

벡터제어 유도전동기를 이용한 축소형 관성 시뮬레이터

金吉童*, 朴懷濬, 韓咏材, 韓慶熙, 趙正珉

A Miniature Inertia Simulator using Vector Controlled Induction Motor

Gil-Dong Kim, Hyun-Jun Park, Young-Jae Han, Kyong-Hee Han, and Jung-Min Cho

요약

철도차량용 추진시스템은 안전성과 신뢰성 때문에 성능을 평가해야만 한다. 일반적으로 Flywheel Type 시험방법은 시험설비로 널리 사용되고 있다. 그러나 Flywheel에 의해 생기는 기계적 관성은 변하기 어렵고 실제적인 주행저항을 표현할 수 없다. 본 연구는 다양한 차량부하의 개발에 초점을 두고 수행되었다. 그렇기 때문에 실제적인 차량부하 특성을 얻기 위해 벡터모터에 의해 제어되는 다양한 차량부하를 사용하는 방법을 제안하였고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 결과를 확인하였다.

ABSTRACT

A propulsion system apparatus for railroad vehicle is estimated its performance because of safety and confidence. In general, flywheel type testing method is widely used in the equipment. However, mechanical inertia generated by the flywheel can not be varied (or controlled) and can not be represent actual running resistance. In this study, we have focused on the development of variable vehicle load generation.

Therefore, we have proposed the method which uses variable vehicle load controlled by vector motor to get the characteristics of the real vehicle load and confirmed the results with those of computer simulations.

Key Words : Vector control, Rolling stock, Traction motor, Propulsion system

1. 서론

국내 도시철도차량을 안전하고 신뢰성 있게 만들기 위해서는 철저한 시험이 요구되고 있다. 도시철도차량의 핵심 부품인 VVVF추진 인버터는 성능시험 및 장시간 신뢰성 평가를 위한 추진장치 성능시험설비 구축이 필요하다.

현재 국내에 있는 인버터 시험설비는 Flywheel을 부하로 하여 시험을 하고 있다. 그러나 Flywheel방식

은 기계적인 구조로 되어있기 때문에 인버터의 성능을 시험할 수 있는 장시간 신뢰성 시험에는 한계가 있다. 또한 Flywheel을 이용한 기계적 관성의 경우, 관성을 가변할 수 없고, 노선의 구배에 따른 부하의 변화와 실제와 유사한 주행저항을 고려한 시험은 불가능하다. 그리고 감속시험시, 발생한 회생 에너지를 저항을 통해 소비시키므로 많은 전력을 소비하게 되며, 고속 구동 시험시 Flywheel에 매우 큰 운동 에너지가 축적되므로 사고시 어떠한 방법으로도 보호가 불가능한 문제가 있다.

따라서, 이에 대한 방안으로 DC모터를 이용하여 전기적 관성부하장치를 이용하여 VVVF추진 인버터 구동부하를 구현하는 방법이 제안된 바 있다^[1]. 그러나 VVVF추진 인버터의 시험용 부하를 충분히 구현하기 위해서는 부하인 전동기가 피시험체 용량에 비하여 동

*한국철도기술연구원 선임연구원

E-mail : gdkim@krii.re.kr

접수일자 : 2001.10.17

1차심사요청일: 2001.11. 1

심사완료일 : 2002. 1. 16

일한 용량의 전동기나 그 이상의 대용량의 전동기를 이용하여야 하며, 이러한 대용량의 부하용 서보시스템은 직류기에 비하여 유도기가 내구성 및 가격에 대하여 유리하다.

본 연구에서는 Flywheel을 이용한 기존의 기계적인 시험설비의 문제점에 대한 대안으로 VVVF추진 인버터 차량부하와 유사한 부하 특성을 얻기 위해서 Flywheel을 대신하여 유도전동기로 전기적 부하관성을 구현하는 방법을 제안하고, 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하였다.

2. 전기적 관성부하 시뮬레이터

2.1 전기적 관성부하 시스템의 구성

전기적 관성부하장치를 구현하기 위해 시험용 유도전동기, 토크메타, 부하용 유도전동기를 한 조로 하여 시험용 베드로 구성하였고, 전기적인 관성부하를 구현하기 위해 각각의 시험용인버터와 부하용인버터 2대를 이용하여 시험용 인버터는 차량제어를 수행하고, 부하용 인버터는 전기관성제어를 하였으며, 인버터구성은 IGBT소자를 이용하여 그림 1과 같이 구성하였다. 그림 1에서, 시험대상인 구동용 모터는 전동차의 제어 조건과 유사하게 하기 위한 토크제어와 모의 관성 크기변화에 대한 특성을 보다 쉽게 인지하도록 속도제어를 행하였고, 부하용 인버터는 모델 속도 트래킹 방법을 이용한 속도제어를 행하였다.

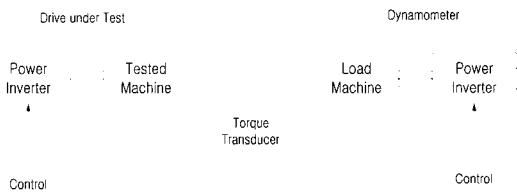


그림 1 시험대상 모터를 위한 부하 관성 시뮬레이터 블록도
Fig. 1 Diagram showing the dynamic dynamometer acting as load for the drive under test

본 연구에서, 부하용 기기와 시험대상 모터는 동일한 22[kW] 3상 유도전동기를 이용하였으며, 구동용 모터와 부하용 모터는 전력흐름관계가 상호 보완적인 것을 고려하여 DC 링크단을 공유하여 실제로 소비되는 전력을 감소시켰다. 또한 전기적 관성특성에 관한 시뮬레이션을 보다 용이하도록 하기 위하여 모터와 토크

변환기사이를 접속한 커플링은 견고한 것으로 가정하였다. 그리고, 그림 1에서 토크검출기는 지령치 토크와 실제로 출력되는 토크와의 관계를 알아보기 위하여 부가적으로 설치하였다.

2.2 제어 방법

그림 2는 전기적 부하장치의 구현방식으로 본 논문에서 이용된 속도제어 방식의 블록도이다. 전체적인 제어 블록은 시험대상모터의 전달함수 $G(s)$ 와 부하모터의 전달함수 $G_{em}(s)$, 그리고 시험대상모터와 부하모터의 속도차를 토크로 환산해 주는 전달함수 $G_t(s)$ 로 구성되어있다.^[2] 따라서, 구동모터에 부담될 부하의 크기는 제어부에 의해서 연산된 구동모터와 부하모터의 속도차에 의하여 구현된다.

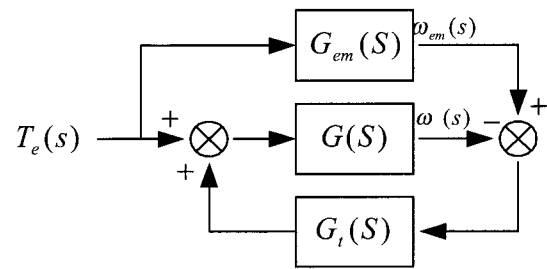


그림 2 모델 속도 트래킹을 이용한 부하 예시예시
Fig. 2 Load emulation using model speed tracking

그림 2의 전달함수는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{1}{Js + B} \tag{1}$$

$$\frac{\omega_{em}(s)}{T_e(s)} = G_{em}(s) = \frac{1}{J_{em}s + B_{em}} \tag{2}$$

$$G_t(s) = \left(K_{pL} + \frac{K_{iL}}{s} \right) \tag{3}$$

$$T_t = \left(K_{pL} + \frac{K_{iL}}{s} \right) * (\omega_{em}(s) - \omega(s)) \tag{4}$$

여기에서, J 는 구동용 모터의 관성크기, B 는 구동용 모터의 점성마찰계수, J_{em} 는 부하용 모터의 모의 관성계수, B_{em} 는 부하용 모터의 모의 점성마찰계수를 나타내고 있다.

식 (3)에서, K_{pL} , K_{iL} 는 각각 부하토크를 위한 이득으로 bandwidth는 전류제어기 이득과 동일하거나, 높은 것으로 한다.

그림 3은 모의 관성을 구현하기 위해서 그림 2의 제어 블록도에 의한 방법을 이용한 경우에 원하는 부하 토크를 얻어낼 수 있는지 알아보기 위하여, Matlab을 이용하여 시뮬레이션한 결과로써, 부하용 모터의 토크 지령과 구동용 모터의 토크응답곡선을 나타내고 있다. 여기에서, 구동용 모터의 자체 관성의 크기는 $J=0.007$ 으로 설정하였으며, 모의 관성크기는 $J_{em}=0.035$ 로 설정하였다.

그림 3의 출력응답 파형에서 볼 수 있듯이 지령치 토크에 대하여 부하응답토크가 안정적으로 응답하고 있다. 여기에서, 그림 2와 같은 속도제어방식은 안정적인 반면 속도제어 대역폭에 한계가 있으므로 급격한 토크의 변화에 대한 속응성이 부족하게 되는 단점이 있다. 그러나 전동차 구동 시스템에는 승객의 승차감을 위해 저크(Jerk)제어가 내장되어있어서 출력 토크의 급변이 제한되어 있으므로 출력 토크에 대한 응답성은 크게 요구되지 않은 특성이 있는 반면 대용량인 만큼 안정성이 더 중요시되는 점을 고려하면, 전동차 구동 시스템의 경우에는 토크 적분을 통한 이러한 속도 제어 방식이 유리한 것으로 판단된다.

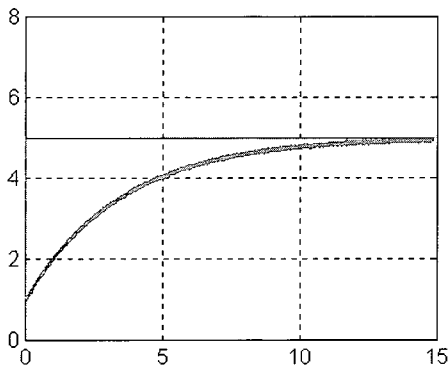


그림 3 속도트래킹 방법을 이용한 경우의 토크응답
CH: 1[Nm/div] TD: 1[S/div]
Fig. 3 Torque response using model speed tracking

2.3 전동차 조합시험을 위한 모의관성

철도차량의 성능시험에 있어서, 추진장치는 열차의 하중에 해당하는 관성뿐만 아니라, 주행조건 및 구배 저항을 고려하여야 한다. 따라서, 부하 모의 관성용 모터는 구배저항, 주행저항성분 및 열차의 주행 속도에

의한 공기저항을 구현할 수 있도록 하여야 한다. 그래서, 토크 입력을 변수로하여 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (6)에 의해 계산된 결과는 부하 모의 관성용 모터의 지령속도가 된다.

$$\omega_m^* = \frac{1}{J_{em}} \int [T_e - T_L] dt \tag{6}$$

$$T_L = T_g + T_r + T_b + a \cdot \omega^2 \tag{7}$$

- T_g : 구배저항분 토크
- T_r : 운행 선로의 구배 형태에 의한 주행저항성분
- T_b : T_b 는 BCU(Brake Control Unit)로부터 전달 받으며, 실제 많은 경우에서 공기 브레이크는 조합시험에서 제외
- a : 속도의 제곱에 비례하는 부하의 파라미터
- J_{em} : 모의관성크기

여기에서, 시험대상모터의 구동토크 T_e 는 시스템이 빠른 응답을 요구하지 않으므로 부하용 모터의 파타메터를 이용하여 산출한 정상상태 토크를 이용하였다.

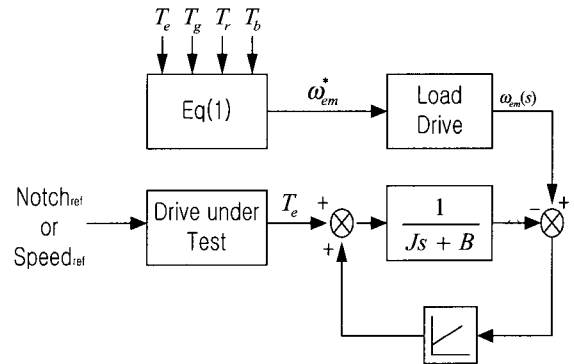


그림 4 전체 시스템 구성도
Fig. 4 Overall system scheme

그림 4는 본 연구에서 실행한 전동차 조합시험을 위한 구동부와 부하부의 전체 제어시스템 블록도이다. 시험대상모터는 Notch 지령에 의한 토크제어 또는 속도지령에 의한 속도제어를 선택할 수 있도록 구성하였으며, 부하용 모터는 식 (6)에 의해 지령된 속도값을 수렴할 수 있도록, 속도제어를 행하였다. 여기에 입력되는 토크입력(T_g, T_r, T_b, a, J_{em})값은 PC에서 실시간으로 가변될 수 있도록 구성하였다.

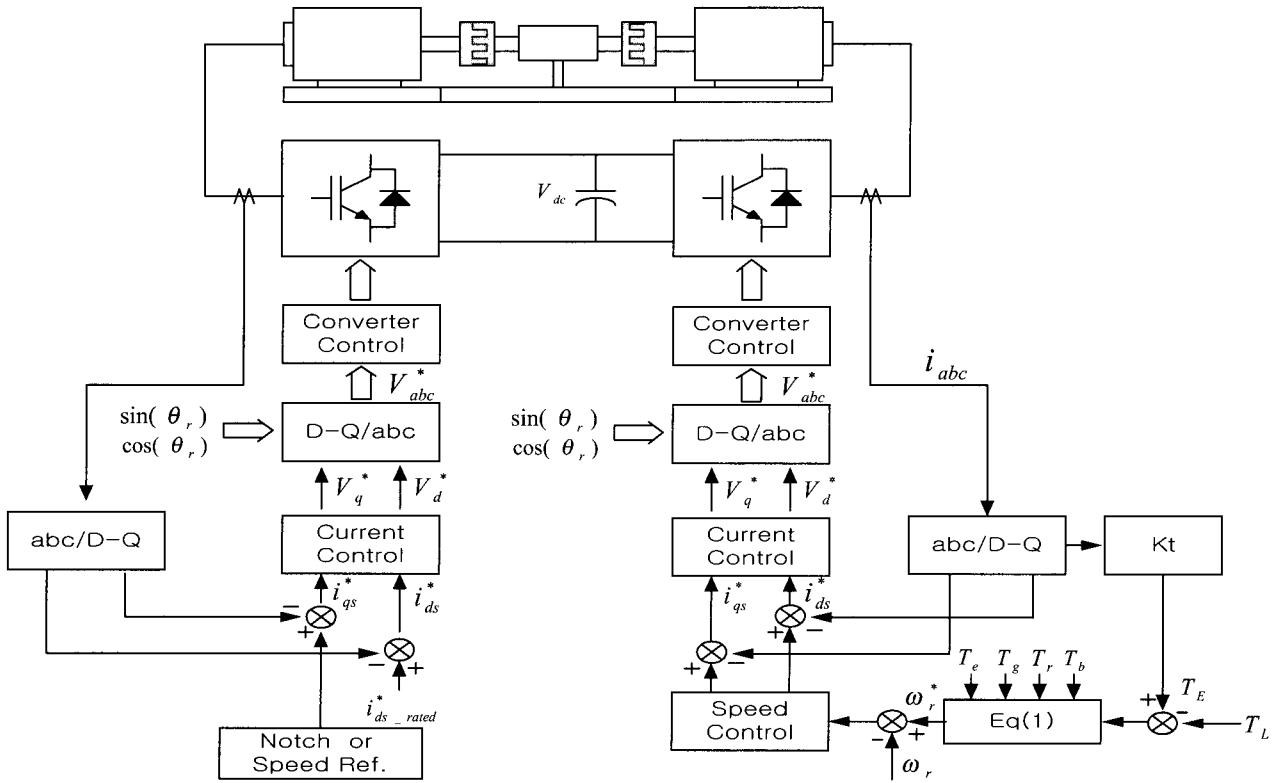


그림 5 벡터제어를 포함한 두 기기의 전체 시스템제어블록도
 Fig. 5 Overall system Block diagram including vector controls of both machines

3. 전기적 관성부하의 시뮬레이션

본 연구에서는 속도 트랙킹을 이용한 부하에블레이션의 타당성을 검증하기 위하여 C언어를 이용하여 관성부하 시스템 및 구동시스템과의 동적관계에 대한 시뮬레이션을 행하였다. 이때 이용된 모터 정수는 표 1과 같다.

시뮬레이션 및 실험을 수행함에 있어서, 속도제어기 및 전류제어기 그리고 자속제어기는 PI 제어기를 이용하였으며 또한 Antiwindup 기능을 갖도록 하였다. 그리고 이 때의 부하토크 구현을 위한 제어기의 대역폭은 전류제어기의 대역폭과 같은 1300[rad/sec]로 설정하였다.

그림 5에서 보여지고 있는 시스템은 축을 공유하는 두 대의 22kW 벡터제어 유도모터 드라이브로 구성되어 있다. 부하용 모터는 모의 관성부하이므로, 그 동작은 관성의 크기 및 각종 부하요소를 프로그래밍 할 수 있도록 구성되어 있다. 두 대의 모터는 회전자 자속기준 벡터제어로 구동되고 있으며 부하용 모터는 부하모

터의 토크를 구하여 구동모터의 토크를 유추하게 된다. 따라서, 구동용 모터는 별도의 장비없이 관성 및 부하시험을 행할 수 있다.

표 1 모터 정수
 Table 1 Motor parameter

모델명	V30HK1	
정격출력[Po]	kW	22
정격토크[Tm]	kgf·m	14.3
기저속도[Nb]	rpm	1500
최고속도[Nm]	rpm	3600
1차저항[Rs]	ohm	0.067
2차저항[Rr]	ohm	0.163
철손저항[Rm]	ohm	0.55
1차누설리액턴스[Lls]	mH	0.581
2차누설리액턴스[Llr]	mH	0.872
여자리액턴스[Lm]	mH	13.081
회전자[GD2]	kgf·m2	0.83

그림 6은 시험 대상 모터의 관성 변화에 따른 속도 응답특성을 시험하기 위해서, 구동용 모터는 속도제어를 행하였으며, 이때의 속도지령치는 -800~800[rpm]으로 변화시켰을 경우로써, 과도시 모의 관성크기의 변화에 따른 속도 및 토크분 전류 i_{qs} 의 파형을 나타내고 있다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 모의관성을 변화시킴에 따라 관성특성을 잘 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 그러나, 여기에서 모의 관성의 크기는 실제의 관성체 크기의 변화와 정확하게 일치하지는 않는다. 이것은 모터 파라미터 및 토크를 구하기 위해 측정된 데이터의 오차때문으로 사료된다.

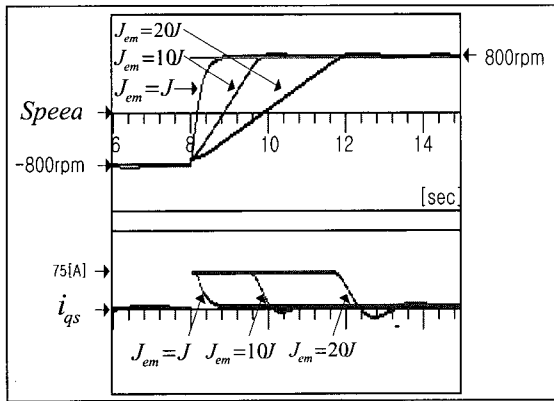


그림 6 부하관성 가변시 각각의 속도 및 q축 전류파형
Fig. 6 Speed and q-axis current waveform in case of changing load inertia

철도차량의 추진제어시스템은 토크지령인 Notch의 변화로 속도조절을 행한다. 그래서, 시험대상모터의 주행시험을 수행 및 Notch 지령에 의한 속도 및 토크 응답파형을 알아보기 위해서, 시험대상모터는 노치 지령에 의한 운전을 행하였고, 부하모터는 철도차량승객 만차의 50%에 해당하는 부하관성크기인 $J_{em} = 25 * J$ 로 설정하였다.

또한, 주행 중 발생할 수 있는 구배조건 시나리오를 설정하고 이를 변화시켰을 경우에 시험대상모터와 부하모터의 d축 및 q축 전류 파형과 속도 파형을 나타내었다. 시험조건은 기동시 Notch 1으로 기동하고 30[sec]에 Notch 2로, 1:29[sec]에 Notch 3으로 운전하였다. 이때의 출력파형으로 그림 7의 (a)는 부하 모터의 d축 및 q축 전류파형으로 구배 및 주행저항에 의한 부하토크를 양호하게 구현할 수 있도록 부하용 모터의 q축 전류가 변화됨을 볼 수 있고, 그림 7의 (b) 파형은 부하용 인버터에 의해 시험용 모터에 나타나는 d축 및

q축 전류파형을 나타내고 있다. 그리고, 그림 7의 (c) 파형은 이때의 전동기 속도와 구동용 모터의 토크 그리고 구배에 해당하는 성분을 나타내었으며 그 이외의 공기저항 등의 부하토크에 대해서는 도시하지 않았다.

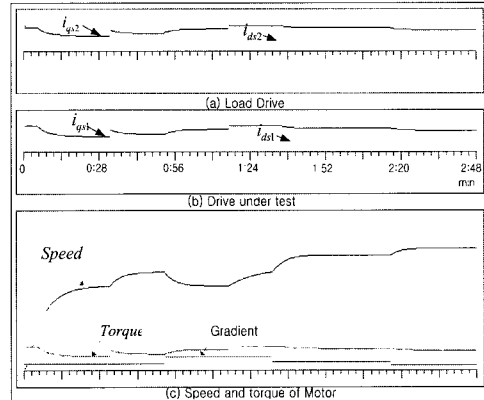


그림 7 Notch 변화와 구배 및 주행저항의 변화에 따른 시험대상모터와 부하모터의 각부 파형
Fig. 7 The curve of drive under test motor and load motor according to the change of notch and gradient profile and the running resistance

4. 실험결과 및 고찰

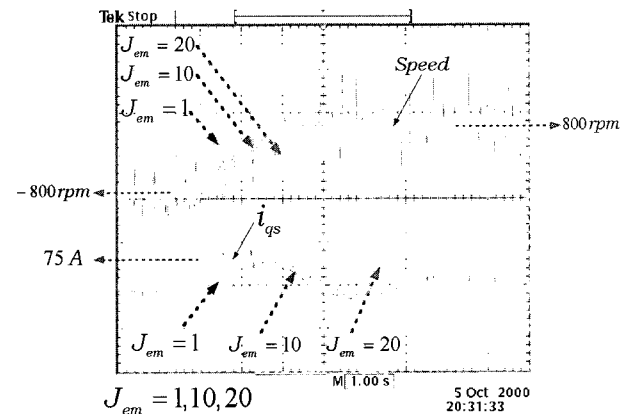


그림 8 속도지령 변화(-800 → 800[rpm])시 전기적 관성변화에 의한 각각의 속도 및 q축 전류파형
Fig. 8 The speed and q-axis current waveform by the changing electrical inertia load in experiment

철도차량의 추진성능시험을 위하여 많이 행하여지고 있는 Flywheel을 이용한 관성시험을 유도전동기를 이용한 모의 부하시험의 특성을 실험을 통하여 확인하고

자, 부하 모터에 관한 실험은 시뮬레이션을 통하여 확인된 제안된 알고리즘을 이용하였다.

본 실험 결과는 선형부하 $G_{em}(s) = 1/(J_{em}s + B_{em})$ 에 의한 모의관성을 보여주게 될 것이다. 모의 부하는 PI속도제어기 동작을 하는 속도제어루프가 포함되어있다. 그 결과가 그림에서 보이는 것처럼 페루프 시스템의 시뮬레이션과 비교될 것이다.

그림 8은 속도 지령치를 변화시켰을 경우에 부하 모의 관성 변화에 따른 속도 및 시험대상모터의 q축 전류 파형이다. 그림에서 볼 수 있듯이 모의 관성을 J, 10J, 20J로 변화시켰을 경우로 시뮬레이션 결과와 유사하며 관성체의 특성이 양호하게 나타나고 있다.

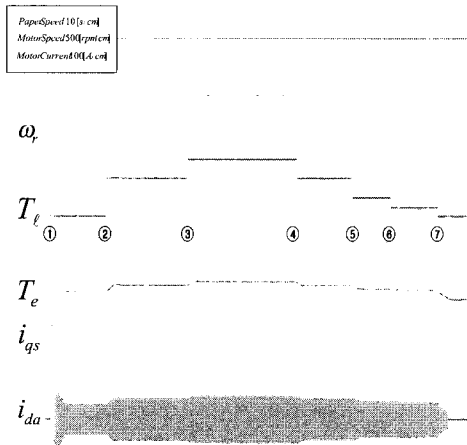


그림 9 Notch 1로 운전 중 구배변화에 따른 각부 파형
Fig. 9 Each part waveform of motor according to changing gradient on operating Notch 1

그림 9는 Notch1으로 주행중인 시험대상모터의 각각의 출력 파형이며 이때의 모의관성 $J_{em} = 30 * J$ 이고, 전동기에 구배에 해당하는 부하토크 T_l 를 변화시켰을 경우의 속도, 부하토크지령, 부하용 모터의 토크, 구동용 모터의 i_{qs} 과 a상 전류이다.

이때 부하용 모터의 토크와 구동용 모터의 q축 전류, 그리고 a상 전류는 구배에 해당하는 부하토크가 상승하면, 이에 따라서 증가하고, 부하토크가 감소하면 이에 따라서 감소하는 것을 알 수 있다. 이에 반하여, 속도 파형은 구배에 해당하는 부하토크가 상승하면, 이에 따라서 속도가 감소하고, 부하토크가 감소하면, 이에 따라서 속도가 증가하는 것을 알 수 있다. 부하 모터는 주행 시 고려해야할 구배 및 주행저항을 PC에서 실시간으로 변화시킨다.

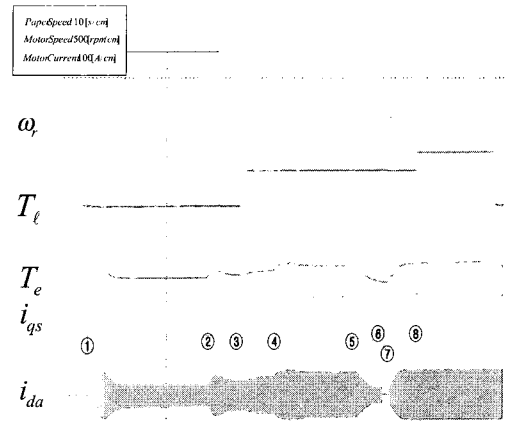


그림 10 Notch와 구배 변화에 따른 각부 파형
Fig. 10 Each part waveform of motor according to changing gradient and Notch

그림 10은 모의관성 $J_{em} = 30 * J$ 이고, Notch 지령치를 변화시켰을 경우에 속도, 부하토크 T_l , 부하용 모터의 토크, 그리고 구동용 모터의 q축 전류 및 a상 전류 파형이다. ① 인 시점에서 Notch 1으로 구동하고, ② 시점에서 Notch 1~Notch 2로 노치를 변경하였을 경우에 속도상승을 볼 수 있으며, ⑤ 시점에서 Notch 3에서 Notch 0로 변경하였을 경우에, 소프트 턴 오프 현상을 볼 수 있다. ⑥~⑦ 구간은 구동용 전동기의 타력 운전중을 시험하기 위한 부분으로 구동용 모터는 타력 운전을 하고 있으며, 이 때의 부하용 모터에는 부하용 모터가 구현하고 있는 구배에 의해 속도가 감소함을 볼 수 있다. 따라서, 부하용 모터는 부하관성뿐만 아니라 부하토크도 잘 구현함을 볼 수 있다.

5. 결 론

철도차량의 성능시험 및 신뢰성 평가를 위하여 기존에는 전동차의 직선운동시의 관성과 동일한 회전관성을 갖는 Flywheel을 사용하였다. 그러나 플라이휠을 이용한 기계적 관성의 경우, 관성을 가변할 수 없고, 노선의 구배에 따른 부하의 변화와 실제와 유사한 주행저항의 구현이 불가능하다. 또한 사고시 대처가 어렵고, 에너지의 역행과 회생이 불가능하므로 전력소모가 많아 에너지의 손실이 증가하고 제작비가 매우 고가인 단점이 있다.

본 연구에서는 플라이휠을 이용한 기존의 기계적인 조합시험설비의 문제점에 대한 방안으로 유도전동기를 이용하여 전동차의 전기적 관성을 구현하는 방법을 제

안하였다. 제안한 알고리즘을 구현하기 위한 조합시험 설비는 22kw 구동부 유도전동기와 부하부 유도전동기 세트로 구성하며, 제어기는 DSP 소자인 TMS320F240을 사용하여 compact하게 구성하였다. 전기적 부하 설비는 관성계수, 주행저항 및 구배저항 토크 등 모든 부하조건을 실시간으로 가변할 수 있으므로 실제 노선의 운행조건과 유사한 부하특성을 얻을 수 있었다. 또한 구동부시스템과 부하부 시스템은 역행과 회생으로 동작하므로 전체 에너지 손실이 매우 적어 경제적인 장점이 있으며, 사고발생시 전기적인 차단으로 안전을 보장할 수 있도록 하였다.

참 고 문 헌

[1] 배분호, 설승기, "전동차 조합시험을 위한 전기적 관성부하에 대한 연구", 대한전기학회 하계학술대회, p. 433, 1999.

[2] Z. Hakan Akpolat, Greg M. Asher, "Dynamic Emulation of Mechanical Loads Using a Vector-Controlled Induction Motor-Generator Set", IEEE, Vol. 46, No. 2.

[3] E. R. Collins, Y. Huang, "A Programmable Dynamometer for Testing Rotating Machinery Using a Three-Phase Induction Machine", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 9, No. 3, 1994, pp. 521~527.

[4] J. J. Carrol, D. M. Dawson, and E. R. Collins, "A Nonlinear control technique for the development of a computer controlled dynamometer", DSC-Vol. 53, ASME 1993, pp. 31~36.

저 자 소 개



김길동(金吉童)

1964년 9월 20일생. 1986년 명지대 전기공과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년~1994년 (주)우진산전 기술연구소 선임연구원. 1995년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원.



박현준(朴煥濬)

1957년 6월 24일생. 1981년 홍익대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년~1991년 삼성전기(주) 정밀기기연구실. 1992년~1996년 현대중공업(주) 중앙연구소 책임연구원. 1997년~현재 한국철도기술연구원 책임연구원.



한영재(韓咏材)

1969년 5월 9일생. 1994년 홍익대 전기제어공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기제어공학과 졸업(석사). 1996년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원.



한경희(韓慶熙)

1943년 4월 9일생. 1967년 명지대 전기공학과 졸업. 1979년 나고야대학원 전기공학과 졸업(석사). 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1983년~현재 명지대 전기공학과 교수.



조정민(趙正珉)

1972년 1월 10일생. 1997년 충주대 전기공학과 졸업, 1999년 명지대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2002년 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.