http://dx.doi.org/10.6113/TKPE.2013.18.6.565

개선된 전차원 자속 관측기를 사용한 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도 제어

이경구[1], 이준석[1], 이교범†

Sensorless Speed Control for PMSM Using an Improved Full-Order Flux Observer

Kyoung-Gu Lee[1], June-Seok Lee[1], and Kyo-Beum Lee†

Abstract - The sensorless speed control using the improved full-order flux observer for PMSM is proposed in this paper. A conventional full-order flux observer has a drawback that the estimated flux of this observer contains the ripple component at the low speed range due to the increased gains of the convectional full-order flux observer. The improved full-order flux observer with the modified gains guarantee the improved estimation performance without ripple component at the from zero to high speed range. To identify the performance of proposed observer, the simulation and experiment are conducted and this performance is compared with the conventional full-order observer.

Keywords: sensorless, full-order flux observer, flux observer, low speed, speed control, permanent magnet synchronous motor

1. 서 론

매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)는 영구자석이 회전자 내부에 위치하여 유효 공극이 작고, 기계강도를 향상시킬 수 있다. 적층형 규소강판으로 이루어진 회전자 표면은 와전류손을 저감시키며, 약계자의 용이성이 있다. 또한 배치된 영구자석 위치에 따라 릴럭턴스 토크가 발생되며 d-q축 인덕턴스가 다르다[1].

일반적으로 IPMSM은 서보전동기, 전기자동차용 전동기에 널리 사용되는데 최근 산업현장에서 요구되는 고효율, 고정밀 제어를 충족시키기 위해 벡터제어가 사용되어 왔다. 벡터제어는 토크와 자속을 독립적으로 제어할 수 있고 벡터제어를 위해서는 회전자의 위치정보가 필수적으로 요구된다. 회전자의 위치정보는 엔코더 또는 레졸버 등을 통해 얻게 되는데, 엔코더의 경우 장기간 사용에 따른 온도 상승 문제를 해결하기 위해서 방열용 펜의 설치가 요구되나, 전동기의 구조와 엔코더 설치 위치상의 문제로 인해 방열용 펜의 설치가 어렵다. 또한, 엔코더 및 레졸버의 설치는 전체적인 설비의 비용을 증가 시키는 원인이 된다.[2]

따라서 최근 산업현장에서는 센서에 의한 문제점의 방안으로 센서없이 회전자의 위치정보를 검출하는 센서리스 제어기법이 연구되었다.[2] 센서리스 제어기법 중 자속 추정법으로 최근 산업현장에서 많이 쓰이고 있는 축소차수 자속 관측기와 전차원 자속 관측기가 있다[1][3]. 일반적으로 전류정보와 자속정보를 추정하는 전차원 자속 관측기와 다르게 축소차수 관측기는 자속정보만을 추정한다. 따라서 계산량이 적고, 전차원 자속 관측기에 비해 구조가 간단한 장점이 있다. 그러나 자속 추정 시 필요한 d-q축 전류항을 센서를 이용하여 얻은 정보를 사용하기 때문에 센서에 의한 노이즈나 왜곡에 민감한 단점이 있다. 반면 전차원 자속 관측기는 계산량이 많고, 구조가 복잡해지는 단점이 있으나, 전류와 자속정보를 같이 추정하기 때문에 센서에 의한 잡음이나 왜곡에 대해 덜 민감하다[1][2][3].

일반적인 전차원 자속 관측기는 이득항의 분모에 속도값이 포함된다. 분모에 포함된 속도값에 의하여 저속운전 영역에서 이득값이 커지게 되는 문제가 발생한다. 저속운전 영역에서 이득값이 커지게 될 경우 추정값에 리플이 발생하여 추정성능을 저하시킨다. 이로 인해 회

Paper number: TKPE-2013-18-6-8
Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281
† Corresponding author: kyl@ajou.ac.kr, Dept. of Electrical and Computer Eng., Ajou University
Tel: +82-31-219-2376 Fax: +82-31-212-9531
[1] Dept. of Electrical and Computer Eng., Ajou University
Manuscript received Aug. 27, 2013; accepted Oct. 16, 2013

전자 위치 정보에도 왜곡이 발생한다[1][3][4][5].

본 논문에서는 전차원 자속 관측기의 개선된 이득을 이용한 센서리스 제어기법을 제안하였다. 제안하는 전차원 자속 관측기의 이득은 속도에 따라 가변되는 항으로 구성되어 d-q축 전류와 자속정보를 추정한다[3]. 또한 일반적인 전차원 자속 관측기 이득의 저속운전 시 불안정해지는 추정성능 단점을 보완하기위해 이득항을 개선하고, 안정적인 극배치를 위해 이득항을 추가하여 안정한 극점을 배치할 수 있다. 속도 정보는 추정된 회전자의 위치정보로부터 PID제어기를 사용하여 얻는다. 매입형 영구자석 동기전동기의 시뮬레이션과 실험을 통해 제안하는 전차원 자속 관측기의 이득 알고리즘의 우수성을 확인하였다.

2. IPMSM 자속 모델링

그림 1은 IPMSM의 구조를 나타낸 것이다. IPMSM의 구조는 d-q축 인덕턴스가 다르다. d축 인덕턴스와 비교하여 q축 인덕턴스 성분은 전류와 온도 및 운전시간에 영향을 받기 때문에 본 논문에서는 자속 모델링을 d축 인덕턴스만을 이용하여 모델링하고, 이를 SPMSM과 동일하게 해석하였다[3].

IPMSM은 자속을 통과하지 않는 q축 인덕턴스가 d축 인덕턴스 보다 크다. 회전자에서 극이 있는 부분인 계자 권선에 의해 자속이 발생하는 방향을 d축이라 정의하고, d축에 전기각으로 90° 앞선 방향을 q축으로 정의한다[2]. 하지만 IPMSM의 자속 모델은 부하와 온도 조건에 따라 광범위하게 변화되는 q축 인덕턴스에 의해 영향을 받는다[3]. 따라서 본 논문에서는 d축과 q축의 인덕턴스가 동일한 SPMSM의 자속 모델링과 같이 IPMSM의 자속 모델링을 d축 인덕턴스로 해석하여 정의한다. d축 인덕턴스는 부하와 온도 조건에 따라 영향을 받지 않기 때문이다[3].

$$T_e = (L_d - L_q) i_d i_q + K_E i_q \tag{1}$$

식 (1)은 IPMSM의 동기좌표계에서 릴럭턴스 토크와 영구자석에 의한 토크를 나타내는 것이다. 식 (1)은 다음과 같이 식 (2)로 나타낼 수 있다.

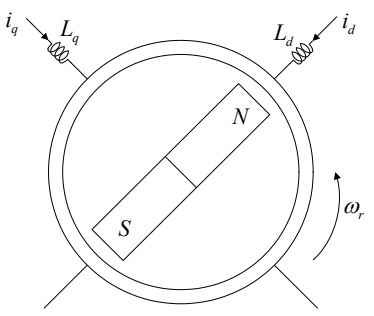


Fig. 1 Interior structure of IPMSM

$$T_e = (L_q - L_d) i_q (-i_d) + K_E i_q \tag{2}$$

식 (3)은 SPMSM의 토크 식이다.

$$T_e = \lambda_q (-i_d) + \lambda_d i_q \tag{3}$$

식 (2)와 식 (3)을 비교하면 $\lambda_q = (L_q - L_d) i_q$가 되고, $\lambda_d = K_E$가 되는 것을 알 수 있다. 따라서 λ_d, λ_q를 식 (4)와 같이 정의한다.

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_E \\ (L_q - L_d) i_q \end{bmatrix} \tag{4}$$

식 (4)를 사용하여 IPMSM 전압 방정식을 SPMSM의 전압 방정식으로 식 (5)와 같이 나타낸다[3].

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & 0 \\ 0 & R_s + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \end{bmatrix} \tag{5}$$

본 논문에서는 IPMSM의 자속 모델을 SPMSM의 자속 모델로 해석하고 전압 방정식을 정의하였다.

3. 전차원 자속 관측기

IPMSM 자속 모델링으로부터 전차원 자속 관측기는 식 (5)에 의해 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)를 돌극형 영구자석 동기전동기(SPMSM)로 간주할 수 있기 때문에 SPMSM 전차원 자속 관측기의 이득 구조 및 행렬에 따라서 선형 조합으로 제한된다. 따라서 IPMSM의 전차원 자속 관측기 d-q축 행렬의 구조는 다음과 같이 식 (6)으로 정의한다[3].

$$\begin{aligned} p\hat{x} &= \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} I & -\frac{\widehat{\omega_{re}}}{L_d} J \\ 0 & \widehat{\omega_{re}} J \end{bmatrix} \hat{x} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} I \\ O \end{bmatrix} u \\ &\quad + \begin{bmatrix} h_{11} I + h_{12} J \\ h_{21} I + h_{22} J \end{bmatrix} [I \quad O] (\hat{x} - x) \\ \hat{x} &= [\hat{i}_d \quad \hat{i}_q \quad \hat{\lambda}_d \quad \hat{\lambda}_q]^T, \; u = [v_d \quad v_q]^T \end{aligned} \tag{6}$$

$h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$는 전차원 자속 관측기의 이득을 나타낸다. 식 (6)으로부터 벡터 표시법의 원리를 사용하여 나타내면 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} p\begin{bmatrix} \hat{i} \\ \hat{\lambda} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} I & -\boldsymbol{j}\frac{\widehat{\omega_{re}}}{L_d} J \\ 0 & \boldsymbol{j}\widehat{\omega_{re}} J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i} \\ \hat{\lambda} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} I \\ O \end{bmatrix} u \\ &\quad + \begin{bmatrix} h_{11} I + \boldsymbol{j} h_{12} J \\ h_{21} I + \boldsymbol{j} h_{22} J \end{bmatrix} (\hat{i} - i) \\ &= A \begin{bmatrix} \hat{i} \\ \hat{\lambda} \end{bmatrix} + Bv + H(\hat{i} - i) \end{aligned} \tag{7}$$

식 (7)로부터 d-q축의 자속과 전류 정보를 얻게 되고, d-q축 자속 정보로부터 추정되는 회전각의 위치정보는 식 (8)과 같이 정리할 수 있다.

$$\hat{\theta} = atan2(\hat{\lambda}_q, \hat{\lambda}_d) \tag{8}$$

4. 제안하는 전차원 자속 관측기의 이득 설계

IPMSM 자속 모델링으로부터 전차원 자속 관측기의 이득을 결정하기 위해 식 (7)로부터 시스템의 특성방정식을 식 (9)와 같이 나타내었다[3].

$$\begin{aligned} |sI - A - HC| &= (s + \frac{R_s}{L_d} - h_{11} - j h_{12})(s - j\hat{\omega}_{re}) \\ &\quad + \frac{j\hat{\omega}_{re}}{L_d}(h_{21} + j h_{22}) \end{aligned} \tag{9}$$

이차방정식의 근을 $\alpha_1 + j\beta_1$과 $\alpha_2 + j\beta_2$로 결정하고 전개하면 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned} &(s-(\alpha_1+j\beta_1))(s-(\alpha_2+j\beta_2)) \\ &= s^2 - (\alpha_1+j\beta_1+\alpha_2+j\beta_2)s + (\alpha_1+j\beta_1)(\alpha_2+j\beta_2) \end{aligned} \tag{10}$$

이차방정식 식 (9)와 식 (10)을 실수와 허수로 나타내면 식 (11), (12)와 같으며, 식 (11)은 전류정보를 추정하기 위한 이득항, 식 (12)는 자속정보를 추정하기 위한 이득항이다.

$$h_{11} + j h_{12} = \frac{R_s}{L_d} - j\hat{\omega}_{re} + \alpha_1 + j\beta_1 + \alpha_2 + j\beta_2 \tag{11}$$

$$\begin{aligned} h_{21} + j h_{22} &= -(\alpha_1+\alpha_2)L_d \\ &\quad + j\hat{\omega}_{re} \cdot L_d - j\frac{L_d}{\hat{\omega}_{re}}(\alpha_1+j\beta_1)(\alpha_2+j\beta_2) \end{aligned} \tag{12}$$

여기서 β_1, β_2는 안정한 극배치를 위해 식 (13)과 같이 정의한다[3].

$$\beta_1 = \beta_2 = 0 \tag{13}$$

따라서 h11, h12, h21, h22를 나타내면 다음과 같다.

$$h_{11} = \frac{R_s}{L_d} + \alpha_1 + \alpha_2 \tag{14}$$

$$h_{12} = -j\hat{\omega}_{re} \tag{15}$$

$$h_{21} = -(\alpha_1+\alpha_2)L_d \tag{16}$$

$$h_{22} = j\hat{\omega}_{re}L_d - \left(j\frac{L_d(\alpha_1\alpha_2)}{\hat{\omega}_{re}}\right) \tag{17}$$

여기서 식 (17)의 이득값은 분모에 속도값이 포함되어 있는 형태이다. 이득값의 분모항에 속도가 포함되는 경우 저속운전 시 이득값은 커지게 되며, 커진 이득으로 인해 노이즈 및 에러에 민감하게 반응하여 추정전류, 자속정보에 리플을 발생시키게 된다. 리플이 포함된 자속정보는 회전자 위치의 추정성능을 저하시키는 원인이 된다[1][4][5]. 본 논문에서는 분모항에 속도를 제거하고, 안정한 극배치를 위해 이득 k를 추가한 개선된 이득을 가지도록 설계한다. 일반적인 전차원 자속 관측기와 제안하는 전차원 자속 관측기는 속도에 따라 가변되는 이득항을 갖는다. 그러나 일반적인 전차원 자속 관측기의 이득은 저속에서 분모에 포함된 속도항에 따라 추정성능이 저하되는 문제가 있다. 제안하는 전차원 자속 관측기의 이득은 저속운전 시 속도에 영향을 받지 않는다. 따라서 제안하는 전차원 자속 관측기의 이득은 식 (18), (19), (20), (21)로 정의하였다.

$$h_{11} = \frac{R_s}{L_d} + \alpha_1 + \alpha_2 \tag{18}$$

$$h_{12} = -j\hat{\omega}_{re} \tag{19}$$

$$h_{21} = -(\alpha_1+\alpha_2)L_d \tag{20}$$

$$h_{22} = k\left(j\hat{\omega}_{re}^2 L_d - (L_d(\alpha_1\alpha_2))\right) \tag{21}$$

여기서, $\beta_1 = \beta_2 = 0$으로 간주한다. 식 (18) ~ (21)로부터 시스템의 특성방정식을 다음과 같이 식 (22)과 같이 정의하였다.

$$G_{(s)} = \frac{s - k(\alpha_1\alpha_2) + k\hat{\omega}_{re}^2 - \hat{\omega}_{re}}{s^2 - (\alpha_1+\alpha_2)s + \hat{\omega}_{re}^2 - k\hat{\omega}_{re}^3 + k\hat{\omega}_{re}(\alpha_1\alpha_2)} \tag{22}$$

α_1, α_2는 안정한 극배치를 위해 각각 -75, -1400으로 선정하였으며, 빠른 오차수렴을 위해 k값을 다음과 같이 선정하였다.

$$\begin{aligned} &s^2 - (\alpha_1+\alpha_2)s + \hat{\omega}_{re}^2 - k\hat{\omega}_{re}^3 + k\hat{\omega}_{re}(\alpha_1\alpha_2) \\ &= as^2 + bs + c \end{aligned} \tag{23}$$

여기서, $a=1$, $b=-(\alpha_1+\alpha_2)$, $c=\hat{\omega}_{re}^2 - k\hat{\omega}_{re}^3 + k\hat{\omega}_{re}(\alpha_1\alpha_2)$ 이다. 식 (23)으로부터 근의 방정식을 사용해 k의 범위를 찾으면 식 (24)의 과정으로 정리하였다.

$$\begin{aligned} &\hat{\omega}_{re}^2 - k\hat{\omega}_{re}^3 + k\hat{\omega}_{re}(\alpha_1\alpha_2) > 0 \\ &\hat{\omega}_{re}^2 > k\hat{\omega}_{re}^3 - k\hat{\omega}_{re}(\alpha_1\alpha_2) \\ &\hat{\omega}_{re}^2 > k\hat{\omega}_{re}(\hat{\omega}_{re}^2 - \alpha_1\alpha_2) \\ &\frac{\hat{\omega}_{re}^2}{\hat{\omega}_{re}^2\alpha_1\alpha_2} < k\hat{\omega}_{re} \\ &\therefore k > \frac{\hat{\omega}_{re}}{\hat{\omega}_{re}^2 - \alpha_1\alpha_2} \end{aligned} \tag{24}$$

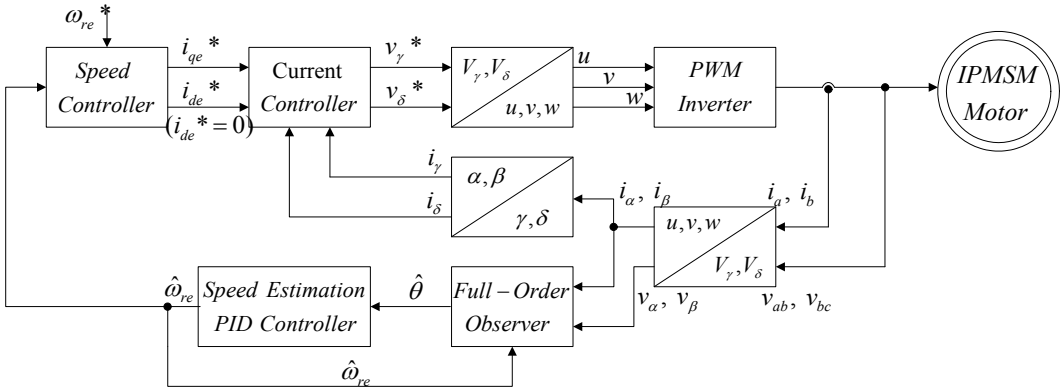


Fig. 3 Proposed Full-Order Flux Observer control systems

따라서 저속운전 영역에서 안정한 k값의 범위를 구하면 '0'에 가까운 양수를 얻을 수 있다. 그림 2는 식 (22)의 특성방정식으로부터 k를 0.01로 설정하고 50 [rpm]운전 시 근궤적법을 사용하여 안정성을 판별한 것이다.

그림 2로부터 두 개의 극이 좌방평면에 위치하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 곧 안정한 시스템이라는 것을 알 수 있다[2]. 본 논문에서는 이득 분모항에 속도정보를 포함한 기존 전차원 자속 관측기의 이득을 나타내는 식 (9) - (17)을 제안하는 전차원 자속 관측기의 이득을 나타내는 식 (18) - (24)로 변경하여 저속운전 영역에서 개선된 성능을 제안한다.

5. 속도 추정

식 (7), (8)로부터 얻은 회전각 정보를 이용하여 각속도를 추정한다. 각속도 추정은 일반적으로 PI제어기를 사용한다[2]. 이는 산업 현장에서 널리 사용되고 있다. 구조가 간단하며 제어이득을 통해 속도 제어가 가능하다. 그러나 높은 제어 이득은 속도의 진동을 가중시키는 특성을 가지게 되므로 제어 이득값의 선정이 어렵고, 추정 속도의 리플을 증가시킬 수 있다[6].

본 논문에서 제안하는 PID제어기는 추정하는 $\hat{\theta}$로부터 PID제어기를 사용하여 속도$\widehat{\omega_{re}}$를 얻는 구조를 가진다.

속도$\widehat{\omega_{re}}$는 적분항을 통해 다시 회전자의 위치정보 $\hat{\theta}_f$로 역변환 하여 PID제어 시 필요한 오차값으로 사용하

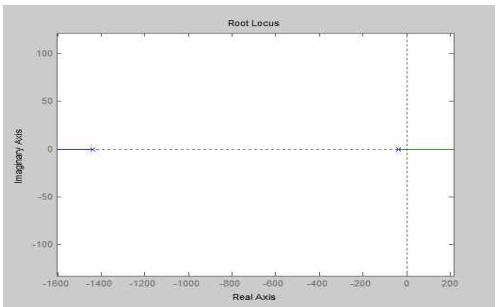


Fig. 2 Root locus method of the characteristic equation

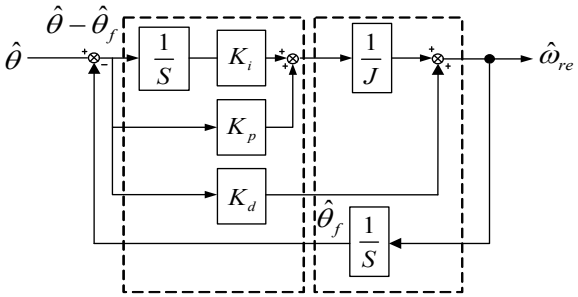


Fig. 4 Speed estimated through PID Controller and Feedforward

Table 1 Values of proposed gain

Variable	Value	Variable	Value
α 1	-75	α 2	-1400
k	0.01		

게 된다. 그림 3은 제안하는 전차원 자속 관측기의 전체 블록선도 이고, 그림 4는 PID제어기를 사용한 속도추정 블록선도이다. 그림 4의 PID제어기에서 비례 제어항은 회전자 위치의 오차에 비례하는 추정 속도를 발생하고, 적분 제어항은 누적 오차에 비례하는 추정 속도를 발생시킨다. 미분 제어항은 회전자 위치의 오차에 변화를 억제하는 추정 속도를 발생시키게 된다. 각 제어이득 K_p, K_i, K_d가 적절히 선정되면 추정 속도는 회전자 위치의 오차를 수렴하게 된다[6].

6. 시뮬레이션

본 논문에서 제안하는 이득을 적용한 전차원 자속 관측기와 일반적인 전차원 자속 관측기의 추정 성능 비교를 위해 PSIM을 사용하여 시뮬레이션을 진행 하였다.

표 1은 본 논문에서 제안하는 이득의 α 1, α 2, k 의 값이다.

Table 2 Parameter of IPMSM

Variable	Value	Variable	Value
R_s	0.349[Ω]	P	6
L_d	13.17[mH]	λ_f	0.554[wb]
L_q	15.60[mH]	Vpk / krpm	287.03
Rated Speed	1650[rpm]	Rated Power	11[kW]
Rated Current	19.9[A]		

표 2는 시뮬레이션에서 사용한 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)의 파라미터이다.

그림 5는 일반적인 전차원 자속 관측기를 사용하여 제어하는 경우 추정성능을 나타낸 것이다. 속도는 50 [rpm]에서 1650 [rpm]까지 가변한 것이고, 부하 토크는 15 [N·m]이다. 구성은 회전각(실제각, 추정각), 속도(지령속도, 실제속도, 추정속도), d-q축의 추정전류 그리고 d-q축의 추정자속이다. 시뮬레이션을 통해 50 [rpm]에서 1650 [rpm]속도 가변 시 속도제어가 가능한 것을 확인할 수 있다. 그러나 저속운전 영역인 50 [rpm]에서 d-q축의 추정자속에 리플성분이 존재하는 것을 확인할 수 있으며 추정 회전각에 리플이 생기는 것을 확인할 수 있다. 이는 d-q축의 추정자속 정보로부터 회전각 정보를 얻기 때문에 추정자속의 리플에 의한 영향이라고 할 수 있다. 또한 50 [rpm]구간에서 회전각 정보로부터 속도정보를 얻기 때문에 추정속도에 리플이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 저속운전 시 이득에 의한 리플이 추정성능을 저하시키는 원인이라고 할 수 있다.

그림 6은 본 논문에서 제안하는 이득을 적용한 전차원 자속 관측기를 사용하여 추정성능을 나타낸 것이다. 구성은 그림 5의 일반적인 전차원 자속 관측기의 시뮬레이션과 동일하다. 시뮬레이션을 통해 50 [rpm]에서 1650 [rpm]속도 가변 시 속도 제어가 가능한 것을 확인할 수 있다. 저속운전 영역인 50 [rpm]에서 d-q축 추정자속은 일반적인 전차원 자속 관측기의 추정자속과 비교해 볼 때 본 논문에서 제안하는 이득을 적용한 전차원 자속 관측기의 추정자속에 리플이 제거된 것을 확인할 수 있다. 또한 추정 회전각에 리플이 제거된 것을 확인할 수 있는데 이는 d-q축의 추정자속에 리플성분이 제거되어 우수한 추정성능을 나타낸다고 할 수 있다. 50 [rpm]구간에서 추정속도는 시뮬레이션 결과를 통해 리플이 제거되어 오차없이 추정되는 것을 나타내었다.

본 시뮬레이션 결과로부터 그림 5의 일반적인 전차원 자속 관측기의 추정 성능을 통해 이득항의 분모에 속도값이 존재할 경우 저속운전에서 추정성능이 저하됨을 확인할 수 있으며, 본 논문에서 제안하는 이득을 적용한 전차원 자속 관측기는 저속운전에서의 추정성능이 우수함을 확인할 수 있다.

7. 실 험

본 논문에서 제안한 이득을 적용한 전차원 자속 관측기의 실험을 위하여 매입형 영구자석 동기전동기를 사용하였다. 실험에서 사용한 매입형 영구자석 동기전동기의 파라미터는 표 1의 파라미터와 동일하다. 그림 7은 본 논문에서 제안하는 관측기를 실험하기 위한 M-G 셋트이다. 좌측 그림은 영구자석 동기전동기(IPMSM)와 제어 컴퓨터 그리고 스코프를 나타내며, 우측 그림은 전력변환부이다. 제어주기는 100 [μsec]이고, 스위칭 주파수는 10 [kHz]이다. 실험에서는 시뮬레이션과 같이 일반적

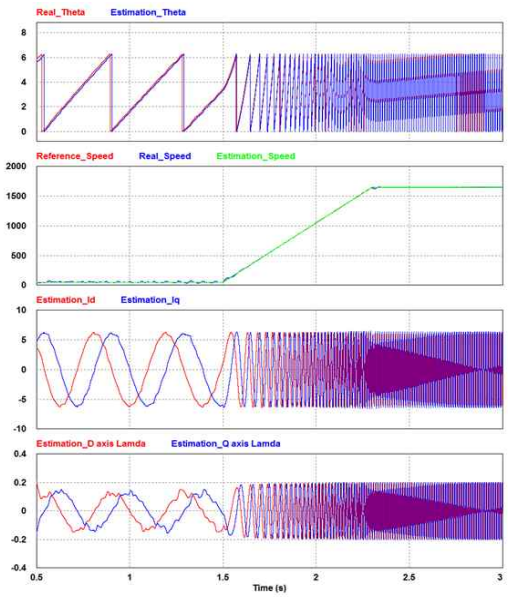


Fig. 5 The variable speed of Full-Order Flux Observer

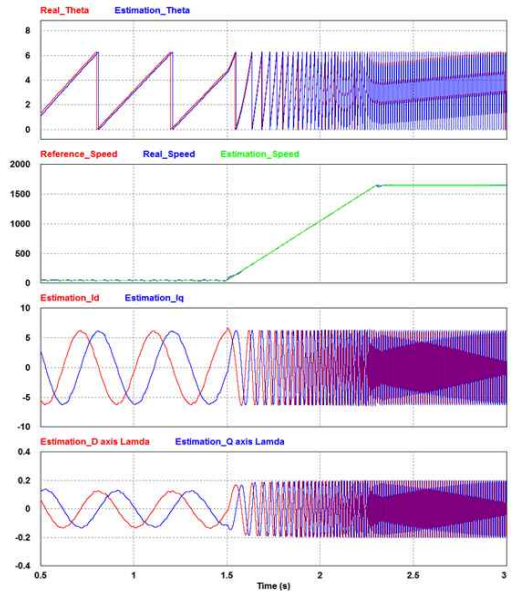
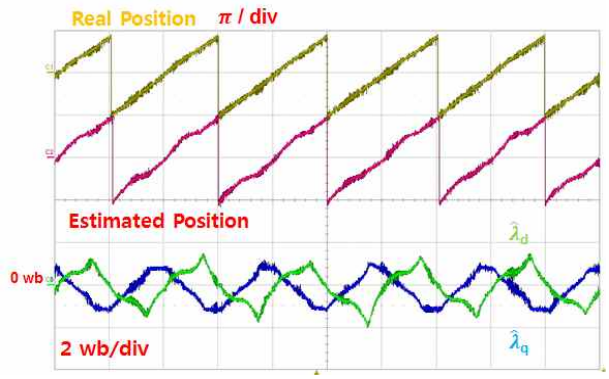


Fig. 6 The variable speed of proposed Full-Order Flux Observer

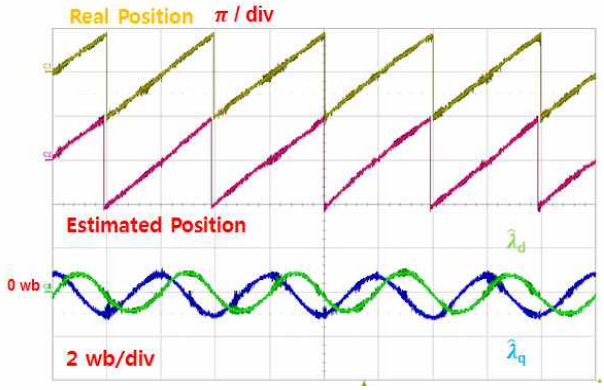
Fig. 7 Experiment set of proposed Full-Order Flux Observer and Power conversion set

으로 사용하는 전차원 자속 관측기와 제안하는 이득을 적용한 전차원 자속 관측기의 저속운전 영역 추정성능을 비교하였다.

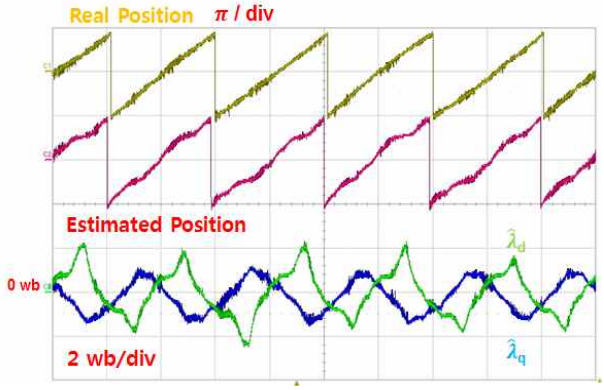
그림 8은 50 [rpm]에서 부하변동 시 일반적인 전차원 자속 관측기와 제안하는 이득을 적용한 전차원 자속 관측기의 성능을 비교하여 나타낸 것이다. 구성은 실제 회전각, 추정 회전각, d-q축 추정 자속이다. (a), (c), (e)는 일반적인 전차원 자속 관측기를 나타내었으며, (b), (d), (f)는 제안하는 이득을 적용한 전차원 자속 관측기를 나타낸 것이다. 경부하 시 (a)는 d-q축의 추정 자속에 리플이 존재하여 리플을 포함한 추정 자속으로부터 회전각 추정 시 리플이 발생하는 것을 확인할 수 있다. (b)는 d-q축의 추정 자속에 리플이 제거되었고, 추정 자속으로부터 회전각 추정 시 리플이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 중부하와 정격부하 시 (c)와 (e)는 리플이 점점 증가하는 것을 확인할 수 있다. (d)와 (f)는 자속과 회전각 추정 시 리플이 발생하지 않는 것을 확인하였다. 본 실험 결과로부터 분모항에 속도값을 포함한 이득을 가진 일반적인 전차원 자속 관측기는 저속운전 시 분모항에 포함 된 속도값에 의해 이득이 커져서 추정값에 리플이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 이득을 가진 전차원 자속 관측기는 저속운전 시 속도값에 영향을 받지않고 리플없이 안정적으로 자속을 추정하는 것을 확인하였다.



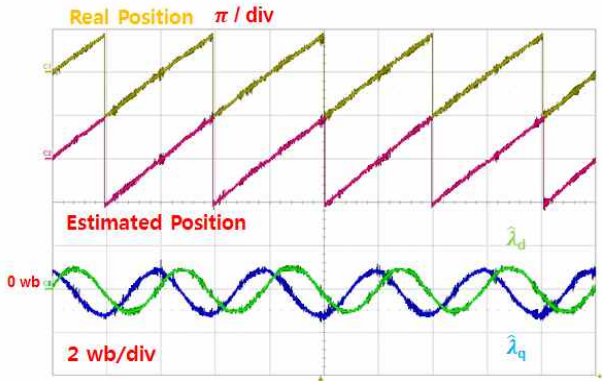
(a) Full-order flux observer : low load



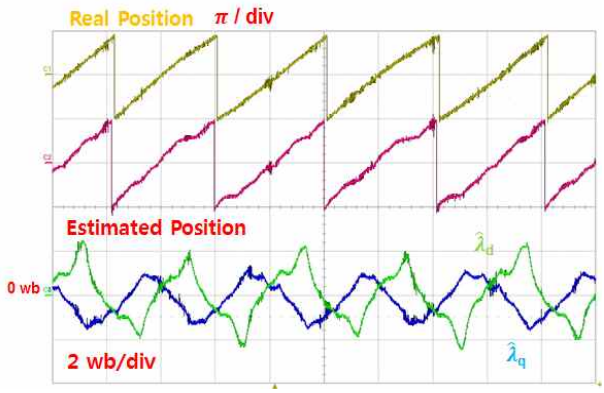
(b) Proposed Full-order flux observer : low load



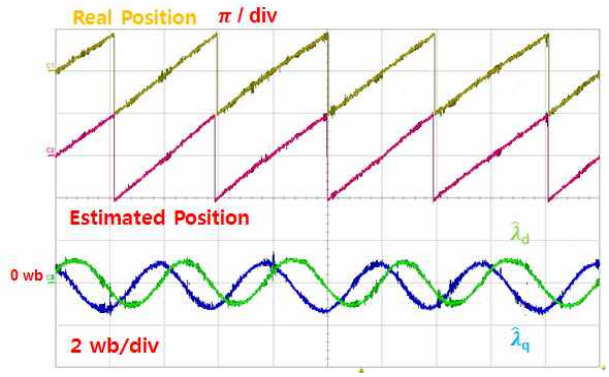
(c) Full-order flux observer : middle load



(d) Proposed Full-order flux observer : middle load



(e) Full-order flux observer : full load



(f) Proposed Full-order flux observer : full load

Fig. 8 Estimation performance comparison

그림 9는 50 [rpm]에서 정격부하(60 [N·m])를 스텝으로 인가하였을 때 제안하는 전차원 자속 관측기의 추정성능을 나타낸다. 실험 결과로부터 정격부하를 스텝으로 인가하였을 때 본 논문에서 제안하는 이득을 적용한 전차원 관측기는 안정적으로 회전각을 추정한다. 따라서 회전각으로부터 추정되는 속도정보는 급격한 외란에도 저속운전 영역에서 오차 없이 추정되며 안정적인 속도제어를 할 수 있다.

그림 10의 (a), (b)는 일반적인 전차원 자속 관측기와 제안하는 이득을 가진 전차원 자속 관측기의 센서리스 속도제어를 비교하여 나타내었고, (c)는 제안하는 이득을 가진 전차원 자속 관측기의 센서리스 속도가변을 나타내었다. (a)는 저속영역인 50 [rpm]에서 각 관측기의 센서리스 속도제어 성능을 비교하여 나타내었고, 구성은 실제각과 추정각, 실제속도와 추정속도를 나타내었다. (b)는 정격속도인 1650 [rpm]에서 각 관측기의 센서리스 속도제어 성능을 비교하였고, 구성은 (a)와 같다. (c)는 50 [rpm]에서 1650 [rpm]까지 속도가변 시 제안하는 이득을 가진 전차원 자속 관측기의 센서리스 속도제어를 나타낸다. 일반적인 전차원 자속 관측기는 이득항 분모에 속도정보를 포함하여 저속운전 시 추정성능 저하의 원인이 되는 것을 확인할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 이득을 가진 전차원 자속 관측기는 저속과 고속에서

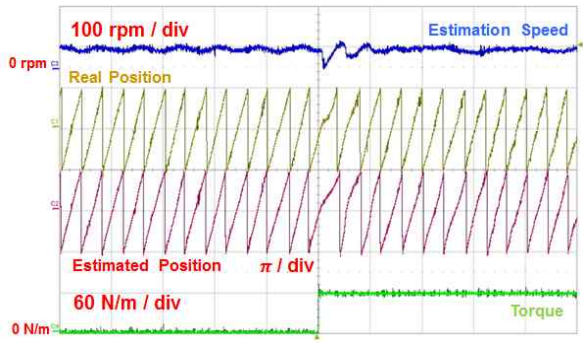
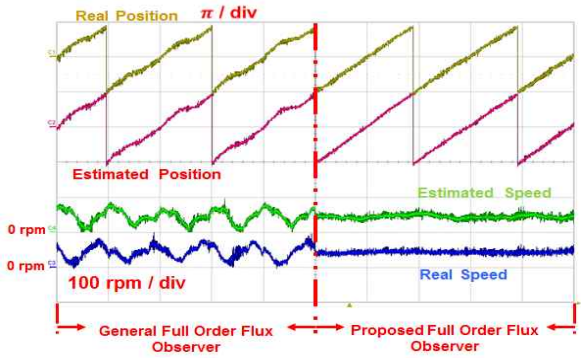
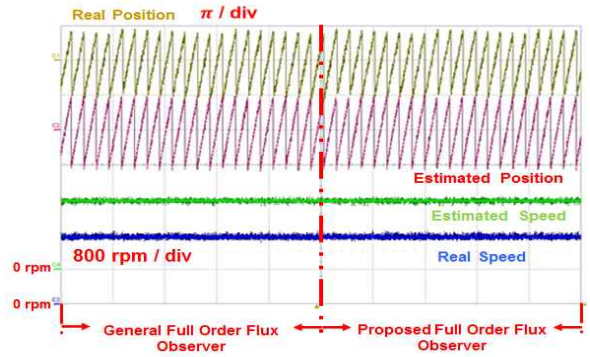


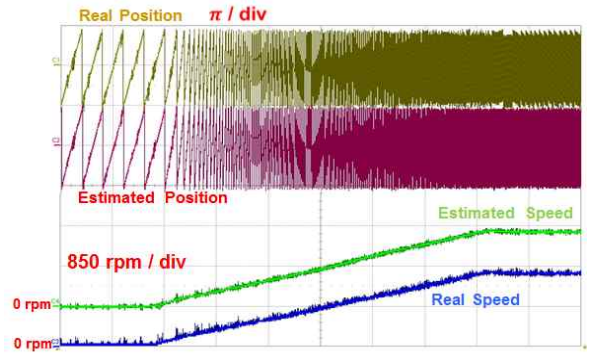
Fig. 9 Rated load step input of proposed Full-Order Flux Observer (1 sec/div)



(a) Estimation performance comparison in 50 [rpm]



(b) Estimation performance comparison in 1650 [rpm]



(c) Proposed Full-order flux observer estimation performance in 50 - 1650 [rpm]

Fig. 10 Estimation performance

안정한 성능을 나타내며, 그림 8, 9, 10으로부터 제안하는 이득을 가진 전차원 자속 관측기의 센서리스 속도제어 시 저속에서 우수한 추정성능을 확인할 수 있다.

8. 결 론

일반적인 전차원 자속 관측기의 저속영역 운전 시 추정되는 자속에 리플이 포함되는 것을 확인하였다. 리플이 포함된 자속으로부터 회전각과 속도의 추정성능이 저하되는 것을 확인할 수 있었고, 관측기의 이득항 분모에 속도정보가 포함되어 저속에서 추정성능이 저하되는

것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문에서는 전차원 자속 관측기의 이득을 변경하고, 저속에서 추정성능이 저하되는 단점을 보완하였다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘의 타당성을 시뮬레이션과 실험 결과를 통해 검증하였다.

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2013R1A1A2A10006090)

References

[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.*, Vol. 2, No. 2, pp. 88-98, 2008.

[2] K.B Lee, "Electric Motor Control." Hantee media.

[3] A. Matsumoto, M. Hasegawa, M. Tomita and K. Matsui, "Algebraic Design of Full-Order Flux Observer For IPMSM Position Sensorless Control," *2011 IEEE International Electric Machines & Dirves Conference (IEMDC)*.

[4] H Jang, S.K. Sul, J.I. Ha, ET Al "Sensorless drive of surface-mounted permanent-magnet motor by high-frequency signal injection based on magnetic saliency," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 39, No. 4, pp. 1031-1039, 2003.

[5] J.S Kim, S.K Sul "High performance PMSM drives without rotational position sensors using reduced order observer," *Conf. Rec. IEEE-IAS Annual Meeting*, Vol. 1, pp. 75-82, Oct. 1995.

[6] H.M Kim, Y.B Choo and D.H Lee, "Design of the Modified PID Speed Controller to Reduce the Speed Ripple," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 17, No. 2, April 2012.

[7] J.G Lee, J.S Hong, K.H Nam, R. Ortega, L.R Praly and A.S Astolfi, IEEE "Sensorless Control of Surface-Mount Permanent-Magnet Synchronous Motors Based on a Nonlinear Observer," *IEEE Transactions on power electronics*, Vol. 25, No. 2, Feb. 2010.

[8] M. Hasegawa and K. Matsui, "IPMSM position sensorless drives using robust adaptive observer on stationary reference frame," *IEEE Trans. on Electrical and Electronics Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 120-127, Jan. 2008.

[9] P.N Sakorn and S.W Somboon, "Stability and Dynamic Performance Improvement of Adaptive Full-Order Observers for Sensorless PMSM Drive," *IEEE Transactions on power electronics*, Vol. 27, No. 2, pp. 588-600, Feb. 2012.

[10] A. Matsumoto, M. Hasegawa and K. Matsui, "A novel flux model and decoupling control on maximum torque control frame for IPMSM position sensorless vector control," *Proc. SPEEDAM 2010*, pp. 312-317, Jun. 2010.

[11] G.D Andreescu, "Adaptive observer for sensorless control of permanent magnet synchronous motor drives," *Electr. Power Compon. Syst*, pp. 107-119, 2002.

[12] S. Shinnaka, "New sensorless vector control using minimum-order flux state observer in a stationary reference frame for permanent-magnet synchronous motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 53, No. 2, pp. 388-398, 2006.

[13] C De Angelo, G. Bossio, J. Solsona, ET Al, "Mechanical sensorless speed control of permanent-magnet AC motors driving an unknown load," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 53, No. 2, pp. 406-414, 2006.

[14] O. Wallmark, L. Harnefors, O. Carlson, "An improved speed and position estimator for salient permanent-magnet synchronous motors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 52, No. 1, pp. 255-262, 2005.

[15] M, Tomita, M. Hasegawa, and K. Matsui, "A design Method of Full-Order Extended Electromotive Force Observer for Sensorless Control of IPMSM," *Proc. of IEEJapan IAS 2009*, pp. 339-342, 2009.

[16] M. Hasegawa and K. Matsui, "Position sensorless control for interior permanent magnet synchronous motor using adaptive flux observer with inductance identification," *Electric Power Applications, IET*, Vol. 3, No. 3, pp. 209-217, May 2009.

이경구(李京求)

1980년 8월 6일생. 2012년 한국산업기술대 메카트로닉스공학과 졸업. 2013년~현재 아주대 전자공학과 대학원 석사과정.

이준석(李濬錫)

1986년 3월 18일생. 2011년 아주대 전자공학부 졸업. 2013년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자공학과 박사과정.

이교범(李敎範)

1972년 6월 30일생. 1997년 아주대 공대 전자공학부 졸업. 1999년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2003년 고려대 전기공학과 졸업(공박). 2003년~2006년 The Institute of Energy Technology, Aalborg University in Denmark. 2006년~2007년 전북대 전자정보공학부 조교수. 2007년~현재 아주대 전자공학부 부교수. 당 학회 JPE 편집위원.