

디지털 보호 계전기를 위한 주파수 변동 보상기의 설계

김병진, 이보인, 김정한  
현대중공업(주) 기계전기연구소

The Design of Frequency Variation Compensator for Digital Protection Relay

Beung-Jin Kim, Bo-In Lee, Jung-Han Kim  
Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries, Co, Ltd.

**Abstract** - The designed frequency compensator is proposed to make the estimation of amplitude of fundamental frequency immune to frequency variation. The designed method which has a simple structure and low calculation burden is proper to apply digital protective relay. The results of experimental demonstrate that the frequency compensator has good performance to the estimation of amplitude of fundamental frequency against frequency variation.

1. 서 론

전력계통에서의 사고나 부하 변동에 따라 주파수 변동이 일어나며 이 영향에 따라서 기본파 주파수가 변동하는 일이 발생한다. 이러한 주파수 변동은 직교필터를 사용하여 실효값을 측정하는 방식의 디지털 계전기에 계속 오차를 유발한다. 기본파 주파수의 변동은 고조파 차수 배 만큼 고조파 성분의 측정에도 영향을 주어 정확한 보호 계전기능 수행을 가로막는 요소가 되고 있다.

다양한 계측을 통하여 사용자가 정의한 보호동작을 수행하는 계전기는 정확한 계측을 기반으로 하고 있다. 계측된 파라미터로는 주로 교류 전압과 전류의 크기와 위상 및 주파수 등이다. 발전기 보호용 계전기에서는 운전 에 따라 주파수 변동이 매우 심하지만 송전이나 배전계통에 적용되는 계전기는 전체 전력 시스템에 적용되는 공칭(nominal) 주파수를 기준으로 계측을 수행한다. 따라서 주파수는 일정하다고 가정하고 전압과 전류의 위상과 크기를 계측하는데 직교필터를 사용하면 크기와 위상을 동시에 구할 수 있어 디지털 보호 계전기에 많이 사용한다[1][2].

본 연구에서는 주파수 관측기와 보상기를 직렬로 설계하여 변동을 감시하고 그에 따른 오차를 보상하는 방식을 취하였다. 제안된 보상기를 디지털 계전기에 적용하기 위해서는 데이터 처리가 빨라야하는 문제점을 갖는다. 이러한 문제점을 고려한 실시간 보상기를 설계하여 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된 방식의 타당성을 입증하였다.

2. 본 론

주파수 변동에 따른 직교필터의 특성을 그림 1에서 나타내고 있다. 공칭 주파수가 60[Hz]이며 정격 전압이 110[V]인 교류신호의 주파수가 45에서 75[Hz]까지 변동할 경우에 직교필터의 출력은 110에서 99.8[V]까지 변동한다. 이러한 주파수 변동은 고조파 계측에는 더 많은 영향을 준다. 만약 기본 주파수 성분이  $x[\text{pu}]$  만큼 이동한다면 5차 고조파는  $5x[\text{pu}]$  만큼의 변위 이동이 생긴다. 따라서 고조파 계측용 직교필터는 계측하려는 고조파 차수와 비례하는 오차를 갖게 된다.

그림 2는 제안된 주파수 변동 보상기를 비롯한 계측부의 구성을 나타내고 있다. 전압과 전류 센서에서

anti-aliasing 필터와 직교필터를 거쳐 기본성분의 실수부와 허수부를 계산한다. 이 값을 제곱근을 이용하여 실효값(r.m.s.)을 계산하게 된다. 이와 병렬로 구성된 주파수 관측기는 주파수의 변동을 관측하여 주파수 변동 보상에 관측된 주파수를 알려준다. 만약 주파수 변동이 발생되면 주파수 변동 보상은 기본파의 실효값을 보상하게 된다[4].

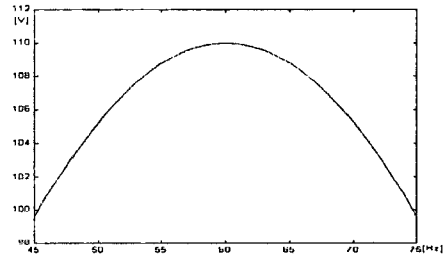


그림 1 주파수 변동에 따른 직교필터의 특성

디지털 보호 계전기는 사고 발생에 대한 빠른 대처를 위해 매 샘플링마다 실효값을 계산하게 된다. 예를 들어 8개 센서 입력 채널을 가지며 주기당 32 샘플링을 수행하는 계전기는 주기당  $96(=8 \times 12)$ 에 해당하는 수의 실효치 계산이 수행되게 된다. 따라서 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. 또한 제곱을 빠르게 계산하기 위해 Schweitzer, Aliaga에 의해 제시된 piece wise linear approximation technique을 이용하였다.

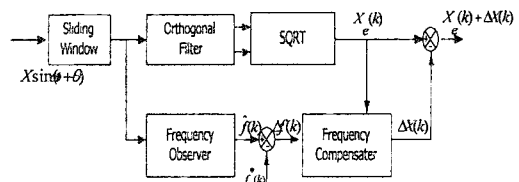


그림 2 주파수 변동 보상기와 계측부

2.1 주파수 관측기의 설계

직교필터와 병렬로 구성된 주파수 관측기는 한 주기의 차이의 샘플링 데이터의 위상 차를 이용하여 구할 수 있다. 먼저 전류는 부하변동에 따라 크기가 변화하고 고조파의 영향을 많이 받으므로 선간 전압(line-to-line voltage)을 이용하여 주파수 관측하는 것이 유리하다.

그림 3에서 알 수 있듯이 주파수의 변동이 발생하면 한 주기 차를 갖는 두 샘플링 데이터,  $x(k)$ 와  $x(k-12)$  사이에 차이  $\phi$ 가 발생하게 된다. 여기서 선

간 전압을 주기당 12 샘플링을 하며 공칭 주파수  $f^*(k)$  이고 주파수 변동이  $\Delta f(k)$  만큼 발생한다는 가정에서 다음 식 1과 식 2를 거쳐 주파수를 관측할 수 있다[5].

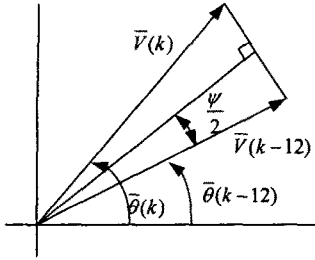


그림 3 주파수 관측기의 설계

두 샘플링 데이터의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

이 식을 다시 정리하면

$$\Delta f(k) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta}{dt} = \frac{f^*(k)}{2\pi} (\theta(k) - \theta(k-12)) \quad (2)$$

## 2.2 주파수 변동 보상기

직교필터는 공칭 주파수를 기본파 주파수로 사용하여 기본파의 실수부와 허수부를 출력한다. 이 실수부와 허수부를 이용하여 크기와 위상을 구할 수 있다. 따라서 실제 주파수가 공칭 주파수로부터 오차를 가질 경우에 크기와 위상에 오차를 포함하게 된다. 그림 4에서 입력 신호  $X\sin(\omega t + \theta)$ 의 실수부 출력과 허수부 출력을 각각  $XK_s \cos(\omega t)$ 과  $XK_c \sin(\omega t)$ 이라 할 수 있다. 여기서  $K_s$ 와  $K_c$ 는 주파수  $\omega$ 에 대한 직교필터의 출력이다[2].

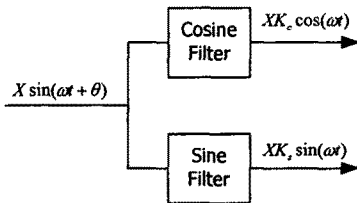


그림 4 직교필터의 출력

이 출력을 이용하여 실효값  $X_e$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$X_e = \sqrt{(K_s X \sin(\omega t))^2 + (K_c X \cos(\omega t))^2} \\ = \sqrt{\frac{(K_s^2 X^2 + K_c^2 X^2)}{2} + \frac{(K_c^2 X^2 - K_s^2 X^2) \cos(2\omega t)}{2}} \quad (3)$$

직교필터 설계자는 공칭 주파수에서  $K_s$ 와  $K_c$ 가 모두 1을 갖게 필터를 구성하므로 만약 실제 주파수와 공칭 주

파수간에 오차가 있으면  $K_s$ 와  $K_c$ 가 1보다 작은 값을 갖게 되어 실제 값보다 작은  $X_e$  값이 나오게 된다. 또한 다음과 같은 위상  $\theta_e$ 의 계측에도 오차를 포함하게 된다.[3]

$$\theta_e = \tan^{-1}\left(\frac{K_s A}{K_c A} \tan(\omega t)\right) = \tan^{-1}\left(\frac{K_s}{K_c} \tan(\omega t)\right) \quad (4)$$

주파수 변동 보상은 직교필터의 식 5와 같은 주파수 특성을 2차 식으로 근사화 하였다. 그림 4.7은 제안된 주파수 변동 보상기를 비롯한 계측부의 구성을 나타내고 있다. 여기서  $K_s$ 는 직교필터의 주파수 특성을 나타내는 계수이다.

$$\Delta X(k) = \frac{X_e(k)}{X_{ref}} * K_f * (\hat{f}(k) - f^*(k))^2 \\ = \frac{X_e(k)}{X_{ref}} * K_f * \Delta f(k)^2 \quad (5)$$

## 3. 실험 및 고찰

제안된 방식의 타당성을 검증하기 위하여 디지털 신호 처리(Digital Signal Processor) 칩셋인 TMS320C32(50MHz)를 사용한다. TMS320C32는 부동소수점 연산이 가능한 DSP(Digital Signal Processor)로 반복적인 곱셈과 덧셈을 빠르게 처리할 수 있어 다량의 디지털 신호처리가 필요한 디지털 보호 계전기에 적합하다. zero-flux형 전류센서와 인덕터형 전압센서를 사용하였고 고속의 아날로그 멀티플렉서와 16비트 A/D변환기를 채용하여 계측 정밀도를 높였다.

실험은 계전기 테스터기(CMC256-6)로 전압과 전류의 주파수를 가변적으로 변화시키며 디지털 계전기의 실효값의 변화를 측정하는 방식을 사용하였다. 주파수 변동은 45[Hz]에서 75[Hz]까지 수행하였으며 전압과 전류의 크기를 가변 시키면서 제안된 보상기의 성능을 측정하였다.

그림 5와 6은 제안된 보상기의 운영에 따라서 직교필터가 주파수 변동에 무관하게 동작함을 나타낸다. 45[Hz]에서 75[Hz]까지의 주파수 변동에 대해 주파수 관측기와 제안된 주파수 변동 보상기가 정상적으로 동작함을 확인할 수 있었다.

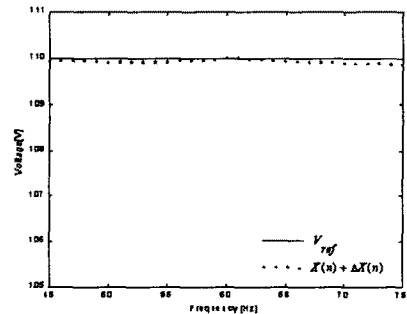


그림 5 주파수 변동에 따른 전압 보상

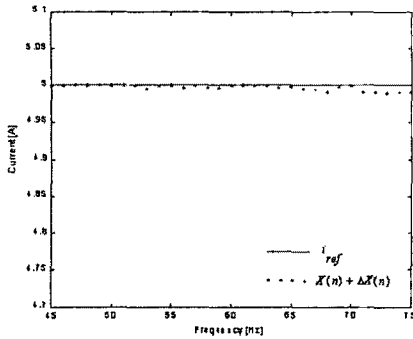


그림 6 주파수 변동에 따른 전류 보상

#### 4. 결 론

본 연구에서는 디지털 보호 계전기에 적용 가능한 주파수 변동 보상기에 관하여 언급하였다. 공칭 주파수를 기준으로 계전 기능을 수행하는 디지털 보호 계전기의 특성상 사고나 부하변동으로 어쩔수 없이 생기는 주파수 변동에 무관하게 전압과 전류의 크기를 계측할 필요가 있다. 또한 사고에 대한 빠른 대처를 위해 실효치 계산이 빈번히 이루어지며 이에 따라 주파수 관측과 변동에 대한 보상기 역시 빠른 알고리즘이 필요하다.

이 연구에서는 이러한 디지털 보호 계전기의 환경에 적합한 주파수 변동 보상기를 설계하였다. 주파수 변동에 오차를 갖는 직교필터의 특성을 보완하기 위하여 주파수 변동 보상기를 설계하여 주파수 변동에 무관하게 계측을 가능하게 하였다. 다양한 실험을 통하여 제안된 방식의 타당성을 검증하였다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] B. Kasztenny and E. Rosolowski, "Two new measuring algorithms for generator and transformer relaying", *Power Delivery, IEEE Transactions on*, Vol. 13, Issue 4, pp. 1053 -1059, Oct. 1998
- [2] T.S. Sidhu and M.S. Sachdev, "An Iterative Technique for Fast and Accurate Measurement of Power System Frequency", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 13, No. 1, Jan., 1998
- [3] J. Szafran, W. Rebizant, and M. Michalik, "Adaptive Measurement Of Power System Currents, Voltages and Impedances in Off-nominal frequency Conditions", *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1999. IMTC/99. Proceedings of the 16th IEEE*, Vol. 2, pp. 801-806, 1999
- [4] Murty V.V.S. Yalla, "A Digital Multifunction Protective Relay", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 1, Jan., 1992.
- [5] R. C. Patterson, "A Quantum leap into the IED age", *The 39th Rural Electric Power Annual Conference*, pp. (B1)-1-5, 1996