

연료전지 발전시스템을 이용한 축소형 철도차량의 운전곡선 추종에 따른 추진제어장치 특성 고찰

A Study on Propulsion Control Device Characteristics of Small-scale Electric Railway Vehicle according to Driving Curve Tracking using Fuel Cell Generation System

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

Abstract - The study in railway system to apply a fuel cell system with high efficiency and mobility than other renewable energy is being actively conducted. It is needed a analysis on load characteristics and control method of rolling stock in order to apply to rolling stock. This paper presents study on control small-scale prototype power converter electric railway vehicle using fuel cell generation system. Experiment is conducted through real fuel cell generation system and reference speed applying the driving curve of the actual electric railway vehicle was applied. Also, output voltage of boost converter is controlled considering characteristic of fuel cell. And it was confirmed characteristic according to powering and regeneration of inverter.

Key Words : Fuel cell system, Propulsion control device, Railway vehicle, Driving curve tracking

1. 서 론

철도기술의 발전과 더불어 타 산업분야에서 적용되고 있는 다양한 요소기술 및 신기술이 철도에 접목하려는 시도가 이루어지고 있다. 이 같은 시도는 화석연료 고갈과 환경오염에 대한 심각성으로 인해 국내에서 운행하는 철도차량이 디젤차량에서 전기차량으로 전환되고, 전철화 구간도 확대되고 있는 실정이다.

한편 철도분야에서도 태양광 및 풍력 등 신재생에너지를 활용하여 전차선로의 전원과 연계하고자 하는 연구가 이루어지고 있다. 최근에는 연료전지를 이용한 발전이 타 신재생에너지보다 높은 효율과 이동성으로 차량 등의 이동용 부하에 적용하려는 연구가 이루어지고 있는데 연료전지를 이용한 발전기술을 철도에 적용하려는 연구가 국내외를 중심으로 수행되고 있다.

연료전지는 수소와 산소가 전기화학 반응을 통해 화학에너지를 전기에너지로 변환하면서 전기를 생산한다. 이때 발생하는 열 사용을 극대화하기 위해 열병합 발전을 하는 경우 전체 효율이 80% 이상이며, 기존 화력발전 대비 CO₂ 배출량 40%, 에너지 사

용량 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]. 연료전지 발전시스템을 철도차량에 적용하기 위해서는 철도차량의 부하특성 및 제어기법에 대한 분석이 필요하다. 일반적인 철도차량의 견인전동기를 구동하는 인버터의 입력전압은 매우 높으며 연료전지발전시스템의 일반적인 특성은 저전압 대전류의 특성을 가진다. 이로 인해 승압형 컨버터를 이용하여 연료전지발전시스템의 출력전압을 승압이 필요하며 이를 위한 승압형 컨버터가 필요하다. 또한 철도차량의 차륜을 구동하기 위한 인버터와 견인전동기 부하를 특성을 고려하여 시스템을 구성하여야 한다.

본 논문에서는 연료전지 발전시스템을 이용하여 축소형 철도차량의 운전특성 곡선 추종에 따른 전력변환장치 특성을 고찰하였다. 이를 위해 실제 연료전지 발전시스템을 통해 전원을 공급 받았다. 또한 컨버터로 전압을 승압시킨 후 철도차량에 많이 적용되고 있는 3상 유도전동기를 제어하였으며, 실제 운전곡선을 고려하여 인버터 속도제어를 적용하였다.

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(H₂O)를

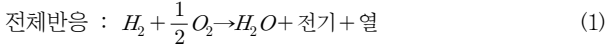
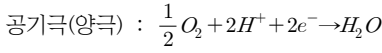
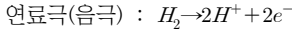
† Corresponding Author : Dept. of Transportation System Engineering, Graduate School of Transportation, Korea National University of Transportation, Korea
E-mail : goldmoon@ut.ac.kr

* Dept. of Transportation System Engineering, Korea National University of Transportation, Korea

** Korea Railroad Research Institute, Korea

Received : October 8, 2015; Accepted : November 18, 2015

발생시킨다.



연료전지는 이온의 전도를 담당하는 전해질의 종류 또는 작동 온도에 따라 알칼리 연료전지(Alkaline Fuel Cell, 이하 AFC), 직접메탄올 연료전지(Direct Methanol Fuel Cell, DMFC), 고분자 전해질 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].

본 논문에서는 작동온도를 고려하여 PEMFC를 이용하여 실험을 수행하였으며 이는 철도차량과 자동차 등의 이동용 전원을 요구할 때 많이 사용되는 연료전지이다.

표 1 연료전지의 종류

Table 1 Kinds of Fuel cell

	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
전해질	고분자막	인산	탄산염	고체 산화물
작동온도(°C)	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, 철도차량, 자동차	건물용 발전	중규모 이상의 발전플랜트	

한편 그림 1에 연료전지의 특성곡선을 나타내었다. 가역반응시 연료전지 스택을 구성하는 단위 셀의 이론적 출력 전압은 무부하

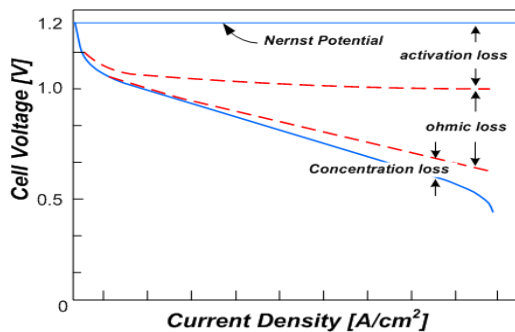


그림 1 연료전지 특성곡선

Fig. 1 The characteristic curve of Fuel Cell

시에 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.

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

2.2 연료전지발전시스템을 적용한 철도차량시스템

일반적으로 철도에 적용된 연료전지시스템은 배터리와 결합한 하이브리드 동력시스템으로 구성되어 있으며, 그림 2는 견인 전동기로서 직류 전동기를 장착한 전기기관차에 적용된 연료전지 발전시스템 구성의 일례를 보여준다. 보조에너지 저장장치로 배터리나 플라이휠 등을 이용하고 있으며 견인 전동기는 제동시 발전기로 사용된다[3-5].

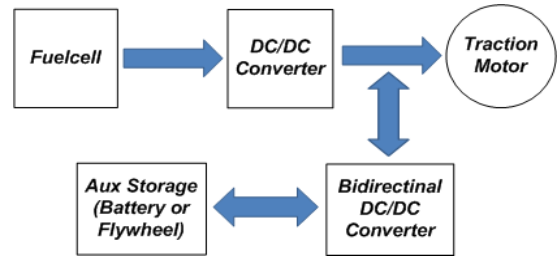


그림 2 전기기관차에 적용된 연료전지 발전시스템

Fig. 2 A fuel cell generation system used electric locomotive

그림 3은 본 논문에서 적용된 연료전지 발전시스템을 이용한 축소형 철도차량의 추진제어시스템 토폴로지를 보여준다. 토폴로지는 연료전지 발전시스템의 저전압을 컨버터를 이용하여 승압된 전압이 인버터 입력전압에 공급하도록 구성하였다. 또한 3상 인버터의 간접제어제어를 통해 견인전동기 속도제어를 하도록 설계하였다.

실험세트의 총 용량은 실험실 환경을 고려하여 3[kW]으로 선

표 2 실험에 적용된 파라미터

Table 2 The used Experiment Parameter

파라미터	데이터
연료전지 전압	60~115[V]
승압형 컨버터 출력전압	380[V]
스위칭 주파수	5[kHz]
유도전동기 용량	3상220[V],2.2[KW]
컨버터 인덕턴스	2[mH]
DC Link 커패시터	325[μF]

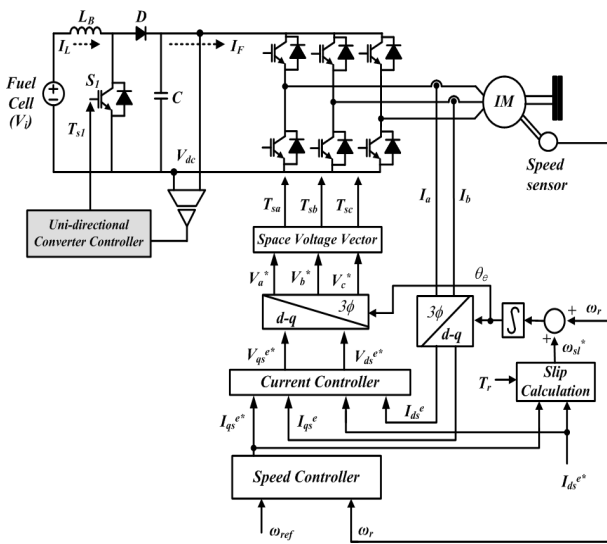


그림 3 연료전지 시스템을 적용한 축소형 철도차량 추진제어시스템
 Fig. 3 The propulsion control system of small-scale prototype railway vehicle using fuelcell generation system

정하였다. 연료전지 발전시스템의 출력전압은 무부하 상태일때 115[V]였다가 부하량이 증가하면 최소 60[V]까지 감소한다. 견인전동기 정격은 2.2[kW]이며 입력전압은 3상 220[V]로 승압형 컨버터의 출력전압 제어의 기준 전압은 3상 220[V]가 전동기에 공급되도록 380[V]로 설정했다. 인버터에 제어되는 견인전동기는 0에서 최대 1000[rpm] 까지 속도제어가 가능하다.

2.2.1 승압형 컨버터

연료전지의 출력전압은 무부하의 경우 115[V]에서 부하를 최대로 사용할 경우 60[V]까지 감소한다. 이 같은 연료전지의 출력 전압은 견인전동기를 구동하기 위한 인버터의 입력전압으로는 상당히 부족한 전압이므로 승압형 컨버터를 이용하여 승압을 해야 한다. 본 논문에서는 승압을 위하여 토폴로지가 복잡하지 않으며 다이오드로 인해 연료전지로 전류가 흐르지 않도록 하는 단방향 승압형 컨버터를 적용하였다.

승압형 컨버터는 전력용 반도체 소자인 주스위치 S의 온·오프에 의해 출력전압을 제어한다. 그림 4는 승압형 컨버터의 회로도를 나타낸다[6].

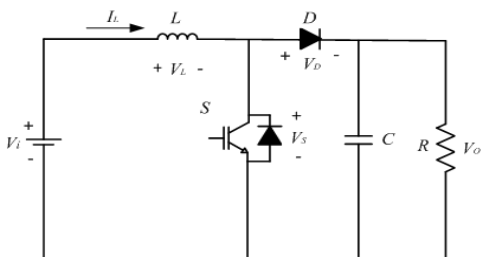


그림 4 승압형 컨버터 회로
 Fig. 4 Boost converter circuit

승압형 컨버터의 출력전압 리플이 거의 없다고 가정하면 일반적으로 입력전압에 대한 출력에 전달되는 전압전달비는 식 (2)와 같다.

$$G_V \equiv \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-D} \tag{2}$$

식 (2)에서 입출력 전압전달비는 (1-D)에 반비례한다. 즉 스위칭 동작을 하지 않은 듀티비 D가 0일 때 그림 4에서 다이오드 D의 순방향 전압강하를 고려하지 않으면 입력전압과 출력전압이 동일한 전압이 된다. 그리고 듀티비 D가 1에 가까울수록 입력전압에 대한 출력전압이 커지게 된다. 따라서 식 (2)와 그림 4에서 컨버터의 출력전압은 듀티비 D를 0에서 1까지 제어함으로써 입력전압 이상이 된다.

2.2.2 3상 인버터

본 논문에서는 철도차량에 많이 채용되고 있는 견인전동기로 3상 유도전동기를 적용하였으며, 유도전동기에 많이 적용되고 있는 간접벡터 제어방식 구현을 통하여 인버터를 제어하였다. 그림 5는 견인전동기 구현을 위한 추진시스템용 3상 인버터 제어 블록도를 보여준다[7].

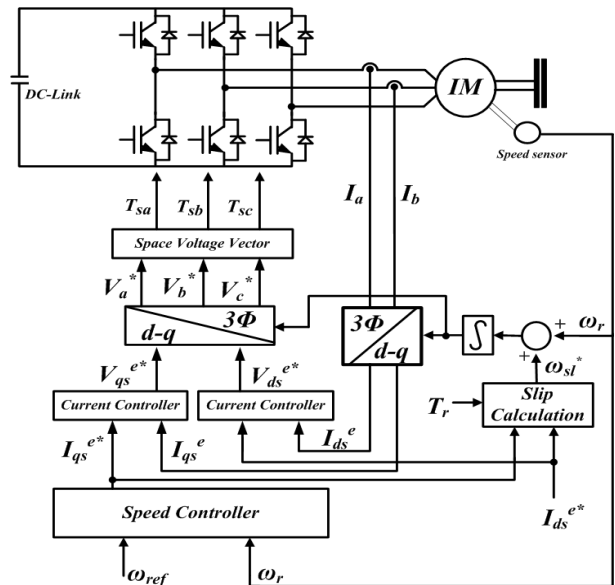


그림 5 3상 유도전동기의 간접벡터제어 블록도
 Fig. 5 Indirect vector control block diagram of three-phase induction motor

자속의 회전각을 알아내는 방식에 따라 벡터제어는 직접 벡터 제어와 간접 벡터제어로 나눌 수 있다. 직접벡터제어는 직접 측정된 자속을 이용하거나 전압과 전류 그리고 속도 정보 등을 이용하여 간접적으로 추정된 자속을 이용하는 제어 방식이다. 그러나 고정자 슬롯(slot)에 자속 검출 코일 등을 설치해야 하므로 노이즈에 약하다.

반면 간접 벡터 제어방식은 그림 5와 같이 기준 토크 전류나 자속 전류로부터 슬립 각속도를 계산하고, 이에 회전자 속도를 더하여 간접적으로 구한 회전자 자속의 순시속도가 동기 각속도 ω_e 되도록 하여 회전 자속이 d 축에만 존재하도록 하여 벡터 제어 조건 q 축 회전 자속 λ_{qr}^e 는 식 (3)과 같다.

$$\lambda_{qr}^e = 0 \quad (3)$$

$d-q$ 변수로부터 표현된 토크와 자속의 관계식은 식 (4)와 같이 얻을 수 있으며, 토크식은 식 (5)와 같다.

$$\tilde{i}_{qs}^e = -\frac{L_r}{L_m} \tilde{i}_{qr}^e \quad (4)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^e \tilde{i}_{qs}^e \quad (5)$$

여기서, \tilde{i}_{qs}^e 는 고정자 q 축 전류 및 토크성분 전류, L_r 는 회전자 자기인덕턴스, L_m 는 자화인덕턴스, \tilde{i}_{qr}^e 는 회전자 전류, T_e 는 동기 좌표계 토크, P 는 극수, λ_{dr}^e 는 회전자 쇄교자속

식 (5)에서 토크는 자속이 일정할 경우 토크성분 전류 \tilde{i}_{qs}^e 에 비례함을 알 수 있다. 유도전동기의 동기 좌표계에서는 q 축 자속은 0이고 d 축 자속은 일정한 값을 가진다. 이러한 조건을 이용하면 식 (6)과 같은 슬립 관계식을 얻는다.

$$\omega_{ref} - \omega_r = \omega_{sl} = -\frac{R_r \tilde{i}_{qr}^e}{\lambda_{dr}^e} = \frac{R_r}{L_r} \frac{\tilde{i}_{qs}^e}{\tilde{i}_{ds}^e} \quad (6)$$

여기서, ω_{ref} 는 속도 명령, ω_r 은 전동기 실제속도, ω_{sl} 는 슬립 각속도, R_r 는 회전자 저항, $T_r = L_r/R_r$ 은 회전자 시정수, \tilde{i}_{ds}^e 는 d 축 전류 및 자속성분 전류

식 (6)에서 ω_{sl} 는 속도 오차가 된다. 따라서 ω_{sl} 를 \tilde{i}_{qs}^e 와 \tilde{i}_{ds}^e 로부터 계산하여 w_r 과 더해지면 원하는 속도제어를 할 수 있고 간접 벡터제어가 가능하게 된다.

3. 실험

그림 6은 연료전지발전시스템을 적용한 철도차량시스템의 축소형 모델 실험을 위한 실험세트이다. 수소연료탱크를 통해 수소를 공급받아 개질기를 통해 발전되며 승압형 컨버터와 3상 인버터를 통해 유도전동기를 구동하게 된다. 유도전동기에는 컨베이어 벨트를 이용하여 관성력을 갖도록 동일용량의 유도전동기를 사용하였다. 연료전지발전시스템의 출력은 무부하상태일 때 115[V]이며 출력 전류가 상승하면 그림 1과 같이 연료전지 특성 곡선에 따라 전압이 감소한다. 따라서 이와 같이 출력전압이 일정하지 않기 때문에 승압형 컨버터의 성능이 중요하다. 본 논문에서는 승압형 컨버터의 성능검증을 위해 실험실 수준을 고려하여 400[W]의 저항부하를 연결하여 실험을 수행하였다.

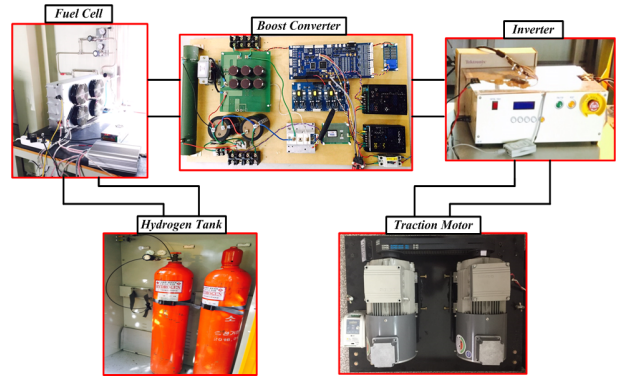
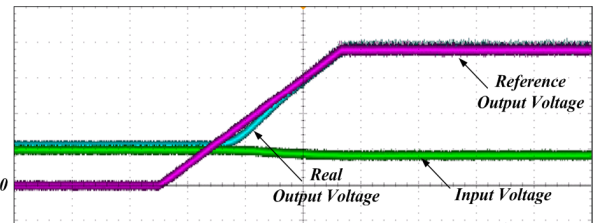


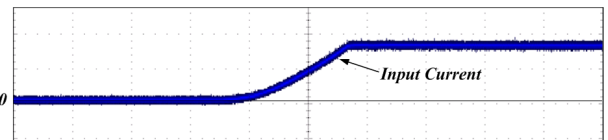
그림 6 연료전지발전시스템 축소형 모델 실험장치
Fig. 6 Fuel Cell generation System small-scale prototype experiment unit

그림 7은 400[W]의 저항부하를 연결한 승압형 컨버터의 실험 파형을 나타낸다. 그림 4에서 보듯이 스위칭 소자가 동작하지 않으면 무부하 상태인 115[V]인 컨버터 입력전압과 출력전압은 거의 동일한 값을 갖게 된다. 또한 이때 컨버터 입력으로 흐르는 연료전지 출력전류는 0[A]가 된다. 이후 3상 유도전동기를 구동하기 위해 인버터의 입력측 전압에 대한 기준전압 380[V]을 램프형태로 제어하였다. 그림 7에서 보듯이 기준전압에 실제전압이 잘 추종하는 것을 볼 수 있으며 컨버터 입력전압에 대해 출력전압이 증가함에 따라 연료전지 출력전류가 증가하는 반면 전압은 20[V] 가까이 감소함을 알 수 있다.

한편 철도차량 추진제어시스템은 컨버터와 인버터로 이루어진 전력변환장치이기 때문에 견인전동기에 많이 채용되고 있는 유도전동기 부하 실험이 필요하다.



(a) 컨버터 출력전압 및 입력전압 파형
(X축 : 1[s]/div., Y축 : 100[V]/div.)

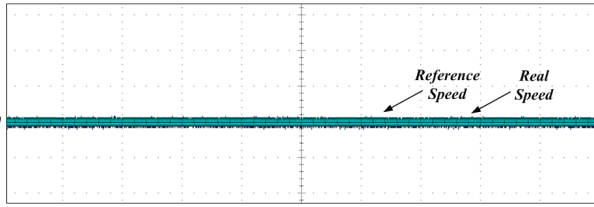


(b) 컨버터 입력전류파형
(X축 : 1[s]/div., Y축 : 2.5[A]/div.)

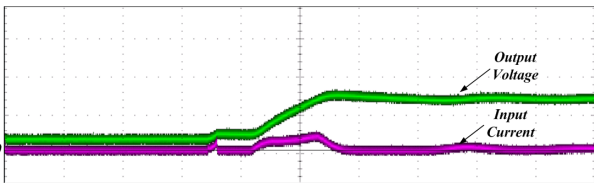
그림 7 400[W]의 저항부하 연결한 컨버터 실험파형
Fig. 7 Converter test waveforms connected to the resistive load of 400[W]

그림 8은 견인전동기가 동작하지 않을 때 승압형 컨버터의 기준전압 380[V]에 대한 응답파형이다. 견인전동기의 기준 속도를 0[rpm]으로 적용하였고 컨버터 동작을 ON한 시점에서 출력전압이 나타난다. 출력전압은 입력전압 100[V] 그대로 출력으로 내보내다가 380[V]를 추종한다.

견인전동기를 구동하지 않기 때문에 무부하상태지만 3상 유도전동기를 구동하기 위한 인버터 입력전압 380[V]를 생성하기 위해 승압형 컨버터를 구동하였다. 입력전압 115[V]를 380[V]로 상승하는 시점에서 연료전지 출력전류가 흐르면서 컨버터 출력측 커패시터에 에너지를 저장하게 된다. 추종이후에는 무부하 상태이기 때문에 다시 0[A]가 되는 것을 확인할 수 있다.



(a) 유도전동기 속도 파형
(X축 : 2[s]/div., Y축 : 200[rpm]/div.)



(b) 출력전압, 입력전류 파형
(X축 : 2[s]/div., Y축 : 250[V]/div., 5[A]/div.)

그림 8 무부하시의 승압형 컨버터 전압, 전류 파형
Fig. 8 Voltage and current waveforms of Boost converter in case of no-load

3상 유도전동기의 기준속도는 실제 철도차량의 운전 특성 곡선을 반영하여 실험하였다. 그림 9는 VVVF 속도제어하고 있는 일반적인 도시철도차량의 운전곡선으로 가속영역, 정속영역, 제동영역으로 나눌 수 있다. 철도차량이 정지상태에서 출발하기 시작하면서 점점 램프함수 형태의 기울기로 속도가 증가하게 된다. 이후 철도차량이 주행 중 최고속도에 도달한 후 그 속도를 유지하다가 정차역에 가까워지면서 차츰 속도를 줄이면서 제동을 하게 된다.

그림 10은 유도전동기의 기준 속도를 0 → 400 → 10 → 0[rpm]으로 변화시킬 때의 전압 및 전류 파형이다. 실제 철도차량의 운전 특성을 반영하기 위해 가속영역, 정속영역, 제동영역을 나타낼 수 있게 제어를 구현하였다. 실제 철도차량의 운전곡선과 다르게 직선으로 가/감속을 하는 것은 실제 부하관성에 비해 견인전동기의 부하 관성이 적기 때문이다. 승압형 컨버터의 출력측 DC 링크단의 전압은 실제 속도가 상승하기 시작하는 시점에서 40[V]가량 감소하는 과도특성을 보였다가 이후 정상상태 도달

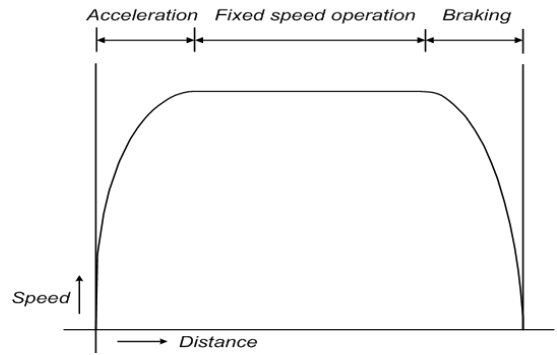
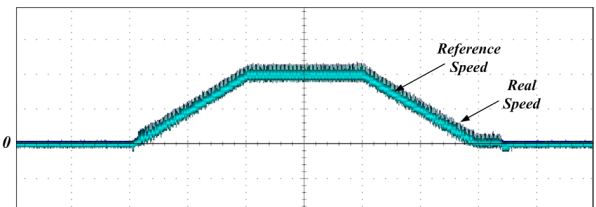
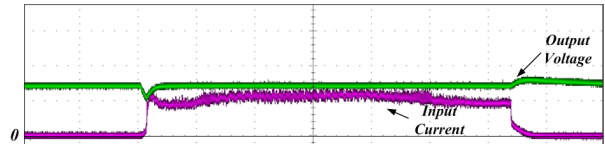


그림 9 일반적인 도시철도차량 운전곡선
Fig. 9 General operation curve of electric railway Vehicle



(a) 속도변화에 따른 속도 파형
(X축 : 2[s]/div., Y축 : 200[rpm]/div.)

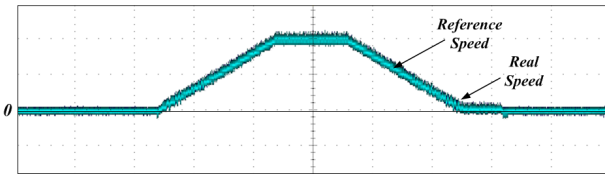


(b) 출력전압 및 입력전류 파형
(X축 : 2[s]/div., Y축 : 250[V]/div., 5[A]/div.)

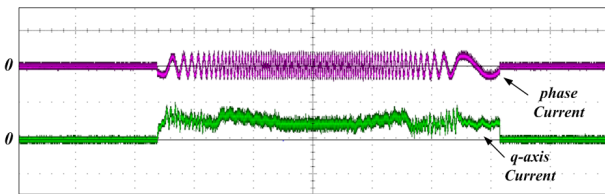
그림 10 속도변화에 따른 전압 및 전류 파형
Fig. 10 Waveforms of Voltage and Current according to speed variation

후 기준전압인 380[V]를 추종한다. 또한 유도전동기가 감속하는 구간에서 램프함수형태의 기울기로 제어되다가 기준속도가 10 → 0[rpm]이 되는 시점에서 전압이 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이는 정회전을 하다가 인버터 스위칭 동작을 멈추게 되면 유도전동기가 발전기 역할을 하게 되어 회생제동으로 인한 전압이 발생한다. 컨버터의 입력전류는 유도전동기의 실제 속도가 상승하는 지점부터 증가하며 실제 속도가 0[rpm]이 시점부터 0[A]로 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

그림 11은 유도전동기의 기준 속도를 0 → 400 → 10 → 0[rpm]으로 변화시킬 때 a축 전류 및 q축 전류 파형이다. 인버터 상전류는 실제속도가 증가함에 따라 속도에 따른 주파수가 상승함을 알 수 있고 10[rpm]일 때 주파수가 낮음을 확인할 수 있다. 또한 q축 전류는 속도가 상승하는 시점, 즉 토크가 증가하는 시점에서 상승하고 실제속도가 0[rpm]이 시점부터 0[A]로 떨어지는 것을 확인할 수 있다.



(a) 속도변화에 따른 속도 파형
(X축 : 2[s]/div., Y축 : 200[rpm]/div.)



(b) 속도변화에 따른 상 전류 및 q축 전류파형
(X축 : 2[s]/div., Y축 : 1[A]/div.)

그림 11 속도에 따른 상전류 및 q축 전류파형

Fig. 11 Waveforms of phase current and q-axis current according to speed variation

4. 결 론

본 논문에서는 연료전지 발전시스템을 이용한 축소형 철도차량의 운전곡선 추종에 따른 추진제어장치의 특성을 고찰하였다.

연료전지 발전시스템의 출력이 부하에 따라 특성곡선과 같이 전압과 전류가 상반되는 현상을 보였다. 즉 전압이 감소하면 전류가 증가하고 전압이 증가하면 전류가 감소하여 직선영역인 저항분극(Ohmic Polarization)에서 동작함을 확인할 수 있었다. 또한 연료전지발전시스템의 출력전압을 승압하기 위해서 승압형 컨버터에 400[W]의 부하를 연결하여 추종성을 검증하였다. 이후 인버터와 견인전동기를 연결하여 철도차량의 운전 특성 곡선을 반영한 기준 속도 대비 실제속도가 추종에 따른 연료전지 출력전류 및 승압형 컨버터 출력전압 과도특성을 고찰하였다. 또한 DC-Link에서 역행시의 전압감소와 회생시의 전압상승을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 축소형 전력변환장치를 이용하여 토폴로지를 분석한 결과는 실제 연료전지발전시스템을 적용한 철도차량을 제작할 때 적용이 가능할 것으로 판단된다.

향후 양방향 컨버터 시스템을 DC-Link에 병렬로 연결한 연구를 통해 역행과 회생의 특성을 분석하고자 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, "Fuel cell 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.
 [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] Eui-Cheol Nho, Power Electronics, 3th edition, Munundang publishing company, 2011.
 [7] No-Geon Jung, Jae-Moon kim et al, "Response Characteristic Analysis using Modeling of Propulsion System for 8200 Electric Locomotive", The Transactions of KIEE, Vol 62, No. 11, pp. 1640-1646, 2013.

저 자 소 개



정 노 건 (No-Geon Jung)

2012년 한국철도대 철도차량전기와 졸업.
 2015년 한국교통대 교통대학원 교통시스템공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 교통시스템 공학과 박사과정



창 상 훈 (Sang-Hoon Chang)

2002년 홍익대 대학원 전기정보제어공학과 졸업(공학). 1992년~1994년 철도청 기술연구소. 1994년~현재 한국철도기술연구원 수석연구원



김 재 문 (Jae-Moon Kim)

1994년 성균관대 전기공학과 졸업. 2000년 2월 동 대학원 졸업(공학). 2000년~2004년 현대모비스(주) 기술연구소 선임연구원. 2006년~현재 국토교통부 철도기술 전문위원, 2004년 3월~현재 한국교통대학교 교통대학원 교통시스템공학과/철도전자전공학과 교수
 E-mail : goldmoon@ut.ac.kr