

# 출력변동 저감 및 출력범위 예측 향상을 위한 풍력-연료전지 하이브리드 시스템의 운영방법

논 문
58-3-15

## Operation Scheme to Regulate the Active Power Output and to Improve the Forecasting of Output Range in Wind Turbine and Fuel-Cell Hybrid System

김운성\*·문대성\*·원동준†  
(Yun-Seong Kim · Dae-Seong Moon · Dong-Jun Won)

**Abstract** - The paper deals with an operation scheme to improve the forecasting of output range and to regulate the active power output of the hybrid system consisting of a doubly fed induction generator(DFIG) and a fuel-cell. The power output of the wind turbine fluctuates as the wind speed varies and the slip power between the rotor circuit and power converter varies as the rotor speed change. The power fluctuation of a DFIG makes its operation difficult when a DFIG is connected to grid. A fuel cell system can be individually operated and adjusted output power, hence the wind turbine and fuel cell hybrid system can overcome power fluctuation by using a fuel-cell power control. In this paper, a fuel-cell is performed to regulate the active power output in comparison with the regulated active power output of a DFIG. And it also improves the forecasting of output range. Based on PSCAD/EMTDC tools, a DFIG and a proton exchange membrane fuel cell(PEMFC) is simulated and the dynamics of the output power in hybrid system are investigated.

**Key Words** : Wind turbine, Fuel cell, Hybrid system, Output power regulation, Forecasting of output range

### 1. 서 론

에너지 소비증가, 전력수요의 증가, 환경문제의 심화, 화석자원의 고갈, 국제유가의 급등과 같은 사회 경제적 문제점과 기존 중앙 집중형 전원의 피크부하 대응의 어려움, 대규모 전원의 원격화에 따른 입지확보의 어려움, 송배전 투자비용 증대, 에너지 손실 증대와 같은 문제점으로 인해서, 신재생에너지원이 차세대 에너지로 각광받기 시작하고 있다.

이러한 신재생 에너지는 수요지 근방에 설치되는 분산전원 형태로 운영되며, 그 중에서 풍력 발전의 설치가 전 세계적으로 가장 빠르게 증가하고 있다. 풍력 발전은 다양한 형태의 풍차를 이용하여 자연현상에서 발생하는 바람의 운동 에너지를 공기 역학적 특성을 이용하여 기계적 에너지로 변환하고, 이때 발전기에 유도되는 전력을 생산하는 시스템으로, 변환 과정에서 청정성과 고갈되지 않는 지속성을 갖는다. 하지만 출력이 바람의 변화에 종속되기 때문에, 변동이 심하고, 예측할 수 없다는 단점을 가진다. 이러한 단점은 계통 측면에서 전기품질 문제를 일으키며 계통과의 연계 및 운영을 어렵게 만든다.

풍력발전이 가지는 이러한 문제점들을 해결하기 위해서 배터리와 연료전지를 이용하여 출력변동을 저감하는 연구가 국내·외에서 진행되고 있다. 이러한 기기와 풍력발전과의

하이브리드 결합은 DC커플링 기반과 AC커플링 기반으로 나눌 수 있다. DC커플링 기반은 풍력발전기가 내는 AC출력을 DC로 재변환해야 하고, 대용량 풍력발전이 투입되었을 때 AC/DC 컨버터와 DC/AC 인버터의 용량이 커지므로 시스템의 효율성이 떨어진다는 단점을 가진다. 반면 AC커플링은 DC커플링에 비해 제어는 더 까다롭지만, 불필요한 전력변환 및 기기가 없으므로 효율성이 더 높다[1][2].

출력변동 저감 목적으로 운용하는 배터리는 빠른 응답속도로 인해 순간적인 변동에 대해 적절한 보상이 가능하지만, 용량과 지속시간 문제로 인한 단점이 있다. 반면에 연료전지는 배터리에 비해 출력 응답은 다소 느리지만 연속운전과 대용량 운영이 가능하며, 허용범위 내에서 제어가 쉽고 안정적인기 때문에 이러한 측면에서 장점을 가진다.

본 논문은 이러한 점들을 착안하여, 최근 대용량 발전에 많이 이용되는 이중여자 유도발전기를 사용한 풍력발전기의 출력변동을 일차적으로 히스테리시스를 이용한 출력조정제어를 통해 저감하며, 이차적으로 AC커플링 된 연료전지가 풍력발전의 출력에 맞게 보상제어 할 수 있게 하는 하이브리드 시스템의 제어방법 및 운영방안을 제안하였다. 이러한 운영방안은 풍력발전의 출력변동을 저감하고, 출력변동 범위를 줄일 수 있기 때문에 출력 범위 예측을 향상시킬 수 있다.

PSCAD/EMTDC를 이용하여, 이중여자 유도 발전기(Doubly Fed Induction Generator; DFIG), 고분자 전해질 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell; PEMFC), DC/AC 인버터, DC/DC 컨버터를 모델링하여 AC버스에 커플링 된 하이브리드 시스템을 구축하였고, 모의실험을 통해 제안한 운영방법을 검증하였다.

\* 준 회원 : 인하대 공대 전기공학과 석사과정

† 교신저자, 정회원 : 인하대 공대 전기공학부 조교수

E-mail : djwon@inha.ac.kr

접수일자 : 2008년 9월 26일

최종완료 : 2009년 2월 5일

## 2. 풍력-연료전지 하이브리드 시스템

### 2.1 이중여자 유도 발전기

#### 2.1.1 이중여자 유도 발전기 모델링

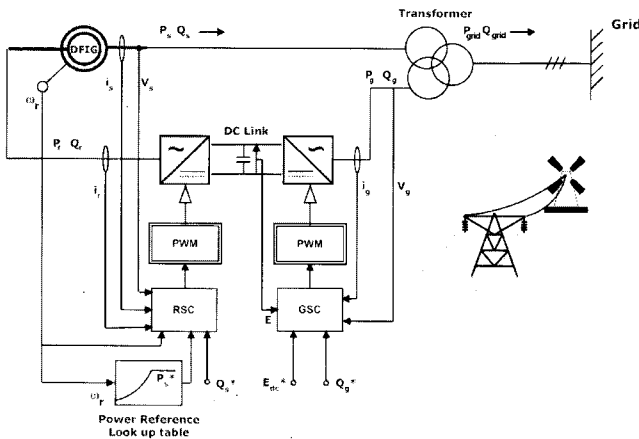


그림 1 이중여자 유도발전기 구조

Fig. 1 DFIG Structure

이중여자 유도 발전기를 사용한 풍력모델은 가변속 방식으로 운전하기 때문에 정속 운전 방식보다 동기속도의 -40%에서 +30%까지 운전이 가능하며 이로 인해 20%에서 30%의 보다 높은 효율을 가진다. 그리고 컨버터를 사용하여 동작하기 때문에 더 넓은 범위의 동적 속도 제어 능력을 갖추고 있으며, 다변화한 풍속에도 불구하고 컨버터 제어를 통해 출력을 제어할 수 있다. DFIG 모델링은 권선형 유도 발전기, 그리드 사이드 컨트롤러(Grid Side Controller; GSC), 로터 사이드 컨트롤러(Rotor Side Controller; RSC) 그리고 이들 사이의 DC링크 전압유지를 위한 백투백 PWM 컨버터로 구성된다. 회전자권선은 슬립링과 브리쉬를 통해 RSC로 연결되고, 고정자 권선은 직접 그리드에 연결된다[3]~[5].

로터사이드 컨트롤러는 유도발전기를 제어하며 DFIG의 유효전력과 무효전력의 출력을 조절하는 역할을 한다. DFIG의 유효전력과 무효전력의 디커플 제어를 하기위해, 고정자 자속의 벡터 컨트롤을 사용한다[3].

그리드사이드 컨트롤러의 주목적은 DC링크의 전압( $E_{dc}$ )을 일정하게 유지하는 것이며, 전압유지를 위해 전압상승 시에 전력( $P_g$ )을 그리드로 내보내고, 반대로 전압강하 시에 그리드로부터 전력을 끌어온다. 이러한 조류제어를 위해 고정자 전압을  $d-q$  좌표계로 변환한 벡터제어를 사용하며, 이를 바탕으로 DC링크 전압과 무효전력을 제어한다[3][4]. DC링크의 전압은 그리드와 그리드 사이드 컨트롤러 사이로 흐르는 전력( $P_g$ )과 로터사이드 컨트롤러와 회전자로 흐르는 전력( $P_r$ )의 차이인 DC전력으로부터 계산된다.

#### 2.1.2 DFIG의 출력 조정 제어

풍력발전의 에너지원인 바람은 순시적으로 변하기 때문에 이러한 특성에 종속되는 풍력 발전의 출력변동 또한 다변화할 수밖에 없다. 그러므로 이를 최소화하기 위해 출력조정제어를 사용하였다. 출력조정 제어의 주목적은 로터 사이드 컨트롤러에서 제어를 통해서 순간적인 유효전력( $P_{grid}$ )의 변동

을 최소화 하여 DFIG를 운영하는 것이다.

고정자의 유효전력은 로터사이드 컨트롤러에서 고정자 자속을  $d-q$  변환을 사용한 식 (1)로 나타낼 수 있다[6]. 여기서  $P_s$ 는 고정자의 유효전력출력이며,  $V_{sd}$ ,  $V_{sq}$ ,  $i_{sd}$ ,  $i_{sq}$ 는 고정자의  $d-q$ 축 전압과 전류 값이다. 이때 전류의 방향은 계통에서 발전기로 들어오는 방향으로 한다.

$$P_s = -\frac{3}{2}(v_{sd}i_{sd} + v_{sq}i_{sq}) \quad (1)$$

고정자 저항에 의한 전압강하가 무시되어  $v_{sd}$ 는 0이다 [3][6]. 고정자의  $q$ 축 전류( $i_{sq}$ )와 회전자의  $q$ 축 전류( $i_{rq}$ )와의 관계는 식 (2)로 나타낼 수 있으며, 여기서  $L_m$ ,  $L_s$ 는 고정자의 상호인덕턴스와 자기인덕턴스이다.

$$i_{sq} = -\frac{L_m}{L_s}i_{rq} \quad (2)$$

식 (1), (2)에 의해 식 (3)이 유도된다.

$$P_s = \frac{3}{2}\left(\frac{L_m}{L_s}v_{sq}\right)i_{rq} \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여  $q$ 축 로터전류의 제어를 통해,  $P_s$ 가 제어되며 궁극적으로 전류제어기 식 (4)에서 회전자  $q$ 축 전류의 지령 값( $i_{rq}^*$ )을 통해  $i_{rq}$ 가 제어되어  $P_s$ 를 제어할 수 있게 된다.

$$i_{rq}^* = \frac{2}{3} \frac{L_s}{L_m} \frac{P_s^*}{v_{sq}} \quad (4)$$

$P_s^*$  값은 바람에 의해 변환된 기계적 입력 값을 따르며 일정시간동안 미세한 풍속 변화에도, 그림 2의 히스테리시스를 이용한 제어를 통해 일정한 값을 유지하게 된다. 만약에 풍속이 특정 값 이상으로 변화한다면  $P_s^*$  값은 더 높은 혹은 낮은 단계로 변환한다. 그리고 스텝 상승에 따른 출력변화에 의한 문제를 줄이기 위해 Rate limiter를 사용한다[6].

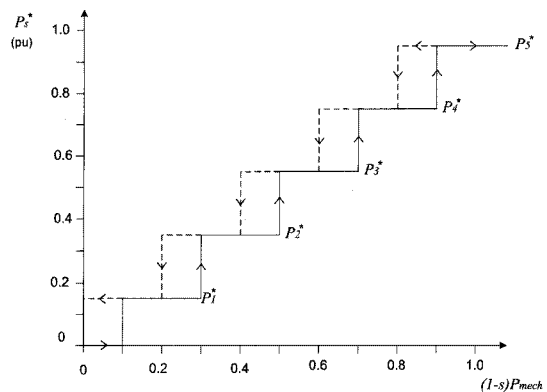


그림 2 히스테리시스를 이용한  $P_s^*$  세팅

Fig. 2  $P_s^*$  setting using hysteresis

## 2.2 연료전지 시스템

### 2.2.1 PEMFC 모델링

고분자 전해질 연료전지(PEMFC)는 이온전도성 고분자를 전해질로 가지며, 다른 연료전지에 비해 저온에서 동작하므로 시동 및 동작이 빠르다[7]. 연료전지 시스템의 기본적인 내부 동작특성은 시스템 외부의 부하 증가-감소에 따라서 내부 전압강하가 연속적으로 일어나며 저항손실(Ohmic Loss), 농도손실(Concentration Loss) 및 활성화 손실(Activation Loss) 등의 내부저항성분으로 나타난다. 저항손실은 전해질을 통한 이온의 흐름은 물론이고 전극이나 각종 연결부를 통과하는 전자의 흐름에 대한 직접적인 저항성분에 의해 발생한다. 농도손실은 화학반응에 의해 연료가 소비될 때 전극표면에서 반응물질의 농도가 변화하기 때문에 발생하며, 네른스트의 식에 의해 모델화 된다. 활성화 손실은 전극의 표면에서 일어나는 반응이 늦어지기 때문에 발생하며, 전극 쪽으로 또는 전극으로부터 전자를 이동시키는 화학반응을 진행시키는데 발생전압 일부가 손실된다[7][8]. 그림 3은 PSCAD/EMTDC로 모델링된 PEMFC의 한 스택에 대한 V-I 특성 곡선이다.

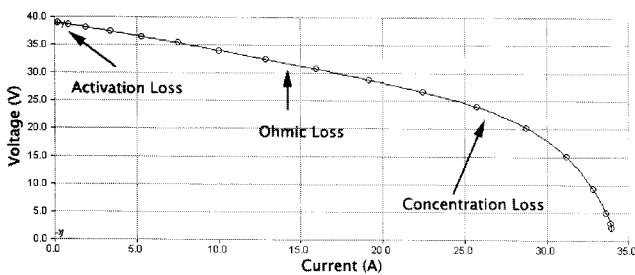


그림 3 PEMFC의 전류-전압 특성 그래프  
Fig. 3 V-I Characteristics of the PEMFC

연료전지 시스템의 인버터제어는 CRPWM 방식으로써,  $d-q$  벡터제어를 이용하여 유효전력과 무효전력을 각각 제어한다. 인버터의 출력 유효전력( $P_m$ )과 지령 유효전력( $P_{ref}$ ) 그리고 출력 무효전력( $Q_m$ )과 지령 무효전력( $Q_{ref}$ ) 사이의 오차 값은 PI 제어기를 통해  $i_d$ ,  $i_q$ 를 형성하고, 이 값과 출력  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 상 전압( $V_{abc,m}$ )을 통해 alpha, beta로 변환한 값( $\alpha$ ,  $\beta$ )은 Instantaneous Power Method를 통해,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 상 전류( $i_{abc,ref}$ )의 지령 값을 만든다. 그리고 이 값과  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 상 전류( $i_{abc,m}$ )의 출력 값과의 오차가 PWM 시그널이 된다[9].

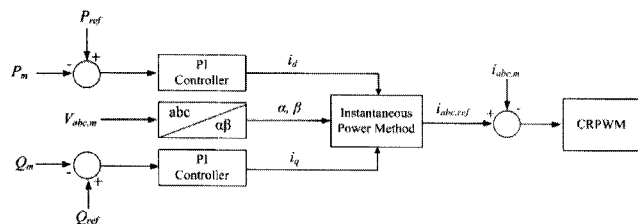


그림 4 PEMFC의 PQ 제어시스템  
Fig. 4 PQ control system of the PEMFC

## 2.3 하이브리드시스템 모델링

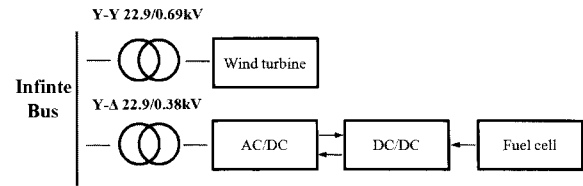


그림 5 풍력-연료전지 하이브리드 시스템 구조  
Fig. 5 Wind turbine and fuel cell hybrid system structure

DFIG와 연료전지 시스템은 AC버스에 커플링되어 있으며 하이브리드 시스템은 22.9kV 무한모선에 연결되어있다. DFIG에서 생산되는 출력은 5MVA 변압기를 통해 AC버스 전달된다. 연료전지에서 발생하는 출력도 마찬가지로 5MVA 변압기를 통해 AC출력을 내게 된다. 연료전지 시스템은 풍력발전에서 보내는 출력 값과 하이브리드 시스템의 설정 값을 비교하여 변화하는 연료전지 지령 값에 따라 AC버스로 출력 값을 달리하여 보상하게 된다.

이때 사용되는 수 백 kW급 이상의 대용량 연료전지는 고압으로 운전되기 때문에 계통 연계시 온/오프로 운전하게 되면, 재시동 시 압축기를 이용하여 산소를 고압 상태를 만들어야 하므로, 시간지연이 발생하게 된다. 이때 시스템 불안정과 더불어 이로 인한 전기적 문제가 발생하므로[7], 이로 인해 수시로 온/오프가 힘들기 때문에 항상 켜져 있는 상태로 운전하도록 한다. 그리고 연료전지가 안정한 상태로 출력제어가 되는 최소출력은 계통으로 내는 출력의 약 10~20%이므로 본 논문에서는 그 이하로 운전할 수 없게 제한한다.

## 3. 출력 조정 제어

### 3.1 출력 조정 제어 알고리즘

풍력-연료전지 하이브리드 시스템의 운영방안의 목적은 풍력발전의 순시적 출력변동을 최대한 억제하며, 연료전지시스템의 보상을 통해 예측 가능한 출력설정 범위를 최소화하고자 함에 있다. 이를 위해 풍력발전은 1차적으로 히스테리시스를 이용한 출력조정 제어를 수행하며, 연료전지는 이러한 풍력발전의 출력 값을 하이브리드 출력설정 값과 비교하여, 작은 경우에는 보상 출력을 내도록 하고, 보상 값이 연료전지의 최대용량 이상인 경우에는 최대출력을 내도록 한다. 한편, 풍력발전의 출력이 하이브리드 출력설정 값 보다 큰 경우에는 최소출력을 내도록 하여 하이브리드 시스템의 출력변동 범위를 최소화한다. 연료전지 시스템이 최대출력, 최소출력의 지령을 받고 운전할 때에 상한과 하한의 제한된 운전점을 두어 연료전지 시스템이 그 범위를 넘지 않도록 하여 안전한 범위 내에서 운전하도록 한다.

제한하고자 하는 풍력-연료전지 하이브리드 시스템의 운영방법을 도출하기 위해서, 우선적으로 DFIG와 연료전지의 용량의 대소를 고려해야 하며, 용량에 따라 DFIG가 연료전지보다 용량이 큰 경우(Case 1) 그리고 용량이 작거나 같은 경우로 나눌 수 있다. 용량이 작거나 같은 경우는 다시, 연료전지의 용량이 DFIG의 용량과 연료전지의 최소출력의 합보다

큰 경우(Case 2)와 작거나 같은 경우(Case 3)로 나눌 수 있다.

**A. Case 1**

우선 DFIG의 용량이 연료전지에 비해 큰 경우를 살펴보면, 그림 6과 같이 하이브리드 시스템 출력설정 값에 의한 출력변동 범위의 패턴에 따라서, 세 가지 출력설정 영역으로 나눌 수 있다.

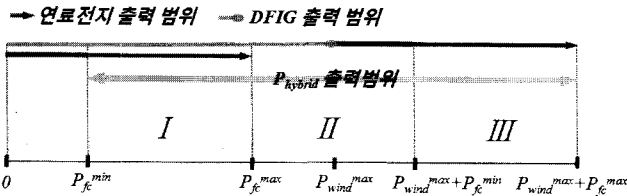


그림 6 Case1의 경우, 하이브리드 시스템 출력범위  
Fig. 6 Active power range of the hybrid system at case 1

여기서,

- $P_{hybrid}$  : 하이브리드 시스템 출력설정 값.
- $P_{wind}^{max}$  : 풍력 발전의 정격 최대출력 값.
- $P_{wind}$  : 풍력 발전의 출력 값.
- $P_{fc}^{min}$  : 연료전지의 최소출력 값.
- $P_{fc}^{max}$  : 연료전지의 최대출력 값.

을 나타낸다.

하이브리드 시스템 출력설정 값이 세 가지 출력설정 영역 내에 각각 설정된다면, 해당 설정 값에 따른 출력범위도 세 가지로 나누어진다. 표 1은 DFIG의 용량이 연료전지의 용량보다 큰 경우, 하이브리드 시스템 출력설정 값의 출력설정 영역에 따른 출력범위를 나타낸다.

표 1 Case 1의 경우, 설정영역 및 출력 범위  
Table 1 Output power range at case 1

분류	설정영역	출력범위
I	$P_{fc}^{min} \sim P_{fc}^{max}$	$P_{hybrid} \sim P_{wind}^{max} + P_{fc}^{min}$
II	$P_{fc}^{max} \sim P_{wind}^{max} + P_{fc}^{min}$	$P_{fc}^{max} \sim P_{wind}^{max} + P_{fc}^{min}$
III	$P_{wind}^{max} + P_{fc}^{min} \sim P_{wind}^{max} + P_{fc}^{max}$	$P_{fc}^{max} \sim P_{hybrid}$

첫 번째 영역 내에서 하이브리드 시스템 출력설정 값 ( $P_{hybrid}$ )이 설정되었을 때, 풍력발전에서 생산되는 전력이 하이브리드 시스템 출력설정 값보다 더 커지게 되는 경우가 발생하기 때문에, 이때 연료전지는 최소출력으로 운전해야하므로, 하이브리드 시스템 최대 출력범위는  $P_{hybrid} \sim P_{wind}^{max} + P_{fc}^{min}$  가 된다. 이 영역에서 출력범위는  $P_{hybrid}$ 가  $P_{fc}^{max}$ 에 가까워질수록 줄어들게 된다.

두 번째 영역 내에서 하이브리드 시스템 출력설정 값이 설정되었을 때를 살펴보면, 풍력발전이 발전하지 않을 때에는 연료전지 시스템이 최대정격용량을 내야하기 때문에,  $P_{fc}^{max}$ 에

서부터 풍력발전이 최대로 발전하는 경우인  $P_{wind}^{max} + P_{fc}^{min}$ 까지 출력설정 범위를 가지게 된다. 이 영역에서  $P_{hybrid}$ 에 설정에 대한 모든 출력범위는  $P_{fc}^{max} \sim P_{wind}^{max} + P_{fc}^{min}$  로 동일하다.

세 번째 영역 내에 하이브리드 시스템 출력설정 값이 설정되었을 때에는, 연료전지의 정격 최대출력 값부터 하이브리드 시스템 출력설정 값까지 출력범위를 가진다. 이 영역에서 출력범위는  $P_{hybrid}$ 가  $P_{wind}^{max} + P_{fc}^{min}$ 에 가까울수록 줄어들게 된다.

**B. Case 2**

DFIG의 용량이 연료전지에 비해 작은 경우 중, 연료전지의 최대 용량이 DFIG의 정격 최대 용량과 연료전지 최소 출력 값의 합보다 큰 경우도 Case 1과 마찬가지로 하이브리드 시스템 출력설정 값 위치에 따른 출력범위의 패턴에 따라서, 그림 7과 같이 세 가지 출력설정 영역으로 나눌 수 있다. 표 2는 Case 2의 경우에 하이브리드 시스템 출력설정 값의 출력설정 영역에 따른 출력 범위를 나타낸다.

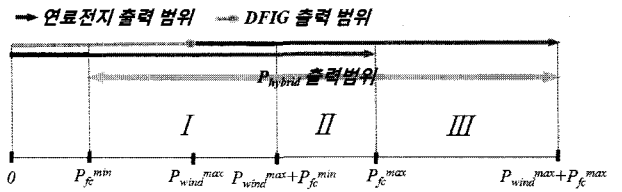


그림 7 Case2의 경우, 하이브리드 시스템 출력범위  
Fig. 7 Active power range of the hybrid system at case 2

표 2 Case 2의 경우, 설정영역 및 출력 범위  
Table 2 Active power range at case 2

분류	설정영역	출력범위
I	$P_{fc}^{min} \sim P_{wind}^{max} + P_{fc}^{min}$	$P_{hybrid} \sim P_{wind}^{max} + P_{fc}^{min}$
II	$P_{wind}^{max} + P_{fc}^{min} \sim P_{fc}^{max}$	$P_{hybrid}$
III	$P_{fc}^{max} \sim P_{wind}^{max} + P_{fc}^{max}$	$P_{fc}^{max} \sim P_{hybrid}$

이 경우에 설정영역을 Case 1과 비교 시에,  $P_{wind}^{max} + P_{fc}^{min}$ 와  $P_{fc}^{max}$ 의 위치만 변화하였으며, 출력범위는 두 번째 영역의 출력범위를 제외하고 첫 번째 영역의 출력범위와 세 번째 영역의 출력범위가 앞에 설명한 이유와 같기 때문에 Case 1과 동일하게 된다. 두 번째 영역 내에서 하이브리드 시스템 출력설정 값이 설정되었을 때는, DFIG가 출력을 내지 않을 때 연료전지 시스템이 하이브리드시스템 출력설정 값까지 낼 수 있고, DFIG가 최대 출력일 때도 최소출력 값 이상에서 운전할 수 있으므로, 이때는 출력변동이 최소인 정출력을 내게 된다.

**C. Case 3**

DFIG의 용량이 연료전지에 비해 작거나 같은 경우에, 연료전지의 최대용량이 DFIG의 정격 최대용량과 연료전지 최소출력 값의 합보다 작은 경우도 앞과 마찬가지로 세 가지

출력설정 영역을 나눌 수 있다.

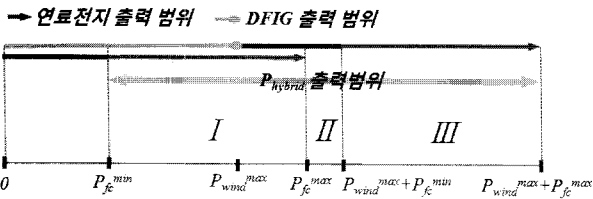


그림 8 Case3의 경우, 하이브리드 시스템 출력범위  
Fig. 8 Active power range of the hybrid system at case 3

Case 3에서 출력범위에 따른 출력영역을 비교하면 Case 1의 표 1과 같다. 결국 Case 3과 Case 1은 동일하다.

각각 비교를 통해서, 동일 출력범위에 따른  $P_{hybrid}$  설정영역을 결정하는 지표는  $P_{fc}^{max}$ ,  $P_{wind}^{max} + P_{fc}^{min}$ 가 되며, 이들 순서에 따라서 두 번째 영역의 출력범위가 달라진다는 사실을 얻을 수 있다.

이러한 사실과 제한한 방법을 바탕으로 그림 9의 하이브리드 시스템 운영 알고리즘을 도출할 수 있다. 여기서,  $P_{fc}^*$ 는 연료전지의 지령 값이며,  $P_{fc}^{max}$ 가  $P_{wind}^{max} + P_{fc}^{min}$ 보다 크거나 같은 경우(Case 1, 3)  $A = P_{wind}^{max} + P_{fc}^{min}$ 와  $B = P_{fc}^{max}$ 로, 작은 경우(Case 2)에는 반대로  $A = P_{fc}^{max}$ 와  $B = P_{wind}^{max} + P_{fc}^{min}$ 로 설정한다.

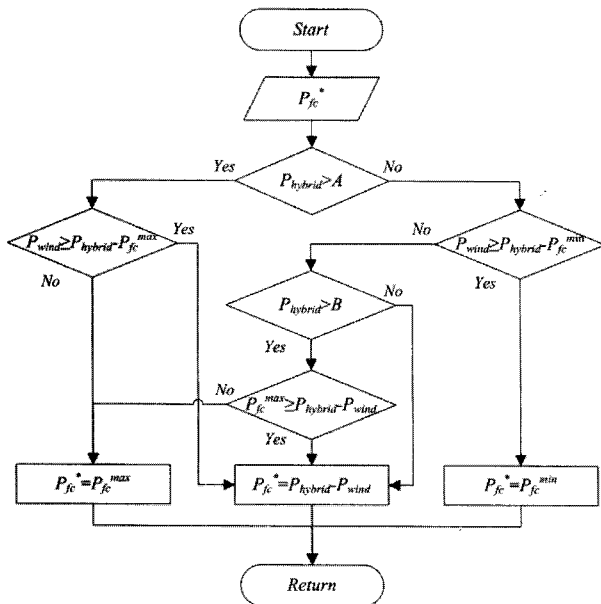


그림 9 하이브리드 시스템의 운영 알고리즘  
Fig. 9 Operation algorithm of the hybrid system

#### 4. 모의 결과

##### 4.1 하이브리드 시스템 시뮬레이션 모델

제안한 운영 방법과 제어방법의 검증을 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여, DFIG와 연료전지 시스템을 모델링하였다. 앞에서 다룬 세 가지 경우를 모두 모의하기 위해서 500kW급 DFIG와 계통으로 공급하는 최대 출력이

400, 500, 600kW인 연료전지 시스템을 이용하여 테스트 하였다. 이 값은 연료전지 시스템의 안정적인 출력범위를 위한 최대 값( $P_{fc}^{max}$ )으로 설정하였으며, 최소 출력 값( $P_{fc}^{min}$ )은 40, 50, 60kW로 설정하였다. 그림 10은 DFIG와 연료전지 시스템이 AC커플링 된 하이브리드 시스템으로, 각각 블록의 내부 모델링은 그림 11, 12와 같다.

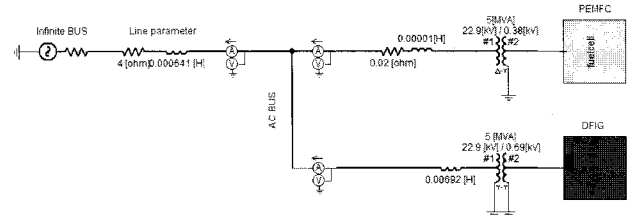


그림 10 풍력-연료전지 하이브리드 시스템 모델링  
Fig. 10 Wind turbine and fuel cell hybrid system modeling

DFIG는 표 3의 사양으로 운전한다. 풍속이 12m/s 이상일 때 정격 최대출력을 내며, 역률이 1로, 최대출력 추종제어(Maximum Power Tracking Control)로 운전한다. 그리고 앞에서 논의한 히스테리시스를 이용한 출력 조정제어를 포함한다.

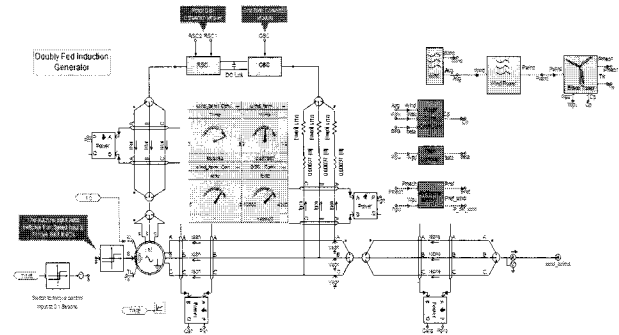
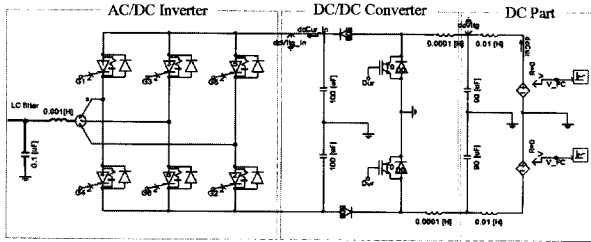


그림 11 DFIG 모델링  
Fig. 11 DFIG Modeling

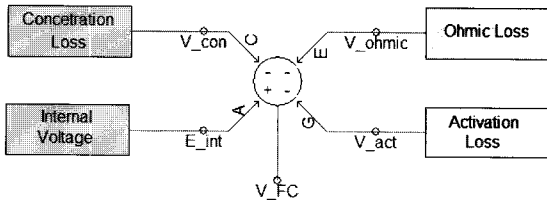
표 3 DFIG 사양  
Table 3 DFIG Parameters

정격 용량	500 kW
정격 전압	0.69 kV
주파수	60 Hz
고정자와 회전자의 턴 비	1
회전 판성 계수	0.5 p.u.
기계적 댐핑 계수	0.01 p.u.
고정자 저항	0.005 p.u.
회전자 저항	0.006 p.u.
고정자 누설 인덕턴스	0.1 p.u.
회전자 누설 인덕턴스	0.1 p.u.
자화 인덕턴스	3.3 p.u.

연료전지는 셀과 스택의 직·병렬연결을 통해 원하는 출력을 낼 수 있으며, CRPWM 인버터의 유효전력-무효전력 제어에 의해서 출력을 조절하여 운전한다. 시뮬레이션에서는 연료전지 시스템의 전압제어를 고려하지 않으므로 지령 무효전력 값( $Q_{ref}$ )을 0으로 설정하여 역률 1로 운전하도록 하였다.



(a) DC/AC 인버터, DC/DC 컨버터 모델링

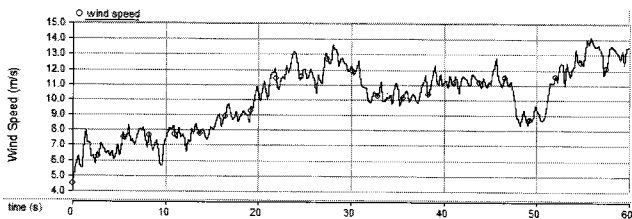


(b) 연료전지 내부 모델링

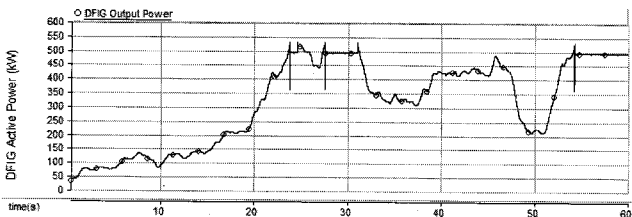
그림 12 연료전지 시스템 모델링  
Fig. 12 Fuel cell system modeling

4.2 Case study

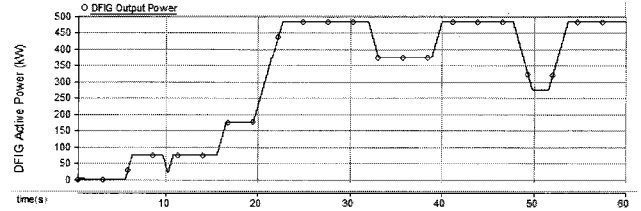
그림 13은 풍속 프로파일과 일반적인 DFIG의 경우, 히스테리시스를 이용한 출력 조정제어를 했을 때의 출력변화를 나타낸 것이다. 일반적인 운전의 경우에 바람의 변동에 따라 출력변동이 심한 것과는 달리, 출력조정제어를 통한 DFIG의 출력에는 미세한 변동의 출력이 조정되는 것을 알 수 있다. 허용치 이하의 변화에서 일정한 값을 유지하고, 허용치 이상에서는 출력이 변동하되 0.2 pu/sec의 Rate limiter로 인해 계단응답으로 동작하지 않는다[6]. 본 논문의 모든 시뮬레이션은 그림 13의 동일 풍속 프로파일과 출력조정제어를 사용한 DFIG 출력변화를 이용하였으며, 이를 바탕으로 제안된 운영방법을 검증한다.



(a) 풍속 프로파일



(b) 일반적인 DFIG의 출력 변화

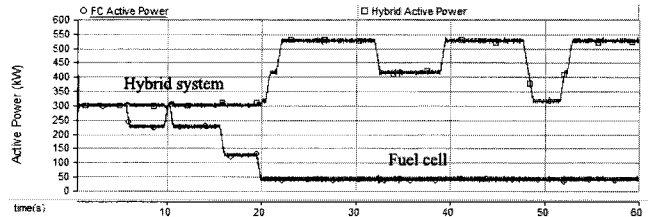


(c) 출력조정제어에 의한 DFIG 출력 변화

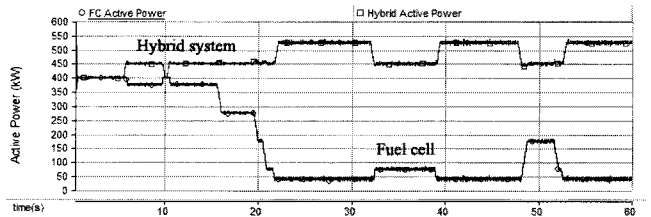
그림 13 풍속 프로파일과 DFIG의 출력  
Fig. 13 Wind profile and output power of the DFIG

A. Case 1

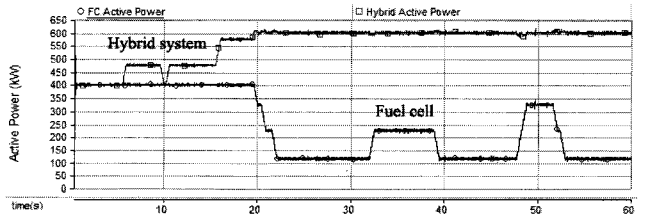
DFIG의 용량이 연료전지 시스템의 용량보다 큰 경우를 모의하기 위해 연료전지 최대출력( $P_{fc}^{max}$ )이 400kW인 연료전지 시스템을 사용하였다. 세 가지 영역에서 출력범위를 가지기 위해 임의로 하이브리드 시스템 출력설정 값( $P_{hybrid}$ )을 300, 450, 600kW로 설정하였다.



(a)  $P_{hybrid}$ 가 300kW일 때, 출력변화



(b)  $P_{hybrid}$ 가 450kW일 때, 출력변화



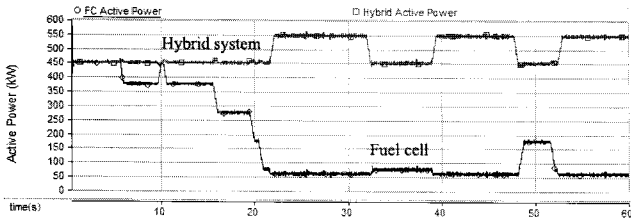
(c)  $P_{hybrid}$ 가 600kW일 때, 출력변화

그림 14 Case 1의 경우, 하이브리드 및 연료전지 시스템 출력 변화

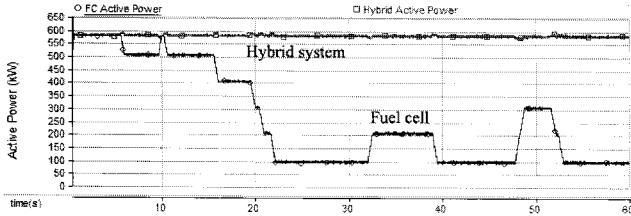
Fig. 14 Hybrid system and fuel cell active power at case 1

B. Case 2

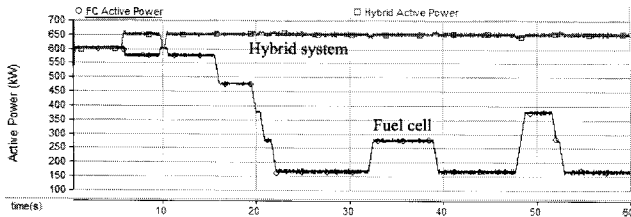
Case 2에서는  $P_{fc}^{max}$ 가 600kW인 연료전지 시스템을 사용했으며,  $P_{wind}^{max}$ 와  $P_{fc}^{min}$ 의 합이 560kW로  $P_{fc}^{max}$ 보다 작은 경우를 모의하였다. 세 가지 영역에서 출력범위를 가지기 위해 임의로 하이브리드 시스템 출력설정 값을 450, 580, 650kW로 설정하였다.



(a)  $P_{hybrid}$ 가 450kW일 때, 출력변화



(b)  $P_{hybrid}$ 가 580kW일 때, 출력변화



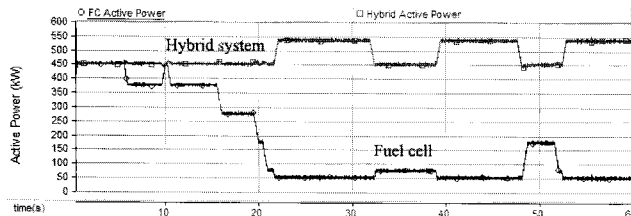
(c)  $P_{hybrid}$ 가 650kW일 때, 출력변화

그림 15 Case 2의 경우, 하이브리드 및 연료전지 시스템 출력 변화

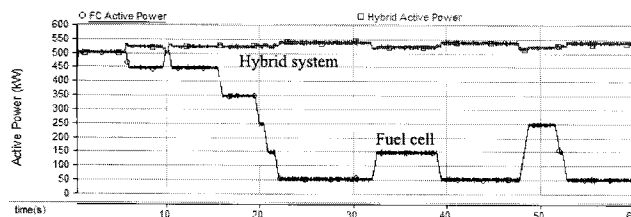
Fig. 15 Hybrid system and fuel cell active power at case 2

C. Case 3

Case 3에서는  $P_{fc}^{max}$ 가 500kW인 연료전지 시스템을 사용했으며,  $P_{wind}^{max}$ 와  $P_{fc}^{min}$ 의 합이 550kW로  $P_{fc}^{max}$ 가 이보다 작은 경우를 모의하였다. 세 가지 영역에서 출력범위를 가지기 위해 임의로 하이브리드 시스템 출력설정 값( $P_{hybrid}$ )을 450, 520, 600kW로 설정하였다.

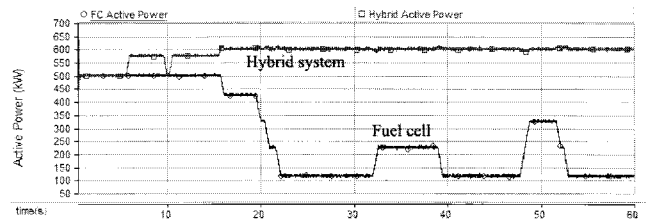


(a)  $P_{hybrid}$ 가 450kW일 때, 출력변화



(b)  $P_{hybrid}$ 가 520kW일 때, 출력변화

출력변동 저감 및 출력범위 예측 향상을 위한 풍력-연료전지 하이브리드 시스템의 운영방법



(c)  $P_{hybrid}$ 가 600kW일 때, 출력변화

그림 16 Case 3의 경우, 하이브리드 및 연료전지 시스템 출력 변화

Fig. 16 Hybrid system and fuel cell active power at case 3.

4.3 결과 분석

표 4 시뮬레이션 결과 (kW)

Table 4 Results of simulation (kW)

분류	$P_{fc}^{max}$	$P_{fc}^{min}$	$P_{hybrid}$	출력 범위
Case 1	400	40	300	300~540
			450	400~540
			600	400~600
Case 2	600	60	450	450~560
			580	580
			650	600~650
Case 3	500	50	450	450~550
			520	500~550
			600	500~600

시뮬레이션 결과 값을 정리하면 표 4와 같다. 시뮬레이션 결과와 그림 14~16을 살펴보면, 제한한 하이브리드 시스템 운영 기법을 통해 풍력-연료전지 하이브리드 시스템의 순시적인 출력변동이 저감됨과 예측 가능한 범위 내에서 운전할 수 있다. 500kW 풍력발전의 출력범위는 0~500kW이지만 제한된 연료전지와 하이브리드 결합 및 운영방법을 통해서 값을 줄일 수 있다. 출력범위는 풍력과 연료전지시스템의 용량, 하이브리드 시스템 출력 설정 값에 따라서 결정된다. 용량선정에 중요한 변수는 연료전지의 용량( $P_{fc}^{max}$ ) 그리고 풍력발전의 용량과 연료전지시스템의 최소출력 값의 합 ( $P_{wind}^{max} + P_{fc}^{min}$ )이며, 각 경우별 비교를 통해서 이 값들의 대소 관계에 따라 출력변동 패턴이 달라짐이 증명된다.

출력변동 측면에서 Case 2-II에서의 운전은 풍력발전의 출력이 변함에도 불구하고 연료전지 시스템이 변동 폭을 다 보충 할 수 있으므로 일정한 출력(580kW)으로 운전할 수 있고, 모든 경우와 비교 시 출력변동이 가장 작으므로 출력범위 예측성이 가장 높다. 그러므로 출력변동을 최소화하기 위해서는 Case 2의 경우처럼 연료전지의 용량이 최소  $P_{wind}^{max} + P_{fc}^{min}$  (560kW)보다 큰 기기를 사용하는 것이 좋으며, 하이브리드 출력 설정 값을 II의 영역인  $P_{wind}^{max} + P_{fc}^{min} \sim P_{fc}^{max}$  (560~600kW)범위나 혹은 다른 영역(I, III)일 때 최대한 이 값에 가깝게 설정하도록 하면 된다. 하지만 연료전지의 용량이 이보다 작은 경우(Case 1, 3)에는 최대한  $P_{wind}^{max} + P_{fc}^{min}$  (540, 550kW)에 가까울수록 최소출력범위를 가지게 되며, 출력범위에 대한 예측성도 마찬가지로 그 값에 근접하면 할수록 향상 된다.

각 영역별(I, II, III) 하이브리드 시스템 출력 설정 값

( $P_{hybrid}$ )에 따라 하이브리드 시스템 운영 포인트를 달리할 수 있다. 운영자가 출력변동 저감에 운영 포인트를 둔다면  $P_{hybrid}$ 를 II 영역에서 둘 때 최대한 효과를 볼 수 있으며, 출력변동 저감과 연료전지의 발전단가를 고려한다면 상대적으로 연료전지의 출력을 최소화해서 운전하는 I 영역에 둘 때 효과를 볼 것이다. 마지막으로 최대한 많은 출력을 필요로 할 때 III 영역에  $P_{hybrid}$ 를 두어 운영하면 된다.

### 5. 결 론

연료전지는 제어가 쉽고, 연속운영과 대용량 설치가 가능하기 때문에 풍력발전의 출력 보상용으로써 적합하다. 본 논문은 풍력-연료전지 하이브리드 시스템의 구조와 출력 범위의 최소화 및 예측성을 향상시키는 운영방법을 제안하였다. 풍력발전(DFIG)의 다변화한 출력변동은 1차적으로 히스테리시스를 이용한 출력조정제어 방법을 통해 최소화 하였으며, 느린 출력변동은 연료전지(PEMFC)를 이용하여 출력변동을 저감 시키도록 하였다. 그리고 하이브리드 설정 값에 따른 출력설정 범위 및 예측 범위를 분류하고 이를 최소화 하는 방법을 제안하였다. 이를 검증하기 위해 PSCAD/EMTDC를 기반으로 DFIG, PEMFC, DC/AC 인버터, DC/DC 컨버터를 모델링하였으며, 이를 이용하여 AC버스에 커플링 된 풍력-연료전지 하이브리드시스템을 구축하였다.

본 논문이 제안한 풍력-연료전지 하이브리드 시스템의 운영 방법을 통해서 출력범위의 최소화 및 출력범위의 예측성 향상을 가능하게 하기 때문에, 도서 산간의 소규모 고립계통에서 풍력-연료전지 하이브리드 시스템을 통해 안정적인 전력공급을 가능하게 한다. 또한 계통 운영을 여유롭게 하기 때문에 출력변동으로 인해 풍력발전의 설치용량이 제한되는 지역에서 풍력발전의 설치규모 확대를 가져올 수 있을 것으로 예측된다.

### 감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2006-D00191)

### 참 고 문 헌

[1] T.Senju, T. Nakaji, K.Uezato and T.Funabashi, "A Hybrid Power System Using Alternative Energy Facilities in Isolated Island", IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 20, Issue 2, pp. 406-414, June 2005.  
 [2] W.Carter and B.M.Diong, "Model of a Regenerative Fuel Cell-Supported Wind Turbine AC Power Generating System", IEEE IAS Annual meeting, vol.4, pp. 2778-2785, Oct. 2004.  
 [3] R. Pena., J.C.Clare., and G. M. As her., "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable speed wind-energy generation", IEE Proc.-Electr. Applic. Vol. 143, No. 3, pp. 231-241, May 1996.

[4] S. Muller, M. Deicke, and R. W. De Doncker, "Doubly fed induction generator systems for wind turbines: A viable alternative to adjust speed over a wide range at minimal cost", IEEE Ind. Appl. Mag., pp. 26-33, May/June 2002.  
 [5] R. S. Pena, R. J. Cardenas, J. C. Clare, and G. M. Asher, "Control strategies for voltage control of a boost type PWM converter", 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, vol. 2, pp. 730-735, 2001.  
 [6] Young-ho Park and Seung-il Moon, "A New Control Scheme to Regulate the Active Power Output of a Doubly Fed Induction Generator in Changing Wind Speed", M.S. thesis, Electrical Eng. Seoul National Univ., Seoul, Korea, 2007.  
 [7] J. Larminie and A. Dicks, *Fuel Cell Systems Explained*, New York, Wiley, 2003.  
 [8] C. Wang, M. H. Nehrir, and H. Gao, "Control of PEM Fuel Cell Distributed Generation Systems", IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 21, Issue 2, pp. 586 - 595, June 2006.  
 [9] R. H. Lasseter, "Control and design of microgrid components", PSERC Final Project Report, Jan. 2006.

## 저 자 소 개



### 김 윤 성 (金 潤 成)

1982년 5월 26일 생. 2008년 인하대학교 전기공학과 졸업. 2008년 ~ 현재 동 대학원 전기공학부 석사과정



### 문 대 성 (文 大 成)

1980년 2월 13일 생. 2006년 전문대학교 물리학과 졸업. 2007년 ~ 현재 인하 대학원 전기공학부 석사과정



### 원 동 준 (元 東 俊)

1975년 1월 1일 생. 1998년 서울대 전기공학부 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 2004년 동 공학연구소 연구원. 2005년 ~ 2006년 미국 University of Washington, APT Center 연구원. 2006년 ~ 현재 인하대학교 전기공학부 교수.