

전동차용 고성능 AC구동시스템의 개발

정기찬, 방이석, 김두식, 서광덕*, 김남해

현대중공업(주) 철도차량제어연구실

A High Performance AC Propulsion System for Electric Car

K.C.Jung, L.S.Bang, D.S.Kim, K.D.Seo, N.H.Kim

Hyundai Heavy Industrial Co., Ltd.

Electrical Railway Cont. Development Dep't.

Abstract

This paper presents a high performance AC propulsion system for electric car to improve traction capability. The presented VVVF inverter was composed of an GTO thyristor and the controller was fully digitalized by using 32bit DSP. The improved PWM algorithms and the new adhesion control were adapted to improve traction characteristics. This system could be possible the higher reliability and flexibility. The field test results showed the higher performances characteristics of the presented system.

1. 서론

최근 산업발달과 생활범위의 확대로 운송시스템에 대한 수요는 급격히 증대되고 있다. 그러나 물류 이동에 필요한 여러가지 제반시설은 이를 충족시키지 못하고 있으며, 이로 인해 현재 국내의 물류 수송 효율은 최악의 상황에 처해 있다. 이로써 대용량의 수송능력을 갖으며 정확한 수송시간을 보장하는 철도차량 운송시스템에 대한 수요는 급증하게 되었다. 따라서 이에 대비코 저 많은 신규노선을 계획하고 증설중에 있다. 이와 아울러 신설되는 노선에 대해서는 시스템 운영효율의 극대화를 위해 노선별로 고속전철과 지하철, 경량전철, 경전철 그리고 자기부상 열차 시스템등 여러가지 방식으로 적용이 검토중에 있다. 이러한 전동차량의 수요증대는 궁극적으로 그와 관련 기술의 증대를 필요로 한다. 그러나 현재 국내에서는 그러한 수요에 대비한 실질적인 기술력의 확보가 부족한 상태에 있고 따라서 수요의 대부분은 국외 기술에 의존하고 있다. 이로 인해 현재 국내 전동차량 시스템은 노선 별로 제각각 다른 시스템으로 구성되어 있고, 그에 따라 일괄된 운영기술 및 유지보수 방법이 없어 현재 많은 어려움이 있다. 따라서 최근 주요기관과 산업체가 중심이 되어 국내 전동차량의 표준화 및 기술 자립을 위한 방법 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 아직 초기 기술자료 분석단계에 있으며, 여러가지 어려운 배경으로 인해 그러한 연구는 다소의 시간이 필요할 것 같다. 따라서 본 연구는 이러한 국내의 기하급수적인 전동차량의 수요에 대비하고 기술의 자립을 위해 그간 연구해 온 교류 견인전동기를 구동하는 시스템인 VVVF 인버터를 소개하고자 한다. 개발되어진 교류방식의 전동차량 추진시스템은 완전 국내 기술로 설계 제작되고 성능 입증 또한 국내 기술로써 현차시험을 성공으로 수행함으로써, 그간 의문적으로 드러난 기술적인 문제 해결 뿐만 아니라 외국에서 전수를 끼리던 실질적인 운영기술인 내면적인 기술력을 확보할 수 있게 되었다. 따라서 우리 실정에 맞는 전동차량 시스템의 추진 시스템의 구축과 유지보수성 그리고 앞으로의 성능변경 용이 및 확장 편리성을 가질 수 있게 되었다고 본다.

2. 시스템의 구성

본 논문에서 소개될 추진용 인버터는 표 1과 같은 사양으로 개발되었다. 추진 시스템의 경량화 및 간략화를 목적으로 견인 전동기 4대를 일괄제어하는 방식을 채택하고 있다. 따라서 사용된 전력용 반도체 소자는 4500V / 3000A 용량을 가지는 GTO Thyristor이며, 유지보수의 편의성을 위해 반도체 스택은 Heat - Pipe를 이용한 자연 냉각 방식을 적용하였으며 이를 상별로 구성하였다. 뿐만 아니라 견인전동기의 분리제어시의 견인력 제어특성을 가지기 위해 최신 견인력 제어기법을 운용하기 위해 고성능 Digital Signal Processor인 32bit의 TMS320C31를 주 제어용 프로세서로 적용하였다[1]. 그리고 이러한 프로세서는 멀티로운용되어 서로 감시운영 및 업무분담을 하며, 완전 디지털화된 간략한 제어기 구성과 더불어 시스템의 고장을 줄여 고 신뢰성의 시스템이 되도록 하였다. 또한 시스템에 대한 사람들의 접근을 용이하게 하기 위해 PC 와의 간단한 RS232통신을 통해 정보를 알 수 있게 한 편리한 맨-머신 인터페이스 기능을 가지게 함으로써, 정차시 뿐만아니라 운행중에도 시스템의

표 1. 시스템 사양

분류	내용
견인시스템 구성	IC4M 일괄제어
스	전압형 GTO 인버터
용량	1.35MVA
입력전압	DC 900V ~ 1950 V
냉각시스템	자연냉각 Heat-Pipe 방식 상별구성
제어기	32Bit DSP TMS320C31
제어방식	순시 견인력 제어
점착제어	추정점착력이용 2차지수제어
편리한 MMI	RS232를 이용한 상태감시

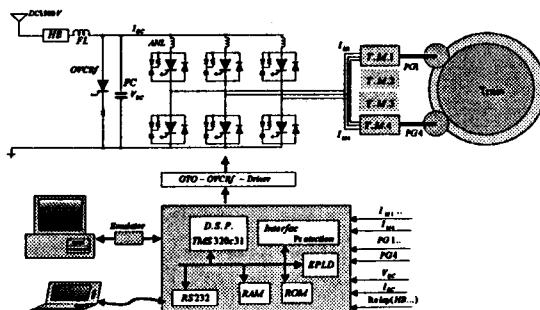


그림 1. 추진제어 시스템 구성도

모든 상황을 감시하고 진단할 수 있도록 하여 시스템의 유지보수성을 한층 증대 시켰다.

3. 제어 알고리즘

일괄제어를 사용하지만 분리제어시의 제어 특성을 얻기 위해 베티제어 기법을 적용한다. 이때 필요한 기준속도는 비공전 속도를 사용한다. 마찰력의 변화에 대해 안정된 최대의 점착력 제어가 가능하도록 하기 위한 새로운 점착 제어기법이 적용되었으며, 이는 운전석에서 요구된 견인력 요구치를 마찰력의 변화에 따라 제한하여 제어하게 한다. 속도변화에 따라 출력전압을 제어하는 PWM발생부는 사용된 견인전동기가 시스템의 최대 전압인 $\frac{\sqrt{6}}{\pi} V_{DC}$ 로 설계됨으로써 6스텝까지 출력을 발생하기 위해

비동기 방식은 물론 동기 PWM방식이 사용된다. 상세한 내용은 아래에서 보인다.

3.1 PWM 알고리즘

셀 구조로 이루어진 GTO 싸이리스터는 과도한 di/dt 에 의한 파손을 방지하기 그의 사용 스위칭 주파수는 최소 오프 시간의 확보와 더불어 수 백 Hz로 제한된다[2]. 따라서 낮은 스위칭 주파수로써 6스텝의 최대 출력전압을 발생하기 위해서는 비동기 변조방법 뿐만 아니라 동기 변조방식이 절대적으로 필요하게 된다. 그리고 동기방식에서는 1펄스 모드까지의 자연스런 전압제어를 위해 중간에 5펄스 변조 및 3펄스 변조를 사용한다. 그런데 이경우 각 모드별로 요구된 전압 크기와 변조기본파의 크기는 비례되지 않기 때문에 모드별로 새로운 크기 조절이 필요했다. 그러나 본 논문에서는 각 모드별 출력전압 요구치에 대한 변조시의 노치 각도를 함수로 구함으로써 출력제어의 연속성 및 선형화를 가지게 하였다. 그리고 광역 3펄스 변조를 적용하여 일반적인 3펄스에서 1펄스로 변환할 경우 최소오프시간의 확보로 발생되는 7~10% 정도의 전압 불연속을 방지하여 안정된 견인력 제어가 가능하도록 하였다. 그리고 입력전압의 변화에 대해 안정된 동기 PWM제어를 위해 Beat-less제어방식이 적용되었다[3]. 식 1은 퓨리에 급수전개를 통해 구해진 각 모드별 제어함수를 보인다.

$$\begin{aligned}\theta_{SP} &= -46.96 \frac{V_m^*}{V_{DC}} + 29.91 \\ \theta_{3P} &= -90.334 \frac{V_m^*}{V_{DC}} + 57.534 \\ \theta_{W3P} &= \sqrt{-5270 \frac{V_m^*}{V_{DC}} + 3356.463}\end{aligned}\quad (1)$$

여기서 θ_{SP} 는 5펄스 모드시의 노치 각도, θ_{3P} 는 3펄스 모드시의 노치 각도, θ_{W3P} 는 광역3펄스시의 노치각도를 나타내며, V_m^* 은 출력 상전압의 최대값, V_{DC} 는 인버터 입력전압이다.

이식은 입력전압과 제어에 따른 전압 요구치의 함수로 나타나므로써 가선전압의 변화와 견인력제어시 어떤 별도의 제어함수가 없어도 출력을 제어할 수 있으며, 식 2에 보이는 경계조건에 의해 각 모드는 별도의 모드결체를 위한 기능제공없이 자연스럽게 결체 제어된다. 경계조건은 최소 오프시간에 의해 제어됨을 보인다. 이는 출력전류의 고조파를 최소로 함으로써 견인 전동기와 견인력 전달 시스템의 손실을 최대한 줄이기 위한 것이다. 이러한 목적으로 비동기 변조시의 PWM방식도 최근 많이 적용되고 있는 공간전압 변조방식을 적용한다. 이는 대칭변조 방식이기 때문에 일반적으로 철도차량 시스템의 비동기 부분에서 많이 적용되고 산각파 변조방식에 비해 출력전류의 고조파 함유율이 적으며 소음이 적고, 뿐만 아니라 출력전압 제어범위도 15% 정도 더 높으며 또한 출력전압의 제어시 제어지연이 적다. 따라서 승차감에 직접적인 영향을 주게되는 저속시의 기동특성 및

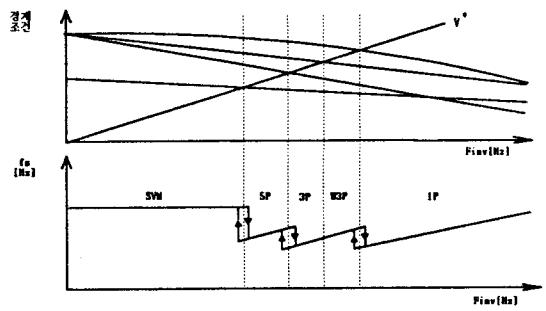


그림 2. PWM 발생 방법 및 경계조건

가속특성 그리고 점착제어성을 한층 증대 시킬 수 있다. 그림2는 이러한 조건에 의해 제어되어진 변조모드를 보인다. 이 때 가선전압은 정격인 1500V로 한다. 물론 가선전압이 높으면 이러한 형태는 앞으로 당겨지며, 낮으면 뒤로 늘어나게 된다.

제어가능한 최대전압 :

$$\begin{aligned}5P : V_m^* &= \frac{T_{off-min} * 360 * F_{inv} - 29.91}{-46.96} \\ 3P : V_m^* &= \frac{T_{off-min} * 360 * F_{inv} - 57.534}{-90.334} \\ W3P : V_m^* &= \frac{(T_{off-min} * 360 * F_{inv})^2 - 3356.463}{-5270}\end{aligned}\quad (2)$$

제어가능한 최소전압 :

$$W3P : V_m^* = \frac{[(\frac{1}{12 * F_{inv}} - T_{off-min}) * 360 * F_{inv}]^2 - 3356.463}{-5270}\quad (3)$$

여기서 $T_{off-min}$ 은 최소 오프 시간으로 180μsec로 하며, F_{inv} 는 인버터 출력 주파수이다.

3.2 점착제어 기법

일반적으로 점착력은 차량속도에 반비례하는 특성을 가진다. 이러한 점착력은 견인력의 최대 전달가능한 제한치가 되며, 최근 차량의 경량화와 견인시스템의 용량 증대로 제한영역에의 견인력 발생 빈도가 증대되고 있다. 점착력 감소로 인해 발생되는 공전과 활주는 차량의 수명저하는 물론 소음과 견인력의 흔들림으로 인한 승차감을 저하 시키게 되므로 반드시 별도의 제어가 필요하게 된다. 그러나 이러한 점착 제어로 인해 견인력의 손실이 과도하다면 견인효율을 저하시키게 되며, 뿐만 아니라 견인력의 리플은 차간 공진 및 가속도 변화를 유발하여 승차감을 저하 시키기 때문에 안정된 제어가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 2차 지수제어법을 적용하며 견인력 감소시의 견인력 손실을 최소화하기 위해 견인력 감소 크기를 추정된 점착력의 크기로 제어한다. 그리고 순수 점착력에는 오차성분이 다소 있기 때문에 안정된 제어를 위해 공전속도 및 공전가속도 성분을 점착제어력을 발생에 포함시킨다[4].

4. 실험결과

앞에서 제시한 각종 특성들은 정지상태의 부하시험은 물론 사전1에서 보이는 현차시험을 통해 충분히 검증하였다. 현차시험 적용차량은 1M1T로 구성하였다. 그림 3에서 그림6은 각 변조방식들이 정상상태는 물론 과도상태시의 전류 및 전압제어가 우수함을 보인다. 일반적으로 모드 변경시의 과도상태의 어려움으로 인해 1펄스로의 전환시 전압도약이 있음에도 불구하고 광역 3펄스 변조방식의 적용을 빼고 있다. 그러나 본 연구 결과에서는 아주 우수한 절체특성을 보임을 확인할 수 있다. 실험된 파형은 최고 가속 지령의 운전시이며 전동기 전류의 실효치는 450~500A로 운전될때이며 이는 옹하중에 따라 변한다. 입력전압은 1650V일 때이다.

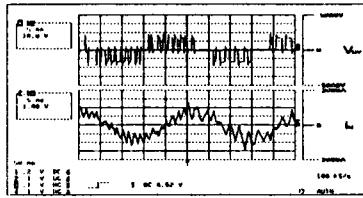


그림3. 비동기 변조와 동기 5필스변조와의 결체특성

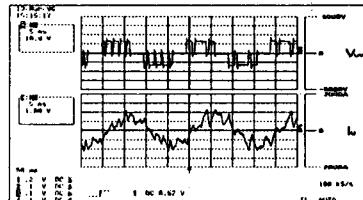


그림4 동기 5필스 변조와 동기 3필스 변조와의 결체특성

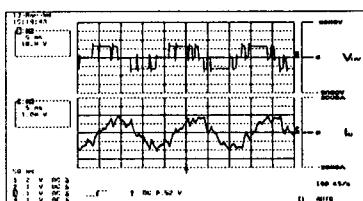


그림5 동기 3필스 변조와 광역 3필스 변조와의 결체특성

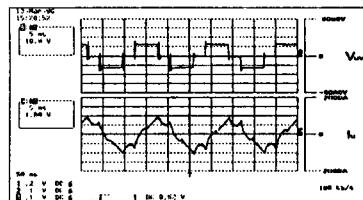


그림6 광역 3필스 변조와 1필스 변조와의 결체특성

그림 7은 현차시험을 통해 얻어진 주행시험 결과를 보이고 있다. 시험 결과로 부터 실제 현차시험에는 아주 많은 시스템 외란이 존재하고 있음을 알 수 있다. 물론 시험궤도가 열악하여 이러한 것들은 더욱 크게 나타났었다. 점착제어가 수행되는 것도 보이고 궤도의 이음매 구간인 불연속점도 보이고 있다. 이러한 수많은 외란에 대해서도 안정된 견인력제어가 수행되고 있음을 볼 수 있다. 뿐만 아니라 초기 기동시의 승차감 저하를 방지하기 위한 가속도 변화를 제어하는 우수한 소프트 기능도 볼 수 있다.

5. 결론

본문에서 철도차량의 견인력 제어를 위해 필요한 향상된 특성의 추진용 GTO 인버터를 소개하였다. 32bit DSP TMS320C31을 이용하여 제어기를 완전 디지털로 구성함으로써 신뢰성을 한층 증대시켰고, 향상된 PWM 및 점착력 제어기법등 우수한 견인력 제어기법을 적용하여 견인력 제어성을 향상 시켜 승차감 및 견인효율을 향상시켰다. 1C4M의 일괄 제어로 시스템을 구성함으로써 견인부의 경량화 및 시스템의 간략화를 이루었다. 특히 전력회로를 상별로 구성하였고, 간단한 통신 기법을 이용한 편리한 맨-마신 인터페이스 기능을 확보함으로써 시스템의 유지보수의 편리를 도모하였다. 이러한 모든 특성은 실제 운전되는 전동차량에 적용하여 실제 영업궤도보다 훨씬 열악한 시험

궤도에서 현차시험을 수행함으로써 그 성능을 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문에서 소개된 교류 견인전동기 구동 추진 시스템은 국내 전장품의 수요를 충족 시킬 수 있을 것이다. 모든 기술이 국내 기술로 이루어짐으로써 한층 우수한 유지보수력을 가지게 할뿐만 아니라 모든 유사한 전장품 개발에 응용되어 국내 전장품 기술을 전일보 시킬 것으로 생각한다.

참고문헌

- [1] Texas Instrument, TMS320C3X user's guide, 1990
- [2]. M.Ibamoto, A.Ueda, T.Hori, H.Narita, T.Tsuboi, "Control System of GTO Inverter for AC Drive Transit Car", in Proc. of TOKYO-IPEC, pp.1599~1606, 1983 .
- [3]. J.Zubek, A.Abbondanti, J.Nordby,"Pulsewidth.. Modulated Inverter Motor Drives with Improved Modulation", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.IA-11, pp.695~703, Nov./Dec. 1975
- [4]. K.D.Seo, S.K.Sul, "A High Performance Readhesive Control with Adhesive Effort Estimation," in Proc. of PCIM/Power Quality/Mass Transit Joint Conference, pp.380~390, Semtember, 1994

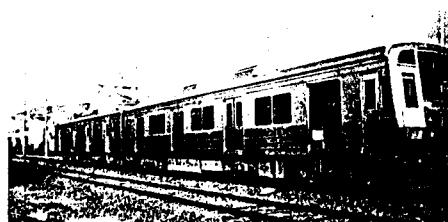


사진1 현차시험 적용차량(1M1T편성)

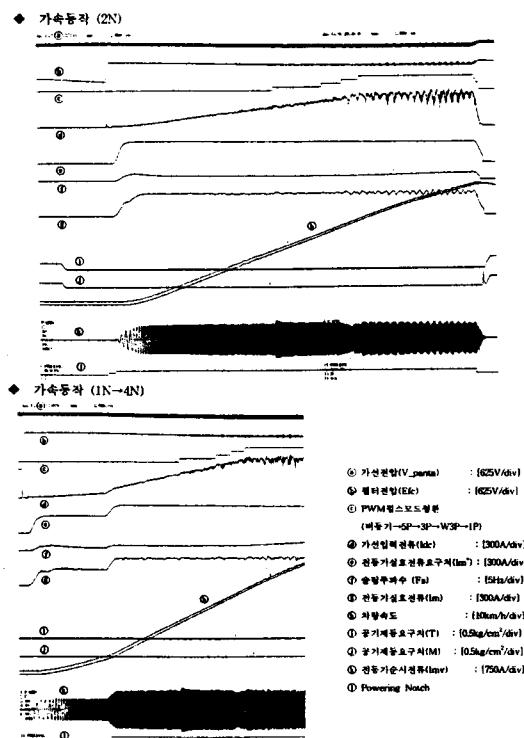


그림7 주행시험 결과