

자속축 전류제어기 출력전압을 이용한 PMSM 센서리스 제어

이 종 건, 석 줄 기, 이 동 춘
영남대학교 전자정보공학부

Sensorless Control of PMSM using Current Regulator Output Voltage in the Synchronous D-axis

Jong-Kun Lee, Jul-Ki Seok and Dong-Choon Lee
Yeungnam University

Abstract - This paper presents a new velocity estimation strategy of a non-salient permanent magnet synchronous motor(PMSM) drive without high frequency signal injection or special PWM pattern.

This approach is based on the d-axis current regulator output voltage of the drive system which has the information of rotor position error. The rotor velocity can be estimated through a rotor position tracking PI controller that controls the position error to zero. For zero and low speed operation, the PI gains of rotor position tracking controller have a variable structure. The PI tuning formulas are derived by analyzing this control system using the frequency domain specifications such as phase margin and bandwidth assignment.

1. 서 론

영구자석 동기전동기의 속도 및 토크 제어를 위해서는 자속의 위치를 알기 위한 회전자의 속도 및 위치 검출기가 필수적으로 요구된다. 속도 및 위치 검출기로는 일반적으로 엔코더나 래졸버가 사용되고 있으나, 가격 상승 및 사이즈 증가, 케이블의 유지 및 점검, 기계적 부착의 어려움 등의 경제적 및 기술적 측면에서 많은 문제점을 안고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 속도 및 위치 검출기가 없는 제어 즉, 센서리스 제어에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다[1-3]. 이러한 기존의 연구들은 진동기 상수에 대한 의존성이 크고, 저속에서의 성능이 좋지 않다는 문제점들을 가지고 있다.

최근에 이러한 문제점을 해결하기 위해서 전동기에 별도의 고주파를 주입하는 방법 및 일정 주파수 패턴을 이용하는 방법들이 제안되었다[4-5]. 고주파를 주입하는 방법은 저속에서 우수한 속도 추정 특성을 보이나, 수 백 Hz의 고속에서는 주입 신호의 추출이 어려워 고속 운전이 어렵고, 고주파를 주입함으로써 소음이 생긴다는 문제점들을 가지고 있다. 그리고, 일정 주파수 패턴을 이용하는 방법은 알고리즘이 매우 간단하다는 장점에 비해 기동시 가감속의 시간 조정이 어렵고, 별도의 센서리스 방법이 요구됨에 따라 별개의 절환 알고리즘을 필요로 한다는 문제점들을 가지고 있다[6].

따라서, 본 논문에서는 기존의 고주파 주입이나 일정 주파수 패턴을 이용하지 않으면서 전동기 상수의 의존성 또한 적은 영구자석 동기전동기(PMSM)의 새로운 센서리스 기법을 제안한다. 제안된 기법은 회전자의 위치 오차 정보를 가지는 자속축 전류제어기 출력전압을 비례적분 제어기를 이용하여 속도를 추정하는 기법으로, 저속에서도 우수한 속도 추정 특성을 보인다. 특히, 역기전력 성분은 작은 저속에서의 속도 추정을 위해 고속에서의 속도 추정과는 다른 기법이 제안되었다. 제안된 기법에서의 추정 속도는 회전자의 위치 오차를 없애주는 비례

적분 제어기의 출력이 되고, 속도 추정을 위한 비례적분 제어기의 이득은 주파수 영역에서 시스템을 해석함으로써 얻어진다. 제안된 기법에서 정지 및 극 저속 속도 추정 제어기의 이득 및 대역폭이 매우 작아 부하 특성이 좋지 않다는 문제점을 지니고 있다. 본 논문에서는 진상 보상을 제어기에 적용하여 저속에서의 대역폭을 증가 시킴으로써 저속에서의 성능을 향상시켰다. 600W PMSM을 이용한 다양한 실험을 통해 제안된 기법의 타당성을 보이고자 한다.

2. 기존의 PMSM 센서리스 제어

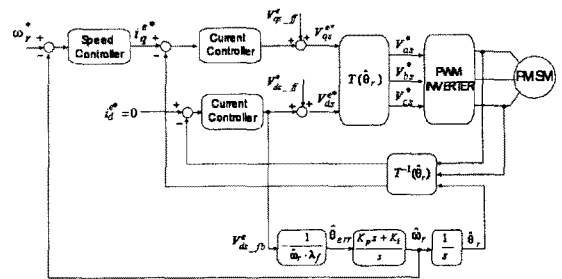


그림 1. 자속축 전류제어기 출력을 이용한 센서리스 제어 블록도

그림 1은 기존의 자속축 전류제어기 출력을 이용한 센서리스 제어 블록도를 나타낸다[5]. 그림 1에서 회전자의 위치 오차 $\hat{\theta}_{err}$ 는 식 (1)과 같이 된다.

$$\hat{\theta}_{err} = \frac{V_{ds}^e - \hat{V}_{ds}}{\hat{\omega}_r \lambda_f} \quad (1)$$

여기서, $\hat{\omega}_r$ 은 추정된 전기적 각속도이고, λ_f 는 역기전력 상수이다.

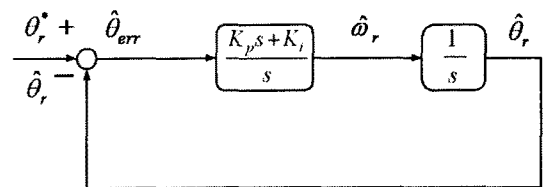


그림 2. 센서리스 제어 블록도

그림 2는 센서리스 제어 블록도를 나타낸다. 식 (1)의 회전자의 위치 오차를 비례적분 제어기의 입력으로 하고, 비례적분 제어기의 출력을 추정 회전자 각속도로 두면, 비례적분 제어기는 $\hat{\theta}_{err}$ 를 없애주기 위해 회전자 속도를 조절하게 된다. 제어를 위한 추정각 $\hat{\theta}_r$ 는 그림 2에서와 같이 $\hat{\omega}_r$ 를 적분함으로써 구해진다.

3. 제안한 PMSM 센서리스 제어

3.1 저속에서의 속도 추정

식 (1)에서 알 수 있듯이 정지 및 저속에서는 속도 정보가 매우 작아서 $\hat{\theta}_{err}$ 가 매우 크기 때문에 기동이 실패할 우려가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 초기 기동시 속도 정보 대신 식 (2)와 같이 특정 상수로 제어를 함으로써 회전자의 위치 오차를 제한하여 저속에서의 제어 특성을 향상시켰다.

$$\hat{\theta}_{err} = \frac{V_{ds}^e - \beta}{\text{sgn}(\hat{\omega}_r) k \cdot \lambda_f} \hat{\theta}_{err} = \frac{V_{ds}^e - \beta}{K \cdot \lambda_f} \hat{\theta}_{err} \quad (2)$$

여기서, K 는 제어 상수이며, 전기적 각속도 $\hat{\omega}_r$ 와 같은 극성을 가진다. 본 논문에서는 제어 상수 K 를 절환 계수로 정의한다.

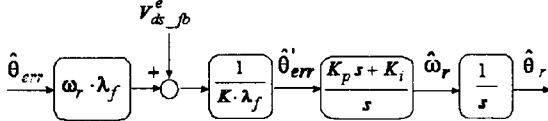


그림 3. 정지 및 저속에서의 제안된 센서리스 블록도

그림 3은 정지 및 저속에서의 제안된 센서리스 블록도를 나타낸다. 속도 정보가 작은 저속에서는 절환 계수 K 로 제어하다가 속도가 충분히 커진 후 $\hat{\omega}_r$ 로 절환하여 제어하게 된다.

3.2 비례적분 제어기의 이득 선정 방법

시스템에서 $G_c(s)$ 와 $G_p(s)$ 가 주어지면 위상여유 ϕ_m 는 식 (3)과 같이 정해진다[7].

$$\phi_m = \arg[G_c(j\omega_g)G_p(j\omega_g)] + \pi \quad (3)$$

여기서, ω_g 는 식 (4)로 정해진다.

$$|G_c(j\omega_g)G_p(j\omega_g)| = 1 \quad (4)$$

그림 2의 센서리스 제어 블록도를 통해 $G_c(s)$ 와 $G_p(s)$ 는 식 (5)-(6)과 같이 된다.

$$G_c(s) = K \frac{s + K_i}{s} \quad (5)$$

$$G_p(s) = \frac{1}{s} \quad (6)$$

$G_c(s)$ 와 $G_p(s)$ 가 주어졌을 때, 식 (3)-(4)를 통해 대역폭(Bandwidth) ω_g 및 위상 여유 ϕ_m 를 구하면 식

7)-(8)과 같이 된다.

$$\omega_g = \sqrt{K \frac{2 + \sqrt{K_i K_p}}{K_p}} \quad (7)$$

$$\phi_m = \arctan \frac{K_p}{K_i \sqrt{K \frac{2 + \sqrt{K_i K_p}}{K_p}}} \quad (8)$$

식 (7)-(8)를 통해 센서리스 제어기의 이득 K_p 와 K_i 를 구하면 식 (9)-(10)과 같이 되고,

$$K_p = \omega_g^2 \frac{1 + (\tan \phi_m)^2}{(\tan \phi_m)^2} \quad (9)$$

$$K_i = \omega_g^2 \frac{1}{1 + (\tan \phi_m)^2} \quad (10)$$

여기서, 위상여유 ϕ_m 의 조건은 식 (11)과 같이 설정되어진다.

$$30^\circ < \phi_m < 60^\circ \quad (11)$$

3.3 주파수 영역에서의 제어기 특성 해석

절환 계수 K 로 제어되는 저속에서의 센서리스 제어기의 대역폭 ω_g 는 식 (7)로부터 식 (12)와 같이 정해진다.

$$\omega_g = \sqrt{\left(\frac{\hat{\omega}_r}{K} K \right)^2 + \left(\frac{\tau \omega_r}{K} \frac{K_i \omega_r + \frac{K_p}{2} K_i \omega_r}{2} \right)^2} \quad (12)$$

식 (7)과 식 (12)를 통해 절환 계수 K 의 변화에 따른 대역폭을 도시하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.

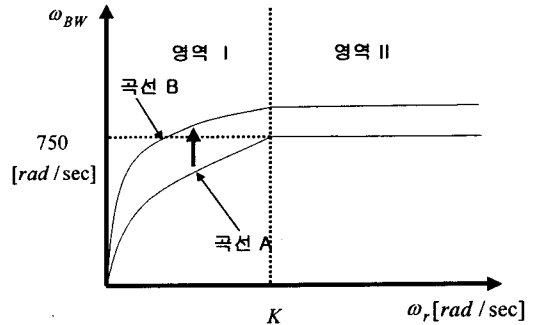


그림 4. 속도 변화에 따른 센서리스 제어기의 대역폭 변화

그림 4는 속도 변화에 따른 센서리스 제어기의 대역폭 변화를 나타낸다. 곡선 A에서 알 수 있듯이 정지 및 저속에서는 센서리스 제어기의 대역폭이 낮아 속도 리플이 생길 수 있고, 이 영역에서 부하가 인가될 경우 제어가 되지 않을 수 있다. 이러한 저속에서의 대역폭이 낮아 생기는 문제점들을 보완하기 위해 진상 보상기가 제어기에 적용되었다.

그림 4의 곡선 B는 보상기가 제어기에 적용됨으로써의 대역폭 변화를 나타낸다. 진상 보상기를 센서리스 제어기에 적용함으로써 저속에서의 대역폭을 증가시켰다. 그러나, 보상기를 통해 대역폭을 증가시켜도 여전히 정지 및 저속에서는 대역폭이 매우 낮아 이 영역에서는 부하 특성이 좋지 않다는 문제점을 안고 있다. 그러나, 역기전력을 이용하는 기존 방법들에 비해서 전동기 상수의

의존성이 적고, 알고리즘 또한 매우 간단하다는 장점을 가지고 있다. 그리고, 주파수 영역에서 센서리스 제어기의 특성을 해석함으로써 운전 가능 영역의 판별에 대한 이론적 근거를 제시해준다.

4. 실험 결과

제안된 기법의 타당성을 검증하기 위해 150[MHz] TMS320VC33 제어 보드를 이용하여 표 1에 제시된 600[W] PMSM에 대해서 실험을 수행하였다. 스위칭 주파수는 20kHz, 전류 및 속도 샘플링 주기는 각각 100us, 1ms이다.

표 1. 600W PMSM의 정격 및 상수

정격 력	600 W
극 수	8 극
정격 속도	3000 r/min
토크 수	0.797 Nt·m/A
관성	1.09×10^{-4} Nt·m ²
역기전력상수	0.0352 V _s /rpm

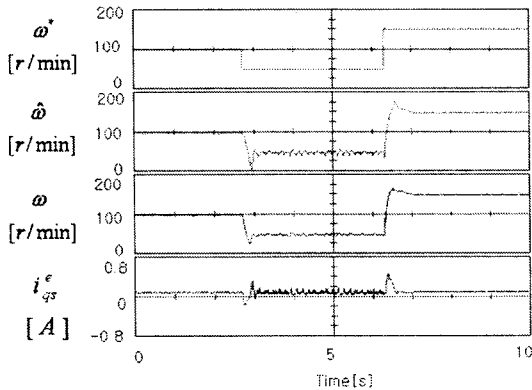


그림 5. 100-50-150[r/min] 속도 지령에 따른 추정 특성

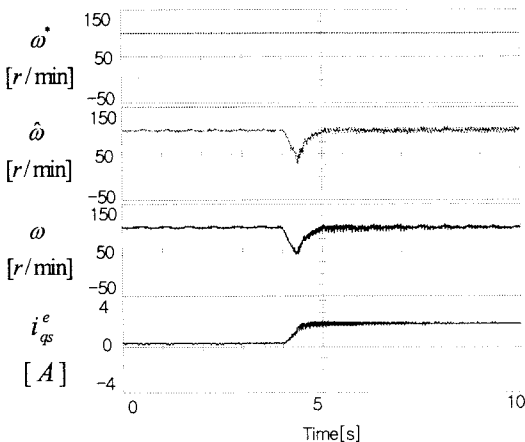


그림 6. 100[r/min]에서 스텝부하 인가에 따른 추정 특성

그림 5은 속도 지령을 100-50-150[r/min]으로 속도 지령의 변화를 주었을 때의 추정 속도 및 실제 속도를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 스텝 지령에 대하여 양호한 응답 특성 및 추정 특성을 나타냄을 알 수 있다. 저속인 50[r/min]에서의 약간의 리플 현상은 전류의 율셋 및 스켈링 에러와 같은 전류 센싱 문제로 인해 생기는 현상으로 전류 센싱을 보다 정확히 한다면, 저속에서의 센서리스 특성 또한 보다 양호해 질 것으로 판단된다.

그림 6은 100[r/min]에서 40%의 정격에 해당하는 스텝 부하를 인가하였을 경우의 추정 속도 및 실제 속도를 나타낸다.

그림에서 알 수 있듯이 스텝부하를 인가하였을 경우에도 속도 추정 및 속도 제어 특성이 양호함을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 기존의 고주파 주입이나 일정 주파수 패턴을 이용하지 않는 영구자석 동기전동기(PMSM)의 새로운 센서리스 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 회전자의 위치 오차 정보를 가지는 자속측 전류제어기 출력 전압을 비례적분 제어기를 이용하여 속도를 추정하는 기법으로, 저속에서도 우수한 속도 추정 특성을 보인다. 저속에서의 속도 추정을 위해서 고속에서의 속도 추정과는 다른 기법이 제안되었다. 제안된 기법에서의 속도 추정을 위한 비례적분 제어기의 이득은 주파수 영역에서 시스템을 해석함으로써 얻어진다. 제안된 기법의 타당성을 위해 다양한 속도 영역에서의 무부하 실험과 부하 실험이 수행되었다.

본 연구는 산업자원부의 (00-역-01)지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행된 과제임

[참고 문헌]

- [1] T. Ohtani, N. Takada and K. Tanaka, "Vector Control of Induction motor without shaft encoder", *IEEE Trans. Industry Application*, vol.28, pp.157-164, 1992.
- [2] A. Consoli, S. Musumeci and etc, "Sensorless Vector and Speed Control of Brushless Motor drives", *IEEE Trans. Industry Application*, vol.41, pp.91-96, 1994.
- [3] Y. R. Kim, S. K. Sul and M. H. Park, "Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor Using Extended Kalman Filter", *IEEE Trans. Industry Application*, vol.30, pp.1225-1233, 1994.
- [4] 하정익, "고주파 신호 주입을 이용한 속도 및 위치 검출기가 없는 교류 전동기의 제어", 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 박사학위 논문, 2001.
- [5] B. H. Bae and etc, "Implementation and Experimental Investigation of Sensorless Control Schemes for PMSM in Super-high Variable Speed Operation", *IEEE-IAS Conf. Rec.*, vol.2, pp.1203-1209, 2001.
- [6] 석줄기, 이동춘, 황준현, "고속압축기 구동 PMSM을 위한 센서리스 운전", 대한전기학회 논문지, vol.51B, pp.676-681, 2002.
- [7] W. K. Ho, C. C. Hang and J. H. Zhou, "Performance and Gain and Phase Margins of Well-known PI Tuning Formulas", *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol.3, pp.245-248, 1995.