

대학 캠퍼스 내 에너지저장장치 연계에 따른 잉여 수소에너지 생산에 관한 연구

A Study on the Production of Hydrogen Energy According to Installed Capacity of Energy Storage System on Campus

최 봉 기* · 전 중 현* · 김 성 열†
(Bong-Gi Choi · Jong-Hyun Jun · Sung-Yul Kim)

Abstract - Depending on how the energy storage system(ESS) is used in a system that can construct a microgrid by using an independent power source such as campus, surplus power can be generated that can not be charged to the ESS. For example, assuming that heat is supplied by a fuel cell in the case of a system in which thermal self-sustaining is prioritized, the fuel cell capacity required differs depending on the heat load. The amount of surplus power that can not be stored in the ESS will appear differently depending on the load operation of the fuel cell for each cycle. This power is hydrogenated through a water electrolytic device to present the amount of hydrogen energy that can be operated for each cycle. Therefore, this paper propose the possibility of utilizing University campus as a hydrogen station.

Key Words : Energy storage system, Fuel cell, Microgrid

1. 서 론

수소는 전 세계적 관점에서 차세대 에너지원으로 각광받고 있다. 그 이유 중 하나는 수소가 지구를 이루는 구성요소에서 가장 높은 비율을 차지하고 있어 그만큼 자원의 제약이 없다는 것이다. 화석연료가 만들어지는 속도에 비해 10만 배 이상 빠른 속도로 고갈되고 있다는 연구에 따르면 수소 고갈에 대한 걱정은 무의미하다. 수소가 주목받은 또 다른 이유는 수소에너지의 특성 상 이를 연료로 사용했을 때 발생하는 연소생성물이 물 밖에 없다는 것이다. 이는 화석연료에 비해 공해물질 배출로 인한 환경오염 걱정으로부터 완전히 벗어날 수 있다는 것을 의미한다. 또 연료전지를 통해 우리가 널리 사용하는 전기에너지로 쉽게 전환이 가능하다는 점과 수소 운반 시에도 전기에너지보다 운송 손실이 1/10 정도로 줄일 수 있다는 점이다. 이 특성은 수소를 액화시켜 수송이 가능하고 다양한 형태로 저장할 수 있다는 특성과 결합하여 수소를 에너지 매체라고 부르기도 한다.

한 편 독립적인 발전원을 갖춘 대학교 캠퍼스와 같은 그리드 내에서 에너지저장장치를 운영하는 방식에 따라 잉여 전력생산량이 발생하는 경우가 있다. 일반적인 경우에는 잉여전력을 다른 부하에 소비를 시키지만 다른 경우에는 전 해조를 거쳐 수소의 형태로 저장할 수도 있다. 이렇게 저장

된 수소는 대학교 캠퍼스를 기반으로 수소스테이션을 형성하여 인근 소비자와 효율적이고 경제적인 에너지 교류를 가능하게 할 수 있다.

본 논문에서는 높은 에너지 밀도를 가진 수소의 특성을 기반으로 대학교 캠퍼스 내 발전설비에 따른 생산 가능한 수소에너지량을 분석함으로써 지역사회 수소인프라 구축에 기여할 수 있는 가능성을 제시하고자 한다[1, 2].

2. 발전원 구성 및 연료전지 용량설정

본 논문에서는 발전시스템과 에너지저장장치를 이용하여 대학교 캠퍼스와 같은 교육용 수용가에 열에너지 및 전력을 공급하는 방식을 모의한다. 설치지역 특성상 열 공급이 가능하고 소음이 없는 발전원을 고려하여 연료전지를 발전원으로 선정하였다. 연료전지는 외부영향에 의한 생산량의 변화가 없다는 장점을 가지며, 24시간 내내 안정적인 발전이 가능하기 때문에 비교적 일정한 부하량을 가지는 캠퍼스 같은 계통에서 운영하기 기 적합하다[3].

2.1 열부하 자립을 위한 연료전지 용량설정

캠퍼스 내 건물의 하루 평균 열 부하량을 기준으로 연료전지 용량을 설정한다. 연료전지는 부하 추종운전을 할 수 있기 때문에 식(2)와 같이 부하량이 가장 많은 계수를 기준으로 용량을 설정한다. 전력 1kW가 열량으로 860kcal임을 감안하여 열부하량을 전력으로 환산하여 계산한다[4].

$$i_{pk} = \left\{ i \mid \max \left(\int H_{L,i}(t) dt \mid_{V_i} \right) \right\} \quad (1)$$

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Energy Engineering, Keimyung University, Korea
E-mail: energy@kmu.ac.kr

* Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Keimyung University, Korea

접수일자 : 2018년 5월 3일

최종완료 : 2018년 5월 29일

$$E_{FC} = \frac{\int (H_{L,i_{pk}}(t)/(860 \cdot 24)) dt}{\eta_h} \quad (2)$$

여기서,

- i_{pk} : 열부하량이 최대가 되는 계시
- t : 시간[Hour]
- E_{FC} : 연료전지 용량[kW]
- $H_{L,i}$: 계시별 건물에서 1시간 동안 사용하는 열량[kcal]
- i : 계시(봄학기 1, 여름방학 2, 가을학기 3, 겨울방학 4)
- η_h : 연료전지 열효율[%]

열 부하량 보다 열 생산량이 많은 시간대에 발생하는 잉여 열은 축열조에 저장하여 열 생산량보다 열 부하량이 많은 시간대에 공급하여 상시 열자립이 가능하도록 한다.

2.2 계시별 부하운전 비율 선정

부하량이 가장 많은 계시를 기준으로 연료전지 용량을 설정 하였기 때문에, 상대적으로 부하량이 적은 시간에는 식 (3)과 같이 선정된 부하운전비율로 운전한다[5].

$$G_{P,i} = \frac{\int (H_{L,i}(t)) dt}{\int H_{L,i_{pk}}(t) dt} \cdot 100 \quad (3)$$

여기서,

- $G_{P,i}$: 계시별 부하운전 비율[%]

이때 실시간으로 연료전지의 부하운전비율을 조정하는 것은 불가능하기 때문에 매 계시마다 한 번 씩 부하운전비율을 조정한다.

3. 에너지저장장치 운영 및 용량선정

3.1 에너지저장장치의 충·방전 시스템

$$E_{FC}(t_{non-pk}) \cdot \eta_e - P_L(t_{non-pk}) > 0, \quad \text{에너지저장장치충전}$$

$$E_{FC}(t_{pk}) \cdot \eta_e - P_L(t_{pk}) < 0, \quad \text{에너지저장장치방전} \quad (4)$$

여기서,

- P_L : 기숙사에서 1시간 동안 사용하는 전력량[kWh]
- η_e : 연료전지 전기효율[%]

본 논문에서는 각 건물의 에너지 자립뿐만 아니라 캠퍼스 전체의 요금적용전력을 저감하는 방식을 모의하였다. 따라서, 식(4)와 같이 비 최대수요구간에서 연료전지의 전력 생산량이 기숙사 부하량 보다 클 때 에너지저장장치를 충전하고 최대수요구간에서는 연료전지의 전력 생산량이 기숙사 부하량보다 작을 때 에너지저장장치를 방전한다[6, 7].

3.2 연료전지 용량에 따른 에너지저장장치 용량 선정

계시별로 다른 비율로 부하운전을 함으로써 전력 생산량 또한 계시별로 상이하다. 이에 따라 발생하는 잉여 전력량에 따른 에너지 저장장치용량은 식(7)과 같이 구할 수 있다.

$$E_{ESS}^{\min} = \min(\int_{\forall t_{non-pk}} (P_{FC}(t) - P_L(t)) dt) \quad (5)$$

$$E_{ESS}^{\max} = \max(\int_{\forall t_{non-pk}} (P_{FC}(t) - P_L(t)) dt) \quad (6)$$

$$E_{ESS}^{\min} \leq E_{ESS} \leq E_{ESS}^{\max} = \int_{\forall t_{non-pk}} (P_{FC}(t) - P_L(t)) dt \quad (7)$$

여기서,

- E_{ESS} : 에너지 저장장치 용량[kWh]
- P_{FC} : 연료전지를 통해 1시간 동안 생산된 전력량[kWh]

부하량이 매일 같지 않기 때문에 식(7)을 통해 산정한 에너지 저장장치 용량 또한 매일 다르다. 따라서 에너지 저장장치의 적정용량을 설정하는 기준이 필요하다. 본 논문에서 선정할 기준은 에너지 저장장치 구축비용을 고려한 최소 용량, 최대 잉여생산량을 저장할 수 있는 최대 용량, 그리고 에너지 저장장치의 구축비용과 잉여생산량의 최대 빈도수를 고려한 용량을 설정하였다[8].

4. 에너지저장장치 용량에 따른 초과 전력 생산량 및 수소에너지 생산량

매일 상이한 기숙사 전기 부하량에 따라서 선정된 에너지 저장장치 용량을 상회하는 잉여 전력량이 발생하는 경우가 생긴다.

$$P_E = \int_{\forall t_{non-pk}} (P_{FC}(t) - P_L(t)) dt - E_{ESS} \quad (8)$$

여기서,

- P_E : 초과 전력생산량[kWh]

식 (8)과 같이 비 최대수요구간에서 연료전지를 통해 생산된 전력량과 선정된 에너지저장장치 용량의 차를 초과 전력 생산량으로 설정한다. 이때, 선정된 에너지저장장치 의 최소 용량, 최대 용량, 최대빈도 용량에 따라 초과 전력 생산량이 다르다. 그리고 이 전력을 이용하여 수전해 장치를 가동시켜 물을 수소화시킨다.

$$H_E = \frac{P_E}{P_{WE}} \quad (9)$$

여기서,

- H_E : 수소생산량[Nm³]
- P_{WE} : 수전해장치가 1Nm³의 수소를 생산하는데 소모하는 전력량[kWh]

수전해 장치는 수소 1Nm³생산에 약 5.5kWh에서 7kWh의 전력을 사용한다. 식(8)을 통해 산출된 초과 전력 생산량을

사용하여 식 (9)와 같이 계시별 에너지저장장치 용량에 따른 수소화 가능용량을 산정한다[9, 10].

5. 캠퍼스 내 에너지저장장치 용량에 따른 수소에너지 생산 용량 분석에 관한 알고리즘

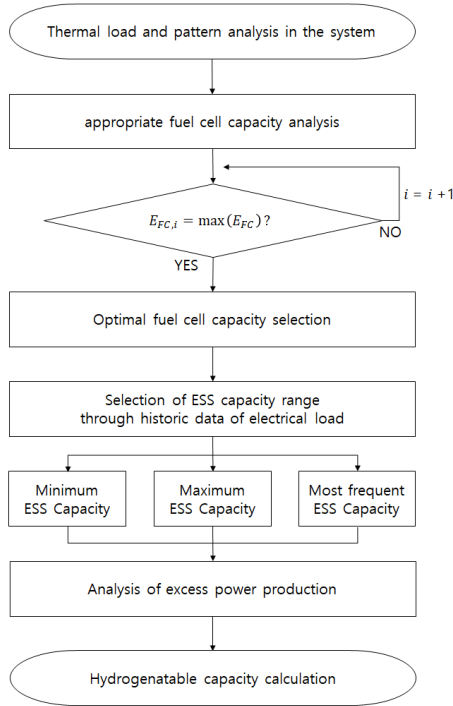


그림 1 에너지저장장치 용량에 따른 수소화 가능용량 산정 알고리즘

Fig. 1 Algorithm for Calculating Hydrogenatable Capacity by Energy Storage System

그림 1은 수소화 가능용량을 산정하는 전체적인 알고리즘이다. 우선 계통 내 열 부하량 및 패턴을 분석하여 부하량이 가장 큰 계시를 기준으로 적정 연료전지 용량을 산정한다. 그리고 전기부하의 historic데이터를 이용하여 그림 1과 같이 세가지 기준으로 에너지저장장치의 용량을 선정한다. 마지막으로 에너지저장장치 용량에 따른 초과전력생산량을 분석하고 이를 통해 수소화 가능용량을 산정한다.

6. 사례연구

본 사례연구에서는 발전용 연료전지와 에너지저장장치, 그리고 수전해 장치를 이용한 소규모그리드를 구현하여, 부하량에 따른 연료전지 용량과 에너지저장장치용량, 잉여전력량에 따른 수소에너지 생산량을 산정한다. 캠퍼스 내 건물 중 비교적 열 부하 사용량이 많은 기숙사동을 기준으로 사례연구를 실시하였으며 연료전지의 열효율 및 전기효율은 각각 49%, 42%,로 설정하였다[11].

A 대학교 기숙사 운영 특성상 방학보다 학기 중 열부하량이 많기 때문에 학기 중 열부하량을 기준으로 100% 열자

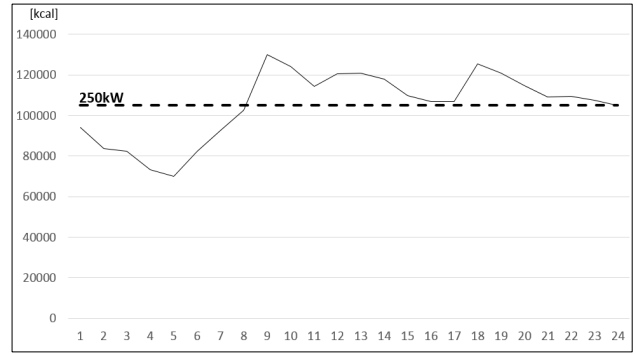


그림 2 A 대학교 기숙사 봄학기 시간대별 열부하량

Fig. 2 A University dormitory spring semester heat load by time

립을 할 수 있는 연료전지 용량을 산정하였다. 연료전지 특성상 부하량에 맞추어 부하운전을 할 수 있기 때문에, 연중 100% 열공급을 하기 위해 학기 중을 기준으로 연료전지 설비 용량을 산정하는 것이 적합하다. 그림 2를 기준으로 본 논문에서는 적정 연료전지 설비용량을 250kW급으로 설정하였다.

$$E_{FC} \cdot \eta_h - H_L(t) > 0 \tag{10}$$

이 때 식 (10)과 같이 A 대학교 기숙사 열 부하량보다 열 생산량이 많은 구간에 발생하는 잉여 열은 축열조에 저장된다. 봄학기 열 부하량을 기준으로 축열조 용량은 생산 160Mcal/h로 설정하였다.

A 대학교 기숙사 AMI 검침기 데이터로 봄 학기의 부하 패턴을 분석하여 그림 3과 같은 잉여전력 생산량 빈도를 도출하였다. 그림 3에서 도출된 최저 잉여전력 생산량과 최대 잉여전력 생산량을 통해 최소, 최대 에너지 저장장치 용량을 산정하였다.

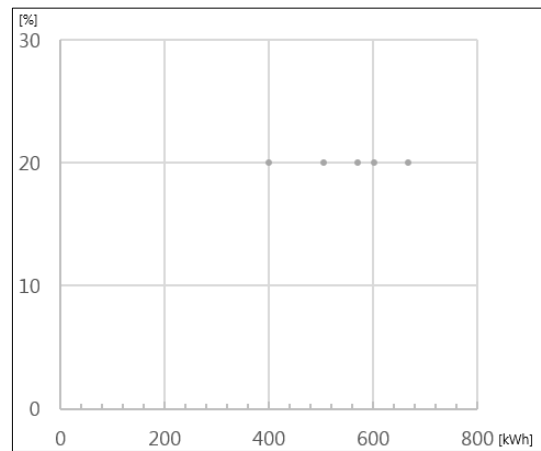


그림 3 봄 학기 부하패턴 분석을 통한 적정 에너지 저장장치 용량

Fig. 3 Appropriate energy storage capacity through spring load pattern analysis

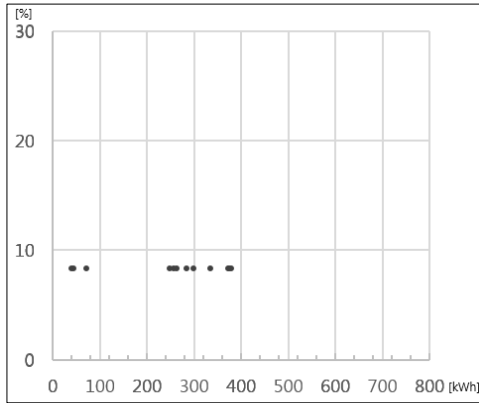


그림 4 겨울방학 부하패턴 분석을 통한 적정 에너지 저장장치 용량

Fig. 4 Appropriate energy storage capacity through analysis of winter vacation load pattern

그리고 겨울방학 때의 최대, 최소에너지저장장치 용량 또한 그림 4와 같은 방법으로 산정하였다. 방학 때의 잉여전력 생산량이 학기 중 잉여전력 생산량에 비해 적었고, 방학 중의 최대 잉여전력 생산량이 학기 중의 최소 잉여전력 생산량에 미치지 못하는 결과를 보였다.

그림 3, 그림 4의 잉여전력 생산량 빈도분포를 기반으로 그림 5와 같이 추가적인 적정 에너지저장장치 용량을 산정하였다. 이때 Round Method를 이용하여 분포되어 있는 용량별 빈도를 일정한 크기단위로 표현하였다.

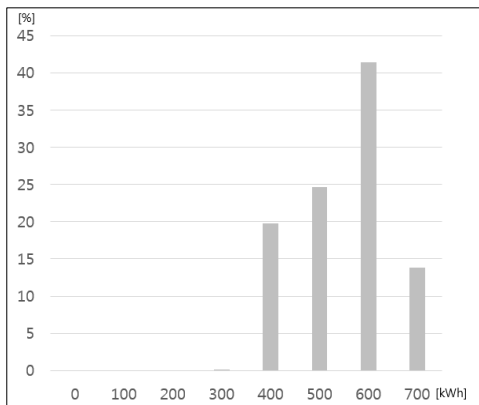


그림 5 Round Method를 이용한 봄 학기 최다빈도 에너지 저장장치 용량

Fig. 5 Most frequent capacity of energy storage system in spring semester using Round method

그림 6 또한 그림 5와 같은 방법으로 용량을 산정하였다. 따라서 봄학과 겨울방학 순서대로 각각 600kWh와 300kWh의 에너지저장장치 용량이 추가로 산정되었다. 단, A대학교 기숙사의 가을학과 여름방학 AMI 검침 데이터의 부재로 각각 봄학과 겨울방학 일일 부하패턴 데이터를 계시별 열부하 비율로 스케일링 하였다.

그림 7은 계시별 부하패턴 분석으로 선정된 에너지저장장

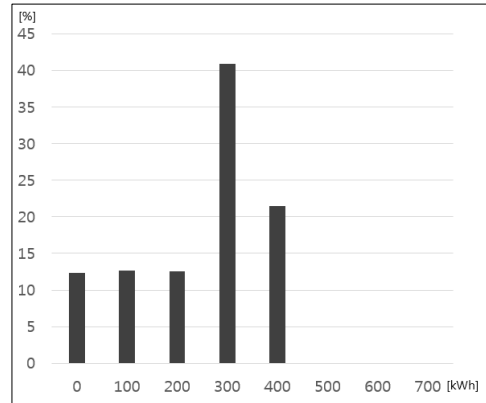


그림 6 Round Method를 이용한 겨울방학 최다빈도 에너지 저장장치 용량

Fig. 6 The most frequent capacity of energy storage system in winter vacation using Round method

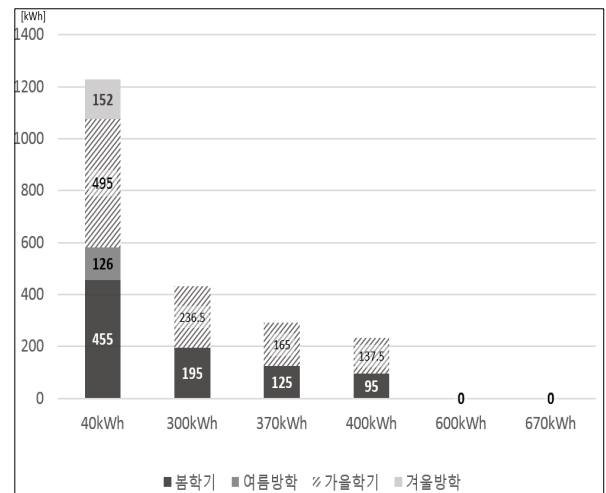


그림 7 에너지저장장치 용량별 연료전지의 초과전력생산량

Fig. 7 Excess power production by fuel cell depending on capacity of energy storage system

지 용량에 따른 계시별 초과 전력 생산량이다. 에너지 저장장치 용량이 40kWh 일 때 봄학기, 여름방학, 가을학기, 겨울방학 순으로 각각 455, 126, 495, 152kWh의 초과전력을 생산한다. 에너지저장장치 용량이 300kWh를 상회하는 구간에는 여름방학과 겨울방학의 초과 전력 생산량이 발생하지 않았고 또 에너지 저장장치 용량이 600kWh를 상회하는 구간에는 모든 계시에서 초과 전력 생산량이 발생하지 않았다.

표 1은 에너지저장장치 용량에 따른 계시별 초과 생산량으로 수전해 장치를 가동하여 수소화 가능한 용량을 나타낸 것이다. 이때 5.5kW의 전력을 소비하여 수소 1Nm³를 만드는 수전해 장치를 기준으로 분석하였다. ESS용량이 40kWh 일 때 봄학기, 가을학기, 여름방학, 겨울방학 순으로 각각 82.7, 90.0, 22.9, 27.6 Nm³의 수소를 생산한다. 또 ESS 용량이 300kWh 이상 일 때 초과 전력 생산량이 상대적으로 적은 방학에는 수소가 생산되지 않고 600kWh 이상 일 때 학기 중에도 수소가 생산되지 않는다.

표 1 계시별 에너지저장장치 용량에 따른 수소화 가능용량 (Nm³)

Table 1 Hydrogenatable capacity according to capacity of energy storage system

ESS capacity	Semester		Vacation	
	Spring	Fall	Summer	Winter
40kWh	82.7	90.0	22.9	27.6
300kWh	35.4	43.0	0	0
370kWh	22.7	30.0	0	0
400kWh	19.0	12.0	0	0
600kWh	0	0	0	0
670kWh	0	0	0	0

7. 결 론

본 논문에서는 마이크로그리드 내 한정되어있는 에너지저장장치 용량과 계시별로 상이한 전력 생산량으로 인해 불가피하게 발생하는 초과전력생산량을 이용하여 수소화 가능용량에 대해 분석하였다. A대학교 기숙사에 설치된 연료전지를 캠퍼스 최대수요전력을 줄이는데 사용하는 관점에서는 ESS용량이 670kWh인 시점이 적절하지만 초과 전력 생산량을 이용하여 수소에너지를 생산하는 관점에서는 ESS용량이 40kWh인 시점이 적절하다. 이렇게 생산된 수소는 대학교 캠퍼스 내에서 전력을 공급받지 못하는 비상 재난 시 연료전지를 가동하는 공급원이 될 수 있고 국가적 차원에서 타 선진국들에 비해 부족한 지역 수소충전 인프라 구축에도 일조할 수 있을 것이라고 판단된다. 또, 사용자의 상황에 맞게 사용자가 원하는 최대수요 저감량과 수소생산량을 고려하여 에너지저장장치 용량을 선택할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1C1A1A02037544).

References

[1] Domestic and Foreign Policy Trends for Preparing Hydrogen Economy Society. Convergence Research Policy Center, 2017.

[2] Possibility of growth and development of hydrogen industry opening renewable energy paradigm, Korea Institute for Industrial Economics & Trade, 2016.

[3] Fatih Cingoz, Ali Elrayyah, Yilmaz Sozer, "Optimized Resource Management for PV - Fuel-Cell-Based Microgrids Using Load Characterizations," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 2, pp. 1723-1735, Apr. 2016.

[4] Jih-Sheng Lai, Michael W. Ellis, "Fuel Cell Power Systems and Applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 11, pp. 2166-2190, Nov. 2017.

[5] Shakti Singh, Mukesh Singh, Subhash Chandra Kaushik, "Optimal power scheduling of renewable energy systems in microgrids using distributed energy storage system," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 9, pp. 1328-1339, Oct. 2016.

[6] Junjie Yang, Juan Liu, Zilu Fang, Weiting Liu, "Electricity scheduling strategy for home energy management system with renewable energy and battery storage: a case study," *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, no. 6, pp. 639-648, Apr. 2018.

[7] Rishi Kant Sharma, Sukumar Mishra, "Dynamic Power Management and Control of a PV PEM Fuel-Cell-Based Standalone ac/dc Microgrid Using Hybrid Energy Storage," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 1, pp. 526-538, Feb. 2018.

[8] Pavithra Harsha, Munther Dahleh, "Optimal Management and Sizing of Energy Storage Under Dynamic Pricing for the Efficient Integration of Renewable Energy," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 1164-1181, May. 2015.

[9] Luis Valverde; Felipe Rosa; Carlos Bordons, "Design, Planning and Management of a Hydrogen-Based Microgrid," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 3, pp. 1398-1404, Aug. 2013.

[10] Sebastian Verhelst, Thomas Wallner, Helmut Eichlseder, Kaname Naganuma, Falk Gerbig, Brad Boyer, Shiro Tanno, "Electricity Powering Combustion: Hydrogen Engines," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 2, pp. 427-439, Feb. 2012.

[11] Seema Kewat, Bhim Singh, Ikhlaz Hussain, "Power management in PV-battery-hydro based standalone microgrid," *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, no. 4, pp. 391-398, Mar. 2018.

저 자 소 개



최 봉 기 (Bong-Gi Choi)

계명대학교 전자전기공학부 학·석사 연계과정

E-mail : cbg1161@gmail.com



전 종 현 (Jong-hyun Jun)

계명대학교 전기에너지공학전공 학부과정
E-mail : electricboy94@naver.com



김 성 열 (Sung-Yul Kim)

2007년 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부
졸업, 2012년 동 대학원 전기공학과 졸업
(공학). 2012년~2013년 미국 Georgia
Institute of Technology, PSCAL 연구원.
현재 계명대학교 전기에너지공학과 조교수.
E-mail : energy@kmu.ac.kr