

Digital Signal Processor를 이용한 실시간 전력 요소와 왜율 측정 시스템 설계

김근준 · 강봉순*

System Design for Real-Time Measuring of Power Quality and Harmonics Distortion using Digital Signal Processor

Geun-Jun kim · Bongsoon Kang*

Department of Electronic Engineering, Dong-A University, Busan 49315, Korea

요 약

전력은 현대 사회를 구성하는데 있어 필수적인 자원이다. 최근, 전력에 대한 수요가 급격하게 증가하였으며 전력 수요 증가는 전력 품질의 저하를 야기하였다. 현대 사회에서 전력 품질은 일반 가정과 산업 전반에 걸쳐 큰 문제를 일으킬 수 있는 중요한 요소가 되었다. 전력 품질 문제를 예방하기 위해서는 전력 품질에 대한 예측과 초기 대응이 중요하다. 본 논문에서는 실시간으로 전력 품질을 예측하고 고조파를 분석하여 모니터링 할 수 있는 시스템 제안한다. 마이크로칩의 dsPIC33FJ256GP710A 칩을 이용한 DM240001 보드를 이용하여 최대 3상 3선에 해당하는 배선 방식의 전력 품질을 예측하는 시스템을 설계하였고, 예측 알고리즘의 최적화로 전력 품질의 순간적인 변화를 측정할 수 있도록 하였다. 또한, 최대 31차에 해당하는 고조파들에 대하여 전압과 전류의 왜율과 수요 전류 왜율에 대해서도 측정 가능하도록 설계하였다.

ABSTRACT

Electrical energy is the essential resource for modern society. Recently, the demand for power was significantly increased. Increase of power demand has lead to a decrease in the power quality. Power quality in modern society has been an important factor that can cause a major problem throughout the home and general industry. Therefore, we need a system for preventing the power quality problems. To avoid power issues, it is important that the measurement of the power quality and initial response. In this paper, we propose real-time power quality measurement system and harmonics monitoring system. We design the system using DM240001 board include dsPIC33FJ256GP710A of microchip. This system can adapt three-phase three-wire system. And optimized the algorithm, we can measure momentary changes of the power system. In addition, designed system can measure harmonics distortion like to VTHD, ITHD and ITDD for 31th harmonics.

키워드 : Digital Signal Processor, 고조파 측정, 전력 장애, 전력 품질 측정

Key word : Digital Signal Processor, Harmonics Measurement, Power Disturbance, Power Quality Measurement

Received 30 March 2016, Revised 04 April 2016, Accepted 12 April 2016

* Corresponding Author Bongsoon Kang (E-mail:bongsoon@dau.ac.kr, Tel:+82-51-200-7703)

Department of Electronic Engineering, Dong-A University, Busan 49315, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkice.2016.20.7.1283>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

현대 사회의 발달은 전력의 사용처 및 사용 용량의 확대를 기반으로 한다. 전력의 사용처 및 사용 용량이 확대 되면서 전력 계통 내에 비선형 스위칭 부하들이 증가하였으며, 이러한 부하들은 전력 품질에 영향을 주어 전력 품질을 저해시키는 요인이 된다[1]. 대정전과 같은 전력 품질 문제가 사회적 이슈로 부상하면서 전력 품질 관리에 대한 중요성이 증가하고 있다.

기존의 전력 품질에 대한 관리는 전력 공급자에 의해 주로 시행되어 왔으나[2], 점차 수용가에 의한 전력 감시 및 계측 시스템을 구축하는 방향으로 시스템이 변화하고 있다. 수용가에서 전력 품질을 계측함으로써 인하여 실제 사용자들의 소모 전력이 감소하며, 정전 관리나 전력 손실 관리, 전압 문제를 파악하여 전력 품질에 따른 문제를 예방할 수 있기 때문이다.

학계와 산업 전반에서는 정확한 전원 품질 계측을 위한 많은 노력을 기울이고 있으며 표준을 제정하여 전력 품질에 관한 규제를 시행하고 있다[3, 4]. 산업 전반에서는 전압 강하나 과전류 문제를 예방하기 위해 전력 품질을 미리 계측하는 시스템을 구축하고 있다[1]. 전력 계통에서 발생하는 고조파에 대한 중요성도 높아졌다. 고조파란 기본 주파수의 정수배에 해당하는 성분으로 컨버터와 같은 변환 장치나 회전기, 변압기와 같은 요소에서 발생한다[5]. 전력 계통에서 발생하는 고조파는 변압기의 용량을 감소시키거나 발열량을 늘리는 등의 문제를 일으킬 수 있다. 고조파에 의한 변압기의 용량 감소는 변압기의 수명에 치명적인 영향을 끼친다. 국내에서도 고조파 관리 기준을 제정하여 전력에서 전압이 왜곡되는 비율을 제한하고 있다[6].

실시간으로 전력 품질을 계측하고 고조파를 분석하여 모니터링 하는 동시에 전압 강하와 같은 전력 품질의 문제가 발생하였을 때, 이를 즉각적으로 알려줄 수 있는 시스템이 필요로 하다. 본 논문에서는 DM240001 보드를 테스트보드로 사용하여 다양한 배전 방식에서의 전력 품질 요소를 측정하며 전압과 전류의 고조파 함유율과 수요 전류를 측정하고 분석하는 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 마이크로칩(Microchip)사의 dsPIC33FJ256GP710A를 사용하여 전압, 전류, 전력과 같은 전력 품질 요소들과 고속 푸리에 변환(FFT: Fast Fourier Transform)를 이용하여 최대 31차에 해당

하는 고조파를 계측하고 전압 왜율(V_{THD} : Voltage Total Harmonic Distortion), 전류 왜율(I_{THD} : Current Total Harmonic Distortion), 수요 전류 왜율(I_{TDD} : Current Total Demand Distortion)과 같은 파라미터의 실시간 추 출이 가능하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 제안하는 시스템에 관한 서술을 하였으며 III장에서는 테스트보드를 이용하여 제안하는 시스템의 성능평가에 대한 실험결과를 나타내었다. IV장에서는 결론을 맺고 추후 연구 목표에 대해 서술하였다.

II. 본 론

2.1. 제안된 시스템의 구성

본 논문에서는 전력 요소와 고조파를 분석하는 시스템을 제안한다. 그림 1은 제안하는 시스템의 블록도이다.

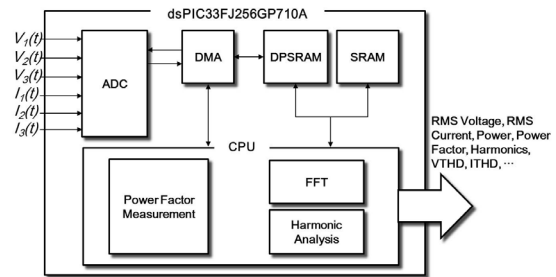


Fig. 1 Block diagram of the proposed system

제안하는 시스템은 최대 3상 3선에 해당하는 입력을 받을 수 있도록 설계하였다. 입력되는 아날로그 신호를 아날로그 디지털 변환기(ADC: Analog to Digital Converter)를 사용하여 디지털 신호로 변환 한 후, 메모리 직접 전송(DMA: Direct Memory Access)을 이용하여 내부 듀얼 포트 메모리(DPSRAM: Dual Port Static Random Access Memory)에 저장한다. 듀얼 포트 메모리에 한 주기의 데이터가 저장되면 메모리 직접 전송 인터럽트 신호를 발생시켜 연산 타이밍을 제어하도록 하였다. 고속 푸리에 변환에 사용되는 입력 데이터를 위하여 양방향 메모리에 존재하는 데이터 중 한 주기에 해당하는 데이터를 내부 메모리(SRAM)으로 데이터에

저장한다.

그림 2는 제안하는 시스템의 타이밍이다. 제안하는 시스템의 아날로그 디지털 변환의 샘플링 주파수는 고속 푸리에 변환의 수행을 위하여 국내 60Hz 기준으로 하여 64배인 3840Hz를 샘플링 주파수로 가진다. 전력 요소 측정은 최초 한 주기의 데이터가 입력된 이후 수행하며 한 주기의 데이터에 대한 요소가 측정된 이후에는 반주기마다 연산을 수행하여 전력 요소를 측정한다[7]. 고조파 분석을 위해서는 고속 푸리에 변환을 수행하는 과정이 필수적이다. 고속 푸리에 변환은 512개의 입력 샘플이 입력되면 연산을 수행한다. 고속 푸리에 변환을 수행하는 시간동안에도 전력 요소의 계측은 실시간으로 유지되어야 하므로 데이터 접근 충돌을 방지하기 위하여 더블 버퍼 방식을 사용하였다.

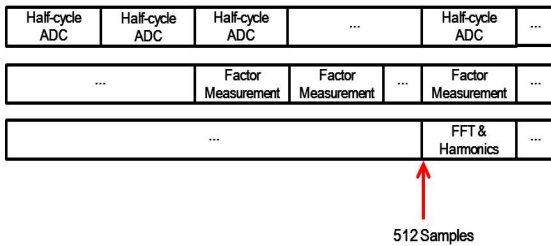


Fig. 2 Timing chart of the proposed system

2.2. 전력 계측 방법

일반적으로 전력 요소 계측에는 수식 (1)을 사용한다 [8]. 수식 (1)의 S는 피상전력, P는 유효 전력, Q는 무효 전력, PF는 역률을 의미한다. V_{rms} 와 I_{rms} 는 각각 전압과 전류에 대한 rms(root mean square) 값이다. θ 는 전압과 전류의 위상각의 차이를 의미한다. 수식 (1)은 매 주기마다 위상을 연산하거나, 부호 변화점(Zero-Crossing) 회로를 구성하여 전압과 전류의 위상차를 연산하여야 한다[8]. 그러나 이러한 연산은 고속 푸리에 변환을 필요로 하며 연산의 증가와 추가적인 회로 구성을 요구하게 된다. 본 논문에서는 수식 (2)의 방법으로 전력 요소들을 연산하였다. 전력 요소 중 무효 전력은 Vector Apparent Power 법에 의해 수식 (2)처럼 연출 할 수 있다[9]. 그림 3은 피상 전력, 무효 전력, 유효 전력과 위상의 관계를 나타낸 그림이다. 유효전력과 피상전력을 계측하면 무효 전력을 계산할 수 있다[9].

$$\begin{aligned}
 S &= V_{rms} \times I_{rms} \\
 P &= V_{rms} \times I_{rms} \times \cos\theta \\
 Q &= V_{rms} \times I_{rms} \times \sin\theta \\
 PF &= \cos\theta
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 S &= V_{rms} \times I_{rms} \\
 P &= \frac{1}{T} \sum_0^{T-1} V[t]I[t] \\
 Q &= \sqrt{S^2 - P^2} \\
 PF &= \left| \frac{P}{S} \right|
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

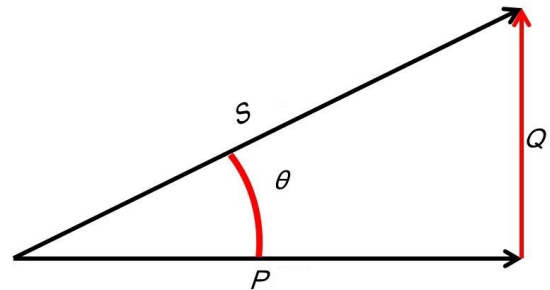


Fig. 3 Vector apparent power

2.3. 고조파 분석

수식 (3)은 전압 왜율을, 수식 (4)는 전류 왜율을 연산하는 수식이다. 수식 (3)과 (4)의 V_1, I_1 는 각각 기본파에 해당하는 전압과 전류를 나타낸다. 최대 31차 까지의 고조파에 대한 측정을 목적으로 하였기 때문에 각각 2차부터 31차까지의 전압과 전류에 해당하는 V_k 와 I_k 를 제공하여 적분하여 연산한다.

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{31} V_k^2}}{V_1} \times 100
 \tag{3}$$

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{31} I_k^2}}{I_1} \times 100
 \tag{4}$$

$$I_{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{31} I_k^2}}{I_D} \times 100
 \tag{5}$$

수식 (5)는 수요 전류 왜율을 연산하는 수식을 나타낸다. I_p 는 최대 수요 전류(Peak Demand Current)이다 [10]. 최대 수요 전류를 계측하기 위하여 그림 4와 같은 슬라이딩 윈도우 방법을 사용하였다. 그림 4의 Peak Measuring Section에 해당하는 전류를 측정하여 가장 큰 전류 값을 Peak Current로 저장한다. 저장된 Peak Current 중 Peak Demand Measuring Time 내에서 가장 큰 값을 가지는 전류 값이 최대 수요 전류가 된다. 본 논문에서는 메모리 사용량을 줄이기 위하여 모든 데이터를 저장하지 않고 Peak Measuring Section은 60분, Peak Demand Measuring Time은 12시간으로 지정하였다.

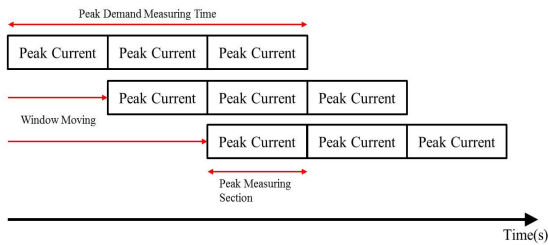


Fig. 4 Measurement method of Peak Demand Current

III. 실험결과

표 1은 유효전력에 대하여 수식 (1)과 수식 (2)를 Matlab을 이용하여 연산한 결과이다. Error는 수식 (1)을 기준으로 하여 수식 (2)와의 차이를 백분율로 표현하였다. 실험 결과 평균 오차는 -0.0001%로 두 결과가 동일하다고 볼 수 있다.

Table. 1 Effective power accuracy comparison between Eq. (1) and Eq. (2)

α (°)	P (W)		Error(%)
	Eq. (1)	Eq. (2)	
0	15550.00	15550.00	0.0000
5	15490.83	15490.83	0.0000
10	15313.76	15313.76	0.0000
15	15020.15	15020.15	0.0000
20	14612.22	14612.22	0.0000
25	14093.09	14093.09	0.0000
30	13466.70	13466.70	-0.0001

35	12737.81	12737.82	-0.0001
40	11911.99	11912.00	-0.0001
45	10995.51	10995.52	-0.0001
50	9995.35	9995.36	-0.0001
55	8919.11	8919.13	-0.0001
60	7775.00	7775.01	-0.0002
65	6571.71	6571.73	-0.0002
70	5318.41	5318.42	-0.0002
75	4024.64	4024.65	-0.0002
80	2700.23	2700.24	-0.0003
85	1355.27	1355.28	-0.0004
90	0.00	0.00	0.0000
Average			-0.0001

Table. 2 Reactive power accuracy comparison between Eq. (1) and Eq. (2)

Θ (°)	Q (VAR)		Error(%)
	Eq. (1)	Eq. (2)	
0	0.00	0.00	0.0000
5	1355.27	1355.27	0.0002
10	2700.23	2700.22	0.0002
15	4024.64	4024.63	0.0002
20	5318.41	5318.40	0.0002
25	6571.71	6571.70	0.0002
30	7775.00	7774.99	0.0002
35	8919.11	8919.10	0.0001
40	9995.35	9995.34	0.0001
45	10995.51	10995.50	0.0001
50	11911.99	11911.98	0.0001
55	12737.81	12737.81	0.0001
60	13466.70	13466.69	0.0001
65	14093.09	14093.08	0.0000
70	14612.22	14612.22	0.0000
75	15020.15	15020.14	0.0000
80	15313.76	15313.76	0.0000
85	15490.83	15490.83	0.0000
90	15550.00	15550.00	0.0000
Average			0.0001

표 2는 무효전력에 대하여 수식 (1)과 수식 (2)를 Matlab을 이용하여 연산한 결과이다. 무효 전력에서도 평균 오차는 0.0001%로 두 결과가 동일하다고 볼 수 있다. 그림 5는 실험에 사용한 실험보드의 사진으로 마이크로칩의 dsPIC33FJ256GP710A 모델이 탑재되어 있는 DM240001보드를 실험보드로 사용하여 실험하였

다. 개발환경으로는 MPLAB X 툴을 사용하였으며 테스트보드와 UART 통신을 이용하여 실험보드에서 연산한 값들을 PC의 하이퍼 터미널에 출력되도록 하였다. 입력 신호로는 함수 발생기를 이용하여 전압과 전류를 3상 3선식으로 구현하였다.

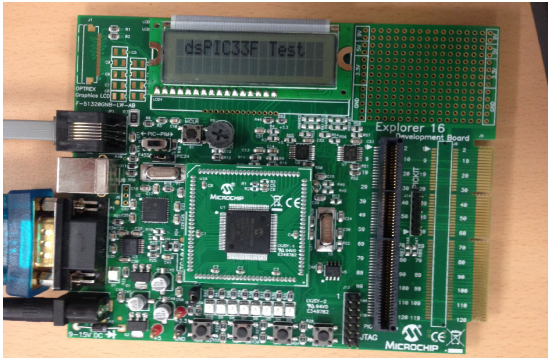


Fig. 5 Picture of the DM240001 board

Table. 3 Comparison of processing time between Eq. (1) and Eq. (2)

	Eq. (1)	Eq. (2)
Processing Time	4109.575 μ s	270.3 μ s

표 3은 수식 (1)과 수식 (2)를 테스트보드에서 구현하여 연산 속도를 비교한 표이다. 두 방법 모두 외부에서 입력되는 아날로그 신호에 대해서 아날로그 디지털 변환이 완료된 이후에 연산이 시작된다. 동일하게 아날로그 디지털 변환이 완료된 데이터에 수식 (1)을 적용하면 4109.575 μ s가 소요되는 반면에 수식 (2)는 270.3 μ s가 소요된다. 이러한 시간 차이가 발생하는 요인은 수식 (1)에서는 고속 푸리에 변환을 이용하여 위상을 연산하는 과정이 포함되기 때문이다.

그림 6은 함수발생기를 이용하여 주파수가 60Hz이고 전압이 0.85V인 입력 아날로그 신호를 사용하였다. 실험 보드에서 입력 아날로그 신호를 아날로그 디지털 변환을 이용하여 디지털 신호로 변환한 결과이다. 그림 6과 같은 신호를 전압, 전류 각 3상으로 입력하여 전력 요소들을 측정하였다. 전원 계통은 국내 주파수 60Hz를 기준으로 하여 최대 31차 고조파까지의 측정을 위하여 고속 푸리에 변환에서 사용하는 샘플링 주파수를 64samples/cycle로 설정하였다.

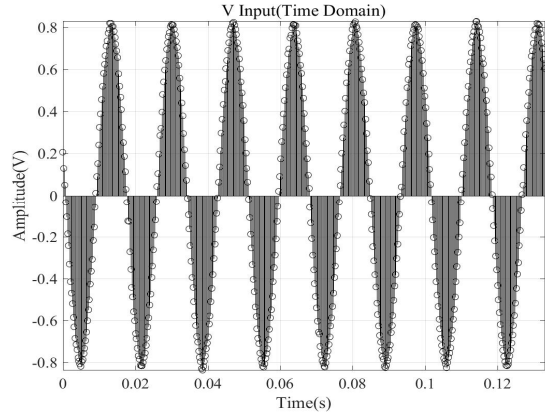


Fig. 6 Input digital signal

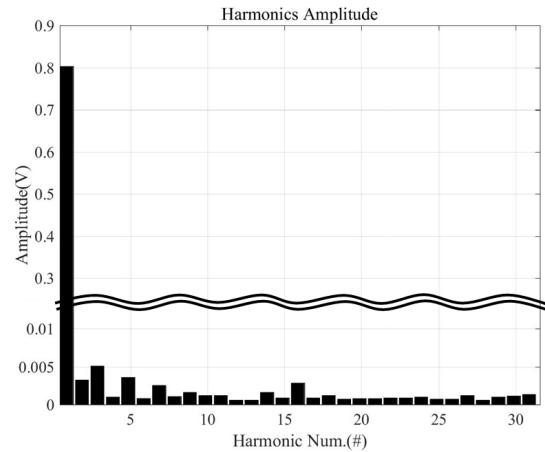


Fig. 7 Amplitude of the harmonics

그림 7은 측정된 기본파와 31차까지 고조파들의 크기를 나타낸다. 측정된 고조파의 크기를 이용하여 수식 (3), 수식 (4)를 이용하여 전압 왜율과 전류 왜율을 연산할 수 있다. 표 4는 3상 3선에 대하여 전압(V_{rms}), 전류(I_{rms}), 유효 전력(P), 무효전력(Q), 피상 전력(S), 역률(PF), 전압 왜율(V_{THD}), 전류 왜율(I_{THD}), 수요 전류 왜율(I_{TDD})의 연산 결과를 비교한 표이다. 오차는 Matlab을 기준으로 하여 테스트보드의 결과의 차이를 백분율로 표현하였다. 테스트보드의 제공근기가 이상적인 제공근기가 아니기 때문에 제공근을 사용하는 전력 요소에서는 오차가 발생한다. 측정 결과로 평균 오차율이 0.0028% 이내로 국제 기준으로도 측정 결과가 우수하다[3,4].

Table. 4 Experiment result of measured power quality

Power Quality	Matlab	Test board	Error(%)
V _{rms_1} (V)	188.774	188.774	0.0000
V _{rms_2} (V)	188.732	188.732	0.0000
V _{rms_3} (V)	188.736	188.736	0.0000
I _{rms_1} (A)	188.738	188.738	0.0000
I _{rms_2} (A)	188.604	188.604	0.0000
I _{rms_3} (A)	188.753	188.753	0.0000
P1(W)	35628.141	35628.141	0.0000
P2(W)	35595.328	35595.328	0.0000
P3(W)	35624.25	35624.250	0.0000
Q1(VAR)	206.928	207.075	0.0710
Q2(VAR)	174.819	174.906	0.0494
Q3(VAR)	145.401	145.327	-0.0504
S1(VA)	35628.742	35628.742	0.0000
S2(VA)	35595.757	35595.758	0.0000
S3(VA)	35624.547	35624.547	0.0000
PF1	1.000	1.000	0.0000
PF2	1.000	1.000	0.0000
PF3	1.000	1.000	0.0000
V _{THD_1} (%)	0.6711	0.6584	0.0127
V _{THD_2} (%)	0.6835	0.6978	-0.0142
V _{THD_3} (%)	0.6835	0.7120	-0.0285
I _{THD_1} (%)	0.7074	0.7138	-0.0064
I _{THD_2} (%)	0.6877	0.7031	-0.0154
I _{THD_3} (%)	0.6877	0.6980	-0.0103
I _{TDD_1} (%)	0.7597	0.7729	-0.0132
I _{TDD_2} (%)	0.7383	0.7610	-0.0228
I _{TDD_3} (%)	0.7353	0.7559	-0.0206
Average			-0.0018

IV. 결 론

본 논문에서는 DM24001 보드를 사용하여 실시간으로 전력 품질 측정과 고조파를 측정하는 시스템을 제안하였다. 다양한 배선 방식에 대해 적용 할 수 있도록 최대 3상 3선에 대해 측정이 가능하며, 최대 31차 고조파를 측정 할 수 있도록 설계하였다. 실험 결과 Matlab을 이용한 이론적인 수치와 평균 0.0028%의 미세한 차이를 가지며 60Hz 입력에 대하여 실시간으로 동작할 수 있다. 그 결과 전력 품질을 실시간으로 측정하며 전력 품질 저하를 감지할 수 있는 시스템을 확인하였다. 이후 보급, 양산을 위하여 본 연구에서 제안된 시스템에

서 사용하는 메모리 용량을 줄이는 방법과 배전반과 같은 다선로 구조에서 각각의 선로를 관리할 수 있는 시스템에 관한 연구를 필요로 한다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Technological Innovation R & D Program (2015 - 0427) funded by the Small and Medium Business Administration (SMBA, Korea)

REFERENCES

- [1] G. Chung and S. Kwack, "Development of Artificial-Intelligent Power Quality Diagnosis Algorithm using DSP," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, vol. 23, no. 1, pp. 116-124, Jan. 2009.
- [2] B. Park, J. Park, S. Song and J. Shin, "A Development of Intelligent Metering and Control System for Energy Management of Electric Cabinet Panel," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, vol. 27, no. 8, pp. 90-97, Aug. 2013.
- [3] EN 50160:1999, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, 1999.
- [4] IEC 61000-4-30:2003, Power quality measurement methods, 2003.
- [5] K. Oh and Y. Yoo, "A Research into a Device for Measuring the Electric Power Quality and the Harmonic Frequency," *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea*, vol. 49, no. 10, pp. 618-624, Oct. 2012.
- [6] C. Park, "The Development of Real-Time Harmonic Analysis Algorithm in Distribution Transformer," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, vol. 27, no. 3, pp. 43-49, Mar. 2013.
- [7] A. Broshi, "Monitoring Power Quality Beyond EN 50160 and IEC 61000-4-30," in *proceedings of the International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, Barcelona, pp. 1-6, 2007.
- [8] S. Chandrasekar and C. Kalaivanan, "Investigations on Leakage Current and Phase Angle Characteristics of

Porcelain and Polymeric Insulator under Contaminated Conditions,” *International Journal of Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 16, no. 2, pp. 574-583, Apr. 2009.

[9] V. Sheldon. (2014, June) Reactive Power Primer. *SOLARPRO* [Online]. Available: <http://solarprofessional.com/articles/design-installation/reactive-power-primer>

[10] T. S. Key and J. Lai, “Comparison of Standards and Power Supply Design Options for Limiting Harmonic Distortion in Power System,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 29, no. 4, pp. 688-695, July. 1993.



김근준(Geun-Jun Kim)

2013년 동아대학교 전자공학과 (공학사)
2013년 ~ 현재 동아대학교 전자공학과 석·박사 통합과정
※관심분야 : 신호처리, SoC설계



강봉순(Bongsoon Kang)

1985년 연세대학교 전자공학과 공학사
1987년 미국 University of Pennsylvania 전기공학과 공학석사
1990년 미국 Drexel University 전기 및 컴퓨터 공학과 공학박사
1989년 ~ 1999년 삼성전자 반도체 수석연구원
1999년 ~ 현재 동아대학교 전자공학과 교수
2006년 ~ 2011년 멀티미디어 연구센터 소장
2006년 ~ 2013년 2단계 BK21 사업팀장
2013년 ~ 현재 BK21 Plus 사업팀장
※관심분야 : 영상신호처리, SoC설계 및 무선통신