

전기추진선박의 운전조건별 전력특성 및 추진전동기 특성 비교 해석

Characteristic Analysis of Integrated Power System and Propulsion Motor Comparison for Electric Vessels According to the Driving Condition

이 상 곤*, 정 유 석**, 정 상 용***, 이 철 균***

Sanggon Lee*, Yu-seok Jeong**, Sang-Yong Jung***, Cheol-Gyun Lee***

Abstract

This paper deals with the characteristic analysis of the integrated power system applied for the electric propulsion ships. This includes the electric power system modeling which is accomplished with the electric power network mainly composed of generators, switchboards, variable frequency devices, electric motors, and etc. In addition, performance comparison between the permanent magnet synchronous motor (PMSM) and the induction motor (IM) for 3.7MW ship propulsion has been done. In order to investigate the main performance of propulsion motor, a coupled model taking into account torque density, copper loss, iron loss, efficiency, power factor, and torque ripple using finite element analysis (FEA) has been employed.

요 약

본 논문에서는 발전기, 스위치보드, VFD, 추진전동기 등으로 구성된 전기추진선박의 전력 네트워크를 모델링하고, 전력조류해석과 단락전류해석을 통하여 계절별 선박 운용에 따른 전력시스템 특성 해석 및 단락사고 발생 시 차단기의 용량을 선정한다. 이와 더불어 3.7MW급 유도전동기 및 영구자석형 동기전동기의 정성적, 정량적 비교 해석을 통해 전기선박 추진전동기로 적합성에 대해 추가 고찰한다.

Key words : Electric Propulsion Ship, Load Flow Analysis, Short Circuit Analysis, Induction Motor, Permanent Magnet Synchronous Motor

* 동아대학교 전기공학과

(Dept. of Electrics Engineering, Donga Univ.)

** 명지대학교 전기공학과

(Dept. of Electrics Engineering, Myongji Univ.)

*** 동의대학교 전기공학과

(Dept. of Electrics Engineering, Dongeui Univ.)

★ 교신저자 (동아대학교 교수)

※ 감사의 글 (Acknowledgment)

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업 및 2009학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 수행된 연구결과임(2009AA161).

接受日:2011年 3月 4日, 修正完了日: 2011年 3月 28日

1. 서론

선박의 전기추진시스템은 2차 세계대전 중 미해군 함정에 폭넓게 적용되었으나 전후 고효율의 디젤엔진 개발 및 기계적인 드라이브 기술 향상으로 인해 80년대까지 별다른 이목을 끌지 못하였다. 하지만 이후 전력소자 및 제어기술의 발달로 현재의 전기추진시스템은 급속한 발전을 이루었고, 현재 크루즈선, 드릴쉽, 군함 등 다양한 종류의 선박에 적용되고 있다.

이러한 전기추진시스템은 디젤엔진-기계시스템과 비교하여 높은 에너지 효율 및 저소음, 저진동, 가제

어성 등의 많은 장점을 지니고 있다. 특히, 원동기의 Redundancy는 시스템의 전반적인 신뢰성 및 승무원의 생존 가능성을 향상시키고, 장비 배치에 있어 유동적인 설계가 가능하다[1].

전기추진선박은 감속기여가 없는 대신 발전기, 컨버터, 추진전동기의 전력 네트워크로 구성되어 있다. 발전기는 추진 및 부하에서 요구하는 전력을 적절히 공급하기 위해 디젤엔진 또는 가스터빈과 연결된 2~6 대의 주 발전기와 보조 발전기로 이루어져 있으며, 단락사고 등의 긴급상황 발생 시에도 충분한 Redundancy 확보가 가능하다. 컨버터는 추진전동기의 속도를 제어하며, 추진전동기는 프로펠러에 추진력을 발생시킨다. 감속기여를 대신하여 효율적인 엔진 속력과 프로펠러 속력을 맞추기 위해 추진전동기가 발전기 속도비에 따라 운전하는 전기식 추진기를 사용한다[2].

이러한 시스템의 전력구조는 전기적 부품간의 상호연계성이 고려되어 설계되었으므로 다양한 동작 상태에서의 전력흐름을 해석하여 각 BUS의 전압 및 전력조류가 허용범위 내인지를 검토하여 시스템의 안정도를 판단하는 것이 매우 중요하다.

따라서 본 논문에서는 전력조류계산, 고장전류계산, 신뢰도 해석 및 보호협조 해석 등 안정적인 전력시스템 설계 및 해석이 가능한 ETAP(Electric Transient Analyzer Program)을 이용하여 5개의 발전기와 2개의 추진전동기로 구성된 전기추진선박 시스템의 전력조류해석(Load Flow Analysis) 수행하여 계절별 전력특성을 분석하고, 단락회로해석(Short Circuit Analysis)을 통해 단락사고 발생 시 시스템 보호를 위한 차단기 용량을 선정한다. 그리고 유한요소해석(Finite Element Analysis)을 통해 선박 추진용 3.7MW급 영구자석 동기전동기(PMSM)와 유도전동기(IM)의 비교 해석을 수행한다. 형상, 토크밀도, 철손 및 동손, 효율, 토크리플 등 시뮬레이션 결과를 바탕으로 어떠한 전동기가 전기선박 추진에 적절한지 제시한다.

II. 시스템 모델링 및 주요 제원

전기선박의 전력시스템은 선박 운용조건에 따른 전력부하 용량을 분석하여 최대부하 운용 시 부하용량 이상으로 산정되어야 한다.

또한, 선박 수명(30년) 동안 충분한 발전용량을 확보하기 위하여 미래 부하 증가분(Load Growth Margin)을 포함한 설계 여유 용량과 건조 여유 용량을 고려해야 한다[3].

선박의 발전기 용량은 전력부하 분석과 부하 여유율(Load Margin)을 적용한 계절별/선박 운용별 부하 분석, 전 속도 구간에 대한 부하 분석 등을 검토함으로써 적절한 제한 기준을 만족시키도록 결정되어야

한다. 이러한 내용을 바탕으로 전기추진시스템의 간단한 등가모델을 그림 1에 나타내었다.

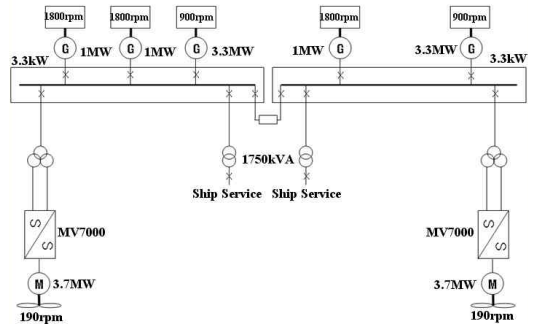


Fig. 1. Configuration of Electric Propulsion System

그림 1. 전기추진시스템의 기본 구성

전기추진선박의 전력부 사양을 표 1에 요약하였다. 선박의 전반적인 구성은 3.3MW급 주 발전기 2대와 1MW급 보조 발전기 3대, 그리고 Redundancy를 포함하고 있는 3.7MW급 추진전동기 2대로 이루어져 있다.

Table 1. Specification of Power System

표 1. 전기추진시스템의 전력부 제원

주 발전기	Capacity: 3.3MW Speed: 900rpm PF: 0.8 Output Power: 3300V, 60Hz, 3Ph
보조 발전기	Capacity: 1MW Speed: 1800rpm PF: 0.8 Output Power: 3300V, 60Hz, 3Ph
추진 전동기	Capacity: 3.7MW Speed: 190rpm

III. 전기추진선박의 전력특성 해석

1. 전력조류해석(Load Flow Analysis)

전력조류해석은 선박의 다양한 동작 상태에서 전력시스템의 정상상태 성능 해석 및 시스템의 전력특성을 분석하는데 사용된다. 이를 통해 각 선로에 흐르는 전력조류 및 단계통과 연결하는 변압기에서의 전력조류, 각 BUS에서의 전압 크기와 위상각 산출이 가능하다.

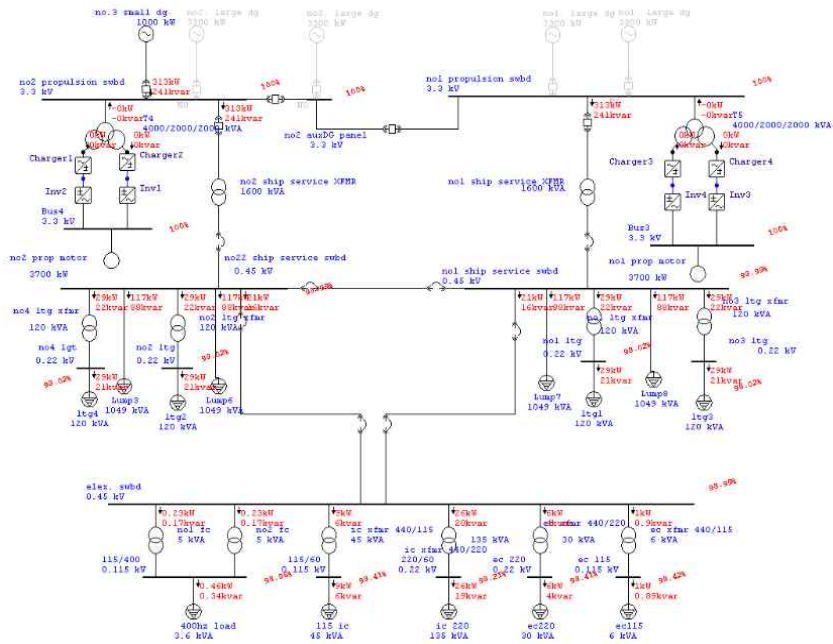


Fig. 2. Power Flow Result at Anchor(Spring/Autumn)
 그림 2. 선박 정박 시 전력 흐름(봄/가을)

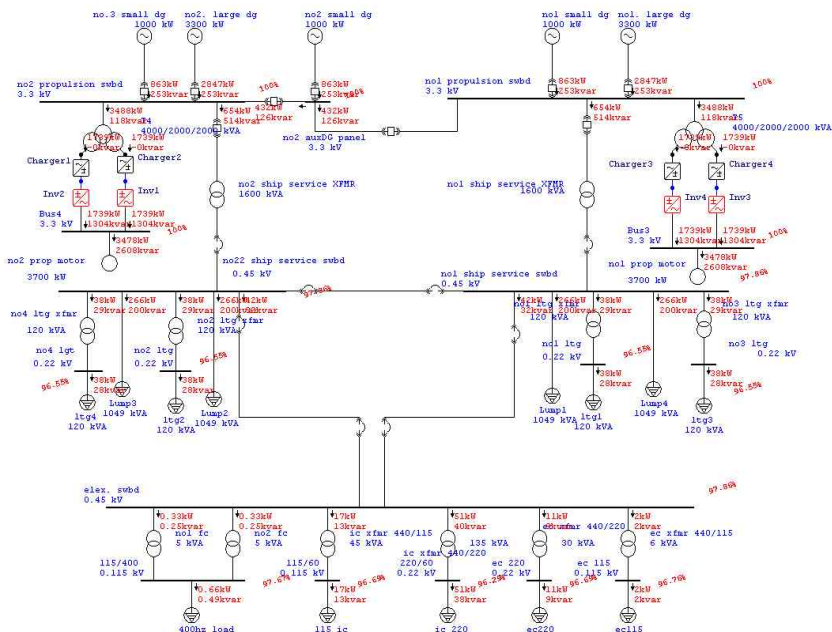


Fig. 3. Power Flow Result at Maximum Speed Cruising(Summer/Winter)
 그림 3. 선박 최대 속도 운항 시 전력 흐름(여름/겨울)

전력조류해석을 위한 수치계산 기법으로는 Newton-Rapson Method, Fast-Decoupled Method, Accelerated Gauss-Seidel Method 등이 사용되지만, 본 논문에서는 수렴속도가 빠르고 안정적인 Newton-Rapson Method를 적용하였다[4].

이 방법을 기반으로 발전기 출력량과 총부하량을 비교하여 발전기의 과부하 여부를 관찰하고, BUS 전압의 변동이 전압제한조건(IEEE Std. 141-1993, 5% 미만)에 적합한지 검토한다. 이와 같은 검토사항은 시스템 모델링의 적절성 여부를 평가하는데 사용된다. 본 논문에서는 봄/가을에 항구에 정박하고 있는 선박과 여름/겨울에 최대속도로 운항 중인 선박, 2가지 경우로 나누어 검토하였다. 먼저, 봄/가을에 정박하고 있는 모드일 경우, 그림 2와 같이 보조 발전기 단 한 대만 시스템에 전력공급을 위해 운전된다.

Table 2. Load Flow Analysis Result at Anchor
표 2. 선박 정박 시 전력조류해석

Comparison of the generator output and the total load	Correspond
Overload situation of the generator	Normal state (31.3% used)
Overload situation of the transformer	Normal state (Maximum capacity range within)
Stability about the change BUS voltage	Stability (95~105% within)
Flow direction of the electricity flow	Normal state

조류해석을 수행한 결과, 봄/가을의 선박 운용조건에 따른 발전기 출력은 최대 용량의 약 31.3% 정도 사용되고 있으며 부하에서 사용되는 유효전력의 총합은 발전기에서 공급되는 유효전력과 동일하다. 또한, BUS 전압의 변동율도 0.1% 미만으로 전압제한조건(IEEE Std. 141-1993)을 만족하며 안정적이다. 전력조류 역시, 정상적으로 발전기에서 부하 쪽으로 흐르고 있다. 따라서 표 2의 결과 같이 시스템이 적절하게 모델링 되었으며, 안정하다고 할 수 있다.

마찬가지로 여름/겨울에 최대속도로 운항 중인 선박의 전력조류해석을 수행한 결과, 그림 3과 같이 5대의 발전기 모두가 2대의 추진전동기, 그리고 각각의 서비스 부하에 전력공급을 위해 운전된다.

Table 3. Load Flow Analysis Result at Maximum Speed Cruising

표 3. 선박 최대 속도 운항 시 전력조류 해석

Comparison of the generator output and the total load	Correspond
Overload situation of the generator	Normal state (87.3% used)
Overload situation of the transformer	Normal state (Maximum capacity range within)
Stability about the change BUS voltage	Stability (95~105% within)
Flow direction of the electricity flow	Normal state

조류해석을 수행한 결과, 여름/겨울의 선박 운용조건에 따른 발전기 출력은 최대 용량의 약 87.3% 정도 사용되고 있으며 부하에서 사용되는 유효전력의 총합은 발전기에서 공급되는 유효전력과 동일하다. 또한, BUS 전압의 변동율도 0.1% 미만으로 전압제한조건(IEEE Std. 141-1993)을 만족하며 안정적이다. 전력조류 역시, 정상적으로 발전기에서 부하 쪽으로 흐르고 있다. 따라서 표 3의 결과 같이 시스템이 적절하게 모델링 되었으며, 안정하다고 할 수 있다.

2. 단락회로해석(Short Circuit Analysis)

단락회로해석은 단락회로 사고 시, 시스템의 전압과 전류의 순간적인 변동을 분석하기 위하여 수행하는 것으로, 일반적으로 전력시스템에서 발생하는 사고전류로는 Momentary Fault Current, Interrupting Fault Current, 그리고 Steady State Fault Current 등이 있다[5].

본 논문에서는 발전기 측의 BUS가 3상 단락되었을 때 각 BUS와 차단기에 흐르는 단락전류와 BUS 전압을 측정하여 차단기의 용량을 선정한다. 한편, 차단기의 용량을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$\text{Rated Interrupting} = \text{Current of Short Circuit} \quad (1)$$

$$\text{Closing and Latching RMS} = 1.6 \times \text{Rated Int.} \quad (2)$$

$$\text{Closing and Latching Crest} = 2.7 \times \text{Rated Int.} \quad (3)$$

그림 4는 최대속도 운항 모드 시 발전기에 연결된 BUS가 3상 단락되어 단락전류의 흐름을 관찰한 것으로 이때의 전기추진시스템은 모든 보호장비가 Close

회전 부분을 단순화해야 한다. 이에 따라 유도전동기는 회전자에 절연 권선, 여자기, 영구자석 등의 장치가 없으므로 유리한 점이 있다. 게다가 어떠한 조건 하에서도 안정적인 운전이 가능하며, 슬롯 스크류를 적용하여 소음 및 진동을 줄일 수 있는 장점이 있으므로 유도전동기는 현재까지 선박 추진에 있어 가장 널리 사용되고 있다.

반면, 영구자석형 동기전동기 또한 고효율 및 높은 출력밀도 등의 특징으로 인해 최근 들어 추진전동기로 폭넓게 사용되고 있다. 권선형 동기전동기 및 유도전동기와 같은 전통의 전동기와 비교하여, 회전자 손실이 줄어들어 출력밀도 및 효율이 증대되었다. 하지만 고온에서 동작 시 감자의 위험이 존재하고, 영구자석 가격이 낮아졌음에도 불구하고 여전히 영구자석형 전동기는 유도전동기보다 비싸다는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 유도전동기와 영구자석형 동기전동기를 크기, 출력밀도, 효율 등의 측면에서 비교, 분석하여 전기선박의 추진전동기로써의 적합한 구조의 전동기를 선정하고자 한다.

V. 추진전동기의 정량적 특성 해석

전기추진선박에 설치되는 추진전동기의 용량을 만족하는 농형 유도전동기와 영구자석형 동기전동기를 대상으로 하여 그 특성을 정량적으로 비교검토 하였다.

Table 5. Specification of 3.7MW Ship Propulsion Motor
표 5. 3.7MW급 선박 추진전동기 모델 사양

	추진전동기
출력	3.7MW
전압	690Vrms
전류	3660Arms
극/상/슬롯	16/3/144 (q=3)
냉각방식	Passive cooling
턴 수	2(per layer)/8-
재료	S. S08(PN08, POSCO)

비교검토는 추진전동기의 주요한 특성을 나타내는 7개 항목(사이즈, 토크밀도, 손실, 효율, 역률, 토크리플)에 대하여 수행하였으며, 각 모터별 비교검토 항목에 해당하는 정량적 값과 더불어 상호 차이도 기준치

에 대한 비교값으로 나타내었다. 3.7MW를 만족할 수 있는 전동기를 설계하여 수치해석기법인 유한요소해석(FEM)을 통하여 특성치를 도출하였다. 표 5에 비교대상으로 삼은 유도전동기와 영구자석형 동기전동기의 검토 모델 사양을 제시하였다.

1. 동일 토크 대비 사이즈 검토

입력조건이 동일할 때 일반적으로 영구자석형 동기전동기가 유도전동기에 비해 상대적으로 높은 토크밀도를 나타낸다고 알려져 있다. 본 논문에서도 동일한 외경에서 영구자석형 동기전동기의 적층길이가 유도전동기에 비해 38.3% 작게 나타났다. 검토 모델의 형상 및 구조는 그림 5와 같다.

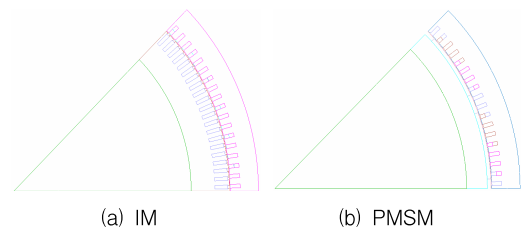


Fig. 5. Shape and size of propulsion motor
그림 5. 추진전동기의 형상 및 사이즈

2. 토크밀도 및 자속분포 검토

토크밀도는 단위체적당 발생하는 토크량으로서, 상기 결과에 따라 사이즈가 작은 영구자석형 동기전동기가 농형 유도전동기에 비해 높게 나타날 것으로 예상되며, 그림 6과 같이 약 161% 정도의 차이를 보인다.

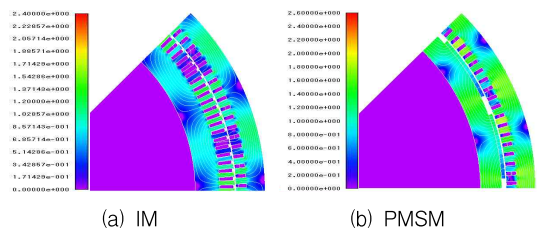


Fig. 6. Torque density and flux distribution of propulsion motor
그림 6. 추진전동기의 토크밀도 및 자속분포

3. 손실 및 효율 검토

가. 동손

그림 7은 동손 분포를 도시하고 있으며, 농형 유도전동기의 경우 회전자 도체바와 엔드링에서 발생하는 와전류로 인한 동손이 현저하게 나타남을 알 수 있

다. 이에 따라, 영구자석형 동기전동기는 농형 유도전동기에 비해 동손이 32% 정도에 불과하다.

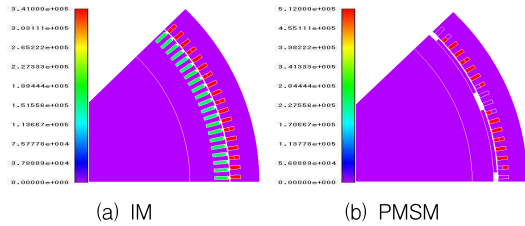


Fig. 7. Copper loss distribution of propulsion motor
 그림 7. 추진전동기의 동손 분포

나. 철손

그림 8은 철손 분포로서, 주로 고정자 철심부(요크 및 치)에 집중적으로 나타나고 있다. 회전자는 동기속도로 회전자계와 동기화되어 실제 자속량이 시변하지 않게 되어 철손이 거의 발생하지 않는다. 영구자석형 동기전동기가 유도전동기에 비해 14% 정도 철손이 크게 나타나고 있다.

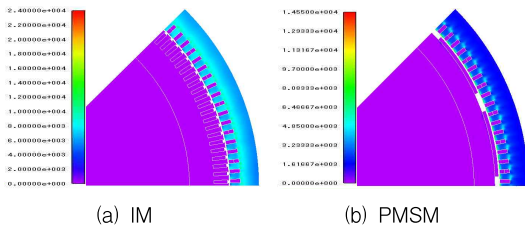


Fig. 8. Iron loss distribution of propulsion motor
 그림 8. 추진전동기의 철손 분포

다. 효율

앞서 도출한 동손과 철손을 바탕으로 효율을 검토한 결과 표 6과 같으며, 영구자석형 동기전동기가 유도전동기에 비해 고효율임을 알 수 있다.

Table 6. Result Of The Efficiency Review
 표 6. 두 모델의 효율 검토 결과

	동손(kW)	철손(kW)	효율(%)
IM	105.9	11.2	96.9
PMSM	33.5	12.7	98.8

4. 역률 검토

전압-전류 위상차를 바탕으로 농형 유도전동기와 영구자석형 동기전동기의 역률 특성은 표 7과 같으며, 유도전동기의 역률이 높게 나타난다. 이는 영구자

석형 동기전동기에서 영구자석의 표면부착에 따라 공극 유효자속 누설이 크게 나타남을 의미한다.

Table 7. Result of The Power Factor Review
 표 7. 두 모델의 역률 검토 결과

	슬립주파수 (Hz)	입력전류 (A)	역률 (%)
IM	0.253	3660	93
PMSM	-	3660	90

5. 토크리플 검토

토크리플은 평균 토크로부터의 맥동치(Peak to Peak)를 의미하며, 그림 9에 해당하는 값을 나타내었다. 영구자석형 동기전동기의 토크리플 값은 17,991[kNm], 농형 유도전동기의 토크리플 값은 29,944[kNm]로 영구자석형 동기전동기가 코깅토크 성분을 포함하고 있음을 고려하더라도 유도전동기의 약 60% 수준에 불과 하는 매우 낮은 값이다. 이는 농형 유도전동기의 경우, 슬롯과 치 개구부 형상이 구조적으로 많은 고조파를 발생시키고 있기 때문이다.

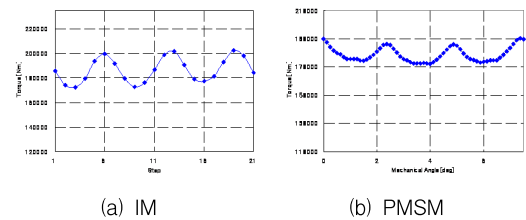


Fig. 9. Torque ripple waveform of propulsion motor
 그림 9. 추진전동기 토크리플 파형

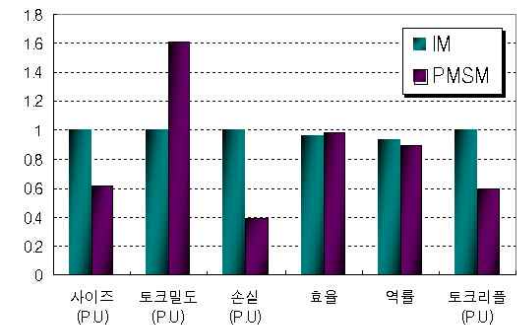


Fig. 10. Quantitative comparison result of two propulsion motors
 그림 10. IM과 PMSM간의 정량적 검토 결과(정규화) 앞서 검토한 7개의 항목에 대하여 정량적인 비교

검토 결과를 그림 10에 나타내었다. 대부분의 성능에서 영구자석형 동기전동기가 농형 유도전동기보다 우수함을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 전기추진선박의 시스템 모델링 및 전력특성 해석을 통하여 시스템의 안정성 여부를 검토하였다. 실제한 전력 네트워크의 정상상태 및 3상 단락사고 발생 하에서의 전력조류해석을 통해 그 유효성을 검토하였다. 특히, 계절별 선박운용에 따른 전력시스템 특성 해석 및 단락사고 발생 시 선박이 안전하게 귀항 가능하도록 차단기의 용량을 선정하여 하였다.

아울러, 선박 추진용으로 사용되는 두 전동기 간의 비교 검토를 통해 영구자석형 동기전동기가 유도전동기에 비해 전반적으로 더 우수한 성능을 나타냄을 볼 수 있었다. 하지만 이는 단지 전기추진선박용 전동기의 임의적인 설계 결과로 설계 변수에 따라 얼마든지 결과값은 바뀔 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] ABB Company Ltd, "Maritime Electrical Installations and Diesel Electric Propulsion," 04. 12, 2003.
- [2] D. H. Clayton, S. D. Sudhoff, and G. F. Grater, "Electric Ship Drive and Power System", Conference Record of the 2004 24th International Power Modulation Symposium, pp.85-88, 2000.
- [3] P. Lettelier, "Electric Propulsion Motors," Electric Propulsion; The Effective Solution, IMarest Conference Proceedings, 5-6 October 1995. pp. 7.1-7.8
- [4] 전원, 왕용필, 정중화, 류승각, 정상용, "선박용 전기추진시스템의 단락상정사태의 전력특성 분석," 한국마린엔지니어링학회지, 제32권, 제2호, pp. 323-329, 2008.
- [5] A. J. Mitcham, J. J. A. Cullen, "Motors and Drives for Surface Ship Propulsion: Comparison of Technologies," Electric Propulsion; The Effective Solution, IMarE Conference Proceedings, 5-6 October 1995. pp. 4.1-4.9
- [6] E. Schroeder, M. Pichot, A. Ouroua, M. Flynn, and J. Beno, "Development of electric propulsion motors with integrated power electronics", presented at the Electric Machine Technology Symposium, Bristol, UK, 2004.

저자소개

이 상 곤 (학생회원)



2009년 : 동아대학교 전기공학과 졸업 (공학사)
2011년 : 동아대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사)
2011년 2월~현재 : 한국철도기술연구원
<주관심분야> Power시스템, 전기기기 수치해석

정 유 석 (정회원)



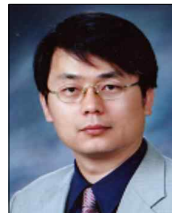
2005년 : 서울대학교 전기공학 (공학박사)
2005년~2006년 : 현대자동차 HEV설계팀 선임 연구원
2007년~현재 : 명지대학교 전기공학과 조교수
<주관심분야> 전력전자(전동기제어)

정 상 용 (정회원)



2003년 : 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사)
2006년 : 현대자동차 연구개발본부 선임연구원
2006년~현재 : 동아대학교 전기공학과 조교수
<주관심분야> 수치해석 기반 전기기기 설계 및 해석

이 철 균 (정회원)



1998년 : 서울대학교 전기공학과 졸업 (공학박사)
1999년~현재 : 동의대학교 전기공학과 부교수
<주관심분야> 전기기기 수치해석 및 최적화