

앞선각 제어를 위한 단상 SRM 회전자설계

오주환, 권병일

한양대학교 전자전기제어계측공학과

Rotor Design of Single Phase Switched Reluctance Motor for Advance Angle Control

Ju-Hwan Oh, Byung-Il Kwon
Hanyang University

Abstract - Single phase switched reluctance motor has a high speed capability, due to its very robust rotor, and requires only one electronic power switch in its control circuitry. The latter feature considerably reduces the cost of the drive system. But it involves starting problem and strongly torque ripple, which means that the motor is not suitable for application that require constant torque or speed. To solve torque ripple and region of these problem, this paper presents a single phase Switched Reluctance Motor model with a barrier rotor pole. Also it is simulated the designed prototype model by FEM for the prediction of characteristics.

또한 단상 SRM보다 토오크 리플이 심하다. 단상 SRM은 고정자극호각(β_s)와 회전자극호각(β_r)에 따라 기동 및 구동시 많은 영향을 미치게 된다.

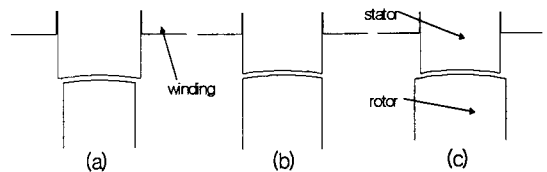
2.1 극호각에 따른 토오크 특성

그림 1은 본 논문에서 해석할 단상 SRM의 기본 모델이다. 그림 1과 같이 고정자극호각과 회전자극호각은 서로 다르며, 이때 발생하는 토오크특성도 다르다. 그림 1(a)는 고정자극호각이 회전자극호각 보다 큰 $\beta_s > \beta_r$ 형상이며, 그림 1(b)는 $\beta_s = \beta_r$, 그림 1(c)는 $\beta_s < \beta_r$ 이다. 그림 1과 같이 서로 다른 극호각 관계에서 발생 토오크는 식(1)과 같이 인덕턴스가 상승되는 즉 양의 기율기에서만 정토오크가 발생하여 연속적으로 회전할 수 있게 된다.

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

1. 서 론

최근 가전분야에 단상 SRM(Switched Reluctance Motor: SRM)을 적용한 사례가 증가하고 있다. 단상 SRM은 단순한 구조, 빠른 기동 그리고 고속도 운전이 가능한 장점을 지니고 있다[1]. 또한 구동방법과 시스템이 타전동기 보다 매우 단순한 구조를 갖고 있다. 하지만 단상 SRM은 토오크리플이 심하며, 고정자극호각에 따라서 회전자극호각의 범위가 제한된다. 그 이유는 기동 및 토오크영역으로 인해 구동하는데 영향을 미치기 때문이다. 그러므로 초기기동 및 연속구동일 경우 부하 변동시 앞선각 제어에 많은 어려움을 갖게 되고, 제한된 범위에서만 구동을 해야 하므로 토오크발생 영역이 줄어들게 된다[2].

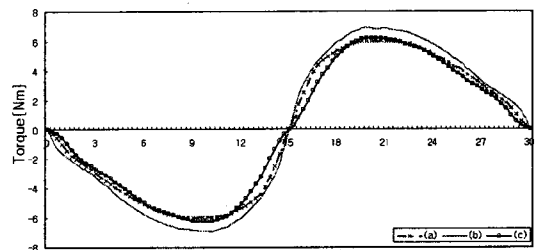


<그림 1> 극호각에 따른 단상 SRM 형상

본 논문에서는 초기기동 및 평균토오크에 미치는 영향을 줄이고, 연속구동일 경우 부하변동시에 앞선각 제어가 가능한 단상 SRM 회전자를 설계하였다. 설계된 회전자는 회전자극에 Barrier를 추가해 가능하게 한다. 그리고 평균토오크와 초기기동에 미치는 영향을 최대한 줄일 수 있다.

그림 1과 같이 서로 다른 극호각을 지닌 형상에서 그림 1(a)는 초기기동이 원활하고 연속구동시 부토오크 영향을 피할 수 있다. 하지만 최대 토오크는 줄어들게 되된다. 그림 1(b)는 초기기동 조건이 까다롭고 연속구동시 발생하는 토오크 영역이 줄어들 수 있다. 그림 1(c)는 연속구동시 부토오크를 피할 수 있고, 최대 토오크를 얻을 수 있다. 하지만, 정확한 전류제어가 요구되어야만 발생하는 토오크가 크다. 그림 2는 그림 1(a)-(c)에 대한 토오크 특성이다.

본 논문에서는 평균토오크에 미치는 영향을 줄이고 앞선각 제어가 가능한 Barrier를 갖는 단상 SRM 회전자 설계를 하고 그 타당성을 유한요소해석으로 비교 검토하였다.



<그림 2> 극호각에 따른 토오크 특성

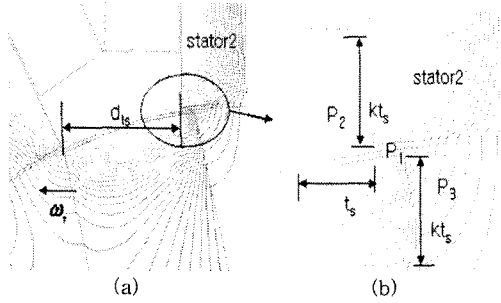
2. 회전자극호각에 따른 토오크영역

단상 SRM은 다상 SRM에 비해 상당히 스위칭소자를 줄일 수 있어 경제적이다. 또한 타전동기에 비해 자로의 길이가 짧고 모든 극이 동시에 여자 되기 때문에 단위체 적당 발생토오크가 크다. 하지만 초기 기동시 어느 특정 위치에 고정되거나 정지시 특정위치에 정지해야 한다.

2.2 비정렬 위치에서 발생하는 퍼미언스

본 논문에서는 기동토크 및 연속구동시 부토크 영향을 줄일 수 있는 회전자형상 중 그림 1(c)형상 ($\beta_s < \beta_r$)에 대해 회전자를 재설계 한다.

그림 1(c)는 회전자극과 고정자극이 서로 비정렬 위치에서 여자(commutation)할 경우 부토크 발생이 크고 그림 3과 같다.



<그림 3> 비정렬 위치에서 발생하는 퍼미언스

그림 3(a)에서 고정자2극(stator2)에 발생하는 자속으로 인해 부토크가 발생된다. 따라서 앞선각(Advance Angle) 제어가 어려워지며, 정토크(positive torque) 영역이 좁아지게 되는 원인이 된다.

여자시 공극에서 발생하는 퍼미언스는 그림 3(b)와 같이 세부분으로 나뉘 볼 수 있는데, P_1 은 P_2 와 P_3 가 자로(magnetic path)로 유도되는 동안 직선자로서 일어난다. 그림 3(b)에서 P_2, P_3 의 영역은 t_s 로부터 결정된다. 여기서 t_s 는 회전자극반경(outer radius)을 따라 미치는 누설자속의 범위로써 $t_s = r\theta_s$ 로 표현된다. 일반적으로 단상SRM의 t_s 는 고정자극간의 거리 $0.5d_s$ 를 넘지 않는다. P_2, P_3 에 대한 평균면적은 다음 식(2)와 같이 표현할 수 있다[3].

$$S = \int_0^{\theta_s} \frac{hr(l+k)}{2} d\theta_s \quad (2)$$

여기서, h 는 SRM의 스택길이이며, l 은 자로의 길이,

$$k = \frac{r\theta_s}{ag - r\theta_s} \text{이다.}$$

$$l = g - \frac{\pi}{2} r\theta_s \quad (3)$$

여기서, g 는 공극의 길이이다.

그러므로 P_2, P_3 는 다음 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_2 = P_3 = \int_0^{\theta_s} \frac{\mu_0 hr [ag - 2r\theta_s]}{[ag - r\theta_s][2g - \pi r\theta_s]} d\theta_s \quad (4)$$

여기서, a 는 정수이다.

회전자극과 고정자극 사이 공극에 발생하는 퍼미언스 P_1 은 다음 식(5)와 같이 단순화할 수 있다.

$$P_1 = \int_0^{\frac{\pi}{12} + \theta_s} \frac{\mu_0 hr}{g} d\theta_s \quad (5)$$

따라서 부토크에 영향을 주는 전체 퍼미언스 P 는 식(4)와 식(5)로부터 구할 수 있다.

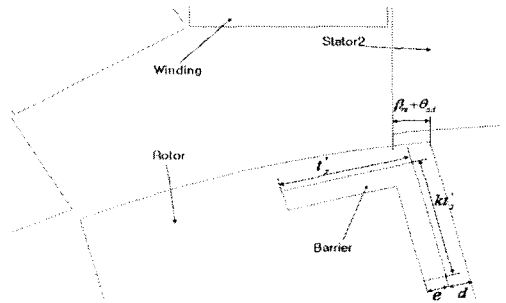
$$P = \frac{\mu_0 hr (\pi + 12\theta_s) g}{12g^2} + \frac{2\mu_0 h}{\pi^2 a - 2\pi} \left[\pi a \ln \left(\frac{ag^2 - r\theta_s g}{ag^2} \right) + (\pi a - 4) \ln \left(\frac{2g^2 - \pi r\theta_s g}{2g^2} \right) \right] \quad (6)$$

여자시 회전자 위치에 따라 부토크의 크기는 다르게 되며, 부토크를 줄이기 위해서는 공극이 커야한다. 하지만 공극을 크게 할 수 없으므로 회전자극에 Barrier를 추가하여 그 부토크를 줄이고 평균토크를 높이고자 한다.

그림 4는 재설계된 회전자극의 단면도이다. 부토크를 최대한 줄이기 위해서는 Barrier의 두께와 길이를 변화 시키며 줄일 수 있다. 하지만 너무 많이 키우게 되면 단위면적당 발생하는 에너지가 작아지므로 평균토크가 줄어들게 되는 이점을 갖는다. 따라서 위의 식(2)와 식(4)에 지배되는 변수는 t_s 이다. 이 변수의 변화는 연속구동시 부하변동으로 앞선각 제어를 할 경우, 그 관계는 식(7) t_s' 와 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$t_s' = \beta_r - \theta_{ad} - d + 0.5d_s \quad (7)$$

여기서 θ_{ad} 는 앞선각(Advance Angle), $\beta_r = \beta_r - \beta_s$, d 와 e 는 정수이다.



<그림 4> Barrier를 갖는 회전자

이상의 결과식으로, 임의의 앞선각제에서 부토크 영향을 줄이고, 정토크 영역도 늘릴 수 있음을 파악할 수 있다.

3. 해석 결과

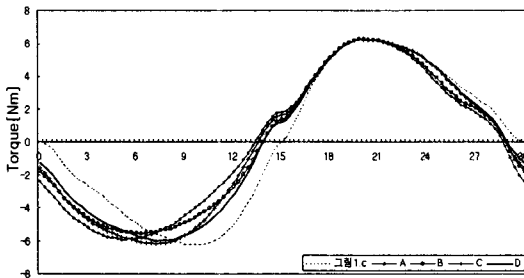
해석모델 Barrier의 두께는 자속이 충분히 통과 하지 않는 정도로 설정하였고, Barrier의 길이는 앞선각을 고려하여 변화를 주었다. 고정자극호각 $\beta_s = 30[\text{deg}]$, 회전자극호각 $\beta_r = 31.5[\text{deg}]$ 으로 고정하였다.

표 1은 Barrier에 변화를 준 해석모델을 나타낸 것이다.

<표 1> Barrier변화에 따른 해석모델

모델	t_s' [mm]	e [mm]	d [mm]	k
A	3	0.5	0.5	1
B	3	0.3	0.5	1
C	2	0.5	0.5	1
D	2	0.3	0.5	1

그림 5는 표 1에 대한 각각의 모델별 토오크 특성을 나타낸 것이다. 그림 5에서 앞선각에 따른 t_s' 의 변화에 따라 토오크의 영역은 확실히 변화가 있었음을 확인할 수 있었다. 정토크 영역에서 부토크로 넘어가는 위치에서 Barrier를 갖는 회전자인 경우가 부토크를 앞서 발생함을 알 수 있다. 하지만 연속구동시 전류제어를 하고 전류가 소호하는 구간이기 때문에 기존 회전자모델과 Barrier를 갖는 모델의 부토크 영역은 무시할 수 있다. 따라서 Barrier를 갖는 회전자인 경우가 기동토크 및 연속구동시 토오크 영역을 더 크게 확보할 수 있었다. 그리고 평균토크도 영향을 주지 않음을 알 수 있다.



<그림 5> Barrier변화에 따른 토오크 특성

4. 결 론

본 논문에서는 회전자극에 Barrier를 추가하여 단상 SRM에 앞선각제어가 가능하게 한 회전자를 설계하였다. 앞선각에 따라 Barrier에 변화를 주어 해석하였고, 해석 결과 기존 회전자극 보다 최대 2[deg] 증가한 정토크 영역을 확보할 수 있었다. 최대토크도 기존회전자와 같았다. 최대 정토크 보다 최대 부토크가 더 적음을 확인하였다. 회전자극에 Barrier를 추가하므로써 연속구동시 부하변화에도 앞선각제어가 가능함을 해석을 통하여 고찰하였고, 그 가능성을 확인하였다. 또한 기존 회전자 토오크 특성에 대해 기동토크와 평균토크가 상승하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] R.Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives", CRC Press LCC, 2001
- [2] C.C.Chan, "Single-phase Switched Reluctance Motor", IE E Proc., Vol.134, Pt.B, No.1, pp.53-56, 1987
- [3] A.Chiba, T.Fukao, O.Ichikawa, M.Oshima, M. Takemoto and D.G.Dorrell, "Magnetic Bearings and Bearingless Drives", Integra Software Service Pvt.Ltd, 2005
- [4] B.C.Mecrow, J.W. Finch, E.A. El-Kharashi and A.G.Jack, "Switched Reluctance Motors with Segmental Rotors", IE E Proc.Electr.Power Appl., Vol.149, No.4, pp.245-254, July 2002
- [5] Masayuki Sanada 외4인, " Radial Force and Acoustic noise Reduction for Switched Reluctance Motor with Hole in -side Pole", IEEJ Trans. IA, Vol.123, No.12, pp.1438-1445, 2003