

## 선박용 전기추진시스템의 단락상정사례의 전력특성 분석

전원\* · 왕용필\* · 정중화\*\* · 류승각\*\*\* · 정상용†  
(원고접수일 : 2007년 8월 9일, 심사완료일 : 2008년 1월 8일)

### Power Characteristic Analysis of Assumed Short Circuit Instance of Electric Ship Propulsion System

Won Jeon\* · Yong-Peel Wang\* · Jong-Hwa Jeong\*\* · Sung-Kak Lyu\*\*\* · Sang-Yong Jung†

**Abstract** : This paper deals with modeling and characteristic analysis of a large-powered electric ship propulsion system. Particularly, system modeling in accordance with the required shipping performance, building-up the equivalent circuit, and the power analysis based on load flow have been performed. In addition, abnormal operating condition of short-circuit network is considered for investigating the safety of system components under the over-load condition. Furthermore, protective device like circuit breaker has been specified in order to make the entire system operate normally in case of short-circuit emergency.

**Key words** : Electric ship(전기 선박), Electric ship propulsion system(전기 추진 선박 시스템), Load flow(전력조류), Short circuit(단락회로), ETAP(전력계통 과도 해석 프로그램)

#### 1. 서 론

선박용 전기추진시스템은 디젤기관이나 증기터빈으로 프로펠러축을 구동하는 기계적 추진시스템과 달리, 내연기관에서 발전기를 돌리고 발전된 전력으로 전동기를 운전한다. 전기추진시스템이 가지는 장점들은 다음과 같다. 첫째, 전기적 제어를 통하여 쉽게 기동·정지·역전할 수 있기 때문에 운전조작성이 뛰어나다. 둘째, 장비손상에 대한 Redundancy가 우수하다. 셋째, 추진시스템의 소

형화로 Cargo 적재 능률 향상을 이룰 수 있다. 넷째, Reliability(신뢰성)와 Availability(유용성)가 뛰어나다. 다섯째, 선회반경, 급제동 등 Maneuvering 성능이 우수하다. 이러한 장점으로 인해 대형 LNG선, 군함, 쇄빙선, 여객선, 화물선 등 여러 고부가가치 선박에 적용이 확대되는 실정이다<sup>[1],[2]</sup>.

선박용 전기추진시스템의 구조는 디젤엔진, 발전기, 배전반, 추진변압기, 주파수변환기, 추진모터, 프로펠러로 구성되는데, 특히 항해 상황에 다

† 교신저자(동아대학교 전기공학과 전자계응용시스템연구소), E-mail:syjung@dau.ac.kr, Tel:(051)200-6945

\* 동아대학교 전기공학과

\*\* 대우조선해양(주) 전장설계팀

\*\*\* 대우조선해양(주) 선박해양기술연구소

라 전력을 적절히 사용할 수 있는 감기운전을 위해 여러 대의 발전기로 구성되며, 통상 2대의 추진모터시스템으로 구성되며, 항해 시 한대의 추진모터가 고장 나더라도 나머지 한대의 추진모터에 의해 무사히 귀환할 수 있도록 구성되어 있다. 이러한 전기추진시스템의 구조는 전기적 부품간의 상호 연계성이 고려되어 설계되어 있으므로 다양한 동작 상태에서의 전력흐름을 해석하여 각 BUS의 전압 및 전력조류가 허용범위 내인지를 검토하여 시스템의 안정도를 판단하는 것이 매우 중요하다. 아울러, 단락사례를 상정하여 단락회로 해석을 통해 단락된 BUS가 계통에 미치는 영향 등을 살펴봄으로써 가능한 단락사고 예방설계를 할 수 있다<sup>(3),(4)</sup>.

따라서 본 논문에서는 LNG선을 모델로, 전기추진선박 시스템의 전력조류해석(Load Flow Analysis)을 선박의 운전상태(항해시와 LNG Unloading 시)에 따라 수행하여 시스템의 전력특성을 분석한다. 그리고 발전기 측의 BUS가 3상 단락된 경우에 대해 단락회로해석(Short Circuit Analysis)을 수행하여 단락전류를 측정하고, 단락전류로부터 시스템을 보호하기 위한 차단기의 용량을 선정한다.

## 2. 선박용 전기추진시스템

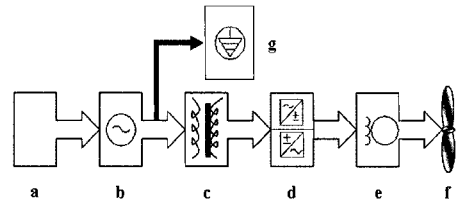
일반적으로 선박용 전기추진시스템의 전력구조는 Fig. 1과 같이 다양한 전력부품들로 이루어져 있다<sup>(5),(6)</sup>. 그러므로 전력특성해석을 하여 시스템의 안정성 여부를 검토하여야 한다.

본 논문에서는 전기추진선박시스템의 전력특성을 해석하기 위해 ETAP(Electrical Transient Analyzer Program)을 사용하였다.

본 논문에서 다루고자 하는 전기추진선박시스템에 대한 해석순서는 아래와 같다.

- ① 전기추진선박시스템을 모델링한다.
- ② 항해시와 LNG Unloading시에 대한 전력조류 해석을 한다.
- ③ 항해시에 Main SWBD2가 3상 단락된 경우에 대한 단락전류해석을 한다.
- ④ 단락발생시 일부 시스템이 활성화 될 수 있도록

Main SWBD1과 Main SWBD2를 연결하는 차단기의 용량을 산정한다.



- a. Prime mover
- b. Synchronous generator
- c. Power transformer
- d. Motor drive(Frequency converter)
- e. Propulsion motor(Synchronous motor)
- f. Propeller
- g. Other load demands(Cargo pumps, lighting, etc)

Fig. 1 Typical electric ship propulsion system

### 2.1 전력조류해석(Load Flow Analysis)

전력조류해석은 다양한 동작 상태에서 전력시스템의 정상상태 성능해석 및 시스템의 전력특성을 분석하는데 사용된다. 이는 부하의 유효전력과 무효전력, 발전기의 유효전력과 무효전력의 범위를 알고, 이를 통해 각 선로를 통해 흐르는 전력조류 및 타계통과 연결하는 변압기에서의 전력조류, 각 BUS에서의 전압의 크기와 위상각을 산출하는 것이다.<sup>(7)</sup>

전력조류해석을 위한 수치 계산 기법에는 Newton-Raphson법, Fast-Decoupled법, Accelerated Gauss-Seidel법이 있다. 본 논문에서는 수렴속도가 빠르고 안정적인 Newton-Raphson법을 적용하여 전력조류해석을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 발전기 출력량과 총부하량을 비교하여 발전기의 과부하 여부를 관찰하고, BUS전압의 변동이 전압제한조건(IEEE Std 141-1993, 5% 미만)에 적합한지를 관찰하여 BUS전압의 안정성을 판단하며, 전력조류흐름의 방향 등을 검토한다. 이와 같은 검토사항은 시스템 모델링의 적절성 여부를 평가하는데 사용된다.

2.2 단락회로해석(Short Circuit Analysis)

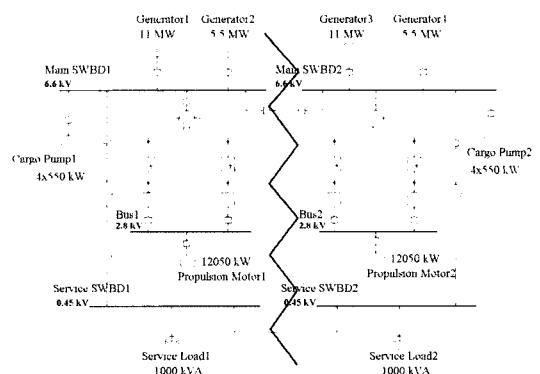
단락회로해석이란 사고가 발생했을 때의 시스템 전압과 전류의 변화를 분석하는 것으로, 일반적인 전력시스템에서 발생하는 사고사례로는 1선 지락, 2선 지락, 선간단락, 3상 단락, 단선사고 등이 있다.

본 논문에서는 발전기 측의 BUS가 3상 단락되었을 때 각 BUS와 차단기에 흐르는 단락전류와 BUS전압을 측정하여 시스템 구성품의 활성화 여부를 검토한다. 이와 같은 검토사항의 결과는 단락사고 시 과도하게 흐르는 단락전류로부터 시스템을 보호하기 위한 차단기의 사양선정 및 적절성을 평가하는데 응용된다.<sup>(8),(9)</sup>

3. 선박용 전기추진시스템의 모델링 및 전력특성분석

3.1 선박용 전기추진시스템의 모델링

본 논문에서 적용한 모델은 LNG선박으로 기본 구성은 Fig. 2와 같이 4대의 발전기와 2대의 추진모터, 8대의 Cargo Pump 및 서비스부하로 이루어져 있으며, 추진모터의 주파수 가변을 위해 Charger와 인버터를 사용하였다. 특히, 선박용 전기추진시스템에 있어 중심을 기준으로 대칭적인 구조를 갖도록 모델링하여 시스템을 추진모터1 측과 추진모터2 측으로 나누어 검토한다. 각 부품들의 사양은 Table 1과 같다.



<Propulsion Motor 1> <Propulsion Motor 2>  
**Fig. 2 Modeling of electric ship propulsion system**

**Table 1 Specification of the electric ship system**

Generator	Rated Power : 11MW, 5.5MW Pole number : 4 Efficiency : 95% Voltage : 6.6kV
Propulsion motor	Rated Power : 12050kW Pole number : 8 Efficiency : 98.5% Voltage : 2.8kV
Cargo pump	Rated Power : 550kW Pole number : 4 Efficiency : 94.1% Voltage : 6.6kV
Charger	6161kVA / 6099kW 1.65kV(AC) / 4.85kV(DC)
Inverter	6140kW / 6140kVA 4.85kV(DC) / 2.8kV(AC)

3.2 선박용 전기추진시스템의 전력특성분석

3.2.1 항해시의 전력조류해석

선박용 전기추진시스템의 운전상태가 항해시일 때 4대의 발전기가 2대의 추진모터 및 서비스부하에 전력을 공급한다. 특히, 발전기 출력에 있어 동일한 퍼센트를 갖도록 설정하였다.

선박 항해시의 전력조류해석 결과(kW + jkvar)로 전력의 흐름은 Fig. 3과 같다. 여기서 발전기의 출력이 최대출력의 약 79.2% 정도 사용되고 있으며, 부하에서 사용되는 유효전력의 총합은 발전기에서 공급되는 유효전력과 동일하다. 또한, BUS 전압의 변동률도 0.1% 미만으로 전압제한조건(IEEE Std 141-1993)을 만족하여 안정하며, 전력조류의 흐름방향도 정상적으로 발전기에서 부하로 흐른다. 이와 같은 항해시의 전력조류해석에 대한 검토사항을 Table 2에 나타내었다.

이러한 결과를 근거로 선박용 전기추진시스템이 항해시의 운전모드에서 적절하게 모델링되었으며 안정하다 할 수 있다.

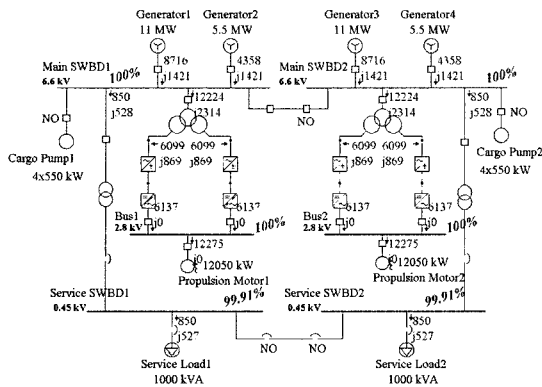


Fig. 3 Load flow analysis result on sea going mode

Table 2 Review result on sea going mode

Comparison about the output of generator and total load	In accordance
Overload situation of the generator	Normal state (79.2% use)
Overload situation of the transformer	Normal state(Maximum capacity range within)
Stability of BUS voltage	Stability (0.1% under)
Load flow direction	Normal state

3.2.2 LNG Unloading시 전력조류해석

전기추진선박시스템의 운전상태가 LNG Unloading시에는 11MW급 발전기 1대가 LNG를 이송하기 위해 사용되는 Cargo Pump 8대 및 서비스부하에 전력을 공급한다.

LNG Unloading시 전력조류해석 결과로 전력의 흐름은 Fig. 4와 같다. 여기서 발전기의 출력이 최대출력의 약 59.4% 정도 사용되고 있으며, Cargo Pump 8대 및 서비스부하에서 사용되는 유효전력의 총합이 발전기에서 공급되는 유효전력과 동일하다. 또한, BUS전압의 변동률도 0.1% 미만으로 전압제한조건을 만족하여 안정하며, 전력조류의 흐름방향도 정상적으로 발전기에서 부하로 흐른다. 이와 같은 LNG Unloading의 전력조류해석에 대한 검토사항을 Table 3에 나타내었다.

이러한 결과를 근거로 선박용 전기추진시스템이

LNG Unloading의 운전모드에서 적절하게 모델링되었으며 안정하다 할 수 있다.

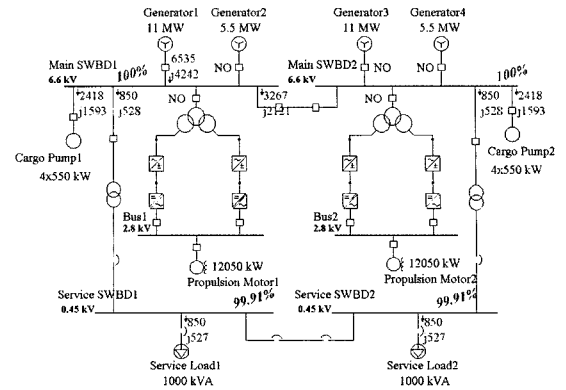


Fig. 4 Load flow analysis result on LNG Unloading

Table 3 Review result on LNG Unloading mode

Comparison about the output of generator and total load	In accordance
Overload situation of the generator	Normal state (59.4% use)
Overload situation of the transformer	Normal state(Maximum capacity range within)
Stability of BUS voltage	Stability (0.1% under)
Load flow direction	Normal state

3.2.3 항해시 3상 단락에 대한 단락회로해석

선박용 전기추진시스템의 운전상태가 항해시일 때, 추진모터2 측의 발전기에 연결된 BUS(Main SWBD2)를 3상 단락시켜 단락전류의 흐름을 관찰하여 차단기의 용량을 선정한다. 또한, 차단기 상태에 따른 시스템 구성품의 활성화 여부를 검토한다. 차단기 용량을 계산하는 식은 다음과 같다.<sup>(10)</sup>

$$\begin{aligned} \text{Rated Int.} &= \text{Current of short circuit} \\ \text{Closing and Latching rms} &= 1.6 \times \text{Rated Int.} \\ \text{Closing and Latching crest} &= 2.7 \times \text{Rated Int.} \end{aligned} \quad (1)$$

먼저, 추진모터1 측과 추진모터2 측을 연결하는 차단기가 Close상태일 때 단락회로해석의 결과를

살펴보자.

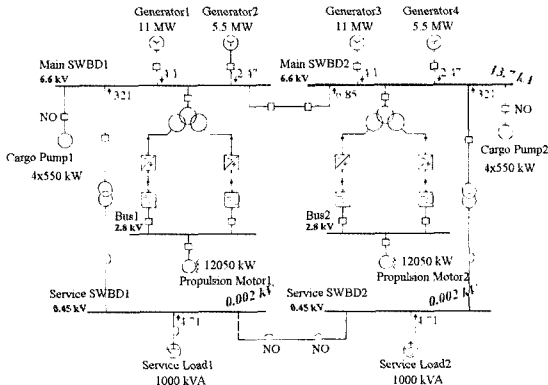


Fig. 5 Short circuit analysis about 3-phase fault (Closed protective device)

차단기 상태가 Close이기 때문에 단락 BUS에 의한 단락전류[kA]가 Table 4와 같이 시스템에 전체적으로 흐른다. 이와 같은 단락전류에 의해 시스템의 모든 BUS는 0V에 가깝게 되고 추진모터를 포함한 모든 구성 품들은 비활성화가 된다.

Table 4 Short current flow at closed protective device

From BUS & device	To BUS	Fault current [kA]
Generator 1	Main SWBD1	4.10
Generator 2		2.47
Service SWBD1		0.32
Generator 3	Main SWBD2	4.10
Generator 4		2.47
Service SWBD2		0.32
Main SWBD1		6.85

이와 같은 단락전류로부터 일부 시스템을 보호하기 위하여 Close상태의 차단기 용량을 Table 5와 같이 선정하였다. 그래서 단락전류가 흐를시 추진모터1 측의 시스템과 추진모터2 측의 시스템이 분리되도록 하여 시스템에 단락발생시 단락 BUS 반대편의 시스템이 활성화되도록 하였다.

Table 5 Capacity of the protective device

Rated Int.	6.85 [kA]
Closing and latching rms	10.96 [kA]
Closing and latching crest	18.50 [kA]

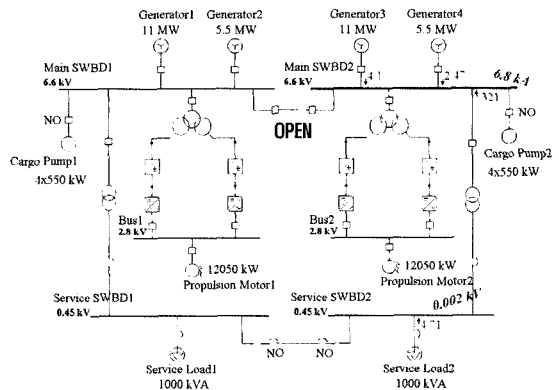


Fig. 6 Short circuit analysis about 3-phase fault (Open protective device)

Table 6 Short current flow at open protective device

From BUS & device	To BUS	Fault current [kA]
Generator 3	Main SWBD2	4.10
Generator 4		2.47
Service SWBD2		0.32

차단기가 Open상태이기 때문에 단락BUS에 의한 단락전류가 추진모터2 측의 시스템에만 흐른다. Table 6에 차단기 Open시 단락전류의 측정치를 나타내었다. 단락BUS에 의해 추진모터2 측의 시스템은 비활성화가 되지만, 추진모터1 측의 시스템은 차단기에 의해 정상적으로 가동한다.

Fig. 7은 Main SWBD2가 3상 단락된 경우의 전력조류해석을 한 결과이다. 특히, 차단기의 용량을 선정하였으므로 추진모터1 측의 시스템은 단락전류의 영향을 받지 않아 활성화되고, 추진모터2 측의 시스템은 단락전류에 의해 비활성화 된다. 추진모터1 측 시스템의 전력조류해석에 대한 검토사항을 Table 7에 나타내었다.

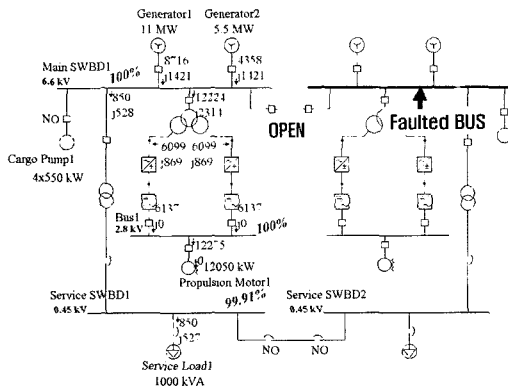


Fig. 7 Power flow about 3-phase fault

Table 7 Review result of propulsion motor1 system when 3-phase fault

Comparison about the output of generator and total load	In accordance
Overload situation of the generator	Normal state (79.2% use)
Overload situation of the transformer	Normal state(Maximum capacity range within)
Stability of BUS voltage	Stability (0.1% under)
Load flow direction	Normal state

여기서 발전기의 출력이 최대출력의 약 79.2% 정도 사용되고 있으며, BUS 전압의 변동률도 0.1% 미만으로 전압제한조건을 만족하여 안정하다. 또한, 전력조류의 흐름방향도 정상적으로 발전기에서 부하로 흐른다. 이와 같은 근거로 Main SWBD2 측의 시스템이 3상 단락된 상태에서 추진 모터1 측의 시스템은 안정하다 할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 선박용 전기추진시스템을 모델링하고, 전력특성을 해석함으로 시스템의 안정성 여부를 검토하였다. 특히, 항해시와 LNG운반시의 선박용 전기추진시스템 상태에 대해 전력조류해석을 수행하였으며 항해시에 Main BUS1을 3상 단락 상정하여 단락회로해석을 수행하였다. 먼저 전

력조류해석에 대해 BUS전압 및 발전기 출력 등을 검토한 결과 시스템이 항해시와 LNG운반시에 안정하다고 판단할 수 있었으며, 단락상정사태에 대한 단락회로해석을 한 결과로 차단기의 용량을 선정할 수 있었다.

#### 참고문헌

[1] J. V. Amy, Jr., "Considerations in the Design of Naval Electric Power Systems", 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol 1, pp.330-335, 2002.

[2] Timothy J. Mc Coy, "Trend in Ship Electric Propulsion", IEEE, Vol.1, pp.343-346, 2002.

[3] 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.

[4] 이교성, 장해기, "LNG선박의 최근동향", 한국마린엔지니어링학회지, 제29권, 제4호, pp.341~348, 2005. 5(ISSN 1226-9549)

[5] Wang, Z. and Liu, Y., "Modeling and Simulation of a Cyclo-converter Drive System for Harmonic Studies", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.47, No.3, pp.533-541, 2000.

[6] E. J. Lecourt, "Using Simulation to Determine the Maneuvering performance of the WAGB-20", Naval Engineers Journal, pp.171-188, January 1998.

[7] S. Woodruff, "Real Time Digital Harmonic Modeling and Simulation: An Advanced Tool for Understanding Power System Harmonics Mechanisms", IEEE Power Engineering Society General Meeting, vol 1, pp.773-776, 6-10 June 2004.

- [8] R. E. Hebner, "Electric Ship Power System-Research at the University of Texas at Austin", IEEE Electric Ship Technologies Symposium, pp.34-38, 25-27 July 2005.
- [9] Kalsi, Swarn S. and Om Nayak, "Ship Electrical System Simulation", IEEE Electric Ship Technologies Symposium, pp.63-69, 25-27 July 2005.
- [10] 김소연, "Suppression of the Thrust Loss for the Maximum Thrust Operation in the Electric Propulsion Ship", 서울대학교 석사학위논문, 2007년 2월



**류승각(柳承恪)**

대우조선해양주식회사  
선박해양기술연구소  
의장시스템R&D팀 파트장



**정상용(鄭相龍)**

1973년 9월생, 1997년 서울대학교 전기 컴퓨터공학부 졸업, 1999년 동 대학원 석사과정 졸업(공학석사), 2003년 동 대학원 박사과정 졸업(공학박사), 2006~ 현재 동아대학교 전기공학과 조교수

**저 자 소 개**



**전원(全源)**

1980년 11월생, 2007년 동아대학교 전기 공학과 졸업, 2007~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정



**왕용필(王龍必)**

1966년 8월생, 1992년 동아대학교 전기 공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전기공학과 석사과정 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 2001년 뉴질랜드 캔터베리대학교 졸업(Post-Doc), 현재 동아대학교 전기공학과 초빙교수



**정중화(丁鍾和)**

대우조선해양주식회사  
의장설계담당  
전장설계팀 파트장