

약계자 제어 영역에서의 순시무효전력을 이용한
영구자석 동기전동기의 센서리스 속도제어

이정훈*,김영석*,최양광*,김대현*
*인하대학교 전기공학과

Sensorless speed Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor
based on an Instantaneous Reactive Power in the Field-Weakening Region

*Jeong-Hum Lee,*Young-Seok Kim,*Yang-Kwang Choi,*Dai-Hyun Kim
*Dept. of Electrical Engineering of Inha University

Abstract- For the permanent magnet synchronous motor(PMSM) drive to operate above the base speed in the constant horsepower region, field weakening control is applied. But field weakening control was not almost applied to sensorless control of the permanent magnet synchronous motor.

In this paper, field weakening control is applied to the sensorless control of PMSM based on an instantaneous reactive power. And the effectiveness of the proposed system is verified by the experimental results.

1. 서 론

원동형 영구자석 동기전동기는 단위 무게당 토크 비 효율 및 효율이 다른 전동기에 비해 높다는 장점을 가지고 있어 산업응용분야에 폭 넓게 사용되고 있다. 원동형 영구자석 동기전동기는 회전자에 부착되어진 영구자석으로부터 자속을 공급받기 때문에 벡터제어를 위해서는 항상 회전자의 정확한 위치 정보를 알아야한다. 그러나 위치 검출기는 일반적으로 가격이 고가일 뿐만 아니라 진동 및 습도 등의 주위환경에 대한 영향을 많이 받기 때문에 사용환경에 제한을 받는다. 따라서 원동형 영구자석 동기전동기의 제어상 큰 문제점인 회전자의 위치 센서를 사용하지 않고 간접적으로 알고자하는 센서리스 제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2]. 그리고 원동형 영구자석 동기전동기는 정격속도 이상이나 DC링크 전압이 작은 특수한 상황에서 약계자 제어가 요구된다. 그러나 이러한 약계자 제어가 센서리스 알고리즘에 적용된 사례는 거의 없다.

본 논문에서는 순시무효전력을 이용한 센서리스 알고리즘[3]에 약계자 제어 알고리즘을 적용하였고 그 타당성을 실험을 통해 증명하였다.

2. 본 론

2.1 순시무효전력을 이용한 센서리스제어 알고리즘

2.1.1 전류 관측기의 구성

고정자 좌표계에서 영구자석 동기전동기의 전압방정식은 식(1)과 같이 나타내어지며,

$$\begin{aligned} \hat{i}_{sd} &= -\frac{R_s}{L_s} i_{sd} + \frac{K_E}{L_s} \omega_r \sin \theta_r + \frac{1}{L_s} v_{sd} \\ &= -\frac{R_s}{L_s} i_{sd} - \frac{1}{L_s} E_{sd} + \frac{1}{L_s} v_{sd} \\ \hat{i}_{sq} &= -\frac{R_s}{L_s} i_{sq} - \frac{K_E}{L_s} \omega_r \cos \theta_r + \frac{1}{L_s} v_{sq} \\ &= -\frac{R_s}{L_s} i_{sq} - \frac{1}{L_s} E_{sq} + \frac{1}{L_s} v_{sq} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, v_{sd} : 고정자 좌표계의 D축 입력전압,
 v_{sq} : 고정자 좌표계의 Q축 입력전압,
 i_{sd} : D축 전류, i_{sq} : Q축 전류,
 ω_r : 회전자의 속도, θ_r : 회전자의 위치,
 R_s : 고정자 저항, L_s : 고정자 인덕턴스,
 $E_{sd} = -K_E \omega_r \sin \theta_r$: D축 역기전력,
 $E_{sq} = K_E \omega_r \cos \theta_r$: Q축 역기전력,
 K_E : 역기전력 상수

관측기를 식(2)와 같이 구성할 경우, 오차방정식은 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} \hat{i}_{sd} &= -\frac{R_s}{L_s} \hat{i}_{sd} + \frac{K_E}{L_s} \hat{\omega}_r \sin \hat{\theta}_r + \frac{1}{L_s} v_{sd} + k_1 e_{sd} \\ &= -\frac{R_s}{L_s} \hat{i}_{sd} - \frac{1}{L_s} \hat{E}_{sd} + \frac{1}{L_s} v_{sd} + k_1 e_{sd} \\ \hat{i}_{sq} &= -\frac{R_s}{L_s} \hat{i}_{sq} - \frac{K_E}{L_s} \hat{\omega}_r \cos \hat{\theta}_r + \frac{1}{L_s} v_{sq} + k_2 e_{sq} \\ &= -\frac{R_s}{L_s} \hat{i}_{sq} - \frac{1}{L_s} \hat{E}_{sq} + \frac{1}{L_s} v_{sq} + k_2 e_{sq} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, \hat{i}_{sd} : D축 추정전류,
 \hat{i}_{sq} : Q축 추정전류,
 k_1, k_2 : 상수,
 $\hat{E}_{sd} = -K_E \hat{\omega}_r \sin \hat{\theta}_r$: D축 추정 역기전력,
 $\hat{E}_{sq} = K_E \hat{\omega}_r \cos \hat{\theta}_r$: Q축 추정 역기전력

$$\begin{aligned} e_{sd} &= \hat{i}_{sd} - i_{sd} \\ e_{sq} &= \hat{i}_{sq} - i_{sq} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_{sd} &= -\frac{R_s}{L_s} e_{sd} + \frac{K_E}{L_s} (\hat{\omega}_r \sin \hat{\theta}_r - \omega_r \sin \theta_r) + k_1 \dot{e}_{sd} \\ \dot{e}_{sq} &= -\frac{R_s}{L_s} e_{sq} - \frac{K_E}{L_s} (\hat{\omega}_r \cos \hat{\theta}_r - \omega_r \cos \theta_r) + k_2 \dot{e}_{sq} \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)으로부터 역기전력의 오차가 0으로 수렴할 경우, 식(2)에서 관측기의 k_1, k_2 가 극배치(pole placement)기법을 통해 안정하도록 설정된다면, 전류오차는 0으로 수렴되어지며, 역기전력 오차를 최소화시키기 위한 알고리즘은 다음절에 나타냈다.

2.1.2 순시무효전력을 이용한 추정속도오차 보상

회전자 좌표계에서 영구자석 동기전동기의 전압방정식은 식(5)와 같으며, 회전자 속도는 식(6)와 같이 산출 가능하다.

$$\begin{aligned} v_{sd} &= (R_s + pL_s) i_{sd} - \omega_r L_s i_{sq} \\ v_{sq} &= (R_s + pL_s) i_{sq} + \omega_r L_s i_{sd} + K_E \omega_r \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, v_{sd} : 회전자 좌표계의 d축 입력전압

v_{sq} : 회전자 좌표계의 q축 입력전압

i_{sd} : 회전자 좌표계의 d축 전류

i_{sq} : 회전자 좌표계의 q축 전류

p : 미분연산자

$$\omega_r = \frac{v_{sq} - (R_s + pL_s)i_{sq}}{K_E + L_s i_{sd}} \quad (6)$$

식(6)으로부터 회전자의 속도를 산출할 경우, 전동기의 파라미터 제측시 발생하는 오차와 선전류 및 입력전압 검출시 발생하는 오차로 인해 실제속도와 추정속도 사이에 오차가 발생하므로, 이를 보상하기 위해 보상값 C를 고려하여, 추정속도를 식(7)과 같이 구성하며, 보상값 C를 결정하기 위해 회전자 좌표계의 순시무효전력을 이용한다.

$$\widehat{\omega}_r = \frac{v_{sq} - (R_s + pL_s)i_{sq}}{K_E + L_s i_{sd}} + C \quad (7)$$

순시 무효전력 q_m 을 선전류 i_s 와 역기전력 E_s 의 벡터의 적이라고 정의하면, 순시무효전력은 식(8)과 같으며,

$$q_m = i_s \otimes E_s \quad (8)$$

여기서, $i_s = (i_{sd}, i_{sq})$

$$E_s = (E_{sd}, E_{sq})$$

$$E_{sd} = 0, \quad E_{sq} = K_E \widehat{\omega}_r$$

식(2)의 추정전류를 이용한 추정 순시 무효전력은 다음과 같다.

$$\widehat{q}_m = \widehat{i}_s \otimes E_s \quad (9)$$

여기서, $\widehat{i}_s = (\widehat{i}_{sd}, \widehat{i}_{sq})$

회전자 좌표계에서 실제전류 i_s 에 대해 추정전류 \widehat{i}_s 가 그림1과 같이 실제 순시 무효전력에 대해 $\Delta\theta_r$ 만큼 벗어나 있다면, 식(8), (9)는 식(10), (11)같이 나타낼 수 있다.

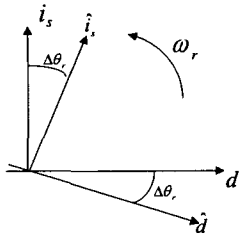


그림1. 실제 및 추정전류에 대한 위치추정오차

$$q_m = i_{sd} K_E \widehat{\omega}_r \quad (10)$$

$$\widehat{q}_m = \widehat{i}_{sd} K_E \widehat{\omega}_r = (i_{sd} \cos \Delta\theta_r + i_{sq} \sin \Delta\theta_r) K_E \widehat{\omega}_r \quad (11)$$

식(11)에서 (12)의 조건이 만족된다면, 식(11)을 식(13)와 같이 근사시킬 수 있으며,

$$\omega_r \neq 0, \Delta\theta_r \cong 0 \quad (12)$$

$$\widehat{q}_m = (i_{sd} + i_{sq} \Delta\theta_r) K_E \widehat{\omega}_r \quad (13)$$

식(10), (13)으로부터, 순시무효전력의 오차는 식(14)과 같이 위치오차에 대한 정보를 포함한 식으로 나타난다. 추정전류가 실제전류보다 앞선 경우를 $\Delta\theta_r > 0$ 라 하면, 속도오차에 대한 보상값을 결정하기 위해 식(15), (16)의 조건이 만족되도록 K_{cp} 를 결정하고, 안정적으로 보상이 이루어지도록 적분이득을 부가하여 다음과 같이 보상값 C를 결정한다.

$$\Delta q_m = \widehat{q}_m - q_m = i_{sq} \Delta\theta_r K_E \widehat{\omega}_r \quad (14)$$

$$\Delta\theta_r > 0 \text{ 이면, } K_{cp} \cdot i_{sq} \Delta\theta_r K_E \omega_r < 0 \quad (15)$$

$$\Delta\theta_r < 0 \text{ 이면, } K_{cp} \cdot i_{sq} \Delta\theta_r K_E \omega_r > 0 \quad (16)$$

$$C = (K_{cp} + \frac{K_{ci}}{p}) \cdot \Delta q_m \quad (17)$$

여기서, K_{cp} , K_{ci} : 상수

식(12)의 조건이 만족되는 경우, 식(4)의 오차방정식은 식(18)같이 나타내어지고,

$$\dot{\tilde{e}}_{sd} = -\frac{R_s}{L_s} \tilde{e}_{sd} + \frac{K_E}{L_s} (\widehat{\omega}_r - \omega) \sin \widehat{\theta}_r + k_1 \tilde{e}_{sd}$$

$$\dot{\tilde{e}}_{sq} = -\frac{R_s}{L_s} \tilde{e}_{sq} - \frac{K_E}{L_s} (\widehat{\omega}_r - \omega) \cos \widehat{\theta}_r + k_2 \tilde{e}_{sq} \quad (18)$$

식(17)에서 추정속도를 잘 보상하여, 속도추정오차가 0으로 수렴하면, 식(18)은 (19)로 나타내지며, 안정성을 확보하기 위해 식(20)을 만족하도록, k_1, k_2 를 설정하면, 식(19)의 오차는 0으로 수렴한다.

$$\dot{\tilde{e}}_{sd} = -(\frac{R_s}{L_s} - k_1) \tilde{e}_{sd}$$

$$\dot{\tilde{e}}_{sq} = -(\frac{R_s}{L_s} - k_2) \tilde{e}_{sq} \quad (19)$$

$$k_1 < \frac{L_s}{R_s}, \quad k_2 < \frac{L_s}{R_s} \quad (20)$$

2.2 약계자 제어 알고리즘

저속에서 식(5)의 속도기전력 항은 작으며, PMSM의 정격전압에 해당하는 DC-link전압은 토크전류를 제어하기에 충분하나 회전자의 속도가 증가할 경우 토크전류를 제어하기 위한 전압의 여유분은 감소되어진다. 따라서, 약계자제어 알고리즘을 사용하지 않고 정격 입력전압에 해당하는 회전자 정격속도 이상으로 PMSM을 동작시키는 것은 불가능하다[4].

인버터가 PMSM에 공급할 수 있는 최대전압 V_{smax} 는 DC-link 전압에 의해 제한되어지며, 이는 PMSM의 정격전압에 의해 결정되어지고, I_{smax} 는 정격전류에 의해 결정되는 값이다. 이러한 경우 PMSM의 전압 및 전류는 다음의 제한 조건을 만족해야한다.

$$v_{sd}^2 + v_{sq}^2 \leq V_{smax}^2 \quad (21)$$

$$i_{sd}^2 + i_{sq}^2 \leq I_{smax}^2 \quad (22)$$

PMSM이 고속에서 운전될 때, 식(5)에서 저항에 의한 전압강하는 속도를 포함한 항에 비해 매우 작으므로 무시될 수 있고, 정상상태에서 동작한다면, 다음의 식(23)과 같이 나타내진다.

$$v_{sd} = -\omega_r L_s i_{sq}$$

$$v_{sq} = \omega_r L_s i_{sd} + K_E \omega_r \quad (23)$$

식(21)과 (23)으로부터, i_{sd} 와 i_{sq} 는 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$(i_{sd} + \frac{K_E}{L_s})^2 + i_{sq}^2 \leq (\frac{V_{smax}}{\omega_r L_s})^2 \quad (24)$$

식(24)의 부등식은 그림2에 보여진 것처럼 반경이 $v_{smax}/\omega_r L_s$ 이고 중심이 $(-K_E/L_s, 0)$ 인 원의 내부를 나타내며, 식(24)로부터 속도가 증가할수록 부등식의 제한치가 감소되어지는 것을 알 수 있다. 식(21)과 (22)의 두 조건을 만족하는 고정자 전류는 전류제한에 의한 원과 전압제한에 의한 원의 내부에 존재해야만 한다.

정토크 운전영역의 최대속도가 ω_1 이면, 고정자 전류는 I_{smax} 에 의해 제한되어지며, ω_1 이상의 속도 즉 약계자 영역에서 최대토크는 A에서 B로 이동한다. PMSM이 ω_1 보다 높은 속도에서 운전되기 위해서는 정격전압이상의 입력이 요구되어진다. 그러나 정격전압에서 d축전류

i_{sd}^* 가 회전자 자속을 감소시키는 방향으로 주입된다면, PMSM은 ω_1 보다 더 높은 속도에서 운전되어질 수 있다[5].

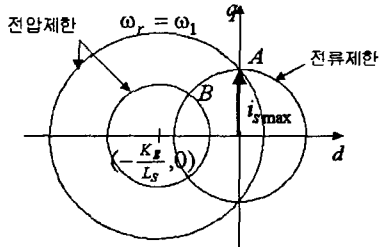


그림2.약계자 제어시 전류 및 전압제한조건에 의한 전류제한 궤적
그림3은 약계자 제어 알고리즘의 블록도이다. 약계자 제어영역에서 입력전압 지령이 V_{smax} 를 초과한다면 제어기는 V_{smax} 와 입력전압 지령의 에러를 감지하고, 회전자 자속을 감소시키는 방향으로 i_{sd}^* 를 주입한다. 전체 지령전류 $i_s^* (= \sqrt{i_{sd}^{*2} + i_{sq}^{*2}})$ 가 전류제한치 I_{smax} 를 넘지 않도록 i_{sqmax} 가 연산되어지며, 이는 속도 제어기에서 토크 지령전류의 제한치로서 사용된다.

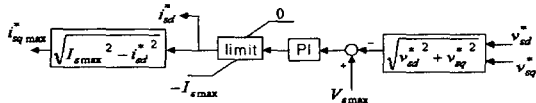


그림3. 약계자 제어 알고리즘

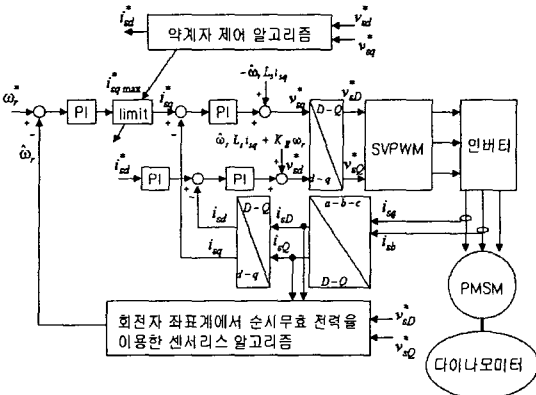


그림 4. 약계자 제어 알고리즘을 적용한 순시무효전력을 이용한 센서리스 제어 알고리즘

그림4는 순시무효전력을 이용한 센서리스 알고리즘에 약계자 제어 알고리즘을 적용한 전체 알고리즘의 블록 다이어그램이다.

2.3 실험결과

표1은 실험에 사용된 원통형 영구자석동기전동기의 규격이다.

표1. 영구자석 동기전동기의 규격

정격용량	1.8[kw]	고정자 저항	0.22[Ω]
정격토크	5.84[N · m]	고정자 인덕턴스	0.88[mH]
정격속도	3000[rpm]	역기전력상수	0.0522[V/r/min]
극수	8극	관성 계수	18.6×10 ⁻⁴ [Kg · m ²]

그림5는 정격속도가 3000rpm이고 최대속도가 3500rpm인 전동기의 3450rpm(정격속도의 115%)에서 -3450rpm으로 정역운전시 추경속도와 d축 전류를 나타냈다. 정격속도 이상에서는 d축 전류가 음의 값으로 주입되며, 이는 회전자 자속을 감소시켜 속도 기전력을 감

소시킨다. 또한 역방향으로 속도가 변화하는 부분에서 d 축 전류가 줄었다가 다시 약계자 영역에서 주입되어짐을 알 수 있다. 이는 고속영역에서 약계자 제어가 정확히 이루어짐을 보여준다. 그림6은 동일한 조건에서 실제위치와 추정위치를 나타내며 위치추정이 매우 잘 되고 있음을 알 수 있다.

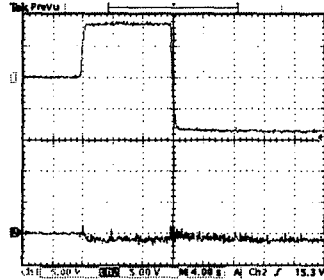


그림5. 3450rpm에서 -3450rpm으로 지령속도를 변화시킨 경우 추경속도(상) 및 d축전류(하)

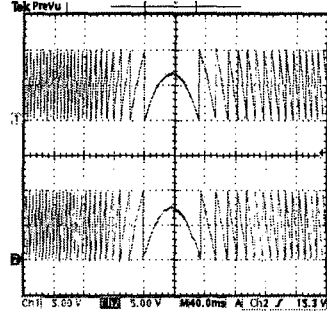


그림6. 3450rpm에서 -3450rpm으로 지령속도를 변화시킨 경우 실제위치(상) 및 추정위치(하)

3. 결 론

본 논문에서는 원통형 영구자석 동기전동기의 고속운전을 위한 약계자 제어를 순시무효전력을 이용한 센서리스 속도제어 알고리즘에 적용하였고 그 타당성을 실험을 통해 증명하였다.

그 결과 순시무효전력을 이용한 센서리스 제어가 정토크 영역에서 뿐만 아니라 약계자 제어 영역에서도 속도 및 위치 추정이 정확히 수행되고 있음을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.(KRF-2003-041-D00243)

[참 고 문 헌]

[1]R. Wu, G.R. Selmon, "A Permanent magnet motor drive without a shaft sensor", IEEE Trans. Ind. Appl., vol.27, no.5, pp 1005-1011, 1991.
[2]N. Matsui, M. Shigyo, "Brushless DC motor control without position and speed sensors", IEEE Trans. Ind. Appl., vol.28, no.1, pp120-127, 1992.
[3]최양광, 김영석, 한윤석, "순시무효전력을 이용한 영구자석 동기전동기의 새로운센서리스제어", 대한전기학회논문지, 53B, pp.247-254, 2004.
[4]T. H. Liu and C. -H. Liu, "A multiprocessor fully digital control architecture for permanent magnet synchronous motor drives", IEEE Trans. on Mag. Vol.5, pp.413-423, 1990.
[5]J. H Song, J.-M. Kim and S.-K. Sul, "A new robust SPMSM control to parameter variations in flux weakening region", in Proc. IECON'96, Vol.2, pp.1193-1198, 1996.