

차량용 스위치드 리럭턴스 전동기의 토오크 리플저감

엄기명*, 송병섭*, 김연충*, 안정준*, 이정호*, 원충연*, 김덕근**
 성균관대학교*, (주)코모텍**

Torque Ripple Reduction of Switched Reluctance Motors for the Vehicle

K. M. EOM*, B. S. SONG*, Y. C. KIM*, J. J. AHN*, J. H. LEE*, C. Y. WON*, D. G. KIM**
 *Sung Kyun Kwan University, **KOMOTEK Co. LTD

Abstract - Switched Reluctance Motors(SRM) attract much attention in motor because they are reliable and inexpensive. With advance in power electronics and high-speed processors, the performance of SRM has been enhanced greatly. But because of its geometric and magnetic structure, the switched reluctance motor naturally creates torque ripples during the commutations of the currents from a supplied phase to an other one. This paper presents the torque ripple reduction using hysteresis current control among of current control techniques.

여기서, $i(\theta)$: 상권선의 전류, $L(\theta)$: 인덕턴스로 나타낼 수 있고, 또한 수식 (2)는

$$T = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i(\theta)^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (3)$$

로 표현될 수 있다. 여기서 SRM의 발생토오크는 전류의 제곱에 비례하고 위치각에 대한 인덕턴스의 기울기에 비례함을 알 수 있다.[1] 그림 1은 회전자 위치에 따른 토오크 발생과정을 보여준다.

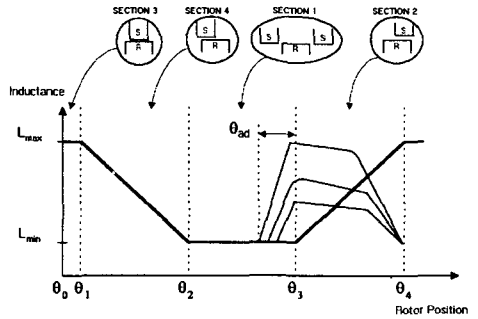


그림 1. 회전자 위치에 따른 토오크 발생과정

토오크 발생구간인 인덕턴스의 가변 구간에서 인덕턴스의 변화량이 일정하고, 전류변화가 없는 Flat-top 전류를 갖게 조정하면 전류의 변화량(di/dt)이 0이 되어 토오크의 리플성분을 줄일 수 있게 되고 일정속도로 운전을 할 수 있다.[2]

본 논문에서 사용된 SRM의 FEM(유한요소 해석법)을 이용해서 얻은 회전자 위치 및 전류의 크기에 따른 자기 인덕턴스는 그림 2와 같다.

1. 서 론

Switched Reluctance Motors(SRM)는 이중 돌극형 구조이고 기계적으로 견고하며 고속운전이 용이하고 다른 전동기들보다 단위 체적당 토오크 및 효율이 우수한 전동기로 알려져 있다. 하지만 SRM은 전류의 크기와 회전자와 고정자의 위치에 따라 인덕턴스의 비선형적인 특징으로 인하여 토오크 리플과 소음이 크다는 단점을 가지고 있다. 이로 인하여 SRM의 실용화에 큰 장애가 되어 왔다. SRM의 토오크 리플을 줄이는 방법으로서는 전동기의 설계 측면과 제어 측면이 있다. 일반적으로 제어의 관점에서 많은 연구가 진행되고 있는데 이러한 방법에는 전압제어와 전류제어 기법이 있다. 제어 측면에 있어서 전압제어를 이용한 온-오프로 전류의 상승을 억제하는 쇼핑에 의한 방법보다는 전류제어를 이용한 방법이 토오크 리플을 많이 줄일 수 있다.[1]

본 논문에서는 여러 가지 전류제어 기법중에서 일반적으로 많이 사용되고 있는 히스테리시스 전류제어 기법을 사용하여 토오크 리플을 줄이고자 한다. 그리고 SRM에 있어서 위치를 판별하기 위한 위치센서로서는 증분형 엔코더를 사용하였다.

2. 본 론

2.1 SRM의 인덕턴스 변화와 토오크 발생
 SRM의 전압방정식은

$$V = Ri(\theta) + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (1)$$

$$= Ri(\theta) + L(\theta) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega$$

여기서 첫째 항은 고정자 권선의 저항에 의한 성분이고, 둘째 항은 자기회로에 축적되어지는 에너지의 변환성분이며, 셋째 항이 기계적 에너지로 변환되는 성분이다.

이 때의 토오크 식을 구하기 위하여 Coenergy W_c 의 개념을 도입하면

$$W_c = \frac{1}{2} i(\theta)^2 \cdot L(\theta) \quad (2)$$

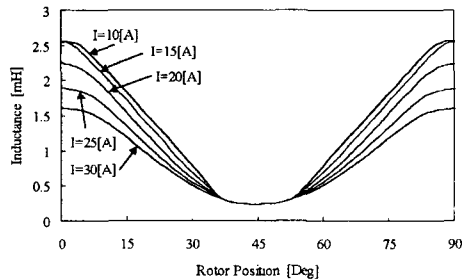


그림 2. 회전자각에 의한 자기인덕턴스

2.2 히스테리시스 전류제어

SRM의 가변속 구동을 위한 제어 방법은 크게 쇼핑에 의한 제어와 각도제어로 나눌 수 있다. 본 논문에서는

쇼핑에 의한 제어와 각도제어를 모두 사용하였다. 쇼핑에 의한 제어로서는 전압 PWM 방식과 전류제어 쇼핑 방식중에서 히스테리시스 전류제어 쇼핑의 이용하여 토오크 리플을 줄이고자 한다. [1][5]
 그림 3과 같이 히스테리시스 전류제어기는 기준 전류값과 전류검출기를 통하여 채환된 순시 전류값을 비교하여 이에 따라 스위치를 온-오프하는 방식이다. [3][4]

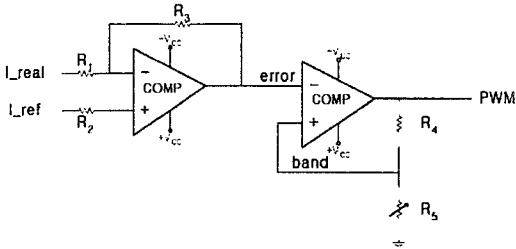


그림 3. 히스테리시스 전류제어기

히스테리시스 밴드폭을 결정하는 Upper-Threshold 전압과 Lower-Threshold 전압은 (4)와 같은 전압 방정식으로 구해진다.

$$V_{UT} = \frac{R_5}{(R_4 + R_5)} (+V_{sat}) \quad (4)$$

$$V_{LT} = \frac{R_5}{(R_4 + R_5)} (-V_{sat})$$

여기서 히스테리시스 전압 V_H 는

$$V_H = V_{UT} - V_{LT} \quad (5)$$

이다. 이때의 PWM 출력은 그림 4와 같다. [3]

그림 5에서와 같이 히스테리시스 전류제어는 SRM의 각상에 흐르는 전류를 평활하게 흘려줄 수가 있기 때문에 전압 PWM 방식에 비해 토오크 리플을 저감시킬수 있는 장점이 있다. 또한 이 경우에는 소프트 쇼핑과 하드쇼핑 방식이 모두 가능하다. [4]

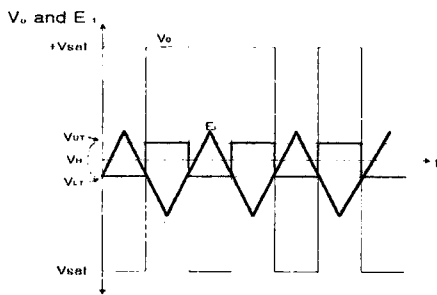


그림 4. 히스테리시스 출력파형

2.3 각도제어

그림 6과같이 기본속도 이상의 고속 또는 중부하시에는 구동하기에 충분한 토오크를 얻기 위하여 어드밴스각과 드웰각을 조절하여 사용하는 방식이다. 즉 어드밴스각을 조절하여 점호시점을 앞당겨 충분한 전류의 상승시간을 도모하고, 드웰각을 조절하여 토오크 발생영역을 최대한 이용하여 역토오크가 발생하는 구간전에 전류의 크기를 최소화시켜 역토오크 발생을 억제시켜서 토오크 리플을 감소시키는 방법이다. [1]

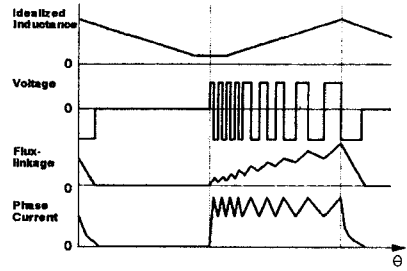


그림 5. 히스테리시스 전류제어의 파형

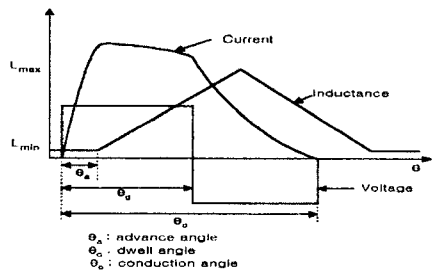


그림 6. SRM의 각도제어

2.4 시스템 구성

그림 7은 PSIM을 이용한 시뮬레이션 회로도를 나타내고 있다. 그림 8은 전체시스템 구성도이다. 전원회로부에서 입력전원은 직류 파워서플라이를, 컨버터는 효율 및 제어성능이 우수한 비대칭 브리지 컨버터를 사용하였다. 제어회로부에서 속도제어를 위해서 PI제어기, 초기기동을 위하여 80C196KC의 PORT1을 사용하였다.

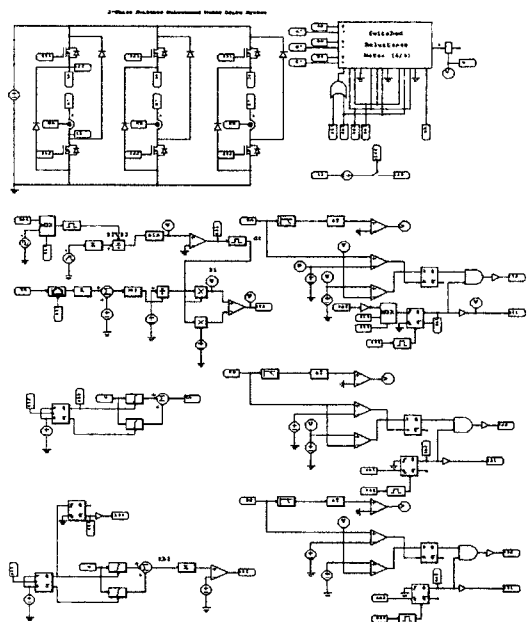


그림 7. PSIM 시뮬레이션 회로도

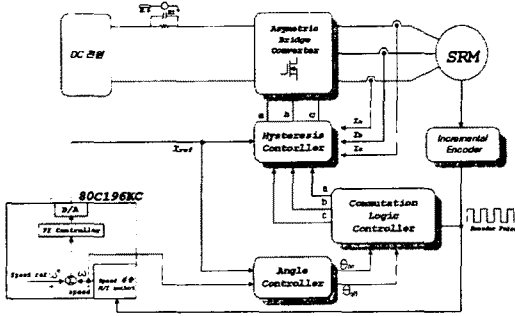


그림 8. 전체 시스템 구성도

2.5 SRM의 PSIM 시뮬레이션 및 실험 결과

시뮬레이션은 PSIM을 이용하여 전압PWM의 방식과 히스테리시스 전류제어를 비교하였다. 시뮬레이션에 있어서 입력전원측 DC링크 전압의 맥동은 무시하였고, SRM의 자기포화는 없다고 가정하였으며, 컨버터에서 스위치 및 다이오드는 이상적인 소자를 사용하였다.

표 1. 실험에 사용된 전동기 상수

상수	3상	정격속도	2200rpm
출력	160[W]	권선저항	0.04166[Ω]
정격전압	12[Vdc]	최대 인덕턴스	2.332[mH]
정격전류	14.55A	최소 인덕턴스	0.241[mH]
고정자 극수	6 pole	고정자 극호	30[Mdeg]
회전자 극수	4 pole	회전자 극호	32[Mdeg]

그림 9는 전압PWM 방식이고 그림 10은 히스테리시스 방식의 시뮬레이션 결과를 보이고 있다.

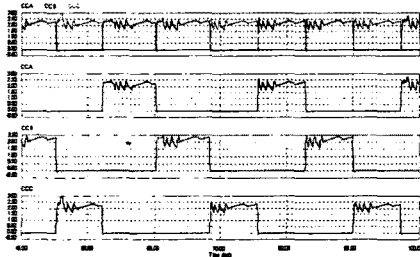


그림 9. 전압PWM 제어에 의한 정상상태 상전류 파형 (CCA: A상, CCB:B상, CCC:C상)

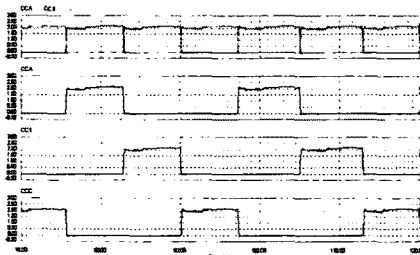


그림 10. 히스테리시스 전류제어에 의한 정상상태 상전류 파형 (CCA: A상, CCB:B상, CCC:C상)

그림 11은 히스테리시스 전류제어의 경우 상전류 파형을 나타내고, 그림 12는 히스테리시스 전류제어시의 상전류와 그때의 게이트 신호를 나타내고 있다.

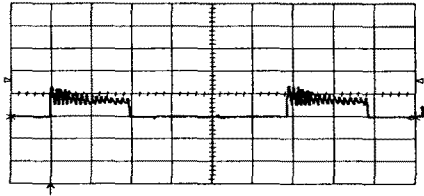


그림 11. 히스테리시스 전류제어에 의한 정상상태 상전류 파형 (time=5ms/div, 2A/div)

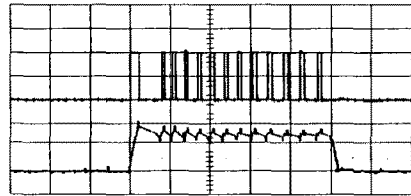


그림 12. 게이트 신호 및 상전류 확대파형 (time=10ms/div, 0.5V/div, 0.5A/div)

3. 결 론

본 논문에서는 차량의 라디에이터 쿨링팬이나 점화용 Starter로 사용하기 위한 것으로 6/4 pole, 160[W]급을 사용하였다. SRM의 위치정보를 알기 위해서 중분형 엔코더와, 초기의 위치 및 commutation을 위해서 카운터 회로를 사용하였다. 그리고 히스테리시스 전류제어 기법을 사용하여 상전류의 정상상태에서의 토크 리플을 저감하였다. 어드밴스각을 통하여 초기에 전류의 상승을 도모하였고, 부토크 부분은 두상의 전류중첩을 통하여 토크 리플을 저감시켰다. 디지털 시뮬레이션과 실험을 통하여 제어기법의 우수성을 확인하였다.

본 연구는 산업기술개발사업의 1차년도 결과의 일부임 (1999.4.~2000.3.)

[참 고 문 헌]

- [1] T.J.E Miler, "Switched Reluctance Motor and Their Control", Oxford University Press, 1993
- [2] Duco W.K. "A Generalised Approach to Torque and Current Computation in Switched Reluctance Motors", EPE, pp. 547~551 1997.
- [3] K. Russa, I. Husain, ME. Elbuluk, "Torque-Ripple Minimization in Switched Reluctance Machines Over a Wide Speed Range", IEEE IAS pp.668~671, March/April, 1998.
- [4] Robert F. Coughlin, Frederick F. Drisoll, "Operational Amplifiers & Linear Interated Circuit", Prentice Hall Career & Technology press, p76~93, 1998.
- [5] H. van der Broeck, D. Gerling and E. Bolte, "Switched Reluctance Drive and PWM Induction Motor Drive Compared for Low Cost Applications", IEEE, 5th European Conf. EPE'93, Vol. 6, pp.71~76, 1993.