

고조파 왜곡을 고려한 디지털 보호계전기의 설계

김병진, 조철희, 이보인, 김정한
현대중공업(주) 기계전기연구소

The Design of Digital Protection Relay under Harmonic Distortion

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

Abstract - In this study, the measurement part in which the Fast Fourier Transform module and orthogonal filter are included is proposed. Protection relay should have a high precision and concurrently real-time response. Because FFT routine give micro-processor heavy burden and orthogonal filter reduces precision, both FFT module and orthogonal filter are designed to have different sampling frequency.

처리할 수 없기 때문이며 빠르게 계전동작을 수행하기 위해서이다.

1. 서 론

최근 전력용 반도체 소자에 관한 기술혁신과 더불어 반도체 소자가 소형화, 고성능화 되면서 전력전자산업의 발달을 이룩할 수 있었던 반면에 전원품질을 저하시키는 문제점을 야기하고 있다. 이러한 전력품질 저하는 선형 부하가 대부분이었던 계전기 개발 초창기 시절에는 문제가 되지 않았다. 그러나 고조파 발생 부하의 사용이 증가하면서 더 이상 고조파가 부하에 미치는 영향을 간과할 수 없게 되었으며 이에 따라서 고조파의 영향을 고려할 수 있는 계전기가 필요하게 되었다.

전력전자 관련 장치에서 발생시키는 전력품질의 저하 요인은 다음과 같다. 먼저 전압크기가 갑자기 변화해서 발생하는 순간전압강하(sag)와 상승(swell)이 대표적이다. 또한 다이오드 정류기 등에서 발생하는 고조파 전압 왜곡, 사이리스터 정류기 등에서 발생하는 고조파 전류 왜곡이 있다.

계전기는 계통에서 발생하는 사고를 중심으로 동작하게 되므로 순시적인 전압 강하나 상승에 대해 가능한 둔감해야 하며 전기설비의 과열, 소음 그리고 오동작을 유발하는 고조파 전압과 전류 왜곡을 분석하고 영향을 고려해야 한다[2][3].

고속의 계전 기능을 수행하기 위해 실시간 데이터 처리가 필요하며 또한 일정한 정밀도를 유지해야 한다는 문제점이 있다. 전력계통에 발생하는 고조파를 분석하기 위해서는 많은 량의 메모리와 메인 프로세서의 처리 시간이 필요하므로 매 샘플링마다 고조파 분석을 실시간으로 처리하기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 데이터 처리가 간단한 직교필터를 이용하여 매 샘플링마다 실시간으로 기본파의 크기를 측정하게 하였고 일정 시간마다 고조파 분석을 통해 얻어진 왜곡율을 계속 반영하여 정밀도를 유지하는 방식을 구현하였다.

2. 본 론

제안된 계측부는 그림 1과 같이 크게 FFT 프로세스 부분과 직교필터 부분으로 구분된다. FFT 프로세스는 한 주기마다 각 상의 고조파 왜곡율(Total Harmonic Distortion:THD)을 계산하여 전력 계산에 반영하게 된다. 한편 직교필터는 매 샘플링마다 기본파 성분을 계측해서 계전기 동작상태를 판정한다. 이러한 구조는 고조파분석(FFT)을 하는데 소요되는 시간이 매우 크므로 실시간으로

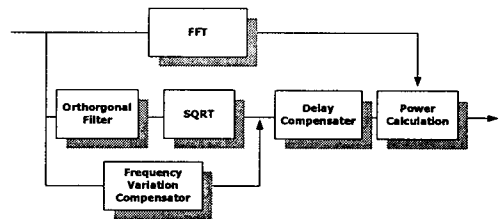


그림 1 FFT 프로세서를 가진 계측부의 구조

2.1 직교필터의 설계

본 연구에서는 전압과 전류의 크기 및 위상 그리고 대칭분 등의 정보를 얻어낼 수 있는 Fourier transforms 방식의 일환인 DFT(Discrete Fourier Transform) 필터를 사용하였다. 디지털 프로세서의 계산량을 줄이기 위해 cosine, sine 기준파 대신 coefficients를 2ⁿ으로 유지할 수 있는 heptagonal 기준파를 채택한 heptagonal 방식을 사용하였다[2].

2.2 효과적인 제곱근 계산

매 샘플링 주기마다 직교필터를 거친 전압과 전류를 이용하여 실효치를 계산한다. 실효치를 계산하기 위해서는 제곱근(square root)을 구해야하는 부담을 갖는다. 계전기의 실시간성을 보장하기 위해서 최대값 계산은 매 샘플링마다 수행되어야하므로 가능한 빠른 연산 알고리즘을 선택해야하며 오차가 가능한 없어야 한다. 본 연구에서는 Schweitzer, Aliaga에 의해 제시된 piece wise linear approximation technique을 이용하여 제곱근 연산을 수행하였다[3].

2.3 주파수 변동보상

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 계측오차를 유발한다. 기본파 주파수의 변동은 고조파 차수배 만큼 고조파 성분의 측정에도 영향을 주어 정확한 보호 계전기능 수행을 가로막는 요소가 되고 있다. 주파수 보상은 직교필터의 주파수 특성을 2차 식으로 근사화하여 배수적으로 보상하는 방식을 사용하였다[3].

2.4 시간지연 보상기

현장에서 배전반의 고압전압과 전류를 계측하기 위해서는 1차 전압, 전류 센서를 사용한 또한 계전기 내부에서 2차 센서를 사용한다. 이러한 센서는 작업공정, 노화상태 또는 결선상태에 따라 다양한 시정수를 갖는다. 특히 계측범위가 매우 넓어서 분압 저항이나 shunt 저항을

이용하여 계측하기 힘든 IED에서는 대부분 인덕터형 센서(inductive transducer)를 사용하는 경우가 많다. 이러한 인덕터형 센서는 신호의 지연을 발생시킨다. 이러한 시간지연의 크기를 보정계수(calibration factor)를 통해 보상할 수 있게 하였다.

2.5 FFT 프로세서 설계

DFT(Discrete Fourier Transform)는 이산시간 신호처리 알고리즘과 시스템을 해석하고, 설계하고 구현하는데 중요한 역할을 한다. 이 DFT의 계산량과 계산시간은 N^2 에 비례하므로 직접적으로 DFT를 계산하는데 필요한 산술연산의 횟수는 N 이 크면 막대한 계산량이 된다.

본 연구에서는 인덱스 분해법에 의한 FFT 프로세서를 적용하기 위해서 2차원 인덱스 맵(2-dimensional index map)에 의한 인덱스 n 과 k 로 분해하였다. 4점 주파수 네시메이션 고속 푸리에 변환은 다음과 같은 n 과 k 로 이루어진 식 1과 같이 정의된다[3][5].

$$n = n_1 + 2n_2 \text{ 및 } k = 2k_1 + k_2 \quad (1)$$

기본적인 4점 이산 푸리에 변환 공식에서 n 을 대입하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\begin{aligned} X[k] &= \sum_{n=0}^3 x[n] W_4^{kn} \\ &= \sum_{n_2=0}^1 \sum_{n_1=0}^1 x[n_1, n_2] W_4^{k(n_1+2n_2)} \end{aligned} \quad (2)$$

$X[k]$ 를 X 로 $x[n_1, n_2]$ 를 x 로 정의하고 재 정렬하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\begin{aligned} X &= \sum_{n_2=0}^1 W_4^{2kn_2} \sum_{n_1=0}^1 x W_4^{kn_1} \\ &= \sum_{n_1=0}^1 x W_4^{2kn_1} + W_4^{2k} \sum_{n_1=0}^1 x W_4^{kn_1} \end{aligned} \quad (3)$$

2.6 고조파를 고려한 전력계산

본 연구에서는 IED의 데이터 처리의 실시간성을 보장해야 한다는 문제점으로 분석 가능한 고조파의 차수를 실제 전력계통에서 주도적인 영향을 미치는 제11차 고조파로 제한적으로 적용하였다. 각 고조파의 FFT 결과는 실수부와 허수부로 구성된 복소수 형태이므로 각각의 전체 고조파 왜곡율을 구할 수 있다. 식 4에서 7까지가 의미하는 것은 기본파 성분에 대한 정수배의 고조파 성분의 크기를 기하평균한 값의 상대적인 크기이다. 이 값이 클수록 순수 정현파 파형을 기준으로 고조파에 의한 파형 왜곡(waveform distortion)이 심하다는 것을 의미한다.

$$THD_{V_{real}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=3,5,7,9,11} V_{n,real}^2}}{V_{1,real}} \quad (4)$$

$$THD_{V_{img}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=3,5,7,9,11} V_{n,img}^2}}{V_{1,img}} \quad (5)$$

$$THD_{I_{real}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=3,5,7,9,11} I_{n,real}^2}}{I_{1,real}} \quad (6)$$

$$THD_{I_{img}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=3,5,7,9,11} I_{n,img}^2}}{I_{1,img}} \quad (7)$$

직교필터를 통해서 얻어진 전압과 전류의 기본파 값에 FFT를 통해서 얻어진 전체 고조파 왜곡율을 이용하여

아래 식과 같은 고조파의 영향을 고려한 전압 V_D 과 전류 I_D 를 계산할 수 있다.

$$V_D = V_{1,real}(1 + THD_{V_{real}}) + jV_{1,img}(1 + THD_{V_{img}}) \quad (8)$$

$$I_D = I_{1,real}(1 + THD_{I_{real}}) + jI_{1,img}(1 + THD_{I_{img}}) \quad (9)$$

전압과 전류를 이용하여 식 (4.38)은 유효전력이며 식 (4.39)은 무효전력이다. 이와 같은 왜곡율을 고려한 전력(distortion power)은 비선형 부하가 발생하는 고조파의 영향을 반영한 것이다[16][17].

$$\begin{aligned} P_D &= V_{1,real}(1 + THD_{V_{real}}) * I_{1,real}(1 + THD_{I_{real}}) \\ &\quad - V_{1,img}(1 + THD_{V_{img}}) * I_{1,img}(1 + THD_{I_{img}}) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} Q_D &= V_{1,real}(1 + THD_{V_{real}}) * I_{1,img}(1 + THD_{I_{img}}) \\ &\quad + I_{1,real}(1 + THD_{I_{real}}) * V_{1,img}(1 + THD_{V_{img}}) \end{aligned} \quad (11)$$

3. 결 론

본 연구에서는 고조파에 영향을 고려한 디지털 보호계 전기를 설계하였다. 전력계통의 부하가 대부분 선형부하였던 그 시대에 기본파 성분만을 바탕으로 계전기 동작을 수행해도 만족스러운 결과를 가져왔지만 비선형 부하가 증가되면서 기본파 중심의 계전을 수행하는 기존의 디지털 보호 계전기는 문제점을 갖게 된다.

본 연구에서는 계통에서 발생하는 다양한 고조파 성분에 대한 분석할 수 있는 고속의 고조파 분석 프로세서를 계측부에 적용하였다. 또한 주파수 변동에 오차를 갖는 직교필터의 특성을 보완하기 위하여 주파수 변동 보상기를 설계하여 주파수 변동에 무관하게 계측과 계전기능을 수행할 수 있게 하였다. 전력계산에 필요한 트랜듀서 및 입력회로의 시간 지연을 정의하고 문제점을 지적하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] G. Bucci and C. Landi, "On Line Digital Measurement for the Quality Analysis of Power Systems Under Nonsinusoidal Conditions", *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, Vol. 48, Issue 4, pp. 853-857, Aug. 1999
- [2] W. A. Elmore, C. A. Kramer, and S. E. Zocholl, "Effect of Waveform Distortion On Protective Relays", *Industry Applications Society Annual Meeting, 1991, Conference Record of the 1991 IEEE*, Vol. 2, pp. 1802-1811 vol.2 1991
- [3] L. G. Durnte, P. K. Ghosh, "Active Power Measurement in Nonsinusoidal Environments", *Power Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 15, Issue 3, pp. 1142-1147, Aug. 2000
- [4] P. Carbone and D. Petri, "Average Power estimation Under Nonsinusoidal Conditions", *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, Vol. 49, Issue 2, pp. 333-336, April 2000
- [5] Jian Qiu Zhang and Yi Shen, "Power Measurement under Nonsinusoidal and Noisy Conditions", *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2001. IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE*, Vol. 2, pp. 1021-1025, 2001