

## SRM의 최대 토크 운전을 위한 자기동조 제어

徐鍾允<sup>†</sup>, 金垸憲<sup>\*</sup>, 張都鉉<sup>\*\*</sup>

## Maximum Torque Operation of SRM by using a Self-tuning Control Method

Jong-Yun Seo, Kwang-Heon Kim, and Do-Hyun Jang

## 요 약

본 연구에서는 SRM의 최대 토크 운전을 위한 자기동조 제어방법을 연구하였다. SRM은 비선형적인 특성이 강하여 해석적인 방법으로 특성을 고찰하거나 속도 및 토크 제어가 어려운 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 최대 토크 운전을 위한 적절한 턴-온/오프각 제어를 자기동조방식(self-tuning method)에 의해 결정하는 방식을 제안하였다. 그리고 턴-온/오프각을 제어하기 위해 귀환되는 신호는 각각 엔코더 펄스수와 상전류의 증분값을 사용하였으며, 운전 중에 스스로 적절한 턴-오프각을 먼저 추종하고 다음으로 턴-온각을 추종하게 된다. 턴-온/오프각은 서로 종속적인 관계에 있으므로 최대 토크 값을 유지하기 위한 턴-온/오프각을 실시간 자기동조방식으로 제어하였으며, 실험을 통해 제안된 방식이 타당함을 확인하였다.

## ABSTRACT

This paper presents a Switched Reluctance Motor(SRM) drive using the self-tuning control method to achieve the maximum torque. SRM has the difficulty to research it by an analytic method and to control the speed and torque because of the high nonlinearity. So, in this paper, the self-tuning control method is applied to relevantly controlling turn-on/off angle to operate at the maximum torque. Also, the feedback signals to control the turn-on/off angle are the encoder pulse and the increment of phase current. At first, an adequate turn-off angle is searched by itself and then a turn-on angle is done. As the relationship between turn-on and turn-off angle is mutual dependent, the turn-on/off angle is controlled by a real time self-tuning control method in order to maintain the maximum torque. The proposed self-tuning algorithm is verified by experiments.

**Key Words** : SRM, Self-Tuning Control, Maximum Torque, Optimal Turn-on/off Angle

## 1. 서 론

SRM은 유도기 및 BLDCM에 비하여 구조가 간단하여 가격이 저렴하며, 토크밀도와 효율이 높고, 인버터에 흐르는 전류 극성에 영향이 없어 간단하고 다양하게 인버터 시스템을 구성할 수 있다.<sup>[1]</sup> 위와 같은 특

성들로 인해 산업용과 건인용뿐만 아니라 세탁기, 청소기, 그리고 에어컨 등의 가정용으로 적용이 되어지고 있다. 그러나 SRM의 비선형성 때문에 해석적인 방법으로는 최적의 운전 조건을 찾기가 매우 어렵다. 그리고 최대 토크 및 효율 그리고 최소 리플 운전 등을 위한 턴-온/오프각을 시뮬레이션을 통해 찾는 방법은 운전 중의 열에 의한 권선저항 및 관성 등의 전동기 파라미터 변화를 고려하지 못하기 때문에 시뮬레이션 결과와 실험결과에서 어느 정도 차이가 있음을 알 수 있다.<sup>[2]</sup>

따라서 본 논문에서는 최대 토크 운전을 위한 적절한

<sup>†</sup>교신저자 : 정희원, LG이노텍 주임연구원  
E-mail : jyseo@lginnotek.com

<sup>\*</sup>평의원, 전남대 공대 전기공학과 교수

<sup>\*\*</sup>평의원, 호서대 전기공학과 교수

접수일자 : 2003. 10. 1      1차 심사 : 2003. 10. 27  
2차 심사 : 2004. 1. 30      심사완료 : 2004. 2. 10

턴-온/오프각 제어를 자기동조방식(Self-tuning method)에 의해 결정하는 방식을 제안하였다. 그리고 턴-온/오프각을 제어하기 위해 귀환되는 신호는 각각 엔코더 펄스수와 전류의 증분 값을 사용하였으며, 운전 중에 스스로 적절한 턴-오프각을 먼저 추종하고 다음으로 턴-온각을 추종하게 된다. 턴-온/오프각은 서로 종속적인 관계에 있으므로 최적의 상태로 최대 토크 값을 유지하기 위한 턴-온/오프각을 실시간 자기동조방식으로 제어하였으며, 실험을 통해 제안된 방식이 타당함을 확인하였다.

## 2. SRM의 토크 특성

SRM의 전압 방정식은 식(1)과 같다.<sup>[3][4]</sup>

$$V = r i + w \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} i + L(\theta) i \frac{di}{dt} \quad (1)$$

여기서  $V$ : 인가전압  
 $r$ : 권선 저항  
 $i$ : 상전류  
 $L$ : 인덕턴스  
 $\theta = \omega t$

식 (1)을 전기적 순시 입력으로 나타내면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 우변의 각 항은 차례대로 저항에서 발생하는 손실과 자계에 저장된 에너지의 미분 값과 기계적 출력의 항으로 구분될 수 있다.

$$V i = r i^2 + w \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} i^2 + L(\theta) i^2 \frac{di}{dt} \quad (2)$$

일반적으로 발생토크는 자계에너지 개념에서 유도할 수 있다. 자계에너지는 자기포화 현상을 무시한 경우에 식 (3)과 같다.

$$W_c(\theta, i) = \int_0^i L(\theta) i dt = \frac{1}{2} L(\theta) i^2 \quad (3)$$

발생토크는 자계에너지를 위치각( $\theta$ )으로 미분한 값으로 식 (4)와 같다.

$$T_{out}(\theta) = \frac{\partial W_c(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (4)$$

식 (3)을 식 (4)에 대입하여 계산하면 8/6극 SRM의 발생토크는 식(5)와 같다.

$$T_{out}(\theta) = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL(\theta - \frac{\pi}{12})}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL(\theta - \frac{\pi}{6})}{d\theta} + \frac{1}{2} i_d^2 \frac{dL(\theta - \frac{\pi}{4})}{d\theta} \quad (5)$$

여기서,  $i_a, i_b, i_c, i_d$ : 상전선의 전류

식 (5)에서 발생토크는 각 상전류가 인가되는 위치와 각 상전류의 크기에 의해 결정되므로, 턴-온/오프각을 적절하게 제어한다면, 최대 발생토크를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

SRM의 운동방정식은 식 (6)과 같다.

$$T_{out}(t) = J_m \frac{d\omega(t)}{dt} + B_m \omega_m(t) + T_f + T_l \quad (6)$$

여기서  $J_m$ : 전동기 관성 모멘트  
 $B_m$ : 전동기 점성 마찰계수  
 $T_f$ : 정지 마찰력  
 $T_l$ : 부하토크

식 (6)에서 입력이 일정하고 부하토크가 일정한 정상상태 운전 중의 토크는 식 (7)과 같이 속도에 비례하게 된다. 즉, 부하가 일정하다고 할 때, 발생토크의 증감을 속도의 증감으로 나타내며 이는 단위 시간당 엔코더 펄스수의 증감과 진상각 제어로 인한 상전류 파형을 통해 알 수 있다.<sup>[5][6]</sup>

$$T_{out}(t) \propto \omega_m(t) \quad (7)$$

## 3. 자기동조에 의한 턴-온/오프각 제어

그림 1은 본 논문에서 제안하는 단위시간당 엔코더 펄스수 증분과 전류 증분 검출을 이용한 자기동조의 턴-온/오프각 제어 순서도이다. 그림 1에서  $\theta_{off}$ 은 엔코더 펄스수의 증분 값을 이용하기 위해 변수  $P_\Delta$ 를 이용하였으며,  $\theta_{on}$ 은 전류 증분 값을 이용하기 위해 변수  $I_N$ 과  $I_{N-1}$  값을 이용하였다. 그리고 마이크로프로세서에서 외부 인터럽트는 500[ $\mu s$ ]이하로 설정하였고 제어 주기는 2[ $ms$ ]로 구동시켰다.

먼저, 초기 운전을 위한 SRM의 턴-온/오프각을 각각  $\theta_{on}=0^\circ$ 와  $\theta_{off}=10^\circ$ 로 설정한다. 그리고 ( $n$ ) 번째 샘플링에서 구해진 펄스 수  $P(n)$ 과 ( $n-1$ ) 번째 샘플

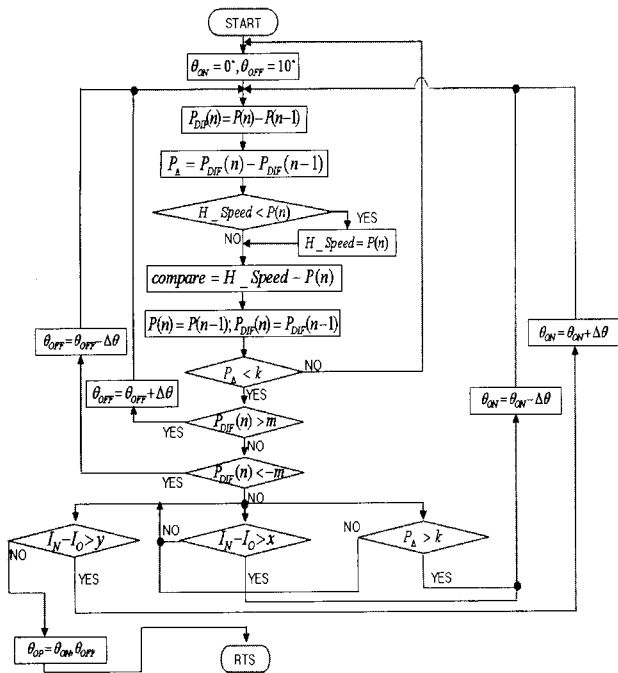


그림 1 자기동조에 의한 턴-온/오프각 결정 순서도  
 Fig. 1 Flowchart for determination of an optimal turn-on/off angle by using a Self-tuning method

링의 펄스 수  $P(n-1)$ 의 차이 값인  $(n)$  번째 속도 증분에 대응되는 펄스 수  $P_{DIF}(n)$ 는 식 (8)과 같다.

$$P_{DIF}(n) = P(n) - P(n-1) \quad (8)$$

그리고  $(n)$  번째 샘플링에서의 속도 증분에 대응되는 펄스 수  $P_{DIF}(n)$ 과  $(n-1)$  번째 샘플링에서의 속도 증분에 대응되는 펄스 수  $P_{DIF}(n-1)$ 의 편차  $P_{\Delta}(n)$ 는 식 (9)와 같다.

$$P_{\Delta}(n) = P_{DIF}(n) - P_{DIF}(n-1) \quad (9)$$

일정부하의 정상상태 운전 중에  $P_{DIF}(n)$  값이 허용 오차  $m$  내에 존재할 경우 현 시점이 최대 토크가 발생되는 턴-오프각이므로 최적 턴-오프각  $\theta_{op}$ 으로 결정된다. 그러나 턴-오프각의 변동으로 기존 대비 운전속도가 증가하는 경우인  $P_{DIF}(n)$  값이 허용오차  $m$ 보다 크거나 부토크 영향으로 운전속도가 떨어졌을 경우인  $P_{DIF}(n)$  값이  $-m$ 보다 적을 경우에는 현시점의 턴-오프각  $\theta_{off}$ 에서 일정 조정각  $\Delta\theta$ 만큼씩 각각 지상 또는 진상으로 이동시킨다. 여기서 허용오차 변수값  $m$ 은 정상상태 운전 중에 외부의 영향으로 순간적인 이상운전으로 각속도 값의 영향을 주어 순시 적으로 자기동조 하는 것을 방지하기 위해 설정된 값이다.

엔코더 신호를 이용하여 적절한 턴-오프각인  $\theta_{op}$ 을 찾은 후, 다음으로 적절한 턴-온각을 찾기 위해서 단위시간당 전류의 증분 변화를 이용한다.  $N-1$  번째 샘플링에서 최대 상전류 값  $I_{N-1}$ 과 현재의  $N$  번째 샘플링에서 최대 상전류 값  $I_N$ 의 값을 비교하게 된다. 자기동조방식에 의해서  $I_N - I_{N-1}$  값이  $x$  이상 되었을 때는  $\Delta\theta$ 만큼 턴-온각을 지상 각으로 이동하게 되고,  $I_N - I_{N-1}$  값이  $y$  이상 되었을 때는  $\Delta\theta$ 만큼씩 턴-온각이 진상 각으로 이동하게 된다. 여기서 각각 다른 변수 값인  $x$ 와  $y$ 값은 턴-온각을 자기동조로 제어하였을 때, 전류 맥동에 의한 오차를 고려한 허용한계치로 각각 설정한 값이다. 그리고 전동기의 과도상태 운전과 턴-온각 제어상태에서 과도한 속도변화로 이상운전 현상을 사전에 제어하기 위해 속도증분에 대응되는 펄스수의 편차  $P_{\Delta}(n)$  값을 이용하였다.

최대 토크를 얻기 위한 턴-온/오프각은 서로 종속적인 관계이므로, 그림 3과 같이 임의의 턴-온/오프각으

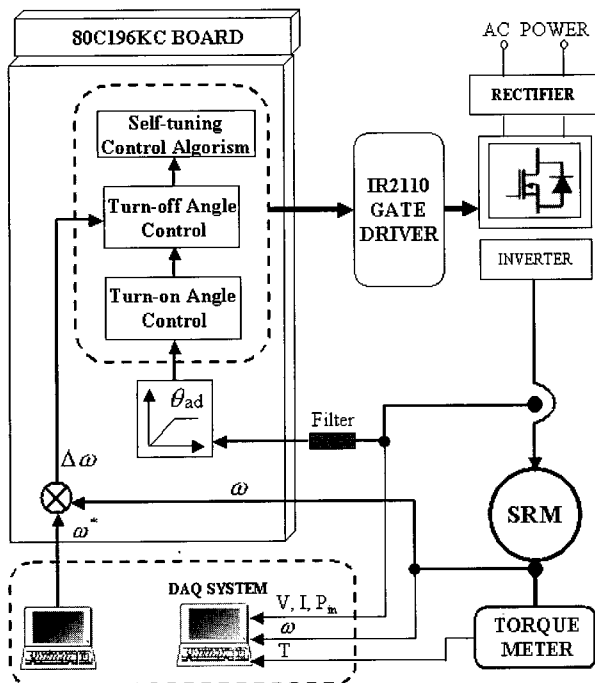


그림 2 전체 시스템 구성  
 Fig. 2 Configuration of an experimental system

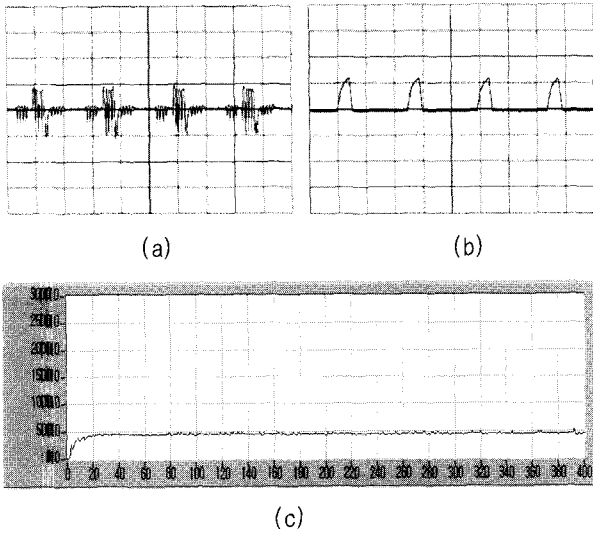


그림 3 고정 턴-온/오프각 제어방식에서 전류, 전압 및 속도 파형:  
 (a)전압(10V/div, 10ms/div),  
 (b)전류(0.5A/div, 10ms/div),  
 (c)속도(500rpm/div, 20sec/div)  
 Fig. 3 The waveform of (a)voltage, (b)current and (c)speed at fixed turn-on/off angle

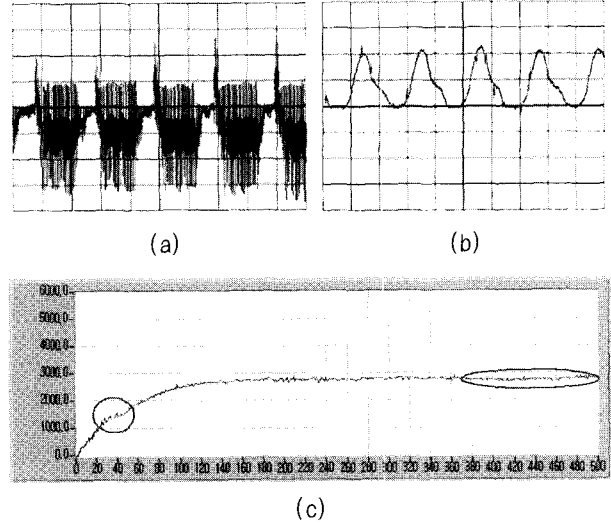


그림 5 엔코더 펄스를 이용한 자기동조 턴-온/오프각 제어에서 전류, 전압 및 속도 파형:  
 (a)전압(10V/div, 2ms/div),  
 (b)전류(0.5A/div, 2ms/div),  
 (c)속도(1000rpm/div, 20sec/div)  
 Fig. 5 The waveform of self-tuning turn-on/off angle control by using encoder pulse (a)voltage, (b)current and (c)speed

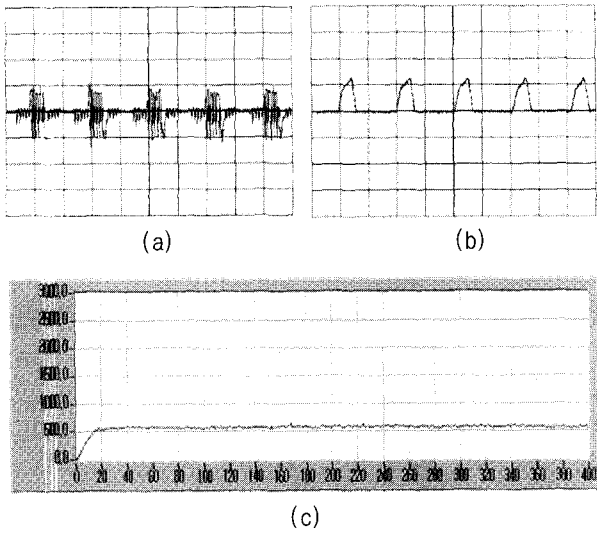


그림 4 고정 턴-온각과 엔코더 펄스를 이용한 자기동조 턴-오프각 제어에서 전류, 전압 및 속도 파형:  
 (a)전압(10V/div, 10ms/div),  
 (b)전류(0.5A/div, 10ms/div),  
 (c)속도(500rpm/div, 20sec/div)  
 Fig. 4 The waveform of fixed turn-on and self-tuning turn-off angle control: (a)voltage, (b)current and (c)speed

로 정상상태까지 운전을 한 후 자기동조방식으로 적정 턴-오프각을 찾는다. 그리고 적정 턴-온각을 자기동조 방식에 의해 다시 찾게 된다. 이와 같은 방법으로 턴-온/오프각을 반복적으로 자기동조 시켜 최적의 턴-온/오프각을 스스로 찾도록 한다.

부하토크와 발생토크가 일정하여 운전속도가 일정할 경우, 즉 정상상태에서는  $\theta_{off}$ 와  $\theta_{on}$ 은 자기동조에 의해서 더 이상 변화되지 않는다. 그러나 부하 또는 속도 명령치가 변화거나 입력전원 등의 운전상태가 변화될 경우에는 그림 2의 순서도에서 보는 바와 같이 자기동조방식에 의해 변화된 운전조건에 최적의 턴-온/오프각이 다시 결정되어 운전된다.

#### 4. 실험결과

본 논문에서는 8/6극의 SRM이 사용되었으며, 자기동조 턴-온/오프각 제어에 의한 최대 토크 운전특성을 실험하기 위해 그림 2과 같이 하드웨어를 구성하였다. 마이크로컨트롤러는 80C196KC를 사용하였으며, 비대칭 브리지 인버터를 사용하였다. 그리고 자기동조를 위한 피드백 신호로 엔코더 펄스와 CT로부터 상전류

값을 입력 받도록 되어있다.

그림 3는 입력 평균전압 7[V], 무부하일 때 턴-온각과 턴-오프각을 각각 0°와 10°로 고정된 상태에서 운전하였을 경우에 측정된 전압, 전류 및 속도 추이 파형을 보여주고 있다. 정상상태에서 평균 운전속도는 약 470[rpm]이다.

그림 4는 그림 3와 같은 입력 평균 전압 7[V], 무부하일 때 턴-온각을 0°로 고정시키고, 턴-오프각은 10°에서 자기동조방식으로 제어하였을 경우 측정된 전압, 전류 및 속도 추이를 보여주고 있다.<sup>[7][8]</sup> 정상상태에서 평균속도는 약 576[rpm] 이다. 동일 입력 전원과 부하 조건에서 턴-온/오프각 고정 제어보다, 턴-온각이 고정되었을 지라도 턴-오프각을 자기동조 제어에 의한 경우 약 100[rpm] 정도의 속도 증가를 보여주고 있어 발생토크가 증가되었음을 알 수 있다.

그림 5은 입력 평균전압 7[V], 무부하일 때 자기동조의 피드백 신호로 엔코더 펄스만을 사용한 턴-온/오프각 제어방식의 전압, 전류 및 속도 추이 파형이다. 그림 5(c)에서 정상상태의 평균속도는 2800[rpm] 이지만, 기동상태와 정상상태에서 약간의 속도 추종이 원활하지 못함을 알 수 있다. 이는, 그림 2에서 설명한 바와 같이 속도의 증분을 검출하기 위한 엔코더 펄스수

를 계수하는 시간과 전동기 시정수 등과의 불가피성이 기인한 것으로, 1400[rpm] 이상의 고속에서 나타나게 된다.

그림 6은 그림 5와 같은 입력 평균전압 7[V], 무부하의 운전조건에서 엔코더 펄스와 상전류를 이용한 자기동조제어 방식의 전압, 전류 및 속도 추이 파형이다. 그림 6(c)에서 정상상태의 평균 속도는 약 3800[rpm]으로 엔코더 펄스만을 이용한 그림 5의 경우보다 약 1000[rpm]의 속도 증가가 있었으며, 기동상태에서 원활한 속도 추종을 보이고 있다. 그림 6과 같은 제어 방식으로 얻은 결과로 보아 기존의 엔코더 펄스인 위치신호만을 이용한 방법에서 속도 추종이 원활하지 못한 문제가 개선되었으며, 노이즈 영향이 현저히 줄어들었음을 전압 파형을 통해 확인 할 수 있었다. 또한 정상상태에서 안정된 운전으로 속도의 변화가 거의 없고 운전속도도 크게 향상됨을 알 수 있었다. 결과적으로 단위시간당 엔코더 펄스수의 증분 값과 상전류 증분 값을 가지고 제어하였을 경우, 정상상태 운전속도가 증가되며 부토크가 줄고 발생토크가 크게 향상되는 턴-온/오프각으로 자기동조 시킬 수 있었다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 최대 토크 운전을 위해 엔코더와 전류 센서를 이용한 자기동조방식으로 턴-온/오프각을 제어하는 방법을 제안하였다. 부토크는 줄어들고 정토크를 커지게 하도록, 턴-온/오프각을 자기동조 함으로써 발생토크가 증가하는 효과를 실험에서 확인할 수 있었다.

본 논문의 자기동조방식은 시뮬레이션에 의해 최대 토크를 낼 수 있는 턴-온/오프각을 찾는 등의 번거로움이 없으며,<sup>[2]</sup> 상전류를 이용한 자기동조방식은 기존의 엔코더 펄스를 비교하는 자기동조방식보다 안정되게 제어할 수 있었다. 또한, 운전 중의 열에 의한 권선 저항 및 관성 등의 전동기 파라미터 변화에 강인한 특성을 가지고 있다.

### 참 고 문 헌

[1] T.J.E Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control," Magna Physics Publishing, 1993.  
 [2] Hyun-Rok Cha, Jong-Yun Seo, Kwang-Heon Kim, "A Study on Voltage and Switching Angle for Maximum Torque/Efficiency and Minimum Torque Ripple of SRM by Using SIMULINK," Journal of Power

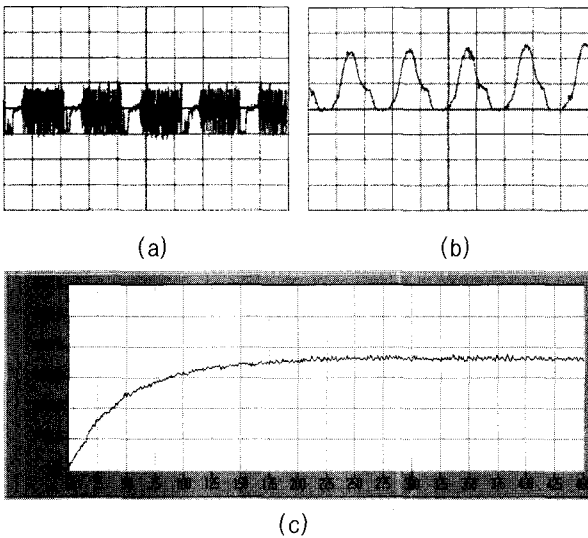


그림 6 엔코더 펄스와 상전류 값을 이용한 자기동조 턴-온/오프각 제어시에 전류, 전압 및 속도 파형:  
 (a)전압(10V/div, 2ms/div),  
 (b)전류(0.5A/div, 2ms/div),  
 (c)속도(1000rpm/div, 25sec/div)  
 Fig. 6 The waveform of self-tuning turn-on/off angle control by using encoder pulse and phase current: (a)voltage, (b)current and (c)speed

- Electronics Vol 1, April, 2001.
- [3] G.S.Buja and M.I.Valla. "Control Characteristics of the SRM Drives-Part I: Operation in the Linear Region." IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 38, No. 5, pp. 313~321, Oct. 1988.
- [4] G.S.Buja and M.I.Valla. "Control Characteristics of the SRM Drives-Part II: Operation in the Saturated Region." IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 41, No. 3, pp. 316~325, June. 1991.
- [5] Philip C. Kjaer, Jeremy J. Gribble, Timothy J.E. Miller. "High-Grade Control of Switched Reluctance Machines." IEEE Trans. on Industry Applications, Vol 33, No. 6, pp. 1585~1593, November/December.
- [6] 오석규, 최태환, 안진우, "SRM 드라이브의 운전성능 향상을 위한 스위칭각 특성에 관한 연구." 전력전자학회 논문지 Vol 6, No 6, pp. 506~513, Dec. 2001.
- [7] J.Y Seo, H.R Cha, J.C Seo, K.H Kim, "Speed Control Method for Switched Reluctance Motors Drive by using Self tuning of Switching Angle." ISIE 2001, Vol II, pp. 811~814, June. 2001.
- [8] 장도현, 문진영, "SRM 컨버터에서 자기동조 방식에 의한 턴-오프각의 결정," 전력전자학회 논문지 Vol 3, No 4, pp. 418~425, Dec. 1998.

## 저자 소개



### 서종윤(徐鍾允)

1976년 2월 28일생. 1999년 여수대 전기공학과 졸업. 2002년 전남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 LG이노텍 주임연구원



### 김광헌(金堯憲)

1960년 12월 27일생. 1983년 전남대 계측제어공학과 졸업. 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박) 현재 전남대 공대 전기공학과 교수.



### 장도현(張都鉉)

1956년 8월 24일생. 1980년 한양대 전기공학과 졸업. 1982년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1993년~1994년 미국 Texas A&M Univ. 객원교수. 현재 호서대 전기공학과 교수. 당 학회 편집위원장.