

배전용 변압기의 실시간 고조파 분석 알고리즘 개발

(The Development of Real-Time Harmonic Analysis Algorithm in Distribution Transformer)

박철우*

(Chul-Woo Park)

Abstract

Recently harmonics flowing into power system is increasing as the usage of semiconductor equipments and switching mode power equipments are increasing. Harmonics cause problems such as heat increasing and reduction in capacity of transformers, especially the harmonics flowing into a distribution transformer can lead to the lifetime reduction of transformer. In this paper, we are about to develop a device that can monitor harmonics in real-time as it is affixed to a distribution transformer. Unlike the existing expensive harmonic analysis device, a new harmonic analysis algorithm is proposed in order to implement low-cost equipment. The real-time harmonic analysis algorithm proposed in this paper allows implementation on low performance microcontrollers, thus it can monitor the harmonic in real-time as it is individually affixed to the transformer. Therefore, it would improve the reliability of the transformer and stable power system operation would be possible as it can prevent the transformer accidents in advance.

Key Words : Harmonic Wave, Power Quality, FFT Analysis, Real-Time Monitoring

1. 서 론

최근 전력변환장치의 기술이 다양화 되고 응용 범위가 확대됨에 따라 반도체 소자를 사용하는 스위칭 전원장치가 널리 보급되고 있다. 컨버터, 인버터와 같은 스위칭 전원장치는 고조파 발생의 주요 원인이 되고

배전선로의 부하에 위치한 스위칭 전원장치에 의해서 발생한 고조파는 계통에 연계되어 있는 타 부하계통에도 심각한 영향을 미치고 있다[1-4].

고조파는 전원품질을 저하시키는 주요 원인이고 배전용 변압기에 큰 문제를 발생시키고 있다. 고조파가 증가할수록 변압기의 용량이 감소하고 또한 전원손실의 증가로 변압기의 발열량이 증가하는 현상이 발생한다. 특히 고조파에 의한 변압기 용량 감소는 변압기의 수명을 감소시키게 된다. 고조파로 인하여 발생하는 문제의 심각성으로 고조파 관리 기준이 제정되어 있고 배전계통 전압의 왜곡율을 제한하고 있다[5-8].

현재는 배전선로에서 변압기의 보호를 위해서는 온

* 주저자 : 경북대학교 융합의료기기로봇연구소
* Main author : Kyungpook National University
Medical device and robot institute of park
Tel : 053-269-6803, Fax : 053-950-7906
E-mail : pcw@mdrip.knu.ac.kr
접수일자 : 2012년 11월 24일
1차심사 : 2012년 11월 28일, 2차심사 : 2013년 1월 7일
심사완료 : 2013년 2월 14일

도 감시 장치만이 변압기에 부착되어 운영되고 있다. 변압기 용량 감소 및 수명 감소에 대한 원인인 변압기에 유입되는 고조파 분석을 하기 위해 주파수 분석기나 전력측정기를 이용할 수 있지만, 고가의 장비이므로 개별적으로 모든 변압기에 설치할 수 없고, 특정 상황이 발생한 경우에만 제한적으로 사용되고 있다 [6-7].

따라서 본 논문에서는 변압기에 부착되어 실시간으로 고조파를 감시할 수 있는 시스템을 개발하고자 한다. 고조파 감시 장치를 모든 변압기에 부착될 수 있도록 하기 위해 낮은 가격으로 제작하는 것이 필수적이므로 저성능의 프로세서를 이용하는 고조파 분석 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘을 이용하여 고조파 감시시스템을 저가의 보급형 시스템으로 제작할 수 있고, 온도 감시장치와 같이 모든 변압기에 부착될 수 있도록 하여 변압기에 유입되는 고조파를 실시간으로 감시하고자 한다. 따라서 변압기의 신뢰성을 향상시킬 수 있고 변압기 사고를 미연에 방지할 수 있으므로 안정적인 전력계통 운영이 가능하다.

2. 본 론

2.1 고조파가 변압기에 미치는 영향

배전용 선로에 발생하는 고조파는 대부분 전력전소자를 사용하는 부하로 인해 발생한다. 특히 인버터, 무정전 전원장치, 아크로 등에 의해 발생하는 고조파는 지속적으로 계통 전압을 왜곡시켜 다른 기기나 선로에 큰 영향을 미친다.

고조파에 의해 왜곡된 계통 전압은 콘덴서, 직렬 리액터에 과열, 과전압을 발생시키는 등 각종 기기에 나쁜 영향을 미친다. 특히 변압기는 철심의 자화현상에 따라 소음이 발생하게 되고 철손과 동손의 증가에 따라 용량이 감소하게 된다. 변압기 용량의 감소와 발열 증가는 변압기 수명저하로 이어질 가능성이 있다.

이와 같이 고조파로 인하여 발생하는 문제의 심각성으로 고조파 관리 기준이 제정되어 있고, 표 1과 같이 송배전계통에서 고조파를 제한하고 있다[8].

앞으로 고조파 문제는 부하설비의 다양화, 전력변환 장치의 사용증가에 따라 더 심각해 질 것으로 예상된다. 현재는 변압기의 상태를 모니터링하기 위한 장비로 온도 감시 장치만 부착되어 있지만 고조파 상황을 실시간으로 감시할 수 있는 시스템의 필요성이 부각되고 있다.

표 1. 국내 고조파 허용기준치
Table 1. The domestic permissible level of harmonic

3의 배수가 아닌 기수고조파			3의 배수인 기수 고조파			우수 고조파		
차수	고조파 전압 %		차수	고조파 전압 %		차수	고조파 전압 %	
	배전	송전		배전	송전		배전	송전
5	3.8	1.7	3	3.1	1.4	2	1.3	0.6
7	3.1	1.4	9	0.9	0.4	4	0.6	0.3
11	2.2	1.0	21	0.2	0.1	6	0.3	0.1
13	1.9	0.9				8	0.3	0.1
17		0.6						
19		0.5						
23		0.4						
25		0.4						
29		0.3						
31	{1.36* (17/h)}	0.3	>21	0.2	0.1	>8	{(0.15* (10/h))+ 0.15}	0.1
35	-0.16	0.2						
37		0.2						
41		0.2						
43		0.2						
47		0.2						
49		0.1						

실시간으로 고조파를 분석하고 특히 상황이 발생하였을 경우 리액터나 콘덴서 등을 연결 할 수 있는 시스템을 저가의 구조로 개발하여 모든 변압기에 부착되도록 한다면 전력계통의 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

그림 1에 실시간 변압기 고조파 감시 시스템 연결도를 나타내었다. 각 변압기에 부착된 고조파 감시장치에서 분석한 고조파 데이터를 모니터링용 PC에 전송

하여 전체 변압기의 상태를 실시간으로 감시할 수 있도록 한다.

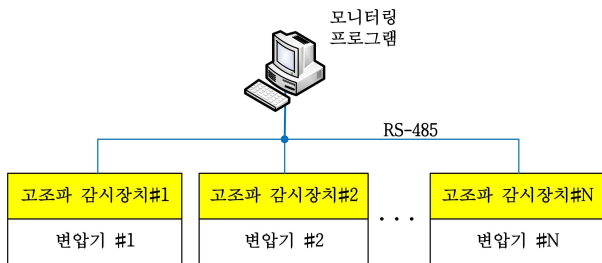


그림 1. 실시간 고조파 감시 시스템 구조
Fig. 1. The structure of real time harmonic monitoring system

그림 1과 같이 배전용 변압기 전체에 개별적으로 고조파 감시 시스템을 부착하기 위해서는 저가의 보급형 구조로 개발하는 것이 필수적이다. 저성능의 마이크로컨트롤러를 이용하여 FFT 기능을 구현할 경우 제한된 성능으로 인해 고조파 분석에 많은 오차가 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 저성능의 마이크로컨트롤러에서 고조파 분석시 발생하는 오차를 줄일 수 있는 알고리즘을 제안한다.

2.2 저성능의 마이크로컨트롤러를 이용한 고조파 분석 방법

고조파 분석을 위해서는 입력받은 신호를 FFT 연산하는 것이 필요하고 FFT 알고리즘은 각 마이크로프로세서 제조회사에서 제공하고 있다. 정확한 고조파 분석을 위해서는 식 (1)에 나타난 것과 같이 FFT 연산시 주파수 분해능에 의한 문제를 고려해야 한다.

$$\text{주파수 분해능} = \frac{\text{샘플링 주파수}}{\text{FFT 데이터 개수}} \quad (1)$$

식 (1)에서와 같이 FFT 연산에 사용되는 데이터의 개수가 많아질수록 주파수 분해능을 줄일 수 있다. 그러나 데이터 개수를 증가하기 위해서는 대용량의 메모리를 가진 고가의 DSP를 사용해야 하므로 제조원가 문제가 발생한다. 본 논문에서는 저가의 보급형 고

조파 분석 시스템을 개발하는 것을 목표로 하고 있기 때문에, 제한된 메모리를 가진 저성능의 마이크로컨트롤러를 사용할 수밖에 없고, 이 경우 낮은 주파수 분해능으로 인해 다음과 같은 문제가 발생한다.

일반적으로 상용전원의 주파수는 60Hz에서 ±0.2Hz의 주파수 변화를 허용하고 있다. 즉 정상적인 상황에서도 상용전원의 주파수는 59.8Hz와 60.2Hz 사이에서 변화하고 있고, 발전기에 큰 부하가 가해지는 경우와 같이 전력 수급이 원활하지 않게 되면 주파수 변동 폭은 더 커지게 된다. 주파수가 변화할 경우 제한된 FFT 분해능으로 인해 정확한 고조파 크기를 분석할 수 없게 된다.

제한된 주파수 분해능으로 인해 발생하는 문제를 나타내기 위해 MATLAB을 이용한 모의실험을 실시하였다. 모의실험 조건은 표 2에 나타내었고, 주파수 분해능이 1Hz이고 기본과가 60Hz와 60.2Hz인 경우에 1차, 3차 고조파를 분석하는 것을 조건으로 설정하였다.

MATLAB을 이용하여 FFT 연산한 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 주파수 분해능의 정수배가 되는 주파수를 가진 신호 1의 경우는 정확하게 고조파 크기를 찾을 수 있지만, 신호 2와 같이 주파수가 주파수 분해능의 정수배가 되지 않는 경우는 많은 오차가 발생하게 되고, 스펙트럼이 퍼진 형태로 나타나는 것을 볼 수 있다. 그림 2의 신호 2에서와 같이 변압기에 인가되는 상용 전원의 주파수는 계속 변화하고, FFT 주파수 분해능은 한계가 있기 때문에 이에 대한 해결책이 필요하다.

표 2. 제한된 주파수 분해능에서 FFT 모의실험 조건
Table 2. The FFT simulation condition in the limited frequency resolution

항목	설정 값
샘플링 주파수	1,024Hz
FFT 데이터 개수	1,024개
주파수 분해능	1Hz
신호 1	100V 60Hz + 100V 180Hz
신호 2	100V 60.2Hz + 100V 180.6Hz

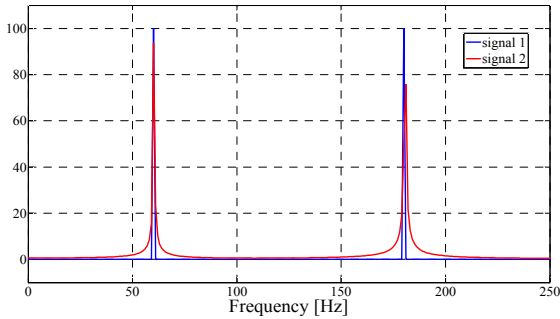


그림 2. 제한된 주파수 분해능에서 FFT 모의실험 결과
Fig. 2. The FFT simulation result in the limited frequency resolution

우선 FFT 데이터 개수를 늘여서 주파수 분해능을 줄이는 방법을 생각해 볼 수 있다. 그러나 이 방법은 메모리 용량이 큰 고가의 DSP를 사용해야 하므로 제조 원가가 증가하게 되어, 본 논문에서 개발하고자 하는 시스템에는 적절하지 않다. 그리고 샘플링 주파수를 줄이는 방법도 있지만, 이 방법은 Nyquist 이론에 의하여 분석 가능한 고조파 차수를 제한하게 된다.

본 논문에서는 제한된 주파수 분해능에서도 분석신호의 고조파 성분의 크기를 정확하게 찾을 수 있는 방법으로 아래와 같은 방법을 제안한다.

기본 주파수 f_1 에서 f_2 로 변화한 신호를 식 (2)에 나타내었다.

$$x_1(t) = A \sin(2\pi f_1 t) \quad (2)$$

$$x_2(t) = A \sin(2\pi f_2 t)$$

식 (2)에서 상용전원의 주파수가 f_1 에서 f_2 로 변화한다고 할 때 FFT 연산을 위해 샘플링한 신호에서 에너지의 변화는 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$E_2 - E_1 = \int_0^{(N-1)T_s} x_2^2(t) dt - \int_0^{(N-1)T_s} x_1^2(t) dt \quad (3)$$

$$= A^2 \frac{f_2 \sin(4\pi f_1 (N-1) T_s) - f_1 \sin(4\pi f_2 (N-1) T_s)}{8\pi f_1 f_2}$$

여기서 N 는 샘플링 개수, T_s 는 샘플링 시간을 나타낸다.

식 (3)을 기본 주파수 f_1 의 에너지 E_1 으로 나누어서 분석 신호의 주파수가 변화할 때 에너지가 변화하는 비율을 구하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{f_2} \frac{f_2 \sin(4\pi f_1 (N-1) T_s) - f_1 \sin(4\pi f_2 (N-1) T_s)}{4\pi f_1 (N-1) T_s - \sin(4\pi f_1 (N-1) T_s)} \quad (4)$$

식 (4)는 고조파 분석을 위한 각 차수별 주파수가 변화할 경우 기준 주파수 신호 대비 에너지 변동 비율을 나타낸다. 식 (4)의 에너지 변동 비율이 가질 수 있는 최대값은 식 (5)와 같다.

$$\frac{1}{f_2} \frac{f_2 + f_1}{4\pi f_1 (N-1) T_s - 1} \quad (5)$$

정상적인 배전 계통에서 주파수 허용 편차는 $\pm 0.2\text{Hz}$ 이고 수용가의 특성에 따라 $\pm 0.5\text{Hz}$ 의 편차는 허용하고 있다. 즉 기본과 60Hz에서 주파수는 0.8%이 내의 작은 비율로 변화한다. 따라서 $f_2 \approx f_1$ 이라 할 수 있고, 식 (5)를 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\frac{1}{2\pi f_1 (N-1) T_s - 1} \approx \frac{(FFT \text{ 주파수 분해능})}{2\pi f_1} \quad (6)$$

식 (6)은 각 고조파 주파수에서 주파수 변동에 의해 발생하는 에너지 변화량의 최대값을 나타낸다. FFT 주파수 분해능이 1Hz일 때 60Hz에서는 0.3%이고 3차 고조파 180Hz에서는 0.09%의 값을 가진다. 이 값은 고조파 차수가 증가할수록 더 작은 값을 가지므로 시간영역에서 주파수 변동에 의한 에너지 변화는 거의 없다고 볼 수 있다.

식 (7)에는 파시발의 정리를 나타내었다.

$$\sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)|^2 \quad (7)$$

파시발의 정리는 유한한 에너지를 가지는 시간함수 $x(n)$ 을 주파수 영역으로 변환하여도 에너지는 동일하다는 의미를 가진다.

식 (6)에서 주파수 변화에 따른 시간영역에서 에너

지의 변화, 즉 식 (7)의 좌변에서 변화는 무시할 수 있는 수준이므로, 주파수가 변화할 경우 주파수 스펙트럼은 그림 2에서와 같이 크게 변화하지만 스펙트럼의 에너지 값은 변화가 없다는 것을 알 수 있다.

식 (2)의 $x_1(t)$ 와 $x_2(t)$ 를 FFT 연산한 신호를 각각 $X_1(f)$, $X_2(f)$ 라고 할 때, 식 (6)과 (7)을 이용하면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X_1(k)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X_2(k)|^2 \quad (8)$$

식 (8)에서 좌변은 주파수 변동이 없는 각 고조파 기준 주파수에서 에너지이고, 우변은 주파수 분해능의 한계로 스펙트럼이 퍼진 형태로 나타나는 경우의 에너지라 할 수 있다. 즉 제한된 주파수 분해능으로 FFT 연산을 한 결과 값을 제공하여 더한다면 주파수 변동이 발생하지 않는 기준 신호에서 크기를 계산할 수 있게 된다.

제한된 주파수 분해능으로 인해 발생한 스펙트럼은 퍼진 형태를 가지지만 각 고조파 차수의 기준 주파수에 집중되어 나타나고 급속히 감소하게 된다. 이 경우 각 고조파의 크기는 독립적으로 계산할 수 있고, 그림 3에 이 방법을 나타내었다.

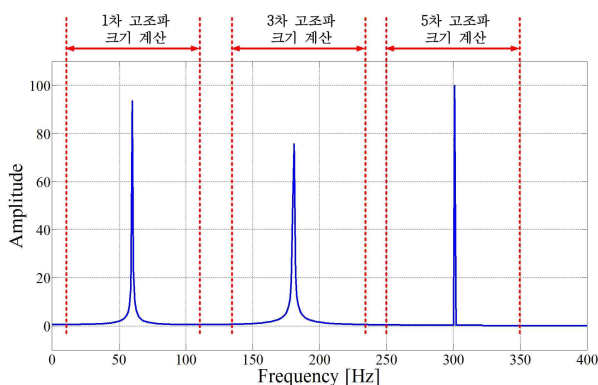


그림 3. 고조파 차수별 신호 크기 계산 방법
Fig. 3. The signal magnitude calculation method according to harmonics order

그림 3에서와 같이 배전선로에 발생하는 고조파는 홀수 고조파만 발생하므로 각 차수별 스펙트럼의 간격

은 120Hz가 되고, 고조파 스펙트럼은 해당 주파수에 집중되어 나타나고 급속히 감소하는 형태를 가진다. 이 경우 각 차수별 주파수 스펙트럼은 독립적으로 나타난다고 할 수 있다. 따라서 각 차수별 고조파 크기는 해당 주파수 인근의 데이터를 제공의 합으로 구할 수 있다. 예를 들어 기준 주파수의 $\pm 50\text{Hz}$ 범위에서 계산한다면 1차 고조파는 10Hz와 110Hz, 3차 고조파는 130Hz와 230Hz, 5차 고조파는 250Hz와 350Hz 사이에 분포한 데이터를 식 (8)의 우변을 이용하여 계산한다면 주파수 분해능으로 인한 문제를 해결 할 수 있다.

2.3 모의실험

본 논문에서 제안한 고조파 분석 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 MATLAB을 이용하여 모의실험을 진행하였다. 모의실험은 표 3과 같은 조건에서 FFT 분석 및 고조파 검출 알고리즘을 수행하였고, 그림 4와 표 4에 그 결과를 나타내었다.

그림 4 (a)는 주파수 분해능이 1Hz이고 그림 4 (b)는 2Hz일 때 모의실험 파형이다. 주파수 분해능의 한계로 주파수 스펙트럼이 퍼진 형태로 나타나고, 주파수 분해능이 2Hz인 그림 4 (b)의 스펙트럼이 더 퍼져 있는 것을 볼 수 있다. 제안한 방법을 이용하여 각 고조파 차수의 주파수에 해당하는 데이터에서 $\pm 50\text{Hz}$ 의 데이터를 제공 합으로 크기를 계산하였고, 그 결과를 표 4에 나타내었다. 표 4에서 주파수 분해능이 2Hz일 경우에도 약 0.6% 이내의 오차를 나타내고 정확한 고조파 크기를 계산할 수 있는 것을 알 수 있다.

표 3. MATLAB을 이용한 모의실험 조건
Table 3. The condition of simulation using MATLAB

항목	설정 값
샘플링 주파수	2,048Hz
FFT 데이터 개수	2,048개 / 1,024개
주파수 분해능	1Hz / 2Hz
분석신호	기본파 주파수 : 60.2Hz 1차부터 15차까지 최대값 100인 사인함수 합성

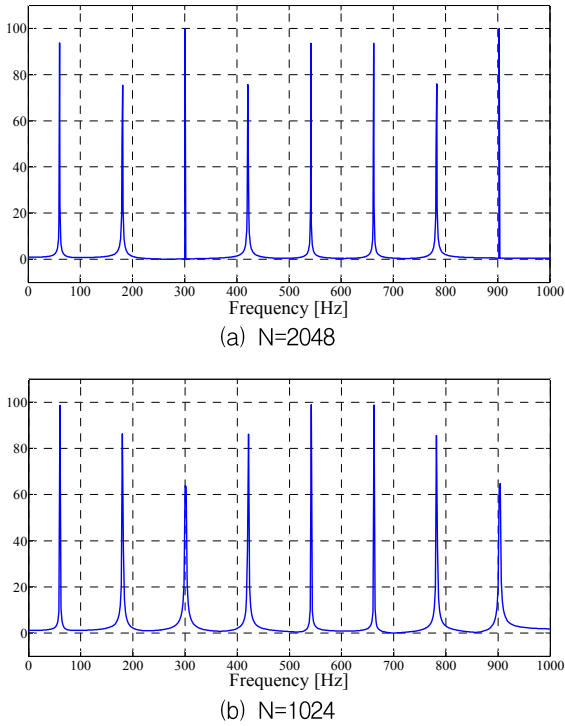


그림 4. MATLAB을 이용한 모의실험 파형
Fig. 4. The simulation waveform using MATLAB

표 4. 제안한 방법을 이용한 고조파 분석 결과
Table 4. The harmonics analysis result using the proposed method

고조파 차수	주파수 분석 범위 Hz	N=2048		N=1024	
		분석 크기	오차 %	분석 크기	오차 %
1	10~110	100.37	0.37	100.60	0.6
3	130~230	99.79	-0.21	100.24	0.24
5	250~350	100.06	0.06	99.58	-0.42
7	370~470	99.83	-0.17	99.92	-0.08
9	490~590	100.00	0	100.63	0.63
11	610~710	99.90	-0.1	100.41	0.41
13	730~830	99.97	-0.03	99.53	-0.47
15	850~950	100.21	0.21	99.96	-0.04

2.4 실험

본 논문에서 제안하는 고조파 분석 알고리즘을 저가의 마이크로컨트롤러에 구현하여 실험을 수행하였다.

실험에는 Microchip사의 dsPIC33FJ256GP710A 마이크로컨트롤러를 사용하였고, 표 5에 사양을 나타내었다. dsPIC33FJ256GP710A는 FFT 연산에 최대 2,048개의 데이터를 사용할 수 있는 메모리를 가지고 있다.

그림 5에는 실험 시스템의 구성도를 나타내었고, Microchip사의 dsPIC33FJ256GP710A 개발보드와 PC와 연결하여 실험 시스템을 구성하였다. 실험은 ADC, 신호레벨 조정회로와 같은 주위 회로에 의한 영향을 배제하고 제안하는 알고리즘의 성능을 보기 위해 마이크로컨트롤러 내부에서 신호를 합성하여 FFT 분석 후 그 결과를 PC로 전송하여 확인하는 방법으로 진행하였다. 실험은 모의실험의 경우와 같이 표 3의 조건에서 실시하였다.

실험 결과는 표 6에 나타내었고, 샘플링 주파수가 2048Hz이므로 15차 고조파까지 분석이 가능하다. 실험 결과에서 주파수 분해능이 2Hz인 경우에도 약 0.8% 이내의 오차를 나타내는 것으로 제안한 방법의 타당성을 확인할 수 있다.

기존에는 변압기에 유입되는 고조파는 고가의 전력 분석기나 주파수 분석기를 이용하여 한시적으로 분석할 수 있고, 모든 변압기에 부착되어 상시 감시하는 것은 불가능 하였다. 그러나 본 논문에서 제안하는 고조파 분석 알고리즘을 이용하면 저가로 구현할 수 있어 모든 변압기에 설치될 수 있다. 그 결과 변압기에 유입되는 고조파를 사용자가 쉽게 관리할 수 있으므로 변압기 사고에 대한 정확한 원인 분석이 가능하고 전력계통의 안정성을 크게 증가시킬 수 있다.

표 5. 실험에 사용한 마이크로컨트롤러 사양
Table 5. The microcontroller specification used in experiments

항목	사양
제조사	Microchip
IC명	dsPIC33FJ256GP710A
구조	16bit micro controller
CPU speed	40MIPS
Program memory	256K Bytes
RAM	30,720 Bytes
최대 FFT 데이터 개수	2,048개

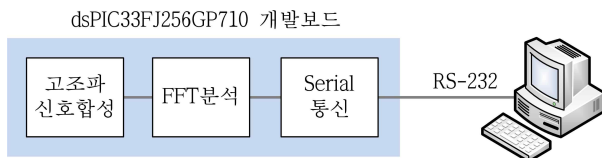


그림 5. 실험 시스템 구성도
Fig. 5. The block diagram of experiment system

표 6. 제안한 방법을 이용한 고조파 분석 실험 결과
Table 6. The result of harmonics analysis experiment using the proposed method

고조파 차수	주파수 분석 범위 Hz	N=2048		N=1024	
		분석 크기	오차 %	분석 크기	오차 %
1	10~110	99.98	-0.02	100.52	0.52
3	130~230	99.95	-0.05	100.41	0.41
5	250~350	100.06	0.06	99.51	-0.49
7	370~470	100.16	0.16	99.31	-0.69
9	490~590	100.36	0.36	100.79	0.79
11	610~710	99.62	-0.38	100.51	0.51
13	730~830	100.57	0.57	100.68	0.68
15	850~950	99.24	-0.76	99.46	-0.54

3. 결 론

본 논문에서는 저성능의 마이크로 컨트롤러에 구현 될 수 있는 고조파 분석 알고리즘을 제안하였다.

고조파 분석을 위해서는 FFT 연산을 해야 하고, FFT 연산을 수행 할 경우 주파수 분해능으로 인해 정확한 고조파 크기를 찾을 수 없는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 제한된 주파수 분해능으로 인해 발생하는 문제를 해결하기 위해 새로운 고조파 분석 알고리즘을 제안하였다. 또한 모의실험과 실험을 통하여 저사양의 마이크로컨트롤러에서 정확하게 고조파 스펙트럼을 분석할 수 있는 것을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 실시간 고조파 분석 알고리즘을 이용하면 저가의 보급형 고조파 분석기 제작이 가능하므로 배전용 변압기에 개별적으로 부착되어 실시간으로 고조파를 감시할 수 있다. 따라서 변압기의 신뢰성을 향상시킬 수 있으므로 안정적인 전력계통 운영에 기여할 수 있다.

References

- [1] Minkwan Kang, Jaeho Park, Daeseok Rho, Yongtaek Oh, Sangeun Hong, "A Study on the Harmonic Evaluation Algorithm for Dispersed Sources in Distribution Systems," KIEE conference, pp.543-544, 2006.
- [2] Jong-Gyeum Kim, Eun-Woong Lee, "Analysis and Measurement of Current Harmonics Due to Non-linear Load in Low Voltage System," Trans. KIEE. Vol. 50B, No. 12, DEC, 2001.
- [3] Ho-Rim Lee, Hyoun-Su Kim, Sang-Min Yeo, Chul-Hwan Kim, "Analysis of Harmonic Effects due to Non-Linear Load in Distribution Systems," KIEE conference, pp. 2226-2227, 2009.
- [4] Moon-Ho Kang, Eun-Bo Sim, Kyung-Hun Kim, Hyung-Ho Lee, "Measurement of Harmonic Level in Distribution System," KIEE conference, pp.370-372, 2008.
- [5] Kyung-Chul Kim, Sang-Young Park, Il-Moo Lee, Seung-Hyun Paik "A Study on the Transformer Capability containing Harmonic Load Currents," KIEE conference, pp.287-292, 2004.
- [6] Bok-Hee Lee, Young-Hwan Baek, "Actual Conditions of Voltage and Current Harmonics on Low-voltage Power Systems Supplying Various Facilities," KIEE, Vol.19, No.4, June 2005.
- [7] Jae-se Park, "Harmonic analysis of differential current by internal fault on transformer," KIEE conference, pp. 136-140, 2006.
- [8] Chan-Eom Park, Woon-Ki Han, Jin-Soo Jung, "An Assessment on Harmonics Effect in Customer and the Distributed Power System during Grid Connection of Residential Fuel Cell System," Trans. KIEE. Vol. 60, No. 6, JUN 2011.

◆ 저자소개 ◆



박철우 (朴哲佑)

1971년 12월 24일생. 1997년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업. 1999년 2월 동대학원 전자공학과 졸업(석사). 2004년 2월 동대학원 전자공학과 졸업(박사). 2004~2008년 삼성SDI 책임연구원. 2008~2012년 영진전문대학 조교수. 2012년~현재 경북대학교 융합의료기기로봇연구소 연구교수.