

소선박 추진용 1MW급 초전도 모터의 설계 및 특성 분석에 관한 연구

서정량¹ · 남기동² · 박민원[†]

(Received November 6, 2019 ; Revised November 21, 2019 ; Accepted November 25, 2019)

Design and characteristics study of a 1 MW class superconducting motor for small-ship propulsions

JungRang Seo¹ · Gi-Dong Nam² · Minwon Park[†]

요약: 본 논문에서는 소선박 추진을 위한 1 MW 초전도 모터의 설계 및 특성에 대해 연구하였다. YBCO 선재를 사용하는 초전도 모터의 기본 설계 조건 및 구조를 기반으로 설계되었으며, 초전도 모터의 전자기 설계 과정에 최적 파라미터를 도출하기 위한 과정에 경우의 수를 축소하여 해석 시간을 축소 할 수 있는 타구치(Taguchi) 방법을 사용하였다. 1MW급 소선박용 초전도 모터의 직경 및 축 길이 및 요구되는 초전도 선재의 길이는 각각 1.4 m, 0.77 m 그리고 8.8 km이다. 초전도 코일에 발생하는 최대 자기장 및 수직 자기장은 각각 3.56 T 및 2.05 T였으며 해석결과 190 rpm에서 정격 토크는 55.2 kN·m로서 1.1 MW의 출력특성을 나타냈다. 이 결과는 초전도 모터의 적용이 필요한 소형 선박 추진 시스템 설계에 효과적으로 사용될 것이다.

주제어: 이트륨 바륨 산화 구리, 선박 추진용 모터, 타구치 방법, 초전도 회전기계

Abstract: In this study, we examined the design and characteristics of a 1 MW superconducting motor for small ship propulsion. The design is based on the basic modelling conditions and structure of a superconducting motor using Yttrium barium copper oxide (YBCO) wire. To determine the best conditions for the rotor and stator sections, and reduce the time required for simulation, a modified Taguchi method was proposed. The diameter and shaft length of the 1 MW small ship superconducting motor, and length of the superconducting wire required were 1.4 m, 0.77 m, and 8.8 km, respectively. The maximum and vertical magnetic fields were 3.56 T and 2.05 T, respectively. The analysis results demonstrated that the rated torque at 190 rpm was 55.2 kN·m with an output power of 1.1 MW. These results will be effectively used in designing small ship propulsion systems that require superconducting motors.

Keywords: Yttrium barium copper oxide (YBCO), Ship propulsion motor, Taguchi method, Superconducting rotating machine

1. 서 론

1.1 선박 추진용 모터의 개요

선박과 선박 무역로의 발달은 인류의 역사만큼 오랜 역사를 가지고 있으며 이런 선박의 개발은 19세기 이전 작고 단순한 항해 용 선박에서 19세기 후반에는 더 크고 복잡한 고속 클리퍼 선박까지 발달하였으며 이후 전 세계적으로 석탄 자원이 풍부해지면서 증기선이 출현하기 시작했다[1]. 이런 항해 추진 기술과 동시에 18세기와 19세기 기계 및 유체 역학 기술도 발달하여 추진 속도가 빨라질 수 있는 계기가 되었는데 그 당시 피스톤 왕복 엔진 방식의 보일러로 구성된 증기 엔진으로 시작됐다. 19세기 말에는 증기 터빈이 채택되었으며 이후 디젤 엔진이 발명되어 1912년에는

해상 화물선인 Selandia호에 적용되었다. 또한 가스 터빈은 해군 선박의 고속 및 스프린트 동작 필요성에 선박 추진 방법으로 등장했는데 선박 추진을 위해 항공기 엔진을 이용한 시스템이었다. 현재 주를 이루는 추진시스템으로 디젤전기 추진시스템이 있는데 최초 유람선에 적용하기 위해 개발되었다. 이는 기술적으로 증기 터빈 구동 선박과 유사한 저소음 및 저진동화를 목표로 했으며 강인한 추진시스템과 객실의 정숙성, 화물 적재량 등의 경제성 등 많은 장점을 가지고 있다[2].

1.2 선박 추진용 모터의 분류

선박추진 모터는 전기 에너지를 기계적 에너지로 변환하는 전기기기로서 초기에는 DC 모터가 주로 사용되었지만

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1950-1986>): Professor, Department of Electrical Engineering, Changwon National University, 727, Gyeongsangnam-do Uichang-gu, Changwon-si 51140, Korea, E-mail: capta.paper@gmail.com, Tel: 055-213-2866

1 CTO, Research Institute, Mogenkorea Co., E-mail: seojr1717@daum.net, Tel: 055-299-5364

2 Ph.D. Candidate, Department of Electrical Engineering, Changwon National University, E-mail: trans7901@gmail.com, Tel: 055-213-2866

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

회전자의 구조가 복잡하고 유지 관리가 어렵 기 때문에 최근에는 거의 사용되지 않고 있다. 그러나 전력 반도체 기술의 발달로 AC 모터의 제어가 용이해 지면서 점차 현재는 유도기, 동기기 및 PMSM이 전기 추진 시스템에 주로 사용되고 있다. Figure 1은 선박 추진을 위한 모터의 분류를 보여주고 있다.

1.3 초전도 모터의 동향

일반적으로 기존의 대형 전기 모터는 90~97%의 효율을 나타내지만 초전도 모터는 약 99%에 가까운 효율을 달성할 수 있다. 특히 저속운전 시 초전도 모터의 적용은 연료 및 배출 가스를 줄일 수 있고, Figure 2과 같이 동급 출력의 기존 모터보다 작고 전력 밀도가 높다; 기존 모터의 경우 약 5 kW/kg에 비해 초전도 모터는 약 30 kW/kg의 비출력을 나타낸다[3]. 2009년 1월에 American Superconductor Corporation (AMSC) 36.5 MW 고온 초전도 선박 추진 모터의 통합 전력 지상 테스트를 성공적으로 완료했다고 발표했으나 현재 선박에서 적용되어 추진시스템에 사용하는 초전도 모터는 없다[4].

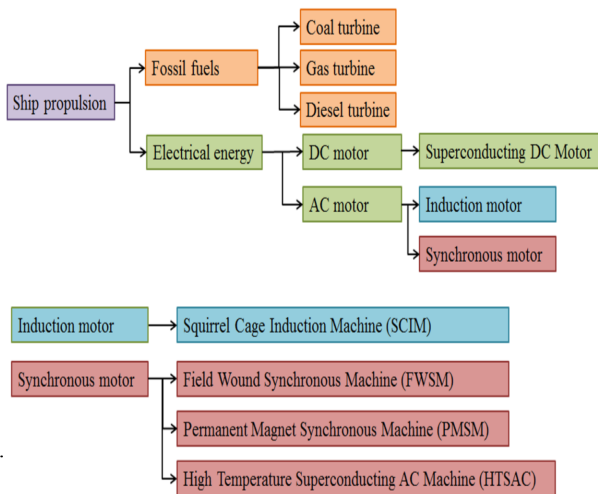


Figure 1: Classification of motor for ship propulsion

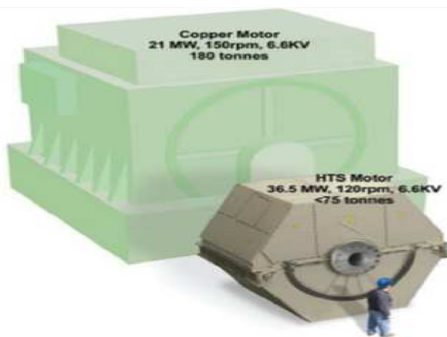


Figure 2: Dimension comparison of the 36.5 MW motor with a conventional

2. 소선박용 1 MW급 초전도 모터의 전자기 설계 및 분석

2.1 소선박 추진을 위한 1 MW급 초전도 모터의 구성

Figure 3은 1 MW 초전도 모터의 구성을 나타내고 있으며 초전도 모터는 크게 고정자와 회전자 부분으로 나누어 볼 수 있다. 초전도 모터와 상용 모터의 차이점은 회전자에 초전도 모터의 필드 코일이 초전도 선재로 구성되고 계자 코일의 냉각을 위해 냉각 시스템 및 극저온 용기가 필요하다는 것이다. 고정자 부분은 고정자 치, 고정자 권선 및 자기 차폐층으로 구성되며 실온에서 동작된다. 회전자 부분은 계자코일이 부착되는 회전체와 계자코일 그리고 극저온 환경을 유지하는 극저온 용기로 30 K의 극저온 환경에서 동작된다. Table 1은 초전도 모터의 각 구성 요소의 재료를 보여주고 있다.

극저온 용기인 Cryostat의 재질은 극저온 환경에서 우수한 저온 취화 특성을 나타내는 스테인리스 스틸로 구성되어 있고, 고정자 치는 비자성 특성을 가지는 강화 유리섬유 플라스틱(GFRP)으로 구성되어 있다. 자기 차폐층의 재질은 철의 한 종류인 M-27 25 Ga로 회전자의 자기 밀도를 높이는 목적으로 사용하였다. 계자 코일의 형상은 레이스 트랙 형상이고, 2개의 코일이 적층되었다. 고정자 권선은 이중권과 분포권을 적용하였다. Table 2는 1 MW 초전도 모터의 기본 설계 조건을 보여준다. 정상 상태에서 정격 전압은 3.3 kV이고 회전자의 회전 속도는 190 rpm이며, 동작 온도는 30 K이다.

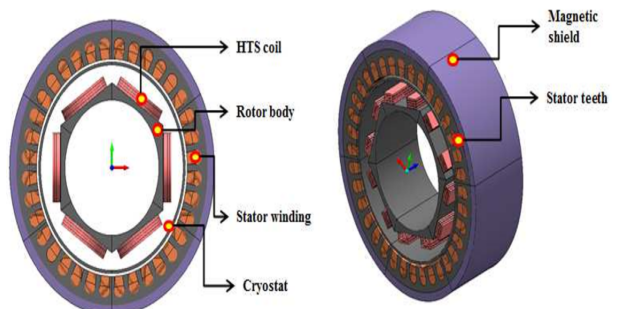


Figure 3: Configuration of the 1 MW superconducting motor

Table 1: The material of each component of the superconducting motor

Component	Material
Rotor body	M-27 24 Ga
Field coil	Y-Ba-Cu-O (YBCO)
Cryostat	304 Stainless steel
Stator teeth	Glass fiber reinforced plastic (GFRP)
Stator winding	Copper

Table 2: Fundamental structure of the 1 MW superconducting motor

Items	Value
Rated output	1 MW
Rate voltage	3.3 kV
Rated armature current	192 A
Rated rotatating speed	190 rpm
Rated torque	55.2 kN·m
Number of poles	6
Operating temperature	30 K

2.2 1 MW급 초전도 모터의 수학적 설계

고정자에 교번 전류가 인가되면 고정자 자계는 상호 작용에 의해 만들어지고, 회전자에는 영구자석 또는 전자석의 자계를 가지고 있으므로 토크는 고정자 주권선의 회전 자계와 회전자 자계의 상호 작용에 의해 발생된다. 즉, 두 자계가 정렬될 때 기기가 회전하며 토크가 발생되고, 자기장의 회전 속도를 동기 속도라고하며 다음과 같이 정의된다.

$$n_{sme} = \frac{120f_e}{p} \quad (1)$$

여기서 f_e 는 여기 주파수 (Hz)이고 p 는 회전자의 극 수이다. 고정자 전류는 고정자의 자기장을 생성하여 회전자의 권선에서 발생하는 자기장과 상호 작용을 하고, 이결과로 토크는 고정자 BS의 회전 자기장과 회 전자 자기장 BR의 상호 작용에 의해 발생한다. 두 자기장에 의해 유도 된 토크는 다음 방정식으로 정의된다.

$$\tau = k B_R \times B_S \quad (2)$$

식 (2)에서 k 의 값은 BR 및 BS를 표현하는데 사용 된 단위 시스템에 의존하는 상수이다. 두 필드가 정렬하려고하면 토크가 생성되고 기기가 회전한다. 동기식 기계의 출력 전력은 다음 방정식으로 계산된다.

$$P = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} k_\omega B_{so} A_s D^2 L n_s \quad (3)$$

여기서 B_{so} 는 고정자 권선에서 최대 방사 자속 밀도이며, 3상 고정자 권선의 전류와 마찬가지로 k_ω 는 기본 고조파 권선 계수이며, D 는 고정자 내경, L 은 모터의 유효 축 길이이며 N_s 는 회전 속도이다. 고정자 자속 밀도는 다음 방정식으로 계산된다.

$$B_{so} = \frac{2\mu_o N_f i_f r_f}{D^2} \quad (4)$$

여기서 D 는 고정자 직경이고, μ_o 는 자유 공간의 투과성이며, N_f 는 계자 코일의 회전수이며, 계자 전류 인 경우 R_f 는

계자 권선의 반경이다. 3 상 고정자 권선의 전류는 회 전자 자속 밀도로부터 계산된다.

$$A_s = \frac{2T_{ph} I_s k_\omega}{0.5 D \pi} \quad (5)$$

여기서 T_{ph} 는 권선 수이고 I_s 는 고정자 권선의 위상 전류이다[5].

2.3 2G HTS 선재의 사양

1 MW 초전도 모터의 필드 코일은 (주)서남의 Yttrium barium copper oxide (YBCO) 선재를 사용하여 설계되었다. YBCO 선재의 자세한 사양은 Table 3에 요약되어 있다 [6].

Figure 4는 YBCO 선재의 Ic-B 곡선을 보여준다. 초전도 선재의 중요한 특성은 자기장의 크기와 입사각에 따라 다른데 YBCO 선재는 수직 자기장에 의해 크게 영향을 받는 테이프 형태이기 때문에 수직 자기장에 의해 임계 전류가 선택되었다. 초전도 필드 코일의 전류는 와이어 임계 전류의 40% 안전 마진을 적용하여 결정되었다.

3. 설계 결과

3.1 Taguchi 방법을 사용한 초전도모터의 최적설계

본 논문에서는 모터의 전자기 설계 과정에 Taguchi 방법을 사용하여 목적 요인에 가장 적합한 매개 변수를 도출하였으며[7], 그 결과로 설계된 1 MW 초전도 모터의 사양은 Table 4에 요약되어 있다. 초전도 모터의 직경과 축 길이 및 필요한 초전도 선재의 길이는 각각 1.4 m, 0.77 m 그리고 8.8 km이다.

Table 3: Characteristics of the superconducting wire

Items	Value
Material	YBCO
Thickness	0.15 mm
Maximum double bending diameter	12 mm
Maximum rated tensile stress	250 MPa
Maximum rated tensile strain	0.30%

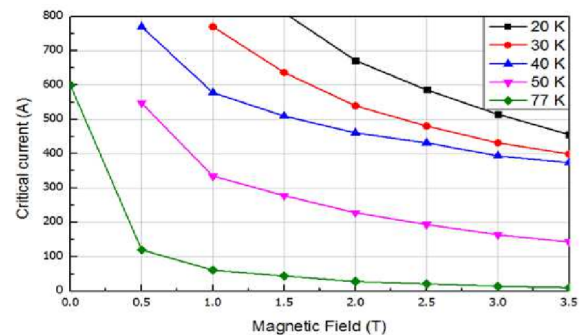
**Figure 4:** Ic-B curves of YBCO wire depending on the operating temperature

Table 4: Specifications of the superconducting motor using the Taguchi method

Items	Value
Rated power	1 MW
Rated L-L voltage	3.3 kV
Rated armature current	192 A
Rated rotational speed	190 rpm
Rated output torque	0.05 MN·m
Air-gap between rotor and stator	52 mm
Core type	air core
Operating temperature	30 K
The number of the rotor poles	6
Effective length	331 mm
The number of the HTS coil turns/layer/pole	250
The number of the HTS coil layers/pole	4
Operating DC field current	324 A
Safety margin of the operating current	30%
Total length of the 2G HTS wire	8.8 km
Core type	air core
Operating temperature	300 K
The number of the stator coil turns/phase	30
The total number of the stator slots	36
Current density of the stator coil	3 A/mm ²
Diameter	1.4 m
volume	1.18 m ³
Axial length	0.77 m
Total weight	8 ton
Maximum magnetic field	3.56 T
Perpendicular magnetic field	2.05 T

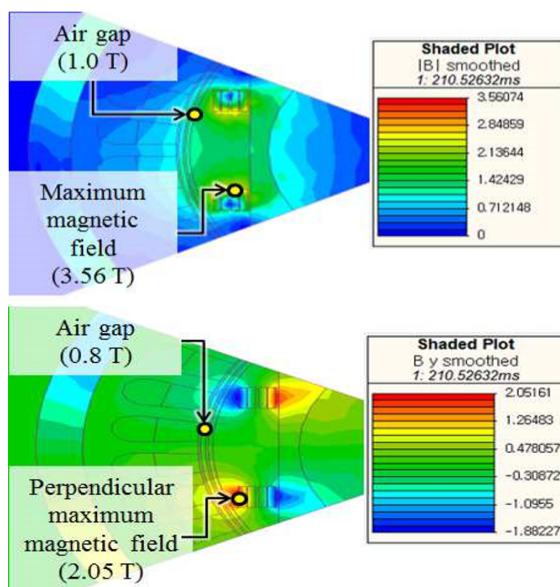


Figure 5: Magnetic field and perpendicular magnetic field distribution of superconducting motor

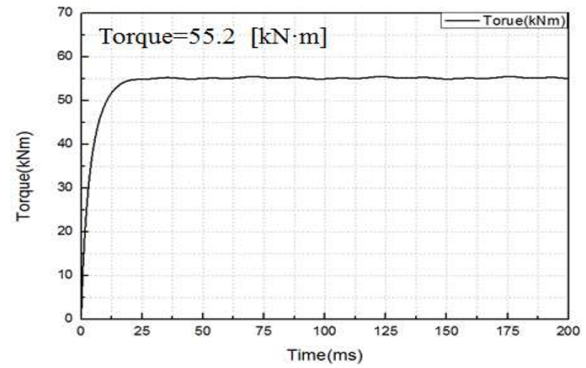


Figure 6: Output torque of the 1 MW superconducting motor

Figure 5는 회전기의 구조상 발생하는 자기장의 형태가 대칭 이므로 전체 초전도 모터의 해석 시간을 단축하기 위하여 초전도 모터의 1/6 모델에 대한 해석을 진행하였으며, 초전도 모터의 자기장 분포와 수직 자기장의 분포를 보여 준다. 최대 자속 밀도는 초전도 계자 코일의 내부 곡선부에 위치한다. 최대 자기장은 3.56 T이다. 또한, 최대 수직 자속 밀도는 초전도 필드 코일의 위쪽에서 발생하며 최대 수직 자기장은 2.05 T이다.

3.2 결과분석

위의 설계된 사양을 토대로 전자기 해석 프로그램을 이용한 해석결과 190 rpm의 정상상태에서의 정격 토크는 아래 Figure 6과 같이 55.2 kN·m로 나타났으며 단위를 환산하면 5,632 kg·m이며, 출력 공식에 의하여 $P = \omega \times \tau$ 이므로 약 1.1 MW가 출력됨을 해석을 통하여 검증하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 소선박 추진을 위한 1 MW 초전도 모터의 설계 및 분석에 대해 설명했다.

YBCO 선재를 사용하는 초전도 모터의 기본 설계 조건 및 구조를 기반으로 설계되었으며, 초전도 모터의 전자기 설계 과정에 최적 파라미터를 도출하기 위한 과정에 경우의 수를 축소하여 해석 시간을 축소 할 수 있는 Taguchi 방법을 사용하였다.

1 MW급 소선박용 초전도 모터의 직경과 축 길이 그리고 초전도 모터에 필요한 초전도 선재의 길이는 각각 1.4 m, 0.77 m 그리고 8.8 km였다. 최대 자기장 및 수직 자기장은 각각 3.56 T 및 2.05 T였으며 해석결과 190 rpm에서 정격 토크는 55.2 kN·m로서 1.1 MW의 출력을 내며, 이 결과는 초전도 모터가 필요한 소 선박 추진 시스템 설계에 효과적으로 사용될 것이다.

Acknowledgement

This research is financially supported by Changwon National University in 2019 ~ 2020.

Author Contributions

Conceptualization, J.R. Seo and M. Park; Methodology, J.R. Seo; Software, J.R. Seo; Validation, J.R. Seo and M. Park; Formal Analysis, J.R. Seo; Investigation, J.R. Seo; Resources, J.R. Seo; Data Curation, J.R. Seo; Writing—Original Draft Preparation, J.R. Seo; Writing—Review & Editing, Corresponding J.R. Seo; Visualization, J.R. Seo; Supervision, M. Park; Project Administration, M. Park; Funding Acquisition, M. Park;

References

- [1] T. Yanamoto, M. Izumi, M. Yokoyama, and K. Umemoto, "Electric propulsion motor development for commercial ships in Japan," *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 12, pp. 2333-2343, 2015.
- [2] W. P. Symington, A. Belle, H. D. Nguyen, and J. R. Binns, "Emerging technologies in marine electric propulsion," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, vol. 230, no. 1, pp. 187-198, 2016.
- [3] W. Nick, M. Frank, G. Klaus, J. Fraunhofer, and H. W. Neumüller, "Operational experience with the world's first 3600 rpm 4 MVA generator at Siemens," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 17, no. 2, pp. 2030-2033, 2007.
- [4] J. F. Gieras, *Advancements in Electric Machines*, Springer, 2008.
- [5] H. J. Sung, G. H. Kim, K. Kim, M. Park, I. K. Yu, and J. Y. Kim, "Design and comparative analysis of 10 MW class superconducting wind power generators according to different types of superconducting wires," *Physica C: Superconductivity*, vol. 494, pp. 255-261, Nov. 2013.
- [6] 2G HTS Wire Specifications, SuNAM Co, Ltd, Gyeonggi-do, Anseong-si, Republic of Korea. [Online]. Available: <http://www.i-sunam.com>, Accessed November 15, 2019.
- [7] D. J. Shin and B. I. Kwon, "Multi-objective optimal design for in-wheel permanent magnet synchronous motor," *Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems*, pp. 1-5, 2009.