

벡터제어를 이용한 전동차 구동 시스템의 개발

배분호*, 설승기*, 김상훈**, 이일호***, 정은성***, 이인석***
 *서울대학교 전기공학부, **강원대학교 전기전자공학부, ***한국철도차량주식회사

**Development of Traction Drive System
 using Vector Control**

Bon-Ho Bae*, Seung-Ki Sul*, Sang-Hoon Kim**, Il-Ho Lee***, Eun-Sung Jung, In-Seok Lee and Sung-Soo Han***
 *Seoul National University, **Kangwon University, ***Korea Rolling Stock Corporation

Abstract - 본 논문은 산업자원부 중기거점기술개발사업의 일환인 '전동차 추진장치 기술 개발 과제'로 개발된 전동차 구동 시스템에 대하여 서술하고 있다. 개발된 전동차 구동 시스템은 4대의 210kW 유도전동기를 병렬로 구동하며 주 전력 소자로 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)를 사용하여 스너버 회로가 없는 간단하고 신뢰성 있는 시스템을 구현하였다. 제어 기법으로는 벡터 제어 기법을 적용하여 저속 기동 및 가속시의 토오크 제어 특성을 향상시켰다. 본 논문에서는 전체 시스템의 구성 및 특성을 약술하고, 적용된 벡터제어에 대하여 논하였다. 그리고 본 과제를 위해 새로 제작된 전동차 1편성을 이용하여 한국철도차량주식회사 상주공장의 시험 전차선에서 주행 시험을 실시한 결과 개발된 전동차 구동 시스템의 성능이 목표 사양을 만족함을 확인하였다.

(Voltage Source Inverter)는 6개의 IGBT 소자로 구성된 2레벨 인버터이다. 주전력소자로 IGBT를 사용함으로써 고속 스위칭을 가능하게 하고, 스너버(snubber) 회로 등의 부가 회로를 제거하고 게이트 드라이버 등이 간단한 구조로 설계되어 신뢰성이 향상되었다. 또한 과전압 시의 보호기능 및 회생 제동을 위해 저항 및 IGBT로 구성된 초퍼가 설치되어 있는데, 특히 회생 제동 시 가선이 전력을 수용할 수 없을 경우 단시간동안 저항을 통해 제동능력을 유지할 수 있게 설계되어 있다. 표 1은 6상 인버터 및 초퍼에 사용된 IGBT의 소자의 사양을 보여준다. 개발된 전동차 구동 시스템은 4개의 210kW 견인용 유도 전동기를 구동하며 표 2는 전동기의 사양을 보여준다. 동력차(motor car)와 부수차(driving trailer)의 설계 비율은 1이며, 1편성은 8량으로 4량의 동력차와 4량의 부수차로 이루어진다. 그러나 시험의 편리함을 위해 시험 차량의 편성은 4량으로 2량의 동력차와 2량의 부수차로 이루어졌다.

1. 서 론

최근 국내의 전동차에 대한 수요는 확대되어 왔으며 앞으로 지방 대도시의 지하철 확충과 함께 그 수요가 급속히 증가할 것으로 예상되고 있다. 전동차의 기본적인 구동 시스템의 경우 기존의 직류 전동기를 이용한 저항 제어 또는 초퍼(chopper) 제어 방식을 대신하여 유도전동기를 이용한 인버터 방식이 적용되고 있다. 그러나 아직까지 인버터 방식의 전동차용 구동 시스템은 일본 및 유럽의 제품을 수입하거나 라이센스 계약에 의한 국내 생산만이 이루어지고 있다. 최근 국내 주요 철도차량 제작사 및 연구소를 중심으로 자체 개발이 수행되어 왔으며 많은 성과가 도출되고 있다. 본 논문에서는 산업자원부 중기거점기술개발사업의 일환인 '전동차 추진장치 기술 개발 과제'로 자체 개발된 인버터 방식의 전동차 구동 시스템의 구성 및 특성을 약술하고 적용된 벡터 제어 기법에 대하여 논하였다. 본론 2.1에서는 개발된 구동 시스템의 전체적인 구성에 대하여 서술하고, 본론 2.2에서는 적용된 벡터 제어 기법에 대하여 기술하고, 본론 2.3에서는 실제 차량을 이용한 시험 결과를 평가한다.

그림 2는 동력차의 하부에 설치된 구동시스템의 사진이다. 4대의 전동차는 대차(bogie)에 2개씩 설치되어 있다. 접착기 Box는 고속도차단기(HSCB), 차단기(LB), 접착기(CCK), 충전저항(CHRe) 등이 내장되어 있다. Filter(FL) Box는 정격용량 8mH, 550A의 공심 리액터를 내장하고 있다. 인버터 Box는 제어장치, 3상인버터 및 회생용 초퍼(BCH) 및 필터 콘덴서(FC)가 내장되어 있다. 회생 저항은 가선이 회생 전력을 받아들이지 못할 경우 열로 소모시키기 위한 저항으로 저항값은 2.1Ω이며 용량은 65kW이다.

그림 3은 인버터 Box의 확대 사진으로서 3상 인버터를 위한 3개의 방열판 및 회생용 초퍼를 위한 방열판을 보여준다. 특히 3상 인버터를 위한 방열판은 히트 파이프(Heat Pipe)를 채용하였으며 자연냉각을 구현하여 냉각팬에서 발생하는 소음 문제를 해소하였다.

개발된 구동 시스템의 견인력은 가속 시에 3.0 [km/h/sec], 감속 시에 3.5 [km/h/sec]의 가감속 능력 및 최고속도 100 [km/h] 이상을 목표로 설계되었다.

표 1. IGBT 사양.

모델 및 제조사	FZ1200R33KF1 [EUPEC]
Collector-Emitter Voltage	3300 [V]
DC-Collector Current	1200 [A]

2. 본 론

2.1 전동차 구동 시스템의 전체 개요

주 회로도도 그림 1에 제시되어 있다. 직류 전압원은 가선을 통해 인버터에 1500[Vdc]의 직류를 공급한다. 입력부의 고속직류차단기(High Speed Circuit Braker)는 사고발생 시 전류를 짧은 시간 내에 차단시켜 구동 시스템 및 변전소를 보호하는 기능을 한다. 필터 리액터와 필터 콘덴서로 구성된 입력 필터는 인버터 단과 전압원의 고조파 간섭을 차단하고 사고 시의 전류의 돌입을 저감시키는 등의 기능을 한다. 전압원 인버터

표 2. 유도전동기 사양.

정격 용량 및 극수	210 [kW], 4 극
정격 선간 전압	1100 [Vrms]
정격 주파수	75 [Hz]

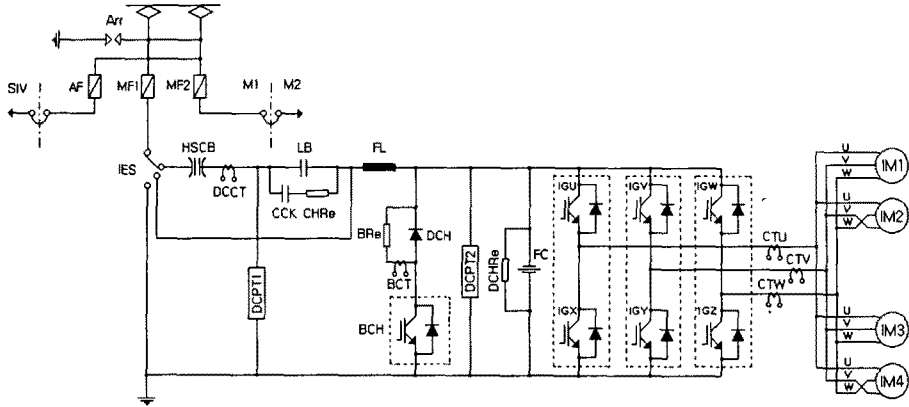


그림 1. 전동차 구동 시스템의 주회로도.



그림 2. 시험 차량에 장착된 구동 시스템.

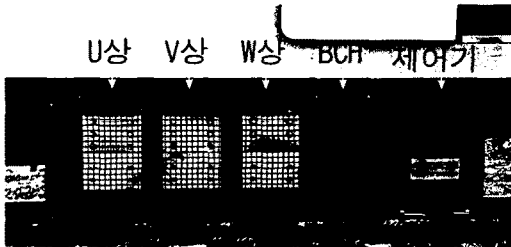


그림 3. 인버터 BOX.

되는 전동차 구동 시스템의 경우에는 DC 링크 단의 전압 이용율을 최대화하기 위하여 6-스텝 PWM 방법을 사용한다(5). 고속으로 가속된 후에는 6-스텝 PWM 방법을 사용하게 되는데 6-스텝 PWM 방법을 사용하면 출력 전압의 크기는 DC 링크 단의 전압에 의해서 결정되게 된다. 따라서 6-스텝 PWM 영역에서는 기존의 벡터제어의 적용이 불가능하다. 따라서 그림 4에서와 같이 저속의 선형 변조 구간에서는 벡터 제어를 적용하고, 고속의 과변조 및 6-스텝 영역에서는 슬립 주파수 제어를 적용하는 기법을 참고 문헌 [6],[7]에서 제안하였다. 벡터제어는 기동 및 가속 시에 우수한 기동특성 및 빠른 토오크 제어 특성을 나타내고, 슬립 주파수 제어는 고속의 과변조 및 6-스텝 영역에서는 만족할 만한 성능을 나타낸다.

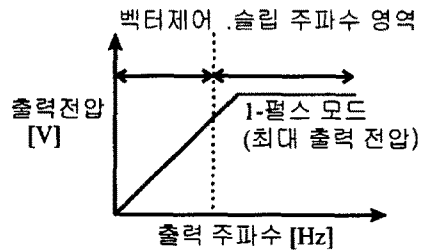


그림 4. 출력 주파수에 따른 출력 전압 및 제어 방식.

2.2 전동차 구동 시스템의 제어

최근 철도 차량의 효율을 높이기 위해 보다 높은 가속도와 속도를 요구하고 있다. 그리고 부수차(trailer car)에 대한 동력차(motor car)의 비율이 줄고 있는 경향이다. 따라서 전동차 구동시스템에 있어서 더 빠른 감가속 능력 및 향상된 점착 성능이 요구된다. 기존의 유도전동기를 이용한 전동차 구동 시스템에서는 일정 자속 제어(일정 V/F 제어)를 이용한 슬립 주파수 제어가 사용되고 있다. 그러나 슬립 주파수 제어는 구배에서 기동시 기동 특성이 좋지 않으며, 토오크 제어에 있어 빠른 응답 특성을 구현할 수 없으며 특히 주파수가 낮을수록 응답이 느리다. 이에 반해 벡터제어는 저속과 고속영역에 까지 순시적인 토오크제어를 수행할 수 있어 벡터제어로 스칼라 제어를 대체하면 기동 및 저속영역에서 좋은 동특성을 나타내므로, 감가속 성능 및 점착성능의 향상을 도모할 수 있다. 벡터제어는 출력 전압벡터의 위상과 크기를 조절해야 한다(4). 그러나 철도차량에 사용

일반적인 운전에서 차량은 가속과 감속을 반복하므로 제어방법의 전환을 계속 반복하게 된다. 두 제어 방법 사이에서의 매끄러운 전환을 위해서 각 제어 출력들을 같은 차원으로 변환되어 출력된다. 또한 모든 상태 변수들은 연속적인 제어출력을 위해서 전환 시에 연속적인 값으로 재설정된다.

2.3 실험 결과

그림 5는 제어 방식이 벡터 제어에서 슬립 주파수 제어로 전이할 때 인버터 직류 전압, 출력 전류 및 변조 지수를 측정 한 결과이다. 실험 결과에서 나타난 바와 같이 전이에 의한 변동이 없이 연속적인 제어를 보이고 있다. 그림 6은 시험 전차선에서 실제 차량을 이용하여 시속 72 (km/hour)까지 감속 및 가속을 실시한 실험 파형이다. 시험용 차량은 구동시스템을 장착한 동력차 2대와 부수차 2대로 편성된 4량 편성이며, 공차(空車) 중량은 130 (ton)이며, 실제 승객이 최대한 탑승한 만차(滿車)시의 상태와 동일하게 만들기 위하여 차량당 20

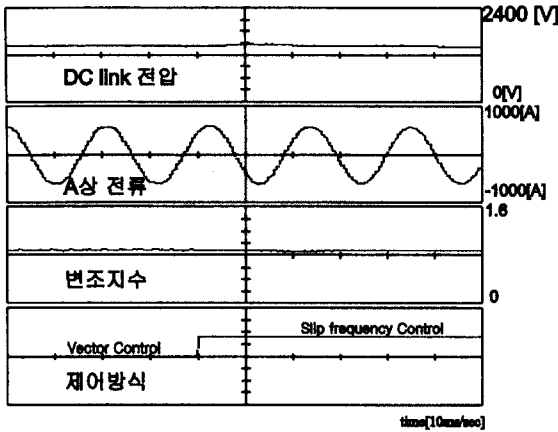


그림 5. 제어 방식 전환시의 전압, 전류, 변조지수

[ton]의 부하를 탑재하여 전체 만차중량 210 [ton]의 시험 조건을 만들었다.

그림 6에서 토오크 지령치와 실제 토오크 데이터를 통하여 가속 및 감속 구간에 걸쳐 토오크 제어가 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. 또한 제어 방식 데이터를 통해 가속 및 감속 구간에서 벡터 제어와 슬립주파수 제

어 방식의 전이가 연속적으로 이루어지며, 이 때 전이로 인한 상태의 급변이 없음을 보이고 있다. 실험 파형에서 BC는 제동 공기압력으로서 출발 전 및 제동 시에 작동함을 보이고 있으며 제동 시에 구동 시스템에 의해 전기적 회생 제동 능력이 있는 동력차와 전기적 제동이 불가능한 부수차 사이에 명확한 차이를 보이고 있다. 특히 정지 직전에 구동 시스템과 공기 제동 장치 간의 적절한 전이(blending)가 이루어짐을 보여주고 있다. 실험 파형에서는 출력 토오크가 정토크 구간과 출력 전력이 일정한 정출력 영역이 주로 보이고 있으며 정토크 구간에서 속도 데이터의 기울기를 보면 만차 상태에서 가속 구간에서의 가속도 설계 목표치 3.0 [km/h/sec] 및 감속 구간에서의 감속도 설계 목표치 3.5 [km/h/sec]가 만족되고 있음을 알 수 있다. 감가속도 데이터의 경우 차량의 실내 바닥에 설치한 가속도 센서를 이용하여 측정된 것인데 고속에서의 주행 진동에 의해 많이 왜곡됨을 볼 수 있다. 이는 시험 선로에 다소의 침하가 발생하여 고속 주행 시 차량 진동이 정상 선로에 비해 심하게 발생하였기 때문이다. 전체적인 실험 결과로 볼 때 전류 및 토오크 등이 지령치를 정확히 추종하고 전 구간에 걸쳐 안정적인 제어가 이루어짐을 보이고 있다.

3. 결 론

저속의 선형 변조 구간에서는 벡터 제어를 적용하고, 고속의 파변조 및 6-스텝 영역에서는 슬립 주파수 제어

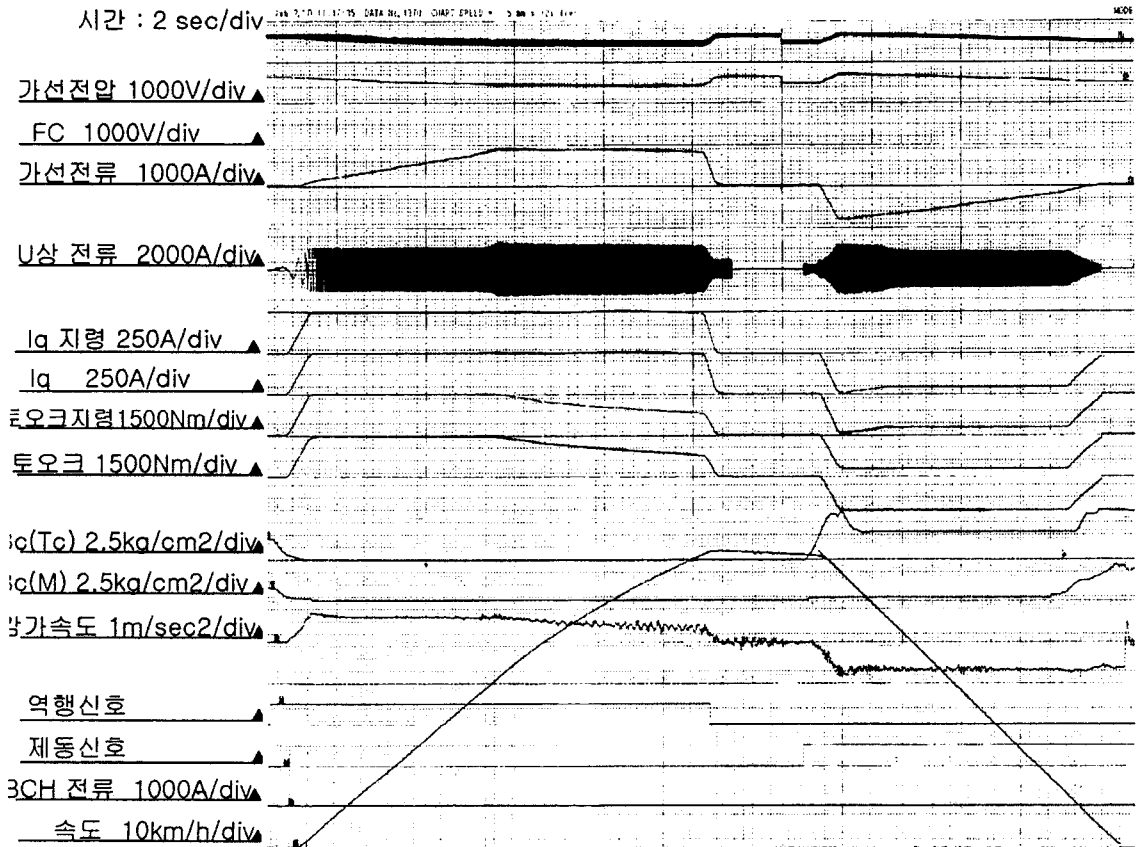


그림 6. 만차(滿車) 감속 및 가속 시험

를 적용하는 기법을 이용하여 4개의 210 kW 유도전동기를 병렬 구동하는 전동차 구동 시스템을 개발하였다. 주 전력 소자로 IGBT를 사용하여 스너버 회로가 없는 간단하고 신뢰성 있는 시스템을 구현하였다. 개발된 구동 시스템은 시험을 위해 제작된 4량 1편성의 차량에 탑재되어 시험 전차선에서 차량 당 20 [ton]의 부하를 포함한 만차 상태로 시험한 결과, 성능 및 신뢰성에서 목표 사양을 만족함을 확인하였다. 또한 벡터제어 기법을 적용함으로써 정밀한 토크 제어가 구현되고, 특히 기동 및 감가속 구간에서 전류 및 토크가 정확하게 제어됨을 확인하였다. 또한 본 시스템의 주회로, 제어장치 및 제어 알고리즘 등이 순수 국내 기술로 개발 제작함으로써, 인버터 방식 전동차 구동 시스템의 순수 자체 개발을 달성하였다.

추후 개발된 시스템은 영업선 시험 주행을 통해 신뢰성을 더욱 향상시키는 작업을 추진하고자 한다.

감사의 글

생산기술연구소 백남욱, 한국철도차량(주) 중앙연구소 한성수 및 기타 시험관련 부서 등 개발 및 시험에 도움을 주신 모든 분들에게 감사드립니다.

(참고 문헌)

- [1] Kouji Yasuda, Kiyoshi Nakada, Yoshio Tsutsui, Kiyoshi Kakamura, "PWM Control Method of a High Frequency Two-level Inverter for Trains", in proc. IPEC-Yokohama, pp1066-1070, 1995
- [2] Takamasa Kanzaki, Ikuo Yasuoka, Gorge Yamamoto, "Direct Digital Controlled PWM GTO Inverter for DC1500V Electric Cars", in proc. IPEC-Tokyo, pp1587-1598, 1983
- [3] Ikuo Yasuoka, Takuma Henmi, Yooske Nakazawa, Ikuya Aoyama, "Improvement of Re-adhesion for Commuter Trains with Vector Control Traction Inverter", in Proc. Power Conversion Conference, pp.51-55, 1997
- [4] D. W. Novotny and T. A. Lipo, "Vector control and Dynamics of AC Drives", New York: Oxford University Press., ch. 7, 1996.
- [5] YOOSKE NAKAZAWA, SHIN-ICHI TODA, IKUO YASUOKA AND Dr. HARUO NAITO, "One-Pulse PWM Mode Vector Control for Traction Drives", Power Electronics in transportation, 1996, IEEE, pp135~141
- [6] Bon-Ho Bae, Seung-Ki Sul, Sang-Hoon Kim, Il-Ho Lee, Sung-Soo Han, "Application of Vector Control to Railway Vehicle", in poced. IPEC-Tokyo, 2000, pp1385~1389
- [7] 배본호, 설승기, 김상훈, 이일호, 한성수, "벡터제어를 이용한 전동차 구동 시스템", 한국철도학회 추계학술대회 논문집, 1999, pp288~295