

차량 추진용 리니어모터의 설계를 위한 정격산정에 관한 검토

장 석명, 흥 정표*, 정 락교**, 이 주**

충남대학교, *창원대학교, **철도기술연구원

The Consideration On The Rated Electric Power of The Linear Induction Motor for The Propulsion of a Vehicle

Jang S.M. Hong J.P. Jeong R.G. Lee J

ChungNam Nat'l Univ., ChangWon Nat'l Univ., Korea Railroad Research Institute

Abstract - In this paper, The considerable matters for the calculation and determination of the rated electric power of the three phase Linear Induction Motor for the propulsion of a vehicle, is treated with inverter performance with harmonics, aerodynamic drag force, running resistance, normal force.

1. 서 론

차량 추진시스템은 차량을 주행속도까지 가속시키기 위하여 필요한 힘을 발생하여 차량에 충분히 공급해주어야만 한다. 즉 차량의 운전중에 바퀴의 마찰력, aerodynamic drag force 및 관성력을 극복하고 가속 및 감속시키는데 필요한 힘을 충분히 공급해 주어야만 한다. 이때 보조장치로는 승차감, 안전, 통신, 안내, 제어, 제동, 비상시의 안전을 고려한 시설들이 필요하다.

자기부상열차, 경전철용 리니어모터 카, 소형 궤도 승용차(PRT)등과 같이 리니어모터로 추진되는 차량의 정격결정은 모터의 추력용량은 물론, 전원계통 및 드라이버인 인버터의 용량, 차량 제어기의 용량과 반도체 스위칭소자의 결정 등을 결정하는 기본요소이므로 시스템의 제작단가 및 건설비의 산정에 필수적이다. 여유도를 충분히 주어 결정하는 경우에는 그 비용이 너무 커져 비경제적이 되는 반면에 정격의 여유도가 작은 경우에는 차량시스템의 운전성능이 불안정해 지게 되므로 적정한 정격치의 산정은 시스템 전체의 운전성능으로부터 건설단가까지를 결정하게 되는 가장 중요한 요인이 된다. 그런데 리니어모터의 정격 결정에 민감한 영향을 주는 요인은 다양하다.

따라서 저자들은 이러한 정격결정에 중요한 영향을 미치는 여러 요인들을 참고문헌을 중심으로 검토분석하여 자기부상열차, 경전철, 소형 궤도승용차인 PRT등 차량의 추진을 위한 리니어모터의 설계에 반영하고자 하였다.

2. 차량 추진용 리니어모터의 추력결정요소

리니어모터의 정격 결정에 민감한 영향을 주는 요인은 다양하다. 특히 인버터로 리니어모터를 구동하는 경우에는 추진을 위한 정격추력 및, 드라이버인 인버터의 용량결정에서 다음과 같은 사항을 반드시 고려해야만 한다.

- 인버터의 고조파 와형율
- 주행저항 및 Aerodynamics
- 수직력

2.1 인버터특성을 고려한 정격

인버터에서 필연적으로 함유되는 고주파는 발열 및 손실 만을 발생하게 되어 차량을 추진하는 힘은 발생하지 않고 오히려 감소시키는 역할을하게 된다. 같은 실효치를 갖는 인버터라 하더라도 기본파의 함유율에 따라 추력이 매우 다르게 발생한다. 따라서 모터의 정격산정시에는 인버터의 와형율에 따라 손실되는 만큼의 정격 감소량을 별도로 더 가산하여 결정해야만 한다. 아래에서는 NEMA규격 회전형모터를 인버터로 운전하는 경우의 제반특성을 참고문헌을 바탕으로 검토한 것이다. 유도형 리니어모터의 경우도 마찬가지가 된다.

2.1.1 리니어모터의 추진드라이브

운전폐편에 따라 운전제어를 하게 되는 차량의 추진을 리니어모터로 하게 되는 경우 아래와 3개의 단계로 나누어 운전제어를 하게 된다.

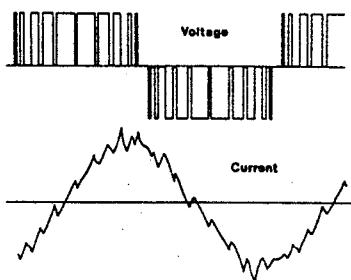
- 일정추력 영역
- 일정출력 영역
- 고속영역

일반적으로 유도형 리니어모터의 추력은 공급전압과 주파수의 크기와 관련된다. 즉 $F=f(\frac{V}{f})$ 와 같이 전압에는 비례하고, 주파수와는 반비례 관계가 된다. 또한 동기속도 $v_s=2\pi f$ 이므로 가속하기 위해서는 주파수 f 를 조정하게 된다. 그런데 주파수 만을 조정하게 되면 추력이 약해지며 가속하기

가 어려우므로, 일정한 크기의 추력으로 가속을 하기 위해서는 전압과 주파수를 동시에 가변시키는 방법인 VVVF인버터를 사용하여 구동을 하게 된다. 일단 목표속도에 도달하여 가속이 끝나면 추력은 크게 필요없고, 단지 속도를 가변하기 위하여 주파수 만을 가변하는 정격출력, 고속영역에 돌입하게 된다. 그런데 이 과정에서 드라이버로 사용되는 인버터는 전압의 파형을 PWM, PAM 등의 방식으로 전압과 주파수의 크기를 조정하는 것으로 고주파의 함유는 필연적이다. 따라서 케이블을 크기 때문에, 기본파에 의해서만 정격추력을 발생시킬 때 되는 모터에 나쁜 영향을 크게 주게 된다. 아래에서 이에 관하여 검토하기로 한다.

2.1.2 인버터의 전압 및 전류파형

인버터의 전압은 그림(1)에서 보는 바와 같이 펄스폭변조(PWM)형, 또는 펄스진폭변조(PAM)형의 파형으로 고조파가 크게 함유된다. 또한 전류파형도 전압파형에 비하여 정현파에 가깝지만 마찬가지로 고조파를 크게 함유하게 된다.



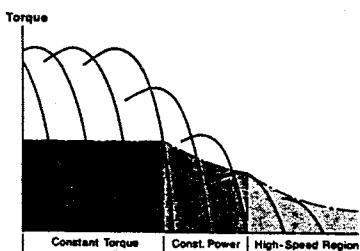
(a) 전압파형, (b) 전류파형

그림(1) 인버터의 출력파형

2.1.3 추력특성

(a) 일반특성

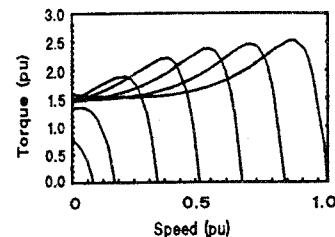
차량을 가속/등속/감속의 운전패턴에 따라 추진하기 위한 추진력을 발생하기 위하여 그림(2)와 같이 인버터에 의하여 일정추력영역, 일정출력영역, 고속영역의 3단계로 제어를 하게 된다.



그림(2) 운전패턴에 따른 추력특성

또한 속도와 주파수를 고려한 출력곡선 그림(3)을

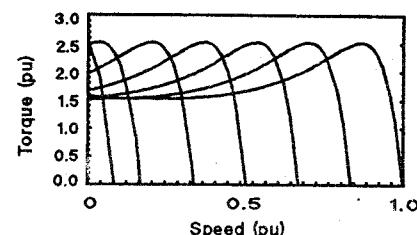
보면 저주파수영역에서는 토크가 매우 적게 발생하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 일정토크로 가속운전을 하기 위해서는 공극자속이 일정하게 발생해야 하는데 이를 위해서 전압의 상승이 따라 주지 못하기 때문에 힘이 감소되는 것과, 저속시에 팬등에 의한 냉각능력의 저조에 따른 온도상승으로 손실이 되기 때문이다. 또한 기동초에 수직력도 최대가 되므로 추력이 감소되는 효과를 갖는다.



그림(3) 일반 유도기의 속도-주파수-힘특성

(b) 승압(boost)특성

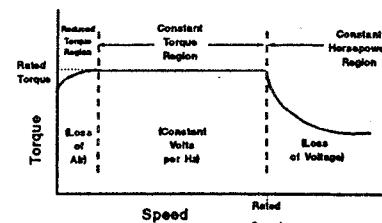
가속초기에 힘이 일정한 값으로 발생하기 때문에 이를 그림(4)와 같이 일정한 값이상으로 올려주기 위해서는 기동초기에 전압을 별도로 승압시키게 된다.



그림(4) 승압을 시킨 경우의 속도-주파수-힘특성

(c) 운전을 고려한 추력특성

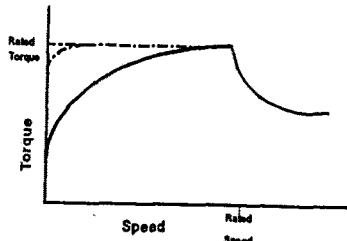
가속/감속/정상운행을 위하여 그림(5)와 같이 3단계의 패턴으로 제어를 하게 된다. 저속영역에서 정격토크가 약간 감소하는 현상을 볼 수 있다.



그림(5) 운전패턴에 따른 힘특성

(d) 인버터에 의한 정격추력의 감소특성

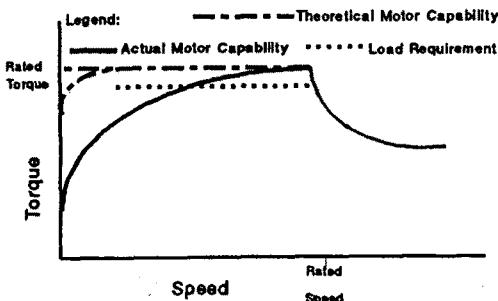
인버터로 리니어모터를 추진운전을 하는 경우에는 기본파에 의해서만 정상추력이 발생하고 고조파에 의해서는 진동 또는 열이 발생하게 되므로 손실이 되어 그림(6)과 같이 모터의 정격추력을 저감시키게 되는데 이경우 파형에 따라 50%정도까지 차지하게 된다.



그림(6) 인버터로 운전하는 경우 정격토크의 저감을 고려한 특성

(e) 부하를 고려한 추력특성

그림(7)에서 부하가 요구하는 값보다 모터의 실제 토크가 작은 경우 모터는 무리한 운전을 하게 되어 과열된다.



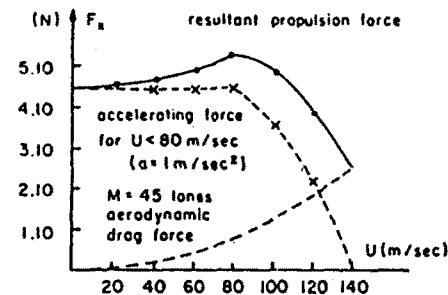
그림(7) 부하의 요구토크와 모터의 실제 발생토크를 고려한 경우의 운전특성

2.2 주행저항 및 aerodynamics

바퀴가 있는 차량의 경우는 바퀴등 접촉부분에서의 마찰저항에 의한 주행저항파, 차량의 단면적 및 형상인 유선형 정도에 따라 결정되는 aero-dynamics에 의한 drag force의 영향을 고려해야 만 한다. 일반적으로 저속에서는 주로 바퀴 등의 기계적인 마찰저항이, 고속에서는 차량의 단면적 및 형상에 의하여 결정되는 aerodynamic drag force가 지배한다. 프랑스의 TGV의 추진력(인장력)과 주행저항에 관한 자료를 보면 속도가 고속영역으로 갈수록 주행저항이 상승한다. 즉 속도가 100[km/h]에서 추진력(인장력)의 10%이상이 되고 있다. 또한 독일의 ICE의 경우도 마찬가지로 100[km/h] 정도에서 주행저항이 추진력의 10%이상이 됨을 알 수 있다. 그런데 주행저항은 차량의 속도는 물론 선두차량의 단면의 크기 및 모양에 직접적으로 관련된다. 이들 TGV나 ICE는 선두차량의 단면이 최대한으로 유선형을 이루고 있는 경우이다. 그러나 일반

도시교통용 차량의 경우는 일반적으로 선두차의 전면의 단면이 유선형과는 거리가 먼 모양을 이루므로 주행저항이 이경우보다 훨씬 크게 된다.

그림(8)은 미국의 Nasar교수가 제시한 자료로 추진에 필요한 속도-가속력파, aerodynamic에 의한 drag force에 관한 자료이다.



그림(8) 속도에 따른 aerodynamic drag force특성의 예

즉 유체역학적인 저항에 의하여 drag force가 상승함에 따라 커지지만 도시교통용 차량의 경우 80[m/s] 정도에서도 정격 가속추력의 20%이상이 됨을 보인다. 따라서 일정크기의 추력으로 차량을 가속하고자 하는 경우, 이를 감안한 추력의 여유도를 보상해야 만 한다.

2.2 수직력특성

리니어모터에서 필연적으로 존재하는 수직력은 차량의 중량을 증가시켜 부하가 증가되는 효과를 주므로 정격추력의 산정에 이를 반드시 감안해야 만 한다.

3. 결 론

차량을 추진하는 모터의, 정격용량의 적정산정은 시스템 전체의 운전성능으로부터 건설단가까지를 결정하게 되는 가장 중요한 요인이 된다. 저자들은 정격결정에 중요한 영향을 미치는 여러 요인들을 관련문헌을 참고하여 검토분석하였다. 이 결과를 자기부상열차, 경전철, 소형 궤도승용차인 PRT 등 차량의 추진을 하기 위한 리니어모터의 설계에 반영하고자 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] 장석명, 이현구, 박영태, "시간고조파를 고려한 유도형 리니어모터의 등가회로와 특성해석", 전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 305-307; 1996.11
- [2] L.Manz, "Applying Adjustable-Speed Drives to Three-Phase Induction NEMA Frame Motors", IEEE Trans., vol. IA-33, no. 2, pp. 402-414, 1997.
- [3] "고속철도차량의 신전개-특집", 일본전기학회 잡지, 117권, 5호, 1997
- [4] I. Boldea, S. A. Nasar, "Linear Motion Electromagnetic Systems", John Wiley & Sons, 1985.