

상전류 변형을 이용한 표면 부착형 영구자석 전동기의 센서리스 성능 향상

김진웅, 하정익
서울대학교 전기정보공학부

Enhancement of Sensorless Performance Using Current Shaping in SMPM Machine Drive

Jin Woong Kim, Jung Ik Ha
School of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

전압형 인버터를 이용한 전동기 구동시스템에서, 출력전압의 비선형성은 역기전력기반 센서리스의 성능에 큰 영향을 미친다. 역기전력기반 센서리스는 전압방정식을 이용하기 때문에 출력전압에 대한 정보가 필요한데 일반적인 인버터에는 출력전압을 측정하는 센서가 없어 출력전압지령을 출력전압과 같다고 가정하고 사용한다. 그러나 인버터의 비선형성으로 인해 전압지령과 실제 출력되는 전압간의 차이가 발생하게 되어 각 추정 오차가 생기게 되고 센서리스의 성능을 떨어트린다. 인버터 비선형성의 주원인인 데드타임에 의한 영향을 보상하기 위해서 여러 가지 방법들이 연구되었지만 전류의 크기가 낮은 저속, 저부하 상황에서는 여전히 오차가 존재 하였다. 본 논문에서는 전압오차가 발생할 수 있는 저전류 구간을 최대한 줄이도록 전류의 형태를 바꾸어 저속 저부하 상황에서의 전압오차를 최소화 하였다. 이를 통해서 역기전력 기반의 센서리스의 저속영역 특성을 개선하였고 실험을 통해 그 효용성을 검증하였다.

1. 서론

영구 자석 전동기 구동 시스템에 일반적으로 사용되는 전압형 인버터(VSI)는 비선형성에 의해서 전압 지령과 실제 출력 전압간에 오차가 발생하는 특성이 있다. 출력전압에 대한 정보를 필요로 하는 역기전력 기반 센서리스 알고리즘에서는 이러한 오차로 인해서 추정각 오차가 발생하게 된다. 전류의 크기가 일정 이상이 되면 출력전압의 오차는 일정한 값을 가지기 때문에 전압지령의 크기가 커지는 고속 영역에서는 오차의 영향을 덜 받는 반면, 전압지령의 크기가 작은 저속 영역에서는 상대적으로 전압오차의 영향을 더 많이 받는다.

전압오차를 발생시키는 인버터의 비선형적인 요소들 중 가장 주된 것은 데드타임에 의한 영향이다.^[1] 데드타임은 상보적으로 작동하는 두 스위치의 단락사고를 예방하기 위한 것으로 두 스위치가 모두 꺼져있는 상태를 뜻한다. 데드타임으로 인한 출력전압의 오차를 보상하기 위해서 여러가지 연구들이 진행되었는데 그 중 별도의 회로 없이 간단하게 할 수 있는 방법이 게이팅 시간을 조절하여 전압이 지령대로 출력되도록 하는 것이다. 이 방법은 전 샘플링의 전류부호가 유지될 것으로 가정하고, 스위치의 on off 순서와 전류방향에 따라서 데드타임 만큼을 전압지령에 더하거나 빼주는 방식이다. 전류가 큰 구간에서는 비교적 정확한 보상이 가능하지만 전류가 0전류 근처에

있는 경우 전류의 방향이 부정확하여 오차가 더 커질 가능성이 있다. 이를 고려해 전류의 크기에 따라서 보상해주는 정도를 조절하여 전류가 낮을 때는 보상크기를 줄여줄 수 있다. 그러나 이방식도 결국 전류가 낮을 때는 데드타임 보상을 안하는 것과 같은 것이기 때문에 전류크기가 낮은 저로드 저속운전 영역에서는 역기전력 기반의 센서리스 성능이 떨어지게 된다. 따라서 이를 해결하기 위해 데드타임 보상시 문제가 되는 구간인 전류가 0근처인 구간을 최대한 줄이도록 전류 지령을 조절하여 출력전압의 오차를 줄이는 방법이 제안된바가 있다.^[2]

본 논문에서는 이러한 전류지령을 만드는 방법에 대하여 분석하고 전류 변형을 위해 주입되는 전류를 최소화 하였다. 또한 표면 부착형 영구자석 전동기 구동시스템에 적용해서 저속영역 저부하 운전지점에서의 센서리스 성능을 향상시킴으로써 그 효용성을 검증하였다.

2. 제안된 전류 변형 방법

2.1 전압오차 분석

본 논문에서는 전류크기가 낮은 구간에서 기존 데드타임 보상 방법의 단점을 해결하기 위하여 전류의 모양을 변형시켰다. 정현파 형태의 전류는 크기가 0인 지점을 지나갈 때 일정시간 동안 전류의 크기가 낮은 구간이 존재하기 때문에 데드타임 보상을 하더라도 출력전압의 오차가 생기게 된다. 실제 전류가 정현파의 형태로 흐를 때, 각 파라미터 값에 대한 정보와 회전자 위치에 대한 정보가 있다면 식(1)의 전압방정식으로부터 출력되는 전압 값을 추정 할 수 있고 이 값과 전압지령과의 비교를 해보면 각 상전류가 0지점을 지나는 구간마다 전압오차가 커지는 것을 확인 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{v}_{ds}^r &= R_s i_{ds}^r + L_d \frac{di_{ds}^r}{dt} - \omega_r L_q i_{qs}^r \\ \hat{v}_{qs}^r &= R_s i_{qs}^r + L_q \frac{di_{qs}^r}{dt} + \omega_r (L_d i_{ds}^r + \lambda_{pm}) \end{aligned} \quad (1)$$

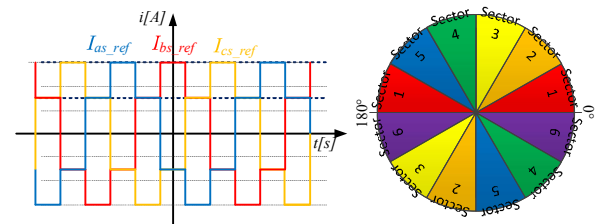


그림 1 제안된 전류파형과 전류각도에 따른 섹터.
Fig. 1 The Proposed current waveforms and sectors.

2.2 전류 변형 방법

제안된 방법에서는 오차가 발생하는 0전류 근처 구간을 최대한 줄이기 위해 그림1에서와 같이 각 상전류가 0전류 부근에서는 계단형태로 변화도록 하면 파형을 변형시켰다. 이와 같은 상전류 파형을 만들어내는 방법은 여러 가지가 있을 수 있는데, 각 상전류를 변형 시키더라도 출력토크와 직접적으로 연관된 q축 전류지령은 그대로 유지 한다는 가정을 하면 각 상전류 지령은 식(2)를 만족 시켜야 한다.

$$I_{qs}^* = -i_{ds}^* \sin\theta_r + i_{qs}^* \cos\theta \quad (2)$$

$$i_{ds}^* = \frac{2}{3}i_{as}^* - \frac{1}{3}(i_{bs}^* + i_{cs}^*), \quad i_{qs}^* = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{bs}^* - i_{cs}^*)$$

$$i_{as}^* + i_{bs}^* + i_{cs}^* = 0$$

I_{qs}^* 는 속도제어기 또는 토크제어기에서 정해진 값이라고 하면 식(2)는 미지수 3개에 주어진 식은 2개이기 때문에 미지수인 각 상전류 지령들 중 하나를 특정 값으로 정해 줄 수 있다. 이 값의 크기를 식(3)에 나타냈듯이 q축지령 크기에 비례하게 정하고 전류각도에 따라서 그림1에서와 같이 섹터를 나눠 각 섹터마다 특정상의 지령을 위에서 정한 값으로 만들어주면 k값에 따라 0전류 부근에서 전류가 스텝으로 변하는 크기를 조절 할 수가 있다. 한상의 전류지령이 정해지면 식(2)로부터 나머지 두상의 전류지령을 계산할 수 있고 전류각도에 따라서 나눠진 섹터에서의 각 상전류들의 지령을 나타내면 표1과 같다.

$$i_{as}^* \text{ or } i_{bs}^* \text{ or } i_{cs}^* = \pm kI_{qs}^* \quad (3)$$

q축 전류지령은 일정하게 유지하도록 각 상의 전류지령들을 만들었기 때문에 상전류 변형을 위해선 d축에 추가적인 전류가 주입된다. k값에 따라서 d축에 주입되는 전류의 크기가 달라지는데 이를 최소화하는 k값으로 구현하면 각 상전류 파형은 그림 2와 같이 나타난다..

표 1 각 섹터에서의 상 전류 지령.

Table 1 References of each phase currents according to sector.

sector	Angle	i_{as}^*	i_{bs}^*	i_{cs}^*
1	$0^\circ < \theta < 30^\circ$ $150^\circ < \theta < 180^\circ$	$-kI_{qs}^*$	$I_{qs}^* \frac{\sqrt{3}k}{2\cos\theta} \left(\frac{1}{k} - \sin\theta + \frac{\cos\theta}{\sqrt{3}} \right)$	$-I_a^* - I_b^*$
2	$30^\circ < \theta < 60^\circ$ $240^\circ < \theta < 270^\circ$	$I_{qs}^* \frac{\sqrt{3}-2k\cos\theta}{\sqrt{3}\sin\theta+\cos\theta}$	$-I_a^* - I_c^*$	$-kI_{qs}^*$
3	$60^\circ < \theta < 90^\circ$ $210^\circ < \theta < 240^\circ$	$I_{qs}^* \frac{\sqrt{3}+2k\cos\theta}{\sqrt{3}\sin\theta+\cos\theta}$	$-I_a^* - I_c^*$	kI_{qs}^*
4	$90^\circ < \theta < 120^\circ$ $300^\circ < \theta < 330^\circ$	$-I_{qs}^* \frac{\sqrt{3}-2k\cos\theta}{\sqrt{3}\sin\theta-\cos\theta}$	kI_{qs}^*	$-I_a^* - I_b^*$
5	$120^\circ < \theta < 150^\circ$ $270^\circ < \theta < 300^\circ$	$-I_{qs}^* \frac{\sqrt{3}+2k\cos\theta}{\sqrt{3}\sin\theta-\cos\theta}$	$-kI_{qs}^*$	$-I_a^* - I_b^*$
6	$150^\circ < \theta < 210^\circ$ $330^\circ < \theta < 360^\circ$	kI_{qs}^*	$I_{qs}^* \frac{\sqrt{3}k}{2\cos\theta} \left(\frac{1}{k} + \sin\theta - \frac{\cos\theta}{\sqrt{3}} \right)$	$-I_a^* - I_b^*$

3. 실험 결과

제안된 방법을 검증하기 위해 SMPM전동기를 이용하여 저 부하 저속 운전영역에서의 동작 특성을 확인하였다. 실험에 사용된 전동기와 인버터의 주요 파라미터는 표2와 같다. 그림 3은 0.3Nm의 저 부하상태에서 75rpm의 저속 운전시에, 제안된 방법을 적용 하여 전압오차와 각오차가 줄어드는 것을 나타내었다. 그림 3(a)은 기존의 데드타임 보상알고리즘만 적용한 것으로 각 상전류가 0지점을 지날 때마다 전압오차가 크게 나타난다. 반면에 그림 3(b)는 기존의 데드타임 보상 알고리즘에 제안된 방법까지 적용하여 0전류 근처 구간을 줄였기 때문에 전압오차가 줄고 각 추정 오차 역시 40%이상 줄어드는 것을 확인 할 수 있다.

표 2 전동기 파라미터와 테스트 환경.

Table 2 Parameters of the machine and test condition.

SMPM machine	
Pole number	8
Rated speed	4000rpm
Stator phase resistance	9.56Ω
Inverter & Test condition	
DC voltage	300V
Switching frequency	16kHz
Dead time	1.5us

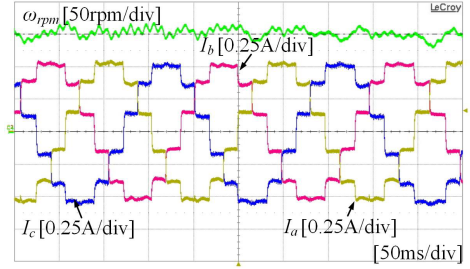
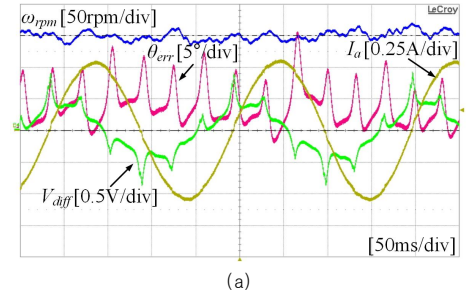
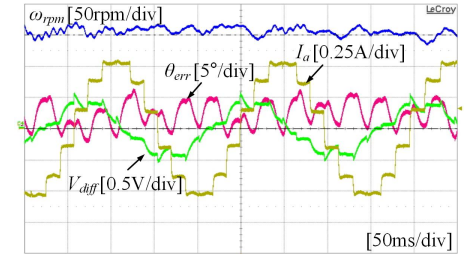


그림 2 제안된 방법이 적용된 전류 파형.

Fig. 2 Phase currents with the proposed method



(a)



(b)

그림 3 저속, 저부하 구간에서의 전압오차. (a)기존 방법 (b)제안된 방법.
Fig. 3 Voltage error in low-speed and low-load region (a)conventional method (b)Proposed method

4.결 론

본 논문에서는 상전류를 변형시켜 영전류 근처 구간에서 발생하는 전압오차를 줄이는 방법분석하고 변형을 위해 주입하는 전류를 최소화하였다. 표면부착형 영구자석 전동기 구동 시스템에서 제안된 방법을 적용하여 전압오차를 줄이고 센서리스 추정각 오차를 줄임으로써 그 효용성을 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] J.W. Choi and S.K. Sul, "Inverter output voltage synthesis using novel dead time compensation," IEEE Trans. Power Electronics, vol.11, no.2, pp.221,227, Mar 1996
- [2] J.W. Kim and J.I. Ha, "Enhancement of Output Voltage Using Current Shaping in Sensorless AC Machine Drive" Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2014, pp2490-2494