

## 독립 6상 BLDC 전동기의 특성해석에 관한 연구

정성영\* · 공영경\*\* · 빈재구\*\* · 신판석\*\*\* · 김장목\*\*\*\* · 최홍순\*\*\*\*\* · 오진석†

(원고접수일 : 2009년 4월 28일, 원고수정일 : 2009년 8월 7일, 심사완료일 : 2009년 8월 28일)

### Characteristic Analysis of Independent 6 phase BLDC Motor

Sung-Young Jung\* · Young-Kyong Kong\*\* · Jae-Goo Bin\*\* · Pan-Seok Shin\*\*\* ·  
Jang-Mok Kim\*\*\*\* · Hong-Soo Choi\*\*\*\*\* · Jin-Seok Oh†

**Abstract :** This paper is described BLDC motor in the submarine propulsion system which is asked high power per unit area. This study analyzes the independent 6-phase BLDC motor a specific extended by existing the independent 3-phase BLDC motor and propose forward development direction. Independent 6-phase motor has a characteristics that phases of stator are independent electrically with each other and two's independence 3-phase BLDC motor are linked with each difference of 60 degree. Six-phase BLDC motor is simulated with Matlab-simulink, the simulation result has a high current and low torque pulsation than existent independence 3-phase BLDC motor.

**Key words :** BLDC(Brushless DC) motor(브러시리스 직류 전동기), Permanent magnet propulsion motor(영구자석 추진 전동기), Hysteresis current control(히스테리시스 전류 제어), Current limit control(전류 한계 제어), Simulation(시뮬레이션)

#### 기호 설명

$V_{ab}$  : Y결선 선간 전압

$R_{ab}$  : Y결선 선간 저항

$I_{ab}$  : Y결선 선간 전류

$L_t$  : 전동기 권선인덕턴스

$e_{ab}$  : Y결선 선간 역기전력

$V_a$  : 독립상 상 전압

$R_a$  : 독립상 상 저항

$I_a$  : 독립상 상 전류

$e_a$  : 독립상 a상 역기전력

$T$  : 전동기 토크

$w$  : 기계 각속도

$e_x$  : (x=1,2,3... n) n상의 역기전력

† 교신저자(한국해양대학교 선박전자기계공학부, E-mail: ojs@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4866)

\* 한국해양대학교 대학원 메카트로닉스

\*\* 국방과학연구소

\*\*\* 홍익대학교

\*\*\*\* 부산대학교

\*\*\*\*\* 경북대학교

### 1. 서 론

반도체 기술의 급격한 발전과 더불어 선박에 활용되는 추진체계에도 많은 변화가 발생하고 있다. 특히 다양한 조건을 요구하는 특수선 분야에서는 현재 기존의 디젤 추진 시스템보다 진동 및 소음 측면에서 유리한 전기 추진 시스템이 각광 받고 있다<sup>(1)</sup>.

일반적으로 수중함의 경우 유도전동기(induction motor)를 사용하여 추진 시스템을 설계하지만, 수중함의 경우 공간적 제약성으로 인해 전력의 효율성보다 단위 면적당 높은 출력을 요구한다. 그러므로 일반적으로 수중함에는 유도전동기가 아닌 영구자석형 전동기(permanent magnet propulsion motor)를 사용하고 있으며, 수중함의 전원 시스템은 축전지 전원을 기반으로 한 직류 전원 시스템을 이용하기 때문에, BLDC(Brushless DC electric motor) 전동기를 사용한다.

본 논문에서는 다상 영구자석형 전동기중 하나인 독립 6상 BLDC 전동기를 수학적으로 모델링하여 체계적인 해석을 수행하고, 기존의 독립 3상 BLDC 전동기와 비교하여 수중함에 적합한 전동기를 설계하는 기초 자료를 확보하고자 한다.

### 2. 독립 6상 BLDC 전동기

#### 2.1 독립상 BLDC 전동기의 구조

독립 6상 BLDC 전동기는 2대의 독립 3상 BLDC 전동기가 복합되어 있는 구조이다. 여기서 독립상이란 권선 구조가 기존의 Y결선 방식이 아닌 각 상이 별개로 분리되어 있는 구조를 말한다.

독립상의 경우 각 상이 분리되기 때문에 중성점(Neutral point)이 없는 형태의 전동기이다. 때문에 전기적으로는 분리되어 있으나, 자기적으로는 상호 인덕턴스, 자기 인덕턴스에 의해 연관이 됨으로 기존 독립 3상 전동기와 유사한 방법으로 동작하게 된다<sup>(2)</sup>.

Fig. 1은 Y결선 구조와 독립상 구조의 인버터

의 스위칭에 따른 전체 전압의 연결을 나타낸 것이다. 입력되는 전체 전압 중 각상에 전압은 Y결선의 경우 최대 전체 전압의 절반이 인가되며 독립상의 경우 전체 전압이 인가되는 것을 알 수 있다. Fig. 1에서 2,3번은 상변환을 나타낸 것이며 1번은 도통을 나타낸 것이다. 독립상으로 할 경우 전동기의 전압 방정식에서도 차이를 갖는다. Y결선은 선간 전압의 형태로 전압 방정식을 구성하는 반면 독립상은 상전압으로 전압방정식을 구성한다.

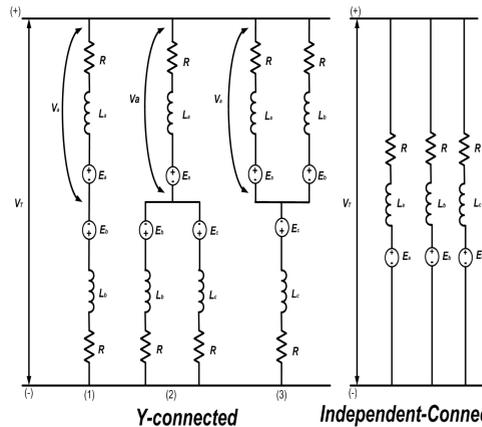


Fig. 1 Comparison of Y-Connected and Independent-Connected

Y결선에서의 선간 전압이 전체 전압이 되고 독립상에서는 상전압이 전체 전압이 된다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다. 식 (1)은 Y결선에서의 선간 전압을 나타낸 것이고 식 (2)는 독립상의 상전압을 나타낸 것이다.

$$V_{ab} = R_{ab}I_{ab} + L_l \frac{dI_{ab}}{dt} + e_{ab} \tag{1}$$

$$V_a = R_a I_a + L_l \frac{dI_a}{dt} + e_a \tag{2}$$

$V_{ab}$ 와  $V_a$ 는 각 인버터 입력 전압이다. Y결선의 경우 2개의 상이 직렬로 연결된 형태로 구성되므로 인버터 전체 전압의 절반이 인가되나, 독립상의 경우 하나의 상에 인버터의 전체 전압이 인가되므로 최대 상전류가 증가하며, 상전류의 증가는 식 3에

의해 토크의 증가로 나타나게 된다. 식 (3)은 3상 BLDC 전동기의 토크를 나타낸다.

$$T = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{w} \quad (3)$$

이때  $w$ 는 각속도,  $T$ 는 전체 토크를 나타낸 것이며, 식 3에 의해 동일 속도, 동일 역기전력에서 상전류가 증가하면 전체 토크가 증가하는 것을 알 수 있다<sup>[2]</sup>.

### 2.2 독립 6상 BLDC 전동기

대용량 형태의 전동기는 대부분 상수를 증가하여 출력되는 토크의 크기를 증가 시킨다. 수식 (3)을 다상 형태로 변형하면 식 (4)와 같다.

$$T = \frac{e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3 + \dots + e_n i_n}{w} \quad (4)$$

Y결선의 다상 전동기는 대부분  $2n+1$  ( $n=1,2,3,\dots$ ) 형태의 상수를 가지는 것에 비해, 독립상 형태의 다상 전동기는  $2n+1, 3n$  ( $n=1,2,3,\dots$ )의 2가지 상수를 가질 수 있다.  $3n$ 형태는 3상 전동기가 위상차를 갖고 겹쳐 있는 구조이다.

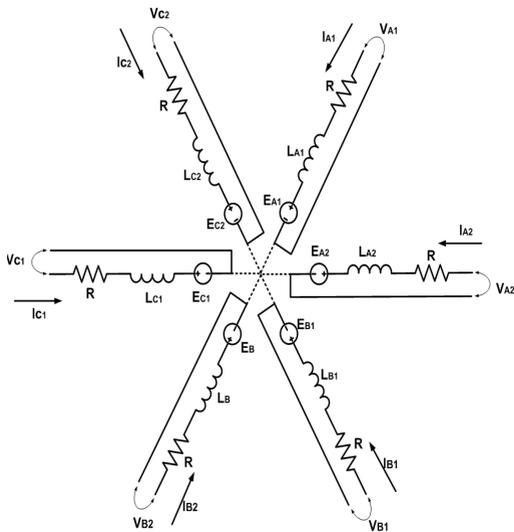


Fig. 2 Independent 6 phase BLDC motor electronic structure

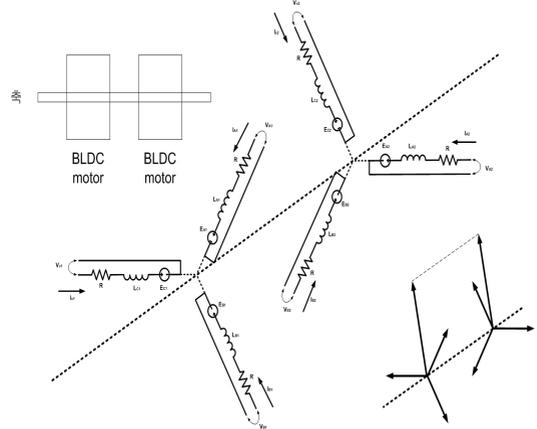


Fig. 3 Independent 6 phase BLDC motor structure

Fig. 2와 3은 각각 독립 6상 전동기의 전기적 구조와 전동기 구조를 나타내고 있다. 6상의 경우 3상이 위상차를 갖고 겹쳐 있는 형태로 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 이때 중성점을 통하여 상전류가 흐르게 되고, 두 개의 3상이 서로 영향을 주어 전동기가 구동되지 못한다. 하지만 독립상의 경우 중성점이 없기 때문에 3상이 독립적으로 구동하게 됨으로 전동기를 2대를 겹쳐 놓은 형태로 구동이 가능하다.

### 2.3 역기전력 파형 및 전류 파형

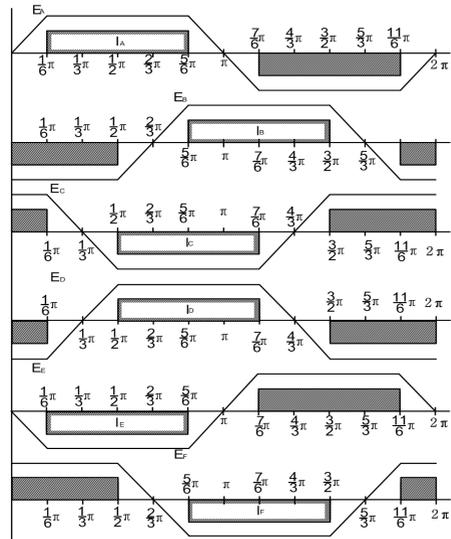


Fig. 4 6 EMF of phase BLDC motor

Fig. 4에 빗금 친 부분은 역기전력 파형에 따른 상전류 도통 구간을 나타낸 것이다. 독립 6상 전동기의 경우 상수의 증가로 인해 독립 3상 전동기에 비해 높은 토크를 발생시킬 수 있으며, 역기전력 파형  $E_a, E_b, E_c$ 을  $\frac{1}{3}\pi$  만큼 이동시키면  $E_d, E_e, E_f$ 가 되므로 스위칭 알고리즘에 따른 Main controller의 부하를 줄일 수 있다는 장점이 있다.

2.4 인버터부 연결 구조

Fig. 5는 독립상으로 구성된 전동기 인버터의 결선도를 나타낸 것이다. 독립 6상 전동기의 각 상은 인버터를 통하여 독립적으로 구성되며, 각 상은 하나의 H-bridge Inverter를 통하여 제어된다<sup>[3]</sup>.

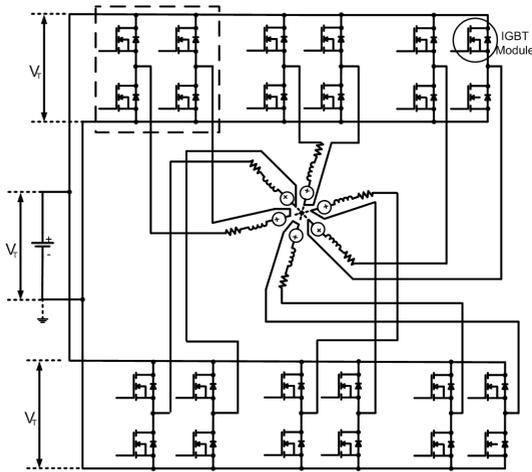


Fig. 5 Inverter connected drawing of Independent 6 phase BLDC motor

독립 6상 BLDC 전동기는 독립 3상 BLDC 전동기 2대가 위상차  $\frac{1}{3}\pi$  를 가지고 한축에 연결된 형태를 취한다. Fig. 5를 보면 독립 6상 BLDC 전동기를 구동하기 위해 크게 2대의 인버터가 설치되어 있는데, 1대의 인버터가 하나의 독립 3상 BLDC 전동기를 구동한다. 만약의 경우 2대의 인버터 중 한 대가 고장이 나서 스위칭이 불가능한 상황이 되어도 다른 1대의 인버터만으로 6상 전동기를 3상 형태로 구동할 수 있다는 장점을 가진다.

3. 독립다상 전동기 인버터 제어 알고리즘

3.1 전류 제어 알고리즘

독립 6상 전동기를 제어하기 위하여 본 논문에서는 히스테리시스 전류제어기를 적용하였다. 히스테리시스 전류제어기는 순시 궤환 제어기의 한 종류로써, 전류 오차를 측정하여 오차가 정해진 밴드를 벗어나면 인버터의 스위치 상태를 바꾸어 오차가 밴드 내에 머무르게 한다. 이 제어기는 밴드폭이 작을 경우 스위칭 주파수가 급격히 증가한다는 단점이 있으나<sup>[4]</sup>, 동적 응답이 빠르고, 최대전류 제한능력을 가지며, 부하 파라미터 변동에 민감하지 않다는 장점을 가진다.

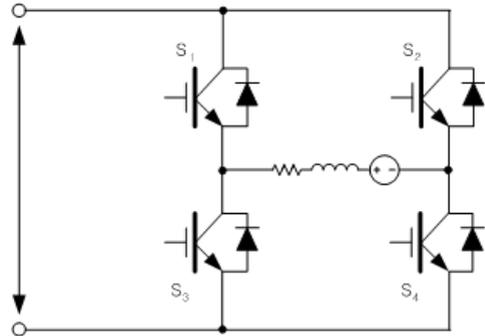


Fig. 6 H-bridge inverter Connected drawing of Independent 6 phase BLDC motor

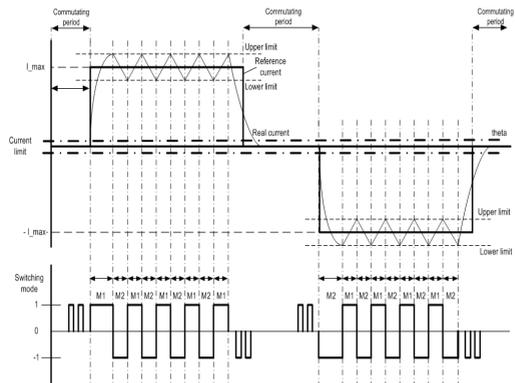


Fig. 7 Hysteresis current control of phase A

Fig. 6과 7은 6상 BLDC 전동기 A상의 히스테리시스 전류 제어 알고리즘과 스위칭 패턴을 나타

낸 것이다.

스위칭 패턴 M1은 스위치  $S_1, S_4$ 가 on이고  $S_2, S_3$ 가 off 동작이며, M2는 스위치  $S_2, S_3$ 가 on이고  $S_1, S_4$ 가 off 동작이다.

Y결선 BLDC 전동기는 중성점의 존재로 인해 별도의 스위칭 알고리즘이 없어도 상전환시 각 상의 전위는 일정하게 유지되지만, 독립상 BLDC 전동기의 경우 중성점이 없기 때문에 스위칭 패턴을 적용하지 않으면 상의 전위가 불분명한 상태가 되어 작은 상전류가 흐르게 되고, 이 상전류는 전압 맥동을 가져온다. 이러한 상황을 방지하기 위해 상전환시에도 히스테리시스 전류 제어 알고리즘을 적용하여 상전류의 흐름을 억제하였다.

#### 4. 시뮬레이션 모델링

앞서 설명한 독립 6상 BLDC 전동기를 Mathworks사의 Matlab - Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 모델은 Fig. 8과 같이 크게 컨트롤러, 인버터, 전원, BLDC 모터로 나눌 수 있다.

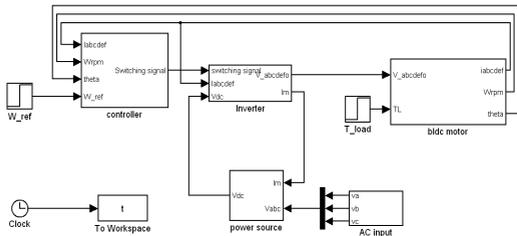


Fig. 8 Simulation block of independent 6 phase BLDC motor

Table 1 Specification of independent 6 phase BLDC motor

Back-EMF constant	0.2264[V/(rad/sec)]
Stator resistance	4.25[Ω]
Self-inductance	8.35[mH]
Mutual inductance	0[mH]
Number of poles	12
Rotor inertia	8.2614*10 <sup>-4</sup> [kg·m <sup>2</sup> ]
Torque constant	0.2264[N·m]
Load Torque	6.2[N·m]

Table 1과 2는 본 시뮬레이션에 사용된 BLDC 전동기와 전원의 사양을 나타내고 있다.

Table 2 Specification of source voltage

Capacitance	22000*10-6uF
Frequency	60Hz
Input voltage	3Φ 220V
Initial voltage	100V

#### 5. 시뮬레이션 결과

독립 3상 BLDC 전동기와 독립 6상 BLDC 전동기의 특성을 비교하기 위해 속도 1200rpm, 부하토크 6.2N/m의 동일한 조건에서 히스테리시스 전류 제어를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다.

Fig. 9은 독립 6상 전동기의 역기전력과 상전류를 나타낸 것이다. 독립 6상 전동기의 특징인 A상과 E상, B상과 F상, C상과 D상이 정확하게 역상의 형태를 취하고 있으며, 각 상간 위상차는  $\frac{1}{3}\pi$ 임을 확인할 수 있다.

Fig. 10과 11은 독립 3상, 독립 6상 전동기의 A상 역기전력과 상전류를 나타낸 파형이다. 동일한 조건에서 각 상에 흐르는 전류량이 3상에 비해 6상이  $\frac{1}{2}$ 배 정도임을 확인할 수 있으며, 그에 따라 전류 맥동 또한 감소한 것을 확인할 수 있다.

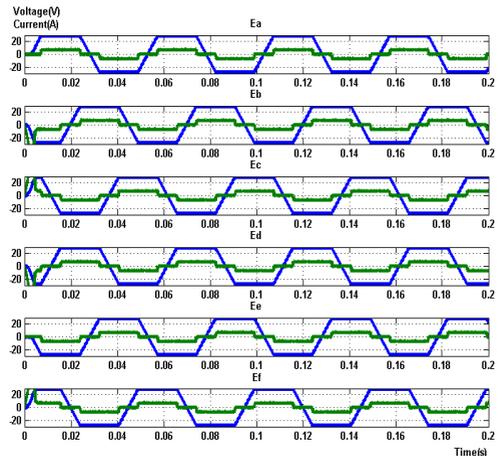


Fig. 9 EMF, phase current of independent 6 phase BLDC motor

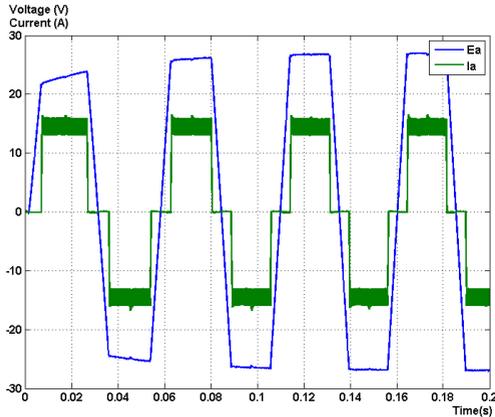


Fig. 10 EMF, current of Phase A of independent 3 phase BLDC motor

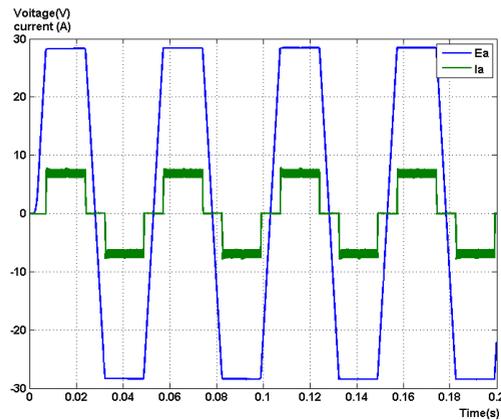


Fig. 11 EMF, current of Phase A of independent 6 phase BLDC motor

## 6. 결 론

본 연구는 독립 3상 BLDC 전동기를 확장한 독립 6상 BLDC 전동기에 대하여 수학적 모델링을 진행하였으며, 히스테리시스 전류제어기를 적용하여 시뮬레이션하여 결과를 확인하였다.

시뮬레이션 결과 독립 6상 BLDC 전동기는 같은 조건일 경우 독립 3상 BLDC 전동기에 비해 높은 출력을 가지며, 낮은 전류 맥동을 가짐을 확인할 수 있다. 또한 독립 6상 BLDC의 경우 3상이 정확하게 역상으로 배치되기 때문에, Main Controller의 연산량이 반으로 줄어들어 Main Controller의 부하를 줄일 수 있으며, 2대의 독립

3상 BLDC가 한축에 연결된 형태를 취함으로써 1대의 인버터가 동작을 하지 않는 경우에도 다른 1대의 인버터만으로 동작을 할 수 있다는 장점을 가진다.

본 연구는 시뮬레이션을 통한 6상 전동기의 특성을 살펴보는데 중점을 뒀으며, 차후 실제 전동기에 적용하기 위해 토크 맥동<sup>[5]</sup>과 스위칭 소자의 특성 및 데드 타임에 관한 추가적인 연구가 필요하며, 다양한 알고리즘에 대한 검증이 있어야 한다. 또한, 실제 실험을 통한 전동기 특성 해석이 추가적으로 진행되어야 할 것으로 생각된다.

## 후 기

수중운동체기술특화연구센터의 지원으로 수행됨

## 참고문헌

- [1] 공영경 “전기추진선박의 추진 체계 발전 방향”, 한국마린엔지니어링 학회지 pp. 548-554, 제 27권, 제5호, 2003
- [2] Kwan-Jun Jo and Jin-Seok Oh, “Characteristic analysis of independent 3 phase BLDC motor”, The Korean Institute of Power Electricronics, pp. 277-284, Vol. 12, No. 3, 2007.
- [3] Jin-Seok Oh, Heui-han Yoo, Jang-mok Kim, Kwan-Jun Jo, Jun-Ho Kwak and Hyung-Shic oh, “Characteristic analysis of inverter for multi-phase BLDC motor”, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 31, No. 8, pp. 983-989, 2007.
- [4] 이석, 전윤석, 목형수, 김덕근, “7상 BLDC 전동기 구동시스템을 위한 새로운 전류제어기에 관한 연구”, 전력전자학회논문지 제6권, 제2호, pp. 191-201, 2001.4
- [5] Byoung-Hee Kang, Hyoung-Soo Mok and Gyu-Ha Choc, “Optimum Torque Control Method for BLDC Motor with

Minimum Torque Pulsation", The Korean Institute of Power Eletrictrics, Vol. 8, No. 1, 2002.

**저 자 소 개**



**정성영(鄭星泳)**

1985년 4월생. 2008년 한국해양대학교 선박전자기계공학부 제어시스템 전공(공학사), 현재 동 대학원 석사과정



**공영경(孔泳卿)**

1956년 5월 1일생. 1979년 홍익대 전기공학과 졸업. 1986년 부산대 대학원 졸업(석사), 1994년 한국해양대 대학원 졸업(공학박) 현재 국방과학연구소 책임연구원.



**빈재구(貧在久)**

1973년 3월 2일생. 1996년 부산대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 졸업(석사), 2007년 동대학원 졸업(공학박). 현재 국방과학연구소 선임연구원.



**신판석(申判錫)**

1953년 1월 28일생. 1977년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 Rensselaer Polytechnique Institute 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1989년~1993년 한국전기연구소 선임연구원. 1993년~현재 홍익대 전자·전기·컴퓨터공학부 부교수



**김장목(金長睦)**

1961년 8월 9일생. 1988년 부산대 전기공학과 졸업. 1991년 서울대 대학원 전기공과 졸업(석사), 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~2001년 한국전력연구원 선임연구원. 2001년 5월~현재 부산대 컴퓨터 및 정보통신연구소 기획부장 2001년3월~현재 부산대 전자전기공학부 부교수



**최흥순(崔鴻洵)**

1963년생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학부 졸업(박사). 1988년~1994년 삼성전기/삼성SDS. 1995~1997 기초전력공학연구소 선임연구원. 1997~2003 (주)코모텍 이사. 2003.9~2007.2 성균관대학교 정보통신공학부 연구교수. 2007.3~현재 경북대 전자전기공학부 조교수. 주 관심분야: 전동기 설계, 전기 및 기계 융합, 전자장비 응용.



**오진석(吳珍錫)**

1960년 3월생. 한국해양대학교 공학박사(전기제어), 일본 큐슈대학 공학박사(에너지 시스템 설계). 영국 ZODIAC 선박회사 엔지니어, 1989년~1992년 국방과학연구소 연구원. 1996년~현재 한국해양대 전임강사, 조교수, 부교수, 교수. 2001년~2002년 영국 CARDIFF대학 교환교수. 2002년~2009년 산학연컨소시엄사업단장. 2002년~2004년 한국마린엔지니어링학회 편집위원. 2003년~2006년 영국 K.O.Tech Consultant, 2005년~2006년 부·울 산학연 협의회 회장, 2009~현재 산학연 ETRS 센터 소장