

선박 추진용 저속형 고온초전도 모터 설계

백승균, 권영길, 김호민, 이재득, 이연용, 김영춘*, 문태선*, 박희주*, 권운식*, 박관수**
 한국전기연구원 초전도기기연구그룹, 두산중공업(주) 기술연구원*, 부산대학교 전자 전기 정보 컴퓨터 공학부**

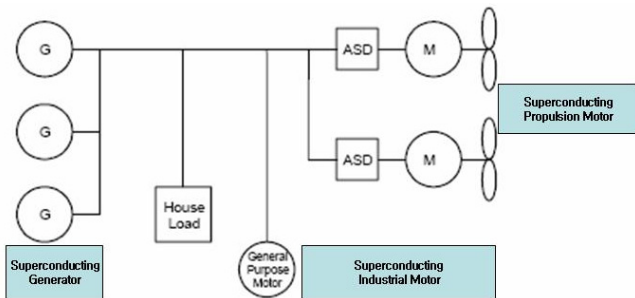
Design of Low-speed High-temperature Superconducting Motor for Ship Propulsion

S. K. Baik, Y. K. Kwon, H. M. Kim, J. D. Lee, E. Y. Lee, Y. C. Kim*, T. S. Moon*, H. J. Park*, W. S. Kwon*, G. S. Park**
 Korea Electrotechnology Research Institute, Doosan Heavy Industries & Construction Co.*, Pusan National University**

Abstract - A superconducting synchronous motor with rotating field coil has been designed. This rotating field coil is composed of high-temperature superconducting(HTS) wire but the stationary armature windings are composed of conventional copper wire. In this paper a 5MW class synchronous motor with rotating HTS coil is designed. This motor is aimed to be utilized for ship propulsion so it has very low-speed. Firstly an air-cored type has been designed, which does not have any iron core both at the field and at the armature teeth. Secondly several iron-cored rotor types are considered to reduce expensive HTS wire cost.

1. 서 론

고온초전도 모터의 최초의 사용 분야는 수송 분야가 될 것으로 보이며, 특히 해군과 상업용 선박의 전기 추진에서 중요한 크기와 중량이 절감되어 선박 설계에 있어서 유연성을 증가시켜 결정적인 이득을 가져올 것이다. 전기 추진은 경쟁 상대인 기계적 시스템보다 뛰어난 장점들을 가지고 있기 때문에 유람선 시장에 이미 침투하였다. 고온초전도 기반의 선박 추진 시스템은 다른 잇점들뿐만 아니라 증가된 Power 밀도와 운전 효율로 전기 추진 시스템에서 호응은 크게 증가할 것이다. 현재 미국에서는 미 해군의 군함에 장착할 36.5MW 고온초전도 모터가 거의 개발된 상태이고, 머지않아 선박에 장착되어 운전될 것이다. 그림 1에는 전기를 사용하여 추진 및 모든 시스템을 운전하는 전전기 선박(All-Electric Ship)에 사용되는 발전기와 모터들을 이러한 진보된 초전도 기기들을 사용하여 대체하는 개념을 소개한다[1].



<그림 1> 초전도 모터와 발전기를 채용하는 전전기 선박의 개념도

본 논문에서는 군함이나 잠수함 또는 일반적인 선박의 추진용으로 이용이 가능한 용량의 5MW급의 동기 모터를 고온초전도 계자코일을 사용하는 개념으로 설계하고자 한다.

2. 본 론

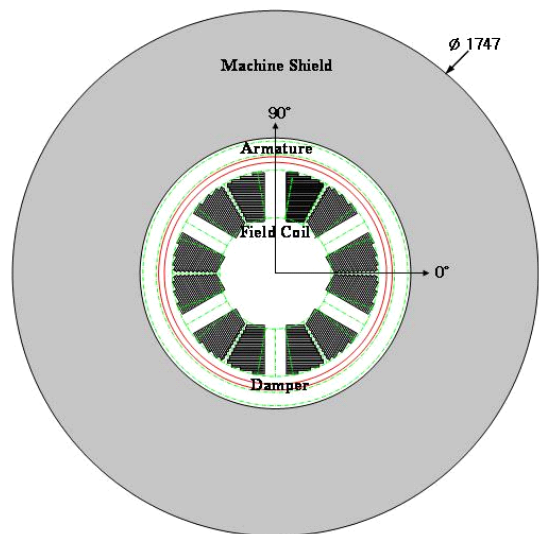
2.1 5MW급 고온초전도 동기 모터의 공심형 설계

회전 계자형 초전도 동기 모터를 5MW의 용량을 갖도록 우선 공심형의 형태로 설계하고, 기기 제조비용의 큰 비중을 차지하는 고가의 고온초전도 선재량을 줄이기 위하여 계자코일 내부에 강자성체인 철을 사용하는 설계안을 도출해 보고자 한다.

본 설계에서는 미국의 American Superconductor사에서 개발된 5MW 기와 동일한 극수와 주파수인 6극, 11.5Hz로 설정하였으며, 설계프로그램을 실행하여 계자코일에 사용되는 고가의 고온초전도 선재량이 가장 적은 것으로 결과를 도출하였다[2][3]. 공심형으로 설계한 고온초전도 모터의 주요 사양과 횡단면 형태를 <표 1>과 <그림 1>에 나타낸다.

<표 1> 5MW급 고온초전도 모터의 공심형 설계 사양

Rating Capacity	5[MW]
Rating Speed	230[rpm]
Pole Number	6
Armature Terminal Voltage	6600[V]
Power Factor	1.0
Frequency	11.5[Hz]
Synchronous Reactance	0.2[p.u.]
Field Coil Rating Current	150[A]
Field Coil Turn Number	6712[turns/pole]
HTS wire length	100[km]
Armature Rating Current	464[A]
Armature Turn Number	120[turns/phase]
Armature Slot Number	72
Straight Axial Length	997[mm]
Machine Shield Outer Diameter	1747[mm]

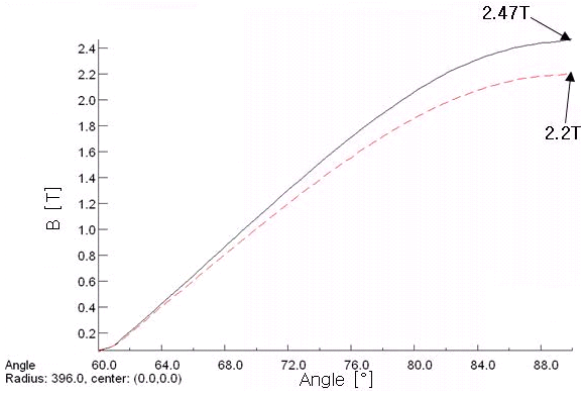


<그림 2> 5MW급 고온초전도 동기 모터의 공심형 설계 횡단면

2.2 철심을 사용한 5MW급 고온초전도 동기 모터의 설계

앞 절에서 공심형으로 도출한 5MW 회전 계자형 초전도 동기 모터의 계자코일에 사용되는 Bi-2223 고온초전도 선재의 필요량은 100km 정도로서, m당 2~3 만원의 현재 가격을 고려해 볼 때 기존의 동일 용량 기기에 비하여 매우 높은 제조비용이 들게 된다. 따라서 기존 모터 대비 경제성을 갖기 위해서는 고가의 고온초전도 선재량을 줄여야 한다. 그 방법으로 계자코일 내부에 투자율이 높은 철을 배치하기로 한다.

<그림 3>은 <그림 2>의 공심형 설계안에서 전기자코일 중심 및 내 반경을 따라 각도 60° ~ 90°에서 발생 토오크와 직접적으로 관련된 Radial 방향의 자속밀도 분포를 보여준다. 2차원 유한요소 해석 방법을 이용하였으며 계자코일의 축방향 직선부 길이(l) 구간에서 발생하는 자속을 <그림 3>의 점선으로 나타나는 반경 방향 자속밀도(B_r)를 식 (1)과 같이 적분하여 극당 최대자속(Φ_{max})을 구한 후 식 (2)를 이용하여 상역기전력 최대치(V_{exc})를 구하였다.

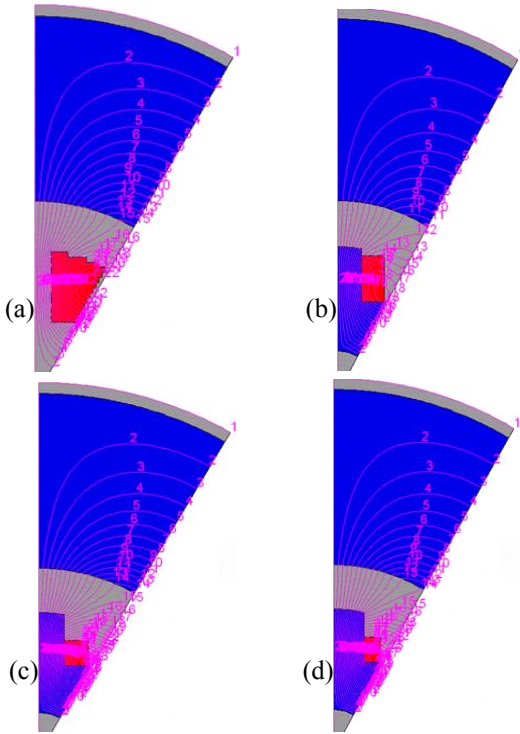


〈그림 3〉 그림 2의 공심형 설계안 전기자 코일 중심 및 내경부를 따르는 Radial 방향 자속밀도 분포

$$\Phi_{\max} = 2l \int_{60^\circ}^{90^\circ} B_r d\theta \quad (1)$$

$$V_{exc} = \omega \Phi_{\max} N_{ph} \quad (2)$$

여기서, ω 는 각주파수, N_{ph} 는 전기자코일 상당 턴 수



〈그림 4〉 철심 사용 효과를 보기 위한 유한요소 해석 모델; (a) Case I, (b) Case II, (c) Case III, (d) Case IV

〈그림 4〉에서는 〈그림 2〉의 공심형 설계안으로부터 철심을 배치하여 고온초전도 코일의 턴 수를 줄인 유한요소 해석 모델들을 보여준다. (a)의 공심형 설계안에서 발생하는 최대 자장은 계자 코일 내측에서 5.45T이며, 고온초전도 선재의 임계전류를 가장 많이 감소시키는 선재면에 수직인 자장도 3.04T로 매우 큰 값을 나타내었다. 또한 전기자 코일 중심부에서 Radial 방향의 최대 자속밀도도 2.20T의 높은 값을 나타내었다. 전기자 코일 중심부에서의 Radial 방향 자속밀도를 식 (1)과 같이 θ 방향에 따라 적분하여 계자코일의 축방향 직선부에 따르는 전기자 코일과 쇄교하는 한 극 분의 자속은 0.5886Wb이며, 이에 따른 전기자 코일 한 상의 역기전력 최대치는 5103V이었다.

(b)에서는 (a)의 공심형 설계안의 계자코일 내부에 기계실드와 같은 B-H곡선을 가지는 철심을 배치하고, 극 당 턴 수를 6712턴에서 2934턴으로 줄인 경우 유한요소 해석 모델을 보여준다. 발생하는 최대 자장은 5.18T이며 계자코일 내부에 배치시킨 철심에서 발생하며 선재면에 수직인 자장도 2.49T로 그림 (a)보다 적은 값을 나타내었다. 전기자 코일

중심부에서 Radial 방향의 최대 자속밀도는 1.72T를 나타내었다. 마찬가지로 전기자 코일 중심부에서의 Radial 방향 자속밀도를 θ 방향에 따라 적분하여 계자코일의 축방향 직선부에 따르는 전기자 코일과 쇄교하는 한 극 분의 자속은 0.4426Wb이며 이에 따른 전기자 코일 한 상의 역기전력 최대치는 3838V이었다. 이는 그림 (a)의 공심형 설계안에서 계산된 역기전력의 75.2%가 되며, 역기전력이 100%가 발생되기 위해서는 기기의 축방향 길이를 0.329m 증가시켜야 한다. 이렇게 감소된 역기전력을 보완하기 위해 축방향 길이가 늘어난다고 하여도 필요한 고온초전도 선재량은 56km로서 공심형 설계 초안의 56%로 줄었다.

그림 (c)에서는 그림 (b)의 극 당 턴 수를 2934턴에서 1630턴으로 줄인 경우에 대한 자장 분포의 2차원 유한요소 해석 모델을 보여준다. 발생하는 최대 자장은 4.42T이며 계자코일 내부에 배치시킨 철심에서 발생하며 (b)의 경우보다 턴 수의 감소로 적은 값을 나타내었다. 계자코일 내부의 철심에서는 높은 자장으로 인하여 포화되어 투자율이 공극부의 2배 정도를 나타내었고, 기계실드 부에서는 자장이 상대적으로 낮기 때문에 B-H 곡선의 비포화 영역에 존재하여 매우 높은 투자율을 보였다. 전기자 코일 중심부에서 Radial 방향의 최대 자속밀도는 1.06T를 나타내었고 전기자 코일과 쇄교하는 한극 분의 자속은 0.2806Wb이며 이에 따른 전기자 코일 한 상의 역기전력 최대치는 2433V이었다. 이는 그림 (a)의 공심형 설계안에서 계산된 역기전력의 47.7%가 되며, 역기전력이 100%가 발생되기 위해서는 기기의 축방향 길이를 1.086m 증가시켜야 한다. 이렇게 감소된 역기전력을 보완하기 위해 축방향 길이가 늘어난다고 하여도 필요한 고온초전도 선재량은 46km로서 공심형 설계 초안의 45%로 줄었다. 이상의 5MW 회전 계자형 고온초전도 모터의 공심형 설계 초안에서 철심을 배치하여 계자의 턴 수를 줄인 경우들에 대한 결과를 <표 2>와 같이 정리한다.

〈표 2〉 5MW 고온초전도 동기 모터의 철심 사용에 따른 결과

	CASE I	CASE II	CASE III	CASE IV
철심 사용	X	0	0	0
극당 턴수	6712	2934	1630	1130
자극폭 [mm]	76	119	119	154
상 역기전력[V] (peak)	5103 (100%)	3838 (75.2%)	2443 (47.9%)	2305 (45.2%)
HTS선재량[km]	101.4	44.8	24.9	17.4
100%역기전력시 직선부 길이[m]	0.997	1.326	2.083	2.207
100%역기전력시 선재량[km]	101.4	56.4 (44.8+11.6)	46.1 (24.9+21.2)	33.8 (17.4+16.4)
계자코일 최대 자속밀도[T]	5.45	5.18	4.42	3.70
고온초전도 선재면에 수직인 자속밀도[T]	3.04	2.49	2.01	1.85
전기자코일 중심부 최대 B_r [T]	2.20	1.72	1.06	0.95
기계실드 최대 자속밀도[T]	1.98	1.55	0.96	0.87

3. 결 론

5MW급 회전 계자형 고온초전도 모터를 공심형 설계 초안에서 철심을 배치하여 계자의 턴 수를 줄인 경우들에 대하여 검토하였다. 철심을 사용하면 CASE IV와 같이 공심형 형태에서 필요한 선재량을 1/3로 줄일 수 있지만, 역기전력의 감소를 보충해주기 위하여 축방향 길이를 증가시켜야 하므로 전기자 코일 도체의 증가로 동손(I^2R 손실)과 동기리액턴스가 증가하는 단점이 있다. 따라서 고가의 고온초전도 선재량을 줄이면서 기기의 효율을 높게 유지시키고 동기리액턴스를 기존 기기보다 낮게 하기 위해서는 CASE II와 같은 설계안을 선정하는 것이 바람직할 것으로 보인다. 그리고 향후 더욱더 정확한 설계를 위해서는 3차원적 해석을 통한 역기전력 산정과 효율 계산 등이 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Swarn S. Kalsi, "Development Status of Superconducting Rotating Machines", IEEE PES Meeting, New York, 27-31 January 2002
- [2] <http://www.amsuper.com/>
- [3] 백승규 외, "1MW 고온초전도 동기모터의 개념 설계 고찰", 한국초전도·저온공학회논문지, 6권 3호, pp.38 - 43, 2004