

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2022.22.1.135>
JIIBC 2022-1-20

연료전지 발전시스템 구현을 위한 전력변환장치 하드웨어 세부설계

Detailed Design of Power Conversion Device Hardware for Realization of Fuel Cell Power Generation System

윤용호*

Yongho Yoon*

요약 연료전지 발전시스템은 수소와 산소의 반응 작용에 의해 직접 전기를 발생하는 스택(Stack) 이외에 메탄올, 천연 가스 등 각종 연료로부터 수소를 만들어 내는 개질기와 스택에서 발전된 직류전압을 안정된 교류전압으로 변환시켜주는 전력변환기 등으로 구성되어진다. 이러한 시스템의 연료전지 출력은 직류로 가정에서 사용하기 위해서는 전력변환장치를 통하여 교류로 변환시키는 인버터 장치가 필요하다. 또한 연료전지 전압이 30~70V 정도로 이를 인버터 동작 전압인 380V 정도로 승압하기 위하여 DC-DC 승압형 컨버터를 사용한다. DC-DC 승압형 컨버터는 연료전지 출력과 인버터 사이에 존재하는 직류전압 가변장치로 연료전지 출력전압의 변동에 반응하여 컨버터의 일정 출력전압을 만들어 내므로 인버터는 연료전지의 전압 변동에 무관하게 일정한 전원을 공급 받을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 연료전지발전 시스템의 구성 원 중 연료전지 출력전압(30~70V)을 입력으로 받아 계통연계에 적용되는 인버터의 주요 전원인 풀 브리지(Full-Bridge) 컨버터의 하드웨어 세부설계에 대하여 논하고자 한다.

Abstract In addition to the stack that directly generates electricity by the reaction of hydrogen and oxygen, the fuel cell power generation system has a reformer that generates hydrogen from various fuels such as methanol and natural gas. It also consists of a power converter that converts the DC voltage generated in the stack into a stable AC voltage. The fuel cell output of such a system is direct current, and in order to be used at home, an inverter device that converts it into alternating current through a power converter is required. In addition, a DC-DC step-up converter is used to boost the fuel cell voltage to about 30~70V, which is the inverter operating voltage, to about 380V. The DC-DC step-up converter is a DC voltage variable device that exists between the fuel cell output and the inverter. Accordingly, since a constant output voltage of the converter is generated in response to a change in the output voltage of the fuel cell, the inverter can receive constant power regardless of the voltage change of the fuel cell. Therefore, in this paper, we discuss the detailed hardware design of the full-bridge converter, which is the main power source of the inverter that receives the fuel cell output voltage (30~70V) as an input and is applied to the grid among the members of the fuel cell power generation system.

Key Words : Fuel Cell Power Generation System, Power Conversion, Full-Bridge Converter, Hardware detailed design

*정회원, 광주대학교 전기전자공학부
접수일자 2022년 1월 1일, 수정완료 2022년 1월 31일
게재확정일자 2022년 2월 4일

Received: 1 January, 2022 / Revised: 31 January, 2022 /
Accepted: 4 February, 2022

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

I. 서 론

연료전지 발전시스템은 그림 1과 같이 수소와 산소의 반응 작용에 의해 직접 전기를 발생하는 스택(Stack) 이외에 메탄올, 천연가스 등 각종 연료로부터 수소를 만들어 내는 개질기와 스택에서 발전된 직류전압을 안정된 교류전압으로 변환시켜주는 전력변환기 등으로 구성되어 있다^[1,2].

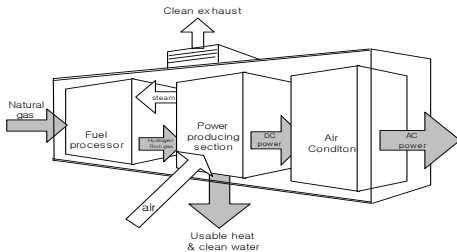


그림 1. 연료전지 발전시스템 구성도
Fig. 1. Configuration diagram of fuel cell power generation system

이러한 시스템의 연료전지 출력은 그림 2와 같이 직류로 가정에서 사용하기 위해서는 전력변환장치를 통하여 교류로 변환시키는 인버터 장치가 필요하다. 또한 연료전지 전압이 30~70V 정도로 이를 인버터 동작 전압인 380V 정도로 승압하기 위하여 DC-DC 승압형 컨버터를 사용한다.

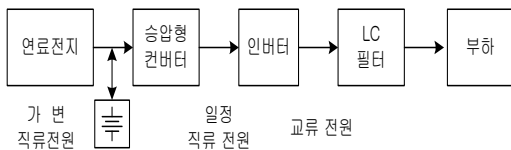


그림 2. 연료전지와 전력변환시스템을 구성한 연료전지 발전시스템 세부 구성도
Fig. 2. Detailed configuration diagram of fuel cell power generation system comprising fuel cell and power conversion system

DC-DC 승압형 컨버터는 연료전지 출력과 인버터 사이에 존재하는 직류전압 가변장치로 연료전지 출력전압의 변동에 반응하여 컨버터의 일정 출력전압을 만들어 내므로 인버터는 연료전지의 전압 변동에 무관하게 일정한 전원을 공급받을 수 있다^[3].

따라서 본 논문에서는 연료전지발전 시스템의 구성 원중 연료전지 출력전압(39~72V)을 입력으로 받아 계통

연계에 적용되는 인버터의 주요 전원인 풀 브리지(Full-Bridge) 컨버터의 하드웨어 세부설계에 대하여 논하고자 한다.

II. 풀 브리지 컨버터 구성요소 하드웨어 설계^[4,5]

1. 풀 브리지 컨버터

풀 브리지 컨버터의 기본 동작은, 4개의 스위치를 사용하므로 한 쌍의 스위치(S1, S4 또는 S2, S3)가 교번으로 도통, 차단을 반복하면서 동작한다. 또한 그림 3과 같이 DC chopper부, 고주파 TR부, 출력 다이오드 부, 출력필터부로 분류될 수 있다.

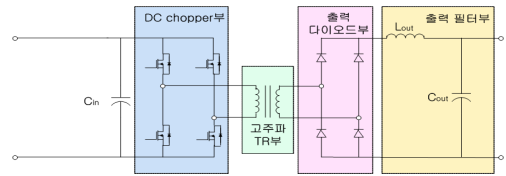


그림 3. 풀 브리지 컨버터 시스템 구성도
Fig. 3. Full-bridge converter system diagram

본 논문에서 풀 브리지 컨버터 시스템은 연료전지의 39~72V 저전압을 입력으로 받아 출력 380Vdc 전압을 출력하도록 설계하였으며 세부 사항은 표 1과 같다.

표 1. 풀 브리지 컨버터 설계사항
Table 1. Full-Bridge converter design specifications

파라미터	정격
용량	3[kW]
입력 전압	39~72[Vdc]
스위칭주파수	15[kHz]
변압기 권수비(n1:n2)	1:13
출력 전압	380[Vdc]
출력 전류	7.5[A]
출력 인덕턴스(L)	2.5[mH]
출력 커패시턴스(C)	2200[μF]

가. 변압기 설계

주파수 특성에 따라 코어의 손실을 나타내는 그래프를 참고하여 스위칭 주파수에 따른 가장 작은 손실도를 찾

아 재질을 결정한다. 또한 포화자속밀도 그래프를 이용하여 손실분을 고려하여야 한다.

본 설계에서는 TDK사의 PC40 재질을 사용하고 Bsat(포화자속밀도)은 0.45T, ΔB를 0.2T로 정한다. 적당한 코어를 결정하기 위해서는 식 (1)을 이용하여 코어의 면적 A_p 를 구하면

$$P_o = (V_o + 1.5)(I_o) \quad (1)$$

$$= (380 + 1.5)(7.5) = 3011.2$$

다이오드 순방향 전압강하를 1.5V 라고 가정하면

$$\sum VA = \left(\sqrt{\left(\frac{1 + D_{\max}}{D_{\max}} + \frac{\sqrt{2}}{\eta} \right)} P_o \right) \quad (2)$$

$$= \left(\sqrt{\left(\frac{1 + 0.4}{0.4} + \frac{\sqrt{2}}{0.9} \right)} \times 3011.2 \right)$$

$$= 10362 VA$$

식 (1), (2)에서 구한 P_o 와 $\sum VA$ 를 코어 면적 A_p 식에 대입하면

$$A_p = A_w A_e \quad (3)$$

$$= \left(\frac{\sum VA \times 10^4}{KB_m f K_u K_t \sqrt{\Delta T}} \right)^{1.14}$$

$$= \left(\frac{10362 \times 10^4}{4.88 \times 0.2 \times 15 \times 10^3 \times 0.4 \times 50 \sqrt{40}} \right)^{1.14}$$

$$= 98.29 cm^4$$

여기서 $\Delta T = 40^\circ C$, $K_u = 0.4$, $K_t = 50$, $K = 4.88$, $B_m = 0.20 T$ 이다.

(A_e : 코어의 단면적 A_w : 코어의 창면적)

코어의 크기는 코어손실에 의해 제한된다고 할 수 있다. 따라서 $A_p = 98.29 cm^4$ 보다 큰 코어를 찾아보면 EC120 코어를 선택할 수 있고 Part No. PC40 EC120-Z를 선택하였다. 그림 4와 같이 datasheet의 파라미터값 들을 참조하여 EC 코어의 계산된 A_e 값과 A_w 값을 이용하여 A_p 값과 일치하는 값을 정한다.

Part No.	Dimensions (mm)										K:2Fmm²	
	A	B	C	D	E	F	H	I	J	K		
PE22 EC70-Z	3950	70	69	10.4	10.5	43.3	45	12.75	4	5.2	14.1	639
PC40 EC78-Z	4890	70	69	10.4	10.5	43.3	45	12.75	4	5.2	14.1	639
PE22 EC90-Z	6340	90	88	13	13	50	50	16	6	5.5	20	1420
PC40 EC96-Z	7940	90	88	13	13	50	50	16	6	5.5	20	1420
PE22 EC100-Z	6450	100	98	13	13	50	50	16	6	5.5	20	1420
PC40 EC102-Z	8090	100	98	13	13	50	50	16	6	5.5	20	1420

Part No.	Core factor					Weight (g)
	C1(mm)	C2(10⁻³mm)	Area(mm²)	Lc(mm)	Vc(mm³)	
PE22 EC70-Z	0.520563	0.18035	282	149	41920	250
PC40 EC78-Z	0.5581571	0.05590	620	223	139500	635
PE22 EC90-Z	0.3448813	0.04464	773	266	205810	986

그림 4. EC 코어의 각 파라미터값

Fig. 4. Each parameter value of the EC core

식 (4)를 통하여 변압기의 권선수를 결정할 수 있다.

$$N_p = \frac{V_{in(min)} \times D_{\max} \times T_s}{2 \times \Delta B \times A_e} \quad (4)$$

$$= \frac{39 \times 0.4 \times 0.066 \times 10^{-3}}{2 \times 0.2 \times 773 \times 10^{-6}}$$

$$= 3.329 \approx 4 turn$$

여기서 $D_{\max} = 0.4$, $V_{in(min)} = 39 V$, $\Delta B = 0.2 T$ 를 적용하였다.

2차측 권선수는 고주파 변압기 효율을 0.95로 가정, 정류다이오드 전압강하를 2[V]로 가정하여 식 (5)를 통하여 결정할 수 있다.

$$N_s = \frac{V_o + V_F + V_L}{D_{\max} \times 2 V_{in(min)}} \times N_p \quad (5)$$

$$= \frac{1}{0.95} \times \frac{380 + 2 + 1}{0.4 \times 2 \times 39} \times 4 = 52 turn$$

또한 D_{min} , D_{max} 는 식 (6)과 (7)을 통해 얻을 수 있다.

$$D_{min} = \frac{N_p}{2 N_s} \times \frac{V_o}{V_{i(max)}} = 0.214 \quad (6)$$

$$D_{max} = \frac{N_p}{2 N_s} \times \frac{V_o}{V_{i(min)}} = 0.394 \quad (7)$$

1차측 권선 전류의 rms값 I_{L1rms} 는 식 (8)에 의해 2차측 권선 전류의 rms값 I_{L2rms} 는 식 (9)에 의해 허용 전류의 기준을 $[4A/mm^2]$ 로 가정할 경우 1, 2차측 권

선 단면적을 다음의 값들로 설계하였다. 또한 전류 용량이 크기 때문에 손실이 적은 Litz wire 권선을 사용하여 그림 5와 같이 풀 브리지 컨버터 변압기를 제작하였다.

- 1차측 권선 단면적 = $21.63[mm^2] \rightarrow 2.62[mm]$
- 2차측 권선 단면적 = $1.25[mm^2] \rightarrow 0.63[mm]$

$$I_{L1rms} = \frac{N_S}{N_P} \times I_{omax} \times \sqrt{2D_{max}} \quad (8)$$

$$= \frac{52}{4} \times 7.5 \times \sqrt{2 \times 0.394} = 86.55$$

$$I_{L2rms} = \frac{1}{2} \times I_{omax} \times \sqrt{1+2D_{max}} \quad (9)$$

$$= \frac{1}{2} \times 7.5 \times \sqrt{1+2 \times 0.394} = 5.01$$

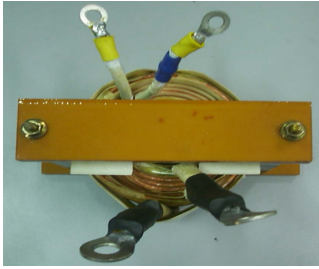


그림 5. 제작된 풀 브리지 컨버터의 변압기
Fig. 5. Transformer of the manufactured full-bridge converter

나. 주 스위치 선정

$$V_{Dmax} = V_{imax} = 72V \quad (10)$$

$$I_{Dmax} = \frac{N_S}{N_P} (I_{omax} + I_{omin}) = 107.25A$$

주 스위치 선정에 있어서 전압 스트레스 V_{DSmax} 와 스위치 전류의 최대치 I_{Dmax} 는 식 (10)을 통해 얻을 수 있다. 또한 스위치 선정은 실제적인 요소로서 서지 전압 및 전류를 고려해서 주어진 값보다 높은 정격의 소자를 대상으로 해야 한다. 따라서 본 논문에서는 세미크론사의 SKM 253B020(200V, 250A) MOSFET 소자를 선정하였다.

다. 정류다이오드

역저지 전압 V_R 은 식 (11)에 의해 얻을 수 있으며 2배의 여유분을 두어 역저지 전압을 구한다.

$$V_R = \frac{N_S}{N_P} \times 2V_{in(max)} \quad (11)$$

$$= \frac{52}{4} \times 2 \times 72 = 1,872V$$

다이오드 전류의 최대치 I_{Fmax} 는 식 (12)를 통해 얻은 값을 고려함과 동시에 순방향 전도 손실의 최소화, 우수한 역회복 특성 등을 만족할 수 있는 소자로서 Fast Recovery 다이오드를 사용하였다. 따라서 본 논문에서는 IXYS사의 DSEI60(52A 1,200V)를 선정하였다.

$$I_{Fmax} = I_{omax} + I_{omin} = 8.25A \quad (12)$$

라. 인덕터 설계

사용 주파수가 15[kHz]이기 때문에 이 주파수 영역에서의 코어 손실이 적은 TDK사의 PC40 재질을 선택하였다.

1) 최대 자속밀도 B_{max} 설계값

최대 자속밀도는 TDK사의 PC40 재질의 경우 포화자속밀도가 0.45T이기 때문에 포화를 우려하여 $B_{max} = 0.20T$ 로 설정하였다. 또한 식 (13)을 통해 L값을 2.516mH로 선정하였다.

$$L \geq \frac{V_o \left(\frac{1}{2} - D_{min} \right) T_s}{2I_{omin}} = \frac{380(0.5 - 0.214)}{2 \times 0.75 \times 2 \times 15 \times 10^3} \quad (13)$$

$$= \frac{114.4}{45 \times 10^3} = 2.516mH$$

2) 코어 설계값

$$A_P = A_W A_e \quad (14)$$

$$= \left(\frac{2W_m \times 10^4}{B_m K_u K_t \sqrt{\Delta T}} \right)^{1.14} = 66.7cm^4$$

코어의 크기는 코어 손실에 의해 제한된다고 할 수 있

다. 따라서 식 (14)를 통해 얻은 코어 면적 $A_p = 66.7\text{cm}^2$ 보다 큰 코어에 해당하는 EC90 코어를 선정하여 제작된 풀 브리지 컨버터의 인덕터를 그림 6에서 보여주고 있다.

여기서 $\Delta T = 50^\circ\text{C}$, $K_u = 0.4$, $K_f = 70$,
 $B_m = 0.20\text{T}$, $W_m = 0.0707\text{J}$ 이다.

3) 인덕터 권선 설계값

인덕터 전류 rms값 $I_{L_{rms}}$ 는 인덕터 권선에 흐르는 최대전류와 동일하게 볼수 있기에 7.5A로 선정할 수 있다. 또한 허용 전류(rms)의 기준을 $4[A/m^2]$ 로 고려하면 권선의 단면적은 식 (15)를 통해 얻을 수 있기에 0.77[mm]의 Litz wire 권선을 사용하는 것으로 하였다.

$$\frac{7.5}{4} = 1.875\text{mm}^2 = 0.77\text{mm} \quad (15)$$

4) 권선수 설계값

결정된 코어의 참고 자료로부터 AL값 7,940 [nH/ N^2]을 적용하여 식 (16)을 통해 권선수 18turn의 설계값을 얻을 수 있다.

$$N = \sqrt{\frac{L}{AL}} = \sqrt{\frac{2.516 \times 10^{-3}}{7,940 \times 10^{-9}}} = 18\text{turn} \quad (16)$$



그림 6. 제작된 풀 브리지 컨버터의 인덕터
 Fig. 6. Inductor of the manufactured full-bridge converter

마. 출력 커패시터 설계값

$$I_{Crms} = \frac{\Delta i}{2\sqrt{3}} = \frac{I_{omin}}{\sqrt{3}} = \frac{0.75}{\sqrt{3}} 0.433\text{A} \quad (17)$$

$$\Delta V_{orms} = \frac{\Delta V_o}{2\sqrt{3}} = \frac{4}{\sqrt{3}} = 2.31\text{V} \quad (18)$$

풀 브리지 컨버터의 출력전압 $V_o = 380\text{V}$ 일 때 풀 브리지 컨버터의 출력 커패시터에 흐르는 전류는 인덕터 전류의 맥동분이 흐르므로 이 전류의 실효치 식 (17)과 출력전압 리플분 식 (18)을 통하여 ESR(Equivalent Series Resistance)의 값을 식 (19)를 통해 얻을 수 있다.

$$ESR = \frac{\Delta V_{os}}{I_{Cs}} = 5.33 \quad (19)$$

그러나 실제 커패시터에 ESR은 2개의 커패시터를 병렬로 사용 때 $72\text{m}\Omega$ 로 본 본문에서는 최종적으로 세미크론사의 SKC 2M2 40A (2200uF 400V)를 병렬로 2개 사용하는 것으로 설계하였다.

III. 풀 브리지 컨버터 실험결과

그림 7은 본 논문에서 제작된 연료전지 발전시스템으로 연료전지 출력전압(30~70V)을 입력으로 받아 이를 인버터 동작 전압인 380V 승압하기 위하여 풀 브리지 컨버터가 적용되었다. 적용된 풀 브리지 컨버터는 "II. 풀 브리지 컨버터 구성요소 하드웨어 설계"에서 논한 내용을 기반으로 설계 및 하드웨어 제작이 이루어졌다.

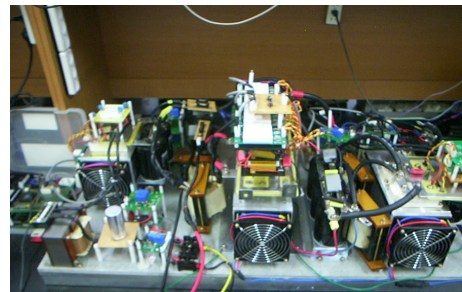


그림 7. 제작된 연료전지 발전시스템
 Fig. 7. Manufactured fuel cell power generation system

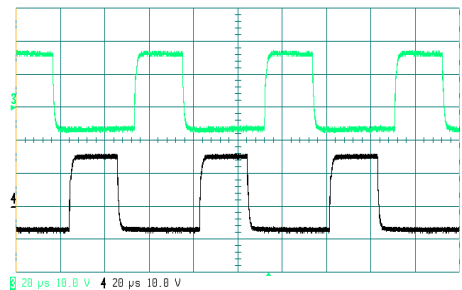


그림 8. 풀 브리지 컨버터 게이트 신호 (10V, 20µs/div)
 Fig. 8. Full-bridge converter gate signal

제작된 연료전지 발전시스템을 구동하여 동작하고 있는 풀 브리지 컨버터의 4개의 스위치 중 한 쌍의 스위치 (S1, S4 또는 S2, S3)가 교번으로 도통, 차단을 반복하면서 동작하게 되는 게이트 신호를 그림 8에서 보여주고 있다. 이러한 동작을 통하여 연료전지 전압 39~72V의 전압을 입력으로 하여 풀 브리지 인버터 출력전압 380V가 출력되고 있는 결과를 그림 9에서 보여주고 있다. 따라서 설계된 풀 브리지 컨버터는 연료전지 출력과 풀 브리지 인버터 사이에 존재하는 직류전압 가변장치로 연료전지 출력전압의 변동에 반응하여 컨버터의 일정 출력전압을 만듦으로써 정상적으로 동작하고 있는 것을 확인할 수 있다^[6].

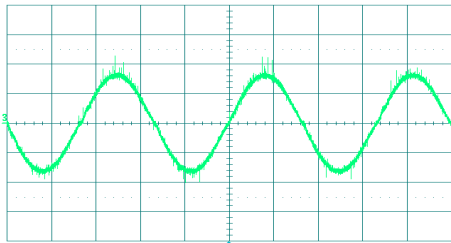


그림 9. 풀 브리지 인버터 출력전압 (200V/div, 5ms/div)
Fig. 9. Full-bridge inverter output voltage

IV. 결 론

본 논문에서는 연료전지발전 시스템의 구성원 중 연료전지 출력전압(30~70V)을 입력으로 받아 계통연계에 적용되는 인버터의 주요 전원인 풀 브리지 컨버터에 대해 표 1과 같은 사양으로 하드웨어 세부설계에 대하여 살펴보았다. 주요 설계 내용으로 풀 브리지 컨버터의 변압기, 주스위치, 정류다이오드, 인덕터, 출력 커패시터에 대한 설계값을 통한 세부 선정과 하드웨어 제작을 통하여 연료전지발전 시스템의 구성원 중 한 부분인 3kW 풀 브리지 컨버터의 성능을 확인하였다.

따라서 본 논문을 통하여 연료전지 출력전압의 변동에 반응하여 컨버터의 일정 출력전압을 만들어 인버터에 전원공급 및 가정에서 필요한 교류전원을 얻을 수 있는 연료전지 발전시스템을 구성할 수 있었다. 이러한 결과물을 통하여 연료전지, 태양광, 풍력에너지 등의 신재생에

너지원을 이용한 전력변환장치의 하드웨어 설계에 표본이 될 것으로 사료된다.

References

- [1] Fuel Cell Handbook, 7th ed., EG&G Technical service, Inc U.S. Department of Energy, 2004.
- [2] H. H Kim, H. J. Lee, S. C. Shin, Y. C. Jung, C. Y. Won, "Fuel Cell Generation System Combined Interleaved Full- bridge Converter with Half-bridge Inverter," Conf. of KIPE, pp. 518~519, 2012.
- [3] J. M. Kim, "The control of Interleaved Multi-phase Boost Converter for Application of a Fuelcell Railway Vehicle," The Transactions of the KIEE, vol. 65, no. 11, pp. 1925-1930, 2015.
<http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2016.65.11.1925>
- [4] Y. H. Yoon, "Modeling of BLDC Motor Driving System for Platform Screen Door Control applied Fuel Cell Power Generation System," Trans. KIEE. vol. 66, no. 6, pp. 968-974, 2017.
<http://doi.org/10.5370/KIEE.2017.66.6.968>
- [5] Y. H. Yoon, "Configuration of Fuel Cell Power Generation System through Power Conversion Device Design," The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (JIIBC), vol. 20, no. 6, pp. 129-134, 2021.
<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2021.21.6.129>
- [6] J. S. Kim, H. S. Kang, Gy. Y. Choe, B. K. Lee, "Development of Robust Algorithm to Eliminate Low Frequency Current Ripples in Fuel Cell Generation System," Trans. KIEE. vol. 58, no. 9, pp. 1720-1727, 2009.

저 자 소 개

윤 용 호(정회원)



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

※ 이 연구는 2022년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음.