

외란관측기와 파라미터 보상기를 이용한 PMSM의 정밀위치제어

고종선*, 이용재**

원광대학교 전기-전자 및 정보 공학부

Precision Position Control of PMSM using Load Torque Observer and Parameter Compensator

Jong-Sun Ko* and Yong-Jae Lee**

School of Electric-Electronic and Information Engineering, Wonkwang University

ABSTRACT

This paper presents external load disturbance compensation that used to deadbeat load torque observer and regulation of the compensation gain by parameter estimator. As a result, the response of PMSM follows that of the nominal plant. The load torque compensation method is compose of a deadbeat observer. To reduce of the noise effect, the post-filter, which is implemented by MA process, is adopted. The parameter compensator with RLSM(recursive least square method) parameter estimator is suggested to increase the performance of the load torque observer and main controller. The proposed estimator is combined with a high performance load torque observer to resolve the problems. As a result, the proposed control system becomes a robust and precise system against the load torque and the parameter variation. A stability and usefulness, through the verified computer simulation, are shown in this paper.

1. 서 론

최근 자성체, 반도체 전력소자, 제어이론 등의 향상으로 중-소용량 영역에서 영구자석 동기전동기(PMSM)를 이용한 동작 제어(motion control)의 응용은 매우 중요한 부분이 되어졌다.

본 논문에서는 영구자석 동기 전동기의 정밀 위치 제어의 방법으로 외란 관측기를 이용한 외란 보상방법과 파라미터 추정에 의해 보상기의 이득을 조절하도록 함으로써, 외란이 없는 등가 지표시스템의 응답 특성을 추정하는 시스템을 제안하였다. 외란 관측기에 의한 보상방법은 잘 알려진 데드비트 외란 관측기를 이용하였으며 잡음에 약한 데드비트 관측기의 단점을 보완하기 위하여 후단필터로서 MA(moving average)처리를 통하여 잡음

에 대한 영향을 줄이도록 하였다. 또한 관측기의 파라미터와 실제 시스템의 파라미터의 차이로 발생하는 외란 추정 오차를 줄이고자 실제 시스템과 파라미터 보상기로 구성된 등가 시스템이 지표 시스템이 되도록 구성하였다. 시스템에 사용된 RLSM 파라미터 추정기는 외란에 의하여 편향된 추정 특성을 가진다. 이러한 파라미터 추정문제에 대하여 파라미터 추정기가 외란 관측기의 보상 입력을 포함하도록 함으로써 외란에 의한 문제를 해결하였다. 이와 같이 제안된 제어기는 외란 및 파라미터 변화를 갖는 시스템에서 강인한 고정밀 제어를 할 수 있으며, 이의 안정성과 효용성을 컴퓨터를 이용한 모의 실험을 통하여 보였다.

2. 제어 알고리즘

2.1. 상태 궤환 제어 알고리즘

PMSM의 추적 제어를 위해서 추가 상태를 식 (1)과 같이 정의하면 PMSM의 추가 상태 시스템 방정식은 식 (2), (3)과 같으며 위치 제어기의 출력 i_{qd} 에 해당하는 제어 규칙은 식 (4)와 같이 정할 수 있다.

$$\dot{z} = \theta - \theta_r \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_r \frac{P}{2J} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i_{as} \tag{2}$$

$$- \begin{bmatrix} \frac{p}{2J} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} T_L - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \theta_r$$

$$y = [0 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} \omega \\ \theta \\ z \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$u = -(k_1\omega + k_2\theta + k_3z) \quad (4)$$

외란에 의한 오차를 빨리 줄이기 위해서는 큰 게환 이득이 필요하게 되며, 이것은 매우 큰 전류를 만들게 된다. 만일 부하 토크 T_L 을 알게 되면,

$T_L = k_t i_{qc2}$ 에 의하여 등가 전류 i_{qc2} 를 구할 수 있으며 외란의 보상 입력을 생성할 수 있다. 따라서 제어 입력 i_{qc} 는 위치 제어기 출력 i_{qc1} 과 등가 전류 i_{qc2} 로 구성된다. 외부 외란의 영향은 등가의 q-상 전류로 정제환(feed-forward)하여 보상한다.

2.2 외란 관측기 및 MA필터

일반적으로 시스템의 모든 입력을 알면 상태 추정(estimation)을 할 수 있다. 그러나, 실제 시스템에서 많은 경우에 몇몇 입력은 정확한 값을 알 수 없거나 찾아내기 힘든 경우가 있다. 빠른 샘플링에 의해 외란은 구간상수로 가정할 수 있으므로 다음과 같은 0차 관측기에 의해 추정 가능하다.

$$\dot{T}_L = 0 \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\omega}} \\ \dot{\hat{\theta}} \\ \dot{\hat{T}_L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & 0 & -\frac{P}{2J} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{\theta} \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_t \frac{P}{2J} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i_{qs} + L \left(\theta - [0 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{\theta} \\ \hat{T}_L \end{bmatrix} \right) \quad (6)$$

빠른 추정을 위해 데드비트 알고리즘을 사용하면, 극점을 z도메인의 0점에 정의하여 게환 이득을 Ackermann공식에 의해 얻을 수 있다. 또한 데드비트 관측기의 단점인 잡음 증폭문제는 MA처리에 의한 저대역 통과 필터(LPF)를 적용하여 고주파 잡음을 저감하였다.

$$H(z) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} z^{-k} \quad (7)$$

식 (7)은 MA필터의 전달 함수이며 N은 데이터의 수를 나타내고 z는 단위 지연을 나타낸다. 여기서 N에 2를 선택하고 관측기에 의해서 추정된 외란을 입력으로 하면 신호 왜곡이 적으며 고주파 잡음을 저감한 외란을 식 (8)에 의해서 얻을 수 있다.

$$\hat{T}_L(k) = \frac{1}{2} (\hat{T}_L(k) + \hat{T}_L(k-1)) \quad (8)$$

2.3 파라미터 보상기와 파라미터 추정기

추가 상태 게환 제어기와 외란 관측기를 이용한 외란 보상기는 고정 이득을 사용하기 때문에 파라미터 변화에 대하여 동일한 성능을 얻을 수 없으며, 외란 관측기는 파라미터 변화에 의해 과도 응답 특성을 갖는다. 실제 시스템의 파라미터 변화 혹은 정확하지 않은 파라미터를 이용한 고정이득설정은 시스템의 성능 변화를 가져오게 된다. 따라서 등가 지표(nominal) 시스템으로 보상하여 파라미터의 변화에 의한 성능 변화를 제거할 수 있다. 영구자석 동기 전동기의 이산방정식은 다음과 같다.

$$\omega(k+1) = \alpha\omega(k) + \beta i_{qs}(k) - \gamma T_L(k) \quad (9)$$

$$\text{여기서, } \alpha = e^{-\frac{B}{J}h} \quad (10)$$

$$\beta = -\frac{P}{2J} \left(-\frac{1}{B} e^{-\frac{B}{J}h} + \frac{1}{B} \right) k_h \quad (11)$$

$$\gamma = \frac{\beta}{k_t} \quad (12)$$

파라미터의 변화를 등가지표시스템으로 보상하기 위하여 부하토크의 영향이 없다고 가정하고, 부게환 이득 및 정제환 이득을 각각 C_1 , C_2 라 정의하면 보상기를 통한 제어명령은 다음과 같다.

$$i_{qs}^*(k) = C_1(k) \cdot i_{qc}(k) + C_2(k) \cdot \omega(k) \quad (13)$$

파라미터 보상기에 의해 보상된 시스템과 등가지표 시스템의 응답이 같다고 가정하면 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \alpha\omega(k) + \beta(i_{qs}(k)C_1(k) + \omega(k)C_2(k)) \\ = \alpha_n\omega(k) + \beta_n i_{qs}(k) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 α , β 와 α_n , β_n 은 각각 시스템의 실제 파라미터와 명판에 주어진 지표파라미터이다. 따라서 보상기의 이득은 식 (14)로 부터 다음과 같이 간단히 얻을 수 있다.

$$C_1(k) = \beta_n/\beta \quad (15)$$

$$C_2(k) = (\alpha_n - \alpha)/\beta \quad (16)$$

파라미터 추정을 위하여 영구자석 동기전동기의 이산 방정식을 파라미터 벡터와 측정 벡터로 구분하면 다음과 같다.

$$\omega(k+1) = \alpha\omega(k) + \beta i_{qs}(k) = \theta^T \phi(k) \quad (17)$$

$$\text{여기서, } \theta^T = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\phi(k)^T = \begin{bmatrix} \omega(k) & i_{qs}(k) \end{bmatrix} \quad (19)$$

파라미터 추정 알고리즘으로 RLSM을 사용하며, 외란에 의한 추정 오차를 제거하기 위해 외란 보상을 포함한 시스템의 입출력을 측정 벡터로 사용하면 다음 식에 의해 파라미터 추정을 할 수 있다.

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + F(k+1) \tilde{\phi}(k) E(k+1) \quad (20)$$

$$F(k+1) = F(k) - \frac{F(k) \tilde{\phi}(k) \tilde{\phi}(k)^T F(k)}{1 + \tilde{\phi}(k)^T F(k) \tilde{\phi}(k)} \quad (21)$$

$$E(k+1) = y(k+1) - \hat{\theta}(k)^T \tilde{\phi}(k) \quad (22)$$

$$\text{여기서, } \hat{\theta}^T = \begin{bmatrix} \hat{\alpha} & \hat{\beta} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{\phi}(k)^T = \begin{bmatrix} \omega(k) & i_{qs}(k) - \frac{\hat{T}_L}{k_t} \end{bmatrix},$$

$$F(0) = \frac{1}{\delta} I \quad (0 < \delta \ll 1)$$

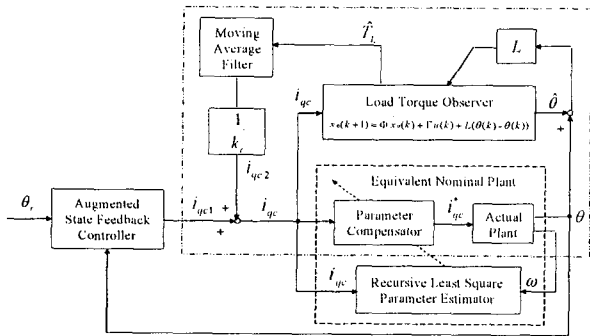


그림 1 제안된 알고리즘의 블록선도

Fig. 1 Block diagram of the proposed algorithm

제어 입력 i_{qc} 는 추가된 상태 궤환에서 i_{qc1} 과 데드비트 외란 관측기의 출력 i_{qc2} 를 합해서 구하게 된다. 이상의 알고리즘 블록선도를 그림 1에 나타내었다.

3. 전체 시스템 구성

제안한 시스템의 구성은 그림 2에 나타냈다. 여기서 제어알고리즘은 위치제어기, 외란 관측기 및 파라미터 보상기로 구성된다. 위치 제어기는 추가 상태 궤환(augmented state feedback)으로 이루어지며, 추가 상태 $z(k+1)$ 의 구현은 평행사변형 방식을 이용하였다. 파라미터 변화는 관성부하를 사용하여 모의 실험을 하였다.

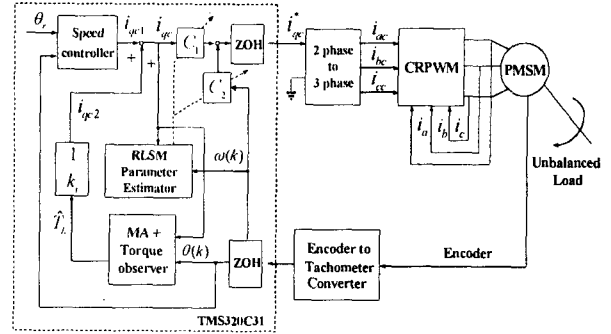


그림 2 제안된 제어 시스템의 블록선도

Fig. 2 block diagram of the proposed control system

4. 모의실험 결과

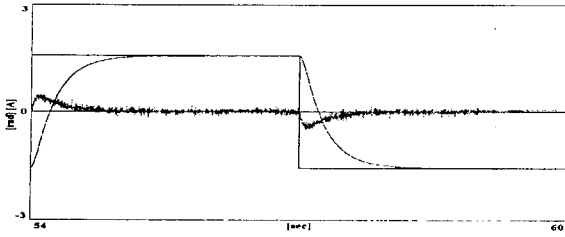
모의실험에서 사용한 영구자석 동기 전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 모터 파라미터

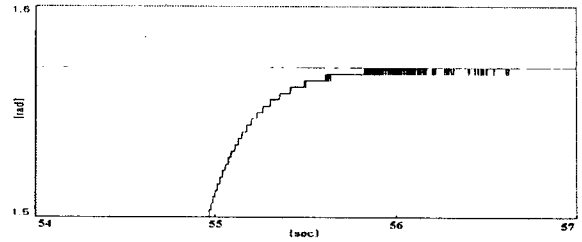
Table 1 Motor parameter

Power : 400 Watt	Inertia : $0.363 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$
Rated torque : 1.3 Nm	Stator resistance : 1.07 Ω
Rated current : 2.7 A	Phase inductance : 4.2 mH

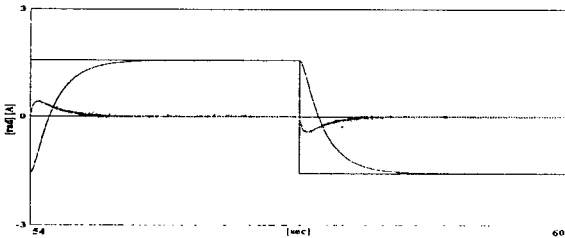
히스테리시스 간격은 0.05[A]이고, 샘플링 주기 Ts는 0.2 [ms]이다. 원하는 목표 도달시간과 과도 응답이 없는 가중 행렬(weighting matrix)은 $Q = \text{diag}[0.1 \ 60 \ 1000]$, $R=1$ 로 선택하여 최적 이득 행렬을 구하면 $k = [0.0771 \ 3.2321 \ 11.4195]$ 이 되며, Dead beat 관측기 이득 $L = [9623.9 \ 2.7000 \ -275.00]$ 이 된다. 그림 3은 무부하인 경우의 시뮬레이션 결과로 외란 관측기를 갖는 제어기와 외란 관측기와 파라미터 보상기를 갖는 제어기 모두 안정된 응답을 보이고 있다. 그림 4는 관성 파라미터의 100배에 해당되는 관성부하를 갖고 모터의 R과 L이 각각 2배의 값을 갖으며 30배의 관성 파라미터 변화를 갖는 경우이다. 외란 관측기를 갖는 제어기는 파라미터 변화로 인해 매우 큰 전류명령을 발생하고 외란 관측기와 파라미터 보상기를 갖는 제어기에서는 파라미터 추정을 통해 이득을 조절하여 안정된 전류 명령을 발생하고 있다. 그림 5는 파라미터 변화가 있는 경우의 시뮬레이션 결과를 0.1[rad]의 스케일로 확대하여 두 제어기의 성능을 비교한 것이다. 외란 관측기는 파라미터 변화로 인한 오차가 발생됨을 알 수 있고 제안된 제어기는 외란 관측기를 갖는 제어기의 오차를 현격히 제거하여 마치 파라미터 변화가 없는 것처럼 오차가 보상됨을 알 수 있다.



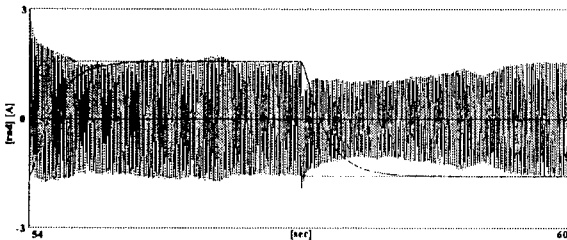
(a) 외란 관측기를 갖는 제어기



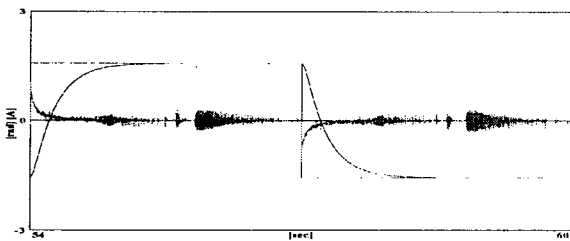
(b) 외란 관측기와 파라미터 보상기를 갖는 제어기
그림 5. 파라미터 변화에 대한 두 제어기의 성능 비교



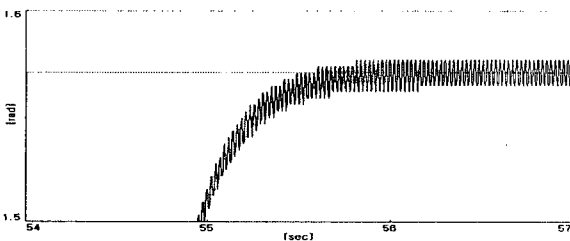
(b) 외란 관측기와 파라미터 보상기를 갖는 제어기
그림 3 무부하에 대한 회전자의 위치, q상 전류 명령의 모의실험 결과



(a) 외란 관측기를 갖는 제어기



(b) 외란 관측기와 파라미터 보상기를 갖는 제어기
그림 4. 관성부하와 30배의 관성 파라미터, R과 L의 변화에 대한 위치 및 q상 전류 명령의 모의실험 결과



(a) 외란 관측기를 갖는 제어기

5. 결론

본 논문은 외란과 파라미터 변화에 강인한 위치 제어를 위해 외란 관측기와 파라미터 보상기를 이용하는 방법을 제시하였다. 또한 파라미터 추정기에 사용된 RLSM 파라미터 추정방법의 단점인 외란에 의해 편향특성을 외란 관측기에 의한 보상 입력을 포함하도록 함으로서 편향 특성을 제거하였으며, 제안된 알고리즘을 모의실험을 통하여 기존 시스템과 성능을 비교하여 더욱 우수한 특성을 나타내고 있음을 보였다.

참고 문헌

- [1] D. W. Novotny and R. D. Lorentz "Introduction to field orientation and high performance AC drives" *IEEE-IAS Tutorial Course*, 1986.
- [2] P. C. Krause, *Analysis of electric machinery*, McGraw-Hill, 1984.
- [3] K. J. Åström and B. Wittenmark *Computer controlled system*, Prentice Hall, International, 1997.
- [4] J. S. Ko, J. H. Lee, S. k. Chung, and M. J. Youn "A Robust Position Control of Brushless DC motor with Dead Beat Load Torque Observer" *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 5, pp. 512-520, 1993.
- [5] C. T. Chen, *Linear System Theory and Design*, Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1984.
- [6] C. Y. Huang, T. C. Chen, C. L. Huang "Robust Control of Induction Motor with A Neural-Network Load Torque Estimator and A Neural-Network Identification" *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 5, pp 990-998, 1999.
- [7] J. D. Landau, *System Identification and Control Design*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1990.
- [8] G. C. Goodwin, K. S. Sin, *Adaptive Filtering Prediction and Control*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1984.
- [9] J. S. Ko and S. K. Youn, "A Study of Adaptive Load Torque Observer and Robust Precision Position Control of BLDD Motor", *Transaction on KIPE*, Vol. 4. No. 2, pp. 138-143, 1999.