

상 변환이 가능한 대용량 영구자석형 선박 추진전동기 설계에 관한 연구

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

A Study on Design of High Power Permanent Magnet Propulsion Motor with Convertible Phase Winding in Ship

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

Abstract - 최근의 선박 추진시스템은 기존의 엔진, 터빈 등의 구동 원에서 선박의 발전기로부터 선체 외부의 프로펠러와 일체형으로 구성된 모터를 구동하여 추진하는 전기추진식으로 변화되고 있다. 특히, 히도류계 영구자석제질의 발달로 인하여 대형 선박의 추진을 위한 대용량 자석제자형 BLDC와 영구자석형 동기전동기의 설계가 가능해졌으며, 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 이도 중·소형 선박기기에 한정되어 있으며, MW급 이상의 대형기기의 설계 연구도 일부 선진국에서만 진행되고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 5MW, 150rpm급 대용량 추진전동기 설계에 관한 연구를 하였다. 본 설계 모델은 오랜 기간 해양 운행을 해야 하는 선박특성 상 중요한 부분인 에너지 효율을 높이기 위하여 인버터를 전동기 내부에 배치한 구조로 부피와 중량을 줄이고, 더불어 속도에 따라 인버터를 커플링하여 상변환이 가능한 전동기를 설계하였다.

1. 서 론

최근 유가의 급속한 상승으로 인하여 높은 동력이 요구되는 산업 및 운송기기의 운영에 큰 어려움을 겪고 있는 실정이다. 이에 산업기기 전반에 대한 대용량 전기기기의 사용이 급속히 증가하고 있으며, 이에 따른 연구가 활발히 이루어지고 있다. 최근 들어 엔진, 터빈 등의 기계식 구동 원을 사용하던 선박의 추진시스템이 선박의 발전기로부터 전기에너지를 이용하여 선체 외부의 프로펠러와 일체형으로 구성된 모터를 구동함으로써 추진하는 전기추진식으로 변화되고 있다. 전기 추진식은 화물 및 사람을 수송하는 일반 선박과 해양 방위를 위한 전함 및 잠수함 등의 진동·소음을 저감시켜 함정의 생존성과 은밀성을 대폭 향상시키고 추진효율의 향상 및 선체설계의 유연성이라는 이점으로 오래전부터 진행되어 왔으며, 현재 수천~수백 kW급 대용량 추진전동기가 개발되어 선박을 포함한 여러 분야에서 활용되고 있다. 그 동안에는 대부분의 대용량 전동기로 유도전동기와 릴럭턴스 전동기가 사용되어 왔으나, 유도전동기는 저속에서의 효율이 낮으며 회전자에 열손실이 효율과 역률을 저하시키는 단점이 있고, 릴럭턴스 전동기는 구조 및 동작 원리상 큰 맥동 토오크로 인하여 소음과 진동이 매우 크다. 이에 효율과 역률이 좋고 고속운전이 가능한 영구자석형 전동기에 대한 연구가 많이 진행되고 있으며, 최근에는 영구자석 재료(희토류계)의 발달로 인하여 대용량 자석제자형 BLDC와 영구자석형 동기전동기의 설계가 가능해져 대용량 동력원으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 이것도 여전히 kW급 이하 중·소형 선박기기에 한정되어 있으며, MW급 이상의 대용량 전동기 설계 연구도 일부 선진국(미국, 독일 등)에서만 진행되고 있는 실정이다. 더욱이 이들 선진국들도 이 대용량 영구자석형 전동기의 설계 기술 이전을 꺼려하고 있다.

이에 본 연구에서는 표 1의 초기 설계 조건을 만족하는 선박 추진을 위한 5MW급 대용량 영구자석형 동기전동기를 설계 하였다. 본 설계 모델은 오랜 기간 해양 운행을 해야 하는 선박특성 상 전기 추진 시스템을 적용한 경우 가장 문제가 되고 중요한 부분인 에너지 효율을 높이기 위하여 인버터를 전동기 내부에 배치한 구조로 부피와 중량을 줄이고, 일부 권선 및 인버터의 고장 시에도 운전이 가능하도록 분리형 인버터시스템으로 설계하였다. [1][2] 특히 본 설계 모델의 가장 큰 특징은 특정 속도를 기준으로 그 이하인 저속에서는 2개의 인버터가 서로 연결되어 제어 되고 고속에서는 모든 인버터가 각각 운전하는 상변환이 가능한 인버터 시스템을 적용함으로써 운전상의 효율을 향상 시켰다.[3]

한편, 전동기의 세부치수는 기본 설계 사양을 바탕으로 자기회로법과 장하분배법을 기초로 설계하였으며, 전자기유한요소법을 이용하여 코어 내부의 자기 분포를 해석하였다.

<표 1> 기본 설계 조건

항 목	설계사양	항 목	설계사양
정격출력[MW]	5	운전전압 [V]	550 ~ 830
정격속도[rpm]	150	공급전류 [A]	< 10000
주 파 수 [Hz]	40	권선전류 [A]	400 ~ 500

2. 본 론

2.1 설계 모델의 구조와 세부 설계 사양 결정

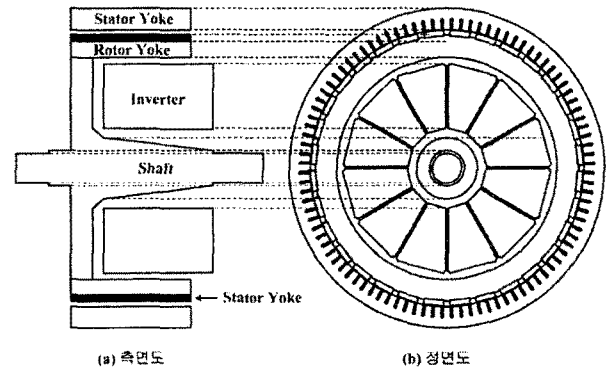
영구자석형 동기전동기를 설계함에 있어 기본설계사양 외에 먼저 결정되어야 하는 극수(P), 슬롯 수(Sn) 등의 추가 설계사양은 표 1의 기본설계사양과 다음 수식으로부터 계산 및 유추 할 수 있다.

극수는 설계 조건에서 주파수와 정격속도(동기속도)가 결정되어 있으므로 식 (1)을 이용하여 계산된다. 영구자석의 재질은 자기특성이 높고, 높은 온도 특성을 가지는 사마륨코발트(SmCo)계 영구자석을 사용하였다.

$$P = \frac{120f}{Ns} = \frac{120 \times 40 [Hz]}{150 [rpm]} = 32 \quad (1)$$

P : 극수, f : 주파수, Ns : 동기속도(정격속도)

따라서, 본 설계 모델은 회전자의 직경이 축방향 길이에 비하여 큰 모델이 됨을 알 수 있다. 즉, 자기회로(분포) 특성상 회전자 내부 중 일부가 불필요하게 된다. 이에 본 설계에서는 그림 1의 구조와 같이 인버터를 회전자 내부에 배치하여 전동기의 부피와 중량을 줄임으로써 에너지 효율을 높이는 구조로 설계하였다. 또한 인버터 시스템을 분리함으로써 일부 인버터의 고장 시에도 전동기 동작이 가능하도록 설계하였다. 이 경우 운전과 동시에 고장 수리가 가능하다.



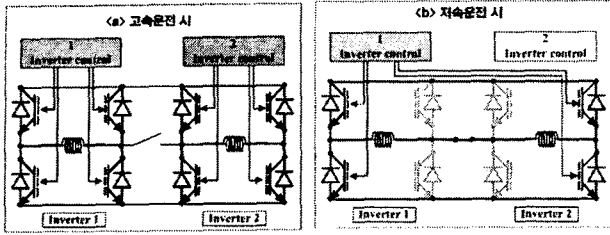
<그림 1> 설계 모델의 구조

한편 상수와 연관이 있는 인버터의 개수는 기본 설계 조건의 최대 공급전류와 권선전류의 관계로부터 24개가 됨을 알 수 있다. 여기에 상변환을 위한 2개의 인버터를 연결하기 위하여 한 모듈당 2개의 인버터로 구성하였다. 따라서 본 설계 모델은 12개의 인버터 모듈로 구성된 인버터 내장형 추진 전동기이다.

상수는 설계 조건으로 주어지지 않은 경우 수많은 경우 수가 가능하기 때문에 임의로 결정하기 어려운 설계 파라미터이면서 전동기 내부 구조를 결정하는 중요한 파라미터이다. 이에 본 설계에서는 상수와 밀접한 관계가 있는 인버터의 구조와 동작특성, 그리고 그에 따른 전동기의 권선도를 바탕으로 상수를 유추하였다.

2.2 상 변환이 가능한 인버터 구조

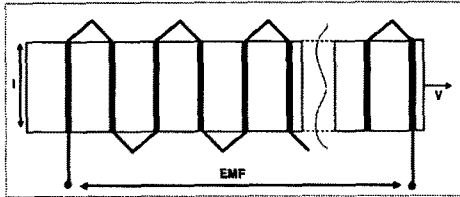
본 설계 모델의 제어부는 분리형 인버터로 전동기의 회전자 내부에 배치되며, 12개의 인버터 모듈로 분리되어있다. 다시 이 각각의 인버터 모듈은 2개의 인버터로 구성된다. 따라서 본 설계모델 전체의 인버터 개수는 24개이다. 특히 각 인버터 모듈내의 2개 인버터는 속도특성에 따라 상변환이 가능한 구조로 정격속도 35% 이하에서는 그림 2의 (b)와 같이 2개의 인버터가 연결되어 1개의 인버터로 제어되고, 정격속도 35% 초과 시에는 그림 2의 (a)와 같이 2개의 인버터로 분리되어 각각 제어된다. 이처럼 속도에 따라 상을 변환하여 운전할 경우 전체 상 중 절반만을 사용하면서 전동기는 정상적으로(모든 권선 운영) 운전하므로 운전 효율을 높일 수 있다. 한편 인버터 설계에 이용된 소자는 고압기기에 많이 이용되는 IGBT이다.



〈그림 2〉 정격속도에 따라 인버터의 상변환 구조

2.3 상 변환이 가능한 인버터 구조의 전동기 권선도

이와 같이 분리형 인버터 구조에 2개의 인버터가 커플링 되어 상변환 운전을 하는 경우 제어부에서 소비되는 에너지를 절약할 수 있지만 전동기의 기본 설계과정에 있어 기존의 3상 권선법과 다상(5상, 7상, ...) 권선법을 적용하기 어렵다. 그러므로 본 설계 모델은 단상형 동기전동기이다. 따라서 인버터의 개수를 감안해 볼 때 본 설계 모델은 24(단상*24)상이 된다. 그러나 이도 기존의 단상형 권선법인 1상당 1극을 발생하는 집중권 방식으로는 전기자의 상전류에 의한 고정자 내의 극수와 영구자석에 의한 회전자의 극수가 동기화 되지 않는 문제점이 있다. 즉 영구자석계자의 극수(32)와 전기자에서 발생하는 극수(24*1극)의 부조화로 인하여 동기속도 운전이 불가능하다. 이에 본 연구에서는 그림 3과 같은 권선법을 제시하였다.



〈그림 3〉 단상·다극 권선법

그림 3의 권선법은 단상으로 다극을 만들 수 있는 권선법으로 극당 1도체 수를 가진다. 즉, 한 상당 도체수가 한 상당 극의 수와 같다. 따라서 본 설계의 모델의 설계 사양인 24상 32극과 같이 고정자의 전체 상 수가 영구자석계자의 극수 보다 작은 경우에도 1상당 극의 수를 도체 수에 따라 증가시킬 수 있어 단상(1상*24)의 구조에서도 영구자석계자의 극수와 동기화가 가능하다. 이 권선법은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$EMF = B \times l \times v \times p \quad (2)$$

B : 영구자석의 자속밀도, l : 고정자 코어의 축방향 길이
v : 회전자 표면의 접선 속도, p : 극수

2.4 설계한 5MW급 추진 전동기의 구조

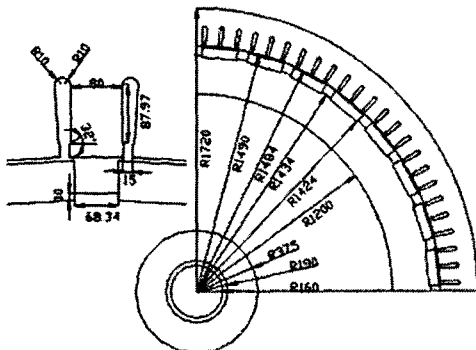
이상의 결과로 기본 설계 조건 외에 기초 설계에 있어 가장 중요한 파라미터인 극수와 상수, 권선도가 결정되었으므로, 이로부터 고정자 형상을 설계하기 위한 슬롯 수를 결정 할 수 있다. 보통 3상형 모델에서는 다음과 같이 극수와 상수의 관계로부터 슬롯수가 결정되어진다.

$$(\text{극수}) \times (\text{상수}) \times (\text{매극·매상의 슬롯 수}) = \text{슬롯 수} \quad (3)$$

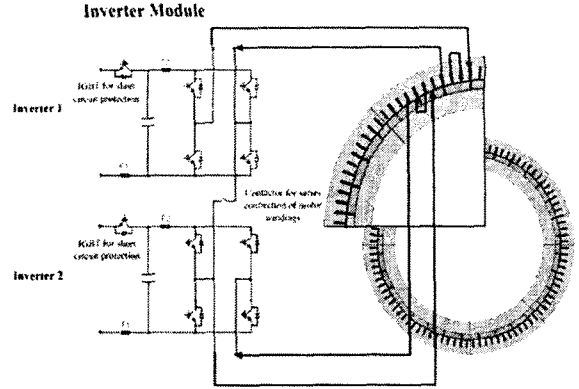
그러나 본 설계 모델은 단상이며, 그림 3과 같은 단상·다극 권선법을 사용하므로, 본 설계 모델의 슬롯 수는

$$\text{상수} \times (4\text{이상의 짝수}) = \text{슬롯수} \geq \text{극수} \quad (4)$$

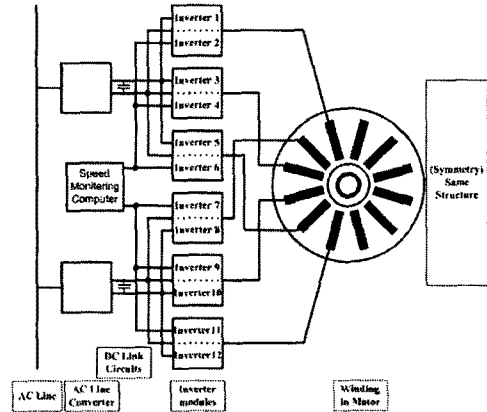
로부터 구해 질 수 있다. 따라서 본 설계모델의 최소 슬롯 수는 96이 된다. 이렇게 구해진 기초 설계 모델에 출력방정식 및 장하분배법 그리고 자기회로법을 적용하면 그림 4와 같은 세부 설계 치수를 구할 수 있다. 여기에 본 연구에서 제시한 인버터와 권선법을 적용하면 그림 5와 같으며, 그림 6은 본 설계 모델의 전체 시스템 블록선도이다.



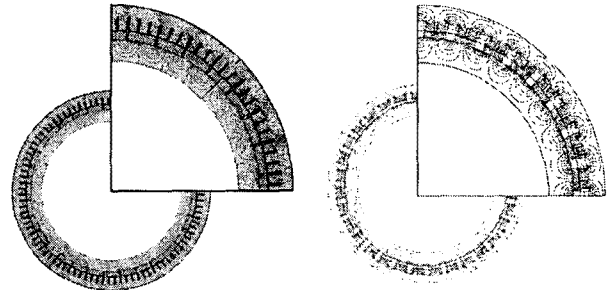
〈그림 4〉 설계한 5MW급 PMPM의 세부 치수



〈그림 5〉 상변환 인버터와 설계한 전동기의 권선도



〈그림 6〉 설계한 5MW PMPM의 전체 시스템 블록선도



(a) 제시한 권선법 (b) 기존의 3상 Y결선법
〈그림 7〉 전자기유한요소법을 이용한 두 권선법의 자기장분포비교

그림 7은 동일 구조의 전동기 형상에 제시한 권선법과 기존의 3상 Y결선법을 적용하여 설계한 후 이를 전자기유한요소법을 이용하여 해석 비교한 결과 거의 유사함을 알 수 있다. 따라서 제시한 권선법의 적합성을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 일부 선진국에서만 보유한 MW급 대용량 영구자석형 추진전동기 설계에 관한 연구를 진행하였으며, 이 과정에서 선박의 에너지 효율을 높이기 위하여 인버터를 전동기 회전자 내부 공간에 분할 배치하는 구조와 운전 시 에너지 소비 효율을 높이기 위하여 상변환이 가능한 인버터 시스템을 제시하였다. 특히, 상변환이 가능한 인버터 구조 상 기존의 권선법의 적용이 어려운 점을 해결하기 위하여 단상·다극 권선 방식으로 설계하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] H. Fürsich, E. Thum, J. Hamann, D. Köllensperger, "New Converter-Fed Permanent-Field Motor", ICEM, München, Germany, September 1986, pp. 50-56
- [2] G. Nerowski, K. Plackner, B. Piepenbreier, H.-J. Tölle, "New Permanent-Field Synchronous Motor with Integrated Inverters", ICEM, Cambridge USA, August 1990
- [3] G. Nerowski, B. Piepenbreier, "A New Generation of Submarine Propeller Motors with PM Excitation and Integrated Inverters", ICEM, 1991