

토크리플 저감과 출력 향상을 위한 Barrier type SRM 설계

이지영, 하재평, 김영균, 홍정표, 이근호\*, 허진\*\*  
 창원대학교 전기공학과, \*남해전문대학 전기과, \*\*전자부품연구원 정밀기기연구센터

Design of the Barrier Type SRM to Reduce the Torque Ripple and Improve the Output Power

Ji-Young Lee, Jae-Pyeong Ha, Young-Kyoun Kim, Jung-Pyo Hong, Geun-Ho Lee\*, Jin Hur\*\*  
 Changwon National University, \*Namhae college, \*\*Korea Electronics Technology Institute

**Abstract** - This paper describes the design optimization of a 8:6 Switched Reluctance Motor(SRM) with the rotor pole inserted barrier. The design is focussed on the minimization of the static torque ripple as maintaining the average torque and the efficiency of the demanded value. The finite element analysis method (FEM) and the optimization algorithm are used to optimize the shape of the rotor pole. By comparing the FEM results of barrier type SRM with these of prototype, it is verified that the barrier type SRM improves the static torque characteristics.

기대할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 260W급으로 설계, 제작되어 있는 SRM과 동일한 고정자를 가지면서, 분산된 Barrier가 삽입된 회전자에 대한 설계를 수행하였다. Barrier가 삽입되지 않은 기존의 전동기(이하 Prototype)에 비해 토크리플을 저감시키고 평균토크를 향상시키기 위하여, Barrier 형상에 대해 반응표면법(Response Surface Methodology, 이하 RSM)을 이용한 최적화를 수행하였다. Barrier type SRM의 최적화를 통해 결정된 값을 기준으로 각각의 설계변수들이 출력 특성에 미치는 영향을 분석하고, 전압방정식과 FEM을 결합한 동특성 해석으로부터 선정된 각 상 전류와 토크 특성에 대해 Prototype과 Barrier type을 비교하였다. 이를 통해 회전자에 삽입된 Barrier로 인해 토크리플이 저감되고, 출력이 향상되었음을 확인하였다.

1. 서 론

초기에는 비교적 낮은 효율로 인해 상품화를 위한 연구 개발이 이루어지지 못하고 있다가, 근래의 반도체 기술과 전자기 설계 기술의 발달로 인해, 가전 제품 및 산업 기기에 릴럭턴스 전동기를 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

릴럭턴스 전동기는 크게 동기형 릴럭턴스 전동기(Synchronous reluctance motor, 이하 SynRM)와 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched reluctance motor, 이하 SRM)로 분류할 수 있다. SynRM이 일반적으로 분포권을 가지며, 정현파에 의해 구동되는데 비해, 펄스 신호에 의해 구동되는 SRM은 고정자와 회전자가 모두 돌극형상이고, 이에 따라 주로 집중권을 사용하고 있다 [1].

SynRM의 기본적인 특성은 회전자 구조에 의해서 결정되는데, 특히 인덕턴스 차이 또는 인덕턴스 비를 말하는 돌극비를 증가시키는 것이 중요하다. 따라서, 전압의 고조파 성분과 토크 리플을 줄이거나 평균토크 또는 효율을 향상시키기 위해, SynRM에 여러 개의 Barrier를 삽입함으로써 돌극비를 향상시키는데 대한 많은 연구 결과가 보고되고 있다 [1]-[3]. 분산적으로 삽입된 Barrier는 등방성의 자성체 재질로 이루어진 회전자들 비등방성 형태가 되도록 함으로서 보다 돌극비를 향상시키게 되는데, 논문 [1]에서는 Barrier의 개수나 형태에 따라서 토크리플, 평균토크, 출력 등이 향상되며, Barrier를 삽입한 모델이 결론적으로 유도기에 비해 효율이 증가함을 보이고 있다. 이러한 연구개발로 인해 유도기나 BLDC의 대안으로서 SynRM이 고려되고 있는데 비해, SRM은 그 응용분야가 매우 제한적이다. 구조가 간단하고 견고하여 유지, 보수가 거의 불필요하며, 생산비용이 저렴하다는 장점을 가지고 있음에도 불구하고, 공극 표면의 돌극 형상에 의해 체적당 출력이 감소하고, 비교적 큰 토크리플을 가짐에 따라 고속회전을 요하는 분야로 그 응용범위가 제한된다. 그러나, 이러한 SRM 회전자에 분산된 Barrier를 삽입시킴으로서, SynRM에서와 같이 돌극비 향상에 따른 출력 향상을

2. 설계 및 해석 이론

2.1 설계 모델

그림 1은 Prototype SRM과 이의 출력특성을 향상시키기 위해 제안된 Barrier type SRM의 단면도를 나타낸 것이다. 두 가지 모두 8개의 고정자 극과 6개의 회전자 극을 가진 4상 8:6 SRM으로서, 제안되는 모델은 Prototype과 동일한 고정자를 가지면서 회전자에 극당 두 개의 Barrier가 삽입되어 있다.

2.2 RSM을 이용한 Barrier 설계

Barrier type의 회전자 형상을 최적화하기 위한 알고리즘으로 RSM을 사용하였다. RSM은 임의의 시스템으로부터 관측된 자료를 근거로 하여 실제 응답과 k개의 설계변수들 사이에 인과 관계를 규명한다[4]-[6]. 설계 변수에 대응되는 응답 또는 출력 값은 일반적으로 실제 실험이나 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 얻어지며, 본 논문에서는 설계변수와 출력 값의 대응관계에 대한 자료를 FEM을 이용하여 확보하였다. 이 최적화 기법에 대한 자세한 과정은 논문 [4]를 참고로 한다.

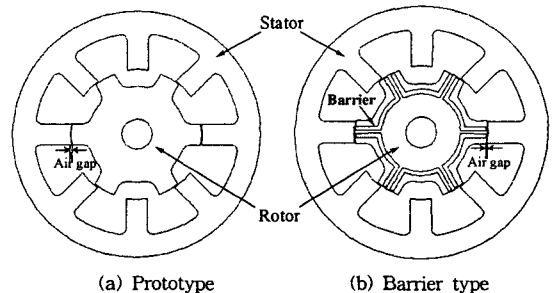


그림 1. 260W급 8:6 SRM

Barrier를 삽입한 회전자자의 형상 최적화를 수행하기 위한 4가지 설계변수로서, 회전자자의 Barrier 너비( $x_1$ ), 회전자 극 너비( $x_2$ ), Bridge 깊이( $x_3$ ), 회전자 중간 치 너비( $x_4$ )를 선정하였다. 그림 2는 변수들의 위치를 나타내고 있으며, 변수의 범위와 그에 대한 레벨은 표 1과 같이 결정하였다. 변수들의 최대, 최소값은 전동기 설계 범위와 제작 성을 고려하여 결정된 것이다. 이 변수들에 의하여 실험 계획법을 실행하고, 그 결과 결정된 25개 모델에 대해 FEM을 이용한 동특성 해석을 수행하였다. 해석 결과로부터 설계변수와 출력변수사이의 상관관계를 나타내는 응답함수를 결정하고 다음의 사항을 제약조건으로 설정하였다.

- 1) 효율에 대한 간단한 지표로서, 평균토크와 한 상의 평균 전류에 대한 비를 Prototype의 값 이상이 되도록 한다.
- 2) 평균토크가 Prototype 값보다 큰 범위에서 토크 리플을 최소화한다.

### 2.3 특성 해석

SRM에서 전류와 회전자 위치에 따른 인덕턴스의 비선형 특성을 보다 정확하게 고려하기 위하여, 동특성 해석을 수행하였다. 한 상에 대한 전압 방정식  $V_s$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s = R_m i_m + L_m \frac{di_m}{dt} + E_m \quad (1)$$

여기서  $R_m$ ,  $L_m$ ,  $E_m$ 은 각각 권선 저항, 코일 끝단 부의 누설 인덕턴스, 그리고, 권선에 유기 되는 역기전력을 나타낸다.

벡터 포텐셜  $\vec{A}$ 를 계변수로 하는 SRM의 기본적인 지배방정식은 식 (2)와 같다.

$$\nabla \times \left[ \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) \right] = \vec{j}_0 \quad (2)$$

여기서  $\mu$ 는 투자율,  $\vec{j}_0$ 는 외부인가 전류를 나타낸다.

위에서 제시한 두 개의 방정식, 즉 지배방정식과 전압 방정식을 결합하여 시스템 행렬을 구성한 뒤, 시간 미분항을 처리하기 위해 해석하고자 하는 현상의 미분 방정식을 시간에 대해 이산화시켜 계산하는 시간 차분법을 이용하였다. 발생토크는 매 시간 간격으로 자체 해석 수행 후 맥스웰 응력법을 이용하여 회전자에 받는 힘으로부터 산정하였다.

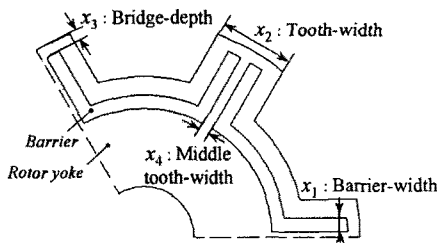


그림 2. 설계변수

표 1 설계 변수의 범위

구분	변수레벨				
	-2	-1	0	1	2
Barrier 너비( $x_1$ )	0.6	1	1.4	1.8	2.2
회전자 극 너비( $x_2$ )	18	18.5	19	19.5	20
Bridge 깊이( $x_3$ )	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1
중간 치 너비( $x_4$ )	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4

### 3. 설계 및 해석 결과

RSM을 이용하여 Barrier를 삽입한 회전자에 대해 형상 최적화를 수행한 결과 표 2와 같은 결과를 얻었다. Prototype의 회전자 극 너비가 18° 인데 비해, 20° 로 증가한 극 너비에 1.2mm 간격으로 1.45mm 너비의 Barrier를 삽입한 형상으로서 그림 1 (b)와 같다.

그림 3~그림 6은 결정된 값을 기준으로 평균토크와 토크리플에 대한 각 변수들의 영향을 분석한 것이다. 그림 3은 Barrier 너비와 회전자 극 너비에 따른 평균토크 변화를 나타낸 것으로서, Barrier 너비가 넓어질수록, 회전자 극 너비는 작아질수록 평균토크가 증가하는 양상을 가진다. 회전자 극 너비가 작아질수록 비정렬 인덕턴스 값은 작아지므로 정렬위치 부근에서 치가 포화되지 않은 경우 돌극비 증가로 인해 토크값이 증가한다. 그러나, Barrier 너비가 넓어져 치가 심하게 포화되는 경우에는 정렬 인덕턴스 또한 감소하여 돌극비의 이득은 없으나 입력전류의 증가로 토크가 증가하게 된다. 그림 4는 Bridge 깊이와 회전자 중간 치 너비에 따른 평균토크 변화를 본 것이다. Barrier 간격이 넓어질수록 이에 비례하여 평균토크가 증가하고, Bridge 깊이는 커질수록 평균토크는 감소하게 된다. 이는 Bridge 깊이가 커질수록 누설 성분이 증가하고, 일정한 회전자 극 너비 내에서 Barrier가 분산될수록 돌극비가 증가하기 때문이다.

Barrier 너비와 회전자 극 너비의 변화에 따른 토크 리플 변화는 그림 5에 나타내었다. 이는 평균토크와 매우 유사한 양상을 가진다. SRM의 발생토크는 입력전류 파형에 많은 영향을 받게되는데, Barrier 너비가 넓어질수록 회전자 극이 보다 심하게 포화되어 입력 전류가 급격히 증가하게 되고, 따라서 최대 토크가 증가하게 된다. 회전자 극 너비가 좁아질수록 그 양상은 뚜렷하게 된다. Bridge 깊이와 회전자 중간치 너비에 따른 토크 리플의 변화는 그림 6과 같다. 중간치 너비가 적은 구간에서는 Bridge 깊이가 감소할수록, 중간치 너비가 큰 구간에서는 Bridge 깊이가 증가할수록 토크리플이 감소 있다. 이와 같이 변수에 따른 토크리플의 증감 부분은 평균토크에 거의 비례하고 있다. 따라서, 최적화 결과는 이상과 같은 모순된 양상을 가지는 변수들에 대해, 평균토크와 토크리플에 대한 제약조건을 모두 만족 시키도록 결정된 값이다.

그림7과 그림 8은 동특성 해석을 통해 Barrier type의 한 스트로크 구간에 발생하는 상 전류와 그 때의 토크를 산정하여 이를 Prototype과 도식적으로 비교한 것이다. 그리고, 그 결과 값은 표 3에서 비교하였다. RSM을 통해 결정된 Barrier type이 Prototype 보다 평균토크는 증가하고, 토크 리플은 현저히 감소하였음을 확인 할 수 있다.

표 2 최적화 결과

설계변수	최적해	단위
Barrier 너비( $x_1$ )	1.45	mm
회전자 극 너비( $x_2$ )	20	°
Bridge 깊이( $x_3$ )	0.3	mm
중간 치 너비( $x_4$ )	1.2	mm
평균 토크	1.49	N·m
토크 리플	1.11	N·m

표 3 특성해석 결과

설계변수	Prototype	Barrier type
평균 토크 (N·m)	1.37	1.42
토크 리플 (N·m)	1.65	1.22
평균토크/평균전류	1.23	1.25

#### 4. 결 론

본 논문에서는 일반적으로 SynRM에 적용하는 분산된 형태의 Barrier를 SRM에 적용함으로써 토크리플은 감소시키면서 평균토크를 증가시키기 위한 설계를 수행하였다. 이를 만족시키기 위한 변수들의 범위는 모순된 양상을 가지나, RSM을 통한 형상 최적화를 수행하여 Barrier가 삽입된 회전자를 설계 할 수 있었다. 이에 대한 타당성은 FEM에 의한 동특성 해석을 수행함으로써 검증하였다. Barrier type SRM이 Prototype에 비해 평균토크는 3.52% 증가하고, 토크리플은 26% 감소하였다. 이후 Barrier type에 대한 제작, 실험을 통하여 본 논문의 설계 및 해석 결과의 타당성을 검증할 계획이다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] Hiroyuki Kiriya, and el, "High Performance Synchronous Reluctance Motor with Multi-Barrier for the Appliance Industry," *IEEE Industry Application Conference*, p.111~117, 1998
- [2] N. Balbo, and el, "Synchronous Reluctance Motors for Low-Cost, Medium Performance Drive," *The European Power Electronics Association*, p77~81, 1993
- [3] T. J. E. Miller, and el, "Design of a Synchronous Reluctance Motor Drive," *IEEE Trans. on Industry Application*, vol. 27, No. 4, p741~749, 1991
- [4] 홍정표, 김영균, "반응표면방법론에 의한 BLDC 전동기의 코딩토크 저감을 위한 최적설계", *대한전기학회 하계학술대회 논문집*, pp. 647-649, 7, 2000.
- [5] 홍정표 외 4명, "영구자석 계자형 동기발전기의 고조파 저감을 위한 자기회로 최적설계", *대한전기학회 춘계학술대회 논문집*, pp.57-59, 4, 2001.
- [6] Myers의 1명, *Response Surface Methodology*, WILEY INTER SCIENCE, 1995.

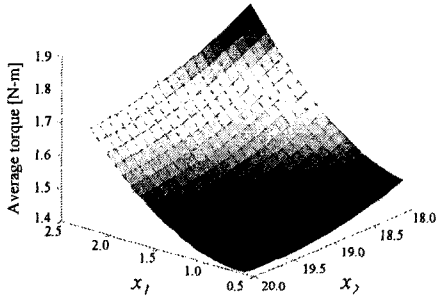


그림 3. Barrier 너비( $x_1$ )와 회전자 극 너비( $x_2$ ) 변화에 따른 평균 토크

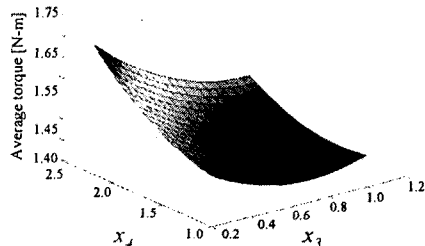


그림 4. Bridge 길이( $x_3$ )와 회전자 중간 치 너비( $x_4$ ) 변화에 따른 평균 토크

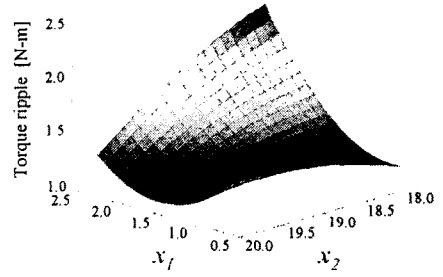


그림 5. Barrier 너비( $x_1$ )와 회전자 극 너비( $x_2$ ) 변화에 따른 토크 리플

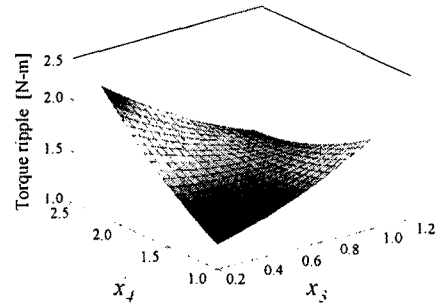


그림 6. Bridge 길이( $x_3$ )와 회전자 중간 치 너비( $x_4$ ) 변화에 따른 토크 리플

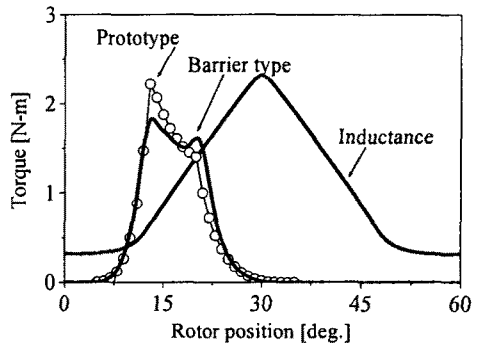


그림 7. Prototype과 Barrier type의 발생 토크 비교 (1회 스트로크)

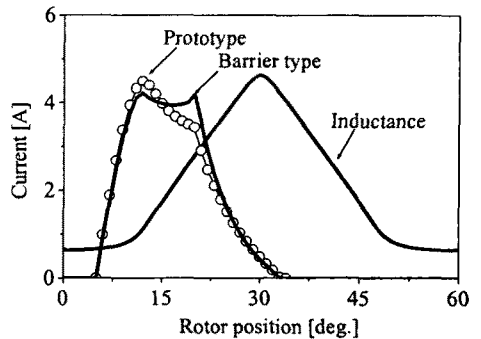


그림 8. Prototype과 Barrier type의 입력 전류 비교 (1회 스트로크)