

이상상태 발생 시 선박용 추진전동기 및 추진축의 과도상태 해석

오세진¹ · 김종수² · 김성환[†]

(Received December 17, 2015 ; Revised December 29, 2015 ; Accepted January 18, 2016)

Transient analysis of marine propulsion motor and shaft under abnormal conditions

Sae-Gin Oh¹ · Jong-Su Kim² · Seung-Hwan Kim[†]

요약: 최근 추진 전동기가 장착된 전기추진 시스템의 대형 크루즈 선박 및 상선이 점차 증가하는 추세이다. 이러한 전기추진 선박에서 추진 전동기에 이상상태가 발생하면 전동기 자체 및 프로펠러축에 심각한 손상이 발생할 수 있다. 하지만 전기추진 선박에 사용되는 추진 전동기의 정상상태 운전 및 이상상태 시의 분석에 관한 연구는 찾아보기 힘들고 관련 정보도 매우 부족한 실정이다. 본 연구에서는 전기추진 선박용 추진 시스템의 수학적 모델을 제시하고 이를 바탕으로 전기적인 이상상태 발생 시에 추진 전동기 및 프로펠러축에 발생하는 과도현상을 해석하고자 한다. 본 연구에 사용된 전기추진 선박용 전동기는 동기전동기이며 소프트웨어인 Matlab을 사용하여 모의실험을 수행하였으며, 정격으로 운전 중인 추진 전동기에 이상상태가 발생하였을 경우 과도전류는 1상 접지 상태에서 가장 크게 발생하며 추진축에 발생하는 과도토크는 3상 접지 및 2상 접지 상태에서 상대적으로 크게 발생하였고, 정격으로 운전 중 추진 전동기의 여자전력이 차단될 경우에도 과도전류와 과도토크가 비교적 크게 발생함을 확인하였다.

주제어: 추진 전동기, 전기추진 시스템, 이상상태, 프로펠러축

Abstract: Recently, electric propulsion systems are being increasingly used in large cruise ships and merchant vessels. When abnormal electrical conditions occur in the motor of an electric propulsion ship, they can cause serious damage to the motor and propeller shaft. Research on abnormal conditions of propulsion motors used in electric propulsion vessels and electric ships is difficult to find. In this study, a mathematical model of the electric propulsion system is proposed to analyze transient phenomena that occur in the case of electric propulsion motor or propeller shaft malfunction. A synchronous motor was used in the MATLAB computer simulation of this study. In the event of electrical malfunction of the electric propulsion motor at rated operation, over current occurs in the condition of 1 phase ground, over torque occurs at 3 and 2 phases ground and over current and torque occur when exciting power fails at rated operation.

Keywords: Propulsion motor, Electric propulsion system, Abnormal condition, Propeller shaft

1. 서론

최근 선박의 대형화에 발맞추어 선박의 전력시스템 용량도 증대되고 있는 추세이며[1] 기술이 진보함에 따라 선박의 전력시스템 구조도 점점 복잡해지고 있다[2]. 선박용 전기추진 시스템에는 발전기, 전력 변환기, 추진 전동기 및 모니터링 장치 등이 설치되며 제어시스템을 최적화 할 수 있고 성능을 증대시킬 수 있으며 에너지 효율을 증가시킬 수 있다.

선박에서 사용하는 전기적인 부하는 운전 상태에 따라서 급변할 수 있으며 따라서 고조파 등이 발생하여 선박 전력

시스템에 악영향을 끼칠 수 있다. 하지만 전력시스템에 단락 등 전기적인 사고가 발생하면 보다 심각한 손상을 초래할 수 있다[3].

선박에서 사용하는 전압은 육상에 비해 저압이기 때문에 사고 시에 발생하는 전류는 상대적으로 상당히 커지게 된다. 전기적인 단락사고는 선박에서 발생할 수 있는 전기적인 사고 중에서 가장 크게 시스템에 손상을 주는데 단락 사고 시에는 정격전류의 수배정도까지 흐르게 된다. 또한 전기추진 전동기에 단락사고가 발생하였을 경우에는 큰

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7735-3582>): Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: kksh@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4265

1 Department of Ship Operation, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: osgen@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-5094

2 Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: jongskim@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4831

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.

과도토크가 발생하여 추진 축계에도 심각한 손상을 입힐 수 있다[4].

본 논문에서는 전기추진 선박용 전력시스템에서 추진 전동기로 많이 사용되는 동기전동기 및 프로펠러축을 모델링[5][6]하고 추진 전동기에 단락 등 전기적인 사고가 발생하였을 경우를 모의 실험하여 이상상태 발생 시의 추진 전동기 및 프로펠러축에 발생하는 과도상태를 분석하고자 한다[7].

2. 전기추진 시스템 모델링

2.1 추진 전동기의 수학적 모델링

3상 동기기는 고정자에 3개의 권선이 120°의 간격으로 배치되어 있고 회전자에는 계자권선이 있다. 또한 회전자에는 단락권선인 제동권선을 추가하여 동기기 상태변화시의 안정성을 확보할 수 있다. 제동권선이 고정자권선에 나란한 방향에 2개, 계자권선과 같은 방향에 1개가 있는 2극 3상 동기기를 개략적으로 도시하면 Figure 1과 같다.

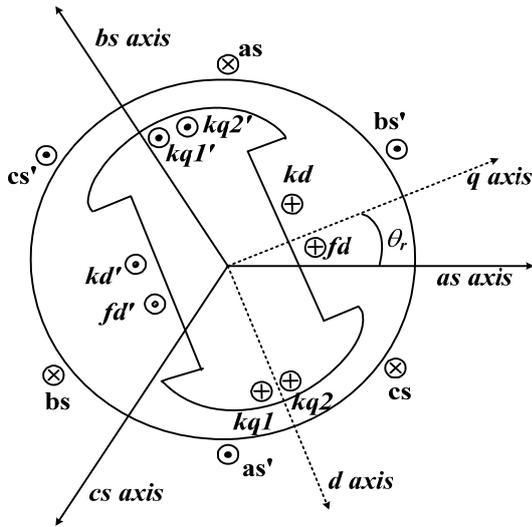


Figure 1: Model of synchronous machine

회전자 좌표축에 대한 동기기의 전압방정식을 표현하면 식 (1), (2)와 같다.

$$v_{qd0s}^r = -r_s i_{qd0s}^r + \omega_r \lambda_{dq_s}^r + p \lambda_{qd0s}^r \quad (1)$$

$$v_{qdr}^r = i_r' i_{qdr}^r + p \lambda_{qdr}^r \quad (2)$$

여기서 첨자 s 와 r 은 각각 고정자와 회전자에 관계된 변수들이고, 부호 '는 회전자의 변수 및 파라미터를 고정자 권선의 값으로 변화시킨 것이다. 식 (1), (2)에서 r 은 저항, i 는 전류, ω 는 각속도, λ 는 자속을 나타내며 p 는 미분연산자이다.

식 (1), (2)에서 자속은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qd0s}^r \\ \lambda_{qdr}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s^T L_s (K_s^T)^{-1} & K_s^T L_{sr}' \\ 2/3 (L_{sr}')^T (K_s^T)^{-1} & L_r' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{qd0s}^r \\ i_{qdr}^r \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서,

$$K_s^T L_s (K_s^T)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_{md} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$K_s^T L_{sr}' = \begin{bmatrix} L_{mq} & L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{md} & L_{md} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\frac{2}{3} (L_{sr}')^T (K_s^T)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{mq} & 0 & 0 \\ L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$L_r' = \begin{bmatrix} L_{lkq1}' + L_{mq} & L_{mq} & 0 & 0 \\ L_{mq} & L_{lkq2}' + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{lfd}' + L_{md} & L_{md} \\ 0 & 0 & L_{md} & L_{lkd}' + L_{md} \end{bmatrix} \quad (7)$$

위 식들에서 L_{ls} 는 고정자 누설인덕턴스, L_{md} 는 종축인덕턴스, L_{mq} 는 횡축인덕턴스, L_{lkq1} , L_{lkq2} , L_{lkd} 회전자 누설인덕턴스, L_{lfd} 는 계자 누설인덕턴스이다.

동기기에 발생하는 토크는 식 (8)로 표현되고 발생토크에 의한 속도변화는 식 (9)가 된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds}^r i_{qs}^r - \lambda_{qs}^r i_{ds}^r) \quad (8)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \frac{P}{2} (T_e - T_L) \quad (9)$$

식(8)에서 T_e 는 발생토크, P 는 극수이고 식 (9)에서 J 는 관성모멘트, T_L 은 부하토크이다.

2.2 선박추진기 모델링

선박 추진기의 역학 시스템을 표현하기 위한 여러 가지 방법이 있지만 본 논문에서는 운동에너지, 퍼텐셜에너지 및 감쇠에너지를 사용한 라그랑제 방정식을 이용하였으며 [8] 식으로 표현하면 식 (10)과 같다.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad (10)$$

여기서 T 는 시스템의 총 운동에너지, U 는 시스템 퍼텐셜에너지 변화, D 는 총 감쇠 에너지, Q_i 는 비 퍼텐셜 모멘트 및 q_i 는 $i=1,2,3 \dots n$ 을 만족하는 일반 좌표이다.

Figure 2는 단순하게 표현한 선박 추진기 모델이다.

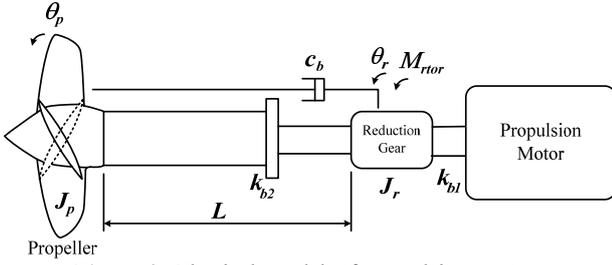


Figure 2: Physical model of propulsion system

Figure 2의 선박 추진기 모델을 이용하면 다음과 같은 식들을 얻을 수 있다.

$$T = \frac{1}{2} J_r \left(\frac{d\theta_r}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} J_p \left(\frac{d\theta_p}{dt} \right)^2 \quad (11)$$

$$U = \frac{1}{2} k_{b1} (\theta_r)^2 + \frac{1}{2} k_{b2} (\theta_r - \theta_p)^2 \quad (12)$$

$$D = \frac{1}{2} c_b \left(\frac{d\theta_r}{dt} - \frac{d\theta_p}{dt} \right)^2 \quad (13)$$

식 (11), (12), (13)에서 T 는 시스템의 운동에너지, U 는 시스템 퍼텐셜에너지 변화, D 는 총 감쇠 에너지, J 는 관성모멘트, θ_r 은 축 운동 각, θ_p 는 프로펠러 운동 각, k_b 는 강도계수 및 c_b 는 감쇠 계수이다.

Figure 2의 시스템을 수식적으로 표현하면 식 (14) 및 식 (15)를 얻을 수 있다. 이때 운동 각은 $\theta_r > \theta_p$ 라고 가정한다.

$$J_r \frac{d^2\theta_r}{dt^2} + c_b \left(\frac{d\theta_r}{dt} - \frac{d\theta_p}{dt} \right) + k_{b1}\theta_r + k_{b2}(\theta_r - \theta_p) = M_{rtor} \quad (14)$$

$$J_p \frac{d^2\theta_p}{dt^2} - c_b \left(\frac{d\theta_r}{dt} - \frac{d\theta_p}{dt} \right) - k_{b2}(\theta_r - \theta_p) = 0 \quad (15)$$

식 (14)에서 M_{rtor} 은 감속기 토크이다.

3. 모의 실험

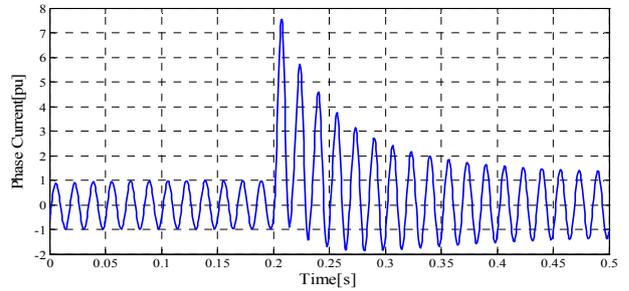
선박용 추진 전동기 이상상태 시의 과도상태를 해석하기 위해 컴퓨터 모의실험을 행하였다. 모의실험에 사용한 추진 전동기는 동기전동기이며 전동기 파라미터 값 및 추진 축계의 파라미터 값은 Table 1과 같다.

3.1 3상 접지

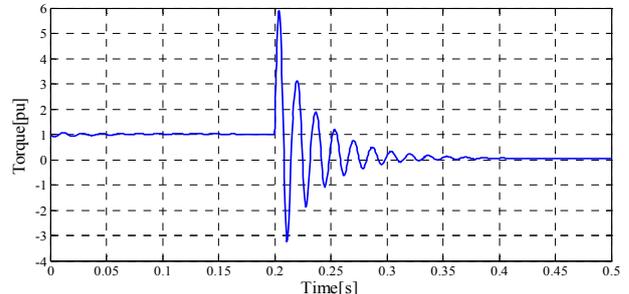
정격부하 상태에서 운전 중이던 추진 전동기에 3상 접지 사고가 발생했을 때의 상태를 모의실험 하였다. Figure 3은 정상운전 중 0.2[sec] 후 추진 전동기에 3상 접지가 발생하였을 경우의 전동기 상전류 및 프로펠러축에 발생하는 토크를 나타낸다. 상전류는 약 7.6(pu), 축 토크는 약 6(pu)까지 상승하였다.

Table 1: Parameters of synchronous motor and propulsion system

| | |
|--------------------|----------------------|
| capacity | 5000 [kW] |
| voltage | 450 [V] |
| number of pole (P) | 4 |
| r_s | 0.00574 [Ω] |
| L_{ls} | 0.03152 [Ω] |
| L_{mq} | 0.7291 [Ω] |
| L_{md} | 0.8689 [Ω] |
| L_{lka} | 0.0599 [Ω] |
| L_{lfd} | 0.05936 [Ω] |
| J_r | 3118 [Kgm^2] |
| J_p | 50725 [Kgm^2] |
| k_{b1} | 237673 [Nm/rad] |
| k_{b2} | 85582 [Nm/rad] |
| c_b | 5000 [Ns/m] |
| M_{rtor} | 50955 [Nm] |



(a) Phase current



(b) Shaft torque

Figure 3: Three phase fault of propulsion motor

3.2 2상 접지

정격부하로 운전 중인 추진 전동기에 두 상이 접지되는 이상상태를 모의실험 하였다. 접지되지 않은 한 상의 권선에는 정격전압이 가해진다. Figure 4는 정상운전 중 0.2[sec] 후 추진 전동기에 2상 접지가 발생하였을 경우의 상전류 및 축에 발생하는 토크를 나타낸다. 상전류는 약 9.6(pu), 토크는 약 5.9(pu)까지 상승하였다.

3.3 1상 접지

정격으로 운전 중이던 추진 전동기에 한 상이 접지되는 상태를 모의실험 하였다. 접지되지 않은 두 상의 권선에는 정격전압이 가해진다. Figure 5는 정상운전 중 0.2[sec] 후 추진 전동기에 1상 접지가 발생하였을 경우의 상전류 및 축 토크를 나타낸다. 상전류는 약 11.2(pu), 토크는 약 5.3(pu)까지 상승하였다.

3.4 여자전력 상실

정격으로 운전 중이던 추진 전동기에 여자전력이 차단될 경우의 상태를 모의실험 하였다. **Figure 6**은 정상운전 중 0.2[sec] 후 추진 전동기의 여자전력이 상실되었을 경우의 전동기 상전류 및 축 토크 변화를 나타낸다. 상전류는 약 3.4(pu), 토크는 약 5.3(pu)까지 상승하였다.

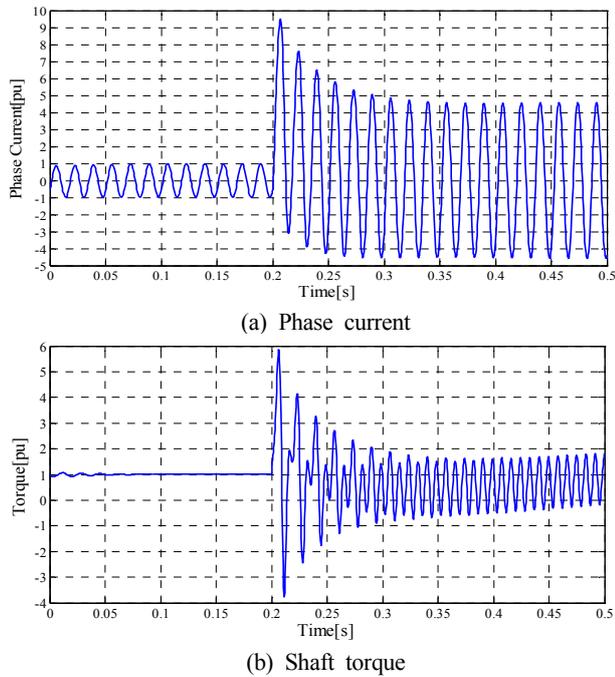


Figure 4: Two phase fault of propulsion motor

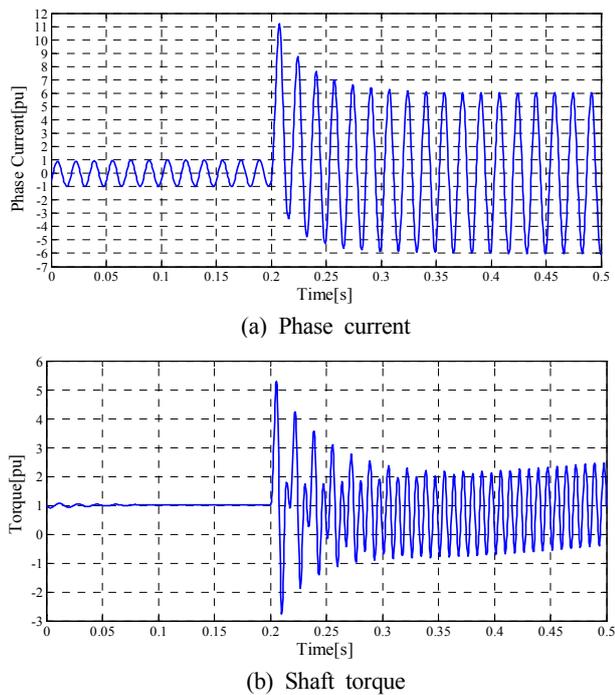


Figure 5: One phase fault of propulsion motor

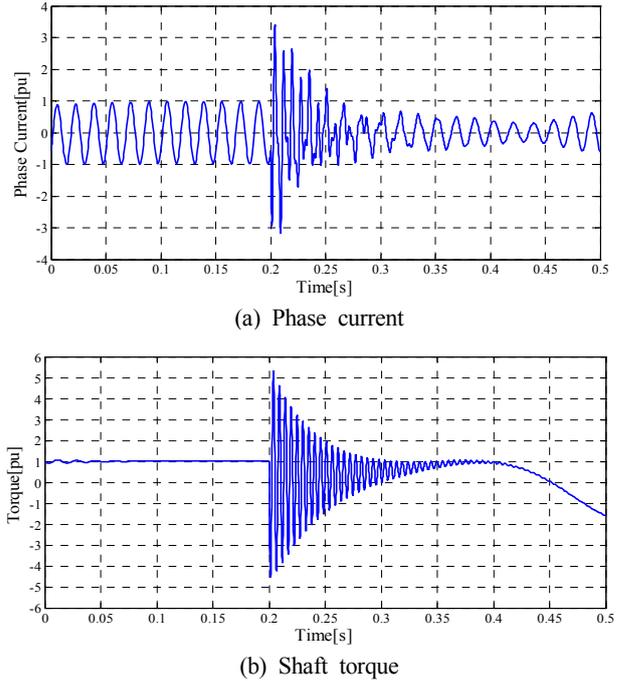


Figure 6: Excitation system fault of propulsion motor

4. 결 론

본 논문에서는 전기추진 선박용 전동기 및 추진축의 수학적 모델을 제시하였고 모델로부터 추진 전동기에 이상상태가 발생하였을 경우의 과도현상을 모의실험 하였다. 그리고 모의실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 정격으로 운전 중인 추진 전동기에 이상상태가 발생하였을 경우 과도전류는 1상 접지 상태에서 가장 크게 발생하며 추진축에 발생하는 과도토크는 3상 접지 및 2상 접지 상태에서 상대적으로 크게 발생하였다.
- 2) 정격으로 운전 중 추진 전동기의 여자전력이 차단될 경우에도 과도전류와 과도토크가 비교적 크게 발생하였다.
- 3) 추진 전동기 및 추진축의 설계 시에는 추진 전동기에 발생할 수 있는 전기적인 단락사고 등의 과도현상을 감안한 안전한 설계가 필요하다.

후 기

본 연구는 한국해양과학기술진흥원 해양안전 및 해양교통시설 기술개발사업 “가변속 엔진발전기를 이용한 직류배전 전기선박용 에너지 효율 향상 시스템 개발” 연구지원으로 수행된 연구결과입니다.

References

- [1] Y. B. Yuan, B. Xu, and X. J. Zhang, “Simulation research on stability of constant power load of marine power system,” *Ship Engineering*, vol. 6, no. 33, pp. 49-52, 2011.

- [2] Z. Guichen and M. Jie, "Hybrid control of direct torque and speed for marine electrical propulsion," *Journal of Harbin Engineering University*, vol. 5, no. 32, pp. 541-545, 2011.
- [3] M. Wang, C. Yang, W. Y. Chen, and H. C. Lin, "Power cable fault classification using improved bayesian decision algorithm," *International Journal of Advancements in Computing Technology*, vol. 4, no. 23, pp. 108-115, 2012.
- [4] L. Yanling, G. Baojun, T. Dajun, Z. Zhiqiang, and L. Peng, "Analysis on magnetic field of extra high voltage generators asynchronously operated under loss-of-field condition," *Proceedings of the CSEE*, vol. 6, no. 32, pp. 170-175, 2012.
- [5] S. Zhang and Q. Zhang, "Coupled torsional and axial nonlinear vibration model of the crankshaft with a propeller," *Asia Simulation Conference - 7th International Conference on System Simulation and Scientific Computing*, 2008.
- [6] A. Grzadziela, "Modelling of propeller shaft dynamics at pulse load," *Polish Maritime Research*, vol. 15, no. 4, pp. 52-58. 2008.
- [7] C. W. Lv, "Fault diagnosis of ship generator based on ant colony algorithm and neural network," *Science Technology and Engineering*, vol. 22, no. 10, pp. 5595-5598, 2010.
- [8] William W. Seto: *Mechanical Vibrations*. Schaum pub., New York 1964.