

인버터 내장형 대용량 BLDC 추진 전동기의 설계에 관한 연구

성일권, 김동석, 박관수
부산대학교

A Study on Design of High Power Brushless DC Propulsion Motor with Insert Inverter type in Rotor

Il Kwon Sung, Dong Sok Kim, Gwan Soo Park
Pusan National University

Abstract - 최근 산업기기의 대형화로 인하여 전기기기 및 전력기기의 고효율·대용량 설계에 대한 관심이 커지고 있다. 그 동안에는 대용량 전동기로 주로 유도전동기와 릴리턴스 전동기가 사용되어 왔다. 그러나 유도전동기는 저속에서의 효율이 낮으며 회전자와의 열순설이 효율과 역률을 저하시키는 단점이 있고, 릴리턴스 전동기는 구조 및 동작원리 상 큰 맥동토크로 인하여 소음과 진동이 매우 크다. 이에 효율과 역률이 좋고 고속운전이 가능한 영구자석형 전동기에 대한 연구가 많이 진행되었고 최근에는 영구자석 재질(회토류)의 발달함으로 인하여 고속 대용량 자석계자형 BLDC와 영구자석형 동기전동기의 설계가 가능해져 대형기에 많이 이용되고 있다. 그러나 대용량 전기기기의 경우 그 크기와 부피가 매우 크고 대전류·대전압의 전원을 공급하여야 하기 때문에 인버터부를 별별 연결하여야 하므로 제어부를 포함한 전동기의 설치 공간이 증가해지는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 인버터를 전동기의 회전자 내부에 배치한 인버터 내부형 5[MW]급 BLDC 전동기를 설계하고자 하였다.

1. 서 론

최근 전 세계적으로 산업 및 문화교류가 커짐에 따라 운송기기 및 산업기기가 대형화되고 있다. 특히, 한반도 정세와 같이 주변국가간의 분쟁이 심화됨에 따라 세계적으로 자국 방위력 향상을 위한 무기체계의 대형화가 급속도로 증가되고 있다. 이에 전기기기 및 전력기기의 고효율·대용량 설계에 대한 관심이 커지고 있다.[1]

그 동안에는 이를 대형기에 대부분 견고성과 유지보수, 안정적 운전 등의 장점을 가진 농형유도전동기와 제작이 간단하고 내구성이 강하며 고 토크 특성을 가진 릴리턴스 전동기가 주로 사용되어 왔다. 그러나 농형유도전동기의 경우, 저속 영역에서의 효율이 낮고, 슬립이 항상 존재하는 특성으로 인하여 회전자의 열 발생이 큼에 이로 인한 효율 및 역률의 저하가 크다. 그리고 릴리턴스 전동기의 경우, 그 구조 및 동작특성상 토크의 맥동이 크며, 이로 인하여 소음 및 진동이 크게 발생하는 단점이 있다. 이에 효율과 역률이 좋고 고속운전이 가능한 영구자석형 전동기에 대한 연구가 많이 진행되었고 최근에는 영구자석 재질(회토류)의 발달로 인하여 고속 대용량 자석계자형 BLDC(Brushless DC)와 영구자석형 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor: 이하 PMSM)의 설계가 가능해져 대형기에 많이 적용되고 있다.

그러나 대용량 전기기기의 경우 그 크기와 부피가 매우 크고 대전류·대전압의 전원을 공급하여야 하기 때문에 여러 개의 인버터를 별별 연결하여야 한다. 따라서 제어부를 포함한 전동기의 설치 공간이 커지는 단점이 있다. 이는 큰 적재 공간을 필요로 하는 선박과 각종 어뢰 및 잠수시스템, 항법장치 복잡한 전자기기를 필요로 하는

잠수함 등에 적용에 있어 매우 큰 제약이 따른다.

또한, 영구 자석으로 인한 코킹 토크의 발생과 인버터의 분할 연결로 인한 고조파의 증가는 효율 및 역률의 저하를 초래한다. 따라서 코킹 토크를 최소화 할 수 있는 전동기 설계가 이루어져야 한다.[2]-[4]

이에 본 연구에서는 공간을 최소화하기 위하여 인버터를 전동기의 내부에 배치하는 인버터 내장형 BLDC 전동기를 설계하였으며, 코킹 토크를 저감하기 위하여 극수와 상수를 각각 32극, 24상으로 설계하였다.

2. 기초 설계 사양 및 적용된 설계 이론

2.1 설계조건

본 연구에서 설계하고자 하는 전동기는 선박 추진을 위한 대용량 BLDC 전동기로 정격출력은 5[MW]이고 정격속도는 150[rpm]인 인버터 내장형 추진전동기이며, 그 설계사양은 Table 1과 같다.

Table 1. 대용량 BLDC 전동기의 설계 사양

	사양	사양	
정격 출력	5000 [kW]	정격속도	150[rpm]
전 압	700 [V]	상 수	24[phase]
전 류	400[A/phase]	극 수	32[pole]
주파수	60[Hz]	슬롯 수	96(slots)

2.2 설계과정

설계조건에서 보는 것과 같이 본 설계의 BLDC 전동기는 저속 고토크 특성을 가지기 때문에 영구자석을 회전자 요크표면에 부착하는 영구자석 표면 부착형 전동기 설계가 가능하며, 회전자 요크와 회전자 축(Shaft) 사이에 인버터를 넣을 수 있는 공간을 가지는 구조이다. Fig. 1은 본 모델의 출면 구조도이고, Fig. 2은 본 설계의 설계과정을 보여주는 설계흐름도이다.

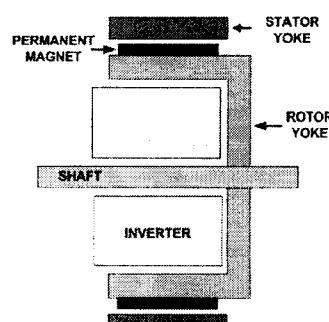


Fig. 1. 설계모델 인버터 배치구조

$$TRV = \frac{T}{V_r} = \frac{T}{\pi r^2 L_r} \quad (3)$$

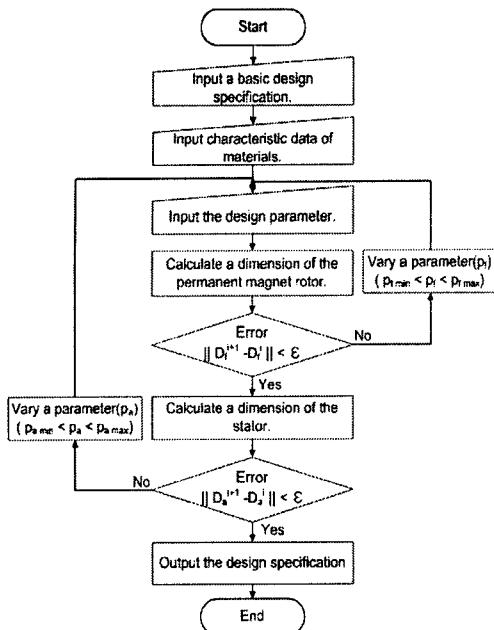


Fig. 2. Design Flow Chart

2.2.1 자석과 코어재질의 선정

본 모델에 사용된 영구자석 재질은 고출력을 요구하고 보자력 특성이 좋은 Br값과 Hc값이 높은 희토류계 영구자석에서 중 SmCo계 자석을 선정하였다. 본래 가격과 재질특성에 있어서 Nd-Fe-B를 선정하여야 하나 본 모델은 대전력 추진전동기로 높은 열이 발생한다. 따라서, 고온에서 감자 및 탈자의 위험이 있는 Nd-Fe-B계 사용하기에는 곤란한 점이 있다. 또한, 선박 및 잠수함이라는 특수성으로 인해 제작비용에 큰 문제가 없는 상황에 있어서 가정 적합한 영구자석의 재질은 SmCo계 영구자석이다. 본 설계에서는 SmCo계 HITACHI_H-30SH를 사용하였으며, $Br = 1.1[T]$ 이고 $Hc = 22000[Oe]$ 이다. 고정자 및 회전자 재질은 자기효율이 높은 고투자율의 규소강판을 선정하였다.

2.2.2 회전자 체적 결정

회전자의 체적을 결정은 아주 작은 마이크로전동기로부터 공정 플랜트나 핵선 추진에 사용되는 아주 큰 교류전동기에 이르기까지 적용되는 기본 출력방정식을 이용하여 구하였으며, 식(1)과 같다.

$$T = KD^2 L, \quad (1)$$

여기서, K 는 출력상수, D ,은 회전자 직경, L ,는 회전자 길이를 나타낸다. 여기서 출력상수는 식(2)와 같다.

$$K = \frac{\pi^2 k_{u1}}{4\sqrt{2}} BA \quad (2)$$

여기서, B 는 자기장하로 극당 자속밀도의 평균치이며, A 는 전기장하로 공극주위의 선형 전류밀도 실효값이다. 또한, 토크가 회전자의 표면에서 발생한다고 하면 체적당 토크(Torque per unit Rotor Volume : TRV)는 식(3)으로 나타낼 수 있다.

따라서, 회전자의 치수결정은 위의 식을 이용하여 구할 수 있으나, 본 모델의 경우 Fig. 1과 같이 인버터가 회전자 내부에 삽입되는 내장형 구조이므로 계산된 회전자 치수에 두 개의 인버터의 길이를 감안한 설계 치수를 결정한다. 본 모델에서 설계한 회전자의 치수는 1.484[m]이다.

2.2.3 극수 및 상수 결정

극수는 코킹토크를 최소화하며, 2.1.2절에서 구한 회전자 직경과 자석재질에 따른 자기효율이 높일 수 있는 최소 요크부의 두께를 가질 수 있는 극수를 선정한다. 본 설계에서는 32극으로 선정하였다.

자석의 두께는 최고/최저 온도에서 전류에 의한 최대감자기자리이 걸렸을 때에도 감자가 되지 않도록 자석 두께를 선정하여야 한다. 따라서 선정한 자석재질의 감자특성곡선상의 최고온도에서의 굴곡점감자계와 최고피크전류가 흘렀을 때에 감자에 견딜 정도의 두께를 선정한다.

상수는 본 설계조건에서의 최대전류를 인버터에 적용될 IGBT 소자의 최대 허용전류로 나누어 정수의 인버터모듈 개수를 계산하고, 여기에 기본 설계상수를 곱하여 선정한다. 본 설계에서는 최대 허용전류가 1200[A]인 IGBT에 3상 설계를 적용하여 8개의 인버터에 24상으로 결정하였다.

2.2.4 슬롯 수 결정

슬롯수의 결정은 식(4)로 주어지는 매극·매상 슬롯 수(q)로부터 구할 수 있다

$$q = \frac{\text{슬롯수}}{\text{매극}\times\text{매상}} \quad (4)$$

여기서, 매상의 값을 2.1.3절에서 구한 24상을 적용할 경우 매극·매상 슬롯수를 1로 가정하여도 총 슬롯 수가 768개가 된다. 그러나 본 모델은 24상을 Y결선한 것이 아니라 인버터모듈을 8개로 나누어 병렬로 연결한 3상 설계이므로, 매극·매상 슬롯수(q)를 1인 96슬롯으로 선정하였다.

2.2.5 공극의 길이 선정

전기적으로 짧을수록 큰 출력력을 낼 수 있으나, 조립상의 어려움, 제작공차의 불균일에 의한 회전자와 고정자의 충돌, 자기흡인력 및 반발력에 의한 진동, 토크 불균일 등의 이유로 무한히 작게 할 수는 없다. 그리고 공극길이가 크면 코킹 토크가 저감되는 아점이 있으므로 이에 본 모델에서는 적정 값인 6[mm]를 선정하였다.

2.2.6 권선사양 결정

권선의 사양을 결정하기 위해서는 먼저 1극의 자속 또는 유효자속을 구하여 하며, 식(5)으로부터 구할 수 있다.

$$\Phi_g = \frac{3.675}{p} \sqrt{\frac{MP}{N_s \zeta \eta \cos \varphi}} \times 10^{-4} [M\chi] \quad (5)$$

여기서 N_s 는 동기 속도, ζ 는 공급전압과 무부하 유도기전력과의 비, M 은 장하비이다.

식(5)로부터 구한 1극의 자속과 식(6)으로부터 전기자 1상 직렬권회수 구한다.

$$w = \frac{30\sqrt{2}E_0}{\pi p N_s k_u \Phi_g} \times 10^8 \quad k_u \approx 0.9 \quad (6)$$

여기서, E_0 은 부부하 유도기전력, p 는 극의 짝수(P/2),

k_u 는 권선계수, Φ_g 는 1극의 자속이다.

또한, 전기자 동선 단면적은 식(7)로부터 구할 수 있다.

$$aQ_a = \frac{2\rho w}{r_1} \left(4.2k_s D_a \frac{S_c}{S_n} + L \right) \times 10^{-2} [\text{mm}^2] \quad (7)$$

$k_s = 1.1 \sim 1.2$, $\rho = 0.01724(20\text{CENTIGRADE}) [\Omega\text{mm}^2/\text{m}]$

여기서, k_s 는 슬롯 높이 비, ρ 는 비저항, S_c 는 권선 코일피치, L 은 전기자 축방향 길이이다.

식(7)로부터 구한 동선자의 단면적을 식(8)에 대입하여 동선의 전류밀도의 확인한다.

$$A_a = \frac{I}{aQ_a} [A/\text{mm}^2] \quad I = \frac{P}{mV_a \eta \cos \varphi} [A] \quad (8)$$

여기서, m 은 상수, η 은 효율, $\cos \varphi$ 은 역율이다.

3. 설계 결과

3.1 설계 알고리즘을 통한 설계 모델

Fig. 3은 Fig. 2의 설계 알고리즘을 토대로 얻어진 각 부위별 치수에 대한 전체의 1/4 CAD 도면이다. 전체 직경은 3.440[m]을 가지며 회전자의 직경은 1.490[m]이다. 여기서 회전자의 직경이 매우 큰 것은 회전자와 shaft 사이에 인버터 모듈을 넣을 수 있도록 함으로써 기존의 다른 시스템보다 공간을 많이 줄일 수 있는 장점이 있다. Fig. 4는 설계된 모델의 전기자 슬롯의 세부 치수를 나타낸다.

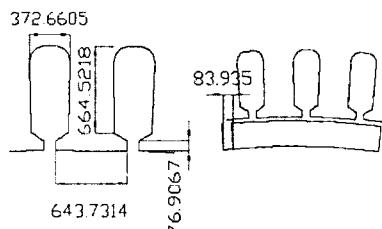


Fig. 3. 설계된 모델의 세부 치수

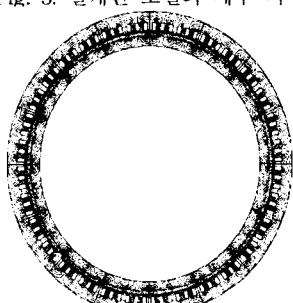


Fig. 4. 설계한 모델의 FEM Analysis

3.2 설계한 모델의 정자계 유한요소법을 이용한 해석
Fig. 5은 본 연구에서 설계한 모델을 Flux2D의 정자계 유한요소법을 이용하여 해석한 Flux Line이다. 결과에서 보듯이 32극이 형성됨을 확인할 수 있다. Fig. 6은 1극 1상의 역기전력 파형이며 최대 6000[V]의 값을 가진다.

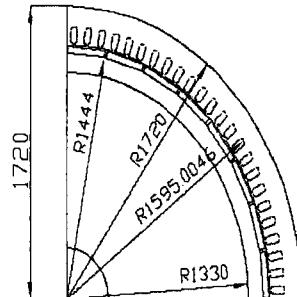


Fig. 5. 설계된 모델의 치수

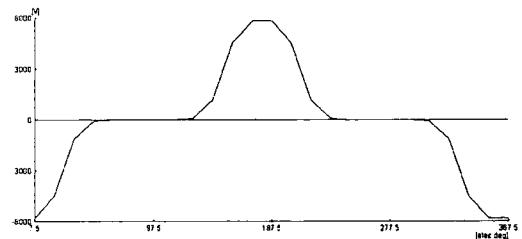


Fig. 6. 1극 1상의 Back-EMF 파형

4. 결 론

최근 산업기기의 대형화로 인하여 전기기기 및 전력기기의 고효율·대용량 설계에 대한 중요성이 커지고 있다. 이에 BLDC와 PMSM을 이용한 고용량 전동기에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 한편, 선박 및 잠수함 등과 같이 복잡한 전자기기로 인한 공간적 제약이 심한 체계의 경우 제어부를 포함한 전동기의 전체 부피가 작으면서 고출력을 내는 전동기의 설계가 필요하다. 이에 본 연구에서는 인버터를 회전자에 내장한 인버터 내장형 고용량 BLDC 전동기 설계에 관한 연구를 하였다.

기본 설계 사양은 5[MW]급, 150[rpm]이다. 설계치수계산에 적용된 이론은 장하분배법과 등가자기회로법이다. 이로부터 설계한 설계모델의 도면을 작성하고, Flux2d를 이용한 FEM 해석을 통해 출력특성을 비교하였다. 설계한 모델의 출력은 2.4[MW]이다. 따라서 설계 값에 근접함을 확인할 수 있다..

[참 고 문 헌]

- [1] 박정태, 김기찬, 이충동, "선박용 전기추진시스템 및 추진전동기 개발동향", 대한조선학회 2001년 춘계학술대회논문집, pp 88-93
- [2] J.R. Hendershot Jr, TJE Miller, "Design of Brushless Permanent Magnet Motors", Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford, 1994
- [3] M. Rosu, etc, "Permanent Magnet Synchronous Motor for ship Propulsion Drive", ICOM '98, Istanbul, Turkey, pp 702-705, 1998
- [4] H. Bausch, "Large Power Variable Speed AC Machines with Permanent Magnet Excitation", Journal of Electrical and Electronics Engineering(Australia), Vol. 10, No. 2, pp102-109, 1990