

자기부상열차용 추진용 인버터(300KVA)에 관한 연구

김석기*, 조성진*, 정진홍*, 김봉섭**

* 코오롱엔지니어링(주), ** 한국기계연구원

Development of the High Performance Inverter(300KVA) for UrbanTransit Magnetic levitation Vehicles

Suk-Ki Kim, Sung-Jin Cho, Jin-Heung Chung, Bong-Seop Kim

KOLON Engineering R&D Center, Korea Institute of Machinery & Materials

Abstract - The urban transit propelled by single sided linear induction motor(SLIM) have been in stage for practical application. Also, the use of the linear induction motor in traction systems enables large forces to be achieved without friction between wheels and rails. In this paper we discuss the linear induction motor (LIM) drive system (300KVA) for magnetic levitation vehicles.

게 제어하므로써 안정된 운행성능을 보장할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 변조된 슬립주파수 일정제어 알고리즘을 적용하였으며 대용량 인버터에서 주로 사용되었던 Power Transstor 나 GTO 소자 대신 IGBT 소자를 사용하여 소형화, 저소음화에 중점을 두어 자기부상열차용 추진용 인버터를 설계 및 제작하였다.

1. 서론

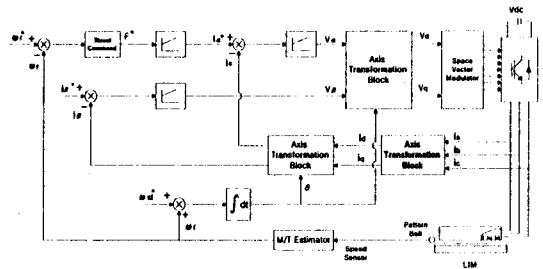
자기부상열차의 추진용 전기기기로 사용되는 선형유도전동기는 직류기에서 사용되는 2가지의 기계적인 부분을 전자적인 부분으로 대체하여 동력장치를 구성하게 된다. 교류기인 농형 유도전동기는 고속·고압화의 한계와 유지보수의 어려움을 갖는 직류전동기의 기계적 부분 즉, 브러시와 정류자 구조를 인버터에 의해 전자적인 정류기구조로 대체하였고, 선형유도전동기는 일반적인 유도전동기의 베어링에 의한 공극구조를 부상용 전자석과 직류초퍼(DC Chopper)로 대체하여 전자기구화하였다.

2. 추진용 인버터의 구성 및 설계

2.1 제어부

전체적인 제어 시스템의 구성은 [그림 1] 과 같다.

그러나 직류기에서 용이했던 가변속제어의 어려움과 공극구조의 변화 즉, 공극의 증대와 증방향 단부효과(Longitudinal End Effect)로 인해 회전형 전기기기에 비해 자화전류가 커지고 역률 및 효율이 크게 떨어지는 단점을 안게 되었다. 또한 선형유도전동기의 공극은 일반적인 회전기 공극의 5배이상인 10~20 [mm]를 요구하는데 이 경우 적정여자를 위해 1차측에 상당히 큰 여자전류가 흐르게 되어 열절연정격을 초과하거나 경우에 따라서는 2차측 철심(Reaction Plate)의 포화 즉 2차측 리액턴스의 포화를 초래하게 되어 결과적으로 높은 슬립이 발생된다. 또한 LIM의 1차측 임피던스를 통해 상대적으로 높은 전압강하가 일어나며 역기전력 또한 상당히 낮아지게 된다. 선형유도전동기의 구동특성은 농형유도전동기와 유사하지만 전자적인 추력(Electromagnetically Developed Thrust Force)이외에 운전점에 따라서 흡인력과 반발력으로 나타나는 수직력(Normal Force)이 작음하게 되며, 공극에서 발생하는 수직력은 다시 자기부상열차의 부상 시스템에 영향을 미치므로 이에 대한 고려가 필요하다. 즉, 정추력영역에서 슬립주파수를 일정하



[그림 1] 제어시스템의 구성도

선형유도전동기의 추력은 식(1)과 같이 나타낼수 있으며 슬립각주파수 ω_s 를 일정하게 유지할 경우 추력 F는 전류에 의해 제어됨을 알 수 있다.

$$F = \frac{\pi}{\tau} \cdot \frac{\omega_s R_2 M^2 I^2}{R_2^2 + \omega_s^2 \cdot L_2^2} \dots \dots \dots (1)$$

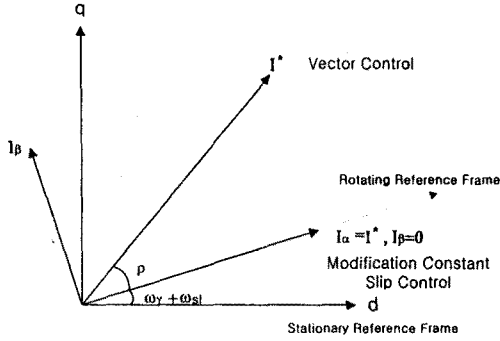
여기서 τ : 극간격 ω_s : 슬립각주파수
 R_2 : 2차측저항 I : 실효치 전류
 M : 상호 인덕턴스 L_2 : 2차측 인덕턴스

전류제어기는 전류의 순시제어를 위하여 동기좌표계의 α, β 축 성분으로 분리하여 독립적으로 제어하였으며 전류 지령치 i_{α}, i_{β} 는 식(2),(3) 과 같이 주어진다.

$$i_a^* = \sqrt{\frac{\tau}{\pi} \cdot \frac{R_2^2 + \omega_s^2 \cdot L_2^2}{\omega_s R_2 M^2}} \cdot F \dots\dots\dots(2)$$

$$i_b^* = 0 \dots\dots\dots(3)$$

[그림 2]에 전류벡터의 위상관계를 간략히 도시하였다.



[그림 2] 전류벡터도

그림에서 보는바와 같이 벡터제어의 개념에서 출발된 변조된 슬립주파수 일정제어의 전류제어 개념을 도시하였으며 기존의 슬립주파수 일정제어에서 평균치의 전류를 제어하는 반면 본 연구에서는 실효치의 전류와 위상까지 제어함으로 순시적인 제어가 가능하다.

전류제어기는 각각의 독립된 PI 제어기에 의해 제어, 전압명령으로 변조되어지며 사용된 PI 제어기의 방정식은 다음과 같다.

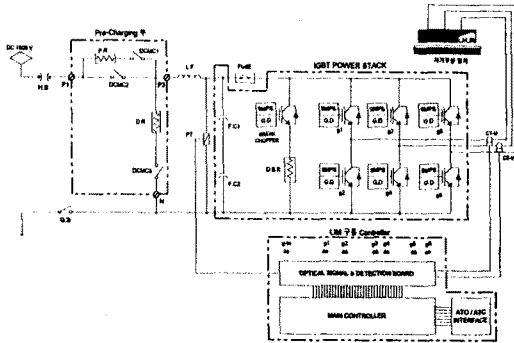
$$V_a = P_{gain} \cdot [i_a^* - i_a] + I_{gain} \int [i_a^* - i_a] dt \dots\dots\dots(4)$$

$$V_b = P_{gain} \cdot [i_b^* - i_b] + I_{gain} \int [i_b^* - i_b] dt \dots\dots\dots(5)$$

속도제어를 위한 PI제어기의 방정식은 다음식(6)과 같다.

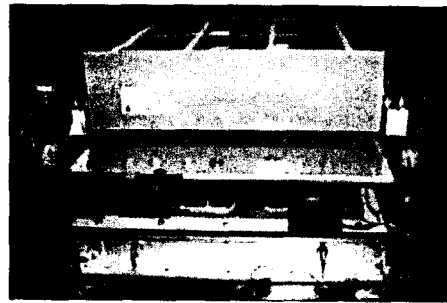
$$F = P_{gain} \cdot [\omega_r^* - \omega_r] + I_{gain} \int [\omega_r^* - \omega_r] dt \dots\dots\dots(6)$$

2.2 전력부



[그림 3] 자기부상열차 추진용 인버터의 시스템 구성도

[그림 3]은 추진용 인버터의 주 회로도를 나타내고 있으며 그림에서 보는 바와같이 크게 집전부, DC 링크부 및 인버터부로 구성된다. 입력단에서 공급되는 DC 1500 [V]는 집전부를 거쳐 100Ω, 시정수 0.836 [sec]의 충전저항(P.R)을 통해 DC 링크 캐패시터에 공급된다. 캐패시터 전압이 정격전압의 80%(DC 1200 [V])에 도달하면 DCMC2으로 회로를 전환하여 시스템은 Ready 상태가 된다. IGBT 소자로 구성된 인버터는 전원의 리플성분을 제거하기 위해 필터 리액터(L.F)와 캐패시터가 사용되어 L-C 필터를 구성한다. 리액터는 자기회로의 통로가 공기이고 자기포화가 발생하지 않아 인덕턴스값의 변동이 거의 선형적인 공심형으로 설계하였고 이 때 L 값을 4.3[mH]로 설정하였다. 캐패시터는 2600 [μF]의 용량을 병렬로 연결하였으며 부유 리액턴스를 최소화 하기 위해 Multi-Layer Bus Bar에 직접 설치하였다.



[그림 4] 300 KVA 추진용 인버터 시스템

[그림 4]는 개발된 추진용 인버터로 300 [kVA]용량으로 2-Level로 구성되어 있으며 Multi Layer Bus Bar를 적용하여 스너버 회로가 필요치 않다. 대용량의 경우 기계적인 부피가 커지고 IGBT의 스위칭 속도를 제한하는 권선의 부유 인덕턴스로 인해서 높은 PWM 주파수를 쉽게 구현할 수 없다. 따라서 PWM 주파수를 늘리기 위해서 IGBT에 스너버회로가 부착되어 최대 Collector 전압을 줄이고 dv/dt와 di/dt 기동기를 적당한 값으로 유지시켜야 한다. 그러나 스너버 회로는 무부하 상태에서도 전력손실을 발생하며 기계적인 부피가 커지게 되는 등 단점으로 작용하므로 이러한 단점을 극복하기 위해 DGC(Dynamic Gate Controller)라는 개념을 채택한 Gate Driver를 채용하였다.

인버터 스위칭 소자는 3300V/800A 용량을 갖는 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)이며 회생제동시 회생에너지를 열로 소비하기 위해 지상에DBR(Dynamic Braker Resistor)를 설치하였다. 제어보드에서 인버터 Stack으로의 신호를 전자파 장애로부터 보호하기 위해 Optic Fiber를 적용하여 시스템의 신뢰성을 확보하였다. 또한 제작된 인버터는 대용량인 관계로 강제-공냉식으로는 소자의 발열량을 감당할 수 없으므로 5 [kW]의 Water Cooler를 채용하여 냉각수가 소자밀의 동관을 통해 흘러 소자를 직접 냉각함으로써 인버터 시스템의 동작환경을 최적으로 만들게 하였다.

표 1에 개발한 추진용 인버터 시스템의 전기적 사양을 나타내었다.

항 목	전 기 적 사 양	
장격사양	용 량	300 [KVA]
	입력전압	DC 1500 [V] ± 20%
	출력전압	3Φ, AC 1100 [Vmax]
	출력전류	160 [A], Max. 245[A]
회 로 방 식	2-Level, 3Φ full bridge inverter	
제 동 방 식	Chopper type dynamic braking	
주 스위칭소자	IGBT소자 3300 [V], 800 [A]	
Bus Bar 구조	Multi-Layer Bus Bar 구조	
냉 각 방 식	수냉식	

표1. 인버터 시스템의 전기적 사양

3. 시험기의 구성 및 실험

자기부상열차는 전자석의 힘으로 주행레일위를 약 11mm 부상 유지를 하며, 선형유도전동기(Linear Induction Motor)에 의해 추진을 하게 된다. 선형유도전동기는 공극이 커서 전동기 효율이 낮아지는 단점이 있는 반면에 일반 전동차에 비해 동력 변환 및 전달 장치가 없어 반 영구적인 시스템을 구성할 수 있다.

선형유도전동기는 추진용 인버터에 의해 속도 조절을 하게 되는데, 선형유도전동의 수직력 특성에 의해 기동시 부상계통에 상당한 무리를 주게 된다. 따라서, 슬립주파수(slip frequency)를 일정하게 유지시켜 정격 가속도까지 유지토록 운전하게 된다.

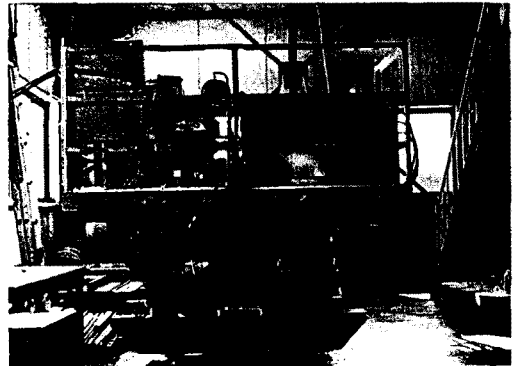
이와 같이 자기부상열차 추진용 선형유도전동기는 기존의 회전전동기와는 부하 조건 및 운전 조건이 상이하고, 효율적인 면에서 낮기 때문에 인버터 설계시 부하 조건을 충분히 고려하고, 모의 실험을 통해 개선해 나가야 한다.

일반적으로 선형유도전동기의 특성시험은 정특성 시험과 동특성 시험으로 구분한다. 정특성 시험은 선형유도전동기를 구속시킨 상태에서 추력과 수직력 특성을 측정한다. 측정 방법은 자기부상열차 운전조건인 슬립주파수 일정인 상태에서 일정 전류를 가하면서 추력과 수직력을 측정한다. 속도가 정지되어 있는 상태이므로 슬립(slip)에 인버터 출력 주파수를 곱한 값이 슬립주파수가 된다. 따라서, 시험 조건은 일정 전류하에서 슬립주파수 변화에 따른 추력 및 수직력을 계측한다. 동특성 시험은 선형유도전동기를 선로에서 주행할 때, 속도를 feedback하여 설정 슬립주파수를 유지하면서 LIM의 추력, 수직력, 전류, 전압, 공급주파수 등을 측정하고 inverter의 입력 및 출력 전압, 전류 등을 측정하게 된다. 본 논문에서는 선형유도전동기의 정특성에 대해 고찰하였다.

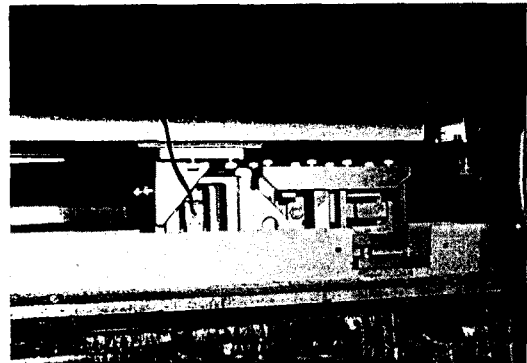
3.1 시험기의 구성

시험기는 Sled Test Jig라고 하며, 전체 중량은 인버터 무게(main inverter : 450kg, reactor box : 314kg)를 포함하여 약 4,140Kg이다. [그림 5]는 시험기의 정면 부분으로 오른쪽에 inverter가 상차되어있음을 알 수 있으며 시험기 일면에 추력 및 수직력을 측정하기 위한 force gauge가 [그림 6]과 같이 설치되어 있다.

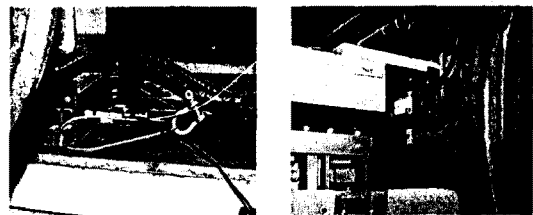
또한 시험기의 중량은 주행 시험시 계측된 추력 및 수직력과 중요한 비교가 될 수 있는 것으로 속도 신호에 의해 산출된 가속도와와 비교해서 실제 추력값과의 비교가 될 수 있다. [그림 7]은 시험에 사용된 추력 측정용 loadcell, 및 수직력 측정용 loadcell을 보여주고 있다.



[그림 5] SLIM 특성시험을 위한 정·동특성 시험기



[그림 6] SLIM의 추력 및 수직력 측정용 force gauge

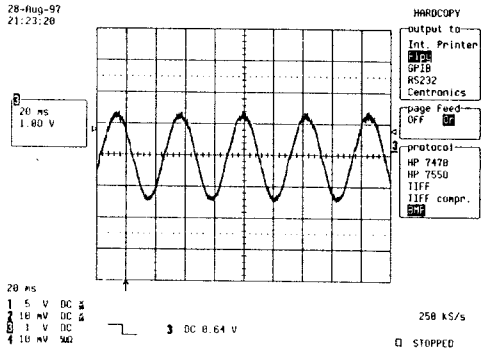


[그림 7] 추력 및 수직력 측정용 loadcell

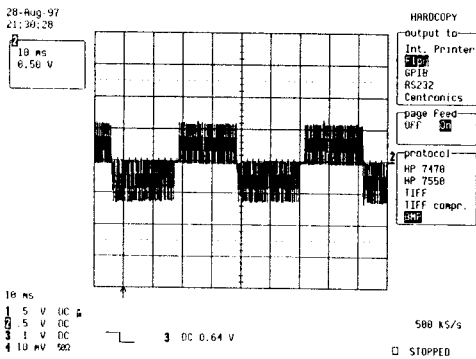
3.2 시험 결과

Sled Test Jig를 사용하여 정격 운전상태의 구속시험 결과는 [그림 8], [그림 9] 및 [그림 10]과 같다. [그림 8]과 [그림 9]는 슬립 주파수 20 [Hz]에서 출력전류와 선간전압을 나타내고 있으며 [그림 10]은 슬립 주파수에 따른 추력 특성곡선으로서 본 실험에서는 슬립주파수를 0~30 Hz까지

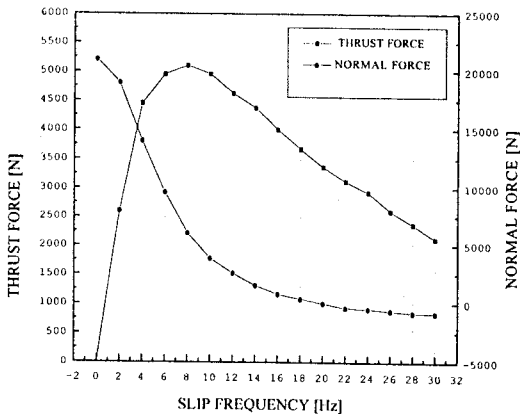
2Hz의 단계로 일정전류하에 추력과 수직력을 측정하였다. [그림 10]에서 알 수 있듯이 slip frequency에 따라 추력은 6.6KN에 미치지 못하였는데, 이는 SLIM 설계시 전체 권선 수의 부족으로 충분한 추력을 발휘하지 못하는 것으로 판단된다. 구속시험으로 알 수 있는 것은 슬립주파수 14Hz ~ 15Hz에서 수직력이 SLIM당 약 100Kgf 정도로 자기부상 열차의 부상계통에 크게 외란은 주지 않고 차체를 stable 하게 해주므로 적절함을 보여주고 있다.



[그림 8] 출력전류 (슬립 주파수 18 Hz, 100A /DIV)



[그림 9] 선간전압 (슬립 주파수 18 Hz, 500V/DIV)



[그림 10] SLIM의 추력 및 수직력 (Constant Current)

4. 결론

인버터의 용량은 SLIM의 산정 추력과 전체 차량의 중량 및 가속도에 의해 결정된다. 시험선로 사정에 의해 주행시험은 추후 진행할 계획에 있으며 충분한 가감속시험을 통해 속도 feedback과 constant slip frequency 운전에 대해 충분한 시험이 예정되어 있다.

본 논문에서 설계·제작된 시제품 인버터(300KVA)는 주행시험을 통하여 최종적으로 판단되겠지만, 구속시험 결과 설정된 Slip Frequency 변화에 따라 SLIM의 추력 및 수직력 성분이 자기부상열차용으로 적합함을 알 수 있으며 계속적인 연구개발을 통해 소형화 및 고성능화에 역점을 두고 진행할 예정이다.

본 연구는 공업기반기술개발사업의 일환으로 수행된 과제결과의 일부임(관리번호 : 951-29-2)

참고 문헌

- [1] H. Ruedi et al., "A new IGBT Gate Unit for High Current/High Voltage IGBT Modules", CT Concept Technology AG. & GvA GmbH.
- [2] J.F. Gieras, "Linear Induction Drives", Clarendon Press, Oxford, 1994
- [3] J. Miyashita, Y. Ohmori, "Current Control for Thrust Force Controlling Inverter of HSST", *Maglev '93*, pp.364~369, 1993
- [4] Z. Zhang, G.E. Dawson, T.R. Eastman, "Identification of Variable Parameters and Evaluation of Dynamic Performance of A Linear Induction Motor", *LDIA '95*, pp.303~306, 1995
- [5] T.A Lipo, "Analysis of Synchronous Machines", *Univ. of Wisconsin*, 1990
- [6] P. Vas, "Vector Control of AC Machines", Clarendon Press, Oxford, 1990
- [7] B.K. Bose, "Power Electronics and AC Drives", *Prentice-Hall Int'l*, 1991
- [8] J.S Kim, S.K Sul, "A Novel Voltage Modulation Technique of the Space Vector PWM", *IPEC-Yokohama*, pp.742~747, 1995
- [9] D.G. Luenberger, "An Introduction to Observers", *IEEE Trans. on Automatic Control Vol.16* no.6, pp.42~46, 1971
- [10] 杉本英彦 外 1人, "VVVF 電源で駆動される誘導電動機の非干渉制御法とその特性", *日本電気學會論文誌 B*, 104卷 11號, pp.781~788, 1984
- [11] 山村直紀 外 2人, "誘導機のバクトル制御における二次抵抗補正の一方法", *日本電気學會論文誌 D*, 111卷 7號, pp.540~544, 1991
- [14] システム制御情報學會(SICE), "PID制御", *朝倉書店*, 1992