

저전압 대전류용 IPM type BLDC 전동기 설계 및 특성해석

윤근영¹, 류세현^{1,2}, 양병렬³, 권병일¹
 한양대학교¹, 전자부품연구원², 삼성전자³

Design and Analysis of Characteristics of IPM type BLDC Motor for Low Voltage, High Current

Keun-young Yun¹, Se-hyun Rhyu^{1,2}, Byoung-yull Yang³, Byung-il Kwon¹
 Hanyang University¹, Korean Electronics Technology Institute², Samsung Electronics³

Abstract - This paper presents a design and characteristics analysis of interior permanent magnet (IPM) type BLDC motor for electric vehicle. In order to design of IPM type BLDC motor, surface mounted permanent magnet (SPM) type BLDC motor is used as the initial design model. According to the size of permanent magnet, the steady state characteristics is analyzed by equivalent magnetic circuit method. The characteristics analysis results of the designed motor is compared with the experimental results.

2. 설계 및 특성해석

2.1 초기 설계

IPM type BLDC 전동기 설계를 위하여 장하분배법에 의한 SPM type BLDC 전동기 설계를 선행하였다. 장하분배법이란 토오크식을 전기장하와 자기장하로 분리하여 그 비를 결정하고 전기장하, 자기장하 중 하나를 먼저 결정한 후 나머지를 설계해 나가는 방법을 말하는 것으로, 토오크식은 다음과 같다.

$$\tau = \left(\frac{m}{2}\right) \sqrt{2} \cdot p \cdot k_w \cdot \omega \cdot \phi_g \cdot I = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 2p\phi_g \cdot 2mk_w\omega I \quad (1)$$

$2mk_w\omega I$: 전기장하, $2p\phi_g$: 자기장하

식(1)에서 전기장하는 전기자의 전류와 권선턴수의 곱을 의미하여 자기장하는 공극에서의 총자속수를 의미한다. 일반적으로 영구자석 전동기에 있어 장하비를 70으로 놓고 설계를 하였을 경우, 설계되어진 SPM type BLDC 전동기의 설계사양은 표 1과 같다.

표 1 SPM type BLDC 전동기의 설계사양

구분	사양	구분	사양
입력전압	직류24[V]	공극길이	0.5[mm]
정격출력	600[W]	적층폭	40[mm]
정격속도	3,000[rpm]	상당직렬턴수	16[turns]
상 수	3[phase]	병렬회로수	4[parallel]
극 수	4[poles]	영구자석	Nd소결[Br=1.0T]
고정자외경	120[mm]	영구자석체적	75.4[mm ³]

설계사양 전동기의 저전압, 대전류의 입력전력 조건을 고려하여 병렬회로수를 선정하였으며, 입력전압은 120° 구형파 구동방식을 선택하였다. 이로부터, 동일체적의 영구자석을 고려한 IPM type BLDC 전동기의 설계 단면도는 그림 1과 같다.

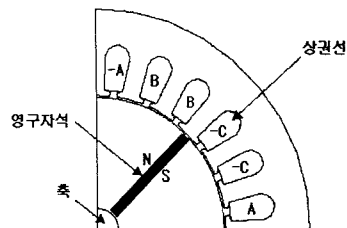


그림 1 IPM type BLDC 전동기 구조도

1. 서 론

산업분야에서 사용되고 있는 BLDC 전동기는 회전자 표면에 영구자석이 부착되는 SPM type이 주류를 이루고 있으나, 구조적 형상에 의하여 고속 회전시 영구자석이 회전자 표면으로부터 떨어질 수 있는 위험성 및 영구자석의 감자특성에 따른 출력저하의 단점이 지적되고 있다. 특히 배터리 전원을 사용한 전동차량 구동용 BLDC 전동기의 경우 고속화 및 고효율화가 요구되고 있으므로, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있다[1]-[3].

회전자에 영구자석을 삽입하는 IPM type BLDC 전동기는 SPM type BLDC 전동기와 비교하여 회전자의 위치에 따라 돌극성을 가지기 때문에 인덕턴스 성분이 다르게 나타난다. 이러한 인덕턴스 차이에 의한 자석토오크 성분 이외에 추가적으로 릴럭턴스 토오크 성분을 얻을 수 있어 표면부착형 영구자석 전동기보다 전체 토오크가 상승하는 효과가 있다. 또한 영구자석이 회전자 내부에 삽입이 되어 있는 구조이기 때문에 회전자가 고속회전을 할 경우 원심력에 의해 영구자석 회전자 표면에서 떨어지는 현상을 방지할 수 있다[2]. 또한, 고정자 권선에 발생하는 열에 의한 직접적인 영향을 적게 받아 영구자석 감자의 위험이 감소되는 장점이 있어, 저전압·대전류의 입력특성을 갖으며, 고속 및 고효율 특성을 유지하기 위한 전동기로서의 활용도가 높다. 특히 Spoke형 IPM type BLDC 전동기의 경우에는 다른 IPM type BLDC 전동기에 비하여 자속의 집중화가 보다 유리한 장점을 가지고 있다[4]-[5].

본 논문에서는 배터리로 구동되어지는 600[W]급 전동차량용 IPM type BLDC 전동기의 한 종류인 Spoke type BLDC 전동기를 설계하였으며, 특히 영구자석의 형상에 따른 특성해석을 수행한다. 장하분배법에 기초한 SPM type BLDC 전동기의 설계로부터 동일 체적을 갖는 IPM type BLDC 전동기를 설계하였으며, 특히 영구자석의 동일 체적을 유지하며 형상의 변화에 따른 특성해석을 수행하고, 제한된 체적에서 출력밀도 향상을 위한 IPM type BLDC 전동기의 구조적 설계방안을 모색하고자 한다.

2.2 자기등가회로법에 의한 특성해석

표 1의 설계제원을 갖는 모델로부터 특성의 중요 인자로 작용하는 영구자석의 형상변화에 따른 성능고찰을 위하여, 자기등가회로법을 이용한 특성고찰을 행하였다. 그림 2는 설계되어진 전동기의 회전자 형상을 나타낸다.

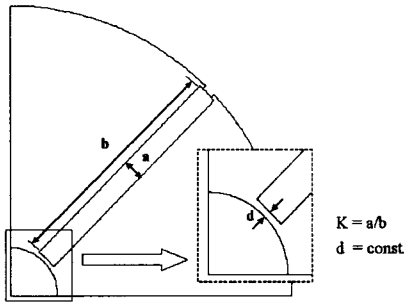


그림 2 IPM type BLDC 전동기의 회전자 단면도

그림 2에서 축과 회전자에 삽입되어진 영구자석과의 거리 d 는 일정하게 유지하며 영구자석의 길이와 폭이 비율만을 변화하였다. 거리 d 는 자속이 누설되는 것을 방지하고, 자속 경로를 보장해 주는 역할을 하며, 포화 정도 및 기계적 가공성을 고려하여 두께를 0.5[mm]로 고정하였고, 이에 따른 특성해석의 결과는 표 2와 같다.

표 2 영구자석의 형상에 따른 특성결과

K =(영구자석 폭/영구자석의 길이)

K	Bg[T]	Bm[T]	Torque[Nm]	Efficiency[%]
0.083	0.67	0.63	1.77	73.39
0.090	0.66	0.65	1.93	73.32
0.097	0.66	0.67	2.02	74.17
0.104	0.65	0.68	2.09	74.30
0.112	0.64	0.70	2.25	74.48
0.119	0.63	0.71	2.38	73.97

주) Bg:공극자속밀도, Bm:영구자석의 동작점 자속밀도

2.3 유한요소법에 의한 특성해석

자기등가회로법을 이용하여 선정된 모델 중 $K=0.09$ 의 영구자석 치수를 갖는 모델을 대상으로 유한요소해석을 통한 세부적인 특성을 분석하였으며, 이로부터 설계모델의 타당성을 검토하였다.

해석대상 모델을 2차원 유한요소 해석하기 위한 지배방정식은 식(2)와 같다.

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} \right) = -J_z - \frac{1}{\mu_r} \left(\frac{\partial M_{rx}}{\partial x} + \frac{\partial M_{ry}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

여기서 A_z 는 자기벡터포텐셜의 z축 성분, J_z 는 권선의 전류밀도, M_{rx}, M_{ry} 는 잔류자화량을 나타낸다. 해석대상이 z축 방향으로 무한하다고 가정하면, A 와 J 는 z축 방향으로만 존재하게 된다.

그림 3과 그림 4는 유한요소법에 의한 역기전력 및 코깅 토오크특성을 나타낸다. 자속이 회전자극 표면에 집중되어 역기전력 파형에 심한 슬롯 고조파 특성이 발생함을 알 수 있다. 또한, 그림 5와 그림 6은 진상각에 따른 토오크 및 전류특성을 나타낸다. 그림을 보아 알 수 있듯이 진상각에 따라 발생 토오크 및 전류 특성이 매우 다르게 나타남을 보이고 있다.

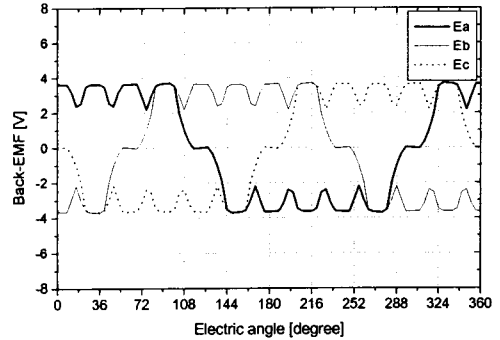


그림 3. 상당 역기전력 파형(1000rpm)

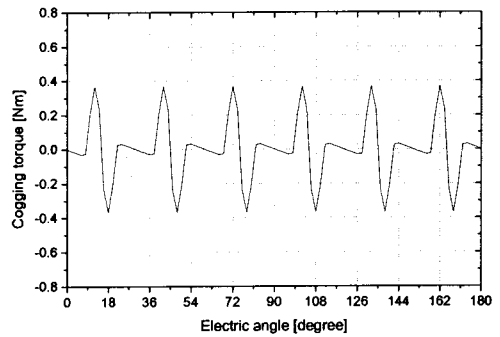


그림 4. 코깅토오크 특성

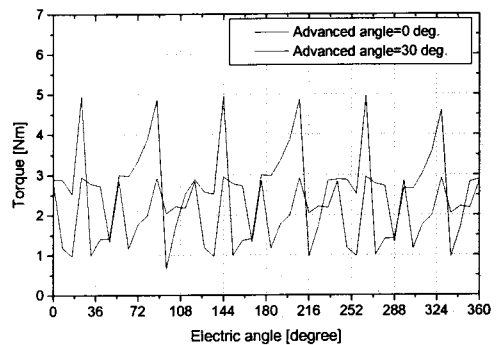


그림 5. 진상각에 따른 토오크특성

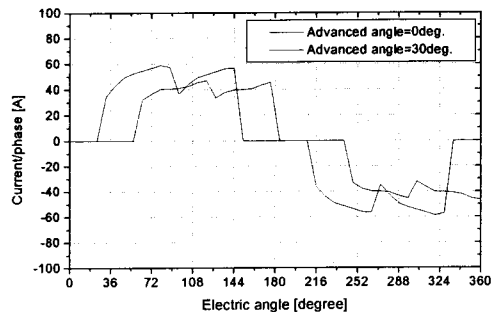


그림 6. 진상각에 따른 전류 특성

그림 5와 그림 6에서 진상각이 0°일 경우 평균토크는 약 2.1[Nm]이며, 30°시에는 약 2.6[Nm]로써 24% 정도의 증가를 보이고 있으며, 전류 또한 25% 정도의 크기 변화 및 형상에서 많은 변화를 가짐을 알 수 있다. 이것은 릴럭턴스 토크와 전자기적 발생 토크가 진상각에 따라 다르게 부합됨을 나타낸다. 따라서, IPM type BLDC 모터의 설계시 릴럭턴스 토크 성분을 고려한 진상각의 선정은 성능향상을 위한 중요 요소가 된다.

3. 특성시험

영구자석의 형상치수 비인 $K=0.09$ 를 갖는 실제로 제작되어진 모델에 대하여 역기전력을 포함한 토크 등의 특성을 시험하였다. 그림 7과 그림 8은 속도 1,000[rpm]에서의 역기전력 및 코깅 토크 특성을 나타낸다.

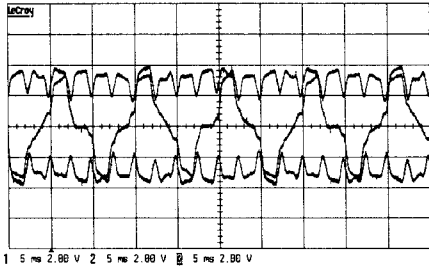


그림 7 역기전력 특성(1,000rpm)

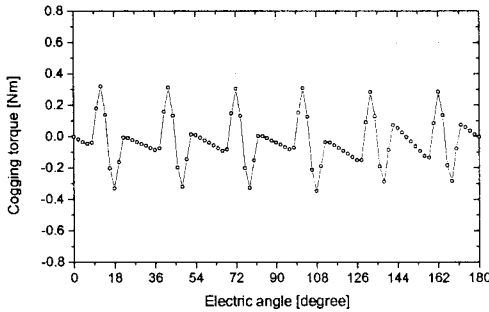


그림 8 코깅 토크 특성

그림 3, 그림 4와 그림 7, 그림 8을 비교하였을 경우 시뮬레이션의 역기전력 파형 및 코깅토크 결과와 시험치가 파형 및 크기에 있어 거의 일치함을 보여주고 있다. 그림 9는 운전시 발생하는 부하특성을 시험하기 위한 전체 측정장치를 나타낸다. 부하를 가변하며 이에 따른 출력 및 효율특성을 실측하였고, 또한 파워미터를 통하여 전류 및 입력전력 특성을 계측하였다.

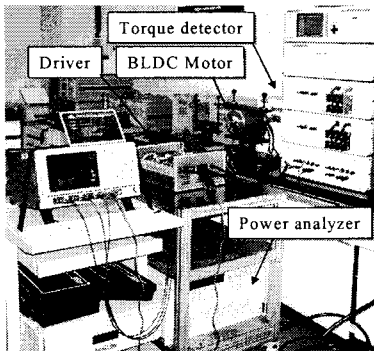


그림 9 속도-토크-전류 실험 장치도

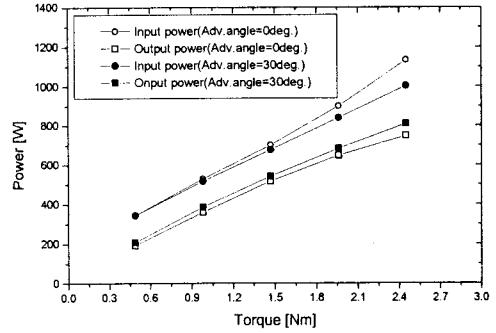


그림 10 부하토크에 따른 파워특성

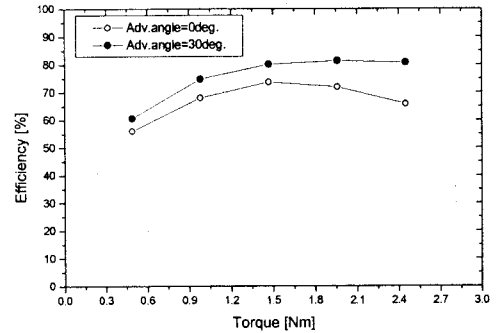


그림 11 부하토크에 따른 효율특성

그림 10, 그림 11에서 나타난 실험결과를 통하여 알 수 있듯이 진상각이 0°시 정격부하지점에서의 효율은 72[%] 이었으나, 진상각 30°시의 효율은 약 81[%]로 약 12[%]의 효율이 상승한다. 이는 진상각에 따른 릴럭턴스 토크의 중첩으로 인해 전체 토크에 크기를 변화되어 효율이 향상되는 것을 확인할 수 있으며 릴럭턴스 토크가 실제로 IPM type의 성능향상을 좌우하는 중요한 요소임을 알 수 있다.

4. 결 론

600[W]급 IPM type BLDC 전동기를 대상으로 영구자석의 치수적 형상변화에 따른 특성고찰을 하였다. SPM type BLDC 전동기를 기준으로 설계되어진 IPM type BLDC 전동기에 대하여 등가자기회로법 및 유한요소법을 이용한 영구자석의 치수가변에 따른 특성해석을 행하였다. 이로부터 동일체적의 영구자석을 갖지만, 형상변화에 따라 출력밀도를 높일 수 있는 설계가 가능함을 볼 수 있었다. 또한, 실제로 제작되어진 모델로부터 실험을 통한 결과를 고찰하였으며, 이로부터 Spoke type BLDC 전동기의 영구자석의 형상에 따른 특성변화를 확인 할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] T.J.E Miller, *Design of Brushless Permanent-Magnet Motor*, Clarendon press, Oxford, 1994
- [2] 大天光吉, 페라이트 磁石回轉機의 設計, 원종수역, 동일출판사, 2002
- [3] 박정우, 구대현외, "전기 자동차용 바퀴일체형 전동기 및 제어기 개발, 한국전기연구서 보고서", 1998
- [4] T.J.E Miller, *Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives*, Clarendon Press, Oxford 1993
- [5] S.A.Nasar, I. Boldea, L.E.Unnewehr, *Permanent Magnet, Reluctance, and Self-Synchronous Motors*, CRC Press 1993