플링을 하며 공칭 주파수 $f(k)$ 이고 주파수 변동이 $\Delta f(k)$ 만큼 발생한다는 가정에서 다음 식 (1)에서 식 (6)까지의 과정을 거쳐 주파수를 관측할 수 있다. 두 샘플링 데이터의 관계는 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta(k) = \theta(k-12) + \frac{\Delta f(k)}{f(k)} 2\pi \tag{1}$$

이 식을 다시 정리하면 식(2)과 같다.

$$\Delta f(k) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta}{dt} = \frac{f'(k)}{2\pi} (\theta(k) - \theta(k-12)) \tag{2}$$

그러나 식 (2)에서 두 개의 위상정보 $\theta(k)$ 와 $\theta(k-12)$ 을 직접 계산하기는 매우 어렵다. 따라서 다음과 같은 과정으로 주파수를 관측하면 마이크로 프로세서의 연산 부담을 줄일 수 있다. 먼저 두 개의 직교필터의 출력을 이용하여 식 (3)에서 식 (5)와 같은 과정을 통해서 두 샘플링 데이터의 차를 알 수 있으며 마이크로 프로세서의 연산 부담을 줄이기 위해 아크 탄젠트 계산 식 (4)을 멱급수(power series)를 이용하여 계산하였다.

$$A + jB = x(k) - x(k-12)$$

$$C + jD = x(k) + x(k-12) \quad (3)$$

$$m = \tan \frac{\psi}{2} = \frac{|A| + |B|}{|C| + |D|} \quad (4)$$

$$\frac{\psi}{2} = \tan^{-1} m = c_0 + c_1 + c_2 m + c_3 m^2 \quad (5)$$

이렇게 얻어진 두 샘플링 데이터의 위상차를 주파수로 환산하면 식(6)과 같다.

$$\Delta f(k) = \frac{f_0}{\pi} \left(\frac{\psi}{2} \right) \quad (6)$$

이 값을 공칭 주파수에 더해서 식(7)과 같이 주파수를 관측할 수 있다.

$$\hat{f}(k) = \Delta f(k) + f^*(k) \quad (7)$$

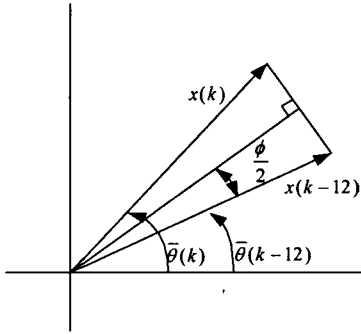


그림 1 주파수 계산
Fig. 1 Frequency measurement

2.2 직교필터를 이용한 주파수 관측기의 오차

전압 신호를 디지털 신호로 변화시켜서 직교필터를 이용해서 주파수를 측정하는 방법에는 두 가지의 커다란 오차 요인을 갖는다. 첫째로 직교필터의 기저(basis) 함수는 공칭(nominal) 주파수를 기준으로 만들어 있기 때문에 만약 주파수가 변동하면 직교필터의 출력 크기에 오차를 포함한다. 두 번째로 이산신호처리에 필요한 신호 샘플링의 주기에 영향을 받는다. 특히 차분방정식(difference equation)을 이용한 주파수 측정 방법[4,5]에서는 정밀한 계측을 위해 빠른 샘플링 주기가 필수적이다.

먼저 직교필터는 입력신호를 직교성을 갖는 두 개의 신호로 분리하는데 사용된다. 이러한 직교필터의 임펄스 입력에 대한 위상 특성은 주파수에 선형적인 특성을 가진다. 입력된 신호는 직교필터의 cosine 기저함수와 sine 기저함수를 통과하면서 90° 위상 차이를 갖는 출력 데이터를 발생한다. 그러나 직교필터의 위상 특성은 그림2와 같이 공칭(nominal) 주파수인 경우에만 정확한 값을 갖고 만약 주파수가 변동하면 오차가 발생하는 문제점을 갖는다. 즉, 식 (2)에서 두 개의 기저함수를 이용한 출력을 이용하여 얻어진 각도 정보가 공칭 주파수를 벗어나면 오차를 갖는다는 것이다.

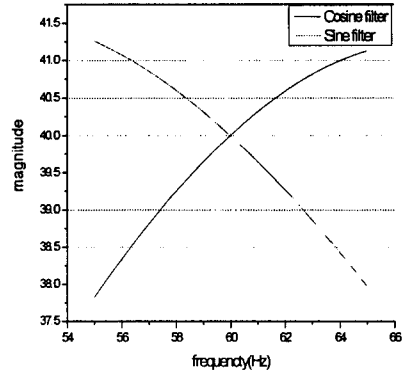


그림 2 직교필터의 주파수 특성
Fig. 2 Frequency characteristics of DFT filter

그림 3은 주파수 변동에 따른 주파수 측정 오차를 나타낸 것이다. 전원 주파수가 필터의 공칭 주파수(60Hz) 보다 높은 경우에 sine측 필터의 출력이 커지고 cosine측 필터의 출력 값은 작아진다. 이와 반대로 공칭 주파수 보다 작은 경우에는 sine측 필터의 값이 작아지고 cosine 필터의 출력 값이 커지는 특성을 갖는다. 따라서 그림 1과 같이 벡터의 궤적이 원형이 아닌 그림 3과 같은 주파수가 변동함에 따라서 타원형의 궤적을 그림에 따라서 오차가 발생하게 된다.

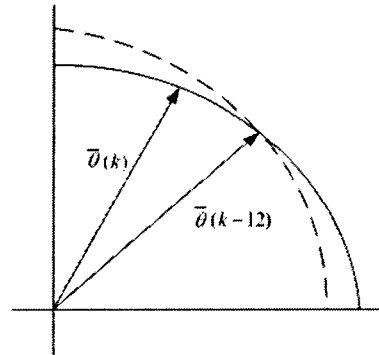


그림 3 직교필터의 크기 응답
Fig. 3 Magnitude response of DFT filter

이러한 문제점을 해결하기 위해 PLL(Phase Locked Loop)을 이용하여 기저함수의 주파수를 변경하는 방법이 소개되었지만 별도의 회로와 분해능이 높은 타이머가 필요하다는 문제점을 갖고 있어서 본 연구에서는 주파수 변동에 따른 필터출력 오차를 보상하기 위한 보상기(compensator)를 설계하였다.

주파수 변동에 따른 보상기의 출력 값은 식 (8)과 (9)에 나타난다[4].

$$G_s(f) = \frac{T_0}{T} \cdot \frac{\sin(2\pi(f-f_{ss})T_0)}{2\pi(f-f_{ss})/T_0} - \frac{\sin(2\pi(f+f_{ss})T_0)}{2\pi(f+f_{ss})/T_0} \quad (8)$$

$$G_c(f) = \frac{T_0}{T} \cdot \frac{\sin(2\pi(f-f_{ss})T_0)}{2\pi(f-f_{ss})/T_0} + \frac{\sin(2\pi(f+f_{ss})T_0)}{2\pi(f+f_{ss})/T_0} \quad (9)$$

여기서 f_{95} 는 공칭 주파수이며 $T_0 = \frac{1}{2f_{95}}$ 이다.

두 번째로 한정된 샘플링의 주기로 발생하는 오차는 샘플링 주기를 빠르게 하여 해결할 수 있지만 많은 연산 양이 필요하기 때문에 계속이외에 다양한 기능을 수행하는 디지털 계전기나 계측기에 적당하지 않으므로 본 연구에서는 차분방정식을 사용하지 않는 식 (7)과 같은 방법을 채택하므로 샘플링 주기의 영향을 최소화하였다.

2.3 주파수 계측 보상기 설계

앞서 언급한 직교필터의 문제점을 고려하여 그림 4와 같은 구성의 주파수 계측부를 설계하였다. 먼저 일정한 시간마다 데이터를 샘플링하여 저장하는 샘플링 창(window)은 과거의 데이터 $x(k-11)$, $x(k-1)$ 와 현재 샘플링된 데이터, $x(k)$,를 이용하여 구성하는 슬라이딩 창(sliding window)을 사용하였다.

검출된 데이터를 sine 과 cosine으로 구성된 두 개의 직교필터를 거치는데 기저함수는 공칭주파수를 기준으로 미리 계산되어 계산 량을 줄였고 이 두 개의 출력들을 식 (7)에 대입하여 주파수를 계산한다. 만약 계산된 주파수가 공칭 주파수와 오차를 갖는다면 주파수 관측기에서 이 오차를 없앨 수 있는 식 (8)과 (9)를 이용한 보상값을 제시하고 다음 주기에 이 값을 고려하여 보상된 주파수 계산 값을 얻을 수 있게 된다.

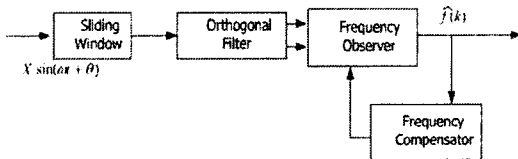


그림 4 주파수 계측 보상기 설계
Fig. 4 Design of frequency compensator

2.4 저주파수 보호계전기의 설계

제안된 주파수 계측방법을 이용하여 저주파수 보호계전기를 설계하였다. 저주파 보호계전기의 주요 용도는 다음과 같이 크게 두가지로 나눌 수 있다. 먼저 계통주파수 저하시 부하차단용으로 발전력 탈락등으로 계통주파수가 저하되면 증기터빈 발전기의 터빈이 진동으로 손상을 받게 되고, 계통에 운전 중인 모든 회전기의 속도가 떨어지는 등 계통이 불안정하게 되며 심한 경우에는 계통이 붕괴될 수도 있다. 이에 대비하여 계통주파수 저하시에는 미리 정해진 몇 단계의 주파수에서 각각 일정량의 부하를 차단하므로 계통의 발전력 부족을 상쇄시켜 계통주파수를 회복시키는 방법이 적용된다.

두번째는 발전기 보호용으로 앞에 설명한 바와 같이 계통주파수가 저하하여 증기 터빈 발전기의 공진 속도에 접근하여 증기 터빈 발전기의 공진 속도에 접근하면 터빈 날개 (특히 저압터빈의 최종단 날개)는 심한 진동으로 손상되며 발전소 소내 보조기기의 속도가 떨어져 정상운전이 곤란하게 된다. 따라서 발전기 보호용 저주파수계전기(UFR)를 설치하여 발전기를 정지시키는 방식도 적용된다. 발전기 보호용 UFR동작으로 발전기가 정지되면 계통 주파수는 더욱 저하되므로 이 용도의 UFR 정지시에는 그 발전기의 저주파수 운전한계(off frequency limit)의 계통의 부하 차단용 UFR 정정치와 협조되도록 검토해야 한다.

본 연구에서 다음과 같은 특성을 갖는 저주파수 보호계전기를 설계하였다.

- 동작치, 동작 시간 정정값 및 판정 기준
- 동작치 정정 : 60[Hz]
- 동작치 판정: 59.995 ~ 60.005 [Hz] 이내

(정정치의 ±0.005Hz 이내)

- 동작시간 정정 : 0.5[Sec]
- 동작시간 판정 : 0.475 - 0.525 [Sec] 이내
- 동작 정정치의 90% 입력에서 ±5% 이내

그림5는 저주파를 인가했을 때에 제안된 주파수 보호계전기의 동작을 나타낸 것이다. 먼저 정상상태에서 60Hz의 공칭 주파수에서 30Hz의 사고 주파수로 입력을 변화시켰을 때에 주파수 계전기가 설정한 0.5초 이후에 동작함을 확인할 수 있었다.

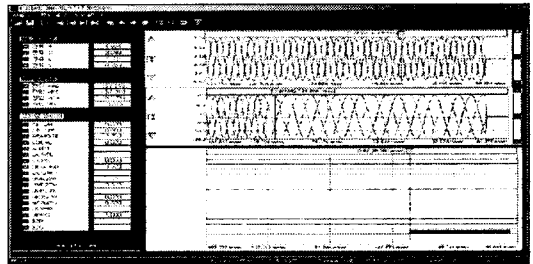


그림 5 주파수 변동에 따른 계전기 동작
Fig. 5 The protection ability of proposed relay with frequency variation

3. 결 론

본 연구에서는 디지털 보호 계전기에 적용 가능한 주파수 측정 알고리즘에 관하여 언급하였다. 디지털 프로세서를 기반으로 한 연산에서 주파수 측정은 프로세서의 부담을 가장 많이 주는 요소로 알려져 왔다. 정밀하고 신속한 주파수 변동에 대한 계측은 직교필터와 보상기를 이용하여 구현되었고 정밀한 보상기법을 이용하여 단상의 정보만으로 정밀도를 유지할 수 있게 구성하였다..

이 본구에서는 이러한 주파수 계측 알고리즘을 기반으로 하여 저주파 보호 계전기를 설계하였다. 저주파 계전기는 주파수 변동을 0.05[%] 오차 내에 측정해야하며 신속한 대처를 위해 가능한 빠르게 계전동작이 수행 되어야 한다. 실험을 통해서 제안된 알고리즘을 현장에 적용 가능한 형태로 설계하여 실증실험을 수행하였다. 여러 가지 실험을 통해서 제안된 방식의 타당성을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

[1] MALIK, O.P., HOPE, G.S., HANCOCK, G.C., ZHAOHUI, LLUQING, Y., and SHOUPING, W., 'Frequency measurement for use with a microprocessor-based turbine governor', Paper No. 91WM 140-4EC, IEEE PES Winter meeting, New York, Feb. 1991.
[2] McILWAINE, S.A., TINDALL, C.E., and McCLAY, W., 'Frequency tracking for power system control', Proc. IEE, C., March 1986, 133, (2), pp. 95-98.
[3] BENMOUYAL, G.: 'Design of a combined global differential and volt/hertz relay for step-up transformers', *IEEE Trans. Power Delivery*, July, 1991, 6, (3), pp.1000-1007.
[4] P J Moore and A T Johns, 'A New Approach to Digital Measurement of Power System Frequency', IEEE Conference on Advances in Power-System Control, Operation and Management, Nov. 1991, pp. 341 - 346.