

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2021.21.6.129>

JIIBC 2021-6-19

전력변환장치 설계를 통한 연료전지 발전시스템 구성

Configuration of Fuel Cell Power Generation System through Power Conversion Device Design

윤용호*

Yongho Yoon*

요 약 최근 급속한 산업 발달과 생활수준의 향상으로 인하여 전력 수요가 점차 증대되고 있고 이러한 전력수요 급증에 의해 화석연료 의존도가 높은 우리나라의 경우 국제환경 규제에 의한 온실가스 배출량의 감축 및 동결은 바로 산업 활동의 위축을 가져오게 된다. 이에 따라 환경을 국가의 산업생산 활동과 연계시키고자 하는 선진국과의 경쟁에서 많은 어려움이 발생하고 있고 이에 대한 대책으로 대체 에너지의 개발이 세계적으로 큰 관심거리가 되고 있다. 이러한 새로운 발전방식 중 비교적 용량이 작은 소규모의 발전설비는 태양광발전 (Photovoltaic generation), 풍력발전 (Wind power generation), 연료전지발전 (Fuel cell generation) 등이 있다. 그중 실용화에 있어서 중요한 요소인 연속운전 및 높은 발전효율, 장기적인 내구성을 고려할 때 가장 주목을 받는 것이 연료전지이다. 연료전지 기술은 화석연료 사용에 따른 공해요인의 제거 및 전력산업 구조조정에 따른 분산형 전원으로서 개발 및 보급 가능성이 큰 새로운 형태의 발전방식으로 주목받고 있다. 따라서 본 논문에서는 연료전지에서 발생하는 직류전원을 입력으로 하여 최종적으로 우리 일상생활에서 사용하는 교류전원을 얻는 데 필요한 전력변환 회로를 설계하여 연료전지 발전시스템을 연구 및 구성하였다.

Abstract Recently, the demand for electricity is gradually increasing due to the rapid industrial development and the improvement of living standards. In the case of Korea, which is highly dependent on fossil fuels due to such a surge in electricity demand, reduction and freezing of greenhouse gas emissions due to international environmental regulations will immediately lead to a contraction in industrial activities. Accordingly, there are many difficulties in competition with advanced countries that want to link the environment with the country's industrial production activities, and the development of alternative energy as a countermeasure is of great interest around the world. Among these new power generation methods, small-scale power generation facilities with relatively small capacity include photovoltaic generation, wind power generation, and fuel cell generation. Among them, the fuel cell attracts the most attention in consideration of continuous operation, high power generation efficiency, and long-term durability, which are important factors for practical use. Therefore, in this paper, the fuel cell power generation system was researched and constructed by designing the power conversion circuit necessary to finally obtain the AC power used in our daily life by using the DC power generated from the fuel cell as an input.

Key Words : Fuel Cell Power Generation, Power Conversion, DC-DC Converter, Inverter

*정회원, 광주대학교 전기전자공학부
접수일자 2021년 9월 5일, 수정완료 2021년 11월 5일
게재확정일자 2021년 12월 10일

Received: 5 September, 2021 / Revised: 5 November, 2021 /
Accepted: 10 December, 2021

*Corresponding Author: yhyoon@gwangju.ac.kr
School of Electrical and Electronic Engineering, Gwangju
University, Korea

I. 서론

최근 급속한 산업 발달과 생활 수준의 향상으로 인하여 전력 수요가 점차 증대되고 있고 이러한 전력수요 급증으로 화석연료 의존도가 높은 우리나라의 경우 국제환경 규제에 의한 온실가스 배출량의 감축 및 동결은 바로 산업 활동의 위축을 가져오게 된다.

이에 따라 환경을 국가의 산업생산 활동과 연계시키고자 하는 선진국과의 경쟁에서 많은 어려움이 발생하고 있고 이에 대한 대책으로 대체 에너지의 개발이 세계적으로 큰 관심이 되고 있다. 이러한 새로운 발전방식 중 비교적 용량이 작은 소규모의 발전설비는 태양광발전(Photovoltaic generation), 풍력발전(Wind power generation), 연료전지발전(Fuel cell generation) 등이 있다.

그중 실용화에 있어서 중요한 요소인 연속운전 및 높은 발전효율, 장기적인 내구성을 고려할 때 가장 주목을 받는 것이 연료전지이다. 연료전지 기술은 화석연료 사용에 따른 공해요인의 제거 및 전력산업 구조조정에 따른 분산형 전원으로서 개발 및 보급 가능성이 큰 새로운 형태의 발전방식으로 주목받고 있다^[1].

따라서 본 논문에서는 연료전지에서 발생하는 직류전원을 입력으로 하여 최종적으로 우리 일상생활에서 사용하는 교류전원을 얻는 데 필요한 전력변환 회로를 설계하여 연료전지 발전시스템을 연구 및 구성하였다.

II. 연료전지의 발전원리 및 전기적 모델링^[2]

연료전지는 그림 1과 같이 공기와 수소를 포함하는 연료를 전기화학 반응을 통해 전기를 생산하고 물을 발생시키는 장치이다. 수소와 공기를 통한 화학적 에너지를 전기 에너지로 변환시키기 때문에 화학적 반응으로 전기를 발생시킨다는 점에서 배터리와 비슷하다.

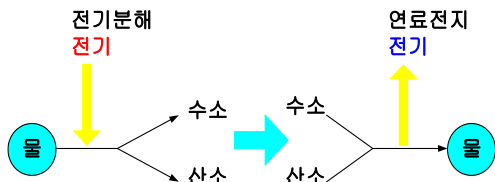


그림 1. 연료전지 원리
Fig. 1. Fuel cell principle

반면에 그림 2와 같이 연료전지는 반응 물질인 수소와 산소를 외부로부터 공급받으므로 배터리와는 달리 충전이 필요 없다. 또한 연료가 공급되는 한 전기를 발생 연료의 연소반응 없이 에너지를 발생시키기 때문에 환경적인 측면에서 연료전지가 가지는 장점은 매우 크다.

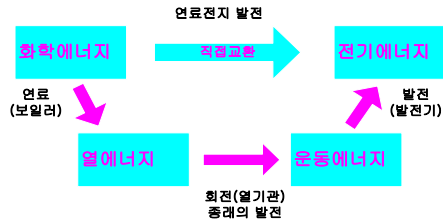


그림 2. 연료전지 특징
Fig. 2. Fuel cell features

연료전지의 구조는 그림 3과 같이 전해질을 사이에 두고 두 전극이 샌드위치의 형태로 위치하며 두 전극을 통하여 수소 이온과 산소 이온이 지나가면서 전류를 발생시키고 부산물로서 물과 열을 생성 한다. 음극(Anode)을 통하여 수소가 공급되고 양극(Cathode)을 통하여 산소가 공급되면 음극을 통해서 들어온 수소 분자는 촉매(Catalyst)에 의해 양자와 전자로 나누어진다. 그리고 나누어진 양자와 전자는 서로 다른 경로를 통해 양극에 도달하게 되는데, 양자는 연료전지의 중심에 있는 전해질(Electrolyte)을 통해 흘러가고 전자는 외부 회로를 통해 이동하면서 전류를 흐르게 하며 양극에서는 다시 산소와 결합하여 물을 생성하는 원리로 동작한다.

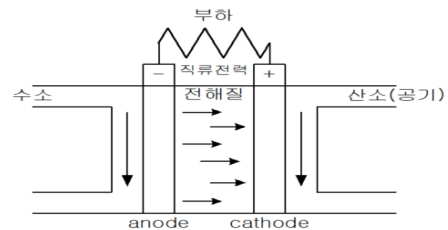


그림 3. 연료전지의 발전원리
Fig. 3. Power generation principle of fuel cell

III. 전력변환 회로를 이용한 연료전지 발전시스템 구성

연료전지에서 발전된 전압은 저압의 직류 39~72V로 승압용 컨버터를 이용하여 직류 400V 승압 및 단상

220V 교류전원으로 변환 때 일상생활에 필요한 전원을 사용할 수 있다. 따라서 연료전지 발전시스템은 그림 4와 같이 연료전지 특성을 갖는 Buck 컨버터, 연료전지의 낮은 전압을 승압시키기 위한 DC-DC 컨버터, 교류전압으로 변환시키기 위한 인버터의 세 부분으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 전력변환 회로를 이용한 연료전지 발전시스템 구성하기 위해 연료전지, 승압용 컨버터 및 인버터로 구성하였고 각각의 시스템은 가장 보편화되고 쉽게 적용이 가능한 벡 컨버터, 풀 브리지 컨버터 및 단상 풀 브리지 인버터를 설계 및 적용하였다^[3-4].

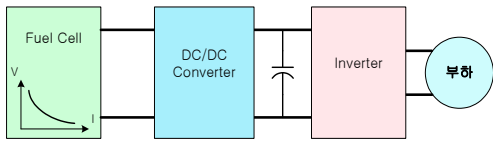


그림 4. 전력변환 회로를 이용한 연료전지 발전시스템 구성
 Fig. 4. Composition of fuel cell power generation system using power conversion circuit

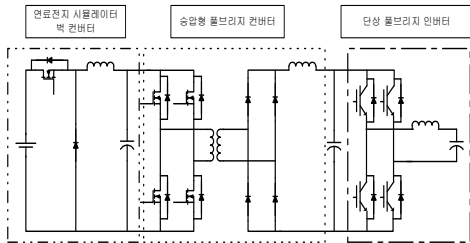


그림 5. 연료전지 발전시스템 전체 구성도
 Fig. 5. Overall configuration diagram of fuel cell power generation system

본 논문에서 구성된 연료전지 발전시스템은 그림 5와 같이 연료전지 특성이 있는 벡 컨버터를 적용하여 출력된 전압을 승압하기 위해 풀 브리지 컨버터와 교류전원으로 변환하기 위해 단상 풀 브리지 인버터를 설계 및 적용하였다.

그림 6은 DC-DC 승압형 컨버터로 사용된 풀 브리지 DC-DC 컨버터는 전력변환장치에서 연료전지 출력과 인버터 사이에 존재하는 직류전압 가변 장치이다. 주 용도는 연료전지 출력전압의 변동에 반응하여 컨버터의 일정 출력전압을 만들어 내므로 인버터는 연료전지의 전압 변동에 무관하게 일정한 전원을 공급받을 수 있게 된다.

그림 7은 DC-AC 인버터로써 DC-DC 변환부에 의해 생성 및 제어되는 직류전압을 교류전압으로 변환하기 위한 전력변환부이다. 연료전지에서 출력으로 나오는 전압은 39~72V의 직류로 가정에서 사용하기 위하여 직류를

380V 정도로 승압해야 한다. 또한 교류로 변환하는 단상 인버터 장치를 구성하여 연료전지 발전시스템을 최적으로 제어할 수 있는 컨버터/인버터 구동 시스템 회로를 설계하고 제작하여 그 성능을 확인한다^[5-6].

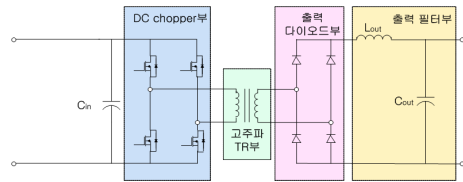


그림 6. 풀 브리지 컨버터
 Fig. 6. Full bridge converter

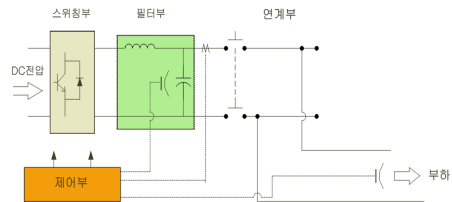


그림 7. DC-AC 인버터
 Fig. 7. DC-AC inverter

III. 실험결과

1. 벡 컨버터 실험파형

최종 출력부인 인버터에 3[kW]의 정류기 부하를 걸었을 때, 입력 부인 벡 컨버터의 게이트 신호인 그림 8에서 게이트 신호의 주파수는 17.6[kHz], 시비율(Duty)은 32.8[%]을 실험 결과로 보여주고 있다.

그림 9는 설계된 벡 컨버터의 인덕터에 흐르는 전류로 평균 전류는 55[A], 리플은 24[A]이다. 맥동전류 파형의 최소점에서 발생한 스파이크는 다이오드가 순간적으로 턴 오프 시에 발생한 것으로 역저지 시간과 주변 기생 성분들로 인해 발생한다.

그림 10은 벡 컨버터의 환류 다이오드 양단에 걸리는 전압 파형으로 구형파의 전압이 발생하면서 피크 값은 다이오드의 역저지 시간에 의해 발생한 것으로 벡 컨버터 주변에 기생 L, C 성분들이 동작에 큰 영향을 주지 않은 것을 알 수 있다.

벡 컨버터의 출력전압 및 출력전류는 3[kW]의 정류기 부하를 걸었을 때, 60[V], 36[A]의 출력결과를 그림 11, 12에서 보여주고 있으며 설계된 값에 의해 정상적으로 동작되고 있음을 보여주고 있다.

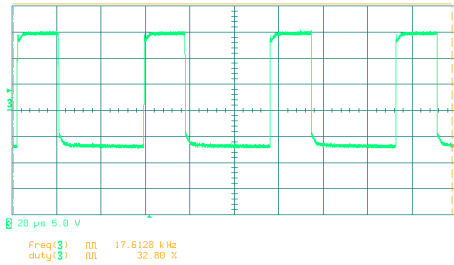


그림 8. 벡 컨버터 게이트 신호 (5V, 20 μ s/div)
Fig. 8. Buck converter gate signal

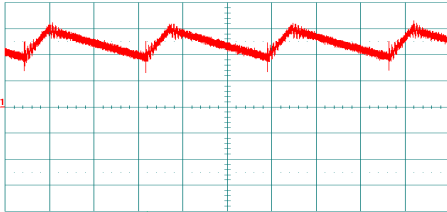


그림 9. 인덕터에 흐르는 전류 (20A, 20 μ s/div)
Fig. 9. Current flowing through the inductor

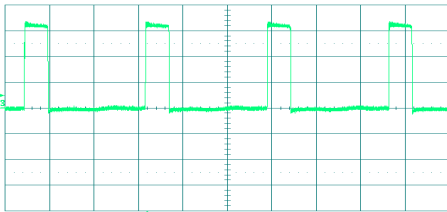


그림 10. 환류 다이오드 양단 전압 (100V, 20 μ s/div)
Fig. 10. Voltage across the freewheeling diode

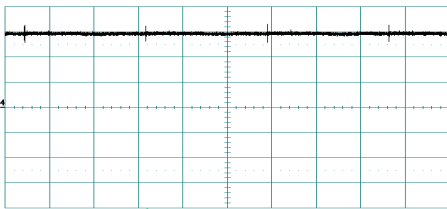


그림 11. 벡 컨버터 출력전압 (20V, 20 μ s/div)
Fig. 11. Buck converter output voltage

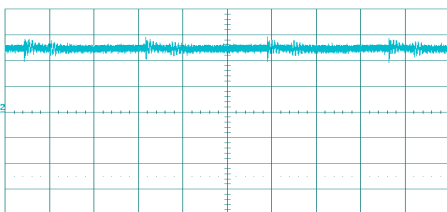


그림 12. 벡 컨버터 출력 전류 (10A, 20 μ s/div)
Fig. 12. Buck converter output current

2. 풀 브리지 컨버터의 실험 파형

설계된 벡 컨버터의 출력값은 그림 5에서 나타낸 승압용 풀 브리지 컨버터에 전달이 되며 풀 브리지 인버터에서 3[kW] 정류 부하를 걸었을 때 풀 브리지 컨버터의 게이트 신호를 그림 13에서 보여주고 있다. 이때 게이트 신호의 시비율(duty)은 36.9%, 데드 타임은 7.5[μ s]의 결과를 확인할 수 있다.

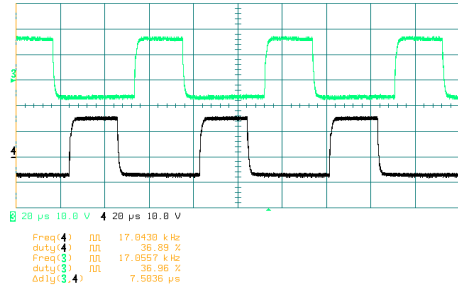


그림 13. 풀 브리지 컨버터 게이트 신호 (10V, 20 μ s/div)
Fig. 13. Full bridge converter gate signal

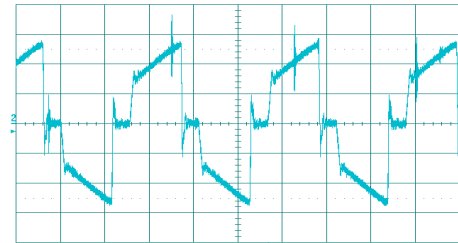


그림 14. 고주파 변압기 1차측 전류 (50A, 20 μ s/div)
Fig. 14. High frequency transformer primary current

그림 14, 15, 16은 각각 고주파 변압기 1차 측 권선에 흐르는 전류, 전압, 2차 측 정류 다이오드 전압의 결과를 보여주고 있다. 고주파 변압기 1차측에 흐르는 최대전류 140[A], 최대전압 200[V], 2차측 정류 다이오드에 걸리는 최대전압 1,100[V] 값과 서지(Surge) 전류 및 전압이 스위치에 인가되고 있는 결과를 알 수 있다. 이는 스위치의 턴 오프 시에 dv/dt 및 di/dt 현상과 누설인덕턴스와 주 스위치의 기생 커패시터의 공진현상으로 발생한다. 또한 주 스위치의 턴 온 시 발생한 링잉현상은 2차측의 정류 다이오드 턴 오프 시에 발생한 것으로 스너버 회로를 통한 서지(surge)를 줄일 필요가 있다.

그림 17은 풀 브리지 컨버터 2차측 인덕터에 흐르는 전류 파형으로 주파수는 1차 측의 스위칭 주파수의 2배인 34[kHz]이며 평균 출력 전류는 8.9[A]의 출력 결과를 보여주고 있다.

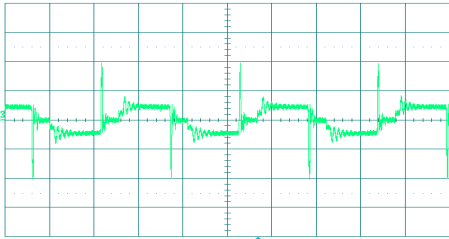


그림 15. 풀 브리지 컨버터 변압기 1차측 전압 (100V, 20 μ s/div)
 Fig. 15. Primary voltage of full bridge converter transformer

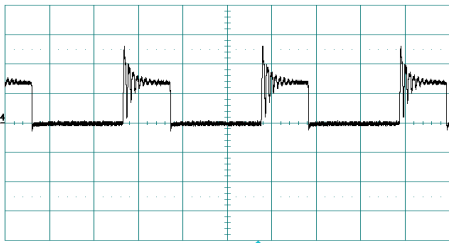


그림 16. 2차측 정류 다이오드 전압 (400V, 20 μ s/div)
 Fig. 16. The voltage across the secondary rectifier diode

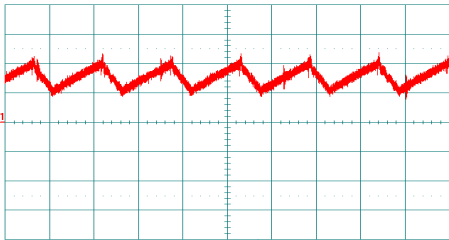


그림 17. 2차측 출력단 인덕터에 흐르는 전류 (5A, 20 μ s/div)
 Fig. 17. Current flowing through the secondary output stage inductor

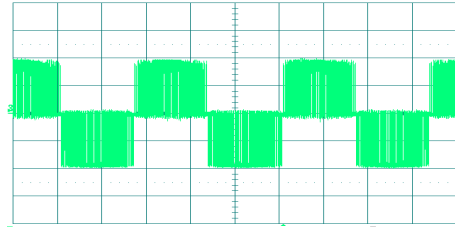


그림 18. 리액터 필터 전단의 출력 전압 (200V, 5ms/div)
 Fig. 18. Output voltage before reactor filter

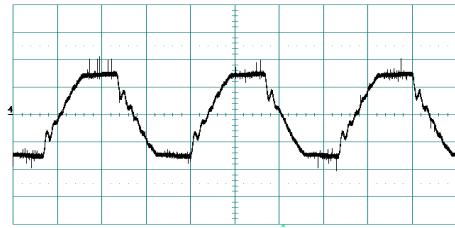


그림 19. 풀 브리지 인버터 출력 전압 (200V/div, 5ms/div)
 Fig. 19. Full bridge inverter output voltage

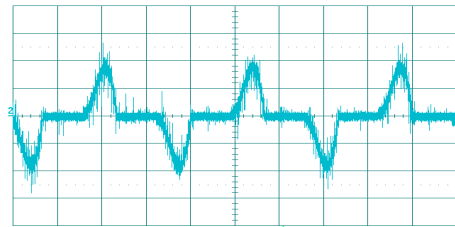


그림 20. 풀 브리지 인버터 출력 전류 (20A, 5ms/div)
 Fig. 20. Full bridge inverter output current

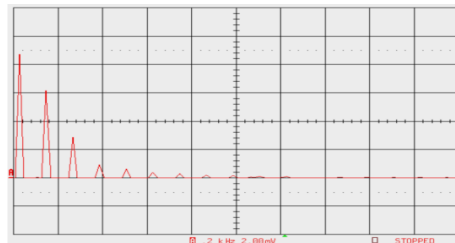


그림 21. 정류 부하 시 고조파 분석
 Fig. 21. Harmonic analysis under rectified load

3. 풀 브리지 인버터 실험파형

3[kW]의 정류기 부하를 걸었을 때 리액터 필터 전단의 전압에 대해 그림 18에서 보여주고 있으며 서지나 링잉 현상 등은 보이지 않고 있다. 또한 그림 19, 20은 리액터 필터를 통한 풀 브리지 인버터의 출력전압 및 전류 파형으로 3[kW] 정류기 부하로 인해 출력전압 파형의 왜곡이 발생함을 볼 수 있다. 따라서 그림 21과 같이 출력 전류의 고조파를 분석해 기본파 성분 이외의 고조파가 함유된 결과를 확인할 수 있다.

4. 효율

전력변환 회로를 통한 연료전지발전시스템의 전력변환기 (풀 브리지 컨버터와 인버터) 효율에 관한 결과를 그림 22에서 보여주고 있다. RCD 스너버, 스위치, 다이오드 및 고주파 변압기의 손실 등으로 인해 최대 효율 85.3[%]의 결과를 얻어 이들 중 효율에 가장 큰 영향을 주

는 요인은 변압기의 누설인덕턴스 성분에 의해 감소하는 전력변환 효율이고, 본 연구에서 사용하고 있는 고주파 변압기의 변환 효율은 91[%]이다.

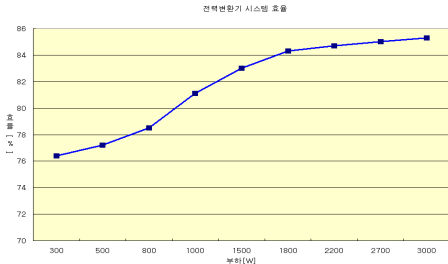


그림 22. 연료전지발전시스템 효율
Fig. 22. Fuel cell power generation system efficiency

V. 결 론

본 논문에서는 전력변환장치 설계를 통한 연료전지 발전시스템을 구성하기 위해 연료전지용 시뮬레이터, 낮은 전압을 승압하는 DC-DC 컨버터, 가정용에 적합한 교류 전원으로 변환하는 인버터를 설계하고 제작하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

- 1) 연료전지와 유사한 특성을 얻기 위해 마이크로프로세서와 벡 컨버터를 사용하여 연료전지 시뮬레이터를 구현하므로써 가정용 연료전지시스템의 동작특성을 확인할 수 있다.
- 2) 인버터에 직류 380V 전압을 공급하기 위해 승압할 수 있는 고주파 변압기 및 DC-DC 풀 브리지 컨버터 설계기술을 적용하므로써 가정용 연료전지시스템에 적용되는 전력변환장치에 응용할 수 있을 것으로 보인다.

References

[1] Y. H. Yoon, "Feed System Modeling of Railroad using Fuel Cell Power Generation System," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (JIIBC), vol. 20, No. 4, pp. 195- 200, 2020.

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2020.20.4.195>

[2] Dachuan Yu, S. Yuvarajan, "Electronic Circuit Model for Proton Exchange Membrane Fuel Cells", Journal of Power Sources 142, pp. 238~242, 2005.

[3] T. W. Lee, S. J. Jang, J. T. Kim, J. S. Gu, C. Y. Won, C. H. Kim, " A Study on PWM Converter/ Inverter Drive System by Fuel Cell Simulator," Trans. KIPE, Vol. 9, No. 3, pp. 222 ~ 230, 2004.

[4] S. M. Jung, Y. S. Bae, T. S. Yu, S. W. Choi, H. S. Kim, "Single-Phase Utility-Interactive Inverter for Residential Fuel Cell Generation System," Trans. KIPE, Vol. 12, No. 1, pp. 81 ~ 88, 2007.

[5] Y. H. Yoon, "Modeling of BLDC Motor Driving System for Platform Screen Door Control applied Fuel Cell Power Generation System," Trans. KIPE, vol. 66, no. 6, pp. 968 ~ 974, 2017.
<http://doi.org/10.5370/KIEE.2017.66.6.968>

[6] S.M.N. Hasan, S.K. Kim, I. Husain, "Power electronic interface and motor control for a fuel cell electric vehicle," IEEE Applied Power Electronics Conf. pp. 1171-1177, 2004.

저 자 소 개

윤 옹 호(정회원)



- 성균관대학교 메카트로닉스공학과 (공학박사)
- 삼성탈레스 종합연구소 전문연구원
- 현재 : 광주대학교 전기전자공학부 교수
- 주관심분야 : 전동기 제어 및 신재생 에너지

※ 이 연구는 2021년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음.