Regular paper | Journal of the KIECS. pp. 1337-1344, vol. 10, no. 12, Dec. 31 2015, t. 68, pISSN 1975-8170 | eISSN 2288-2189
http://dx.doi.org/10.13067/JKIECS.2015.10.12.1337

DC μ-Grid 기반 배터리 충/방전 시스템의 에너지 효율에 관한 연구

여성대* · 김종운* · 이경량* · 한철규** · 류태형** · 김경화*** · 김성권****

A Study on Energy Efficiency of Battery Charge/Discharge System based on DC μ-Grid

Sung-Dae Yeo* · Jong-Un Kim* · Kyung-Ryang Lee* · Cheol-Kyu Han** · Tae-Hyoung Ryu** · Kyeong-Hwa Kim*** · Seong-Kweon Kim****

요 약

Li-ion 배터리를 생산하는데 있어서 충/방전을 통한 formation 과정이 필요하다. 이 과정에서 방전기의 부하 저항을 통해 방전하게 되는데 이때 에너지 손실이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 DC μ-Grid 기반의 충/방전 시스템에서 배터리를 효율적으로 운영하는 방안에 대해 연구하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과, DC μ-Grid 기반의 충/방전 시스템에서 충전 배터리 set 3개 기준 대비 방전 배터리 set의 수가 133%를 초과하게 되면 망 전압이 안정화되는 과정에서 발생하는 전압 fluctuation 폭을 초과하기 때문에 시스템에 치명적인 손상을 야기한다. 따라서 충전 배터리 set 3개 기준 대비 방전 배터리 set의 수를 133%까지 운영할 수 있으며 획기적인 에너지 절감 효과를 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

Formation process through charge/discharge operation is needed in manufacturing Li-ion battery. In the process battery is discharged by a load resistor of discharger. Here, energy losses happen. Therefore, in this paper, the efficient energy operation of battery is studied in the charge/discharge system based on DC μ-Grid. A result of computer simulation shows that if in the charge/discharge system based on DC μ-Grid, the number of discharge batteries in comparison with three charge battery sets exceeds 133%, voltage fluctuation that occurs while the grid voltage stabilizes, which makes the system fatal. Therefore, it was demonstrated that a remarkable energy saving effect could be achieved when the number of discharge battery set is maintained to be 133% in comparison with three charge battery sets.

키워드

Charge/Discharge System, DC Micro Grid, Low Power Operation, Energy Efficiency, Li-Ion Battery
충전 방전 시스템, DC μ-Grid, 저전력 동작, 에너지 효율, 리튬이온 배터리

* 서울과학기술대학교 NID융합기술대학원(ysd1009@seoultech.ac.kr, trywooni@seoultech.ac.kr, corenc@seoultech.ac.kr)
** LG CNS(ckhan@lgcns.com, thryu@lgcns.com)
*** 서울과학기술대학교 전기정보공학과(k2h1@seoultech.ac.kr)
****교신저자 : 서울과학기술대학교 NID융합기술대학원
· 접 수 일 : 2015. 11. 03
· 수정완료일 : 2015. 12. 13
· 게재확정일 : 2015. 12. 24
· Received : Nov 03, 2015, Revised : Dec 13, 2015, Accepted : Dec 24, 2015
· Corresponding Author : Seong-Kweon Kim
Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science & Technology
Email : kim12632@seoultech.ac.kr

Ⅰ. 서 론

현대 사회에서 환경문제는 매우 심각한 문제로써 중요한 관심사로 대두되어 왔다. 이중에서 대기오염을 살펴보면 주요 원인은 자동차 배기가스이며 이에 대한 해법으로 전기자동차의 사용이 제시되었다. 이러한 환경문제의 해법인 전기자동차에서 Li-ion 배터리는 필수적으로 사용된다. Li-ion 배터리는 단계적인 절차에 의해 생산되는데 하나의 단위 배터리를 cell 이라고 정의한다. 생산 직후 각각의 배터리 cell들은 일정하지 않은 전압을 가진다. 따라서 이들을 동일한 전압으로 일치시키기 위하여 반복적인 충/방전 동작을 수행함으로써 배터리의 전압을 일치시키는 formation 과정이 필요하다. 이 과정에서 방전을 유도함으로써 부하 저항을 통해 열에너지로 소비되는 에너지 손실이 발생한다[1-8].

따라서 본 논문에서는 부하 저항에 의해 낭비되었던 전류를 충전 시스템에 재활용하여 시스템의 에너지 효율적 활용을 기함으로써 효율적인 충/방전 운영을 위한 연구를 진행한다.

Ⅱ. DC µ-Grid를 이용한 충/방전 시스템

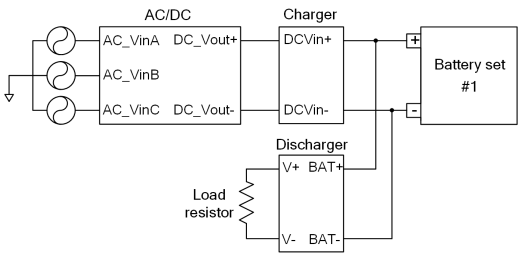

그림 1. 일반적인 배터리 충/방전 시스템 블록도

Fig. 1 The block diagram for general charge/discharge system

그림 1은 하나의 배터리 set에서 충/방전에 사용되는 일반적인 시스템 블록도를 나타낸다. 하나의 배터리 set은 다수의 배터리 cell들로 이루어져있다. 충전 동작 시, Charger를 통해 배터리 set에 전압 및 전류를 인가하여 에너지를 충전한다. 그리고 방전 모드에 진입할 경우, Discharger가 동작하면서 부하 저항을 통해 열로써 에너지를 소비하게 된다. 이 에너지 손실을 최소화하기 위하여 DC µ-Grid의 적용을 검토하였다.

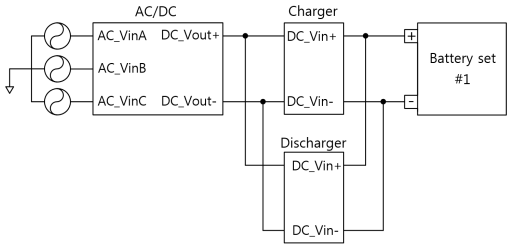

그림 2. DC µ-Grid 기반 충/방전 단위 시스템 블록도

Fig. 2 The block diagram for the charge/discharge unit system based on DC µ-Grid

그림 2는 DC µ-Grid를 기반으로 하는 배터리 set 충/방전 단위 시스템을 나타낸다. DC µ-Grid는 AC µ-Grid의 단점인 동기화, 안정도, 무효전력소모 등을 해결할 수 있다. 또한 각 전원별로 발생되는 전력을 교류로 변환하지 않아 시스템의 비용이 낮고, 보호나 감시도 용이한 장점을 갖는다[9-10].

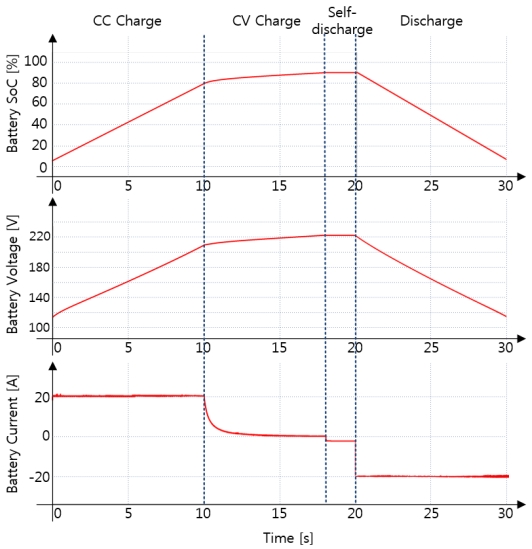

그림 3. DC µ-Grid 기반 충/방전 시스템에서의 1개 배터리 set SoC, 전압, 전류 파형

Fig. 3 The waveform of SoC, voltage, current on unit battery set from the charge/discharge system based on DC µ-Grid

그림 3은 DC μ-Grid를 적용한 충/방전 시스템 1개 배터리 set의 시뮬레이션 결과를 나타내었으며 배터리 set에 대한 충/방전 실험은 생산과정에서 적용되는 시스템의 전압 및 전류조건을 그대로 반영하였다. 각각의 시뮬레이션 결과 파형은 SoC(State of Charge), 전압, 전류를 나타낸다. 배터리 set의 SoC 및 전압, 전류의 정상적인 입/출력 동작 여부를 확인하기 위하여 10%의 SoC를 가지는 배터리 set을 구성하고 일정 시간동안 시스템을 동작시키는 시뮬레이션을 진행하였다.

SoC 10~80%까지인 0~10초 동안 CC(: Constant Current) 동작이 수행되면서 20A의 전류가 배터리 set으로 흐르게 된다. 이 때, 배터리 set의 전압은 약 210V까지 상승하게 된다. SoC 80~90%까지인 10~18초 동안 CV(: Constant Voltage) 동작이 수행되면서 배터리 set으로 흐르는 전류가 0A로 내려가게 되며 배터리 set의 전압은 약 220V까지 상승하게 된다. 이 후, 2초간 배터리 set에서는 self-discharge 동작을 수행한다. 방전모드에서는 방전명령 후, 배터리 set에서 20A의 전류가 방전하게 된다.

III. 충/방전 시스템에 대한 운영 schedule

3.1 SoC 조건에 따른 충/방전 운영 schedule

초기 설정된 SoC의 상태에 따라 충/방전 시스템은 배터리의 전류를 제어하게 된다. 배터리의 초기 SoC가 0~80%의 조건에서 충전기는 배터리로 20A의 전류를 흐르게 하여 CC충전 동작을 수행한다. 그리고 초기 SoC가 80~90%의 조건에서 충전기는 배터리로 0A의 전류를 흐르게 하여 CV충전 동작을 수행한다. 또한 초기 90%의 SoC에서는 self-discharge를 수행하게 되고 초기 90~100%의 SoC에서는 20A의 전류를 방전하게 된다.

3.2 충전 및 방전에 대한 효율적 운영 schedule

충전 및 방전에 대한 운영에 있어서 첫 번째 실험으로 충전동작과 방전동작의 동시 운영에 대한 전력을 비교하는 실험을 진행한다. 한 개의 배터리 set이 충전 동작을 수행하고 있는 동시에 방전 동작을 수행하는 배터리 set 2개를 추가함에 따라 방전되는 에너지가 회생되는 지점인 DC μ-Grid 망에서의 전력 변화를 관측한다. 다음으로 3개의 충전하는 배터리 set을 기준으로 하여 충전 배터리 set과 방전 배터리 set 수의 비율에 따른 소비전력 절감 효과를 확인하기 위한 실험을 진행하여 효율적 에너지 사용에 대한 최적의 비율을 도출한다.

3.3 단일 충전동작과 방전동작을 함께 운영할 경우 소비전력 변화 실험

충/방전 시스템이 단일 충전 동작만 수행할 경우의 전류는 DC μ-Grid 망에서 4.9A가 계산되었다. 이때 정상상태일 때 전압은 600V이기 때문에 소비전력은 2.9kW가 계산된다. 여기에서 방전하는 배터리 set 2개를 추가하였을 경우 소비전력 변화에 대한 실험을 진행하도록 한다.

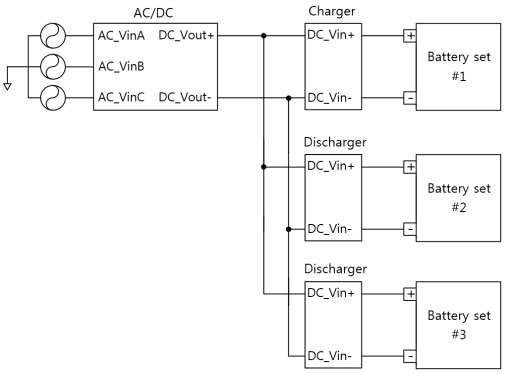

그림 4. 충전하는 배터리 set 1개와 방전하는 배터리 set 2개를 운영할 경우의 시스템 블록도

Fig. 4 The system block diagram in operating 1-charge/2-discharge battery set

그림 4는 DC μ-Grid 기반의 충/방전 시스템을 이용하여 1개의 배터리 set을 충전하고 2개의 배터리 set을 방전하는 경우의 시스템 블록도를 나타낸다.

그림 5는 초기 충전하는 배터리 set 1개를 운영하면서 0.5초부터 2개의 방전 배터리 set을 추가운영 하였을 때 DC μ-Grid 망에서의 전력을 확인한 시뮬레이션 결과이다.

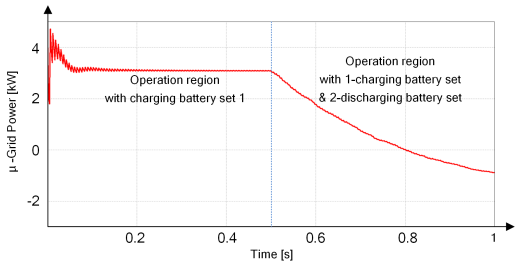

그림 5. 충전 동작 중 방전 배터리 set 운영에 대한 전력 변화

Fig. 5 Power monitoring about operation of discharge battery set during the charge

1개의 배터리 set을 충전할 경우 전력은 2.9kW이며 0.5초 이후 방전 배터리 set 2개를 추가 운영할 경우 계통으로 전력이 회수되기 때문에 소비전력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 시간이 지날수록 전력이 계통으로 공급됨을 시뮬레이션 결과로부터 확인하였다. 이때 충전 배터리 set와 방전 배터리 set가 동시에 운영되는 경우가 발생할 수 있다.

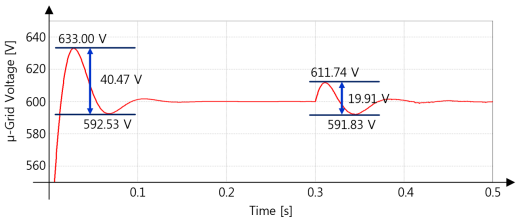

그림 6. 충전 1 / 방전 2개 운영 시, DC μ-Grid 망의 전압

Fig. 6 Voltage of DC μ-Grid network in operating 1-charge/2-discharge battery set

그림 6은 0.3초에서 충전하는 배터리 set 1개와 방전하는 배터리 set 2개를 동시에 운영할 경우 DC μ-Grid 망에서의 전압을 나타낸다. 좌측의 전압 변화는 초기 망 전압이 안정화되면서 발생하는 fluctuation이며 우측의 전압 변화는 충/방전 동작에 의해 발생하는 fluctuation이다.

충/방전 동작 시 발생하는 전압 fluctuation 폭이 DC μ-Grid 망의 전압이 안정화되는 과정에서 발생하는 전압 fluctuation 폭을 초과하면 충/방전 시스템의 안정적인 동작에 문제가 발생하며, 시스템에 치명적인 손상을 야기한다.

Ⅳ. 충/방전 배터리 set의 비율에 따른 효율적 운영 방안

본 절에서는 충전 동작하는 배터리 set과 방전 동작하는 배터리 set의 비율에 따른 소비전력 변화실험을 진행하도록 한다.

표 1은 충전하는 배터리 set 3개를 기준으로 하는 방전 배터리 set 운영 비율에 따른 전력 절감 효과를 비교하기 위한 시뮬레이션 조건을 나타낸다.

표 1. 방전 배터리 set 운영 시뮬레이션 조건

Table 1. The simulation condition in operating the discharge battery set

Experiment No.	Battery Composition	Dischar. battery ratio
Experiment 1	Char. 3 / Dischar. 0	0 %
Experiment 2	Char. 3 / Dischar. 1	33 %
Experiment 3	Char. 3 / Dischar. 2	66 %
Experiment 4	Char. 3 / Dischar. 3	100 %
Experiment 5	Char. 3 / Dischar. 4	133 %
Experiment 6	Char. 3 / Dischar. 5	166 %

충전하는 배터리 set 3개를 기준으로 하여 Experiment 1은 방전 운영하는 배터리 set을 0% 가동한 경우이고, Experiment 2는 33%, Experiment 3은 66%, Experiment 4는 100%, Experiment 5는 133%를 가동한 경우이다. 마지막으로 Experiment 6은 방전 운영하는 배터리 set을 166% 가동한 경우를 나타낸다.

그림 7은 방전 배터리 set 추가 운영에 따른 DC μ-Grid 망 소비전력 비교 실험을 위한 블록도를 나타낸다. 충전하는 배터리 set 3개를 기준으로 하여 방전 운영하는 배터리 set의 운영 비율을 높여가면서 소비전력을 측정하도록 한다.

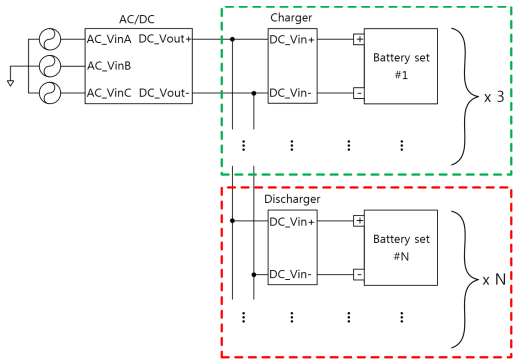

그림 7. 3개의 충전 배터리 set을 기준으로 하는 방전 배터리 set 추가 운영 시스템 블록도

Fig. 7 The system block diagram in operating the additional discharge battery set during operating 3-charge battery set

그림 8은 3개의 배터리 set가 충전 동작을 수행할 때를 기준으로 하여 방전 배터리 set를 추가시키면서 DC μ-Grid 망 전력을 측정한 시뮬레이션 결과를 나타내는 그래프이다.

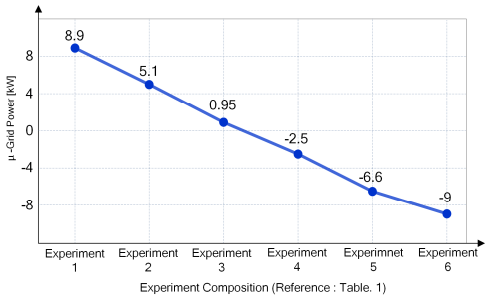

그림 8. 방전 배터리 set 운영에 따른 전력 비교

Fig. 8 Power comparison as operating the discharge battery set

DC μ-Grid 기반의 충/방전 시스템에서 충전 배터리 set 3개를 기준으로 하여 방전 배터리가 없을 경우, 소비전력은 8.9kW이며 방전하는 배터리 set가 충전 배터리 set 대비 33%인 경우의 소비전력은 5.1kW, 66%일 경우의 소비전력은 0.95 kW가 계산되었다. 방전 배터리 set의 비율이 66% 까지는 DC μ-Grid 망에서 에너지를 소비하였다. 하지만 방전 배터리 set의 비율이 충전 배터리 set 대비 100%일 경우에는 DC μ-Grid 망으로 전력을 2.5kW 공급하는 동작을 수행하며 133%일 경우에는 6.6kW, 166%일 경우에는 9kW를 DC μ-Grid 망으로 전력을 공급하였다.

시뮬레이션 결과로부터 추가적인 방전 배터리 set의 동작은 계통으로의 추가적인 전력 회수가 가능한 것으로 확인하였다. 기존의 충/방전 시스템에서 방전 운영 시, 부하 저항에 의해 낭비되었던 전류를 충전 시스템에 재활용함으로써 시스템의 저전력 동작을 유도하게 된다. 하지만 충전 및 방전의 갑작스러운 동작은 DC μ-Grid 망에서의 전압 fluctuation이 커지게 된다.

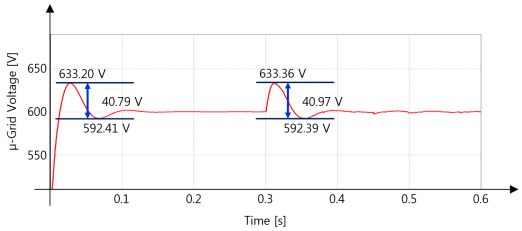

그림 9. 충전-3 / 방전-5 운영 시(실험 6 조건), DC μ-Grid 망에서의 전압 fluctuation

Fig. 9 Voltage fluctuation from DC μ-Grid network in operating 3-charge/5-discharge battery set (a condition of experiment 6)

그림 9는 충전하는 배터리 set 3개를 기준으로 하여 방전 배터리 set의 수를 166%로 운영할 경우, DC μ-Grid 망에서의 전압 fluctuation을 나타낸다. 방전 배터리의 비율이 133%를 초과할 시, DC μ-Grid 망에서의 전압 fluctuation 폭이 커져서 시스템에 영향을 끼칠 수 있기 때문에 이에 대한 별도의 대책이 필요하게 된다. 따라서 DC μ-Grid 기반의 충/방전 시스템에서 충전 배터리 set 3개를 기준으로 하여 방전 배터리 set의 수를 133%로 운영할 경우, 방전에서 버리는 에너지를 재활용하게 되므로 획기적인 에너지 절감 효과를 확인할 수 있게 된다.

Ⅴ. 결 론

Li-ion 배터리의 생산 과정 중 formation 과정에서, 방전 시 부하 저항에 의해 열에너지로 소비되는 에너

지 손실 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 DC μ-Grid를 적용한 충/방전 운영 방안을 검토하였으며 충전 배터리 set의 수에 따른 방전 배터리 set의 운영으로 효율적 에너지 절감 방안에 대한 연구를 진행하였다. 시뮬레이션 결과로부터 방전 배터리 set의 비중이 높을수록 더욱 낮은 전력이 소비됨을 확인하였으며 방전 배터리 set의 비율이 133%를 초과하게 되면 전압 fluctuation이 과다하게 발생하게 되었다. 충전 배터리 set 대비 방전 배터리 set의 비율이 133%에서 획기적인 에너지 절감 효과가 있었음을 확인하였다.

본 연구결과는 DC μ-Grid 기반의 Li-ion 배터리 충/방전 시스템을 운영할 경우, 에너지 효율 향상에 유용할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] Y. Jung, “A Study on Generalized Output Capacitor Ripple Current Equation of Interleaved Boost Converter,” *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences,* vol. 7, no. 6, 2012, pp. 1429-1435.

[2] S. Kim, K. Lee, S. Yeo, S. Hong, and Y. Park, “Implementation of Successive Approximate Register typed A/D Converter for a Monitored Battery Voltage Conversion,” *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences,* vol. 6, no. 2, 2011, pp. 256-261.

[3] Y. Ko, “A Study on the Application of Energy Storage System (ESS) to the Power System,” *Conf. of Korea Institute of Electronic Communication Sciences,* Cheonan, Korea, Nov. 2014, pp. 233-236.

[4] J. Nam, J. Choi, S. Kim, H. Hwang, and J. Kim, “A Study on SOC Algorithm and Design of Battery ECU for Hybrid Electric Vehicle,” *The Trans. of the Korea Institute of Power Electronics,* vol. 9, no. 4, 2004, pp. 319-325.

[5] M. Cho, D. Nah, S. Kil, and S. Kim, “Li-Ion Traction Batteries for All-Electric Vehicle,” *J. of Energy Engineering,* vol. 20, no. 2, 2011, pp. 109-122.

[6] S. You, J. Jung, K. Cheong, and J. Go, “Numerical Simulation of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles,” *The Trans. of the Korean Society of Mechanical Engineers - B,* vol. 35, no. 6, 2011, pp. 649-656.

[7] Z. Zhang, M. Zhong, F. Liu, F. Zhong, and F. Wu, “Heat dissipation from a Ni-MH battery during charge and discharge with a secondary electrode reaction,” *J. of Power Sources,* vol. 70, issue 2, 1998, pp. 276-280.

[8] H. Vaidyanathan, W. H. Kelly, and G. Rao, “Heat dissipation in a lithium ion cell,” *J. of Power Sources,* vol. 93, issue 1-2, 2001, pp. 112-122.

[9] B. Han and J. Lee, “Operation Analysis Simulation Model of DC Micro-grid,” *The Trans. of the Korean Institute of Power Electronics,* vol. 15, no. 2, 2010, pp. 36-42.

[10] J. Lee, G. Kwon, B. Han, and H. Cha, "Operational Characteristic Analysis of DC Micro-grid with Detail Model of Distributed Generation," *The Trans. of The Korean Institute of Electrical Engineers,* vol. 58, no. 11, 2009, pp. 2175-2184.

저자 소개

여성대(Sung-Dae Yeo)

2011년 목포해양대학교 해양전자공학과 졸업 (공학사)
2013년 서울과학기술대학교 NID융합기술대학원 졸업(공학석사)
2013년~현재 서울과학기술대학교 NID융합기술대학원 박사과정

※ 관심분야 : Renewable Energy, 전류모드 회로 설계, 신호처리, 시스템 LSI 설계

김종운(Jong-Un Kim)

2014년 서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과 졸업(공학사)
2014년~현재 서울과학기술대학교 NID융합기술대학원 석사과정
※ 관심분야 : 전류모드 회로 설계, 저전력 회로설계, Mixed 회로 설계, 음향신호처리

이경량(Kyung-Ryang Lee)

2006년 명지대학교 컴퓨터공학과
2009~2011년 서울과학기술대학교 NID융합기술대학원 석사
2011년~현재 서울과학기술대학교 NID융합기술대학원 박사과정
※ 관심분야 : VLSI, SoC, POSIX

한철규(Cheol-Kyu Han)

1999년 한양대학교 산업공학과 졸업(공학사)
2014년 서울과학기술대학교 NID융합기술대학원 졸업(공학석사)
2000년~현재 LG CNS 스마트그린솔루션연구소 책임연구원
2015년~현재 IEC TC120 국제전문위원
※ 관심분야 : ESS, 마이크로그리드, 신재생 에너지, 융합보안, 개발방법론

류태형(Tae-Hyoung Ryu)

1987년 성균관대학교 물리학과 졸업(이학사)
1997년 KAIST 자동화 및 설계공학과 졸업(공학석사)
1994년~현재 LG CNS 하이테크사업본부 전문위원
※ 관심분야 : ESS, Microgrid, 신재생 에너지

김경화(Kyeong-Hwa Kim)

1998년 KAIST 전기 및 전자공학과 공학박사
1998~2000년 삼성전자 선임연구원
2000~2002년 KAIST 연구 교수
2002~현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수
※ 관심분야 : AC Machine Drive, Inverter, Renewable Energy, Robust Control

김성권(Seong-Kweon Kim)

2002년 일본TOHOKU대학 대학원 전자공학과(공학박사)
2002~2004년 일본TOHOKU대학 전기통신연구소 Assistant Professor & Research Fellow
2004~2009년 목포해양대학교 해양전자통신공학부 조교수
2009년~현재 서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과 부교수
※ 관심분야 : 무선통신용 아날로그 LSI 설계, 멀티미디어통신, 음향공학