

선형유도전동기를 이용한 자기부상추진시스템의 ATO운전 효율 향상

박상욱, 전찬용, 목형수, 임재원, 박도영
 건국대학교, 한국기계연구원

Improvement of ATO Efficiency by Varying Slip Frequency for a Magnetic Levitation Propulsion System Using a Linear Induction Motor

Park Sang Uk, Jeon Chan Yong, Mok Hyung Soo, Lim Jae-Won, Park Doh-Young
 Konkuk University, Korea Institute of Machinery & Materials

ABSTRACT

본 논문에서는 현재 운행되고 있는 선형 유도전동기의 슬립 주파수 고정 방식이 아닌 선형 유도전동기를 이용한 자기부상 열차의 슬립주파수와 수직력 및 추진력과의 관계를 이용, 열차의 가감속시 운행패턴에 따라 운행 중 슬립주파수가 가변할 수 있는 슬립주파수 가변패턴을 형성, 선형유도전동기 자기부상시스템에서의 에너지 효율향상 가능성을 검증하였다.

슬립주파수와 수직력, 추진력과의 관계를 이용 슬립주파수 일정 실효치전류제어 알고리즘과 슬립주파수 일정 벡터제어 알고리즘을 사용하여 운전조건과 슬립주파수를 변경하며 운전조건에 따른 가장 효율적인 슬립주파수의 패턴을 형성하였다. 이후 모의시험과 실차를 이용한 실험을 통해 알고리즘에 대한 정당성과 실제 효율의 증가를 통해 타당성을 검증하였다.

앞선 두 가지 알고리즘을 통해 열차부상에 영향을 미치지 않는 범위의 수직력을 가지는 범위내에서 슬립주파수를 가변 운전 조건에 따른 최적의 슬립주파수에 대한 정보를 기반으로 운행 중 가변하는 슬립주파수를 자동열차운전(ATO)시스템에 적용 모의실험을 통해 그 적용가능성과 효율을 검증하였다.

1. 서론

최근 도시의 인구집중에 의한 대중교통시장이 활발해 지면서 도시 내 소음, 환경, 에너지 등 다양한 문제들이 발생하고 있다. 열차 또한 이러한 소음과 에너지 문제를 피할 수 없다. 이에 따라 최근 저소음, 친환경의 선형 전동기를 이용한 자기부상열차가 관심을 받고 있다. 하지만 선형 전동기는 운영비용이 크다는 단점을 가지고 있어, 선형 전동기의 운영 효율 증가를 통한 비용절감을 위해, 운전효율 향상방안과 관련된 많은 연구들이 진행 중이다. 본 논문에서는 현재 운행되고 있는 선형 유도전동기의 슬립주파수 고정 방식이 아닌 선형 유도전동기를 이용한 자기부상 열차의 슬립주파수와 수직력 및 추진력과의 관계를 이용, 열차의 가감속시 운행패턴에 따라 운행 중 슬립주파수를 가변 할 수 있는 슬립주파수 가변패턴을 형성, 선형유도전동기 자기부상시스템에서의 에너지 효율향상 가능성을 검증하였다. 검증 방식은 자동열차운전(ATO)시스템의 운행패턴을 통하여 운행 중 가변 하는 슬립주파수를 적용 모의실험을 통해 그 적용가능성과 효율을 검증하였다.^{[1][2][3]}

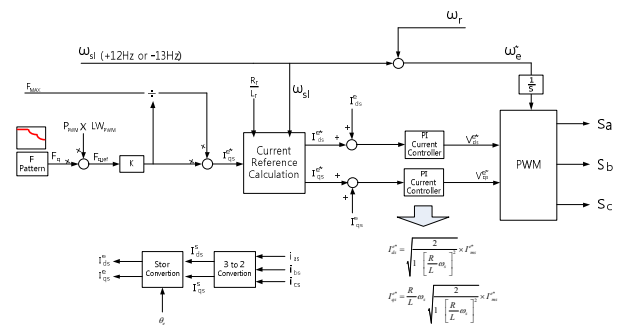


그림 1 슬립주파수 일정 벡터제어 알고리즘
 Fig. 1 Constant slip frequency vector control algorithm

2. 제어 알고리즘과 시스템

2.1 제어 알고리즘

벡터제어 동기좌표계 PI제어기를 사용할 경우 그림 1의 슬립주파수 일정 벡터제어 알고리즘의 경우에서처럼 d-q축 동기좌표계 PI전류제어기를 사용하며, 순시전류제어를 수행한다. 추진력 지령치에 해당하는 실효전류 지령값을 출력하면 슬립주파수에 해당하는 d-q축 순시전류 지령값을 출력하고 3상전류를 측정 후 3상/2상변환과 정지/동기 좌표변환으로부터 d-q축 순시값으로 변환 각각 순시전류제어를 수행한다. 이때 인버터의 각도 지령은 슬립주파수와 전동기의 속도에 의해 계산하고, 이를 적분하여 각도를 출력한다.^{[1][4]}

2.2 적용 시스템(자동 열차제어 시스템)

자동 열차제어 시스템은 열차가 정거장을 출발하여 다음 정거장에 정차할 때 까지 가속, 감속, 정거장에서의 정위치 정착등을 자동으로 수행, 제어 시스템에서 열차의 자동운전을 실시한다. 그림 2는 실제 운행 중인 차량의 ATO운전 패턴을 기반으로 토크를 추출, 이 추출된 토크를 지령으로 이용하여 시뮬레이션 운전을 시행하였다. 파란색 그래프는 차량 운행 속도 곡선을 붉은색 그래프는 가속과 제동을 거는 PB의 곡선을 보이고 있다.^{[2][5]}



그림 2 차량의 ATO 운행 속도 패턴
Fig. 2 ATO driving speed pattern

3. 시뮬레이션

일반적으로 차량은 가속을 하는 추진, 타행운전을 하는 타행구간, 감속을 하는 제동구간을 가지게 되는데 기존의 운행 방식은 모든 구간이나 속도에 관계없이 12.5_13.5의 슬립주파수를 고정하여 운전을 시행 하였다. 다음 시뮬레이션에서는 벡터 제어 알고리즘을 기반으로 열차의 운행조건에 맞추어 슬립주파수를 가변시켜 줌으로써 더 효율적인 운행이 가능한지 확인 하였다. 그림 3은 슬립주파수를 추진12.5[Hz] 제동13.5[Hz]로 하고, ATO운전을 하였을 때와 슬립주파수를 가변하면서 운전한 시뮬레이션이다. 누적 소비전력은 슬립주파수 13.5[Hz] 고정 운전의 경우 누적 소비전력이 최대 167[kWh] 이지만, 운전조건에 따라 슬립주파수를 가변 한 경우 누적 소비전력 159[kWh]이다. 운전조건에 따라 슬립주파수를 가변 하며 운전시 더 효율적인 운전이 가능한 것을 보여주고 있다.

표 1은 운전조건에 따른 슬립주파수의 가변 패턴을 더욱 세분화 하여 나타내었다. 이때 가장 효율적인 운전 패턴을 이용 시 누적 소비전력량 0.997[kWh]와 기존의 슬립주파수 고정 운전 패턴을 이용 시 누적 소비전력량 1.333[kWh] 비교하면 약 0.336[kWh]의 누적 소비전력량이 감소 이는 약 25.2%의 에너지 효율 증가를 보여준다.

4. 결론

기존의 선형유도 전동기를 이용한 자기부상열차는 열차의 운전조건에 관계없이 슬립주파수를 13.5[Hz]로 고정하여 사용함으로써 비효율적인 운행을 시행하여 왔다. 본 논문에서는 열차의 가감속시 운행패턴에 따라 운행 중 슬립주파수가 가변 함으로써 더 효율적인 운행을 시행 하였으며 이때 약 1.333[kWh]의 누적 소비전력량을 감소시켰으며, 이는 약 25.2[%]의 에너지 효율의 증가를 보여줌으로써 기존의 방식보다 더 효율적임을 검증하였다.

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

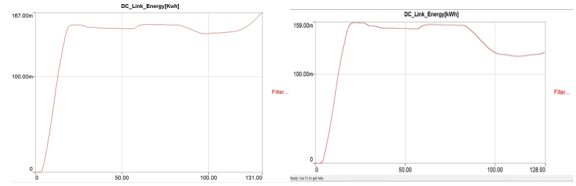


그림 3 운전조건에 따른 슬립주파수 가변 시 누적 소비전력량 (a)기존(13.5Hz) (b)슬립주파수 가변
Fig. 3 Variable slip frequency when the cumulative power consumption according to the operating conditions (a)original(13.5Hz) (b)Variable slip frequency

표 1 자기부상열차 슬립주파수 고정 자동 열차제어 시스템(ATO)운전과 슬립주파수 가변 패턴 시뮬레이션 전력량 비교

Table 1 Maglev fixed slip frequency automatic train control system and Compare slip variable frequency power pattern simulation

ATO자동운전 슬립주파수 가변 시뮬레이션					
	슬립주파수가변 곡선	슬립주파수가변	소비전력량(kwh)	소비전력증감비율(kwh)	
ATO 슬립주파수 가변 고정용 패턴	①	 12.5 13.5 12.5 13.5 -100 -60 -20 0 100 101	12.5 13.5 (평균 슬립주파수 고정)	1.33344	증감율: 0kwh
	②	 7.5 6.5 9.5 9.5 -100 -60 -20 0 100 101	-100 7.5 -60 6.5 -20 6.5 0 6.5 100 9.5 101 9.5	0.99736	증감율: -0.336kwh
	③	 9.5 7.5 6.5 6.5 9.5 9.5 -100 -60 -20 0 100 101	-100 9.5 -60 7.5 -20 6.5 0 6.5 100 9.5 101 9.5	1.02088	증감율: -0.313kwh
	④	 10.5 6.5 6.5 9.5 9.5 -100 -60 -20 0 100 101	-100 10.5 -60 8.5 -20 6.5 0 6.5 100 9.5 101 9.5	1.05424	증감율: -0.279kwh
	⑤	 11.5 6.5 6.5 9.5 9.5 -100 -60 -20 0 100 101	-100 11.5 -60 9.5 -20 6.5 0 6.5 100 9.5 101 9.5	1.08736	증감율: -0.246kwh

참고 문헌

- [1] 이석영, 『선형유도전동기를 이용한 자기부상추진시스템의 슬립주파수 가변에 의한 효율운전에 관한 연구』, 건국대학교 대학원 공학석사, 2015
- [2] 김종호, 『ATO통신에 의한 열차운행간격 제어에 관한 연구』, 연세대학교 산업대학원 전기공학석사, 2000
- [3] N.G. Hingorani, "Power Electronics in Electric Utilities : Role of Power Electronics in Future Power System", Proceedings of the IEEE, Vol. 76, No. 4, pp. 481-482, 1988, April.
- [4] Jeong-hyoun Sung, Kwanghee Nam, "A New Approach to Vector Control for a Linear Induction Motor Considering End Effects", Industry Application Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE. 2284-2289
- [5] Xiaomin Zhu, 『The Modeling of Test Systems of Automatic Train Operation (ATO) in Urban Rail Transit Based on LAB VIEW』, 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCSM 2010) (Volume:1), 22-24 Oct. 2010, Beijing, Jiaotong University