

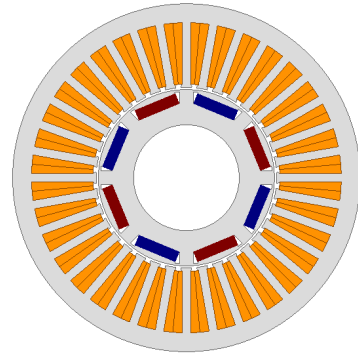
출력 특성 향상을 위한 IPMSM 영구자석 전동기 고정자 최적 설계 연구

김영광\*, 김성우\*, 이강석\*  
부천대학교\*

A Study on Improvement of Power characteristics of IPMSM Optimization design

Young Kwang Kim\*, Seong Woo Kim\*, Gang Seok Lee\*  
Bucheon University \*

**Abstract** - 영구자석 전동기는 다양한 산업 분야에 사용되고 있으며, 고풍력 연구가 활발히 진행되고 있다. 전동기의 출력은 토크와 연관되며, 영구자석 전동기의 구조에 따라 토크는 변화한다. 전동기의 구조는 크게 회전자와 고정자로 나뉘어지며, 회전자는 영구자석과 베리어의 구조를 통해, 고정자는 치, 슈, 백요크 구조를 통해 토크 최대화 최적 설계를 진행한다. 본 논문은 내장형 영구자석 동기 모터(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, 이하 IPMSM)의 회전자와 고정자 중 고정자 최적 설계를 진행하여 최대 토크 설계를 진행하였다. 토크 최대화 최적 설계를 위해 고정자의 형상 중 고정자 슈, 치 형상을 결정하였으며, 턴수의 경우 슬롯 면적과 점적률, 전류밀도를 통해 결정하였다.



<그림 1> IPMSM 영구자석 전동기 구조

1. 서 론

현재 전동기의 경우 자성 재료에 따라 크게 두 가지 범주로 나뉘어진다. 하나는 희토류 자원을 기반으로 한 영구자석형 전동기(Permanent Magnet Motor)이고, 다른 하나는 이러한 희토류 자원을 사용하지 않는 비희토류형 전동기(Non-rare Earth Motor)이다. 영구자석 전동기의 경우 비희토류 전동기에 비해 고풍력 특성을 가지고 있다. 영구자석 전동기는 영구자석의 위치와 구조에 따라 SPMSM(Surface Permanent Magnet Synchronous Motor)과 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)로 구분되어진다.

현재 IPMSM의 최대 토크에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 특히 출력 특성을 극대화하는 설계 기술에 대한 관심이 점점 높아지고 있다. 이는 IPMSM 모터가 고효율 장점을 바탕으로 다양한 산업 분야에서 널리 활용되고 있기 때문이다. 예를 들어, 전기자동차(EV), 무인항공기(드론), 고급 가전제품, 산업용 로봇 등 고성능이 요구되는 응용 분야에서는 제한된 공간과 에너지 효율의 제약 조건 내에서 가능한 한 높은 출력을 확보하는 것이 매우 중요한 과제로 대두되고 있다. 이러한 산업적 요구에 부응하기 위해 IPMSM 모터의 설계 최적화, 특히 출력 특성의 향상에 초점을 맞춘 연구가 절실히 필요하다. 본 논문에서는 이러한 기술적 배경과 필요성에 기반하여, IPMSM 전동기의 출력 성능을 극대화하기 위한 설계 방안을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 영구자석 전동기 최적화 파라미터

영구자석 전동기의 최적화 설계는 고정자와 회전자로 나뉘어질 수 있으며, 본 논문은 고정자의 최적화 설계를 다룬다. 영구자석 전동기 고정자 직경과 회전자 형상이 정해진 경우 고정자는 백요크, 치, 슈의 형상에 따라 슬롯 면적과 상당 턴 수, 자기포화도가 변하여 토크에 영향을 미친다. 이에 따라 고정자 형상 설계는 전동기의 성능 향상을 위해 매우 중요한 요소로 작용한다. <그림 1>은 IPMSM 전동기의 구조를 나타내며, <그림 2>는 IPMSM 전동기의 형상 치수들을 나타낸다.

<그림 1>의 형상 치수에 따라 슬롯의 면적( $A_{slot}$ )은 수식(1)과 같이 표현된다.

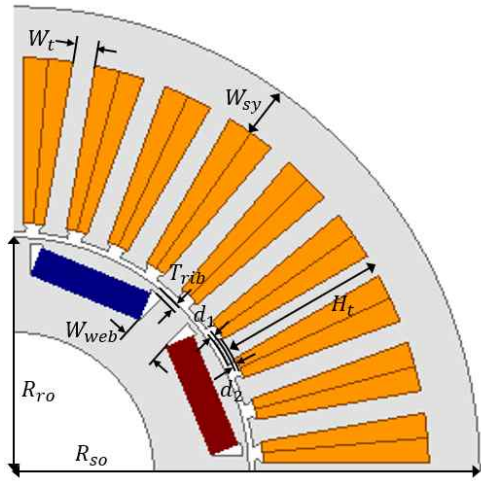
$$A_{slot} = \frac{((R_{so} - W_{sy})^2 - (R_{so} - W_{sy} - H_t)^2)\pi}{N_{slot}} - H_t W_t$$

$$= 2N_{turn} \frac{I_a}{J} \tag{1}$$

위의 수식에서 알 수 있듯이, 백요크 길이( $W_{sy}$ ), 고정자 반지름( $R_{so}$ ), 슬롯 수( $N_{slot}$ ), 치 두께( $W_t$ ), 치 너비( $H_t$ )는 슬롯 면적( $A_{slot}$ )을 결정하고, 슬롯 면적과 고정자 전류( $I_a$ ), 전류밀도( $J$ )에 따라 상당 턴수( $N_{turn}$ )를 결정할 수 있다. 결정된 상당 턴수는 각 상의 기자력 크기와 비례하여 영구자석 전동기의 토크를 결정한다.

2.2 영구자석 전동기 최적화 설계 Simulation

영구자석 전동기의 설계는 전자계 해석이 필수적이며 수학적 모델링인 자기등가회로(Magnetic Equivalent Circuit, MEC)와 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)이 사용된다. 자기등가회로의 경우 계산 속도가 빠르고 대략적인 성능 예측에는 유리하나 누설자속이나 자속 경로의 복잡한 분포를 정밀하게 반영하기 어려우며, 코어 소재의 비선형적인 자기포화 특성을 반영하지 못해 해석 결과에 오차가 존재한다. 특히 고성능이 요구되는 IPMSM과 같은 구조에서는 자속 분포의 미세한 변화가 전체 출력 특성에 큰 영향을 미치기 때문에, 정밀한 자기 해석이 더욱 중요하게 작용한다. 이를 고려하여 본 논문에서는 보다 신뢰도 높은 유한요소해석 기반 시뮬레이션을 활용하여 IPMSM 특성 해석을 진행하고, IPMSM의 출력을 극대화할 수 있는 최적화 설계를 수행하였다. 또한, 다양한 설계 변수들의 영향도를 분석하여 최적 설계 방향을 체계적으로 도출하였다. 영구자석 전동기의 설계 조건은 <표 1>과 같다.



<그림 2> 영구자석 전동기 형상 치수

<표 1> 영구자석 전동기 설계 조건

	Value	Unit
BaseRPM	6,000	RPM
Torque	25	Nm
고정자 최대 직경	165.8	mm

<표 2> 영구자석 전동기 설계 파라미터

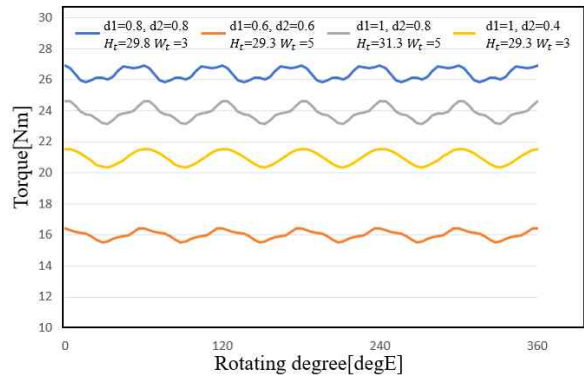
	Value	Unit
극 수/슬롯 수	8/36	Pole/Slot
코어 재질	S08	
영구자석	Nd35FE	
고정자 최대 직경	6,000	RPM
회전자 최대 직경	84	mm
고정자 최대 직경	165.8	mm
백요크 길이	9	mm
치 길이	29.3~31.3 (0.5step)	mm
치 두께	3~5	mm
영구자석 두께	5	mm
영구자석 길이	20.7	mm
립 두께	1	mm
웹 두께	6.4	mm
슈 길이( $d_1$ )	0.2~1(0.2step)	mm
슈 길이( $d_2$ )	0.2~1(0.2step)	mm

<표 3> 영구자석 전동기 최적 설계 결과

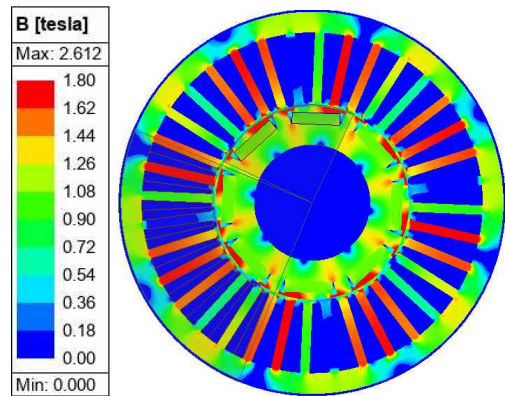
	Value	Unit
치 길이	29.8	mm
치 두께	3	mm
슈 길이( $d_1$ )	0.8	mm
슈 길이( $d_2$ )	0.8	mm
토크	26.83	Nm

설계 조건을 만족하는 전동기를 설계하기 위하여 기초 모델을 선정하였으며, <표 2>는 기초모델의 설계 파라미터와 최적화 범위를 나타낸다. 최적 설계를 위하여 본 논문은 슈 길이( $d_1$ ,  $d_2$ ), 치 길이, 치 두께를 변화시켰다.

<그림 2>는 최적화 설계에 활용된 bar-type IPMSM 전자기 해석 시뮬레이션 모델과 각 Geometric value들을 나타낸다.



(a) IPMSM 전동기 토크 그래프



(b) 최적 설계 전동기 자속 밀도 분포

<그림 3> 영구자석 전동기 해석

<그림 3>과 <표 3>은 최적 설계 결과를 나타낸다. 최소 토크를 내는 설계는 치 길이, 치 두께, 슈 길이( $d_1$ ,  $d_2$ )가 29.3mm, 5mm, 0.6mm, 0.6mm 일 경우 15.98Nm로 확인되고 최적 설계 결과 치 길이, 치 두께, 슈 길이( $d_1$ ,  $d_2$ )가 29.8mm, 3mm, 0.6mm, 0.8mm, 일 경우 26.83Nm의 토크로 최대토크가 발생함을 확인하였으며, 6,000RPM에서 요구 토크 25Nm를 만족함을 확인하였다.

### 3. 결 론

논문에서는 IPMSM 전동기의 출력 특성을 향상시키기 위해 슈와 치의 구조를 변형시켜 극효율에 따라 출력 특성을 비교 분석한 후 최적의 극효율을 선정하여 출력특성을 향상시켰다. 또한 고정자 슈  $d_1$ 의 길이를 0.8 mm로 정하고  $d_2$ 의 길이를 0.8mm로 정하고 치의 길이는 29.8 mm 두께는 3 mm로 정하여 턴 수의 값을 정하고 최대 토크값인 26.83 Nm을 출력하는 모터의 형상을 검출하였다. 전동기의 슈, 치의 면적에 따른 코일의 턴 수를 구하여 출력값인 토크의 연관성을 찾아 최대 토크를 낼 수 있는 최적화 포인트를 찾는다.

### [참고 문헌]

- [1] 이승원, 양인준, 신동윤, 김원호, "EPS용 IPMSM의 코딩토크 및 토크리플 저감에 관한 연구", 대한전기학회 학술대회 논문집, 187-188, 2021
- [2] 위현우, 김남호, 왕창현, 조제훈, 정상용, "EPS용 Spoke Type IPMSM 토크 성능 향상을 위한 회전자 코어 및 고정자 토치 형상 설계", 대한전기학회 학술대회 논문집, 페이지, 489-1,490, 2024
- [3] 오호진, 지태혁, 노시현, 김용재, 정상용, "고정자 요크 폭에 따른 분수 슬롯 치집중권 IPMSM 성능 비교", 대한전기학회 학술대회 논문집, 203-205, 2021