

개선된 외란관측기를 이용한 영구자석 동기전동기의 위치 센서리스 제어

박정우
현대로템

A Improved Disturbance Observer Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive

Jeong-Woo Park
Hyundai Rotem

ABSTRACT

PMSM의 위치 센서리스 제어는 인덕턴스를 이용한 고주파 주입 기법과 모델기반 기법으로 나뉜다. 모델기반 기법은 전압 방정식을 이용하는 확장 역기전력 기법(Extended EMF)과 전압 모델을 이용하는 Active Flux 기법이 주로 사용되는데, [1]은 Active Flux 기법으로 외란 관측기를 이용하여 전압모델의 순수적분에서 발생하는 DC-Offset Drift문제를 해결하고 극저속 안티 와인드업 기법을 제안하여 전 구간 센서리스를 제안했다. 본 논문은 [1]의 외란관측기 개선을 제안한다.

1. 서론

확장 역기전력 기법과 고주파 주입기법은 부하 급변 상황이 나 고부하 조건에서 위치 추정을 제대로 못하는 문제가 있다. 이는 확장 역기전력 기법은 추정 속도와 실제 속도의 속도 오차가 작을 때만 성립하는 각도추정을 위한 근사 조건이 있으며, 고주파 주입 기법은 각도 오차 θ_{err} 가 작을 때만 성립하는 $\sin(\theta_{err}) \approx 0$, $\cos(\theta_{err}) \approx 1$ 로 근사 조건이 있기 때문이다.

[1]의 Active Flux 기법은 위와 같은 근사 조건이 없으므로 급브레이크로 인한 부하 급변이 자주 발생하는 견인 구동에도 안정적으로 사용될 가능성이 있으며, [1]에서 극저속에 대한 대책도 제안되어 전 구간 위치 센서리스의 구현이 가능하다.

[1]의 Active Flux 기법은 [2]의 전압지령 리미터 코드를 같이 사용하면, 확장 역기전력 기법과 달리 정지 및 극저속 시 센서리스만으로 초기기동이 된다. 강제 정렬 또는 초기 회전자 위치 추정, 오픈루프 또는 I-F 저속 구동 등이 필요 없으며, 센서리스 기동으로 어떤 초기각 조건에도 전동기제어의 경우 과전류 폴트, 발전기제어의 경우 과전압 폴트가 발생하지 않고 자체 기동이 가능하다. 강제정렬 후 기동 시 응답이 더 빠르다.

[1]의 Active Flux 기법도 인버터 OFF 상태에서 전동기의 전기적 운전주파수 5Hz 이상 회전 중 구동 재개(Flying Start)는 전동기제어의 경우 과전류 폴트, 발전기제어의 경우 과전압 폴트가 발생하는 문제가 있어, 항상 Restart 기법을 먼저 투입 후 Restart 기법의 추정 각도와 추정 속도 등을 Active Flux 기법에 전달한 뒤 기동해야 된다.

2. 본 문

2.1 개선된 외란관측기 Active Flux 센서리스 기법

[1]에서 제안된 외란관측기는 그림 1과 같으며, 본 논문에서 제안하는 개선된 외란관측기는 그림 2와 같다.

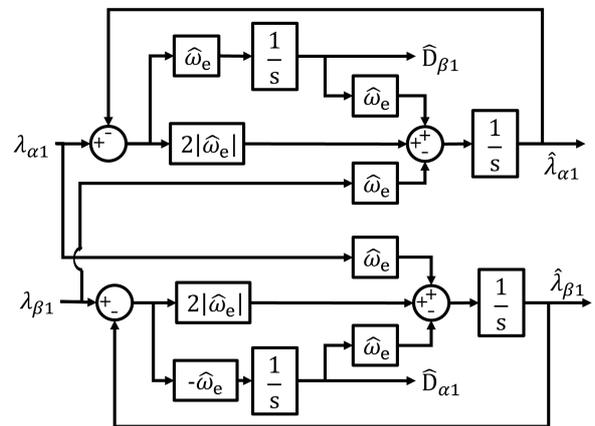


그림 1 [1]에서 제안된 외란 관측기
Fig. 1 Disturbance Observer proposed in [1]

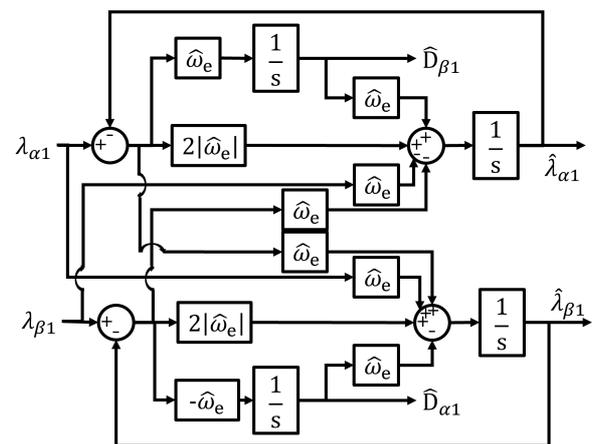


그림 2 본 논문에서 제안하는 외란 관측기
Fig. 2 Disturbance Observer proposed in this paper

[1]에서 제안하는 루엔버거 업저버는 식 (1)과 같다.

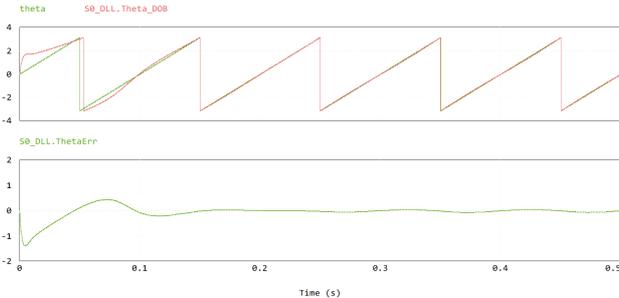
$$\frac{d}{dt} \hat{\lambda}_{\alpha\beta D} = A_m \hat{\lambda}_{\alpha\beta D} + L_m [\lambda_{\alpha\beta 1} - C_m \hat{\lambda}_{\alpha\beta D}] \quad (1)$$

[1]에서 극점을 $(s + |\omega_e|)^4$ 의 사중근으로 설정하는 방식이 제안되었지만, 그림 1을 수식으로 변환하면 식(2)처럼 되지 않고 식(3)처럼 되고 식(3)의 경우 사중근 극점이 아니다. [1]의 극점 설정과정에서 $p_2 = -p_3 = -\omega_e$ 이어야 하는데, 그림 1을 재구성하면 $p_2 = -p_3 = 0$ 이 되어 근의 위치에 허수 성분이 있어서 불안정할 수 있다. 통상 극점에 허수 성분이 있으면 불안정하고, 전동기 속도 증가 시 음의 실수 성분으로만 극점이 멀어지게 이동해야 안정적이기 때문이다.

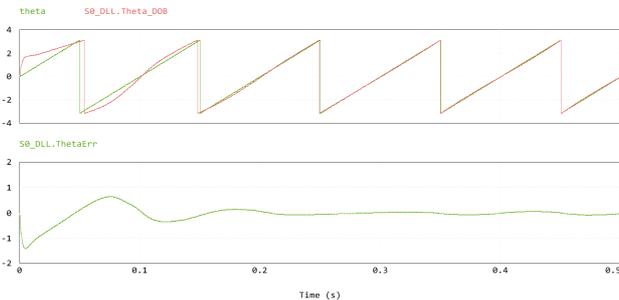
$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\lambda}_{\alpha 1} \\ \hat{\lambda}_{\beta 1} \\ \hat{D}_\alpha \\ \hat{D}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_e(D_\beta - \lambda_{\beta 1}) \\ \omega_e(\lambda_{\alpha 1} - D_\alpha) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2|\omega_e| & -\omega_e \\ \omega_e & 2|\omega_e| \\ 0 & -\omega_e \\ \omega_e & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{\alpha 1} - \hat{\lambda}_{\alpha 1} \\ \lambda_{\beta 1} - \hat{\lambda}_{\beta 1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\lambda}_{\alpha 1} \\ \hat{\lambda}_{\beta 1} \\ \hat{D}_\alpha \\ \hat{D}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_e(D_\beta - \lambda_{\beta 1}) \\ \omega_e(\lambda_{\alpha 1} - D_\alpha) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2|\omega_e| & 0 \\ 0 & 2|\omega_e| \\ 0 & -\omega_e \\ \omega_e & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{\alpha 1} - \hat{\lambda}_{\alpha 1} \\ \lambda_{\beta 1} - \hat{\lambda}_{\beta 1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

3. 시뮬레이션 결과



[1]에서 제안된 외란관측기를 이용한 제어 시 위치추정 응답성



본 논문이 제안하는 외란관측기를 이용한 제어 시 위치추정 응답성

그림 3 [1]과 제안하는 기법의 위치추정 응답 비교

Fig. 3 Comparison of Position Estimation Response using [1] and proposed method

그림 3은 [1]과 본 논문이 제안하는 기법의 시뮬레이션 결과이며, [1]과 본 논문의 위치 추정이 안정적임을 알 수 있다.

4. 부가적인 정보

[1]의 극저속 구간에서의 안티와인드업은 [2]의 방식대로 제한하였다. 식(5)는 위치추정이 부정확할 경우에 전류 dq 변환이 오차가 크므로 전류지령을 사용한다.

$$|\hat{\lambda}_r| = \sqrt{(\hat{\lambda}_{\alpha r})^2 + (\hat{\lambda}_{\beta r})^2} \quad (4)$$

$$\lambda_{lim} = \sqrt{(\lambda_{ds}^{r*})^2 + (\lambda_{qs}^{r*})^2} = \sqrt{(\lambda_f + L_d i_{ds}^{r*})^2 + (L_q i_{qs}^{r*})^2} \quad (5)$$

$$\lambda_{\alpha\beta r, lim} = \lambda_{\alpha\beta r} \frac{\lambda_{lim}}{|\hat{\lambda}_r|} \quad (6)$$

극저속 구간에 추정 속도는 높게 되어 증속 구동인 것처럼 제어하다가 다시 추정 속도가 낮게 되어 극저속 구동인 것처럼 제어하는 것을 반복하여 제대로 제어가 되지 않았다. 이를 방지하고 정상영역 운전을 극대화하기 위해, 전기적 운전주파수 0.6Hz 이상일 때 정상영역, 0.15Hz 이하일 때 극저속 영역으로 히스테리시스를 주었다.

정속부하 토크제어에서 0.4Hz 미만 운전은 항상 각도, 속도 모두 오차가 크고, 0.4Hz ~ 0.6Hz 운전은 각도 오차는 없지만, 속도 오차는 크며, 0.6Hz 이상부터 정상 운전된다.

무부하 속도제어에서 속도 제어 대역폭을 1.6Hz로 할 경우 5Hz 미만 운전하면 추정 속도가 울렁이거나 간헐적으로 점프하고 5Hz 이상에서 정상운전 되며, 속도 제어 대역폭을 0.4Hz로 할 경우 전 구간 운전이 된다.

무부하 정지상태 초기기동 실험 시 초기에 1초 정도 정지, 정역전환 울렁이는 상태로 초기 응답 지연이 있다.

외란관측기 게인 k_{df} 은 1, k_{af} 는 $2\pi 100$, 위치 T2S의 감쇄비는 1, 고유주파수는 15Hz, 속도 T2S의 감쇄비는 1, 고유주파수는 4Hz로 하였다.

자속 추정을 확인하기 위해, 다음과 같이 실제 자속과 일치시켜 이용하였다. 실제 자속과의 관계는 아래와 같다. 극저속에서 역기전력이 DC 수준이므로 외란처럼 작용하여 제거되며, 안티와인드업으로 극저속에서 버티기만 하는 것으로 판단된다.

$$\hat{\lambda}_{ds}^r = (\lambda_f + (L_d - L_q) i_{ds}^r) + \cos(\theta_{re}) (-\hat{\lambda}_{\alpha r}) + \sin(\theta_{re}) (-\hat{\lambda}_{\beta r}) \quad (7)$$

$$\hat{\lambda}_{qs}^r = -\sin(\theta_{re}) (-\hat{\lambda}_{\alpha r}) + \cos(\theta_{re}) (-\hat{\lambda}_{\beta r}) \quad (8)$$

5. 결론

본 논문은 Active Flux 기반의 외란 관측기를 이용한 센서리스 논문 [1]을 개선하기 위해 외란 관측기 구성을 변경하였다. 제안하는 외란 관측기를 이용하여 안정적이다.

참고 문헌

- [1] Y. Park and S. -K. Sul, "Sensorless Control Method for PMSM Based on Frequency-Adaptive Disturbance Observer," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 2, no. 2, pp. 143-151, June 2014
- [2] L. Harnefors and H. . -P. Nee, "Model-based current control of AC machines using the internal model control method," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 34, no. 1, pp. 133-141, Jan.-Feb. 1998