

센서리스 영구자석 동기전동기의 구동에 관한 연구

이상훈·홍인표·박성준*·김철우
부산대학교 동명대학*

A sensorless control of PMSM using superposition theorem

Sang-Hun Lee, In-Pyo Hong, Sung-Jun Park,* Cheul-U Kim
Pusan National Univ. * Dongmyong College

Abstract - 제안된 센서리스 구동 알고리즘에서는 역기전력이 구동전원인 한 상의 등가회로부터 전류성분을 구하고 이때 전류성분이 갖게 되는 위상지연은 회로 시정수를 고려하여 보상해줌으로써 간접적으로 위상지연이 없는 회전자 위치정보를 구하는 방법을 적용하였다. 그리고 실험을 통해서 그 타당성을 제시하였다.

1. 서 론

교류 서보 전동기에는 크게 유도 전동기와 영구자석을 이용한 영구자석 동기 전동기로 나눌 수 있다. 이중 유도 전동기는 영구자석 동기 전동기에 비해 제작의 용이성은 있으나 효율 및 속도성은 떨어지는 단점을 가지고 있다. 이에 비해 영구자석 동기 전동기는 토오르크를 발생시키기 위한 계자자속이 영구자석을 이용하여 발생됨으로 전력소모를 최소화하여 전체 시스템 효율의 향상을 기대할 수 있다. 이러한 영구자석 동기 전동기의 정확하고 정밀한 속도 및 토오르크 제어를 위해서는 회전자 속도 뿐만 아니라 회전자의 위치정보가 반드시 필요하다. 이는 인버터의 스위칭을 통해서 회전자의 위치에 따른 적절한 위상의 전류를 인가해 주어야만 요구되는 토오르크를 생성할 수 있기 때문이다. 이를 위해서 엔코더나 레졸버와 같은 위치검출장치를 부착하여야 한다. 그러나 고가의 센서사용은 경제적으로 불리할 뿐만 아니라 열악한 조건에서 사용되는 경우 신뢰성을 보장하기 어렵다. 그리고 이러한 문제점들을 고려하여 최근에는 회전자의 위치센서가 없는 센서리스 구동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

따라서 본 연구에서는 센서리스 구동 알고리즘을 통해 위치센서를 이용한 시스템이 갖는 단점을 극복함으로써 향상된 제어성능을 제안하고자 한다. 제안된 센서리스 구동 알고리즘에서는 역기전력이 구동전원인 한 상의 등가회로부터 전류성분을 구하고 이때 전류성분이 갖게 되는 위상지연은 회로 시정수를 고려하여 보상해줌으로써 간접적으로 위상지연이 없는 회전자 위치정보를 구하는 방법을 적용하였다. 그리고 실험을 통해서 그 타당성을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 영구자석 동기 전동기의 전압방정식

영구자석 동기전동기의 수학적 모델은 계자를 형성하는 영구자석을 직류전원에 의해 여자되는 계자권선으로 등가화한 모델을 토대로 공간 벡터적인 해석이 가능하다. 본 연구에서 사용한 영구자석 동기전동기는 회전자의 기계적 구조가 원통형이며 쇠교자속의 분포가 정현적인 전동기이므로 이에 대한 수학적 모델링을 통해서 영구자석 동기전동기를 해석하였다.

그림 1은 영구자석 동기전동기의 3상 등가모델을 표현하고 있다.

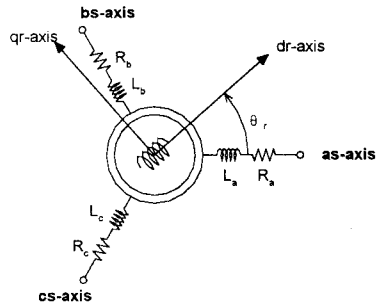


그림 1 3상 영구자석 동기전동기 등가모델
Fig. 1. The equivalent model of 3-phase PMSM

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

원통형 영구자석 동기전동기에서 돌극성은 무시되므로 각 상의 자기 인덕턴스는 모두 동일하며 3상의 전류의 합이 0인 완전 대칭 구조로 가정하면 각 상의 쇠교자속은 고정자 상권선의 자기 인덕턴스와 상권선간의 상호 인덕턴스 그리고 영구자석에 의한 쇠교자속의 향으로 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & M & M \\ M & L_{bb} & M \\ M & M & L_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix} \quad (2)$$

영구자석에 의한 각 상권선의 역기전력항은 식(3)과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} e_{as} &= -\omega_r K_e \sin(\theta_r) \\ e_{bs} &= -\omega_r K_e \sin(\theta_r - 120^\circ) \\ e_{cs} &= -\omega_r K_e \sin(\theta_r + 120^\circ) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $K_e = M I_f$: 역기전력 상수

영구자석 동기전동기의 전압방정식은 상전류가 3상평형을 이루고 있다고 가정하면 식(4)와 같이 간략한 형태로 유도된다.

$$\begin{aligned} v_{as} &= R_a i_{as} + \frac{3}{2} L_a \frac{di_{as}}{dt} - \omega_r K_e \sin \theta_r \\ v_{bs} &= R_b i_{bs} + \frac{3}{2} L_b \frac{di_{bs}}{dt} - \omega_r K_e \sin(\theta_r - \frac{3}{2} \pi) \\ v_{cs} &= R_c i_{cs} + \frac{3}{2} L_c \frac{di_{cs}}{dt} - \omega_r K_e \sin(\theta_r + \frac{3}{2} \pi) \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 3상-2상 좌표변환

상술한 그림 1의 고정자 좌표축 as, bs, cs 축과 $\alpha, -\beta$ 축 사이의 관계를 설명하기 위한 등가 모델을 그림 2에 나타낸다.

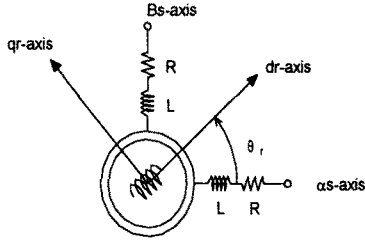


그림 2 영구자석 동기전동기의 2상 등가 모델
Fig. 2. Two Phase Equivalent model of PMSM

좌표변환 행렬식을 이용하여 3상 영구자석 동기전동기의 순시전압 방정식을 2상 고정자 기준좌표계의 전압 방정식으로 표현하면 식 (5)과 같다

$$v_{\alpha s} = R i_{\alpha s} + L \frac{di_{\alpha s}}{dt} - K_e \omega_r \sin \theta_r = R i_{\alpha s} + L \frac{di_{\alpha s}}{dt} - e_{\alpha} \quad (5)$$

$$v_{\beta s} = R i_{\beta s} + L \frac{di_{\beta s}}{dt} + K_e \omega_r \cos \theta_r = R i_{\beta s} + L \frac{di_{\beta s}}{dt} + e_{\beta}$$

여기서

$$K_e = \sqrt{\frac{3}{2}} M I_f : \text{역기전력상수}$$

상술한 2상 전압방정식을 토대로 하여 그림 3과 같이 등가회로를 나타낼 수 있다.

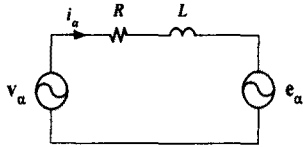


그림 3 α_s 축으로 표현한 등가회로
Fig. 3. Equivalent circuit of PMSM by α_s axis

β_s 축에 의한 등가회로도 마찬가지로 나타낼 수 있다.

이때 표현되는 토오크 방정식은 식(6)과 같이 정리된다.

$$T_e = PK_e (-i_{\alpha s} \sin \theta_r + i_{\beta s} \cos \theta_r) \quad (6)$$

그림 3의 등가회로로부터 알 수 있듯이 전동기의 전류를 형성하는 소스는 두 개의 전압원인 단자전압과 역기전력 전압으로 구성된다. 따라서 두 개의 전압 소스를 분리하여 그림 4와 같은 등가회로로 표현 할 수 있다.

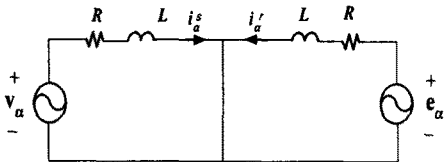


그림 4 중첩의 원리를 사용한 PMSM의 등가회로
Fig. 4. Equivalent circuit of PMSM using superposition principle

그림 4에 의하면 전동기에 흐르는 전류의 근원은 인버터에서 출력되는 상전압과 전동기가 회전함으로써 발생

하는 유기 기전력항으로 표현된다. 전동기의 흐르는 전류는 전동기의 우수한 속도제어 및 과전류 검출을 위해서 필연적으로 검출되어야 하는 요소가 된다. 만일 전동기의 파라미터인 R, L 만 알고 있다면 인버터에서 인가되는 상 전압에 의한 전류성분은 쉽게 구할 수 있다.

2.3. 제안한 센서리스 알고리즘

상술한 2상 $\alpha_s - \beta_s$ 좌표축상으로 표현된 영구자석 동기전동기의 등가회로로부터 그림 5와 같이 역기전력을 전원으로 한 회로 A와 본 연구에서 역기전력 추정을 위해 도입한 회로 B로 구분하여 등가회로를 표현한다.

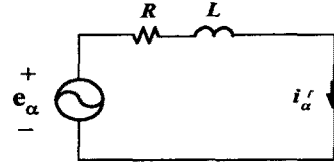


그림 5 위상지연성분을 고려한 역기전력 추정회로

Fig. 5. EMF estimation circuit considering a lag-phase component

회로 A에서 전동기 파라미터 파라미터인 R 과 L 은 측정에 의한 기지량으로 가정하면 2상 좌표변환된 역기전력과 단락전류 i_{α}^r 는 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{\alpha} = (R_{\alpha} + sL_{\alpha}) i_{\alpha}^r \quad (7)$$

식(7)로부터 전달함수는 아래와 같이 표현된다.

$$H_{\alpha}(s) = \frac{I_{\alpha}^r}{E_{\alpha}} = \frac{1}{R_{\alpha} + sL_{\alpha}} = H_{\alpha} \angle \theta_1 \quad (8)$$

이때 전달함수의 크기와 위상지연은 다음과 같다.

$$\|H_{\alpha}\| = \frac{1}{\sqrt{R_{\alpha}^2 + (\omega L_{\alpha})^2}} \quad (9)$$

$$\text{단, } \theta_1 = -\tan^{-1}\left(\frac{\omega L_{\alpha}}{R_{\alpha}}\right)$$

따라서 전류는 위상각 θ_1 만큼의 위상지연을 갖게 된다.

그림 5의 등가회로로부터 2상 변환한 α 축 전류는 식(10)과 같이 표현된다.

$$i_{\alpha}^r = \sqrt{\frac{3}{2}} \sqrt{\left(1 + \frac{R}{\omega_e L^2}\right)^2} \left(\frac{\Phi_{\max}}{L}\right) \cos(\theta + \theta_2) \quad (10)$$

식(10)로부터 코사인 항으로 다시 표현하면 아래와 같다.

$$\cos(\theta + \theta_2) = \frac{i_{\alpha}^r}{\sqrt{\frac{3}{2}} \sqrt{\left(1 + \frac{R}{\omega_e L^2}\right)^2} \left(\frac{\Phi_{\max}}{L}\right)} \quad (11)$$

$$\text{단 } \theta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{R}{\omega_e L}\right)$$

마찬가지 방법으로 2상 변환한 β 축 전류는 식(12)과 같이 표현된다.

$$i_{\beta}^r = \sqrt{\frac{3}{2}} \left(\frac{\Phi_{\max}}{L}\right) \sqrt{\left(1 + \frac{R}{\omega_e L^2}\right)^2} \sin(\theta + \theta_2) \quad (12)$$

식 (13)으로부터 사인 항으로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\sin(\theta + \theta_z) = \frac{i_{\beta}^r}{\sqrt{\frac{3}{2} \sqrt{\left(1 + \frac{R}{\omega_s L^2}\right)^2 \left(\frac{\Phi_{max}}{L}\right)}}} \quad (13)$$

그러므로 $\tan(\theta + \theta_z) = \frac{i_{\beta}^r}{i_{\alpha}^r}$ 으로부터 회전자의 위치는 식 (14)로 나타낼 수 있다.

$$\theta_e = \tan^{-1}\left(\frac{i_{\beta}^r}{i_{\alpha}^r}\right) + \theta_z \quad (14)$$

단 $\theta_z = \tan^{-1}\left(\frac{R}{\omega_s L}\right)$

본 연구에서 회전자 위치각 추정은 역기전력상수와 무관하게 추정할 수 있지만, 전동기의 속도를 추정하기 위해서는 역기전력 상수를 알고 있어야 한다. $\alpha - \beta$ 축상의 역기전력이 주어진다면 회전자의 전기적 각속도는 아래와 같이 주어진다.

$$\omega_e = \frac{1}{K_E \|H_{\alpha\beta}\|} \sqrt{(i_{\alpha}^r)^2 + (i_{\beta}^r)^2} \quad (15)$$

단 K_E : 역기전력 상수

2.4 실험 및 고찰

추정값의 정확성을 고찰하기 위해 그림 7을 통해 전동기를 구속한 상태 즉 역기전력이 영인 상태에서 단자전압을 변화하면서 실제 CT를 통해 측정된 값과 상태방정식을 통해 추정된 전류값과의 차이를 비교해 보았다. 그림 7-1에서는 인버터의 출력전압을 가변시켰을 경우 실제 전류와 추정전류를 비교한 것이다. 정확성을 보이기 위해 그림 7-2에서는 그림 7-1의 파형을 확대하여 살펴본 것으로써 실제 전류와 추정전류를 구분하기 위해 오실로스코프상에서 크기를 다르게 하여 비교한 것이다. 위상이 일치할 뿐만 아니라 크기도 동일한 값을 가짐을 알 수 있다. 이 역시 추정오차가 없음을 나타내는 것이 된다.

표 1. 측정된 모터 파라미터

Table 1 The measured motor parameters

Winding resistance	1.981[Ω]
Winding inductance	10.8[mH]
EMF constant	0.224[rpm/V]
Number of poles	24 poles
Rated current	6.0[A]
Rated Speed	600[rpm]

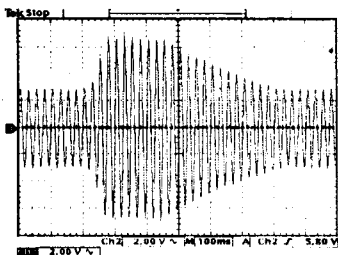


그림 7-1. 인버터 출력전압 가변시

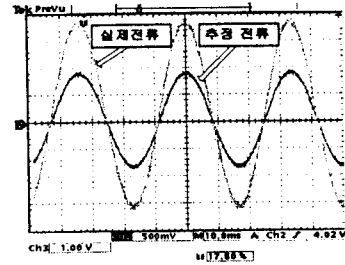


그림 7-2. 확대파형(그림 7-1)

그림 8은 엔코더를 부착한 경우와 센서리스 알고리즘을 이용하여 추정한 위치각의 차이를 보인 것이다. 제안된 알고리즘에 의해 센서리스를 행하였을 경우 회전자의 위치추정이 양호하게 이루어짐을 확인할 수 있다.

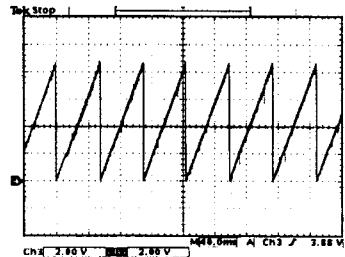


그림 8. 역기전력 및 회전자의 위치

Fig 8. The comparison of real position

3. 결론

본 연구에서는 2상 좌표축변환에 의해 구성된 등가회로를 이용하여 역기전력이 구동전원인 한 상의 등가회로부터 전류성분을 구하고 이때 전류성분이 갖게 되는 위상지연은 회로 시정수를 고려하여 보상해줌으로써 간접적으로 위상지연이 없는 회전자 위치정보를 구하는 방법을 적용하였다. 제어알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 실험한 결과 위상지연없는 전류추정이 가능하며 이를 바탕으로 센서리스 추정성능이 우수함을 확인할 수 있었다. 향후 PC의 네트워크 기능을 이용하여 원격 제어 및 모니터링 기능을 부가한다면 보다 효율적인 시스템을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

(참고 문헌)

- [1] P. Vas, Sensorless Vector and Direct Torque Control. Oxford Univ. Press, 1998
- [2] Peter Vas, Vector Control of AC Machines, CLARENDON Press, 1990
- [3] D.C. Hanselman, "Minimum Torque Ripple, Maximum Efficiency Excitation of BLDC motors", IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol.41, No. 3, pp 292-300, June 1994
- [4] M.Natsui and M. Shigo, "Brushless dc Motor Control without Position and Speed Sensors", IEEE, IA-28, No.1, pp 120-127, 1992
- [5] S. Ogasawara, H. Akagi, O. Shinkawa, "Wide Speed Operation of a Sensorless Brushless dc Motor Having an Interior Permanent Rotor", PCC-Yokohama, pp.363-370, 1993