

영구자석 동기전동기의 새로운 센서리스 제어 알고리즘에 관한 연구

진병호\*, 최양광\*, 김영석\*, 한운석\*\*

\*인하대학교 차세대 고전압 전력기술 연구센터, \*\*삼성테크윈

A Study on the New Sensorless Control Algorithm for Permanent Magnet Synchronous Motor

\*Byoung-Ho Jun, \*Yang-Kwang Choi, \*Young-Seok Kim, \*\*Yoon-Seok Han

\*\*Research Center for Next-generation High voltage and Power Technology, Inha University

\*\*Samsung Techwin co., LTD.

**Abstract** - This paper presents a new speed sensorless control algorithm of a permanent magnet synchronous motor based on instantaneous reactive power. The proposed algorithm is constructed by instantaneous reactive power in the stationary reference frame and is not affected by mechanical motor parameters, because mechanical equation is not used. The effectiveness of the proposed algorithm is verified by the experimental results.

1. 서 론

영구자석 동기전동기는 단위무게당 토크 비율, 효율이 다른 전동기에 비해 월등히 높다는 장점을 가지고 있어 산업 응용분야에 폭 넓게 사용되고 있다. 그러나, 영구자석 동기 전동기는 회전자에 부착된 영구자석으로부터 자속을 공급받기 때문에 백터제어를 위해서는 항상 회전자의 정확한 위치정보를 알아야 하므로, 전동기 회전자의 정확한 위치정보를 얻기 위한 레졸버나 absolute encoder 또는 홀 소자 등의 센서를 이용한 전자식 위치 검출기가 사용되어진다. 이러한 위치검출기는 일반적으로 가격이 고가일 뿐만 아니라 별도의 복잡한 하드웨어가 제어기에 구성되어야하는 단점이 있으며, 진동 및 습도 등 주위환경에 대해 많은 영향을 받기 때문에 사용에 제한을 받는다. 이외에도 위치 검출기를 전동기 축에 부착함으로써 인한 전동기 크기의 증대 및 가공성의 저하의 문제가 발생하게 된다. 이러한 영구자석 전동기의 제어상 큰 문제점인 회전자의 위치검출을 위해 센서를 사용하지 않고 간접적으로 얻고자하는 센서리스 제어에 관한 연구가 많이 진행되고 있다.[1]~[6]

본 논문은 순시 무효전력을 이용한 영구자석 동기전동기의 새로운 센서리스 제어를 제안한다. 제안된 방법은 전동기의 기계방정식을 사용하지 않고 영구자석 동기전동기의 회전자의 속도 및 위치를 추정하므로, 전동기의 기계적 제 정수에 강인함을 갖는다. 제안한 방법의 타당성과 강인함을 실험을 통하여 증명하였다.

2. 본 론

2.1 관측기의 구성

고정자 좌표계에서 영구자석 동기 전동기의 전압 방정식을 고려한 상태방정식은 식(1)과 같다.

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

여기서,  $v_{sd}$  : 고정자 좌표계의 D축 입력전압  
 $v_{sq}$  : 고정자 좌표계의 Q축 입력전압

$i_{sd}$  : D축 전류  
 $i_{sq}$  : Q축 전류  
 $R_s$  : 고정자 저항  
 $L_s$  : 고정자 인덕턴스  
 $K_E$  : 역기전력 상수

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

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

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

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

식(4)로부터 역기전력의 오차가 0으로 수렴할 경우, 식(2)의 관측기는 극배치(pole placement)기법을 통해  $k_1, k_2$ 를 설정함으로써 안정성이 확보되어진다. 전류오차는 '0'으로 수렴되어진다.

2.2 순시 무효 전력을 이용한 추정속도오차의 보상

식(1)로부터 회전자의 속도를 식(5)와 같이 산출가능하다.

$$\omega_r = \{ -(v_{sd} \sin \theta_r - v_{sq} \cos \theta_r) + (R_s + pL_s)(i_{sd} \sin \theta_r - i_{sq} \cos \theta_r) \} / K_E \quad (5)$$

식(6)으로부터 회전자의 속도를 산출할 경우, 실제 회전자의 속도와 오차가 발생하므로, 이를 보상하기 위한 보상값 C를 고려하여, 추정속도를 식(6)과 같이 구성한다.

$$\hat{\omega}_r = \{ -(v_{sd} \sin \hat{\theta}_r - v_{sq} \cos \hat{\theta}_r) + (R_s + pL_s)(\hat{i}_{sd} \sin \hat{\theta}_r - \hat{i}_{sq} \cos \hat{\theta}_r) \} / K_E + C \quad (6)$$

보상값 C를 결정하기 위해 고정자 좌표계에서의 순시무효전력을 이용한다.

순시 무효전력  $q_m$ 을 선전류  $i_s$ 와 추정 역기전력  $\hat{E}_s$ 의 벡터외적이라고 정의하면, 순시무효전력은 식(7)과 같다.

$$q_m \equiv i_s \otimes \hat{E}_s \quad (7)$$

여기서,  $i_s = (i_{sd}, i_{sq})$ ,  $\hat{E}_s = (\hat{E}_{sd}, \hat{E}_{sq})$

또한, 식(2)의 추정전류를 이용한 추정 순시 무효전력은 다음과 같다.

$$\widehat{q}_m = \widehat{i}_s \otimes \widehat{E}_s \quad (8)$$

여기서,  $\widehat{i}_s = (\widehat{i}_{sD}, \widehat{i}_{sQ})$

고정자 좌표계에서 실제전류  $i_s$ 에 대해 추정전류  $\widehat{i}_s$ 가 그림1과 같이 실제 순시 무효전력에 대해  $\Delta\theta_r$ 만큼 벗어나 있다면, 식(7),(8)는 식(9),(10)같이 산출된다.

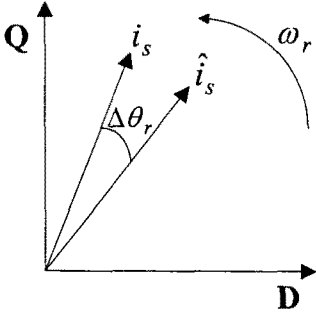


그림 1 고정자 좌표계에서의 실제전류 및 추정전류

$$q_m = i_{sD}\widehat{E}_{sQ} - i_{sQ}\widehat{E}_{sD} \quad (9)$$

$$\widehat{q}_m = (i_{sD}\cos\Delta\theta_r + i_{sQ}\sin\Delta\theta_r)\widehat{E}_{sQ} + (i_{sD}\sin\Delta\theta_r - i_{sQ}\cos\Delta\theta_r)\widehat{E}_{sD} \quad (10)$$

식(10)에서 (11)의 조건이 만족된다면, 식(10)을 식(12)와 같이 근사시킬 수 있으며,

$$\omega_r \neq 0, \Delta\theta_r \approx 0 \quad (11)$$

$$\widehat{q}_m = (i_{sD} + i_{sQ}\Delta\theta_r)\widehat{E}_{sQ} + (i_{sD}\Delta\theta_r - i_{sQ})\widehat{E}_{sD} \quad (12)$$

식(9),(10)로부터, 순시무효전력의 오차는 식(13)와 같이 위치오차에 대한 정보를 포함한 식으로 나타나므로, 속도오차에 대한 보상값 C를 식(14)와 같이 비례 적분하여 결정한다.

$$\Delta q_m = \widehat{q}_m - q_m = \Delta\theta_r(i_{sQ}\widehat{E}_{sQ} + i_{sD}\widehat{E}_{sD}) \quad (13)$$

$$C = (K_p + \frac{K_I}{p}) \cdot \Delta q_m \quad (14)$$

식(11)의 조건이 만족된다면, 식(4)의 오차방정식은 식(15)같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_{sD} &= -\frac{R_s}{L_s}e_{sD} + \frac{K_E}{L_s}(\widehat{\omega}_r - \omega)\sin\widehat{\theta}_r + k_1e_{sD} \\ \dot{e}_{sQ} &= -\frac{R_s}{L_s}e_{sQ} - \frac{K_E}{L_s}(\widehat{\omega}_r - \omega)\cos\widehat{\theta}_r + k_2e_{sQ} \end{aligned} \quad (15)$$

식(14)에서 속도 추정오차가 안정적으로 보상되어지면, 식(15)은 (16)로 나타내지며, 안정성을 확보하도록  $k_1, k_2$ 를 설정하면, 식(16)의 오차는 0으로 수렴한다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_{sD} &= -\left(\frac{R_s}{L_s} - k_1\right)e_{sD} \\ \dot{e}_{sQ} &= -\left(\frac{R_s}{L_s} - k_2\right)e_{sQ} \end{aligned} \quad (16)$$

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

추정 알고리즘에 대한 전체 블록 다이어그램을 그림2에 나타내었다.

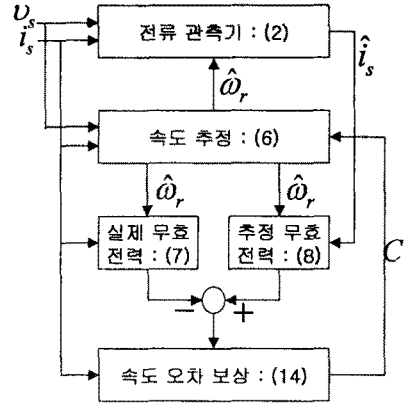


그림 2 제안한 순시무효전력을 이용한 속도 추정 알고리즘의 블록도

### 2.3. 실험결과

제안된 센서리스 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 다음의 실험을 수행하였으며, 실험에 사용된 전동기의 규격은 표1과 같다.

표 1. 영구자석 전동기의 규격

정격용량	1.8[kw]	고정자 저항	0.22[Ω]
정격 토크	5.88[N · m]	고정자 인덕턴스	0.88[mH]
정격 속도	3000[rpm]	역기전력 상수	0.0522 [V/rpm]
극수	8극	관성 계수	18.6 × 10 <sup>-4</sup> [Kg · m <sup>2</sup> ]

그림3은 1000rpm 정상상태 운전시 스텝으로 정격부하 인가시 동작 특성이며, 부하의 급격한 변화에 강인하게 동작함을 알 수 있다.

그림4~5는 1500rpm, 정격의 60%부하에서, 정역 운전특성이며, 속도오차는 실제 속도오차의 10배를 한 파형이다. 속도가 급변하는 조건에서도 잘 추정함을 보인다.

그림6~7은 1000rpm, 90도(전기각)의 초기 회전자 위치 오차를 가진 후 운전특성이다, 회전자위치가 90도 어긋난 조건에서도 강인하게 동작함을 알 수 있다.

그림 8~9는 50rpm(정격 속도의 1.6%)에서의 특성이다. 전동기 자체에 내장된 incremental encoder의 분해능이 낮아 실제 측정된 속도의 정밀도가 낮게 나타나지만, 저속에서도 안정적으로 동작함을 알 수 있다.

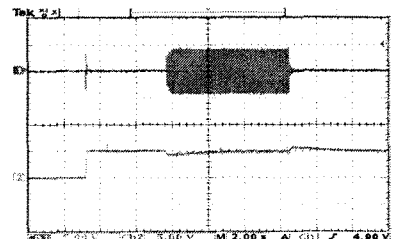


그림 3 1000rpm 스텝부하 인가시 실제전류(상), 추정속도(하)

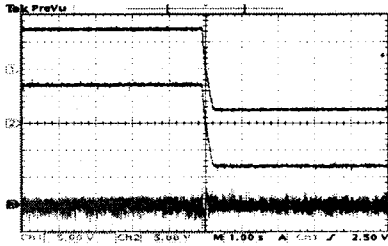


그림 4 1500rpm 정역운전시 실제속도(상), 추정속도(중), 속도오차(하)

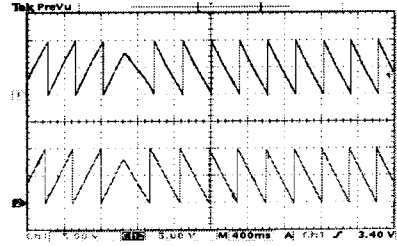


그림 9 50rpm 정역운전시 실제위치(상), 추정위치(하)

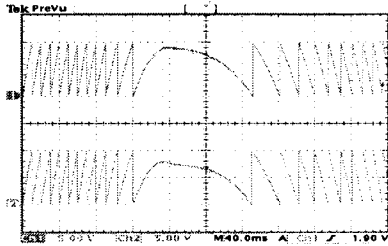


그림 5 1500rpm 정역운전시 실제위치(상), 추정위치(하)

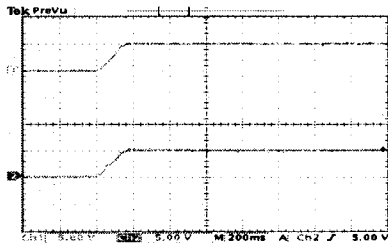


그림 6 초기 회전자 오차 90도, 1000rpm 운전시 실제속도(상), 추정속도(하)

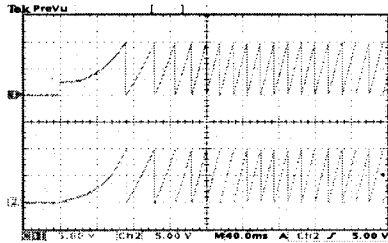


그림 7 초기 회전자 오차 90도, 1000rpm 운전시 실제위치(상), 추정위치(하)

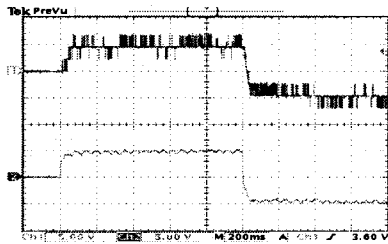


그림 8 50rpm 정역운전시 실제속도(상), 추정속도(하)

### 3. 결 론

본 논문에서는 원통형 영구자석 동기전동기의 고정자 좌표계에서 순시무효전력을 이용한 위치 및 속도추정 알고리즘을 제안하였으며, 이를 실험을 통해 증명하였다. 그 결과 정상상태 뿐만아니라, 속도가 급변하는 과도 상태에서도 속도 및 위치를 안정적으로 추정하며, 급격한 부하변화에도 안정적으로 동작하며, 초기 회전자 위치에 오차가 있는 경우에도 견실하게 동작하였다. 또한, 제안된 알고리즘은 전동기의 기계적 방정식을 사용하지 않으므로, 기계적 파라미터가 가지는 계측의 어려움 및 계측오차에서 발생하는 불안정한 구동과 같은 문제점이 해결된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.(KRF-2001-041-E00146)

#### [참 고 문 헌]

- [1] R. Wu et al, "A Permanent Magnet Motor Drive Without a Shaft Sensor", IEEE Trans. Ind. Appl., vol.27, no.5, pp.1005-1011, 1991
- [2] N. Matsui et al, "Sensorless PM Brushless DC Motor Drives", IEEE Trans. Ind. Electronics, vol.43, no.2, pp.300-308, 1996
- [3] J. Hu. et al, "Application of Sliding Observer to Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System", IEEE PESC Conf. Record, pp.532-536, 1994
- [4] R. B. Sepe et al, "Real-Time Observer-Based (Adaptive) Control of a Permanent-Magnet Synchronous Motor without Mechanical Sensor", IEEE Trans. Ind. Appl., vol.28, no.6, pp.1345-1352, 1992
- [5] T. Furuhashi et al, "A Position-and-Velocity Sensorless Control for Brushless DC Motors Using an Adaptive Sliding Mode Observer", IEEE Trans. Industrial Electronics, vol.39, no.2, pp.89-95, 1992
- [6] Yoon-Seok Han et al, "Sensorless PMSM Drive with a Sliding Mode Control Based Adaptive Speed and Stator Resistance Estimator", IEEE Trans. Magnetics, vol.36, no.5, pp.3588-3591, Sep. 2000