

# 인접한 스위치 온 타임 비교를 통한 SRM의 센서리스 제어

(Sensorless Control for Switched Reluctance Motor by Comparing Two Consecutive Switch-on times)

양형열\* · 김재혁\*\*

(Hyong-Yeol Yang · Jae-Hyuck Kim)

## 요 약

본 논문에서는 인덕턴스의 변화에 따른 전류 변화율을 모니터링 하여 회전자의 속도 및 위치를 추정하는 센서리스 구동방법을 제안한다. 전류의 변화율은 히스테리시스 전류제어 방법을 이용하여 인접한 두 스위치 온 타임을 비교함으로써 간단히 측정할 수 있다. 제안된 방법은 복잡한 계산이나 별도의 하드웨어를 필요치 않으므로 구현이 용이하다. 시뮬레이션과 실험 결과는 제안한 방법의 실효성을 보여준다.

## Abstract

This paper describes a new position sensorless control for the switched reluctance motor (SRM) by monitoring the rate of change of current with respect to the inductance variation. Two consecutive switch-on times in hysteresis current control are compared to calculate the rate of change of current and hence to estimate the rotor position and speed. The proposed sensorless control algorithm is simple to implement as it does not depend on extensive computation or additional hardware. Simulation and experimental results are presented to demonstrate the feasibility of the proposed sensorless control method.

Key Words : Motor Drive, Position Estimation, Sensorless Control, Switched Reluctance Motor

## 1. 서 론

SRM(Switched reluctance motor)는 간단한 구조,

저렴한 가격, 고효율 등의 장점이 있으나 구동을 위해서는 인코더나 홀센서와 같은 위치센서를 필요로 한다. 그러나 이러한 위치센서는 전체 드라이브 시스템의 가격상승 및 부피증가의 요인이 되고 충격, 고열 및 외부 노이즈에 취약한 단점이 있다. 따라서 위치센서 없는(sensorless) 구동방법을 적용함으로써 가격절감 및 신뢰성을 향상시키는 방법에 관한 활발한 연구개발이 최근 HVAC(heating, ventilation, air-conditioning), 팬

\* 주저자 : 호남대학교 전기공학과 전임강사  
\*\* 교신저자 : RAMU Inc. 엔지니어  
Tel : 062-940-5498, Fax : 062-940-5072  
E-mail : hyyang@honam.ac.kr  
접수일자 : 2010년 3월 2일  
1차심사 : 2010년 3월 5일  
심사완료 : 2010년 3월 16일

(fan), 소형가전 등과 같은 저가대량생산 분야에서 진행되고 있다[1].

참고문헌 [2-4]에서 제안된 방법들은 자속, 전류, 회전자 위치에 대한 비선형적 자기특성(magnetic characteristics) 데이터와 전류 및 전압 측정을 필요로 하며 다소 복잡한 계산을 필요로 한다. 참고문헌 [5-6]의 방법들은 간단하지만 서치코일과 같은 부가적 장치를 필요로 한다.

참고문헌 [7]에서는 전류의 파형을 측정하여 전류변화율과 인크리멘탈 인덕턴스(incremental inductance)와 회전자 위치 간의 상관관계를 이용하여 위치검출을 하는 방법을 제안하였으나 인크리멘탈 인덕턴스의 계산 및 인덕턴스와 회전자 위치간의 데이터(lookup table)를 미리 저장해야 하는 번거로움이 있다.

본 논문에서는 [7]의 단점을 보완하기 위해 전류 변화율을 이용하지만 인크리멘탈 인덕턴스의 계산 및 데이터(lookup data)가 필요 없고 연속적인 두 개의 스위치 온 타임간의 비교만으로 간단히 위치를 검출해 내는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 전류 변화율 비교만을 필요로 하기 때문에 단자전압을 측정할 필요가 없다.

센서리스 구동 알고리즘에 대한 이론적 설명과 DSP 컨트롤러를 통한 구현 방법을 설명한 후 시뮬레이션과 실험 결과를 통해 제안한 방법의 타당성을 입증한다.

## 2. 제안된 센서리스 방법의 이론고찰

그림 1은 단상 SRM의 전류변화율( $di_s/dt$ ), 인덕턴스( $L_s$ ), 그리고 회전자 위치( $\theta$ ) 간의 관계를 나타내며, 이를 이용한 회전자 위치 및 속도 추정 방법에 대한 설명은 다음과 같다. 모터가 정상상태에서 일정속도로 운전 중인 가정 하에 여자구간 내 두 인접한 스위칭 구간에서 스위치 턴 온 시 각각의 샘플링 시간  $t_1, t_2$ 에서의 전압방정식은 식 (1) 및 식 (2)와 같다.

$$v_s(t_1) = R_s i_s(t_1) + L_s(t_1) \frac{di_s(t_1)}{dt} + i_s(t_1) \frac{dL_s(t_1)}{dt} \quad (1)$$

$$v_s(t_2) = R_s i_s(t_2) + L_s(t_2) \frac{di_s(t_2)}{dt} + i_s(t_2) \frac{dL_s(t_2)}{dt} \quad (2)$$

여기서  $R_s, L_s, v_s(t), i_s(t)$ 는 각각 권선 저항, 인덕턴스, 단자전압, 상전류이며, 샘플링 시간  $t_1, t_2$ 에서의 단자전압은 직류링크전압 전압,  $V_{dc}$ 와 같다.

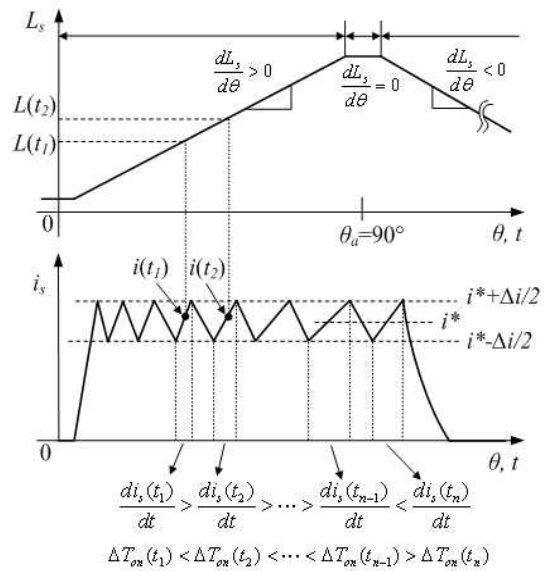


그림 1. 전류변화율, 인덕턴스, 회전자 위치간의 관계  
Fig. 1. Relationship among rate of change of current, inductance, and rotor position

$$v_s(t_1) = v_s(t_2) = V_{dc} \quad (3)$$

정밀한 히스테리시스 전류제어를 가정하면  $t_1, t_2$ 에서의 전류는 모두 지령치( $i_s^*$ )와 같다고 가정할 수 있으므로, 즉,  $i_s(t_1) \approx i_s(t_2) \approx i_s^*$ 이 된다. 따라서 식 (4)가 성립된다.

$$R_s i_s(t_1) \approx R_s i_s(t_2) \quad (4)$$

또한 정속운전 시 불포화 선형 인덕턴스 구간에서 인덕턴스의 변화율은 일정하다는 가정 하에서 다음의 식 (5)가 성립된다.

$$i_s(t_1) \frac{dL_s(t_1)}{dt} \approx i_s(t_2) \frac{dL_s(t_2)}{dt} \quad (5)$$

따라서 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 식 (2)에서 식 (1)을 빼주면 식 (6)을 얻게 되고,

$$L_s(t_2) \frac{di_s(t_2)}{dt} \approx L_s(t_1) \frac{di_s(t_1)}{dt} \quad (6)$$

식 (6)으로부터 전류 변화율과 인덕턴스간의 아래의 식 (7)~(9)와 같은 관계를 유도할 수 있다.

$$\frac{di_s(t_2)}{dt} < \frac{di_s(t_1)}{dt} \rightarrow L_s(t_2) > L_s(t_1) \quad (7)$$

$$\frac{di_s(t_2)}{dt} > \frac{di_s(t_1)}{dt} \rightarrow L_s(t_2) < L_s(t_1) \quad (8)$$

$$\frac{di_s(t_2)}{dt} = \frac{di_s(t_1)}{dt} \rightarrow L_s(t_2) = L_s(t_1) \quad (9)$$

여기서 전류 변화율은 스위치 온 타임( $\Delta T_{on}$ )과 전류 변화치( $\Delta i_s$ )를 측정함으로써 알 수 있다.

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{\Delta i_s}{\Delta T_{on}} \quad (10)$$

정밀한 히스테리시스 제어의 경우 스위치 온 타임 동안 전류 변화치는 일정하게 유지되므로 식 (7)~(9)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta T_{on}(t_2) > \Delta T_{on}(t_1) \rightarrow L_s(t_2) > L_s(t_1) \quad (11)$$

$$\Delta T_{on}(t_2) < \Delta T_{on}(t_1) \rightarrow L_s(t_2) < L_s(t_1) \quad (12)$$

$$\Delta T_{on}(t_2) = \Delta T_{on}(t_1) \rightarrow L_s(t_2) = L_s(t_1) \quad (13)$$

따라서 모터의 여자구간 내에서 두 개의 인접한 스위칭 주기의 스위치 온 타임을 연속적으로 비교함으로써 인덕턴스의 상대적 크기를 비교할 수 있고 인덕턴스는 회전자 위치와 선형적 관계가 있으므로 상대적인 회전자 위치를 알 수 있다.

그림 1에서와 같이 인접한 두 스위치 온 타임을 비

교했을 때 만약 식 (11)의 경우라면 회전자는 인덕턴스 증가 영역에 위치하므로 아직 여자구간에 있는 것이고 만약 식 (12)의 경우라면 인덕턴스가 감소하는 구간에 위치하는 것이므로 네거티브 토크(negative torque)를 발생하는 구간이므로 여자를 종료하여야 한다. 만약 식 (13)의 경우라면 회전자는 인덕턴스의 최대값(고정자 돌극과 회전자 돌극이 일치된 상태) 또는 최저값(고정자 돌극과 회전자 돌극이 어긋난 상태)의 위치에 있는 것인데, 식 (11)에서 식 (13)의 상태로 변화하면 최대값 위치, 식 (12)에서 식 (13)의 상태로 변화하면 최저값 위치에 있는 것으로 유추할 수 있다.

최대 또는 최소 인덕턴스 지점이 결정되면 최소 또는 최대 인덕턴스 지점은 회전자 돌극 피치에 따라 예측할 수 있다. 저속운전에서는 최대인덕턴스 지점을 기준 각으로, 고속운전에서는 최소인덕턴스 지점을 기준 각으로 검출하여 사용하는 것이 유리하다.

본 논문에서는 최대인덕턴스 지점을 검출해 기준 턴 오프 각( $\Theta_{off}$ )으로 정하고 속도 및 위치를 추정하였고 턴 온각( $\Theta_{on}$ )은 동작속도에 따라 결정하는 방법을 사용하였다.

### 3. 제안된 센서리스 알고리즘의 구현

제안된 센서리스 알고리즘의 성공적인 구현을 위해서는 정확한 스위치 온 타임 계산을 위한 빠른 샘플링을 필요로 한다. 따라서 본 논문에서는 32-[bit] 고정소수점 DSP를 이용하여 제안된 알고리즘을 구현하였는데 DSP내의 CPU 타이머를 사용하여 스위치 온 타임을 구하고, 속도 및 위치 계산은 PWM 타이머를 사용하였다. 매 스위칭 주기마다의 스위치 온 타임은 10MHz의 클럭 주파수를 갖는 CPU 타이머를 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$\Delta T_{on}(n) = TC(n) \times 0.1 [\mu s] \quad (14)$$

여기서  $(TC(n))$ 는 임의의 n번째 스위칭 주기에 서의 스위칭 온 타임에 대한 타이머 카운트 숫자이며, 따라서 식 (11)~(13)은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$TC(n) > TC(n-1) \rightarrow L_s(n) > L_s(n-1) \quad (15)$$

$$TC(n) < TC(n-1) \rightarrow L_s(n) < L_s(n-1) \quad (16)$$

$$TC(n) = TC(n-1) \rightarrow L_s(n) = L_s(n-1) \quad (17)$$

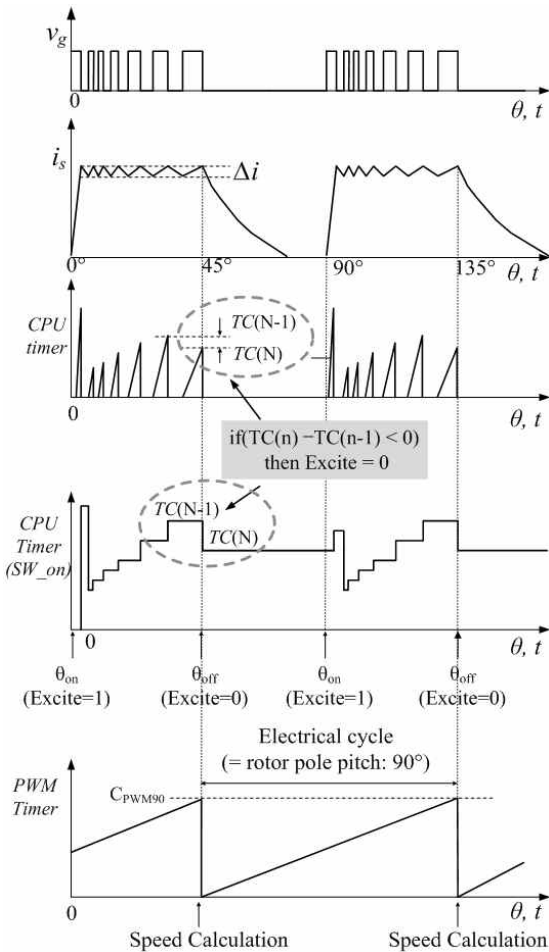


그림 2. 제안된 센서리스 구동 알고리즘  
Fig. 2. Proposed sensorless control algorithm

그림 2는 제안된 센서리스 제어 알고리즘 구현을 설명하기 위한 것으로, 게이트 전압, 전류파형, 스위치 온 타임 카운트( $TC(n)$ ), PWM 타이머 카운트( $C_{PWM}$ )을 보여준다.

히스테리시스 전류제어에서 전류가 히스테리시스 밴드의 하한에 도달하면 스위치가 턴 온되고 이때 스위치 온 타임 카운트( $TC(n)$ )가 증가하기 시작한다. 전류가 상한에 도달하면 스위치는 턴 오프되면서 이

때의 타이머 값이 저장된 후 리셋된다. 전류가 감소하여 다시 하한에 도달하면 다시 스위치가 턴 온되고 전류가 다시 상한에 도달할 때까지 타이머카운트가 증가하게 된다. 이때 저장된 값 즉,  $TC(n)$ 과 이전의 값  $TC(n-1)$ 을 연속적으로 비교하는데 그림 2에서  $TC(n) > TC(n-1)$ 의 상태가 계속 유지되면 회전자가 여전히 인덕턴스 증가구간에 위치하고 있는 것이므로 여자 상태를 유지시키고,  $TC(N) \leq TC(N-1)$  상태로 바뀌는 N 번째 스위칭 주기에서 회전자는 최대인덕턴스 위치에 도달해 있는 상태이므로 즉시 여자를 종료시킨다.

그림 2에서 두 번째와 세 번째 그래프 모두  $TC(n)$  값을 나타내는데, 두 번째 그래프는 매 스위칭 주기가 온 타임 동안 카운트 증가를 보여주며, 세 번째 그래프는 스위치 오프 후 저장된 온 타임 카운트 값의 추이를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 각 커뮤테이션 싸이클 당 전류가 0에서 지령치까지 도달하기 위해 시간이 필요한 첫 스위칭 주기를 제외한 타이머 값은 계속 증가하다 최대 인덕턴스 이후부터 감소하기 시작한다.

본 논문에 사용된 모터의 회전자는 4개의 돌극을 가지므로 회전자 피치는  $90^\circ$ 이므로 최대 인덕턴스 간격 즉, 커뮤테이션 주기는  $90^\circ$ 이며, 최소 인덕턴스와 최대 인덕턴스 간 기계적 간격은  $45^\circ$ 이다. 따라서  $250[\text{kHz}]$  주파수를 갖는 PWM 타이머를 이용하여 커뮤테이션 주기 동안의 타이머 카운트 값( $C_{PWM}$ )을 측정하여 회전자의 속도 및 위치를 식 (18)과 식 (19)와 같이 계산할 수 있다.

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{\pi/2}{C_{PWM0} \times 4\mu s} \times \frac{60}{2\pi} [\text{rpm}] \quad (18)$$

$$\theta = \text{rem} \left( \frac{C_{PWM} \times \frac{\pi}{2}}{C_{PWM0}} + \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2} \right) [\text{rad}] \quad (19)$$

위의 식 (18)과 식 (19)에서  $C_{PWM0}$ 은 커뮤테이션 주기 동안의 총 카운트 값이며 매번 최대 인덕턴스가 검출되는 지점에서 속도가 계산된 후 카운터는 리셋된다.

그림 3과 그림 4는 위에 제안된 알고리즘의 DSP 소프트웨어 구현을 위한 흐름도이다. 그림 3은 메인 컨트롤 알고리즘을 수행하는 PWM 인터럽트 루틴의 흐름도이고, 그림 4는 히스테리시스 전류 제어 루프를 나타내는 흐름도이다. 제안된 알고리즘의 성공적인 구현을 위해서는 히스테리시스 응답지연을 최대한 줄이기 위해 빠른 샘플링이 필요하므로, 250[kHz]의 샘플링 주파수가 스위치 온 타임 계산을 위해 쓰였다.

모터 기동 후 센서리스 알고리즘은 PWM 인터럽트 루틴에서 수행이 되면 PWM 카운트는 매번 PWM 인터럽트 실행시마다 증가한다. 회전자가 0°, 즉 최소 인덕턴스 위치에 있을 때 여자가 시작되면 전류제어 루프를 매 4[μs] 주기마다 수행한다. 전류제어 루프에서는 전류가 히스테리시스 밴드 하한에 도달하면 스위치가 턴 온되고 상한에 도달할 때까지 타이머가 카운트되어 턴 온 시간을 계산한다. 두 인접한 스위치 온 시간은 최대 인덕턴스 지점이 검출될 때까지 비교를 한다. 간혹 노이즈나 인덕턴스의 비선형성으로 인해 최대지점에 도달하기 훨씬 이전에 여자가 종료되는 것을 방지하여 충분한 여자시간을 확보하기 위해 커뮤테이션은 30° 이후에 실시하도록 하고 있다.

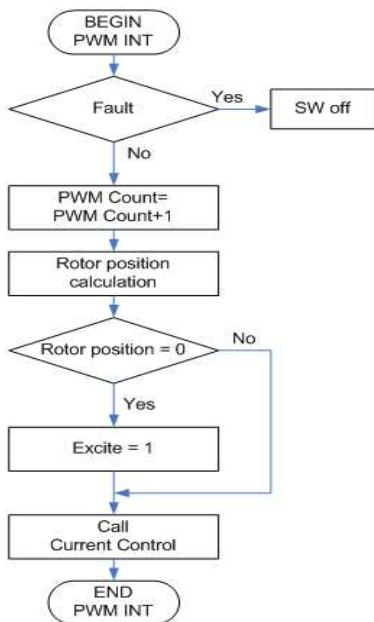


그림 3. PWM 인터럽트 루틴을 나타내는 흐름도  
Fig. 3. Flow chart for PWM interrupt routine

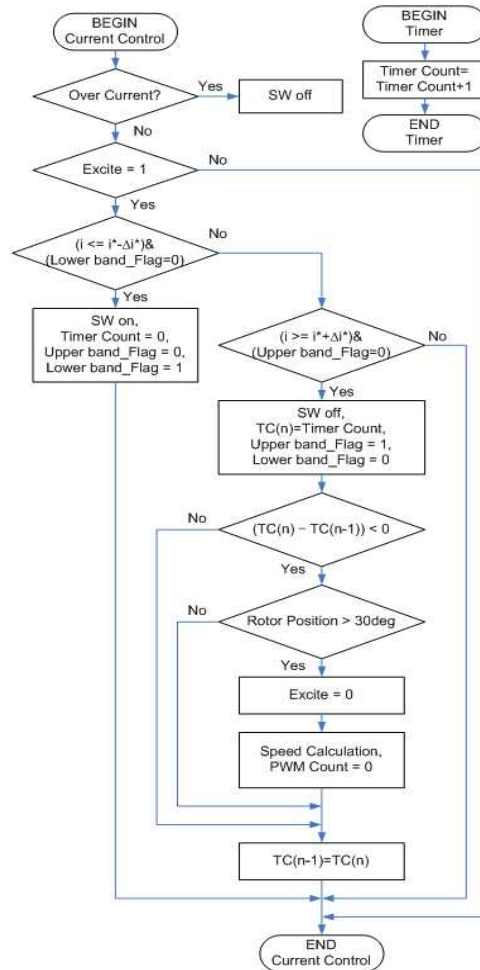


그림 4. 전류제어 루프를 나타내는 흐름도  
Fig. 4. Flowchart for current control loop

#### 4. 시뮬레이션 결과

제안된 센서리스 제어 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 Maxwell 2D와 Simplorer를 연계하여 모터의 실시간 FEA 해석과 구동회로 및 제어 알고리즘을 동시에 실행할 수 있는 시뮬레이션을 시행하였다. 그림 5는 SRM이 1,800[rpm]의 정상상태에서 운전 중일 때의 인덕턴스, 게이트 펄스, 상전류, 스위치 온 타이머 카운트, PWM 인터럽트 타이머 카운트를 보여주고 있으며 그림 1의 그래프와 매우 흡사함을 알 수 있다. 그림에서 보이듯이 인덕턴스가 증가함에 따라 전류 증가율이 작아지며, 히스테리시스 밴드가 일정하므로 스위치 온 시간은 증가하고 있음을 볼 수 있다. 따라

인접한 스위치 온 타임 비교를 통한 SRM의 센서리스 제어

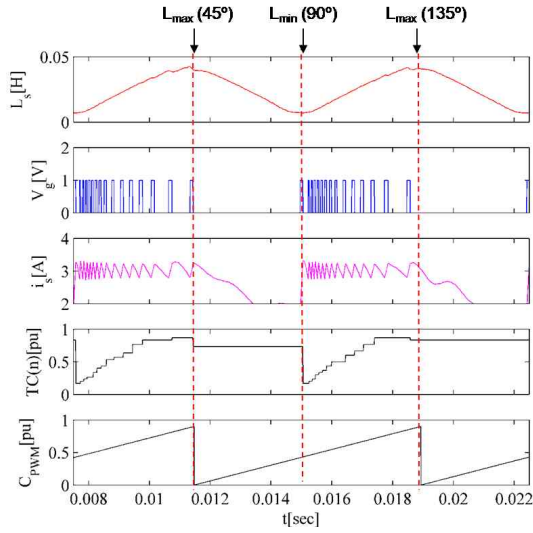


그림 5. 제안된 센서리스 제어 방법에 대한 시뮬레이션 결과 (1,800[rpm])

Fig. 5. Simulation results for proposed rotor position estimation(1,800[rpm])

서 타이머 카운터도 증가하고 있음을 알 수 있다. 두 개의 인접한 스위치 온 시간을 계속 비교하다가 최대 인덕턴스에 도달하면 다시 스위치 온 타임이 줄어들게 되어 타이머 카운터도 줄어들게 된다. 그림 5에도 보이듯이 모터의 인덕턴스 카운터 값은 회전자 위치에 따라 증감의 경향이 유사함을 알 수 있다.

## 5. 실험 결과

제안된 SRM의 센서리스 알고리즘은 DSP 컨트롤러(TMS320F2808)를 이용하여 실험적으로 구현하였다. 그림 6는 DSP를 이용하여 얻은 실험결과로서 상전류, 타이머 카운터, 홀 센서(Hall sensor) 신호, 그리고 Excite\_Flag를 나타낸다.

그림 6의 결과에서 나타난 것처럼 스위치 온 시간의 증가에 따른 타이머 카운트의 증가를 시뮬레이션 결과와 비슷하게 관찰할 수 있다. 위치 검출기인 홀 센서는 제안된 방법으로 추정된 회전자 위치와 실제 위치를 확인하기 위해서만 쓰였다. 그림에서 Excite\_Flag는 매 45°마다 여자과 커뮤테이션을 보여주는 플래그로서 실제 홀센서 신호와 거의 동기를

이루는 것을 볼 수 있다. 실제 회전자 위치와 추정치 간의 오차는 최대 3.2°(3.55%)이다.

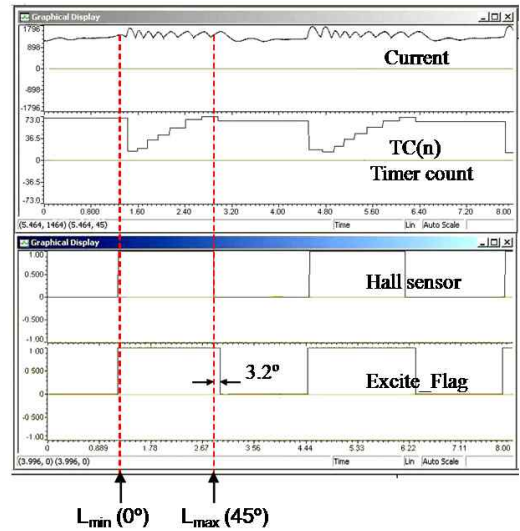


그림 6. DSP를 통해 얻은 실험결과 파형

Fig. 6. Experimental waveform captured by DSP controller(1,800[rpm])

## 6. 결론

본 논문에서는 히스테리시스 전류제어에서 두 인접한 스위칭 온 시간을 연속적으로 비교함으로써 SRM의 회전자의 위치와 속도를 추정할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 자기특성에 대한 데이터나 별도의 하드웨어가 필요 없고 복잡한 계산이 요구되지 않아 구현이 매우 용이하다. 본 논문에서는 제안된 방법의 이론적인 바탕을 제시하였고, 이를 시뮬레이션과 실험을 통하여 타당성을 검증하였다. 제안된 방법은 팬(fan)과 같은 저가의 모터 드라이브에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2005-214).

## References

- [1] R. Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives", CRC Press, 2001.
- [2] MESE, E., and TORREY, D. A, "An Approach for Sensorless Position Estimation for Switched Reluctance Motors Using Artifical Neural Networks", IEEE Trans., PE-17,(1), pp.66-75, 2002.
- [3] K. R. THOMPSON, P. P. ACARNLEY, and C. FRENCH, "Rotor Position Estimation in a Switched Reluctance Drive Using Recursive Least Squares", IEEE Trans., IE-47, (2), pp.368-379, 2000.
- [4] LYONS, J. P., MACMINN, S. R. and PRESTON, M. A, "Flux/current methods for SRM rotor position estimation", Proceedings of IEEE Industrial Applications Society Annual Meeting, IAS'91, pp.482-487,1991.
- [5] LIU, S.P .and W.WANG, 'Indirect Rotor Position Sensing for Switched Reluctance Motor Using Search Coil', Proc. of the Canadian Conf. on Electrical and Computer Engineering, pp.938-942, 1996.
- [6] H. Y. Yang, J.G. Kim, Y.C. Lim, S. K. Jeong, and Y. G. Jung, "Position detection and drive of a toroidal Switched Reluctance Motor(TSRM) using search coils", IEE Proceedings-Electric Power Applications. - Vol. 151, No. 4. 07, pp.377-384, 2004.
- [7] S.K. Panda, and G.A.J. Amaratunga, "Analysis of the waveform detection technique for indirect rotor position sensing of switched reluctance motor drives," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 6 , No. 3, pp. 476-483, 1991.

## ◆ 저자소개 ◆



### 양형열(梁煥烈)

1969년 5월 27일생. 1993년 전남대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동대학 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동대학 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993~1994년 현대자동차(주) 사원. 2005년 10월 ~2006년 10월 미국 Virginia Tech.

Post-Doc. 연구원. 2007년 3월~2009년 2월 호남대학교 전임강사. 2009년 3월~2009년 9월 지오토(주) 연구소장. 2009년 10월~현재 호남대학교 전임강사.



### 김재혁(金宰赫)

1973년 4월 25일생. 1999년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1998~2000년 UL Korea, Ltd(a subsidiary of Underwriters Laboratories Inc, Northbrook, USA) 엔지니어. 2004년 미국 위스콘신 주립대 (University of Wisconsin-Madison) 졸업(석사).

2010 미국 버지니아텍(Virginia Tech) 졸업(박사). 2010년 1월~현재 미국 RAMU Inc, senior engineer.