

## SRM의 정밀 각도제어를 위한 아날로그 엔코더

安珍雨<sup>†</sup>, 黃炯軫<sup>\*</sup>, 李東熙<sup>\*\*</sup>, 朴 晟 濬<sup>\*\*\*</sup>

## An Optical Analog Encoder for Precise Angle Control of SRM

Jin-Woo Ahn, Hyung-Jin Hwang, Dong-Hee Lee, and Sung-Jun Park

## 요 약

스위치드 릴럭턴스 전동기(SRM)의 구동에서 회전자 위치는 필수적인 정보로서 회전자의 위치에 따라 고정자의 상여자 신호를 동기화 시키는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 고해상도의 엔코더나 레졸버가 이용되는데 이는 전동기의 생산가격 상승을 가져오게 된다. 반면 센서리스 기법을 통한 상여자신호의 동기화는 신뢰성 및 고속영역에서 스위칭각이 마이크로프로세서의 샘플링 주기에 의해 영향을 받게 된다.

본 논문에서는 실용적인 방식의 저가형 아날로그 엔코더를 제안한다. 또한 간단한 디지탈회로를 사용한 제어신호를 생성하기 위한 제어알고리즘을 제시한다. 실험을 통하여 제안된 아날로그 엔코더의 성능을 검증하고 이를 이용한 스위칭각 제어방법에 대해 검증하였다.

## ABSTRACT

In a switched reluctance motor drive, it is important to synchronize the stator phase excitation with the rotor position, Therefore the position of rotor is an essential information. Although high resolution optical encoders/resolvers are used to provide a precise position information, these sensors are expensive. And switching angles synchronizing using sensorless technique has some problems like a reliability and fluctuating of the preset value in the high-speed region, which is caused by the sampling period of the microprocessor.

In this paper, a low cost analog encoder suitable for practical applications is proposed. And the control algorithm to generate switching signals using a simple digital logic is presented. The validity of the proposed analog encoder with a proper logic controller is verified from the experiments.

**Key Words** : SRM, analog encoder, switching angle control

## 1. 서 론

경제성은 산업용 전동기와 드라이브 부문에서 우위를 차지하는 중요한 요소 중의 하나이다. 스위치드 릴

럭턴스 단순하고 저가형의 강인한 전동기로서 서보전동기와 마찬가지로 넓은 가변속 운전에 적합하다. 이에 현재까지 SRM은 가정용품, 전기자동차, 항공기 등에 대한 응용이 폭넓게 연구되어 왔다<sup>[1]</sup>. 하지만 SRM드라이브에서 고정자의 상여자와 회전자의 위치를 동기화 시키는 것은 중요하다. 따라서 적절한 스위칭동작을 위해 정확한 회전자 위치 정보는 필수적이다. 일반적으로 회전자의 위치를 알아내기 위해서 엔코더나 레졸버가 사용되고 있으나, 고해상도의 위치검출을 위해서는 위치센서를 포함한 전동기의 단위가격이 커지게

<sup>†</sup> 교신저자 : 정희원, 경성대 전기전자컴퓨터공학부 교수  
E-mail : jwahn@ks.ac.kr

\* 학생회원, 경성대 대학원 전기전자공학과 석사과정

\*\* 정희원, 경성대 전기전자컴퓨터공학부 Post Doc.

\*\*\* 정희원, 전남대 전기공학과 조교수

접수일자 : 2003. 8. 27 1차 심사 : 2003. 9. 30

2차 심사 : 2003. 10. 31 심사완료 : 2003. 11. 13

된다. 이에 산업용 전동기로써의 활용에 가격적인 면에서 많은 제약을 받아왔다. 따라서 설치비용을 줄이기 위하여 저가형 엔코더나 센서리스기법이 채택되고 있다<sup>[2],[3]</sup>. 저가형 엔코더를 사용하였을 경우, 그 분해능의 제한으로 인하여 정확한 상의 검출이 어려워 전류-전 범위에서 최적의 운전에 한계가 있다. 센서리스기법을 사용하였을 경우, 각 상 스위치의 적절한 제어틀을 위해서, 위치 신호를 계산하고 상여자 신호를 발생하는데에 마이크로 프로세서의 연산주기에 따른 시간이 많이 소요되어 고속운전이 제한 될 수 있다.

본 논문에서 SRM드라이브의 고성능 스위칭 각 제어에 적합한 새로운 저가형의 아날로그 엔코더를 제시한다. 또한 매우 간단한 구조의 회로로 스위칭 온-오프각의 제어가능한 기법을 제안한다. 제안된 스위칭 기법에서 스위칭 온-오프각의 해상도는 일반적인 방법과는 다르며 마이크로프로세서의 샘플링 주기와 전동기 속도에 영향을 받지 않으므로 온-오프 스위칭각 제어는 어떠한 위치에서도 수행될 수 있다.

역공진 저지를 위한 다이오드를 추가로 달아 모든 스위칭 소자들이 소프트 스위칭 조건에서 턴온/턴오프하여 스위칭 손실을 최소화하고, 공진 에너지를 완전히 입력으로 회귀시켜 전도손실을 절감하여 효율을 증가시킨다.

## 2. SRM의 기본원리

그림 1은 일반적인 SRM 드라이브 시스템을 보여준다. 토크는 스위칭 전류의 공급과 식(1)에서의 회전자의 위치각에 따른 인덕턴스의 편미분값에 비례한다.

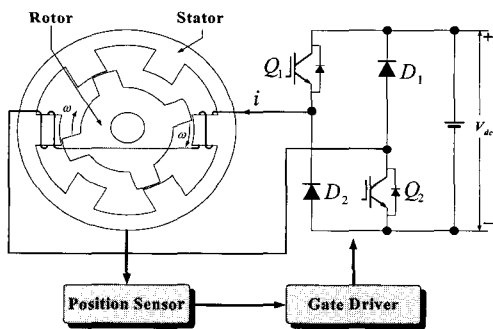


그림 1 SRM 드라이브 시스템  
Fig. 1 SRM drive system

$$\tau(\theta) = \frac{1}{2} i(\theta)^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \quad (1)$$

$L(\theta)$ 은 전동기의 인덕턴스 프로파일이다. SRM의 제어는 입력전압, 스위칭 온-오프각에 의해서 수행된다. SRM의 전류량과 전류파형은 스위칭 온-오프각에 영향을 받으며, 전압원에서 전류를 효과적으로 상승시키기 위해서는 돌극이 만나기전에 선행 스위칭이 필요하다. 스위칭-온 각은 전류를 적절하게 상승시키기 위한 주요한 요소이다. 따라서 최적의 SRM 운전특성을 얻기 위해서는 스위칭 온각을 정확하게 제어할 필요가 있다.

## 3. SRM용 엔코더

### 3.1 일반적 엔코더

일반적으로 마이크로프로세서와 디지털 부호방식의 엔코더 시스템은 고성능화, 데이터 취급의 용이성 그리고 프로그래밍의 유연성 등의 특성으로 인해, 전동기 제어에서 많이 사용된다.

증분형 엔코더의 경우, 회전자 위치와 속도의 정확도는 샘플링주기와 엔코더 해상도에 달려있다. SRM의 제어성능은 회전자 위치의 정확도와 마이크로프로세서의 성능에 의해 결정된다. 회전자 위치의 절대 측정오차는 엔코더의 해상도에 따른 오차( $\Delta\theta_e$ )와 샘플링 주기중의 회전자 속도에 따른 오차( $\Delta\theta_p$ )에 의해 결정된다.

$$\Delta\theta_e = 2\pi \frac{N_r}{N_p} [\text{rad}] \quad (2)$$

$$\Delta\theta_p = \omega_r \cdot T_s [\text{rad}]$$

여기서  $N_r$ 은 회전자 극수,  $N_p$ 는 엔코더의 펄스 수 [ppr],  $T_s$ 는 마이크로프로세서의 샘플링 주기,  $\omega_r$ 은 회전속도이다. 그러므로 절대 측정오차  $\Delta\theta_s$ 는 식(3)과 같다.

$$\Delta\theta_s = \Delta\theta_e + \Delta\theta_p = 2\pi \frac{N_r}{N_p} + \omega_r \cdot T_s [\text{rad}] \quad (3)$$

회전자 속도에 따른 회전자위치의 오차는 속도추정 기법을 사용하지 않았을 경우 커지게 되므로 전향보상을 통하여 오차를 감소할 수 있다. 그림 2는 증분형 엔코더를 적용한 시스템에서 마이크로프로세서의 연산에 의한 속도에 따른 절대 측정오차를 나타낸다. 저속영역에서는 엔코더 해상도에 의해서, 전동기속도가 증가할수록 샘플링주기에서 전동기 위치의 편차가 커지는 것

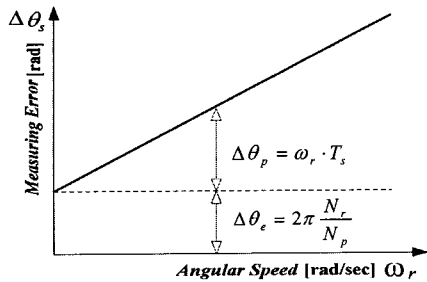


그림 2 회전자 속도에 따른 회전자 위치의 측정오차  
 Fig. 2 Measuring error of rotor position according to rotor speed

을 알 수 있다. 일반적으로 1024펄스의 엔코더 시스템과 회전자극수가 8극인 경우, 전동기 속도가 3000[rpm]이고 200[μs]의 샘플링 주기를 가진다면 최대 전기각 31.6125도의 오차를 가질 수 있다. 이는 토크리플 유발과 전체시스템 가격의 상승을 가져오게 된다.

광학식 엔코더의 경우 스위칭 각 제어는 인덕턴스 프로파일에 정렬되어 있는 광학엔코더의 신호에 의해 수행된다. 그림 3은 간단한 엔코더 디스크와 상의 센서 신호를 나타내었다. 광학엔코더의 구조는 대단히 간단하면서 매우 저가이지만, 고해상도의 스위칭 각 제어는 매우 어렵다. 스위칭 온-오프각은 광학 엔코더 신호의 상승에지와 하강에지에서 계산되며, 계산된 스위칭 각의 정확도는 마이크로프로세서와 회전자속도에 달려있다. 이 경우 토크조절을 위해 PWM기법이 채택되지만 교류파의 스위칭은 스위칭손실을 야기하게 된다.

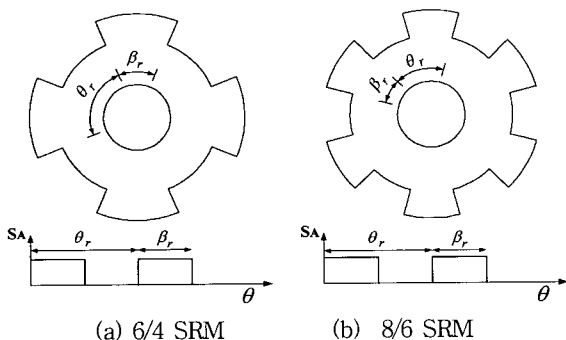


그림 3 단순한 광학엔코더와 센서신호  
 Fig. 3 A simple optical encoder and sensor signal

### 3.2 제안된 엔코더

본 논문에서는 SRM 스위칭각 제어용의 새로운 형태의 엔코더를 제안한다. 제안된 엔코더는 단순하지만

고해상도의 스위칭제어가 가능하다.

그림 4는 제안된 6/4, 8/6, 12/8 SRM용 아날로그 엔코더를 각각 나타낸다. 회전판은 투명 플라스틱 재질을 이용하여 일반 인쇄방식을 사용하여 제작되었다. 일반적인 증분형이나 광학엔코더에서 디지털신호가 나오는 것처럼, 제안된 엔코더는 원판의 명암에 비례하여 아날로그 신호가 나오게 된다. 원판의 명암정도는 포토트랜지스터의 선형적인 신호에 세팅되어 있다. 포토트랜지스터의 출력은 삼각파형의 전압값으로서 위치각의 역할을 하므로 회전자의 위치를 알 수 있다.

제안된 아날로그 엔코더의 경우 현재 상용화 되어 있는 1024 Pulse의 증분형 엔코더에 비해 가격면에서 상당히 저렴하다.

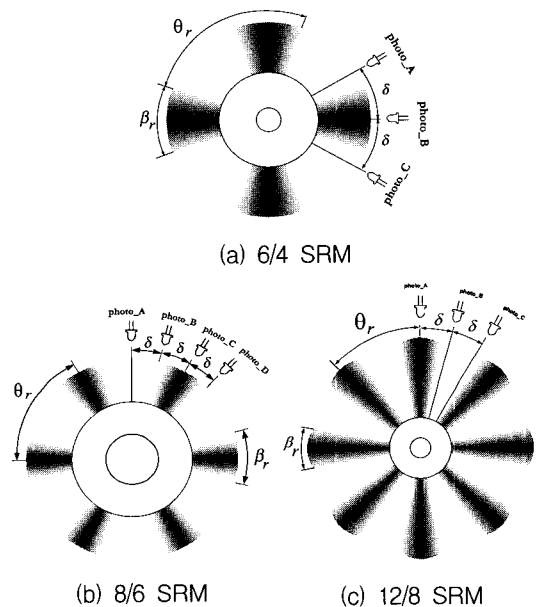


그림 4 제안된 아날로그 엔코더용의 디스크판  
 Fig. 4 Disk plate for the proposed analog encoder

### 4. 스위칭 각과 제어 토폴로지

본 논문에서 제안된 엔코더로 효과적인 스위칭 각 제어 방법을 제안된다. 제안하는 스위칭 각 제어 방법은 독립적으로 스위칭 온 과 오프용의 두 지령신호에 기반을 두고 있다.

그림 5는 아날로그 엔코더로 제안된 스위칭 각 제어 토폴로지의 기본원리를 나타낸다. 위로부터 인덕턴스 프로파일, 제안된 아날로그 엔코더용 디스크판에 의해 생성된 포토 인터럽터 출력신호, 인덕턴스 프로파일에 따른 제안된 엔코더의 출력신호를 나타내었다. 그리고

상:스위칭 신호를 생성하기 위한 제어신호의 제어과정을 보여준다.

전동기 모드에서 스위칭 온각은 센서신호  $\theta_a$ 와  $\theta_0$  사이의 내리막에, 스위칭 오프각은 센서신호  $\theta_0$ 와  $\theta_d$ 사이의 오르막에 위치한다. 엔코더 신호패턴의 끝 쪽에는 계단형태의 신호가 되어 최대 드웰각  $\beta_r$ 내에서 여자 간격을 제한한다. 전동기 속도와 부하조건에 따라서, 지령신호  $V_{on}$ 과  $V_{off}$ 에 의해 적절한 스위칭 온각  $\theta_{on}$ 과 스위칭 오프각  $\theta_{off}$ 가 독립적으로 제어될 수 있다. 스위칭 온각  $\theta_{on}$ 은 센서 신호의 내리막과 스위칭 온 지령신호  $V_{on}$ 과의 교차점이다.

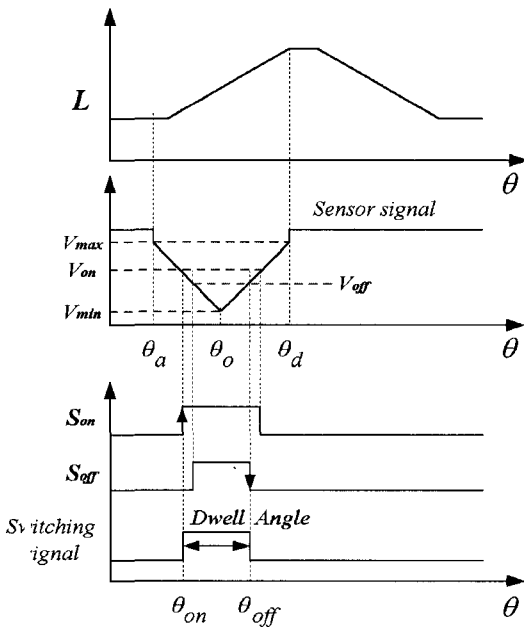


그림 5 상스위칭 각 제어  
Fig. 5 Switching angle control of a phase

최대 스위칭 온각은 최소 인덕턴스 구간에 있기 때문에 정격부하에서 전류의 상승을 매우 빠르게 한다. 그리고 최소 스위칭 온각은 인덕턴스 상승구간에 있어서 경부하에서 부드러운 전류상승이 가능하여 토크발생이 매끄럽게 된다.

5. 실험 결과 및 검토

표 1과 같이 12/8 SRM을 이용하여 제안된 아날로그 엔코더와 제어 토폴로지의 유효성을 검증하였다.

표 1 시작 전동기의 제원  
TABLE 1 Specification of the prototype motor

Stator/rotor pole	12/8	Stator pole arc	14 [deg.]
Rated power	500 [W]	Rotor pole arc	18 [deg.]
Rated speed	2000 [rpm]	Winding resistance	3 [ $\Omega$ ]
Rated voltage	200 [V]	Maximum inductance	122 [mH]
Rated torque	2.5 [Nm]	Minimum inductance	21 [mH]

그림 6은 제어 시스템의 블록도를 나타낸다. 메인 프로세서로서 간단한 PIC프로세서가, 스위칭 각 제어를 위해 2채널 10bit D/A 컨버터가 사용되었다. 제어 해상도는 D/A 컨버터의 해상도에 의해 결정된다.

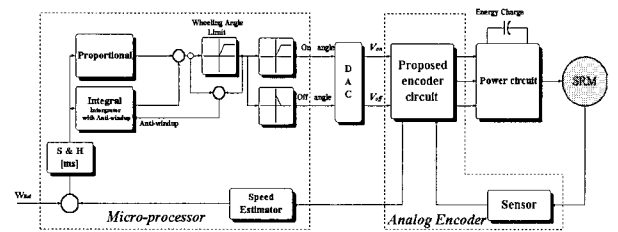


그림 6 제어 시스템의 블록도  
Fig. 6 Block diagram of the control system

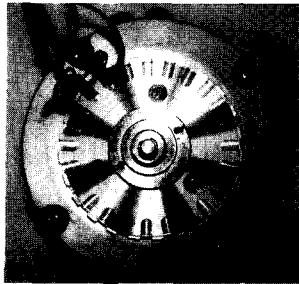
식(4)는 마이크로프로세서의 D/A 컨버터에 의해 얻어낸 스위칭각의 해상도를 나타낸다.

$$\theta_{resolution} = \frac{\beta_r \cdot V_{max}}{2^{n+1} \cdot (V_{max} - V_{min})} \tag{4}$$

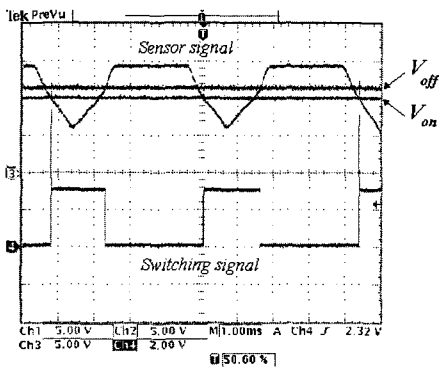
여기서 n은 D/A 컨버터의 비트수로서, 측정결과  $V_{max}$ 는 대략 3.75V이며  $V_{min}$ 은 0.2V로 측정되었다. 이 값을 이용 식 (4)를 이용 계산한 결과 본 논문에서 사용된 아날로그 엔코더의 스위칭각의 해상도는 0.00928°로 대략 0.01°이다.

그림 7은 프로토타입 엔코더의 사진과 그 출력파형을 나타낸다. 실험한 전동기는 12개의 고정자돌극과 8개의 회전자 돌극을 가진다. 아날로그 위치 신호를 만들어 내는 상 간격으로 3개의 포토센서가 장착되었다. 스위칭 온, 오프 신호는 센서신호와 두 스위칭 지령과의 조합에 의해서 결정된다.

그림 8은 센서신호, 스위칭 온 지령, 스위칭신호, 상 전류를 보여준다. 상전류파형은 센서신호와 스위칭 지령으로 결정된다. 포토센서로부터 출력되는 신호의 최하점에서 상승 및 하강하는 구간에 다소 비선형적인



(a)

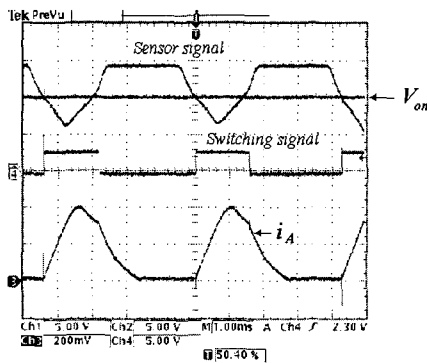


(b)

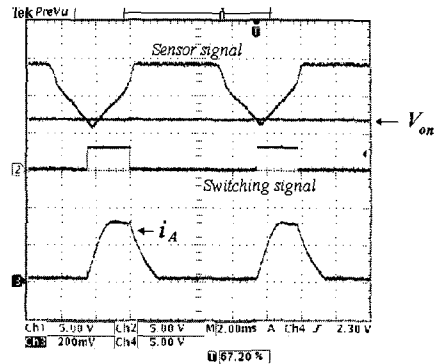
그림 7 SRM에 장착된 (a)엔코더, (b)출력파형  
Fig. 7 Prototype encoder(a) and output waveform(b)

구간이 존재하나 이는 포토센서의 특성에 의한 것으로 실용화시 적절한 소자의 선택을 통하여 해결할 수 있다.

그림 9는 제안된 엔코더와 제어 시스템에서 부하변동에 따른 스위칭각 조정과 상전류를 보여준다. 부하는 2000[rpm]에서 1.3[Nm]에서 2.5[Nm]로 변환다. 스위칭각이 스위칭 온 지령의 변화에 의해 조절된다.



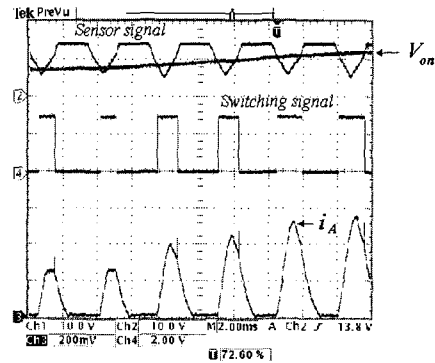
(a) 1750[rpm] (횡:1ms/div, 종:2A/div)



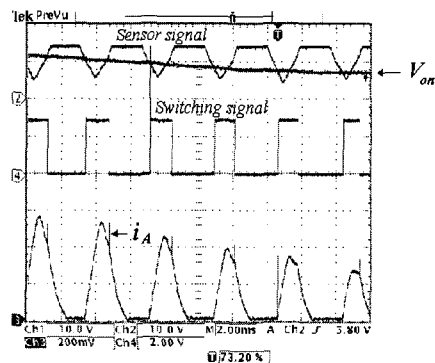
(b) 800[rpm](횡:2ms/div, 종:2A/div)

그림 8 제어시스템에서의 신호(위로부터 센서신호, 스위칭 온 신호, 스위칭 오프 신호, 전류)

Fig. 8 Signals in the control system(sensor signal, swit ching-on reference, switching signal and current from top trace)



(a) 1.3[Nm]에서 2.5[Nm]로 변동



(b) 2.5[Nm]에서 1.3[Nm]로 변동

그림 9 2000[rpm]에서 갑작스런 부하의 변동에 따른 스위칭 특성 (횡: 2.0[ms/div] 종: 2.0[A/div])

Fig. 9 Switching characteristics of sudden load disturbance at 2000[rpm]  
(Hor: 2.0[ms/div], Ver(current): 2.0[A/div])

갑작스런 부하변동에 스위칭각이 적절하게 제어될 수 있어, 매끄러운 토크발생이 가능하다. 실험결과는 제안된 엔코더와 제어방법의 유효성을 보여준다.

## 6. 결 론

본 논문에서 간단한 구조이지만 고성능의 아날로그 엔코더를 제안하였고, SRM의 구동에 적용이 가능함을 보였다. 또한 경제적인 면에서 전동기전체의 제작가를 크게 낮출 수 있음을 보였으며, 이를 이용하여 새로운 기법의 상여자 제어방식을 통한 구동을 수행하였다.

제안된 엔코더는 간단한 구조의 광학 엔코더와 회전자 위치의 고해상도 검출을 위한 아날로그 명암패턴을 사용하였다. 명암패턴의 끝부분에 스텝변화를 주어 간단히 여자각의 제한이 가능했다. 스위칭 온, 오프 각은 분리된 스위칭 온 지령과 스위칭 오프 지령으로 수행하였다.

실험결과로부터, 적절한 제어방법으로 제안된 아날로그 엔코더는 유효성과 경제적인 면에서의 실용 가능성을 검증하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] P. J. Lawrenson, J. M. Stephenson and P. T. Blenkinsop et al, "Variable-speed Switched Reluctance Motors", IEE Proc. B, Vol. 127, No. 4, 1980, pp. 253~265.
- [2] M. Ehsani, I. Husain, S.Mahajan, and K. R. Ramani, "New Modulation Encoding Techniques for Indirect Rotor Position Sensing in Switched Reluctance", *IEEE Trans. on IA*, Vol. 30, No. 1, pp. 85~91, 1994.
- [3] M. Ehsani, and K. R. Ramani, "Direct Control Strategies Based on Sensing Inductance in Switched Reluctance Motors", *IEEE Trans. on PE*, Vol. 11, No. 1, pp. 74~82, 1996.
- [4] J. W. Ahn et al, "Novel Encoder for SRM Drive with High Resolution Angle Control", *Proceedings of IEEE / ISIE 2001*, pp. 1781~1785, 2001.
- [5] 안진우 "스위치드 릴럭턴스 전동기 구동과 응용", *오성 미디어*, 2001.
- [6] 안진우 외 2 : "Pallet Truck용 6/4 SRM", *전력전자학술대회 논문집*, pp. 844~847, 2003. 7.
- [7] 안진우, 강유정 : "SRM의 4상한 구동을 위한 전류제한방식" *전력전자학회 논문지* 8권, 제3호, pp. 285~291, 2003. 6.

## 저 자 소 개



### 안진우(安珍雨)

1958년생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년 12월~1996년 2월 영국 글래스고우대 방문연구원. 1998년 8월~1999년 8월 미국 위스컨신대 방문교수. 1992년~현재 경성대 전기전자컴퓨터공학부 교수. 당 학회 학술이사.



### 황형진(黃炯軫)

1976년생. 2003년 경성대 전기전자공학과 졸업. 2003년~현재 동 대학원 전기전자공학과 석사과정.



### 이동희(李東熙)

1970년생. 1996년 부산대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 2001~경성대 Post Doc.



### 박성준(朴晟濬)

1965년 생. 1991년 부산대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 졸업(공박). 1996~2000 거제대학 교수, 2001~2003 동명대 전 기 자동화계열 교수, 2003. 9~현재 전남대 전기공학과 조교수.