

선박용 5MW급 BLDC 추진전동기의 고정자 형상에 따른 회전특성에 관한 연구

김동석, 성일권, 김장목, 박관수, 김한들*, 신판석*
 부산대학교 전기공학과, 홍익대학교 전기공학과*

A Study on Revolving Characteristics According to Stator Shape
 in 5MW Class Brushless DC Motor for Ship Propulsion

Dong Sok Kim, Il Kwon Sung, Jang Mok Kim, Gwan Soo Park, Han Deul Kim*, Pan Seok Shin*
 Dept. of Electrical Engineering in Pusan National University
 Dept. of Electrical Engineering in Hongik*

Abstract - 최근의 선박 추진시스템은 기존의 엔진, 터빈 등의 구동 원에서 선박의 발전기로부터 선체 외부의 프로펠러와 일체형으로 구성된 모터를 구동하여 추진하는 전기추진식으로 변화되고 있다. 특히, 히토티계 영구자석재료의 발달로 인하여 대형선박의 추진을 위한 대용량 자석계자형 BLDC와 영구자석형 동기전동기의 설계 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 여전히 MW급 대용량 BLDC 추진전동기의 설계 연구는 미흡한 실정이다.

이에 본 연구에서는 5MW급 대용량 BLDC 추진전동기 설계 연구를 진행하였으며, 그 결과 슬롯 수에 의한 고정자 형상이 다른 3가지 타입의 인버터 내장형 MW급 모델을 설계하였다. 그리고 이들 모델들을 정자계 유한요소법을 이용하여 해석함으로써 고정자 형상에 따른 회전특성을 분석하였고, 이를 바탕으로 본 설계 조건에 적합한 고정자 형상 설계 방향을 제시하였다.

1. 서 론

최근 고유가로 인한 에너지 수급의 어려움으로 인하여 사업 전반에 걸쳐 동력발생원의 전기기기가 급속도로 확대되고 있다. 특히, 선박과 같은 운송기기를 추진시스템은 진동·소음을 저감시켜 함정의 생존성과 은밀성을 대폭 향상시키고 추진효율의 향상 및 선체설계의 유연성이라는 이점으로 오래전부터 진행 되어왔으며, 많은 연구 결과 수천~수백 kW급 대용량 전동기가 개발되어 여러 분야에서 활용되고 있다. 그 동안에는 대부분의 대용량 전동기로 유도전동기와 릴럭턴스 전동기가 사용되어 왔다. 그러나 유도전동기는 저속에서의 효율이 낮으며 회전자의 열손실이 효율과 역률을 저하시키는 단점이 있고, 릴럭턴스 전동기는 구조 및 동작원리상 큰 맥동도 크로 인하여 소음과 진동이 매우 크다. 이에 효율과 역률이 좋고 고속운전이 가능한 영구자석형 전동기에 대한 연구가 많이 진행되었고 최근에는 영구자석 재료(히토티계)의 발달로 인하여 대용량 자석계자형 BLDC와 영구자석형 동기전동기의 설계가 가능해져 대형기에 많이 이용되고 있다. 그러나 여전히 MW급 대용량 BLDC 추진전동기의 국내 설계 연구는 매우 미흡한 실정이다. 더욱이 대용량 BLDC 추진전동기의 설계는 일부 선진국(미국, 독일 등)만이 보유한 기술로 대부분 기술이전을 꺼려하고 있다.[1]

이에 본 연구에서는 일부 선진국에서만 보유하고 있는 MW급 대용량 BLDC 추진전동기 설계 연구를 진행하였으며, 그 결과 슬롯수가 다른 3종류의 인버터 내장형 MW급 모델을 설계하였다. 특히, 본 설계 모델은 선반의 공간 활용도를 높이고, 선체 설계의 유연성을 높이기 위하여 기존의 제어회로가 설치된 인버터 모듈을 회전자

코어의 내부에 삽입하고 분리가 가능하게 설계한 독특함 모델이다. 이는 다극 구조를 가지며, 회전자 직경이 큰 대용량 전동기의 경우 코어내부의 자기흐름상 코어내부에 공간을 두어도 자기효율이 저감되지 않는다는 점에서 착안한 설계이다.

설계한 모델들을 정자계 유한요소법을 이용하여 해석함으로써 설계의 정확성을 판단하였으며, 슬롯 수에 따른 회전특성을 분석·비교함으로써 설계 조건에 가장 부합되는 모델을 제시하였다. [2]

2. 5MW급 BLDC 추진전동기 설계

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 1.과 같다.

표 1. 대용량 BLDC 전동기의 설계 사양

항 목	사 양	항 목	사 양
정격 출력	5000 [kW]	정격속도	150[rpm]
전 압	700 [V]	상 수	3[phase]
전 류	400[A/phase]	극 수	32[pole]
주 파 수	60[Hz]	슬롯 수	96[slots]

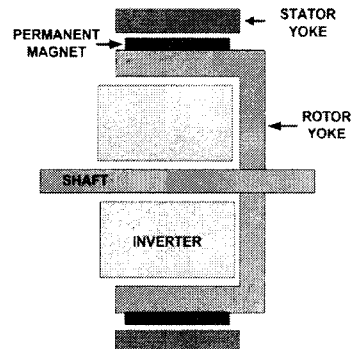


그림 1. 설계 모델의 기본구조(측면도)

표 1의 설계 사양에서 보는 것과 같이 본 설계의 BLDC 전동기는 저속·고토크 특성을 가지기 때문에 영구자석을 회전자 요크표면에 부착하는 영구자석 표면 부착형 전동기 설계가 가능하며, 전체적인 구조는 그림 1과 같이 공간 활용도를 높이기 위하여 회전자 요크와 회전자 축(Shaft) 사이에 인버터를 넣는 구조이다. 그림 1은 본 모델의 측면 구조도이고, 그림 2는 본 설계의 설계과정을 보여주는 설계 흐름도이다.

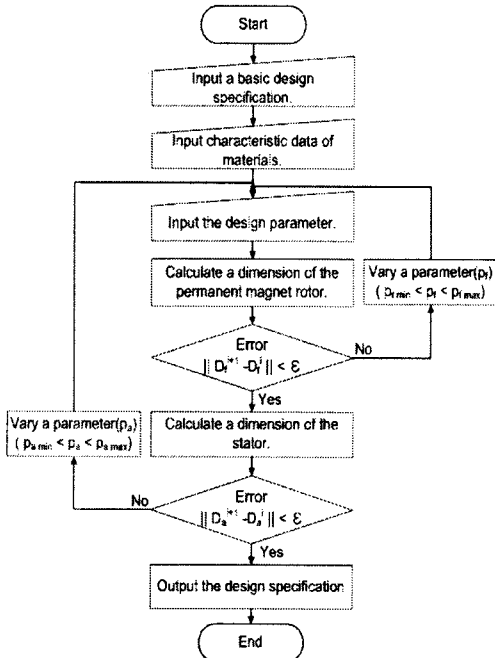


그림 2. 설계 흐름도

2.2 설계 모델

표 1의 설계 조건에 만족하는 정확한 설계를 위하여 본 설계에서는 기본적으로 자기회로법과 장하분배법을 이용한 전기기기 설계방법을 기초로 설계하였으며, 여기에 그림 1에서 보는 바와 같이 본 설계 모델은 인버터가 회전자 코어 내부에 삽입되는 특수한 형태의 전동기이기 때문에 이를 감안하여 일부 설계치수를 일정한 단계로 변경하는 설계방법을 사용하였다.

그 결과 고정자 슬롯 수에 따른 고정자 형상이 다른 3가지 타입의 전동기를 설계하였다.

이는 회전자의 구조가 식 (1)의 출력방정식에서 보는 바와 같이 출력을 결정하는 중요한 요소로 인한 동일 조건이라는 점과 본 설계 모델이 다상인 점을 고려할 때 최소한 32극을 만족할 수 있는 슬롯 수와 설계 공정상 제작 가능한 설계 구조에 따라 설계된 모델이다. 그림 3은 설계 모델의 구조와 치수이다. 여기서 회전자 및 고정자의 기본 치수는 동일하고, 고정자의 슬롯 수 차이로 인한 고정자 형상이 각각 다를 수 있다.

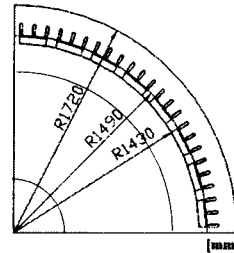
$$T = KD^2 L, \quad (1)$$

여기서, K 는 출력상수, D_r 은 회전자 직경, L_r 는 회전자 길이를 나타낸다.

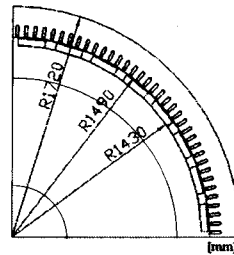
표 2. 설계모델의 고정자 형상비교

항목	모델I	모델II	모델III
매극·매상슬롯 수	1	1.5	2
총 슬롯 수	96	144	192
슬롯 면적[mm ²]	1616.7	1633.2	1677.7
Teeth 폭[mm]	80	46	29
권선 수 [turn]	10	10	10
상당 코일피치	4슬롯 분	5슬롯 분	5슬롯 분
권선방법	이층	이층	단층

(모델I)



(모델II)



(모델III)

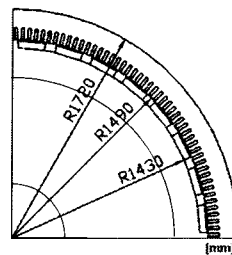


그림 3. 설계한 모델들의 구조와 치수

3. 전자기 유한요소법을 이용한 전동기의 회전특성해석

3.1 코어내의 자기장 분포 해석

본 연구에서는 설계된 모델들의 설계 적합성을 판단하고, 3가지 타입의 설계 모델들의 회전 특성을 분석하기 위하여 전자기 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 그림 4는 모델I 코어의 자기장 흐름(Flux Line)을 해석한 결과이다. 회전자의 극수와 같은 32극이 만들어짐을 확인할 수 있다. 또한, 인버터 모듈이 들어갈 회전자 Yoke와 축사이의 코어내부에는 자기흐름이 없음을 알

수 있다. 그리고 그림 5, 그림 6, 그림 7, 그림 8은 각각 설계한 3모델의 Cogging Torque, Back-EMF, 이력회로의 전압파형, Torque 그래프이다.

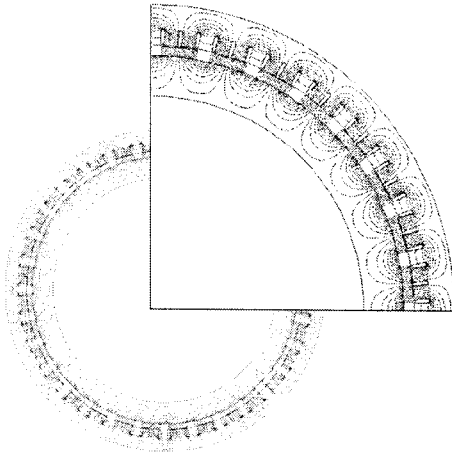


그림 4. F.E.M.이용한 설계 모델의 자기장 분포 해석 결과(모델1의 Flux Line)

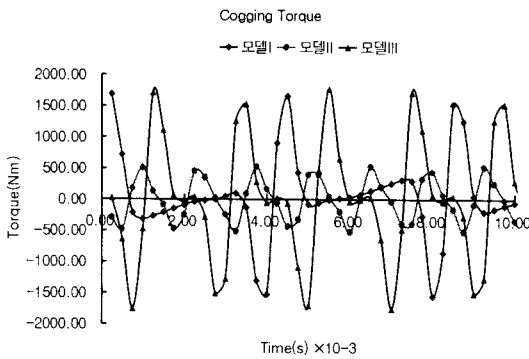


그림 5. 설계 모델의 Cogging Torque 그래프

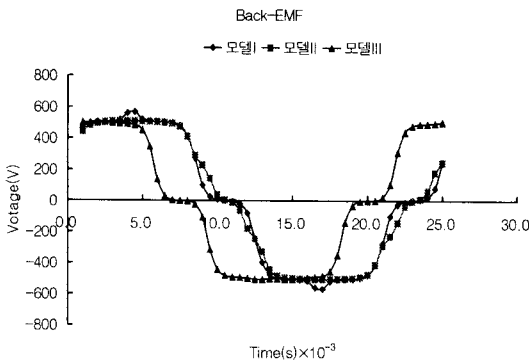


그림 6. 설계 모델의 Back-EMF 그래프

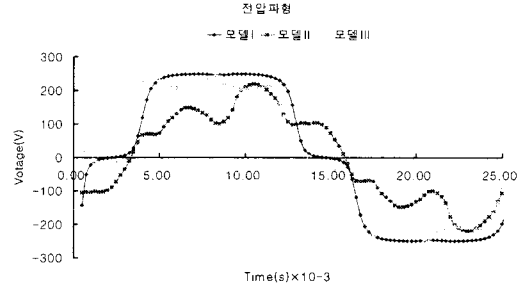


그림 7. 설계한 모델의 회로 전압 파형

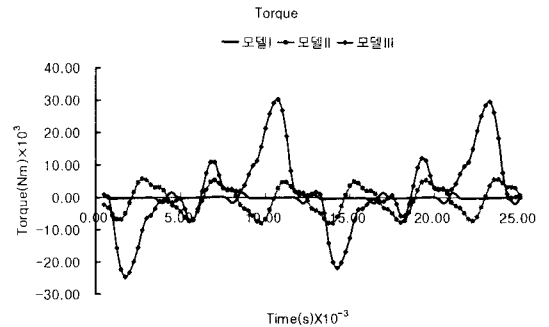


그림 8. 설계한 모델의 Torque 그래프

4. 결 론

본 연구에서는 최근 대형 선박용 추진시스템이 기존의 엔진식 추진시스템에서 전기추진식으로 변화함과 더불어 대용량 BLDC 추진전동기의 설계에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나 MW급 추진전동기의 국내 설계 사례 및 기술 수준은 미흡하며, 이 기술을 보유한 일부 선진국들도 기술이전을 꺼려하기 때문에 자체적인 설계기술을 확보하기 위한 장기적인 목적 하에 5MW급 대용량 BLDC 추진전동기 설계 연구를 진행하다. 그 결과 초기모델로 슬롯 수가 다른 3종류의 인버터 내장형 MW급 모델을 설계하였다. 그리고 슬롯 수로 인한 고정자 형상의 차이가 전체 회전자성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 정자계 유한요소법을 이용하여 해석하였다.

그 결과 모델 I가 평균토크는 두 모델보다 작으나 소음과 진동의 원인이 되는 Cogging Torque가 가장 작음을 알 수 있었다. 그리고 모델 III은 Cogging Torque는 매우 큰 단점이 있으나 평균토크가 가장 크게 나타났다. 따라서 생존성과 은밀성이 요구되는 선박에 모델 III을 선정할 경우 Cogging Torque를 줄이기 위한 연구가 수반되어야 한다.

본 연구결과는 국방과학연구소(A.D.D)의 지원에 의하여 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] J.R. Hendershot Jr, TJE Miller, "Design of Brushless Permanent Magnet Motors", Magna Physics Publishing and Clarendon Press, Oxford, 1994
- [2] 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