

## 선박용 전기추진시스템의 운전조건별 Dynamic 특성 연구

전 원\* · 왕용필\* · 정상용†

(원고접수일 : 2008년 7월 30일, 원고수정일 : 2008년 9월 29일, 심사완료일 : 2008년 11월 12일)

### Dynamic Characteristic Analysis at Each Operating Condition for Electric Ship Propulsion System

Won Jeon\* · Yong-Peel Wang\* · Sang-Yong Jung†

**Abstract :** This paper deals with modeling and dynamic characteristic analysis of a large-powered LNG electric ship propulsion system. Basically, we perform to verify the adequacy of system modeling on the sea going mode and LNG unloading mode based on load flow analysis. And then, we observe the dynamic characteristic of system to perform motor starting analysis and transient stability analysis. Particularly, this paper examine analysis results in comparison with the IEEE standard 141 and the class rule. Hence, this paper has evaluated stability of the electric ship propulsion system at static and dynamic conditions.

**Key words :** Electric ship(전기 선박), Electric ship propulsion system(전기추진선박시스템), Load flow(전력조류), Motor starting analysis(전동기구동해석), Transient stability analysis(과도안정도해석)

### 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 능력 향상을 이룰 수 있다. 넷

째, 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, 추진전동기시스템은

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

\* 동아대학교 전기공학과

통상 2대로 구성되며, 항해 시 한 대의 추진전동기가 고장 나더라도 나머지 한 대의 추진전동기에 의해 무사히 귀환할 수 있도록 구성되어 있다. 이러한 전기추진시스템의 구조는 전기적 부품간의 상호 연계성이 고려되어 설계되어져 있으므로 다양한 동작 상태에서의 전압 및 전력조류가 허용범위 내인지를 검토하여 시스템의 정적 안정도를 판단하는 것과 시스템의 동적상황에 따라 발전기와 추진전동기의 전압변동률을 검토하여 시스템의 동적 안정도를 판단하는 것은 매우 중요하다.

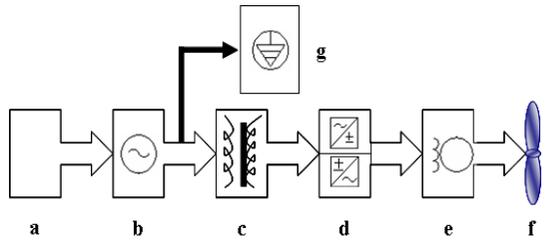
따라서 본 논문에서는 대형LNG선을 모델로, 전기추진선박시스템의 전력조류해석(Load Flow Analysis)을 선박의 운전상태(항해시와 LNG Unloading시)에 따라 수행하여 전압제한조건(IEEE Std 141-1993, 5%미만)을 근거로 시스템의 전력특성을 분석한다<sup>[1]</sup>. 또한, 선급규정(Class Rule)을 근거로 전동기 기동해석(Motor Starting Analysis)을 수행하여 유도전동기 기동시 시스템의 전압 변동률 및 발전기의 주파수변화율에 대해 안정성을 검토하고, 선박 항해시 발생할 수 있는 발전기 및 추진전동기의 상태변동을 설정하여 과도안정도해석(Transient Stability Analysis)을 수행하여 시스템의 동적안정성을 분석한다<sup>[2]~[5]</sup>.

## 2. 선박용 전기추진시스템

일반적으로 선박용 전기추진시스템의 전력구조는 Fig.1과 같이 다양한 전력부품들로 이루어져 있다<sup>[6]~[7]</sup>. 따라서, 전력특성해석을 하여 시스템의 정적 안정성과 동적 안전성에 대해 검토하여야 한다. 본 논문에서는 소프트웨어 ETAP(Electrical Transient Analyzer Program)을 사용하여 아래와 같은 순서로 선박용 전기추진시스템에 대한 정특성 및 동특성 해석을 수행한다.

- ① 항해시와 LNG Unloading시에 대한 정특성해석(전력조류해석)을 한다.
- ② LNG Unloading에 대한 Cargo Pump 기동시 동특성해석(Motor Starting Analysis)을 한다.

- ③ 항해시 발생할 수 있는 발전기 및 추진전동기 변동에 대해 동특성해석(Transient Stability Analysis)을 한다.



- 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

## 3. 선박용 전기추진시스템의 정특성 해석

### 3.1 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>[8]~[9]</sup>.

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

#### 3.1.1 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 Fig.2와 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 전압 제한조건(IEEE Std 141-1993, 5%미만)을 만족하여 안정하며, 전력조류의 흐름방향도 정상적으로 발전기에서 부하로 흐른다.

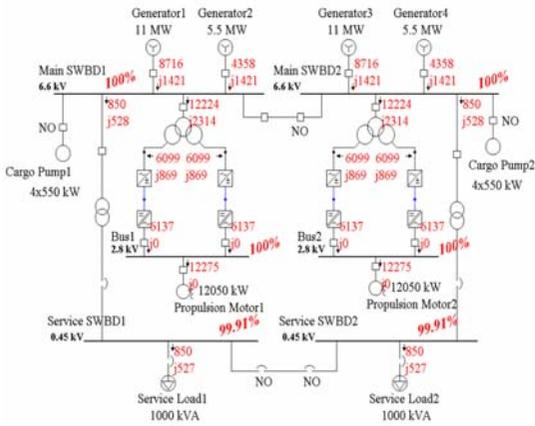


Fig. 2 Load flow analysis result on sea going mode

Table 1 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

Table1의 검토 결과를 근거로 선박용 전기추진 시스템의 발전량 및 부하설정이 항해시의 운전모드에서 적절하게 모델링되었으며 정적운전 상태에서 안정하다 할 수 있다.

3.1.2 LNG Unloading시에 대한 전력조류해석 전기추진선박시스템의 운전상태가 LNG Unloading

시는 11MW급 발전기 1대가 LNG를 이송하기 위해 사용되는 Cargo Pump 8대 및 서비스부하에 전력을 공급한다.

LNG Unloading시 전력조류해석 결과로 전력의 흐름은 Fig.3과 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 전압제한조건(IEEE Std 141-1993, 5%미만)을 만족하여 안정하며, 전력조류의 흐름방향도 정상적으로 발전기에서 부하로 흐른다.

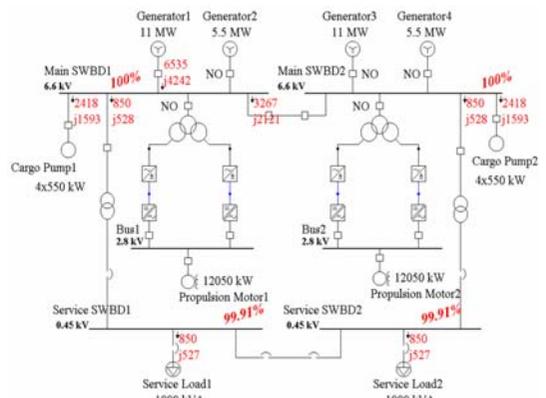


Fig. 3 Load flow analysis result on LNG unloading

Table 2 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

Table2의 검토 결과를 근거로 선박용 전기추진 시스템의 발전량 및 부하설정이 LNG Unloading의 운전모드에서 적절하게 모델링되었으며 정적운전 상태에서 안정하다 할 수 있다.

#### 4. 선박용 전기추진시스템의 동특성 해석

##### 4.1 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.

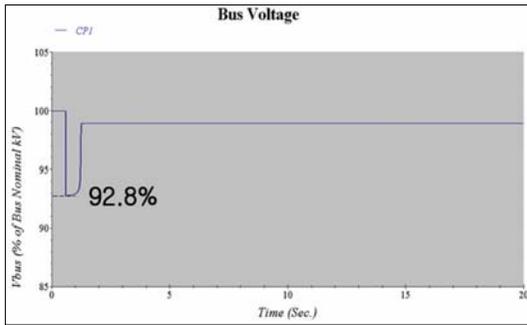


Fig. 4 BUS voltage variation at the cargo pump starting on LNG unloading

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. Fig.4는 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.

아울러, Cargo Pump 기동시 발전기의 속도(주파수) 변동 안정성을 검토하였는데, Fig.5를 보면 Cargo Pump 기동시 속도가 514.3rpm에서 최저 속도 506.6rpm까지 1.5% 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 Cargo Pump 기동시 발전기의 속도 변화량이 Class Rule(10%미만)을 만족하므로

Cargo Pump 기동시 발전기가 안정한 상태임을 알 수 있다.

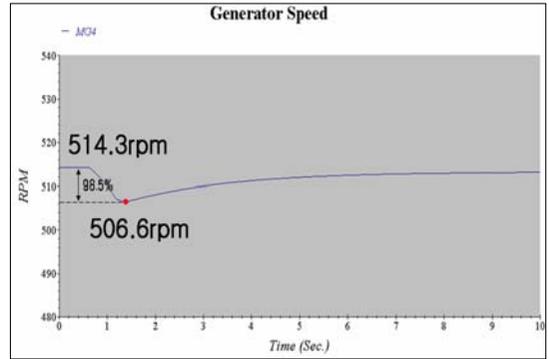


Fig. 5 Generator speed variation at the cargo pump starting on LNG unloading

Table 3 Review result about motor starting analysis

BUS voltage variation	Class rule (Standard)	85% ~ 120%
	Result value	92.8% (Stability)
Generator speed variation	Class rule (Standard)	90% ~ 110%
	Result value	98.5% (Stability)

따라서 Cargo Pump 기동시 시스템의 전압강하 및 발전기의 속도변동률이 Table 3과 같이 Class Rule을 만족하여 선박용 전기추진시스템이 부하의 동적 변동(LNG Unloading시)에 대해 안정함을 알 수 있다.

##### 4.2 Transient Stability Analysis

전력시스템에 부하변동이나 선로사고 등과 같은 교란이 발생하면 시스템이 전반적으로 불평형 상태가 되어 발전기 및 전동기가 탈조하거나 전력계통이 붕괴되는 사고가 발생한다. 따라서 본 논문에서는 선박항해시 발생할 수 있는 상황(Table 4)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.

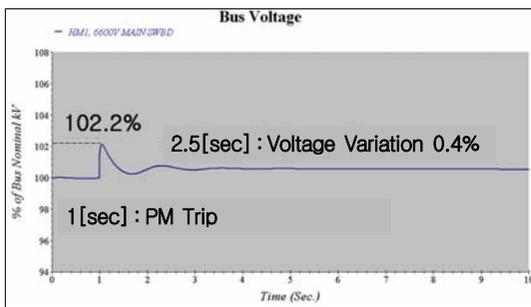
**Table 4 The state establishment on transient stability analysis**

Case	Initial state						Change state					
	Generator				PM		Generator				PM	
	G1	G2	G3	G4	PM1	PM2	G1	G2	G3	G4	PM1	PM2
Case1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○
Case2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×
Case3	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○
Case4	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	×	○

(○:Activation, ×:Trip)

4.2.1 Case1의 Transient Stability Analysis

항해시(발전기 4대, 추진전동기 2대 기동) 추진 전동기 한 대가 Trip되는 상황을 Case1으로 설정하여 과도안정도 해석을 수행하였다. Fig.6은 과도안정도 해석결과로 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 모델링되었었다는 것을 알 수 있다.

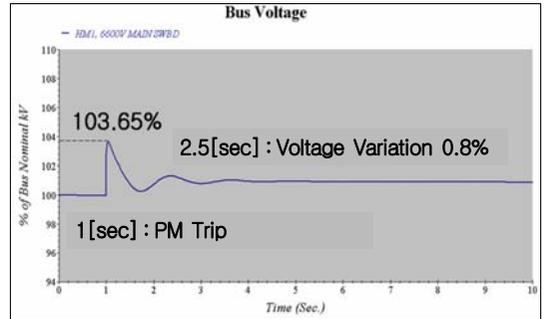


**Fig. 6 Analysis result of case1**

4.2.2 Case2의 Transient Stability Analysis

항해시(발전기 4대, 추진전동기 2대 기동) 추진 전동기 두 대가 Trip되는 상황을 Case2로 설정하여 과도안정도 해석을 수행하였다. 해석결과 (Fig.7) 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 경우에서도 발전기의 Governor가 적절히 모델링되었었다는 것을 알 수 있다.

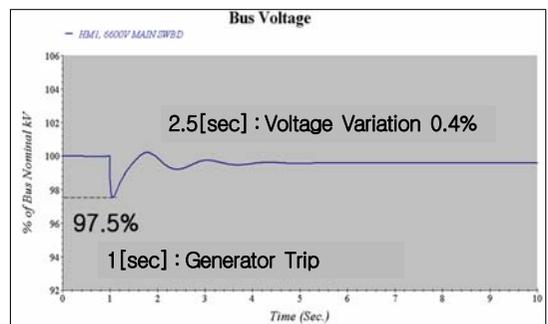
1.5초 이내에 전압변동 3%미만)을 만족한다. 따라서 Case2의 해석상황에서도 발전기의 Governor가 적절히 모델링되었었다는 것을 알 수 있다.



**Fig. 7 Analysis result of case2**

4.2.3 Case3의 Transient Stability Analysis

항해시(발전기 4대, 추진전동기 2대 기동) 5.5MW급 발전기 한 대가 Trip되는 상황을 Case3으로 설정하여 과도안정도 해석을 수행하였다. Fig.8의 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 Case3의 경우에서도 발전기의 Governor가 적절히 모델링되었음을 알 수 있다.



**Fig. 8 Analysis result of case3**

4.2.4 Case4의 Transient Stability Analysis

Case4는 항해시(발전기 4대, 추진전동기 2대 기동) 11MW급과 5.5MW급 발전기 각 한 대씩 Trip시키는 상황이다. 특히, 발전량이 부하량을 감

당할 수 있도록 발전기 두 대 Trip후 1초 후에 12MW급 추진전동기 한 대를 Trip시켰다. Fig.9의 해석결과를 보면 1초에 발전기 Trip시 발전기의 전압변동률 최소값이 91.3%, 2초에 추진전동기 Trip시 발전기의 전압변동률 최대값이 103.5%로 Class Rule(전압변동률 최대값 85%~120%)을 만족하였으며, 안정화 정도도 추진전동기 Trip후 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.

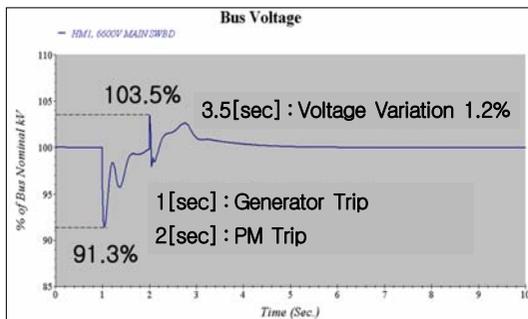


Fig. 9 Analysis result of case4

이와 같이 설정된 4가지 상황에 대한 과도안정도 해석결과를 Table 5에 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.

Table 5 Analysis result on the transient stability analysis

Case	Voltage variation (Class Rule 85%~120%)	Setting time (Class Rule Less than 3% on after 1.5sec)
Case1	102.2%	0.4%
Case2	103.65%	0.8%
Case3	97.5%	0.4%
Case4	91.3%, 103.5%	1.2%

## 5. 결 론

본 논문에서는 전기추진시스템을 채택한 대형 LNG선에 대한 정·동특성을 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 선급규정(Class Rule)과 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 선박용 전기추진시스템의 정적 및 동적 변동에 대해 전반적인 안정성 검증의 체계를 구축하고자 하였다.

## 감사의 글

이 논문은 2008학년도 동아대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- [1] Won Jeon, Yong-Peel Wang, Jong-Hwa Jeong, Sung-Kak Lyu, Sang-Yong Jung, "Power Characteristic Analysis of Assumed Short Circuit Instance of Electric Ship Propulsion System", 한국마린엔지니어링학회지 제32권, 제2호, pp.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 I, pp.330-335, 2002.
- [3] Timothy J. Mc Coy, "Trend in Ship Electric Propulsion", IEEE, Vol.1, pp.343-346, 2002.

- [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 I, 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] 김소연, “Suppression of the Thrust Loss for the Maximum Thrust Operation in the Electric Propulsion Ship”, 서울대학교 석사학위논문, 2007년 2월

## 자 자 소 개

### 진 원(全 源)

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



### 왕용필(王龍泌)

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



### 정상용(鄭相龍)

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

