

스마트그리드를 위한 신재생에너지원과 하이브리드시스템 모델링

(Renewable Source and Hybrid System Modeling for Smart Grid)

조재훈* · 홍원표 · 전명근

(Jae-Hoon Cho · Won-Pyo Hong · Myung-Geun Chun)

Abstract

Recently, smart grid for solving energy problems have been receiving growing attention. Also, renewable energy sources such as photovoltaic and fuel cell as future energy for realizing smart grid have been widely studied. On the other hand, hybrid structures have been proposed since the output power of these renewable energy sources is usually dependent on weather conditions. This paper proposes a hybrid system involving a proper photovoltaic in the hybrid system, Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell with water electrolyzer and ultracapacitor. The results of simulation and output of the proposed model are established and analysed by Matlab/Simulink and SimPowerSystems.

Key Words : Smartgrid, Renewable Energy, Photovoltaic, Fuel Cell, Hybrid System

1. 서 론

전기적 에너지의 수요는 기술 발전, 인구의 증가 및 화석 에너지의 고갈과 도시의 대기오염, 국제적 환경 변화와 같은 환경적 고려요소들에 의해서 계속적으로 증가하고 있다. 스마트 그리드는 이런 문제점들을 해결하기 위한 대안으로 가장 주목을 받는 기술이며 하나의 독립된 기술로 정의되기보다 에너지의 소비와 탄소배출을 제어할 수 있는 전력망과 정보통신의 융합기술로서 정의된다[1].

스마트그리드를 실현하기 위한 기술로서 신·재생

에너지원들이 많은 관심을 받고 있다. 신재생에너지원의 운전은 크게 계통연계형과 독립형으로 나뉘질 수 있고 최근에는 환경문제에 대응하기 위하여 요구 부하전력을 신재생에너지원과 저장장치들만을 이용하여 공급하는 독립형 운전에 대한 연구가 크게 증가하고 있다[2]. 독립형 운전에서는 요구부하전력에 대한 신재생에너지원의 비중이 크기 때문에 신재생에너지원의 안정적인 전력공급이 요구되어진다. 이런 요구에도 불구하고 신재생에너지원의 대표적인 태양광과 풍력발전 시스템의 비중이 크게 증가하지 못하는 이유는 외부 환경에 크게 영향을 받는 단점 때문이다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 태양광 및 풍력 시스템들은 다른 전력원들이나 배터리 또는 울트라캐패시터(Ultracapacitor : UC)와 같은 에너지 저장장치와 결합된 형태로 구성된다. 태양광 시스템과 UC의 조합은 높은 효율, 빠른 부하 응답, 다른 신재생 에너지원들간

* 주저자 : 충북대학교 전기공학과 박사과정

Tel : 042-821-1712

E-mail : mmi8988@lycos.co.kr

접수일자 : 2010년 7월 11일

1차심사 : 2010년 7월 16일

심사완료 : 2010년 10월 21일

의 유연한 결합구조들 때문에 최근 많은 연구들이 진행되어지고 있다[2-4].

Uzunoglu 등은 주거용으로 적합한 태양광시스템(Photovoltaic : PV), 고분자연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell : PEMFC)와 울트라캐패시터(Ultracapacitor : UC)가 융합된 구조를 제안하였고, 특히 PEMFC는 개질기(reformer) 모델을 사용하였으며, 태양광 시스템, 수소저장장치(hydrogen tank)를 포함하는 하이브리드모델을 제안하였다[5]. 여기서 사용된 태양광시스템은 일반적인 수학적 모델을 사용하였으며, PEMFC의 손실에 대한 비선형 성분을 최대한 간략한 형태로 표현하였다.

한편 신재생에너지원과 주변장치와 같은 전기적 모델들을 시뮬레이션 하기 위하여 PSIM, PSCAD와 같은 다양한 전력용 시뮬레이션 툴들이 사용되어져 왔다[6-7]. 그러나 하이브리드 시스템과 같은 다른 물리량들을 포함하는 시스템들의 시뮬레이션에서는 더 융통성 있는 시뮬레이션 툴들이 필요하다. 최근에는 다양한 물리량과 기계 및 전기 시스템을 모델링할 수 있고 제어알고리즘 개발에 편리한 Matlab/simulink와 Maltab사의 전력용 툴인 SimPowerSystems을 이용한 시뮬레이션 기법이 많은 사용되어지고 있다[4-5].

따라서 본 논문에서는 시뮬레이션에 적합한 태양광 시스템을 보간법(interpolation)과 2D-Lookup 테이블을 이용하여 모델링하고 간략화된 구조의 PEMFC 모델과 시스템의 효율을 위해서 UC 모듈을 병렬로 연결하여 과도상태와 순간부하전력 요구량을 만족하도록 시뮬레이션 모델을 구성하였다. 개발된 개별 모델들을 융합하여 독립형 PV/FC/UC 하이브리드 시스템으로 구성하고 각 모델의 파라미터들은 실제시스템에서 사용하는 값들을 이용하여 출력 특성들을 분석하였다. 제안된 하이브리드 시스템에서 주전원으로 사용되는 PV시스템의 출력 특성과 다른 장치들의 출력특성들을 쉽게 평가하기 위하여 시스템에 연결된 부하는 5[kW]의 특정 고정부하전력으로 가정하였다.

시뮬레이션 모델은 PV/FC/UC 복합시스템의 성능 분석 뿐 아니라 임의의 기상조건에서 부하요구전력에 추종할 수 있는 시스템의 용량설계에 사용될 수 있고 특히 PV 시스템과 UC 그리고 연료전지의 동적

모델은 제작사들의 스펙에 맞게 수정하여 적용가능하며 쉽게 특성을 파악할 수 있다. 또한 개발된 모델을 이용하여 스마트그리드용 하이브리드시스템의 전체 성능을 평가할 수 있고, 각각의 발전기와 구성요소들의 동적모델들은 좋은 성능을 가지는 하이브리드구조를 개발하기 위하여 다양한 형태로 결합될 수 있다. 모델링과 시뮬레이션은 MATLAB, simulink와 SimPowerSystems 패키지를 이용하였으며 시뮬레이션 결과들을 통해 제안된 시스템의 효율성과 타당성을 확인하였다.

2. 태양광 시스템

태양광 시스템은 지구상에 도달하는 태양에너지를 태양전지(solar cell)라 불리는 광전변환소자로부터 발생되는 광기전력을 이용하여 태양의 빛에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 발전 방식이다. 태양전지는 일반적으로 p형 반도체와 n형 반도체의 접합형태를 가지며 그 기본구조는 다이오드와 동일하다. 태양광선이 태양전지에 입사되면 태양광 에너지에 의해 전자와 정공이 이동하여 n층과 p층을 각각 음극과 양극으로 대전시키는 광기전력효과(Photovoltaic Effect)에 의해서 전압이 유기된다[8]. 태양전지 모델링을 위해서는 태양전지의 등가모델이 필요하며 그림 1과 같이 간단하고 비교적 오차가 적은 1개의 다이오드와 직렬저항을 가진 등가모델이 많이 사용된다[9].

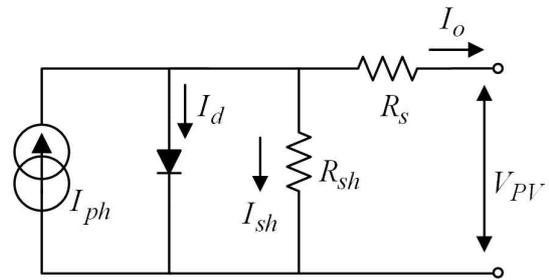


그림 1. 태양전지 등가회로.
Fig. 1. Equivalent circuit for photovoltaic

부하로 전달되는 전류는 아래 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 수식 (1)에서 광기전류 I_{ph} 는 수식 (2)로 표현

할 수 있고 다이오드전류 I_d 는 수식 (3)으로 표현된다. 또한 분권전류 I_{sh} 는 수식 (4)로 표현된다.

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

$$I_{ph} = I_{sc}S_N + I_t(T - T_{ref}) \quad (2)$$

$$I_d = I_o \left(e^{\left(\frac{q(V_{PV} + I_{PV})}{akT} \right)} - 1 \right) \quad (3)$$

$$I_{sh} = \frac{V_{PV} - I_{PV}R_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

태양전지는 일반적으로 단일 셀이 직렬로 연결된 형태의 태양전지 모듈로 제작되고, 적용부하에서 요구되는 전압과 전류 및 용량을 얻기 위하여 직·병렬로 연결하여 태양전지 어레이형태로 구성한다. 시뮬레이션 모델에서 태양전지 어레이는 전류원으로 모델링되고 출력 전류는 위 수식들을 이용하여 아래와 같이 표현 된다.

$$I_{PV} = [I_{sc}S_N + I_t(T - T_{ref})] - [I_o(\exp([q(V_{PV} + I_o)/\alpha kT] - 1))] - \frac{V_{PV} - I_{PV}R_s}{R_{sh}} \quad (5)$$

위 식 (1)~(5)에서 사용된 전체 변수는 아래와 같다.

- α 이상계수
- I_o 역포화 전류[A]
- I_{PV} 태양전지 출력전류 [A]
- I_{ph} 광기전류[A]
- I_{sc} 단락전류 [A]
- I_{sh} 분권전류(Shunt current)
- I_d 다이오드 전류[A]
- I_t 단락전류온도계수(2.3×10^{-4} [A/K])
- k 볼츠만 상수 [J/_K]
- N_p 셀의 병렬연결 수
- N_s 셀의 직렬연결 수
- q 전하의 전하량 [C]

- R_s 직렬저항[Ω]
- R_{sh} 내부 병렬저항(Shunt resistance)[Ω]
- T 셀의 온도 [K]
- T_{ref} 셀 기준온도[K]
- V_{oc} 개방전압 [V]
- V_{PV} 태양전지 단자전압 [V]
- S_N 표준일사량

제조자들의 데이터시트를 통하여 수식 (5)에서 필요한 파라미터들의 정보를 얻을 수 있고 본 논문에서 사용된 태양광 어레이의 파라미터 값은 표 1과 같다.

표 1. 태양광 어레이의 파라미터 [5]
Table 1. Parameters of PV array

PV system Parameters	Values
The number of series cells per string (N_s)	105
The number of parallel cells per strings (N_p)	148
Ideality or completion factor (α)	1.9
Boltzmann's constant (k)	1.3805e23 [J/K]
PV cell temperature (T)	298 [K]
Electron charge (q)	1.6e-19 C
Short-circuit cell current (I_{sc}) (A)	2.926
PV cell reverse saturation current (I_o) (A)	0.00005
Series resistance of PV cell (R_s) (Ω)	0.0277

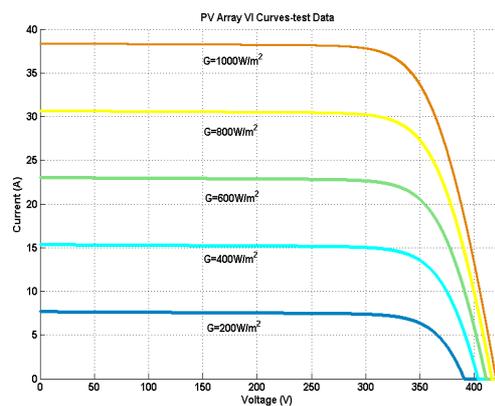


그림 2. PV모듈의 일사량 변화에 따른 I-V 특성 (G : 일사량)
Fig. 2. Characteristic curve of current and voltage according to irradiance

시뮬레이션을 위하여 본 논문에서는 시뮬레이션 시간과 데이터 저장의 효율성을 위하여 Matlab Toolbox에서 제공되는 2D Lookup 테이블과 SimPowerSystems에서 제공하는 전류제어 전압원(Controlled Current Source)을 이용하여 태양광 어레이를 모델링 하였다. 태양광 어레이의 출력을 2D Lookup 테이블로 생성하기 위하여 그림 2와 같이 다른 일사량(Irradiance)에서 태양광어레이의 I-V 값을 이용하였다.

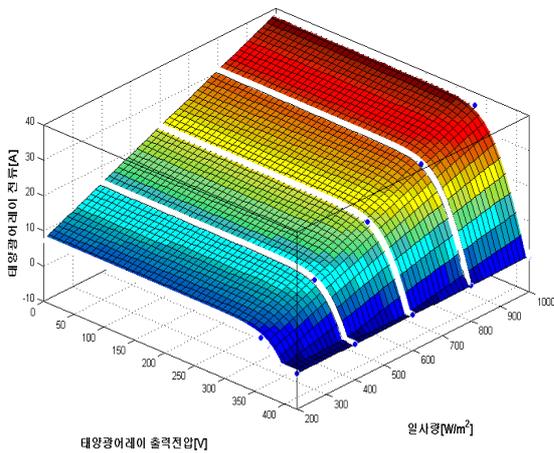


그림 3. 가변 일사량에 대한 태양광어레이의 3차원 특성
Fig. 3. 3D characteristic of PV array for variable irradiance

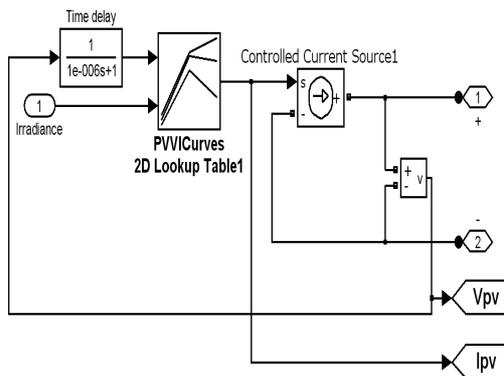


그림 4. PV 어레이의 Matlab Simulink 모델
Fig. 4. Matlab simulink model for PV array

그림 3은 그림 2의 데이터를 사용하여 생성된 2D Lookup 테이블을 3차원으로 나타내었으며, 그림 4는

그림 3에서 생성된 2D Lookup 테이블과 전류제어 전압원(Controlled Current Source)을 이용한 태양광 어레이의 Simulink 모델이다. 2D Lookup 테이블의 입력은 일사량과 태양광 어레이의 출력 전압이다. 출력 전압은 초기 I_{pv} 값을 계산하기 위하여 초기 값을 가지는 시지연 전달함수를 통하여 피드백 된다.

3. 고분자연료전지(PEMFC) 모델링

3.1 고분자연료전지(PEMFC) 모델링

연료전지 발전 시스템은 기존의 에너지 변환 방식에 비하여 고효율, 무공해, 무소음의 열병합 발전시스템으로서 연료로 수소를 사용하여 전기 화학적 반응에 의하여 전기를 생산하는 방법으로 특히 환경 친화적이라는 측면에서 그 중요성이 커지고 있다. PEMFC는 내부의 화학적 반응과 열적 동특성 반응 및 주변 기계적 보조 장치들의 동작특성 때문에 느린 동특성을 가지며, 이런 동특성은 연료전지를 적용한 단독운전, 계통연계 운전 및 복합에너지시스템 운전에서 연료전지 정상상태 특성을 평가하기 위한 중요한 요소가 된다.

일반적인 연료전지의 동적모델은 Nernst 모델과 활성화분극, 저항분극, 농도분극, 내부전류손실 등에 의한 전압강하와 전류밀도에 따라 출력전압이 비선형적으로 변화되는 특성을 반영해야 한다. 또한 RC 1차 시지연함수로 모델링 되는 Charge Double Layer 동특성 및 부하급변 시 나타나는 순간적인 전압강하와 같은 동특성이 포함되어야 한다. 본 논문에서는 PEMFC을 모델링 하기 위하여 전기화학반응식을 이용하였으며 MATLAB/Simulink와 SimPowerSystems Tool을 이용하여 시뮬레이션 모델을 설계하였다. PEMFC에서 수소가스의 몰유동(molar flow)과 채널내의 부분 수소압력의 관계는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{q_{H_2}}{p_{H_2}} = \frac{K_{an}}{\sqrt{M_{H_2}}} = K_{H_2} \quad (6)$$

여기서 q_{H_2} 는 수소의 입력몰유동 K_{an} 은 애노드

(anode)의 밸브 상수, p_{H_2} 는 수소분압, M_{H_2} 는 수소물질량, K_{H_2} 는 수소밸브 몰상수이다. 수소물유동에는 3가지 중요한 인자 즉, 수소입력유동 $q_{H_2}^{input}$, 수소출력유동 $q_{H_2}^{out}$, 그리고 반응수소유동 $q_{H_2}^r$ 이 있으며 이 3가지 인자의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} p_{H_2} = \frac{RT}{V_{an}} (q_{H_2}^{input} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r) \quad (7)$$

수소유동과 PEMFC전류의 기본적인 전기화학적 관계에 의하여 수소반응속도는 다음 식으로 주어진다.

$$q_{H_2}^r = \frac{N_o N_s I_{FC}}{2F} = 2K_r I_{FC} \quad (8)$$

위의 두식을 이용하여 라플라스변환을 적용하여 수소부분압력을 S 도메인으로 나타내면 식 (9)와 같다.

$$p_{H_2} = \frac{1/K_{H_2}}{1 + \tau_{H_2} s} (q_{H_2}^{input} - 2K_r I_{FC}) \quad (9)$$

여기서 수소의 시정수 τ_{H_2} 는 식 (10) 같이 표현되며

$$\tau_{H_2} = \frac{V_{an}}{K_{H_2} RT} \quad (10)$$

수소입력유동 $q_{H_2}^{input}$ 는 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_{H_2}^{input} = \frac{N_o N_s I_{FC}}{2FU} \quad (11)$$

유사한 방법으로 물부분압력과 수소부분압력을 식 (12)~(14)로 각각 나타낼 수 있다.

$$p_{H_2O} = \frac{1/K_{H_2O}}{1 + \tau_{H_2O} s} 2K_r I_{FC} \quad (12)$$

$$p_{O_2} = \frac{1/K_{O_2}}{1 + \tau_{O_2} s} (q_{O_2}^{input} - K_r I_{FC}) \quad (13)$$

$$q_{O_2}^{input} = \frac{N_o N_s I_{FC}}{2FUr_{H-O}} \quad (14)$$

위 식에서 수소-산소유동비율 r_{H-O} 는 산소유동비율을 결정하고 연료 이용율 U 를 이용하여 연료의 흐름으로 모델링 된다. PEMFC에 대한 분극곡선은 Nernst 전압, 활성화분극 η_{act} , 저항분극 η_{ohmic} , 및 농도분극의 합으로부터 얻을 수 있다.

분극은 전기적 관점에서 전압의 손실로 생각될 수 있고 이런 손실은 농도분극에 비해 활성화분극과 저항분극이 크기 때문에 농도분극을 생략한 모델들이

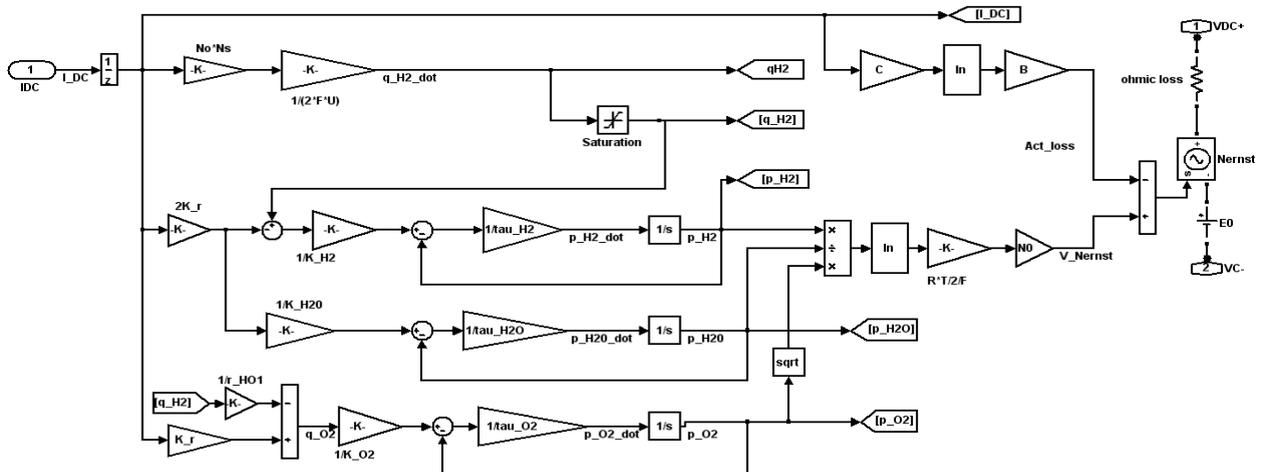


그림 5. PEMFC의 Matlab/simulink 모델
Fig. 5. Matlab/simulink for PEMFC

많이 사용된다.

일정온도 및 일정 산소농도를 가정하면 PEMFC의 출력전압은 활성화 분극과 저항 분극이 아래와 같을 때 식 (15)와 같이 표현된다.

$$\eta_{act} = B \ln(CI_{FC}), \eta_{ohmic} = R_{ohm} I_{FC}$$

$$V_{cell} = E - \eta_{act} - \eta_{ohmic} \quad (15)$$

위 식에서 Nernst 순시전압 E 는 다음과 같이 정의 된다.

$$E = N_o \left[E_o + \frac{RT}{2F} \log \left[\frac{p_{H_2} \sqrt{p_{O_2}}}{p_{H_2O}} \right] \right] \quad (16)$$

그림 5는 Matlab/simulink 와 SimPowerSystems의 전압제어 전압원(Controlled-Voltage Source)을 이용하여 설계된 PEMFC의 모델이다. 표 2는 본 논문에서 사용한 PEMFC의 파라미터들이다.

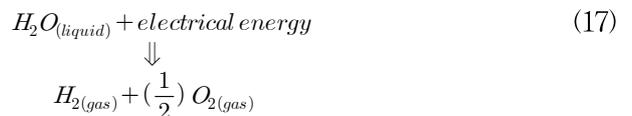
표 2. PEMFC의 파라미터
Tabel 2. Parameters of PEMFC

PEMFC Parameters	Values
Activation voltage constant (B)	0.04777 [A^{-1}]
Activation voltage constant (C)	0.0136 [V]
Faraday's constant (F)	96484600 [C/kmol]
Hydrogen time constant(τ_{H_2})	3.37 [s]
Hydrogen valve constant(K_{H_2})	4.22×10^{-5}
Hydrogen - oxygen flow ratio(r_{H-O})	1.168
Kr constant = $N_o/4F$	2.2802×10^{-7}
No load voltage (E_o)	0.8 [V]
Number of cells (N_o)	88
Number of stacks (N_s)	1
Oxygen time constant(τ_{O_2})	6.74 [s]
Oxygen valve constant(k_{O_2})	2.11×10^{-5}
FC system internal resistance(R_{ohm})	0.00303 [Ω]
FC absolute temperature(T)	343[K]
Universal gas constant (R)	8314.47 [J/(kmol K)]
Utilization factor (U)	0.8
Water time constant(τ_{H_2O})	18.418 [s]
Water valve constant(K_{H_2O})	7.716×10^{-6}

3.2 수전해시스템 모델(Electrolyzer Model)

수소에너지 제조원으로는 천연가스, LPG와 풍력, 태양광등의 신·재생에너지 및 원자력에너지를 이용하는 물 그리고 바이오매스 등을 이용할 수 있다. 이를 이용하는 제조 기술은 수증기개질, 부분산화, 열분해, 신재생에너지를 활용한 수전기분해, 광학적 또는 생물학적 수소제조방법이 있다. 수소 연료전지와 신재생 에너지원 하이브리드시스템은 태양광 및 풍력발전 시스템에서 전력수요 이상의 전력을 생산하는 경우에는 여분의 전력을 이용하여 수소를 생성하여 저장해 두었다가 태양광 및 풍력의 발전량이 전력수요보다 작은 경우에 연료전지를 이용하여 전력을 생산하여 전력수요에 대응하도록 하는 전력 생산 및 공급 시스템이다. 즉 수전해장치와 연계된 연료전지는 일종의 에너지 변환/저장 시스템으로서, 태양광 및 풍력으로부터 생산되는 전기를 수전해장치를 이용하여 물을 전기분해하여 수소형태로 저장해 두었다가 자연에너지를 이용한 발전이 불가능한 경우에 저장해둔 수소를 이용하여 전기를 발생하게 된다. 본 연구에서는 태양광을 이용한 수전해장치를 활용하여 연료전지에 필요한 수소를 생산할 수 있는 태양광-수소에너지 하이브리드시스템에 대하여 통합모델을 적용한 후 모의를 통하여 시스템의 성능을 분석하였다.

수전해질 사이에 분리된 두 전극사이에 전기를 통과시키면 물은 수소와 산소 성분으로 분해된다. 수전해장치의 전기화학적 반응은 다음 식으로 주어진다[8].



수전해모델은 아래와 같은 파라미터를 가지고 있다.

- F : Faraday 상수 [C/kmol]
- i_e : 수전해장치 전류[A]
- n_c : 직렬로 연결된 수전해장치 셀의 수
- η_F : Faraday 효율
- n_{H_2} : 초당생산된 수소 몰[mol/s]

패러데이 법칙에 따라 수전해 셀의 수소생산은 n_c 가 수전해셀의 직렬 연결 수, i_c 가 수전해시스템의 전류라 할 때 다음과 같이 표현된다.

$$n_{H_2} = \frac{\eta_F n_c i_c}{2F} \quad (18)$$

수전해장치의 실제와 이론적인 최대 생산량의 비율은 패러데이 효율이라 하며 수전해장치의 동작온도가 40 [°C]일 때 패러데이 효율은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\eta_F = 96.5 e^{(0.09/i_c - 75.5/i_c^2)} \quad (19)$$

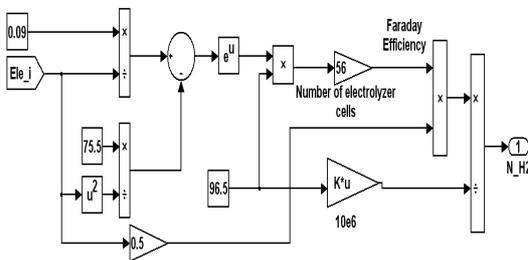


그림 6. 수전해장치의 Simulink 모델
Fig. 6. Simulink model for electrolyzer

두 식에서 수전해시스템은 40[°C]로 유지하기 위하여 독립적인 냉각시스템을 가지고 있다고 가정하면 간단한 수전해시스템의 모델을 구성할 수 있다. 태양 광발전시스템의 변동성으로 인하여 수전해시스템의 운전출력은 큰 변동범위를 가져야한다. 식 (18~19)에 의하여 그림 6과 같은 간단한 수전해장치의 simulink 모델을 설계하였다.

3.3 울트라캐패시터(Ultracapacitor: UC) 모델

울트라캐패시터(UC)는 독립적인 에너지 저장장치로서 배터리에 비해 순간부하전력에 대응 능력이 뛰어나기 때문에 에너지 저장뿐만 아니라 전력 백업 시스템으로 많은 각광을 받고 있다. 에너지를 이용하는 모든 분야에서 UC는 높은 파워밀도 및 우수한 충방전 특성으로 순시 피크파워공급 및 전원부하조절용으로

사용될 수 있어 에너지이용효율의 향상과 함께 전원 시스템의 능력을 최적화시켜 주는 매우 중요한 장치이다. UC는 적용 시스템의 용량과 전압을 맞추기 위하여 직·병렬로 연결하여 모듈형태로 사용되어진다. 하이브리드시스템의 안정적인 일정 전력공급원을 확보하기 위한 방안으로 UC 모듈을 DC 버스에 설치하여 하이브리드시스템의 운전특성을 분석하였다. 여기서 사용한 모델은 Maxwell technologies사[10]의 UC 모듈을 기준으로 하였다.

UCB의 수학적 모델링에 사용된 파라메타는 다음과 같다.

- C : 정전용량[F]
- $C_{UC-total}$: 전체 UC 정전용량[F]
- EPR : 등가병렬저항[Ω]
- ESR : 등가직렬내부저항[Ω]
- E_{UC} : UCB에 저장된 에너지양[Ws]
- n_s : 직렬로 연결된 캐패시터 수
- n_p : 병렬로 연결된 직렬스트링(string)의 수
- $R_{UC-total}$: 전체 UCB시스템 저항[Ω]

그림 7 은 UC의 등가회로를 나타낸 것이다. 모델은 정전용량[C], 방전과 충전저항을 나타내는 등가직렬 저항(ESR : Equivalent Series Resistance) 및 자연방전손실을 나타내는 등가병렬저항(EPR : Equivalent Parallel Resistance)로 구성되어 있다[11]. EPR은 누설효과를 모델링하는 것으로 UC의 장시간 에너지저장성능을 나타낸다. UC의 에너지양은 정전용량과 단자전압의 변화에 직접적으로 비례하며 다음과 같다.

$$E_{UC} = \frac{1}{2} C (V_i^2 - V_f^2) \quad (20)$$

- V_i : 방전시작 전 초기전압[V]
- V_f : 방전 후 최종전압[V]

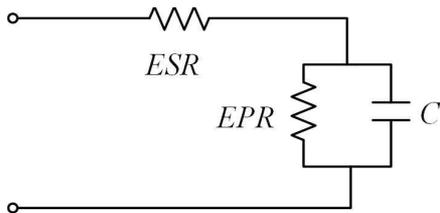
UC가 부하에서 요구되는 에너지를 공급할 때 UC의 전압은 감소하고 충전되면 전압은 높아진다. 따라서 식 (20)에서 알 수 있듯이 E_{UC} 는 UC의 전압 변화에

따라 비례적으로 감소 또는 증가한다. 시스템의 최대 출력 등을 고려하여 UC의 에너지 용량이 선정이 되어 하며 다양한 부하에 대한 UC의 에너지양은 여러 UC 를 연결한 UC모듈로서 충족시킬 수 있다. UC모듈의 단자전압은 모듈을 구성하기 위하여 직렬로 연결된 UC의 수에 의하여 결정하며 전체 정전용량은 병렬로 연결된 UC의 수에 의하여 결정된다. UC모듈의 전체 저항과 전체 정전용량은 식 (21)과 (22)로 나타낼 수 있다.

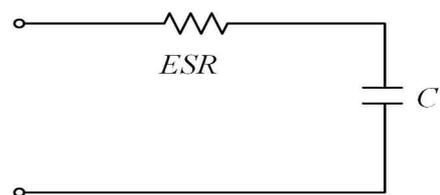
$$R_{UC-total} = n_s \frac{ESR}{n_p} \tag{21}$$

$$C_{UC-total} = n_p \frac{C}{n_s} \tag{22}$$

그림 7 (a)은 ESR을 포함하는 단일 울트라캐패시터 (UC)의 간략한 전기적 등가모델을 나타낸다. ESR은 UC의 자가방전효과를 나타낸다. 자가방전효과는 긴 시간의 실험이나 시뮬레이션에서는 동특성에 영향을 미치나 짧은 시간의 시뮬레이션에서는 ESR을 무시한 7 (b)의 간략모델이 많이 사용된다. 본 논문에서도 그



(a) ESR포함한 UC 간략 등가모델
(a) Simple UC equivalent model with ESR



(b) UC 간략 등가모델
(b) Simple UC equivalent model

그림 7. UC 간략 모델
Fig. 7. Simple UC equivalent mode

림 7 (b)의 간략모델을 사용하였다. 표 3은 본 연구에 서 사용된 UCB의 파라미터를 나타낸다.

표 3. 울트라캐패시터 모듈 파라미터
Tabel 3. Ultracapacitor module parameters

UC parameters	Value
Capacitance [F]	165
Internal series resistance (dc) [mΩ]	6.1
Leakage current [A]	0.0052, 72 h, 25 C
Operating temperature	40 C to 65 C
Voltage [V]	48.6
Short-circuit current [A]	4800
Power density [W/kg]	7900
Energy density [Wh/kg]	3.81

4. 신재생에너지원을 이용한 하이브리 드시스템의 모델링 및 시뮬레이션

4.1 신재생에너지원을 이용한 하이브리드 시스템

그림 8은 제안된 PV/PEMFC/UC 하이브리드 발전 시스템의 전체구성도이다. 부하에서 요구되는 전력을 유지하고, 에너지 저장 문제를 해결하기 위해서 전기 적 에너지는 수전해시스템을 통해 수소형태로 수소탱 크에 저장된다. 태양광 발전시스템에서 생산된 잉여 전력을 수전해시스템에 공급하여 수소를 생산하게 되 고, 생산된 수소를 이용하여 연료전지 시스템을 운전 한다. 이러한 운전모드에서 수소탱크와 수전해시스템 그리고 연료전지시스템은 에너지 완충기(buffer)로서 동작하기 때문에 일사량에 따라 출력 변동이 큰 태양 광 시스템의 전력을 보완하는 역할을 하게 된다. 제안 된 시스템의 전력관리(power management)를 위해서 각각의 에너지원들과 각각의 구성요소들의 입력과 출 력 전력들을 센싱하여 주제어기(Main Controller)의 입력으로 사용하고 주제어기는 이러한 입력 정보를 바탕으로 태양광 발전시스템, 연료전지 시스템, UC 모듈, 수전해시스템의 지령치를 계산하여 각각의 출력 및 전압 등을 제어하는 컨버터로 전달한다. 제안하는

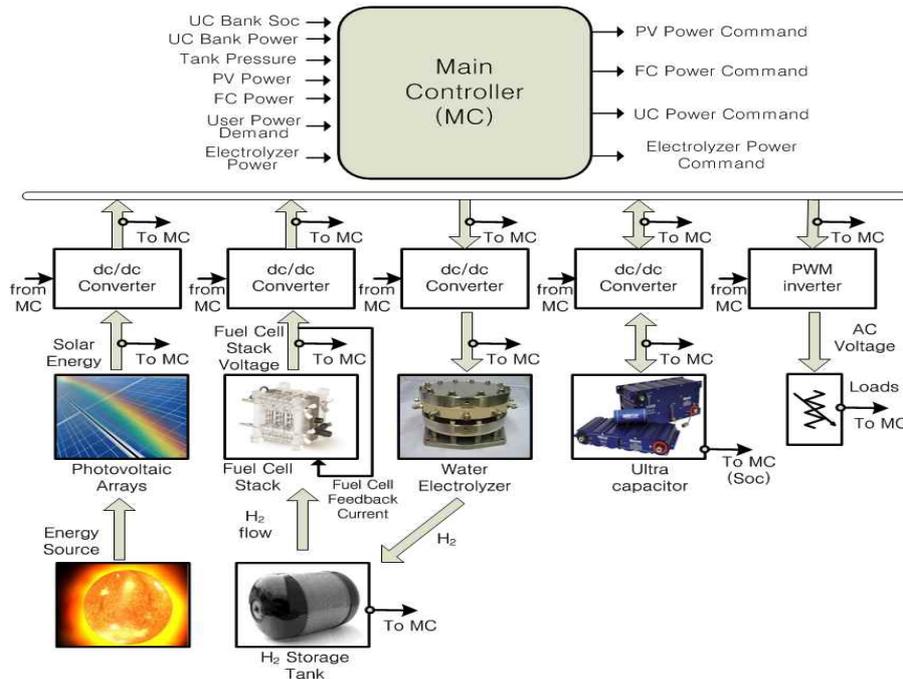


그림 8. 제안된 하이브리드 시스템
Fig. 8. Proposed hybrid system

시스템에서의 컨버터는 태양광 발전 시스템과 연료전지 시스템을 위한 승압형 DC/DC 컨버터, 수전해시스템을 위한 DC/DC 감압형 컨버터, UC 모듈을 위한 양방향 DC/DC 컨버터를 사용한다. 또한 AC 부하를 위하여 DC/AC 인버터를 사용한다.

그림 9는 제안된 전체시스템의 Matlab/simulink 블록도이다. 앞서 언급한 각각의 요소들을 모델링하여 하이브리드시스템을 구성하였다. 본 시뮬레이션에서 사용된 태양광 발전 시스템은 최고 일사량에서 최대 출력 12[kW]를 가지며, PEMFC는 5[kW]를 최대 출력 파워를 가진다. 수전해시스템의 정격은 10[kW]이며 시뮬레이션에 적용된 UC 모듈의 전류는 제조사 사양에 따라 최대전류 750[A]로 제한된다.

태양광시스템에 의해 생산된 전력은 PEMFC 또는 UC 모듈보다 우선적으로 부하에 공급된다. 태양광 시스템에서의 생산 전력이 부하 요구량보다 높을 경우 잉여 전력은 UC 모듈에 충전되고 UC모듈이 완전히 충전되면 나머지 전력은 수전해시스템에서 수소를 생산하는데 사용된다. PV 시스템에 의해 생산된 전

력이 부하 요구량보다 작을 때 PEMFC로부터 최대전력 5[kW]까지 전력을 공급받는다. 또한 부하요구량이 PV와 PEMFC의 합한 전력보다 더 클 때는 UC 모듈로부터 전력을 공급받는다. UC 모듈은 부족한 전력의 5[kW]까지 공급할 수 있고 또한, PEMFC가 전력을 공급하는 동안 느린 동특성 때문에 생기는 오차를 보상한다. 본 실험에서는 5[kW]의 고정부하를 사용하였으며, 태양광시스템은 승압형 DC-DC 컨버터를 이용하여 MPPT를 수행한다. 그림 10은 본 논문에서 사용된 전력관리 블록도이다. PEMFC의 동작은 스위치를 사용하여 온/오프 제어를 수행하였고 잉여전력들을 수전해시스템에서 사용하기 위하여 Electrolyzer_Controller에서 DC-DC 컨버터의 Duty를 제어하였다.

4.2 하이브리드시스템의 시뮬레이션

그림 11 (a)는 본 연구에서 사용된 태양광 시스템에 입력으로 들어가는 일사량 데이터이다. 일사량은 개

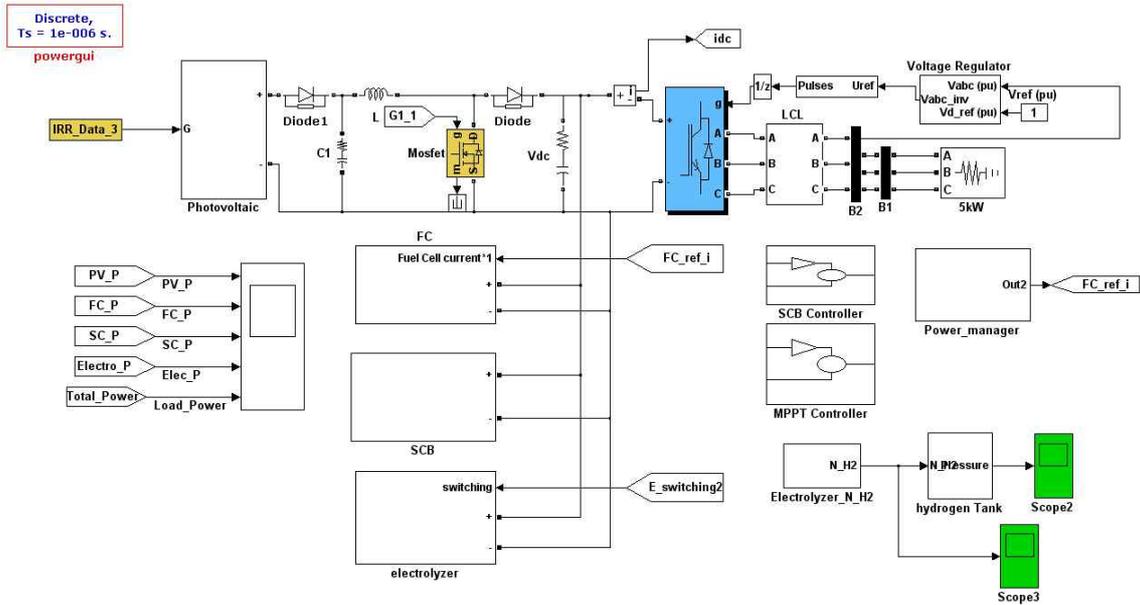


그림 9. 제안된 하이브리드 시스템의 Matlab/simulink 모델
 Fig. 9. Matlab/simulink model for proposed model

발된 모델의 동적특성들을 평가하기 위하여 최대 $20[W/m^2] \sim 800[W/m^2]$ 까지 변화하도록 임의로 구성하였으며, 특히 13:00~14:00 동안에는 날씨 영향으로 인한 일사량의 급격한 변화를 분석하기 위한 일사량 변화를 생성하였다. 그림 11 (b)는 태양광 시스템의 출력 전력을 나타내며 MPPT제어를 사용하여 최대출력 곡선이다. 여기서 일사량 변화가 급격한 구간에서의 최대출력에서 DC-DC컨버터의 제어가 잘 이루어

지지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 DC-DC컨버터 제어를 위한 PI제어기의 이득 값들이 일사량의 급격한 변화에 잘 대응하지 못하는 것을 볼 수 있다. 그림 11 (a)와 그림 11 (b)를 비교하면 개발된 시뮬레이션 모델이 일반적인 태양광 특성을 가지고 잘 동작하는 것을 볼 수 있다.

그림 12 (a)와 그림 12 (b)는 각각 연료전지의 출력 전력과 연료전지의 수소소비량을 나타낸다. PEMFC의 출력은 태양광시스템에서 발전된 전력량이 부하요구 전력보다 낮은 경우 우선적으로 부족전력을 공급해야 한다. 본 시뮬레이션에서 사용된 부하는 5[kW]의 일정부하를 사용하여 시뮬레이션을 하였기 때문에 그림 11 (b)에서 태양광에서 발전된 전력이 5[kW]를 넘지 못하는 구간에서는 부족한 전력에 대하여 연료전지가 공급하게 된다. 그림 11 (b)와 그림 12 (a)를 비교해 보면 연료전지가 부족분 전력에 대하여 잘 추종하고 태양광 시스템의 출력이 부하요구전력보다 높은 시간대에서는 동작하지 않는 것을 볼 수 있다. 그림 12 (b)에서는 연료전지가 부족분 전력을 채우기 위하여 동작될 때의 수소소비량 곡선을 나타내며 연료전지의

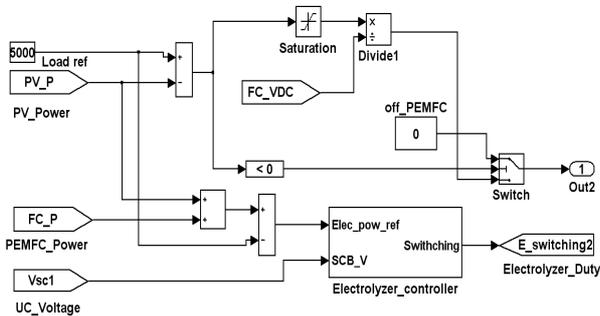
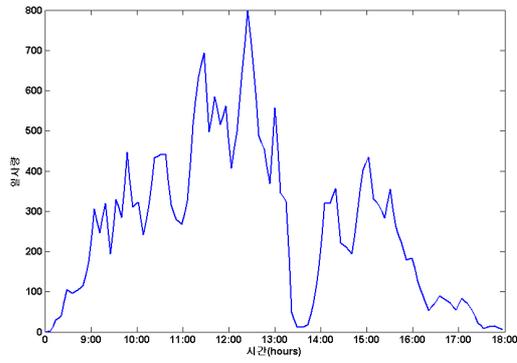
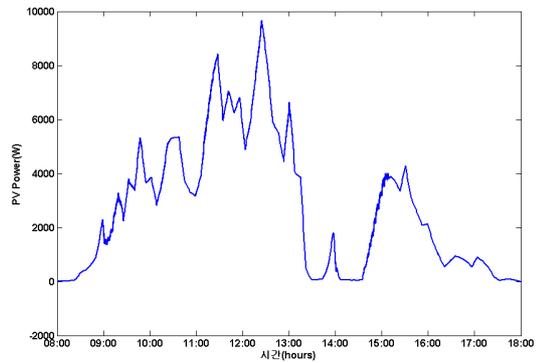


그림 10. 제안된 하이브리드 시스템의 전력관리 블록도
 Fig. 10. Block diagram of power management for proposed hybrid system

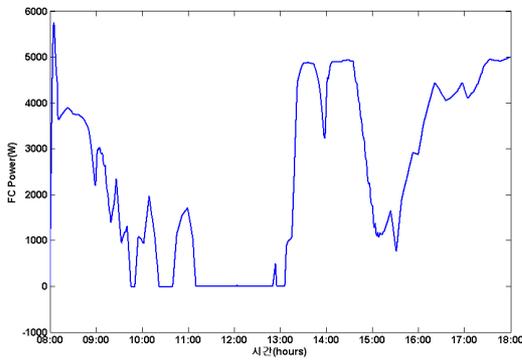


(a) 태양광 시스템을 위한 일사량 데이터(W/m^2)
 (a) Irradiance data for photovoltaic system

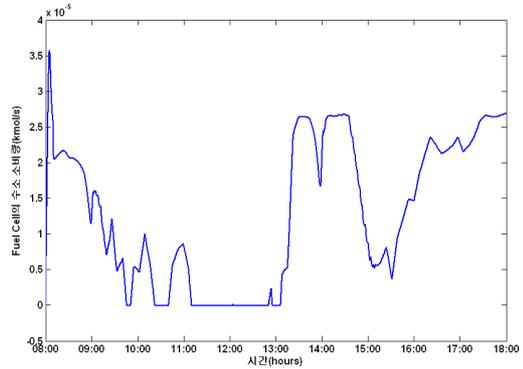


(b) 태양광 시스템의 출력 전력(W)
 (b) Output power of photovoltaic system

그림 11. 태양광시스템을 위한 일사량 데이터와 출력전력
 그림 11. Irradiance data and output power for PV system



(a) PEMFC의 출력 전력(W)
 (a) Output power of PEMFC



(b) PEMFC의 수소 소비량(kmol/s)
 (b) Consumed hydrogen of PEMFC

그림 12. PEMFC의 출력 전력과 수소소비량
 Fig. 12. Output power and the amount of the consumed hydrogen

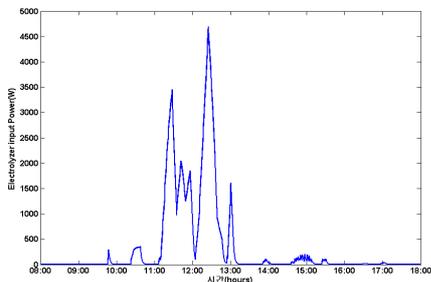


그림 13. 수전해시스템의 소비전력
 Fig. 13. Power consumption of electrolyzer

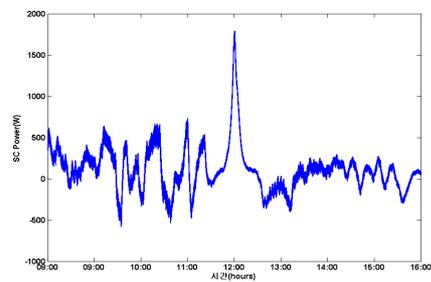


그림 14. UC모듈의 충·방전 전력
 Fig. 14. Charge/discharge power of UC module

동작에 비례하여 소비되는 것이 잘 모델링된 것을 볼 수 있다.

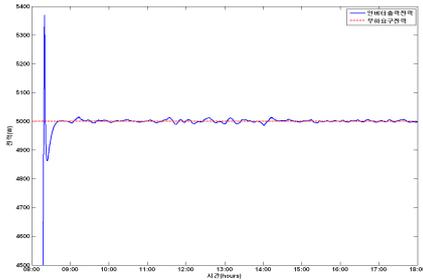


그림 15. 요구부하전력과 하이브리드 시스템의 출력
Fig. 15. Output power of hybrid system and load power

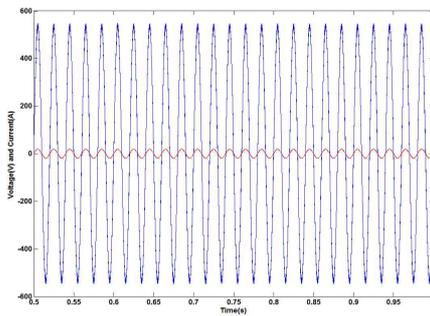


그림 16. 부하의 전압과 전류 파형
Fig. 16. Voltage and Current wave of load

그림 13은 수전해시스템의 소비전력을 나타낸다. 태양광시스템에서 발전된 전력이 부하에서 요구하는 전력 이상으로 발전될 때 잉여전력은 우선 수전해시스템에서 수소를 생산하는데 사용될 수 있다. 생산된 수소는 저장탱크에 저장되어 이후의 연료전지의 전력생산에 사용되게 된다. 그림 11 (b)와 그림 13을 비교해보면 태양광 발전 시스템의 출력이 요구 부하량 5[kW] 이상으로 발전되는 구간에서 동작되는 것을 볼 수 있다. 그림 14는 UC모듈의 충·방전 전력을 보여준다. 그림 14에서 UC모듈의 충·방전 전력은 부하요구량을 일정하게 충족시켜 주기 위해서 짧은 시간에서의 전력을 공급하고 저장한다. 가장 이상적으로는 수전해시스템에서 태양광 시스템의 잉여전력을 모두 사용하는 것이 좋으나, 수전해시스템과 연료전지의 느

린 동특성 때문에 순간적인 전력의 유지는 UC모듈이 담당하게 된다. 태양광의 출력이 최대일 때인 12:00~13:00에서 UC 모듈은 부하전력을 공급하고 잉여 전력은 충전하여 부하요구전력을 충족시키고, 태양광의 출력과 PEMFC의 출력이 급변하는 13:00~14:00 동안에는 충·방전을 교번으로 동작하여 부하에 일정전력이 공급되도록 한다. 그림 15에서는 요구부하전력과 제안된 시스템의 출력을 나타내었으며 그림 16은 부하의 전압과 전류파형을 보였다. 그림 15와 16에서 볼 수 있듯이 제안된 시스템이 비교적 안정적으로 부하전력을 추종하는 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

최근 스마트그리드의 실현을 앞당길 수 있는 기술로서 신·재생에너지원들에 대한 관심이 크게 급증하였다. 현재 신재생에너지원들을 포함하는 발전 시스템들이 계통연계형에서 많이 연구되어지고 있으나 선진국들을 중심으로 특정부하를 위한 독립형 신재생에너지원의 발전시스템들이 많이 연구되어지고 있다. 따라서 본 논문에서는 제안된 시스템을 이용하여 독립 모드에서 운전될 수 있는 PV/FC/UC 하이브리드 시스템의 운전특성을 분석하였다. 제안된 시스템의 운전은 태양광 시스템이 일사량이 충분한 동안에 부하에서 요구하는 전력을 공급하고 잉여 전력은 향후 전력 생산을 위하여 수소를 생산하는 수전해시스템(electrolyzer)공급하고 또는 UC모듈에서 충전을 한다. 태양광 발전시스템이 부하에서 요구되는 전력을 공급하지 못할 때 연료전지 시스템이 나머지 전력을 부하에 공급한다. 부하에서 요구하는 전력이 태양광 시스템과 연료전지 시스템의 최대 전력을 초과할 경우 UC 모듈에서 부족한 전력을 공급하고 또는 연료전지 시스템의 느린 동특성을 보상하는 기능도 함께 수행한다.

제안된 모델은 Matlab Simulink 와 전기·전자 시스템의 시뮬레이션이 가능한 SimPowerSystems을 기반으로 시뮬레이션을 수행하였다. 제안된 시스템의 운전 특성 및 각 장치들의 출력들의 변화를 쉽게 분석하기 위하여 가변되는 일사량 데이터와 5[kW] 고정부

하를 사용하였다. 시뮬레이션을 통하여 태양광 출력의 변화에 따른 잉여전력이나 부족분 전력을 수전해 장치, 연료전지, UC모듈의 동작들에 의하여 요구부하 전력에 잘 충족되는 것을 확인하였다. 향후 다양한 부하와 운전조건들에 대한 특성 분석 및 평가 등을 통하여 실제 시스템개발을 위한 시뮬레이션 모델로서 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgment

The authors would like to gratefully acknowledge the financial support of KESRI (Korea Electrical Engineering & Science Research Institute) under project R-2007-1-015-02

References

[1] Kyoungsoo R, Rahman S., "Two-loop controller for maximizing performance of a grid-connected photovoltaic-fuel cell hybrid power plant". IEEE Transactions Energy Conversion, Vol. 13, No.3, pp. 276 - 281, 1998.

[2] Uzunoglu M, Alam MS., "Dynamic modeling, design and simulation of a combined PEM fuel cell and ultra-capacitor system for stand alone residential applications". IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 21, No. 3, pp. 767 - 775, 2006.

[3] Blaabjerg F, Zhe C, Kjaer SB., "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, No. 5, pp. 1184-1194, 2004.

[4] El-Shatter TF, Eskandar MN, El-Hagry MT., "Hybrid PV/fuel cell system design and simulation". Renewable Energy Vol. 27, No. 3, pp. 479 - 485, 2002.

[5] M. Uzunoglua, O.C. Onara, and M.S. Alam, "Modeling, control and simulation of a PV/FC/UC based hybrid power generation system for stand-alone applications", Renewable Energy, Vol. 34, Issue 3, pp. 509-520, 2009.

[6] 최정식, 고재섭, 정동화, "일사량 변화를 고려한 PV 시스템의 개선된 P&O 알고리즘 개발", 조명·전기설비학회논문지 제24권 제4호, pp.166-176, 2010.

[7] 이계병, 손광명, 전인수, "계통 연계형 태양광 발전 시스템의 실 계통 적용을 위한 시뮬레이션 모델에 관한 연구", 조명·전기설비학회논문지 제22권 제6호, pp.70-78, 2008.

[8] 임희천, 안교상, "태양광 발전(Photovoltaic) 기술 동향", 전력전자학회지, 제8권, 제3호, pp.27-34, 2003.

[9] 최규영, 김중수, 이영국, 이병국, "MATLAB 기반의 PLECS를 이용한 태양광 모델링 및 발전시스템 개발", 대한전기학회 논문지, 제58호, 12권, pp. 2379-2384, 2009.

[10] Electric Double Layer Capacitor: BOOSTCAP Ultracapacitor. <http://www.maxwell.com/pdf/uc/datasheets/mc_power_series_48_1009365_rev3.pdf>.

[11] Spyker RL, Nelms RM, "Analysis of double-layer capacitors supplying constant power loads", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 36, No. 4 pp. 1439 - 1443, 2000.

◇ 저자소개 ◇



조재훈 (趙在勳)

1975년 5월 14일생. 2002년 한밭대학교 제어계측공학과 졸업. 2004년 한밭대학교 제어계측공학과 졸업(석사). 2005년~현재 충북대학교 제어계측공학과 박사과정.



홍원표 (洪元杓)

1956년 5월 15일생. 1978년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1989년 서울대학교 대학교 전기공학과 졸업(박사). 1979~1993년 한전전력연구원 선임연구원. 2007~2008년 UBC 방문교수. 현재 한밭대학교 건축설비공학과 교수. 본 학회 편수 이사.



전명근 (全命根)

1964년 7월 17일생. 1987년 부산대학교 전자공학과 졸업. 1989년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1993년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(박사). 2000~2001년 University of Alberta 방문교수. 1996년~현재 충북대학교 전자정보대학 제어로봇공학과 교수.