

과변조 영역에서의 영구자석동기전동기의 센서리스 제어특성 개선 알고리즘

이한솔, 최해준, 조관열, 김학원
한국교통대학교

Algorithm of Improving Sensorless Control Characteristics of PM Synchronous Motor in Over Modulation

Han Sol Lee, Hae Jun Choi, Kwan Yuhl Cho, Hag Wone Kim
Korea National University of Transportation

ABSTRACT

영구자석 동기전동기의 회전자 위치검출센서를 사용하지 않는 센서리스 제어를 위해서는 모터에 인가되는 전압과 전류를 정확하게 알아야 한다. 일반적으로 영구자석동기전동기 모델기반의 회전자 위치검출 관측기에 사용되는 전압은 전류제어기의 출력인 전압지령 값을 사용한다. 그러나 전압지령 값은 인버터에 사용되는 데드타임의 영향으로 인해 실제 모터에 인가되는 전압과 차이를 갖는다. 특히 고속운전 시 과변조 구간에서의 전압지령 값은 실제 모터에 인가되는 전압과 큰 오차를 갖게 된다. 데드타임에 의한 전압 오차는 회전자 위치검출 오차에 미치는 영향이 비교적 작게 나타나지만, 과변조 구간에서의 전압 오차는 회전자 위치검출 오차를 매우 크게 만들어 센서리스 제어를 불가능하게 만들 수 있다. 본 논문에서는 추가적인 전압검출회로를 사용하여 모터에 인가되는 3상 전압을 검출하여 회전자 위치검출 관측기에 적용함으로써 과변조 구간까지 센서리스 제어 범위를 확장하는 방법을 시뮬레이션을 통하여 타당성을 검증하였다.

1. 서론

영구자석 동기전동기는 직류전동기 및 유도전동기와 대비하여 높은 효율과 우수한 제어성능으로 인해 전기자동차, 가전기기, 산업용 등의 다양한 분야에서 사용되고 있다. 영구자석 동기전동기의 백터제어를 위해서는 회전자 자속의 위치를 알아야 하고 회전자의 자속의 위치는 회전자의 위치 정보로부터 알아낸다. 일반적인 경우 절대형 엔코더(Absolute encoder), 레졸버(Resolver) 또는 홀센서(Hall sensor)등의 위치 검출용 센서를 사용하여 회전자의 위치를 검출한다. 그러나 회전자 위치 검출용 센서는 가격이 비싸다는 측면과 설치를 위한 별도의 공간 확보가 필요하다.^[1] 이러한 단점을 극복하기 위하여 영구자석 동기전동기의 센서리스 구동 알고리즘에 대한 연구가 진행되었다.^{[1][2]} 센서리스 구동방식으로는 역기전력에 기반한 방식과 위치에 따른 인덕턴스 변화에 기반한 방식으로 구분할 수 있다. 역기전력에 기반한 방식 중 Extended EMF 방식의 경우 식 (1), (2)의 영구자석동기전동기의 모델로부터 식 (3)과 같이 추정된 dq 역기전력으로부터 회전자의 위치오차를 추정하고 PI 제어기를 통하여 속도를 추정한다.^[2] 식 (2)의 역기전력 추정 시 dq 전압은 일반적으로 전류 제어기의 출력인 dq 지령전압을 사용한다.

$$\begin{bmatrix} v_r \\ v_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + L_d s & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_q & r_s + L_d s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r \\ i_\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_r \\ e_\delta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} e_r \\ e_\delta \end{bmatrix} = E_{ex} \begin{bmatrix} -\sin \Delta \theta_r \\ \cos \Delta \theta_r \end{bmatrix} + (\hat{\omega}_r - \omega_r) L_d \begin{bmatrix} -i_\delta \\ i_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} v_r + \hat{\omega}_r L_q i_\delta - (r_s + L_d s) i_r \\ v_\delta - \hat{\omega}_r L_q i_r - (r_s + L_d s) i_\delta \end{bmatrix}$$

$$\Delta \theta_r = \tan^{-1} \left(\frac{e_r}{e_\delta} \right), \quad \hat{\omega}_r = \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \Delta \theta_r \quad (3)$$

그림 1 은 선형변조 영역과 과변조 영역에서의 지령전압과 삼각파 및 인버터의 출력전압의 기본파를 나타낸다. 과변조 영역에서는 그림 1(b)와 같이 지령전압의 크기가 삼각파보다 크기 때문에 출력전압에 왜곡이 생기게 된다. 따라서 지령전압과 출력전압에 오차가 생기게 된다.

따라서 센서리스 제어 시 과변조 영역에서는 역기전력을 추정하기 위한 dq 전압은 실제 전동기에 인가되는 전압과 차이가 발생한다. 그 결과 회전자의 추정위치 및 추정속도는 실제 회전자의 위치 및 속도와 오차를 갖게 되어 영구자석동기전동기의 제어특성에 영향을 미친다. 본 논문에서는 센서리스 제어 시 고속운전 영역을 확대하기 위해 과변조 영역에서 전압지령 값을 사용하지 않고 전동기에 인가되는 실제전압을 측정하여 회전자 위치추정기에 사용하는 센서리스 제어방법을 제안한다.

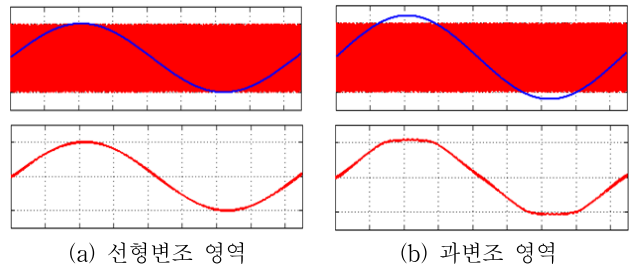


그림 1 변조 영역별 출력파형

2. 본론

2.1 과변조영역에서의 센서리스 제어

센서리스 운전 시 고속운전 영역의 확대를 위해서는 과변조 영역에서의 운전이 필요할 수 있다. 그러나 고속운전 시 과변조 영역에서는 전압지령과 전동기에 인가되는 실제전압과의 차이로 인해 센서리스 제어가 제대로 이루어지지 않는다. 또한

선형변조 영역에서도 그림 2에 나타난 바와 같이 데드타임(Deadtime)에 의해 지령전압과 출력전압 사이에는 차이가 발생하게 된다. 그림 2에서 v_{a_ref} 는 전압지령, 즉 데드타임이 없는 경우 인버터의 출력전압을 나타내고, v_{a_cap} 은 데드타임이 있는 전동기에 인가되는 실제 전압을 나타낸다.

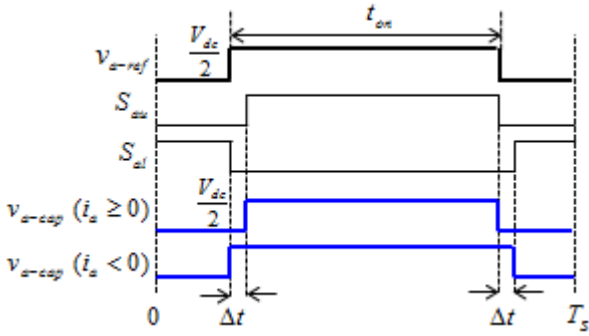


그림 2 Dead-Time 효과에 의한 인버터출력

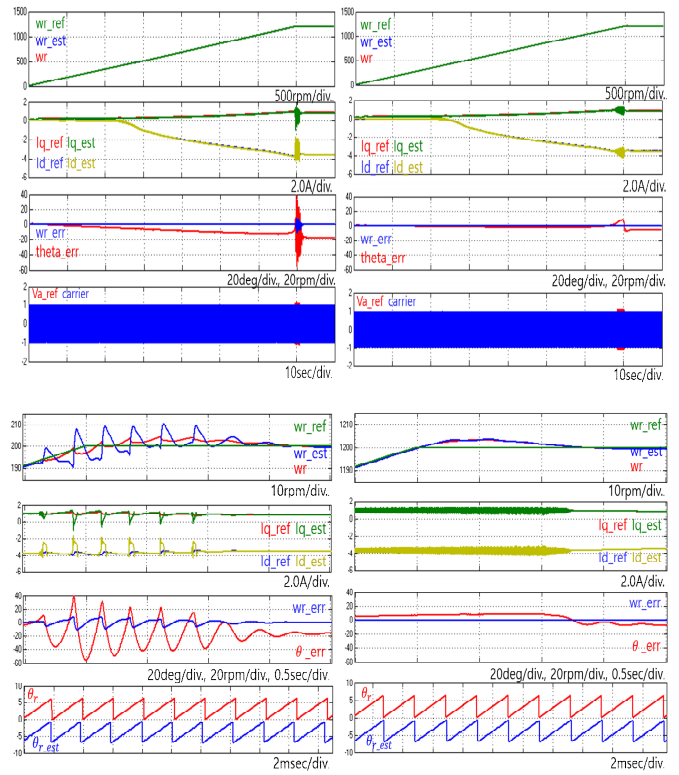
센서리스 제어 시 데드타임에 의한 영향을 반영하고 과변조 영역에서 회전자의 정확한 위치추정을 위해서는 전동기에 인가되는 실제전압을 측정할 필요가 있다. PWM 제어 시 인버터의 출력전압(Pole voltage)은 $V_{dc}/2$, 0(Zero), 및 $-V_{dc}/2$ 의 값을 갖는 구형파 형태를 갖는다. 따라서 3상 인버터 출력전압을 측정하기 위해서는 구형파의 평균전압을 측정해야 한다.^[3]

구형파의 평균전압을 측정하기 위해서는 PWM의 주기 및 전압이 인가되고 있는 시간 t_{on} 을 구해야 한다. 본 논문에서는 t_{on} 을 구하기 위해 캡처 모듈을 이용하며, 시스템 제어를 하는 MCU에 포함되어 있는 시간 측정 모듈인 eCAP pin을 사용한다. 그림 2를 예로 들면 PWM 한 주기 내에서 a상의 평균전압은 PWM 주기 T_s 및 $V_{dc}/2$ 전압이 인가되고 있는 시간 t_{on} 으로부터 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 Δt 는 데드타임에 의한 출력 파형의 시간지연을 나타낸다, 회전자 위치추정기에 지령전압이 아닌 $v_{a_cap-avr}$ 를 사용하게 되면 전동기에 인가되는 실제전압에 가까운 전압을 사용하게 됨으로써 회전자 추정위치 및 추정속도의 오차를 줄일 수 있다.

$$v_{a_cap-avr} = \frac{V_{dc}}{2} \times \frac{t_{on} - \Delta t \times \text{sign}(i_a)}{T_s} \quad (4)$$

2.2 시뮬레이션

그림 3은 회전자 위치추정기에 지령전압을 사용할 경우와 인버터 측정전압을 사용한 경우의 센서리스 제어 특성 및 과변조 영역에서의 dq 전류, 추정위치 오차 및 추정속도 오차의 확대파형을 나타낸다. 회전자 위치 추정기에 지령전압을 사용한 경우 앞 절에서 설명한 바와 같이 과변조 영역에 들어가면서부터 회전자 추정위치 및 추정속도는 실제위치 및 실제속도와 오차가 커지게 된다. 추정위치 및 추정속도의 오차가 증가함에 따라 dq 제어가 정상적으로 제어되지 못함에 따라 토크제어가 제대로 이루어지지 않게 된다. 회전자 위치 추정기에 인버터에서 출력되는 전압을 사용할 경우 그림 3(b)와 같이 고속에서도 정상적인 속도제어가 이루어짐을 알 수 있다. 또한 과변조 영역에서도 전동기에 인가되는 실제 전압을 회전자 위치 추정기에 사용함으로써 추정위치 및 추정속도가 실제위치 및 실제속도를 추종함을 알 수 있다.



(a) 지령전압 사용 시 (b) 측정전압 사용 시

그림 3 속도제어 시 dq 전류, 추정위치 및 추정속도

3. 결론

본 논문에서는 센서리스 운전영역 확장을 위해 과변조 영역에서의 센서리스 제어특성 개선 알고리즘을 제안하였다. 고속 운전 시 발생하는 과변조 영역에서 전류제어의 출력인 지령전압을 회전자 위치 및 속도관측기에 사용할 경우 발생하는 문제점을 검토하였다. 지령전압을 사용하는 기존방법에 비해 전동기에 인가되는 실제전압을 측정하여 사용할 경우 과변조 영역에서도 추정위치 및 추정속도가 실제 위치 및 속도를 추종함을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 추후 실험을 통해 과변조 영역에서의 센서리스 제어 특성을 검증할 계획이다.

본 연구는 2016년 한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음

참고 문헌

- [1] 백인철, 이주석, 김학원, "영구자석 표면부착형 동기전동기의 전류제어를 이용한 센서리스 기동방법 및 속도제어," 전력전자학회논문지, 18권 6호, pp. 523-529, 2013. 12
- [2] S. Morimoto, K. Kawamoto, M. Sanada and Y. Takeda, "Sensorless control strategy for salient-pole PMSM based on extended emf in rotating reference frame," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 38, No. 4, pp. 1054-1061, 2002.
- [3] Y. C. Son, B. H. Bae and S. K. Sul, "Sensorless operation of permanent magnet motor using direct voltage sensing circuit," in Conf. Rec. IEEE IAS Annual Meeting, pp.1674-1678, 2002.