

불균일한 공극길이에서의 스위치드 릴럭턴스 모터 토크 특성

정도영\*, 이상호\*, 오홍석\*\*  
\*삼척대학교, \*\*영남대학교

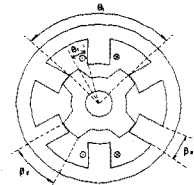
Torque Characteristics of Switched Reluctance Motor in Nonuniform airgap field

Jung Do-Young\*, Lee Sang-Ho\*, Oh Hong-Seok\*\*  
\*Samchok National University, \*\*Yeungnam University

**Abstract** - This paper analyzed the static torque of SRM according to the variation of airgap length using Finite Element Method. The normal and tangential components of flux density are analyzed at uniform airgap field which gap length is 0.3(mm) and nonuniform airgap which gap lengths are 0.2-0.4(mm) and 0.4-0.2(mm). Also their static torques were simulated by using Virtual Work Principle. We expect that their parameters will help for the design of Switched Reluctance Motor.

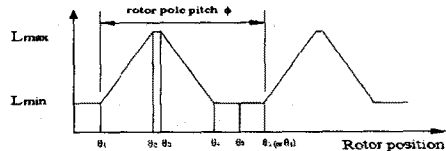
델시커 부-토크를 제거하는 것이 필요하다.

그림 1-1은 전형적인 6/4 SRM의 구조와 인덕턴스 프로필을 나타낸다.



1. 서 론

SRM의 구조적인 특징을 살펴보면, 고정자극에는 일반 직류 전동기의 계자극과 같이 집중권을 사용하지만 철심을 성층하여 만든 회전자에는 권선이 감겨있지 않고, 브러시와 정류자가 없어 구조가 간단하며 고장율이 적어 신뢰도가 높다. 따라서 보지 유지가 쉬울 뿐만 아니라 효율이 높고 토크/전류비가 크다는 장점이 있어 대량 생산시 생산비가 싸게 된다.



최근 10여년 동안 반도체 및 마이크로프로세서의 발달로 SRM의 구동을 위한 컨버터회로에 관한 연구가 많이 이루어져 왔으며, 현재에는 토크 리플저감, 위치센서 없는 구동 등에 관한 연구가 진행되고 있다. 그러나 컴퓨터의 하드웨어와 소프트웨어의 급진적 발달로 전기기기의 해석이 수치해석학적으로 보다 정확하여져 SRM의 구조적인 문제에 접근하여 해석할 필요가 있다.

그림 1-1 전형적인 6/4 SRM의 구조와 인덕턴스 프로파일

회전자와 고정자극이 비정렬위치일 때의 인덕턴스는 최소(L<sub>min</sub>)가 되며, 그림 1-1과 같이 일정한 값을 가진다. 식 (1)에 의하면 인덕턴스가 최소가 되는 동안 토크는 발생할 수 없으므로, 이 기간을 Dead zone이라 한다. 위의 관계를 수치해석학적으로 해석하고자 많은 시도가 이루어져 왔다.[1]-[3] 유한요소법(Finite Element Method)은 전기기기의 수치해석에 가장 많이 사용되는 방법 중에 하나이다.[4]-[8]

자기포화를 무시할 경우, SRM의 순시토크는 식 (1)과 같이 표현된다.

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

유한요소법을 이용하여 토크를 구하는 방법은 맥스웰 응력법(Maxwell stress tensor method)과 가상변위법(Virtual work method) 등이 있다. M. Moallem은 고정자 극과 회전자 극 사이에 균일한 공극인 경우의 정-토크 특성을 맥스웰 응력법으로 해석하였다.[4] 본 논문에서는 가상변위법을 이용하여 SRM의 토크 특성을 해석하고, 정렬위치에서도 토크가 발생하는 모델을 제시하고자 한다.

여기서, T, dL, dθ는 각각 순시토크, 인덕턴스 및 고정자에 대한 회전자의 각 변위이며 i는 순시 전류 값이다. 따라서 SRM은 구조상 식 (1)과 같이 인덕턴스의 프로파일이 상승하는 (Positive slope of inductance profile) 영역 동안 전류가 인가되어 토크가 발생하는 원리이다. 그러나 모터 동작중 상전압이 Off되더라도 여자전류는 계속 흐르려하고, 정렬된 위치를 지나서도 전류는 지속되어 부-토크를 발생하게 되므로 평균토크를 감소시키게 된다. 따라서 고정자 극과 회전자 극이 정렬되기 전에 권선에 흐르는 전류를 소

2. 토크 방정식

SRM의 유한요소법 2차원 모델에서, 토크 식은 다음과 같이 표현된다.[4]

$$T = \nu \int_{\text{SR}} B_n B_t d\gamma \quad (2)$$

여기서,  $\nu$ 는 공기의 자기성분이고,  $Z$ 는 스택 길이,  $R$ 은 원통형 표면의 반경이고,  $B_n$ 는 원통형 표면의 한 요소에서 법선성분에 해당하는 자속밀도이며,  $B_t$ 는 접선성분의 자속밀도이다.

유한요소법에서, 적분식 (2)는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$T = \nu \int_{\text{SR}} R^2 \sum_{i=1}^m B_n B_t dt_i \quad (3)$$

위의 식 (3)에서 정-토오크는 법선성분과 접선성분의 자속밀도의 곱에 비례함을 알 수 있다. 만약 공극의 길이를 감소시킬 경우, 법선성분의 자속밀도 값을 증가시키는 결과가 되어 토오크는 증가 될 것이다. 하지만 포화현상 때문에 정확히 비례하지는 않는다.

그림 2-1은 일정전류로 한 상을 여자하였을 경우, 전형적인 3상 6/4극 SRM에 유한요소법을 적용하여 구한 자속밀도를 나타낸다. 여기서 공극의 길이는 0.3(mm)이고, Fringing effect는 무시하였다. 그리고 그림 2-2는 정렬위치와 비정렬위치에서의 법선성분과 접선성분의 자속밀도를 나타낸다.

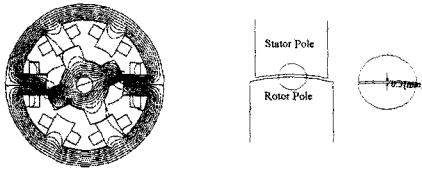
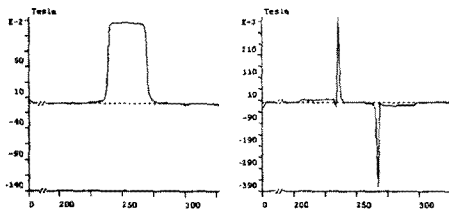
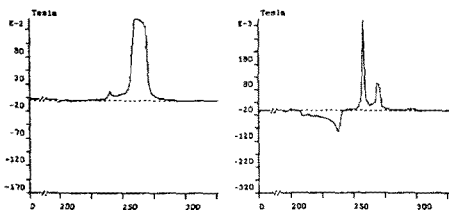


그림 2-1 공극길이 0.3(mm)에서의 자속분포도



(a)  $\theta = 0^\circ$ 에서의 법선성분과 접선성분의 자속밀도



(a)  $\theta = 20^\circ$ 에서의 법선성분과 접선성분의 자속밀도

그림 2-2 전형적인 SRM의 자속밀도

그림 2-1과 같이 전형적인 SRM에서, 고정자 극과 회전자 극 사이의 공극은 균일한 공극을 갖는다. 따라서, 그림 2-2의 (a)와 같은 정렬위치( $\theta = 0^\circ$ )의 양 모서리 부근에서 접선성분의 자속밀도가 나타나지만, 대개 법선성분의 자속밀도가 지배하게 되고, 두 개의 자속밀도의 적어 영이 아닐지라도 평균토오크는 영이 된다. 반면에 (b)와 같은 비정렬위치( $\theta = 20^\circ$ )에서 접선성분의 자속밀도는 매우 큰 것을 알 수 있다.

만약 정렬위치에서 양 모서리 부근에 나타나는 접선성분의 자속밀도를 비대칭으로 변화시킬 수 있다면 정-토오크 영역은 늘어나고, 정렬위치에서도 토오크가 발생하게 될 것이다. 본 논문에서는 정렬위치에서 접선성분과 법선성분의 자속밀도의 곱이 영이 되지 않도록 하기 위하여 고정자 극과 회전자 극 사이를 경사지도록 새로운 SRM모델을 설계하였다.

그림 2-3은 고정자 극과 처음 마주치는 회전자극의 공극은 작고, 각변위가 커짐에 따라 공극의 길이가 점점 늘어나는 공극길이 0.4-0.2(mm)의 구조이고, 그림 2-4는 반대로 처음에는 공극의 길이가 크다가 점점 작아지는 공극길이 0.2-0.4(mm)의 구조를 나타낸다.

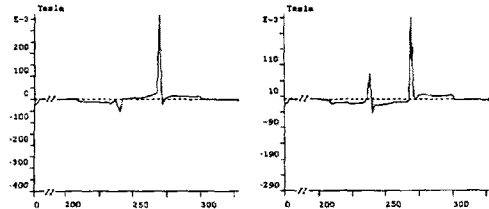
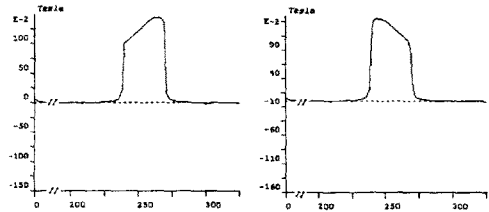
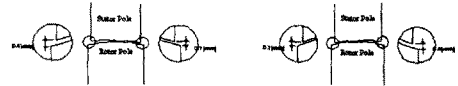


그림 2-3. 불균일한 공극길이 0.4-0.2(mm)에서의 법선성분과 접선성분의 자속밀도

그림 2-4. 불균일한 공극길이 0.2-0.4(mm)에서의 법선성분과 접선성분의 자속밀도

위의 그림에서 알 수 있는바와 같이, 공극의 길이를 불균일로 하였을 경우 정렬위치에서도 접선성분의 자속밀도가 비대칭으로 나타나므로 약간의 토오크가 발생되는 것을 예측할 수 있다.

### 3. 시뮬레이션

토오크 계산에 이용되는 맥스웰용력법은 힘이 발생하는 물체를 둘러싸는 폐곡면 전체에 걸쳐 맥스웰 용력에 의한 힘을 계산하는 방법으로, 공극에서 적분하는 경로에 따라 토오크 값이 달라지는 단점이 있다. 본 연구에서는 맥스웰 용력법의 단점을 보완하기 위하여 가상변위법을 이용하여 정토크/각도 특성을 해석하였다.

그림 3-1은 공극길이의 변화에 따른 SRM의 정-토오크/각도 특성을 나타낸다.

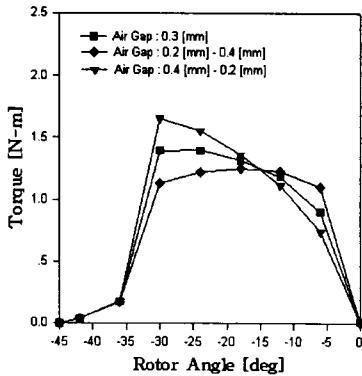


그림 3-1 공극길이의 변화에 따른 정-토오크 특성

그림 3-1에서 불균일한 공극 길이 0.4-0.2[mm]로 감소하는 경우의 토오크는 회전자 극이 고정자 극과 나란한 위치에 가까울수록 균일한 공극 길이 0.3[mm]에 대한 토오크 보다 조금 작게 나타났다. 그러나 회전자 극과 고정자 극이 마주치기 시작할 때부터 중간 각도 영역까지는 0.3[mm]의 토오크보다 훨씬 크기 때문에, 일정한 전압 공급에 대한 전류가 최대인 중간각도 영역에서 토오크가 더 커지는 효과를 가져다 주므로 좋은 기동토오크 특성이 기대된다.

반면에, 불균일한 공극 길이가 0.2-0.4[mm]로 증가하는 경우의 정-토오크 특성은 균일한 공극 길이 0.3[mm]의 그것에 비해 거의 평편(Flat type)하게 나타났다. 이러한 구조는 토오크 리플의 저감을 가져오리라 기대된다. 그러나 회전자 극이 고정자 극과 나란한 위치에 가까울수록 평균 공극길이 0.3[mm]에 대한 토오크 보다 더 크기 때문에, 전류(Commutation)시 큰 부(-)의 토오크를 생성할 가능성이 있으므로 설계시 주의가 필요하리라 생각된다.

### 4. 결론

본 연구에서는 3상 6/4 SRM의 공극길이 변화에 따른 토오크/각도 특성을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 첫째, 공극길이가 균일한 경우, 정렬위치에서의 법선성분과 접선성분의 자속밀도 값으로부터 토오크는 발생될

수 없었다. 하지만 공극길이를 변화하였을 때, 접선성분의 자속밀도가 비대칭으로 나타나므로 토오크의 변화가 생기는 것을 알 수 있었다.

둘째, 가상변위법을 이용한 정-토오크 특성에서, 불균일한 공극 길이 0.4[mm]-0.2[mm]로 감소하는 구조는 좋은 기동 토오크 특성이 기대되며, 불균일한 공극 길이가 0.2[mm]-0.4[mm]로 증가하는 구조는 토오크 리플의 저감을 가져오리라 기대된다.

### [참 고 문 헌]

- [1]. G.S. Buja, M.I. Valla, "Control Characteristics of the SRM Drives - Part I: Operation in the Linear Region", IEEE Tras. on Industrial Electronics, Vol. 38, No. 5, pp. 313-321, Oct/1991
- [2]. G.S. Buja, M.I. Valla, "Control Characteristics of the SRM Drives - Part II: Operation in the Saturated Region", IEEE Tras. on Industrial Electronics, Vol. 41, No. 3, pp. 316-325, June/1994
- [3] T. J. E. Miller, "Switched Reluctance Motors and their Control", Magna Physics Publishing, 1993
- [4] M. Moallem, C. M. Ong, L. E. Unnewehr, "Effect of Rotor Profiles on the Torque of a Switched Reluctance Motor", IEEE, 1990
- [5]. Longya Xu, Eric Ruckstadter, "Direct Modeling of Switched Reluctance Machine by Coupled Field - Circuit Method", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 10, No. 3, pp. 446-452, Sep/1995
- [6]. 정도영, 이상호, 오홍석, 최경호, "고효율을 갖는 스위치드 리럭턴스 모터에 관한 연구", '98년도 대한전기학회 전기기 기연구회 추계학술대회 논문집, pp. 22-25, 1998. 10
- [7]. H.H. Moghbelli, G.E. Adams and R.G. Hoft, "Prediction of the Instantaneous and Steady State Torque of the Switched Reluctance Motor Using the Finite Element Method", IEEE, IAS, Vol.1, pp59-70, 1988
- [8]. T.Ishikawa and M. Matsunami, "Dynamic Analysis of a Switched-Reluctance Motor Using Finite Element Method", SMIC'96 proceedings, pp 205-210, 1996
- [9]. J.W. Finch, J. Faiz and J.M.B. Metwally, "Design Study of Switched Reluctance Motor Performance", IEEE, IAS, Vol.1, pp242-248, 1992