

## 벡터제어 유도전동기를 이용한 축소형 관성 시뮬레이터

김길동, 한영재, 박현준, 변운섭, 장동욱, 조정민

### A miniature inertia simulator using vector controlled induction motor

Gil-Dong Kim, Young-Jae Park, Hyun-Jun Park, Youn-Seop Byun, Dong-Uook Jang, Jeong-Min Jho

**Abstract** - A railroad vehicle( Light weight electric rail car, Urban railroad, High-speed railroad) need to construct propulsion- system capacity experiment equipment to test performance or to estimate confidence. Experiment equipment in interior have been used Flywheel which is equal to the same inertia as railroad straight moment. But mechanical inertia using flywheel don't change inertia and can't embody traveling-struggle which is similar to actual traveling-struggle.

We propose the method to embody electric railroad load system with inertia using electric servo motor in order to get the characteristic of real vehicle load, and confirm this algorithm with simulation and experiment.

조건과 유사하게 하기 위하여 토크제어를 행하였고, 다이내모메터는 속도제어를 행하였다.

본 연구에서, 다이내모메터 기기와 시험대상 모터는 동일한 22[kW] 3상유도전동기를 이용하였다. 모터와 토크 변환기사이를 접속한 커플링은 견고한 것으로 가정한다.

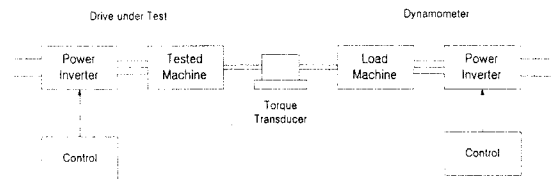


그림 1. 실험대상 모터를 위한 부하 관성 시뮬레이터 블록도

## 1. 서 론

철도차량(경량전철, 도시철도, 고속철도)은 성능시험 및 신뢰성 평가를 위한 추진장치 성능시험설비 구축이 필요하다.

이를 위해 국내에 있는 시험설비는 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 일반적으로 회생시 발생한 에너지를 저항을 통해 소비시키므로 많은 전력을 소비하게 된다. 고속시험시 플라이휠에 매우 큰 운동 에너지가 축적되므로 사고시 어떠한 방법으로도 보호가 불가능한 문제가 있다.

이에 대한 방안으로 전기적 서보시스템을 이용하여 전동차의 부하를 구현하는 방법이 제안된 바 있다.[1] 그러나 전동차의 부하를 충분히 구현하기 위해서 부하인 서보시스템은 피시험체에 비하여 동일한 용량의 전동기나 그 이상의 대용량의 전동기를 이용하여야 한다. 따라서 부하용 서보시스템은 직류기에 비하여 유도기가 내구성 및 가격에 대하여 유리하다.

본 연구에서는 플라이휠을 이용한 기존의 기계적인 시험설비의 문제점에 대한 방안과 실제 차량부하와 유사한 부하 특성을 얻기 위해서 유도전동기를 이용하여 전기적 관성을 구현하는 방법을 제안하고 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하고자 한다.

## 2. 전기적 관성부하 시뮬레이터

### 2.1 전기적 관성부하 시스템의 구성

전기적인 관성부하와 구동용 모터는 IGBT를 이용한 전압원 인버터로 구성되는 시스템으로 그림1과 같이 구성하였다.

그림 1에서, 시험대상인 구동용모터는 전동차의 제어

### 2.2 제어 방법

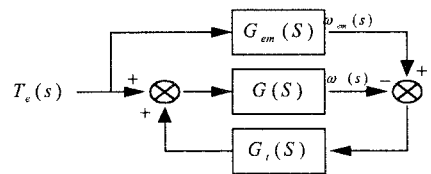


그림 2. 모델 속도 트래킹을 이용한 부하 에뮬레이션

그림 2는 기본적인 속도제어 방식의 블록도이다. 전체 전인 제어 블록은 시험대상모터의 전달함수  $G(s)$ 와 부하모터의 전달함수  $G_{em}(s)$  그리고, 시험대상모터와 부하모터의 속도차를 토크로 환산해주는 전달함수  $G_f(s)$ 로 구성되어있다.[2] 이런 전달함수를 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

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

$$G_f(s) = (K_{pl} + \frac{K_{il}}{s}) \quad (3)$$

$$T_l = (K_{pl} + \frac{K_{il}}{s}) * (\omega_{em}(s) - \omega(s)) \quad (4)$$

식 (3)을 z변환하면 식(4)과 같이 표현한다.

$$\omega_{err} = \omega_{em}(s) - \omega(s)$$

$$T_l = T_l(n-1) + (K_{pl} + T_s * K_{il}) * \omega_{err}(n-1) - K_{pl} * \omega_{err} \quad (5)$$

여기에서,  $K_{pl}$ ,  $K_{il}$ 는 각각 부하토크를 위한 이득으로 bandwidth는 전류제어기 이득과 동일하거나, 높은 것으로 한다.

그림2와 같은 방식은 안정적인 반면 속도제어 대역폭에 한계가 있으므로 급격한 토크의 변화에 대한 대응성이 부족하게 된다. 전동차 구동 시스템에는 승객의 승차감을 위해 저크(Jerk)제어가 내장되어 출력 토크의 급변이 제한되어 있으므로 출력 토크에 대한 응답성은 크게 요구되지 않은 특성이 있는 반면 대용량인 만큼 안정성이 더 중요시된다. 따라서, 전동차 구동 시스템의 경우에는 토크 적분을 통한 속도 제어 방식이 유리한 것으로 판단된다.[1]

### 2.1 전동차 조합시험을 위한 모의관성

모터 부하는 주행조건 및 구배저항을 고려한 토크 입력을 변수로하여 속도 기준치를 계산하는 부분으로 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

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

$$T_L = T_g + T_r + T_b + a \cdot \omega^2 \quad (7)$$

$T_g$ : 구배저항분 토크

$T_r$ : 운행 선로의 구배 형태에 의한 주행저항성분

$T_b$ :  $T_b$ 는 BCU(Brake Control Unit)로부터 전달받으며, 실제 많은 경우에서 공기 브레이크는 조합시험에서 제외

$a$ : 속도의 제곱에 비례하는 부하의 파라미터

$J_{em}$ : 모의관성크기

여기에서, 시험대상모터의 구동토크  $T_e$ 는 토크 검출기로부터의 입력값을 이용하였다.

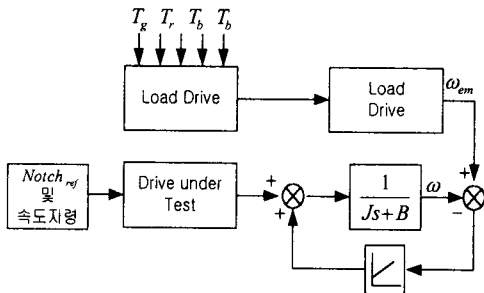


그림 3. 구동부와 부하부의 전체 제어시스템 블록도

그림 3은 본 연구에서 실행한 전동차 조합시험을 위한 구동부와 부하부의 전체 제어시스템 블록도이다. 시험대상모터는 Notch 지령에 의한 토크제어 또는 속도지령에 의한 속도제어를 선택할 수 있도록 구성하였고, 부하용모터는 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.

### 2.3 전기적 관성부하의 시뮬레이션

본 연구에서는 C언어를 이용하여 관성부하 시스템의 시뮬레이션을 행하였다. 이때 이용된 모터 정수는 다음과 같다.

표1. 모터 정수

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 4는 속도지령치를  $-800 \sim 800$ [rpm]으로 변화시켰을 경우에 모의 관성크기의 변화에 따른 속도 및 q축 전류 파형을 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 모의 관성을 변화시키기에 따라 관성특성을 잘 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

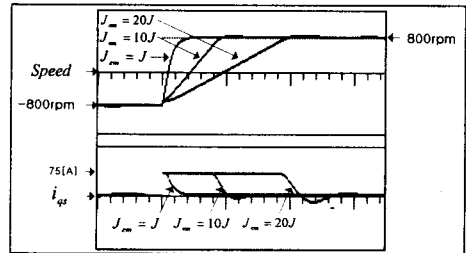


그림 4. 부하관성 가변시 각각의 속도 및 q축 전류파형

그림 5는 시험대상모터에 노치 지령을 부하모터에 구배조건을 변화시켰을 경우에 시험대상모터와 부하모터의 d축 및 q축 전류파형과 속도파형을 나타내었다. 첫 번째 그림은 부하 모터의 d축 및 q축 전류파형으로 구배 및 주행저항에 의한 부하토크를 양호하게 구현함을 알 수 있고 두 번째 파형은 그에 따라 시험용 모터가 적절하게 반응함을 볼 수 있다.

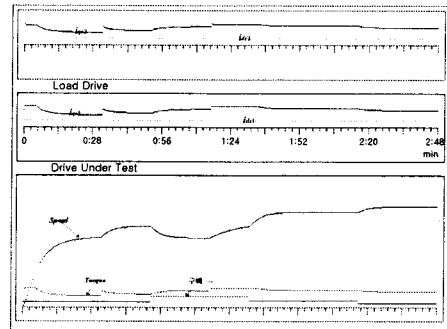


그림 5. Notch 변화와 구배 및 주행저항의 변화에 따른 시험대상모터와 부하모터의 각부 파형

### 2.4 실험결과 및 고찰

부하 모터에 관한 실험은 시뮬레이션을 통하여 확인된 제안된 알고리즘을 직결된 22[kW]의 3상 유도전동기2대를 이용하여 그 특성을 확인하였다.

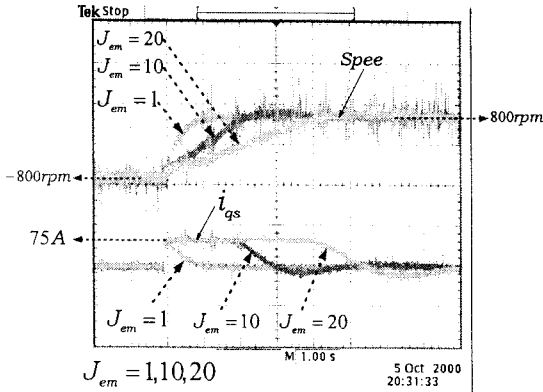


그림 6 속도지령 변화(-800 → 800[rpm])시 모의 관성변화에 의한 각각의 속도 및 q축 전류파형

그림 6은 속도지령치를 변화시켰을 경우에 부하 모의 관성 변화에 따른 속도 및 시험대상모터의 q축 전류파형이다. 그림에서 볼 수 있듯이 모의 관성을 J, 10J, 20J로 변화시켰을 경우로 시뮬레이션 결과와 유사하며 관성체의 특성이 양호하게 나타나고 있다.

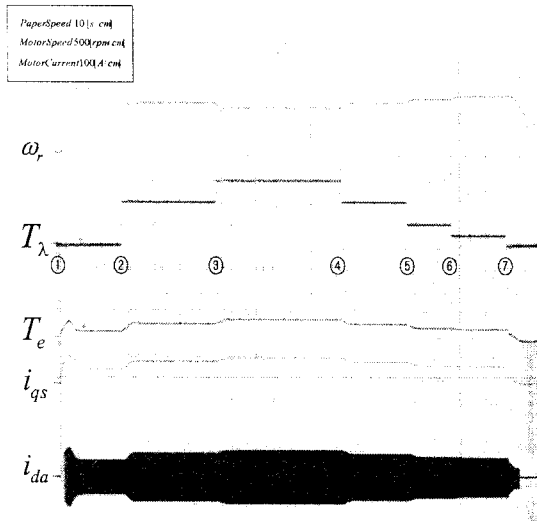


그림 7 Notch 1로 운전중 구배변화에 따른 각부 파형

그림 7은 Notch 1로 주행중인 시험대상모터의 각각의 출력파형이며 모의관성  $J_{em} = 30 \cdot J$  이고, 전동기에 구배에 해당하는 부하토크  $T_\lambda$ 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 주행시 고려해야할 구배 및 주행저항을 PC에서 실시간으로 변화시킨다.

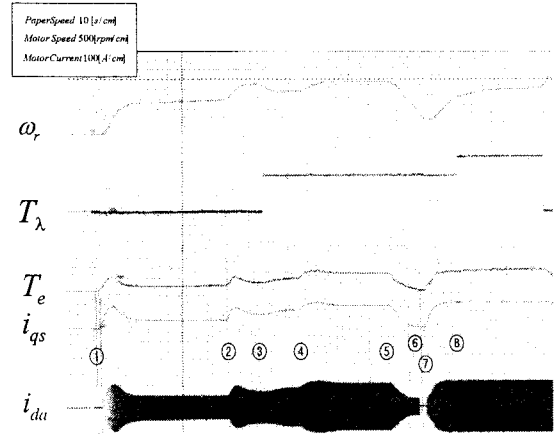


그림 8. Notch와 구배변화에 따른 각부 파형

그림 8은 모의관성  $J_{em} = 30 \cdot J$  이고, Notch 지령치를 변화시켰을 경우에 속도, 부하토크  $T_\lambda$ , 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 타력운전중인 모터에 구배가 있으므로 속도가 현저히 감소함을 볼 수 있다.

### 3. 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 제안하였다. 제안한 알고리즘을 구현하기 위한 조합시험설비는 22kw 구동부 유도전동기와 부하부 유도전동기 세트로 구성하며, 제어기는 DSP 소자인 TMS320F240을 사용하여 compact하게 구성하였다. 전기적 부하 설비는 관성계수, 주행저항 및 구배저항 토오크등 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, 사고 발생시 전기적인 차단으로 안전을 보장할 수 있도록 하였다.

### [참고 문헌]

- [1] 배본호, 설승기, "전동차 조합시험을 위한 전기적 관성부하에 대한 연구", 대한전기학회 하계학술대회, p433, 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, 1999