

http://dx.doi.org/10.7236/JIWIT.2012.12.5.31

JIWIT 2012-5-5

안티아일랜드링 기능을 적용한 전기자동차 충전계통 연계 스마트그리드 모니터링 시스템 개발

Development of a Smart Grid Monitoring System with Anti-Islanding Function for Electric Vehicle Charging

노선희*, 신범식*, 이경중*, 기영훈*, 안현식**

Sunny Ro, Bum-Sik Shin, Kyung-Jung Lee, Young-Hun Ki, Hyun-Sik Ahn

요약 본 논문에서는 무선 센서 네트워크를 활용하여 스마트그리드와 전기자동차의 충전 시스템 연계과정을 효과적으로 파악하고, 안티아일랜드링 기능을 적용하여 전기자동차 충전계통과 연계된 스마트그리드 모니터링 시스템을 제안한다. 스마트그리드 모니터링 시스템은 지그비(ZigBee)통신을 통해 무선으로 전력 모니터링 데이터를 수신하며, 별도의 물리적 연결 없이 원격 제어를 통해 전기자동차의 충전제어가 가능하다. 또한, 그리드 내 독립전원에 아일랜드링 현상이 발생하면, 아일랜드링 현상이 발생한 독립전원을 즉시 감지하여 차단하고 다른 독립전원으로 대체하여 그리드의 안정적인 운용을 하도록 하며, 실험을 통하여 스마트그리드 모니터링 시스템의 성능을 확인한다.

Abstract In this paper, we present a smart grid monitoring system connected with electric vehicle charging system using anti-islanding method. Electric vehicles can be charged through remote control of smart grid monitoring system and the charging process may be more stable and more efficient by wireless communication between the Local Area Module and End Modules. It is illustrated by some experiments that electric vehicle charging process may not be interrupted without any serious fault even though the islanding phenomena occurred in the grid if the presented monitoring system was applied to the smart grid system.

Key Words : Electric Vehicle, Smart Grid, Anti-Islanding, Electric Vehicle charging

1. 서론

스마트그리드 기술은 기존 전력망에 정보통신기술을 접목하여 에너지를 효율적으로 관리하기 위한 차세대 전력망 기술이다. 기존의 단방향 그리드와 비교했을 때 실시간으로 전력 발전량·소비량 정보를 교환할 수 있으므로 에너지 관리 효율을 높일 수 있으며, 신재생 에너지원인 태

양광발전, 풍력발전, 연료전지와 같은 분산전원 계통들에 적용이 가능하다. 또한, 최근 전기자동차 기술의 발달과 함께 차량의 배터리를 가정용 축전지로 활용하는 V2G (Vehicle-to-Grid) 기술에 대한 관심이 확대되고 있다^[1].

전기자동차(Electric Vehicle : EV) 충전시스템을 스마트그리드에 연계시켜 전력 발전량 및 소비량 관련 정보를 교환하고 다양한 기능을 구현함으로써 에너지를 효율

*준회원, 국민대학교 전자공학과

**정회원, 국민대학교 전자공학과

접수일자 : 2012년 8월 8일, 수정완료 : 2012년 9월 20일

게재확정일자 : 2012년 10월 12일

Received: 8 August 2012 / Revised: 20 September 2012 /

Accepted: 10 October 2012

**Corresponding Author: ahs@kookmin.ac.kr

Dept. of Electronic Engineering, Kookmin University, Korea

적으로 관리할 수 있다^[2]. EV에 공급되는 전력은 스마트 그리드의 각 분산전원으로부터 얻어지고, 각 분산전원은 EV의 전력수요자가 원하는 장소 또는 가격 등이 만족될 때 충전이 진행되도록 한다. 또한, EV를 충전하고 남은 전력을 전체 전력망으로 역전송하여 에너지를 효과적으로 관리할 수 있다^[3]. EV가 가정, 빌딩, 충전소 그 외에 어느 곳에서든 충전이 가능하기 위해서는 스마트그리드 내 분산전원들의 효율적인 네트워킹이 필수적이다.

또한, 스마트그리드 내에서는 에너지 효율을 최대한 높이기 위해 전력 발전량·소비량, 전력의 품질 등 각각의 상태를 모니터링할 필요가 있다. 이러한 모니터링 시스템은 대부분의 산업현장에서 유선망 방식을 채택해왔으나 유선망 방식은 광범위하게 분산되어 있는 스마트그리드의 분산전원에 적용하기에는 매우 비효율적이다. 따라서 최근 스마트그리드는 유선망 통신을 대체할 수 있는 무선 통신 방식의 원격 모니터링 시스템을 요구하고 있다^[4].

스마트그리드 내에 소규모 독립전원들을 포함할 때, 각 독립전원에서 여러 가지 문제가 발생할 수 있다. 예를 들어, 같은 전력계통에 연계된 독립전원의 연결이 끊어지게 되면, 발전된 전력이 전송되지 못하고 계속 쌓이거나, 계통에 전력이 잔류하여 독립전원과 계통에 연계된 다른 장치들에 고장을 일으킬 수 있다^[5]. 그러므로 스마트그리드 모니터링 시스템에는 이러한 문제를 해결할 수 있는 안티아일랜드링 기술도 적용되어야 한다.

본 논문에서는 EV충전 시스템과 연계되고, 안티아일랜드링 기능이 적용된 무선 센서 네트워크 기반의 스마트그리드 모니터링 시스템을 제안한다. 또한, 구현한 모니터링 시스템의 성능을 검증하기 위해 EV 시뮬레이터와 스마트그리드를 이용한 실험을 수행한다. 배터리와 모터 구동부로 구성된 EV 시뮬레이터는 HILS(Hardware-In-the-Loop-Simulation)로 구현하고, 풍력발전 등의 분산 전원으로 구성된 스마트그리드는 SILS(Software-In-the-Loop-Simulation)로 구현하며 전체 시스템에 대한 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통해 모니터링 시스템의 성능을 검증한다.

II. 스마트그리드의 구성

본 논문에서 제안하는 스마트그리드 시스템은 그림 1과 같이 특정 영역별로 하위 감시 모듈(End monitor

Module : EM), 지역 감시 모듈(Local Area monitor Module : LAM) 및 광역 감시 모듈(Wide Area monitor Module : WAM)로 구성되어 있다. 이 모듈들은 시스템의 신뢰도를 높이기 위하여 계층별로 각각 다른 통신 기술을 사용한다^[6].

EM은 무선 센서 노드의 일종으로 3개의 타입으로 구별할 수 있다. 첫 번째로, EPM(End Power monitor Module)은 재생 가능한 각각의 소규모 전력 발전기에 위치하여 발전 전력, 전류, 전압, 전력의 품질 및 발전기 상태를 모니터링할 수 있다. 또한, 소비자는 PC에서 원격으로 EPM의 상태를 확인할 수 있다. 두 번째로, ELM(End Load monitor Module)은 집, 사무실, 공장과 같이 소비자가 전력을 소비하는 장소와 인접한 지점에 위치하게 되며, 소비자들의 전력 소비량과 상태를 측정한다. 세 번째로, EGM(End Grid 111111monitor Module)은 전류·전압 센서가 포함되어 있는 분산 망에 위치하여 전체적인 전력 발전량·소비량, 전력계통의 사고 발생 및 전력의 품질을 감시한다. EPM, ELM은 LAM의 지령에 따라 연결된 장치를 차단하고 재연결할 수 있다. 또한, FFT(Fast Fourier Transform)를 사용하여 전류, 전압의 고조파를 계산하고, 비정상적인 고조파의 발생을 통하여 사고를 감지할 수 있다.

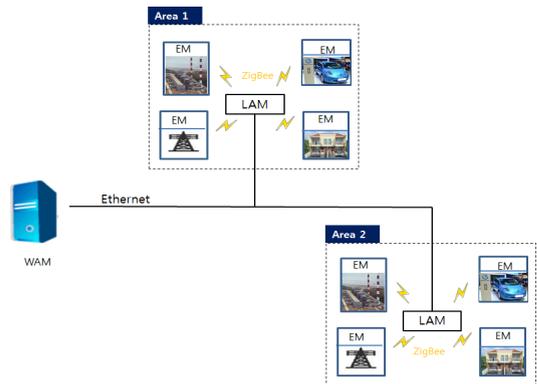


그림 1. 스마트그리드의 블록 다이어그램
Fig 1. The block diagram of the smart grid

EM은 각 모듈들에 대한 정보를 실시간으로 측정하여 제어해야 하므로 고성능 프로세서, 전류·전압 센서, ZigBee 무선 통신 모듈로 구성된다. EM과 LAM간의 데이터는 ZigBee통신을 이용하여 전송된다. 각 EM은 측정된 정보를 LAM에 전송하고 저장하며, LAM은 저장된 데이터를 분석하여 EM에 필요한 지령을 내린다. 예를

들어 분산전원이 과도한 전력을 생산하면, LAM은 발전량을 감소하라는 명령을 EPM에 보낸다. 각 EM으로부터 모니터링되는 정보는 정보보안과 통신 신뢰성을 유지하기 위해 각 local 영역에 있는 LAM에 의해 수집된다. LAM은 ZigBee 무선 통신을 통해 얻어지는 정보를 이더넷으로 변환하는 게이트웨이를 가지고 있다. 발전기, 부하, EM에 연결된 전원장치에 문제가 발생하는 즉시 LAM에 고장 검출 신호를 전송한다. LAM은 고장 검출 신호를 수신하여 해당 노드에서 전력계통을 차단하고 이더넷을 통해 실시간으로 전체 네트워크를 모니터링 할 수 있는 WAM에 고장신호를 보고한다.

III. 전기자동차 충전 시스템을 위한 안티아일랜딩 응용

스마트그리드 모니터링 시스템은 소규모 분산전원 발전기의 아일랜딩 현상을 방지하는데 응용할 수 있다. 아일랜딩 현상은 결합이나 사고에 의해 유틸리티 전력 손실이 발생하는 경우 분산 전원이 불안정하게 동작하는 것을 의미한다. 아일랜딩의 발생은 유틸리티 네트워크의 재 연결을 복잡하게 만들고 유틸리티 부하에 위험을 줄 수 있으며, 소규모 발전기에 부담을 가중시킬 수 있다^[7]. 그러므로 스마트그리드 모니터링 시스템을 이용하여 소규모 분산 전원 발전기의 아일랜딩 현상을 해결하고, 아일랜딩 현상을 검출하여 시스템을 안전하게 동작시켜야 한다.

아일랜딩을 검출하는 방법으로는 수동적인 방법과 능동적인 방법이 있다. 첫 번째로 수동적인 방법은 유틸리티 네트워크에 사고가 발생했을 때 전압, 주파수, 위상 등의 변동을 감지함으로써 아일랜딩을 검출하는 것이다. 발전기 인버터 터미널에 전압 레벨이나 주파수가 미리 설정된 정상 범위를 초과하면, 유틸리티의 고장으로 간주된다. 따라서 발전기 인버터가 과전압 방지(OVP), 저전압 방지(UVP), 과주파수 방지(OFP), 저주파수 방지(UFP)의 기능을 갖고 있으면, 발전기는 기본적인 아일랜딩 검출 능력을 가질 수 있다^[8]. 두 번째로 능동적인 방법은 주파수 바이어스, Sandia 주파수 이동법, 주파수 점프, 하모닉 진폭 점프, 전력선 캐리어 통신 등이 있다^[4]. 이러한 방법은 임의의 신호를 발전기의 출력 신호로 변환하고, 부하의 전압 및 주파수 변화를 관찰함으로써 아일랜

딩을 검출한다.

그러나 이러한 기존의 아일랜딩 검출 방법에는 몇 가지 문제가 있다. 첫 번째, 능동적인 아일랜딩 검출 방법에서 임의의 신호를 발전기의 출력신호로 변환하기 때문에 전력의 품질이 감소한다. 두 번째, 수동적인 아일랜딩 검출 방법에는 NDZ(Non-Detection Zone)이 존재하는데 NDZ에 의해 신뢰성 및 안정성에도 문제가 발생할 수 있다^[9]. 그러므로 본 논문에서는 위의 문제점을 보완하기 위한 무선 통신 기반의 안티아일랜딩 기능을 스마트그리드에 적용하여 EV충전을 진행하고, 제안된 스마트그리드 모니터링 시스템을 통하여 안정적인 충전이 이루어지는 것을 확인한다. 예를 들어, 그림 2와 같이 독립전원의 결합으로 인해 전력손실이 발생되면 LAM은 센서를 통해 문제를 감지하고 독립전원을 차단하며, ZigBee 무선 통신을 통해 각 부하 및 발전소와 독립전원의 고장 정보를 공유하여 다른 독립전원에 아일랜딩 현상을 방지한다.

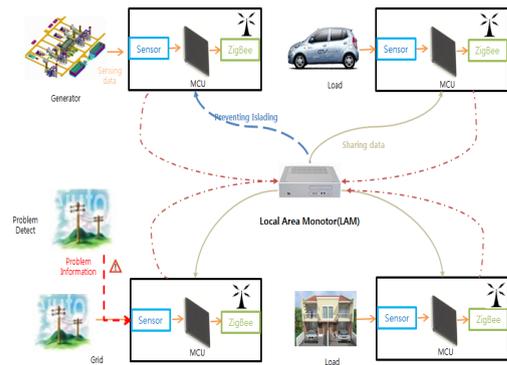


그림 2. 안티아일랜딩 방법에 기반한 스마트그리드 원격 모니터링 시스템

Fig 2. The RMS based anti-islanding method

IV. 스마트그리드 시스템의 구성

본 논문의 실험 시스템은 그림 3과 같이 EV, EVSE, 스마트그리드로 구현되었다.

EVSE는 ZigBee 무선 통신을 통하여 스마트그리드와 데이터를 송·수신 하고, EVSE와 EV는 CAN(Controller Area Network) 통신을 통하여 유선으로 정보를 전달한다. 스마트그리드는 그리드 내에 각 노드를 제어하기 위한 MCU(Micro Controller Unit), EVSE와 무선 통신을 위한 ZigBee 모듈, 전력원 그리고 EV 충전 상태, 충전 정

보 등을 확인할 수 있는 스마트그리드 모니터링 시스템으로 구성되며, EVSE는 제어프로그램의 수행을 위한 MCU, 스마트그리드와 무선 네트워크를 위한 ZigBee 모듈, AC 전력을 DC 전력으로 변환하기 위한 AC-DC Converter 그리고 EV 충전 상태를 모니터링하기 위한 JAVA 기반의 EVSE 모니터링 시스템으로 구성된다.

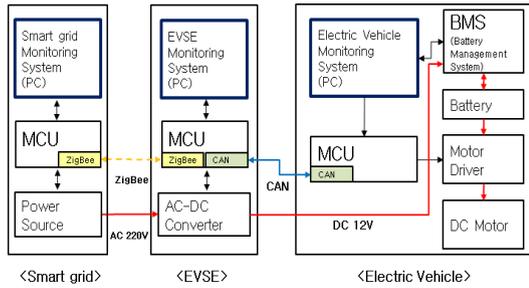


그림 3. 실험 시스템의 구조
Fig 3. The structure of experimental system

EV는 MCU, 배터리 충전 관리를 위한 BMS(Battery Management System), 배터리, EV 운전을 위한 DC 모터, 모터 드라이버 그리고 충전 상태를 확인하기 위한 MCU기반의 EV 모니터링 시스템으로 구성된다.

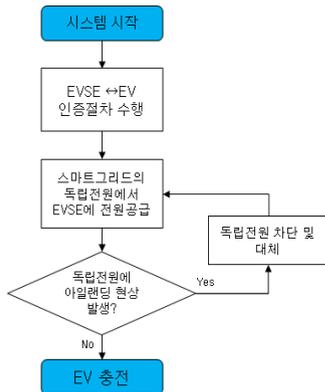


그림 4. 스마트그리드 시스템 흐름도
Fig 4. Smart grid system flowchart

스마트그리드에서 EV의 기본적인 충전과정은 그림 4와 같이 간단히 표현할 수 있다. 또한, EV와 EVSE 사이의 충전절차는 그림 5와 같이 IEC 61850에 따른 충전 인증 절차를 수행하고, EV 운전자 ID, 배터리 정보, SOC(State Of Charge) 순서대로 인증 절차가 완료되면, EVSE는 스마트그리드의 독립전원으로부터 전원을 공급

받는다^[10]. 그러나 독립전원에 아일랜드링 현상이 발생하면 스마트그리드 시스템은 기존의 독립전원을 차단하고 같은 충전계통에 있는 다른 독립전원으로 전력원을 대체하여 EVSE에 전원을 공급한다.

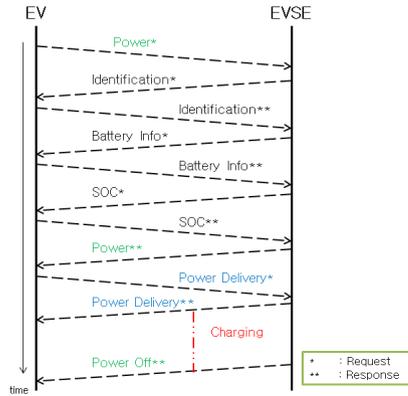


그림 5. 충전 인증 절차
Fig 5. Certification process of charging

V. 실험 시스템 구현 및 결과

스마트그리드와 EVSE는 ZigBee 무선 통신을 통하여 데이터를 송·수신 한다. 스마트그리드는 각 센서노드들로부터 전송받은 데이터를 RS-232를 이용하여 PC에 전송하고, 모니터링 시스템(LAM)을 통하여 각 노드의 전력량, EV운전자 ID, 배터리 정보, SOC, 충전 시간, 충전요금 정보를 나타낸다.

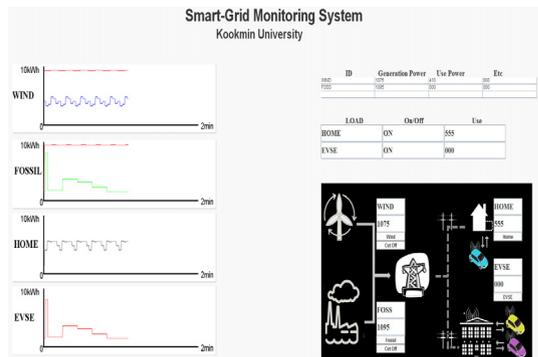


그림 6. 스마트그리드 모니터링 시스템 (LAM)
Fig 6. The smart grid monitoring system (LAM)

수신된 데이터와 그래프 파형은 그림 6과 같이 스마트

그리드 모니터링 시스템을 통해 확인할 수 있도록 구현하였고, 이를 기반으로 분산 전원의 상태를 분석할 수 있다.

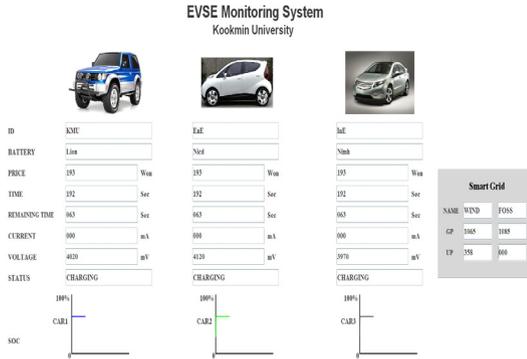


그림 7. EVSE 모니터링 시스템 (EM)
Fig 7. The EVSE monitoring system (EM)

EVSE와 EV간의 인증과정, 배터리 정보, SOC, 충전 요금 정보, 충전 시간 정보들은 그림 7과 같이 EVSE 모니터링 시스템(EM)을 통하여 확인이 가능하도록 구현하고, EV의 배터리 상태 정보는 EV 모니터링 시스템을 통하여 그림 8과 같이 확인할 수 있도록 구현했다.

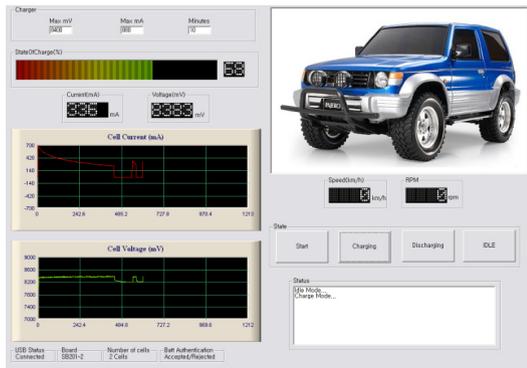


그림 8. EV 모니터링 시스템
Fig 8. The EV monitoring system

만약, EV 충전이 진행되는 동안 독립전원에 아일랜딩 현상이 발생 되면 LAM은 ZigBee 무선 통신 및 센서를 통해 문제를 감지한다. 또한, LAM에서 문제가 발생한 EM을 차단하고 대체하는 데까지 걸리는 시간은 그림 9와 같이 33ms 이다. 즉 LAM이 1초 이내의 짧은 cut-off 시간을 보임으로, 국제 표준인 IEEE std. 929-2000과 UL1741에서 규정한 1초의 cut-off 시간을 만족하는 것을 확인했다. 또한, 아일랜딩의 검출시간과 EV 충전 전압의

상태를 통하여 아일랜딩이 검출되는 경우, EV 충전 전압은 그림 10과 같이 EM이 대체되는 6ms 동안 약 5.42% 떨어진 후 다시 충전이 진행되는 것을 확인했다.

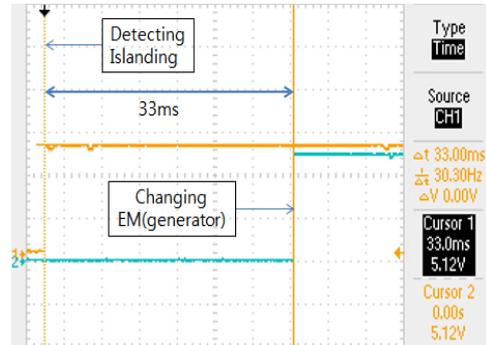


그림 9. 아일랜딩 검출 시간
Fig 9. The Detection time of islanding

위의 실험을 통해 EVSE는 무선 통신을 통해 스마트 그리드 모니터링 시스템을 사용하여 아일랜딩 문제를 해결하는 것을 확인하였고, 스마트그리드 모니터링 시스템이 사고를 검출하여 전력 공급원을 대체 하여도 EV의 충전 능력은 저하되지 않는 것을 확인했다.

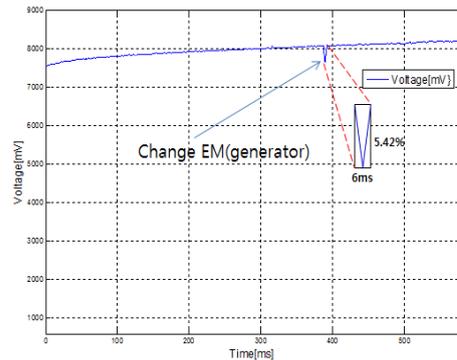


그림 10. 아일랜딩 발생 시 EV 충전 전압
Fig 10. EV charging voltage when islanding occurs

VI. 결론

본 논문에서는 무선 센서 네트워크 기반의 안티아일랜딩 방법을 적용한 스마트그리드 모니터링 시스템을 구현하였다. 이 시스템의 유효성은 LAM과 EM들로 구성된 스마트그리드에 아일랜딩 현상이 발생하여도 전력계

통에 문제없이 EV충전이 진행되는 실험을 통해 검증하였다. 실험의 결과로는 스마트그리드 모니터링 시스템의 동작이 원활하게 수행되었으며, 스마트그리드와 EV간의 통신 신뢰성을 확인하였다. 제안한 무선 통신 기반의 모니터링 시스템은 일반적인 스마트그리드 시스템과 쉽게 적용될 수 있다. 향후 스마트그리드 모니터링 시스템을 이용하여 EV의 충전 효율을 개선시키는 연구가 진행될 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] R. DeBlasio and C. Tom, "Standards for the smart grid," Proc. of Energy 2030 Conference (ENERGY), IEEE, 2008
- [2] V. Gungor, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergut, C. Buccella, C. Cecati, and G.Hancke, "Smart grid technologies: Communications technologies and standards," Proc. of IEEE Trans. Ind. Information, vol. 7, 2011
- [3] I. Cvetkovic, T. Thacker, D. Dong, G. Francis, V. Podosinov, D. Boroyevich, F. Wang, R. Burgos, G. Skutt, and J. Lesko, "Future home uninterruptible renewable energy system with vehicle-to-grid technology," Proc. of Energy Conversion Congress and Exposition, 2009 (ECCE '09), IEEE, 2009
- [4] K. M. Kim, K. J. Lee, C. W. Moon, H. S. Ahn and G. M. Jung, "Wireless sensor network based remote power monitoring system for anti-islanding application in smart-grid," Journal of the Institute of Webcasting, Internet and Telecommunication, 2010
- [5] B. G. Yu, M. Matsui, J. H and G. J. Yu, "A high power quality anti-islanding method using effective power variation," Journal of the International Solar Energy Society, 2008
- [6] B. Luitel, G. Venayagamoorthy and C. Johnson, "Enhanced wide area monitoring system," Proc. of IEEE PES conference on innovative smart grid technologies, 2010
- [7] S. Mekhilef and N. A. Rahim, "Implementation of grid-connected photovoltaic system with power factor control and islanding detection," Proc. of Power Electronics Specialists Conference, 2004
- [8] G.-K. Hung, C.-C. Chang, and C.-L. Chen, "Automatic phase-shift method for islanding detection of grid-connected photovoltaic inverters," IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 18, 2003
- [9] Z. Ye, A. Kolwalkar, Y. Zhang, P. Du and R. Walling, "Evaluation of anti-islanding schemes based on nondetection zone concept," Proc. of Transactions on Power Electronics, IEEE, 2004
- [10] S. Kabisch, A. Schmitt, M. Winter and J. Heuer, "Interconnections and communications of electric vehicles and smart grids," Proc. of International Conference on Smart Grid Communications, IEEE, 2010

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업(NIPA-2012-H0301-12-2007)과 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업(NIPA-2012-H0401-12-2003)의 연구결과로 수행되었음.

※ 본 연구는 2012년도 국민대학교 교내연구비를 지원받아 수행된 연구입니다.

저자 소개

노 선 희(준회원)



- 2012년 : 국민대학교 전자공학부 학사 졸업
- 2012년 ~ 현재 : 국민대학교 대학원 전자공학부 석사과정

<주관심분야 : 전기자동차 충전 시스템제어>

신 범 식(준회원)



- 2011년 : 국민대학교 전자공학부 학사 졸업
- 2011년 ~ 현재 : 국민대학교 대학원 전자공학부 석사과정

<주관심분야 : 전기 자동차 충전 시스템 제어, 전기 모터 및 임베디드 시스템>

이 경 중(준회원)



- 2010년 ~ 현재 : 국민대학교 대학원 전자공학부 박사과정

<주관심분야 : 전자 브레이크 제어, 전기 모터 및 임베디드 시스템>

기 영 훈(준회원)



- 2010년 ~ 현재 : 국민대학교 대학원 전자공학부 박사과정

<주관심분야 : 전자 브레이크 제어, 전기 모터 및 임베디드 시스템>

안 현 식(정회원)



- 1992년 : 서울대학교 제어계측 공학과 박사
- 현재 : 국민대학교 전자공학부 교수

<주관심분야 : 차량 전자 제어>