

LSRM의 토크리플 저감에 관한 연구

성호경, 조정민, 이종민, 김봉섭, 유문환
한국기계연구원

A Study on The Torque Ripple Reduction of LSRM

Ho-Kyong Sung, Jeong-Min Jho, Jowng-Min Lee, Bong-Sub Kim, Moon-Hwan Yu
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]-[3]. 그리고 그중 몇몇 논문에서 턴-오프 각을 조절하여 토크 리플을 줄이기 위한 방법들이 보고되었다. [4]에서는 초기에 다루어지던 간단한 제어방법이 소개되고 있다. 최적 토크에 대한 턴-오프각을 결정하는 분석적인 방법은 [5]에 제시되었다. 최근에는 여러 가지 동작모드를 선택함으로써 모터가 최대 효율, 최대 토크 또는 최소의 토크 맥동을 발생시키도록 하는 논문이 [6]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, 신뢰성도 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 토크 리플

H-브리지 컨버터에서, 전류시 LSRM의 상전류는 식(1)과 같다.

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

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

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

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

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

식(3)에서는 (1)와(2)가 이용되었다. 방정식(3)은 R_x 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 제어가능함을 나타낸 것이다. 즉 특정 속도와 특정전류에서 턴-오프 각을 조절하면 토크리플이 최소화되는 각각의 토크리플 최소점이 존재한다는 것을 나타낸다.

3. 턴-오프각 보상에 의한 토크리플저감

LSRM은 초기에 실험적으로 얻어진 적절한 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.

$$\theta_{off} = \theta_{off|initial} + \Delta\theta \quad (4)$$

식(4)으로부터 알 수 있듯이 $\Delta\theta$ 값은 $\Delta\theta(\omega, i)$ 로 결정하게 된다. 여기에서 전류 지령치 i 는 전류제어기가 델타변조 전류제어기를 이용함으로써 지령전류 r 으로 대체할 수 있다. 그래서 $\Delta\theta$ 값은 $\Delta\theta(\omega, r)$ 으로 주어질 수 있다. 이러한 함수관계는 LSRM의 비선형모델을 이용한 시뮬레이션으로부터 구할 수 있다. 따라서 시뮬레이션을 통하여 다양한 값의 모터속도 v_m 과 전류 r 에 대하여, 토크리플을 줄일 수 있는 상응한 $\Delta\theta$ 를 구한다.

3.1 보상관계의 설정

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

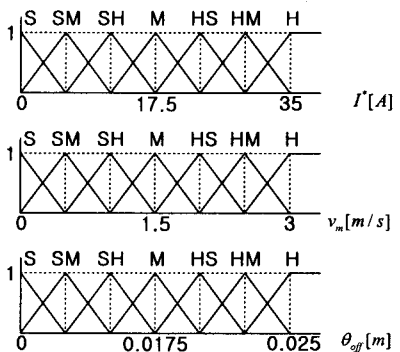


그림 1(a) 전류 및 속도에 대한 퍼지화

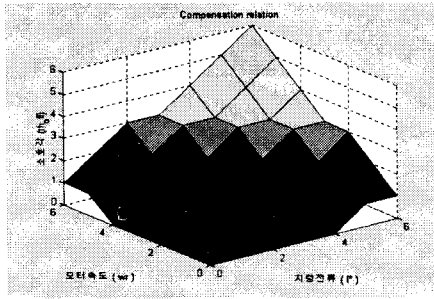


그림 1(b) 지령전류와 속도에 대한 보상관계
그림 1 퍼지세트입력과 보상각

여기에서 인용된 알고리즘은 [8]의 Wang에 의해 제시된 학습알고리즘이다. 이러한 알고리즘은 입력변수 I^* , v_m 가 이등변 삼각형 형태의 멤버쉽 함수에 의해 그림 1(a)과 같이 균등하게 분리된 멤버언어로 변환된다. 출력변수 θ_{off} 는 단일출력의 멤버언어로 표현된다. 이러한 알고리즘은 2개의 퍼지화된 멤버변수와 일치하는 정도를 선택하는 t-norm max법을 이용한다. 퍼지 모델에 있어서 그 규칙은 표 1과 같은 형태로 표현할 수 있다. 이러한 퍼지 입력변수와 출력변수와의 출력관계는 그림 1(b)과 같다.

표 1 턴-오프각 보상을 위한 퍼지룰

| I^* \ v_m | S | SM | SH | M | HS | HM | H |
|---------------|----|----|----|----|----|----|----|
| S | S | S | S | S | S | SM | SM |
| SM | S | S | S | S | SM | SM | SH |
| SH | S | S | S | SM | SM | SH | M |
| M | S | S | SM | SM | SH | M | M |
| HS | S | SM | SM | SH | M | M | HS |
| HM | SM | SM | SH | M | M | HS | HM |
| H | SM | SH | M | M | HS | HM | H |

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

$$\theta_{off} = \frac{\sum_{l=1}^c \mu(R^{(l)}) \cdot v^{(l)}}{\sum_{l=1}^c \mu(R^{(l)})} \quad (5)$$

식(5)에 의해 출력된 값은 scaling factor에 의해 θ_{off} 값으로 변환된다.

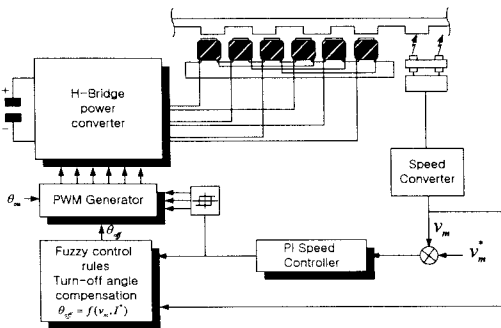


그림 2. 제안된 보상기의 블록다이어그램

그림 2는 제안된 보상기를 적용한 전체제어 시스템 블록도를 나타내고 있다. 시스템의 구성은 LSRM과 전력변환부 그리고 제어부로 구성되어 있다. 제어부는 LSRM으로부터 속도를 검출 받아 속도제어기에 입력되고 이 값은 지령속도와 비교되어 지령전류를 산출한다. 이 값은 델타변조 전류제어기법에 의해 전류 제어되고, 턴-오프 시점은 보상각 회로의 출력을 $\theta_{off} |_{initial}$ 값에 더한 값으로 LSR 드라이브 시스템에 턴-오프각을 결정하게 된다. 이렇게 만들어진 제어 신호는 H브리지 컨버터에 입력되어 전력변환기를 턴-오프 하게 된다.

본 연구에서는 제안된 토크리플 저감 방식의 타당성을 확인하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다.

4. 시뮬레이션 및 고찰

그림 3~그림 5의 시험조건은 LSRM 모터의 지령속도를 3[m/sec]로 하고, 기동 후 2초 후 300[Nm]의 부하를 투입한 경우 보상각의 변환에 대한 결과이다.

그림 2의 (a),(b)는 보상각 $\Delta\theta$ 를 0[m]으로 고정하였을 경우에 특성 파형으로써, 그림 3(a)는 모터의 속도와 보상각 $\Delta\theta$ 를 나타내고 있으며, 그림 3(b)는 모터의 토크 및 주파수 스펙트럼의 결과를 나타낸다. 그림 3(a)로부터, 보상각 $\Delta\theta$ 를 0으로 고정하였을 경우, 지령한 속도를 충실하게 추종하는 것을 알 수 있으나, 그림 3(b)의 토크에 대한 FFT 분석으로부터 75[Hz], 150[Hz]의 토크리플이 비교적 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

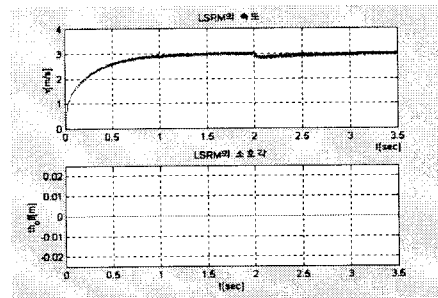


그림 3(a) 모터속도 및 보상각 ($\Delta\theta=0$)

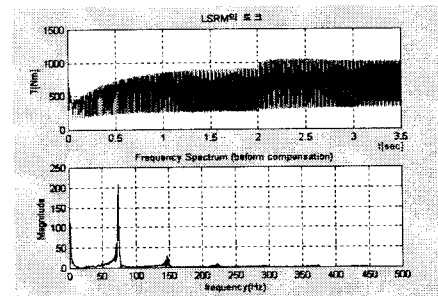


그림 3(b) 토크 및 주파수 스펙트럼 ($\Delta\theta=0$)

그림 4의 (a),(b)는 보상각 $\Delta\theta$ 를 0.02[m]으로 고정하였을 경우에 특성 파형 나타내고 있다. 그림 4(b)의 토크에 대한 FFT 분석으로부터 보상각 $\Delta\theta$ 를 0.02[m]으로 고정하였을 경우 20[Hz], 50[Hz], 75[Hz], 150[Hz]의 토크리플이 비교적 적게 넓은 주파수 대에 나타나고 있으며, 그림 4(a)으로부터, 300[Nm]의 부하가 투입된 이후 지령한 속도를 추종하지 못하는 것을 알다. 즉, 소호시점을 길게 주었을 경우 drag force에 의해 다양한 주파수 범위에 걸쳐 토크리플이 발생시킬뿐만 아니라 추력에도 영향을 주어 추진력의 평균값이 저하되는 것을 알 수 있다.

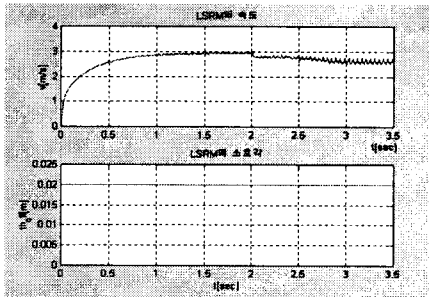


그림 4(a) 모터속도 및 보상각 ($\Delta\theta=0.02$)

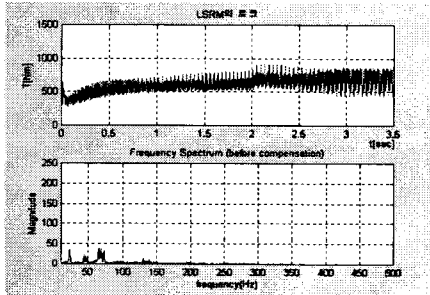


그림 4(b) 토크 및 주파수 스펙트럼 ($\Delta\theta=0.02$)

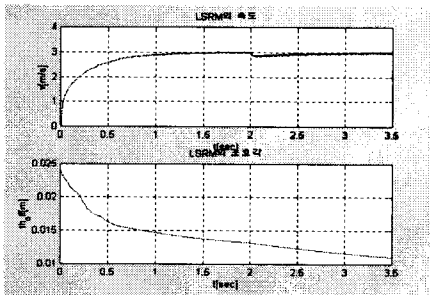


그림 5(a) 모터속도 및 보상각(보상후)

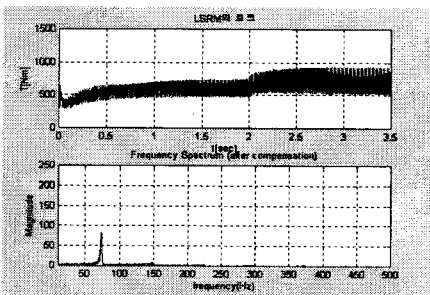


그림 5(b) 토크 및 주파수 스펙트럼(보상후)

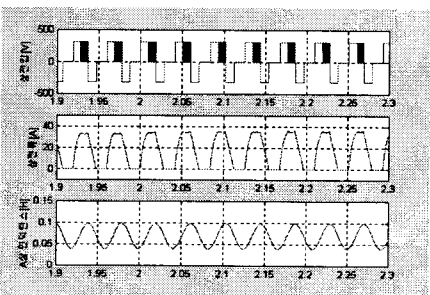


그림 5(c) 스위칭전압, 전류 및 인덕턴스

그림 5의 (a),(b)는 보상각 $\Delta\theta$ 를 off-line에서 기설정된 퍼지룰에 의해 보상각을 보정하였을 경우에 특성 파형 나타내고 있다. 그림 5(a)는 지령속도에 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, 기동후 턴 오프 각을 적은 값으로 하여 drag force 및 토크 리플을 줄여, 추력의 평균값을 상승시키는 것을 알 수 있다. 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 주파수범위에 걸쳐 토크리플이 발생하며, drag force에 의해 추진력이 약화되는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서 제안된 토크리플 저감방식은 광범위한 모터속도범위에서 뿐만 아니라 부하외란에 대해서도 토크리플을 효과적으로 저감시킬 수 있다. 이러한 특성을 확인하기 위해서 LSRM 모터 및 퍼지룰을 수학적 모델링하여 그 상호관계를 시뮬레이션을 하였고, 이를 통하여 제안된 턴-오프각 설정 방식은 LSRM에 대하여 토크리플을 줄일 수 있는 보안관계에 있음을 LSRM의 속도 및 토크리플 주파수 스펙트럼을 통하여 분석 및 확인하였다. 또한 토크 검출기를 사용하지 않고 토크리플을 저감시키므로써, 토크 리플 보상기를 간단하게 구성할 수 있으며, 신뢰성을 높일 수 있다.

향후 보다 나은 결과를 얻기 위해서는 퍼지룰 보상에 자기동조 프로세싱 기법을 도입하는 것이 필요하다고 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [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] D.S.Reay, M.M.Moud, T.C.Green, and B.W.Williams, "Switched reluctance motor control via fuzzy adaptive systems", IEEE Contr.Syst. Mag., vol. 16, pp.200-206, June 1995
- [3] S.Mir, M.E.Ebulbuk, and I.Husain, "Torque-ripple minimization in switched reluctance motors using adaptive fuzzy control,"IEEE Trans. Ind. Applicat.,vol.35,pp.461-468, Mar./Apr.1999
- [4] 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
- [5] R.Orthmann and H.P.Schoner, "Turn-off angle control of switched reluctance motor for optimum torque output," in PROC. EPE'93, 1993, pp.20-25.
- [6] 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
- [7] L.Henriques, L.Rolim, W.Suemitsu, P.Costa Branco, and J.Dente, "Torque ripple minimization in a switched reluctance drive by neuro-fuzzy compensation," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 36, pp.3592-3594, Sept. 2000.