

SRM의 토크리플을 고려한 극호형상의 최적설계

°이진우*, 우경일**, 김홍석*, 권병일*
 한양대 대학원 전자전기제어계측공학과*, **한양대학교 공학기술연구소

Optimum Design of Pole arc shape Considering Torque Ripple of SRM

°Jin-Woo Lee, Kyung-Il Woo**, Hong-Seok Kim*, Byung-Il Kwon*
 *Dept. of Electrical Eng., Graduate School of Hanyang Univ. **RIET

Abstract - Switched reluctance motors have the advantage a high torque/weight ratio, as the large reluctance torque is made by salient poles of both stator and rotor, and a high reliability. On the other hand, the switched reluctance motors have the disadvantage of a large ripple torque which is made by salient poles. So the application for the industrial fields have been limited to special cases. Geometric significant parameters are β_r and β_s , respectively the rotor and stator pole arc while the significant electric parameters are the angles where the drive switches are turned on and off. It can be simulated that β_r and β_s must be chosen in a particular region of the plane (β_r, β_s) called the feasible triangle.

The aim of this paper is to simulate the minimum of the torque ripple by using finite element method and to determine the best choice of the rotor and stator pole arc

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 모터(Switched reluctance Motor : SRM)는 신뢰성과 단위 중량 당 토크가 높으며 넓은 범위의 가변속 운전이 가능하다.

현재 산업현장의 여러 분야에서 SRM의 응용이 시도되고 있지만 고정자와 회전자들의 형상이 돌극(Salient poles)형태를 하고 있어 전동기의 진동과 소음의 원인이 되는 큰 토크 리플을 발생하는 단점이 있다.

회전자와 고정자의 이중 돌극형태에서 좁은 극호는 높은 효율을 얻을 수 있고, 슬롯면적이 극대화되지만 토크값 때문에 기동능력이 떨어지고 인덕턴스와 인덕턴스비가 작아지게되는 한편 큰 토크 리플의 원인이 된다. 반면에 넓은 극호는 슬롯면적이 줄어들어서 더 큰 동손이 발생한다.

본 논문에서는 4상 8/6 SRM의 토크 리플을 최소화 하는 극호각을 유한요소법을 이용하여 최적 설계하였고, 고정자와 회전자들의 극호비를 Lawrenson의 유효한 삼각형(feasible triangles) 범위 내에서 각각 변화시키면서 최소 토크 리플을 갖는 극호각을 선정하였다.

2. 본 론

2.1 적용모델 및 유한요소법의 적용

적용모델은 고정자 극수Ns가 8극이고, 회전자 극수Nr가 6극인 A,B,C,D의 4상, 8/6극의 전동기이다. 그림 1은 축방향 길이가 127mm인 해석모델을 나타내고 β_s , β_r 은 각각 고정자와 회전자의 극호각이다.

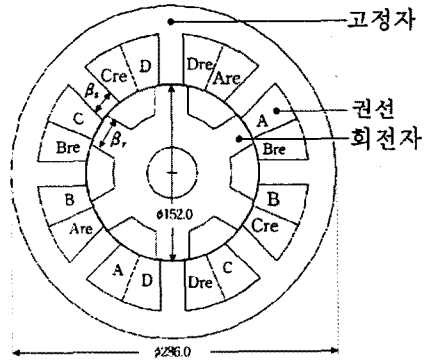


그림 1 해석모델

2차원 유한 요소 해석의 지배 방정식은 식(1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\nu \frac{\partial A_{oz}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\nu \frac{\partial A_{oz}}{\partial y}) = -J_{oz} \quad (1)$$

여기서 ν 는 자기 저항율, J_{oz} 은 전류밀도 J_o 의 z성분 전류밀도, A_{oz} 은 z성분의 자기벡터 포텐셜이다.

2.2 최초 극호각 선정기준

전동기로 기동하기 위해서는 고정자극수Ns와 회전자극수Nr는 짝수이어야 하며, 상수(相數)q는 2보다 커야 한다. 식(2)와 같이 스트로크각 ϵ 은 상수q값에 종속되며, 회전자 극 간격 α_r 은 회전자극수에 종속 된다.

$$\epsilon = \frac{\alpha_r}{q} \quad \text{여기서 } \alpha_r = \frac{2\pi}{N_r} \quad (2)$$

단일 방향의 토크를 생성하기 위하여 회전자 극호의 최소각 β_r 과 고정자의 최소각 β_s 은 식(3)과 같이 각각 스트로크각 ϵ 보다 커야하며, 고정자 극호각과 회전자 극호각의 합은 식(4)와 같이 회전자 극간격 보다 작아야 한다.

$$\min(\beta_r, \beta_s) \geq \epsilon \quad (3)$$

$$\beta_s + \beta_r \leq \alpha_r \quad (4)$$

식(2),(3),(4)의 제한조건을 고려하여 회전자와 고정자의 설계 가능한 범위를 정하여야한다.

$\beta_s > \beta_r$ 일 때 식(3)로부터 회전자 최소각은 스트로크각과 같고, 고정자 극호각의 최대각 $\hat{\beta}_s$ 은 식(4)로부터 식(5)와 같이 된다.

$$\check{\beta}_r = \varepsilon, \quad \hat{\beta}_s = \alpha_r - \check{\beta}_r = \frac{2\pi}{N_r} \left(1 - \frac{1}{q}\right) \quad (5)$$

$\beta_s < \beta_r$ 일 때 고정자 극호각의 최소각은 스트로크각과 같고, 회전자 극호각의 최대각 $\hat{\beta}_r$ 은 식(4)로부터 식(6)와 같이 된다.

$$\check{\beta}_s = \varepsilon, \quad \hat{\beta}_r = \alpha_r - \check{\beta}_s = \frac{2\pi}{N_r} \left(1 - \frac{1}{q}\right) \quad (6)$$

따라서 식(7),(8)과 같이 고정자와 회전자 극호각은 모두 같은 선택 범위를 갖는다. 제한조건 식(4)로부터 고정자와 회전자 극호각의 합은 회전자 극 간격 보다 작아야 하므로, 그림2와 같이 xyz영역의 고정자와 회전자 극호각의 선택 범위가 된다

$$\hat{\beta}_s - \check{\beta}_s = \frac{2\pi}{N_r} \left(1 - \frac{2}{q}\right) \quad (7)$$

$$\hat{\beta}_r - \check{\beta}_r = \frac{2\pi}{N_r} \left(1 - \frac{2}{q}\right) \quad (8)$$

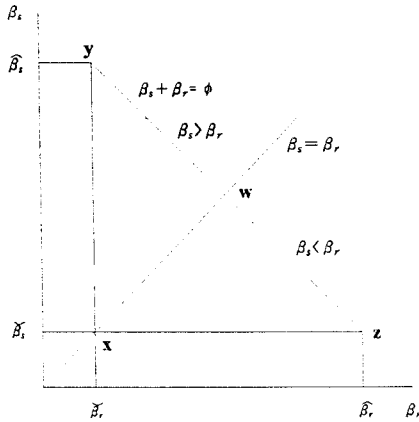


그림 2 설계 가능한 극호각 조합의 삼각형 범위

그림2에서 $\beta_s = \beta_r$ 의 선분xw를 기준으로 $\beta_s > \beta_r$ 과 $\beta_s < \beta_r$ 의 두 영역으로 구분된다. 그러나 기동시 $\beta_s > \beta_r$ 영역의 정렬위치에서는 회전자 극호각이 고정자 극호각에 묻혀서 전동기가 가동하지 않는 영역이 발생하므로, $\beta_s < \beta_r$ 의 xwz영역이 고정자와 회전자 극호각의 설계 가능한 범위가 된다. 고정자와 회전자 극호각 조합의 한계는 삼각형xwz의 선분이 된다.

2.2.1 극호각 변화에 따른 인덕턴스 변화

그림2의 삼각형xyz영역 내에서 임의의 극호각 조합은 그 위치에 따라서 그림3과 같은 세 가지 유형중 한가지의 인덕턴스 변화를 나타낸다.

1) 그림2의 x점은 고정자 극호각과 회전자 극호각이 최소각으로 같게 되어서 데드존(dead zone)을 갖지 않으며, 그림3 (a)와 같은 인덕턴스 변화를 보인다.

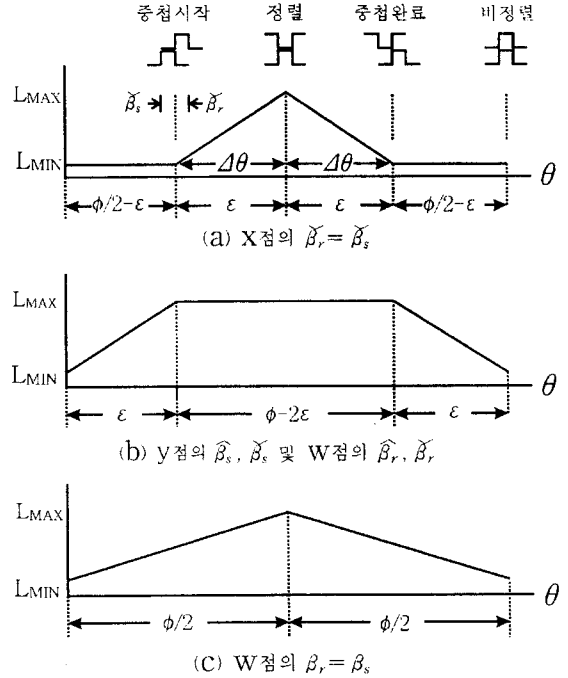


그림 3 인덕턴스 프로파일

2) x점에서 선분xy 또는 선분xz를 따라 고정자 최대 극호각인 y점 또는 회전자 최대 극호각인 z점으로 회전자 극호각과 고정자 극호각을 각각 증가시키면 두 극호각의 절대치 차($|\beta_s - \beta_r|$)만큼 데드존(dead zone)이 발생하며, 그림3 (b)와 같은 인덕턴스 변화를 보인다. y점에서는 고정자 극호각이 최대값이 되어서, 적은 관성을 갖으나 권선 공간면적이 0으로 되어서 설계상 현실성이 없다. 반대로 z점은 고정자 극호각이 최소값으로 되어, 권선 공간면적은 최대가 된다.

3) w점에서 $\beta_s = \beta_r = \frac{\phi}{2}$ 로 되어서, 그림3 (c)와 같은 인덕턴스 변화를 나타내고, 고정자 극호각과 회전자 극호각이 같게 되어서 데드존(dead zone)은 생성되지 않는다.

SRM의 토크는 회전자각 θ 의 함수이며, 회전자각 θ 로 한상(相)의 인덕턴스L를 편미분 하여 식(9)와 같이 산출한다.

$$T(\theta, I) = \frac{I^2}{2} \frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta} \quad (9)$$

프린팅 효과를 무시하면 그림3에서와 같이 정토크를 발생하는 인덕턴스값($L_{max} - L_{min}$)은 회전자와 고정자 극호각의 중첩 ($\Delta\theta$)에 비례한다.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

3.1 토크 특성

회전자 극호와 고정자 극호각이 같은 선분xw에서 x점과 w점 그리고 x점과 w점의 중간점에서 토크 파형을 그림4에서 나타내었다. x점의 각은 식(2),(3)로부터 15°가 되고, w점의 각은 식(7),(8)로부터 30°가 된다. x점과 w점의 중간각은 22.5°가 된다. 그림4는 그림1의

위지에서 회전자가 75.6°회전시 토오크 파형을 나타낸다.

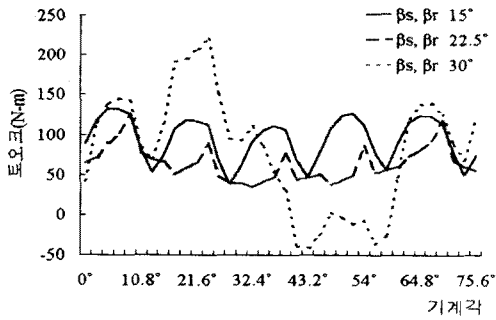


그림 4 선분xw의 토오크 파형

그림5에서 회전자와 고정자의 극호각이 같을 때 토오크 리플을 나타내며, 15°와 22.5°에서 토오크 리플 Trip(Tmax - Tmin)이 작고, 22.5°와 30° 사이에서 토오크 리플이 증폭된다.

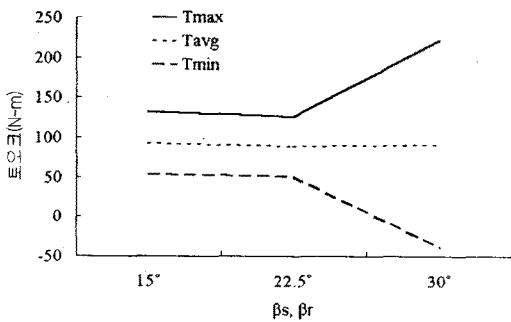


그림 5 선분xw의 토오크 리플 대역

$\beta_s \beta_r$ 와 $\beta_s = \beta_r$ (ϵ 의 조건에서는 이중형 돌극기의 전동기가 기동하지 못하는 영역이 발생하므로 상세 설계에서는 $\epsilon < \beta_s \beta_r$ 과 그림5와 같이 토오크 리플이 작은 대역인 15°와 22.5°의 영역내에서 극호각을 변화시키면서 토오크리플과 평균값을 시뮬레이션 하였다.

표1,2는 토오크리플과, 평균토오크를 나타내며, 회전자 극호각과 고정자 극호각의 최적값은 각각 22°와 17°이다.

표 1. 토오크 리플 (N-m)

$\beta_r \backslash \beta_s$	17°	18°	19°	20°
20°	74.7	81.3	80.9	92.8
21°	75.8	78.88	77.75	81.97
22°	63.13	75.1	76.08	71.33
23°	70.49	83.77	76.87	81.99

표 2. 평균 토오크 값 (N-m)

$\beta_r \backslash \beta_s$	17°	18°	19°	20°
20°	92.61	86.97	86.68	92.06
21°	90.3	86.14	86	90.25
22°	92.8	86.833	81.81	84.45
23°	89.1	95.66	90.57	90.49

4. 결 론

본 논문에서는 이중 돌극형 전동기의 제한조건을 고려하여 회전자와 고정자의 극호각의 설계 가능한 범위를 제시하였다.

4상 8/6 SRM의 토오크 리플을 최소화하는 극호각을 유한요소법을 이용하여 최적 설계하였고, 고정자와 회전자의 극호비를 Lawrenson의 유효한 삼각형(feasible triangles) 범위 내에서 각각 변화시키면서 최소 토오크 리플을 갖는 극호각을 설계하였다.

[참고 문헌]

- (1) TJE Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control", Magna physics publishing and clarendon press, 1993
- (2) Ki-Bong Kim, Byung-Il kwon, "Toroidal switched reluctance motor", SMIC' 99, pp.57-60, 1999.10.
- (3) P.J.Lawrenson, J.M.Stephenson, P.T.Blenkinsop, J.Corda and N.N.Fulton, "Variable Speed Switched Reluctance Motors", IEE Proc, Vol. 127, Pt.B, No4, July 1980.
- (4) Yasuharu Obdachi, "Optimum Design of Switched Reluctance Motors using Dynamic Finite Element Analysis", IEEE Proc, Vol. 33, No.2, pp.033-2036, March 1997.
- (5) Stephane Brisset, Pascal Brochet, "Optimization of Switched Reluctance Motors using Deterministic Methods with Static and Dynamic Finite Element Simulations", IEEE Proc, Vol. 34, No.5, pp.2853-2856, September 1998.