

대용량 영구자석 매입형 동기전동기 설계

김지은*, 배병덕**, 정태욱***
경남대

Design of High Power Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

Ji-Eun Kim*, Byung-Duk Bae**, Tae-Uk Jung***
Kyungnam University

Abstract - 전 세계적으로 환경 문제가 발생하고 있는데 이러한 문제를 해결하기 위해 전기자동차에 대한 관심이 높아져 높은 효율을 내는 구동전동기의 개발이 절실하다. 본 논문에서는 전기자동차용 구동전동기의 설계를 수행하였다. 구조적인 제약조건을 고려하고 체적설계법을 적용하여 초기치수를 설정하였으며 2차원 유한요소해석을 통하여 요구 사양에 만족하는 전동기 설계를 제안하였다.

1. 서 론

현재 석유 자원의 고갈 및 온실 가스에 의한 지구 온난화 문제로 인해 환경 문제가 전 세계적으로 발생하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 자동차에 관한 많은 규제들이 생겨나고 있으며 대표적인 예로 EU의 이산화탄소 배출량 규제 및 북미의 ZEV규제 등을 들 수 있다[1].

국내의 자동차 제조사의 경우 이런 규약들을 만족하기 위하여 하이브리드 자동차, 연료전지 자동차, 전기 자동차 등 친환경 자동차에 대한 관심을 높이고 있으며 전기구동시스템의 핵심부품인 고효율 구동전동기의 개발이 절실하다.

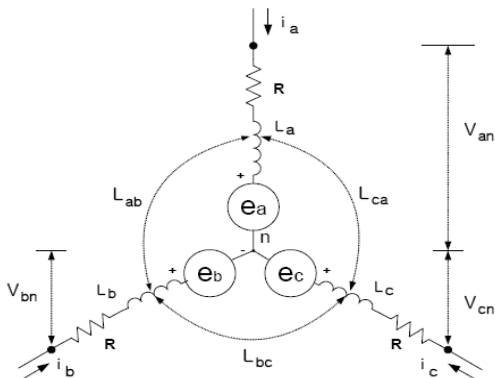
전기자동차용 구동전동기는 토크밀도가 높고 고효율성을 지닌 교류모터가 대부분이며, 유도전동기 및 영구자석형 동기전동기가 대표적이다. 한편, 영구자석형 동기전동기는 회전자의 구조에 따라 SPM(Surface Permanent Magnet)과 IPM(Interior Permanent Magnet)으로 나눌 수 있는데 그 중 IPM 모터는 고속운전이 용이하고 토크밀도를 활용할 수 있는 장점이 있어 구동용 전동기로 널리 적용되고 있는 추세이다 [2].

본 논문에서는 8극 12슬롯의 영구자석 매입형(IPM) BLDC 전동기를 설계하고 자석의 감자를 막기 위해 NdFeB39H 영구자석을 사용하였으며, 권선 방식은 고정자 권선의 엔드 와인딩(End winding)의 손실 감소와 전동기의 컴팩트화, 자동권선기 등 플랫폼 구축비용을 줄일 수 있는 장점을 지닌 집중권으로 설계하였다. 코어 재질은 0.5[mm]의 S18 등급의 전기강판을 사용하였다.

이와 같이 30[kW]의 출력을 얻는 대용량 전기자동차용 BLDC 전동기로 토크밀도를 활용할 수 있는 영구자석 매입형 BLDC 전동기를 적용하여 설계를 수행하였다. 구조적인 제약조건을 고려하고 체적설계법을 적용하여 초기치수를 설정하였고 유한요소해석을 통하여 요구 사양에 만족하는 전동기 설계를 제안하였다.

2. IPM BLDC 전동기의 설계 과정

2.1 IPM BLDC 전동기의 모델링



〈그림 1〉 IPM BLDC 전동기의 등가회로

그림 1은 IPM BLDC 전동기를 등가 회로로 나타낸 것이다. 각 a, b, c상 마다 R과 L, 역기전력의 관계로 이루어져 있다. BLDC 전동기의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, V_{as} , V_{bs} , V_{cs} 는 각 상의 전압이고, i_a , i_b , i_c 는 각 a, b, c상의 전류, R은 전동기의 각 상의 저항, L은 전동기의 각 상 인덕턴스이다. 인덕턴스는 회전자의 위치에 따라 유효공극의 크기가 변화하므로 고정자 인덕턴스가 회전자의 위치에 따라 달라지는 함수이다. e_a , e_b , e_c 는 각 상의 역기전력이다.

IPM BLDC 전동기의 발생 토크는 마그네틱 토크(T_m)와 릴럭턴스 토크(T_r) 두성분으로 나타낼 수 있다.

$$T_m = \frac{(e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c)}{\omega_m}$$

$$T_r = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (L_d - L_q) \cdot i_{ds}^e \cdot i_{qs}^e$$

$$T_e = T_m + T_r \quad (2)$$

2.2 IPM BLDC 전동기 설계 사양

표 1과 같이 도출된 요구 사양을 만족하도록 BLDC 전동기 설계를 진행하였으며, TRV법에 의해 BLDC 전동기의 체적을 결정하고, 요구 성능을 만족하기 위한 형상 및 치수 등을 도출하였다.

〈표 1〉 BLDC 전동기의 개발 요구사항

항목	요구사항
정격 출력 [kW]	30
정격 회전속도 [rpm]	3000
정격 토크 [Nm]	100
정격 효율 [%]	95
정격 전압 [V]	220

초기 체적 결정은 식 (3)에 의해 회전자의 체적 및 요구 회전수를 고려하여 회전자 외반경 및 축방향 길이를 산정하였다.

$$T = K D_r^2 L_{stk} [Nm] \quad (3)$$

여기서 K는 출력 계수이고, D_r 은 회전자의 직경, L_{stk} 는 회전자의 길이를 각각 나타낸다. 또한 TRV 값을 15~50로 두고 설계를 진행 하였다.

회전자 체적당 토크로 나타내면 식 (4)와 같다.

$$TRV = 4T / (\pi D_r^2 L_{stk}) [kNm/m^3] \quad (4)$$

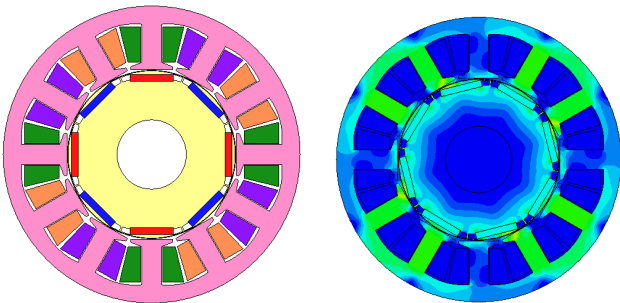
체적 산정에 의한 BLDC 전동기의 사양은 표 2와 같다.

<표 2> BLDC 전동기 선정사양

항 목	선정사양
고정자 외경 [mm]	300
회전자 외경 [mm]	169
극수 / 슬롯수	8 / 12
적층 길이 [mm]	190
자석 / 코어 재질	NdFeB39H / S18
권선 방식	3상 집중권
권선 결선 / 회로수	Y 결선 / 2 병렬
냉각방식	수냉

2.3 유한요소 해석 및 실험결과

표 2와 같이 전동기의 선정사양에 의하여 2차원 유한요소해석을 하였다. 그림 2는 구동전동기의 최종 설계된 전동기 형상을 나타낸다. 오른쪽 그림은 해석된 전동기의 자속밀도를 보여주고 있다.



(a)모델링 형상 (b)모델의 자속밀도 분포

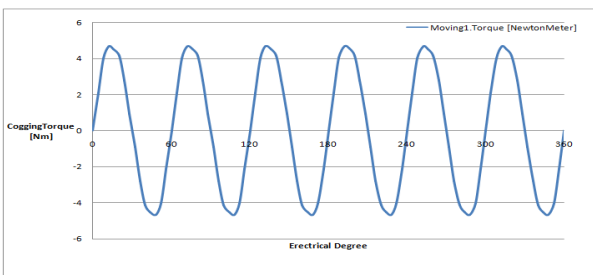
<그림 2> 2차원 모델링 형상 및 무부하 해석시 자속밀도 분포

그림 3과 그림 4는 무부하시 코깅토크와 역기전력 파형을 나타내며, 그림 5와 그림 6은 부하시 입력전압 및 상전압과 전류 파형을 나타내고 있다.

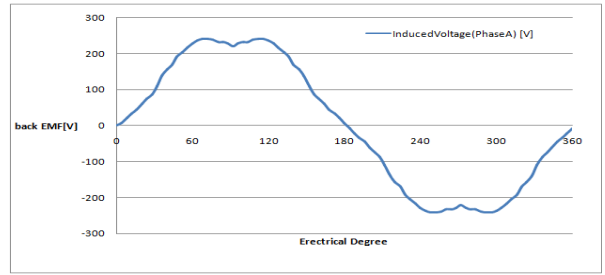
이에 따른 결과 값을 표 3에 정리하였다.

<표 3> 전동기의 설계 결과

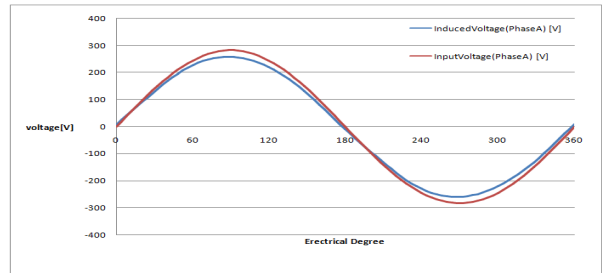
항목	요구사항	해석치
정격 출력 [kW]	30	31
정격 전압 [V]	220	220
정격 회전속도 [rpm]	3000	3000
정격 토크 [Nm]	100	101
정격 효율 [%]	95	94.7



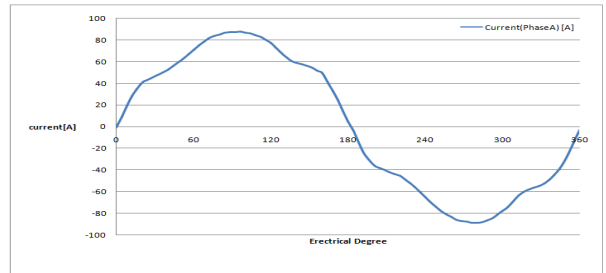
<그림 3> 코깅토크 파형



<그림 4> 역기전력 파형



<그림 5> 입력전압 및 상전압 파형



<그림 6> 전류 파형

3. 결 론

본 논문에서는 30[kW] 출력을 얻는 대용량 전기자동차용 BLDC 전동기 토크 리플턴스 토크를 활용할 수 있는 영구자석 매입형 BLDC 전동기를 적용하였다. 모터의 초기치수를 체적설계법을 적용하여 설정하였으며, 요구사항에 만족하는 모터 형상 및 권선 설계는 유한요소해석법을 이용하여 30[kW] BLDC 전동기를 설계하였다. 향후 실험을 통한 실제 모델과 모의실험 모델의 결과특성을 비교분석하고 진동 및 소음 특성을 줄이기 위해 토크 리플 저감에 관한 연구를 진행하겠다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 지식경제부의 광역경제권 연계협력사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임(No.2010-D-002)

[참 고 문 헌]

[1] Kang, Jinsong; Xu, Guoqing; Hu, BO; Zhang, Zhouyun; Gong, Jun, "Research Power with BLDC Motor for Electric Vehicle Application", Integration Technology, 2007. ICIT '07. IEEE International Conference Page(s): 437 ~ 441, 20-24 March 2007

[2] K. Y. Hwang, "A Study on Optimal Pole Design of Spok e-Type IPMSM With Concentrated Winding for Reducing the Torque Ripple by Experiment Design Method", IEEE Transaction on magnetics, VOL. 45, NO. 10, pp4712-4715, OCTOBER 2009

[3] J. R. Hendershot Jr, TJE Niller, Design of Brushless Permanent Magnet Motors, Magna Physics Publishing and Clarendon Press - Oxford, 1994

[4] 이주, 매입자석 동기모터의 설계 및 제어, 한양대학교 에너지변환연구실, 2010