

선박추진용 HTS모터 기술분석 연구

김 중 구, 김 기 찬, 이 찬 주
 현대중공업(주), 기계전기연구소

Research on the Technical Analysis of HTS Motor for Vessel Propulsion

Jong-koo Kim, Ki-Chan Kim, Chan-joo Lee

Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

Abstract - Recently, as the interests in the electrical propulsion ship increase, it is needed to prepare for the technical demand of the versatile HTS synchronous motor, the noble paradigm of the electrical motor.

In this paper, the electrical propulsion apparatus was classified at first. Then, the merits and demerits of the HTS synchronous motor were investigated. Finally, the feasibility study of development of the HTS motor was performed with electromagnetic FEM analysis.

Additionally, the points to be considered in decision of the capacity or number of the HTS motor and the way to supply electricity were studied in this paper. This work would be very useful in establishing the development direction of the HTS motor

1. 서 론

현재의 일반적인 선박 추진시스템은 선체내부에 위치한 엔진, 터빈 등의 구동 원으로부터 추진축으로 연결된 프로펠러를 회전시켜 추진력을 얻도록 하는 단점이 있어서, 선박의 발전기로부터 선체 외부의 프로펠러와 일체형으로 구성된 모터를 구동하여 추진하는 전기추진 방식이 개발되고 있다. 전기추진시스템은 진동, 소음을 저감시켜 함정의 생존성과 은밀성을 대폭 향상시키고, 추진효율의 향상 및 선체설계의 유연성 제공 등으로 모든 종류의 선박에 제어기술의 발전으로 대용량화가 가능해짐에 따라 활발하게 적용될 것으로 예상된다.

우선 전기추진장치를 분류하고, 발전방향을 따라가면서 전기추진장치의 장,단점을 비교하고, 이런 결과를 선박회전기의 개발방향 수립에 도움이 되도록 하였다.

전기추진장치는 배의 프로펠러축과는 무관하게 원동기 및 발전기의 대수를 결정할 수 있고, 선속에 대응하여 필요한 원동기를 운전하면 경제적 운전이 가능한데 이것은 전기추진방식의 큰 장점이다. 또한 이 장점은 추진 이외로 큰 전력부하를 갖는 배 등에 현저하게 되고, 종종 전기추진방식이 채용되는 결정적인 요인이다. 따라서 추진장치의 기본계획으로 그 배의 운항조건에 대응하는 성능 및 경제성의 평가가 필요하게 된다.

이어서 새로운 패러다임으로 등장한 전기추진용 초전도모터가 효율, 진동, 소음, 및 소형화의 장점이 획기적이다. 때문에 본 연구에서는 장치 함정의 초전도모터추진시스템을 적용하기 위하여 추진장치의 기본계획에 관한 추진용 모터의 용량 및 대수를 결정할 때 고려 되어야 할 점 및 급전방식 과 선박용 추진모터의 기술개발동향을 파악하고, 선박추진용 대용량 HTS모터 개발 가능성을 전자기 해석을 통하여 검토하였다.

2. 본 론

2.1 선박용 전기추진 시스템 변천

선박에 대한 전기추진의 시초는 1839년에 러시아의 소형 교통선에 축전지와 직류전동기로부터 직류식 전기추진이 적용됨으로써 시작되었다. 1899년 프랑스 잠수함 Naval (146톤)이 취항하고 그 이후 잠수함에는 전기추진이 적용되었다.

전기추진 방식은 전기기기의 종류 및 주회로의 전력 변환장치에 따라 DC-DC방식, AC-DC방식, DC-AC방식, AC-AC정속도 방식, AC-AC가변속 방식으로 나눌 수 있다. 1960년대까지 설비비가 높은 전기추진은 조종 성능, 토크특성, 응답성 등이 우수한 성능 및 기능을 필요로 하는 잠수선, 쇄빙선, 견인선, 케이블 준설선 등과 같은 특수한 선박을 대상으로 워드 레오나드 방식이 주로 채용되었다. 1970년도에는 사이리스터 및 다이오드 방식을 이용한 정지형 레오나드 방식의 전기추진이 출현하고, 그 후 PWM인버터, 사이크로 컨버터, 싱크로 컨버터가 개발, 적용되기 시작함으로써 직류전동기를 대신하여 교류전동기로 대체되게 되었고, 나아가 동기모터 방식이 대형 여객선을 중심으로 적용되고 있다.

정보산업사회의 급팽창으로 해상물류수송의 초고속화, 초대형화가 가속될 전망이며, 영구자석 동기기는 초대형화에는 역시 어려운 점이 있으므로 새로운 추진장치인 초전도 추진선이 개발됨이 적용될 것이다. 표 1은 각종 추진전동기의 비교 결과를 표로 나타낸 것이다.

2.2 선박추진시스템의 사양 선정

전기추진 방식의 장점으로 배의 프로펠러와 무관하게 원동기 및 발전기의 대수를 결정할 수 있고, 선속에 대응하여 필요한 원동기를 운전하면 경제적 운전이 가능하다. 한편 항해 중에 일어나는 기기의 주위조건은 육상 조건과는 다르며 특히 전기기기는 주위공기의 조건에 따라 출력, 수명, 및 성능에 영향을 받으므로 충분히 유의해야 한다.

표 1. 각종 추진전동기의 비교

	직류기	유도기	PM동기	HTS모터
효율(%)	85~89	94~95	95~97	96~98
제작가격	medium	low	high	high
견고성	0	@	0	@
신뢰성	^	@	0	@
제어 간편성	@	0	0	0
장치가격	1	3.5	2.5	2.5
유지.보수	^	@	0	0
대형화	^	^	0	@
기 타	정기적 유지 보수필요	공극대,역물 나뭇	영구자석감자 방지필요	대형화유리

*범례 @: 매우 좋음, 0: 좋음, ^: 보통

2.2.1 추진모터와 발전기의 용량

전기추진모터의 용량은 기본적으로는 적용하려고 하는 배에 요구되는 추진성능 으로부터 결정되는 프로펠러 부하를 감당할 수 있는 용량이 되면 좋다. 또한 발전기의 용량은 프로펠러를 구동하는 추진모터의 출력에 대하여 모터 및 급전회로의 효율을 고려하여 결정되면 좋는데 발전기가 추진모터 이외에 선내의 다른 부하의 전원으로써도 겸용으로 사용되는 경우에는 선내 부하의 용량도 고려하여 발전기의 용량을 결정할 필요가 있다.

대수에 대해서는 1대의 프로펠러에 대해서 각각 1대 이상의 모터와 발전기를 갖는 것이 일반적이라고 생각되는데 프로펠러의 대수 및 모터와 발전기 대수와의 사이에는 어떠한 제한도 없는 장점을 갖고 있다.

일반적으로 일반 상선의 감기운전, 쇄빙선의 평수운행, 조사선의 미속운행 등의 경우는 모터 및 발전기의 전 출력을 필요로 하지 않기 때문에 복수대로 분할 장치하면 소요 출력에 맞는 대수의 모터 및 발전기를 운전하고 다른 모터와 발전기는 정지하든가 또는 발전기를 선박내의 다른 대출력 부하용으로 전용하는 것이 가능하다. 이것에 의해 시스템의 전체 효율이 높아지고, 연료소비 등의 점에서 경제성의 향상과 함께 신뢰성의 향상에도 관계된다.

2.2.2 추진장치의 특성과 감기 운전

(1) 프로펠러의 특성

프로펠러는 거의 2승 토크 특성의 부하인데, 선체 저항의 변화에 의해 그림 1과 같다.

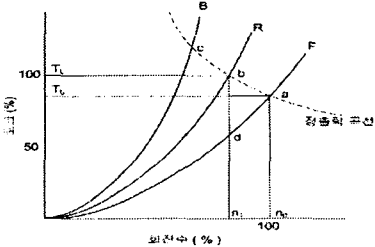


그림 1. 프로펠러 토크 특성

객선 및 화물선 등과 같이 선체 이외에 부가저항이 없는 것은 가속시를 제외하고는 자유 항주곡선 F를 참고하면 좋다. 그런데 방해항해를 하는 배 등은 저항이 증대하고 곡선R과 같이 된다. 곡선 B는 Bollard 특성으로 선박속도 제로의 상태이다. 터그보트 및 쇄빙선은 종종 R-B의 특성으로 운전된다.

또한 프로펠러는 이와 같은 정상상태 이외의 파랑, 동요, 재화에 의한 홀수의 변화, 조타, 가감속 등에 의한 동적 외란이 부수하는 것은 말할 것도 없다.

(2) 감기 운전의 방법

감기운전이라는 것은 경제속력 또는 감속 항행시에 복수의 추진기계의 일부운전을 정지 또는 다른 용도로 전용하는 것이다.

따라서 여기에는 발전기와 그의 원동기만을 줄이고 전동기는 그대로 부분 부하로 운전하는 발전기 감기방식과 발전기 및 모터의 조합수를 감소하고 정지 모터는 유전상태로 하는 방식이 있다. 또한 대수를 1/2로 줄이는 것을 반기 운전이라고도 한다.

(3) 급전 방식

전기추진장치에는 각종방식이 있고, 각각의 배의 사용목적 기능에 적합하도록 선정된다. 그러한 급전회로 및 보호방식은 각각의 시스템의 특성에 따라 적합하도록 결정되기 때문에 그 내용은 다양하다.

그러나 급전방식 면으로만 대별하면 공통의 발전기와 공통의 모선에 의해 급전되는 방식과 전용의 발전기와 모터의 조합에 의한 방식이 있다.

2.3 전기추진 시스템

최근 미 해군을 중심으로 전기추진체계에 대한 관심과 연구노력으로 그림2와 같은 IPS(통합전기추진체계)의 실용화를 앞두고 있다. IPS의 개념은 동일한 발전기와 전력변환 시스템으로 추진용 전력과 전투시스템 및 보조 장치와 선박의 부대시설들에 전원을 공급할 수 있다. 이는 기존의 기계추진 시스템사용시보다 15~19%의 에너지를 절약할 수 있는 것으로 예상하고 있다.

합성 추진체계의 IPS의 적용에 다른 장점으로는 "구획 전력분배 시스템"을 갖춤으로써 유사시에 필수적인 전력공급처에 전력의 단절 없이 전력공급이 이루어질 수 있어 전투능력과 생존성이 향상되는 점이다.

미 해군은 합선의 운용요구조건을 만족하면서 비용을 절감할 목적으로, 전자기기 등 함내 수요와 전기추진 시스템에 통합적으로 전력을 공급하는 통합전력시스템(IPS: Integrated Power System)이라는 새로운 개념을 새워서, DD(X)에도 적용하려고 계획하고 있다.

차기 수상전투함의 추진방식으로서, 통합 전력시스템의 실현의 징후가 보이기 시작했다. 즉, 방향면환이 가능한 Pod를 함미에 장치하는 형태이다. Pod내에 소형 대 출력의 모터가 필요하다. 이를 위해서는 높은 전류밀도와 자기밀도가 필요로 하므로, 이제는 초전도 기술이 등장할 차례이다. 초전도모터는 여러 면에서 전기추진장치의 장점들을 향상시킬 것이다.

2.4 선박용 모터 개발동향

2.4.1 대형 영구자석 동기모터

대형 영구자석 모터는 다른 모터보다도 높은 효율을 달성할 수 있다. 그렇지만 영구자석 재료가 비싸기 때문에 사용에 제한이 있다. 또한 영구자석은 어떤 온도 이상 되면 영구적으로 감자되는 특성을 갖고 있다. 따라서 NdFeB 자석을 사용한 모터의 온도는 반드시 150℃ 이하로 유지하여야 한다. 모터의 주요 치수(고정자 내경, 코어 유효 길이)는 정격출력, 속도, 공극 자속밀도 그리고 전기자 선 전류밀도에 의해 결정된다. 공극에서의 자속밀도는 영구자석의 잔류자속밀도와 코어의 포화자속밀도에 의해서 제한된다. 선 전류는 냉각이 좋을수록 증가시킬 수 있다. 고정자 내경이 주어졌을 때 모터의 무게는 보다 많은 극수를 사용함으로써 줄일 수 있다. 같은 고정자 내경에 대해서 영구자석 모터의 무게를 극수의 함수로 표현하면 그림 3과 같다.

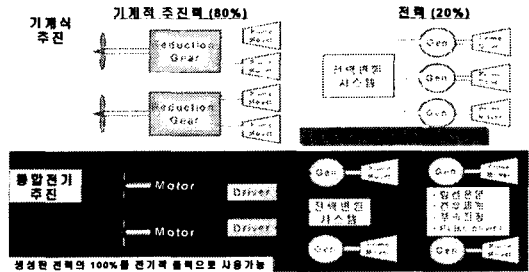


그림2. 전기추진함의 추진체계도

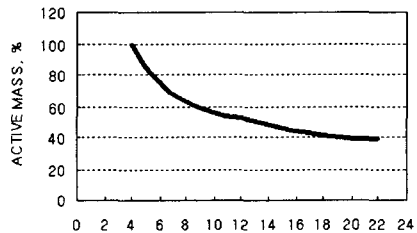


그림3. 영구자석 모터 무게와 극수와의 관계

선박추진을 위한 1MW이상의 용량을 갖는 히트류 영구자석 모터의 최초 프로토타입 1980년 대 초반에 독일 지멘스에 의해 제작되었으며, 그 후 ABB에 의해 설계된 선박 또는 잠수함 추진용 1.5MW 영구자석 동기모터(MEP 모터)가 개발되었다.

2.4.2 선박추진용 HTS모터

고온초전도 모터는 그림4의 AMSC사에서 2003년 3월25일 무부하시험을 성공적으로 수행한 5MW HTS 동기모터를 보여주고 있는바와 같이, 기존의 동기모터의 계자권선을 고온초전도체를 이용하여 제작함으로써 효율상승 및 소형·경량화를 도모하고 있다.

Rockwell Automation과 EPRI는 1987년 모터에 HTS를 적용한 경우의 평가연구를 하고, 1994년에 SPI 프로젝트에 참가하여 1단계로서 4극, 1800rpm, 125hp(94kW) 동기모터를 개발하였다. 계속하여 2단계에서는 1,000hp(750kW) 및 5000hp(3750kW)의 준상용기 prototype 개발을 진행하였다. 이 연구에서는 가변속장치(ASD)와 조합하여 통상의 유도기에 대해 2% 높은 98%의 효율을 얻었다.

1999년 4월에는 4개의 더블팬케이크 코일을 완성하고 공장실험이 실시되었다. 냉동기부하에 의한 효율의 저하는 77K에서 운전하는 경우 0.1%, 30K에서는 0.3%로 예상되고 있고, 발전기와 같은 대용량기에 비하면 임팩트는 크지만 HTS의 특성으로부터 30K에서 운전한다고 하여도 효율의 이점은 충분하다. 2001년 7월에는 AMSC에 의해 5,000hp HTS 모터를 제작하였으며, 기존의 유도형 일반모터에 비하여 무게와 부피가 1/2로 줄었고, 효율에서 2%의 상승이 있는 것으로 알려졌다.

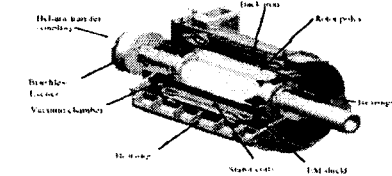


Figure 4. 5MW motor assembly. It has been developed to demonstrate components for the full-size 25 MW motor

그림4. 5MW 고온초전도 동기모터

2.5 선박용 초전도모터 대용량화 가능성 검토

2.5.1 다극화를 위한 초전도 계자권선 전자장 해석

고온초전도 전력기기 설계 시 가능한 고온초전도 표면에 접하는 수직자장을 어떻게 줄여주는가가 기기의 효율적 설계를 판가름하는 요소가 될 뿐만 아니라 대용량기기 개발가능성을 판단하는 척도가 되고 있다.

전기적으로 손실이 없는 고온초전도물질의 발전은 이러한 측면에서 회전기기의 효율을 극대화시킬 수 있으며 일반적인 회전기에 비해 절반 정도의 크기와 무게를 가질 수 있다. 이로 인해 선박 내부에 설치하기가 더 쉬워지고 모듈화 된 선박 건설이 용이해지며 선박 설계가 용이하게 된다.

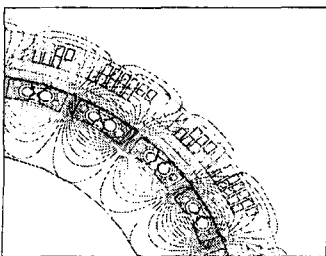


그림5. 다극 계자권선 모델링과 전자장 해석

대용량 급 고온초전도 모터와 발전기에서 고려해야 될 것은 다극화로 인한 코일의 배치와 자속의 수직성분 및 공극의 거리 등과 고온초전도 선재를 냉각시키는 냉각 시스템이 가능한 작고 가격이 저렴해야한다. 이는 극간격이 줄어들게 되고, 상대적으로 공극이 커지게 되어 출력밀도가 떨어지는 현상이 발생된다.

따라서 출력증대를 위해서 계자의 설계뿐만 아니라 damper중에 해당되는 기계적 gap을 줄이는 것이 큰 관건이다. 그림5는 선박추진용 저속 다극 계자권선 모델링과 전자장 해석한 결과이다.

2.5.2 일반 동기모터와 HTS동기모터의 비교

일반 동기모터 3.5MW, 6.6kV와 같은 size에서, 초전도 동기모터를 설계하여 출력을 어느정도 증대시킬 수 있을 것 인지를 전자장 해석을 통하여 검증하였다. 또 Torque Angle Curve에서 운전범위 최저 8.4MW에서 최고22MW까지 저속에서 고온초전도 동기모터와 기존의 동기모터의 크기를 비교설계 하여 고효율의 가능성을 얻었다. 그림6은 Angle에 따른 운전영역을 나타낼 수 있는 HTS모터 Torque Angle Curve이다.

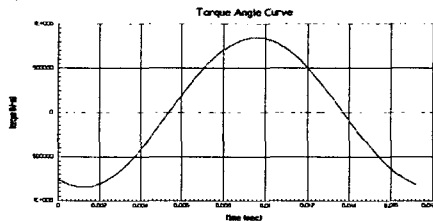


그림6. HTS모터 Torque Angle Curve

설계 시 코일의 Total turn 수는 3978 turn이며 18층이다, 계자전류는 125A이고 전류밀도는 100A/mm²이다. 그림6에서 최대 토오크는 848,923 Nm로서 최대출력은 26.7MW까지 낼 수 있다.

고온초전도 모터는 대용량화 될수록 무게가 가볍고 크기가 작아 특정한 크기에 대한 요구에 최적화할 수 있다. 또한 고온초전도 추진 시스템은 특히 대부분 시간 동안 부분적인 부하 상태에서 운전하는 여행 선박, 해안 상업 선박, 전투선박에서 낮은 속도로 운전할 경우에도 효율이 높다는 부가적인 장점이 있다.

3. 결 론

선박용 추진시스템의 기본계획 수립에 필요한 항목을 검토하고, 일반 동기모터 3.5MW, 6.6kV와 같은 Size(직경 3270φ, 길이 4570m/m)에서, 고온초전도 모터를 최대운전출력 22MW, 320rpm 까지 설계하여 대용량 HTS모터 고효율의 가능성을 전자장해석을 통해 국내에서는 처음으로 확인하였다.

향후 현재의 연구 프로그램으로 고온초전도모터의 상업적 이용가능성이 입증되면, 상전도 모터가 갖고 있는 효율향상의 한계와 대용량화에 따른 부피 및 중량의 증대, 설치장소의 어려움을 해소하기 위해서는 고온초전도 모터 채택이 될 수밖에 없는 이유로 새로운 기기의 잠재적인 시장이 형성될 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] David Driscoll, Burt Zhang, Viatcheslave Dombrovski, "Construction and testing of a 1,000HP High Temperature Superconducting Motor", IEEE, Paper No. PCIC 2002-28
- [2] S. Kalsi and S. Karon, "Compact Light Weight Ship Propulsion Motor" Presented at the Ship Propulsion System Conference London, UK 21 22 October 2002.
- [3] 해군조함단 연구보고서, 2001.12 "합정설계기술 기반구축 연구"