

마이크로 컨트롤러를 이용한 SRM구동용 디지털 방식 인버터에 관한 연구

(A Study on the Digital Inverter for SRM Drive using Microcontroller)

安珍雨* · 金喆禹**

(Jin-Woo Ahn · Cheul-U Kim)

요 약

본 논문은 SRM의 가변속 구동을 위한 디지털 방식 인버터에 관한 연구이다. 전동기의 속도제어를 위해 고정스위치각과 가변전압제어방식을 사용하였으며 이는 평탄 상전류를 얻어 토크 맥동을 저감하고 상제어를 위한 위상각 제어를 하지 않아 제어시스템을 단순하게하는 장점을 가진다. 8097마이크로컨트롤러를 이용하여 제어시스템을 디지털화, 소형화하고 제어의 유연성을 높였다.

Abstract

This paper is to develop a digital inverter using microcontroller for a Switched Reluctance Motor (SRM) drives. The closed-loop speed control system with fixed switching angle and variable voltage control is used to form a flat-topped phase current and to simplify the drive system. This could be driven in a wide speed range with flat-topped current. Microcontroller is used to be compact and to have a flexibility in the control system.

1. 서 론

Switched Reluctance Motor(SRM)은 범용전동기의 다기능화와 그 효율화의 한계를 극복하기 위해 개발되었다. 반도체 전력변환 장치를 이용한 기존의 교류전동기의 경우 회전자계를 이용하여 토크를 발생해야 하므로 정현파발생을 위한

복잡한 제어회로가 요구되며, 스텝전동기인 경우 펄스전원이 요구되어 스위칭방식의 전원이 적당하나 대용량의 적용에는 적절하지 못하다. 그러나 SRM의 경우 일반 자기회로를 사용하고 전력회로도 비교적 간단하며 에너지 변환효율도 매우 높아 바람직한 대체 전동기구로 주목받고 있다.¹⁾

본 논문에서는 넓은 속도범위에 적용할 수 있으며 비교적 간단하고 소형화된 전력 제어장치를 전동기부와 일체화 할 수 있는 디지털 방식의

*正會員 : 경성대 공대 전기공학과 조교수

**正會員 : 부산대 공대 전기공학과 교수

接受日字 : 1996年 9月 4日

SRM 구동시스템을 제안한다. 일반적으로 SRM의 구동방식은 저속에서는 전류제어를 위해 초핑 또는 PMM 제어를 통해 토오크를 제어하며, 고속에서는 여자시간 감소로 스위칭각을 조정할 수 없으므로 단일펄스를 사용하여 위상각 제어를 통해 토오크를 제어한다. 그러나 저속의 초핑 영역에서는 전류맥동으로 인해 토오크맥동 및 스위칭 손실이 증가하고 고속에서는 단일펄스모드로 동작해야 하는 등 동작모드의 전환이 필수적이며 이로 인해 제어의 복잡성을 가중되며 넓은 속도범위에서 사용하기에는 적당하지 못하다.

그러므로 본 논문에서는 동작속도범위에 관계없이 상여자각을 일정한 값으로 고정하면서 토오크조정이 가능한 제어기법을 이용하여 제어과정을 단순화한다. 또한 제어의 유연성과 가변성을 높이고 제어 및 전력부를 전동기와 일체화하기 위해 필수적인 소형화를 위해 경제성이 높은 마이크로 컨트롤러를 사용하고 제어과정은 소프트웨어화 하도록 하였다.

2. SRM 구동 방식

SRM은 기존의 릴럭턴스 전동기에 전력전자기술을 적용하며 가변속 구동을 용이하게 한 전동기구이다. 이는 종래의 회전기 토오크 발생방법과는 그 원리가 다르다. 즉 SRM은 가변릴럭턴스 특성을 이용해야 하고, 이를 위해서는 가변여자 즉 스위칭여자가 필요하며 이는 전력용 스위칭 여자기구를 이용하면 효과적인 제어가 가능하다.

이러한 가변여자제어를 위한 전력변환장치는 다양하게 제안되어 있으며 구동특성도 각 방식에 따라 다르다. 이러한 전력변환장치를 이용한 구동시스템을 크게 전압제어구동 방식과 전류제어구동방식이 있다. 전압제어방식은 가변 듀티사이클로 전압의 크기를 조정하는 방식이며 전류제어방식은 전동기의 토오크-전류 관계에서 요구 토오크에 의해 전압의 크기를 조정하는 방식이다. 전동기는 근본적으로 기자력제어가 효과적이므로 두 구동방식중에서 전류제어방식이 구동특성이 우수하며 바람직한 제어 방식으로 평가되고

있다.^{2), 3)}

그러나 이 두 방식 모두 초핑제어방식을 채택하여 전류맥동이 발생하고 이로 인해 토오크의 맥동 및 스위칭 손실이 증가하므로 운전효율측면에서도 바람직하지 못하다. 즉, 전류맥동을 최소화하는 제어방식을 도입한다면 구동특성을 향상시킬 수 있을 것이다.

SRM 구동에서 기준속도(base speed)이하에서는 일정토오크로 제어되고 이를 위해 전압을 초핑하여 기준전류를 유지하도록 제어한다. 이 속도를 넘으면 충분한 여자시간을 확보할 수 없으므로 단일펄스를 사용하고 펄스의 폭을 조정하여 일정출력을 유지하도록 제어한다.

이와같이 제어방식은 크게 초핑영역, 위상제어영역으로 나뉘어지며 전자는 전류린, 후자는 전압원제어방식이 적절하다. 그러나 넓은 속도 범위에서는 두 영역을 모두 포함하여 구동하므로 이 두 방식을 효율적으로 조정할 수 있는 제어시스템의 도입이 필요하다. 또한 전동기 발생토오크의 맥동은 전류 맥동에 의해 발생하므로 적절한 여자방식에 의해 맥동전류를 최소화하는 것이 바람직하다.

그러므로 전동기 동작속도구간에 관계없이 전동기전류가 평활하게 되면서 여자각을 조정하는 과정을 요구하지 않는 고정된 여자각 및 소호각을 구할 수 있다면 상여자기간동안 일정전류로 여자 할 수 있으며, 상여자를 위한 제어도 간단해 질 수 있을 것이다.

이 고정된 여자각, θ_{on} 은 권선의 저항을 무시하면 식(1)과 같고 평활한 전류가 역토오크를 발생하지 않고 0이 될 수 있는 최대 소호각, θ_{off} 는 식(2)와 같이 구할 수 있다.^{4), 5)}

$$\theta_{on} = \frac{L_{min}}{K_1} \quad (1)$$

$$\theta_{off} = \frac{L_{max}V}{K_1V_b} \quad (2)$$

여기서 전동기의 상권선저항은 무시하였으며, K_1 은 $dL(\theta, i)/d\theta$, L_{min} , L_{max} 는 전동기 인덕턴스 프로필의 최소값 및 최대값이며 V 는 여자전압, V_b 는 감자전압의 크기를 나타낸다. 또한 이때의 토오크는

$$T(\theta) = \frac{1}{2} \cdot \frac{V^2}{K_t \omega_r^2} \quad (3)$$

식(3)으로 표시되어 토오크는 여자전압의 조정으로 가능하다. 여기서, ω_r 은 회전각속도이다.

3. 제어 시스템의 구성

제안한 전류예측방식 속도제어시스템은 전동기의 상전류의 맥동을 저감시키기위해 별도의 상초핑을 행할 필요가 없으며 상여자를 위한 점호각 및 소호각을 각 여자순간마다 계산할 필요가 없으므로 소프트웨어를 이용한 디지털 제어시스템에 적용할 경우 고성능의 마이크로 프로세서를 채용하지 않아도 된다. 제어시스템의 전체 블록도는 [그림 1]에 있다.

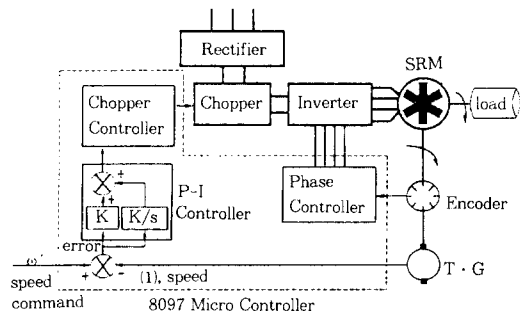


그림 1. 제어시스템의 전체 블록도
Fig. 1. Block diagram of control system

제어시스템은 전력변환부, 제어용 하드웨어 및 소프트웨어로 구성된다. 각 부분의 구성을 살펴보면

3.1 전력변환부

전력변환부는 정류기, 초퍼 및 인버터로 구성된다. 정류기는 교류를 일정 직류로 변환하고 초퍼는 전동기의 요구토크에 따라 전압을 조정하는 부분이며, 인버터는 순차적으로 상여자를 행하는 부분이다. 여기서 인버터는 전류의 조정이나 제한을 위한 초핑동작은 하지 않는다. 사용한 전력변환부는 [그림 2]에 나타내었다. 구동시스

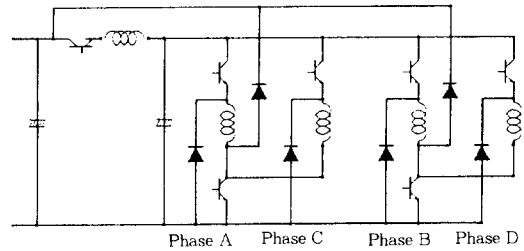


그림 2. 전력변환부
Fig. 2. Power converter

템은 넓은 속도 범위에서 연속적 속도제어를 실현하므로 제어방식의 유연성이 높은 비대칭형 인버터를 채택하였다. 각 상의 상단 환류다이오드가 초퍼단 앞에 연결되어 있는 것은 전력회생 뿐만 아니라 감자전압으로 확보되어 감자시 전류의 감쇄를 크게 하는 장점이 있다.

3.2 제어 하드웨어

8096계열은 고성능 및 빠른 실시간 처리를 필요로 하는 응용 제품들에 사용될 수 있도록 만들어진 16비트 단일칩 마이크로 콘트롤러로서 다양한 성능 및 기능을 가지고 있다. 8097은 16비트의 CPU와 232바이트의 내부 RAM, Accumulator의 한계를 극복해 주는 Register to Register Architecture, SFR(Special Function Register)을 통한 I/O의 직접제어로 빠른 I/O출력시간, 보드상의 공간을 줄여주는 10비트 A/D 변환기, 외부 입출력을 정확한 시간에 처리해 줄 수 있는 고속I/O Subsystem, CPU의 Overhead를 줄여주는 PWM(Pulse Width Modulation)출력 기능, 외부와 직렬 통신을 할 수 있는 Full Duplex Serial Port, 2개의 타이머 등, 실시간 처리 및 고성능, 고집적을 요구하는 응용에 사용될 수 있는 기능들을 모두 갖추고 있어 전동기 제어에 적합한 프로세서이다.

전동기에 연결되어있는 절대 엔코더에서 출력되는 9비트의 데이터는 8097의 입력포트(P0.1~P0.7)와 쌍방향 입출력 포트(P2.6, P2.7)를 사용해 받아들이고 타코 제너레이터에서 출력되는 속도아날로그 신호를 아날로그 입력포트(P0.0)를

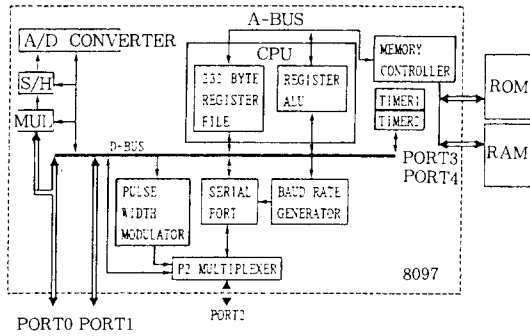


그림 3. 8097의 내부구조
Fig. 3. Block diagram of 8097

통해 받아들여 A/D 변환기에 입력하게 된다. 8097에 집적된 A/D변환부는 8개 채널의 아날로그 멀티플렉서와 샘플-홀드회로 그리고 10비트 A/D변환기로 구성되어 있다. 각 변환은 $22(\mu\text{sec})$ 가 걸리고 샘플-홀드를 위한 시간을 필요로 한다. 변환방법은 연속 접근(Successive Approximation)방법이 사용된다. 전동기의 인가전압을 조정하는 초퍼는 8097의 PWM출력을 이용한다. PWM출력파형은 $15.625(\text{KHz})$ 의 주파수를 가지는 가변듀티사이클(duty cycle)펄스이고 듀티사이클을 변화함으로써 256스텝에서 변화될 수 있는 DC인가전압을 얻는다. 전동기의 상제어를 위해 출력포트(P1.0~P1.3)를 사용하여 전력소자를 구동한다. PORT3, PORT4는 메모리 컨트롤러를 사용하는 시스템 버스로 사용하여 외부 메모리를 호출한다. 개발시의 편의성을 도모하기 위해 8097과 IMB PC간에 직렬포트를 통해 8097에서 지원하는 네가지의 직렬통신 모드중 표준 비동기 통신방식을 사용하고 $9600(\text{bps})$ 로 통신이 이루어진다. [그림 3]는 8097의 내부구조의 블록도를 보여준다.

3.3 제어 소프트웨어

제어프로그램은 8097어셈블리어언어로 작성되었다. 프로그램의 가장 기본적인 기능을 수행하는 전동기의 상제어를 위한 출력포트 제어루틴은 절대 엔코더에서 받은 위치 정보를 사용하여 메모리의 회전자 각위치(angular position)정보가 저

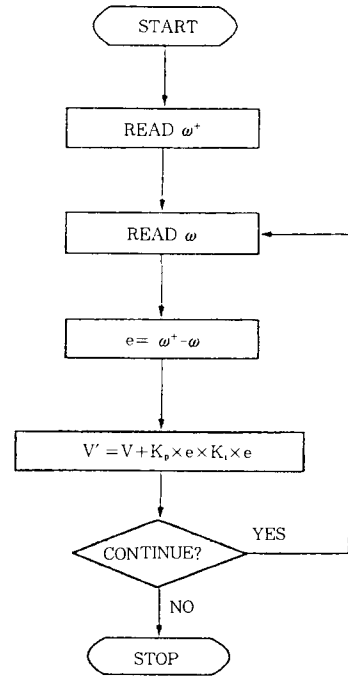


그림 4. 제어 흐름도
Fig. 4. Flow chart of control software

장되어 있는 테이블을 참조하여 회전자의 각위치를 파악, 각 상의 ON/OFF여부를 결정하고 상제어신호를 PORT1으로 출력해 전력소자 IGBT를 동작시킨다. 전동기 기동시에 빠른 지령속도 추종을 위해 소프트웨어 타이머 인터럽트를 사용한다. 위 인터럽트 루틴에서는 지령속도와 현재속도간의 차이정도에 따라 적절한 PWM 듀티사이클을 명령하면 PULSE WIDTH MODULATOR는 지시된 듀티사이클의 PWM신호를 P2의 PWM핀으로 출력한다. 운전시에 속도제어를 위해 A/D 변환완료 인터럽트를 사용한다. 위 인터럽트 처리루틴은 타코 제너레이터에서 제공한 각속도 정보를 PORT0.0로 입력받아 A/D 변환된 데이터를 P-I제어 알고리즘을 사용해 일정속도 제어를 위한 최적의 PWM듀티사이클을 연산해 출력하는 루틴이다. 지령속도의 지시와 전동기의 기동, 제동을 위해 통신 인터럽트를 사용한다. 통신 인터럽트 루틴은 시스템의 운용을 위한 부분으로, 키보드에서 입력되는 코드를 판별해 지

령속도 지시, 전동기의 기동, 제동을 위한 루틴으로 프로그램을 분기 시킨다.

4. 실험 및 결과

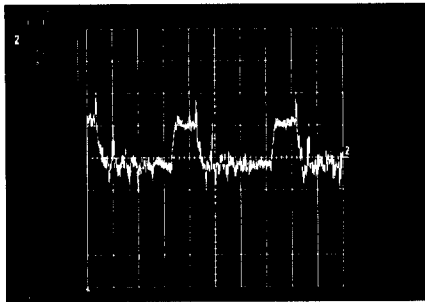
본 연구에서는 SRM의 가변속제어에서 부하, 속도에 무관하게 전동기 상전류가 초평되지 않고 평단하게 되기 위한 제어방식을 채용하고 이를 8097 마이크로 컨트롤러를 이용하여 실현하였다.

구성한 제어시스템을 통해 제안한 제어방식의 타당성을 확인하였다. 구동시 상전류는 [그림 5]와 같다. (a), (b)는 각각 500, (b)는 1000[rpm]에서의 상전류를 보여준다. 상전류의 잡음은 드라이브회로의 전원으로 스위칭레귤레이터를 사용한 때문으로 실용화 할 경우는 이를 충분히 감쇄시켜야 할 것이다. [그림 6]은 전동기의 속도응답 특성을 보여준다. (a)는 0→500[rpm], 0→

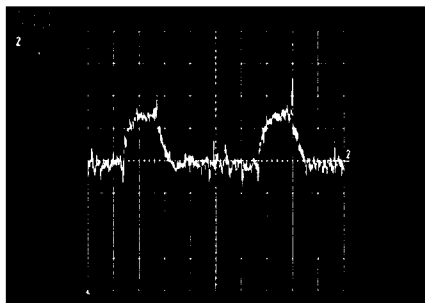
1000[rpm]으로 운전될 경우의 응답특성이다. 또한 [그림 7]은 외란 또는 부하변동에 따른 속도 응답성을 보여주는 것으로 (a)는 200[rpm]에서 (b)는 500[rpm]에서 1/2부하로 운전중 전부하로 갑자기 부하가 증가할 경우이다. 이상의 운전특성으로 보아 본 제어시스템은 비교적 양호한 운전특성을 가졌음을 알 수 있다. [그림 8]는 전동기의 운전중 속도, 상전류, 상여자전압, DC전압 조절을 위한 PWM출력신호를 보여준다. (a), (b)는 500[rpm], (c), (d)는 1000[rpm]에서의 결과이며 (b), (d)는 (a), (c)의 과형에서 PWM신호를 보기위해 시간축을 확대한 것이다.

5. 결 론

본 논문은 SRM의 가변속제어를 위한 디지털 방식인버터를 구성하고 구동시스템의 동작특성에 대해 기술하였다.

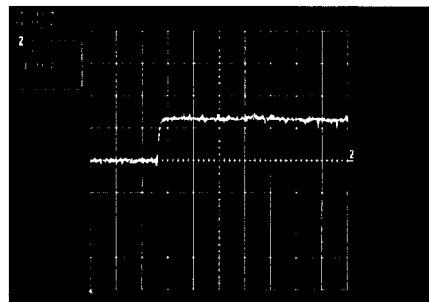


(a)

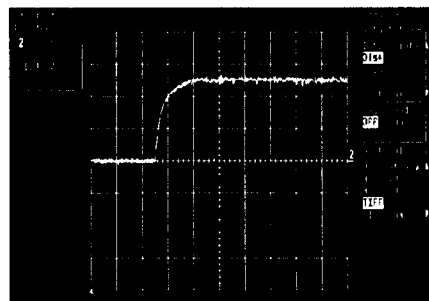


(b)

그림 5. 상전류 (a) 500[rpm], (b) 1000[rpm]
(수직: 2A/Div., 수평: (a) 5ms/Div., (b) 2ms/Div.)
Fig. 5. Phase current (a) 500[rpm] (b) 1000[rpm]
(Ver.: 2A/Div., Hor.: (a) 5ms/Div., (b) 2ms/Div.)

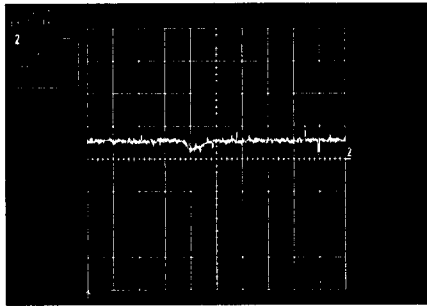


(a)

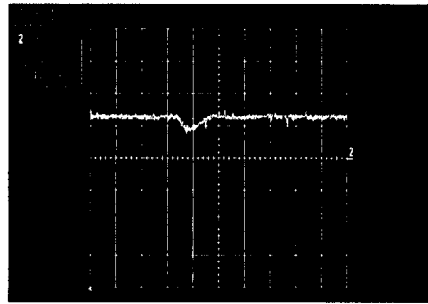


(b)

그림 6. 전동기의 속도응답 특성 (Hor.: 2s/Div.)
(a) 0→500[rpm] (b) 0→1000[rpm]
Fig. 6. Speed characteristics of the control system
(Hor.: 2s/Div.) (a) 0→500[rpm] (b) 0→1000[rpm]

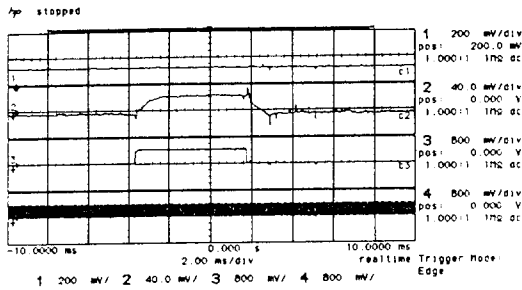


(a)

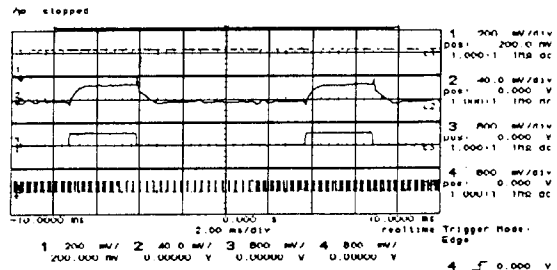


(b)

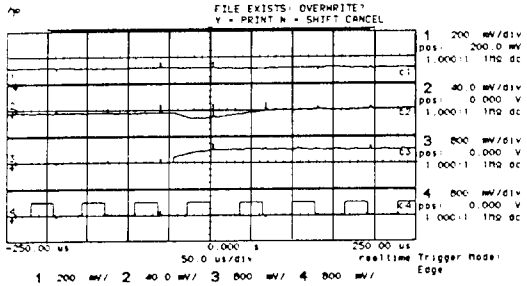
그림 7. 전동기의 속도응답 특성(1/2부하에서 전부하인가시)(Hor.:2s/Div.) (a) 200[rpm] (b) 500[rpm]
 Fig. 7. Speed characteristics of the control system(1/2load to full load)(Hor.:2s/Div.) (a) 200[rpm] (b) 500[rpm]



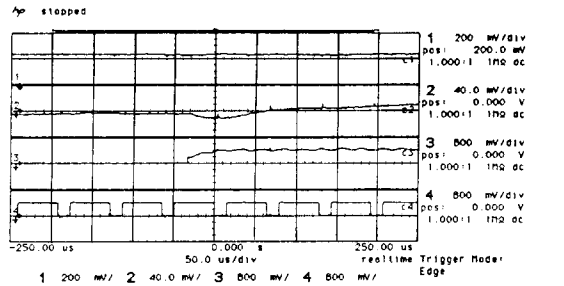
(a)



(c)



(b)



(d)

그림 8. 전동기의 운전중 속도, 상전류, 상여자전압, PWM출력신호 (파형 위에서부터 1: 속도, 2: 상전류, 3: 상여자전압, 4: PWM출력신호) (a), (b) 500[rpm], (c), (d) 1000[rpm]

Fig. 8. Speed, phase current and voltage, PWM signal(Upper to down q: speed, 2: phase current, 3: phase voltage, 4: PWM signal) (a), (b) 500[rpm] (c), (d) 1000[rpm]

속도제어시스템은 넓은 속도범위에서 맥동토 오크를 저감하고 손실을 줄이기 위해 초퍼와 비대칭인버터를 결합하고 초퍼에서는 속도에 따라 초퍼비를 조정하여 평탄 상전류가 되게 한다. 상 스위칭 온각과 오프각은 고정되고, 속도제어는

속도루우프에 의해서 상인가전압을 조정하므로 비교적 간단한 轉流 및 제어회로로 구성할 수 있었으며 제어시스템은 제어의 유연성과 가변성을 확보하고 컴팩트화하기 위해 8097 마이크로 콘트롤러를 채용하였다.

구성한 시스템으로 1/4[Hp] 8/6 SRM 구동한 결과 200~2000[rpm]까지 구동하였으며 구동특성도 우수하였다. 향후 구성한 시스템의 토오크 및 효율의 극대화를 위한 연구가 계속되어야 할 것이다.

본 연구는 한국전력공사 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음. 과제번호 : 95-8

참 고 문 헌

1) P.J.Lawenson, J.M.Stephenson, P.T.Blenkinsop, J. Corda, N.N.Fulton "Variable-speed switched reluctance motors" IEE Vol.127, Pt.B, No.4, July, pp. 253-265, 1980.
 2) G.S.Buja and M.I.Valla, "Control Characteristics of the SRM Drives-Part I : Operation in the Linear Region," IEEE Trans. Indu. Elec., vol.38, no.5, pp.313-321, Octo-

ber 1991.
 3) G.S.Buja and M.I.Valla, "Control characteristics of the SRM Drives-Part II : Operation in the Saturated Region," IEEE Trans. Indu. Elec., vol.41, no.3, pp.316-325, June 1991.
 4) Jin-Woo Ahn, H.W. Park, Y.M. Hwang, "A Novel control Scheme for SRM Drives" Tr of KIEE pp.45-49, 1996.4.
 5) Jin-Woo Ahn, Y.M. Hwang, "Fixed Switching Angle Control Scheme for SRM Drive" Proc. of APEC'96 pp. 963-967, San Jose, U.S.A, 1996.3.
 6) C.Elmas, H.Parra, "A DSP Controlled Switched Reluctance Drive System for Wide Rwnge of Operating Speed" Proc. of IEEE-PESC'92, pp.84-85, 1992.
 7) B.K. Bose, T.J.E. Miller, P.M. Szczesny, W.H.Bicknell, "Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor" IEEE Trans. Vol.IA-2. N0.4, pp. 708-715, 1986.
 8) 오석규, 이두성, 안진우, 황영문, "PLL을 이용한 SRM의 동기화 강화에 관한 연구" 전기학회 하계학술회의 논문집, pp.403-405, 1996. 7.

◇ 著 者 紹 介 ◇



안진우(安珍雨)
 1958년 5월 26日生. 1984년 부산대 공대 전기공학과 졸. 1992년 2월 동대학원 전기공학과 졸(박사). 현재 경성대학교 전기공학과 조교수.



김철우(金喆禹)
 1942년 12월 5日生. 1969년 부산대학교 공대전기공학과 졸업. 1974년 일본 전기통신대학 전자공학과(석사). 1986년 중앙대 대학원 전기공학과(박사). 1982년 일본 동경공업대 전기전자공학과 객원교수. 현재 부산대 공대 전기공학과 교수.