

영구자석형 동기모터의 센서리스 제어

홍찬희, 조관열, 양순배
(주) LG전자 Digital Appliance 연구소

Sensorless Control of PMSM

Chan-Hee Hong, Kwan-Yuhl Cho, Soon-Bae Yang
Digital Appliance Research Lab., LG Electronics Inc.

ABSTRACT

This paper presents the sensorless control technique with cost competitive phase currents detection for PMSM drives. The phase currents are detected by two methods : one is from the dc link current, another is from the currents of the lower legs of the inverter switches. The sensorless control with the phase currents detection is implemented with DSP. It is verified through the experiment that the estimated rotor position tracks the real rotor position at the low speeds and high speeds operation with flux weakening.

1. 서 론

최근 에너지 저소비와 소음에 대한 관심이 높아 가면서 영구자석형 동기모터에 대한 사용이 보편화 되고 있으며, 특히 가전제품에 있어서 원가와 성능을 동시에 만족하기 위한 노력이 있어왔다. 이와 함께, 위치나 속도센서를 제거하여 원가절감 및 제품편차를 줄이고 모터의 성능을 최대로 얻기 위한 센서리스 제어의 적용은 필수적이다.

모터의 모델식을 통하여 회전자의 위치를 추정하고 정확한 모터의 전류제어를 위해서는 순시적인 모터의 상전류 정보가 필요하다. 홀 효과를 응용한 전류 검출장치에 비해 DC링크에 직렬로 연결한 저항에 흐르는 전류를 검출하는 방법은 저렴한 비용으로 상전류를 검출할 수 있다^{[1][2]}. 그러나, 이 방법은 최소 검출 시간이 필요하여 저전압 구간 및 60도 주기마다 상전류를 검출하지 못하는 구간이 발생한다.

또 하나의 방법은 인버터의 하단스위치에 각각 직렬로 삽입한 저항의 상전류에 비례하는 전위차를 이용하는 것이다. DC링크 직렬저항을 이용한 방법

에 비해 검출 저항이 3배로 든다는 단점은 있으나, 하단의 스위치가 도통되는 구간이 확보되면 3상의 전류를 동시에 검출할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서는 위의 두가지 상전류 검출 장치를 센서리스 알고리즘으로 운전되는 영구자석형 모터에 적용하여 다양한 운전형태로 고찰하였다. TI의 TMS320F2406을 이용하여 SPM타입의 영구자석형 모터를 대상으로 센서리스 알고리즘으로 구동하여 정역운전 및 약자속 제어를 통한 고속운전을 통하여 실제 제품에의 적용 가능성을 검증하였다.

2. 실험 모델

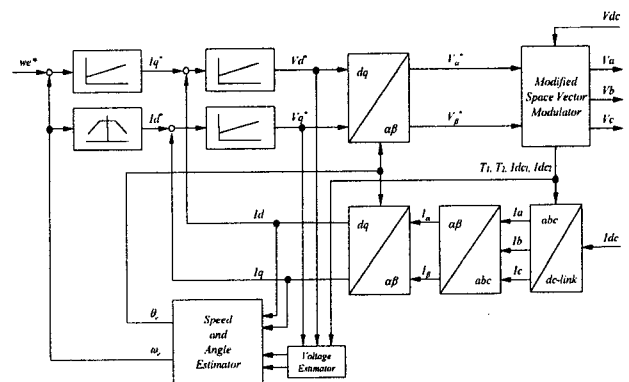


그림 1 전체 블록도

Fig. 1 Block diagram of PMSM sensorless control

전체 블록도는 그림 1과 같다. 회전자 동기 좌표계에서 센서리스 알고리즘 및 전류 제어를 행하였으며, 상전류 검출을 하기 위한 시간을 확보하기 위하여 공간전압 벡터를 수정한다. 상전압 검출은 각 상의 PWM출력값에 상전류와 함께 데드타임 보상 정보를 이용하여 계산하여 사용한다. 속도 제어를 통하여 토크축 전류를 제어하며, 약자속 영역으로 운전시 자속축 전류를 계산한다.

3. 상전류 검출

3.1 DC링크 직렬 저항 이용

인버터의 스위치 패턴에 따라 DC링크 직렬 저항에 흐르는 전류가 3상 전류중 하나라는 점을 이용하는 방법이다. 그림 2는 각 스위칭 패턴에 따른 DC링크 직렬 저항에 흐르는 상전류를 나타낸다.

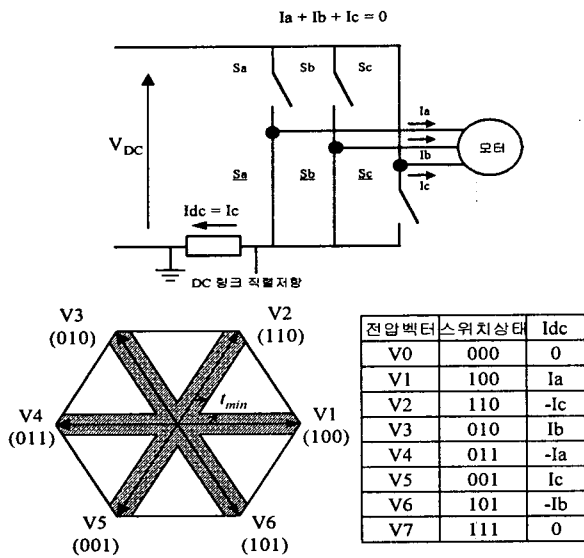


그림 2 DC링크 직렬저항에 의한 상전류 검출
Fig. 2 Current sensing with DC link resistor

유효 전압벡터의 출력시간 (공간벡터의 t_1, t_2)은 ADC가 DC링크 전류에서 해당 상전류를 검출하기 위한 시간 t_{min} 이 확보되어야 한다. 여기서 t_{min} 은 t_{di} (데드타임) + t_{settle} (스위치소자 안정화시간) + t_{ADC} (ADC샘플링 시간)이다. 이러한 검출시간을 확보하면서 원하는 전압벡터를 출력하기 위하여 유효 전압벡터의 출력시간 t_1 또는 t_2 가 t_{min} 보다 작으면, 그림 3과 같이 PWM 한 주기에 상전류검출을 위한 t_{min} 이상을 출력하고 나머지 소정의 PWM주기에 걸쳐 원하는 전압벡터가 되도록 평균전압을 출력한다.^[3]

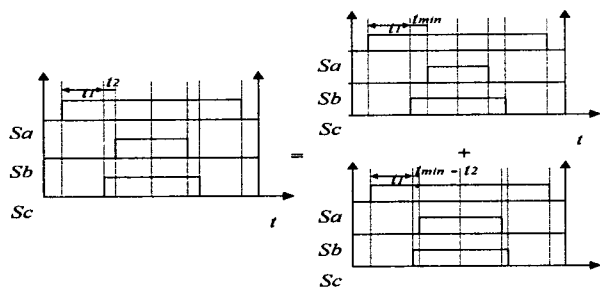


그림 3 DC링크 검출시간 확보를 위한 평균전압 보상
Fig. 3 Modified voltage vector

3.2 스위치 하단 직렬 저항 이용

인버터의 각 상의 스위치 하단과 DC링크 그라운드 사이에 직렬 저항을 삽입하여 이를 통하는 전류를 검출한다. DC링크 전류 검출 방법과 달리 하단 스위치가 켜졌을 때에만 검출이 가능하다.

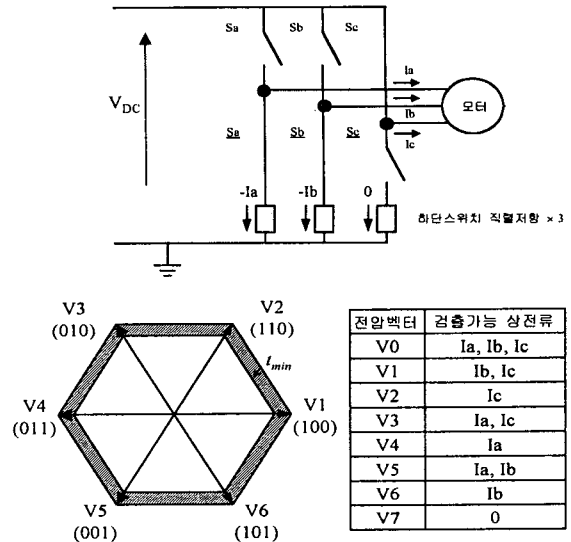


그림 4 스위치 하단 직렬저항에 의한 상전류 검출
Fig. 4 Current sensing with 3 shunt resistors

이 방법에 있어서 PWM출력전압이 제로벡터(V_0)일 경우 하단의 스위치가 모두 켜지기 때문에, 3상 전류를 동시에 모두 검출할 수 있다. 그러나, 검출을 위한 제로벡터를 $V_0(V_7) < t_{min}$ 로 제한할 경우, 그림 4와 같이 인버터의 전압을 100% 사용할 수 없게 된다.

이를 해결하기 위하여, 두 상전류만 검출할 수 있는 벡터(V_1, V_3, V_5)까지 사용하고, 나머지 한 상의 전류는 $I_a + I_b + I_c = 0$ 관계식에서 구할 수 있다. ADC로 검출하는 시간은 제로벡터가 t_{min} 보다 클 때는 V_0 의 중앙부근에서 시작하며, 작을 때는 V_1, V_3, V_5 의 시작부터 t_{min} 만큼 지연된 시간이후에 한다. 따라서 V_0, V_1, V_3, V_5 가 출력되는 보다 넓은 공간 벡터상으로 검출 영역을 확대할 수 있다. 이러한 검출가능 상전류는 그림 4의 표에 정리하였다.

4. 센서리스 알고리즘

영구자석형 동기기의 센서리스 제어를 위한 여러 가지 알고리즘이 제시되고 있다. 본 논문에서는 검출된 모터의 상전류와 모터의 모델에서 계산된 상전류 추정값을 비교하여 모터의 회전자 위치의 오차를 줄이는 알고리즘을 적용한다.^[4]

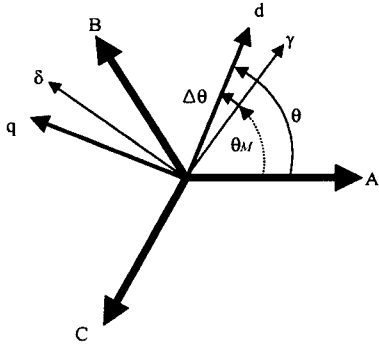


그림 5 회전자 실제위치와 추정각
Fig. 5 Analytical model of PMSM

그림 5에서 회전자가 고정자 A상에서 θ 만큼의 각도인 d - q 축상에 위치해 있다. 그러나, 추정한 회전자의 위치 θ_M 은 실제 회전자 위치 θ 에서 작은 각 $\Delta\theta$ 만큼의 오차가 있는 γ - δ 축상에 있다고 가정하면, 모터의 모델식으로부터 다음의 식이 성립한다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R+L_d p & -\sigma_M L_q \\ \sigma_M L_d & R+L_q p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + e \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R+L_d p & -\sigma_M L_q \\ \sigma_M L_d & R+L_q p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} + e \begin{bmatrix} -\sin \Delta\theta \\ \cos \Delta\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

이를 전류에 의한 식으로 정리하면,

$$\begin{bmatrix} i_\gamma(n) \\ i_\delta(n) \end{bmatrix} = \frac{T}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_q v_\gamma(n-1) \\ L_d v_\delta(n-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1-\frac{R}{L_d} T & \sigma_M \frac{L_q T}{L_d} \\ -\sigma_M \frac{L_d T}{L_q} & 1-\frac{R}{L_q} T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma(n-1) \\ i_\delta(n-1) \end{bmatrix} - \frac{T}{L_d L_q} e \begin{bmatrix} -L_q \sin \Delta\theta \\ L_d \cos \Delta\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{M\gamma}(n) \\ i_{M\delta}(n) \end{bmatrix} = \frac{T}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_q v_\gamma(n-1) \\ L_d v_\delta(n-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1-\frac{R}{L_d} T & \sigma_M \frac{L_q T}{L_d} \\ -\sigma_M \frac{L_d T}{L_q} & 1-\frac{R}{L_q} T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma(n-1) \\ i_\delta(n-1) \end{bmatrix} - \frac{T}{L_q} e_M \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

두식을 정리하면, 다음 식 (5)와 같이 모델의 추정전류와 검출 전류의 오차가 모터의 역기전력과 위치오차와의 관계를 알 수 있다. ($\Delta\theta$ 가 작은 경우 근사식 적용)

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta i_\gamma(n) \\ \Delta i_\delta(n) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} i_\gamma(n) \\ i_\delta(n) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{M\gamma}(n) \\ i_{M\delta}(n) \end{bmatrix} \\ &= \frac{T}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_q e \sin \Delta\theta \\ L_d (e_M - e \cos \theta) \end{bmatrix} \\ &= \frac{T}{L_d L_q} \begin{bmatrix} L_q e \Delta\theta \\ -L_d \Delta e \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

역기전력의 적분식과 추정 위치를 정리하면 다음과 같다. (K_e 는 역기전압 추정계인, K_θ 는 회전자 위치 추정계인)

$$e_s(n) = e_s(n-1) - K_e \Delta i_s(n) \quad (6)$$

$$\theta(n) = \theta(n-1) + \frac{T}{\nu} e_M(n) + K_\theta \Delta i_r(n) \quad (7)$$

모터의 전류모델을 통한 상전류의 추정값과 DC 링크 또는 인버터 하단의 직렬저항을 통해 검출된 모터의 상전류간의 오차를 통해 역기전압을 추정하고 추정위치의 오차를 보정하여 회전자의 위치를 알 수 있다.

5. 실험 결과

본 논문에서 논의된 두가지의 모터 상전류검출 방법을 표 1과 같은 인버터와 영구자석형 동기모터의 센서리스 알고리즘에 의한 운전이 행하여졌다.

표 1 시스템 파라미터
Table 1 System parameters

패러미터 항목	패러미터 값
상저항	4.5Ω (25°)
상 인덕턴스	31.88mH
역기전압 상수	선간 6.48V·rad/s
DC링크 전압	311V
스위칭 주파수	12kHz

원활한 알고리즘의 구현을 위하여 처리속도가 30MIPS이며 PWM 및 ADC모듈이 내장된 TI의 고정소수점 연산용 모터제어 DSP인 320F2406이 사용되었다.

그림 6과 그림 7은 DC링크 직렬저항을 사용하여 모터의 상전류를 검출하고 센서리스 제어로 운전하였을 경우의 파형이다. (실험 파형중에서 회전자위치 신호는 기계적인 구조상 회전자에 비해 정방향 회전일 경우 전기각으로 18도 앞서서 발생하게 되어 있다.) 그림 6에서는 약 1.2초 주기로 50Hz의 정역운전을 할 때의 추정위치 및 상전류 검출값을 비교하였다. 상전류 검출주기는 3kHz이며 상전류 검출을 위해 변형된 전압값을 1회 출력하고 원래의 기준전압과의 오차를 보상하는 전압벡터를 3회 출력한다. 그림 7은 lead angle이 약 90도인 약자속 제어시의 추정각 및 상전류 검출 파형이다. 인버터의 출력주파수는 300Hz의 고속으로 정속운전하며, 상전류 검출은 6kHz의 주기로 행하여지기 때문에 모터의 상전류 샘플링 주기를 저속시 정역운전에 비해 2배로 높아지게 된다.

DC링크 직렬저항으로부터 상전류 검출을 위하여 기준전압 벡터와는 다소 왜곡된 방향으로 전압벡터가 출력되지만, 고속에서도 센서리스 제어로 운전되는데 큰 문제는 없는 것으로 보인다.

6. 결 론

본 논문에서는 비교적 비용에 부담이 없는 DC 링크 직렬저항과 인버터 하단 스위치 직렬저항을 이용한 모터의 상전류 검출방법을 고찰하였으며, 두 가지 방법을 사용하여 센서리스 제어에 적용하였다.

DC 링크 직렬저항을 이용한 방법은 유효 전압벡터의 출력시간을 상전류 검출 시간이상으로 항상 확보하여야 하기 때문에, 상전류 검출 주기를 출력 주파수에 따라 가변하여 평균전압을 출력하는 방법을 사용하였다. 인버터 스위치 하단에 저항을 직렬로 연결하여 상전류를 검출하는 방법은 보다 더 넓은 범위의 공간 벡터상의 면적을 이용할 수 있다. 또한, 센서리스 제어에 적용하여 급격한 정역운전 및 고속의 약자속 제어 등 전운전 영역에 있어서 정상적으로 모터의 상전류가 검출되며 센서리스 제어가 이루어졌다.

앞으로는 보다 더 정확한 센서리스 제어를 위하여 모터의 상전류 검출이 어려운 공간벡터상의 영역도 토크맥동이나 소음발생없이 상전류를 검출할 수 있는 알고리즘의 개발이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] T.C. Green, B.W. Williams, "Derivation of motor line-current waveforms from the DC-link current of an inverter," *IEE Proc. B*, Vol. 136, No. 4, pp. 196~204, 1989.
- [2] Frede Blaabjerg, John K. Pederson, "Single Current Sensor Technique in the DC Link of Three-Phase PWM-VS Inverters: A Review and a Novel Solution," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. IA-33, No. 5, pp. 1241~1253, 1997, Sep/Oct.
- [3] Texas Instruments, "Three phase current measurements using a single line resistor on the TMS320F240," ref. BPRA077, 1998, May.
- [4] Nobuyuki Matsui, "Sensorless PM Brushless DC Motor Drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. IE-43, No. 2, pp. 300~308, 1996, April.

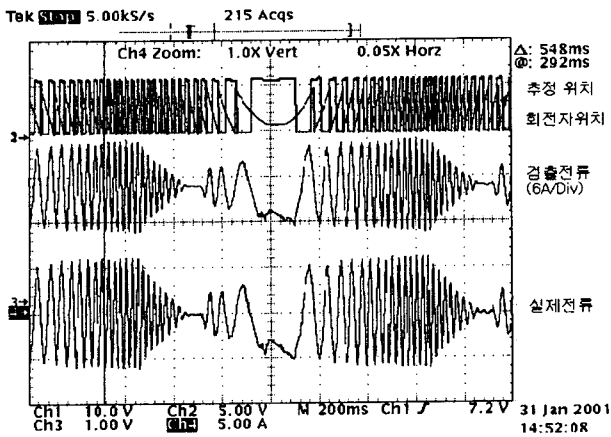


그림 6 정역시의 추정각 및 상전류 검출
Fig. 6 Sensorless drive using DC link current

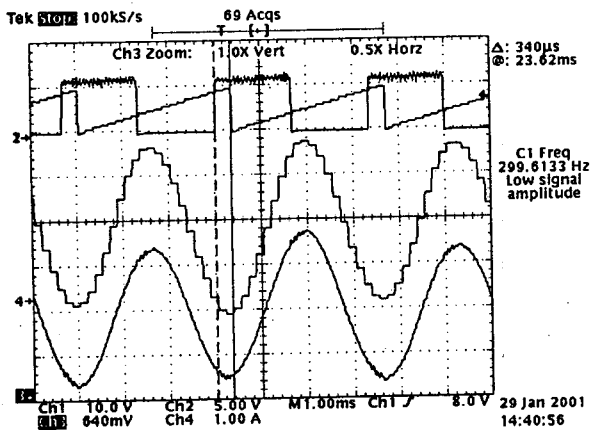


그림 7 300Hz 운전시의 추정각과 상전류 검출
Fig. 7 Flux weakening drive using DC link current

그림 8은 같은 센서리스 알고리즘을 인버터 스위치 하단의 직렬저항을 이용하여 검출한 상전류 정보로 정역운전하였을 경우의 추정위치 및 상전류 파형이다. DC 링크 직렬저항을 이용할 때와는 달리 일정전압내에서 전압벡터의 왜곡이 없기 때문에 PWM 주기와 같은 주파수로 상전류가 잘 검출된다.

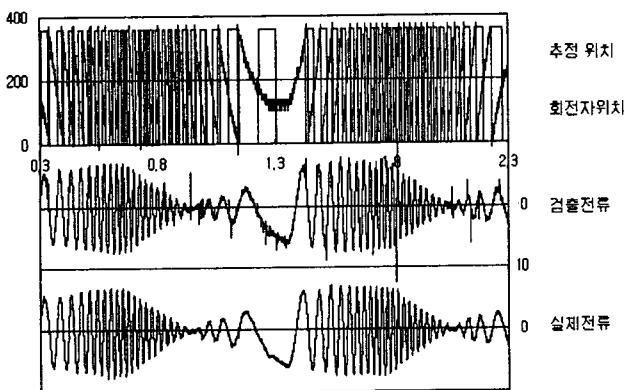


그림 8 스위치 하단 직렬저항을 이용한 전류검출
Fig. 8 Sensorless drive using 3 shunt resistors