

## 상전류 변화를 이용한 Switched Reluctance Motor의 Sensorless 구동회로

임 준영<sup>o</sup>, 조 판열, 신 두진, 김 창현, 김 정철  
LG 전자, 생활 시스템 연구소

Sensorless Drive Circuit of a Switched Reluctance Motor  
using the Variation of Phase Currents

J. Y. Lim, K. Y. Cho, D. J. Shin, C. H. Kim, and J. C. Kim  
LG Electronics Inc., Living System Lab.

### Abstract

A simple drive circuit without position sensors for a switched reluctance motor is presented. The turn on and turn off points are determined by detecting the rate of change of the active phase current. The drive circuit consists of a current sensing resistor, RC filter, comparator, OP Amp, and OR gates. It is verified through the experiments that the switched reluctance motor with the proposed sensorless drive circuit is well operated in wide speed ranges.

### 1. 서론

Switched reluctance motor는 고정자(stator)와 회전자(rotor)가 돌극(salient pole)구조로 되어 있으며 회전자에는 권선이나 영구자석이 없어 구조적으로 매우 견고한 장점이 있다. 일반적으로 축(shaft)에는 sensor용 slit disk가 부착되고 photo interruptor등의 빛에 의해 감지되는 sensor를 이용하여 회전자의 위치를 검출한다. 이러한 sensor는 먼지나 기름에 의한 신뢰성 문제, 온도 상승에 의한 내구성의 저하와 같은 문제가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 다양한 방식의 sensorless 구동방식이 제안되었다[1-5]. 도통되지 않는 상에 짧은 시간동안 전압을 가하여 전류의 상승 기울기에 따라 inductance를 계산하여 회전자 위치를 검출하는 방법[1], linear frequency modulation[2] 또는 sinusoidal waveform injection에 의한 방법[3], 전류에 따른 flux linkage로부터 검출하는 방법[4] 과 observer에 의한 방법[5] 등이 있다. 이러한 방법들은 알고리즘을 구현하기 위한 hardware가 복잡한 단점들이 있다.

본 논문에서는 기존의 방법들에 비해 간단한 hardware로 구현하기 위해 turn-on 상태의 active phase에 흐르는 전류를 이용하는 방법을 제안한다. 이 방법에서는 하위 각상 스위치에 흐르는 전류의 변화형태를 conduction 구간내에서 정현파(sinusoidal waveform)로 가정하고, 적합한 filter와 conduction구간내에서 flat top 전류를 확보하기 위한 지연과형을 만들고 비교기와 OR 게이트를 이용하여 합성한 후 최종 게이트 신호를 발생시킨다.

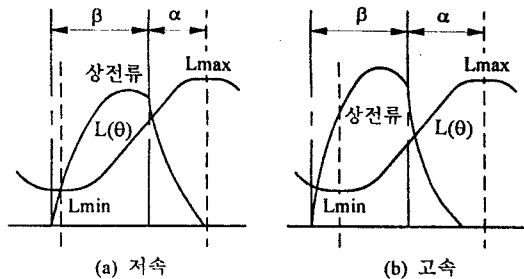
### 2. Sensorless 구동회로

#### 2.1 전압제어 SRM의 정상상태 전류파형

그림 1은 6/4, 3상 switched reluctance motor의 회전자의 위치변화에 따른 인덕턴스 profile과 정상상태에서 고정자 권선에 흐르는 전류를 나타낸다. 그림 1의 (a)는 저속, (b)는 고속에서의 일반적인 전류파형이다. 권선에 흐르는 전류는 commutation구간이 그림 1의 인덕턴스 profile의 어느 위치에 있는가에 따라 그 형태와 크기가 달라지게 된다. 즉 속도가 높아짐에 따라 conduction 구간은 더 앞으로 나가야 하며 conduction 구간내에 flat top 영역이 존재하는 것이 바람직하다. 자속이 포화되지 않은 정상상태에서 전압제어로 구동하는 경우 상전류의 형태는 정현파에 근사화 시킬 수 있다. 본 논문에서는 6/4 구조의 switched reluctance motor에 대해 conduction 구간내에서 권선에 흐르는 전류파형을 다음과 같이 근사화하였다.

$$i_{phase}(\theta) \cong k \sin(4\theta) \tag{1}$$

식 (1)에서 k는 비례상수이다. 식 (1)과 같이 나타난 상전류( $i_{phase}$ )의 미분파형은 상전류가 최대치가 되는 점( $\theta_p=90^\circ$ )에서 zero cross를 하게 된다. 전류의 flat top 영역을 확보하기 위하여 상전류가 최대가 되는 점( $\theta_p=90^\circ$ )에서 스위치를 turn off 하지 않고 어느 시간동안 turn on 상태를 유지해야 한다. 본 논문에서는 도통상태때의 전류가 역기전력(back EMF)에 의해 감소를 시작하는  $120^\circ$



β: Conduction Angle    α: Advance Angle

그림 1. 상인덕턴스와 상전류

## 2.2 Sensorless 구동회로

그림 2는 본 논문에서 제안한 switched reluctance motor의 sensorless 구동방식의 회로이다. 권선에 있던 에너지가 diode D2를 통하여 free wheeling하는 구간을 제외하면 각상의 권선에 흐르는 전류는 sensing 저항에 의해 검출된다. 검출된 전류신호는 콘덴서 C와 저항 R에 의해 그림 3과 같이 미분된 형태의 파형으로 나타난다('가'점). 초기 기동시에는 임의의 상을 순서대로 turn on 하여 전압을 인가하면 권선에는 전류가 흐르게 되고 이때부터 그림 2의 회로에 의해 정상적으로 동작하게 된다.

그림 3은 상에 흐르는 전류를 정현파로 근사화했을 때 OP Amp를 사용하여 미분한 파형과 본 회로에서 사용한 filter 파형의 비교 결과를 나타낸다. (자)점까지 conduction 구간이라고 가정하면 상이 turn off 되는 지점은 A, B 파형이 zero를 지나는 위치보다 더 늦게 일어나고 있으므로 시간 지연회로가 필요하게 된다. 따라서 low pass filter를 이용하여 이 시간만큼의 지연효과를 주었으며 속도의 변화에 대해 둔감하게 하기 위해서는 시간지연이 작을수록 유리하므로 turn off 점으로부터 zero cross점과 더욱 가까운 B파형을 택하였다. 순수한 미분의 형태인 A파형을 이용할 수도 있으나 이 경우에는 B파형을 이용하는 것에 비해 속도변화에 더 영향을 받는다. 실제로 전류 검출저항에서 측정된 전류신호가 filter를 통과한 후의 파형은 그림 4(a)와 같이 상당한 잡음이 섞여 있는 신호이다. 이 신호는 voltage follower와 전압증폭 회로의 OP Amp의 낮은 응답특성으로 인해 그림 4(b)와 같이

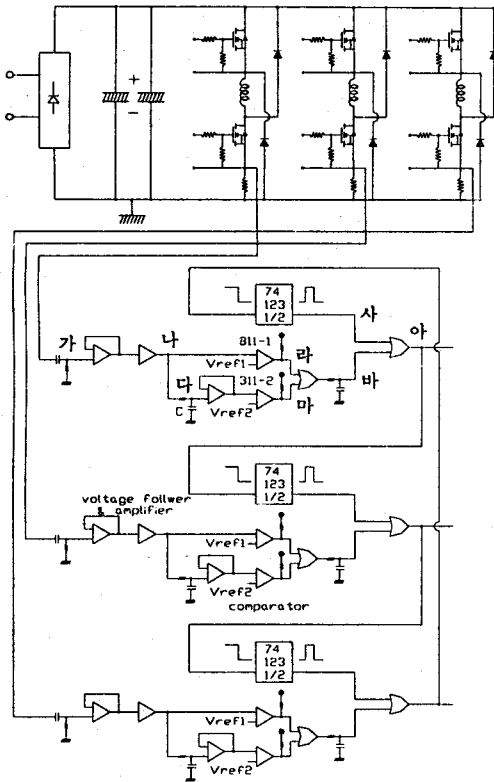


그림 2. Sensorless 구동회로

잡음이 제거된 깨끗한 신호로 변한다. 그림 5는 제안된 구동회로의 각 부분의 신호파형을 나타낸다. 이 신호로부터 그림 2의 low pass filter, voltage follower 및 comparator에 의해 지연된 신호를 검출할 수 있다.

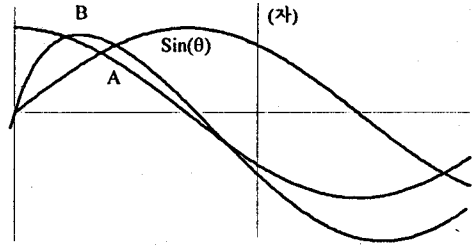
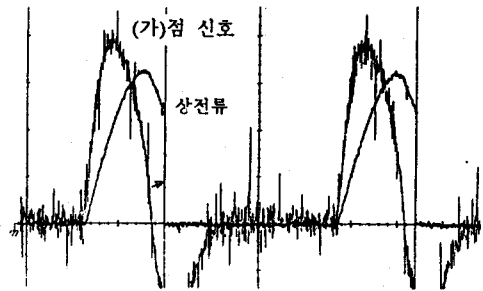
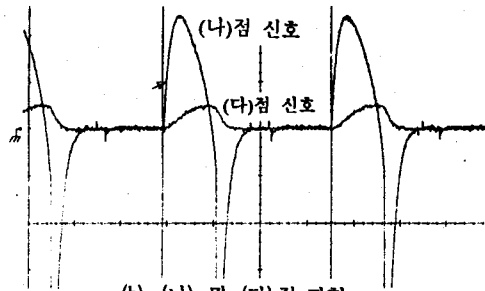


그림 3. 근사화된 상전류와 filter 파형



(a) 상전류 및 (가)점 파형



(b) (나) 및 (다)점 파형

그림 4. 상전류 및 filter 파형

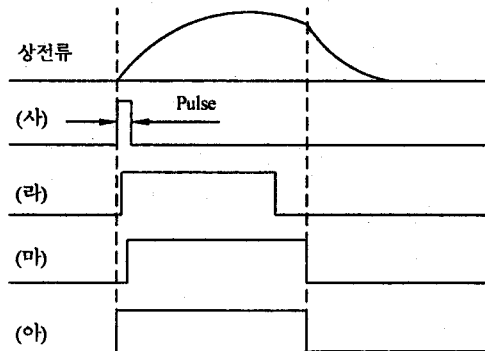


그림 5. 구동회로의 각 부분파형

Switched reluctance motor의 advance angle은 (나) 점과 (다) 점의 신호와 비교되는 각각의 기준전압  $V_{ref1}$ ,  $V_{ref2}$ 와 지연 filter의 조건에 따라 가변할 수 있다. 최종 gate 신호는 turn off시 다음 상을 바로 여자시키기 위한 pulse 신호와 검출된 전류신호로부터 얻은 신호에 의해 결정된다. Switched reluctance motor의 회전방향이 결정되면 상여자 순서도 결정되므로 한 상의 상여자가 끝나는 시점에서 monostable multi-vibrator를 사용하여 다음 상을 turn on 시키는 pulse 신호를 발생한다. Pulse 신호의 유지시간은 switched reluctance motor가 최대속도로 회전할 때의 상여자 시간보다 작으면 되므로 본 논문에서는 상여자 시간의 30%로 하였으며 이때의 pulse 시간은 250  $\mu$ sec이다. 이러한 방식으로 turn on된 상은 그림 4(b)의 A신호의 앞부분의 신호를 만들고 스스로 자신의 상을 active 상태로 유지한다.

### 2.3 실험결과

실험에 사용한 switched reluctance motor의 고정자와 회전자는 6/4 구조로, 상 인덕턴스의 최소치와 최대치는 각각  $L_{min} = 3$  [mH],  $L_{max} = 15$  [mH]이다. 각 상의 전압을 제어하기 위한 PWM carrier 주파수는 16 [kHz]이고 스위칭 소자는 MOSFET을 사용하였다. PWM은 위상에만 가하고 아랫상은 commutation만을 담당한다. 전류 sensing 저항은 전기적인 잡음을 줄이기 위하여 0.2  $\Omega$ 의 무유도 저항을 사용하였다. 부하로는 fan을 사용하였고 7000 [rpm]의 속도까지 reference 전압( $V_{ref1}$ ,  $V_{ref2}$ )의 크기를 변화시키지 않아도 정상적으로 동작하였다. V/F chip을 추가하여 속도에 따라 reference 전압을 변화시켜 스위칭각을 바꾸어 주면 더 좋은 속도특성을 얻을 수 있다.

비교적 낮은 속도에서의 상전류는 flat top이 되는 부분이 존재하지만, 속도가 높아짐에 따라 PWM의 duty도 커지므로 전류의 상승속도도 빨라지게 되어 역기전력(back EMF)에 의해 전류의 감소가 일어나는 부분에서 스위치가 turn off하게 된다. 그림 6의 (a), (b), (c)는 본 논문에서 제안한 sensorless 구동회로의 각 상의 gate 신호와 상전류를 나타낸다. 상전류의 형태는 5000 [rpm]까지는 정현파(sinusoidal waveform)와 매우 비슷하나, 6000 [rpm]보다 더 높아지면 turn off 직전에 상전류의 모양이 찌그러지는 현상이 나타난다. 그러나 상전류의 형태가 크게 변하지 않는 한 정상적으로 구동되며 정상상태에서는 약 1000 [rpm]부터 7000 [rpm]까지 안정하게 동작하였다. 그러나 초기기동시 정상상태까지 도달하는데 수초의 시간이 필요하여 이에 대한 보완도 필요하다.

### 3. 결론

본 논문에서는 전압제어 방식을 사용한 switched reluctance motor의 sensorless 구동을 위한 새로운 형태의 구동회로를 제안하였다. 제안된 알고리즘은 각 상에 흐르는 active 상의 전류를 이용하였고, 구동회로는 RC filter, OP Amp, OR gate, comparator등으로 구성된다. 저속 및 7000 [rpm]의 고속에서도 안정적으로 동작함을 실험을 통하여 확인하였다.

### 참고 문헌

[1] S. R. MacMinn, et. al., "Application of sensor integration techniques to switched reluctance motor drives," IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 28,

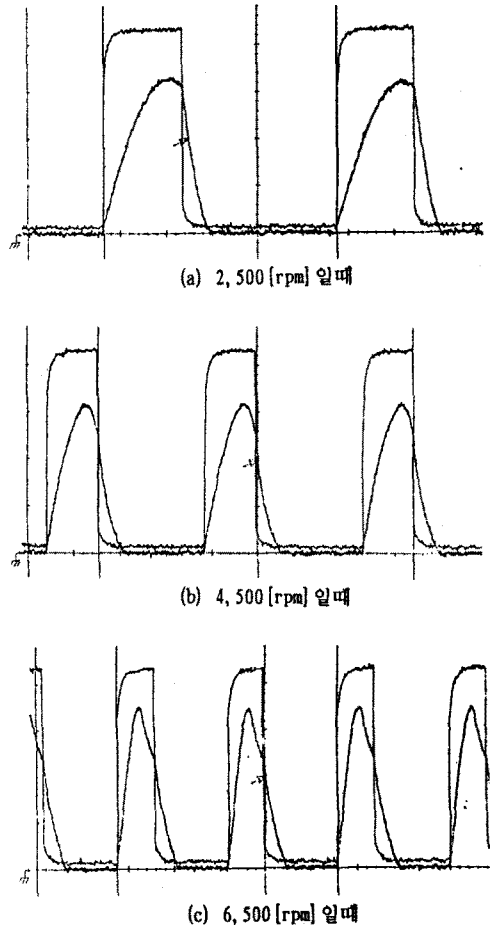


그림 6. 속도에 따른 Gate 신호 및 상전류 파형

no. 6, pp. 1339-1344, 1992  
 [2] M. Ehsani, et. al., "Elimination of discrete position sensor and current sensor in switched reluctance motor drives," IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 28, no. 1, pp. 128-135, 1992  
 [3] M. Ehsani, et. al., "New modulation encoding techniques for indirect rotor position sensing in switched reluctance motors," IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 30, no. 1, pp. 85-91, 1994  
 [4] J. P. Lyons, et. al., "Flux/current methods for SRM rotor position estimation," IEEE IAS Conf. Rec., pp. 482-487, 1991  
 [5] W. D. Harris and J. H. Lang, "A simple motion estimator for variable-reluctance motors," IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 26, no. 2, pp. 237-243, 1990