



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

저용량 Spoke-type IPMSM

설계에 관한 연구



2022 年 2 月

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

閔 株 賢

工學碩士 學位論文

저용량 Spoke-type IPMSM 설계에 관한 연구

指導教授 禹 炘 一

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2022 年 2 月

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

閔 株 賢

이 論文을 閔株賢의 碩士學位
論文으로 認准함

2022 年 2 月 25 日

主審 工學博士 朴 瀚 錫 ⑩

委員 工學博士 文 相 弼 ⑩

委員 工學博士 禹 炅 一 ⑩

목 차

Abstract	ii
제 1 장 서 론	1
제 2 장 영구자석 동기전동기	2
2.1 영구자석 동기전동기의 회전 원리	2
2.2 영구자석 동기전동기의 회전자 구조	6
2.3 영구자석 동기전동기의 역기전력 형태	8
2.4 영구자석 동기전동기의 출력 방정식	9
제 3 장 Spoke-type IPM 동기전동기 설계	12
3.1 설계 사양 및 회전자 구조 선정	12
3.2 극 수 및 슬롯 수 선정	13
3.3 공극체적 산정	14
3.4 권선 설계	16
3.5 고정자 형상 설계	18
3.6 Spoke-type IPM 동기전동기 설계 결과	21
제 4 장 해석 결과 및 고찰	23
제 5 장 결 론	29
참고문헌	30

A Study on the Design of Low Power Spoke-type IPMSM

Ju-Hyun, Min

Department of Electrical Engineering

Graduate School of Industry

Pukyong National University

Abstract

The Permanent Magnet Synchronous Motor(PMSM) is a profit model as a next generation servo motor because it has less rotor loss, high efficiency, high torque/inertia characteristics. Also, Spoke-type Interior Permanent Magnet Synchronous Moror (IPM) has advantages such as high torque/output density, small sizing, possible high speed drive.

This paper describes on the design of low power Spoke-type IPMSM. For this the characteristics of IPMSM varying the construction of rotor is analyzed. The design of IPMSM follows the load distribution method. After the design of winding is performed by analyzing the winding coefficient the construction of the stator is determined. To verify the design validation the design results such as no load back electromotive force, cogging torque, load torque, flux density obtained by FEM are compared with those of experiment.

제 1 장 서 론

서보모터는 세계적으로 산업용 로봇을 포함하여 의료기기, 포장 및 패키징, 반도체 제조장치, 공작기계, 사무 및 공장 자동화 설비 등 적재적소에 많은 수요가 있다. 이러한 제조공정이나 자동화 설비 등이 정밀화 혹은 세분화 됨에 따라, 서보모터 시장은 점차 확대되어 왔다.

서보모터 산업은 초기 독일, 프랑스, 미국 그리고 영국 등에서 전자 산업을 중심으로 발전되어 왔으며, 일본이 성능대비 저렴한 가격으로 시장을 개척하는 추세이다. 대표적으로 Yaskawa를 포함하여, Mitsubishi, Parasonic 등 일본의 서보모터 업체들은 1980년대 반도체 시장의 성장을 기반으로 생산 자동화 라인 등에서 많은 기술개발과 노하우를 보유하고 있으나, 국내에서는 자국의 제품군을 내수하여 사용하는 것보다 주로 일본에서 수입하여 사용하고 있는 실정이다.

이러한 관점에서 본 논문에서는 서보 application을 위한 영구자석 동기전동기를 설계한다. 이를 위해 먼저, 영구자석 동기전동기의 회전자 구조에 따른 특성을 분석한다. 영구자석 동기전동기는 회전자 손실이 없어 효율이 높으며, 토크/관성 비가 높은 특성을 갖고 있어 차세대 서보모터로 적합한 모델이다.

영구자석 동기전동기 설계는 장하분배법을 이용한 공극 체적 산정을 시작으로, 코일 피치에 따른 권선계수 분석을 통해 권선 사양을 선정하고, 이를 만족하는 고정자 형상을 결정하는 순으로 수행한다. 이후 무부하 역기전력, 코깁 토크, 부하 토크, 자속밀도 분포 및 자속선도 등을 FEM으로 해석하여 설계 정확성을 비교함으로써 본 논문에서 설계된 전동기를 검증한다.

제 2 장 영구자석 동기전동기

2.1 영구자석 동기전동기의 회전 원리

평형 3상 교류 전원을 120[deg]의 전기각 간격으로 배치되어 있는 3상 고정자 권선에 연결하여 전류를 흘리면 그림 1에 보이는 바와 같이 일정 크기를 갖고 인가 전원의 각주파수로 회전하는 하나의 자석이 공극에 발생한다. 이를 회전자계(Rotating Magnetic Field)라고 부르며, 3상 권선에 흐르는 전류에 의한 합성 공극 자속을 구할 수 있다.

그림 2의 a상 권선에 전류가 흐르면 암페어의 주회법칙에 따라 권선의 축 방향으로 공극에 기자력이 발생하며, 그 크기는 전류의 크기에 따라 달라진다. b상과 c상 역시 각각의 권선 축을 중심으로 각 전류의 크기에 비례하는 기자력이 발생한다. 공극에는 이들 3상 권선에서 발생하는 기자력의 합이 나타나는데, 3상 권선이 서로 120[deg]의 전기각만큼 떨어져 있고, 각 권선에 흐르는 전류의 위상차가 서로 120[deg]인 경우, 이는 N극과 S극이 하나씩 있는 2극 자석으로 취급할 수 있다. 이 합성 기자력은 권선에 흐르는 전류의 각속도로 공극에서 회전한다.

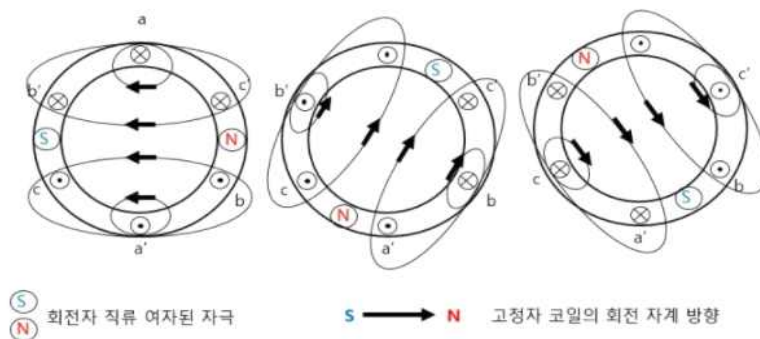


그림 1. 동기 전동기의 회전 원리

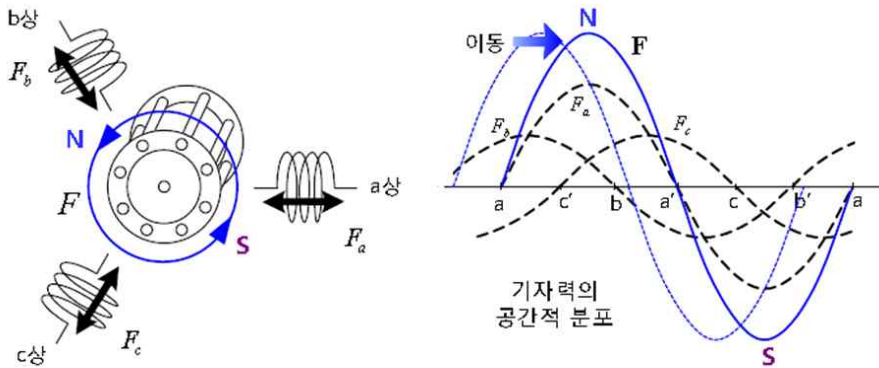


그림 2. 3상 합성 기자력

고정자 권선에 식 (1)과 같은 I_m 의 크기를 갖는 3상 평형 전류가 흐른다고 가정하자. 여기서 $\omega_s (= 2\pi f_s)$ 는 전류의 각속도이고, f_s 는 전류의 주파수이다.

$$\begin{aligned}
 i_a &= I_m \cos \omega_s t \text{ [A]} \\
 i_b &= I_m \cos \left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) \text{ [A]} \\
 i_c &= I_m \cos \left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} \right) \text{ [A]}
 \end{aligned} \tag{1}$$

그림 3에 고정자 3상 전류의 시간 흐름에 따른 전류의 공간상의 분포를 나타내었다. 시간이 t_0 에서 t_3 으로 흘러감에 따라 권선의 전류 분포에 의한 기자력은 a상, b상 그리고 c상의 권선 축 방향으로 움직이는 것을 확인할 수 있다. 전류 한 주기 변동에 대해 기계적으로 1회전을 하며, 3상 권선 중 두 상의 결선을 바꾸면 회전자계의 방향이 반대가 된다.

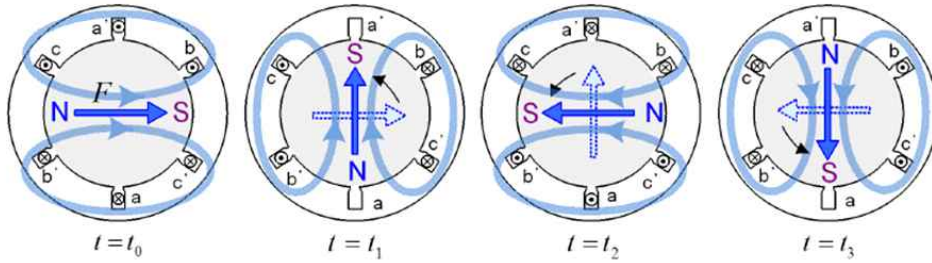


그림 3. 전류 한 주기에 대한 3상 합성 기자력의 이동

3상 권선이 $P/2$ 세트가 배치되는 경우에는 $P/2$ 쌍의 N-S극 분포가 생성되어 P 극기가 되는데, 이 경우 전류 한 주기 동안 기계적으로 $2/P$ 만큼 회전하게 되어 전기적인 $P/2$ 주기가 기계적인 1주기가 된다. 즉 전기각 θ_e 와 기계각 θ_m 사이에는 식 (2)와 같은 관계가 있다.

$$\theta_e = \left(\frac{P}{2} \right) \theta_m \text{ [rad]} \quad (2)$$

따라서 P 극기에서 회전자계의 분당 회전수(r/min)은 식 (3)과 같이 구할 수 있으며, 이 회전자계의 속도를 동기속도(Synchronous Speed)라고 정의한다. 예를 들어 4극기에 60[Hz]의 전원이 인가하는 경우 동기속도는 1,800[r/min]이다.

$$n = \frac{2}{P} \cdot f_s \cdot 60 = \frac{120}{P} f_s \text{ [r/min]} \quad (3)$$

유효 턴 수 N_s 를 갖는 3상 권선에 흐르는 전류에 의한 각 상의 기자력은 공간상에서 정현적으로 분포되므로 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

여기서 a 상 기자력이 발생하는 권선 축을 $\theta = 0[\text{deg}]$ 의 기준으로 정의하였다.

$$\begin{aligned}
 F_a(\theta) &= N_s i_a \cos \theta \quad [\text{AT}] \\
 F_b(\theta) &= N_s i_b \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \quad [\text{AT}] \\
 F_c(\theta) &= N_s i_c \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \quad [\text{AT}]
 \end{aligned} \tag{4}$$

식 (1)과 같은 전류가 주어지면 식 (5)와 같이 3상 평형 전류에 의한 합성 기자력을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F(\theta) &= F_a(\theta) + F_b(\theta) + F_c(\theta) \\
 &= N_s I_m \left[\cos \omega_s t \cos \theta + \cos \left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right. \\
 &\quad \left. + \cos \left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\
 &= \frac{3}{2} N_s I_m \cos(\omega_s t - \theta)
 \end{aligned} \tag{5}$$

식 (5)는 3상 평형 전류에 의한 합성 기자력이 항상 일정한 크기를 갖고 공간상에서 정현적으로 분포하며, 그 분포의 형태는 시간에 따라 전류의 각속도로 움직이는 것을 의미한다.

영구자석 동기전동기의 공극에는 그림 4에 보이듯이 동기속도로 회전하는 독립된 두 개의 회전자계가 존재한다. 하나는 3상 고정자 권선에서 3상 교류 전류에 의해 발생한 것이고, 다른 하나는 회전자의 영구자석에 의해 발생한 것이다. 회전자의 영구자석에 의해 발생하는 자계는 직류자

게이나 이것이 고정자의 회전자계와 붙으려 하여 발생하는 힘에 의해 동기속도로 회전한다. 이처럼 동일한 속도로 회전하려 하는 두 자계의 상호작용으로 지속적인 토크가 발생하며, 동기전동기의 고정자 권선에는 이들 두 회전자계가 쇄교한다.

2.2 영구자석 동기전동기의 회전자 구조

영구자석 동기전동기는 사용된 영구자석의 종류에 따라 성능이 달라지며, 같은 종류의 영구자석을 사용하더라도 그 형상과 배치에 따라 다른 특성을 나타낸다. 이러한 영구자석 동기전동기의 회전자는 영구자석 배치에 따라 표면에 부착되어 있는 표면부착형(SPM, Surface-mounted PM), 회전자 내부에 삽입된 매입형(IPM, Interior PM)으로 분류할 수 있으며, 매입형 안에서도 영구자석의 극이 원주 방향을 향하도록 매입된 원주 매입형과 방사 방향을 향하도록 매입된 방사 매입형으로 분류할 수 있다. 원주 매입형의 경우 일반적인 매입형 구조이며, 방사 매입형의 경우 Spoke-type으로 부르기도 한다.

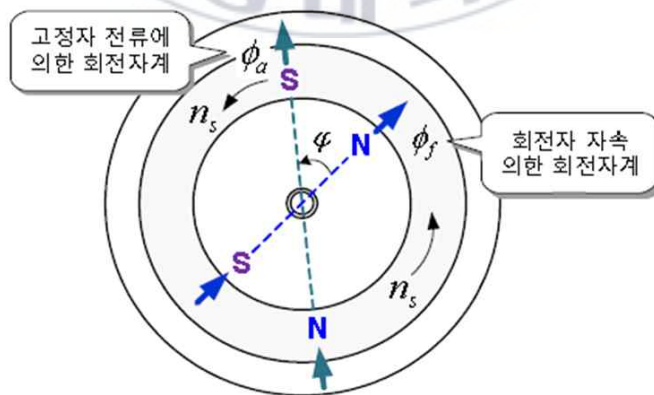


그림 4. 동기전동기의 고정자 및 회전자 회전자계

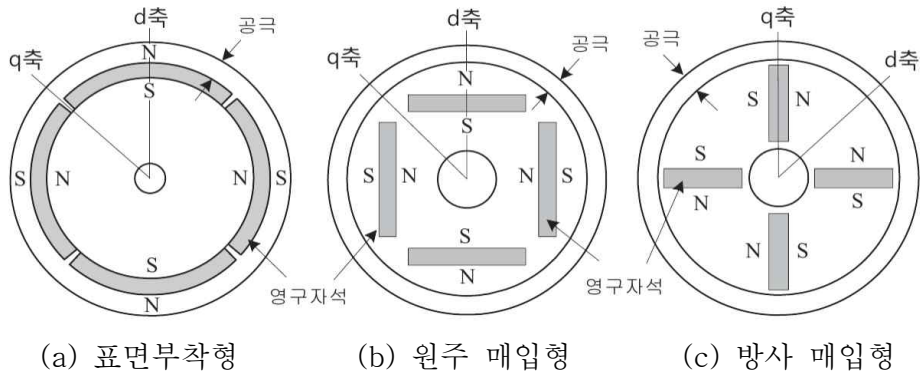


그림 5. 영구자석의 배치와 배열에 따른 회전자 구조

각 타입에 따른 특성은 다음과 같다[7-9]. 표면부착형의 경우 영구자석이 표면에 일정한 두께로 배치되어 있어 d축과 q축의 인덕턴스가 동일하여 공극 자속밀도의 왜곡이 상대적으로 적어 가장 정현파적인 역기전력과 리플이 적은 토크를 얻을 수 있다는 장점이 있으나, 고속 회전 시 원심력에 의한 비산 우려가 존재한다. 원주 매입형의 경우 유효 공극을 작게 하여 약계자 운전이 유리하고, 영구자석의 비산 문제가 없어 기계적으로 튼튼하여 고속 운전에 유리하나, 회전자 철심 내에 부분적인 포화와 기자력 강하로 인해 유효 공극 자속밀도가 비교적 낮아 역기전력과 토크특성이 비교적 나쁘다. 방사 매입형의 경우 자속을 집중시킬 수 있는 구조로 인해 높은 공극 자속밀도를 갖고 있어 역기전력과 토크특성이 비교적 높은 장점이 있으므로, 전동기의 사이징 측면에서 가장 유리한 회전자 타입이다.

2.3 영구자석 동기전동기의 역기전력 형태

영구자석 동기전동기는 그 구조의 유사성으로 인해 BLDC 전동기와 외간으로 구분하기 어려우나 역기전력의 형태로 두 전동기를 분류할 수 있다[10-11]. 영구자석 동기전동기의 영구자석은 정현파 전류와 작용하여 일정한 토크를 발생시켜야 하기 때문에 평행(parallel)으로 착자되어 정현파 형태의 역기전력이 발생한다. 반면, BLDC 전동기의 영구자석은 고정자 권선에 흐르는 구형파 전류와 작용하여 일정한 토크를 발생시키기 때문에 방사상(radial)으로 균일하게 착자되어 있어 역기전력의 형태가 근사 사다리꼴이 된다.

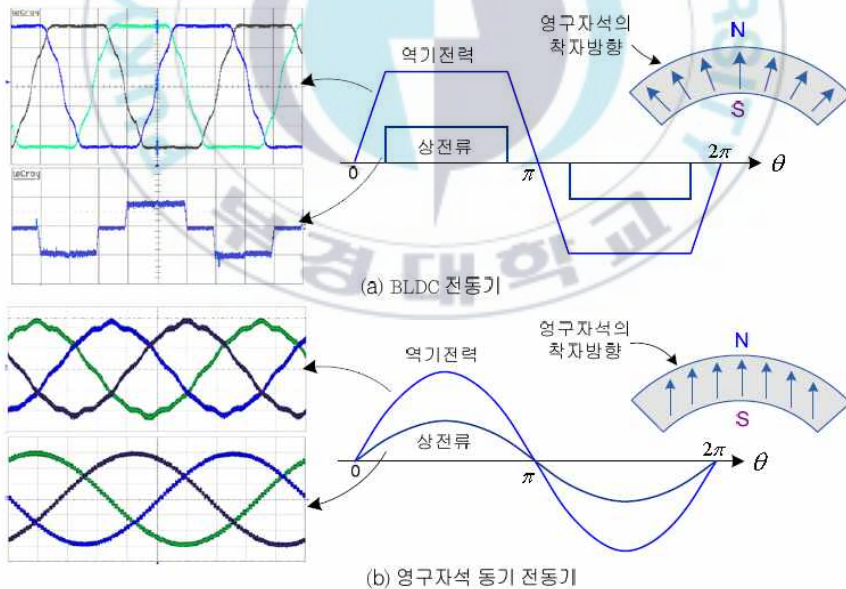


그림 6. 영구자석 동기전동기와 BLDC 전동기의 전류 및 역기전력 비교

영구자석 동기전동기와 BLDC 전동기의 특징을 표 1에 간략히 비교하였다. 사다리꼴의 역기저력을 갖는 BLDC 전동기에 비해 정현파의 역기전력을 갖는 영구자석 동기전동기의 전력 밀도가 약 15% 정도 더 낮고 시스템 가격도 비교적 고가이나, 상전류 전환 구간에서 토크 리플이 적은 등 출력 특성이 좋은 장점이 존재한다.

표 1. 영구자석 동기전동기와 BLDC 전동기의 비교

구 분	영구자석 동기전동기	BLDC 전동기
역기전력	정현파	근사 사다리꼴
고정자 전류	정현파	구형파
구동 장치	인버터 (3상 여자방식)	인버터 (2상 여자방식)
토크 리플	작은 토크 리플	상전류 전환 시 토크 리플 발생
시스템 가격	고가	저가

2.4 영구자석 동기전동기의 출력 방정식

3상 영구자석 동기전동기의 입력 전력은 다음과 같다.

$$P_{in} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad [W] \quad (6)$$

식 (6)는 고정자 기준 abc 좌표계이며, 이를 회전자 기준 $dq0$ 좌표계로 변환하면,

$$\begin{aligned}
P_{in} &= \mathbf{i}_{abc}^T \mathbf{v}_{abc} = (\mathbf{T}_{dq0}^{-1} \mathbf{i}_{dq0})^T \mathbf{T}_{dq0}^{-1} \mathbf{v}_{dq0} \\
&= \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) + 3 v_0 i_0 \\
&= \frac{3}{2} \begin{bmatrix} R_s (i_d^2 + i_q^2) \\ + i_d \frac{d\lambda_d}{dt} + i_q \frac{d\lambda_q}{dt} \\ \omega_{em} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \end{bmatrix} + 3 i_0^2 R_0 + 3 i_0 \frac{d\lambda_0}{dt}
\end{aligned} \tag{7}$$

여기서 $\mathbf{T}_{dq0}$ 는 좌표 변환 행렬이며, $\mathbf{T}_{dq0}^{-1}$ 는 역 변환 행렬로 다음과 같다.

$$\mathbf{T}_{dq0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_{em} & \cos \left(\theta_{em} - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta_{em} - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta_{em} & -\sin \left(\theta_{em} - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta_{em} - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{8}$$

$$\mathbf{T}_{dq0}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{em} & -\sin \theta_{em} & 1 \\ \cos \left(\theta_{em} - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta_{em} - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\theta_{em} - \frac{4\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta_{em} - \frac{4\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \tag{9}$$

위 수식의 대괄호 안 첫 번째 항은 고정자 동손에 해당하는 부분이며, 두 번째와 세 번째 항은 자기적인 에너지에 해당한다. i_0 에 의한 항 또한 손실과 자기적인 에너지에 해당하므로 식 (2.62)에서 공극으로 전달되는

전력은 대괄호 안 네 번째 항만 존재한다.

$$\begin{aligned}
 P_{ag} &= \frac{3}{2} \omega_{em} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \\
 &= \frac{3}{2} \omega_{em} [(L_d - L_q) i_d i_q + \lambda_{pm} i_q]
 \end{aligned} \tag{10}$$

따라서 전기적인 각속도를 기계적인 각속도로 변환하여 공극에서의 토크를 유도할 수 있다.

$$P_{ag} = \frac{3}{2} p \omega_m [(L_d - L_q) i_d i_q + \lambda_{pm} i_q] \text{ [W]} \tag{11}$$

$$T = \frac{3}{2} \omega_m [(L_d - L_q) i_d i_q + \lambda_{pm} i_q] \text{ [Nm]} \tag{12}$$

제 3 장 Spoke-type IPM 동기전동기 설계

3.1 설계 사양 및 회전자 구조 선정

표 2는 본 논문의 설계 목표인 저용량 전동기의 설계 사양을 나타낸다. 해당 전동기는 서보 application에 적용될 예정이며, 이를 위해 높은 토크 밀도 / 출력밀도, 소형 및 경량화가 요구된다[4]. 이러한 설계 사양을 만족하고자 본 논문에서는 Spoke-type(방사 매입형)의 회전자 구조를 채택하였다. Spoke-type의 경우 앞서 언급한 요구조건을 만족하기에 비교적 수월할 뿐만 아니라, 정격 회전속도와 최고 회전 속도가 각각 3,000[rpm] 및 6,000[rpm]으로 고속 운전 시 기계적인 구조 측면에서도 유리하다.

표 2. 전동기 설계 사양

요구되는 파라미터	기호	값	단위
상 수	m	3	-
극 수	P	10	-
슬롯 수	Q	12	-
정격 출력	P_{out}	0.2	kW
정격 토크	τ	0.637	Nm
정격 회전속도	N_m	3,000	rpm
최고 회전속도	N_{max}	6,000	rpm

3.2 극 수 및 슬롯 수 선정

Spoke-type IPM 동기전동기의 극 수는 회전속도와 입력 주파수에서 식 (6)의 관계가 있으며, 제어기의 carrier frequency를 고려하여 선정한다.

$$N_s = \frac{120}{P} f \quad (6)$$

여기서 N_s [rpm]는 동기속도이며, P 는 극 수, f 는 입력 주파수[Hz]이다. 제어기의 carrier frequency는 식 (7)과 같이 최대 회전속도 시 입력 주파수의 15배 이상 되어야 안정성에 문제가 없으며, 입력 주파수와 회전속도는 비례관계이므로 6,000[rpm]의 최고속도에서 제어기의 carrier frequency를 10[kHz]로 가정하면 10극을 선정할 수 있다.

$$f = \frac{6,000 \times P}{120} \leq \frac{10 \times 10^3}{15} \text{ [Hz]} \quad (7)$$

슬롯 수의 경우 좋은 토크특성을 얻도록 역기전력의 기본파 성분이 높은 권선계수가 되게 하는 극 수/슬롯 수 조합을 고려하여 선정할 수 있으며, 소음 및 진동을 고려하여 식 (8)의 수식으로도 선정할 수 있다.

$$\mu = \frac{|0.5r_\lambda \mp Q|}{p} = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

여기서 Q 는 슬롯 수, p 는 극쌍 수이다. r_λ 값이 작을수록 진동/소음에 취약하며, μ 값이 정수가 되게 하는 r_λ 값을 역산하여 슬롯 수를 선정할 수 있다. 12 슬롯일 경우 r_λ 값이 4일 때 μ 값이 1을 만족하므로, 극 수/슬롯 수 조합을 10극 12슬롯으로 선정함.

3.3 공극체적 산정

Spoke-type IPM 동기전동기의 공극 체적은 기계적 출력과 식 (9)의 관계가 있다[12-13].

$$P_{mech} = \frac{1}{60} k_{stk} \pi^2 B_g(ac) D_g^2 L_{stk} N_m \text{ [W]} \quad (9)$$

여기서 P_{mech} 는 기계적인 출력, k_{stk} 은 적층 점적률, B_g [T]는 자기장하, (ac) [A/m]는 전기장하, D_g [m]는 공극 직경, L_{stk} [m]은 적층 길이, N_m [r/min]은 회전속도이다. 전기장하와 자기장하만 가정하면 서보모터의 공극 체적인 $D_g^2 L_{stk}$ 을 산정하는 것이 가능하며, 회전기계의 종류에 따른 참고적인 수치를 표 3에 나타내었다.

그리고, Spoke-type을 채택하여 설계 및 제작이 진행되는 점을 고려하여 공극 길이를 0.3mm로 선정하였다. 이는 표면부착형과 다르게 영구자석 비산의 염려가 없어 기계적으로 안정적인 구조인데다, 유효 공극을 작게 하여 약계자 운전이 유리한 점을 고려하였다.

전기장하와 자기장하의 분배로 얻은 공극 체적을 정격 토크로 나누어 단위 회전자 체적당 발생하는 토크특성을 선정할 수 있다. 이를 TRV라 하며, 회전기계의 타입에 따라 아래의 표 4에 정리하였다.

표 3. 회전기기 타입에 따른 전기장하와 자기장하 선정

회전기기 타입	전기장하 [A/m]	자기장하 [T]
10kW 이하의 유도기	10,000 ~ 35,000	0.6 ~ 0.8
1,000kW 이하의 유도기	25,000 ~ 45,000	0.6 ~ 0.8
10kW 이하의 영구자석형 동기기	15,000	0.7
1,000kW 이하의 영구자석형 동기기	~ 60,000	0.8

표 4. 회전기기의 타입에 따른 TRV 선정

회전기기 타입	TRV [kNm/m ³]
소용량 전폐형 회전기기 (페라이트 적용 시)	7 ~ 14
전폐형 회전기기 (NdFeB 적용 시)	14 ~ 42
전폐형 회전기기 (본딩된 NdFeB 적용 시)	21
산업 통합형 회전기기	7 ~ 30
고성능 서보모터	15 ~ 50
항공에 적용되는 회전기기	30 ~ 75
수냉식 대용량 회전기기	100 ~ 250

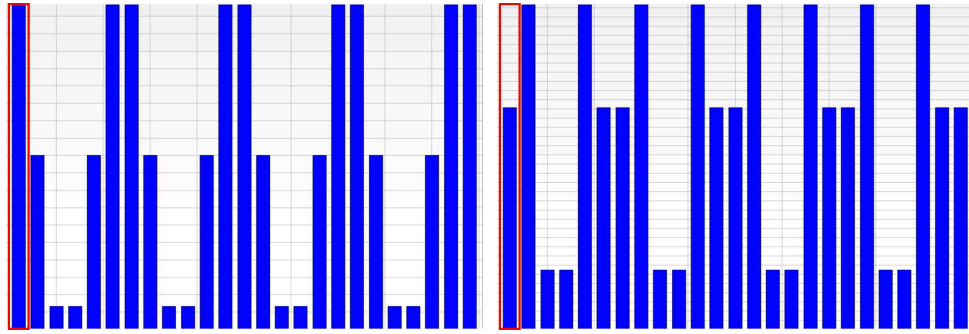
TRV가 높을수록 회전자 체적 당 발생하는 토크특성이 높아지므로 전 동기 사이징에 유리하지만, 많은 턴 수를 요구하게 되어 발열 측면에서 불리하여 적절한 TRV를 채택하는 것이 좋다. 이번 절에서 선정된 공극 체적은 전기장하와 자기장하의 분배에 따라 $25125.74[\text{mm}^3]$ 로, 이 경우 TRV는 $29.29[\text{kNm/m}^3]$ 이 되어 TRV 선정 참고표와 비교하였을 때 적절한 값을 확인하였다.

3.4 권선 설계

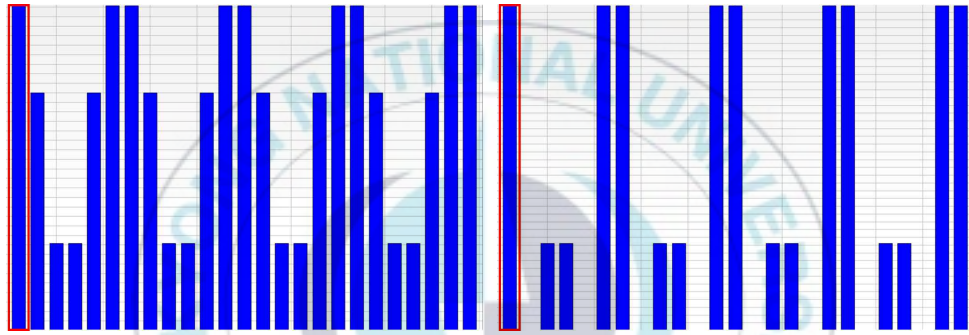
본 논문의 설계 목표인 Spoke-type IPM 동기전동기는 3상 10극 12슬롯의 사양을 갖고 있어, 그에 따른 권선법을 고려해야 한다. 이에 적용할 수 있는 권선법은 크게 집중권과 분포권이 있다. 먼저, 분포권은 권선 기자력과 점적률이 낮은 권선법으로 공간 고조파가 낮지만 엔드 턴이 길어지고 전동기의 체적이 증가하는 단점이 있다.

집중권은 엔드 턴이 짧아지고 권선 기자력이 향상되어 서보모터 체적 감소, 효율 증가 그리고 출력밀도 증가 등의 장점이 있으나 공간 고조파 성분이 증가하여 코강토크 및 토크리플 증가, 소음/진동 증가의 우려가 있으나 최적 설계나 위상 최적화 등 기법들이 개발되고 발전하면서 기자력의 공간 고조파가 비교적 큰 집중권의 특성이 다소 보완 가능해졌다.

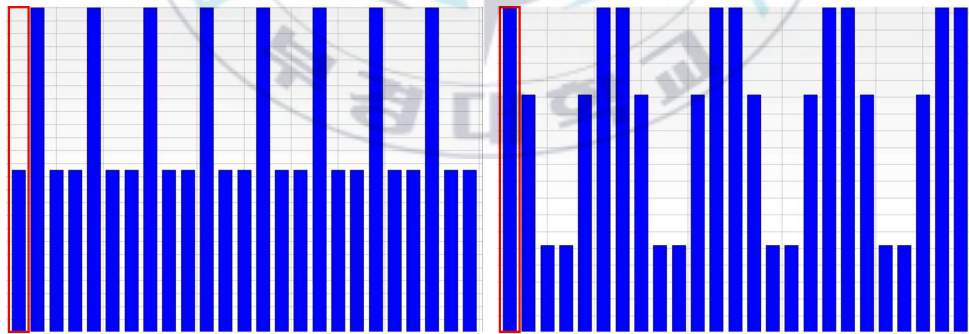
그림 7과 같이 코일 피치를 증가시키면서 각 코일 피치에서의 기본파 및 고조파 계수를 분석하였고, 권선 계수의 기본파 성분이 0.9330으로 가장 높은 1의 코일 피치, 즉 집중권을 채택하였다. 6 코일피치에서의 기본파 성분이 0.9659로 집중권인 1 슬롯피치에서의 0.9330보다 더 높게 분석되었으나, 고조파 성분이 상당량 증가하여 집중권을 채택하였다.



(a) 코일 피치 = 1, 11 / 1st = 0.9330 (b) 코일 피치 = 2, 10 / 1st = 0.6169



(c) 코일 피치 = 3, 9 / 1st = 0.6830 (d) 코일 피치 = 4, 8 / 1st = 0.8365



(e) 코일 피치 = 5, 7 / 1st = 0.2500 (f) 코일 피치 = 6 / 1st = 0.9659

그림 7. 코일 피치에 따른 권선계수 기본파 및 고조파 성분 분석

앞서 선정된 공극 체적과 자기장하로부터 상당 직렬 턴수를 식 (10)을 활용하여 계산할 수 있다.

$$N_{ph} = \frac{E}{k_w k_{stk} B_g D_g L_{stk} \omega_m} \quad (10)$$

여기서 N_{ph} 는 상당 직렬 턴수, E 는 역기전력[V], k_w 는 권선계수, k_{stk} 은 적층 점적률, ω_m 은 회전 각속도[rad/sec]이며, 역기전력은 제어기의 사양과 함께 회전속도 및 최고속도를 고려하여 식 (11)과 같이 계산할 수 있다.

$$E = \frac{N_m}{N_{max}} \times \frac{V_{DC-Link}}{\sqrt{2}} \times MI \text{ [V]} \quad (11)$$

여기서, $V_{DC-Link}$ 는 제어기의 DC 링크 전압이며, MI 는 Modulation Index의 약자로 변조지수이다. MI 는 설계과정에서 통상 0.9로 가정한다.

3.5 고정자 형상 설계

고정자의 치는 전동기의 자기회로를 생성하는 데 있어 매우 중요한 요소 중의 하나로서, 자속이 균일하게 흐를 수 있도록 설계하는 것이 바람직하다. 치 폭의 계산은 운전 중인 전동기의 공극 자속이 각 치로 균일하게 들어간다고 가정하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$2p\phi_g = QB_t b_t L_{stk} \quad (12)$$

여기서 b_t [mm]는 치 폭이며, ϕ_g [Wb]는 공극 자속이다. B_t [T]는 치의 포화 자속밀도, 높게 가정할수록 치 폭을 작게 가져갈 수 있어 전동기의 사이즈 측면에서 유리하다.

요크 너비의 계산은 식 (13)와 같이 임의의 한 극에서 나오는 자속이 자기회로 상에서 고정자 치를 거쳐 2개의 요크 경로로 나뉘어 반대 극으로 흘러 들어간다고 가정하여 계산할 수 있다.

$$\phi_g = 2 B_y h_y L_{stk} \quad (13)$$

여기서 h_y [mm]는 요크 너비이며, ϕ_g [Wb]는 공극 자속이다. B_y [T]는 요크의 포화 자속밀도로, 높게 가정할수록 요크 너비를 작게 가져갈 수 있어 전동기의 사이즈 측면에서 유리하다. 치와 요크의 각 포화 자속밀도는 사용되는 철심의 재질마다 다르지만 최초 2 [T] 전후의 운전점을 가정하여 설계한다.

그림 8과 같이 물방울형 슬롯을 가정하면, 먼저 슬롯 개구부는 권선의 삽입을 위한 공간으로 b_{s0} 의 경우 1 ~ 3 [mm], h_{s1} 은 0.5 ~ 1.5 [mm]와 같이 권선의 삽입에 필요한 정도로 최초 가정하여 설계한다.

슬롯 하단 높이 h_{s1} [mm]과 슬롯 하단 너비 b_{s1} [mm]는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\pi \{ D_{s,in} + 2(h_{s0} + h_{s1}) \} = Q(b_t + b_{s1}) \quad (14)$$

$$\pi \{ D_{s,in} + 2(h_{s0} + h_{s1}) \} = Q(b_t + b_{s1}) \quad (15)$$

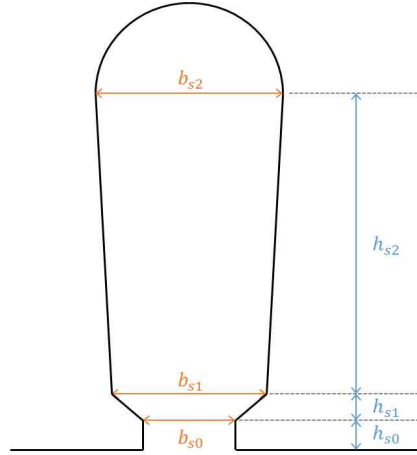


그림 8. 물방울형 슬롯 파라미터

$$b_{s1} = \frac{\pi \{D_{s,in} + 2(h_{s0} + h_{s1})\}}{Q} - b_t \text{ [mm]} \quad (16)$$

슬롯 높이 h_{s2} [mm]과 슬롯 상단 너비 b_{s2} [mm]는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$h_{s2} = \frac{\pi \{D_{s,in} + 2(h_{s0} + h_{s1})\}}{Q} - b_t \text{ [mm]} \quad (17)$$

$$b_{s2} = \frac{\pi \{D_{s,in} + 2(h_{s0} + h_{s1})\}}{Q} - b_t \text{ [mm]} \quad (18)$$

따라서 고정자 외경을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$D_{s,out} = D_{s,in} + 2\left(h_{s0} + h_{s1} + h_{s2} + \frac{1}{2}b_{s2} + h_y\right) \text{ [mm]} \quad (19)$$

3.5 Spoke-type IPM 동기전동기 설계 결과

지금까지의 내용을 바탕으로 서보 application을 위한 Spoke-type IPM 동기전동기의 설계를 수행하였고, 그림 8과 표 5에 정리하였다.

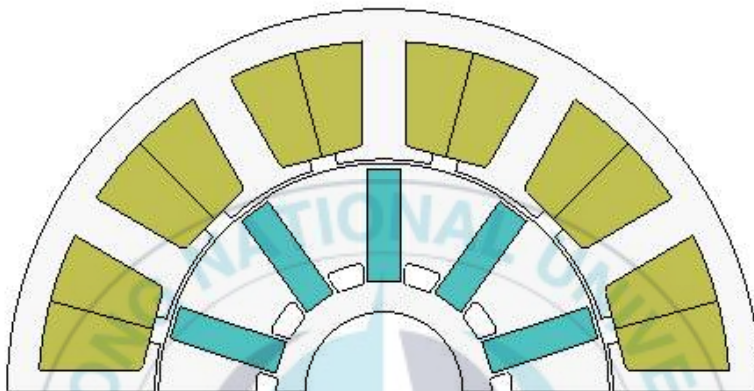


그림 8. 3상 10극 12슬롯 Spoke-type IPM 동기전동기 설계 결과

표 5. 3상 10극 12슬롯 Spoke-type IPM 동기전동기 설계 파라미터

설계 사양		값	단위
고정자	외경	57.6	mm
	내경	35	mm
	* 재료 : 35PN230(철심)		
공극 길이		0.3	mm
적층 길이		23	mm
회전자	외경	34.4	mm
	내경	12	mm
	* 재료 : 35PN230(철심), N48SH(영구자석)		

고정자 외경을 57.6[mm]로 하여 60각 서보모터 제작에 어려움이 없도록 설계하였으며, 영구자석의 매입 형태를 Spoke-type으로 채택하여 0.3[mm]의 공극에 대한 기구적인 안정성을 증대시켰다. 또한 회전자 철심 하단에 공기층을 형성하여 Spoke-type 구조에서 필수적으로 야기되는 누설 자속 문제를 보완하였다.



제 4 장 해석 결과 및 고찰

본 논문의 설계 결과인 3상 10극 12슬롯 Spoke-type 동기전동기를 검증하기 위해 유한요소법으로 해석하였다. 시간 소요를 줄이기 위해 반주기 모델에 대해서 해석을 수행하였다. 먼저, 공극 자속밀도를 관찰하여 그림 9에 나타내었다.

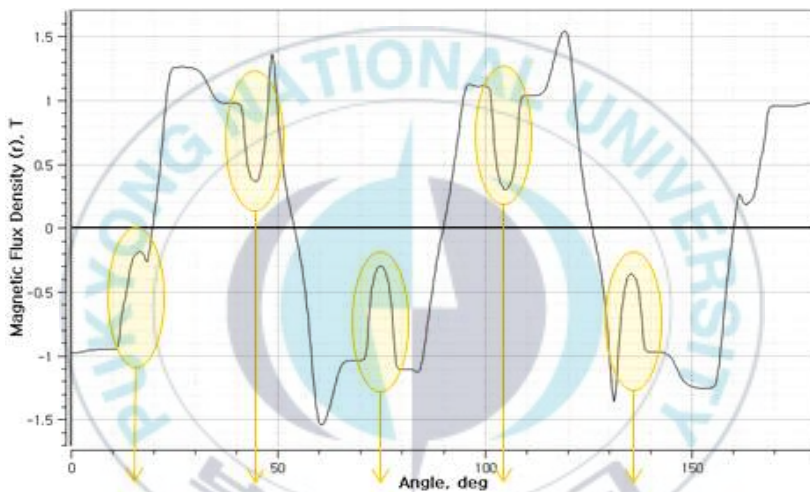


그림 9. 공극 자속밀도 분포 해석 결과

고정자 철심의 슬롯 위치에서 공극 자속밀도의 왜곡이 발생하는 Slot Effect가 존재하나, 전체적인 극 형성에 문제가 없는 것을 확인하였다. 그림 10은 가우스 미터를 이용하여 실제 제작된 회전자의 공극 자계 분포를 측정된 것이다. 이를 통해 그림 9에서 회전자 위치와 동기되지 않은 슬롯 고조파의 영향을 제외하면 설계 결과가 실제와 유사한 것을 알 수 있다.

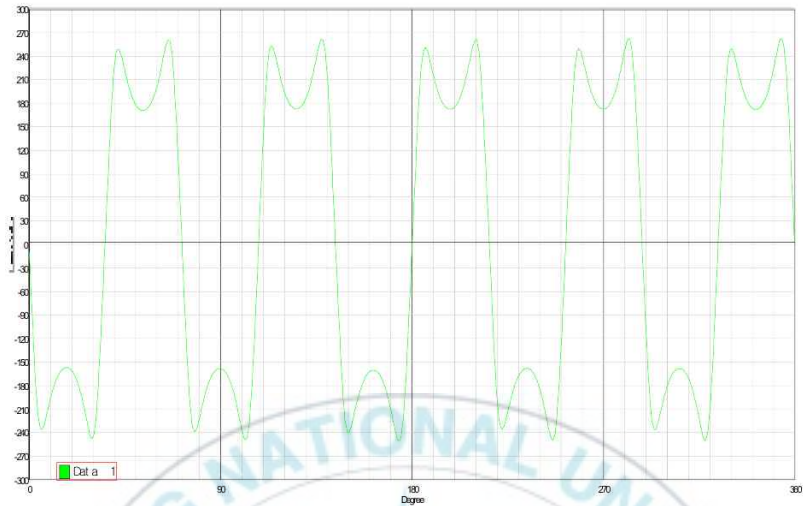


그림 10. 가우스 미터를 이용한 공극 자속밀도 계측 결과

다음으로 무부하 역기전력을 해석하여 그림 11에 나타내고, 이를 검증하기 위해 그림 124에 실제 제작된 시작품을 대상으로 저속에서의 역기전력을 측정하여 설계 결과를 검증하였다.

그림 11에서 슬롯 고조파로 인해 피크 영역에서 무부하 역기전력에 고조파가 포함되어 왜곡이 있는 것을 확인하였다. 또한 332.6rpm에서 5.7Vrms의 역기전력이 측정된 결과, 정격속도인 3,000rpm에서는 51.4Vrms의 역기전력이 예상되며, 이는 최적설계의 해석결과인 55.0Vrms와 6%의 오차 내에 있다. 그리고 최고속도인 6,000rpm에서는 102.8Vrms의 상 역기전력, 178.05Vrms의 선간 역기전력이 예상되는 바, 이는 드라이브의 DC링크 전압인 311.1V에 비해 여유가 충분하여 제어하는데 문제가 없는 것으로 사료된다.

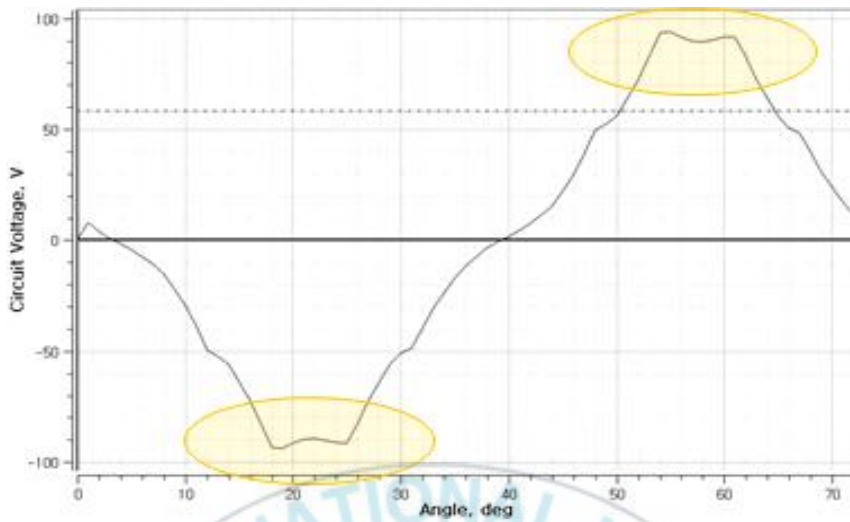


그림 11. 무부하 역기전력 해석 결과

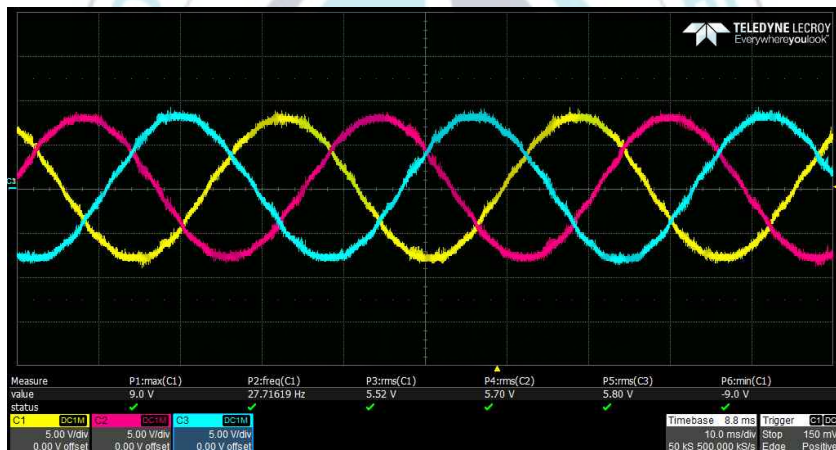


그림 12. 무부하 역기전력 측정 결과

또한 무부하 역기전력의 총 고조파 왜율(THD)를 분석하여 표 6에 나타내었다. THD는 식 (12)를 통해 계산할 수 있으며, 계산의 편의를 위해 고조파 차수는 20차까지만 고려하였다.

표 6. 무부하 역기전력 THD 분석 결과

항목	값	단위
무부하 역기전력 실효값	58.39	V
무부하 역기전력 THD	18.22	%

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} e_h^2}{e_1^2}} \quad (6)$$

다음으로 코깅 토크를 해석하여 그림 13에 나타내었다. 코깅 토크 (Cogging Torque)는 전동기의 릴럭턴스 변화가 회전각에 대응하여 변동하는 일종의 자기 흡입력의 변화로 모터의 회전자와 고정자 사이가 부드럽게 돌아가지 못하는 것을 의미한다. 모터의 코깅토크가 클수록 샤프트는 손으로 돌아가지 않고, 코깅토크가 적을 수록 부드럽게 돌아간다.

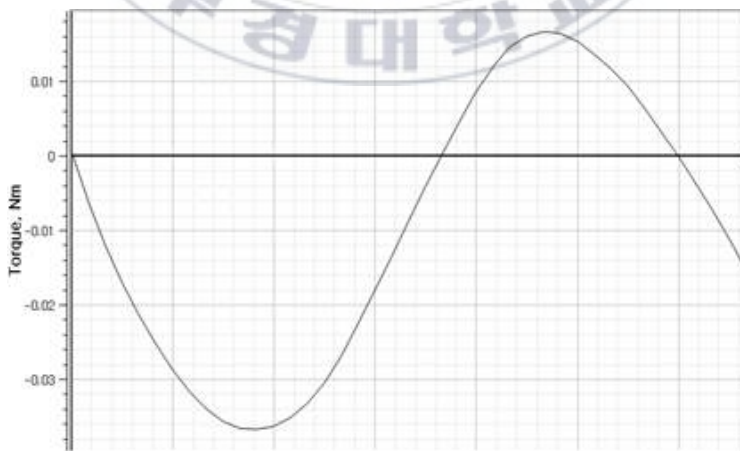


그림 13. 코깅 토크 해석 결과

코깅 토크 해석 결과, 29.42[mNm]로 분석되어 서보 application을 위한 위치 및 속도 제어에 용이할 것으로 사료된다. 다음으로 부하 토크를 해석하여 그림 14에 나타내고, 토크 특성을 표 7에 나타내었다.

마지막으로 자속밀도 분포를 해석하여 그림 15에 나타내었다. 해석 결과 전동기 운전 중 고정자 치나 요크 등 포화에 취약한 부분에서 포화 발생 없이 정상적으로 동작하고, 회전자 하단의 공기 층과 회전자 표면의 브릿지가 설계대로 포화되어 누설 자속을 저감하는 모습을 확인하였다.

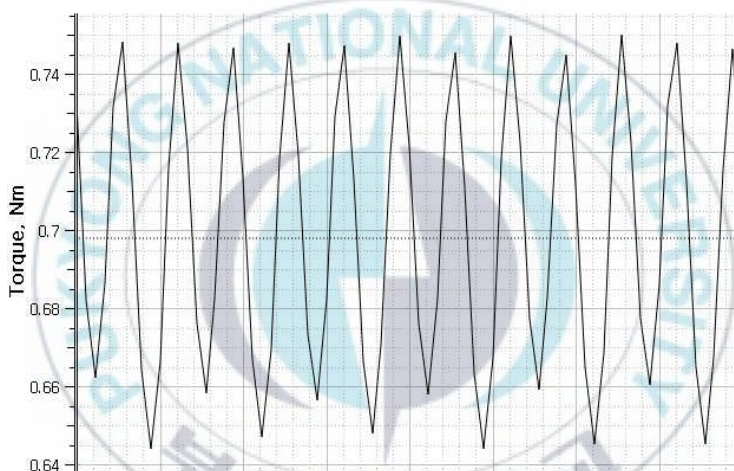


그림 14. 부하 토크 해석 결과

표 7. 토크 특성 해석 결과

항목	값	단위
평균 토크	0.698	Nm
토크 리플	15.2	%

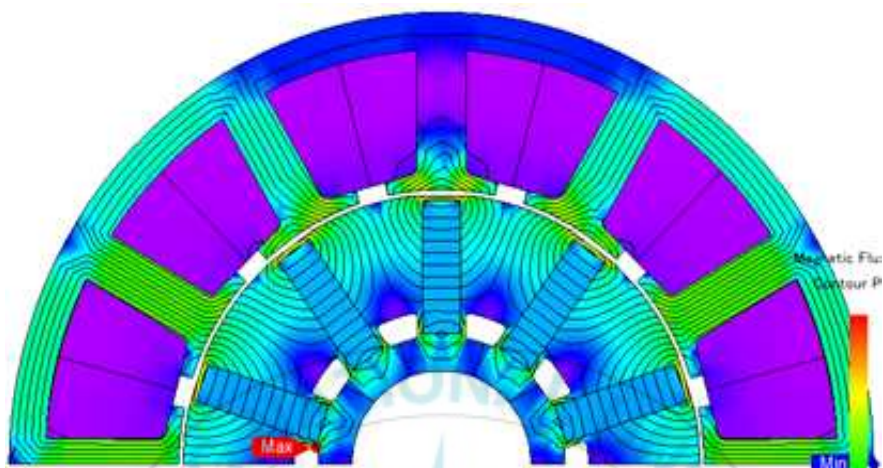


그림 15. 자속밀도 및 자속선도 해석 결과

제 5 장 결 론

Spoke-type IPM 동기전동기는 높은 토크밀도/출력밀도, 소형 및 경량화를 만족하며, 고속 운전 시 기계적인 구조 측면에서 유리한 전동기이다. 또한 자속을 집중시킬 수 있는 구조로 인해 높은 공극 자속밀도를 갖고 있어 역기전력과 토크특성이 비교적 높은 장점이 있으므로, 전동기의 사이징 측면에서 가장 유리하다.

본 논문에서는 서보 application을 위한 Spoke-type IPM 동기전동기를 설계하였다. 전자기기의 설계는 장하분배법과 D^2L 법이 있으나 두 방법은 근본적으로는 동일하며 계산순서가 다를 뿐이다. 두 방법 중 장하분배법은 D^2L 법에 비해 계산 순서가 간단할 뿐만 아니라, D^2L 법이 회전기의 설계에만 한정되는데 비해 장하분배법은 변압기의 설계에도 일관된 방법이 적용된다. 장하분배법을 이용하여 전동기의 공극 체적을 산정하고, 코일 피치에 따른 권선계수를 분석하여 집중권을 선정하여 설계를 진행하였다. 그리고 Spoke-type 구조에서 필연적으로 뒤따르는 누설 자속을 저감하기 위해 회전자 하단에 공기 층으로 구성된 누설 자속 저감부를 고려하였고, 회전자 상단에 브릿지를 얇게 하여 쉽게 포화되도록 설계하였다.

설계된 전동기를 FEM으로 해석하여 설계 결과를 검증하였다. 검증 항목은 무부하 역기전력, 부하 토크, 코깅 토크 그리고 자속밀도 분포 등이 있으며, 무부하 역기전력의 경우 실효값과 THD 등을 분석하였고, 부하 토크의 경우 평균 토크와 토크 리플 등을 분석하였다. 해석 결과, 본 논문에서 설계한 Spoke-type IPM 동기전동기의 출력 특성이 목표 성능을 만족하는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] Jesus U, Liceaga-Castro, Irma I. Siller-Alcala, Jorge Jaimes-Ponce, Roberto A. Alcantara-Ramirez, Enrique Arevalo Zamudio, Fazal M. Mahomed. Identification and Real Time Speed Control of a Series DC Motor. Mathematical Problems in Engineering, 2017.
- [2] Lv Yang, Jing Hong Zhao. The Design of DC Motor Excitation Regulation System Based on DSP. Advanced Materials Research, 2012, 1518(383).
- [3] Cheng Qun Li, Xing Sun, Xiao Lei Dong. Design of Pure Electric Vehicles` Drive Motor Contoller Based on dsPIC. Advanced Materials Research, 2010, 1037(139).
- [4] 최철, “산업용 서보모터의 기술동향 및 설계 요소”, 한국생산제조학회지, 19(2), 147-156. 2010.
- [5] 김진우, “4차 산업혁명 대응 소형모터 기술의 발전향에 관한 연구 : 서보모터를 중심으로”, 석사학위논문, 부산대학교 대학원, 2018.
- [6] 이종환, “국내 서보모터의 기술현황과 발전방안”, 석사학위논문, 경북대학교 대학원, 2011.
- [7] Payam Shams Ghahfarokhi, Jawad Faiz, “Design of four-pole permanent magnet motor with different rotor topologies”, Journal of Electromotion 20, 2013.
- [8] Eklund, P., Eriksson, S, “The influence of permanent magnet material properties on generator rotor design”, Energies, 12(7), pp.1314, 2019.
- [9] Gundogdu, T., Komurgoz, G, “Design of permanent magnet machines with different rotor type”, World Academy of Science, Engineering and Technology, vol.70, pp.511-514, 2010.
- [10] Miyamasu, M., Akatsu, K, “Efficiency comparison between Brushless dc motor and Brushless AC motor considering driving method and machine design”, IEEJ Journal of Industry Applications, 2(1), 79-86. 2013.

- [11] Zhu, Z. Q., Shen, J. X., Howe, D., "Flux-weakening characteristics of trapezoidal back-emf machines in brushless DC and AC modes", 2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, vol.2, pp.1-5, 2006.
- [12] 이중호, 윤태원, "유한요소법과 반응표면법을 이용한 250kW 급 견인 유도전동기 최적설계", 한국자기학회지, 20(6), 239-243, 2010.
- [13] 오광규, "유한요소법을 이용한 계수 산정에 기초한 전동공구용 영구자석 매입형 BLDC 모터의 설계", 석사학위논문, 충북대학교 대학원, 2017.



저용량 Spoke-type IPMSM 설계에 관한 연구

閔 株 賢

釜慶大學校 産業大學院 電氣工學科

要 約

영구자석 동기전동기는 회전자 손실이 없어 효율이 높으며, 토크/관성 비가 높은 특성을 갖고 있어 차세대 서보모터로 적합한 모델이다. 또한 Spoke-type IPM 동기전동기는 높은 토크밀도/출력밀도, 소형 및 경량화를 만족하며, 고속 운전 시 기계적인 구조 측면에서 유리한 전동기이다.

본 논문에서는 저용량 Spoke-type IPMSM을 설계한다. 이를 위해 먼저, 영구자석 동기전동기의 회전자 구조에 따른 특성을 분석한다. 영구자석 동기전동기 설계는 장하분배법을 이용한 공극 체적 산정을 시작으로, 코일 피치에 따른 권선계수 분석을 통해 권선 사양을 선정하고, 이를 만족하는 고정자 형상을 결정하는 순으로 수행한다. 이후 무부하 역기전력, 코깅 토크, 부하 토크, 자속밀도 분포 및 자속선도 등을 FEM으로 해석하여 설계 정확성을 비교함으로써 본 논문에서 설계된 전동기를 검증한다.