

고속전철 모의시험 장치

류홍제, 김중수, 임근희, 김용주, 원충연\*  
 한국전기연구소 산업전기연구단,\*성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터 공학부

A Scale-down Simulator for High-speed Railway Train

Hong-Je Ryoo, Myung-Ho Woo, Jong-soo Kim, Geun-Hie Rim, Chung-Yuen Won\*.  
 KERI, Industry Application Center,\*SKKU, School of E&C Engineering.

**Abstract** - This paper describes a down-scaled model for a high-speed railway train. The propulsion system of simulator consists of four line-side converters four induction motors driven by two inverters, an eddy current braking system, two dynamic braking systems. The control algorithm of traction and braking including anti-skid control can be developed using the simulator. Simulator design procedure, control algorithm and some experimental waveforms are presented in this paper.

1. 서 론

최근 안전하고 공해를 유발하지 않는 고속전철에 대한 관심이 고조되고 우리나라에서도 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 고속전철에 대한 경험이 없는 상황에서 대용량 시스템을 구축하기 위한 단계로서 각종 알고리즘을 모의시험할 수 있고 발생하는 문제점을 파악하여 실제 연구에 적용하기 위한 장치의 필요성이 대두됨에 따라 본 논문에서는 현재 진행 중인 한국형 고속전철의 주요 사양을 기준으로 주요 추진 제어 알고리즘을 검증할 수 있도록 축소 모의 시험장치를 설계 구성하였다. [1-2]

모의시험장치는 동력차 한 대를 모의할 수 있는 추진 및 제동장치와 관성 부하 장치, 레일과 휠의 접촉계수 및 주행저항을 모의하기 위한 장치로 구성된다.

모의시험장치의 추진시스템 구성은 실제 시스템의 동력차 한 대를 모의 하기 위하여 주변압기와 4상한 입력 컨버터 4대, 견인전동기 4대와 이를 구동하기 위한 인버터 두 대 비접촉 와류제동장치와 저항제동장치 및 두 대의 디스크제동장치로 이루어진다.

관성부하장치는 동력차 한 대가 담당하는 열차의 중량 및 관성을 모의하며, 휠과 레일의 접촉계수를 모의할 수 있도록 유압 서보 밸브를 장착하였고 휠의 슬립/슬라이드현상을 모의할 수 있도록 주수장치를 구성하였다. 열차의 주행저항은 관성부하장치의 축에 DC 발전기를 연결하여 부하를 변화시켜 근사적으로 모의 가능하도록 하였다.

모의 시험장치의 모든 설계는 실시시스템과 모의 시험장치의 견인전동기 용량비를 기준으로 설계하였다.

본 논문에서는 모의시험장치의 설계 및 각 추진장치의 제어 알고리즘을 간략히 소개하고 모의시험장치를 이용한 몇가지 실험결과를 제시한다.

구성된 모의시험 장치는 추후 실시시스템에 적용하기 위한 각종 제어 알고리즘 구축에 이용가능하다.

2. 모의시험장치

2.1 추진시스템

모의 시험장치의 추진시스템을 그림 1에 나타내었다. 추진시스템의 구성은 실시시스템과 동일하며, 견인력용량 비로 축소 구성되었다.

주변압기는 6개의 2차권선을 가지며, 4권선이 추진용으로 이용되고, 보조권선은 추후 충전기용 전원 및 능동 필터용 전원으로 사용될 예정이다. 추진권선은 입력전원 승압 및 역률제어를 위해 누설인덕턴스를 0.2pu로 설계하였다. [3] 4상한 컨버터는 입력 변압기의 누설 인덕턴스를 이용하여 입력전원 220V부터 400V의 직류전압을 공급한다. 입력 컨버터는 병렬 위상지연운전으로 고조파를 제거하고 역행 및 회생시 항상 입력전류의 역률이 1이 되도록 운전한다.

전기제동장치는 저항 및 와전류제동장치로 구성되며, 저항제동장치는 컨버터 이상시 DC 전압 상승 방지용으로 같이 사용된다. 설계장착된 와전류 제동장치는 12000AT의 기자력으로 약 300N의 제동력을 발생하도록 설계되었다. [4]

실제 시스템과 모의시험장치의 추진시스템을 표 1에 비교하였다.

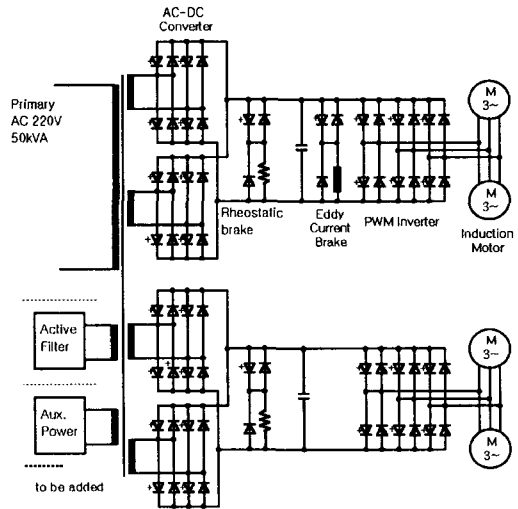


그림 1 추진시스템 구성

표 1 추진시스템 비교

	모의시험장치	한국형 고속전철
견인전동기	3상 농형 유도전동기 출력: 7.5kW*4 장격: 220V, 26A 최대속도: 4500rpm	3상 농형 유도전동기 출력: 1100kW*16 장격: 2183V, 379A 최대속도: 4222rpm
인버터	용량: 22kVA*2 입력: 400V 출력: 0-220V	용량: 2824kVA*8 입력: 2800V 출력: 0-2200V
입력컨버터	용량: 10kW*4 입력: 220V 출력: 400V	용량: 1250kW*16 입력: 1400V 출력: 2800V
스위치소자	IGBT: 1200V, 300A	IGCT: 4500V, 4000A
비집속제동장치	제동력: 300N 장격: 80V, 10A	제동력: 25kN*32 장격: 350V, 70A
저항제동장치	10kW, 10Ω	800kW*8, 3.9Ω
DC 링크	400V, 5500μF	2800V, 8000μF
주변압기	1차: 220V, 70kVA 2차: 220V, 15kVA 152V, 110V, 5kVA, %Z: 20%	1차: 25kV, 8900kVA 2차: 1400V, 1250kVA*6 350V, 350kVA*4 %Z: 20%

2.2 관성부하장치설계

2P+4M+16T의 20량 편성 고속전철 추진시스템의 열차 총 중량은 780톤이며 350km/h의 속도로 달리는 열차의 관성에너지를 모의하기 위하여 플라이 휠을 사용하였다. 관성에너지는 실제 시스템의 견인전동기와 모의 장치의 견인전동기 용량비에 맞게 축소하였다. 현재 고속전철 견인전동기 전체용량은 17600kW이고 기어비는 2.012로 설계되었으며, 실제 고속전철 시스템과 모의 시험장치의 전동기 용량비를 구해보면 587 : 1(17600kw:30kW) 이 되며, 350km/h의 속도로 달리는 고속전철의 에너지를 구해보면 다음과 같다.

$$E_{at 350Km/h} = \frac{1}{2}mv^2 = 3690 MJ \quad (1)$$

이로부터 전동기용량비로 축소한 flywheel의 관성에너지를 구하면

$$E_{at flywheel} = \frac{1}{2}J\omega^2 = 6010 KJ \quad (2)$$

모의레인과 모의휠의 회전비를 2로 하는 경우 플라이 휠의 최대회전수는 2100rpm정도이며 이 경우의 관성모우멘트를 구하면 249 kg.m<sup>2</sup>가 된다.

관성부하장치는 모두 7개의 플라이휠과 관련된 기계 장치로 구성된다. 7개 플라이휠의 관성에너지는 견인전동기 용량비로 축소한 고속전철의 관성에너지와 같도록 설계하였고, 주행시의 고속전철의 주행저항을 모의하기 위하여 DC발전기를 사용하며 발전기의 출력단 부하를 조정하여 근사적으로 모의가능하도록 한다.

20량 편성의 한국형고속전철의 주행저항은 다음식으로 표현된다.

$$R = 471.15 + 6.24V + 0.07153V^2 \quad (3)$$

350km/h에서 131.4[kN]이며, 전동기 용량비를 기준으로 시뮬레이터 DC 발전기의 필요 용량을 계산하면, 350km에서의 토크는 214[N]이 되며 이에 필요한 발전기 출력은 다음과 같이 정할 수 있다.

$$P = F \cdot V = 214[N] \times 97.22[m/s] \approx 21kW \quad (4)$$

전동기에 축으로 연결된 바퀴모의 장치와 플라이 휠의 레일 모의부 사이의 접촉 계수를 변화 시킬 수 있도록 유압제어 장치를 사용한다. 이에 따라 접촉계수를 변

화시킬 수 있으며 각 바퀴의 다른 접촉계수 특성을 갖는 경우도 모의가능하다. 또한 주수장치를 사용하여 휠-레일 접촉부에 주수하여 노면상태에 따른 슬립/슬라이드 제어 알고리즘을 실험가능하도록 제작하였다.

그림 2에 구성된 관성부하장치의 실제 사진 및 구성도를 나타내었고 각 플라이휠의 설계사양은 표 2에 나타내었다.

3. 실험결과

3.1 제어 알고리즘

본 논문에서는 구성된 모의시험장치의 타당성을 검증하기 위해 모의 실험을 하였으며 이에 사용된 제어 알고리즘블럭도를 그림 3- 그림 6에 나타내었다.

표 2 플라이휠 사양

	지름(mm)	넓이(mm)	중량	J (kg.m <sup>2</sup> )	수량
플라이휠	885	240	1.68ton	228	1
모의레일	450	150	206kg	9.56	2
모의휠	225	100	33.24kg	0.396	4

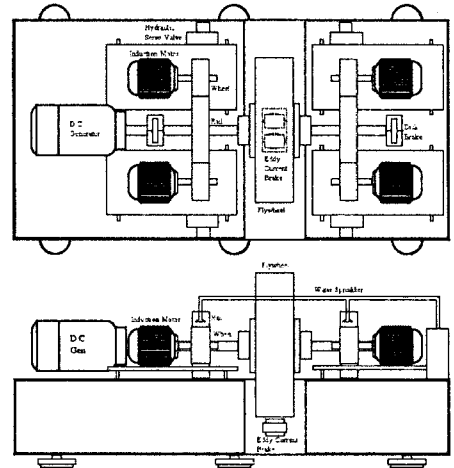


그림 2 관성부하장치

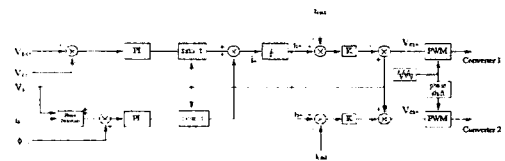


그림 3 4상한 입력 컨버터 제어 블럭도

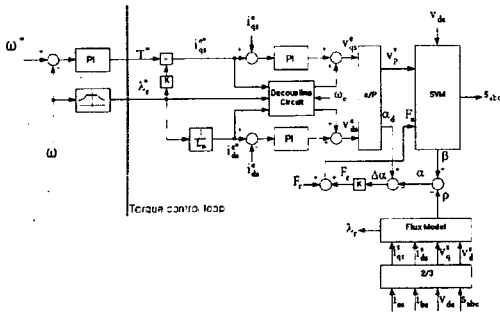


그림 4 유도전동기 제어 블록도

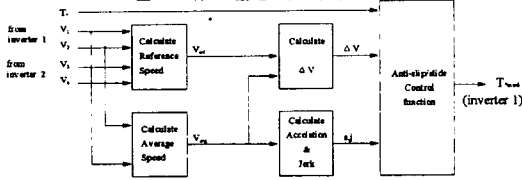


그림 5 활주방지 제어 블록도

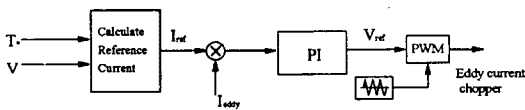


그림 6 와류제동장치 제어 블록도

### 3.2 실험결과

그림 7은 속도제어 모드에서의 전동기의 기준속도와 실제속도파형으로 역행 및 회생시 모두 지령속도를 잘 추종함을 볼 수 있다.

그림 8은 역행 및 회생운전시의 변압기 1차측 전압 전류파형이다. 그림에서 보이는 바와 같이 540Hz의 낮은 스위칭 주파수에도 불구하고 입력전류는 전 운전범위에서 단위역률에 가깝게 운전됨을 알 수 있다.

그림 9는 제작된 와류전류제동장치에 정격전류를 흘린 경우의 속도에 따른 제동토크 측정 파형이며, 그림 10은 일정토크가 발생되도록 전류제어를 한 경우의 속도에 대한 전류 및 토크 파형을 나타내었다.

## 4. 결 론

논문에서는 현재 진행중인 고속전철의 추진제어 알고리즘을 검증할 수 있는 고속전철 모의시험장치를 설계 제작하였다. 축소 설계된 모의시험장치를 통하여 모의시험할 수 있는 부분은 다음과 같다.

- 1) 진단시스템과의 연계에 의한 열차 주행모의
- 2) 4상한 컨버터의 역률제어 및 4상한 제어
- 3) DC link 전압제어
- 4) 인버터에 의한 견인유도전동기 제어
- 5) 전기제동(회생, 와류)
- 6) 슬립/슬라이드 제어

구성된 모의시험장치는 다음의 추진제어 알고리즘 검증에 이용될 예정이다.

- 1) 시스템 인터페이스 구성 확립
- 2) 슬립/슬라이드 제어 알고리즘 구성
- 3) 제동 블렌딩 및 비접촉 제동 알고리즘 구성
- 4) 견인용 컨버터/인버터 제어 알고리즘 검증

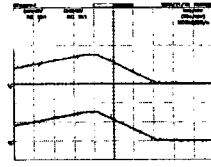
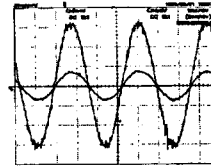
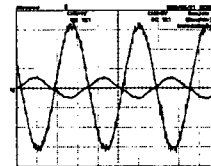


그림 7 플라이휠 속도(1000rpm/div)



(a) 역행 운전시



(b) 회생 운전시

그림 8 변압기 입력전압 전류 (100V/div., 100A/div.)

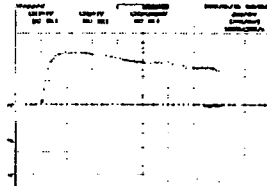


그림 9 와전류 속도-토크 특성

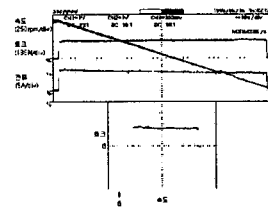


그림 10 와전류 제동장치 실험파형

본 논문의 연구는 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부 공동주관 아래 선도기술개발사업으로 시행되는 고속전철기술개발사업에 의해 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자에게 감사드립니다.

### [참 고 문 헌]

- (1) "추진시스템 엔지니어링 기술개발 2차년도 보고서", 한국전기연구소, 1998. 11.
- (2) "고속전철 시스템 기본사양", 한국철도기술연구원, 1998.
- (3) "비접촉제동시스템 개발 1차년도 보고서", 한국전기연구소, 1997. 11