

LSM 추진형 자기부상시스템 시험장치 설계

조정민*, 한영재*, 이창영*, 서승일*
한국철도기술연구원*

Design of the Test-Bed for the LSM-based Levitation System

Jeong-Min Jo*, Young-Jae Han*, Chang-Young Lee*, Seung-Il*
Korea Railroad Research Institute*

Abstract - LSM기반의 초고속자기부상열차는 고전압, 대전류의 추진 전력을 공급할 수 있도록 설계되어진 특수한 형태의 추진 인버터와 주행시 부상공극변동에 대해서도 강한 부상특성을 제공할 수 있도록 개발된 부상제어시스템이 필요하다. 본 논문은 550km/h급 초고속자기부상 시스템에 대한 설계기술의 확보를 위한 것으로, 실 규모시스템 구현에 앞서 축소모형으로 각각의 시스템 구성품을 개발하되 실규모 시스템에 적용하는 방식의 2스텝의 추진용 인버터시스템과 전류원 초퍼기반의 부상시스템 토폴로지를 구성하고 그 제어특성의 시험 및 평가를 위해 시뮬레이션을 수행하여 그 가용성을 확인하였다.

1. 서 론

독일의 트랜스라피드와 같이 전자기력으로 부상되어 이동하는 시스템의 추진력은 가이드웨이를 따라 길게 고정 배치되어있는 고정형 계자를 갖는 LSM에 의해 공급되어지고, 부상을 위한 자속을 발생시키는 이동자극은 차상에 설치되어져 있다[1-2].

자기부상시스템에서 LSM은 궤도를 따라 길게 설치되어있으나 추력을 발생시킬 수 있는 차상의 2차측 마그네트는 상대적으로 작은 일부분에 해당하므로, LSM의 효율을 매우 낮아지게 된다. 따라서 LSM의 운전효율을 개선시키기 위해서는 LSM의 2차측 계자가 설치되어져 있는 자기부상열차 차량의 길이와 최고속도를 고려하여 LSM섹션을 구성하며, LSM 섹션에 추진용 전원을 공급하는 인버터는 파권으로 구성된 LSM의 고 임피던스를 고려하여 고전압 대전류의 전력을 공급할 수 있도록 구성한다. 부상시스템의 경우는 가이드웨이의 경간 및 처짐 등을 고려하여 시스템의 요구사항이 결정된다.

본 논문에서는 LSM 추진시스템 기반의 550km/h급 초고속자기부상열차의 기술개발에 선행하여 시스템 설계기술에 대한 평가를 위한 축소모형 자기부상시스템 시험 장치를 개발하고자 한다. 따라서 초고속자기부상열차의 추진시스템은 지상 1차방식의 장계자형 LSM 추진시스템으로 구성하였고, 부상시스템은 상전도 마그네트 기반의 EMS를 구성하였다.

추진용 인버터는 다수의 대 전류용 인버터의 출력을 출력변압기를 통하여 직렬로 구성하고, 지령전압에 따라 고전압을 발생시킬 수 있도록 구성되었으며, 그 가용성을 파악하기 위해 2대의 단상 Full bridge 인버터로 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 위치검지시스템은 LSM 추진력발생시 부상마그네트의 자속과 추진력의 자속을 동기시키기위해 필요한 시스템으로 자기식 위치검지시스템에 대하여 고찰하였다.

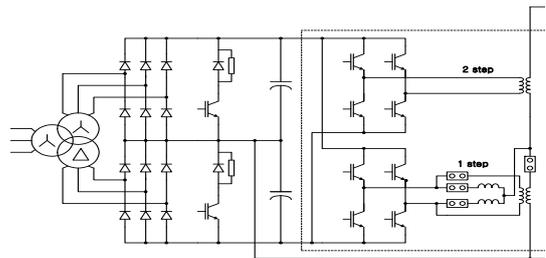
부상시스템의 경우 정격부상공극 변화로 인한 부상제어시스템의 비선형 특성을 보상하기위해 전류원인버터 기반의 전력변환시스템과 부상가속도 신호를 검출 받아 부상시스템의 안정도를 향상시킬 수 있도록 구성하였다. 이에 대한 성능평가를 위해 시뮬레이션을 수행하였다.

2. LSM 추진형 자기부상시스템 설계

2.1.1 추진용 인버터

초고속 자기부상열차의 추진을 위한 LSM용 인버터는 궤도를 따라 길게 설치되어 있는 LSM의 고정계자에 대전류를 공급해야 함으로, 고전압 대전류의 전력을 공급할 수 있도록 구성되어야 한다. 그러나 현재 사용되고 있는 전력변환용 스위칭디바이스 중 가장 널리 활용되고 있는 IGBT의 경우 최고 전압이 6kV급 정도이며 허용전류도 초고속 자기부상시스템의 요구사항과도 합치되지 않는다. 이러한 문제점을 해결하기위해 상대적으로 낮은 DC 링크 전압의 인버터를 다수 개를 설치하고, 출력 변압기를 통하여 직렬 연결하여 고전압을 발생시키는 방식이 활용되어져 왔다. 그림 1은 2단계로 구성된 인버터의 한 상에 대한 회로구성도를 나타내고 있다.

LSM은 동기모터로써 차량의 속도에 비례하여 인버터의 출력전압주파수가 변하게 됨으로 0~20Hz의 저주파 영역에서는 출력 변압기가 포화될 수 있다.

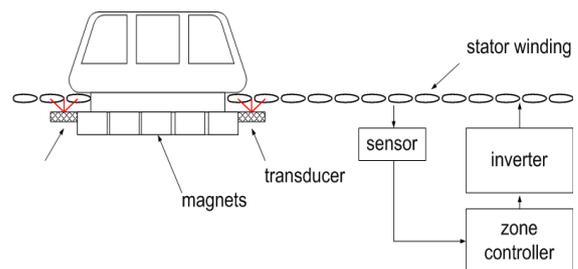


<그림 1> 2 Step 인버터의 한상에 대한 회로 구성도

따라서 1 step 인버터의 출력 단에 기계적 접점 스위치를 두어 0~20Hz의 저주파수 영역에서는 출력 변압기를 통하지 않고 직접 LSM에 전력을 공급하며, 20Hz 이상의 주파수에서는 기계적 접점 스위치를 조작하여 출력변압기에 의해 추진전력을 발생시키도록 하였다.

2.2 위치검지시스템

위치검지시스템은 크게 광학식과 자기식으로 구분된다. 광학식 위치검지시스템은 산업계에서 가장 널리 사용되고 있는 것으로써 쉽게 비접촉 위치검지가 가능하고, 고속에서도 사용이 가능하며 높은 분해능을 갖으나, 외부환경에 민감하다는 것이 단점이다. 자기식 위치검지시스템은 광학식에 비하여 외부환경의 오염으로부터 민감하지 않으며, 저비용으로 강한 특성을 얻을 수 있고, 소비전력이 낮은 것이 장점으로 자기부상 시스템에 적합한 방식이다.

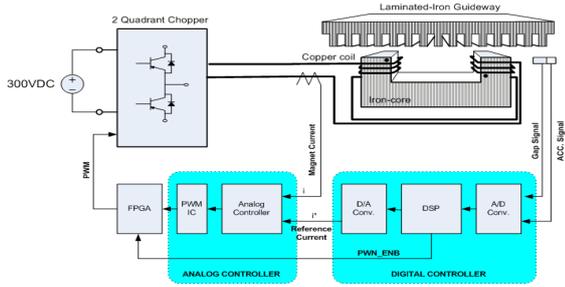


<그림 2> 축소모형시스템의 위치검지방식

본 논문에서는 차상에 설치된 위치검출용 변환기(Transducer)는 고정자측 각상의 권선에 신호를 유도하여 지상에 설치되어있는 센서를 통해 위치를 검출하고 연산에 의해 인버터를 구동하는 방식을 적용 하고자 한다.

2.3 자기부상 제어시스템

자기부상제어시스템은 페루프 극점에 대한 전자기적 상수의 영향으로 인하여 특정한 운전점에서 만족할 만큼 동작하도록 디자인된 전자기적 부상시스템이라도 만일 다른 운전점에서 부상된다면 적합한 수준의 안정도를 갖지 못할 수도 있다. 본 시스템은 부상공극변화로 인한 부상마그네트의 인덕턴스 변화, 그리고 이로 인한 마그네트 전류의 과도특성변화에 대하여 보다 강인하도록 부상마그네트의 제어방식은 전류제어방식을 적용하였다. 전류제어시스템은 전류지령에 대한 적응성 및 높은 대역폭의 전류제어특성을 얻기 위해 아날로그 회로로 구성하였다.

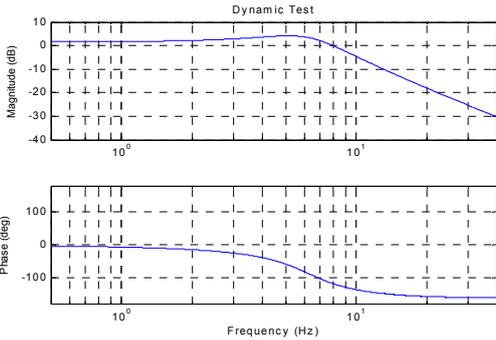


〈그림 3〉 부상제어시스템 제어 블럭도

부상제어시스템은 부상공극 및 부상공극의 가속도 변화에 대한 신호를 제어시스템의 입력으로 사용하여, 특정점을 기준으로 설정된 부상제어시스템의 이득을 운전공극 전 범위 내에서도 안정적으로 동작할 수 있도록 하였다. 부상제어방식은 부상마그네트에 설치되어 있는 공극 및 공극 가속도 센서의 신호를 5개의 상태공간변수로 변환하고, 변환된 값에 적절한 이득을 곱하여 출력지령 전류를 산출할 수 있도록 구성하였다.

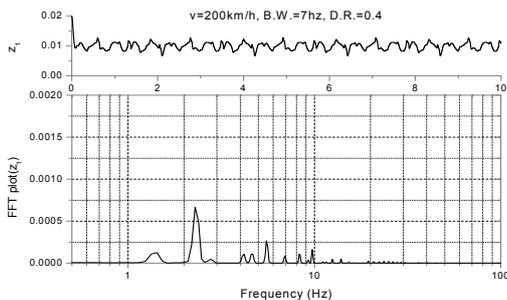
3. 시뮬레이션 및 고찰

자기부상시스템의 추진력은 부상마그네트의 부상력에 의한 자계와 LSM추진시스템의 전기자전류의 상호작용에 의해 추력이 발생한다. 그러나 추진력은 부상계에도 많은 영향을 미칠 수 있어 부상시스템은 궤도시스템에 의한 영향과 추진시스템에 의해 발생하는 외란에 대해서도 강한 특성을 얻을 수 있음과 동시에 부상마그네트의 대형화로 인한 중량증가를 고려하여 부상시스템의 요구성능 사양이 결정된다. 본 시스템의 부상성능기준은 독일 트랜스라피드 TR06의 성능기준에 준하도록 하였다.

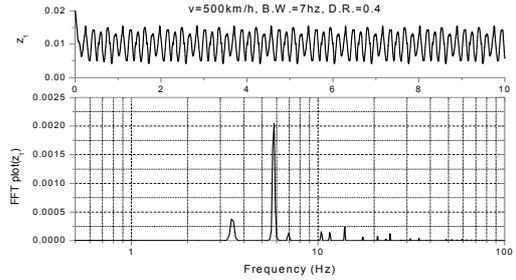


〈그림 4〉 부상제어시스템의 응답특성

그림 4는 부상시스템의 공극외란에 대한 응답특성으로 마그네트 서스펜션의 대역폭은 대략 7Hz, 댐핑비는 0.4가 되도록 나타남을 확인 할 수 있다. 부상시스템의 동특성에 대한 시뮬레이션 조건으로는 가이드웨이처짐 및 경간을 각각 24m, 1/4800을 고려하였고, 주행속도 200km/h 및 500km/h 주행 속도에 해당하는 가이드웨이 가진 주파수를 입력으로 하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 그림 5는 주행속도 200km/h를 고려하여 가이드웨이를 2.1hz로 가진한 경우로써 부상공극궤적 및 부상공극 궤적에 대한 FFT 분석결과를 나타낸 것으로, 주요 공극변동은 공극외란에 해당하는 2.1hz대역이 지배적으로 나타내고 있으며 그 이상의 고차고주파에 대해서는 감쇠되는 것을 확인 할 수 있다.

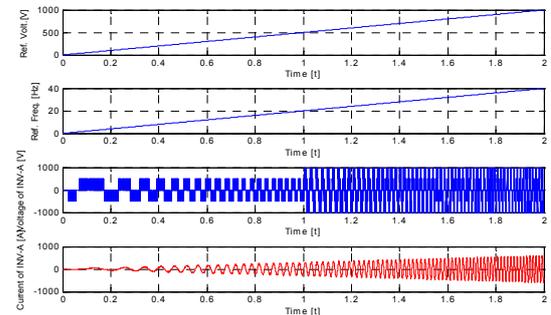


〈그림 5〉 2hz의 궤도가진에 대한 부상공극 변동 및 FFT 분석



〈그림 6〉 5hz의 궤도가진에 대한 부상공극 변동 및 FFT 분석

그림 6은 500km/h를 고려하여 가이드웨이를 5.5hz로 가진한 경우 부상공극궤적 및 부상공극 궤적에 대한 FFT 분석결과를 나타낸 것으로, 주요 공극변동은 공극외란에 해당하는 5.5hz대역이 지배적으로 나타내고 있다. 이것은 2hz 대역에 비하여 보다 큰 값인데 부상시스템의 공진점 부근으로 인한 특징이 나타난 것이다.



〈그림 7〉 인버터 지령에 대한 PWM출력 및 전류

그림 7은 500VDC급 단상인버터가 2단으로 구성된 추진용 인버터에 있어서 선형적으로 증가하는 지령전압 및 주파수에 대하여 인버터의 출력전압 및 주파수가 선형적으로 발생됨을 확인하기 위한 것으로, 지령주파수 20hz를 기준으로 인버터의 출력 PWM전압이 2레벨에서 3레벨로 변화되어 출력됨을 확인 할 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 LSM 추진시스템 기반의 550km/h급 초고속자기부상열차의 기술개발에 선행하여 시스템 설계기술에 대한 평가를 위해 축소모형 자기부상시스템 시험 장치를 개발한 것으로 추진용 인버터는 다수의 대전류용 인버터를 출력변압기를 통하여 직렬로 구성하여 고전압을 발생시킬 수 있는 메커니즘을 제시하였다. 부상시스템의 경우 정격부상공극 변화로 인한 부상제어시스템의 비선형 특성을 보상하기위해 전류원인버터 기반의 전력변환시스템과 부상 가속도 신호를 검출 받아 부상시스템의 안정도를 향상시킬 수 있도록 구성하였다. 이에 대한 성능평가를 위해 시뮬레이션을 수행하였고 시뮬레이션 결과로부터 제시한 방식의 가용성을 확인 할 수 있었으며, 향후 실험을 통해 시험 및 평가가 진행 될 예정이다.

본 연구는 국토해양부에서 시행하는 기술료사업의 “루프형LSM 소형 시험장치 및 차량 궤도시스템간의 인터페이스 기술개발”과제로 부터 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Yingying Yao, Youtong Fang, and Guanzhong Hu, " The Dynamic Performance Analysis Model of EMS-MAGLEV System Utilizing Coupled Field-Circuit-Movement Finite Element Method", Progress In Electromagnetics Research Symposium, 2005, Hangzhou, China, August 22-26
- [2] D. Cho, Y.Kato and D. Spilman, "Experimental comparison of sliding mode and classical controllers in magnetic levitation systems", IEEE Control Systems Magazine, 13(1), Feb. 1993, 42-48