http://dx.doi.org/10.6113/TKPE.2015.20.4.351

전기추진선박의 전력품질 개선을 위한 리튬-이온 배터리 에너지저장시스템 적용

구현근[1], 서혜림[1], 김장목†

Lithium-ion Battery Energy Storage System for Power Quality Improvement in Electrical Propulsion Ships

Hyun-Keun Ku[1], Hye-Rim Seo[1], and Jang-Mok Kim†

Abstract

This paper explained the application of a lithium-ion battery energy storage system to electric propulsion ships. The power distribution in electric propulsion ships has low power quality because of the variation in the power consumption of the propulsion motor. For proper operation of the ship, the power quality needs to be improved, and the battery energy storage system is used to solve power-quality problems. The simulation models of electric propulsion ship and battery energy storage systems are constructed on MATLAB/Simulink to verify the improvement in power quality. The proposed system is applied in various scenarios of the propulsion motor state. The power quality achieved by using the battery energy storage system in both voltage and frequency satisfies the standards set by IEC-60092/101.

Key words: Electric propulsion ship, Lithium-ion battery(LiB, Li-ion battery), ESS(Energy Storage System)

1. 서 론

선박의 환경오염에 대한 국제사회의 규제 강화에 따라 해양오염방지는 기본이고 대기오염과 기후변화의 주범인 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx) 및 온실가스(CO_2등)의 배출에도 규제를 강화하고 있다. 또한 선박이 대형화 및 고속화됨에 따라 공동현상(Cavitation)으로 인한 진동 및 소음 문제가 대두되었으며, 고유가 시대에 따른 효율적인 연료소모에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 해운 패러다임의 변화는 전 세계 조선소 및 관련 기관들의 이목을 기존 기계적 추진시스템의 선박에서 전기식 추진시스템으로 이동시켰다[1]-[2].

기존 선박의 기계식 추진방식은 추진부하와 선박 공급용 전력부하에 개별적으로 전력을 공급하였으며, 선박의 추진을 위해 원동기와 샤프트를 통해 프로펠러를 직접 구동 시켰다. 그러나 전기식 추진방식은 동일한 발전시스템으로 추진부하 및 선박 공급용 전력부하에 전력을 공급 할 수 있는 통합 운용방식의 전력시스템으로 원동기 구동에 의한 발전기의 전기가 추진전동기를 구동시켜 프로펠러를 움직이게 하는 새로운 기술이다. 이 기술은 선박의 공간 활용도 증대와 진동, 소음 감소는 물론 연료 소모량과 배출가스의 감소로 인해 친환경적인 시스템으로 평가받고 있다[3]-[4].

전기추진선박은 구성하는 원동기의 종류 및 용량에 의해 발전시스템의 응답성이 결정되며, 결정된 응답성에 의해 일정 시간동안 출력 가능한 발전 전력이 정해지므로, 발전기에서 수용 가능한 부하 전력량이 제한된다. 따라서 선박의 급격한 부하 증가 및 감소 운전 시, 발전시스템의 응답성으로 인해 발전전력이 충분이 공급되지 못하는 경우가 발생하며, 이때에 계통의 전압 및 주파수 맥동으로 인한 전력품질 저하가 발생된다.

계통의 전압 및 주파수 맥동으로 인한 전력품질 저하 및 공급 안정성 문제 해결을 위한 방법으로는 전기추진선박의 계통에 에너지저장시스템을 추가적으로 사용하는 방법이 있다. 계통에서 발생되는 전압 및 주파수 맥동의 경우 발전전력과 소비전력의 수급 불균형에 의한 것으로 에너지저장시스템을 사용함으로써 부하가 급격하게 증가하여 발전전력이 소비전력보다 적을 경우, 에너지저장시스템에서 전력을 방전하고, 부하가 급격히 감

Paper number: TKPE-2015-20-4-8
Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281
† Corresponding author: jmok@pusan.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University, Korea
[1] Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University
Manuscript received Jan. 20, 2015; revised Mar. 11, 2015; accepted July 2, 2015

TABLE Ⅰ
POWER QUALITY REQUIREMENTS BASED ON IEC-60092/101[7]

Requirements	
Steady-state voltage deviations	+6%, 10%
Phase to phase voltage unbalance (continuous)	3%
Voltage momentary deviation	±20%
Voltage transients recovery time	1,5s
THD	5%
A single distortion (any harmonic greater than)	3%
Steady-state frequency deviations	±5%
Frequency momentary deviations	±10%
Frequency transients recovery time	5s

소하여 발전전력이 소비전력보다 클 경우, 에너지저장시스템에서 전력을 충전함으로써 전력 수급 차를 해소한다[5]-[6].

에너지저장장치의 종류로는 울트라커패시터, 연료전지, 플라이휠 및 배터리 등이 있으며, 본 논문에서는 제한된 선박 공간에서 적은 부피와 무게로 높은 에너지 밀도와 효율, 장수명 및 안전성을 가지는 리튬-이온 배터리를 이용하여 에너지저장시스템을 구성하였고, 이는 최근 미 해군에서 선박의 수명 대비 운용비용등을 고려하였을 때 충분히 적용 가능성을 인정받아 DDG-51급 함정에 실제 적용되는 사례가 존재하였다[7].

선박 전력 계통은 적용 분야와 용량에 따라 국 내·외적으로 다양한 기준이 정립되어 있으며 본 논문에서는 업용 규격인 IEC-60092/101에서 제시하는 전압 및 주파수 허용 범위를 기준으로 하여 전력품질 안정성 및 개선 여부를 판별한다[8].

본 논문은 2장에서 전기추진선박 및 리튬-이온 배터리의 시뮬레이션 모델 개발[8], 리튬-이온 배터리의 용량 선정 및 시뮬레이션 모델 적용 시나리오에 대해 기술하고 있으며, 3장은 개발된 전기추진선박 모델을 기반으로 추진전동기의 상태변동 시나리오를 적용함으로써 에너지저장시스템을 이용한 전기 추진선박 계통의 전력품질 개선 여부를 확인하여 4장에서 결론을 기술한다.

2. 전기추진선박 시뮬레이션 모델 개발

2.1 시뮬레이션 모델의 구성

본 연구에서 사용되는 전기추진선박의 전력계통 구성은 Fig. 1과 Table 2에 나타냈다. 전기추진선박 구성은 전력을 생산하는 발전시스템(Power generation system), 추진력을 발생하는 추진시스템(Propulsion system), 보조 에너지원인 에너지 저장시스템(Energy storage system) 각 1대와 선박 내 서비스 부하인 전력부하 시스템(Load power system) 및 선박 전력을 관리하는 전력관리시스템 (Power management system) 및 AC 배전 시스템으로 이루어진다.

TABLE Ⅱ
COMPONENTS AND PARAMETERS OF THE ELECTRIC PROPULSION SHIP SYSTEM WITH AC DISTRIBUTION

System	Component & Parameters
Power generation	- Prime mover[M] : Gas turbine 10 [MVA] - Generator[M] : 3-phase PMSG 5.5x2 [MVA] - Governor[M] : Digital governor - Exciter[M] : IEEE DC Exciter
Propulsion	- Propulsion motor[M] : 3-phase PMSM 8 [MVA] - Converter[D] : 3-phase Diode rectifier - Inverter[D] : 3-phase PWM inverter
Energy storage	- Lithium-ion battery[M] : 500 [kWh] - Buck-boost DC/DC converter[D] - Inverter[D] : 3-phase PWM inverter
Power load	- Ship service load[D] : single/three phase active/passive load - 3-phase rectifier[D] - Single/three phase inverter[D]
Power management	Software[D]

[M] : Changing parameters from Matlab preset model
[D] : Design & Development

발전시스템은 원동기, 거버너, 발전기 및 여자기로 구성되며 각각은 Matlab/simulink에서 제공하는 preset 모델을 기반으로 크기와 용량만 변경하여 시뮬레이션 모델을 완성하였다. 추진시스템의 추진전동기는 3상 영구자석 동기 전동기 모델을 이용하였고 전동기 구동을 위한 인버터와 DC 전원생성을 위한 정류기는 일반적인 3상 인버터와 다이오드 정류기를 모델링하였다. 에너지저장시스템에 이용되는 배터리 모델은 Matlab/simulink의 preset 모델의 파라미터 변경을 통해 모델링하였고, 전력변환장치로는 Buck-boost DC/DC 컨버터와 3상 인버터를 구성하였다. 전력부하시스템은 단상과 3상의 서비스부하 및 전력변환기기로 구성되며 전력관리시스템인 소프트웨어로 구성된다[9].

2.2 리튬-이온 배터리 에너지저장시스템 용량 선정

발전기의 탈락 및 선박 부하의 대부분을 차지하는 추진부하의 갑작스런 증가 및 감소와 같은 계통 입·출력 전력의 변화는 발전시스템의 제한된 응답성으로 인해서

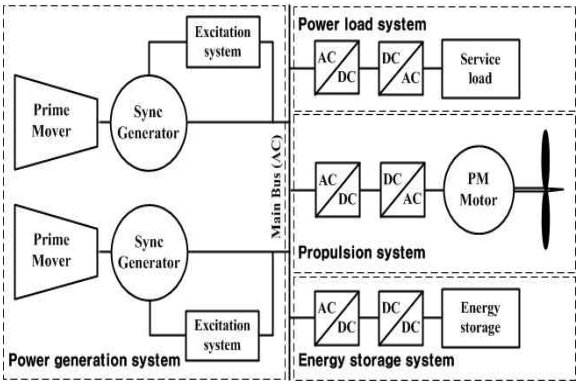

Fig. 1. Single-line configuration of the AC grid electric propulsion ship.

메인 AC계통의 전압 및 주파수에 맥동을 일으켜 전력 품질 저하를 발생 시킬 수 있다. 이러한 전압 및 주파수 맥동은 전력 수급 불균형에 의한 것으로 리튬-이온 배터리 에너지 저장시스템을 이용하여 생산전력과 소비전력 간의 수급 균형을 맞춰줌으로써 메인 AC 계통의 전력 품질을 개선시킬 수 있다[10].

에너지 저장장치의 용량이 클수록 전력계통 운영 측면에서는 전력품질 및 공급 신뢰도를 향상시킬 수 있지만, 에너지 저장 시스템 구성의 비용과 같은 경제적인 측면과 제한된 선박 공간에서의 무게 및 부피를 고려하여 에너지 저장장치의 용량은 합리적인 절차에 따라 필요 최소한으로 선정되어야 한다[11]-[13]. 이러한 합리적 절차의 의미는 선박의 운항모드에 따른 부하율을 예상하여, 가속/정속/감속의 구간별 운전 시에 발전기의 정격 용량을 넘거나 부족한 양을 계산하여 에너지 저장장치의 용량을 결정해야 하며, 본 논문에서는 에너지 저장장치의 용량을 과도상태 시의 메인 AC 계통의 전압 및 주파수의 개선효과를 보기 위해 전체 시스템 용량의 5% 정도로 결정하였다.

2.3 시뮬레이션 적용 시나리오

메인 AC 계통을 가지는 Fig. 1의 전기추진선박의 단선도를 바탕으로 Fig.2 와 같은 Matlab/Simulink 시뮬레이션 모델을 완성하였다. Fig. 2의 시뮬레이션 모델에 메인 선박의 운전 조건 중에서도 AC 계통의 전압 및 주파수 맥동이 크게 발생되리라 판단되는 2대의 발전기 중 한 대의 발전기가 탈락하는 상황에 대한 운전 시나리오를 적용하였다.

운전 조건과 상황을 기술하면, 발전기 1 대 탈락 시나리오는 함 내 서비스 부하를 ① : 초기 부하로 10초간 인가하여 계통이 정상상태에 도달하였음을 확인 후, ② : 추진전동기 속도를 정격의 80%까지 약 10초간 빠르게 증가 시킨다. ③ : 정상상태 도달을 확인하기 위하여 약 10초간 유지한 뒤 ④ : 2 대의 발전기 중 한 대를 탈락시킨다. ⑤ : 나머지 한 대의 발전기를 이용하여 추진전동기와 서비스 부하에 전원을 공급하며, 추진전동기 속도를 약 10초간 감소시킨다. ⑥ : 마지막으로 초기 상태로 돌아가며 이는 Fig. 3을 통해 확인 할 수 있다.

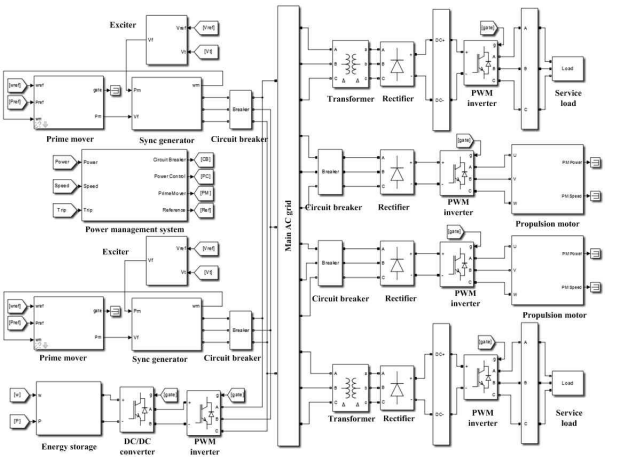

Fig. 2. Configuration of the electric propulsion ship with AC distribution in MATLAB/Simulink.

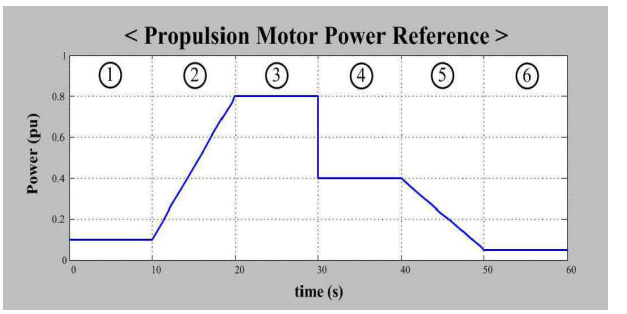

Fig. 3. Power of the propulsion motor in the one generator trip scenario.

발전기 1 대 탈락에 따라 전력관리시스템(PMS)에서의 운전 중인 나머지 1대 발전기의 전력을 고려하여 추진전동기의 최대 출력을 절반으로 제한되며 따라서 전력관리시스템의 동작에 의해서 정상적인 운전을 지속한다.

3. 시뮬레이션

에너지 저장시스템을 포함하는 Fig.2의 전기추진선박 시뮬레이션 모델에 발전기가 1대 탈락하는 Fig. 3의 운전 시나리오를 적용하여 전기추진선박에서의 전력계통의 결과를 살펴보고 IEC-60092/101 규격에 부합하는지의 여부를 판별하여 에너지 저장 시스템을 추가하여 개선 가능성을 살펴본다.

에너지 저장장치를 삽입하지 않았을 때의 전기추진선박에 발전기 1대 탈락 시나리오를 적용하여 전력관리시스템에 따른 추진전동기의 출력 전력, 원동기 출력 전력, 메인 계통 전압, 발전기 주파수를 Fig. 4에서 보여준다. 계통 전압은 정상상태에서 +6%/-10%의 정상상태의 크기 변화, 순간적인 맥동의 크기, 회복 시간 등의 규격을 모두 만족하나, 계통 주파수가 ±5%의 정상상태 맥동을 만족하지 못하는 결과를 보여준다.

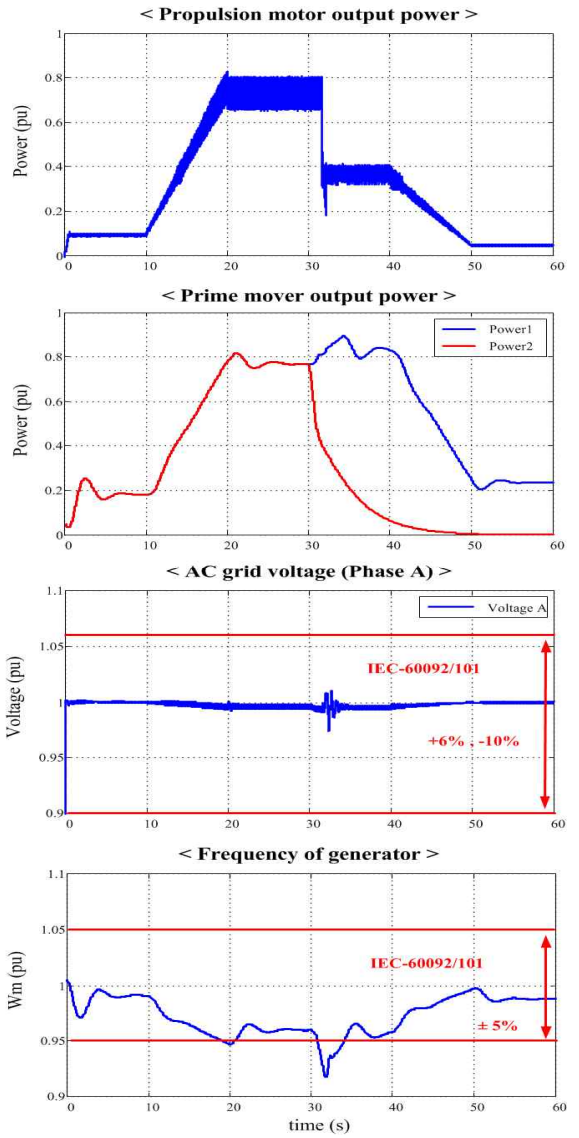

Fig. 4. Simulation results of generator trip without energy storage system.

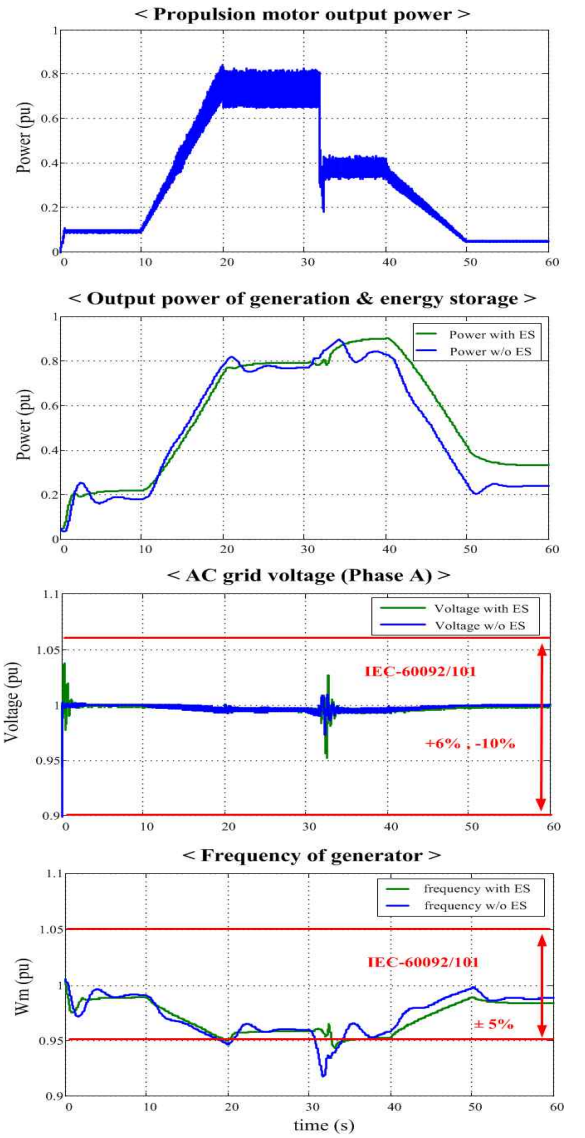

Fig. 5. Simulation results of generator trip with energy storage system.

이는 발전기가 1대 탈락하는 시점에서 전력관리시스템이 작동하여 발전기 1대의 전력을 고려한 추진부하전력을 제한시킴에도 불구하고 전력관리시스템의 투입이 1대의 탈락보다 시간적으로 늦기 때문에 순간적으로 나머지 한 대의 발전기로는 계통에 인가되는 부하전력에 충분히 전력을 공급하지 못함으로써 발생된다. 따라서 안정적인 전압 및 주파수 전력품질을 위하여 리튬-이온 배터리를 이용한 에너지 저장시스템을 투입하여 동일한 시나리오에 따른 전압 및 주파수를 Fig. 5에서 검토하였다.

에너지 저장시스템을 투입하여 발전기 1대 탈락 시나리오를 전기추진선박에 적용하였을 때의 메인 AC 계통 전압은 에너지 저장시스템 투입 전과 동일하게 IEC-60092/101에서 제시하는 전압 허용범위를 만족함을 확인 할 수 있다.

에너지 저장시스템의 투입으로 추진전동기 기동 및 부하의 증가, 감소에 따라 맥동하는 발전전력이 에너지 저장시스템을 투입하기 전보다 안정적으로 출력되는 것을 확인 할 수 있으며, 이에 따라 주파수의 맥동도 감소하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 전기추진선박에 리튬-이온 배터리를 이용한 에너지 저장시스템을 투입함으로써 선박 계통에서 발생되는 전력품질 저하 문제를 해결하였다.

전기추진선박 및 리튬-이온 배터리 에너지 저장시스템은 MATLAB/Simulink를 이용하여 시뮬레이션 모델을 개발하였고, 개발된 시뮬레이션 모델에 발전기의 상태 변동 시나리오를 적용하였다. 적용된 시나리오에 따른 시뮬레이션 결과를 통하여 전력품질의 저하 문제를 해결하고 개선 효과를 확인하였다.

본 논문은 BK21플러스, IT기반 융합산업 창의인력양성사업단에 의하여 지원되었음.

References

[1] J. G. Lim, H. J. Jeon, T. I. Kim, E. K. Lee, and J. H. Kim, "Future ship and advent of its business model," *Korea Marinetime Institute*, 2011

[2] S. Y. Kim, Y. D. Youn, and S. K. Sul, "Suppression of the thrust loss for the maximum thrust operation in the electric propulsion ship," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 44, No. 3, pp. 238-247, Jun. 2007.

[3] J. T. Park, K. J. Lee, S. Y. Jang, K. J. Lee, J. K. Kim, and S. J. Cho, "A trend of the technical development of electric propulsion systems for ships," *The Korean Institute of Electrical Engineers, Summer conference*, pp. 958-960, Jul. 2000.

[4] S. N. Ryu, C. H. Jeon, and K. H. Chung, "Next generation naval electric propulsion system technology," *The Korean Society of Marine Engineering, Joint Conference*, pp. 257-258, Jun. 2009.

[5] C. Holsonback, T. Webb, T. Kiehne, C. C. Seepersad, "System-level modeling and optimal design of an all-electric ship energy storage module," *ASNE Electric Machine Technology Symposium,* Philadelphia, PA, 2006, May.

[6] M. Hadarts and M. Julander, "Battery-supercapacitor energy storage," *Master thesis of chalmers university of technology*, Jun. 2008.

[7] R. E. Hebner, J. D. Herbst, and A. L. Gattozzi, "Pulsed power loads support and efficiency improvement on navy ships," *Naval Engineers Journal*, Vol. 122, No. 4, pp. 23-32, Dec. 2010.

[8] D. Czarkowski, E. Szmit, J. Mindykowski, and M. Szweda, "Power quality in isolated systems requirements and examples analysis," *5th International Conference Workshop, Compatibility in Power Electronics(CPE)*, 2007.

[9] H. K. Ku, K. K. Kwak, and J. M. Kim, "A study integrated-power-system simulation model of all-electric ship," *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 20, No. 1, pp. 45-50, Feb. 2015.

[10] M. Swierczynski, D. I. Stroe, A. I. Stan, R. Teodorescu, R. Laerke, and P. C. Kjaer, "Field tests experience from 1.6MW/400kWh li-ion battery energy storage system providing primary frequency regulation service," *IEEE PES ISGT Europe*, pp. 1-5, Oct. 2014.

[11] S. J. Lee, "Understanding governor droop of turbine-generator through graph and proportional expression," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 27, No. 5, pp. 33-38, May 2013.

[12] R. Sadoun, N. Rizoun, P. Bartholomius, B. Barbedette, and P. Le Moigne, "Optimal sizing of hybrid supply for electric vehicle using li-ion battery and supercapacitor," *Vehicle Power and Propulsion Conference(VPPC)*, pp. 1-8, Sep. 2011.

[13] M. S. Park and Y. H. Chun, "The study on appropriate energy storage capacity estimation considering wind generation volatility in ullengdo," *The Korean Institute of Electrical Engineers*, Summer Conference, pp. 150-151, Jul. 2012.

구현근(具賢根)

1984년 12월 11일생. 2009년 부산대 전자전기통신 공학부 졸업. 2009년~현재 동 대학원 석·박사 통합과정.

서혜림(徐慧琳)

1989년 11월 11일생. 2013년 부산대 전자전기공학부 졸업. 2015년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).

김장목(金長睦)

1961년 8월 6일생. 1988년 부산대 전기공학과 졸업. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1997년~2001년 한전 전력연구원 선임연구원. 2007년 Florida State University 방문교수. 2001년 3월~현재 부산대 전기공학과 교수. LG전자 스마트 제어 센터장.