

SRM의 센서리스 제어를 위한 인덕턴스 추론기법

安珍雨^{*}, 朴晟濬^{**}, 金泰亨^{***}

Inductance Reasoning Method for Sensorless Control of an SRM

J.W Ahn, S.J Park, and T.H Kim

요 약

본 논문은 스위치드 릴럭턴스 전동기(SRM)에서 회전자위치검출의 새로운 방법을 다루었다. 전동기에 대한 센서리스방식의 제어기법들은 상전류의 측정과 비여자 구간에서의 펄스전압인가를 포함하고 있다. 회전자의 위치를 추정 할 수 있는 원리는 펄스 전류를 통한 인덕턴스의 검출을 기초로 한다. 이 센서리스 제어법은 회전자의 위치검출 연산이 매우 간단하여 전속도구간에서 운전이 가능하여 드라이브 시스템을 효율적으로 구성할 수 있다. 제안한 방식을 이용하여 구동시스템을 구성하고 실험을 통하여 검증하였다.

ABSTRACT

This paper describes a new method of detecting rotor position in switched reluctance motor(SRM). Some strategies of position sensorless control methods for the motor include the measurement of phase current and applied pulse voltage in an unexcited phase. The principle of the estimation of a rotor position is based on the detection of inductance by pulse currents. This sensorless method is very simple to compute rotor position estimation and gives efficient control of drive system. Suggested method is verified by some experimental tests.

Key words : SRM, Sensorless, Pluse voltage and current, Inductance estimation

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 구조가 간단하고 저렴하며, 직류 직권 전동기의 속도-토크 특성을 가지고 있어, 선진국을 중심으로 가전기기, 전기자동차, 항공기 및 산업전반에 걸쳐 그 응용영역을 확대해가고 있다.^[1]

SRM은 릴럭턴스 토크를 극대화하기 위해 회전자와 고정자가 모두 돌극형의 구조를 가지며 권선은 고정자에만 집중권으로 감겨 있어 전자계 구조상 단속적인 여자 전원이 각 상 권선에 순차적으로 인가되어 구동되므로 낮은 스위칭 주파수로 운전이 가능하여 고속 운전이 가능한 장점을 갖고있다^[2]. 반면에 회전자 위치에 따른 적절한 스위칭 동작을 위해서는 회전자 위치에 대한 정보를 검출하기 위한 위치 검출 장치가 필수적이라는 취약점을 가지고 있다^[3]. 회전자 위치각의 검출은 일반적으로 엔코더나 레졸버를 사용하나, 이러한 외부 위치센서는 분해능이 높을수록 단가가 상승하게 된다. 따라서 설치비용에 대한 부담을 줄이기 위해서 저가형 엔코더를 사용하거나 이를 완전히 제거하기 위한 센서리스 구동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[4]. 그러나 여기서는 저속에서의 문제 등 가능성을

*정회원, 경성대 전기전자컴퓨터공학부 교수

E-mail : jwahn@ks.ac.kr

**정회원, 전남대 전기공학과 조교수

***학생회원, 경성대 전기전자공학과 석사과정

접수일자 : 2003. 7. 3

1차심사 : 2003. 9. 3

심사완료일 : 2003. 9.16

보인것에 불과하다. 따라서 본 연구에서는 토크를 발생하지 않고 있는 상에 극히 짧은 시간의 펄스 전압을 인가하고 이 때 발생하는 전류로부터 SRM의 상 인덕턴스를 측정하여 회전자의 위치를 검출하는 방법을 사용하되 고속의 프로세서를 이용하여 전 속도구간에서 위치추정과 속도제어가 가능한 방식을 제안하였다. 제안된 회전자 위치 검출방식은 정지 및 기동시에도 회전자의 위치를 검출할 수 있어 기존의 기동에 대한 문제를 해결하였다. 따라서 온·오프각 제어에 의한 광범위한 속도영역에서 안정된 속도제어가 가능할 뿐만 아니라, 기존의 엔코더를 제거함으로써 SRM의 실용화 가능성을 높였으며, 제안한 방식을 구현하기위한 DSP제어 알고리즘을 개발하여 그 가능성을 확인하였다.

2. SRM의 전압방정식

SRM에서 정확한 스위칭 동작으로 원하는 토크를 발생시키기 위해서는 상전류에 대한 해가 필수적이다. 전동기에서 상전류를 해석하기 위한 기초가 되는 상 전압방정식은 아래와 같다.

$$V_s = R i + \frac{d\lambda}{dt} \quad (1)$$

여기서 R은 권선저항, λ 는 총 쇠교자속이다.

식 (1)에서 총 쇠교자속은 인덕턴스와 전류의 곱으로 표현되나 인덕턴스가 위치와 전류의 함수로 표현되므로 편미분을 이용하여 다시 표현하면 아래와 같다.

$$V_s = R i(t) + i(t) \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega + L(\theta) \frac{di(t)}{dt} \quad (2)$$

여기서 ω : 회전자 각속도

식 (2)의 상전압 방정식에서 우변의 두 번째 항은 SRM의 역기전력에 해당된다. 따라서 역기전력 항은 아래 식으로 표현된다.

$$e = \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega i(t) = K \omega i(t) \quad (3)$$

$$\text{단, } K = \frac{dL(\theta)}{d\theta}.$$

식 (3)에서 보는 바와 같이 역기전력은 직류전동기와 동일한 형태를 취하고 있다.

3. 인덕턴스 프로파일에 의한 회전자 위치검출

SRM에 상 전압을 인가하고 토크성분인 상전류를 검출하면 이론적으로는 상 인덕턴스를 계산할 수가 있어 회전자의 위치에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이 상 인덕턴스를 계산하기 위해서는 저항에 의한 전압강하, 전류 및 인덕턴스의 포화의 함수인 역기전력을 정확히 계산되어야 한다는 전제조건이 필요하다. 이러한 전제조건을 만족시키기란 현실적으로 매우 어려움이 있다. 이러한 전제조건을 제거하기 위해서는 우선 상 인덕턴스를 검출하기 위한 전류와 토크발생을 위한 전류와 구별이 되어야한다. 이를 만족시키기 위해서는 상 인덕턴스 검출시에는 토크발생을 위한 상전류의 형성이 없어야 한다. 다행히 SRM은 전자계 구조상 단속적인 여자 전원이 각 상 권선에 순차적으로 인가되어 구동되므로 항상 토크발생을 위한 상전류가 도통하지 않는 상이 존재하게 된다. 따라서 상전류가 흐르지 않는 상으로부터 인덕턴스를 측정할 수 있다. 상전류가 흐르지 않는 상에 전압을 인가하고 전류를 검출하여 상 인덕턴스를 측정할 수 있으나, SRM이 운전 중에는 역기전력을 무시할 수 없으며, 저항에 의한 전압강하도 무시할 수가 없다. 특히 인덕턴스 검출을 위한 상전류가 토크 맥동을 유발해서는 안 된다. 이러한 제한조건을 만족하기 위해서는 인덕턴스 측정을 위한 전류가 매우 적어야한다. 이를 위해 폭이 매우 좁은 펄스 전압을 인가하고 그때의 상전류를 검출하게 되면 매우 적은 전류에 의해 저항의 전압강하 및 역기전력 성분은 무시될 수 있으며 단순히 인덕턴스로 보아도 무방하다. 따라서 SRM에서 상전류가 매우 적다면 식 (2)의 전압방정식은 식 (4)과 같이 간단히 표현된다.

$$V_s = L(\theta) \frac{di(t)}{dt} \quad (4)$$

식 (4)를 전기적인 등가회로로 표현하면 그림 1과 같이 된다.

그림 1에서 보는 바와 같이 SRM의 상 인덕턴스는 위치의 함수만으로 간단히 표현되어진다.

그림 1과 같은 회로에서 인덕턴스를 검출하기 위해서는 상스위치를 온하고 일정시간 후 이때 흐르는 전류를 검출하여 계산하면 된다. 이때 인덕턴스 검출용 전류는 전동기 구동에 영향을 미치지 않을 정도의 적은 전류로 되는 시간으로 설정하여야 한다. 그림 2는 인덕턴스 계산을 위해 SRM의 상 전압을 인가할 경우의 상전류 파형이다.

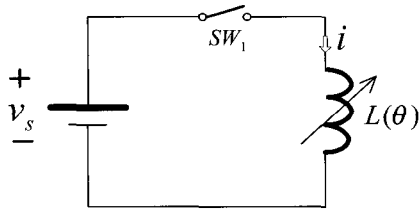


그림 1 적은 전류시 SRM의 상 등가회로
Fig. 1 Phase model of SRM at low current level

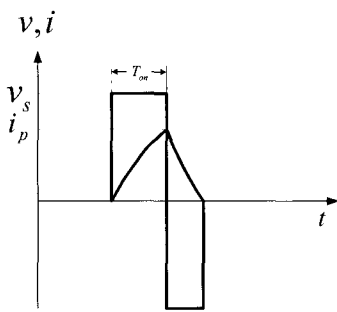


그림 2 펄스전압 인가시 상전압 및 상전류 파형
Fig. 2 Waveform of phase voltage and current when pulse applied

이때 상 스위치가 오프될 때 전류해를 구하면 식(4)로부터 아래와 같이 주어진다.

$$di(t) = \frac{V_s}{L(\theta)} dt \tag{5}$$

식 (5)로 부터 그림 2와 같이 스위치 온 시간이 주어질 때, 스위치가 오프되는 시점인 피크전류를 구하면 다음과 같다.

$$i_p = \frac{V_s}{L(\theta)} T_{on} \tag{6}$$

식 (6)에서 구한 피크전류로부터 인덕턴스를 구하면 아래와 같다.

$$L(\theta) = \frac{1}{i_p} V_s T_{on} \tag{7}$$

식 (7)에서 인가전압과 스위치 온 시간은 설정치로 정해지면 상수로 취급할 수 있다. 따라서 식 (7)는 아래 식과 같이 간단히 표현된다.

$$L(\theta) = K_1 \frac{1}{i_p} \tag{8}$$

단, $K_1 = V_s T_{on}$.

상전류가 흐르지 않는 상에 인덕턴스 검출용 전류만 검출된다면 식 (8)로부터 간단히 SRM의 상 인덕턴스가 계산되어지고, 이를 이용하여 회전자의 위치를 추정할 수 있다.

그림 3은 회전자의 전기적 위치각에 따른 비포화 인덕턴스 프로파일과 인덕턴스 검출용 전류 파형을 나타내고 있다.

그림 3(a)에서 보는바와 같이 회전자 위치각에 대한 인덕턴스가 전단사함수가 되지 않으므로 인덕턴스를 예측한다하더라도 이를 만족하는 회전자 위치각은 2개가 존재하게 된다. 이 2개의 회전자 위치각에서 현재 회전자 위치각과 일치하는 유일 해를 구하는 방법에는 크게 두 가지 방법으로 접근 할 수 있다. 그 첫째는 다른 상의 인덕턴스를 예측하여 그 해와 같은 한 해를 구하는 방법이다. 이 방법은 회전자의 위치각을 추정하는 확실한 방법으로 초기 기동시 회전자의 위치각 판별에 사용하면 그 효과를 극대화 할 수 있다. 그러나 이 방법을 사용하기 위해서는 상전류 도통이 하지 않는 상이 최소한 2개가 존재하여야 하는 조건으로 인하여 상이 많은 4상 이상에서 문제가 되지 않으나 3상 이하에서는 SRM이 운전중에 상전류 도통이 하지 않는 2개의 상이 항상 존재하는 것은 아니다. 이 경우에는 한 상의 인덕턴스 값으로만 회전자 위치각은 구하기는 어려운 실정이다. 회전자 위치각을 추정하는 2번째 방법으로는 이전의 상스위치 정보와 인덕턴스프로파일을 갖고 유일 해를 찾는 것이다. 이는 SRM의 전자계 구조상 단속적인 여자 전원이 각 상 권선에 순차적으로 인가되어 구동하는 방식이므로 이전의 상스위치 상태를 참고하면 원하는 회전자 위치각을 선택할 수 있다.

본 논문에서는 초기회전자 위치각은 3상의 인덕턴스에 의해서 결정하고, 운전시는 상스위치 정보와 한 상의 인덕턴스 프로파일에 의해서 회전자의 위치 검출방식으로 행하였다. 인덕턴스를 예측하기 위해 상 스위치 오프와 동시에 상전류를 검출하면 스위칭 노이즈에 의해 정확한 전류를 검출하기는 어렵다.

따라서 이러한 노이즈를 방지하기 위해서는 상 스위치를 오프하기 이전에 인덕턴스 전류값을 샘플홀더하고 상 스위치를 오프하는 방식으로 전류를 검출한다. 따라서 L을 계산하기 위한 식 (8)에서 Ton은 상스위치를 온한 순간에서부터 샘플링 홀더가 동작한 시간으로 대체하면 간단히 해결된다. 이와 같은 과정을 그림 4에 도식적으로 표현하였다.

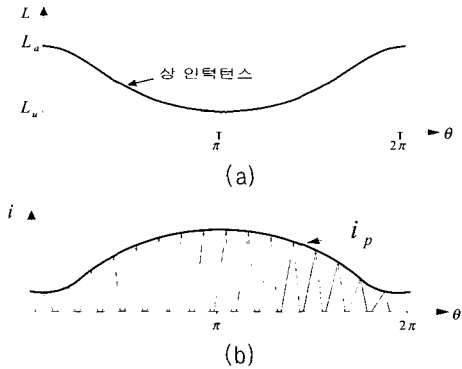


그림 3 인덕턴스 프로파일 및 인덕턴스 검출용 전류
 (a) 회전자의 전기적 위치에 따른 인덕턴스 프로파일
 (b) 회전자의 전기적 위치에 따른 상전류의 피크치
 Fig. 3 Inductance profile and currents according to electrical angle of rotor
 (a) Inductance profile according to electrical angle of rotor
 (b) Pick currents according to electrical angle of rotor

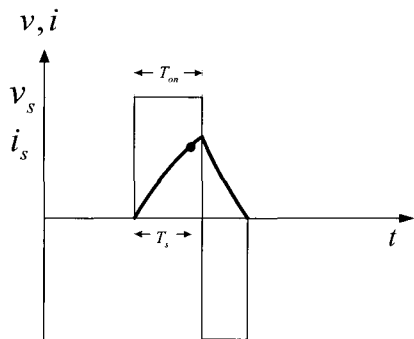


그림 4 정확한 전류검출을 위한 전류검출 시점
 Fig. 4 Instant of current pick-up

4. 제어기의 구성

그림 5는 SRM 구동시 메인 루프의 흐름도이다. 메인 루프에서는 각 상에 펄스 전압을 인가하여 회전자의 초기 위치각을 결정하고, 각종 변수의 초기화 및 과전류 및 과전압 등을 검사하여 폴트 신호를 발생하는 부분이며, 제어루틴에는 매 샘플링마다 구동영역에 따라 SRM구동에 필요한 전류 및 스위칭 각을 결정한다.

그림 6은 샘플링 시간간격마다 발생하는 인터럽터에 의해 실행되는 제어프로그램의 흐름도를 나타낸 것이다. 우선 회전자의 위치를 검출하기 위해 모든 상의

상전류를 검출하여 상전류가 도통하지 않는 상을 점검하고 그 상에 펄스 전압을 인가하여 인덕턴스 검출용

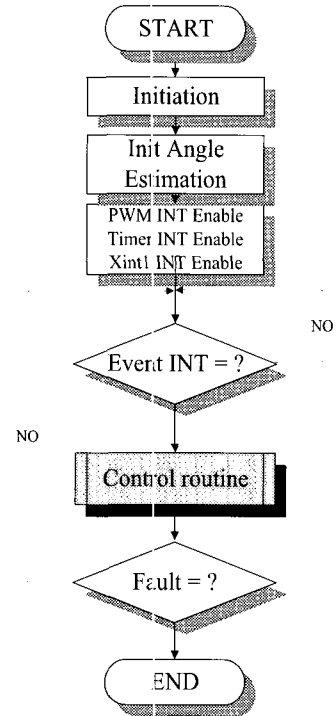


그림 5 주프로그램의 흐름도
 Fig. 5 Flowchart of main routine

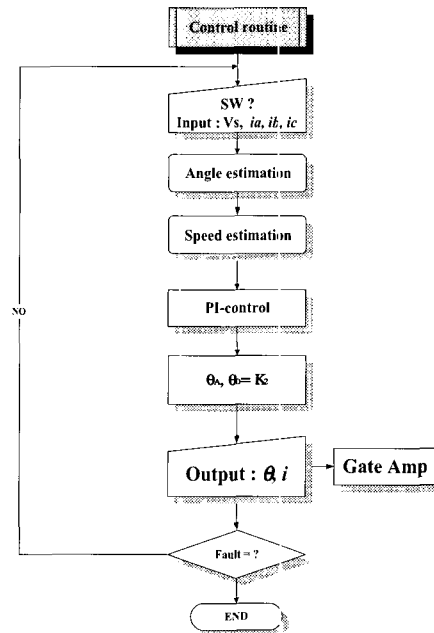


그림 6 제어루틴
 Fig. 6 Control routine

전류를 검출한다. 이때 상전류가 도통하지 않는 상이 2개인 경우 상전류 현재의 상스위치를 참조하여 다음 상이 온 되어야하는 상을 우선으로 하여 회전자 위치각을 결정한다. 위치정보로부터 속도 추정을 행하며, 이 속도 값과 기 취득한 전류값을 기초로 하여 SRM의 구동영역을 결정한다. 기동속도영역과 부토크 영역은 기본적으로 전류제어를 행하고, 기동속도 이상에서는 어드벤스 각도제어를 행하여 임의의 부하에 대하여 일정속도로 제어한다.

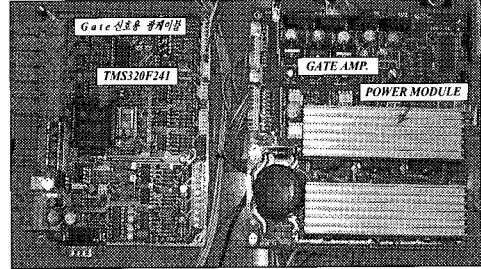


그림 8 제어 및 파워 보드의 사진
Fig. 8 Photograph of control board

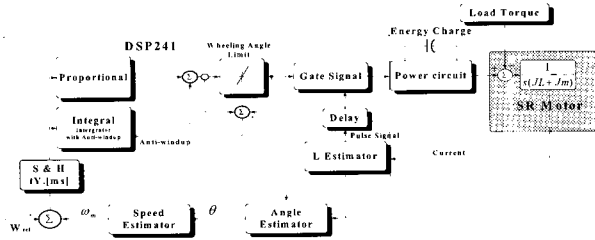
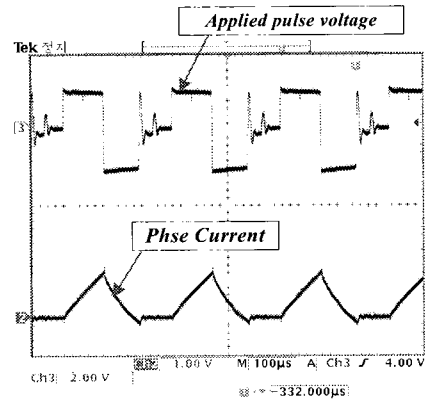


그림 7 전체 제어시스템의 구성
Fig. 7 Configuration of overall control System

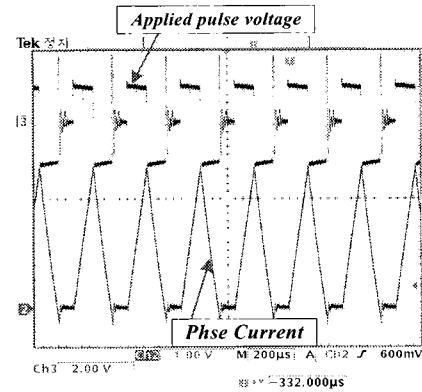
5. 실험결과 및 검토

그림 8은 제작된 제어기를 보여주고 있다. 제어기에 사용된 프로세서는 DSP320F241이다. DSP320F241은 6개의 PWM단자와 PWM 인터럽터를 가지고 있으며, 자체에 EEPROM과 10 Bit A/D컨버터 내장하고 있으며, 위치독 타이머에 의한 자기감시기능을 갖고 있다. 본 제어기에서 의한 인덕턴스를 검출하기 위하여 PWM단자에 의한 펄스를 발생하며 PWM 인터럽터에 의한 전류를 전류 샘플을 행하며, 스위치의 상태를 참고하여 회전자의 위치각을 추정하며, 이를 근거로 속도를 추정하여 지령속도 및 속도에 동작모드를 결정하여 SRM을 제어하게 된다.

그림 9는 인덕턴스를 계산하기 위한 펄스 전압과 전류 값을 고찰하기 위한 실험 파형이다. 인덕턴스 검출을 위한 상에 인가되는 펄스 전압의 폭은 100[μs]이며, 그림 9(a)는 최대 인덕턴스 시점에서 펄스형 상 전압과 전류를 나타내고 있으며, 그림 9(b)는 최소 인덕턴스 시점에서 펄스형 상 전압과 전류를 나타내고 있다. 회전자가 회전함에 따라 전류의 피크치는 그림 9(a)에서 그림 9(b) 사이의 값으로 변하게 되며 이 전류값을 검출하면 인덕턴스를 구할 수 있다.



(a)



(b)

그림 9 펄스 전압 및 전류
(a) 최대인덕턴스시 (b) 최소인덕턴스시

Fig. 9 Pluse voltage and current
(a) Aligned (b) Unaligned

그림 10은 외부에서 SRM을 회전시킨 상태에서 회전자 위치에 따른 인덕턴스 검출용 전류를 나타내고 있으며, 회전자의 정렬에서 다음 정렬까지 즉 전기각 360도에 따른 전류파형이다. 그림에서 보는 바와 같이

정렬에서 인덕턴스 검출용 전류의 피크치는 최소가 되고, 비정렬에 가까워질수록 인덕턴스 검출용 전류의 피크치는 크게되며, 비정렬시 인덕턴스 검출용 전류는 최대치가 된다. 따라서 인덕턴스 검출용 전류의 피크치를 검출하여 회전자 위치에 대한 정보를 얻을 수 있다.

그림 11는 SRM에서 연속적인 펄스 전압을 인가 한 상태에서 인덕턴스 측정용 전류와 이를 검출하기 위한 샘플홀드의 값을 나타내고 있다. 파형에서 알 수 있는 바와 같이 전기각 360도에 대한 샘플홀드의 값은 양호하게 나타남을 알 수 있다.

그림 12는 SRM에서 연속적인 펄스 전압을 인가한 상태에서 인덕턴스 측정용 전류와 이를 근거로 계산된 인덕턴스를 표시하고 있다. 파형에서 알 수 있는 바와 같이 전기각 360도에 대한 인덕턴스는 양호하게 나타남을 알 수 있다.

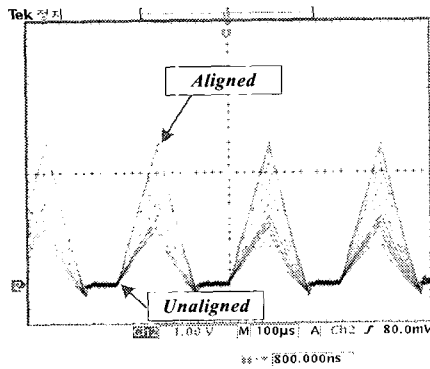


그림 10 회전자 위치에 따른 펄스 전류
Fig. 10 Pulse current according to rotor position

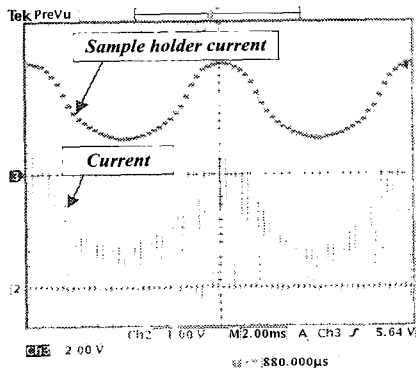


그림 11 회전자 위치에 따른 펄스 전류와 샘플홀드 값
Fig. 11 Pulse current and sample holder value according to rotor position

따라서 인덕턴스 측정법에 의한 SRM의 센서리스제어의 타당성은 어느 정도 검증된다고 할 수 있다. 이 계산된 인덕턴스가 설사 실제 인덕턴스와 오차가 발생해도 이 계산된 인덕턴스와 그 때의 위치각으로 위치각 추정하기 때문에 위치각 추정에는 별문제가 없다.

그림 13는 SRM에서 연속적인 펄스 전압을 인가 한 상태에서 인덕턴스 측정용 A상 전류와 이를 근거로 계산된 A상 및 B상 인덕턴스를 표시하고 있다. 파형에서 알 수 있는 바와 같이 전기각 360도에 대한 인덕턴스는 양호하게 나타남을 알 수 있다.

그림 14는 SRM을 센서리스 모드로 구동한 상태에서 A상 전류, 상스위칭 신호 및 인덕턴스 측정용 상전류를 나타내고 있다. 파형에서 보는 바와 같이 인덕턴스 검출용 전류에 그 상의 토크분 전류가 없을 시 회전자 위치검출을 위한 펄스 전압을 인가하고 있다.

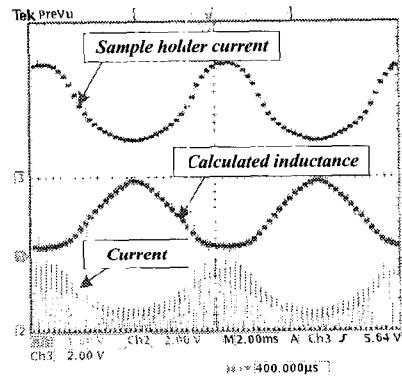


그림 12 회전자 위치에 따른 펄스 전류, 샘플홀드 값 및 계산된 인덕턴스
Fig. 12 Pulse current, sample holder and inductance value according to rotor position

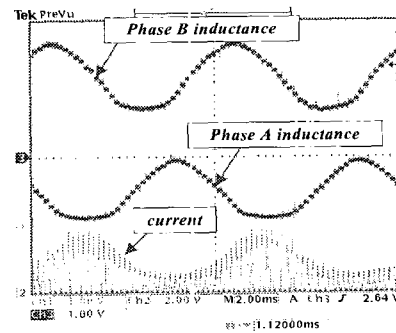


그림 13 회전자 위치에 따른 펄스 전류, 계산된 A, B 상 인덕턴스
Fig. 13 Pulse current and inductance of phase A and B according to rotor position

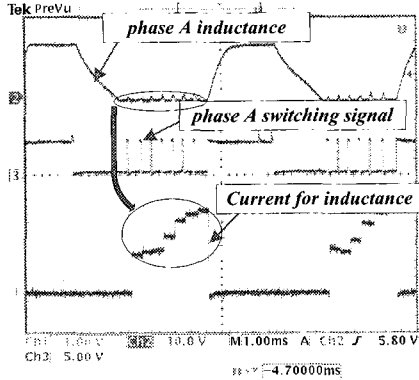
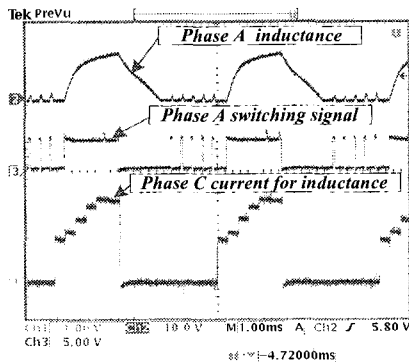
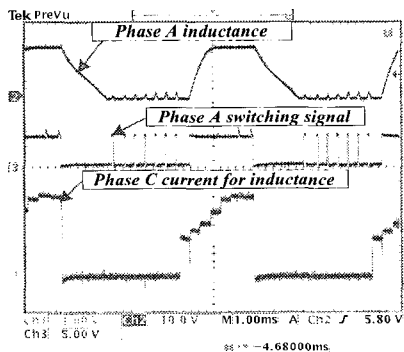


그림 14 A상 전류, A상 신호 및 인덕턴스 측정을 위한 A상 전류

Fig. 14 A Inductance of phase A, gate signal of phase A and current of phase A for inductance calculation



(a)



(b)

그림 15 인덕턴스 측정을 위한 상 전류, A상 신호 및 A상 인덕턴스 (a) 선행각 20° (b) 선행각 43°

Fig. 15 Inductance of phase A, gate signal of phase A and current of phase C (a) Advance angle 20° (b) Advance angle 43°

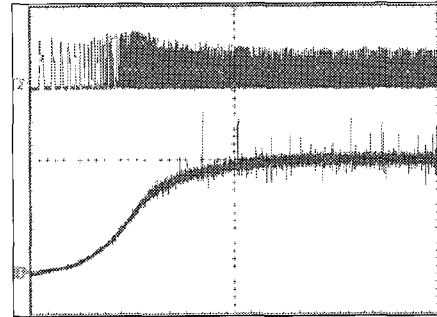


그림 16 속도응답특성 (upper: current 2.5[A/div.], lower: speed 500rpm/div., time:200ms)

Fig. 16 Sensorless speed response (upper: current 2.5[A/div.], lower: speed 500rpm/div., time:200ms)

그림 15(a)는 인덕턴스 증가시점을 기준으로 하여 선행각(advance angle) 20° 에서 상스위치를 온 한 경우이며, 그림 15(b)는 인덕턴스 증가시점을 기준으로 하여 선행각(advance angle) 43° 에서 상스위치를 온 한 경우의 실험파형을 나타내고 있다.

그림 16은 제안한 방식으로 구동되는 시스템의 속도 응답성을 보여주고 있다. 기준속도는 1500[rpm]이며 양호한 응답성을 보여주고 있다.

6. 결 론

본 연구는 SRM의 구동에서 회전자 위치각에 대한 정보를 얻기 위한 한 방법으로 토크를 발생하지 않고 있는 상에 극히 짧은 시간의 펄스 전압을 인가하고, 이 때 발생하는 전류로부터 상 인덕턴스를 측정하여 회전자의 위치를 검출하는 방법을 제안하였다. 특히 고속의 프로세서를 이용하여 전 속도구간에서 위치추정과 속도제어가 가능하도록 하였으며 전체 구동알고리즘을 제시하였습니다. 따라서 SRM의 구동시 반드시 필요한 위치 검출용 엔코더를 제거함으로써 제어기기의 저가격화를 구현할 수 있으며, SRM의 실용화 가능성을 높였다. 제안한 방법은 실험을 통해 그 효용성을 증명하였다.

본 연구는 과학재단 목적기초연구 (연구과제 R01-2001-00000300-0) 지원으로 수행하였음.

참 고 문 헌

- [1] 안진우, 황영문, "스위치 릴럭턴스 전동기 구동과 응용", 신지서원, pp. 225~264, 2002.
- [2] P.J. Lawrenson, "A Brief Status Review of Switched Reluctance Drives", EPE, Vol. 2, No. 3, pp. 133~144, 1992.
- [3] M. Ehsani, I. Husain, and A.B. Kulkarni, "Elimination of Discrete Position Ssensor and Current Ssensor in Switched Reluctance Mototr Drives", IEEE Trans on IA, Vol. 28, pp. 128~135, 1992.
- [4] P.P. Acarnley, R.J. Hill, and C.W. Hooper, "Detection of Rotor Position in Stepping and Switched Reluctance Motors by Monitoring of Current Waveforms", IEEE Trans, Ind. Electron, Vol. IE-32. No. 3, pp. 215~222, Aug. 1985.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 안진우 외 3, "SRM의 센서리스 제어를 위한 인덕턴스 추정기법", 대한전기학회 부산경남울산지부 합동추계학술대회, pp. 154~157, 2001.11.



김태형(金泰亨)

1977년생. 2003년 경성대 전기전자공학과 졸업. 2003년~현재 동 대학원 전기전자공학과 석사과정.

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.



박성준(朴晙濬)

1965년생. 1991년 부산대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 졸업(박사). 1996년~2000년 거제대학 조교수. 2001년~2003년 8월 동명대 전기자동화계열 조교수. 2003년 9월~현재 전남대 전기공학과 조교수.