

SRM의 회전자 구조에 따른 토크특성 고찰

백원식*, 최경호*, 김민회**, 김동희*
 영남대학교*, 영남이공대학**

A Study on the Torque Characteristic of SRM Drive with Rotor Geometry

Won-Sik Baik*, Kyeong-Ho Choi*, Min-Huei Kim**, Dong-Hee Kim*,
 *Yeungnam University, **Yeungnam College of Science & Technology

ABSTRACT

The low cost, ruggedness, and reliability of switched reluctance motor(SRM) drive makes them potentially suitable for many industrial applications. But the generation of a high-level torque ripple and the acoustic noise restricts the practical application range. This paper analyzes the torque characteristic of SRM according to rotor pole arc and the effect of turn-on and turn-off angles to reduce the torque ripple. The simulation result shows the different torque characteristic of each cases.

Keywords : SRM, Pole Arc, Output Torque, Advance Angle

1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 고정자와 회전자 모두가 돌극형 구조를 하고 있으며 각기 다른 갯수의 극을 가진다. 이 구조는 비 선형적인 자기특성으로 인하여 실제 운전특성이 회전자의 형상이나 위치에 따라 현저히 다르게 나타나며, 토크 리플과 소음등이 실용화에 대한 어려움으로 지적되고 있어 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

따라서, SRM을 보다 유용하게 활용하기 위해서는 우선적으로 전동기의 특성 해석이 이루어져야 하며, 그 분석을 통해서 적절한 제어나 운용이 따라야 한다.

본 논문에서는 회전자 극호각과 위치변화에 따른 출력 토크변화를 고찰하기 위하여, 6/4극 3상 SRM의 고정자 극호각은 고정시키고 회전자 극호각을 변화시키면서 그에 따른 특성을 분석하였다.

2. SRM의 동작 원리

6/4극 3상 SRM은 회전자 위치각에 따른 인덕턴스 변

화와 전류에 의해 토크가 발생한다. 한 상의 고정자 권선이 여자되면 회전자는 여자된 고정자와 정렬이 되려는 방향으로 토크가 발생하여 움직이게 되고, 완전히 정렬되기 이전에 인가된 전압을 오픈한 후 다음상에 순차적으로 여자시킴으로써 연속적인 회전력을 얻게 된다. SRM의 한 상당 전압방정식은 다음 (1)식과 같다.

$$V=L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{d\theta} \omega \quad (1)$$

여기서, V 는 인가전압, L 은 고정자에서 유기되는 인덕턴스이고, $\frac{dL}{d\theta}$ 은 회전자 위치에 따른 인덕턴스 변화량이며, ω 는 회전자의 회전 각속도이다. 회전자 극수가 4개일 때, 한 상당 인덕턴스의 변환주기는 90도가 되며, 자기포화를 무시하고 전류의 크기와 관계없이 인덕턴스가 항상 일정한 최대값 L_{max} 와 최소값 L_{min} 을 갖는다고 가정하면 회전자 위치에 따른 인덕턴스의 변화는 다음 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{L_{max} - L_{min}}{\beta_s} \quad (2)$$

여기서, β_s 는 고정자 극호각을 나타낸다. 3상 SRM의 합성토크는 식 (3)과 같다.

$$T = \frac{1}{2} i_a^2 \cdot \frac{dL(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \cdot \frac{dL(\theta-30^\circ)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \cdot \frac{dL(\theta-60^\circ)}{d\theta} \quad (3)$$

토크가 전류의 제곱에 비례하므로 상 전류의 방향과 무관하게 토크를 발생시킬 수 있으며, 회전자 위치에 따

큰 인덕턴스 변화에 따라 토크의 부호가 달라지므로 회전방향에 대하여 역방향의 토크가 발생하는 회전자의 위치각도가 존재한다. 그러므로 정 방향의 토크를 연속적으로 발생하고 부 토크의 발생으로 인한 효율 저하를 억제하기 위해서는 적절한 스위칭 시간의 조정이 중요하다. 선형적인 부하를 갖는 전동기의 기계방정식은 식 (4)와 같다.

$$T = T_L + B\omega + J\frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

여기서, T_L 은 부하토크, B 는 마찰계수, ω 는 회전속도, J 는 관성모멘트를 나타낸다.

3. SRM의 구조

3상 6/4극 SRM의 구조는 그림 1과 같다. SRM은 구조적으로 릴럭턴스 토크를 최대하기 위하여 자극의 모양이 모두 돌극형이며, 고정자에만 권선이 감겨져 있으므로 전동기 자체의 관성이 적고 관성에 대한 토크비가 다른 전동기에 비해 높다. 회전자가 간단한 적층 규소강판으로 되어있기 때문에 기계적으로 견고하고, 고속회전과 고온등의 열악한 운전조건에서도 신뢰성이 높다.

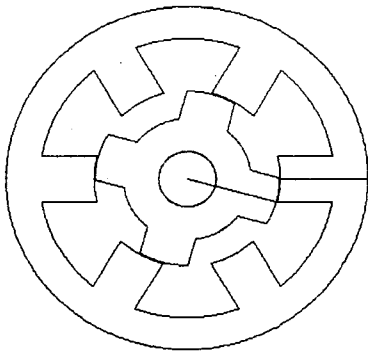


그림 1 6/4극 SRM의 구조

4. SRM의 여자 각도

그림 2는 회전자 위치각에 따른 이상적인 인덕턴스 프로파일과 스위칭에 의한 여자전류의 파형을 나타내었다. 인덕턴스 프로파일에는 회전자 위치에 따른 인덕턴스의 최소부분, 상승부분, 최대부분, 감소부분이 나타나며, 상승부분에서는 인덕턴스의 증가로 인하여 전류의 확립이 충분하지 못하므로 그 이전에서 스위치를 턴온해야 한다. 전동기가 고속이나 중부하로 운전될 경우에는 충분한 전류상승시간을 확보하기 위해 부하에 따라서 어드밴스각을 적절히 조정해야한다. 인덕턴스가 감소하는 시점에서 전류가 존재하면 부토크가 발생하게 되며, 부 토크의 발생을 억제하기 위해서는 감소부분 이전에 전류가

완전히 소호되어야 한다. 실제로 전류를 소호할 때 인덕턴스로 인한 전류의 소호시간이 길어지므로 어느 정도의 소호시간을 두고 스위치를 오프해야 한다. 또한 최대부분에서는 인덕턴스의 변화가 없기 때문에 토크가 발생하지 않으므로 고효율 운전을 위해서는 최대부분이전에 스위치를 오프한다.^[1]

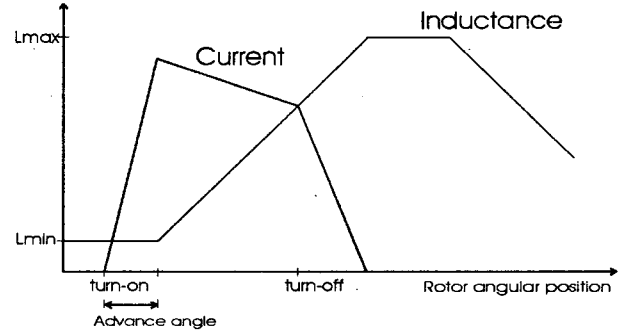


그림 2 SRM의 여자각도

5. 회전자 구조에 따른 여자특성

그림 3에는 로렌슨(Lawrenson)이 발표한 6/4극 3상 SRM의 가능한 삼각형(feasible triangles)을 나타내었다. 고정자 극호각이 30도일 경우 가능한 회전자 극호각은 30도에서 60도 사이임을 알 수 있다.^[2] 그림 4에는 3상 6/4극 SRM의 회전자 극호각 크기에 따른 인덕턴스 프로파일을 나타내었다. 회전자 극호각이 커질수록 인덕턴스의 최소부분은 짧아지고 최대부분은 길어진다. 최대출력을 높이기 위해서는 소호되는 전류가 부토크의 영향이 미치지 않는 범위까지 여자시간을 최대한 크게 하는 것이 좋으며, 회전자 극호각의 크기가 커질수록 유효토크가 발생하는 스위칭각도인 토크각도가 커지게 된다. 6/4극 3상 SRM은 구조적으로 토크답이 나타나게 되는데, 고정자와 회전자 극호각을 넓혀서 줄일 수 있으나 이로 인해 슬롯면적을 감소시키고 동손을 증가시키게 된다. 따라서 토크 리플 저감과 효율향상을 위해서는 적절한 고정자 및 회전자 극호각을 선정함이 중요하다.

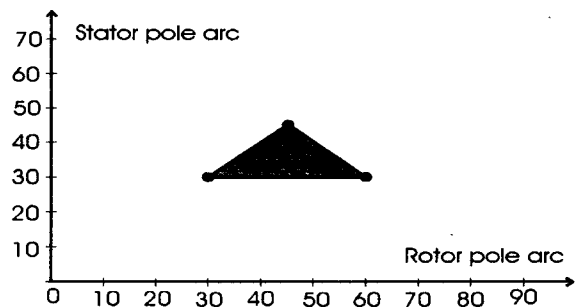
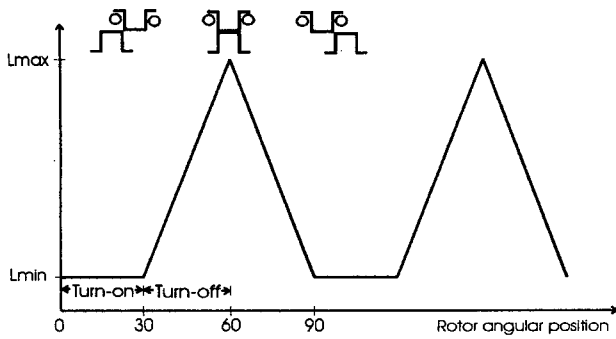
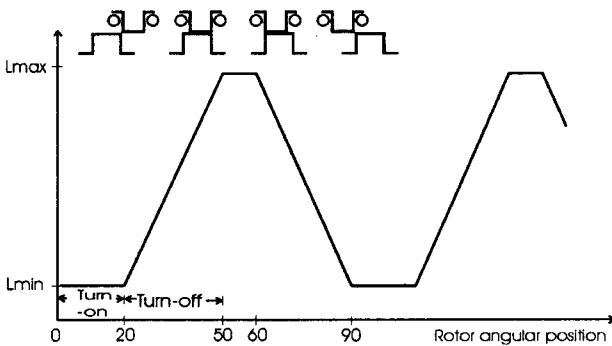


그림 3 6/4극 3상 SRM의 가능한 삼각형

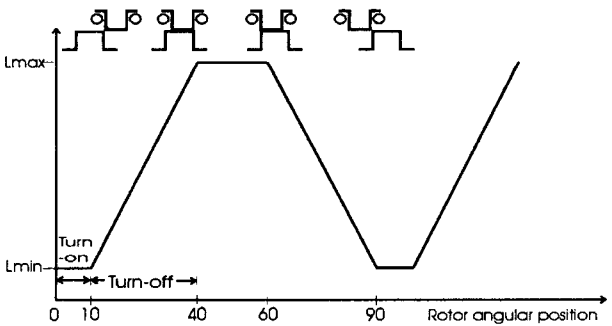
6. 시뮬레이션 결과 및 고찰



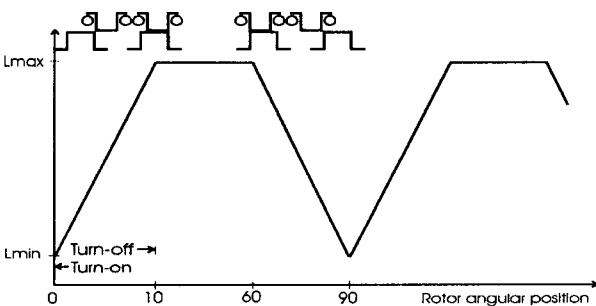
(a) 회전자 극호각 30도



(b) 회전자 극호각 40도



(c) 회전자 극호각 50도

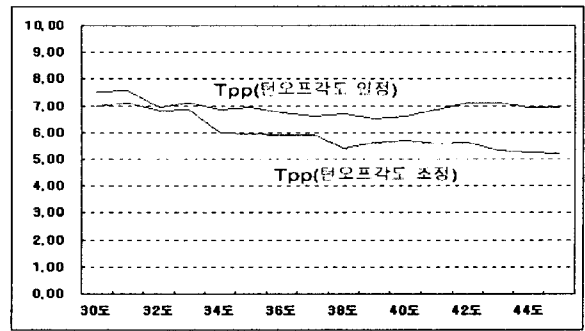


(d) 회전자 극호각 60도

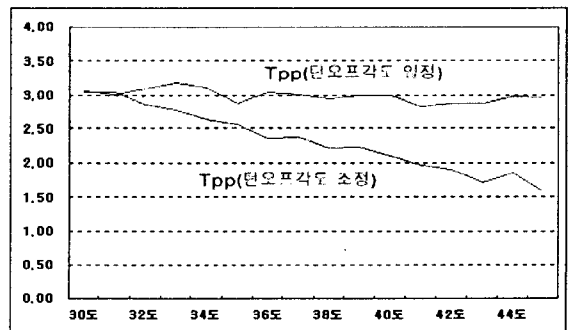
그림 4 회전자 극호각에 따른 인덕턴스 프로파일

6/4극 SRM의 가능한 회전자 극호각은 60도까지이지만, 충분한 전류상승시간을 확보하기 위해서는 고정자 극호각과 회전자 극호각이 거의 같아야 한다. 본 논문에서는 회전수 2000[rpm] 부하토크 1[Nm]의 조건으로 30도에서 45도까지 회전자 극호각을 1도씩 변화시키면서 시뮬레이션을 수행하였다. 사용된 전동기 모델은 1마력 3상 6/4극으로 하였다. 그림 5에는 회전자 극호각에 따른 토크 특성을 비교하였다. 회전자 극호각에 대한 각 경우의 시뮬레이션 데이터로부터 초기 기동시를 제외한 토크 최대값과 최소값의 평균을 구한 후 두 값의 차를

T_{PP} (Torque peak-to-peak)로써 나타내었다. (a)는 15도의 어드밴스각을 적용한 경우, 턴오프각을 일정하게 한 경우와 회전자 극호각에 따라 턴오프각을 조정한 경우의 토크 특성을 비교하였다. 회전자 극호각이 커짐에 따라 토크 특성이 개선됨을 확인할 수 있었다. (b)에는 5도의 어드밴스각을 적용하고 턴오프각을 일정하게 한 경우와 턴오프각을 조정한 경우의 토크 특성을 비교하였다. (a) 경우에 비해 전반적으로 토크특성이 개선되었음을 알 수 있고, 회전자 극호각에 따라 턴오프각을 조정함으로써 토크 리플이 감소함을 알 수 있었다. 그림 6에는 5도의 어드밴스각을 적용하고 턴오프각을 조정한 경우, 회전자 극호각이 30, 35, 40, 45도에서의 실제 토크 출력 파형을 나타내었다. 파형으로부터 회전자 극호각이 커짐에 따라 리플이 감소함을 알 수 있다.



(a) 15도의 어드밴스각을 적용한 경우



(b) 5도의 어드밴스각을 적용한 경우

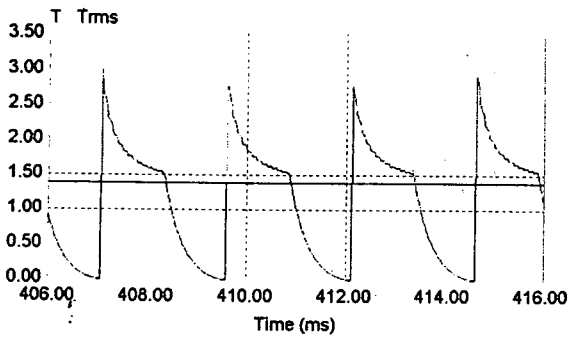
그림 5 회전자 극호각에 따른 토크 특성 비교

7. 결 론

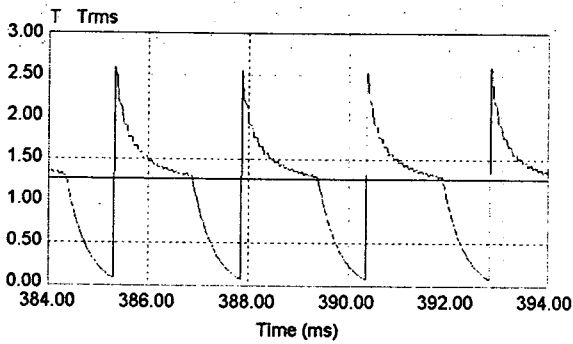
본 논문에서는 6/4극 3상 SRM의 회전자 극호각에 따른 출력토크특성에 관해 연구하였다. 회전자 극호각의 크기에 따른 여자시간의 특성을 시뮬레이션을 통하여 응답특성을 조사하였다. 토크 리플을 줄이기 위해서는 출력 가능한 허용 범위내에서 어드밴스각을 작게 하고, 역토크가 발생하지 않는 범위내에서 스위치 턴오프 각을 크게 하는 것이 좋을 수 있었다. 회전자 극호각이 클수록 인덕턴스의 최대부분이 길어서 전류소호시간의 여유를 가지게 되며, 이로 인해 턴 오프 각을 크게 해서 토크 맥동을 줄일 수 있었다.

참 고 문 헌

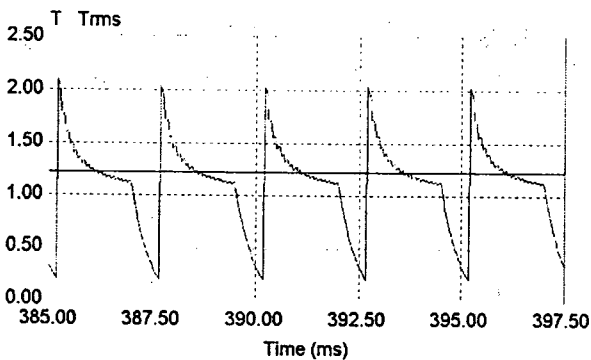
- [1] T.J.E Miler, "Switched Reluctance Motor and Their Control", Oxford University Press, 1993.
- [2] Lawrenson, P.T. et al, "Variable-speed switched reluctance motors", IEE Proc., Vol. 127, pp. 253~265, 1980.
- [3] 최경호, 백원식, 김동희, 김민희, "SRM의 인덕턴스 및 쇄교자속 변화 특성", 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 156~159, 2001.
- [4] Funda Sahin, H. et al, "Optimum Geometry for Torque Ripple Minimization of Switched Reluctance Motors", IEEE Trans. on EC, Vol. 15, pp. 30~39, March 2000.
- [5] T.J.E Miller et al, "Nonlinear theory of the switched reluctance motor for rapid computer-aided design", IEE Proceeding, Vol. 137, Pt. B, pp. 337~347, Nov 1990.
- [6] R. Rabinovici, "Scaling of switched reluctance motors", IEE Proc.-EPA, Vol. 142, pp. 1~4, Jan 1995.



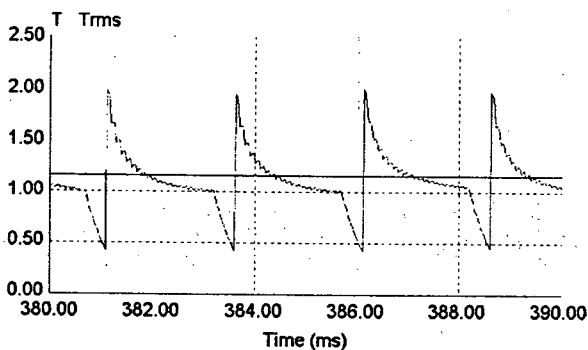
(a) 회전자 극호각 30도인 경우



(b) 회전자 극호각 35도인 경우



(c) 회전자 극호각 40도인 경우



(d) 회전자 극호각 45도인 경우

그림 6 토크 출력 파형 비교