

대용량 매입형 영구자석 동기전동기를 위한 전차원 자속 관측기 기반의 향상된 센서리스 제어 기법

임영설*, 이준석**, 이교범*
아주대학교* 한국철도기술연구원**

Improved Sensorless Control Based on Full-Order Flux Observer for High Power IPMSM

Young Seol Lim*, June Seok Lee**, Kyo Beum Lee*
Ajou University*, Korea Railroad Research Institute**

ABSTRACT

본 논문은 전차원 자속 관측기를 이용한 대용량 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)의 센서리스 제어 기법을 제안한다. 기존의 전차원 자속 관측기를 사용한 제어 방식은 IPMSM의 자속 모델을 표면 부착형 영구자석 동기전동기(SPMSM)의 자속 모델처럼 해석하기 때문에 추정되는 회전각의 오차가 발생한다. 특히 릴럭턴스 토크가 큰 대용량 IPMSM 구동 시에는 회전각 오차가 크게 나타나므로 단위 전류당 발생하는 최대토크를 감소시켜 정밀한 MTPA 제어가 불가능하다. 제안하는 알고리즘은 전차원 자속 관측기를 통해 추정된 회전각의 오차를 보상하여 대용량 IPMSM의 정밀한 센서리스 제어를 가능하게 한다. 제안하는 기법의 타당성은 시뮬레이션을 통해 확인하였으며, 기존의 알고리즘과 비교하였다.

1. 서 론

매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)는 고성능, 고효율을 갖는 장점으로 인해 최근 전기자동차 및 철도차량에서 사용이 증가되고 있다. 일반적으로 정밀한 제어를 위해 벡터제어를 통해 토크와 자속을 독립적으로 제어하며, 벡터제어를 위해서는 회전자의 위치에 대한 정보가 필수적이다. 엔코더나 레졸버 등의 센서를 사용하는 경우, 설비 비용과 부피 증가 및 유지보수 등의 문제로 인해 다양한 센서리스 제어 기법들이 연구된 바 있다.^[1-3]

전차원 자속 관측기는 전류와 자속정보를 모두 추정하여 축소차수 자속 관측기에 비해 잡음이나 왜곡에 덜 민감한 장점이 있다.^[1] 최근 저속영역에서 전차원 자속 관측기의 추정성능을 개선시키는 관측기 설계방법과 관측기의 이득을 저속과 고속영역에서 다르게 적용하여 전체적인 추정성능을 향상시키는 방법에 관한 연구가 진행되었다.^[1-3] IPMSM을 위한 관측기에서는 d축 인덕턴스만을 이용하여 전압 방정식을 나타내고 표면부착형 영구자석 동기전동기(SPMSM)처럼 해석한다. 이 방법은 회전각 추정 오차가 존재하며 대용량 IPMSM에서는 무시할 수 없을 만큼 증가하게 된다.

따라서, 본 논문에서는 회전각 오차를 보상하여 대용량 IPMSM 센서리스 제어를 위한 관측기 성능을 향상시키는 방법을 제안하고 시뮬레이션을 통해 제안하는 알고리즘의 타당성을 확인한다.

2. IPMSM의 모델링 및 전차원 자속 관측기의 구성

2.1 IPMSM의 수학적 모델링과 해석

그림 1 (a)는 일반적인 IPMSM의 구조를 나타내며, 그림 1 (b)는 식 (2)~(3)을 고려한 IPMSM의 구조를 나타낸다. 식 (2)~(3)과 그림 1 (b)를 통해 IPMSM을 SPMSM과 같이 d축 인덕턴스만을 고려하여 모델링하고 해석한다.

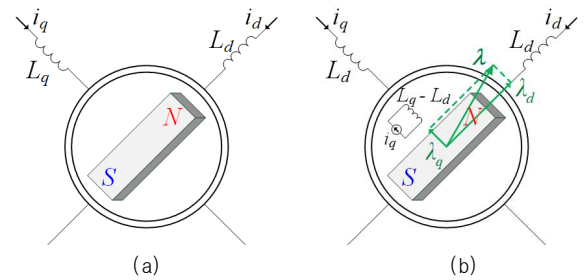


그림 1 매입형 영구자석 동기 전동기의 구조
Fig. 1 Structure of IPMSM

d q축 회전좌표계에서 IPMSM의 전압방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega_{re}L_q \\ \omega_{re}L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{re}K_E \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 d축 인덕턴스만을 고려하여 전압방정식을 나타내면 식 (2) 같다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega_{re}L_d \\ \omega_{re}L_d & R_s + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ p(L_q - L_d)i_q \end{bmatrix} + \omega_{re} \begin{bmatrix} -(L_q - L_d)i_q \\ K_E \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)로부터 자속벡터는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_E \\ (L_q - L_d)i_q \end{bmatrix} \quad (3)$$

변형된 식 (2)를 α β 축 고정좌표계에서 나타내면 식 (4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & 0 \\ 0 & R_s + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \lambda_\alpha \\ \lambda_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

그림 2는 식 (1)~(4)로부터 모델링 된 IPMSM의 좌표축을 나타낸다. 이러한 모델링을 통해 회전각의 위치정보를 추정하는 경우, 식 (3)에서 q축 자속 성분으로 인해 실제 회전각(θ_{re})과 추정 회전각($\hat{\theta}$) 사이의 오차가 발생

하며, 회전각의 오차(θ_{err})는 식 (5)와 같다.

$$\theta_{err} = \tan^{-1}\left(\frac{(L_q - L_d)i_q}{K_E}\right) \quad (5)$$

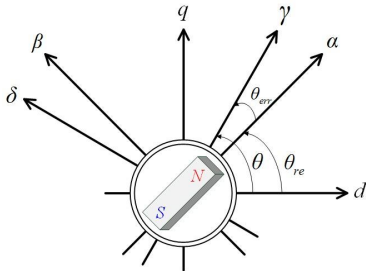


그림 2 매입형 영구자석 동기전동기 좌표축
Fig. 2 Coordinates of IPMSM

일정 토크 영역에서 단위 전류 당 최대 토크 제어 (MTPA, Maximum Torque Per Ampere)를 위한 전류 각은 식 (6)과 같고, 이로부터 최적의 d축 지령 전류는 식 (7)과 같다.

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{-K_E + \sqrt{K_E^2 + 8(L_d - L_q)^2 I_s^2}}{4(L_d - L_q)I_s}\right) \quad (6)$$

$$i_{d,MTPA}^* = I_s \cos\beta \quad (7)$$

2.2 전차원 자속 관측기

회전각 및 속도를 추정하기 위한 전차원 자속 관측기는 식 (8)과 같이 구성된다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bv + HC(\hat{x} - x) \quad (8)$$

$$\hat{x} = [\hat{i}_\alpha \hat{i}_\beta \hat{\lambda}_\alpha \hat{\lambda}_\beta]^T, v = [v_\alpha v_\beta]^T, O = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ O & A_{22} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} B_1 \\ O \end{bmatrix}, I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{11} = (-R/L_d)I, A_{12} = (-\omega_{re}/L_d)J,$$

$$A_{22} = \omega_{re}J, B_1 = (1/L_d)I, C = [I \ O],$$

$$H = \begin{bmatrix} h_{11}I + h_{12}J \\ h_{21}I + h_{22}J \end{bmatrix}$$

전차원 자속 관측기를 통해 추정된 자속 정보로부터 추정된 회전각은 식 (9)와 같다.

$$\hat{\theta} = \tan^{-1}\left(\frac{\hat{\lambda}_\beta}{\hat{\lambda}_\alpha}\right) \quad (9)$$

3. 시뮬레이션 결과

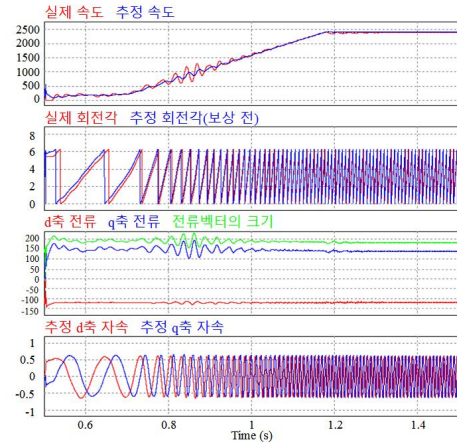
시뮬레이션은 210kW급 IPMSM을 이용하여 진행하였으며, 전동기 파라미터와 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다.

표 1 매입형 영구자석 동기전동기의 파라미터
Table 1 Parameter of IPMSM

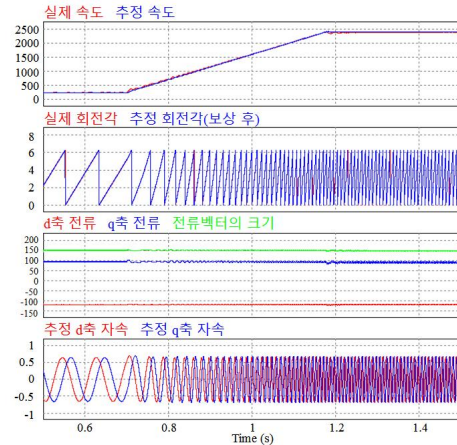
DC Link Voltage	1500[V]	R_s	0.039224[Ω]
L_d	1.997[mH]	L_q	5.499[mH]
Pole	6	Rated Power	210[kW]
Rated Voltage	1100[V _{rms}]	Rated Torque	836[N·m]
Rated Speed	2400[rpm]	Rated Current	220[A _{pk}]
EMF constant	2.077[V·s/rad]	Rotor Inertia	0.00179[kg·m ³]

50%부하(418N·m)조건 시 250rpm에서 2400rpm까지 센서리스 속도 제어를 수행하였으며, d축 전류는 MTPA를 위해 식 (7)에서 계산된 값으로 제어를 수행하였다. 그림 3 (a)와 그림

3 (b)는 각각 회전각 오차 보상 전, 후의 파형을 나타낸다. 그림 3 (a)보다 그림 3 (b)에서 동일한 토크 발생을 위해 더 낮은 고정자 전류가 요구되며, 관측기의 추정 성능이 더 뛰어난 것을 확인할 수 있다.



(a) 회전각 오차 보상 전



(b) 회전각 오차 보상 후

그림 3 시뮬레이션 결과

Fig. 3 Simulation Results

4. 결론

본 논문은 기존의 전차원 자속 관측기를 사용한 센서리스 제어 기법을 대용량 IPMSM에 적용 시 발생하는 회전각 오차를 보상하는 기법을 제안하고, 제안하는 기법 적용 시 기존 방식에 비해 관측기의 추정 성능이 더 뛰어나며, 정밀한 MTPA 제어가 가능함을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Tuovinen, T., Hinkkanen, M., Harnefors, L., & Luomi, J. (2012). Comparison of a reduced order observer and a full order observer for sensorless synchronous motor drives. IEEE Transactions on Industry Applications, 48(6), 1959-1967.
- [2] Kyoung Gu Lee, June Seok Lee, Kyo Beum Lee. (2015). Wide Range Sensorless Control for SPMSM Using an Improved Full Order Flux Observer. Journal of Power Electronics, 15(3), 721-729.
- [3] Seong Yun Kang, Jae Seung Yoon, Hye Ung Shin, Kyo Beum Lee. (2017). Sensorless Speed Control Algorithm of IPMSM for Wide Speed Range with an Improved Full Order Flux Observer. The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, 66(2), 339-346.