

논문 2013-50-2-20

LED 기반 그린에너지 조명시스템을 위한 전력품질 측정

(Power Quality Measurement for LED-based Green Energy Lighting Systems)

유형모*, 최진원*, 최상호**

(Hyung-Mo Yu, Jin-Won Choi, and Sangho Choe)

요약

LED 기반 그린에너지 조명 시스템의 성공적인 연구 개발과 원만한 설치 운영을 위해서는 펄스 파, 스파이크 파를 비롯한 비선형신호와 고조파, sag, swell 등을 포함한 불요신호에 대한 실시간 전력품질측정이 요구된다. 본 논문에서는 그린에너지 조명시스템 응용을 타깃으로 기존 저주파수 대 (60Hz~수KHz)는 물론 수십 KHz 이상의 고주파수 대에 발생하는 각종 전원 신호 분석이 가능한 저가형 전력품질측정 (power quality measurement: PQM) 방안을 제안하고, 이를 TI 320F28335 MCU (micro-controller unit) 기반 PQM 테스트 베드로 구현한다. 제안된 알고리즘은 CCS (Code Composer Studio) 3.3 환경에서 C 언어로 작성하였으며, 임의 신호 발생기(NF-WF1974)로부터 발생된 모의 신호를 활용하여 구현된 알고리즘을 검증한다. 테스트 베드를 이용하여 LED SMPS로부터 발생하는 각종 비선형 전류 신호 측정, FFT를 이용한 고조파 신호의 분석이 가능할 뿐 아니라 이산 웨이블릿 변환을 이용한 sag, swell, interruption 등의 고품질 전력신호 측정도 가능하다.

Abstract

For the successful R&D and deployment of LED-based green energy lighting systems, the real-time power quality measurement of both various non-linear power signals including pulse waveform, spike waveform, etc and the undesired-signals including harmonics, sag, swell, etc is required. In this paper, we propose a low-cost power quality measurement (PQM) method for low- (60Hz-several KHz) to high-frequency (several tens KHz) power signals, which are generated by green-energy lighting systems, and implement a PQM testbed using TI TMS320F28335 MCU. The proposed algorithm is programmed using C in the CCS (Code Composer Studio) 3.3 environment and is verified using test signals generated by an arbitrary signal generator, NF-WF1974. In the implemented testbed, we can measure various non-linear current signals that LED SMPS generates, analyze harmonics by fast Fourier transform, and test sag, swell, and interruption using wavelet transform.

Keywords : LED, Power Quality Measurement, Pulse Waveform, High Frequency, Power Factor, THD, Fast Fourier Transform(FFT), Wavelet Transform

I. 서론

미래지향적 산업 중 주요산업으로 부각되고 있는 그

* 학생회원, ** 정회원, 가톨릭대학교 정보통신전자공학부 (School of Information, Communications, and Electronic Engineering, The Catholic University of Korea)

※ 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0015286).

접수일자: 2012년7월9일, 수정완료일: 2013년1월20일

린에너지 산업은 전 세계적으로 정부지원정책 및 지원 사업으로 인해 무궁무진한 시장으로 기대되고 있다. 2000년도 이후 국제적으로 이상기후변화대책 및 에너지 고갈문제, 환경오염, 지구온난화 방지대책, 자연재해 방지대책 등 지구환경문제가 대두되어 처음에는 선진국 중심으로 그린에너지 시장이 형성되어 왔다. 하지만 2000년대 중반 이후 기후변화협약에 가입한 국가 수가 188개국(2004.02 기준)으로 급속히 증가되었다. 국내에서는 녹색성장시대로 접어들면서 정부정책사항으로 인

해 그린에너지 시장을 중점적으로 정부지원 함으로써 그린에너지를 활용한 첨단기술개발 및 응용사업 등이 활발하게 진행되고 있는 상황이다. 미국의 전문조사기관 Clean Edge 사는 그린에너지 시장이 향후 10년간 연평균 15.1% 고성장 할 것으로 전망하며, IT혁명기에 비견될 만큼(2000년대 초 성장률, 17%) 폭발적인 성장이 예상된다고 밝혔다^[1].

LED는 기존광원에 비해 에너지 절감 효과가 뛰어나고 수명이 거의 반영구적으로 사용할 수 있는 차세대 광원으로 소비전력을 과격적으로 줄일 수 있는 장점을 갖는다^[2~3]. LED 장치는 온실가스 감축, 저에너지에 부합되는 조명장치로 대부분의 기존 조명 장치에 대한 조기 대체(70% 이상)를 고려할 때 시장규모 또한 매년 큰 폭으로 성장할 것으로 예상되고 있다^[4].

LED 장치 사용 시 전원선 상에 유기되는 각종 불요 신호는 주위 다른 전자기기의 고장 및 오동작을 유발할 수 있어 이들 불요신호에 대한 정확한 전력품질 측정이 요구된다^[5]. 예를 들면, LED 드라이버와 같은 전력품질을 저해시키는 비선형 부하들은 전압, 전류의 고조파 발생, 서지(Surge) 발생, 순간 전압변동 등의 순시적 미소 외란들을 발생시키며 이러한 외란들이 반복적으로 발생하게 되면 계통내의 전기기기를 오동작 또는 열화시킬 수 있다.

LED를 비롯한 대부분의 그린 조명장치에는 SMPS(Switch Mode Power Supply)를 내장하고 있어 이로 인해 발생하는 높은 고주파 대역(100KHz 이하) 전원 신호에 대한 정밀품질측정(power quality measurement: PQM) 및 진단이 요구된다^[5~6]. 하지만 현재까지 대부분의 PQM 연구는 기본 전원 신호를 중심으로 한 저주파 대역(60Hz~수KHz)에 주로 이루어져 왔다. 더욱이 PQM 알고리즘의 구현은 LabVIEW나 Matlab Simulink 등을 활용한 소프트웨어 시뮬레이션^[7~8] 단계에 그치던가 아니면 실시간을 고려한 하드웨어 설계(언어는 주로 C 사용)라 하더라도 고급 DSP 칩(예를 들면 320C3000 혹은 320C6000계열)을 활용한 경우가 대부분이며 매우 고가이다^[9~10].

본 논문에서는 LED 기반의 고효율 조명 장치 개발을 위해 요구되는 측정방식으로 기존 측정방식과는 달리 기본 주파수 60Hz에서 최고 100KHz의 고주파 대역에 걸친 각종신호, 즉, 기본적인 Sine 신호, 고조파 신호, SMPS로 인한 펄스 신호, LED 전류신호, 스파이크

신호(고효율 3과장 램프 등에 발생)에 대한 전력신호 품질을 함께 진단한다. 또한 웨이블렛 알고리즘을 이용하여 Sag, Swell, Interruption 등의 순시전압변동을 실시간으로 검출이 가능하다. 특별히 본 논문에서는 저가형 PQM 설계를 타깃으로 MCU(TMS320F28335) 칩을 활용한 테스트 베드를 구축하고, 전력선 신호 시뮬레이터(NF-WF1974)로부터 발생된 각종 모의 테스트 신호를 구축된 테스트 베드에 입력하여 제한한 알고리즘을 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장 본문에서는 먼저 전력품질의 요소 및 기준사항을 소개하고, 각 요소들을 측정하기 위한 신호처리를 이용한 전력품질요소 분석기법을 제시한다. III장에서는 설계한 테스트 베드 시스템 구성과 각종 전원 신호 품질측정 항목에 대한 모의실험 결과를 보여주고, 마지막으로 IV장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 본 론

1. 전력품질 요소 및 기준사항

IEEE Std. 1159-1995^[11]와 IEEE Std. 1459-2010^[12]에 따라 분류된 고효율 LED 조명 시스템에서 발생하는 전원 신호의 주요 전력품질 요소 및 기준사항은 다음과 같다.

가. 실효값(Root Mean Square)

실효값은 전력품질에 결정적인 영향을 미치는 전력품질지수중 하나로서 전압이나 전류에 의한 저항에서의 열 효과 정도를 나타내며 그 크기는 주기적인 전류나 전압과 동일한 열 효과를 내는 직류전류나 직류전압의 크기에 해당한다. 연구과정에서 분석한 3과장 Ramp 신호와 LED 신호는 기존에 사용하던 정현파 신호에 비하여 전압 전류 모두 실효값이 낮아져 소비전력의 감소라는 이득을 가져올 수 있다.

나. 피상전력(Apparent Power)

피상전력은 교류회로에서 전압의 실효값과 전류의 실효값의 곱을 의미한다. 본 연구에서는 역률을 구하기 위한 수치 중 하나로 피상전력을 사용하였다.

다. 유효전력(Active Power)

유효전력은 교류회로에서 부하에 유용하게 사용되는 전력이다. 실제로 일을 하는 전력이며 피상전력에 신호 간 위상각의 차이인 θ 의 Cosine값을 곱한 값이다. 본 연구에서 피상전력과 마찬가지로 역률을 구하기 위한 수치 중 하나로 사용하였다.

라. 역률(Power Factor)

역률이란 피상전력에 대한 유효전력의 비율을 의미한다. 이는 다른 말로 전기기기에 실제로 걸리는 전압과 전류가 얼마나 유효하게 일을 하는지와 같은 의미이며 역률이 크다는 것은 같은 사용자 측에서 전기기기를 최대한 유용하게 사용하고 있다는 것을 의미하고 공급자 측에서는 같은 부하에 대하여 적은 전류를 흘려보내도 되기 때문에 전압강하가 적어지고 전원설비의 이용효과가 커지는 장점이 있다.

최근 조명시스템을 위해 이용되는 LED 신호의 주요 목적은 전원 효율성의 극대화이다. 때문에 전자기기를 동작시킬 수 있는 최소한의 소비전력 소모를 목표로 두고 있으나 이는 곧 역률의 저하를 야기할 수 있어 이에 대한 고려가 필요하다. 고효율신호들은 대부분 주파수 대역이 높기 때문에 정확한 신호의 분석을 위해서는 Nyquist 이론을 만족하는 표본율(sampling rate)을 취하고 하드웨어가 이 연산을 무리 없이 수행할 수 있어야 한다. 때문에 고효율을 추구하는 시스템에서 역률의 저하라는 문제를 개선하기 위해서는 기존에 정형화된 신호의 역률 측정뿐만 아니라 고주파 신호(100KHz 이하)에 대한 역률의 정확한 측정에 관한 연구가 필수적으로 선행되어야 한다.

마. 고조파(Harmonics)

고조파란 기본파(60Hz)의 정수배를 말하며 n 차 고조파라는 것은 기본파의 n 배 주파수를 가리킨다. 전력계통내에 컨버터, 인버터, 아크로, 변압기, 사무용 기기 등 비선형 부하가 존재하면 이러한 부하는 고조파 전류를 발생하게 되고 전압과 전류는 왜곡되어 왜곡파가 되는 데 이는 기본 정현파와 그 정수배의 주파수 성분이 합성된 것이다.

IEEE Std. 519-1992에 따르면 전기 공급 규정으로 69KV의 전압은 3.0%, 69.001KV부터 161KV의 전압은 1.5%, 161.001 이상의 전압은 1.0%의 기준을 두고 있으

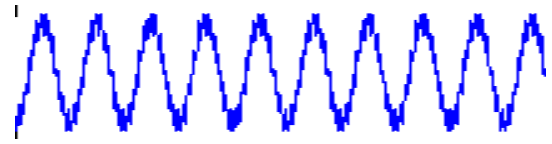


그림 1. 고조파 왜곡파형
Fig. 1. Harmonics distortion.

며 국내 한국전력에서는 69KV 이하의 전압은 3.0%, 69KV 이상에서는 1.5%로 규제하고 있다^[14].

그림 1은 기본파에 10차, 33차, 40차 고조파가 각기 10%씩 함유된 고조파 왜곡파형을 보여준다.

바. 순간전압변동(Sag, Swell, Interruption)

표 1은 전력 품질을 저하시키는 대표적인 순간전압변동 요소인 순간전압강하(Sag), 순간전압상승(Swell), 순간정전(Interruption)을 IEEE 1159-1995^[6, 11]에 따라 분류하고 있다. 그 중 순간전압강하는 산업용 기기에서 순간적인 재가동 및 정지, 불량품 증가를 유발하여 많은 손실을 발생시켜 가장 큰 문제점으로 주목받고 있다.

순간전압강하는 전압의 크기가 0.1pu~0.9pu*로 작아진 전압을 말하며 지속시간을 1분 기준으로 0.5사이클~30사이클까지 순간 전압강하로 분류한다^[11]. 순간전압강하의 주된 원인은 보통 계통사고와 밀접한 관계가 있고 대형 모터의 가동이나 대형 부하의 충전 등에도 영향을 받으며 낙뢰 등의 자연현상에도 영향을 받는다.

순간전압상승(Swell)은 실효전압의 크기가 1.1pu~1.8pu로 증가한 전압을 말하며 지속시간은 순간전압강하와 동일한 기준을 사용한다. 주된 발생 원인은 갑작스러운 부하의 감소나 중성선 개방 그리고 선로 누설 등이 있다.

순간정전(Interruption)은 실효전압의 크기가 0.1pu 이하로 작은 전압을 말하며 지속시간 1분을 기준으로 0.5사이클~3초 동안 0.1pu보다 작을 때를 짧은 정전

표 1. IEEE 1159-1995 전력품질 분류
Table 1. IEEE 1159-1995 power quality classification.

Sag	0.5 - 30cycles	0.1-0.9 pu
Swell	0.5 - 30cycles	1.1-1.8 pu
Interruption	0.5 - 3s	< 0.1 pu

* pu : 단위법, 어떤 양을 나타내는데 그 절대량이 아닌 기준량에 대한 비로써 나타내는 방법.

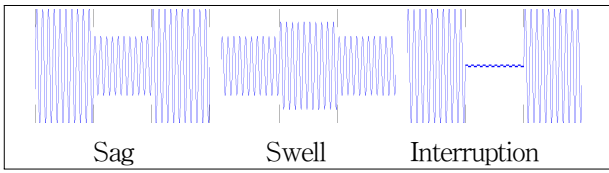


그림 2. Sag, Swell, Interruption 파형
Fig. 2. Sag, Swell, Interruption waveforms.

(Momentary Interruption)이라 한다^[11]. 순간정전의 원인으로서는 낙뢰 등으로 유도부하 스위칭 혹은 커패시터 동작의 On/Off 가 되어 발생한다. 그림 2는 10주기 동안 50%의 순간전압 강하, 50%의 순간정압 상승, 1%의 순간정전을 나타내고 있다.

2. 신호처리를 이용한 전력품질요소 분석

일반적으로 실효값, 피상전력, 유효전력, 역률 분석은 한 주기 T동안 신호를 지속적으로 관찰(혹은 샘플링)하여 분석이 가능하다. 하지만 일반적인 분석이 어려운 신호 분석(검출)의 경우에는 푸리에 변환, 웨이블릿 변환과 같은 신호 처리 기술이 요구된다.

원 신호 $f(t)$ 에 60Hz의 기본 파 외에 포함된 고조파 신호를 분석하고자 할 때에는 푸리에 변환 방법을 사용한다. 푸리에 변환은 시간 축 크기 성분을 주파수 축 크기 성분으로 변환하는 방법으로, 원 신호 $f(t)$ 에 포함된 정수배 주파수의 크기를 효과적으로 알 수 있는 유용한 신호 분석 방법이다. 아울러 LED 조명시스템 전원 신호에는 수십 KHz 이상(일반적으로 100KHz 이하)의 고주파 신호 성분을 포함하고 있어 PQM 시스템은 고주파 신호에 대한 정밀분석이 요구된다. 제안한 시스템을 이용하여 기본주파수 60Hz부터 최대 100KHz까지의 고주파 신호에 대해 푸리에 변환을 이용한 분석을 실시하고 시스템 제한요인인 측정오차를 함께 검토한다.

제안한 테스트 베드에 웨이블릿 변환을 이용한 Sag, Swell, Interruption 측정 알고리즘을 구현하고 순간전압변동 신호를 분석한다. 웨이블릿 변환은 모 함수(Mother function)의 크기변화와 이동을 통한 분석으로 짧은 과도신호 해석에 용이하여 SMPS, 3과장 Ramp 전류신호와 같은 스파이크 형태의 파형분석에도 효과적이다.

가. 실효값(RMS) 계산

순시전압 또는 순시전류 신호 $f(t)$ 의 한 주기 T 동안의 실효값은 식 (1)과 같이 표현한다.

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}, I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (1)$$

디지털 시스템에서는 아날로그 전압과 전류 신호의 한 주기를 샘플링 한 N개의 샘플로 다음과 같이 실효값을 계산한다.

$$V = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N v_k^2}, I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_k^2} \quad (2)$$

나. 피상·유효·무효 전력 및 역률 계산

피상·유효·무효 전력을 계산하기 위해 입력 전원 신호의 전압, 전류를 다음과 같다고 가정하자.

$$v(t) = \sqrt{2} V \sin(2\pi ft), i(t) = \sqrt{2} I \sin(2\pi ft - \theta) \quad (3)$$

여기서 V, I는 전압과 전류의 실효치를 각각 가리킨다. 이때 복소 전력 S 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = P + jQ = \sqrt{P^2 + Q^2} \angle \theta = S \angle \theta \quad (4)$$

식 (4)에서 S는 피상전력을 뜻하고, P와 Q (=VAR)는 각각 유효전력과 무효전력에 해당한다. 하지만 실제의 경우 위상차 θ 값을 알아내기 어려움으로 피상전력을 다음과 같은 방법으로 계산한다.

$$S = V \times I \quad (5)$$

디지털 시스템에서 실제 유효 전력은 한 주기 동안 샘플링 된 전압샘플과 전류샘플을 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$P = \frac{\sum_{k=1}^N v_k \times i_k}{N} \quad (6)$$

이 결과인 유효전력 P는 고조파 성분을 포함하는 실제 전력이 된다. 무효전력의 경우 피상전력의 곱에서 유효전력의 곱을 제한 후 square-root를 취하여 구할 수 있다.

$$VAR = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (7)$$

역률 (PF)은 다음과 같이 피상전력에 대한 유효전력의 비로 나타낸다.

$$PF = \frac{P}{S} \tag{8}$$

다. THD 계산

THD(Total Harmonic Distortion)는 총 고조파 왜형을으로써 기본파 성분(기본파 전압: V_1 , 기본파 전류: I_1)과 그 외 파형 간 모양의 근접 정도를 나타내는 지표로 식 (9)처럼 표현한다.

$$V_{THD} = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}, I_{THD} = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \tag{9}$$

여기서 V_n 은 n 차 고조파 전압, I_n 은 n 차 고조파 전류를 나타낸다.

III. 실험

1. 전력품질측정 테스트 베드 및 프로세스

그림 3은 설계한 하드웨어 장치(PQM 테스트 베드)를 보여준다. 테스트 베드는 CCS3.3 S/W, 임의신호발생기, 전원공급기, TI사의 320F28335 MCU 프로세서 기반 Delfino EVM 보드, 메인 콘솔 용 PC로 구성된다. 저가형 MCU인 TI사의 TMS320F28335는 150MHz의 명령처리 주파수를 사용하고 68KByte 내부메모리와 512KByte의 플래쉬 메모리를 내장하고 있다.

Delfino EVM 보드에 A/D변환기는 12 비트 분해능과 12.5MSPS(samples per second)의 샘플링 성능을 가지고 있고 8개의 내부채널과 8개의 외부채널을 내장하고 있으며 32 비트 FPU(Floating Point Unit) 연산이

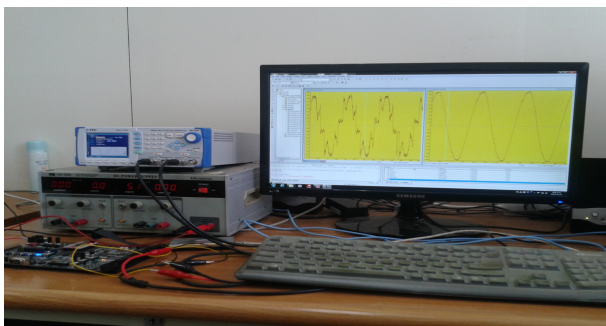


그림 3. 전력품질측정 테스트 베드
Fig. 3. Power quality measurement testbed.

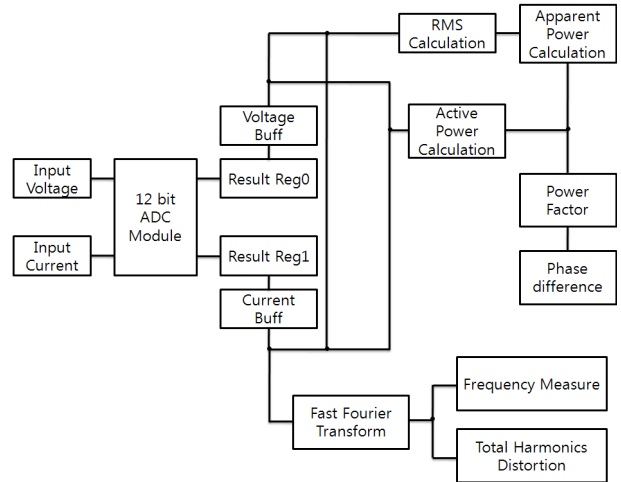


그림 4. 설계된 테스트 베드를 이용한 전력품질측정
Fig. 4. PQM using the implemented testbed.

가능하다. 설계한 테스트 베드를 활용하여 실시간으로 전압과 전류의 실효치(RMS), 피상전력(Apparent Power), 유효전력, 역률(Power Factor), 총고조파 왜형률(Total Harmonics Distortion : THD)의 측정이 가능하다. 실제 가정환경에서는 220V에서 동작하지만 실제 테스트 베드에 입력 전압이 0~3V이므로 3V를 220V로 매핑시켜 실험을 진행하였다.

실험을 위한 입력 신호 발생은 임의신호발생기 WF1974 를 사용하였다. WF1974는 2 채널 임의신호발생기로 0.01μHz부터 30MHz사이의 주파수 신호를 발생한다. 0.01μHz의 주파수 분해능을 가지고 있고 1% 이내의 출력 전압 정확도를 보장하며 0.001°의 위상분해능과 0.0001% 단위로 듀티 설정 분해가 가능하고 총 25가지의 임의 파형을 내장하고 있어 이를 이용 각종 모의 실험을 위한 신호의 발생이 가능하다.

그림 4는 설계된 테스트 베드를 사용한 전력품질측정 블록도를 보여준다. 먼저 임의신호발생기를 이용해 전압과 전류 신호를 각각 발생 입력하게 되면 각 신호는 ADC 모듈을 거쳐 레지스터 및 버퍼에 저장되고, 각 측정 항목별 이들 저장 데이터에 대한 처리(연산) 과정을 거쳐 얻은 결과 값을 얻고 이를 콘솔 GUI에 보여준다. 실제 조명 시스템에서 발생하는 신호를 고려하여 전압신호는 60Hz의 정현파로 고정시키고 전류신호를 변경하여준다. 설계된 테스트 베드를 이용하여 기본 정현파, 펄스 파, 고주파 신호, 고조파 신호, 3파장 Ramp 신호, LED 전류 신호 등 실제 산업현장에서 발생하는 각종 조명 시스템 신호에 대한 측정 분석이 가능하다.

이하 본 논문에서는 설계된 테스트 베드를 활용한 각 입력신호 측정시 역률 측정오차, THD 측정오차, 순간 전압변동 분석에 주안점을 두고 실시하고 그 결과를 표시한다.

2. 실험 및 측정

그림 5는 전력품질측정 프로세스의 블록도를 보여준다^[15]. 우선 측정 대상 신호 파형의 특징에 따른 신호군을 분류하고 이를 테스트 베드에 입력하면 요구되는 품질측정 분석이 수행된다. 조명시스템에서 발생하는 입력신호는 그림 5에서 보여주듯이 기본주파수가 60Hz인 정현파, 폭(Duty Ratio)이 서로 다른 펄스파, 고조파가 함유된 정현파, 100KHz 이하의 고주파 신호 그리고 3 파장 Ramp에서 사용되는 스파이크 형태의 전류신호, 마지막으로 LED 전류 신호로 크게 분류된다. 그림 5에서 보여주듯이 분류된 각 입력신호에 대응되는 요구 측

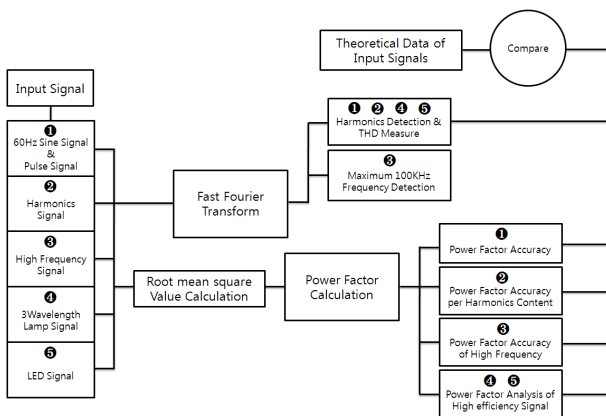


그림 5. PQM 프로세스 블록도
Fig. 5. PQM process block diagram.

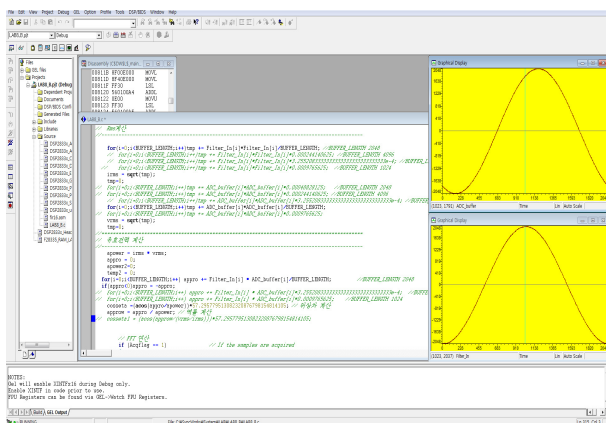


그림 6. CCS 3.3v 실행 화면
Fig. 6. CCS 3.3v execution display.

정요소 항목(번호 표기)을 측정한다.

우선 Matlab상에서, 각 분류된 이상적인 신호군(여기서는 '대조군'이라 칭함)의 신호를 PC Level에서 발생시켜 검증된 알고리즘을 이용해 이상적 신호에 대해 분석된 전력품질 데이터를 획득한다. 다음으로는 신호발생기를 이용 발생된 실제 신호군 (여기서는 '실험군'이라 칭함)의 신호를 테스트 베드에 입력 PQM 프로세스를 거쳐 실효치 (RMS), 역률 (PF), 고조파 왜형률 (THD) 등을 측정 값을 얻고 (결과 화면은 그림 6 참조), 이 값을 대조군 신호 측정 값(기준 값)과의 차이인 측정오차 Δ_{meas} (단위: %)를 계산한다. 여기서 Δ_{meas} 란 이상적 신호 (대조군 신호)를 이용한 Matlab 시뮬레이션 측정 값 (기준 값)과 실제신호 (실험군 신호)를 이용한 PQM 테스트 베드 측정 값과의 차이를 가리키는 데, 일반적으로 Δ_{meas} 가 1% 이내이면 고품질을 10% 이내이면 양호품질을 나타낸다. 특별히 고주파 신호에 대한 역률을 구하는 과정에서는 산업현장에서 사용되는 LED 고효율 신호들이 대부분 고주파 신호이기 때문에 100KHz까지 순차적으로 주파수를 증가시키면서 역률을 측정하고 요구 기준 오차범위 ($\Delta_{meas} \leq 10\%$, IEEE1459 기준^[12]) 이내를 만족하는지를 검증한다. 입력된 신호들에 대하여 필요시 FFT 변환, Wavelet 변환 등 적정 신호처리 알고리즘을 적용하고 그 결과를 비교, 분석한다.

가. 정현파 분석

표 2는 고조파가 함유되지 않은 순수 정현파에 대한 대조군 신호와 실험군 신호의 측정 결과를 비교하여 보여준다. 비교 결과 대조군 신호와 실험군 신호의 오차

표 2. 정현파의 대조군 신호와 실험군 신호의 비교
Table 2. Comparison of ideal and real sinusoidal signals.

분류	대조군 신호	실험군 신호
파형		
RMS V	724.08	723.07
RMS I	724.08	722.47
역률(%)	100%	99.99%
THD V(%)	0%	0%
THD I(%)	0%	0%

율이 거의 없음(즉, Δ_{meas} 가 0.01% 이하)을 확인할 수 있었다.

나. 고조파에 따른 신호 분석

표 3, 표 4, 표 5에서는 기준 파 신호에 10%, 30%, 50%의 각기 서로 다른 비율 (60Hz 기준 파 신호 전력 크기에 대한 고조파 신호 크기의 상대적인 비율을 가리킴)의 고조파 성분을 함유한 대조군 신호와 실험군 신호에 대한 측정 결과를 비교하여 보여준다. 여기서는 전압과 전류신호의 위상차 $\theta = 0^\circ$ 를 가정한다. 실제로 같은 비율이라도 기본파에 함유된 고조파 개수의 증감에 따라 역률 값이 달라지지만, NF사의 WF1974 Model (임의신호발생기)의 경우 고조파를 최대 3개까지만 삽입 가능하여 시뮬레이션에서는 10차, 33차, 40차의 고조파 성분을 함유한 경우를 가정하여 실험하였다— 단, IEEE Std. 1459 규격에 따라 40차 이하 고조파 신호를 고려한다^[12]. 전력품질을 측정할 결과 고조파의 비율이 점차 증가(표 3 → 표 4 → 표 5)함에 따라 역률이 감소함을 확인할 수 있었다. 이는 곧 고조파 비율의 증가는 피상전력의 크기를 증가시키나 유효전력의 크기는 일정한 값을 유지하여 결과적으로 역률이 줄어들게 된다. 고조파 비율이 증가함에 따라 총 고조파 왜형율 (THD) 역시 증가됨을 알 수 있었다. 대조군 신호와 실험군 신호에 대한 실험결과 데이터를 상호 비교한 결과 THD와 역률의 Δ_{meas} 가 1% 이내로 유지됨을 알 수 있었다.

표 6에서는 전압신호와 전류신호의 위상차 $\theta = 60^\circ$ 일 때 30%의 10차, 33차, 40차의 고조파 성분을 포함한 입력신호에 대해 분석한 결과를 보여준다. 이때에도 THD와 역률 값의 Δ_{meas} 가 1% 이내로 유지됨을 알 수 있었다.

표 3. 10%의 10차,33차,40차 고조파를 함유한 대조군 신호와 실험군 신호의 비교

Table 3. Comparison of ideal and real signals with 10% harmonics at 10th, 33th, and 40th orders.

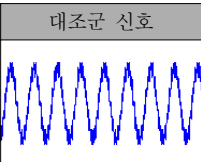
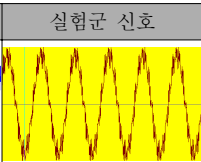
분류	대조군 신호	실험군 신호
파형		
RMS	734.86	733.84
역률(%)	98.53%	98.53%
THD(%)	17.32%	17.30%

표 4. 30%의 10차,33차,40차 고조파를 함유한 대조군 신호와 실험군 신호의 비교

Table 4. Comparison of ideal and real signals with 30% harmonics at 10th, 33th, and 40th orders.

분류	대조군 신호	실험군 신호
RMS	816.00	815.06
역률(%)	88.74%	88.74%
THD(%)	51.96%	51.91%

표 5. 50%의 10차,33차,40차 고조파를 함유한 대조군 신호와 실험군 신호의 비교

Table 5. Comparison of ideal and real signals with 50% harmonics at 10th, 33th, and 40th orders.

분류	대조군 신호	실험군 신호
RMS	957.86	953.27
역률(%)	75.59%	75.58%
THD(%)	86.60%	86.62%

표 6. 위상차 60° 을 갖는 30%의 10차,33차,40차 고조파를 함유한 대조군 신호와 실험군 신호의 비교

Table 6. Comparison of ideal and real signals with 30% harmonics at 10th, 33th, and 40th orders and $\theta = 60^\circ$.

분류	대조군 신호	실험군 신호
RMS	734.86	733.50
역률(%)	49.27%	49.22%
THD(%)	86.60%	86.62%

다. 펄스 파형 분석

서론에서도 언급하였다시피 LED를 비롯한 각종 조명시스템은 물론 여러 그린 에너지 IT 시스템(장치)에서는 에너지 고효율을 고려 SMPS를 내장하고 있다. 소비전력 효율부분에서 큰 이득을 가져오는 SMPS는 내재적으로 펄스 파의 전류신호를 발생한다. 펄스 파형에 대한 품질측정은 SMPS를 활용한 고효율 그린 에너지 시스템 개발 시에 중요할 뿐 아니라, 실제로 이 펄스 파는 전력선 상에 유기되어 여타 전력선 신호의 품질 저하를 낳을 수 있어 이를 방지하기 위해서라도 펄스 파형의 정밀측정이 중요하다.

본 논문에서는 펄스 파형의 폭(duty)이 5%, 10%, 25%인 경우의 3 가지로 분류하고 각 경우에 발생된 신호에 대한 전력품질을 측정하고 그 결과 값을 비교한다 (표 7 참조). 펄스 폭이 좁아질수록 (즉, duty가 작을수록) 피상전력과 유효전력이 모두 감소하였으며 역률 역시 감소함을 알 수 있었다—여기서 역률이 감소한다는 것은 전력품질 측면에서는 다소 떨어지지만 에너지 절약 측면에서는 높아짐을 의미한다고 볼 수 있다. 역률

표 7. 펄스 파형의 duty가 5%, 10%, 25%인 각 경우에 대조군 신호와 실험군 신호의 비교

Table 7. Comparison of ideal and real pulse signals with 5%, 10%, and 25% duty.

분류	대조군 신호(5%)	실험군 신호(5%)
파형		
RMS	228.67	229.82
역률(%)	31.72%	31.71%
THD(%)	281.68%	281.96%
분류	대조군 신호(10%)	실험군 신호(10%)
RMS	362.04	363.14
역률(%)	49.67%	49.74%
THD(%)	166.80%	169.86%
분류	대조군 신호(25%)	실험군 신호(25%)
RMS	512.00	511.33
역률(%)	68.90%	68.88%
THD(%)	101.74%	103.15%

의 경우 펄스 폭에 상관없이 Δ_{meas} 가 1% 이내로 유지되며, THD의 경우 5% duty에서 Δ_{meas} 가 1% 이내이지만 10% 와 25%의 duty에서 약 2~3% 이내로 유지됨을 알 수 있다. 이는 곧 설계한 테스트 베드에서 펄스 파에 대한 고급품질 측정 (1% 기준)에 있어 다소 제한됨을 의미한다.

라. 3파장 Ramp 전류 신호 분석

실제 3파장 Ramp의 전류신호 데이터에 대한 파형을 생성하여 분석한 결과를 표 8에서 보여준다. 대조군의 신호와 실험군의 신호에 대한 역률 값의 Δ_{meas} 가 1%보다 다소 커짐을 알 수 있는데, 이는 3파장 Ramp의 전류신호가 펄스 신호와 유사한 특성을 가짐에 기인한다.

표 8. 3파장 Ramp 파형의 이상신호와 실제신호의 비교

Table 8. Comparison of ideal and real 3-wavelength ramp signals.

분류	대조군 신호	실험군 신호
파형		
RMS	315.22	313.10
역률(%)	61.12%	62.78%

마. FFT를 이용한 LED 전류 신호 분석

표 9는 실제 산업현장에서 발생한 기본 주파수 60Hz

표 9. LED 전류신호의 분석 결과

Table 9. Analytical results of LED current signal.

시간 축 신호	주파수 축 신호
파형	
RMS = 602.42	
PF(%) = 91.18%	
THD(%) = 33.10%	

의 LED 전류신호의 데이터를 토대로 초기화 시킨 신호의 분석결과이다. LED 전류신호는 임의신호발생기(WF1974)로 유사한 형태의 신호를 생성하는데 어려움이 있어 상대적인 정확도 비교 보다는 신호 측정 및 분석에 주안점을 두었다. 표 9의 왼쪽 그림은 신호의 시간 축 영역에서 확인한 신호이며 오른쪽 그림은 해당 신호의 FFT 결과를 보여준다. 실제 LED 신호에서 전류신호의 크기는 일반적으로 약 20mA정도이며 기존의 형광등의 전류 신호의 크기와 크게 다르지 않다. 때문에 RMS의 크기는 기존의 정현파 신호의 크기와 크게 다르지 않았다. 하지만 같은 밝기 기준에서 LED 정격 전압이 상황에 따라 다르지만 기존 형광등에 비하여 현저히 작아 소비전력 측면에서 상당한 이익이 있음을 알 수 있었다. 또 측정 결과에서 보여주듯이, 동일 조건하에서 LED의 역률 값이 고효율을 자랑하는 3파장 Ramp의 역률 값(표 8 참조)보다 높아 전력품질 면에서도 LED가 상대적으로 우수함을 알 수 있었다.

바. FFT를 이용한 고주파 분석

테스트 베드에 100KHz 이하의 고주파수대 Sine 신호를 입력 하여 고주파 검출 및 분석을 실시하였다. 그림 7은 100.080KHz 주파수의 Sine 신호의 FFT 결과로 오차 없이 정확하게 측정된 결과를 보여준다.

하지만 측정된 역률 값의 Δ_{meas} 가 주파수가 높아질수록 커짐을 알 수 있었는데 이를 관찰하기 위해 100KHz 이하 주파수 대역을 4개 구간 (25KHz 간격)으로 나누고 대표 주파수를 선정하여 역률의 오차 변화를 측정하는 실험을 진행하였다. 표 10은 전압과 전류 신호가 모두 Sine신호인 입력에 대한 역률의 오차 범위를 나타내는 데 $f = 75KHz$ 까지는 오차 Δ_{meas} 가 기준 값(= 1.0)의 10% 이내를 만족하지만 $f = 100KHz$ 의 경우에는

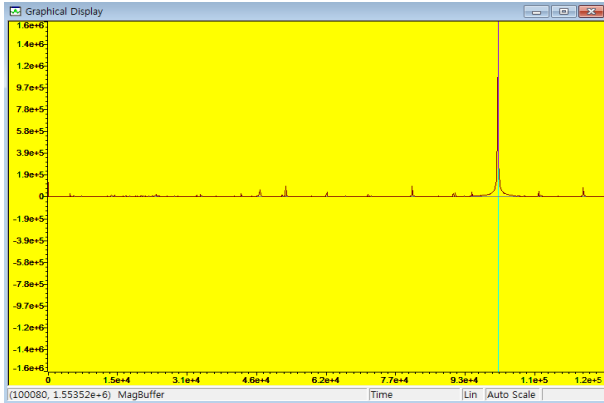


그림 7. 주파수 $f=100.080\text{KHz}$ Sine 신호에 대한 FFT 결과

Fig. 7. FFT results of sine wave with $f=100.080\text{KHz}$.

표 10. 고주파수 대역별 주파수에 대한 PF
Table 10. PF at high frequencies.

주파수 (KHz)	PF(%)
25KHz	99.17%
50KHz	96.80%
75KHz	93.24%
100KHz	89.06%

표 11. 80KHz 이상 주파수에 대한 PF
Table 11. PF error at high frequencies above 80KHz.

주파수(KHz)	PF(%)
80KHz	92.43%
85KHz	91.48%
90KHz	90.82%
95KHz	89.96%

다소 벗어남을 확인할 수 있었다. 표 11에서는 80KHz 부터 100KHz 사이의 구간을 좀 더 세밀하게 나누어 (5KHz 간격) 역률 측정 실험을 진행한 결과이다. 실험 결과 고주파 분석에서 주파수가 증가할수록 역률이 감소함을 확인할 수 있었고, 95KHz 이상의 경우 기준 오차범위를 만족하지 못함을 확인할 수 있었다.

사. 웨이블릿을 이용한 Sag, Swell, Interruption 분석
Wavelet 함수를 선언하고 Daubechies4를 이용하여 총 4단계까지 분해(decomposition)하는 과정을 거쳐 순간전압변동 모의 입력신호를 분석한다. 제안한 알고리즘에서는 정상신호와의 비율을 나타내는 p.u를 구하고 입력신호의 순간전원변동 이상 여부를 판정하고 나타난 증상을 증상별(Sag, Swell, Interruption)로 분류(검출)한다. Matlab 환경에서 제안한 알고리즘을 사용하여 이상 전력신호에 대한 분석한 결과, 1단계 분해만으로도

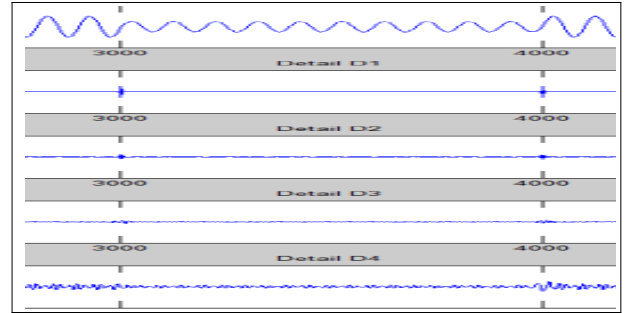


그림 8. Sag 신호에 대한 웨이블릿 분석 결과
Fig. 8. Wavelet analytical results for sag signal.

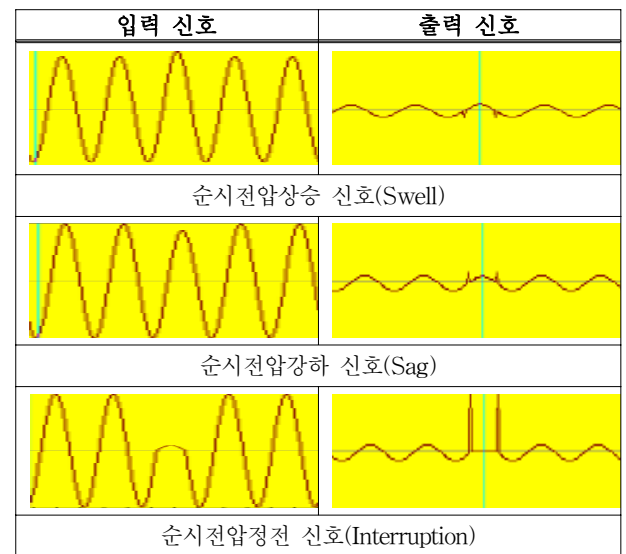


그림 9. 순간전압변동 신호에 대한 웨이블릿 변환
Fig. 9. Wavelet transform for instantaneous power variation (swell, sag, interruption).

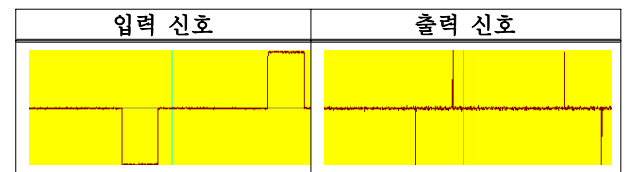


그림 10. 펄스 신호에 대한 웨이블릿 변환
Fig. 10. Wavelet transform for pulse signal.

이상 신호에 대한 효과적인 신호 분석이 가능함을 알 수 있었다.

또한 실제 테스트 베드에 이상 신호를 입력하여 측정 한 결과가 IEEE 1159에서 지정한 요구규격을 만족함을 확인할 수 있었다. 그림 8에서는 Sag신호에 대한 분석 결과인 단계별 세부계수 값을 그래프로 보여주며, 그림 9는 Sag, Swell, Interruption 신호를 Wavelet 함수를 이용하여 검출(분류)한 결과를 각각 보여준다.

그림 10은 LED 혹은 3파장 Ramp에서 발생하는 펄스 전류신호에 대한 웨이블렛 변환을 실행한 결과를 보여주는 데 정확하게 펄스 신호 검출이 가능함을 알 수 있었다. 펄스 신호는 소비전력의 효율을 높일 수 있는 장점을 가지고 있지만 주변의 다른 전자기기에 불요신호로 작용 오히려 전력품질을 떨어트리는 요인이 될 수 있는 데, 웨이블렛 변환을 이용 시 효과적으로 펄스 파형의 검출이 가능함을 알 수 있었다.

IV. 실험분석 종합 및 결론

본 논문에서는 LED기반 그린 에너지 조명시스템의 개발 및 운용시 발생하는 각종 전원신호의 전력품질을 측정하는 방안을 제시하고 이를 저가형 MCU (TMS320F28335)를 이용한 테스트 베드로 구축하였다. 조명시스템에서 발생하는 각종 전원신호에 대한 실효치, 피상전력, 유효전력, 역률 등을 계산하고 고속 푸리에 변환과 웨이블렛 알고리즘 등을 이용하여 총 고조파 왜형률 (THD) 그리고 순간전원변동 요소들의 분석이 가능한 알고리즘을 CCS 3.3 환경에서 C언어로 구현하였다.

테스트 베드 실험 결과, 우선 40차 이하의 고조파를 함유한 신호 측정에서 측정오차가 요구기준을 만족함을 알 수 있었다. 구현된 FFT 알고리즘을 이용한 고주파에 대한 분석에서 95KHz 이하의 주파수에서 역률 측정 오차가 요구기준 이내임을 알 수 있었다. 고에너지 효율 조명시스템에서 주로 발생하는 펄스 파형에 대한 분석에서 역률의 경우 측정오차가 1% 이하를 만족하지만, THD의 경우 duty가 10% 미만에서는 측정오차가 1% 이하를 만족하지만 10% 이상인 경우 2~3%로 고급품질측정 기준을 다소 상회함을 알 수 있었다. 또한 테스트 베드에 구현된 웨이블렛을 이용한 순간전원이상 신호 분석에서는 1단계 분석만으로 Sag, Swell, Interruption 신호 뿐 아니라 펄스 신호에 대한 실시간 검출이 가능함을 알 수 있었다.

향후 필터 및 효율적인 메모리 이용 등으로 임의의 비선형신호에 대해 측정오차를 좀 더 낮추어 주는 실시간 고급 품질측정방안 연구를 수행할 계획이다.

참고 문헌

- [1] 이승만, "기업 간 전략적 제휴가 기업가치에 미치는 영향: 그린에너지 시장을 중심으로", 한양대학교 석사학위논문, 2011.2
- [2] 오혁근, "도로경관과 에너지효율을 고려한 LED 가로등 디자인 개발," 한국디지털디자인학회지, 제9권, 제3호, 2009.
- [3] 유민정, 김유신, 최안섭, "기존 가로등과 LED가로등의 디자인 경향 및 성능 분석," 한국생활환경학회지, 제18권, 제4호, 383-391쪽, 2011.
- [4] 김용운, "LED조명산업의 성장전략에 관한 연구," 한양대학교 석사학위논문, 2009.02
- [5] 허민호, "LED 구동용 1단방식 고역률 컨버터," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 985-986쪽, 2009.07.
- [6] 신현용 "SMPS 구동 대형교통 신호용 LED 신호등의 특성," 한국전자통신학회논문지, 제6권, 제5호, 643-648쪽, 2011.10
- [7] Q. Tang, Z. Teng, S. Guo, and Y. Wang, "Design of power quality monitoring system based on LabVIEW," in *Proc. IEEE ICMTMA 2009*, pp.292-295, April 2009.
- [8] A. Thapar, T. K. Saha, and Z. Y. Don, "Investigation of power quality categorisation and simulating its impact on sensitive electronic equipment," in *Proc. IEEE PESGM 2004*, pp.528-533, June 2004.
- [9] D. Hong, J. Lee, and J. Choi, "Power quality monitoring system using power line communication," in *Proc. IEEE ICICS 2005*, pp.931-935, 2005.
- [10] C. Gherasim, J. V. Keybus, J. Driesen, and R. Belmans, "DSP implementation of power measurements according to the IEEE trial-use standard 1459," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 53, no.4, pp.1086-1092, Aug. 2004.
- [11] IEEE Std. 1159, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, 1995.
- [12] IEEE Std. 1459, IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Non-sinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions, 2010.
- [13] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems IEEE Std 519-1992.
- [14] 정교범, 관선근, "DSP를 이용한 인공지능형 전력품질 진단기법 연구," 조명·전기설비학회 논문지, 제23권, 제1호, 116-124쪽, 2009.01

[15] 오규태, 유영길, “전력 품질 및 전력 고조파 측정 장치에 관한 연구,” 전자공학회 논문지, 제 49권, 제 10호, 618-624쪽, 2012.10

— 저 자 소 개 —



유형모(학생회원)
2012년 가톨릭대학교 정보통신전자공학부 학사 졸업.
<주관심분야 : 통신신호처리, 임베디드 시스템 설계>



최진원(학생회원)
2012년 가톨릭대학교 정보통신전자공학부 학사 졸업.
<주관심분야 : 통신신호처리, 임베디드 시스템 설계>



최상호(정회원)-교신저자
1982년 한양대학교 전자공학과 학사 졸업.
1984년~1994년 국방과학연구소 선임연구원.
1994년~1996년 한국전자통신연구원 선임연구원.
2001년~2002년 RadioCosm Inc. 수석연구원.
2002년~현재 가톨릭대학교 정보통신전자공학부 교수
<주관심분야 : 무선통신, 전력선통신, 센서네트워크, 전력선신호처리>