

PLL 제어 방식 SRM의 고효율 구동

表成暎, 安珍雨

High Efficiency PLL Control for SRM Drive

Sung-Young Pyo, Jin-Woo Ahn

요 약

본 논문에서는 SRM 운전에서 맥동토크와 부하토크의 변화로 인한 속도변동을 줄이기 위해 동적 도통각 제어 원리를 이용한 PLL(Phase Locked Loop) 속도제어 방식을 채택하였다. SRM은 많은 장점을 가지고 있으나 토크리플에 따른 속도변동으로 정밀한 속도제어에 어려움이 있다. SRM 구동 시스템에 PLL을 적용한 결과 전동기는 강인한 정속도 운전을 할 수 있으며, 또한 운전속도에 따라 선행각을 조정함으로써 고효율 구동을 할 수 있었다. 구성된 시스템은 운전속도와 부하의 변화에 따라 선행각이 증감함으로써 뛰어난 동적 속도제어 특성을 갖고 있으며, 인버터 인가전압을 제어하여 선행각을 조정함으로써 일정부하 영역에서 높은 효율특성을 가진다. SRM 구동 시스템의 PLL 속도제어와 고효율 구동을 위한 도통각제어를 위해 TMS320F240 DSP를 사용함으로써 디지털 제어기의 유연성과 소형화를 꾀하였다.

ABSTRACT

In this paper, appropriate advance angle control for high efficiency drive and PLL technique for accurate speed control of a Switched Reluctance Motor(SRM) is proposed. SRM drive system is known to provide good torque characteristics and high efficiency drive. However, speed variation caused by higher torque ripple is one of the main drawbacks. The Phase-Locked Loop (PLL) technique in conjunction with dynamic dwell angle control is adapted to have a good speed regulation characteristics. The advance angle is adjusted via applied voltage control to have a high efficiency drive. A TMS320F240 DSP is used to realize this drive system. Experimental test results show that the system has good dynamic and precise speed control capability as well as high efficiency.

Key Words : Switched Reluctance Motor, PLL control, Dynamic dwell angle, High efficiency drive

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 릴럭턴스토크에 의해 구동되므로 토크 발생 메카니즘상 맥동 토크 성분이 크고 이것이 순시속도변동의 원인으로 작용한다.^[1-3] 이러한 속도 변동을 줄이기 위해 각 상의 토크 발생구간에서 여자전류를 적절히 제어해야 되나 상여자시 자기회로의 포화로 인해 회전자 위치에 따른 인덕턴스가 비

선형적으로 변화함에 따라 평탄한 토크 발생을 위한 상전류의 제어가 어렵다. 또한 상여자 전류를 제어하여 토크를 제어하는 경우 운전효율이 저하하며, 상전류의 실시간 계산과 제어를 위해서는 고가의 고성능 제어기를 필요로 하는 등의 문제점이 있다.

본 논문에서는 상전류의 계산없이, 저가형의 제어기로서 순시속도 제어기능을 가지는 디지털 PLL 제어 방식을 제안하였다. 또한 구동효율을 높이기 위해 도통각이 고효율 운전구간에서 결정되도록 하는 SRM구

동 시스템을 제안한다.

2. SRM의 고성능 운전을 위한 제어

전동기의 구동성능은 효율, 토크, 토크 리플, 무게 대비 출력 등과 같은 여러 기준들에 의해 특성 지워질 수 있다.^[4] 이러한 성능 기준들을 부하특성에 따라 균형되게 최적화 하기 위해서는 전자기적 구조설계, 제어기 능력, 스위칭 방법 등을 동시에 고려하는 것이 반드시 필요하다. SRM 드라이브는 간단한 전자기적 구조와 브러쉬리스 형태에 기인해 넓은 속도 범위에서 높은 신뢰도와 뛰어난 성능을 가진다. 본 논문에서는 일반적인 응용에서 중요시하는 효율을 주 성능 기준으로 하고, 가변속 운전시 속도 제어특성을 높일 수 있는 구동 시스템을 구성한다.

2.1 순시속도제어를 위한 동적도통각 제어

SRM의 구동에서 맥동토크로 인한 순시속도변동을 최소화 하기 위해서는 발생토크의 순시적 제어방식을 도입해야 한다. 본 연구에서는 맥동토크나 부하토크 변동에 의해 나타나는 순시속도 변화를 선행각을 증감시켜 억제시키는 동적 도통각 제어방식을 적용한다.^[5]

동적 도통각 제어의 개념은 그림 1에서 보여준다. 맥동토크가 증가하거나 부하토크가 감소하면 발생토크가 부하토크보다 더 커져 순간적으로 회전자는 가속된다. 회전자 속도가 빨라지는 만큼 그림 1에서와 같이 상 인덕턴스의 주기가 점차 작아지게 되어 도통각이 줄어들어서 평균 상전류와 발생토크가 작아진다. 따라서 발생토크와 부하토크가 평형을 이루는 도통각에서 동작하게 되어 회전자 속도는 현재 지령속도를 다시 유지하게 된다. 이와 같이 맥동토크

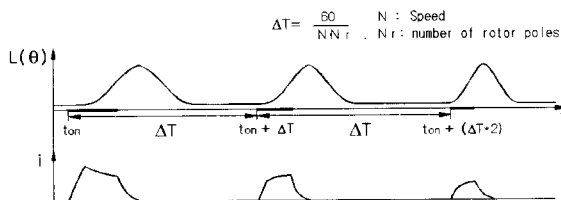
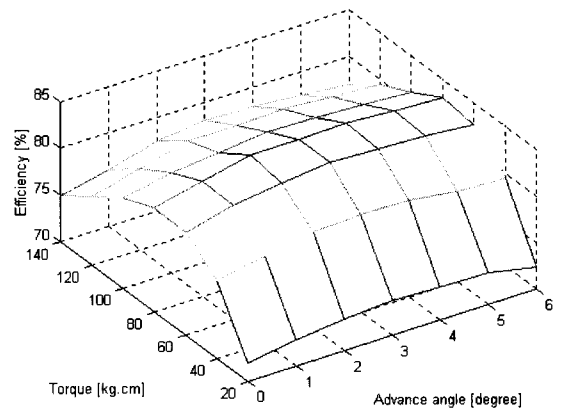
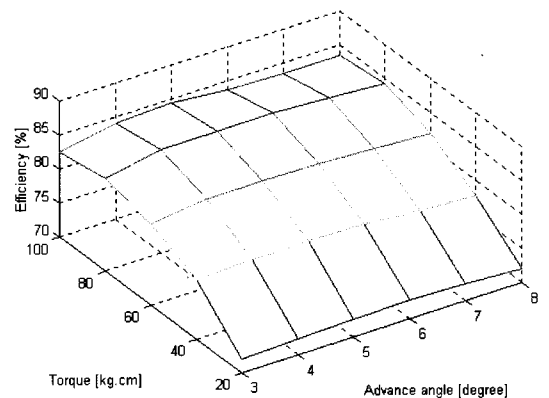


그림 1 부하토크 변동에 따른 도통각의 동적 제어원리
Fig. 1 Dynamic dwell angle control principle according to load torque

크나 부하토크의 증감에 의한 회전자의 순시적인 속도변동에 대응해 도통각이 조절되어 상에 인가되는 전류의 양을 조절함으로써 동적 도통각 제어는 순시속도변동을 억제할 수 있는 방법이다. 여기서 제어의 복잡성을 줄이기 위해 스위칭-오프 각은 회전자의 일정위치에 고정시키고 스위칭-온 각만이 순시 속도변동에 대응하여 자동적으로 조정되도록 한다.^[6]



(a) speed : 1000[rpm]



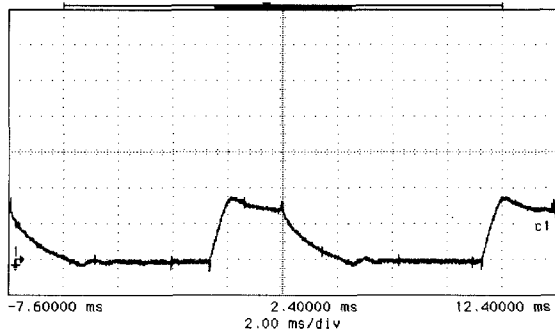
(b) speed : 1500[rpm]

그림 2 선행각과 부하 토크의 변화에 따른 효율 특성
Fig. 2 Efficiency according to advance angle and load torque

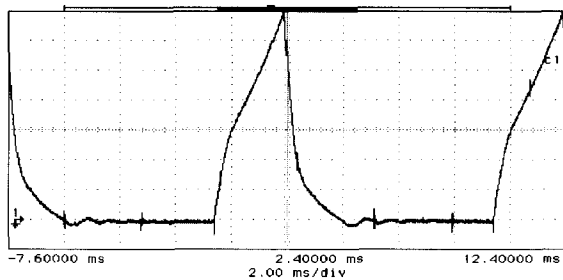
2.2 고효율 구동을 위한 운전조건

SRM 드라이브의 제어변수인 선행각, 토크각, 인가전압 크기 등의 여러 가지 조합으로 토크-속도 특

성곡선 상에서 동일한 동작점에서 운전하는 것이 가능하며, 이러한 제어변수들의 조합에 따라 구동효율은 달라지게 된다. 이에 따라 SRM 드라이브의 구동토크와 효율을 최대로 하기 위해서는 도통각을 운전속도와 부하토크에 따라 가변할 수 있어야 한다. 따라서 고효율 운전을 위한 선행각과 인가전압 등의 상호 관계에 대한 실험 결과를 근거로 고효율 운전을 위한 구동시스템의 제어기를 구성한다.



(a) speed : 1000[rpm], torque : 20[kg·cm]



(b) speed : 1000[rpm], torque : 120[kg·cm]

그림 3 일정속도에서 부하의 증가에 따른 전류파형 (2.5[A/div.])

Fig. 3 Current according to load at constant speed (2.5[A/div.])

그림 2는 일정속도 운전에서 부하토크와 선행각의 변화에 따른 운전효율의 시험결과를 나타낸다. 각 운전속도 1000, 1500[rpm]에서 부하의 변화에 따라 선행각이 각각 약 3도, 5도 부근에서 항상 가장 높은 효율 특성을 보이고 있다. 일정한 부하토크에서 고효율 구동을 위한 선행각은 속도에 따라 변화한다. 1000[rpm]에서는 약 3도 부근에서 최대 효율 동작점이 형성되고 1500[rpm]에서는 5도 부근으로 동작점이 이동한다.

전동기를 최대효율점에서 동작하면서 부하가 증가하

면 전류파형은 그림 3(a)의 평탄한 형태에서 3(b)의 첨두파형으로 변해가며 점차 피크전류가 과도하게 흐르게 된다. 그림 3(b)의 파형은 전동기 전류의 크기와 인버터 스위치 소자의 정격 전압, 전류 등의 제한으로 인해 구동시스템의 인버터를 구성하는데 문제점이 있다. 이러한 이유로 피크전류를 낮추기 위해서는 상전류를 제한하는 방법과 선행각을 증가시키는 방법이 가능하다.

그림 4에서 속도 1000[rpm], 부하토크 120[kg·cm]의 운전상태에서 상전류를 15[A]에서 제한했을 때와 하지 않을 때 선행각의 변화에 대한 효율특성을 비교하였다. 그림상의 세 개의 동작점을 비교하면, A점은 전동기를 가장 높은 효율로 구동시키는 조건이나 높은 피크전류가 흐르고, C점은 전류 제한으로 인해 적절한 상 여자가 행해지지 않으며, 스위칭 손실의 증가로 효율이 낮아진다.

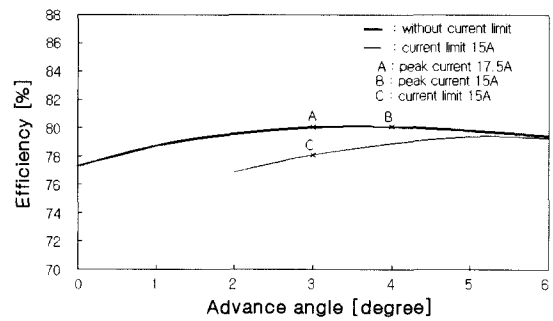


그림 4 전류제한에 따른 효율특성, 1000[rpm]

Fig. 4 Efficiency characteristics according to current limit

따라서 선행각을 증가시키고 전류를 제한을 하지 않는 B점이 인버터의 용량을 적절히 유지시키면서 고효율 구동을 얻을 수 있는 동작점이다. 여기서 선행각은 인버터 인가전압을 조절하여 증감시킬 수 있도록 한다.

부하-속도 특성에 따른 고효율 운전을 위한 선행각의 변화는 비선형적이기 때문에 실험 결과를 제어기에 입력해 고효율 운전에 활용한다.

3. 구동시스템의 구성

전동기 구동을 위한 디지털 제어기를 TMS320 F240 DSP를 이용하여 구현하였다. 그림 5에서 구동시스템의 전압 제어기, 도통각 제어기, 상 디코더는 인터럽트

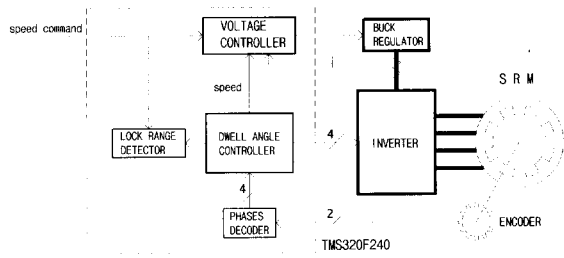


그림 5 구동시스템의 구성도
Fig. 5 Drive system configuration

루틴으로 구성되어 있으며, 제어 알고리즘의 특성상 타이머 제어와 인터럽트 핸들링 등이 제어기 구현에 있어서 가장 중요한 요소들이다. 도통각 제어기에서는 기준신호 발생과 엔코더로부터 케환된 신호를 처리한다. 기준신호는 속도명령에 해당하는 일정한 샘플링 주기를 가지고 발생되어지며, 엔코더로부터의 케환신호는 DSP상의 QEP단자에 입력되어 타이머 주기 인터럽트에 의해 처리된다. 상 디코더는 QEP단자에 입력된 신호를 디코딩하여 현재 OFF해야할 상을 판단해 도통각 제어기에 제공한다. 전압제어기는 운전영역상

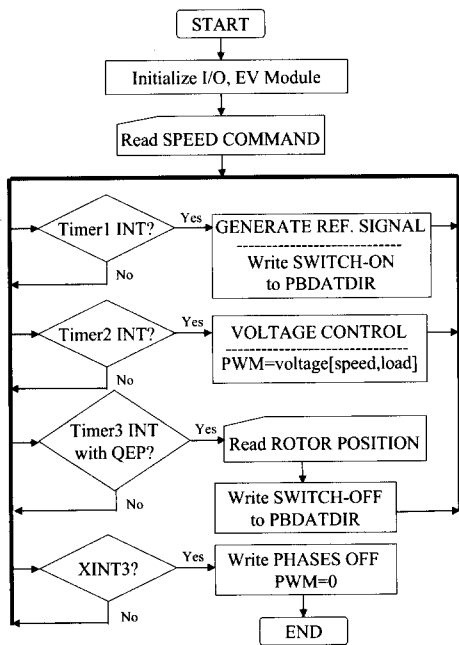
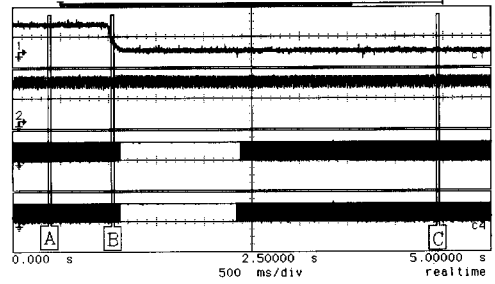
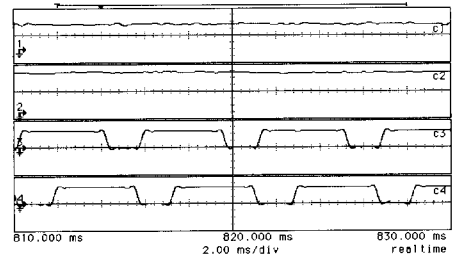


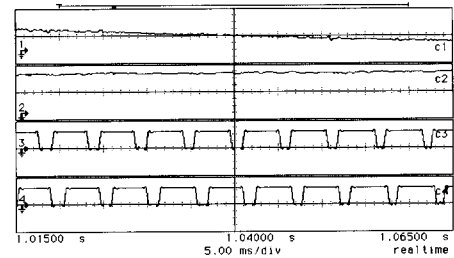
그림 6 제어 흐름도
Fig. 6 Control flow chart



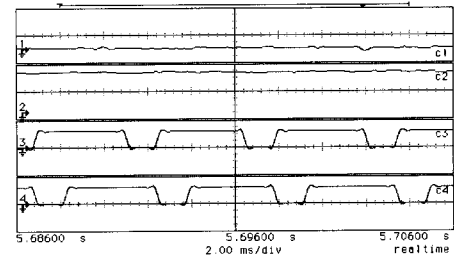
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 7 부하감소에 따른 속도응답 (a) 토크, 속도, 상여자신호, (b),(c),(d):(a)의 A,B,C 부분의 확대;CH1 부하토크, CH2 속도, CH3, CH4 상 여자신호

Fig. 7 Speed response according to load decrease (a) torque, speed, phase excitation signals,(b),(c),(d): expanding of A,B,C in (a) ;CH1 load torque, CH2 speed, CH3)and CH4) phase excitation signal

에서 가장 높은 효율 특성을 보이는 선행각과 인가 전압과의 관계를 록-업 테이블 형태로 가지고서 Buck Regulator를 통해 인버터의 인가전압을 제어한다. 그림 6은 전체 제어 알고리즘을 보여준다. 여기에는 속도 명령과 PLL원리에 따른 기준신호 즉 스위칭-온 신호를 발생하는 루우프와 속도와 부하에 따른 전압제어루우프 그리고 회전자위치검출 즉 스위칭-오프신호검출 루우프를 가진다.

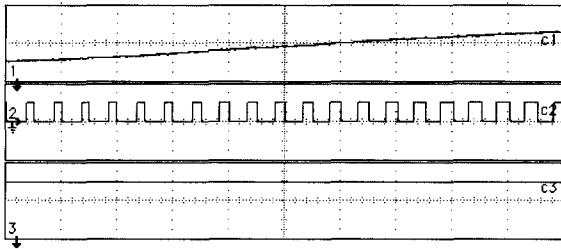


그림 8 부하토크 증가시 PLL에 의한 동적 도통각 변화; CH1) 부하토크 (0[kg·cm] → 90[kg·cm]), CH2) 도통각, CH3) 속도 1500[rpm], 수평축 20[ms/div.]
 Fig. 8 Dynamic dwell angle variation by PLL control when load increase; CH1) load torque (0[kg·cm] → 90[kg·cm]), CH2) dwell angle, CH3) speed 1500[rpm], Horizontal 20[ms/div.]

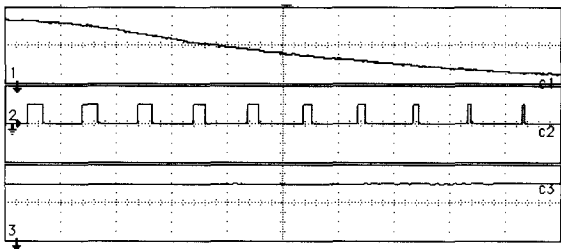


그림 9 부하토크 감소시 PLL에 의한 동적 도통각변화. CH1) 부하토크 (90[kg·cm] → 0[kg·cm]), CH2) 도통각, CH3) 속도 1500[rpm], 수평축 10[ms/div.]
 Fig. 9 Dynamic dwell angle variation by PLL control when load decrease; CH1) load torque (90[kg·cm] → 0[kg·cm]), CH2) dwell angle, CH3) speed 1500[rpm], Horizontal 10[ms/div.]

4. 실험 및 결과

구성된 제어 시스템을 이용하여 속도제어특성을 확인하였다. 실험에 사용한 전동기는 2마력 8/6 SRM이며, 전력변환기는 비대칭형 브릿지 인버터를 사용하였

다. 그림 7은 부하가 급격히 감소하는 경우 속도와 상 제어신호를 보여준다. 부하의 변화에 무관하게 일정한 속도를 유지함을 알 수 있다. 즉, 부하의 급격한 감소에 따라 순시속도는 높아지고 이에 따라 그림7의 (b)에서 (c)로 도통각이 좁아져 토크 발생 구간이 동적으로 줄어들어진다. 그러나 인가전압이 감소하면 도통각이 원래의 고효율 값으로 복구하게된다. 이와 같이 순시 토크 응답과 고효율구동이 가능하다. 그림 8과 9는 부하토크의 감소 및 증가시 동적 토크각의 변화를 자세히 보여준다.

그림 8에서 부하의 증가시 도통각은 증가하며 속도는 일정하게 유지되어 동적도통각 제어기능이 순시속도 제어에 있어서 150ms 이내의 빠른 응답속도와 1~2[rpm]의 적은 속도오차로 우수한 응답 특성을 확인할 수 있었다.

구성된 제어 시스템으로 부하토크의 변화에 따른 효율특성을 실험을 통해 확인하였다. 그림 10은 운전 속도 1000[rpm]에서 전부하 영역에 대한 효율특성이다. 그림 10의 A곡선은 그림 2의 운전점 중 최고의 효율을 나타내는 포인트들이고 B곡선은 구성된 PLL 구동 시스템으로 운전 시 측정효율이며 C곡선은 전류제한을 한 상태에서 측정한 효율특성치이다. 효율은 인버터 전단에서 입력전력을 Power Analyzer(Voltech PM3300)을 사용해 측정하고 동력계를 사용하여 속도와 토크를 측정해 전동기 출력을 구하여 시스템 전체 효율을 구하였다. 본 연구에 사용된 SRM은 정격이 1500[W], 2000[rpm]으로 정격운전시 약 86%의 운전효율을 나타내며, 본 연구에서는 1000[rpm]에서 1500[rpm]사이의 속도에서의 SRM 적용에 중점을 두어 실험을 함으로서 정격 효율치보다 약간 낮은 효율특성을 보인다. 그림 10의 A곡선과 같이 상전류를 제한하지 않고 고정된 도통각으로 운전하였을 때 가장 높은

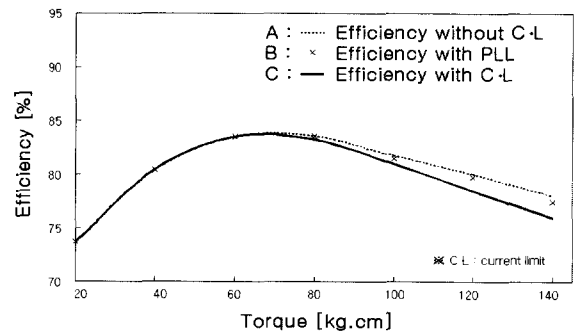


그림 10 부하변화에 따른 운전효율 특성, 1000[rpm]
 Fig. 10 Efficiency characteristics at 1000[rpm]

효율특성이 나오나, 이는 부하가 증가하면 높은 피이크전류가 형성된다. 그러나 도통각을 그대로 하고 상전류를 제한하여 운전하는 경우 C곡선과 같이 효율의 저하를 가져온다. 상전류를 제한하지 않고 선행각을 가변시키는 PLL 제어를 행하면 B곡선과 같은 결과를 가지며, 이는 최고운전 효율 곡선에 근접하는 결과를 얻을 수 있다. 즉, 일정한 부하토크값 이상일 때 선행각을 증가시키는 PLL 특성을 가지는 구동시스템이 전류제한 구동보다 더 향상된 효율특성을 보이며, 최고 효율특성에 근접하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 SRM의 구동에서 동적 도통각 제어를 통해 맥동토크와 부하토크의 변화로 인한 속도 변동을 줄이는 PLL(Phase Locked Loop) 방식을 채택하였으며, 고효율 구동을 위해 도통각제어를 행하였다. 적정도통각은 전동기의 운전실험을 통해 구하고, 인가 전압의 조정으로 제어하였다. 구성된 시스템은 운전속도와 부하의 변화에 따라 선행각이 증감함으로써 뛰어난 동적 속도제어 특성을 가지며, 인버터 인가전압 제어를 통해 선행각을 조정함으로써 전부하 영역에서 높은 구동효율특성을 보였다. SRM 구동 시스템의 PLL 속도 제어기능과 도통각제어를 TMS320F240 DSP를 사용해 구현함으로써 디지털 제어기의 유연성과 소형화를 꾀하였다.

본 연구는 학국과학재단 해외 post-doc.연구에 의한 결과의 일부로 재단의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] 안진우, 황영문, "스위치드 릴럭턴스 전동기의 구동과 응용", pp195-224, 신지서원, 1998.
 [2] 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.
 [3] 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.
 [4] J. Reinert, R. Inderka, M. Menne, R. W. De Doncker,

"Optimizing Performance in Switched Reluctance Drives", IEEE Tr-IA, Vol. 31, No.1 pp.91-98, 1995.
 [5] J. W. Ahn, Y. J. An, C. J. Joe, Y. M. Hwang, "SRM Drive System with Power Angle Control Concept", Proc. of ICPE'95, pp.963-967, 1995.
 [6] J. W. Ahn et al " Digital PLL Technique for Precise Speed Control of SR Drive" Proc. of PESC'99, pp.815-819, 1999.
 [7] M. O. Bilgic, V. Ozbulur, A. Sabanovic ; "Torque Ripple Minimization of a Switched Reluctance Motor" IEEE/APEC'95, Dallas, 1995.
 [8] J. Reinert, R. Inderka, M. Menne, R. W. De Doncker ; "Optimizing Performance in Switched Reluctance Drives", APEC'98, 13th, Vol.2, pp.765-770, 1998.
 [9] A.W. Moore ; "Phase-Locked Loops for Motor-Speed Control" IEEE Spectrum, Vol.10, pp.61-67, 1973.

저 자 소개



표성영(表成暎)

1970년생. 1998년 경성대학교 공과대학 전기전자·컴퓨터공학부 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 대양전기 기술연구소 연구원.



안진우(安珍雨)

1958년생. 1984년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1998-99년 미국 위스컨신대 방문교수. 현재 경성대학교 전기전자·컴퓨터공학부 부교수.

학부 부교수.