

# 자기력을 고려한 매입형 영구자석 모터의 토크 리플 저감 자속 장벽 최적설계

박승균\*, 민승재\*\*,†, 홍정표\*\*

## Optimal Flux Barrier Design of Interior Permanent Magnet Motor for Torque Ripple Reduction considering Magnetic Force

Seunggyun Park, Seungjae Min, Jungpyo Hong

**Key Words :** Torque Ripple(토크 리플), Interior Permanent Magnet Motor(매입형 영구자석 모터), Flux Barrier(자속 장벽), Level Set Method(레벨셋 방법)

### Abstract

Interior Permanent Magnet(IPM) motor has relatively high torque ripple generated by reluctance torque. Because the torque pulsation has a bad effect on the noise and vibration of motor, efforts to reduce torque ripple have been studied by changing the motor configurations. In this paper, harmonic analysis of the tangential magnetic force waveform for the stator teeth is performed to identify harmonics that influence the torque ripple and the target force wave is generated by eliminating the identified harmonics. The optimization problem is formulated to fit the tangential magnetic force wave to the target force wave. Preliminary results show that low torque ripple of IPM motor is achieved using level set method.

### 1. 서 론

매입형 영구자석(Interior Permanent Magnet, IPM) 모터는 전자기적 토크 외에 자기저항의 차이에 의해 발생하는 릴럭턴스 토크를 이용하기 때문에 높은 효율과 출력밀도를 가지고 있어 다양한 산업 현장에서 사용하고 있다<sup>(1)</sup>. 그러나 릴럭턴스 차이에 의한 큰 토크 리플이 발생하여 진동 및 소음의 원인이 된다. 따라서 토크 리플 저감을 위한 방법으로 고정자 형상 변화, 슬롯 개구폭 조절, 고조파 전류 입력 등의 많은 방법들이 제안되어져 왔다<sup>(2~4)</sup>. 특히 공기 영역과 림(rib or bridge)으로 구성되어 두 매질의 투자율 차이를 이용해 자속의 흐름을 바꾸는 역할을 하는 자속 장벽을 이용한 토크 리플 저감에 관한 연구<sup>(5~7)</sup>가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 자속 장벽의 형상 설계를 위해

고정자의 치(tooth)가 받는 자기력(magnetic force)의 접선 방향 성분을 이용하였으며, 토크 리플에 영향을 주는 자기력 성분의 고조파 항들을 제거함으로써 IPM 모터의 토크 리플을 저감하는 방법을 제안하였다.

### 2. 문제 정식화

자속 장벽의 형상 표현은 레벨셋 함수( $\phi$ )를 이용하였으며 레벨셋 방정식의 해를 구하여 경계를 진전시키게 된다. 고정자의 치가 받는 자기력은 맥스웰 응력 텐서(Maxwell Stress Tensor, MST) 법을 이용하여 계산하며, 접선 방향 자기력 성분은 다음과 같다.

$$F_t = \frac{1}{\mu_0} \int B_n B_t dS \quad (1)$$

여기서  $B_n$  은 반경 방향 자속 밀도,  $B_t$  는 접선 방향 자속 밀도,  $\mu_0$  는 자유 공간에서의 투자율을 나타낸다.

\* 한양대학교 대학원 자동차공학과

\*\* 한양대학교 기계공학부/자동차공학과

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부/자동차공학과

E-mail : [seungjae@hanyang.ac.kr](mailto:seungjae@hanyang.ac.kr)

TEL : (02)-2220-0457 FAX : (02)2298-4634

접선 방향 자기력의 파형은 극 당 한주기를 이루게 된다. 자기력의 파형이 슬롯 사이의 각도만큼 위상차를 두고 모든 슬롯의 파형을 합하게 되면 토크의 주기와 같아지게 되고, 여기서 특정 고조파 성분은 겹쳐져 증폭되어 토크 리플에 영향을 주게 된다. 따라서 특정 고조파 성분의 크기를 최소화시키면 토크 리플을 줄일 수 있다. 접선 방향 자기력의 주기가  $2L$  일 때 정식화는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \text{find} \quad \{x | \phi(x) = 0\} \\ & \text{minimize} \quad \left( \frac{F_t - F_t^*}{a_0} \right)^2 \\ & \text{where} \quad F_t^* = a_0 + \sum_{\substack{j=1 \\ (i \neq j)}}^{\infty} \left( a_i \cos \frac{i\pi}{L} \theta + b_i \sin \frac{i\pi}{L} \theta \right) \\ & \text{subject to} \quad \sum_{\Omega_{\text{design}}} H(\phi(x)) - VF \leq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $a_0$ ,  $a_i$ ,  $b_i$  인 푸리에 계수는 오일러 공식에 의해 구해지며  $H(x)$ ,  $VF$ ,  $j$ ,  $\theta$ 는 각각 형상 경계를 표현하는 Heaviside 함수, 제한된 부피 비율, 그리고 토크 리플에 영향을 주는 특정 고조파 차수, 회전자의 회전각을 나타낸다.

### 3. 설계 예제

적용 대상 모델은 12극 18슬롯의 V자 형상 영구자석이 매입된 IPM 모터로 그림 1(a)와 같다. 3상의 사인과 형태 전류가 입력되며 영구자석의 잔류 자속 밀도는 1.103[T]이다. 피 제한 조건은 기존 설계의 자속 장벽과 같은 양으로 설정하였고, 설계 영역은 그림 2(b)와 같이 영구 자석의 바깥 영역으로 설정하였다. 고정자의 치가 받는 자기력의 주기는 12극 18슬롯이므로 기계각으로  $30^\circ$ 가 한 주기를 이룬다. 슬롯당 사이각은  $20^\circ$ 를 이루고 있으므로 3배수 고조파 성분이 서로 중첩이 되므로 토크 리플에 영향을 준다.

초기 설계 대비 자속 장벽의 형상은 그림 2와 같이 자극 각도(pole arc)가 커지고 릿 길이가 작아지는 것을 알 수 있다. 그림 3은 접선 방향 자기력의 파형으로 3배수 고조파 항이 크게 줄어든 것을 그림 4의 고조파 분석을 통해 알 수 있다. 모터의 성능은 표 1과 같으며, 토크 리플이 크게 감소함을 알 수 있다. 그림 5은 기존 모델과 최적

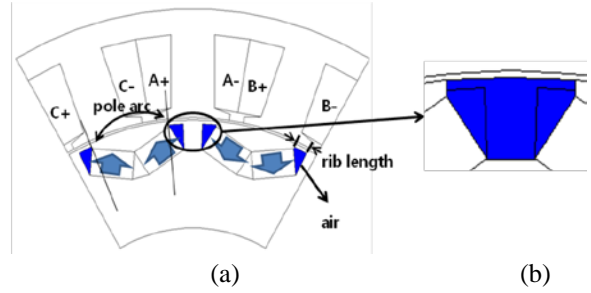


Fig. 1 V-type IPMSM : (a) initial design, (b) design domain

모델의 공극 자속밀도 그래프를 나타낸 것이다. 자극각도가 초기 형상에 비해 커짐에 따라 자속이 넓게 분포하게 되고 파형의 양 끝단에서 자속 밀도 값의 피크 부분을 줄여 공극 자속밀도를 보다 정현적 파형을 만들어 토크 리플이 줄어들었으나 릿 길이가 줄어 저항이 작아지게 되므로 공극으로 넘어가는 자속량이 초기 설계에 비해 작아지게 되어 평균 토크가 감소한 것으로 판단된다.

### 4. 결 론

토크 리플을 저감하기 위하여 고정자의 치 하나가 받는 접선 방향 자기력 성분에서 토크 리플에 영향을 주는 고조파 성분을 제거하는 방법을 제안하였다. 12극 18슬롯 모델에 적용하여 토크 리플을 저감할 수 있었으며, 이는 진동 및 소음 저감에 유용할 것으로 예상된다.

Table 1 Results

	Initial shape	Optimum shape
Average torque [Nm]	57.2	52.0 (8.9% ↓)
Torque ripple [%]	204.5	48.1 (76.5% ↓)

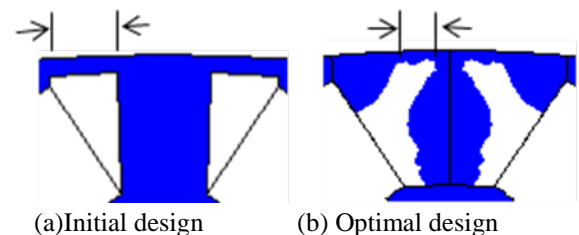


Fig. 2 Flux barrier configuration

## 참고문헌

- (1) Lee, J., 2001, *Design and Control of IPMSM*, Interscience, Seoul
- (2) Kwak, J., Min, S. and Hong, J. P., 2010, "Optimal Stator Design of Interior Permanent Magnet Motor to Reduce Torque Ripple Using Level Set Method", *IEEE Trans. Magn.*, Vol.46, No. 6, pp. 2108-2111.
- (3) Lee, S. H., Hong, J. P. and Hwang, S. M., 2009, "Optimal Design for Noise Reduction in Interior Permanent-Magnet Motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 45, No. 6, pp. 1954~1960.
- (4) Kioumars, A., Moallem, M., and Fahimi, B., 2006, "Mitigation of Torque Ripple in Interior Permanent Magnet Motors by Optimal Shape Design.", *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 42, No. 11, pp. 3706~3711.
- (5) Sanada, M., Hiramoto, K., and Morimoto, S., 2004, "Torque Ripple Improvement for Synchronous Reluctance Motor Using an Asymmetric Flux Barrier Arrangement." *IEEE trans. Ind. Appl.*, Vol. 40, No. 4, pp. 1076~1082.
- (6) Park, H. K., Yang, B. Y., Lee, S. B. and Kwon, B. I., 2007, "Novel Design of Flux Barrier in IPM type BLDC motor by considering Multi-response Taguchi Method." *KIEE*, Vol. 56, No. 3, pp. 498~505.
- (7) Kim, S. I., Lee, G. H., Hong, J. P. and Lee, S. H., 2008, "Shape Design for Improving the Characteristics of Interior PM Synchronous Motor." *KIEE*, pp. 814~815.

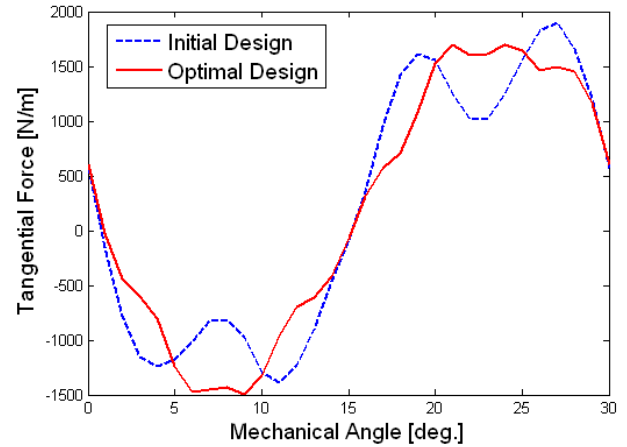


Fig. 3 Tangential force waveform

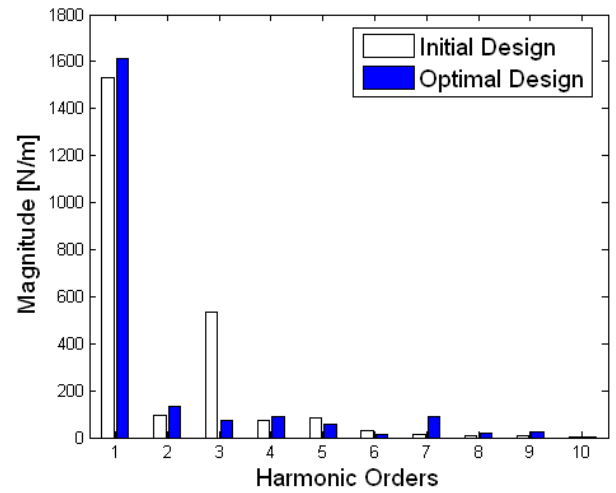


Fig. 4 Harmonic analysis

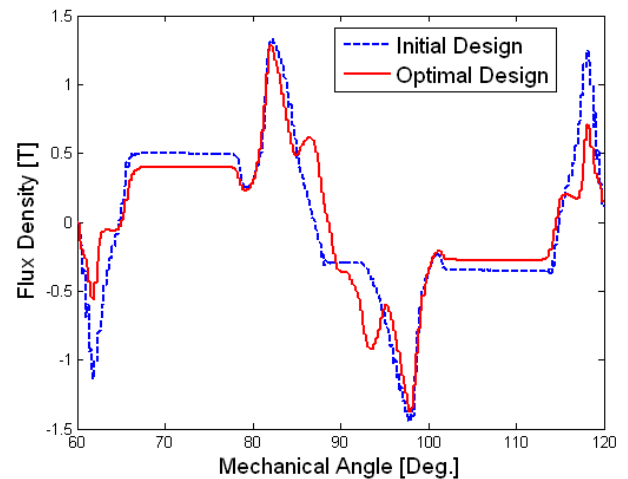


Fig. 5 Comparison of flux density distribution