ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 63, No. 1, pp. 184~190, 2014
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2014.63.1.184

연료전지 발전시스템을 이용한 축소형 철도차량 적용 선행연구

The Feasibility Study on Small-scale Prototype Electric Railway Vehicle Application using Fuel Cell Generation System

정 노 건* · 장 진 영** · 창 상 훈*** · 김 재 문†
(No-Geon Jung · Chin-Young Chang · Sang-Hoon Chang · Jae-Moon Kim)

Abstract - Fuel cell power system, unlike conventional energy sources, converts chemical energy into electrical energy through electrochemical reaction of hydrogen and oxygen. In recent years, railway field as well as mobile fuel cell power system is being studying actively with development of hydrogen storage technologies. This paper presents the feasibility study on small-scale prototype electric railway vehicle application using fuel cell generation system. it is confirmed that proposed fuelcell-battery hybrid system shows good response characteristic about speed and torque based on design of parameter on system. Also as results of response for proposed system modeling, it show that powering mode and braking mode of system is controlled by switching devices of converters.

Key Words : Fuel cell, Hydrogen, Fuelcell-battery hybrid system, Converter, SVPWM

1. 서 론

철도기술의 발전과 더불어 타 산업분야에서 적용되고 있는 다양한 요소기술 및 신기술이 철도에 접목하려는 시도가 이루어지고 있다. 이와 같은 시도는 화석연료 고갈과 환경오염에 대한 관심이 고조되면서 국내에서 운행되고 있는 철도차량이 디젤차량에서 전기차량으로 전환되고, 전철화 구간도 확대되면서 진행되고 있다.

한편 신재생에너지를 활용한 기술이 타 산업분야로 확대되는 가운데 철도산업에서 태양광 및 풍력 등 신재생에너지를 활용하여 전차선로의 전원과 연계하고자 하는 노력이 시도되고 있다. 이와 연계하여 연료전지를 이용한 발전기술이 철도분야에 적용하려는 연구가 국내외를 중심으로 이루어지고 있다.

연료전지는 수소와 산소가 전기화학 반응을 통해 화학에너지를 전기에너지로 변환하게 되는데 전기를 생산하면서 발생되는 열사용을 극대화하기 위해 열병합 발전을 하는 경우 전체 효율이 80%이상이며, 기존 화력발전 대비 CO_2 배출량 40%, 에너지 사용량 26%가 감소하는 효과를 갖는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 연료전지를 통해 발전하기 위해서는 에너지원인 연료전지 스택(Stack)을 비롯하여 개질기 등의 주변 보조기기(Balance of Plant, BOP), 전력변환장치, 제어시스템으로 이루어진다[1][2].

코제너레이션(Cogeneration)의 하나인 연료전지 발전은 [mW]급 소용량에서 부터 수십 [MW]급 대용량에 이르기까지 산업용 및 업무용에서 자동차, 가정용 등 넓은 분야에 적용이 가능한 시스템으로 확대되고 있다.

본 논문에서는 연료전지 발전시스템을 이용하여 철도차량에 적용하고자 할 때 고려되어야 할 항목에 대해 선행연구를 하였다. 철도차량에 적용한 토폴로지 사례는 기존에 제시되고 있으나, 제어기법 등 세부적인 연구들은 제시되어 있지 않다[3][4]. 따라서 다양한 연료전지 중 철도차량에 적합한 연료전지 종류와 이에 따른 연료전지 특성곡선을 고찰하였다. 또한 대용량 전력을 필요로 하는 철도분야 적용사례를 살펴보고 연료전지 발전을 위한 전력변환장치 토폴로지들의 장단점을 분석하여 적합한 토폴로지를 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 견인전동기가 수시로 이루어지는 역행과 회생제동에 대해 이루어졌으며, 이를 토대로 제안한 토폴로지가 타당함을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 연료전지 종류 및 특성

연료전지는 물의 전기분해와 반대되는 원리로 식 (1)과 같이 수소와 산소를 전기 화학적으로 반응시켜 전기와 열, 물(H_20)를 발생시킨다.

$$\begin{aligned} &\text{연료극(음극)} : H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \\ &\text{공기극(양극)} : \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O \\ &\text{전체반응} : H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O + \text{전기} + \text{열} \end{aligned} \quad (1)$$

* Dept. of Transportation System Engineering, Korea National University of Transportation, Korea
** School of Electronics & Electric Engineering, Chung-Ang University, Korea
*** Korea Railroad Research Institute, Ph.D, Korea
† Corresponding Author : Dept. of Transportation System Engineering, Graduate School of Transportation, Korea National University of Transportation, Korea
E-mail : goldmoon@ut.ac.kr
Received : November 25, 2013; Accepted : December 23, 2013

연료전지는 이온의 전도를 담당하는 전해질의 종류 또는 작동온도에 따라 알칼리 연료전지(Alkaline Fuel Cell, 이하 AFC), 직접메탄올 연료전지(Direct Methanol Fuel Cell, DMFC), 고분자전해질 연료전지 (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, 이하 PEMFC), 인산형 연료전지 (Phosphoric Acid Fuel Cell, 이하 PAFC), 용융 탄산염 연료전지(Molten Carbonate Fuel Cell, 이하 MCFC), 고체산화물형 연료전지 (Solid Oxide Fuel Cell, 이하 SOFC) 등과 같이 분류되며, 표 1에 대표적인 연료전지를 나타내었다[1].

표 1 연료전지의 종류
Table 1 Kinds of Fuel cell

	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
전해질	고분자막	인산	탄산염	고체 산화물
작동온도(℃)	30~100	약 220	600~700	500~1000
발전효율(%)	35~42	35~42	50~65	50~65
용량범위	50W~75kW	250kW~수십 MW		1kW~수십 MW
연료	수소			
용도	가정용, 자동차	건물용 발전	중규모 이상의 발전플랜트	

한편 그림 1에 연료전지의 특성곡선을 나타내었다. 가역반응시 연료전지 스택을 구성하는 단위 셀의 이론적 출력전압은 무부하시에 약 1.2~1.3[V]가 되며, 전류가 증가함에 따라 약 0.6~0.7[V]까지 낮아진다. 실제로 내부전류 및 연료손실, 활성화분극, 저항분극, 농도분극 등에 의한 고유한 비선형 특성을 나타낸다.

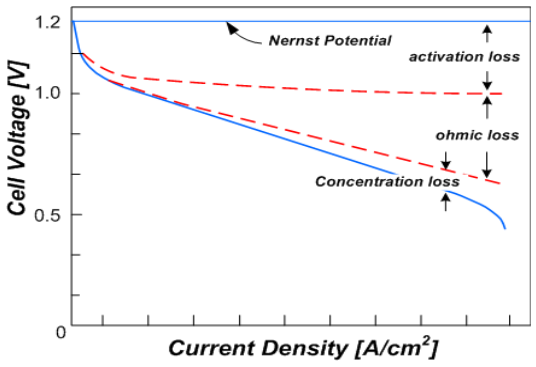


그림 1 연료전지 특성곡선
Fig. 1 The characteristic curve of Fuel Cell

그림에서 보듯이 활성화 분극(Activation Polarization)은 화학 반응으로 인한 분극으로 양극(Anode)과 음극(Cathode) 사이의 반응을 위해 에너지가 소모되며 촉매의 반응이 활발하지 않아 전압강하가 발생한다. 농도 분극(Concentration Polarization)은 반응물과 생성물의 확산속도 차이로 발생하게 되는데, 연료전지의 최대 출력량을 초과하여 더 이상 연료전지에서 전압이 출력되지 않는다. 저항분극(Ohmic Polarization)은 연료전지의 주 동작영역으로 부하가 증가함에 따라 연료전지의 내부저항에 따라 출력이 선형적으로 감소한다[1].

2.2 철도분야에 적용된 사례

일반적으로 철도에 적용된 연료전지시스템은 배터리와 결합한 하이브리드 동력시스템으로 구성되어 있으며, 그림 2는 견인 전동기로서 직류 전동기를 장착한 전기기관차에 적용된 연료전지 발전시스템 구성도를 보여준다. 보조에너지 저장장치로 배터리나 플라이휠 등을 이용하고 있으며 견인 전동기는 제동시 발전기로 사용된다[3][4].

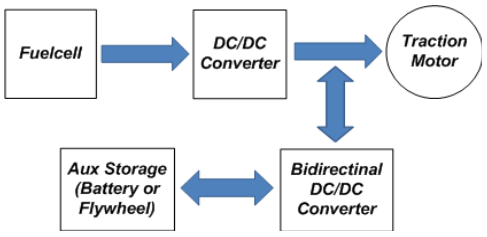


그림 2 전기기관차에 적용된 연료전지 발전시스템
Fig. 2 A fuelcell generation system used electric locomotive

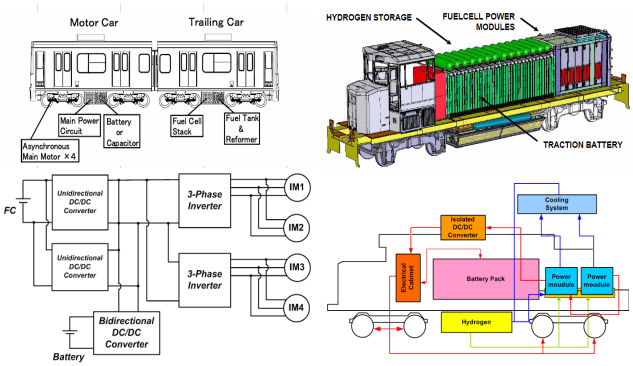


그림 3 철도에 적용되고 있는 연료전지 발전시스템 사례
Fig. 3 Cases of fuelcell generation system used railroad field

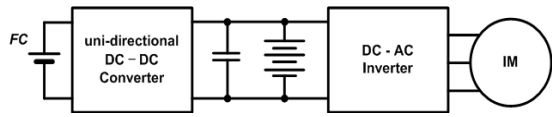
그림 3은 전동차 및 기관차에 적용되고 있는 사례를 보여준다. 철도차량은 승객 및 화물을 운송해야 하므로 대용량 발전 및 작동온도를 고려한 PEMFC 적용하고 있다. 이것은 대용량 배터리를 사용하며 개질기로 사용하지 않고 수소탱크를 사용하여 직접 연료전지 발전시스템에 수소를 공급하는 방식으로 불필요한 BOP를 최소화하기 위함이다.

2.3 연료전지 발전용 전력변환장치 토폴로지 고찰

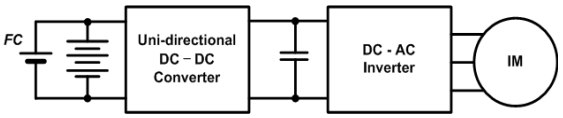
연료전지는 높은 가격과 느린 동특성을 갖고 있어 배터리 또는 슈퍼 커패시터와 같은 에너지 저장장치를 연료전지 시스템에 적용한 하이브리드 시스템 등 다양한 전력변환장치 토폴로지에 대한 연구가 이루어지고 있다[5][6].

그림 4는 철도차량에 견인전동기인 유도전동기를 적용하고자 할 때 고려될 수 있는 토폴로지에 대해 비교하였다. (a)는 배터리 팩(Battery Pack)이 컨버터와 인버터 사이에

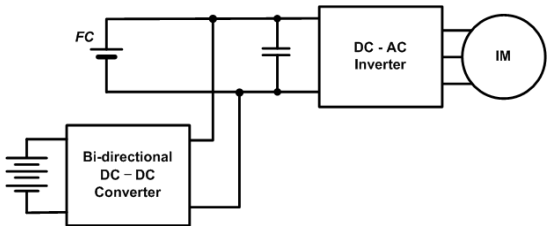
병렬로 연결되는 토폴로지로 급격한 부하변동에도 안정적으로 출력전압을 부하에 공급할 수 있다. 하지만 배터리 전압의 크기에 따라 연료전지가 에너지원으로, 배터리가 에너지원 역할을 할 수도 있으므로 배터리 용량과 방전 전력이 커야 하는 단점이 있다. 뿐만 아니라 철도차량인 대용량을 요구하므로 배터리 용량 혹은 연료전지 발전용량만으로 운전 시스템이 동작하려면 발전시스템이 커져야 한다. 이로 인해 시스템 구축비용이 증가하게 된다. 따라서 이 토폴로지는 소규모에 적합하다고 할 수 있다.



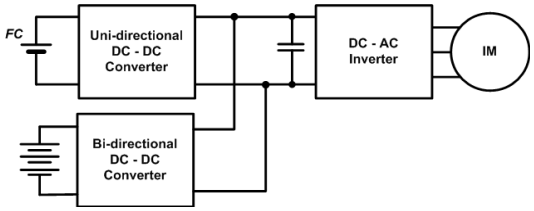
(a) 연료전지-컨버터-배터리-인버터 토폴로지



(b) 연료전지-배터리-컨버터-인버터 토폴로지



(c) 병렬 양방향 컨버터(배터리)-인버터 토폴로지



(d) 단방향 컨버터-병렬 양방향 컨버터-인버터 토폴로지

그림 4 연료전지-배터리 하이브리드 시스템 토폴로지 유형
Fig. 4 Kinds of topology of fuelcell-battery hybrid system

(b)는 배터리 팩이 에너지 버퍼 역할을 하며 단방향 컨버터를 이용하여 출력전압 제어가 가능하다. 하지만 연료전지 스택의 전압이 배터리 전압보다 큰 경우에만 배터리가 충전되므로 배터리 팩의 충전상태(State of Charge, 이하 SOC)를 제어하기 어렵고, 연료전지 스택과 배터리 팩의 선정이 까다롭다. (c)의 경우 연료전지 스택과 인버터 사이에 컨버터가 존재하지 않아 손실을 최소화 할 수 있지만, 출력전압을 일정하게 유지하기가 어렵다. 또한 양방향 컨버터를 전력 제어하면 원하는 출력전압을 획득할 수 있지만, 연료전지 스택의 특성곡선이 연료전지의 상태나 주변 환경에 의해 변하므로 제어 알고리즘이 복잡하다. 대용량 견인전동기인 가변속 부하와 배터리 팩 충전을 만족하기에는 연료전지 스택 용량이 규모가 커야 한다. (d)의 경우 연료전지 스택은 단방향 컨버터를 통해 연결되고 배터리 팩은 양방향 컨버터를 통해 DC-link 커패시터에 병렬로 연결된다. 이 구조는 연료전지 스택과 배터리 팩이 함께 부하를 담당할 수 있기도 하며 별도로 전력 공급이 가능하다. 전체적인 시스템에서 유동적인 제어가 가능하여 상기에 언급한 토폴로지 중에 대전력을 필요로 하는 철도차량에 적합한 토폴로지이다.

2.4 제안하는 철도차량용 연료전지 발전시스템 설계

그림 4(d)의 토폴로지는 철도차량에 적합한 하이브리드 연료전지 발전시스템으로 단방향 컨버터는 연료전지 전압을 출력전압을 상승되도록 제어할 수 있는 승압형 컨버터로 하고 병렬 구조를 갖는 양방향 컨버터는 승압형과 강압형 컨버터를 구현할 수 있는 구조를 제안한다. 컨버터 출력전압은 3상 인버터를 통해 견인전동기인 유도전동기를 역행 및 회생이 이루어지도록 구현한다.

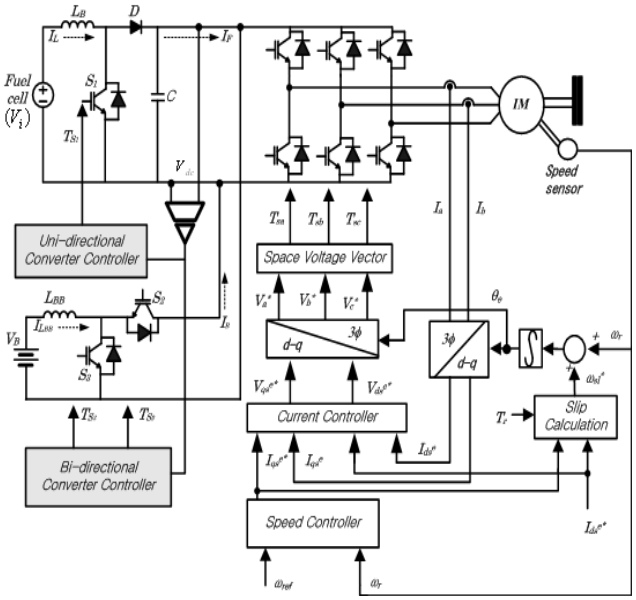


그림 5 연료전지-배터리 하이브리드 시스템 토폴로지
Fig. 5 The proposed topology of fuelcell-battery hybrid system

단방향 컨버터인 승압형 컨버터에서 입력측 인덕턴스 L_B와 출력측 커패시터 C를 구하기 위해 승압형 컨버터의 효율이 100%라고 가정하면 정상상태에서 승압형 컨버터 입력전력 P_i와 출력전력 P_o의 평균은 같고 도통율(Duty ratio)을 D라 하면 입출력 전압(V_{dc}/V_i)관계에서 $1/(1-D)$이므로 인덕터에 흐르는 평균전류 I_L은 식 (2)에서 구해진다[7].

$$I_L = \frac{V_{dc} I_F}{V_i} = \frac{I_F}{1-D} \tag{2}$$

2.4.1 단방향 컨버터 설계

단방향 컨버터의 인덕턴스 L_B에 흐르는 전류 I_L는 스위칭 주파수, 입력전압, 컨버터의 출력전류에 따라 전류 불연

속 모드로 동작할 경우 제어를 하더라도 원하는 출력전압을 얻을 수 없다. 따라서 일정한 스위칭 주기에 따라 인덕터에 흐르는 전류가 최소가 되더라도 연속적으로 흐를 수 있도록 인덕턴스 L_B을 산정해야 한다. 식 (3)은 인덕터에 흐르는 최소 전류이며, 이를 통해 식 (4)를 얻는다.

$$I_{\min} = I_L - \frac{1}{2}\Delta i_L = I_L - \frac{V_{dc}}{2L_B} \cdot DT \tag{3}$$

$$L_B \geq \frac{V_{dc}}{2I_F} \bullet D(1-D)T \tag{4}$$

또한 단방향 컨버터인 승압형 컨버터의 출력전압 V_{dc}가 인버터를 통해 부하에 영향을 주게 되므로 리플율을 고려할 필요가 있다. 스위치 소자 S_1가 턴온(Turn On)되는 동안 커패시터 C에 축적된 에너지가 부하에 흐르므로 R 부하인 경우 출력전압 V_{dc}에 대한 전압 변동율 Δv_{dc}는 식 (5)와 같고 이를 통해 식 (6)을 얻는다.

$$\Delta v_{dc} = \frac{1}{C} \cdot DT \cdot I_F = \frac{1}{C} \cdot DT \cdot \left(\frac{V_{dc}}{R}\right) \tag{5}$$

$$C \geq \frac{V_{dc} \bullet DT}{R \bullet \Delta v_{dc}} \tag{6}$$

2.4.2 양방향 컨버터 설계

단방향 컨버터와 병렬로 연결된 양방향 컨버터의 인덕터 L_{BB}을 구하기 위하기 위해 고찰하면, 양방향 컨버터는 DC link 전압 V_{dc}과 배터리 전압 V_B와 비교하여 승압형 컨버터와 강압형 컨버터로 동작한다.

철도차량이 주행하는 경우 차륜과 연결된 견인전동기는 연료전지와 배터리로부터 전력을 공급받아 철도차량이 역행(力行)할 수 있도록 한다. 따라서 스위칭 소자 S_3가 동작하여 배터리 전압 V_B보다 DC link 전압 V_{dc}가 높도록 승압형 컨버터로 제어한다.

한편 철도차량이 주행하다가 제동하는 경우 차륜과 연결된 견인전동기는 발전기로 동작하게 되어 에너지가 부하에서 전원으로 회생하게 되는데, 연료전지와 연결된 컨버터는 단방향으로 에너지가 전달되지 않아 DC link 전압이 상승하게 된다. 따라서 스위칭 소자 S_2가 동작되어 견인전동기 회생시의 에너지를 배터리에 저장되도록 강압형 컨버터로 제어한다.

이와 같이 양방향 컨버터는 강압형 컨버터와 승압형 컨버터 동작 모드에 따라 입출력이 바뀌게 되며, 이때 인덕턴스 L_{BB}에 흐르는 전류가 연속모드로 흐를 수 있도록 인덕턴스 L_{BB}을 선정한다. 강압형 컨버터로서 동작할 때 스위칭 소자 S_2가 턴 온(Turn on)되면 DC link 전압 V_{dc}가 배터리 전압 V_B보다 높게 되어 있는 상태에서 인덕턴스 L_{BB}측으로 전류가 흐르게 되는데 식 (7)보다 작게 되는 경우 불연속 모드가 된다. 따라서 $V_B = DV_{dc}$이므로 식 (8)과 같이 설계하게 되면 연속적으로 전류가 흐르게 된다.

$$I_{\min} = I_{L_{BB}} - \frac{1}{2}\Delta i_{L_{BB}} = I_{L_{BB}} - \frac{V_{dc} - V_B}{2L_{BB}} \cdot DT \tag{7}$$

$$L_{BB} \geq V_B \bullet \frac{1-D}{2I_{L_{BB}}} \bullet T \tag{8}$$

반면 승압형 컨버터로서 동작할 때 스위칭 소자 S_3가 턴온(Turn on)되면 배터리 전원으로부터 인덕턴스 L_{BB}에 전류가 흐르면서 자기 에너지가 인덕터에 축적된다. 이후 스위칭 소자 S_3가 턴 오프(Turn Off)되면 S_2의 역병렬 다이오드를 통해 인버터 입력측 DC link로 전류가 흐르게 된다. 이때 인덕턴스 L_{BB}에 흐르는 전류가 식 (9)보다 작게 되는 경우 불연속 모드로 동작하게 된다. 따라서 인덕터에 인가되는 전압은 $V_{L_{BB}} = V_B \bullet DT$ 이고 $I_{L_{BB}}/I_B = 1/(1-D)$이므로 식 (10)과 같이 설계하게 되면 연속적으로 전류가 흐르게 된다.

$$I_{\min} = I_{L_{BB}} - \frac{1}{2}\Delta i_{L_{BB}} = I_{L_{BB}} - \frac{V_B}{2L_{BB}} \bullet DT \tag{9}$$

$$L_{BB} \geq \frac{V_B}{2I_B} \bullet D(1-D)T \tag{10}$$

3. 시뮬레이션

제안된 시스템에 대한 타당성을 확인하기 위해 철도차량에 많이 적용되고 있는 견인전동기인 유도전동기의 축소형 모델에 대해 속도변화에 따른 응답특성을 분석하였다. 표 2는 시뮬레이션에 적용된 파라미터 값으로 부하인 유도전동기를 3상 380[V], 30[KW] 용량으로 하였을 때 인버터 선간전압 380[V]로 하려면 인버터 입력단 직류 전압은 700[V]가 되어야 한다.

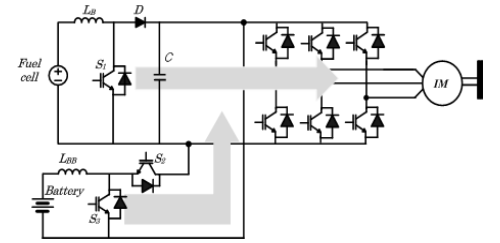
표 2 시뮬레이션에 적용된 파라미터
Table 2 The used simulation Parameter

파라미터	데이터
연료전지 전압(V_{FC})	250~300[V]
배터리 전압(V_B)	300[V]
단방향 컨버터 출력전압(V_{dc})	700[V]
단방향 컨버터/인버터 스위칭 주파수	5[kHz]
유도전동기 용량	3상380[V],30[KW]
양방향 컨버터 스위칭 주파수	20[kHz]
컨버터 인덕턴스(L_B, L_{BB})	2[mH]
DC Link 커패시터(C_{dc})	5000[uF]
관성 모멘트	0.1[kgm2]

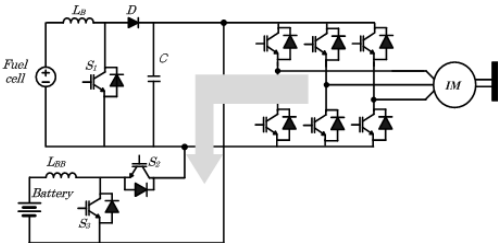
식 (2)~식 (10)을 통해 각각의 인덕턴스와 커패시터를 산정하였으며, 연료전지와 배터리 전압을 기준으로 승압해야 하므로 표 2와 같이 각각의 출력전압을 300[V]로 하였다. 제안된 연료전지-배터리 하이브리드 시스템은 철도차량에 적용되는 대용량 시스템으로 크게 2가지로 나눌 수 있다.

연료전지와 배터리로부터 동시에 에너지를 부하인 견인전동기로 공급하는 그림 6(a)의 역행 모드와 주행 중인 철도차량이 속도를 줄이게 되면 견인전동기가 발전기로 동작하

게 되어 3상 인버터가 3상 컨버터로 동작하게 되고 이에 따라 부하에서 전원측으로 에너지가 회생하게 되는 그림 6(b)의 회생 모드가 있다. 견인전동기가 제동을 하는 경우 발전기 동작으로 인해 인버터 입력전압이 상승하게 되는데, 연료전지측 컨버터는 단방향이므로 배터리측 양방향 컨버터를 통해 배터리에 에너지가 회생되도록 제어해야 한다.



(a) 연료전지+배터리 ⇒ 부하 (역행모드)



(b) 부하 ⇒ 배터리 (제동모드)

그림 6 역행 및 제동시 전력흐름

Fig. 6 Power flow of in case of powering mode and braking mode

▢ 병렬형 양방향 컨버터를 포함하지 않은 경우

철도차량 역행(力行) 및 제동시 제안된 연료전지-배터리 하이브리드 시스템의 견인제어 특성을 검증하기 위해 병렬형 양방향 컨버터 및 배터리를 제외하고 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 7은 기준속도를 0 → 500 → 1500[rpm]으로 속도를 증가시키면서 가속을 수행한 후 1500 → 500[rpm]으로 견인전동기 특성인 제동을 인가하면서 속도를 줄여 회생동작 분석해 보았다. 연료전지측 승압형 컨버터은 단방향 전력흐름을 갖기 때문에 4상한 동작이 되지 않는다. 그림 7에서 보듯이 단방향 컨버터 기준전압을 700[V]로 제어하면서 속도 변화를 주게 되면 기준속도가 변화될 때마다 컨버터 출력전압이 순간적으로 전압이 강하되는 과도상태가 발생하였다가 기준속도를 추종하고 있음을 알 수 있다.

또한 속도가 증가하면서 컨버터 제어기의 제어량이 순시적으로 변하고 있으며, 회생모드인 1500 → 500[rpm]으로 견인전동기가 제동할 때 컨버터 출력측 DC-Link 전압이 제어되지 않고 상승하는 하는 것을 볼 수 있다. 이에 따라 컨버터 제어기의 제어량은 스위칭 소자 S_1가 동작하지 않도록 영(Zero)의 값을 갖는다.

그림 8은 기준속도 변화에 따른 각 상의 전류 및 토크성분 q축 전류 파형을 보여준다. 기준속도가 변화는 시점에 각 상의 전류가 과도상태가 되었다가 정상상태로 되돌아가고

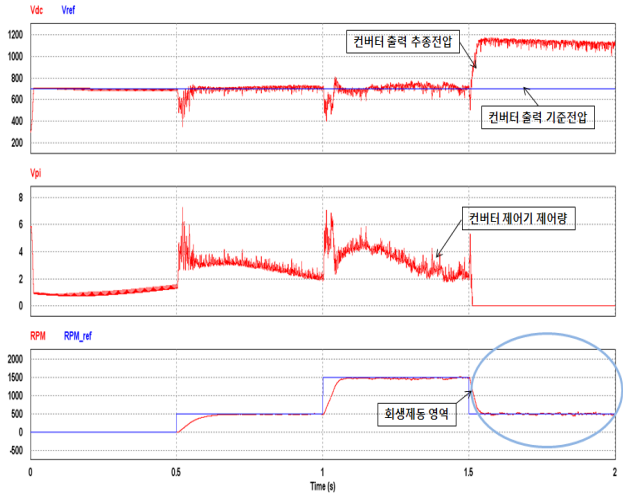


그림 7 기준속도 변화에 따른 단방향 컨버터 출력전압 및 속도 응답특성 (단방향 컨버터만 있는 경우)

Fig. 7 The response characteristic of output voltage of uni-directional converter and motor speed according to reference speed variation (only uni-directional converter)

A상 전류파형에서 보듯이 속도가 증가할수록 주파수가 증가함을 알 수 있다. 또한 토크성분 q축 전류는 기준전류에 실제값이 추종되고 있으며, 제동시 (-)값의 전류을 갖게 되어 부(-) 토크가 발생하게 된다.

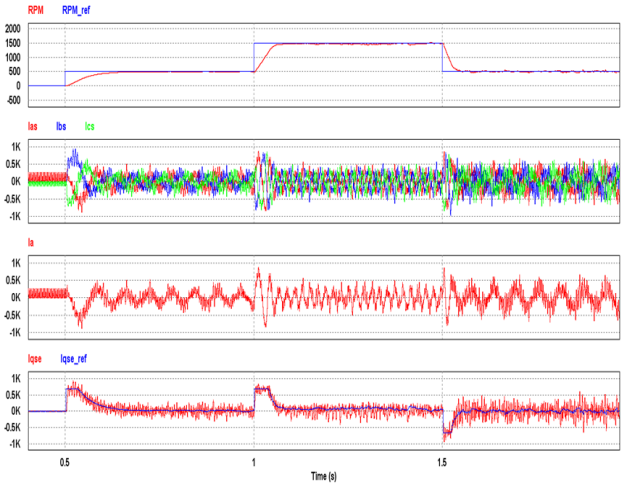


그림 8 속도변화에 따른 각 상의 전류와 A상 전류, 토크 성분 q측 전류 (단방향 컨버터만 있는 경우)

Fig. 8 A phase current, each phase current and torque q axis current waveforms according to reference speed variation (only uni-directional converter)

▢ 병렬형 양방향 컨버터 및 배터리를 포함한 경우

그림 5에서 단방향 컨버터와 병렬로 연결된 양방향 컨버터 및 배터리를 포함한 경우 시뮬레이션을 통해 견인특성을 고찰하였다.

그림 9는 견인전동기인 유도전동기의 기준속도 변화에 따

른 3상 인버터 입력측 DC link 전압과 토크 성분 q축 전류 파형을 보여준다. 그림 7의 컨버터 출력전압과 비교하면 병렬형 양방향 컨버터가 포함되지 않을 때 역행시, 즉 0→500→1500[rpm]으로 속도가 증가하는 과도상태일 때 일시적인 전압강하가 발생하지만, 그림 9에서는 배터리 전원에서 승압형 컨버터 동작을 통해 인버터 입력측 DC link로 전력을 공급하게 되어 일시적인 전압강하가 발생하지 않고 안정적인 출력전압을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 그림 7에서 보듯이 1500 → 500[rpm]으로 속도를 낮추면서 제동할 때 회생제동 영역에서는 DC Link 전압이 상승하고 있지만, 그림 9에서는 회생전력이 병렬형 양방향 컨버터의 스위칭 소자의 동작을 통해 배터리를 충전하기 때문에 DC-Link 전압이 안정적으로 제어되고 있다.

또한 견인전동기 기준속도 변화에 따라 토크성분 q축 전류도 변하는데, 역행시 기준속도가 증가하는 과도시점에 토크성분 q축 전류가 양(+)의 값을 갖게 되고 제동시 기준속도가 감소하게 되므로 토크성분 q축 전류가 음(-)의 값을 갖는다. 토크성분 q축 기준전류에 따라 실제전류가 잘 추종하고 있음을 보여준다.

그림 10은 a상 전류 및 각 상의 전류 파형을 보여준다. 단방향 컨버터만을 적용한 경우와 마찬가지로 기준속도가 변화됨에 따라 각 상에 흐르는 전류 주파수가 변하고 과도상태에서 전류가 증가하였다가 정상상태로 되돌아가고 있음을 확인할 수 있다.

□ 관성모멘트에 따른 속도 및 전류 변화

그림 7~그림 10에서 견인전동기인 유도전동기에 관성모멘트 0.1[kgm^2]를 갖는 토크부하를 연결하여 시뮬레이션을 수행한 파형들이다. 역행일 경우 실제토크 성분 전류 i_{qs}^e가 (+)의 방향이지만 감속에 따른 회생제동일 경우 관성 부하보다 견인전동기의 속도가 낮아지게 되고 토크성분 전류 i_{qs}^e가 (-)의 방향으로 역행시의 반대가 되는 것을 알 수 있다. 이것은 관성부하가 견인전동기의 축에 힘을 가해 회전시키는 것을 의미하며 감속하는 구간에서 회생이 일어난 것을 알 수 있다.

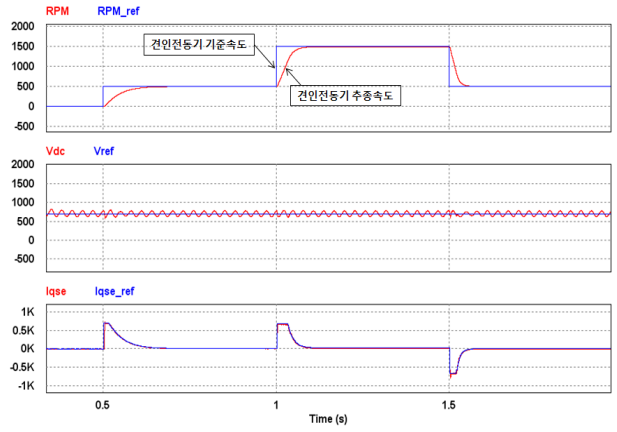


그림 9 기준속도 변화에 따른 3상 인버터 입력전압 및 전동기 속도 응답특성 (양방향 컨버터가 있는 경우)

Fig. 9 The response characteristic of input voltage of 3 phase inverter and motor speed according to reference speed variation(with bi-directional converter)

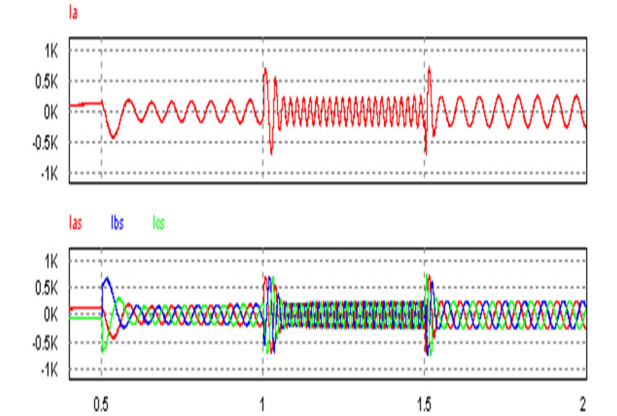
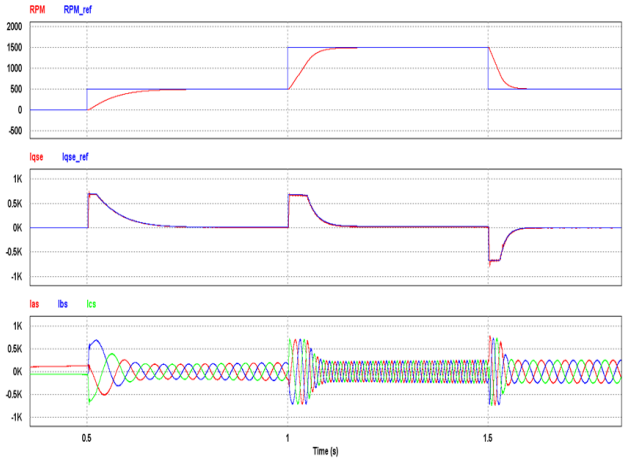
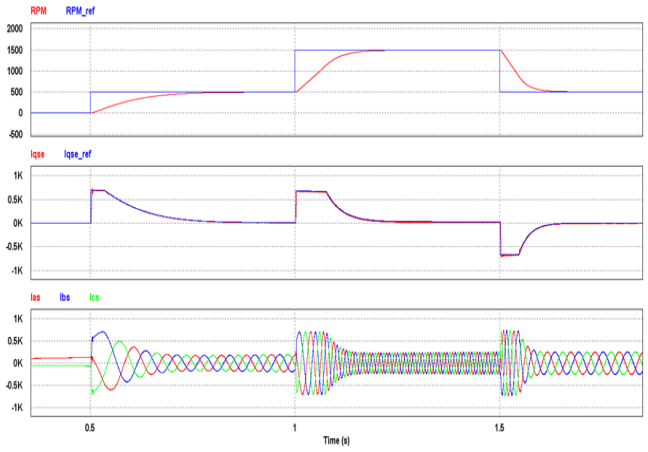


그림 10 a상 전류 및 각 상 전류(양방향 컨버터가 있는 경우)

Fig. 10 A phase current and each phase current waveforms (with bi-directional converter)



(a) 관성모멘트 0.2[kgm^2]인 경우



(b) 관성모멘트 0.4[kgm^2]인 경우

그림 11 관성모멘트 크기에 따른 속도, 토크전류, 전류파형

Fig. 11 Waveforms of speed, i_{qs}^e axis torque current and current according to amplitude of inertia moment

그림 11은 견인전동기 축에 연결된 토크부하의 관성모멘트 크기에 따라 기준속도 변화시 토크성분 i_{qs}^{e} 전류와 상전류 파형을 보여준다. 그림 11에서 보듯이 관성모멘트가 증가함에 따라 기준속도에 따른 추종속도가 늦다. 각 상전류는 0.2[kgm^2] 관성모멘트인 경우 500→ 500[rpm] 기준속도 변화시 2 cycle 정도 범위내에서 과도상태가 진행된다. 반면 0.4[kgm^2] 관성모멘트인 경우 3 cycle 정도 범위내에서 과도상태가 진행된다. 제동일 경우에도 관성모멘트 크기에 따라 응답속도도 비례하여 변하게 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 연료전지 발전시스템을 이용하여 철도차량에 적용할 수 있는지에 대해 선행연구를 하였다. 철도차량은 대전력을 필요로 하기 때문에 연료전지와 배터리를 혼용한 하이브리드 시스템이 적합한 것으로 검토되었다. 따라서 철도차량이 주행시 역행에 따른 속도 증가와 제동시 토크성분 전류변화 등 응답특성 분석을 통해 철도 적용가능성을 확인하였다.

향후 시뮬레이션을 바탕으로 축소형 모델을 제작하여 제안된 시스템에 대해 슬립/슬라이드 등 활주시의 제어 알고리즘 등을 보완해 나가고자 한다.

References

[1] Shim, Joong-pyo et al, “Application and the principle of hydrogen fuel cell of a new renewable energy source,” KIEE of plan series, Vol. 61, No. 11, pp. 15-22, 2012.

[2] Kim, Hyun-il, “A study on Dynamic Model Development for PEMFC and Liquid Water Exhaust Characteristics in Cathode Flow Channels,” Master’s degree paper, p.7, 2009.

[3] Arnold R. Miller, “Fuelcell Hybrid Locomotives : Applications and Benefits,” Joint Rail Conference, 2006.

[4] Kris S. Hess, “Demonstration of a hydrogen fuel cell locomotive", APTA 2010 rail conference, 2010. 7.

[5] Kim, Seung-Min et al, “The Controller of Bi-directional DC-DC Converter for a Fuel Cell Energy Storage System," The spring conference of the korean solar energy society, Vol. 32, No. 1, pp. 222-227, 2012.

[6] Dong-gyun Woo, Dong-myoung Joo et al, “Design and Implementation of 150W Portable Fuel Cell Power Pack,” The Transaction of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 17, No. 6, pp. 553-561, 2012.

[7] Eui-Cheol Nho, Power Electronics, 3th edition, Munundang publishing company, 2011.

저 자 소 개

정 노 건 (鄭 盧 建)

2012년 한국철도대 철도차량전기과 졸업. 2013년～현재 한국교통대 교통대학원 교통시스템공학과 석사과정

장 진 영 (張 珍 榮)

2006년 철도대 철도차량전기과 졸업. 2010년 중앙대 전자전기공학부 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기공학부 박사수료

창 상 훈 (倉 相 勳)

1961년 3월 28일생. 2002년 홍익대 대학원 전기정보제어공학과 졸업(공박). 1992년～1994년 철도청 기술연구소. 2002년 충남대 대학원 기계시스템공학과 졸업(석사), 2013년～한국교통대 교통대학원 겸임교수. 1994년～현재 한국철도기술연구원 수석연구원

김 재 문 (金 才 文)

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 부교수

Tel : 070-8855-1664

Fax : 031-462-2944

E-mail : goldmoon@ut.ac.kr