도시형 자기부상열차용 주요전장품 개발

이광주, 정만규, 방이석* , 김두식, 서광덕,
현대중공업(주) 전력전자연구실
김국진, 강병관
현대정공(주) 기술연구소

The Development of Main Power Conversion System for MAGLEV

Kwang-Joo Lee, Man-Gyu Jung, Lee-Seok Bang* , Du-Sik Kim, Kwang-Duk Seo
Hyundai Heavy Industries Co. Ltd. Power Electronics R&D Dept.
Kuk-Jin Kim, Byeong-Koan Kang
Hyundai Precision Industries Co. Ltd. R&D Center

Abstract

This paper describes the electrical design, characteristic and test results of both VVVF Inverter system and a auxiliary power supply system for UTM-01. As the propulsion system for SLIMs, GTO type VVVF inverter is used. IGBT 3 level inverter is adopt in Auxiliary Power Supply system. The control of two systems is fully digitalized by DSP TMS320C31. So a performance of two systems is more improved.

그림 1. 도시형 자기부상열차

Ⅰ. 서론

20세기에 들어 날로 심각해져가고 있는 도시교통의 여건과 공해발생, 도시인구 집중현상으로 인하여 새로운 교통수단인 자기부상열차의 실용화가 절실해지고 있다. 자기부상열차는 비접촉에서 오는 우수한 주행특성과 저 소음, 저 공해성을 지닌 첨단교통수단으로 지난 20여년간 독일, 일본, 영국을 중심으로 많은 연구개발이 이루어져 왔다.

최근에는 미국이 국책연구개발을 재개하는 등 선진각국의 전략사업으로 등장하고 있으며 고속형인 독일의 Transrapid와 중저속형인 일본의 HSST는 기술적으로 완성단계에 있으며, 곧 실용화가 이루어질 전망이다. 본 자기부상열차 주요 전장품 개발은 국책연구과제인 "도시형 자기부상열차 개발사업"의 일환으로 진행되었으며 리니어(Linear)모터를 구동하는 VVVF 인버터장치와 차량을 레일에서 부상시키기 위해 필요한 전자석 구동용 DC-DC 컨버터장치 그리고 차내에 각종 제어전원을 공급하는 SIV장치로 크게 대별되며 이하 각 장치의 특징을 기술하고자 한다.

그림1 은 본 시스템을 적용하여 대전기계연구원에서 실험 운행중인 도시형 자기부상열차이다.

Ⅱ. 추진형 VVVF 인버터 시스템

1. 개요

선형유도전동기(Linear Induction Motor) 6대를 3S2P 접속하여, 일괄제어를 하며 대용량 GTO를 사용한 전압형인버터로 운전속도는 110㎞/h, 가속도는 3.0㎞/h/s 가 되도록 설계되었다. 제한된 GTO 스위칭주파수 이내에서 펄스모드를 변환함과 동시에 SVM PWM 방법의 구현으로 LIM 구동시 발생하는 소음을 대폭 줄였으며, 제어회로는 DSP(Digital Signal Processor)와 EPLD(Erasable Programmable Logic Device)소자를 사용 완전 디지털화 하여 자기진단기능 및 MMI(Man-Machine Interface) 기능을 대폭 강화했을 뿐만 아니라 유지보수성 및 신뢰성을 향상시켰다. 전력회로와 제어회로와의 연계는 별도의 릴레이 회로를 구성하여 전기적 절연을 시킴으로써 노이즈에 대한 내량을 높였다. 또한 Heat Pipe 강제냉각방식을 적용 Inverter장치를 소형, 경량화시켰다. 본 VVVF Inverter 시스템은 자기부상열차의 추진시스템으로 기계연구원(대전)에 설치되어 있는 1.1㎞ 시험선로에서 충분한 현차시험을 거쳤으며 6% 구배구간의 등판능력이 완벽하고 최소회전 반경 60m 곡선에서의 주행특성이 매우 우수함이 입증되어 차후 국내 자기부상열차의 상업화에 대비하고자 한다.

2. 시스템구성

도시형 자기부상열차의 추진시스템의 기본사양은 표1과 같다. 일반적으로 LIM의 가변속운전을 위한 전력변환장치로는 VVVF 인버터가 필수적이다. LIM은 추진력뿐만 아니라 수직력도 발생시켜 부상시스템의 외란으로 수직력이 작용하게 된다. 외란의 방향과 크기는 슬립주파수에 따라 변화하므로 외란을 최소화 할 목적으로 슬립주파수를 일정하게 제어 해주어야 하며 본 시스템에는 시험을 거쳐 추진력에는 설계치(10Hz)보다 10%의 손실이 있자만 부상시스템에 외란을 줄이고자 12Hz를 적용하였다. 초기 가속시에는 자속일정 운전을 하다가 한계전압에 도달하면 약계자 운전으로 절환되며 이때 전압은 최대값으로 유지된다. 본시스템의 주회로도는 그림2에 표시하였고 GTO Inverter Stack은 그림3에 표시하였다.

대용량 전력용 반도체 소자인 GTO는 Turn On/Off의 스위칭 특성을 향상 시켰으며, 최소 Turn On/Off시간을 보장하여 안정된 스위칭을 가지도록 한 Drive 회로와, 과도한 di/dt에 의한 소자파괴 및 노이즈 발생을 방지하기 위해 각 상에 Anode Reactor를 부과하였다.

표1. VVVF 인버터시스템 사양

항 목	내 용
입력전압	DC 1500V
출력전압	3상 0 ~1120V
출력전류	410A/상
출력주파수	0 ~ 80Hz
쵸핑주파수	최고 210Hz
반도체소자	2000A, 4500V GTO
필터콘덴서	4000μF
필터리액터	5mH
소자냉각방식	Heat Pipe 강제냉각방식
추진력/ LIM	3.3kN

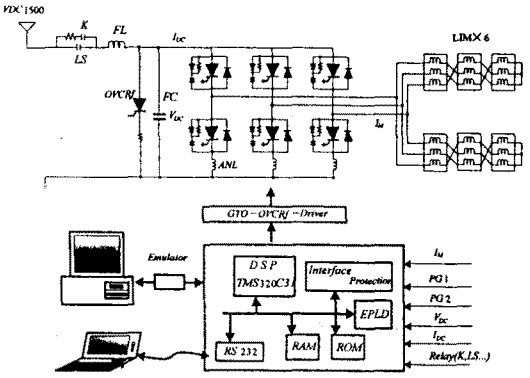


그림 2. VVVF 인버터의 구조

그림 3. GTO INVERTER STACK 사진

3. 제어알고리즘

전동기의 토크와 LIM의 추진력관계식에 의해 추진력 F를 표시하면 (1)식과 같이 된다.

$$F=(\frac{\pi}{\tau}*TE)/(P/2) \qquad (1)$$

이것을 정리하면 (2)식과 같이 된다.

$$F=(\pi/\tau)(\frac{Ws\cdot R_2\cdot M}{R_2+Ws^2L_2^2})(I_M) \qquad (2)$$

여기서, W_S : 슬립각속도

I_M : 1차전류

τ : 극피치

R_2 : LIM의 2차저항

M : LIM의 2차 인덕턴스

(2)식에서 볼 때 만약 슬립주파수가 일정하게 제어된다면 추진력 F는 1차전류의 제곱에 비례하는 것을 나타낸다. 그림4에서 보면 전압을 가변시켜줌으로써 추진력요구치에 해당하는 전류를 제어해주고 있으며 가선전압의 변동을 출력전압에 보상해주기 위해

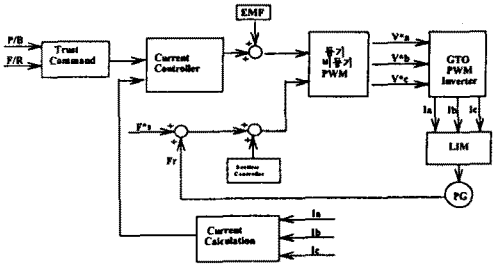


그림 4. 제어회로 알고리즘

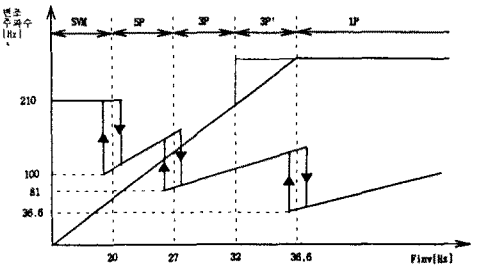


그림 5. 인버터주파수에 대한 스위칭모드

Beatless제어를 해주었다. 인버터주파수는 LIM속도를 주파수로 환산한 값 FR과 일정한 슬립주파수 FS를 더해서 나타내며 차량속도를 V(㎞)라 하면 LIM의 회전자주파수는 (3)식으로 표시된다.

$$F_r=\frac{V}{2\tau} \qquad (3)$$

GTO인버터는 스위칭주파수가 수백 Hz로 제한되므로 주파수의 증가에 따라 PWM방식은 저주파수의 비동기방식(SVM)에서 동기방식으로 절환되어야 하며 동기 PWM방식 또한 GTO의 스위칭능력을 충분히 활용하기 위해 비동기→5펄스→3펄스→광역3펄스→1펄스 등으로 자동절환되어 운전된다. 이에 따른 인버터주파수에 대한 스위칭모드를 그림5에 표시하였다.

3펄스에서 1펄스로 절환시 GTO의 최소 턴-오프시간으로 인한 7~10% 정도의 불연속이 발생하게 되므로 두 모드간의 절환시에는 광역3펄스방식을 적용하여 전압의 불연속 없이 전동기의 추진력제어가 이루어지도록 하였다 .

III. 보조전원장치 시스템

1. 개요

자기부상열차 시스템의 보조전원장치는 크게 나누어 DC-DC 컨버터, SIV1, SIV2로 구성되어 있다. DC-DC 컨버터장치는 입력전원 1500V를 받아 전자석을 구동하기 위한 부상시스템의 쵸퍼장치에 DC300V 전원을 공급함과 동시에 제어기의 제어전원 DC100V 및 계측장비등의 전원 AC110/220V를 공급해주는 전원장치를 말하며 이에 대한 주회로와 사양을 각각 그림6과 표2에 나타냈다. 그림7은 IGBT DC-DC Converter Stack 사진이다.

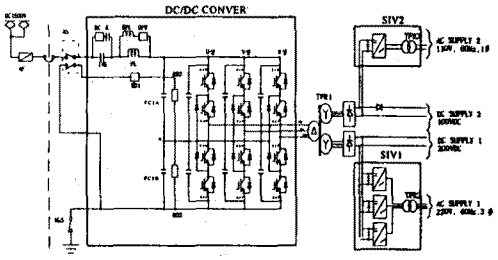


그림 6. 보조전원장치의 주회로도

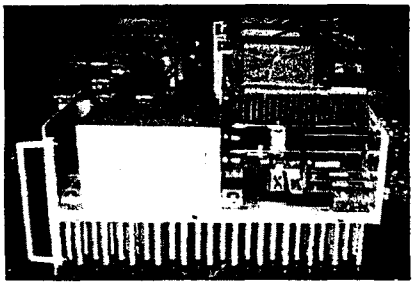


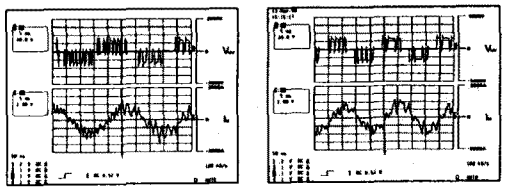
그림 7. IGBT DC/DC Conveter Stack 사진

표2. 보조전원장치의 사양

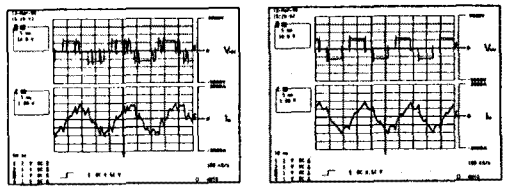
항 목		내 용
DC-DC 컨버터	시스템형태	직류-교류(400Hz,3Φ)-직류 전환방식
	인버터형태	3상 IGBT 3레벨 인버터
	용량	120kVA
	입력전압	DC1500V(900V~1900V 동작허용)
	출력전압	DC300V/200A, DC100V/50A
	출력리플	4% 이내
	효율	90% 이상
	제어방식	PWM 제어
	사용소자	1600V, 600A IGBT
	냉각방식	자연 냉각방식
SIV1	용량	40kVA
	입력전압	DC300V
	출력전압	3상 220V 60Hz
	출력왜율	5% 이내
	부하역율	85% 이상
	사용소자	600V, 300A
	냉각방식	자연 냉각방식
SIV2	용량	5 kVA
	입력전압	DC100V
	출력전압	단상 110V, 60Hz
	출력왜율	3% 이내
	부하역율	85% 이상
	사용소자	600V, 200A
	냉각방식	자연 냉각방식

기존 전기철도분야에서 보조전원장치시스템의 구성은 이중쵸퍼+트랜지스터인버터, 12상 PWM인버터, Booster + 6상 PWM 인버터, DC/DC컨버터를 주로 사용하여 왔다. 최근에는 반도체소자의 발달에 힘입어 3레벨을 이용한 인버터에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며 이러한 추세에 맞추어 3레벨 IGBT Type 보조전원장치를 개발, 자기부상열차에 탑재하여 충분한 현차시험기간을 통해 성능이 우수함을 입증하였다.

본 DC-DC 컨버터장치는 입력전압 DC900V ~ 1900V를 입력받아 출력전압을 일정하게 제어하며, IGBT를 이용 3레벨 PWM



a) 비동기(공간백터) ↔ 5P　　b) 5P ↔ 3P MODE



c) 3P ↔ 3'P MODE　　d) 3'P ↔ 1P MODE

그림 8. PWM 제어 및 모드절환 특성

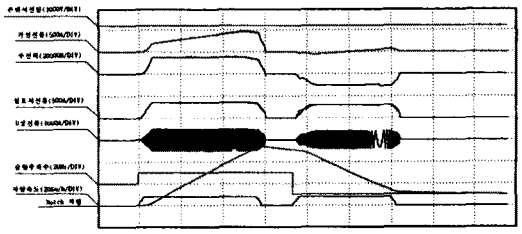


그림 9. 추진장치의 가감속 특성 시뮬레이션

인버터를 구성, 고조파성분이 작고 출력특성이 우수하도록 설계하였다. 본 시스템은 입력필터를 포함하여 직류를 교류로 변환하는 3레벨 PWM 인버터부, 절연용변압기부, 출력정류기부와 제어기로 구성되었다. 제어기구성은 33㎒의 클럭을 가지며 실수연산이 가능한 32bit Processor 인 TMS320C31 DSP(Digital Signal Processor)를 사용, 고속연산이 가능해져 복잡하고 다단시스템인 보조전원장치의 출력을 동시 병렬제어해주는 것이 가능하였다.

Ⅳ. 시스템시뮬레이션 및 시험결과

1. 추진형 VVVF 인버터시스템

역행 및 회생신호를 운전석에서 지령을 받아 요구하는 추진력을 내기위해 추진력에 비례한 전류제어를 행한다. 이때 역기전력을 속도정보로 부터 계산, 전압기준치에 보상하여 주었으며 직류링크단 Vdc전압도 가저와 변동분을 보상해 주었다. PWM 펄스 모드사이의 절체특성이 우수하여 모드절체시에 발생하는 과도현상이 줄어짐을 그림8에 나타냈으며 가감속 특성 시뮬레이션 결과와 현차시험 결과파형은 그림9, 그림10에 나타내었다.

2. 보조전원장치시스템

스위칭손실이 적은 IGBT모듈을 사용하므로써, 기존의 스너버회로가 필요없어 전력회로가 간단해졌고 2 레벨보다 출력파형에 포함된 고조파성분이 적어 출력특성을 향상시켰다. 또한 필터의 크기가 줄어 보다 경제적인 시스템구성이 가능해졌다.

그림11은 선간전압(U-V)과 상전류(U상)를 나타낸다.

MI(Modulation Index)가 낮아 선간전압 파형이 2 Level이지만 가선전압 DC1500[V]의 반인 750[V]로 스위칭됨을 보아 3 Level로 동작하는 것을 알 수 있다.

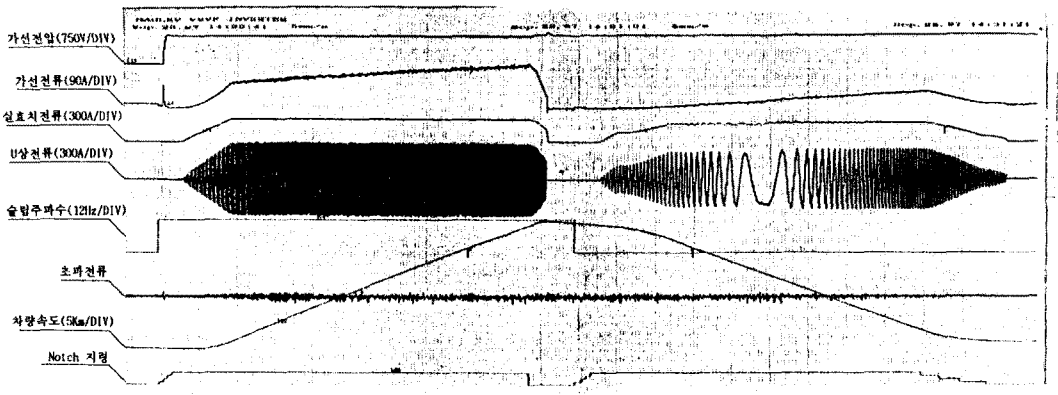


그림 10. 현차시험 결과파형

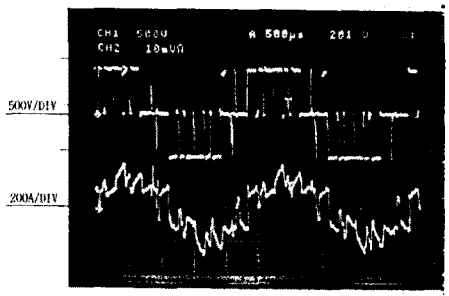


그림 11. 선간전압(상)과 상전류(하)

V. 결론

본 추진장치와 보조전원장치에서 사용한 제어기의 효용성과 우수성은 시스템 모델링으로 수행된 시뮬레이션과 현차시험 결과를 통해 입증하였다. 제어알고리즘의 구현을 위해 고속, 고성능의 기능을 갖는 CPU를 사용 순시제어가 가능하도록 하였으며 순시제어를 통해 과도상태시에도 안정적인 추진력제어와 보조전원장치의 일정한 전원공급이 가능하도록 하여 차량운행의 안정성 및 운송능력을 증대시켰다. 선형유도전동기의 특성해석 및 병렬운전 특성해석을 통해 강인한 추진력제어특성을 갖도록 제어기를 구성하였을 뿐만 아니라 Soft Start/ Soft Stop 기능을 첨가하여 승차감을 증대시켰다. GTO 인버터의 출력전압 발생방법으로는 비동기 및 동기 PWM방법을 이용 출력에 포함된 고조파성분을 줄였으며 전압이용율을 크게 높여 시스템효율을 향상시켰을 뿐만 아니라 합리적인 보조전원장치를 구성키 위해 3레벨 인버터를 적용 더욱 소형·경량화하여 경제성을 높이는데 주력하였다.

본 프로젝트는 기계연구원, 전기연구소, 현대정공(주), 현대중공업(주) 공동연구개발로 수행한 국책사업일환으로 2차년도 사업도 현재 진행중이다.

참고문헌

[1] 대택휘지 "HSST-100 TYPE 제어장치", 전기차의 과학. p21~26, 1991. 3

[2] Ichiro Miyashita and Youichi OHMORI. " Current Control for Thrust Force Controlling Inverter of HSST'. 13th International Conference on MAGLEV May 19-21. p364~369, 1993

[3] Ichiro Miyashita and Youichi OHMORI. " New Modulation Method for VVVF Inverter for HSST-05". 11th International Conference on MAGLEV July. p185~190, 1989

[4] Sakataro NONATA "Characteristic and Speed Control of Linear Induction Motor for Urban Transit" MAG-88, 1988

[5] B. Velaert's, P.Marthys, E.Tatakis, "A Novel Approach to The Generation and Optimization of Three Level PWM Wave Forms", PESC'88, Record