

## 매입형 영구자석 동기전동기의 특성 향상을 위한 형상설계

김성일\*, 이근호\*, 홍정표\*, 이성호\*\*  
 한양대학교 기계공학부\*, 한국생산기술연구원\*\*

### Shape Design for Improving the Characteristics of Interior PM Synchronous Motor

Sung-Il Kim\*, Geun-Ho Lee\*, Jung-Pyo Hong\*, Sung-Ho Lee\*\*  
 School of Mechanical Engineering, Hanyang University\*  
 Korea Institute of Industrial Technology\*\*

**Abstract** - 매입형 영구자석 동기전동기의 경우 고효율, 고출력 그리고 넓은 속도 범위와 같은 많은 장점에도 불구하고 상대적으로 큰 코깅 토크와 토크 리플로 인하여 정밀한 위치 제어용 전동기로 사용하는데 있어 한계가 있다. 이는 flux barrier와 치 사이의 불연속적인 자기저항의 변화가 주요한 원인 중의 하나로 이를 최소화 할 수 있는 형상 설계가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 초기 설계된 매입형 영구자석 동기전동기의 특성을 향상시키기 위한 형상 설계를 제시하고 실험 결과를 통하여 제안된 설계 방법의 유용성을 증명하고자 한다.

〈표 1〉 초기 모델의 주요 치수 및 설계 사양

항 목	값	항 목	값
고정자 최외경	117.2 mm	극 수	6
회전자 최외경	70.8 mm	DC link 전압	155 V
축방향 길이	15 mm	단자 전압	98.6 V
공극 길이	0.6 mm	정격 출력	2 kW
Br(@20~25°C)	1.22~1.28 T	기저 및 최대속도	3500, 7500 rpm

## 1. 서 론

매입형 영구자석 동기전동기(Interior PM synchronous motor : 이하 IPMSM)의 경우 고효율, 고출력 그리고 넓은 속도 운전 영역과 같은 많은 장점들 때문에 그 사용 비중이 점점 높아지고 있다. 더욱이 이런 장점들은 에너지 효율 및 공간적인 제약이 많은 자동차 분야에 적용하는데 유리하게 만든다. 하지만 발생토크 측면에서 표면 부착형 영구자석 동기전동기에 비해 코깅 토크 및 토크 리플이 상대적으로 크게 발생할 뿐만 아니라 역기전력의 왜형을 역시 좋지 않다. 이는 주로 회전자와 고정자 사이의 불연속적인 자기저항에 의해 야기되며, 특히 넓은 속도 영역에서 운전되는 IPMSM의 경우 킬러턴스 토크 및 전동기의 속도를 증가시키기 위해 입력되는 d축 전류로 인하여 더 큰 토크 리플이 발생하게 된다 [1]. 따라서 토크 특성을 향상시키기 위한 형상 설계가 필연적으로 요구되지만 어떤 설계 인자들이 그 특성에 영향을 주는 것인지 그리고 그들 사이의 상호작용이 어떻게 되는지를 고려해야 되기 때문에 쉽게 접근할 수 없게 된다.

본 논문의 목적은 초기 설계된 double-layer IPMSM을 대상으로 flux barrier의 형상 설계만으로 코깅 토크와 기저 및 최대 속도에서의 토크 리플 그리고 역기전력의 왜형을 동시에 개선시킬 수 있음을 보여주고 실험을 통해 그 설계 방법의 효율성을 증명하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 초기 모델

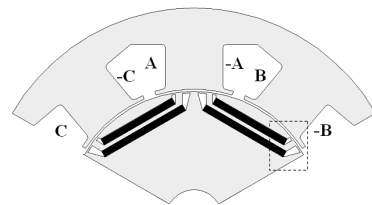
그림 1은 하이브리드 자동차의 에어컨 컴프레서 구동용으로 설계된 double-layer IPMSM의 초기 형상을 보여주고 있으며 표 1에서는 주요 치수 및 설계 사양을 제시하고 있다. 그 모델의 특성들은 유한요소해석(finite element analysis : 이하 FEA)과 식 (1), (2)에 나와 있는 전압 및 토크 방정식에 의해 산정된다. 이 때, 철손 및 기계손은 무시된다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega\psi_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

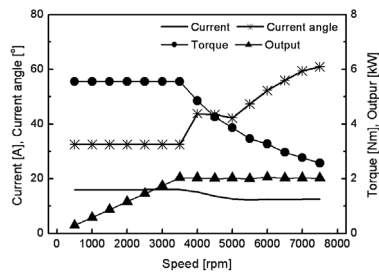
$$\begin{aligned} T &= P_n[\psi_a i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \\ &= P_n[\psi_a I_a \cos \beta + \frac{1}{2}(L_d - L_q)I_a^2 \sin 2\beta] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $v_d$ 와  $v_q$ 는 d, q축 단자전압을  $R_a$ 는 전기자 권선 저항을  $\psi_a$ 는 영구자석에 의한 쇠교 자속 실효치를  $L_d$ 와  $L_q$ 는 d, q축 인덕턴스를  $p$ 는  $d/dt$ 를  $P_n$ 은 극쌍수를 각각 나타낸다. 그리고 전압방정식의 제약조건은 다음과 같다.

$$I_a = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{am}, \quad V_a = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \leq V_{am} \quad (3)$$



〈그림 1〉 Double-layer IPMSM의 초기 모델 형상



〈그림 2〉 초기 모델의 출력 특성

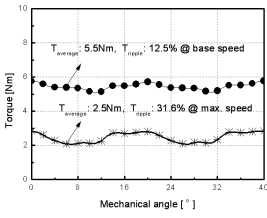
그림 2는 [2]에서 제시된 방법으로 산정된 d-q축 인덕턴스를 바탕으로 식 (1), (2) 그리고 (3)에 의해 얻어진 초기 모델의 출력 특성을 보여주고 있다. 이 때, 기저 및 최대 속도에서의 입력 전류는 15.3A와 12.5A이며 전류 위상각은 각각 32.5°와 63.6°이다.

### 2.2 최적 설계

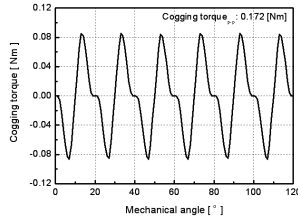
최적 설계에 앞서 FEA를 통해 초기 모델의 토크 특성을 확인하였으며, 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 또한 그림 4와 5는 초기 모델의 코깅 토크와 역기전력의 왜형을 함께 보여주고 있다.

형상 최적 설계를 위해 회전자 및 고정자에서 고려해야 할 설계 변수는 무수히 많으며 이를 다 고려한다는 것은 비실용적이며 많은 시간을 요구하게 된다. 따라서 본 논문에서는 표 1에 주어진 설계 조건을 만족시키는 초기 모델에 대해 그 성능을 유지시키면서 토크 특성 및 역기전력의 왜형을 개선시키기 위해 선택한 설계 변수로써 그림 6에 나와 있는 barrier angle이다. 이는 영구자속에 의한 쇠교 자속 및 인덕턴스와 같은 전동기의 주요 파라미터들의 변화를 최소화하기 위해 영구자석의 크기 및 위치 그리고 공극 길이는 초기 모델의 치수를 그대로 유지하였고 점접촉 및 자동 권선을 위해 고정자 형상 또한 초기 모델과 동일하게 가져왔기 때문이다.

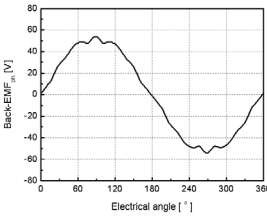
초기 모델의 형상 최적 설계를 위해 적용한 최적화 방법은 반응표면 방법(Response surface methodology : 이하 RSM)이다. RSM의 경우 최근 전기기기의 최적 설계에 많이 이용되고 있는데 이는 설계 변수의 변화에 따른 반응과의 관계를 근사 다항식의 형태로 표현할 수 있어 모델



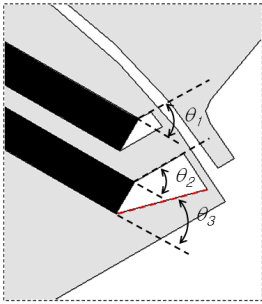
〈그림 3〉 초기 모델의 토크 특성



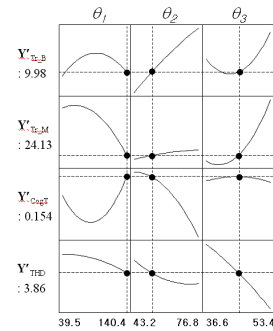
〈그림 4〉 초기 모델의 코깅 토크



〈그림 5〉 초기 모델의 역기전력 파형 및 왜형률 @ 3500rpm



〈그림 6〉 설계 변수



〈그림 7〉 각 목적함수의 반응

링과 해석을 일일이 하지 않아도 반응을 미리 예측할 수 있으며 거기에 필요한 시간과 노력 또한 많이 절약할 수 있기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 barrier angle의 변화에 따른 코깅 토크 및 토크 리플 그리고 역기전력 왜형률을 각각 2차 근사 다항식에 의한 함수 형태로 나타내기 위해 RSM을 이용하였다. 표 2는 각 반응의 근사 다항식을 만들기 위한 barrier angle의 변화 범위를 나타내고 있다. 이를 바탕으로 중심합성계획법에 의한 해석 결과를 가지고 각 반응의 근사 다항식을 만들었으며 그 결과는 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 알 수 있듯이 모든 반응을 동시에 최소화 시킬 수 있는 조건이 없기 때문에 식 (4)와 (5)에 나와 있는 목적함수와 제약조건을 만족시키는 최종 결과를 표 3에 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 Y'_{Tr\_B} &\leq 10\%, & Y'_{Tr\_M} &\leq 30\%, \\
 Y'_{CogT} &\leq 0.16\text{Nm}, & Y'_{THD} &\leq 4\%
 \end{aligned}
 \quad (4)$$

$$Y'_{AT} \geq 5.5\text{Nm}, \quad \text{Output power} > 2\text{kW} \quad (5)$$

여기서,  $Y'_{Tr\_B}$ 는 기저 속도에서의 토크 리플,  $Y'_{Tr\_M}$ 는 최대 속도에서의 토크 리플,  $Y'_{CogT}$ 는 코깅 토크,  $Y'_{THD}$ 는 역기전력의 왜형률,  $Y'_{AT}$ 는 기저 속도에서의 평균 토크를 나타낸다.

### 2.3 실험 결과

그림 8은 제작된 최종 모델과 기저 및 최대 속도에서의 토크 리플과 입력 전류를 측정하기 위한 실험 장치를 나타내었다. 그림 9(a)와 (b)는 토크 리플 측정 결과를 나타내며, 이 때 측정된 전압 크기는 1V 당 1Nm를 가리킨다. 마지막으로 코깅 토크 및 역기전력의 왜형률 측정 결과는 그림 10과 11에 표시하였다.

## 3. 결론

본 논문에서는 초기 설계된 double-layer IPMSM의 특성을 향상시키기 위한 형상 설계 방법으로 RSM이 제시되었다. 설계 변수의 변화에 따른 전동기 특성을 쉽게 예측할 수 있었고 다중의 목적함수를 만족시키는 최적 조건을 쉽게 찾을 수 있었다. 최종적으로 설계 방법의 유용성이 실험 및 FEA 결과와의 비교를 통해 입증되었다.

## [참고 문헌]

[1] G. H. Lee, S. I. Kim, J. P. Hong, and J. H. Bhan, "Torque ripple reduction of interior permanent magnet synchronous motor using harmonic injected current", IEEE Trans. Magn., vol. 44, no. 6, pp. 1582-1585, June 2008.

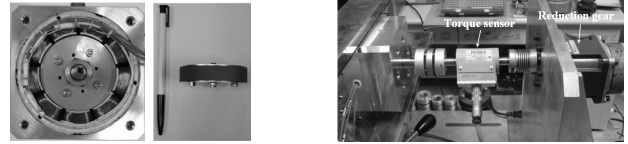
[2] 김성일, 이석희, 홍정표, 이지영, "매입형 영구자석 동기전동기의 인덕턴스 산정에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, B권, pp. 745-746, 2006.

〈표 2〉 설계 변수의 변화 영역

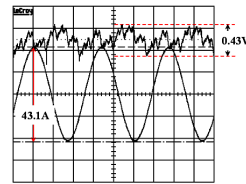
설계 변수	설계 변수 수준				
	$-\alpha$	-1	0	1	$\alpha$
$\theta_1$ [°]	39.5	60	90	120	140.4
$\theta_2$ [°]	43.2	50	60	70	76.8
$\theta_3$ [°]	36.6	40	45	50	53.4

〈표 3〉 최적 설계 결과

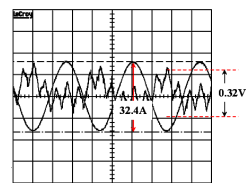
설계 변수	초기 모델	최적 모델
$\theta_1$ [°]	60	140.4
$\theta_2$ [°]	60	52.2
$\theta_3$ [°]	45	45



〈그림 8〉 최종 모델의 형상 및 실험 장치

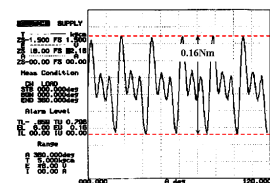


(a) 기저 속도에서 토크 리플 @  $\beta=32.5^\circ$

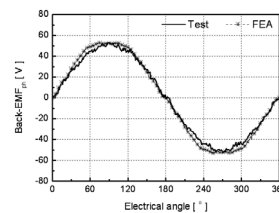


(b) 최대 속도에서 토크 리플 @  $\beta=63.6^\circ$

〈그림 9〉 토크 리플에 관한 FEA 및 실험 결과



〈그림 10〉 코깅 토크에 관한 FEA 및 실험 결과



〈그림 11〉 역기전력 왜형률에 관한 FEA 및 실험 결과

