

역기전력과 사각고주파 전압주입 센서리스 기법의 절환을 통한 영구자석 동기전동기의 회전자 자속기준 벡터제어

박정우 이동명

홍익대학교 전자전기공학부

Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors with Crossover of Back-EMF-based and Square-wave High Frequency Voltage Injection-based Sensorless Schemes

Jeong-Woo Park and Dong-Myung Lee

School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University

ABSTRACT

회전자 자속기준 벡터제어(FOC)의 센서리스의 기법은 다양하지만, 크게 역기전력을 이용하는 방식과 인덕턴스를 기반으로 하는 방식으로 나눌 수 있다. 역기전력을 기반으로 하는 기법은 중속이상의 영역에서는 뛰어난 성능을 보이지만, 저속영역에서 역기전력이 작기 때문에 저속에서 불리함이 있다. 반면, 인덕턴스를 기반으로 하는 기법 중 캐리어 신호를 주입하는 기법은 전동기의 자기적 돌극성(Magnetic saliency)을 이용하므로 저속에서도 사용가능하지만, 고속에서는 전압제한으로 인하여 전압주입에 불리함이 있으며, 고주파잡음의 문제가 있다. 따라서 본 논문은 저속영역에서 사각파 형태의 고주파 주입 센서리스기법을 사용하고, 중속이상의 영역에서 역기전력 센서리스 기법으로 절환(Crossover)하는 방식을 제안한다. 기존의 속도 추정 기법과 제안하는 기법을 시뮬레이션을 통해 비교한다.

1. 서론

N. Matsui에 의해 역기전력을 이용한 센서리스 기법이 제안되었고, 다양하게 발전되어 왔다. 그러나 N. Matsui의 센서리스 기법은 저속영역에서 역기전력이 작기 때문에 저속에서 불리함이 있으므로, 저속영역에서 간헐적으로 사각파 펄스신호를 주입하는 기법을 제안하였다.^[1]

한편 인덕턴스를 이용하는 방식은 고주파 전압주입기법이 대표적이다. 최근 관측기 기반의 사각고주파 전압을 주입하는 기법^[2]이 제안되었다. 관측기만 사용해도 위치 및 속도 추정이 가능하지만, 속도제어 대역폭 120[rad/s] 등의 조건을 가지는 것으로 알려져 있다.^[3] 사각고주파 주입은 속도제어 대역폭을 넓히며, 정밀도를 높였다.^[2]

본 논문에서는 저속에서 사각고주파 주입기법을 사용하고, 중속 이상에서 역기전력 기법으로 절환하는 기법을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법의 타당성을 검증한다.

2. 센서리스 방식

2.1 전류모델 역기전력 센서리스기법^[4]

N. Matsui의 역기전력을 이용한 센서리스 기법은 센서리스로 구동하면 회전자 각도를 모르는 상황이므로, 실제 회전자 위치 기준 좌표계 $d-q$ 축에 대응하는 추정된 회전자위치 기준

좌표계 $\gamma-\delta$ 축을 설정하여 수식을 전개함으로 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^r \\ v_{qs}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d - \omega_{re}L_q & \\ \omega_{re}L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{re}\lambda_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_{\gamma s}^r \\ v_{\delta s}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d - \omega_{re}L_q & \\ \omega_{re}L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\gamma s}^r \\ i_{\delta s}^r \end{bmatrix} + \lambda_f \hat{\omega}_{re} \begin{bmatrix} -\sin\Delta\theta \\ \cos\Delta\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$\Delta\theta = \hat{\theta}_{re} - \theta_{re}$ 이다. 여기서 가상의 축의 회전자의 위치가 우연히 일치한다면 $\Delta\theta = 0$ 이며, 식(1)과 식(2)의 두 번째 항인 역기전력이 같아지므로 위치를 추정할 수 있는 원리이다.

식(1), (2)를 시간에 대한 미분p에 대해 이산시간영역에서 비교한 N. Matsui의 IPM 전류모델^[4]의 결과는 아래와 같다.

$$\hat{\theta}[n] = \hat{\theta}_{re}[n-1] + \frac{T_s}{\lambda_f} e_M[n] + K_\theta \text{Sgn}[\hat{\omega}_{re}] \Delta i_d[n] \quad (3)$$

$$\hat{\omega}_{re} = e_M[n] \frac{1}{\lambda_f} + \frac{K_\theta}{T_s} \text{Sgn}[LPF[\hat{\omega}_{re}]] \Delta i_d[n] \quad (4)$$

$$e_M[n] = e_M[n-1] - K_\theta \Delta i_q[n] \quad (5)$$

2.2 사각 고주파주입 센서리스 기법

관측기를 이용한 사각 고주파 주입기법은 그림 1과 같다.

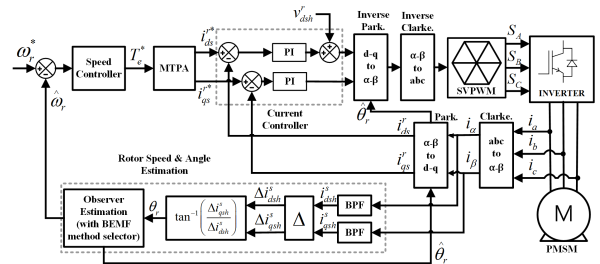


그림 1. 제안하는 사각파 주입 시스템 전체 블록도

사각 고주파를 d축 전압지령으로 주입하며, 전동기를 거쳐, d,q축 전류에서 적절한 필터링으로 돌극성을 검출한다.

v_{dsh}^r 은 d축 전압으로 주입되는 사각 고주파다. 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{dsh}^r[n-1] \\ v_{qsh}^r[n-1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_h \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} v_{dsh}^r[n] \\ v_{qsh}^r[n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V_h \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

i_{dsh}^s, i_{qsh}^s 는 대역통과필터(BPF)를 통해 필터링하여 검출한다. 필터링을 통해 검출된 고주파항의 차이 $\Delta i_{dsh}^s, \Delta i_{qsh}^s$ 의 관

계는 식(7)과 같으며, 식(8)의 회전자 각도가 추정된다.^[3]

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{dsh}^s \\ \Delta i_{qsh}^s \end{bmatrix} \approx \frac{V_h \Delta T_s}{L_{dh}^r} \begin{bmatrix} \cos \theta_r \\ \sin \theta_r \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\hat{\theta}_r = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta i_{qsh}^s}{\Delta i_{dsh}^s} \right) \quad (8)$$

회전자 각도는 그림 2의 관측기의 입력이 되며, 관측기를 통해 속도와 위치가 추정된다. 위치 및 속도 관측기는 그림 2와 같이 설계한다.^[3]

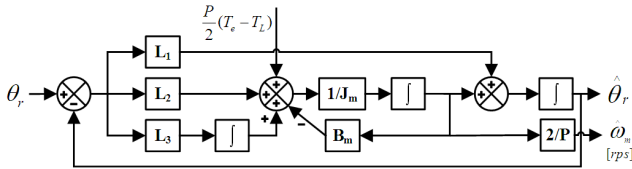


그림 2. 위치 및 속도 관측기 구조

$$T_e = J_m \frac{d\omega_{re}}{dt} \frac{2}{P} + B_m \omega_{re} \frac{2}{P} + T_L \quad (9)$$

식(9)의 전동기 식을 식(10)의 관측기 형태로 변경한다.

$$\dot{\hat{x}} = \mathbf{A}\hat{x} + \mathbf{B}u + \mathbf{L}(y - \mathbf{C}\hat{x}) \quad (10)$$

관측기의 이득행렬 L은 식(11)을 이용하여 구한다.

$$\det[s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})] = 0 \quad (11)$$

2.3 적절한 속도에서 절환

초기구동에서 200[rpm]까지 사각 고주파주입을 통해 위치와 속도를 추정하고, 200[rpm]이후부터 역기전력 기법으로 적절히 절환된다. 이후 속도를 증가시키면서 MTPA가 수행되는 정토크구간을 넘어, 정출력구간에서 약계자제어가 수행되므로 전압 제한으로 인해 적절한 속도구간에서 고주파주입은 중단된다.

2.4 시뮬레이션 결과

그림 3은 사각고주파와 관측기만을 이용한 시뮬레이션 결과이다. 사각고주파와 관측기만을 이용하면 오차가 누적되어 고속에서 불안정해짐을 알 수 있다. 그림 4는 역기전력 기법만으로 구동한 결과이다. 저속에서도 안정적 구동을 하려면 초기 응답성이 좋지 않음을 알 수 있다. 그림 5는 200[rpm]까지는 사각고주파 주입기법으로, 200[rpm]이후에는 마쯔이의 역기전력 기법으로 절환하여 구동시킨 결과이다. 응답성이 좋으며, 안정적으로 구동됨을 알 수 있다. 그러나 관측기는 실제 구현 시 모터의 관성계수와 마찰계수가 실제 값과 다르다면, 높은 주파수 영역에서 영향을 미칠 수 있다.

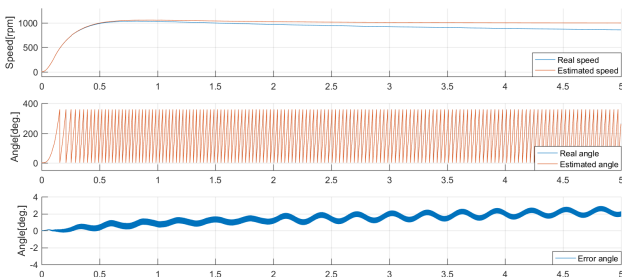


그림 3. 사각 고주파 주입기법만을 적용 시 시뮬레이션 파형

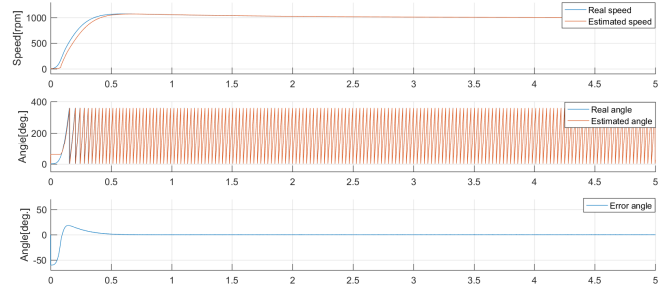


그림 4. 역기전력기법만을 이용 시 시뮬레이션 파형

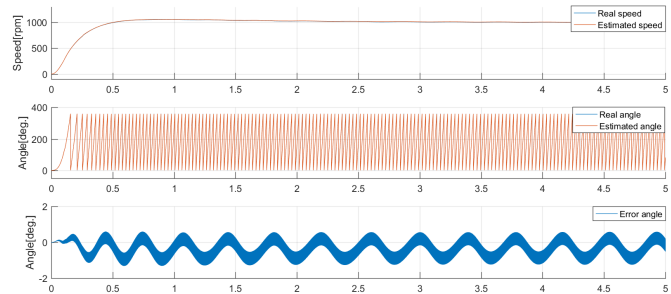


그림 5. 제안한 사각 고주파 주입기법과 역기전력기법의 절환기법 적용 시 시뮬레이션 파형

3. 결론

본 논문은 저속에서 사각고주파 주입기법을 사용하고, 중속 이상에서 역기전력 기법으로 절환하는 기법을 제안하였다. 역기전력 기법만으로 구동하면 초기 응답성이 좋지 않고, 옴저버와 사각고주파 주입만으로 구동하면 오차가 누적되어 불안정해진다. 제안하는 기법은 고주파 주입기법에서 역기전력 기법으로 절환하여 초기 응답성과 불안정성을 개선하였으며, 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법의 타당성을 검증하였다.

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음.(2016R1A2B4011954)

참고 문헌

- [1] R. Mizutani, T. Takeshita, and N. Matsui, "Current model-based sensorless drives of salient-pole PMSM at low speed and standstill," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 34, no. 4, pp. 841-846, Jul./Aug. 1998.
- [2] Y. D. Yoon, S. K. Sul, S. Morimoto, and K. Ide, "High-bandwidth sensorless algorithm for ac machines based on square-wave-type voltage injection," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 47, no. 3, pp. 1361-1370, May/June 2011.
- [3] 설승기, "전기기기 제어론," 홍릉과학출판사, 2008.
- [4] T. Takeshita and N. Matsui, "Sensorless control and initial position estimation of salient-pole Brushless DC motor," Proc. of IEEE AMC'96-MIE, pp. 18-23, 1996.