ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 65, No. 11, pp. 1925~1930, 2016
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2016.65.11.1925

연료전지 철도차량 적용을 위한 인터리브드 다상 승압형 컨버터 제어

The control of Interleaved Multi-phase Boost Converter for Application of a Fuelcell Railway Vehicle

김 재 문*
(Jae-Moon Kim)

Abstract - Fuel cell power generation system, unlike conventional energy sources, converts chemical energy into electrical energy through electrochemical reaction of hydrogen and oxygen. This paper presents the control of interleaved multi-phase boost converter as the feasibility study on small-scale prototype electric railway vehicle application using fuel cell generation system. PSIM simulation program is to be used to implement the modeling of the electrical fuelcell as well as traction motor control with interleaved multi-phase boost converter. Comparing the input current ripple rate, two-phase interleaved boost converter is less than the boost converter. But the more multi-phase not less proportional to the ripple factor. we confirmed that the amplitude of the input current ripple rate of converter depend on duty ratio.

Key Words : Fuel cell power generation system, Interleaved boost converter, Input current ripple, Railway vehicle

1. 서 론

에너지 사용에 대한 환경규제 및 화석연료 고갈에 대비한 자원 확보 경쟁 등으로 전기를 생성하는 기존의 화석연료 에너지원을 청정에너지로 대체하는 비중이 최근에 확대되고 있다. 철도분야에서도 국내 철도기술의 발전과 더불어 타 산업분야에서 적용되고 있는 다양한 요소기술뿐만 아니라 신기술을 철도산업에 접목하려는 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 일례로 철도역사 내에 태양광 및 풍력 등 신재생에너지를 활용하여 계통연계 혹은 독립형 운전을 통해 에너지 이용율을 높이고자 노력하고 있다.[1] 또한 타 신재생에너지보다 높은 효율과 대기 중의 산소를 이용한다는 측면에서 철도분야에 연료전지 발전기술을 적용하려는 연구가 국내외를 중심으로 수행되고 있다.[2]

연료전지는 화학에너지를 전기에너지로 변환하면서 전기를 생산하는 신재생에너지원으로 발생되는 열사용을 극대화하기 위해 열병합 발전을 하는 경우 효율이 80%이상이며, 기존 화력발전 대비 CO_2 배출량 40% 감소하는 효과를 갖는 것으로 알려져 있다. 철도차량에 연료전지 발전을 적용하려는 연구가 이루어지고 있어 국외에서 활발하게 진행되고 있다. 연료전지 발전시스템을 철도차량에 적용하기 위해서는 에너지원에 해당하는 연료전지 특성 및 철도차량의 부하특성 분석을 통해 이에 적정한 전력변환시스템 및 제어기법이 요구된다. 즉, 철도차량의 견인전동기를 구동하는 인버터의 입력전압은 높으며 연료전지 발전시스템의 출력은 저전압 대전류로 철도차량에 적용하기 위해서는 부하특성을 고려한 전력변환장치 설계가 요구된다.

본 논문에서는 연료전지 발전시스템을 철도차량 견인시스템에 적용하기 위한 선행연구로 연료전지 발전시스템을 모델링하고, 연료전지 발전시스템의 출력전압을 컨버터를 통해 축소형 인버터의 입력전압으로 적합하도록 제어를 구현하였다. 컨버터는 용량이 커질수록 전류가 상승하여 전력용 스위치 소자의 피로를 증가시켜 성능을 하락시키거나 고장을 유발할 수 있으므로 전력용 스위치 소자의 피로를 저감하고 전압, 전류 리플율을 최소화할 수 있는 인터리브드 다상 승압형 컨버터를 제안하였다.

이를 위해 반응속도가 느린 PEM(Proton Exchange Membrane) 연료전지 특성에 근사하도록 전기적인 단순화된 모델링을 구현한 후 시뮬레이션을 수행함으로써 컨버터 출력전압 제어특성 고찰하였다. 그리고 축소형 인버터에 적합하고 입력전류 리플율을 최소화할 수 있는 인터리브드 다상 승압형 컨버터에 대해 제안하고 부하변동에 따른 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 철도차량에 많이 적용되고 있는 3상 유도전동기의 속도변화를 통해 제안된 컨버터의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 연료전지 특성

연료전지는 수소와 산소를 전기 화학적으로 반응시켜 식 (1)과 같이 전기와 열, 물(H_20)를 발생시킨다.[2-4]

연료극(양극) : $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

공기극(음극) : $2H^+ + \frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O$

* Corresponding Author : Dept. of Transportation System Engineering, Graduate School of Transportation, Korea National University of Transportation, Korea
E-mail: goldmoon@ut.ac.kr
Received : October 13, 2016; Accepted : October 25, 2016

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

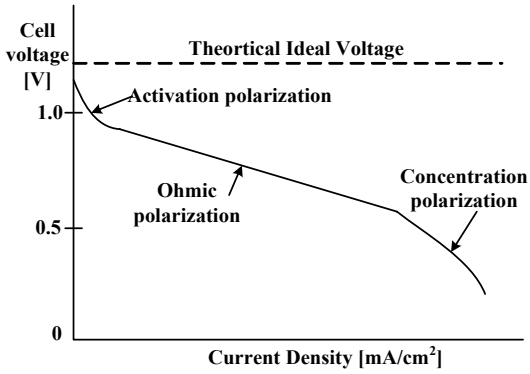


그림 1 연료전지의 일반적인 전압-전류 특성곡선
Fig. 1 General characteristic curve of V-I of fuel cell

$$\text{전체반응 : } H_2+\frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O+\text{전기}+\text{열} \quad (1)$$

일반적으로 연료전지는 양극 (Anode)을 통해 수소가 공급되고, 음극 (Cathode)을 통하여 공기 중의 산소가 공급이 된다. 음극을 통하여 들어온 분자는 촉매에 의하여 양자와 전자로 나누어지고 나누어진 양자와 전자는 서로 다른 경로를 통하여 양극에 도달하게 된다. 양자는 전해질을 통하여 흘러가고 전자는 외부회로를 통하여 전류를 흐르게 하면 산소와 결합하여 물을 발생시킨다.

그림 1은 연료전지의 전압-전류 특성곡선을 보여준다. 가역반응시 연료전지 스택을 구성하는 단위 셀의 전압은 무부하시 약 1.2~1.3[V]이고 출력전류가 증가함에 따라 약 0.6~0.7[V]까지 낮아진다. 연료전지의 전압과 전류 특성은 활성화 분극 (Activation Polarization), 저항 분극 (Ohmic Polarization), 농도 분극 (Concentration Polarization), 내부전류 및 연료손실 등에 의한 비선형 특성을 나타낸다. 특히 저항 분극은 연료전지의 주 동작영역으로 부하가 증가함에 따라 연료전지의 내부저항 및 연료의 공급량 영향으로 출력이 선형적으로 감소한다.

비표준 상태에서 연료전지의 이론적 전압으로 "네른스트 전압"이 존재하며 네른스트 전압에서 각 분극의 전압을 뺀 전압인 "단위 셀 전압"은 식 (2)과 같이 표현되며, 셀의 직렬 연결 수를 곱하면 스택 전압이 된다.

$$V_{cell}=E-(i+i_n)r-\frac{RT}{\alpha nF}\ln\left(\frac{i+i_n}{i_o}\right)+\frac{RT}{nF}\ln\left(1-\frac{i+i_n}{i_L}\right) \quad (2)$$

여기서, i_n은 내부전류, R은 기체상수 (8.3144 J/mol · K), T는 절대온도 (K), α는 전이계수, n은 반응에 참여한 몰(mol) 수, F는 페러데이 상수(96,485 C/mol), i_o는 교환전류밀도, i_L은 제한 전류밀도를 나타낸다.

한편 본 논문에서 적용하고자 하는 연료전지는 다수의 셀로 구성되어 있는 PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)이다. 그림 2와 그림 3은 정격용량 5[kW]의 연료전지 전류-전압 특성곡선과 전류-전력 특성곡선의 일례를 보여준다. 그림

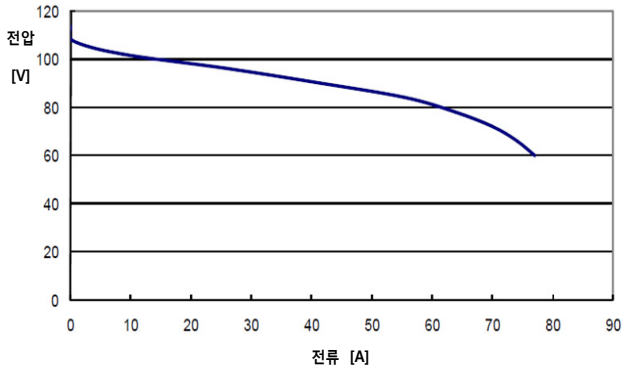


그림 2 연료전지의 전압-전류 특성곡선의 일례
Fig. 2 The example of characteristic curve of V-I of fuel cell

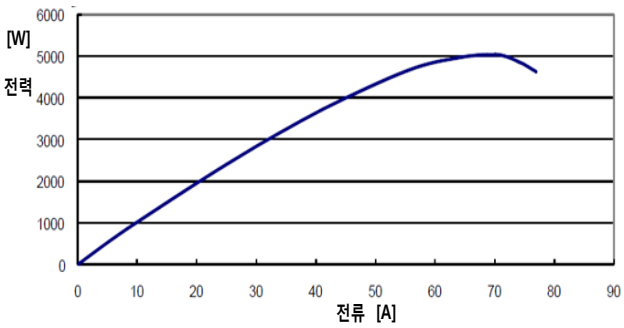


그림 3 연료전지의 전력-전류 특성곡선의 일례
Fig. 3 The example of characteristic curve of P-I of fuel cell

2에서 보면, 전부하시 전압은 72[V] 전류는 70[A]이며 무부하시 전압은 115[V]이고 전류를 75[A]까지 사용시 전압이 60[V]까지 감소한다.

그림 3은 용량과 전류와의 관계를 나타낸 P-I 곡선이다. 전류 70[A]일 때 용량 5[kW]를 기준으로 전류가 감소함을 보여준다.

2.2 연료전지 발전시스템을 적용한 철도차량 견인시스템

일반적으로 연료전지 발전시스템은 에너지원인 연료전지 스택 (Stack)을 비롯하여 주변 보조기기(Balance of Plant, BOP), 주변환장치, 제어 유니트로 구성된다[2][3]. 해외사례를 살펴보면, 그림 4와 같이 철도차량에 적용된 연료전지 발전시스템은 배터리 등과 같은 에너지저장장치와 결합한 하이브리드 동력시스템으로 구성되어 있다. 그림 4는 연료전지 발전시스템을 통해 생성된 전력은 주변환장치를 이용하여 견인용 직류전동기를 구동하게 되며, 가속인 경우 부족한 전력을 에너지저장장치를 통해 공급받고 제동시에는 회생에너지가 양방향 컨버터를 통해 에너지저장장치에 저장하게 된다.

그림 5는 수소연료전지 발전시스템을 탑재한 전동차의 주변환장치 토폴로지로 그림 4와 비교했을 때 견인용 유도전동기를 구

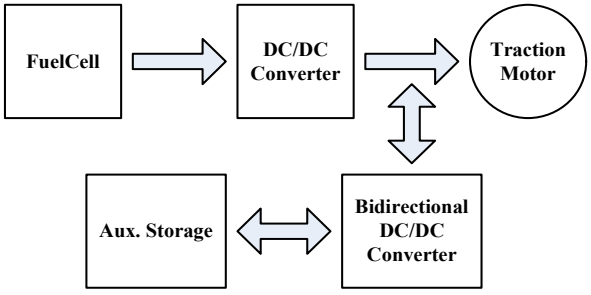


그림 4 전기기관차에 적용된 연료전지 발전시스템
Fig. 4 A fuel cell generation system used electric locomotive

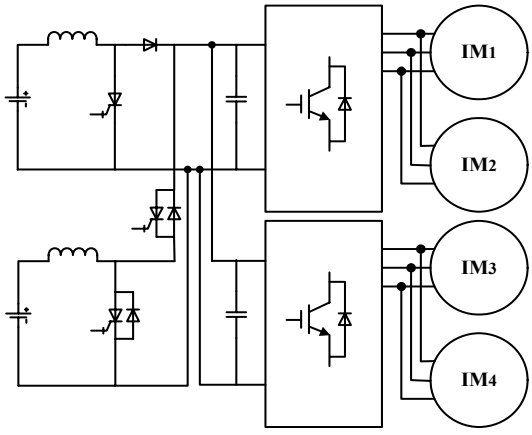


그림 5 JR 수소연료전지 전동차 일례
Fig. 5 The example of Fuelcell EMU for JR

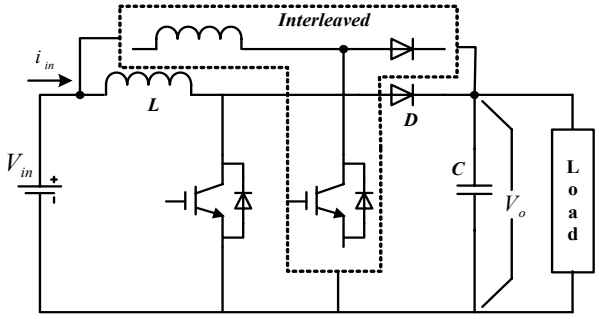


그림 6 인터리브드 다상 승압형 컨버터
Fig. 6 Interleaved multi-phase boost converter

동하기 위한 3상 인버터가 추가로 연결되어 있으며, 인버터 1대당 견인전동기 2대를 구동하는 1C2M 구조이다.

2.3 인터리브드 승압형 컨버터 고찰

연료전지는 저전압 대전류 특성을 나타냄에 따라 철도차량용 견인 유도전동기를 구동하기 위한 승압형 컨버터 및 교류 전원

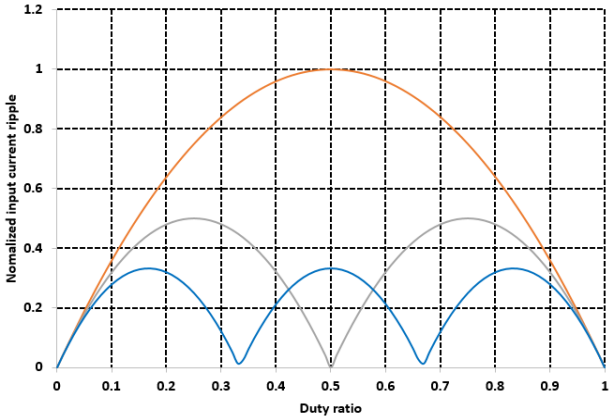


그림 7 듀티비에 따른 입력전류에 대한 전류 리플률 크기
Fig. 7 The magnitude of current ripple rate on input current according with duty ratio

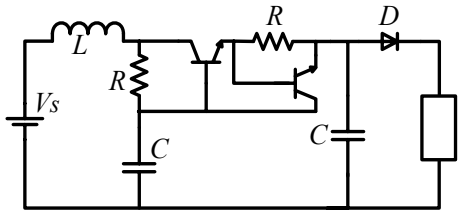


그림 8 PEMFC의 단순화된 전기적 모델링
Fig. 8 Simplified electrical modeling of PEMFC[6][7]

생성 인버터가 요구되며, 이때 입력 전압원으로 고려되는 연료전지 출력의 전류 리플을 고려할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 전류 리플을 최소화하여 스위칭 소자의 스트레스를 줄일 수 있도록 인터리브드 승압형 컨버를 적용하였다. 그림 6은 승압형 컨버터를 기본으로 추가적으로 스위칭소자, 인덕터(L), 다이오드(D)가 구성된 결선 횟수에 따라 인터리브드 2상, 3상으로 확장될 수 있음을 보여준다.[4][5]

연료전지를 전압원으로 컨버터를 제어하게 되면 출력전압은 일정하게 되지만 그림 1과 그림 2에서 보듯이 부하가 증가함에 따라 전압이 감소하게 된다. 따라서 그림 6에서 컨버터 입력전압 V_{in}은 연료전지 출력전압이고 스위칭 주기 T, 듀티비 D, 인덕터 L이라고 할 때, 컨버터 출력전압이 일정한 경우의 입력리플 전류 Δi_{in}에 대한 수식은 다음과 같다.

$$\Delta i_{in} = \frac{V_o T}{L}(1-D)D \tag{3}$$

2상 인터리브드 승압형 컨버터는 그림 6에서 2개의 승압형 컨버터가 병렬로 연결되어 있다. 따라서 2개의 스위칭 소자는 180° 의 위상차를 두고 제어한다. 이 경우 입력전류에 대한 리플율은 듀티비 0.5를 기준으로 고려될 수 있다.

$$0 \le D \le 0.5 \text{ 인 경우 } \Delta i_{in} = \frac{V_o T}{L}(1-2D)D \quad (4)$$

$$0.5 \le D \le 1 \text{ 인 경우 } \Delta i_{in} = \frac{V_o T}{L}(2D-1)(1-D) \quad (5)$$

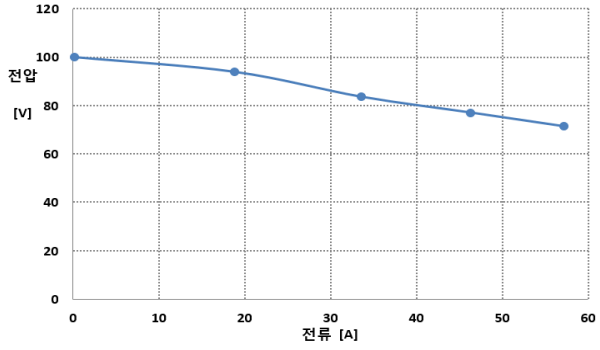
3상 인터리브드 승압형 컨버터는 그림 6에서 3개의 승압형 컨버터가 병렬로 연결된 구조로 각각의 승압형 컨버터는 120° 의 위상차를 두고 제어를 하게 된다. 따라서 듀티비를 식 (6)~식 (8)과 같이 3개의 구간으로 구분하여 전류 리플율을 계산한다.

$$0 \le D \le 1/3 \text{ 인 경우 } \Delta i_{in} = \frac{V_o T}{L}(1-3D)D \quad (6)$$

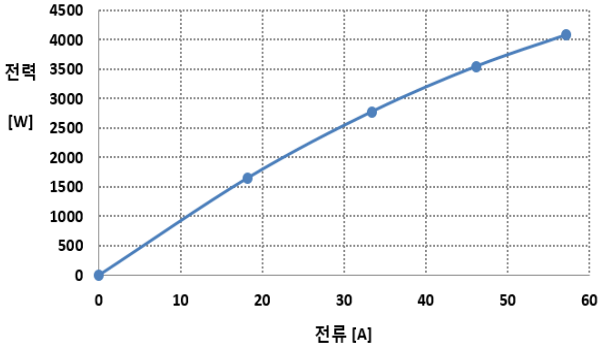
$$1/3 \le D \le 2/3 \text{인 경우 } \Delta i_{in} = \frac{V_o T}{L}(2-3D)(D-1/3) \quad (7)$$

$$2/3 \le D \le 1 \text{ 인 경우 } \Delta i_{in} = \frac{3V_o T}{L}(1-D)(D-2/3) \quad (8)$$

그림 7은 컨버터 출력측 전압이 일정한 경우 일반적인 승압형 컨버터를 비롯하여 2상 및 3상 인터리브드인 경우의 컨버터 입력전류 리플율을 보여준다. 컨버터 입력전류에 대해 듀티비에 따른 리플전류의 상대크기를 보여주고 있는데 일반적인 승압형 컨버터의 입력전류를 기준으로 하면, 2상인 경우 0.5 듀티비일 때 리플율이 거의 없으며, 3상 인터리브드 승압형 컨버터 전류 리플율은 듀티비 0.33과 0.67 정도에서 리플율이 거의 나타나지 않는 특성을 보인다.



(a) 전류-전압 특성곡선



(b) 전류-전력 특성곡선

그림 9 PEMFC 모델링에 의한 전류-전압, 전류-전력 특성곡선

Fig. 9 The characteristic curve of I-v, I-p by PEMFC electrical modeling

2.4 시뮬레이션

본 논문에서는 적용된 연료전지는 120개의 셀로 구성되어 있는 PEMFC(Proton Exchange Membrane Fuel Cell)으로, 그림 2와 그림 3에서 보듯이 정격전력은 5[kW]이며 무부하시 전압은 115[V]이고 전류를 상승함에 따라 전압이 감소한다. 따라서 그림 8과 같이 연료전지에 대한 단순화된 모델링을 수행하고 시뮬레이션을 하였다.

그림 9는 그림 8을 통해 시뮬레이션 결과로 전류-전압, 전류-전력 특성곡선을 나타낸다. 정격부하에서 정격전력 5[kW]를 보이고 있으며, 그림 3과 같이 정격전력 이후 용량이 감소함을 알 수 있다. 또한 그림 2와 같이 부하전류가 증가함에 따라 연료전지 출력전압이 감소함을 보여준다.

그림 10은 연료전지를 포함한 시뮬레이션 회로도를 보여준다. 연료전지 발전시스템을 통해 출력된 전압은 2상 인터리브드 승압형 컨버터 제어를 통해 380[V]로 승압한다. 이후 3상 인버터를 통해 3[kW] 견인전동기를 구동하게 된다.

그림 11은 그림 왼아10에서 인버터와 견인전동기를 제외하고

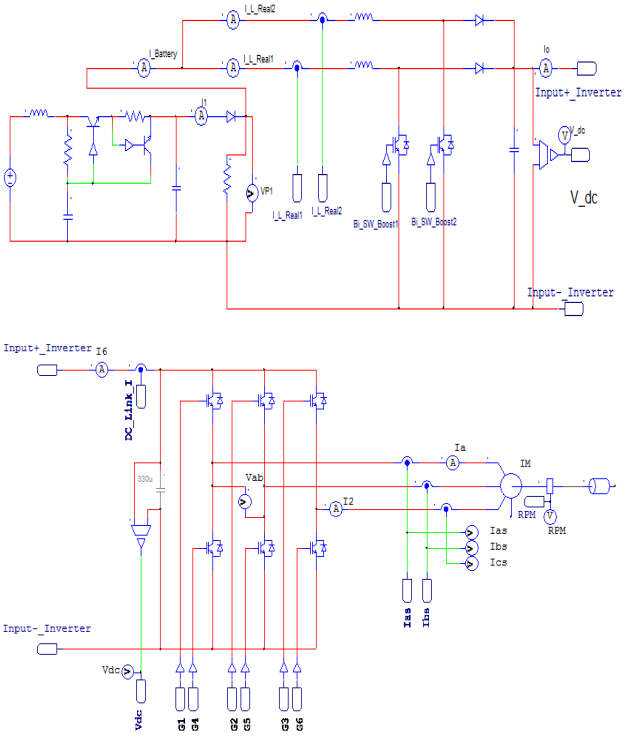


그림 10 연료전지 모델링을 포함한 시뮬레이션 회로

Fig. 10 Simulation circuit with modeling of PEMFC

저항부하를 연결하여 컨버터 출력전압을 제어할 때의 파형을 보여준다. 저항부하 375[W]에서 컨버터 출력전압을 380[V]로 제어하다가 0.7초 시점에 750[W], 1.2초 시점에 1.5[kW]로 부하를 증가하였을 때 출력전압과 인터리브드 2상 인덕터에 흐르는 전류를 보여준다. 부하 750[W]일 때는 인덕터에 흐르는 전류가 불연속을 보이다가 부하가 증가하면서 연속모드로 흐르고 있음을 알 수 있다. 또한 부하변동에 대해 출력전압 380[W]가 과도상태를 보이다가 정상상태에 도달함을 볼 수 있다.

그림 12는 그림 11에서 저항부하 1.5[kW] 부하변동을 주었을 때 정상상태 파형으로 1.4[sec]에서 1.472[sec] 동안 출력전압 380[V]로 제어되고 있으며, 컨버터 입력전류는 8.5[A]~11.5[A]의 범위내에서 흐르고 있음을 알 수 있다.

그림 13은 저항부하 1.5[kW]에 대해 일반적인 승압형 컨버터로 출력전압 380[V]로 제어할 때의 정상상태 결과파형을 보여준다. 컨버터 입력전류가 14[A]~18[A] 범위내에서 흐르고 있으며, 전류 리플이 4[A] 변동폭을 갖고 있으며 연속 모드에서 동작하고 있음을 알 수 있다.

그림 8과 그림 9에서 보면, 부하용량이 1.5[kW]인 경우 전류는 15[A] 정도가 흐르게 되며 이때 연료전지 출력전압은 전류가 증가함에 따라 감소하게 되는데 95[V] 정도가 됨을 알 수 있다. 이 값을 기준으로 컨버터 출력전압이 380[V] 제어를 하게 되면 듀티비 D는 0.75로 동작하게 된다.

그림 7에서 듀티비 D가 0.75인 경우 일반적인 승압형 컨버터는 듀티비 0.5일 때 입력전류 리플율 대비 0.7이 되며 인터리브드 2상 승압형 컨버터인 경우 0.5 정도의 리플율을 갖게 된다. 그리고 인터리브드 3상 승압형 컨버터인 경우는 0.25 정도의 리플율을 갖는다.

따라서 그림 12와 그림 13을 비교하면 전류 변동폭이 인터리브드 2상일 때 3[A], 일반적인 승압형 컨버터일 때 4[A]로 인터리브트 2상 승압형 컨버터가 25[%] 정도 작다는 것을 알 수 있

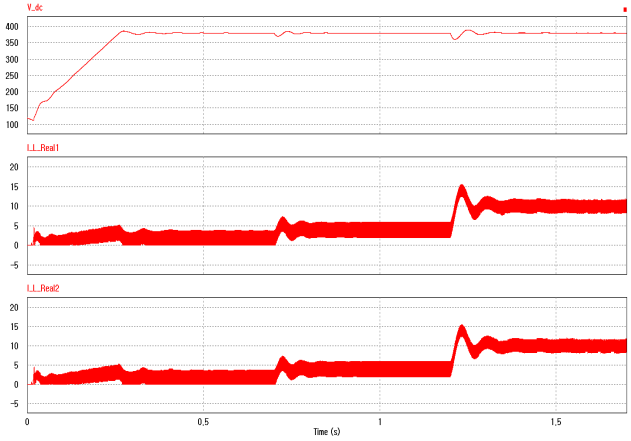


그림 11 부하변화에 따른 인터리브드 승압형 컨버터 출력전압 및 전류 파형

Fig. 11 Output voltage and current waveform of Interleaved Boost converter in case of load variance

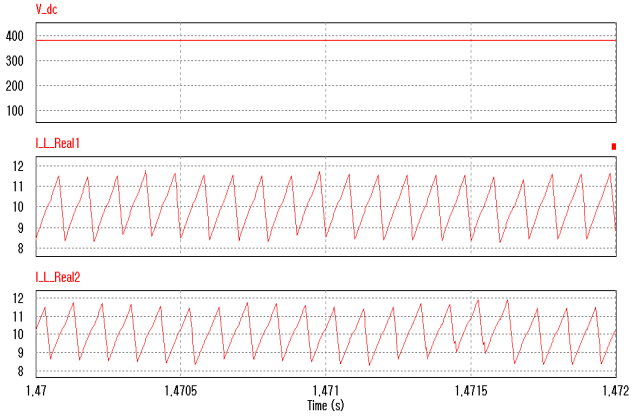


그림 12 부하변화에 따른 인터리브드 승압형 컨버터 출력전압 및 전류 파형

Fig. 12 Output voltage and current waveform of Interleaved boost converter according to the load variance

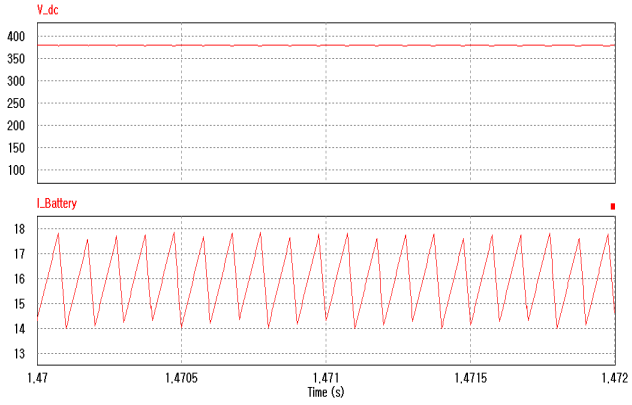


그림 13 부하변화에 따른 인터리브드 승압형 컨버터 출력전압 및 전류 파형

Fig. 13 Output voltage and current waveform of Interleaved Boost converter in case of load variance

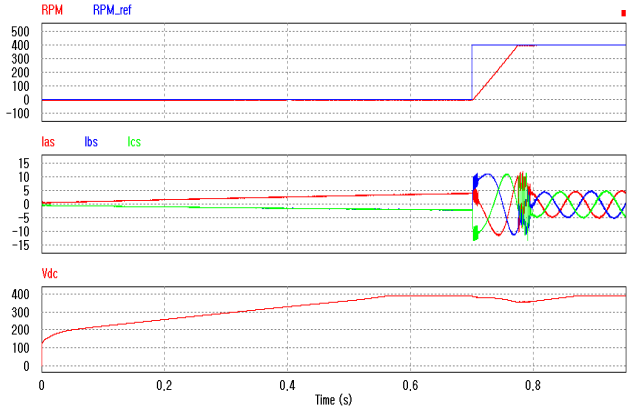


그림 14 속도제어에 따른 인버터 상전류 및 컨버터 출력전압 파형

Fig. 14 Waveform of converter output voltage and inverter phase current according to the traction motor control

으며, 이는 그림 7에서 보듯이 리플율이 거의 같음을 확인할 수 있다. 3상 인터리브드 승압형 컨버터일 경우 리플율은 더욱 작게 될 수 있으나, 시스템을 설계할 때 듀티비 D에 따라 2상 혹은 3상을 선택해야 함을 의미한다. 즉 듀티비 D가 0.5를 기준으로 설정할 경우 2상 인터리브드 승압형 컨버터 입력전류 리플율이 3상 인터리브드 승압형 컨버터 입력전류 리플율과 비교하여 줄어든다.

그림 14는 2상 인터리브드 승압형 컨버터 초기값에서 램프형태의 출력전압 380[V]를 제어하면 기준값을 추종하다가 0.6[sec] 이전에 380[V]에 도달하게 된다. 이후 0.7초 되는 시점에 견인전동기 속도 400[rpm] 기준값을 주면 0.8초 이전에 기준값을 추종하게 되고 인버터 상전류는 과도현상을 보인다. 이때 컨버터 출력전압은 견인전동기 역행으로 인해 전압강하가 발생하게 되고 이후 견인전동기 속도가 기준값을 추종하게 되면 다시 안정된 상태로 되돌아가게 됨을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 연료전지 발전시스템을 철도차량 견인시스템에 적용하기 위한 선행연구로 PEM 연료전지에 대한 전기적인 모델링을 제시하고 이에 따른 시뮬레이션을 위해 단순화된 모델링을 구현하였다. 그리고 시스템 설계시 컨버터 입력전류 리플율을 최소화할 수 있는 인터리브드 다상 승압형 컨버터 선택방법을 그림 7을 통해 제시하였다. 본 논문을 통해 얻은 결과는 아래와 같다.

1) PEM 연료전지는 수소와 산소가 화학적 반응을 통해 전기가 생성되지만, 일반적인 전류-전압, 전류-전력 특성곡선을 통해 단순화된 전기적인 모델링을 구현할 수 있음을 확인하였다.

2) 입력전압 대비 출력전압 듀티비에 따라 시스템 설계시 적정한 인터리브드 승압형 컨버터를 선정해야 함을 확인할 수 있었다.

3) 또한 연료전지 발전시스템을 인터리브드 승압형 컨버터를 적용하여 철도차량에 많이 적용되고 있는 3상 유도전동기의 속도변화를 고찰한 결과 과도상태에서 인버터 상전류가 크게 증가하지만 정정시간이 지나면 정상상태에 도달하였다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구입니다.

References

[1] Seungkwon Shin, Hyungchul Kim, Hosung Jung et al., “Multilevel Inverter Development to Utilize Renewable Energy in Urban Railway Station”, The Transactions of the KIEE, Vol. 64, No. 2. pp. 324-330, 2015

[2] No-Geon Jung, Chin-Young Chang, Sang-Hoon Chang and Jae-Moon Kim, “The Feasibility Study on Small-scale Prototype Electric Railway Vehicle Application using Fuel Cell Generation System”, The Transactions of the KIEE, Vol. 63, No. 1, pp. 184-190, 2014

[3] No-Geon Jung, Sang-Hoon Chang and Jae-Moon Kim, “A Study on Propulsion Control Device Characteristics of Small-scale Electric Railway Vehicle according to Driving Curve Tracking using Fuel Cell Generation System”, The Transactions of the KIEE, Vol. 64, No. 12, pp. 1804-1809, 2015

[4] Yong-Chae Jung., “Input Ripple Current Formula Analysis of Multi-Stage Interleaved Boost Converter”, Journal of the KIECS, Vol. 6, No. 6, pp. 865-871, 2011

[5] Yong-Chae Jung. “A Study on Generalized Output Capacitor Ripple Current Equation of Interleaved Boost Converter”, Journal of the KIECS, Vol. 7, No. 6, pp. 1429-1435, 2012

[6] Dachuan Yu, S. Yuvarajan, “Electronic Circuit Model for Proton Exchange Membrane Fuel Cells”, Journal of Power Sources 142, pp. 238-242, 2005

[7] Caisheng Wang, Hashem Nehrir and Steven R. Shaw, “Dynamic Models and Model Validation for PEM Fuel Cells Using Electrical Circuits", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 2, June 2005

저 자 소 개

김 재 문 (Jae-Moon Kim)

1994년 성균관대 전기공학과 졸업. 2000년 2월 동 대학원 졸업(공박). 2000년~2004년 현대모비스(주) 기술연구소 선임연구원. 2006년~현재 국토교통부 철도기술 전문위원, 2004년 3월~현재 한국교통대학교 교통대학원 교통시스템공학과/철도전기전자공학과 교수

E-mail : goldmoon@ut.ac.kr