

자기부상열차 슬립주파수 변경에 의한 전기제동 특성 연구

A study on characteristic of electric braking system by changing slip frequency of Lim-powered maglev train

마상건*[†], 이경복*

Sangkyeon Ma*[†], Kyeongbok Lee*

Abstract For better energy efficiency of urban maglev train with the linear induction motor, this paper has dealt with the braking control system of the inverter. Which operates by slip frequency of 12.5Hz for propulsion and 13.5Hz for braking. When braking, both plugging type braking and regenerative braking work simultaneously, of which the characteristic leads to lowering energy efficiency comparing to other systems. The empirical tests on coordinating slip frequency of inverter of the maglev train have conducted to obtain what is the best option for power consumption, vertical force to float, regenerative braking, and plugging type braking.

Keywords : Maglev, Slip Frequency, Power Consumption

초 록 본 논문은 도시형 자기부상열차의 에너지 효율 향상을 위해 인버터 제동 제어 변경에 대한 내용으로 현재 실용화 개발 완료된 자기부상열차의 인버터는 추진 12.5Hz, 제동시 13.5Hz의 일정 슬립 주파수 제어방식으로 제동시 역상제동과 회생제동 병행에 따른 에너지 효율이 다른 철도차량 시스템에 비해 상대적으로 낮은 실정이다. 자기부상열차의 에너지 효율 향상 측면에서 인버터 슬립주파수 조정을 통해 수직력을 고려한 부상전력과 회생/역상 및 소비전력 특성을 현차 시험을 통해서 시험·검증하였다.

주요어 : 자기부상열차, 슬립 주파수, 소비전력

1. 서 론

오늘날 철도는 지구온난화 해결과 환경성을 고려한 절대적인 대중교통으로 자리매김하고 있는 이때, 신 교통 수단을 중심으로 에너지 효율에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 특히 자기부상열차는 차량 특성상 에너지 효율이 상대적으로 다른 차종에 비해 낮다. 철재차륜 전동차, K-AGT(고무차륜전동차) 등 다른 차량 시스템과의 에너지 소비특성을 비교해보면 상대적으로 많은 전력을 소비하고 있다.

본 논문에서는 슬립주파수 일정 제어 RMS 전류 제어를 기반으로 한 알고리즘에 슬립 주파수를 변경하여 선형유도 전동기를 이용한 제어방법을 적용함으로써 기존 사용하던 슬립주파수 일정 전류제어방식과의 전력 소모측면에서 효과를 한국기계연구원 자기부상열차 차량

*[†] 교신저자: 대전광역시도시철도공사 연구개발원(malnara@hanmail.net)

* 대전광역시도시철도공사 연구개발원

에 적용하여 시험·검증하였다. 본 제어 방식은 자기부상열차의 부상에 대한 수직력과 흡인력을 고려한 슬립주파수의 변경과 차량의 노치변경에 따른 전력량을 측정하고 비교함으로써 에너지 효율측면에서 유효함을 증명하였다.

2. 본 론

2.1 LIM 슬립주파수 특성

2.1.1 슬립주파수 특성

자기부상열차는 추진용 선형유도전동기는 일반 회전형 전동기와는 달리 공극과 자화 전류가 커서 상대적으로 효율이 낮다. 또한 1차측(Primary)과 2차측(Rail)간의 추력 대비 흡인력과 반발력으로 작용하는 수직력(normal force)가 발생한다. 그림 1은 선형유도전동기의 슬립주파수 변경에 따른 추진력과 수직력 특성을 나타내고 있다.

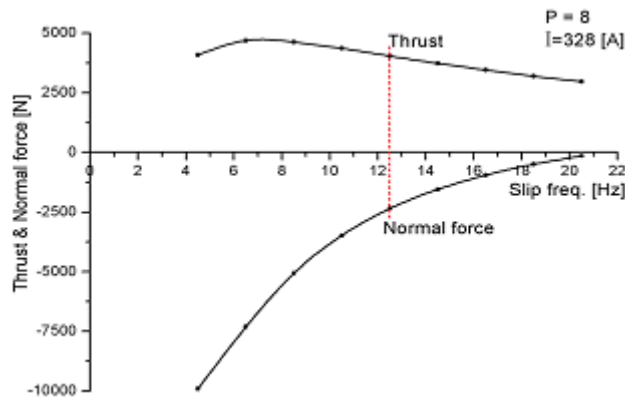


그림 1. LIM 슬립주파수 특성

Fig. 1 Characteristic of Linear Induction Motor Slip Frequency

여기서 수직력의 크기와 방향은 선형유도전동기의 입력 전류를 일정하게 유지할 때 슬립주파수 변화에 따라 그 크기가 달라져 추진력과 부상력에 영향을 미친다. 일정 슬립주파수 제어는 추진 및 부상에 따른 다른 제어에 영향을 미치지 않고 수직력이 부상 시스템에 영향을 최소화하기 위하여 슬립 주파수 일정 제어 방식을 한국기계연구원 시험 차량 및 인천 실용화 차량 인버터에 적용하였다.

2.1.2 슬립 주파수 일정 RMS전류 제어 방식

기존 자기부상열차의 LIM 은 수직력이 부상 시스템에 미치는 영향을 최소화하기 위해서 슬립주파수 일정전류제어 방식으로 그림 2 와 같은 블럭 다이어그램을 적용하였다.

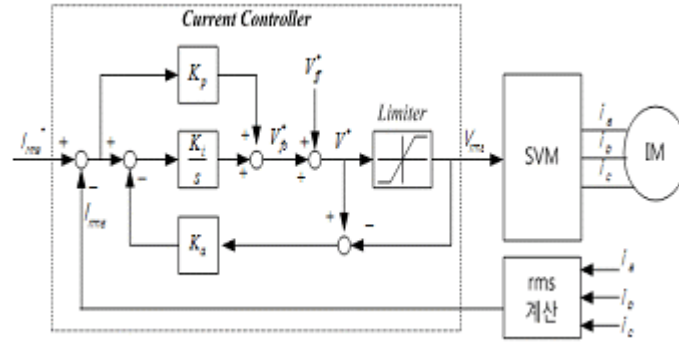


그림 2. 슬립주파수 일정 전류제어

Fig. 2 Slip frequency constant current control

슬립주파수 일정 전류제어 방식은 실효치 전류 지령에 따라 PI 제어기, 안티 와이드 업 및 전압 전향보상으로 구성된 형태의 제어 방식으로 전류 제어기의 대역폭이 수 Hz 로 전류 제어 응답특성이 빠르지 않다. 자기부상열차 인버터 스위칭 주파수가 900Hz 로 많은 순간 전류 오차가 발생한다. 또한 V/f 일정 모드에서 일정 슬립 주파수를 제어 입력으로 사용하게 되는데 전반적으로 효율이 특성이 나쁘고 특히 저속구간에서 현저하다.

2.2 슬립주파수 변경 시험 및 분석

그림 3 은 자기부상열차의 추진 및 제동시 전류 특성을 나타내고 있는데 제동시 슬립주파수에 따른 회생제동과 역상제동을 사용하는 전기제동 특성을 보이고 있다. 슬립주파수 조정은 회생제동 영역을 넓히고 역상제동을 줄임으로서 효율적인 전력 소비가 가능하게 된다. 또한 슬립주파수 조정에 따른 흡인력과 반발력으로 작용하는 수직력(normal force)에 대한 자기부상열차의 소비 부상전력 관계를 시험하였다.

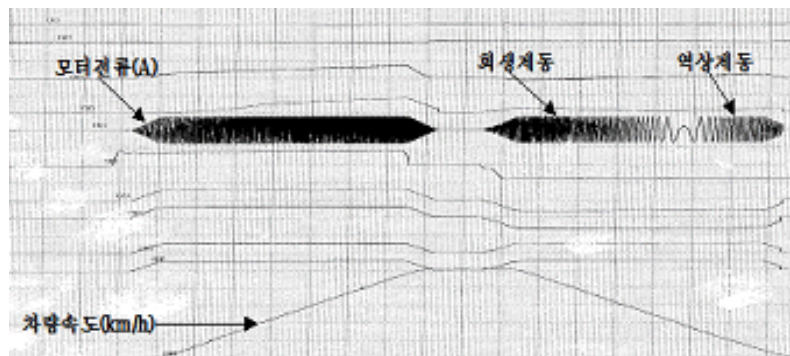


그림 3. 전류 특성(자기부상열차)

Fig. 3 Characteristic of Inverter Current (MAGLEV)

자기부상열차 인버터 슬립 주파수는 추진시 12.5Hz, 제동시 13.5Hz 로 고정한 제어 방식을 사용하였는데 본 논문에서는 추진시 슬립주파수는 고정하고 제동시 슬립주파수를 13.5Hz 에서

10.5Hz 까지 1Hz 씩 낮추어 시험을 수행하였다. 자기부상열차의 추진시 100%(Notch P4)로 제동시 100%(B7), 85%(B6), 72%(B5)로 단계별 수행하고, 이때 열차 최고 속도는 50km/h 이다. 슬립 주파수 가변에 대한 에너지 분석 결과는 다음과 같다.

표 1. 슬립주파수 일정 전류제어 시험(P4_B7)

Table 1. Test of slip frequency constant current control (P4_B7)

(단위:kwh)

제동슬립 주파수 (Hz)	Notch	INV	추진	회생	역상	MDPS
13.5	P4_B7	1.536	1.418	-0.082	0.2	0.159
12.5		1.499	1.413	-0.097	0.183	0.156
11.5		1.454	1.402	-0.111	0.163	0.152
10.5		1.446	1.421	-0.12	0.145	0.144

표 2. 슬립주파수 일정 전류제어 시험(P4_B6)

Table 2. Test of slip frequency constant current control (P4_B6)

(단위:kwh)

제동슬립 주파수 (Hz)	Notch	INV	추진	회생	역상	MDPS
13.5	P4_B6	1.57	1.431	-0.071	0.21	0.173
12.5		1.499	1.413	-0.097	0.183	0.156
11.5		1.459	1.399	-0.100	0.16	0.152
10.5		1.436	1.405	-0.109	0.14	0.179

표 3. 슬립주파수 일정 전류제어 시험(P4_B5)

Table 3. Test of slip frequency constant current control (P4_B5)

(단위:kwh)

제동슬립 주파수 (Hz)	Notch	INV	추진	회생	역상	MDPS
13.5	P4_B5	1.555	1.422	-0.075	0.208	0.175
12.5		1.531	1.411	-0.080	0.2	0.171
11.5		1.497	1.418	-0.091	0.17	0.165
10.5		1.467	1.425	-0.108	0.15	0.188

3. 결 론

슬립주파수 변경에 따른 실측 소비전력은 슬립주파수 13.5Hz 에서 10.5Hz 로 변경시 인버터 상전류 변환시점이 20Km/h 에서 14Km/h 로 낮아져 회생제동구간이 증가하고 상대적으로 역상제동 구간 감소함에 따라 회생에너지 약 47% 증가, 역상에너지 약 31% 감소로 전체적인 전력량은 8% 감소하였다. 또한 상대적으로 제동 슬립주파수 변경에 의한 수직력(normal force)관련 부상 소비에너지 차이는 거의 변함이 없는 것으로 현차 시험으로 확인하였다.

후 기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(13RTRP-A069839)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 오성철, “선형 유도전동기의 추진력 및 수직력 제어 방식”, 대한전기학회 하계학술대회, pp.289-291, 1996
- [2] 이석영, 박상욱외 3 명, “선형유도전동기를 이용한 자기부상 추진시스템의 슬립주파수 제어”, 대한전기학회 하계학술대회, pp.493-494, 2015