

무효전력을 이용한 영구자석 동기전동기의 위치 및 속도 센서리스 제어

*진창언, *한윤석, **신재화, *김영석
 *인하대학교 전자·전기·컴퓨터공학부, **인천전문대

Sensorless Vector Control for PMSM Using Instantaneous Reactive Power

Chang-eon Jin, Yoon-seok Han, Jae-wha Shin, Young-seok Kim
 School of electrical & computer engineering, Inha University, Incheon College

Abstract - This paper describes a new approach to estimating permanent magnet synchronous motor(PMSM) speed and position from measured terminal voltages and currents for speed-sensorless vector control. The proposed system is based on observing the instantaneous reactive power of the motor. The described technique is very simple and robust to variations of motor parameters. The new approach is not dependent upon the value of the stator resistance. Also, MRAS schemes are chosen for determining the adaptive law for the speed and the position estimator. The effectiveness is verified by the experimental results.

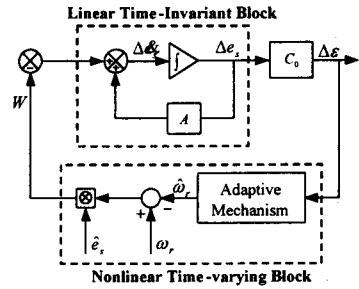


그림 1. 속도 추정을 위한 MRAS 시스템

1. 서 론

영구자석 동기전동기는 단위 무게 당 토오크의 비율, 출력 및 효율이 다른 전동기에 비해서 월등히 높기 때문에 산업응용분야에서 폭넓게 사용되고 있다. 그러나 영구자석 동기전동기는 회전자에 부착된 영구자석으로부터 공급받기 때문에 벡터제어를 위해서는 항상 회전자의 정확한 위치를 알아야 한다. 회전자의 위치는 축에 부착된 Absolute Encoder나 Resolver를 이용하면 알 수 있다. 하지만 이들 위치검출기는 일반적으로 비용이 고가일뿐만 아니라 주위 환경의 영향을 많이 받고, 별도의 복잡한 하드웨어 제어가 구성되어야 하는 단점이 있다. 그밖에, 위치검출기를 전동기 축에 부착함으로써 인한 전동기 크기의 증대 및 가공성 저하 등의 문제가 발생하게 된다. 이런 단점들을 극복하기 위해서 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1]-[3]. 본 논문에서는 순시 무효전력을 이용한 새로운 센서리스 제어를 제안한다. 제안한 방법은 벡터 제어 이론을 적용하여 고정자 저항이 포함된 항이 삭제되기 때문에 기존의 방법보다는 양호한 성능을 나타낸다.

2. MRAS를 이용한 관측기

고정자 좌표계에서 영구자석 동기 전동기의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_{ds} \\ \dot{v}_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & 0 \\ 0 & R_s + L_s p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{ds} \\ e_{qs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} e_{ds} \\ e_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_e \omega_r \sin \theta_r \\ K_e \omega_r \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, $v_s = [v_{ds} \ v_{qs}]^T$: 고정자 공급 전압

$i_s = [i_{ds} \ i_{qs}]^T$: 고정자 전류

$e_s = [e_{ds} \ e_{qs}]^T$: 역기전력 K_e : 역기전력 상수
 R_s : 고정자 권선저항 L_s : 고정자 권선 인덕턴스
 식(1)과 식(2)로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} e_{ds} \\ e_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s + L_s p & 0 \\ 0 & R_s + L_s p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_{ds} \\ \dot{e}_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r \\ \omega_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{ds} \\ e_{qs} \end{bmatrix} \quad (4)$$

3. 속도 및 위치 추정식

식(4)를 이용해서 오차방정식으로 표현하고, 다음과 같이 설정한다.

$$\begin{aligned} \Delta e_s &= e_s - \hat{e}_s \\ \Delta \dot{e}_s &= A \Delta e_s - W \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, \hat{e}_s : 역기전력 추정값 $A = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r \\ \omega_r & 0 \end{bmatrix}$

$$W = \begin{bmatrix} 0 & \hat{\omega}_r - \omega_r \\ -(\hat{\omega}_r - \omega_r) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{e}_{ds} \\ \hat{e}_{qs} \end{bmatrix}$$

전동기의 속도 및 위치를 추정하기 위해서 초월(Hyperstability) 함수를 사용할 경우 두 가지 조건을 만족해야 한다. 첫째로 피드포워드부가 S.P.R(strictly Positive Real)해야하고, 두 번째로 피드백부가 다음의 적분부등식을 만족해야 한다.

$$\int_0^{t_1} \Delta e_s \cdot W dt \geq -\gamma_0^2 \text{ for all } t_1 \geq 0 \quad (6)$$

여기서, γ_0 는 양의 실수
 위 식에서 피드포워드부가 S.P.R.하게 만들기 위해서 보상기 C_0 를 다음과 같이 설계하였다.

$$C_0 = \begin{bmatrix} s & \omega_r \\ -\omega_r & s \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\Delta \epsilon = C_0 \Delta e_s \quad (8)$$

피드백부가 식(6)을 만족하도록 속도추정 방정식을 유도한다. 속도의 오차 성분은 역기전력의 오차에 비례하기 때문에 추정속도의 방정식은 다음과 같이 설정하였다.

$$\hat{\omega}_r = (K_P + \frac{K_I}{s}) \cdot \hat{e}_s \otimes (C_0 \cdot \Delta e_s). \quad (9)$$

식(6)에서 식(9)를 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \int_0^t \Delta \varepsilon \cdot W dt \\ &= \int_0^t \Delta \varepsilon \cdot \{(\hat{\omega}_r - \omega_r) \otimes \hat{e}_s\} dt \\ &= \int_0^t \Delta \varepsilon \cdot \left[\left\{ (K_P + \frac{K_I}{p}) \hat{e}_s \otimes \Delta \varepsilon - \omega_r \right\} \otimes \hat{e}_s \right] dt \quad (10) \\ &= \int_0^t (\Delta \varepsilon \otimes \hat{e}_s) \cdot \left\{ \omega_r - (K_P + \frac{K_I}{p}) \hat{e}_s \otimes \Delta \varepsilon \right\} dt \\ &\geq -\gamma_0^2 \end{aligned}$$

위 식에서 알 수 있는 바와 같이 식(9)는 식(6)을 만족함을 알 수 있다.

4. 무효전력을 이용한 새로운 속도 및 위치 추정

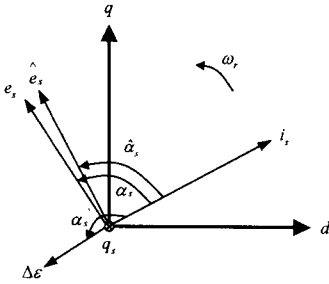


그림 2. 고정자 좌표계

3절에서 역기전력을 이용한 속도 및 위치 추정식을 나타내었다. 그러나, 식(3)에서 보는 것과 같이 역기전력을 추정하기 위해서는 정확한 고정자 저항값을 알아야 한다. 만약 고정자 저항이 온도에 따라서 변한다면 속도와 위치를 추정하는 성능이 저속 운전 시에 떨어지게 된다. 그러므로, 고정자 저항의 변화에 둔감한 방법이 요구된다. 여기서, 고정자 저항의 변화에 둔감한 속도 및 위치 추정 알고리즘을 제안한다.

5. 구조 및 원리

먼저 순시 무효전력 q_s 를 역기전력 e_s 와 고정자 전류 i_s 의 벡터외적이라고 정의한다.

$$q_s \equiv i_s \otimes e_s \quad (11)$$

식(11)의 정의를 이용해서 새로운 속도 알고리즘을 세우면 다음과 같다.

$$\Delta q_s = i_s \otimes (\Delta \varepsilon - \hat{e}_s) \quad (12)$$

위 식을 전개한 후 다음과 같이 정리한다.

$$\Delta q_s = q_s - \hat{q}_s \quad (13)$$

$$q_s = i_s \otimes (C_0 \cdot e_s) \quad (14)$$

$$\hat{q}_s = i_s \otimes (C_0' \cdot \hat{e}_s) \quad (15)$$

여기서, $C_0' = \begin{bmatrix} s+1 & \omega_r \\ -\omega_r & s+1 \end{bmatrix}$

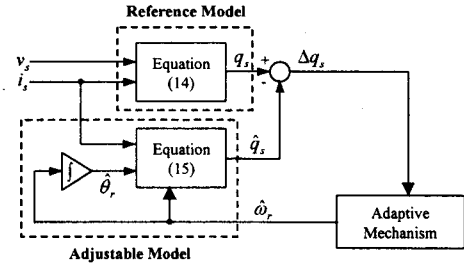


그림 3. 새로운 속도 추정 방법의 구조

그림 3은 새로운 속도 및 위치 추정 알고리즘의 블록 선도를 나타내고 있다. 새롭게 제안한 방법의 안정도를 분석하면 다음과 같다.

$$\hat{e}_s \otimes \Delta \varepsilon \propto \sin(\alpha_s' - \hat{\alpha}_s) \quad (16)$$

$$i_s \otimes (\Delta \varepsilon - \hat{e}_s) \propto \sin \alpha_s' - \sin \hat{\alpha}_s \quad (17)$$

만약에 초기 값이 서로 같고 식(16)와 식(17)이 작은 구간에서 선형성을 이룬다면 식(9)에서 역기전력 대신에 순시 무효 전력의 식으로 표현할 수 있다.

$$(\hat{e}_s \otimes \Delta \varepsilon)' \propto \Delta \alpha_s' - \Delta \hat{\alpha}_s \quad (18)$$

$$\begin{aligned} (i_s \otimes (\Delta \varepsilon - \hat{e}_s))' &\propto \cos \alpha_{s0}' \Delta \alpha_s' - \cos \hat{\alpha}_{s0} \Delta \hat{\alpha}_s \\ &= \cos \alpha_{s0}' (\Delta \alpha_s' - \Delta \hat{\alpha}_s) \end{aligned} \quad (19)$$

따라서, 위 두 식은 선형성을 이루기 때문에 식(9)에서 역기전력 대신에 순시 무효 전력으로 바뀌도 안정함을 알 수 있다. 그러므로, 식(9)에서 역기전력 대신에 순시 무효 전력의 오차항으로 바꾸고 속도 추정식을 정리하면 다음과 같다.

$$\hat{\omega}_r = (K_P + \frac{K_I}{p}) \cdot \Delta q_s \quad (20)$$

위치에 관한 정보는 식(20)을 적분하여 얻을 수 있다.

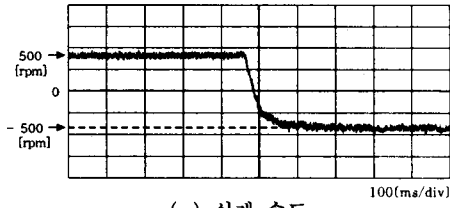
6. 모의 실험 결과

실험에 적용된 PMSM의 사양은 표 1과 같다. 또한, 모든 제어 알고리즘은 DSP TMS320C31을 사용하여 구현 하였으며, 실험 파형은 DSP에 부착되어진 D/A 컨버터에 의해 출력된 값을 오실로스코프로 나타내었다.

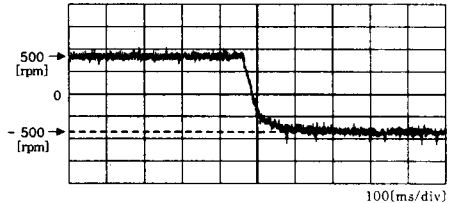
제어의 성능을 평가하기 위하여 500[rpm]에서의 정속운전과 정-역 운전, 100[rpm]에서 저속운전을 수행하였을 때의 속도 응답 특성을 살펴보았다. 그림 4에서는 정-역 운전 특성을 나타낸 것으로 500[rpm]에서 -500[rpm]으로 설정하였다. 과도 상태 이후에도 실제 속도와 추정 속도 모두 지령속도를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

표 1. PMSM의 파라메타

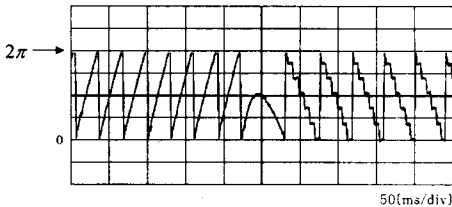
정격출력 [kw]	1.8	R_s [Ω]	0.22
극수	4	L_s [mH]	0.88
정격속도 [rpm]	3000	J [$kg \cdot m^2$]	18.6×10^{-4}
정격토크 [N·m]	5.84	K_e [V/(r/min)]	52.2×10^{-3}



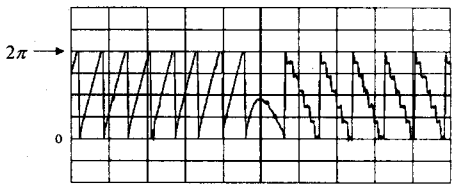
(a) 실제 속도



(b) 추정 속도

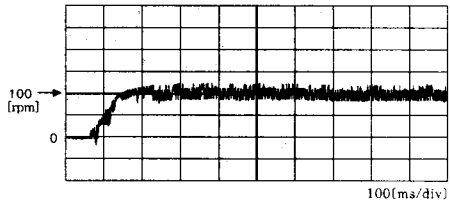


(c) 실제 위치

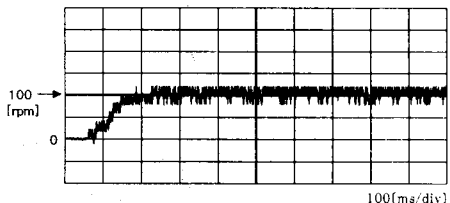


(d) 추정 위치

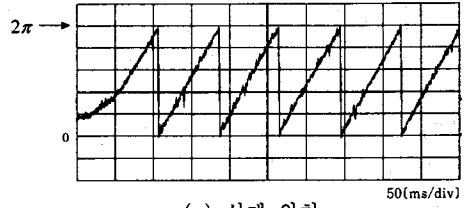
그림 4. 500rpm ~ -500rpm 인가 시 추정기의 속도응답특성



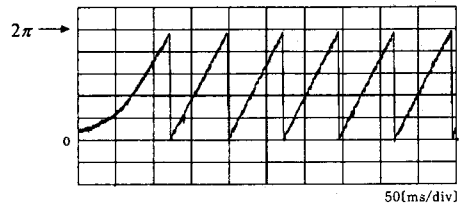
(a) 실제 속도



(b) 추정 속도



(c) 실제 위치



(d) 추정 위치

그림 5. 100rpm 인가시 제안한 추정기의 속도응답특성

그림 5은 저속도 100rpm에서 운전 시 속도 및 위치 파형을 나타내고 있다. 실험 결과에서 알 수 있듯이 초기 기동시 실제위치와 추정 위치가 어긋나 있으나 잠시 후 위치에 오차가 거의 없음을 알 수 있다. 따라서, 저속 운전시에도 제안한 추정기의 성능이 양호함을 알 수 있다.

3. 결 론

위치 센서가 없는 새로운 센서리스 벡터제어 방법이 제안되었다. 제안한 방법은 순시무효 전력을 이용한 방법으로서 기존의 역기전력을 이용한 방법과는 차이가 있다. 제안한 새로운 방법은 고정자 저항에 영향을 받지 않는다. 그리고 실험을 통하여 제안한 방법을 이용한 위치 및 속도 센서없는 PMSM의 제어방법이 양호함을 증명하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Thomas A. Lipo, "Sensorless Synchronous Motor Drive for Use on Commercial Transport Airplanes", IEEE Trans. Ind. Appl., vol.31, no.4, pp.850-859, 1995.
- [2] Rusong Wu, "A Permanent Magnet Motor Drive Without a Shaft Sensor", IEEE Trans. Ind. Appl., vol.27, no.5, pp.1005-1011, 1991.
- [3] 이홍희, "영구자석 동기전동기의 센서리스 벡터제어", 대한전기학회 논문지, 41권 10호, pp.1136-1143, 1992.
- [4] Fang-Zheng Peng, "Robust Speed Identification for Speed-Sensorless Vector Control of Induction Motors", IEEE Trans. Ind. Appl., vol.30, no.5, pp.1234-1240, 1994.
- [5] Mineo Tsuji, "A New Method of Sensorless Vector Control for Induction Motors Using Instantaneous reactive Power", T.IEE Japan, vol.119-D, no.6, pp.857-865, 1999.