

DSP 기반 영구자석 동기기의 센서리스 속도제어

이상훈, 원태현*, 박성준**, 이동희***, 안진우****

KT전기, 동의공업대학*, 동명대학**, 거제대학***, 경성대학교****

Sensorless Velocity Control for Permanent Magnet Synchronous Motor

Sang-Hun Lee, Tae-Hyun Won*, Sung-Jun Park**, Dong-Hee Lee***, Jin-Woo Ahn****

KT Electric, Dongeui Institute of Technology, Tongmyong College**,
Koje College***, Kyung Sung University****

ABSTRACT

A sensorless velocity control strategy for permanent magnet synchronous motors is presented in this paper. Two stator currents are measured and processed in discrete form in DSP. The rotor position and speed are estimated through the stator flux linkage and its derivative estimation. Flux and its derivative are calculated in the stationary reference frame and used to estimate the speed and position. The closed-loop speed control has been shown to be effective from standstill to rated speed. Moreover, a flux drift problem caused by the integration can be eliminated so that a stable sensorless starting and running operation can be achieved. Experimental results are presented to demonstrate the effectiveness of the proposed scheme.

1. 서론

현대사회의 자동화설비 확장으로 인하여 산업용 기계 및 가정용 기기에서의 서보 전동기의 이용이 급부상하고 있다. 산업용 로봇 및 각종 수치제어 공작기계에서부터 가정용 기기 등 모든 분야에서 서보 전동기는 필수적인 구동원으로 자리잡고 있다. 서보 전동기는 페라이트 영구자석을 이용한 직류서보전동기가 주종을 이루고 있었으나 브러시나 정류자로 인하여 고속 운전이 곤란하며, 빈번한 보수 및 점검이 필요로 하는 약점을 가지고 있다.

산업 및 가전용 기기에서 교류전동기 시스템은 기존의 직류전동기를 사용하던 시스템에 비해서 기계적인 마모에 의한 유지 및 보수의 문제가 없다는

점과 다양한 제어 방식과 고성능 마이크로 프로세서 및 전력전자 소자의 발달에 힘입어 점점 고성능 교류 전동기의 사용빈도가 높아져 가는 추세이다.

특히 영구자석 동기전동기는 토크를 발생하기 위한 제자자속을 영구자석을 사용하여 발생함으로써 유도전동기와 같은 다른 교류전동기에 비해 높은 효율과 우수한 토크 특성 및 제어 성능이 우수하고 단위 중량당 전력 및 단위 전류당 토크가 큰 장점을 지니고 있다. 이러한 영구자석 동기전동기를 정확하고 정밀한 속도 및 토크 제어하기 위해서는 회전자의 속도뿐만 아니라, 회전자의 위치 정보가 반드시 요구된다.

영구자석 동기전동기 구동 시스템에서 제어에 필수적인 회전자의 위치각 및 속도를 검출하기 위하여 일반적으로 사용되는 엔코더는 전동기에 비하여 저가가 아닌 관계로 전동기 제어 시스템의 저가화에 문제가 되며, 엔코더를 사용하기 위한 회로의 추가 및 기계적인 부착으로 발생하는 전동기 가공성 저하, 전동기의 방열문제 등 많은 문제점을 포함하고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도제어를 위한 새로운 알고리즘을 제안한다.

2. 영구자석 동기전동기 수학적 모델

그림 1은 2상 고정자 기준 좌표축과 회전자 기준 좌표축에 대한 영구자석 동기전동기의 등가모델을 표현하고 있다.

영구자석 동기전동기의 순시전압 방정식을 2상 회전자 기준좌표계 $d-q$ 축의 전압방정식과 토크 방정식은 각각 식 (1) 및 식 (2)로 유도된다.

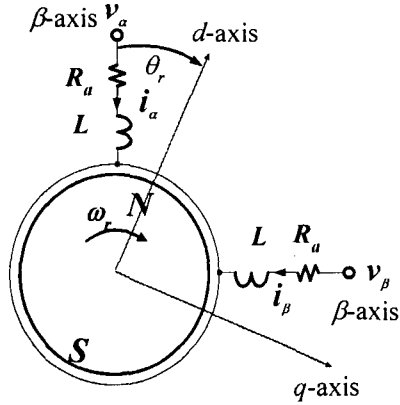


그림 1 2상 고정자 기준 좌표축과 회전자 기준 좌표축
Fig. 1 Stationary reference frame and rotor reference frame

$$v_d = R_s i_d + L \frac{di_d}{dt} - L \omega_r i_q \quad (1)$$

$$v_q = L \omega_r i_d + R_s i_q + L \frac{di_q}{dt} + K_e \omega_r$$

$$T_E = \frac{3}{2} P K_e i_q \quad (2)$$

그리고 영구자석 동기전동기의 운동방정식은 식(3)과 같이 모델링된다.

$$T_E = J \frac{d}{dt} \omega_m + \omega_m B_m + T_L \quad (3)$$

따라서 영구자석 동기전동기의 고정자 슬롯에서의 릴럭턴스 변화를 무시하고, 영구자석에 의한 쇄교자속이 공간적으로 매우 정현적이라고 가정하면 영구자석 동기전동기의 토크는 q 축 전류에 의해서 제어됨을 알 수가 있다.

3. 제안하는 센서리스 알고리즘

본 연구는 쇄교자속 간접 검출에 의한 영구자석 동기전동기의 회전자 위치 추정방법을 제안하고, 제안된 방식의 파라미터 의존성을 보완하기 위하여 정밀한 전기적 파라미터 추정을 위한 TCM 방식을 병행하여, 초기 기동시와 센서리스 운전 성능을 개선하였다. 본 연구에서 제안하는 쇄교자속 간접검출방법은 영구자석 동기전동기의 등가모델로부터 유도될 수 있으며, 운전상태의 영구자석 동기전동기의 쇄교자속 공간 벡터는 그림 2와 같다.

본 연구는 전동기의 전기적인 모델을 근거로 하여 자속과 자속의 도함수를 추정하고 이를 전동기의 속도와 위치 추정을 수행하는 방식이다.

고정자 기준좌표로 표현된 영구자석 동기전동기의 총쇄교자속은 그림 2의 공간벡터도에서 다음과 같이 α - β 축 자속벡터의 합성 벡터로 표현된다.

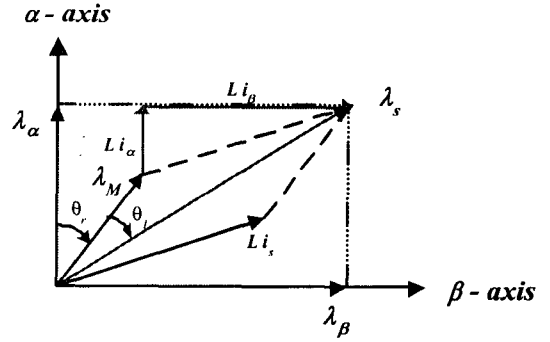


그림 2 쇄교자속의 공간벡터도
Fig. 2 Space vector diagram of flux linkage

$$\lambda_s = \lambda_\alpha + j\lambda_\beta \quad (4)$$

영구자석 동기전동기의 쇄교자속은 회전자인 영구자석의 계자자속과 고정자 권선에서의 인덕턴스에 의한 자속의 합성벡터이다. 본 연구에서 해석된 영구자석 동기전동기는 원통형 회전자 구조로 가정되어 일정한 공극을 가지므로 인덕턴스 크기는 동일한 것으로 가정된다. 따라서 식(4)의 쇄교자속은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \lambda_\alpha &= L_\alpha i_\alpha + \lambda_{M\alpha} = L i_\alpha + \lambda_{M\alpha} \\ \lambda_\beta &= L_\beta i_\beta + \lambda_{M\beta} = L i_\beta + \lambda_{M\beta} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $\lambda_{M\alpha}$ 와 $\lambda_{M\beta}$ 는 회전자 자석에 의한 α - β 축의 계자자속 성분을 의미하며 회전자의 위치각에 대한 함수로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_{M\alpha} &= |\lambda_M| \cos(\theta_r) \\ \lambda_{M\beta} &= |\lambda_M| \sin(\theta_r) \end{aligned} \quad (6)$$

이때 전동기의 총쇄교자속은 계자자속의 관점에서 회전자위치와 부하각에 대한 함수로 유도될 수 있으며, 그림 2의 공간벡터도에서 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \lambda_\alpha &= |\lambda_s| \cos(\theta_r + \theta_1) \\ \lambda_\beta &= |\lambda_s| \sin(\theta_r + \theta_1) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{단, } |\lambda_s| = \sqrt{\lambda_\alpha^2 + \lambda_\beta^2}$$

여기서 θ_1 은 회전자 계자자속과 총쇄교자속과의 각도를 의미한다.

따라서 식(6)과 식(7)로부터 회전자 계자자속의 도함수와 총 쇄교자속의 도함수는 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{d\lambda_{M\alpha}}{dt} = -\omega_r |\lambda_M| \sin(\theta_r) \quad (8)$$

$$\frac{d\lambda_{M\beta}}{dt} = \omega_r |\lambda_M| \cos(\theta_r)$$

$$\frac{d\lambda_\alpha}{dt} = -\omega_r |\lambda_s| \sin(\theta_r + \theta_1) \quad (9)$$

$$\frac{d\lambda_\beta}{dt} = \omega_r |\lambda_s| \cos(\theta_r + \theta_1)$$

$$\text{단 } \omega_r = \frac{d}{dt} \theta_r, \quad \omega_r' = \frac{d}{dt} (\theta_r + \theta_1)$$

이때 정상상태에서 ω_r 과 ω_r' 은 동일한 값으로 되며 부하각 θ_1 은 일정하다. 위의 식으로부터 회전자 계자자속에 의한 도함수와 총쇄교자속의 도함수의 관계는 다음 식과 같이 간단히 정리된다.

$$\frac{d\lambda_{M\alpha}}{dt} = -\omega_r \lambda_{M\beta} \quad (10)$$

$$\frac{d\lambda_{M\beta}}{dt} = \omega_r \lambda_{M\alpha}$$

$$\frac{d\lambda_\alpha}{dt} = -\omega_r \lambda_\beta \quad (11)$$

$$\frac{d\lambda_\beta}{dt} = \omega_r \lambda_\alpha$$

식 (10)에서 회전자 계자자속 및 회전자 계자자속의 도함수 관계로부터전동기의 순시 속도값을 구할 수 있음을 알 수 있고, 식(11)에서 총 쇄교자속 및 총 쇄교자속의 도함수 값으로부터 순시 총 쇄교자속의 속도값을 구할 수 있음을 알 수 있다.

따라서 영구자석 동기전동기의 수학적인 모델로부터 전동기의 쇄교자속을 간접적으로 검출하고 이에 대한 정보로부터 회전자 위치를 추정하는 센서리스 기법을 제안한다.

회전자의 속도정보를 포함하고 있는 계자자속과 계자자속의 도함수는 전동기의 수학적인 모델로부터 다음과 같이 추정된다.

$$\lambda_{M\alpha} = \hat{\lambda}_{M\alpha}(\hat{\theta}_r) \quad (11)$$

$$\lambda_{M\beta} = \hat{\lambda}_{M\beta}(\hat{\theta}_r)$$

$$\frac{d\hat{\lambda}_{M\alpha}}{dt} = v_\alpha - R_a i_\alpha - L \frac{di_\alpha}{dt} \quad (12)$$

$$\frac{d\hat{\lambda}_{M\beta}}{dt} = v_\beta - R_a i_\beta - L \frac{di_\beta}{dt}$$

단, $\hat{\theta}_r$: 추정된 회전자 위치

$\hat{\lambda}_{M\alpha}, \hat{\lambda}_{M\beta}$: 추정된 계자자속

또한 추정된 계자자속에 의한 총 쇄교자속 및 쇄교자속의 도함수는 다음과 같이 계산된다.

$$\lambda_\alpha = L i_\alpha + \hat{\lambda}_{M\alpha}(\hat{\theta}_r) \quad (13)$$

$$\lambda_\beta = L i_\beta + \hat{\lambda}_{M\beta}(\hat{\theta}_r)$$

$$\frac{d\lambda_\alpha}{dt} = v_\alpha - R_a i_\alpha \quad (14)$$

$$\frac{d\lambda_\beta}{dt} = v_\beta - R_a i_\beta$$

위 식으로부터 전동기의 속도는 쇄교자속의 간접 검출에 의해 다음 식과 같이 계산되어질 수 있다.

$$\hat{\omega}_h = \frac{\sqrt{\left(\frac{d\hat{\lambda}_{M\alpha}}{dt}\right)^2 + \left(\frac{d\hat{\lambda}_{M\beta}}{dt}\right)^2}}{\lambda_M} \quad (15)$$

그림 3은 본 연구에서 제안한 쇄교자속 간접 검출의 의한 센서리스 추정 블록도이다.

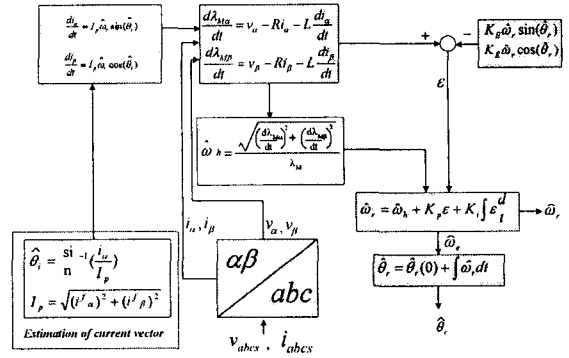


그림 3 쇄교자속 간접 검출에 의한 센서리스 추정 블록도
Fig. 3 Block diagram of proposed sensorless algorithm

4. 실험 결과

본 논문에서 제안한 영구자석 동기전동기의 센서리스 알고리즘의 타당성을 확인하기 위하여 기동특성 및 정역 운전 실험을 수행하였다.

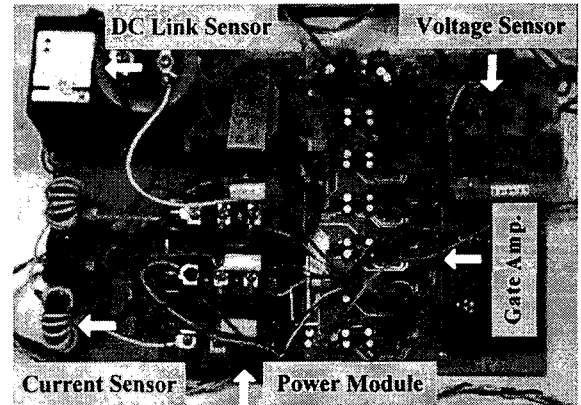


그림 4 영구자석 동기전동기 구동 인버터
Fig. 4 Photograph of Inverter for PMSM driving

그림 4는 본 연구에서 사용된 SVPWM 구동 인버터이고, 표 1은 실험에 사용된 영구자석 동기전동기의 제원을 나타내고 있다.

일반적으로 영구자석 동기전동기 센서리스의 문제점인 초기 기동은 회전자의 초기 위치를 별도의 절차를 통하여 확인한 후 기동시키는 것과 레환 신호를 사용하지 않고 개루프 제어를 이용한 기동 방식으로 구분되어 있지만, 본 연구에서는 별도의 기동 절차없이 센서리스 알고리즘을 이용한 기동방법을 보이고 있다.

그림 5는 위치 오차가 170° 인 경우로서 회전자 위치 오차가 90° 를 넘는 경우에는 자속의 방향이 역방향이 된다.

표 1 영구자석 동기전동기 제원

Table 1 The specification of tested PMSM

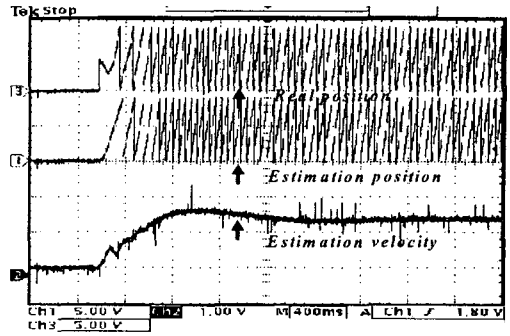
Rated Power	1.2 [kW]
Rated current	6.2 [A]
Max. value of the flux linkage	0.051 [Wb.t]
Rated Torque	3.8 [N.m]
Winding resistance	0.8 [Ω]
Winding inductance	0.92 [mH]
Number of poles	4
Rated Speed	3,000 [rpm]
Max. Speed	3,600 [rpm]

그러므로 제어기는 역방향으로 회전시키는 명령을 출력하게 되므로 실제 전동기는 기동시에 역방향으로 회전하게 되지만 전동기가 회전하게 되면서 회전자 위치 오차가 감소하게 되므로 원래의 방향을 찾을 수 있으며, 실험결과 0.5[sec] 이내에 회전각도는 수렴하고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 제안한 센서리스 알고리즘은 정방향 토크 발생영역을 초과하는 위치 오차 90° ~ 270°의 경우에 대해서도 강인한 기동 특성을 가지고 있음을 실험을 통해 검증하였다. 이것은 초기 회전자 위치에 관계없이 기동이 가능함을 검증하였다.

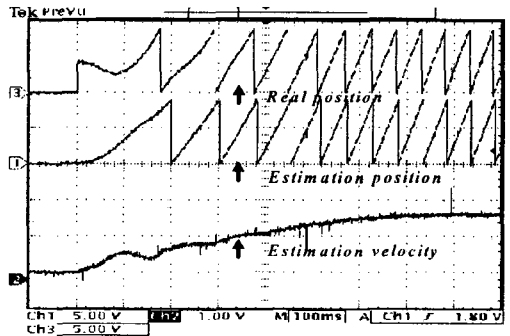
그림 6은 정역 운전 특성을 보이고 있다. 정역 운전은 속도 0인 점을 지나는 센서리스 입장에서는 제어가 되지 않는 영역이 존재하게 된다. 본 연구에서 제안한 센서리스 알고리즘의 정역 운전 결과 그 성능이 양호함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 영구자석 동기전동기의 가변속 구동이 가능한 강인한 센서리스 알고리즘을 제안하였다. PMSM 구동 시스템에서 제어에 필수적인 회전자의 위치각 및 속도를 검출하기 위하여 일반적으로 사용되는 엔코더는 전동기에 비하여 저가가 아닌 관계로 전동기 제어 시스템의 저가화에 문제가 되며, 엔코더를 사용하기 위한 회로의 추가 및 기계적인 부착으로 발생하는 전동기 가공성 저하, 전동기의 방열문제 등 많은 문제점을 내재하고 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 엔코더를 사용하지 않고 전동기 제어가 가능한 센서리스 알고리즘에 대하여 연구하였다. 본 연구에서는 쇠교자속을 간접 검출하고 이를 이용하여 회전자의 속도 및 위치를 추정하였다. 제안된 센서리스 알고리즘은 초기 기동이 가능하며, 정역 운전 등 우수한 성능을 보이고 있다.



(a) 센서리스 추정 위치 및 속도 응답 특성 (400ms/div)
(a) Estimated position & speed response (400ms/div)



(b) 센서리스 추정 위치 및 속도 응답 특성 (100ms/div)
(b) Estimated position & speed response (100ms/div)

그림 5 기동 특성 (초기 위치 오차 170°)
Fig. 5 Startup characteristics in case of 170° position error

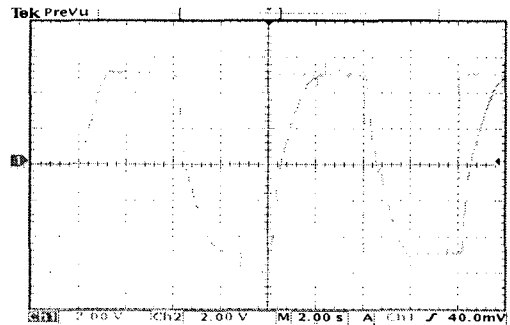


그림 6 정역운전 특성
Fig. 6 Characteristics of CW/CCW speed command

참 고 문 헌

[1] P. Vas, *Sensorless Vector and Direct Torque Control*, Oxford Univ. Press, 1998.
[2] N. Matsui, "Sensorless PM Brushless DC Motor Drives," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 43, No. 2, pp. 300-308, 1996.