

# PV와 PEFC를 병용한 가정용 분산 전원 시스템의 전력평준화 제어법

## Power Balancing Control Method of A Residential Distributed Generation System using Photovoltaic Power Generation and Polymer Electrolyte Fuel Cells

윤 영 변\* · 문 상 필\*\* · 박 한 석\*\*\* · 우 경 일†

(Young-Byun Yoon · Sang-Pil Mun · Han-Seok Park · Kyung-II Woo)

**Abstract** - Output power in photovoltaic systems changes steeply with the change of the sun intensity. The change of output power has influence on the electric power quality of the system. This paper proposes a residential distributed generation system using photovoltaic power generation and polymer electrolyte fuel cells(hybrid systems). In order to level the output power which changes steeply the polymer electrolyte fuel cells are connected to the photovoltaic power generation system in parallel. Thus the generated power of all the system can be leveled. However, the steep generated power in the photovoltaic power generation system can not be leveled. Therefore, the electric double layer capacitor(EDLC) is connected in parallel with the hybrid systems. It is confirmed by the simulation that the proposed distributed generation system is available for a residential supply.

**Key Words** : Photovoltaic power generation, Polymer electrolyte fuel cells, Electric double layer capacitor, Residential distributed power supply, Maximum power point tracking

### 1. 서 론

최근 최근 이산화탄소 등의 증가로 인한 지구 온난화, 화석 연료 등의 에너지 자원의 고갈이 심각한 문제가 되고 있다. 그래서 재생 에너지로 환경 부하가 적은 태양광 발전 시스템(Photovoltaic System)이 인기를 끌고 있다. 그러나 태양광 발전시스템은 날씨에 따라 일사 변동과 온도 변화에 따라 출력 전력이 급격하게 변화하기 때문에 계통의 전력 품질에 악영향을 미친다. 그래서 발전 전력의 변동을 평준화하는 시스템이 필요로 된다.

태양광 발전 시스템의 발전 전력을 평준화하는 방법으로 태양광 발전 시스템에 제어 가능한 전원을 배치하고 이 발전 전력에 의해 전체 시스템의 출력 전력을 평준화하는 방법이 있다. 그 중에서 병설하는 전원으로 환경 친화적 향후 연구 개발이 진행되어, 시스템의 저비용화를 기대할 수 있는 연료 전지가 효과적이다. 연료 전지의 출력은 요구된 전력 추종 제어를 할 필요가 있다. 그러나 개질기의 응답 지연을 위한 연료 전지의 출력에 지연이 생겨 전력 평준화에 악영

향을 미친다[1-5].

일반적으로 태양광 발전은 최대 전력 추종(MPPT : Maximum Power Point Tracking) 제어를 하는데 이는 불규칙한 출력 전력 변동이 발생한다[6-8]. 이를 평준화하기 위해 본 논문에서는 고체 고분자형 연료 전지(PEFC : Polymer Electrolyte Fuel Cell, 이하 PEFC라 한다)병용하여 설치하였다. 그러나 고체 고분자형 연료 전지를 사용함으로써 개질기의 응답 지연을 통해 태양광 발전의 급격한 변화에 추종하지 못하고, 전력의 평준화가 불가능하다. 그래서 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 태양광 발전과 연료 전지에 병렬로 에너지 저장 소자인 전기 이중층 커패시터(EDLC : Electric Double Layer Capacitor, 이하 EDLC라 한다)를 설치하여 문제점을 해결하였다. 이러한 모든 사항은 실험 결과를 통해 확인하고자 한다.

### 2. 가정용 분산 전원 시스템과 전력평준화 제어법

일반적으로 태양광 발전은 최대 전력을 얻기 위해 MPPT 제어를 하는 경우에 음영이 생기면 음영이 생긴 부분과 그 외 약 2~3배 면적까지 효율 저하로 인해 태양광 발전의 출력 전력이 크게 변동하는 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 논문에서는 태양광 발전과 고체 고분자 연료 전지를 병렬로 연결하여 신재생 하이브리드 시스템의 전력 평준화를 실시하였다. 그러나 고체 고분자 연료 전지를 사용함으로써 개질기의 응답 지연으로 연료 전지의 출력이 지연되어 전력에 추종한 출력을 얻을 수 없기 때문에 전력 평준화에 악영향을 미친다. 또한 부하에서 소비되지 않은 잉여 전력이 계통에 역조류한다. 이 때 변동이 심한 태

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Pukyong National University, Korea

E-mail : cogging@pknu.ac.kr

\* Chang-Young Industries Co., Ltd., Korea

\*\* Dept. of Electrical Engineering, Masan University, Korea

\*\*\* Dept. of Electrical Engineering, Pukyong National University, Korea

접수일자 : 2016년 10월 6일

수정일자 : 2016년 11월 2일

최종완료 : 2016년 11월 28일

양광 발전의 잉여 전력을 그대로 역조류하면 계통에 악영향을 미친다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 태양광 발전과 고체 고분자 연료 전지에 병렬로 에너지 저장 소자인 EDLC를 이용함으로써 연료 전지의 출력 지연과 잉여 전력을 보상하고 전체 시스템의 전력 평준화를 이루었다. 그림 1은 제안한 신재생 하이브리드 시스템을 이용한 분산형 전원 시스템을 나타낸 것이며, 각 시스템의 전력의 관계는 다음 식과 같다.

$$P_{PV} + P_{PEFC} - P_L = P_{EDLC} - P_S \quad (1)$$

여기에서,  $P_{PV}$ 는 태양 전지의 출력 전력,  $P_{PEFC}$ 는 연료 전지의 출력 전력,  $P_{EDLC}$ 는 EDLC의 입·출력 전력,  $P_L$ 은 가정의 부하 전력,  $P_S$ 는 계통의 전력이다.

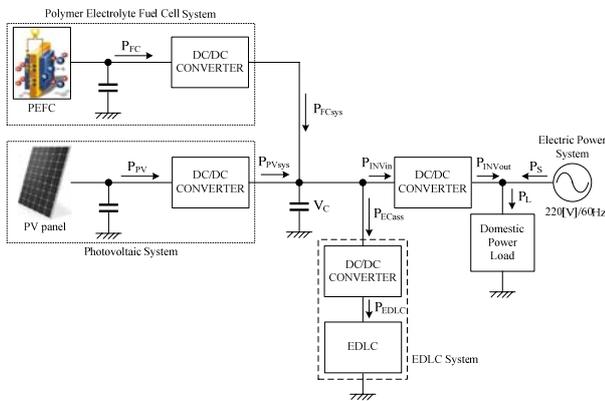


그림 1 제안한 신재생 하이브리드 시스템을 이용한 분산형 전원 시스템  
Fig. 1 The distributed power systems using proposed renewable hybrid systems

그림 1에 나타낸 제안한 가정용 분산 전원 시스템의 전력은 다음과 같은 관계가 성립된다.

1) PV 시스템

$$P_{PVsys} = \eta_{PV} P_{PV} \quad (2)$$

여기서,  $\eta_{PV}$  : PV 시스템의 컨버터 효율이다.

2) FC 시스템

$$P_{FCsys} = \eta_{FC} P_{FC} \quad (3)$$

여기서,  $\eta_{FC}$  : FC 시스템의 컨버터 효율이다.

3) EDLC 시스템

①  $P_{EDLC}$ ,  $P_{ECass}$ 가 정(+)일 경우(EDLC : 충전)

$$P_{EDLC} = \eta_{EDLC} P_{ECass} \quad (4)$$

②  $P_{EDLC}$ ,  $P_{ECass}$ 가 부(-)일 경우(EDLC : 방전)

$$P_{ECass} = \eta_{EDLC} P_{EDLC} \quad (5)$$

여기서,  $\eta_{EDLC}$  : EDLC 시스템의 컨버터 효율이다.

4) DC 링크

$$P_{INVin} = P_{PVsys} + P_{FCsys} - P_{ECass} \quad (6)$$

5) 교류측

$$P_{INVout} = \eta_{INV} P_{INVin} \quad (7)$$

$$P_S = P_L - P_{INVout} \quad (8)$$

여기서,  $\eta_{INV}$  : 파워 컨디셔너의 효율이다.

2016년 3월 9일 ○○대학교가 위치한 ○○동에서 측정된 일사 강도와 온도를 이용하여 실험을 통해 출력 전력 평균화 제어에 대해 검토하였으며, 이때의 각 시스템의 용량은 표 1에 나타내었다. 표 1에서 가정의 부하 전력  $P_L$ 은 무작위로 변동이 심하며, 그때의 부하 전력의 파형은 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 그리고 그림 3은 태양광 발전의 발전 전력 파형을 나타낸 것이다. 그림 3에서 태양 전지의 출력 전력  $P_{PV}$ 는 일사 강도의 변화에 따라 급격히 변화하고 있다.

표 1 각 시스템의 용량  
Table 1 The capacity of each system

구분	값
태양 전지의 최대 출력 전력( $P_{PV,max}$ )	3.6[kW]
연료 전지의 최대 출력 전력( $P_{PEFC,max}$ )	1[kW]
EDLC의 충·방전 전압( $V_{E,max}$ )	320[V]
EDLC의 최소 전압( $V_{E,min}$ )	80[V]
EDLC의 정전용량( $C_{EDLC}$ )	150[F]
부하 소비전력( $P_L$ )	20.94[kWh]
계통의 전력( $P_S$ )	0.59[kWh]
각 컨버터와 인버터의 효율( $\eta_{INV}$ )	90[%]

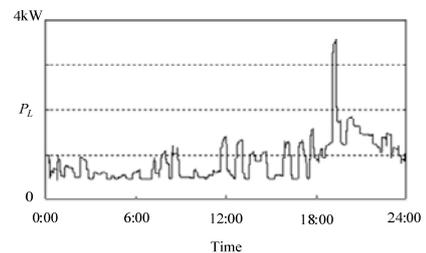


그림 2 부하 전력의 파형  
Fig. 2 The waveform of the load power

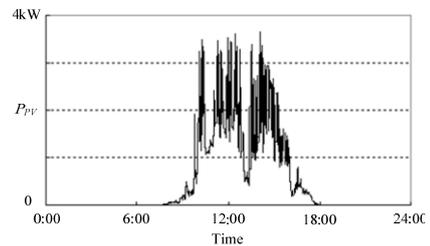


그림 3 태양광 발전의 전력 파형  
Fig. 3 The power waveform of solar photovoltaic

### 2.1 연료전지의 출력전력제어

태양광 발전의 발전 전력( $P_{PV}$ )과 가정의 전력 부하( $P_L$ )를 검출하고, 고체 고분자 연료 전지의 출력 전력 리밍값( $P_{PEFC}^*$ )을 구한다. 고체 고분자 연료 전지의 최대 출력 전력이 1[kW]이

기 때문에 출력 전력 지령값( $P_{PEFC}^*$ )는 다음과 같다.

$$P_{PEFC}^* = \begin{cases} 1000 & (\because 1000 < P_L - P_{PV}) \\ P_L - P_{PV} & (\because 0 \leq P_L - P_{PV} \leq 1000) \\ 0 & (\because P_L - P_{PV} < 0) \end{cases} \quad (9)$$

그림 4는 고체 고분자 연료 전지의 출력 전력 지령값( $P_{PEFC}^*$ )을 나타낸 것이다. 그림 4에서 출력 전력 지령값( $P_{PEFC}^*$ )은 0에서 1[kW]의 범위에서 설정하였으며, 또한 고체 고분자 연료 전지 시스템의 컨버터는 개질기의 응답 지연을 위한 출력 전력 지령값( $P_{PEFC}^*$ )의 일차 지연을 출력하도록 동작하였다.

### 2.2 계통의 전력제어

앞에서 서술한 바와 같이, 가정의 전력 부하 $P_L$ 에 태양광 발전 전력 $P_{PV}$ 와 고체 고분자 연료 전지 발전 전력 $P_{PEFC}$ 의 합이 작은 경우 계통이 간결 전력을 공급한다. 또한  $P_L$ 보다  $P_{PV} + P_{PEFC}$ 가 큰 경우 잉여분을 계통에 역 조류를 시킨다. 그러나 계통의 전력 지령값( $P_s^*$ )를  $P_L - P_{PV} - P_{PEFC} (= P_a)$ 하면 변동이 심한  $P_L$  및  $P_{PV}$ 를 포함하기 때문에 그대로 출력되거나 잉여분을 역 조류 시키거나하면 계통에 악영향을 미친다. 그래서  $P_a$ 의 필터링하여 평균화 한 것을 계통의 전력 지령값  $P_s^*$ 로 하였으며, 본 논문에서는 필터링 기법으로 지수 평활법을 사용하였다. 1차 지수 평활법에 의해서  $P_s^*$ 를 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_s^*(t) = (1 - \alpha)P_s^*(t-1) + \alpha P_a(t) \quad (10)$$

식 (3)에서 평활 지수 $\alpha$ 의 범위는  $0 < \alpha \leq 1$ 이며,  $\alpha$ 가 0에 가까울수록 과거의 데이터에 비중을 두고  $\alpha$ 가 1에 가까울수록 현재의 데이터에 비중을 둔다.

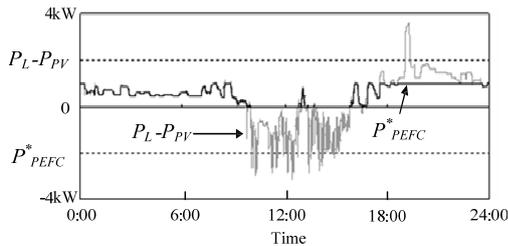
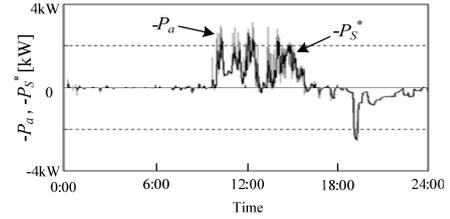
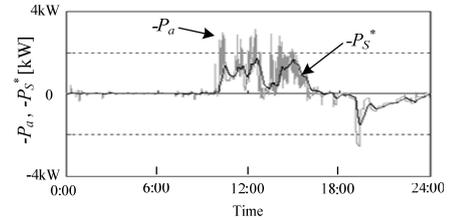


그림 4 고체 고분자 연료 전지의 출력 전력 지령값( $P_{PEFC}^*$ )  
Fig. 4 The output power reference value of polymer electrolyte membrane fuel cell

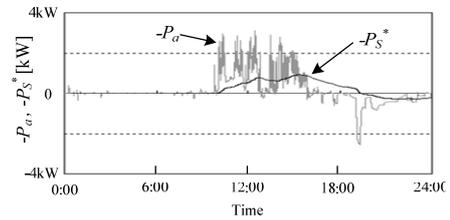
그림 5는  $\alpha$ 값을 0.02, 0.002, 0.0002로 변화 시켰을 때의  $P_a$ 와  $P_s^*$ 를 나타낸 것이다. 그림 5에서 알 수 있듯이  $\alpha$ 가 0.02일 때에는  $P_a$ 가  $P_s^*$ 와 파형이 거의 겹치고 있어, 평활화를 할 수 없으나  $\alpha=0.002$ 때는  $P_a$ 에 비해  $P_s^*$ 를 원활하게 필터링 할 수 있다. 그리고  $\alpha=0.0002$ 일 때는  $\alpha=0.002$ 때 보다  $P_s^*$ 가 부드럽지만,  $P_a$ 에 대해 거의 추종하지 않기 때문에 이 차이를 EDLC가 보상하게 된다. 결과적으로  $\alpha$ 값이 커지면 평준화는 할 수 없게 되지만,  $\alpha$ 가 작아지면 EDLC 용량이 커지는 것보다 평활 상수  $\alpha$ 를 0.002로 하였다.



(a)  $\alpha=0.02$ 인 경우



(b)  $\alpha=0.002$ 인 경우



(c)  $\alpha=0.0002$ 인 경우

그림 5  $\alpha$ 값을 변화 시켰을 때의  $P_a$ 와  $P_s^*$ 의 파형

Fig. 5 The waveform  $P_a$  and  $P_s^*$  was changed when the value of  $\alpha$

또한, 인버터의 전력 지령값  $P_{INV}^*$ 는 식 (10)에서 구한  $P_s^*$ 를 이용하여 식 (11)와 같다.

$$P_{LNV}^* = P_L - P_s^* \quad (11)$$

### 2.3 EDLC의 전력제어

개질기에 의한 연료 전지의 응답 지연과 계통의 전력을 평준화에 의해 발생하는  $P_a$ 와  $P_s^*$ 의 차이를 보상하기 위해 EDLC를 설치하였다. 그림 6은 EDLC 전력 제어 방법을 나타낸 것이다. 그림 6에서 EDLC의 전력은 DC 링크 전압  $V_c$ 를 검출하고,  $V_c$  및 설정값  $V_c^*=280[V]$ 의 차이를 이용하여 비례 제어를 실행한 것이다. 그림 7는 비례 이득 K와 오차  $\epsilon[\%]$ 의 관계를 나타낸 것이다. 여기서  $\epsilon$ 는 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon = \frac{|V_c - V_c^*|}{V_c^*} \times 100 \quad (12)$$

그림 7에서 비례 이득 K가 증가할수록 오차  $\epsilon$ 이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 그러나  $K = 200$  이상의 영역에서 DC 링크 전압  $V_c$ 는 발산하고 불안정한 동작을 한다. 그래서 본 논문에서는 오차가 5%이하인 비례 이득 K를 0.6에서 안정 영역인 비례 이득 K를 200까지의 중간값으로 이득 상수 K를 18로 설정하였다.

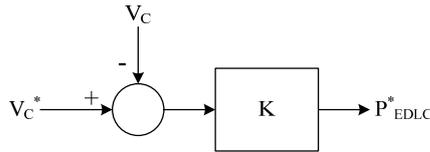


그림 6 EDLC 전력제어 방법

Fig. 6 EDLC power control methods

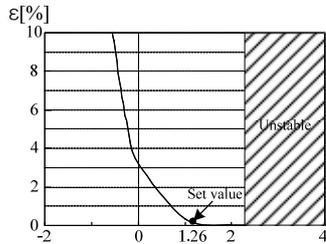


그림 7 비례 이득 K와 오차 ε[%]의 관계

Fig. 7 The relationship of proportional gain K and the error ε[%]

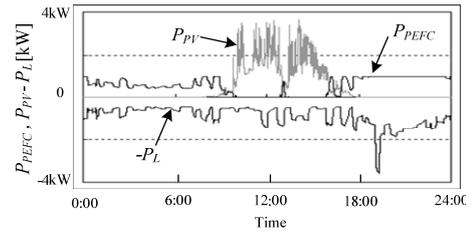
### 3. 실험결과 및 검토

그림 8은 제안한 분산형 전원 시스템의 각 부의 실험 결과를 나타낸 것이다. 그림 8에서 부하 전력의 1일의 총합은 20.94[kWh]에서 태양광 발전 시스템의 1일의 발전 전력량은 11.26[kWh], 고체 고분자 연료 전지 시스템의 발전 전력량은 13.15[kWh], 계통에서의 발전 전력량은 -3.47[kWh]이며, 잉여 전력이 계통에 역조류하고 있는 것을 확인하였다. 그리고 태양광 발전의 출력 전력  $P_{PV}$ 는 급격히 변화하고, 가정의 부하 전력  $P_L$ 은 무작위로 변화하고, 고체 고분자 연료 전지의 출력 전력  $P_{PEFC}$ 는 그림 4의 지령값대로 값을 출력하고 있다. 또한, 태양광 발전의 출력 전력  $P_{PV}$ 의 잉여 전력을 그대로 계통에 역조류 시키면  $P_a$ 의 파형이 된다.  $P_a$ 의 파형은 급격히 변화하고 있기 때문에 계통에 악영향을 미칠 것으로 판단된다.

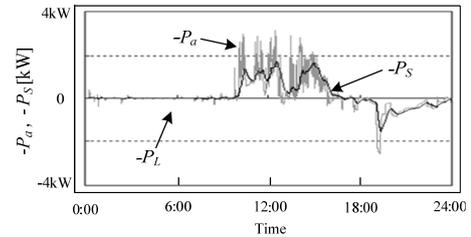
이에 반해 제안한 시스템에서는 계통의 전력  $P_S$ 가 EDLC에 의해 평준화함으로써  $P_a$ 보다 매끄럽게 되며, 계통에 전력을 역조류했을 때  $P_a$ 의 최대값이 3,130[W]인 반면,  $P_S$ 의 최대값이 1,750[W]까지 내리고 있다. 또한 계통에서 전력을 얻을 수 있는  $P_a$ 의 최대값이 2,590[W]인 반면,  $P_S$ 의 최대값이 1,550[W]에 내려가 있기 때문에 평준화가 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 또한 DC 링크 전압  $V_C$ 가 설정 전압 280[V]로 일정하며, EDLC 전압은 240[V]에서 319[V]로 변화한다.

### 4. 결론

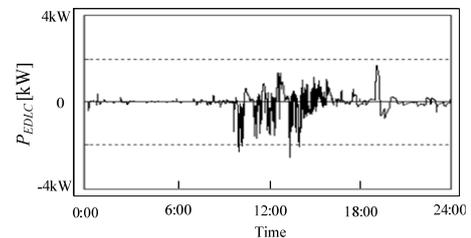
본 논문에서는 태양광 발전과 고체 고분자 연료 전지를 병용한 신재생 하이브리드 시스템을 이용한 가정용 분산 전원 시스템을 제안했다. 제안한 시스템의 계통에 전력 지령값을 1차 지수 평활법을 이용한 필터링에 의해 결정하였으나 필터링에 의해 발생하는  $P_a$ 와  $P_S^*$ 의 차이에 표적으로 하는 전력 평준화가 곤란한 문제점이 발생하였다. 그래서 개질기



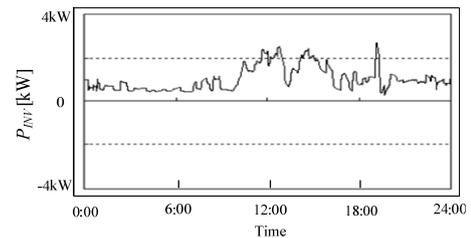
(a)  $P_{PEFC}$ 와  $P_{PV}-P_L$ 의 관계



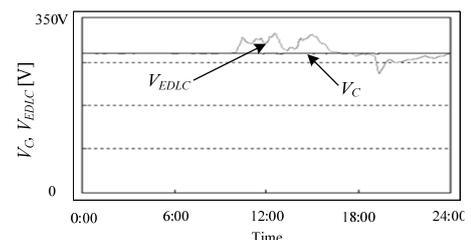
(b)  $-P_a$ 와  $-P_S$ 의 관계



(c)  $P_{EDLC}$



(d)  $P_{INV}$



(e)  $V_C$ 와  $V_{EDLC}$

그림 8 제안한 분산형 전원 시스템의 각 부의 실험 결과

Fig. 8 The each portion experiment results of proposed distributed generation systems

의 응답의 지연이나 필터링에 의해 발생  $P_a$ 와  $P_S^*$ 의 차이를 보상하기 위해 전기 이중층 커패시터를 태양광 발전과 고체 고분자 연료 전지에 병렬로 연결하여 개질기의 응답 지연, 계통의 전력을 평준화함으로써 발생 하는  $P_a$ 와  $P_S^*$ 의 차이를 보상 할 수 있었다. 또한, 계통에 역조류하는 경우 필터링을 수행함으로써 역조류시키는 전력이 3,130[W]에서 1,750[W]로 되어 계통에서 분리 전력은 2,590[W]에서 1,550[W]가 되어

기존의 변동이 심한 전력 파형이 매끄러운 파형으로 되어  
평준화 제어가 실현 될 수 있었다.

### 감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년)  
에 의하여 연구되었음.

### References

- [1] Yilanci A, Dincer I, Ozturk H.K ,“Performance analysis of a PEM fuel cell unit in a solar - hydrogen system”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.33, No.24, pp.7538-7552, 2008
- [2] M.Uzunoglu and M.S.Alam,“Dynamic Modeling, and Simulation of a Combined PEM Fuel Cell and Ultra capacitor System for Stand-Alone Residential Applications”, IEEE Trans on Energy Conversion, Vol.21, No.3, pp.767 -775, 2006
- [3] El-Sharkh M.Y, Rahman A, Alam M.S, Byrne P.C, Sakla A.A, Thomas T ,“A dynamic model for a stand-alone PEM fuel cell power plant for residential applications”, JOURNAL OF POWER SOURCES, Vol.138, No.1 pp.199 -204, 2004
- [4] Hatti Mustapha, Tioursi Mustapha ,“Dynamic neural network controller model of PEM fuel cell system”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.34, No.11, pp.5015-5021, 2008
- [5] Sandy Thomas C.E,“Transportation options in a carbon -constrained world: Hybrids, plug-in hybrids, biofuels, fuel cell electric vehicles, and battery electric vehicles”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.34, No.23, pp.9279-9296, 2009
- [6] Rajabi-Ghahnavieh A, Nowdeh S.A,“Optimal PV - FC hybrid system operation considering reliability”, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol.60, pp.325-333, 2014
- [7] Clarke R.E, Giddey S, Ciacchi F.T, Badwal S.P.S, Paul B, Andrews J, “Direct coupling of an electrolyser to a solar PV system for generating hydrogen”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.34, No.6, pp.2531-2542, 2009
- [8] Akyuz E, Oktay Z, Dincer I ,“Performance investigation of hydrogen production from a hybrid wind-PV system”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol.37, No.21, pp.16623-16630, 2012

## 저 자 소 개



### 윤영변 (尹永便)

2007년 경남대 전기공학과 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2012년 부경대 대학원 전기공학과 박사수료. 1994년~2016년 현재 창영산업(주) 근무. 현 본 학회 정회원



### 문상필 (文相弼)

1997년 부경대 전기공학과 졸업. 1999년 경남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2010년 8월~현재 마산대학교 전기과 조교수. 2009년 7월 IEEE ISIE Bsst Paper Award 수상. 2010년 12월 한국조명전기설비학회 학술상 수상. 현 본 학회 산업전기위원회 편집위원 겸 정회원



### 우경일 (禹旻一)

1969년 9월 6일생. 1995년 한양대 전기공학과 졸업(공학사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2002년~현재 부경대학교 전기공학과 교수



### 박한석 (朴瀚錫)

1981년 중앙대학교 전기공학과 졸업. 1983년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 한국해양대학교 대학원 졸업(박사). 1986년 3월 ~현재 부경대학교 공과대학 전기공학과 교수. 현 본 학회 정회원