

전기추진선박시스템의 운전조건별 동특성에 관한 연구

전원 · 왕용필 · 한성진 · 정상용  
 동아대학교 전기공학과

Dynamic Characteristic Analysis at each Operating Condition  
 for Electric Ship Propulsion System

Won Jeon, Yong-Peel Wang, Sung-Chin Hahn, Sang-Yong Jung  
 Department of Electrical Engineering, Dong-A University

**Abstract** - 본 논문은 대형(MW 급) LNG 전기추진선박 시스템의 동적·정적 특성에 대해 다룬다. 특히, 선박 항해시와 LNG Unloading시에 대해 전력조류해석(정특성 해석)으로 시스템 모델링의 타당성을 검증하였다. 아울러, LNG Unloading에 대한 Cargo Pump 기동시 시스템의 전압변동을 및 발전기의 주파수(속도)변화를 관찰하였으며, PID제어기로 구성된 발전기 Governor의 파라미터를 설계하기 위해 실제 항해시 발생할 수 있는 몇 가지 상황(발전기 및 추진전동기 Trip)의 과도안정도해석을 수행하였다. 따라서 전동기 기동해석 및 과도안정도해석(동특성 해석)으로 발전기 및 추진전동기의 전압안정성을 관찰하였다.

2. 선박용 전기추진시스템의 정특성 해석

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 단계통과 연결하는 변압기에서의 전력조류, 각 BUS에서의 전압의 크기와 위상각을 산출하는 것이다.<sup>[5][6]</sup>

본 논문에서는 선박 항해시와 LNG Unloading시의 전력조류해석을 수행하여 발전기의 과부하 여부, BUS전압의 안정성, 전력조류방향 등을 검토하여 각 운전조건별 시스템 모델링의 적합성을 분석하고자 한다.

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 소형화로 Cargo 적재 능력을 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. 선박용 전기추진시스템의 구조는 디젤엔진, 발전기, 배전반, 추진변압기, 주파수변환기, 추진전동기, 프로펠러로 구성되는데, 특히 항해 상황에 따라 전력을 적절히 사용할 수 있는 감기운전을 위해 여러 대의 발전기로 구성되며, 통상 2대의 추진전동기시스템으로 구성되며, 항해 시 한대의 추진전동기가 고장 나더라도 나머지 한대의 추진전동기에 의해 무사히 귀환할 수 있도록 구성되어 있다. 이러한 전기추진시스템의 구조는 전기적 부품간의 상호 연계성이 고려되어 설계되어 있으므로 다양한 동작 상태에서의 전압 및 전력조류가 허용범위 내인지를 검토하여 시스템의 정적 안정도를 판단하는 것과 시스템의 동적상황에 따라 발전기와 추진전동기의 전압변동을 검토하여 시스템의 동적 안정도를 판단하는 것은 매우 중요하다.<sup>[1]-[3]</sup>

따라서 본 논문에서는 대형LNG선을 모델로, 전기추진선박 시스템의 전력조류해석(Load Flow Analysis)을 선박의 운전상태(항해시와 LNG Unloading시)에 따라 수행하여 시스템의 전력특성을 분석한다. 또한, Motor Starting Analysis를 수행하여 유도전동기 기동시 시스템의 전압 변동률 및 발전기의 주파수변화에 대한 안정성을 검토하고, 선박 항해시 발생할 수 있는 발전기 및 추진전동기 변화를 설정하여 Transient Stability Analysis를 수행하여 시스템의 과도안정성을 분석한다.<sup>[4]</sup>

2.1.1 항해시에 대한 전력조류해석

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

선박 항해시에 대한 전력조류해석의 결과[kW+jkvar]로 전력의 흐름은 그림1과 같다. 여기서 발전기의 출력이 최대출력의 약 79.2% 정도 사용되고 있으며, 부하에서 사용되는 유효전력의 총합은 발전기에서 공급되는 유효전력과 동일하다. 또한, BUS전압의 변동률도 0.1% 미만으로 전압제한조건(IEEE Std 141-1993, ±5%미만)을 만족하여 안정하며, 전력조류의 흐름방향도 정상적으로 발전기에서 부하로 흐른다.

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

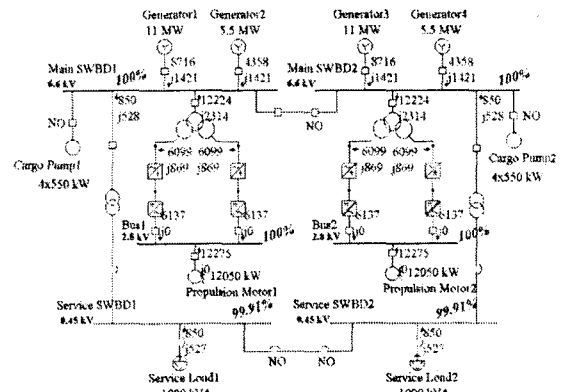


그림 1. 항해시 전력조류해석의 결과

### 2.1.2 LNG Unloading시에 대한 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 그림2와 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.

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

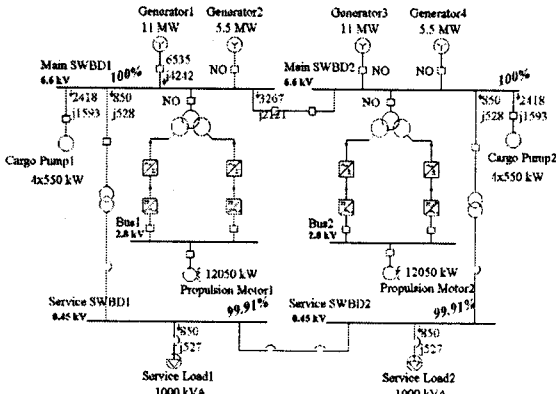


그림 2. LNG Unloading시 전력조류해석의 결과

### 3. 선박용 전기추진시스템의 동특성 해석

#### 3.1 Motor Starting Analysis

유도전동기 기동시 특성상 낮은 역률의 높은 기동전류를 필요로 하기 때문에 시스템의 전압강하를 유발한다. 따라서 본 논문에서는 유도전동기 기동시 시스템의 전압강하 안정성 여부(Class Rule 204조항, 85% ~ 120%)와 발전기의 속도(주파수) 변동 안정성 여부(Class Rule 206조항, ±10%미만)를 검토하고자 한다.

LNG Unloading시 LNG 이송에 사용되는 Cargo Pump는 550kW급 유도전동기로 8대가 시스템에 내재되어 있다. 따라서 11MW급 발전기 1대가 가동되고 있는 LNG Unloading시 Cargo Pump의 기동은 시스템 및 발전기에 전압강하를 유발한다. 그림3은 Cargo Pump 기동시 시스템의 전압강하를 나타낸 것이다. 시스템의 전압강하(92.8%)가 Class Rule(85%~120%)을 만족하고 있으므로 시스템은 Cargo Pump 기동시 유발되는 전압강하를 적절히 감당할 수 있다.

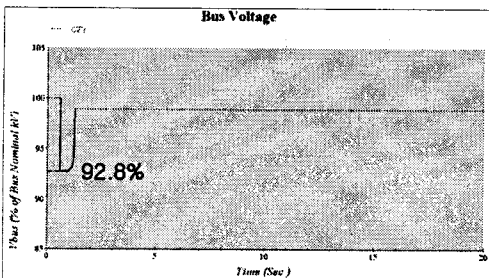


그림 3. Cargo Pump 기동시 BUS 전압의 변동률

아울러, Cargo Pump 기동시 발전기의 속도(주파수) 변동 안정성을 검토하였는데, 그림4를 보면 Cargo Pump 기동시 속도가 514.3rpm에서 최저속도 506.6rpm까지 1.5% 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 Cargo Pump 기동시 발전기의 속도변화량이 Class Rule(±10%미만)을 만족하므로 Cargo Pump 기동시 발전기가 안정한 상태를 얻을 수 있다.

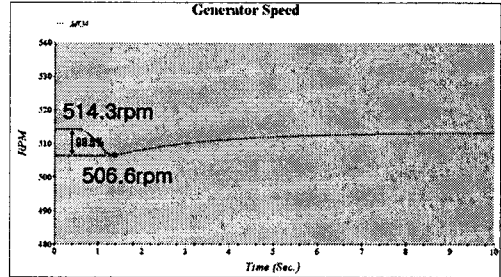


그림 4. Cargo Pump 기동시 발전기 속도 변화를

#### 3.2 Transient Stability Analysis

전력시스템에 부하변동이나 선로사고 등과 같은 교란이 발생하면 시스템 전반적으로 불평형 상태가 되어 발전기 및 전동기가 탈조하거나 전력계통이 붕괴되는 사고가 발생한다. 따라서 본 논문에서는 선박항해시 발생할 수 있는 상황(표 1)을 설정하여 부하변동에 따른 발전기 전압강하(Class Rule 85%~120%)와 시스템의 안정화 시간(Class Rule 1.5초 이내에 전압변동 3%미만)에 대해 검토하고자 한다.

표 1. Transient Stability Analysis 상태설정

구분	초기상태						사고설정						
	Generator				PM		Generator				PM		
	G1	G2	G3	G4	PM1	PM2	G1	G2	G3	G4	PM1	PM2	
Case1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Case2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Case3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Case4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

(○)는 활성화, (×)는 Trip

#### 3.2.1 Case1에 대한 Transient Stability Analysis

항해시(발전기 4대, 추진전동기 2대 기동) 추진전동기 한 대가 Trip되는 상황을 Case1으로 설정하여 과도안정도 해석을 수행하였다. 그림5는 과도안정도 해석결과 1초에 추진전동기 1대가 Trip 되면서 발전기의 전압변동을 최대값이 102.2%가 되고, 1.5초경과 후 100.4%가 되어 Class Rule(전압변동을 최대값 85%~120%, 1.5초 이내에 전압변동 3%미만)을 만족한다. 따라서 Case1의 해석상황에서 과도안정도 해석에 가장 큰 영향을 미치는 발전기의 Governor가 적절히 모델링되었다는 것을 알 수 있다.

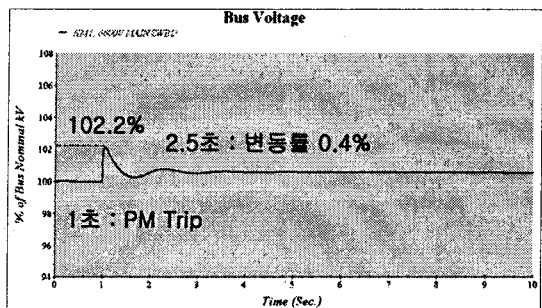


그림 5. Case1의 과도안정도 해석결과

### 3.2.2 Case2에 대한 Transient Stability Analysis

항해시(발전기 4대, 추진전동기 2대 기동) 추진전동기 두 대가 Trip되는 상황을 Case2로 설정하여 과도안정도 해석을 수행하였다. 해석결과(그림6) 발전기의 전압변동을 최대값이 103.65%, 1.5초경과 후 안정화 정도는 100.8%가 되어 Class Rule(전압변동을 최대값 85%~120%, 1.5초 이내에 전압변동 3%미만)을 만족한다. 따라서 Case2의 해석상황에서도 발전기의 Governor가 적절히 모델링되었다는 것을 알 수 있다.

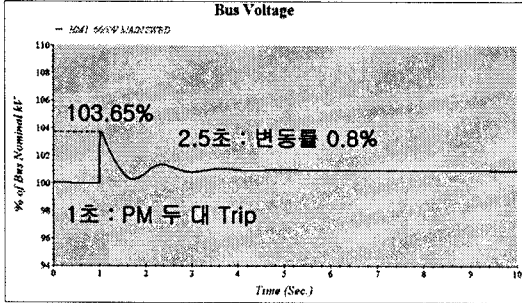


그림 6. Case2의 과도안정도 해석결과

### 3.2.3 Case3에 대한 Transient Stability Analysis

항해시(발전기 4대, 추진전동기 2대 기동) 5.5MW급 발전기 한 대가 Trip되는 상황을 Case3으로 설정하여 과도안정도 해석을 수행하였다. 그림7의 해석결과를 보면 발전기의 전압변동을 최소값이 97.5%, 1.5초경과 후 안정화 정도는 100.4%가 되어 Class Rule(전압변동을 최대값 85%~120%, 1.5초 이내에 전압변동 3%미만)을 만족한다. 따라서 발전기의 Governor가 Case3의 해석상황에서도 적절히 모델링되었음을 알 수 있다.

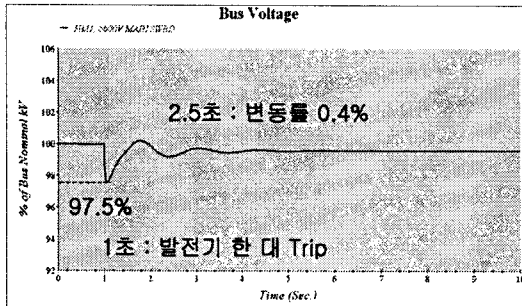


그림 7. Case3의 과도안정도 해석결과

### 3.2.4 Case4에 대한 Transient Stability Analysis

Case4는 항해시(발전기 4대, 추진전동기 2대 기동) 11MW급과 5.5MW급 발전기 각 한 대씩 Trip시키는 상황이다. 특히, 발전량이 부하량을 감당할 수 있도록 발전기 두 대 Trip후 1초 후에 12MW급 추진전동기 한 대를 Trip시켰다. 그림8의 해석결과를 보면 1초에 발전기 Trip시 발전기의 전압변동을 최소값이 91.3%, 2초에 추진전동기 Trip시 발전기의 전압변동을 최대값이 103.5%로 Class Rule(전압변동을 최대값 85%~120%)을 만족하였으며, 안정화 정도도 추진전동기 Trip 후 1.5초경과시 101.2%가 되어 Class Rule(1.5초 이내에 전압변동 3%미만)을 만족하였다. 따라서 발전기의 Governor가 Case4의 해석상황에서도 적절히 모델링되었음을 알 수 있다.

이와 같이 설정된 4가지 상황에 대한 과도안정도 해석결과를 표2에 나타내었으며, 발전기의 최대 전압변동률과 안정화 시간이 모두 Class Rule을 만족하므로 전기추진선박 시스템이 과도상태 시 안정한 것을 알 수 있다. 아울러, 발전기의 Governor파라미터도 적절히 모델링되었음을 알 수 있다.

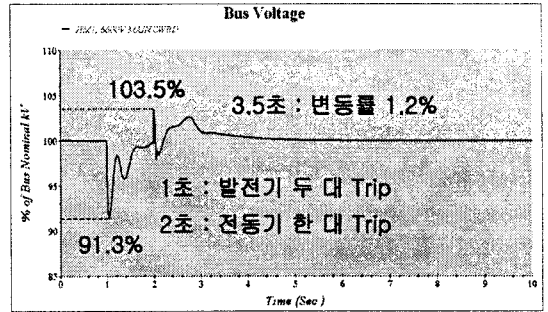


그림 8. Case4의 과도안정도 해석결과

표 2. Transient Stability Analysis 해석결과

구분	최대 전압변동률 (Class Rule:85%~120%)	안정화 시간 (Class Rule:1.5초 후 3%)
Case1	102.2%	0.4%
Case2	103.65%	0.8%
Case3	97.5%	0.4%
Case4	91.3%, 103.5%	1.2%

## 4. 결 론

본 논문에서는 전기추진시스템을 채택한 대형 LNG선에 대한 정동특성을 검토하고자 항해시와 LNG Unloading시의 Load Flow Analysis, Cargo Pump기동시의 Motor Starting Analysis, 항해시 발생할 수 있는 4가지 설정상황에 대한 Transient Stability Analysis를 수행하였다. 각 해석에 대해 전압제한조건(IEEE Std 141-1993) 및 Class Rule과 같은 실제 선박설계 시 고려되는 기준을 근거로 결과를 관찰하였다. 그 결과, 전기추진선박 시스템의 모델링 적합성과 시스템 동적 운전시 및 사고발생시 발전기와 시스템 안정성을 검증하였다.

이와 같이 본 논문에서는 전기추진선박 시스템의 전반적인 안정성을 검증하고자 하였으며, 현재는 전기추진선박 시스템의 보호계전기를 설정하여 전압레벨별 보호협조분석을 추진 중이다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Won Jeon, Yong-Peel Wang, Jong-Hwa Jeong, Sung-Ka k Lyu, Sang-Yong Jung, 'Power Characteristic Analysis of Assumed Short Circuit Instance of Electric Ship Propulsion System', 한국마린엔지니어링학회지 제32권 제2호, p.323-329, 2008.
- [2] 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.
- [3] Timothy J. Mc Coy, 'Trend in Ship Electric Propulsion', IEEE, Vol.1, pp.343-346, 2002.
- [4] 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.
- [5] 김소연, 'Suppression of the Thrust Loss for the Maximum Thrust Operation in the Electric Propulsion Ship', 서울대학교 석사학위논문, 2007년 2월
- [6] 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.