

SRM의 정밀속도제어를 위한 순시스위칭각 제어방식

安珍雨, 吳錫奎, 黃煥文

Instantaneous Switching-Angle Control Scheme for Precise Speed Control of an SRM

Jin-Woo Ahn, Sok-Kyu Oh, Young-Moon Hwang

요 약

SRM은 많은 장점으로 인해 각종 산업분야에 적용을 검토하고 있다. 그러나 토오크리플과 소음이 교류전동기보다 상대적으로 높은 단점이 있다. SRM은 상전류파형이 동작특성과 토오크리플발생에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 토오크리플을 줄이고 정밀한 속도제어를 위해 순시도통각제어와 PLL제어시스템을 이용하였다. PLL의 위상검출기는 도통각제어에, 루우프필터의 출력은 순시 인가전압의 제어에 각각 도입하여 속응성을 높이고 토오크리플을 줄일 수 있도록 하였다. 실험을 통하여 정밀한 속도제어와 토오크리플 저감특성을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

The good features of a switched reluctance motor (SRM) are appreciated by the appliance manufactures. The few disadvantages of the motor are higher torque ripple and noise. This paper proposes an instantaneous torque control scheme to control a speed precisely. It adapts phase-locked loop (PLL) control technique to regulate speed precisely as well as instantaneous advance angle control. In this control scheme, the phase detector signal of PLL controls the switching dwell angle flexibly and the signal of loop filter controls adaptively the instantaneous switching voltage. Experimental results show that this system controls speed precisely with low torque ripple.

Key Words: SRM, advance angle control, PLL speed control, torque ripple reduction

1. 서 론

Switched Reluctance Motor(SRM)는 구조의 간단함, 견고성 등의 장점으로 가변속 전동기구로서의 적용이 다양하게 검토되고 있다.^[1] 그러나 다른 전동기구보다 상대적으로 큰 토오크리플로 인하여 소음과 진동을 유발하며 정밀속도제어에 장애가 되고있다.^[2]

토오크리플은 전동기의 인덕턴스 프로파일의 변화가 비선형적인데 따른 것으로 이를 줄이기 위해서는 스위칭각과 전압의 제어가 필요하다. 고정자와 회전자가 중첩되기 시작하여 토오크를 발생하게 되는 위치에서의 포화과 프린칭현상, 그리고 고정자와 회전자가 중첩되었을 경우 포화를 고려하기

위해서는 복잡한 계산과 연산회로가 필요하다.

이러한 토오크리플을 줄이는 데는 전동기의 자기적 구조를 개선하거나 제어를 통하여 토오크를 제어하는 방법이 가능하다. 전동기의 자기구조의 조정도 결국은 제어과정을 요구하게 된다. 그러므로 전동기의 전류파형을 제어하기 위해서는 전압, 스위치 온 및 오프각 등을 포함한 동작 파라미터의 적절한 조합이 요구된다.

토오크발생구간에서 발생토오크를 평탄하게 하기 위하여 전류를 적절히 중첩하거나 전류초핑을 행하는 제어가 일반적으로 적용되어 왔다.^[3,4] 그러나 순시 평탄토오크를 발생시키기 위해서는 인덕턴스의 포화를 고려한 전류의 파형의 제어가 우선되어야 한다. 본 논문에서 토오크리플을 줄이고 정밀

한 속도제어를 위해 순시적으로 전류파형을 제어하는 새로운 제어기법을 제안하였다.

본 제어기법에서, 순시토크 및 속도를 advance각과 PLL제어기법을 통하여 정밀하게 제어한다. 즉, 전력각제어 개념을 가진 advance각과 속도PLL제어에 의해 토크발생구간에서 순시 평탄토크를 발생하도록 제어된다. 실험에 의해 안정된 속도특성과 토크리플 저감의 효과를 확인하였다.

2. 토크특성의 제어

SRM은 돌극형의 고정자극과 회전자극이 중첩되기 시작할 때 고정자극에 전류원에서 스위칭 전류를 인가함으로써 토크가 발생한다. 그러나 전압원의 스위칭 인가에서 이러한 기저력을 효과적으로 확립하기 위해서는 고정자와 회전자극이 중첩되기 전에, 즉 자기궤터턴스가 최소일 때 스위칭 전압을 인가하며, 스위칭각 및 인가전압이 전류확립위한 초기치 전류에 영향을 미친다.

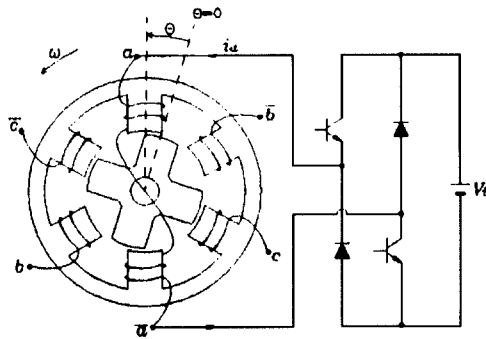


그림 1 SR 드라이브
Fig. 1 SR Drive

토크 발생 구간에서는 릴럭턴스가 증가하고 전동기의 작용 인덕턴스 $L(\theta, i)$ 가 증가함으로 기저력발생을위한 전류의 상승률은 그림 2에서와 같이 완만해진다. 상전류는 인가전압 $v(\theta)$, 초기치 전류 $i(\theta_0)$, 속도 역기전력(speed back e.m.f) 및 권선 저항에 의하여 결정된다. 즉 전압원 SRM에서의 전압 방정식은

$$v(\theta) = Ri(\theta) + L(\theta, i) \frac{di(\theta)}{dt} + i(\theta) \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

로 표현되며, 식 (1)의 오른쪽 첫째항은 권선 저항전압, 둘째항은 리액턴스 전압이며 셋째항은 속도 역기전력이고 동시에 기계적 에너지로 변환되는 성분을 각각 나타내고 있다. 이때 초기치 전류 $i(\theta_0)$ 는

$$i(\theta_0) = \frac{v(\theta_0)}{\omega L_{\min}} \cdot \theta_{ud} \quad (2)$$

와 같이 쓸 수 있다. 토크 발생구간에서의 토크 $\tau(\theta, i)$ 는 식 (3)과 같다.

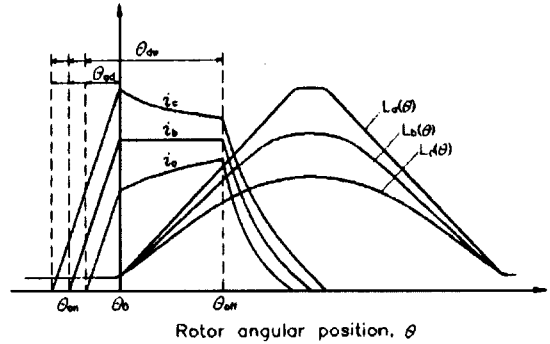


그림 2 인덕턴스 프로파일과 전류
Fig. 2 Inductance profile and current

$$\tau = \frac{1}{2} i^2(\theta) \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (3)$$

즉, 발생토크는 상전류파형에 의존하며 일반적으로 상전류를 평탄하게 하거나 전류초평에의해 전류를 제어하여 토크리플을 저감시킨다.

그러나 이러한 제어방법은 인덕턴스의 변화를 $dL(\theta, i)/d\theta$ 가 전류에 따라 일정하다는 가정하에서 이루어지고 있다. 그러나 그림 3에서와 같이 인덕턴스변화를 $dL(\theta, i)/d\theta$ 는 전류값에 따라 큰 변화를 가지므로 이를 고려하여야 할 것이다. 따라서 전동기의 토크제어특성을 개선하기 위해 일정순시 토크를 발생시키도록 전류 $i(\theta)$ 를 제어되어야 한다.

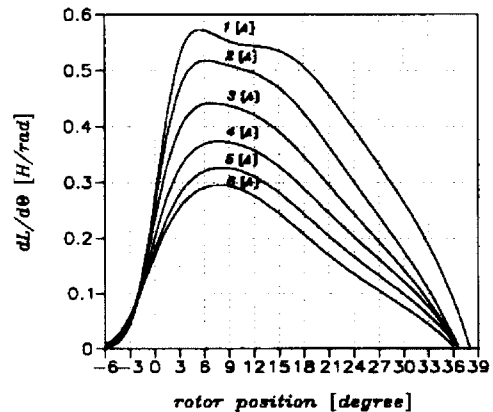


그림 3 전류에 따른 인덕턴스 변화율 $dL(\theta, i)/d\theta$
Fig. 3 Changing ratio of inductance with current, $dL(\theta, i)/d\theta$

2.1 토오크제어를 위한 전압

인덕턴스의 변화율이 비선형적으로 변하더라도 평탄토오크를 발생시키기 위한 전압값은 식(1)과 (3)을 이용하여 구할 수 있다.

토오크발생구간에서 토오크를 제어하기 위하여 순시 인가 전압 $v(\theta)$ 과 초기치 전류 $i(\theta_0)$ 를 제어하여야 한다. 식 (1)과 (3)으로부터 $v(\theta)/\omega$ 은 다음과 같이 되며,

$$\frac{v(\theta)}{\omega} = \left[\frac{Ri(\theta)}{\omega} + L(\theta, i) \cdot \frac{di(\theta)}{d\theta} \right] + \sqrt{2\tau(\theta)} \cdot \sqrt{\frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta}} \quad (4)$$

일정속도상태에서 순시전압 $v(\theta)$ 이 속도역기전력성분 $\sqrt{\frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta}}$ 과 임피던스강하 $\left[\frac{Ri(\theta)}{\omega} + L(\theta, i) \frac{di(\theta)}{d\theta} \right]$ 분을 보상하도록 제어된다면 순시 토오크는 평탄하게 될 수 있을 것이다.

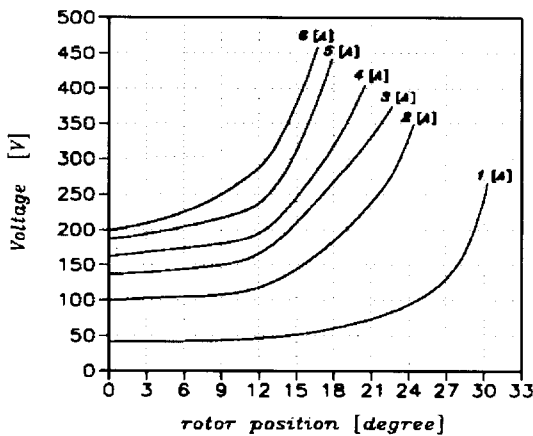


그림 4 순시 평탄토오크를 위한 인가전압
Fig. 4 Applied voltage for instantaneous flat torque

순시 평탄토오크를 생성하기 위한 순시 인가전압은 식(4)로부터 구하면 그림 4와 같다. 즉, 순시 평탄토오크를 발생시키기 위해서는 토오크발생구간에서 순시전압을 적절하게 조정해야 함을 알 수 있다.

2.2 토오크와 속도안정화를 위한 제어시스템

순시 평탄토오크를 발생하기 위한 적정제어는 순시 전압의 제어에 의해 얻을 수 있다. 아울러 속도제어루우프의 안정화와 부하변동에 따른 토오크제어를 위해서 advance각을 순시적으로 조절할 수 있다면 보다 속응성이 높고 정밀한 속도제어를 행할 수 있다.

이를 위해서는 동기기에서의 부하각제어개념을 도입한 advance각의 유연한 제어시스템⁶⁾을 적용함이 바람직하다.

이것은 순시 전압제어와 연계되어 행하여져야 하며 이를 위해 순시 전압제어 및 순시 위상차제어 기능이 우수한 PLL제어기를 채택하여 그것의 루우프 필터(loop filter) 출력은 SRM의 순시전압제어에, 위상검출기(phase detector)출력은 SRM의 도통각제어에 적용하는 유연한 제어기법을 도입한다.

3. PLL제어에 의한 속도제어

Phase Lock Loop(PLL)는 기준으로 하는 주파수의 위상을 일치시키도록 하는 제어기이다. 이러한 시스템을 전동기의 속도제어시스템에 적용하면 전동기 회전자의 속도변동 즉, 회전불균일을 없애기 위해서 위상동기루우프는 높은 주파수 성분에 대해서는 프라이휠 효과를 이용하고 낮은 주파수 성분에 대해서는 동기화력을 갖게 하여 정속성을 좋게하도록 하는 역할을 한다.⁷⁾

위상동기시스템의 기본적인 구성은 위상검출기, 루우프필터, 그리고 Voltage Controlled Oscillator(VCO)로 구성되어 있다. 이를 전동기 제어 시스템에 적용하게 되면 VCO는 전동기 구동회로와 회전자속도에 비례하는 펄스를 만드는 엔코더로 대체된다.

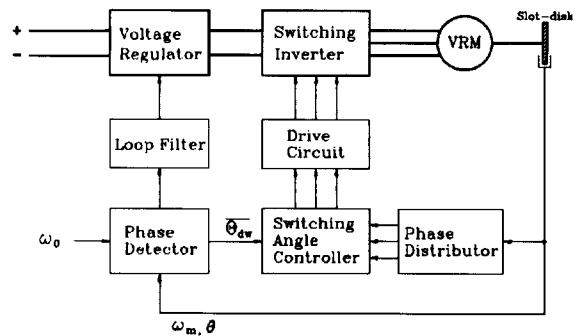


그림 5 PLL을 이용한 속도 제어시스템
Fig. 5 Speed control system using PLL

그림 5는 PLL을 이용한 속도제어시스템을 보여주고 있다. 지금까지 PLL제어를 전동기 제어에 이용한 경우 위상검출기는 단지 기준주파수와 피드백된 회전자의 엔코더와의 위상차를 이용하여 전압 혹은 전류를 제어하는데 이용되어 왔으나, 본 제어시스템에서는 인가전압 뿐만 아니라 도통각제어에도 이용함으로써 전압만을 가변시켰을 때보다 순시 토오크 및 속도의 속응성을 높이고 전동기의 토오크-속도특성의 안정도를 향상시킬 수 있다.

3.1 제어시스템의 구성

제어시스템은 전력변환기, 위상동기시스템, 속도센서부로

구성된다. 위상검출기의 신호는 기준주파수와 회전자엔코더의 출력신호의 주파수의 위상차에 의해 만들어진다. 이는 스위칭각의 제어에 있어서 기본적으로 부하에 따른 위상검출기의 위상차의 변화와 일치한다. 따라서 위상검출기의 기본원리를 이용하여 각 상에 인가하는 스위칭 신호는 기준주파수를 스위칭 신호의 온 신호로 하고 회전자의 엔코더에서 나온 신호를 오프 신호로 하여 만들 수 있다. 스위치 오프각은 엔코더의 일정한 각으로 고정하여 두면 된다. 그러므로 순시토크변동에 따라 적응성있게 도통각의 순시제어를 행하게 할 수 있게 한다.⁶⁾

그림 6은 토크변동에 따른 스위칭각의 제어원리를 보여주고 있다. 속도지령에 비례하는 기준주파수 신호와 회전자 엔코더의 회전속도 신호에 의하여 위상검출기의 출력신호를 만든다. 위상검출기의 출력신호는 루우프필터의 입력뿐 아니라 SRM의 advance각 및 도통각의 제어신호로 작용하게 한다. 이때 전동기의 부하가 증가하게 되면 회전자 엔코더 속도 신호가 뒤지게 되어 advance각이 커지게 된다. 따라서 초기치 전류가 크게 확립되어 가속도오차가 발생한다.

이와 반대로 부하토크가 감소하면 advance각은 줄어들게 되어 전동기 속도가 감소하게되므로 도통각은 부하의 변동에 대해 적응성있게 조정된다. 이때 루우프필터의 출력신호는 PWM제어기를 통하여 전압제어기 buck converter의 입력신호로 작용하여 순시전압을 제어하게 하여 토크발생구간에서의 전류파형 및 크기를 조정하게 된다.

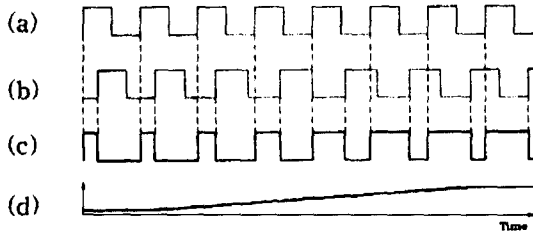


그림 6 부하에 따른 위상검출기와 루우프필터의 출력신호
(a)기준신호 (b)엔코더신호
(c)위상신호검출기 신호 (d)루우프필터의 출력

Fig. 6 Output signals of phase detector and loop filter when laod change (a)reference signal (b)encoder siganl (c)phase detector output (d)loop filter output

본 실험에서 PLL제어기로서 루우프필터의 출력신호를 안정되게 얻고 동기신호 등의 부가적인 기능도 가지고 있는 전동기제어용 PLL IC TC9142를 사용하였다. 상분배기(phase distributor)는 회전자 엔코더의 펄스신호에 따라 연속적으로 a상 → b상 → c상 순으로 각 상의 펄스신호로 나누고 이 신호는 스위칭각 제어기(switching angle controller)

에 의해 위상검출기의 출력신호와 논리 AND 연산되어 인버터에 스위칭신호로 보내어진다. 회전자 엔코더에서 나오는 신호는 스위칭각의 스위치 오프로 사용하기 때문에 1 회전당 펄스발생수는

$$n_{pulse} = qN_r \tag{5}$$

와 같다. 여기서 q 는 상수이고 N_r 은 회전자극수이다. 6/4 SRM의 경우 1 회전에 12회의 스위칭을 필요로 하기 때문에 엔코더의 슬롯수를 12로 하였으며 그림 6과 같이 duty비는 15%정도로 하여 기준속도이하에서 그림 6에서 회전자 엔코더 신호를 반전한 신호를 스위칭각으로 사용하여 가속시킨다.

3.2 PLL제어 특성

PLL의 제어기능 중 위상검출기와 루우프필터의 출력특성을 살펴보면 그림 7과 같다. 그림 7에서 점선은 순시평탄토크 발생을 위한 전압과 초기치 전류를 확립하기 위한 advance 각을 계산한 결과이다. 그리고 실선은 실험을 통해 제어되는 PLL의 위상검출기와 루우프필터의 변화를 보여주고 있다. 주어진 속도에서 토크가 증가하면 토크의 평형을 위해 스위칭각과 전압이 조정되는 것을 알 수 있다. 루우프필터의 경우 토크가 낮은 범위에서 실험결과가 시뮬레이션 결과와 일치하지 않는 것은 평탄토크를 발생시키기 위해서는 저토크영역에서 인가전압을 크게 낮출 수 없기 때문이다.

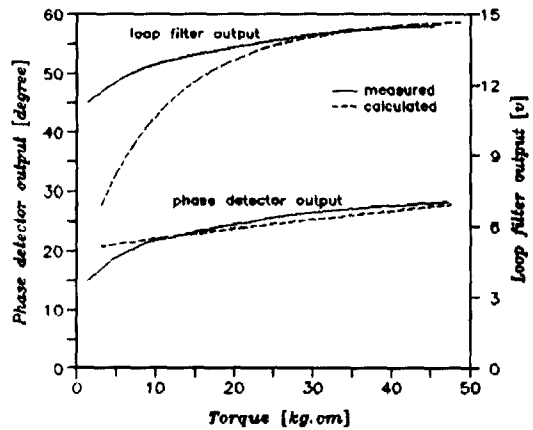


그림 7 PLL제어의 특성

Fig. 7 Output of PLL control

4. 결과 및 고찰

특성해석실험은 고정자극이 6개, 회전자 극이 4개인 6/4

SRM, 클래식인버터(classic inverter), 그리고 전압제어를 위해 buck converter를 사용하였다. 본 실험에서는 감자구간에서의 토오크리플은 고려하지 않았다.

4.1 전류파형과 토오크리플

전류파형은 임의의 속도에서 advance각과 순시인가전압에 따라 달라지며 동시에 토오크와 토오크리플발생에 영향을 미친다.

그림 8은 전류파형에 따른 토오크리플을 보여주고 있다. 이 그림 8(a)는 순시도통각제어방식에서의, 8(b)는 상PLL 방식에서의 상전류와 순시토오크를 보여주고 있으며 본 논문의 제안방법이 토오크리플을 보다 더 저감할 수 있음을 보여준다.

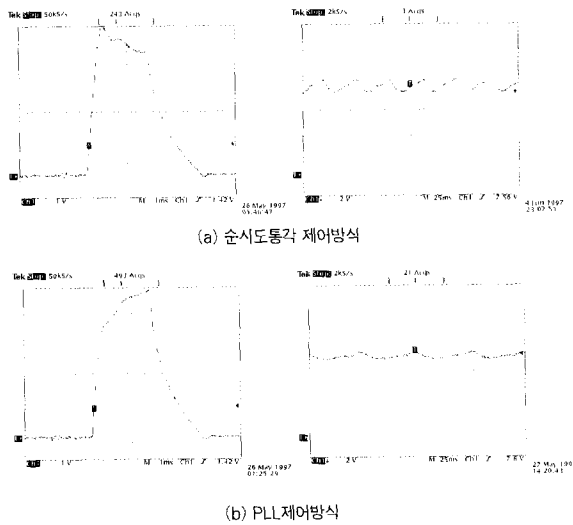


그림 8 전류파형(좌)과 순시토오크(우)
Fig. 8 Current(left) and instantaneous torque(right)

4.2 부하에 따른 동특성

그림 9는 1000rpm에서 부하토오크를 1.0 kg.cm에서 20.0 kg.cm로 증가시켰을 때의 동특성을 보여주고 있다. 전동기는 부하가 변함에도 불구하고 도통각과 인가전압을 순시적으로 조정하여 속도변화가 거의 없는 안정된 운전특성을 얻을 수 있었다. 상전류는 부하변동에 따라 advance각이 순간적으로 커지게 되고 이로 인하여 루우프필터의 출력신호가 커지게 되어 인가전압이 증가하게 되고 발생토오크와 평형을 이루게 되면 전류파형은 처음상태와 같은 모양으로 된다.

5. 결론

SRM은 상전류파형에 따라 동작특성이 다르게 나타나고 토

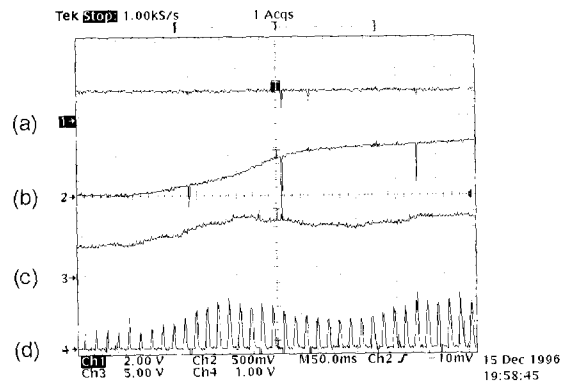


그림 9 일정속도에서 부하에 따른 동특성(1000rpm, 1.0에서 20.0 kg.cm)
(a) 속도 (b) 토오크 (c) 루우프필터출력 (d) 전류
Fig. 9 Speed response(1000rpm, 1.0 to 20.0 kg.cm)
(a) speed (b) torque (c) output of loop filter (d) current

오크리플을 많이 유발하기도 한다. 걱정된 인가전압의 제어로 토오크리플과 속도변동을 줄이고 안정된 운전특성을 얻을 수 있다. 이러한 제어를 위해 상도통각과 인가전압을 순시적으로 제어할 수 있는 제어기법을 도입하였다.

본 논문에서는 토오크리플을 줄이기 위한 전압을 해석하고, 해석된 전압을 형성시키기 위하여 PLL제어시스템을 이용하여 위상검출기는 도통각제어에, 루우프필터의 출력은 순시인가전압의 제어에 각각 도입하여 속응성을 높이고 토오크리플을 줄일 수 있도록 하였다. 실험을 통하여 정밀한 속도제어와 토오크리플 저감특성을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] P.J. Lawrenson, D.Sc., J.M. Stephenson, P. T. Blenkinsop, J. Corda, N.N. Fulton, "Variable speed switched reluctance motors," IEE PROC., Vol. 127, Pt. B, No.4, July 1980.
- [2] Chi-Yao and Charles Pollock, "Analysis and Reduction of Vibration and Acoustic Noise in the Switched Reluctance Drive," IEEE Trans. on IA, vol. 31, no. 1, pp.91~98, 1995.
- [3] M.O. Bilgic, V. Ozbulur, A. Sabanovic, "Torque ripple minimization of a switched reluctance motor," APEC'95, Dallas 1995.
- [4] P.C. Kjaer, J.J. Gribble and T.J.E. Miller, "High-Grade Control of Switched Reluctance Machine," Proc. of IAS annual meeting '96, vol.1 pp.92~100, Oct. 6~10 1996.

- [5] I. Husain and M. Ehsani, "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control," IEEE Trans. on PE, Vol.11, No.1, pp.83~88, Jan. 1996.
- [6] S.G. Oh, J.W. Ahn and Y.M. Hwang, "A Novel Control Scheme for Low Cost SRM Drive, Proc. of IEEE ISIE'95, Athens, vol.1, pp.279~283, July 10~14, 1995.
- [7] A.W.Moore, "Phase-locked Loops for motor speed control," IEEE Spectrum, Vol.10, pp.61~67, Apr 1973.

〈 저 자 소 개 〉



안진우(安珍雨)

1958년 5월 26일생. 1984년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 경성대학교 공대 전기전자컴퓨터공학부 조교수.



오석규(吳錫奎)

1967년 6월 2일생. 1991년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1993~1994년 현대중전기 근무. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사).



황영문(黃煥文)

1934년 4월 13일생. 1957년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1959년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1972년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1991~1992 대한전기학회 회장 역임. 현재 부산대학교 공대 전기공학과 교수.