

LSRM의 Turn-off보상에 의한 퍼지로직 토크리플저감에 관한 연구

성호경, 조정민, 이종민, 유문환, 김동성

한국기계연구원

A Study on Fuzzy Logic Torque Ripple Reduction by Turn-off Angle Compensation of LSRM

H.K. Sung, J.M. Jho, J.M. Lee, M.W. Yu, D.S. Kim

Korea Institute of Machinery & Materials

Abstract –In this paper, A fuzzy logic based turn-off angle compensator for torque ripple reduction in a linear switched reluctance motor is proposed. The turn-off angle, as a complex function of motor speed and current, is automatically changed for a wide speed range to reduce torque ripple. Simulation results are presented that show ripple reduction when the turn-off angle compensator is used.

1. 서 론

고성능 시스템을 위한 스위치드 릴럭턴스모터(SRM)의 주된 문제점은 토크리플, 진동과 잡음이다. 이러한 문제점을 줄이기 위해서, 토크리플을 줄이기 위한 전류 프로파일 연구법에 대하여 많은 논문들이 발표되었다[1]. 그리고 그중 몇몇 논문에서 턴-오프 각을 조절하여 토크리플을 줄이기 위한 방법들이 보고되었다. [2]에서는 초기에 다루어지던 간단한 제어방법이 소개되고 있다. 최적 토크에 대한 턴-오프각을 결정하는 분석적인 방법은 [3]에 제시되었다. 최근에는 여러 가지 동작모드를 선택함으로써 모터가 최대 효율, 최대 토크 또는 최소의 토크 백동을 발생시키도록 하는 논문이 [4]에서 제시되었다. 그러나 이러한 접근방법들은 광범위한 속도운전이 필요한 자기부상열차의 추진모터에 대한 제어방법으로써는 적합하지 않다. 왜냐하면, 토크리플을 최소화하는 방식에 이용되는 토크검출기의 동적토크는 정밀하게 측정하기 어려울 뿐만 아니라, 신뢰성이 낮다. 본 논문에서 제시하는 기법은 모터의 속도와 전류신호가 기기의 운전조건에서 전류에 대하여 토크리플을 최소화하는 턴-오프각을 오프라인에서 튜닝하여 퍼지룰을 만들어, 실제 시스템에서 자동적으로 턴-오프각을 연산하도록 구성하였다. 그러므로 이러한 방식은 토크검출기에 의한 문제점을 해소하며 토크리플을 줄일 수 있음으로 신뢰성이 중요한 요소인 자기부상열차의 추진시스템에 대하여 적합한 기법이다.

2. LSRM의 운전 특성

2.1 LSRM의 운전특성

MAGLEV 구동을 위한 LSRM 제어방식에는 4상한 운전이 가능하여, 기동 및 정지뿐만 아니라 역행운전도 가능하여야 한다. 이러한 가속 및 정지에 대한 LSRM에서의 발생토크는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 그림 1로부터 모터는 인덕턴스의 상승 변화가 있는 동안 양의 토크를 발생시키고, 상 인덕턴스의 감소구간에 음의 토크를 발생시킨다.

전류제어방식은 히스테리시스 전류제어방식을 택하였고, 히스테리시스 전류제어방식은 강인하고 빠른 응답을 기대할 수 있다.

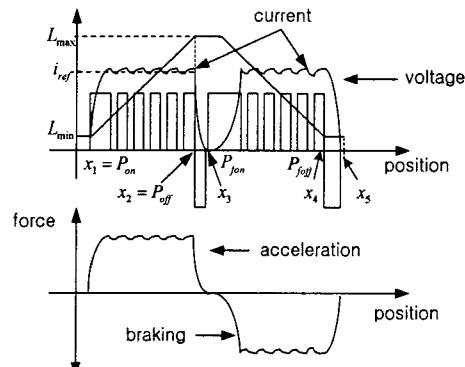


그림 1 LSRM 추진력의 특성

2.2 LSRM의 토크 리플

H-브리지 컨버터에서, 전류시 LSRM의 상전류는 식(1)과 같다.

$$i(t) = i_0 e^{(-t/c_1)} - (V/R_s)(1 - e^{(-t/c_1)}) \quad (1)$$

여기에서 i_0 는 초기전류, $-V$ 는 전류(commutation)시전압, $c_1 = L(\theta_{off})/R_s$ 는 전류시 시정수, $L(\theta_{off})$ 는 턴-오프각에서 상인덕턴스, 그리고 R_s 는 식(2)과 같다.

$$R_s = R + \frac{dL}{d\theta} v_m \quad (2)$$

그래서, 상전류가 영전류에 도달하는 시간 t_d 는 식 (3)과 같다.

$$t_d = -\frac{L(\theta_{off})}{R} \ln\left(\frac{V}{R_s i_0 + V}\right) \quad (3)$$

식(3)에서는 (1)와(2)가 이용되었다. 방정식(3)은 R_s 에 의한 모터속도 v_m 와 초기상전류 i_0 에 대하여 턴-오프각 θ_{off} 에 의해 전류시간 t_d 를 조절할 수 있다는 것을 나타낸다. 이것은 토크리플이 턴-오프각 조절에 의해서 제어 가능함을 나타낸 것이다. 즉 특정 속도와 특정전류에서 턴-오프 각을 조절하면 토크리플이 최소화되는 각각의 토크리플 최소점이 존재한다는 것을 나타낸다.

3. 컨버터의 스위칭 방식

3.1 기존의 스위칭 방식[5]

자기부상열차의 차체 속도 가감 및 정지는 기기가 운행되고 있는 동안 전력용 반도체의 스위칭을 통하여 제어된다. 따라서 위치에 대한 이상적인 인덕턴스 변화곡선으로부터 차체의 위치는 제어를 수행하는데 있어 중요하다.

그림 1은 스위칭 방식을 나타내고 있으며, 기존의 스

위치위치 설정방식으로 [5]의 제안된 방식을 따라 식(4)과 같이 표현된다.

$$\begin{cases} x_1 = (w_{fs} - w_{sp})/2 \\ x_2 = x_1 + w_{sp} \\ x_3 = x_2 + (w_{fp} - w_{sp}) \\ x_4 = x_3 + w_{sp} \\ x_5 = \zeta \end{cases} \quad (4)$$

여기에서, w_{fs} 와 w_{fp} 는 각각 고정부의 슬롯폭과 돌극폭이고, w_{sp} 는 고정자 둘곡의 폭이다.

모터에서 부상 및 추진력은 전력변환기의 스위칭펄스와 관계가 있다. 식(5)는 본 시뮬레이션에서 적용한 LSRM의 A상에 대한 스위칭 방식이다.

$$\begin{aligned} V_A = V &\Rightarrow (P_{on} \leq x < P_{off}) \\ V_A = -V &\Rightarrow (x \geq P_{off}) \text{ or } (x \geq P_{foff}) \text{ and } (i_o > 0) \\ V_A = 0 &\Rightarrow \text{another position} \\ V_A = V &\Rightarrow (P_{fon} \leq x < P_{foff}) \end{aligned} \quad (5)$$

3.2 턴-오프각 보상에 의한 토크리플저감

LSRM은 초기에 실험적으로 얻어진 적정한 턴-오프각 $\theta_{off|initial}$ 으로 동작한다. 이때 정상상태에서 리플을 줄일 수 있는 값으로 초기 턴 오프 각을 정한다.

필요한 보상 값을 구하기 위해서, 증분각 $\Delta\theta$ 값을 초기 값에 더한다.

$$\theta_{off} = \theta_{off|initial} + \Delta\theta \quad (6)$$

식(6)로부터 알 수 있듯이 $\Delta\theta$ 값은 $\Delta\theta(\omega, i)$ 로 결정하게 된다. 여기에서 전류 지령치 i 는 전류제어기가 멘타변조 전류제어기를 이용함으로 지령전류 I^* 으로 대체할 수 있다. 그래서 $\Delta\theta$ 값은 $\Delta\theta(\omega, I^*)$ 으로 주어질 수 있다. 이러한 함수관계는 LSRM의 비선형모델을 이용한 시뮬레이션으로부터 구할 수 있다. 따라서 시뮬레이션을 통하여 다양한 값의 모터속도 v_m 과 전류 I^* 에 대하여, 토크리플을 줄일 수 있는 상응한 $\Delta\theta$ 를 구한다.

3.3 보상관계의 설정

LSRM 시스템 시뮬레이션으로부터 얻어진 데이터를 기반으로 $\Delta\theta$ 각에 대한 모터속도와 상전류 값과 관계된 규칙은 퍼지모델링 알고리즘을 이용하여 구한다

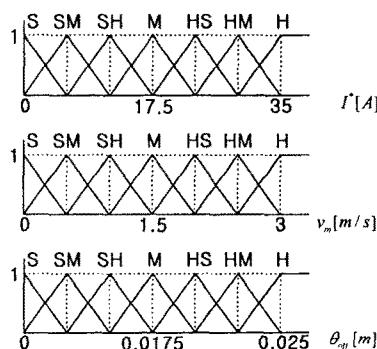


그림 2(a) 전류 및 속도에 대한 퍼지화

여기에서 인용된 알고리즘은 [6]의 Wang에 의해 제시된 학습알고리즘이다. 이러한 알고리즘은 입력변수 I , v_m 가 이등변 삼각형 형태의 맴버십 함수에 의해 그림 2(a)과 같이 균등하게 분리된 맴버언어로 변환된다. 출력변수 θ_{off} 는 단임출력의 맴버언어로 표현된다. 이러한 알고리즘은 2개의 퍼지화된 맴버변수와 일치하는 정교한

선택하는 t-norm max법을 이용한다. 퍼지 모델에 있어서 그 규칙은 표 1과 같은 형태로 표현할 수 있다. 이러한 퍼지 입력변수와 출력변수와의 출력관계는 그림 2(b)과 같다.

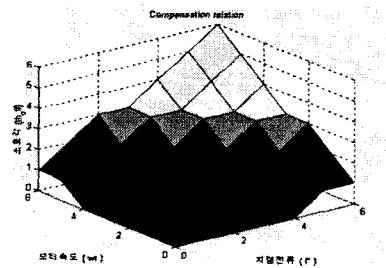


그림 2(b) 지령전류와 속도에 대한 보상관계

그림 2 퍼지세트입력과 보상각

비퍼지화는 무게중심법(Center of area method)을 이용하였다. 이 방법은 합성된 출력 퍼지집합의 무게중심을 구하여, 그 해당하는 제어 값을 제어입력으로 사용한다. 출력값 θ_{off} 는 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\theta_{off} = \frac{\sum_{i=1}^c \mu(R^{(i)}) \cdot v^{(i)}}{\sum_{i=1}^c \mu(R^{(i)})} \quad (7)$$

식(7)에 의해 출력된 값은 scaling factor에 의해 θ_{off} 값으로 변환된다.

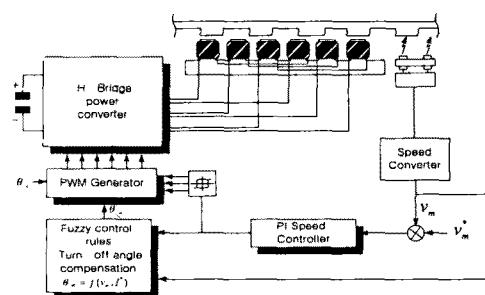


그림 3 제안된 보상기의 블록다이어그램

그림 3은 제안된 보상기를 적용한 전체제어 시스템 블록도를 나타내고 있다. 시스템의 구성은 LSRM와 전력변환부 그리고 제어부로 구성되어져 있다. 제어부는 LSRM으로부터 속도를 측정 받아 속도제어기에 입력되고 이 값은 지령속도와 비교되어 지령전류를 산출한다. 이 값은 Delta 제어기법에 의해 전류 제어되고, 턴-오프 시점은 보상각 회로의 출력을 $\theta_{off|initial}$ 각에 더한 값으로 LSR 드라이브 시스템에 턴-오프각을 결정하게 된다. 이렇게 만들어진 제어 신호는 H브리지 컨버터에 입력되어 전력변환기를 턴-오프하게 된다.

4. 시뮬레이션 및 고찰

본 연구에서는 제안된 토크리플 저감 방식의 타당성을 확인하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4~그림 5의 시험 조건은 LSRM의 지령속도를 3[m/sec]로 하고, 가동 후 2초 후 300[Nm]의 부하를 투입한 경우이다.

그림 4는 식(4), 식(5)에 의한 기존의 스위칭 방식에 의한 모터의 토크 및 FFT분석 및 속도등을 나타내고 있다. 그림 4(b)의 토크에 대한 FFT 분석으로부터 75[Hz], 150[Hz]의 토크리플이 비교적 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

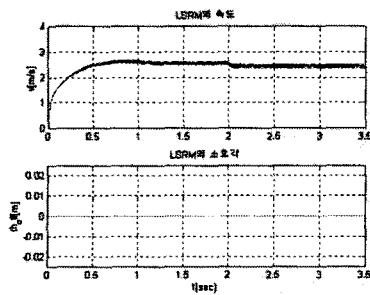


그림 4(a) 모터속도 및 보상각(기존의 방식)

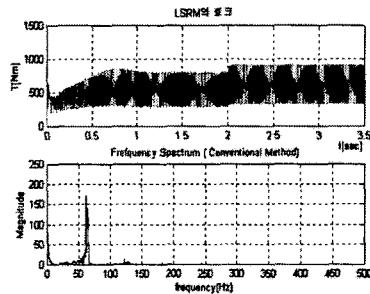


그림 4(b) 토크 및 주파수스펙트럼(기존의 방식)

그림 5의 (a),(b)는 보상각 $\Delta\theta$ 를 off-line에서 기 설정된 퍼지룰에 의해 보상각을 보정하였을 경우에 특성 과정 나타내고 있다. 그림 5(a)는 저령속도에 대한 모터의 속도 및 턴-오프 각을 나타낸 것으로 기동시, 보상각 $\Delta\theta$ 는 0.015정도 이상의 큰 값이 적용되어 기동토크가 큰 값으로 기동되고 있는 것을 확인할 수 있으며, 기동 후 턴 오프 각은 값으로 하여 drag force 및 토크 리플을 줄여, 추력의 평균값을 상승시키는 것을 알 수 있다.

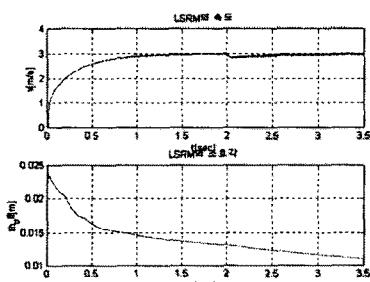


그림 5(a) 모터속도 및 보상각(보상후)

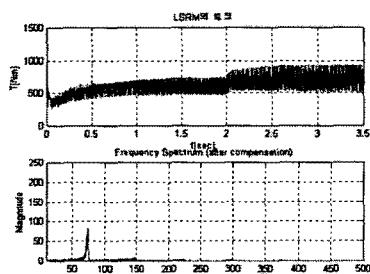


그림 5(b) 토크 및 주파수 스펙트럼(보상후)

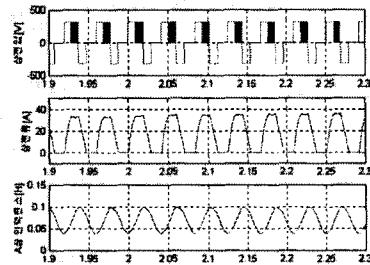


그림 5(c) 스위칭전압, 전류 및 인덕턴스

그림 5(b)의 퍼지룰에 의해 턴-오프각이 보상되었을 경우 토크에 대한 FFT 분석으로써 보상후 75[Hz]의 토크리플만이 비교적 적은 값으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 그림5(c)는 퍼지룰에 의해 턴-오프각을 조절할 경우 모터에 투입되는 전압 및 전류, 그리고 인덕턴스를 나타내고 있다. 이상의 시뮬레이션 결과로부터, 소호시점을 길게 주었을 경우 역방향 토크에 의해 다양한 주파수 범위에 걸쳐 토크리플이 발생하며, drag force에 의해 추진력이 약화되는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서 턴오프각을 퍼지룰에 의해 설정하여 광범위한 모터속도범위에서 뿐만 아니라 부하외란에 대해서도 토크리풀을 저감시킬 수 있는 방식을 다루었다. 이러한 방식의 우수성을 확인하기 위해서, 기존의 스위칭 설정 방식과 퍼지룰을 이용하여 턴오프각을 조절하는 방식을 비교하였다.

시뮬레이션 결과는 제안된 턴-오프각 설정 방식은 기 설정된 최적의 턴 오프각을 이용하므로써 토크리풀을 효과적으로 줄일 수 있는 보안관계에 있음을 LSRM의 속도 및 토크리풀 주파수 스펙트럼을 통하여 분석 및 확인하였다. 따라서, 제안된 방식은 토크 검출기를 사용하지 않고 토크리풀을 저감시키므로써, 토크 리풀 보상기를 간단하게 구성할 수 있으며, 신뢰성을 높일 수 있다.

향후 보다나은 결과를 얻기 위해서는 퍼지로직 보상 기에 자기동조 프로세싱 기법을 도입하는 것이 필요하다고 판단된다.

[참 고 문 현]

- [1] R. C. Kavanagh, J.M.D. Murphy, and M.Egan, "Torque ripple minimization in switched reluctance drives using self-learning techniques", in Proc.IEEE IECON'91, pp.289-294
- [2] B.K.Bose, T.J.E.Miller, P.Szczesny, and W.Bicknell, "Microprocessor control of switched reluctance motor," IEEE Trans. Ind. Electron., vol.IE-22, pp.708-715,Aug.1986
- [3] R.Ortmann and H.P.Schoner, "Turn-off angle control of switched reluctance motor for optimum torque output," in PROC. EPE'93, 1993, pp.20-25.
- [4] P.C.Kjaer, P.Nielsen, L.Andersen, and F.Blaabjerg, "A new energy optimizing control strategy for switched reluctance motors," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 31, pp.1088-1095, Sept./Oct. 1995
- [5] J.L. Domingos, D.A. Andrade, M.A.A.Freitas, H.De Paula, "A New Drive Strategy for a Linear Switched Reluctance Motor," IEEE, pp.1714-1719, Febrt. 2003.
- [6] L.X. Wang and J. Mendel, "Generating fuzzy rules by learning from examples," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. pp.1414-1427, July 1992.