

태양광 · 연료전지 복합발전 시스템의 DC/DC 컨버터 제어 시뮬레이션

(DC/DC Converter Control for Photovoltaic/Fuel Cell Hybrid Generation system)

박소리*, 박상훈*, 원충연*, 정용채**, 김영렬***

(So Ri Park*, Sang-Hoon Park*, Chung-Yuen Won*, Yong-Chae Jung**)
(성균관대학교*, 남서울대학교**, 인양대학교***)

Abstract

This paper is proposed that the photovoltaic/fuel cell hybrid generation system for the stand-alone system. In case of the photovoltaic generation system, it depends on the weather condition, irradiation and so on... On the contrary, fuel cell has not this limitation. It can be interactive generation system between photovoltaic and fuel cell. This paper simulated stand-alone co-generation system based on the control of DC link.

Moreover, 1[kw] BLDC motor system with speed and hysteresis current controller is used for the proposed system.

1. 서론

최근 환경문제와 화석연료 에너지원 등의 고갈로 인해 청정하고 환경오염이 적은 에너지원에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 이러한 화석연료 에너지원을 대체 할 수 있는 에너지원으로 태양광과 연료전지를 사용한 독립형 발전시스템에서의 DC 링크단의 컨버터 제어에 관하여 논한다.

태양광 발전시스템은 태양으로부터 발산되는 광 에너지가 반도체 소자의 표면에 조사(照射)되면 광기전력 효과에 의해서 전압이 발생하는 원리로서 무한 청정에너지원이라 할 수 있다. 그러나 날씨와 일사량 변화에 대한 제약이 크며 그림자 등에 의해 발전용량에 영향을 받는다. 또한 발전을 위한 면적이 매우 커 발전소의 위치에 대한 제한이 따른다. [1]

반면에 연료전지를 이용한 발전시스템은 메탄이나 메탄올 같은 탄화수소를 이용하여 개질기(Reformer)에서 개질이라는 과정을 통해 생산된 수소의 화학적 에너지가 전기에너지로 직접 변환되어 직류전류(DC)를 생산하고, 종래의 전지와는 다르게 외부에서 연료와 공기를 공급하여 연속적으로 전기를 생산하는 원리로서 태양광에 비해 높은 에너지 효율을 가진다. 또한 기존의 에너지원에 비해 환경오염과 화석연료의 의존성이 적은 에너지원으로 연료전지 내부의 반응에서 전기와 열이 동시에 발생하므로 연료전지 자체만으로도 co-generation 시스템에 최적이다. 그러나 수소 공급, 저장 등의 인프라 구축 문제가 따른다.

본 논문에서는 이러한 특성을 가진 두 신재생 에너지원의 특성을 적용하여 모델링을 한 후 각각의 에너지원의 PCS의 제어를 시뮬레이션을 통해 구현한다.

시뮬레이션은 PowerSim사의 PSIM 6.0을 통하여 구현이 되었다. 에너지원의 모델링은 연료전지의 경우, PEM연료전지(Polymer Exchange Membrane Fuel Cell)를 기준으로 한 네른스트 방정식을 기반으로 모델링 되었으며 태양광의 경우 KPEM-S150A72 모듈을 기준으로 모델링 되었다.

DC-DC 컨버터로는 위상천이 풀 브리지 컨버터를 사용하였으며 부하는 DC-AC 인버터를 거쳐 속도 제어와 히스테리시스 전류제어기를 갖는 1[kW]급 3상 BLDC motor로 시뮬레이션 하였다.

2. 태양광 · 연료전지 복합발전 시스템의 DC/DC 컨버터 제어 시뮬레이션

2.1. 태양전지 모델링

태양전지 모델링 방법으로는 매개변수법과 보간법이 있다. 매개변수법은 광기전력 효과를 이용하여 수학적으로 모델링을 하는 방법이며, 보간법은 실측 데이터를 이용하여 모델을 구한다. 전자는 정확한 파라미터들을 가지고 태양전지의 반도체 특성을 수학적으로 모델링하기 때문에 실제 태양전지의 출력을 비교적 정확하게 추종하는 장점이 있으며 후자는 정확한 파라미터 없이도 실측 데이터로부터 모델을 구하는 장점이 있으나 매개변수형에 비해 오차가 다소 떨어지는 단점이 있다. 본 논문에서는 매개변수형을 이용하여 태양전지 모델링을 하였다. [1],[2]

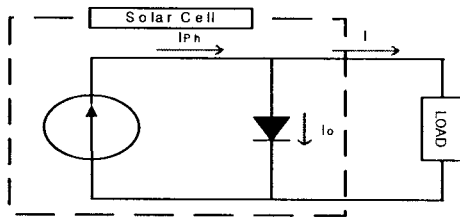


그림 1. 태양 전지 등가 회로
Fig. 1 The equivalent circuit of PV cell

$$I = I_{ph} - I_D \quad (1)$$

$$I_{ph} = I_{SC} \cdot S + J_o(T - T_r) \quad (2)$$

$$I_D = I_o \exp\left(\frac{qV}{AkT}\right) \quad (3)$$

$$I_o = I_{do} \left(\frac{T}{T_3}\right)^3 \exp\left[\frac{qE_g}{Bk} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (4)$$

그림 1은 태양전지의 등가회로를 나타낸 것이다. 등가회로에서의 출력전류와 광기전류는 각각 식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다. [1]

이러한 태양전지의 등가모델을 통한 특성방정식을 이용하여 매개변수법모델을 구할 수 있다.

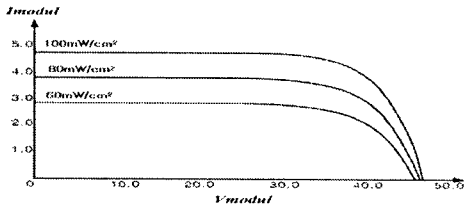


그림 2. 일사량변화에 따른 태양전지의 I-V 특성
Fig. 2 I-V characteristic of PV Array against Irradiation.

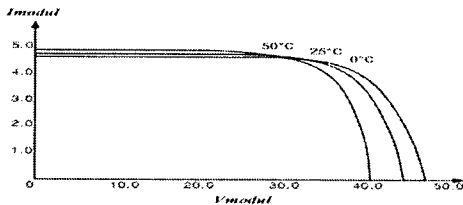


그림 3. 온도변화에 따른 태양전지의 I-V 특성
Fig. 3 I-V Characteristic of PV Array against temperature

그림 2는 일사량 변화에 따른 단락전류의 I-V 곡선을 나타낸다. 태양전지의 개방전압과 단락전류는 일사량이 증가함에 따라 증가하는 특성을 나타내고 있다. 그림 3은 온도 변화에 따른 I-V 특성을 나타내며 온도가 증가함에 따라 단락전류는 증가 하고 개방전압이 대폭 감소하는 특성을 보이고 있다.[1]

2.2. 연료전지 모델링

연료전지의 동작 특성은 연료전지 스택 내부의 전압 및 전류의 관계로부터 얻을 수 있으며 본 논문에서는 내부 전류 밀도와 각종 손실 등의 성분이 고려되었다.

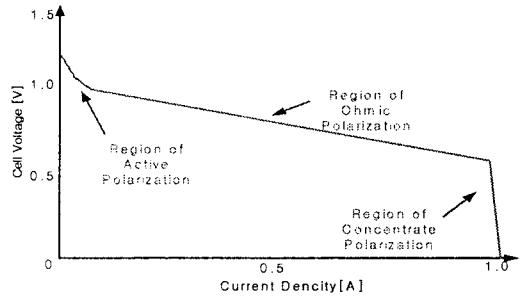


그림 4. PEMFC의 전압 곡선
Fig. 4 I-V characteristic of PEMFC

그림 4는 연료전지 셀의 전압 곡선을 나타낸다. 실제 연료전지가 작동 할 때에는 가역적이지 못하기 때문에 이론적인 전지전압(E) 보다 낮아진다. 이것은 내부저항과 전기화학반응에서 일어나는 비가역적인 현상 때문이며 가역 반응 시 얻어지는 이론적인 평형전지 전압과 실제 작동전압과의 차이를 분극 이라한다. 이러한 출력특성은 그림 4에서 나타나는 것처럼 전압과 전류의 크기에 따라 활성화 분극, 저항분극, 농도 분극 세 가지로 나타내어진다.

활성화 분극은 촉매의 반응이 분극현상보다 활발하지 않아 발생하며 전극으로부터 전자를 이동시키는 화학반응을 진행시키는데 발생전압의 일부가 손실된다. 이 영역에서의 내부전류 밀도를 고려한 셀 전압은 식(5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = E - A \ln\left(\frac{i + i_n}{i_0}\right) \quad (5)$$

이때의 i_n 은 내부전류 밀도의 크기이며, i_0 는 교환전류 밀도의 크기가 된다.

저항분극영역은 부하가 증가함에 따라 연료전지의 전압이 선형적으로 감소하는 형태로 나타나며 가장 큰 원인은 내부저항이다. 따라서 출력 특성 역시 옴의 법칙을 따르게 되어 식 (6)과 같이 나타낸다.

$$\Delta V_{ohm} = ir \quad (6)$$

여기서, i 는 전류 밀도(A/cm²)이며 r 은 단위면적에 대한 저항(kΩ · cm²)이다.

농도분극은 전극에서 수소와 산소가 전해질속에서 이동하는 속도의 한계에 의해 발생하는 현상이다. 이때 전류의 흐름으로부터 발생하는 전극표면에서 반응물의 농도변

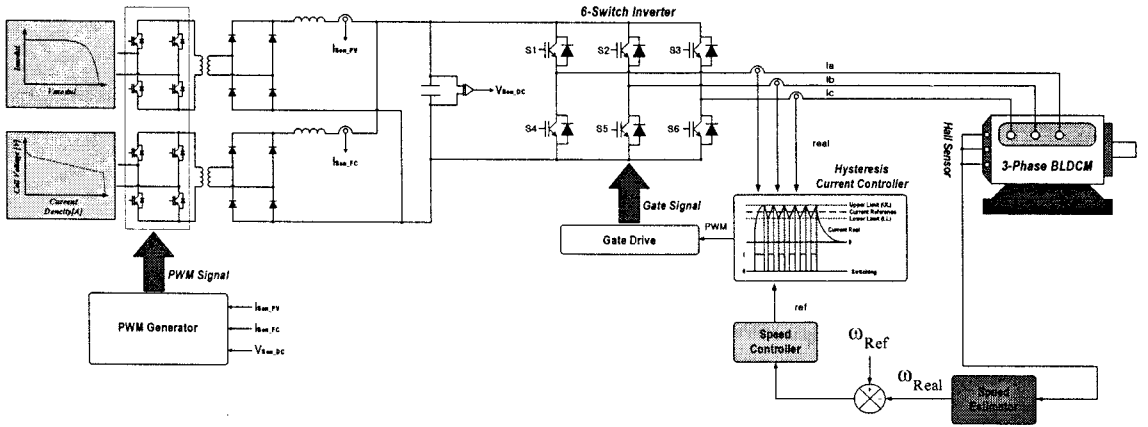


그림 5. 제안된 시스템의 전체 제어블록도
Fig. 5 Overall control block diagram of the proposed system.

화에 대한 전압의 차이는 식(7)과 같이 나타내어진다.

$$\Delta V_{con} = \frac{RT}{2F} \ln\left(1 - \frac{i}{i_1}\right) \quad (7)$$

여기서, R은 기체상수, T는 연료전지 작동온도이고 F는 패러데이 상수이다.

연료전지가 동작할 때에는 activation, ohmic, Concentration loss로 표현되는 세 가지 분극현상이 발생하므로 연료전지 스택의 출력전압은 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V = E_{\text{rev}} - \Delta V_{act} - \Delta V_{ohmic} - \Delta V_{con} \quad (8)$$

$$V = E - ir - A \left(\ln \frac{i - i_n}{i_0} \right) - B \left(1 - \frac{i}{i_1} \right) \quad (9)$$

따라서 최종적인 연료전지 동작 전압은 식 (9)과 같이 나타낼 수 있으며 여기에서 B는 상수로서 연료전지의 운전 상태에 따라 다르다.

2.3. DC-DC 컨버터 제어

본 논문에서 태양광 발전과 연료전지 시스템에 사용된 DC-DC 컨버터는 위상천이 폴 브리지 컨버터이다. 위상천이 폴 브리지 컨버터는 위상지연을 이용하여 변압기의 누설 인덕터에 축적된 에너지와 스위치로 사용된 MOSFET의 기생캐패시터의 충·방전 에너지에 의해 영전압 스위칭이 이루어진다.

그림 5는 본 논문에서 제안한 전체 시스템의 제어블록도이다. 각각 태양전지 셀과 연료전지 스택으로부터 전원은 각각의 DC-DC 컨버터인 위상천이 폴 브리지 컨버터로 공급된다. 각각의 위상천이 폴 브리지 컨버터는 DC-AC 인버터에 병렬로 접속이 된다. 각각의 컨버터는 인버터로부터 정전류원 형태로 모델링 되어야 하며 병렬로 접속되기 위해

전류제어 특성이 우수해야 한다. 따라서 본 논문에서는 PI 제어기를 전류제어기로 사용하였으며, DC 링크단의 출력전압 역시 PI제어기를 사용하여 400[V]의 정전압으로 제어하였다.

DC-AC인버터는 제안된 회로로부터 공급된 DC 전원을 이용하여 부하인 3상 BLDC 전동기를 제어한다. 인버터는 속도제어와 히스테리시스 전류제어를 동시에 수행한다.

3. 시뮬레이션 결과

표 1은 본 논문에서 사용한 각각의 DC-DC 컨버터 시뮬레이션 사양을 나타낸다

연료전지용 DC-DC 컨버터는 부하가변에 따라 25~50[V_{dc}]의 전압변화를 가지므로 입력전압을 25~50[V_{dc}]로 입력받아 DC 링크단의 최종전압을 400[V_{dc}]로 제어한다. 태양광 발전용 DC-DC 컨버터는 250~400[V_{dc}]의 전압을 받아 400[V_{dc}]로 제어하며, 두 개의 컨버터 모두 50[kHz]의 스위칭 주파수를 갖고 전류제어를 수행한다.

다음의 그림 6은 PowerSim사의 PSIM 6.0 툴을 이용하여 본 논문의 토폴로지를 설계한 시뮬레이션 회로도이다.

연료전지와 태양광 어레이의 모델링은 위의 관련된 수식을 적용하여 PSIM의 DLL과 Microsoft사의 Visual C++를 이용하여 프로그램 하였다.

표 1. 시뮬레이션 사양
Fig. 1 Simulation parameters.

	연료전지용 DC-DC컨버터	태양광발전용 DC-DC컨버터
입력전압	25~50[V _{dc}]	250~400[V _{dc}]
출력전압	400[V _{dc}]	400[V _{dc}]
스위칭 주파수	50[kHz]	50[kHz]
정격	1[kW]	1.6[kW]

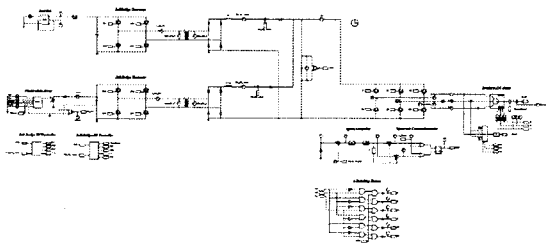


그림 6. 시뮬레이션 전체회로도
Fig. 6 Overall Simulation Schematic.

그림 7은 모델링 된 연료전지와 태양광 어레이의 I-V 특성곡선을 나타낸 시뮬레이션 결과 파형이다.

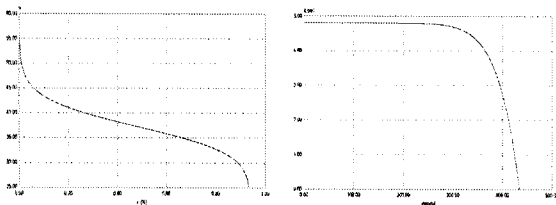


그림 7. 연료전지와 태양광 어레이의 I-V 특성곡선
(좌 : 연료전지, 우 : 태양광 어레이)
Fig. 7 I-V characteristic waveform of fuel-cell stack and PV array
(Left : Fuel-cell, Right: PV Array)

그림 8은 연료전지와 태양광 어레이의 출력을 입력으로 하는 위상천이 풀 브리지 컨버터의 출력전류와 인버터 DC 링크단의 전압을 나타내는 시뮬레이션 결과파형이다.

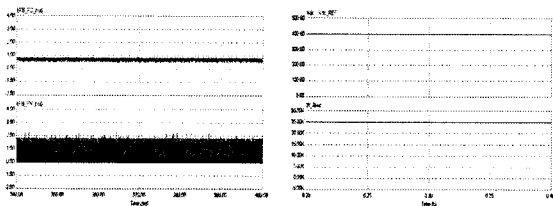


그림 8.각 풀 브리지 컨버터의 출력전류와 DC 링크단의 전압 시뮬레이션 결과파형
(좌 : 출력전류, 우 : DC 링크단의 전압파형)
Fig. 8 Output Current and voltage wave form of each of the phase shift full-bridge converter
(Left : output current, Right : output voltage waveform of DC link)

그림 9는 3상 BLDC 전동기의 속도와 각 상의 전류 그리고 히스테리시스 전류제어에 대한 전류 파형을 나타낸 시뮬레이션 결과파형이다.

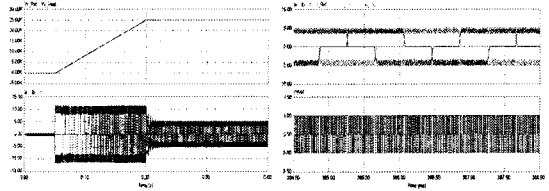


그림 9. 3상 BLDC 전동기의 속도, 각상의 전류, 히스테리시스 전류제어 와 홀센서 신호 시뮬레이션 파형
(좌 : 속도 및 각 상전류 파형, 우 : 히스테리시스 전류제어와 홀센서 신호파형)

Fig. 9 Speed, phase current, hysteresis current control and hall sensor signal waveform of 3-phase BLDC motor

(Left : speed and phase current, Right : hysteresis current control and hall sensor signal)

4. 결 론

본 논문에서는 화석연료의 의존성이 적고 청정한 에너지원인 태양광 발전과 연료전지를 이용한 복합발전 시스템을 PowerSim사의 PSIM 6.0 소프트웨어를 이용하여 구현하였다.

태양광 어레이와 연료전지를 모델링하여 두 개의 위상천이 풀 브리지 컨버터를 통해 출력단의 전압과 전류를 제어하였다.

또한, 출력된 전압을DC-AC 인버터의 직류전원으로 사용하여 3상 BLDC 전동기 부하를 구동하였다.

본 과제(결과물)는 산업자원부의 출연금으로 수행한 특성화대학원사업의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] 최규하, 정병환, 강병희, 이명언, “ 가상구현 태양전지 시스템을 위한 태양전지의 새로운 모델링 ”, 전력전자학회, 전력전자학회논문지 전력전자학회 논문지 제11권 제1호, 2006. 2, pp. 79 ~ 90
- [2] 정병환, 조준석, 고재석, 최규하, 김용상, 이창성, “ 공통 DC단을 갖는 복합발전시스템을 위한 전력균형제어에 관한 연구 ”, 전력전자학회, 전력전자학회논문집 전력전자학회 2002년 추계학술대회논문집, 2002. 11, pp. 181 ~ 185
- [3] Das, D., Esmaili, R., Xu, L., Nichols, D “An optimal design of a grid connected hybrid wind/photovoltaic/fuel cell system for distributed energy production”, Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE 6-10 Nov. 2005 Page(s):6 pp.
- [4] Contino, R., Iannone, F., Leva, S., Zaninelli, D., “ Hybrid photovoltaic-fuel cell system controller sizing and dynamic performance evaluation ”, Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE 18-22 June 2006 Page(s):6 pp