

간단한 위치검출기를 이용한 SRM 가변속 디지털 제어시스템 개발

千 潼 進, 鄭 道 永, 李 相 鎬, 李 奉 燮, 朴 永 錄

Development of Variable Speed Digital Control System for SRM using Simple Position Detector

Dong-Jin Cheon, Do-Young Jung, Sang-Ho Lee, Bong-Sob Lee, Young-Rok Park

요 약

스위치드 리럭턴스 모터 (Switched Reluctance Motor : 이하 SRM) 는 이중 돌극형으로 되어있으며, 상권선은 고정자만 사용한다. 다른 어느 전동기보다도 간단한 구조를 가지고 있어 제작단가가 저렴하고, 기계적으로 견고하며, 고온 등의 열악한 환경에서도 신뢰성이 높으며, 브러쉬 등이 없어 유지비가 거의 들지 않는 장점을 지니고 있다. 그러나 SRM은 상여자를 위하여 회전자의 위치정보를 알아야하므로 위치 검출기가 필요하고, 정속도 운전을 위하여 타코 발전기나 엔코더가 부가적으로 필요하다. 그러나 본 논문에서는 회전자의 속도추정을 얻기 위하여 고가의 엔코더를 사용하지 않고, 단지 간단한 슬롯 디스크로부터 위치를 검출하여 속도를 추정할 수 있는 알고리즘을 제시하고 개발하였다. 속도 추정 알고리즘을 적용한 가변속 디지털 제어시스템을 구현하기 위하여 TI사의 TMS320F240-20MIPS 고정 소수점 연산용 프로세서를 사용하였다. 개발한 시스템을 실험한 결과 넓은 범위에 걸쳐 속도제어가 가능하였고, 단일 펄스모드, 하드 초핑모드 및 소프트 초핑모드 뿐만 아니라, 전류제어 동작모드에서 가변속 제어가 가능하였다. 그리고 어드밴스각 제어가 가능하였다.

ABSTRACT

A Switched Reluctance Motor(SRM) has double salient poles structure and the phase windings are wound in stator. SRM has more simple structure than that of other motor, thus manufacture cost is low, mechanically strong, reliable to a poor environment such as high temperature, and maintenance cost is low because of brushless. SRM needs position detector to get rotor position information for phases excitation and tachometer or encoder for constant speed operation. But, this paper doesn't use an encoder of high cost for velocity measurement of rotor. Instead of it, the algorithm for position detection and velocity estimation from simple slotted disk has been proposed and developed. To implement variable speed digital control system with velocity estimation algorithm, the TMS320F240-20MIPS fixed point arithmetic processor of TI corporation is used. The experimental results of the developing system are able to control speed with wide range, not only single pulse, hard chopping mode and soft chopping, but also variable speed control, and advance angle control.

Key Words : Switched Reluctance Motor(SRM), variable speed controller, position detector, DSP

1. 서 론

일반적으로 가변속 운전 분야에서는 직류 전동기가

교류 전동기에 비해 속도제어가 쉽다는 이유로 많이 사용되어져 왔다. 그러나 직류 전동기의 정류자판과 브러시를 사용함에 따라 구조가 복잡하여 가격 및 유

지비가 많이 들고, 인화성 지역에 사용할 수 없으며, 보수에 어려움 등 많은 단점을 가지고 있다. 이에 따라 최근 대용량의 전력용 반도체 개발과 전력전자 기술의 발달에 따라 구조가 간단하고 효율이 양호한 교류전동기가 많이 적용되고 있으며 이 중 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor : SRM)의 가변속 응용 분야에 대한 연구가 증가되고 있다.

SRM은 다른 어느 전동기보다도 간단한 구조를 가지고 있어 제작단가가 저렴하고, 기계적으로 견고하며, 고온 등의 열악한 환경에서도 신뢰성이 높으며, 브리쉬 등이 없어 유지비가 거의 들지 않는 장점을 지니고 있다. 또한 광범위한 속도제어 범위를 가지고 있으며 초고속 운전이 용이하고, 단위체적당 토크 및 효율면에서는 유도전동기보다도 우수한 것으로 나타나 있다.^{[1][2]} 그러나 SRM은 상여자를 위하여 회전자의 위치 정보를 알아야하므로 위치 검출기가 필요하고, 정속도 운전을 위하여 타코 발전기나 엔코더가 부가적으로 필요하다.

본 연구는 회전자의 속도추정을 얻기 위하여 고가의 엔코더를 사용하지 않고, 단지 간단한 슬롯 디스크로부터 위치를 검출하여 속도를 추정할 수 있는 알고리즘을 제시하고 개발하였다. 이 시스템을 구현하기 위하여 TI사의 TMS320F240-20MIPS 고정 소수점 연산용 프로세서를 사용하였다.^{[3][4][5]}

본 연구에서 제안된 속도추정 알고리즘을 이용하여 구현한 가변속 제어시스템에서, 정속도 운전 및 정토크 운전모드에 대한 동작을 실험하였다.

2. SRM의 동작원리

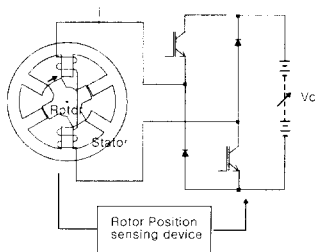


그림 1 SRM의 구조 및 구동
Fig. 1 Structure and Drive of SRM

SRM은 구조가 간단하고 이중 돌극형 구조로 되어 있으며, 그림 1은 6/4 SRM 구조 및 한상에 대한 구동

스위칭 회로를 보여주고 있다. SRM의 동작원리는 전자석의 원리와 같으며, 고정자 권선이 여자되면 근접한 회전자는 여자된 고정자와 정렬이 되려는 방향으로 움직이게 된다.

즉 회전자 위치의 변화에 따라 인덕턴스가 달라지므로 토크는 여자권선의 자기저항이 최소가 되는 위치에서 발생하게 되며, 발생토크는 식 (1)로 쓸 수 있다.

$$T = \frac{1}{2} i(\theta)^2 \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \tag{1}$$

여기서, T , $d\theta$, i 는 각각 토크, 고정자에 대한 회전자의 변위, 순시 전류값이며, $L(\theta, i)$ 는 고정자와 회전자의 인덕턴스이다.

SRM의 고속 회전시 각도 제어(angle control)는 대단히 중요하다.

그림 2는 인덕턴스의 상승구간에서 정(+) 토크가 발생하고, 감소 구간에서 부(-) 토크가 발생하므로 점화각(firing angle)의 중요성을 보여준다.

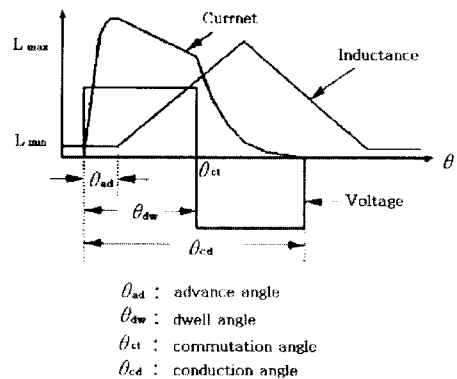


그림 2 SRM의 각도 제어
Fig. 2 Angle control of SRM

기본속도 이상의 고속 또는 중부하시에는 필요한 토크를 충분히 얻기 위해서 그림 2에 나타난 것과 같이 어드밴스각(θ_{ad})과 드웰각(θ_{dw})을 조절하는 방법을 사용한다. 즉 충분한 전류상승 시간은 가변부하에 따라 평탄전류를 유지하기 위하여 어드밴스각으로 정하고, 토크 구간은 그림 2의 부하전류 곡선에서 소호되는 전류가 인덕턴스 감소 구간 전까지이다. 그러므로 인덕턴스 감소구간에서 드웰각을 조절하여 토크 발생 영역을 최대한 이용하는 것이 필요하다.^{[1][6]}

3. 가변속 제어시스템 구현

간단한 위치센서로부터 얻은 출력을 DSP F240의 캡처 기능을 이용하여 θ_{ad} , θ_{dw} , θ_{cl} 를 계산하는 속도추정 알고리즘을 설명한다.

3.1 회전자 위치 추정

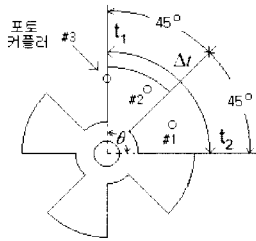


그림 3 포토커플러 위치
Fig. 3 Position of photo-coupler

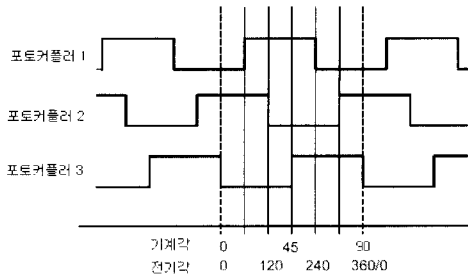


그림 4 위치센서 출력신호
Fig. 4 Output signals of position sensor

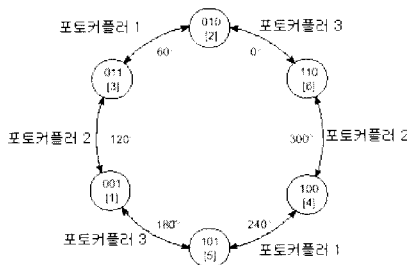


그림 5 SRM의 전기각에 대한 조합논리 변환
Fig. 5 Combinations for electric angle of SRM

회전자의 위치추정은 그림 3에서와 같이 회전자 구조와 비슷한 슬롯 디스크에 30° 간격으로 배치된 포토커플러 3개를 조합하면 6개의 조합된 논리가 그림 4와

같이 생성된다. 이것을 한 상에 대한 전기각 360°에 대하여 초기 기동시 회전자의 위치를 추정하는 것을 그림 5에서 보여주고 있다.

3.2 전류제어기

전류제어기는 DSP의 비교기를 이용하여 PWM의 듀티비의 조정으로 전류제어 알고리즘을 구현하였다. PWM 주파수는 20KHz 주어지고, 듀티비 P는 식 (2)를 이용하여 구하였다.

$$P = \frac{CPU_{clock} \text{ 주파수}}{PWM \text{ 주파수}} - 1 \quad (2)$$

정전류제어를 위한 전류 레환용 센서는 셉트저항 (0.0025Ω)을 사용하였다.

3.3 속도 추정

속도 측정에는 기존 모터 제어시스템에서 많이 사용되고 있는 엔코더를 사용하지 않고, DSP의 CAP1~CAP3 단자를 사용하여 속도를 추정하였다. 슬롯 디스크 회전시 각 포토커플러의 출력 신호를 CAP1~CAP3의 입력으로 받을 수 있도록 구성하였다.

그림 6은 실험에서 사용된 속도측정 구성을 나타낸다. CAP1-CAP3에서 받은 신호로부터 DSP에서는 캡처 이벤트가 발생하여 주기를 측정하기 위한 인터럽트 프로그램이 동작한다.

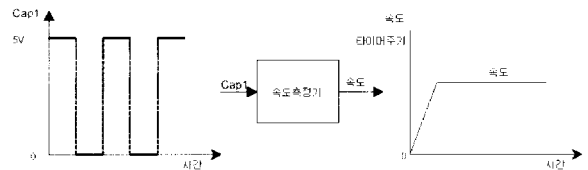


그림 6 속도측정 구성도
Fig. 6 Configuration diagram of speed measurement

속도 계산식은

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{60 \Delta\theta f_{clk}}{N} \quad (3)$$

여기서, ω : 추정각속도, $\Delta\theta$: 센서간격, Δt : 측정시간, N : 측정구간 카운터 수, f_{clk} : 클럭 주파수이다.

측정시간 Δt 는

$$\Delta t = t_2 - t_1 \text{ (sec)} \tag{4}$$

추정속도는

$$\omega = \frac{1}{\sum_{n=1}^4 \Delta t_n} \text{ (rev/ sec)} \tag{5}$$

로 표시할 수 있다.

F240 타이머에서 Δ 를 구하기 위한 경우를 그림 7에서 보여주고 있다.

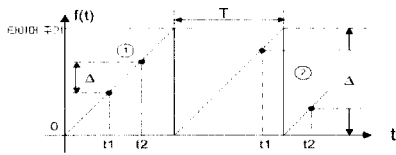


그림 7 DSP 타이머 주기
Fig. 7 Period of DSP timer

타이머 및 입력 주파수에서 주기를 이용하여 CAP 신호 상호간에 $f(t_2) \geq f(t_1)$ 일 때, Δ 는 식 (6)을 적용하고, $f(t_2) \leq f(t_1)$ 일 때, 식 (7)을 이용하여 구할 수 있다. 단, $t_2 - t_1$ 이 타이머 주기보다 작아야한다.

$$f(t_2) \geq f(t_1) \text{ 일 때,} \\ \Delta = f(t_2) - f(t_1) \tag{6}$$

$$f(t_2) \leq f(t_1) \text{ 일 때,} \\ \Delta = 1 + f(t_2) - f(t_1) \tag{7}$$

일반적으로 속도검출기로 사용하고 있는 Encoder는 1회전에 대한 펄스 수에 따라 각도를 계산하는 방식을 사용하므로, 고속 회전시 Encoder의 포토커플러 성능 한계로 인하여 펄스를 놓칠 수 있다. 또한, 저속 회전시 적어도 1회전에 대한 동기 신호가 있어야 각도를 계산할 수 있으므로, 1회전이 되지 않았을 때에 위치 측정 및 속도 측정이 불가능하다는 단점이 있다.

그러나 본 논문에서 제안한 속도 및 위치검출 알고리즘은 슬롯 디스크의 간격이 넓어 포토커플러에서 신호를 미스하는 경우가 없고, 위치에 대한 조합논리신호에 의하여 마이크로컨트롤러 내부 클럭펄스를 카운

트하여 계산하므로 정확한 위치 및 속도를 얻을 수 있는 장점을 갖는다.

4. 실험 결과

그림 8은 본 논문에서 제안한 가변속 제어시스템의 구성도를 나타내고, 그림 9는 실험장치를 나타낸다.

DSP의 캡처 기능을 이용하여 속도추정 및 θ_{ad} 를 구하였고, 제어모드인 단일 펄스모드, 하드 쇼핑모드, 소프트 쇼핑모드에 대한 $\theta_{ad} = 0^\circ, 15^\circ$ 에서 출력과형 및 동작특성을 구하였다.

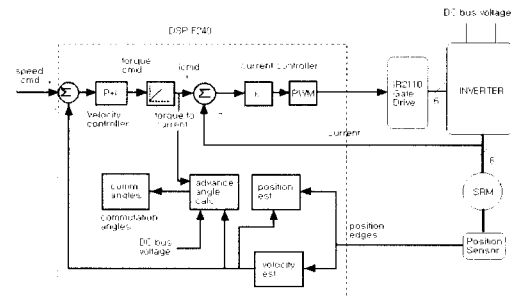


그림 8 가변속 제어시스템 구성도
Fig. 8 Configuration of variable speed control system

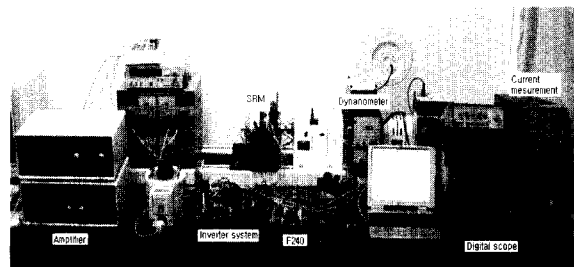


그림 9 가변속 제어 실험 장치
Fig. 9 Experimental set up of variable speed control

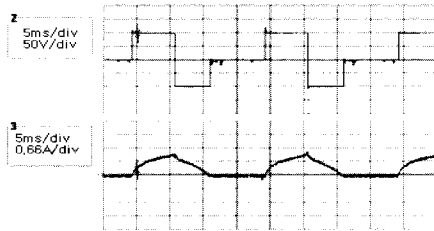
실험에서 사용된 SRM의 체원은 표 1과 같고, 인버터는 4상한 제어를 위하여 비대칭 브리지를 사용하였으며, 모터 해석을 위하여 Leroy Somer의 Dynano Machine을 사용하였다.

그림 10은 단일 펄스모드 동작시 $\omega_r = 314$ [rad/s] 일 때, θ_{ad} 에 따른 상전압 및 상전류파형을 측정할 것이다.

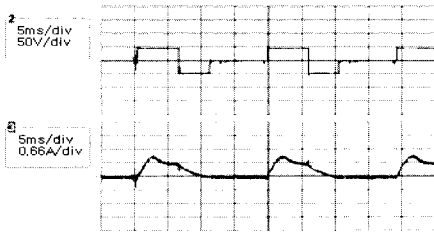
그림 11은 하드쇼핑 모드시 각속도 $\omega_r = 314$ [rad/s] 에서 θ_{ad} 에 따른 상전압 및 상전류파형을 나타낸다.

표 1 SRM의 제원
Table 1 Parameters of SRM

종 류	제 원
상 수(m)	3상
고정자극수(Ns)	6극
회전자극수(Nr)	4극
상 저항(Rm)	9.02Ω
최대인덕턴스(Lmax)	247.2[mH]
최소인덕턴스(Lmin)	72.85[mH]
상 최대전류	5[A]
DC bus 전압	300[V]
출 력	1/2[HP]
정 격 회전수	2,000[RPM]

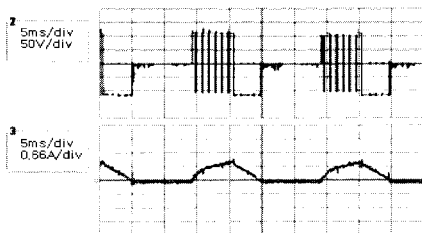


(a) $\theta_{ad} = 0^\circ$

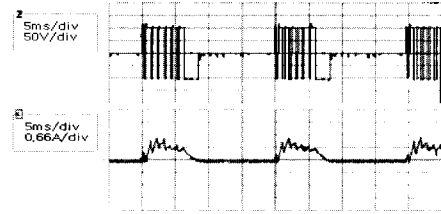


(b) $\theta_{ad} = 15^\circ$

그림 10 단일펄스 제어모드
Fig. 10 Single pulse control mode



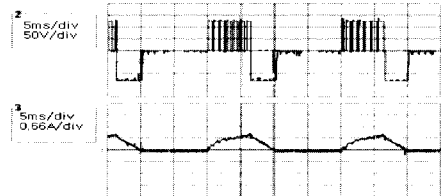
(a) $\theta_a = 0^\circ$



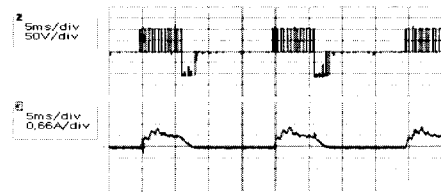
(b) $\theta_{ad} = 15^\circ$

그림 11 하드쇼핑 제어모드
Fig. 11 Hard chopping control mode

그림 12는 소프트 쇼핑모드시 각속도 $\omega_r = 314$ [rad/s]를 주고, θ_{ad} 에 따른 상전압 및 전류파형을 나타낸다.



(a) $\theta_{ad} = 0^\circ$



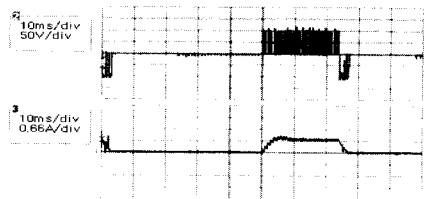
(b) $\theta_{ad} = 15^\circ$

그림 12 소프트쇼핑 제어모드
Fig. 12 Soft chopping control mode

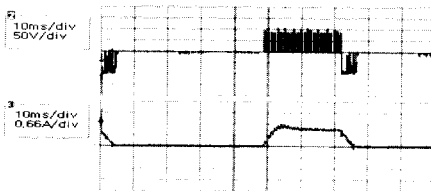
그림 13은 속도가 200[rpm]일 경우, 부하토크 T_L 을 0.1[N·m], 0.2[N·m]주었을 때의 상 전압 및 전류파형을 나타낸다.

그림 14는 속도 1000rpm, 부하토크 0.1[N·m]로 운전 중에, 부하토크를 0.2[N·m]로 증가하였을 때의 속도응답을 관측한 것이다.

이 실험은 외란에 대한 속도응답특성을 고찰 한 것으로 정속도에서 부하의 증가로 속도가 감소되었다가 다시 지령속도를 따르고 있음을 보여주고 있다.



(a) $T_L = 0.1$ [N-m]



(b) $T_L = 0.2$ [N-m]

그림 13 전류제어 특성

Fig. 13 Current control characteristics

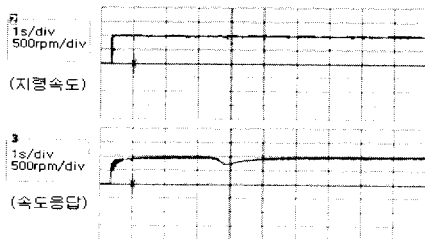


그림 14 부하토크 증가시 속도응답특성

Fig. 14 Speed response characteristics for increasing load torque

그림 15는 부하토크를 0.1[N-m]주고, 지령속도 1000, 500, 1500, 500, 1500 rpm에 대한 속도응답을 나타낸다.

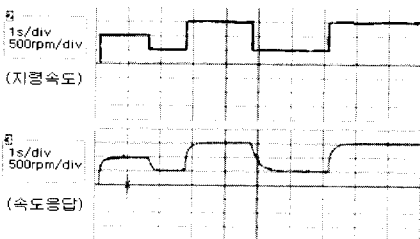


그림 15 속도 응답 특성

Fig. 15 Speed response characteristics

이 실험은 여러 지령속도에 대하여 속도응답특성을 고찰한 것으로 지령속도에 추종됨을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 회전자속의 속도정보를 엔코더와 같은 속도 변환기를 사용하지 않고, 간단한 슬롯 디스크로부터 위치를 검출하여 속도를 추정할 수 있는 알고리즘을 제시하고, TMS320F240를 이용하여 가변속 제어 시스템을 개발하였다.

회전자의 위치정보를 위하여 3개의 포토커플러로부터 얻은 출력신호를 조합하여 기동에 필요한 회전자 위치를 추정하였다. 속도추정을 위하여 F240의 캡처기능을 이용하였고, 속도제어기는 PI제어 알고리즘을 적용하였으며, 전류제어를 위하여 지령전류값과 전류센서의 전류값을 비교한 출력 전류오차에 따라 PWM 듀티비 P를 이용하여 제어하였다.

기존의 엔코더를 사용하였을 경우에 비하여 정지상태에서부터 시작하여 고속에 이르기까지 정밀한 속도 제어를 할 수 있었다. 개발된 디지털 제어시스템의 장점은 다음과 같다.

1. 간단한 위치 검출기를 이용하여 0~2000rpm 전 범위를 걸쳐 속도제어가 가능하였다.
2. 단일 펄스모드, 하드 쇼핑모드 및 소프트 쇼핑모드뿐만 아니라, 전류제어 동작모드에서 가변속 제어가 가능하였다.
3. 어드밴스각 $0^\circ \sim 15^\circ$ 전 범위에 걸쳐 제어가 가능하였다.

참 고 문 헌

- [1] T.J.E. Miller, " Switched Reluctance Motors and Their Control ", Magna Physics publishing and Clarendon Press. OXFORD, 1993.
- [2] Hassan Moghbelli, Gayle E. Adams, Richard G. Hoft, "Performance of 10-Hp Switched Reluctance Motor and Comparison with Inductance Motors", IEEE Transaction on IA, Vol. 27, pp. 531~538, 1991.
- [3] Iqbal. Husain, M. Ehsani, "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control", IEEE Transaction on PE, Vol. 11, pp. 83~88, 1996.
- [4] C. Pollock, Chi-Yao Wu, "Acoustic Noise Cancellation Techniques for Switched Reluctance Motor," IEEE Transaction on IA, Vol. 33, pp. 477~484, 1997.

- [5] 구분관, 김준하, 남광희, "TMS320F240 DSP 컨트롤러를 이용한 서보모터 드라이브 개발", 전력전자학술대회 논문집, pp. 357~360, 1998.
- [6] Do-Young Jung etc. "Analysis of Switched Reluctance Motor Characteristics Considering Magnetic Nonlinearity", 전력전자학술대회 논문집, pp. 517~520, 2000.



박영록(朴永錄)

1970년 11월 5일생. 1999년 삼척대 제어계측공학과 졸업. 1999년~현재 동 대학원 제어계측공학과 석사과정.

저 자 소 개



천동진(千潼進)

1969년 5월 25일생. 1998년 삼척대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 현재 삼척시청 전산실 근무.



정도영(鄭道永)

1956년 8월 13일생. 1981년 영남대 전기공학과 졸업. 1984년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1997~1998 미국 Ohio 주립대학 방문교수. 현재 삼척대학교 전기제어계측공학부 교수. 당 학회 강원지부 원지부장.



이상호(李相鎬)

1959년 7월 13일생. 1982년 영남대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 삼척대학교 전기제어계측공학부 부교수. 당 학회 강원지부 재무이사.



이봉섭(李奉燮)

1965년 9월 19일생. 1991년 영남대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 삼척대학교 전기제어계측공학부 조교수. 당 학회 강원지부 총무이사.