

TPC로 구동되는 영구자석 동기전동기의 축소차수 관측기를 이용한 센서리스 속도제어

이경구, 조용수, 이준석, 이교범
아주대학교

Speed Sensorless Algorithm using a Reduced-Order Observer for a PMSM Drive by TPC

Kyoung Gu Lee, Yong Soo Cho, June Seok Lee, and Kyo Beum Lee
Ajou University

초록

본 논문에서는 토크 예측제어 기반의 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도 제어기법을 제안한다. 제안한 기법은 Reduced Order Observer를 이용한 센서리스 방식으로 저속영역에서 불안정해지는 일반적인 센서리스의 단점을 보완하여 저속영역에서도 안정된 속도추정이 가능하다. 또한 토크 예측제어 방식을 사용하여 영구자석 동기전동기의 빠른 응답성과 토크리플 저감 효과를 얻을 수 있다. 제안된 제어기법은 시뮬레이션 결과를 통하여 타당성을 확인한다.

1. 서론

영구자석 동기전동기는 구조적 간단함과 높은 토크 그리고 가변속 범위가 넓은 전동기로서 가전 및 산업에서 응용범위를 넓혀가고 있다. 최근 고성능 구동이 필요한 정밀 구동 분야에서 빠른 가감속 능력을 필요로 하기 때문에 토크제어를 사용한다. 이러한 토크제어를 위해 전류와 자속을 공간적 크기와 방향에 대해 제어하는 벡터제어가 필요하며 벡터제어를 위해 회전자의 위치 정보가 필수이다^[4].

본 논문은 축소차수 관측기를 이용한 센서리스 제어기법을 제안한다. 제안하는 축소차수 관측기는 속도에 따라 가변되는 이득 값을 통해 정밀한 고정자 자속 값을 추정하여 회전자의 위치 정보를 얻게 된다. 또한 높은 응답성과 리플성분 저감을 위해 토크예측 제어기법을 사용한다. 영구자석 동기전동기의 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 제어기법의 우수성을 확인한다.

2. 축소차수 관측기 속도제어

영구자석 동기전동기의 전류는 식(1)과 같이 정의된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_\alpha \\ \dot{i}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{\omega}{L_s} \\ -\frac{\omega}{L_s} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_\alpha \\ \lambda_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 λ_α 와 λ_β 는 식(2), (3)에 의해 정의된다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_\alpha \\ \lambda_\beta \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda}_\alpha \\ \dot{\lambda}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_\alpha \\ \lambda_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

Reduced-order rotor flux observer로부터 다음과 같

이 축소차수 관측기의 상태방정식을 정의한다^[1].

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{x}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ x_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u \quad (4)$$

$$y = [I \ 0] \begin{bmatrix} x_m \\ x_u \end{bmatrix}$$

여기서 $x_m = [i_\alpha \ i_\beta]^T$, $x_u = [\hat{\lambda}_\alpha \ \hat{\lambda}_\beta]^T$ 이며 식(4)의 x_m 은 측정된 전류이고, \hat{x}_u 는 추정된 자속 값을 나타낸다^[2].

$$\begin{aligned} \dot{z} &= Dz + Fy + Gu \\ \hat{x}_u &= z + Hy \end{aligned} \quad (5)$$

ω 가 0에 가까운 경우 관측기가 불안정해 질 수 있다. 따라서 관측기의 극 $d = \gamma|\omega|$ 을 통해 각각의 D, H, F, G를 다음과 같이 구성한다.

$$\begin{aligned} D &= \gamma|\omega| \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ H &= Ls \begin{bmatrix} -1 & \gamma \text{sign}(\omega) \\ -\gamma \text{sign}(\omega) & -1 \end{bmatrix} \\ F &= (\gamma|\omega|Ls + Rs) \begin{bmatrix} -1 & \gamma \text{sign}(\omega) \\ -\gamma \text{sign}(\omega) & -1 \end{bmatrix} \\ G &= - \begin{bmatrix} -1 & \gamma \text{sign}(\omega) \\ -\gamma \text{sign}(\omega) & -1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

식(5)로부터 회전자의 위치 $\hat{\theta}$ 와 속도 ω 는 다음과 같다.

$$\hat{\theta} = \text{atan2}(\hat{\lambda}_\beta, \hat{\lambda}_\alpha) \quad (7)$$

$$\hat{\omega} = \frac{C(s)}{s + C(s)} s\hat{\theta} \quad (8)$$

$$\hat{\theta}_f = \frac{1}{s} \hat{\omega} \quad (9)$$

식(8), (9)으로부터 속도제어를 위한 피드백을 그림 1에 나타내었다.

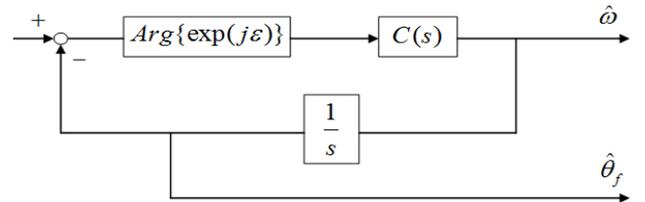


그림 1. 속도 적분 피드백과 위치 추정
Fig 1. Integral speed feedback and Position Estimation

3. 토크예측 제어

본 논문에서는 토크예측 제어기법을 제안한다. 영구자석 동기전동기는 고정자 자속 값을 사용하여 회전자의 위치정보를

언을 수 있는데, 축소차수 관측기로부터 추정된 고정자 자속은 오류정보를 포함한다. 제안하는 토크예측 제어기법은 고정자 자속의 오류정보를 포함하여 히스테리시스 대역폭을 결정하고 동일한 토크를 생성하여 지령전압 벡터를 수정하기 때문에 관측기로부터 추정된 고정자 자속의 리플과 토크 리플이 저감된다. 리플이 저감된 고정자 자속으로부터 회전자 위치와 빠른 응답성을 얻을 수 있다. 토크예측 제어기법의 전압벡터와 자속은 식(10)과 식(11)로 나타낼 수 있다^{[3][4]}.

$$\vec{u}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d}{dt} \vec{\lambda}_s \quad (10)$$

$$\vec{\lambda}_s = L i_s + \vec{\lambda}_r \quad (11)$$

식(12)으로부터 고정자 자속의 오류 정보를 포함한 전압 벡터는 다음과 같다.

$$u_s = \Delta \lambda_s T_s^{-1} \quad (12)$$

식(12)를 사용한 지령전압 벡터의 수정은 다음과 같다.

$$|u_{mod}^*| = \sqrt{(u_s^* \sin \theta^*)^2 + (\Delta \lambda_s T_s^{-1})^2} \quad (13)$$

$$\theta_{mod}^* = \arcsin \left(\frac{|u_s^*|}{|u_{mod}^*|} \sin \theta^* \right)$$

그림 2에서는 고정자 자속 오류를 사용하여 히스테리시스 대역폭을 결정하고 동등한 크기의 토크를 만들어 지령전압 벡터를 수정하는 것을 나타내었다.

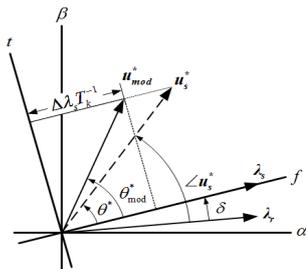


그림 2. 고정자 자속 오류를 사용한 히스테리시스 대역폭
Fig 2. Hysteresis bandwidth by using a stator flux error

4. 시뮬레이션

제안한 기법의 타당성을 검증하기 위해 영구자석 동기전동기(SPMSM)를 이용하여 저속 운전영역인 속도 100[rpm]으로 시뮬레이션 하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 영구자석 동기전동기의 파라미터를 나타낸다.

표 1 영구자석 동기전동기의 파라미터

| 변수 | 값 | 변수 | 값 |
|------------|---------|-------|-------|
| 고정자 저항 | 0.349 | 관성모멘트 | 0.002 |
| d축 인덕턴스 | 0.01560 | 계자 자속 | 0.554 |
| 극 수 | 6 | 토크 상수 | 2.493 |
| Vpk / krpm | 301.43 | | |

그림 3의 시뮬레이션 결과를 통해 저속운전 영역에서 TPC 방식을 사용하여 축소차수 속도제어 시 추정되는 자속 값이 토크예측 제어를 사용하여 리플이 저감된 것을 확인할 수 있으며, 축소차수 관측기로부터 회전자의 위치가 정확히 추정되는 것을 시뮬레이션 결과를 통해 확인 하였다.

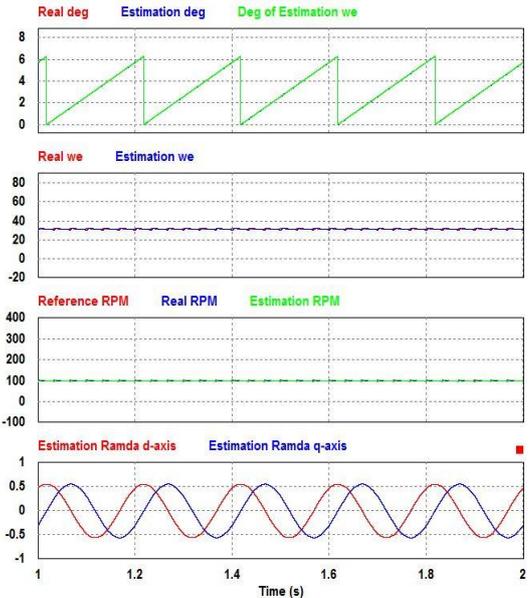


그림 3 축소차수 관측기 속도제어 : 100rpm
Fig 3. Speed control of Reduced-order observer : 100rpm

5. 결론

본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 토크예측 기법을 사용한 축소차수 관측기를 제안하였다. 축소차수 관측기로부터 추정되는 고정자 자속 값을 토크예측 기법을 사용하여 저속운전 영역에서 얻어낸 회전자 위치정보가 정확한 것을 확인하였다. 영구자석 동기전동기 기반의 PSIM 시뮬레이션을 통하여 제안하는 제어기법의 성능을 검증하였다.

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 연구 재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. S2012A040300097).

참고 문헌

- [1] T.F. Chan, W.Wang, P.Borsje, Y.K. Wong and S.L. Ho "Sensorless permanent magnet synchronous motor drive using a reduced order rotor flux observer." IET Electr. Power Appl., 2008, Vol. 2, No. 2, pp. 88 98
- [2] STEFANI R.T., SHAHIAN B., SAVANT C.J.JR., ET AL.: 'Design of feedback control system.' (Oxford University Press Inc., New York, USA, 2002)
- [3] Y.S. Cho, K.B Lee, M.Q. Li, J.H. Song, and Y.I. Lee, "Novel Torque Predictive Control for a Permanent Magnet Synchronous Motor with Minimum Torque Ripple and Fast Dynamics," IEEE APEC2013, pp. 2253 2258, 2013.
- [4] 이교범, "전동기 제어", 한티미디어, 2013.