

## 회전자 형상에 따른 매입형 영구자석 동기전동기의 토크 특성 비교 및 분석

이승재\*, 이재길\*, 정현교\*  
 서울대학교 전기정보공학부\*

### Torque Characteristics of IPMSM According to the Rotor Shape

Seung-Jae Lee\*, Jae-Gil Lee\*, Hyun-Kyo Jung\*  
 Seoul National University\*

**Abstract** - 본 논문은 100kW급 차량 구동용 매입형 영구자석 동기전동기의 회전자 형상에 따른 특성을 비교 분석하였다. 영구자석 사용량을 동일하게 유지하고, 자속장벽 길이와 자석의 각도를 설계변수로 하여 해석 모델을 선정하였다. 유한요소 해석을 통해 선정된 해석 모델의 평균 토크, 토크리플 특성을 비교, 분석하여 개선된 모델을 제시하였다.

를 주었다. 설계된 모델들 중 구조적으로 불가능한 형상의 모델은 제외하였고 영구자석의 두께와 길이, 즉 영구자석의 사용량과 센터포스트와 브릿지의 길이는 설계변수의 값과 상관없이 항상 일정한 값을 유지하였다.

### 1. 서 론

최근 환경오염과 화석연료의 고갈로 인해 엔진 자동차 대신 전기모터를 사용하는 자동차들이 개발되고 있으며 보다 더 높은 효율과 넓은 운전영역을 갖는 전동기를 개발하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 이 중 높은 효율과 출력밀도를 갖는 매입형 영구자석 동기전동기는 고에너지 밀도의 회로류계 자석재료의 활발한 개발과 함께 차량 구동용 모터로서 주류를 이루고 있다. 매입형 영구자석 동기전동기는 영구자석이 회전자 내부에 매입되어 있는 구조를 가진 전동기로 표면부착형 영구자석 전동기에 비해 고속 운전시 구조적으로 높은 안정성을 가지며 돌극성으로 인한 자로의 불균형에서 발생하는 토크리플을 이용해 높은 출력을 낼 수 있다. 또한 구조적으로 제한이 적어, 다양한 회전자 설계가 가능하다는 장점이 있다.[1]

본 논문에서는 차량구동용 매입형 영구자석 동기전동기 설계에서 회전자 형상의 변화에 따른 특성을 비교, 분석하였다. 영구자석의 사용량을 동일하게 유지하고, 자속장벽 길이와 자석의 각도를 설계변수로 하여 해석 모델을 선정하고, 유한요소 해석을 통해 선정된 해석 모델의 평균 토크, 토크리플 특성을 비교, 분석하여 개선된 모델을 제시하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 해석 모델의 구조 및 사양

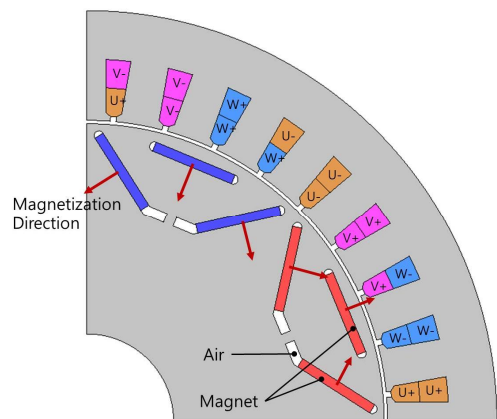
해석 모델은 100kW급 차량 구동용 매입형 영구자석 동기전동기로 8극 36슬롯의 구조를 갖고 정격 출력은 100kW 정격속도는 3600 rpm, 정격 토크는 265N·m이다. 표 1에 해석 모델의 구체적인 설계 사양을 제시하였고, 그림 1에 해석 모델의 1/4 형상을 나타내었다.

<표 1> 해석모델 기본사양

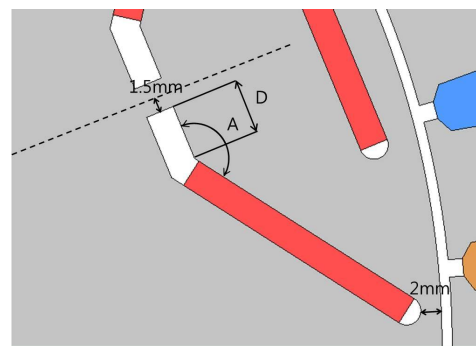
구분	구분	기본 사양
일반	극수/상수	8극 3상
	축방향 길이	230 [mm]
	공극 길이	1 [mm]
	최대 전류	640 [A]
	정격 속도	3600 [rpm]
고정자	정격 토크	265 [N·m]
	슬롯 수	36슬롯 (2층권)
	외경/내경	240/176 [mm]
회전자	슬롯당 턴수	8턴
	상 저항	4.5 [mΩ]
	외경/내경	174/50 [mm]
	자석 두께	2.8 [mm]
	자석 사용량	390 [cc]

#### 2.2 설계변수 설정

회전자 형상에 따른 전동기의 특성을 비교하기 위하여 그림2와 같이 설계변수를 선정하였다. 센터포스트에서 시작하는 자속장벽의 길이를 D라 하고 이와 영구자석이 이루는 각도를 A라 하였다. 기본 모델에서 변수 A의 값은 145°이고 D의 값은 5.5mm, 이다. 자속장벽의 길이 D는 1.5mm에서 10.5mm까지 변화시켰고 각도 A는 105°에서 150°까지 변화



<그림 1> 전동기의 형상



<그림 2> 설계 변수

#### 2.3 토크 특성 해석 결과 및 최적모델 선정

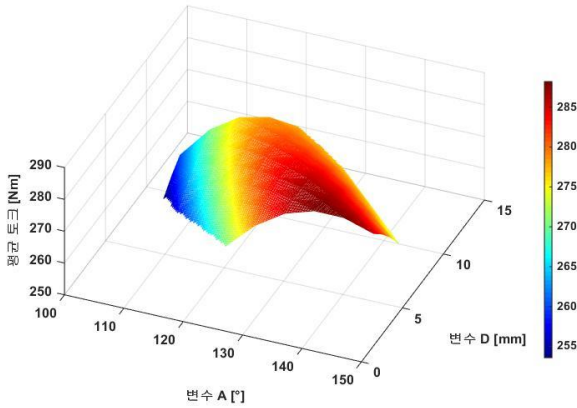
설계변수 A와 D를 각각 10단계로 바꾸며 총 100개의 서로 다른 해석 모델을 선정, 설계하였고, 이들 중 구조적으로 불가능한 형상의 모델은 제외하여 최종적으로 64개의 모델에 대하여 정격속도 3600rpm에서 상전류 640A 인가시 최대 평균토크와 토크리플을 분석하였다. 해석된 결과는 Matlab을 이용하여 3차원 그래프로 그림 3과 4에 나타내었다.

그림 3에서 보이는 바와 같이 평균토크 그래프는 최대값 주위로 값이 점차적으로 작아지는 언덕모양의 그래프가 나타났다. A가 커질수록, D가 작아질수록 평균토크가 커지는 경향을 보였으며 설계변수 A가 140, D가 1.5일 때 최대값이 나타났다.

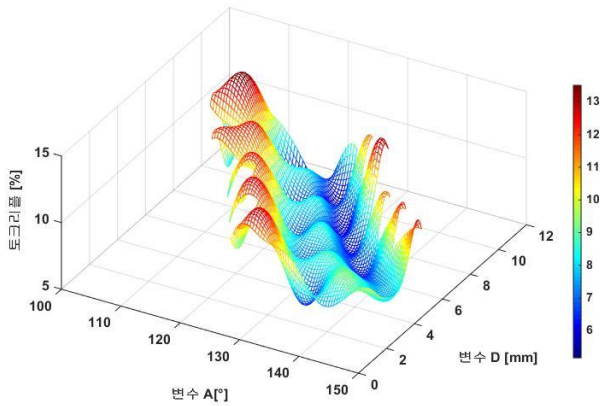
반면 토크리플 해석 결과에서는, 그림 4에 나타난 것과 같이 골짜기 형태의 그래프가 나타났으며 설계변수 A가 130 D가 7.5일 때 최소값을 갖는 것을 확인하였다.

결과값을 토대로 선정된 두 모델 모두 정격토크를 만족하지만 토크리플은 전동기의 소음 발생 및 진동에 영향을 주기 때문에 차량구동용 전동기의 설계인 점을 감안하여 토크리플의 감소율이 더 큰 모델을 최적 모델로 선정하였다.[2] 초기모델과 최적모델의 평균토크와 토크리플을 비교하여 표2에 나타내었다. 최적모델은 초기모델과 비교했을 때 2.36%

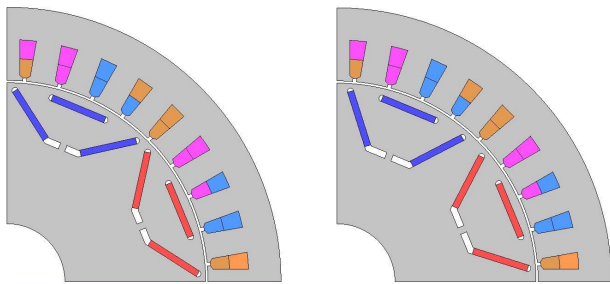
증가한 평균토크와 49.7% 감소된 토크리플을 보였다. 초기모델과 최적모델의 형상을 그림 5에 나타내었고, 각 모델의 토크 곡선을 그림 6에 비교하였다.



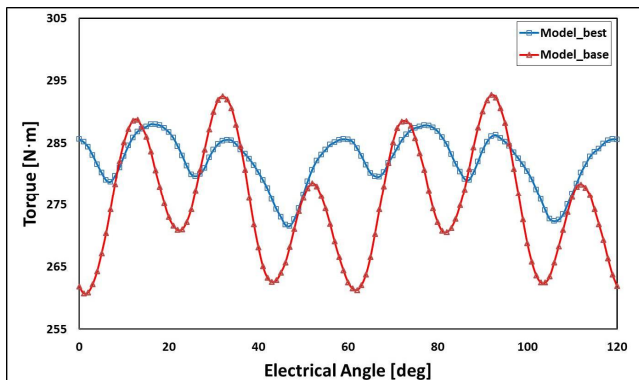
〈그림 3〉 설계변수 A와 D에 대한 평균토크 그래프



〈그림 4〉 설계변수 A와 D에 대한 토크리플 그래프



〈그림 5〉 초기모델(좌)과 최적모델(우)



〈그림 6〉 초기모델과 최적모델의 토크 곡선

〈표 2〉 초기모델과 최적모델의 토크특성비교

	초기모델	최적모델
설계변수 A [°]	145	130
설계변수 D [mm]	5.5	7.5
평균토크 [N·m]	275.6	282.1
토크리플 [%]	11.6	5.84

### 2.4 토크 특성 분석

매입형 영구자석 동기전동기의 토크는 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크의 합으로 나타나며 전체 토크, 마그네틱 토크, 릴럭턴스 토크 각각은 아래의 식 (1), (2), (3)과 같다.

$$T = P_n \left\{ \Psi_a I_a \cos\beta + \frac{1}{2} (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta \right\} \quad (1)$$

$$T_m = P_n \Psi_a I_a \cos\beta \quad (2)$$

$$T_r = \frac{P_n}{2} (L_q - L_d) I_a^2 \sin 2\beta \quad (3)$$

식 (1)은 영구자석 전동기의 일반적인 토크 식으로  $P_n$ 는 극쌍수,  $\Psi_a$ 는 영구자석에 의한 쇄교자속,  $I_a$ 는 전류,  $\beta$ 는 전류 위상각,  $L_q$ 는 q축 인덕턴스,  $L_d$ 는 d축 인덕턴스이다.[3]

차량구동용 동기전동기는 사용특성상 저속에서 고속까지 넓은 구동범위를 갖고 있다. 하지만 고속 운전영역에서는 역기전력 제한으로 인해 마그네틱 토크 성분을 크게 할 수 없어 릴럭턴스 토크를 극대화 할 수 있는 설계가 최적의 설계안이 될 수 있다.[1] 따라서 정격속도인 3600rpm을 넘어서는 고속 운전영역에서의 토크특성을 알아보기 위해 위 식을 이용하여 기본 모델과 논문에 제시된 최적 모델의 토크를 계산하여 표 3에 나타내었다.

〈표 3〉 초기모델과 최적모델의 토크특성 계산결과

	초기모델	최적모델
$L_q - L_d$ [H]	$7.55 \times 10^{-5}$	$8.32 \times 10^{-5}$
마그네틱 토크 [N·m]	188.8	182.5
릴럭턴스 토크 [N·m]	83.4	96.1
해석값과의 차이 [%]	1.2	1.2

위에서 선정된 최적모델의 경우 마그네틱 토크는 줄어든 반면 릴럭턴스 토크가 커졌기 때문에 고속 운전영역에서도 초기모델에 비해 개선된 특성을 보일 것으로 예상된다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 100kW급 차량 구동용 매입형 영구자석 동기전동기의 회전자 형상 설계를 변화시키며 유한요소 해석을 통하여 초기모델과 동일한 전류 인가시 정격 속도에서 각각의 특성을 비교해 보았다. 결과값을 토대로 정격토크를 만족하는 모델 중 토크리플을 저감하는 최적의 모델을 제시하였다. 제시된 모델은 기본 모델에 비해 평균토크는 2.36% 증가하였으며 토크리플은 49.7% 저감되었다. 또한 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크 계산을 통해 고속 운전영역에서의 구동 특성을 분석하여 고속 운전영역에서도 초기모델보다 개선된 토크 특성을 보일 것으로 예상할 수 있었다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 광상업, "차량 구동용 다층 매입형 영구자석 전동기의 특성 해석 및 설계", 서울대학교 대학원 학위논문, 2007
- [2] 김창기, 이상곤, 정상용, "정밀제어용 표면부착형 영구자석 동기전동기의 코깅토크 및 토크리플 저감 설계", 대한전기학회 논문지, 제58권, 2009
- [3] 설승기, "전기기기제어론", 브레인코리아, pp.223-227, 2000