

PMSM의 센서리스 운전시 플라잉스타트 속도 추정 오차 저감 기법

서정준, 하정익
서울대학교 전기정보공학부

Reducing Speed Estimation Error of Flying Start in Sensorless PMSM

Jeongjun Seo, Jung-Ik Ha

School of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

2. 플라잉 스타트 속도 오차 저감 기법

ABSTRACT

본 논문은 PMSM 센서리스 운전 중에 적은 속도 오차로 플라잉스타트하는 방법을 제안한다. 철도 차량 운전시 손실을 줄이기 위해 인버터의 스위치를 모두 off하고 관성으로만 운전하는 타행운전을 자주 하게 되는데 센서리스 운전시 타행운전 상태에서 회전자의 속도와 위치를 알 수 없어 문제가 된다. 따라서 플라잉스타트에서 회전자의 속도와 위치를 빠르게 추정할 수 있는 방법이 필요하다. 기존의 방법은 플라잉스타트에서 3번의 영전압 합성을 통해 회전자의 속도와 위치를 추정해 내는 방법인데, 이 때 전류 정보에 오차가 존재할 경우 속도와 위치 오차가 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서 4번의 영전압 합성을 통해 전류 정보에 오차로 인한 속도와 위치 오차를 저감시킬 수 있는 방법을 제안한다.

1. 서론

최근 전력전자 기술과 자성소재의 발달에 따라 기존의 유도기를 사용하던 많은 어플리케이션에서 영구자석동기기를 사용하려는 시도가 발생하고 있다.[1]

영구자석동기기를 제어하기 위해서는 회전자의 위치에 따라 전류를 제어하는 벡터 제어를 주로 사용하게 되는데, 이 때 회전자의 위치를 정확히 알고있을 필요가 있다. 이를 위해 엔코더, 레졸버와 같은 위치 센서를 사용하여 회전자의 위치를 측정한다. 하지만 이런 센서들로 인한 구동부 부피 상승, 비용 증가, 고장의 위험성으로 인해 위치 센서 없이 회전자의 위치를 알아내어 제어하는 센서리스 기법이 도입되고 있다.[2]

철도 차량의 경우 토크를 가해 가속한 후 인버터의 스위치를 off 시키고 차량의 관성을 이용하여 주행하는 타행운전을 자주 사용하는데, 센서리스 운전에서는 이 때 전류 정보를 얻을 수 없어 회전자의 위치를 추정하는 것이 불가능해지게 된다. 이로 인해 스위치 off 후 재기동 시 속도와 위치를 추정하기 위해 잠깐의 시간이 필요하고, 이 때 큰 돌입전류가 발생하여 문제가 되고 있다. 이를 해결하기 위해 스타트 시 제어하기 전에 회전자의 속도와 위치를 알아내는 방법이 필요하다.

회전자가 회전하고 있는 상태에서 제어를 시작하는 방법을 플라잉 스타트 방법이라고 하는데 본 논문에서는 기존의 플라잉 스타트 방법들을 소개하고, 기존의 플라잉 스타트에서 발생하는 속도 오차를 개선하는 방법을 제안하고자 한다. 그리고 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하고자 한다.

2.1 기존의 플라잉 스타트 속도 추정 방법[3]

2.1.1 위치 추정 방법

회전하고 있는 모터에 그림 1과 같이 영전압을 합성하게 되면 역기전력에 의한 전류가 흐르게 된다.

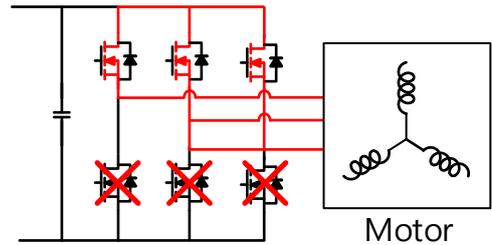


그림 1 영전압 합성

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_m + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_m + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \lambda_f \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)의 영구자석동기 전압방정식에서 저항을 0으로 가정하고 영전압 합성하면 $v_d, v_q = 0$ 이 되므로 식 (2)처럼 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \lambda_f \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)를 영전압 합성 시간 T_{sh} 동안 ω 가 일정하다고 가정하고 초기 전류가 0이라고 가정하고 위의 방정식을 풀어보면 전류 벡터 $i(T_{sh})$ 는 식 (3)과 같이 나타난다.

$$i(T_{sh}) = \begin{bmatrix} i_d(T_{sh}) \\ i_q(T_{sh}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\lambda_f}{L_d} (1 - \cos(\omega_e T_{sh})) \\ -\frac{\lambda_f}{L_q} \sin(\omega_e T_{sh}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

따라서 그림 2의 dq 좌표계에서의 전류 벡터각 θ_0 는 식 (4)와 같고, 현재 추정하고 있는 $\alpha\beta$ 좌표계에서의 전류 벡터각 θ_i 는 식 (5)와 같으므로 식 (6)을 통해 회전자 추정 위치 θ_e 를 구할 수 있다.

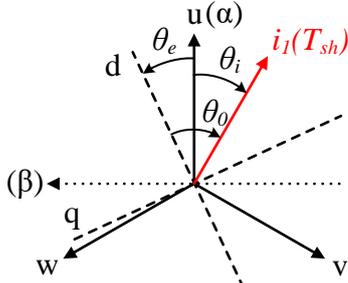


그림 2 영전압 합성 전류와 회전자 위치의 관계

$$\theta_0 \approx \tan^{-1} \left(\frac{i_q}{i_d} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{-\frac{\lambda_f}{L_q} \sin(\omega_e T_{sh})}{-\frac{\lambda_f}{L_d} (1 - \cos(\omega_e T_{sh}))} \right) \quad (4)$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{i_\beta}{i_\alpha} \right) \quad (5)$$

$$\theta_e = \theta_i - \theta_0 \quad (6)$$

2.1.2 영전압 2번 합성 속도 추정 방법

위치 추정 방법을 이용하여 회전자의 속도 또한 추정할 수 있는데, 그림 3과 같이 회전하고 있는 모터에 영전압을 2번 합성한 후 식 (7)을 이용하면 회전자의 속도를 알아낼 수 있다. τ_{12} 는 첫 번째 영전압 합성과 두 번째 영전압 합성 사이의 시간이다.

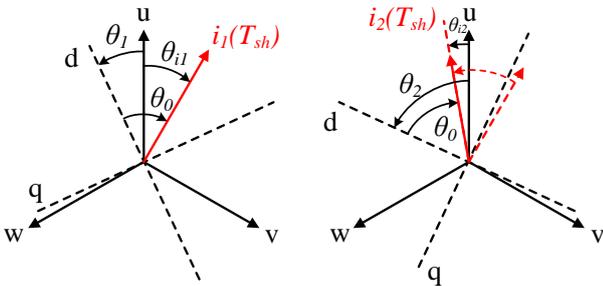


그림 3 영전압 2번 합성 속도 추정

$$\omega_e = \frac{\theta_{i2} - \theta_{i1}}{T_{sh} + \tau_{12}} \quad (7)$$

하지만 위의 방법으로 회전자의 속도를 구할 때는 다음과 같은 제한 조건이 발생한다. 먼저 그림 4의 (a)와 같이 처음 추정한 위치와 두 번째에 추정한 위치가 360도 이상 차이날 경우 그것을 구분할 수 없다.

또한 그림 4의 (b)와 같이 회전자가 반대 방향으로 회전할 경우 이를 구분할 수 없다.

이를 해결하기 위하여 회전자의 최대 속도를 미리 알고 있을 시 처음 영전압을 주입한 시기와 다음 영전압을 주입하는 시기인 τ 동안 한 바퀴 회전하지 않도록 짧은 간격을 주어 그림 4의 (a)와 같은 상황이 발생하지 않도록 하여 첫 번째 문제를 해결할 수 있고, 반 바퀴 이상 회전하지 않도록 하여 그림 4의 (b)와 같이 반 바퀴 이상 회전했을 시 반대 방향으로 회전한 것으로 판단하여 두 번째 문제까지 해결할 수 있었다.

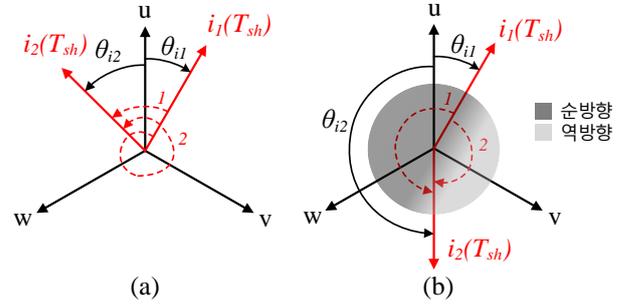


그림 4 속도 추정 방법의 제한조건

따라서 위의 두 가지 문제를 해결하기 위하여 영전압 합성 주기 τ 의 제한이 발생하게 되며 이는 식 8과 같다.

$$\tau_{12} \leq \frac{\pi}{\omega_{max}} \quad (8)$$

2.1.3 영전압 3번 합성 속도 추정 방법

τ 의 최대값 뿐만 아니라 최소값에도 제한이 존재한다. 처음 영전압을 합성하여 전류가 발생한 후 이 전류가 0이 되기 전에 다음 영전압을 합성할 경우 이전의 영전압 합성으로 인한 전류가 다음 영전압 합성으로 인한 전류에 영향을 주게 되고 따라서 두 번째 추정 위치에 큰 오차가 발생하게 되어 속도 추정이 불가능해진다. 따라서 영전압을 합성하여 발생한 전류가 0이 되기까지 기다려야 하는 최소 주기 τ_{min} 이 존재하며 이는 시스템의 시정수에 따라 다른 값을 가진다.

이 때 최소 주기 조건과 최대 주기 조건식이 서로 겹치게 될 경우 영전압 2번 합성 속도 추정 방법을 사용할 수 없는데 이를 해결하기 위해 그림 5와 같은 알고리즘이 존재한다. 그림 5와 같이 영전압을 3번 합성하여 추정한 위치의 차이를 이용하여 식 9와 같이 속도를 추정할 수 있고, 식 (8)도 식 (10)과 같이 변화한다. 이 방법은 영전압 주입 주기 τ_{23} , τ_{12} 는 전류가 0이 될만큼 길게 주면서 속도 추정시 사용하는 $\tau_{23} - \tau_{12}$ 는 짧게 유지할 수 있어 시정수가 큰 시스템에서도 속도 추정을 할 수 있어 효과적이다.

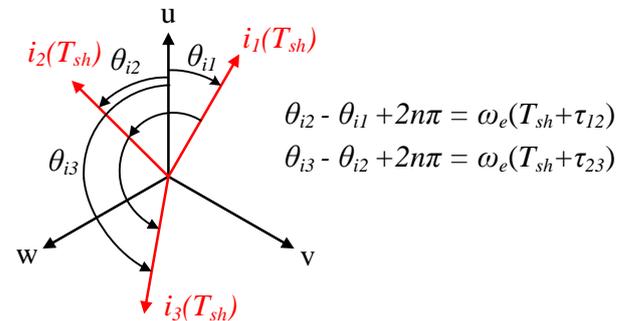


그림 5 영전압 3번 합성 속도 추정 방법

$$\omega_e = \frac{(\theta_{i3} - \theta_{i2}) - (\theta_{i2} - \theta_{i1})}{\tau_{23} - \tau_{12}} \quad (9)$$

$$\tau_{23} - \tau_{12} \leq \frac{\pi}{\omega_{max}} \quad (10)$$

2.2 전류 측정 오차로 인한 속도 추정 오차

철도 차량과 같은 대형 시스템에서는 여러가지 기기들의 노이즈와 비선형성으로 인해 영전압 합성으로 인한 전류를 측정할 때 오차가 발생한다. 이로 인해 추정하는 회전자의 위치와 속도에 오차가 발생하게 된다. 이 때 영전압 합성으로 인한 전류가 잘못 추정될 경우 식 (11)과 같이 추정하는 위치에 오차가 발생할 수 있다. 그리고 이 위치 오차로 인해 추정하는 속도의 오차가 발생하게 되는데 이는 식 (9)에 의해 (12)와 같다.

$$\Delta\theta_i = \theta_{i.real} - \theta_{i.sen} = \tan^{-1}\left(\frac{i_\beta}{i_\alpha}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{i_\beta + \Delta i_\beta}{i_\alpha + \Delta i_\alpha}\right) \quad (11)$$

$$\Delta\omega_{e.max} = \frac{4\Delta\theta_{i.max}}{\tau_{23} - \tau_{12}} \quad (12)$$

2.3 제안하는 방법

식 (12)와 같이 위 오차는 τ ($\tau_{23} - \tau_{12}$)에 의해 제한되게 되는데, 따라서 이 τ 를 늘리기 위한 알고리즘을 제안한다. 이 방법은 기존의 영전압 3번 합성 방법에서 영전압을 추가로 한 번 합성하는 방식이다. 이 방법은 τ 의 범위를 기존의 최대 속력으로 제한하지 않고, 처음 3번의 영전압 주입으로 속도를 추정한 이후 이 속도에 오차가 있다고 가정하고 그 오차를 보정한 속도에 맞게 4번째 영전압 합성 시에 τ ($\tau_{34} - \tau_{23}$)를 크게 하여 최대 속도일 때에 비해 큰 τ 를 얻을 수 있다. 또한 처음의 속도 추정에 오차가 존재하더라도 방향 정보는 신뢰할 수 있으므로, 기존의 방향 정보를 모르기 때문에 발생하는 반 바퀴 회전의 제한을 한 바퀴 회전으로 늘릴 수 있어 τ 를 크게 늘릴 수 있다.

시뮬레이션 결과는 그림 6과 같다. 기존의 영전압 3번 주입에 비해 제안된 알고리즘의 경우 각도 추정에 오차가 발생하였을 때 속도 추정에서 더 나은 정확도를 보여준다.

파라미터	값
P	6
R_m	21.33[m Ω]
λ_f	0.9594[V/s/rad]
L_d	2.6[mH]
L_q	5.9[mH]
T_s	350[μ s]
T_{sh}	350[μ s]
V_{dc}	1500[V]

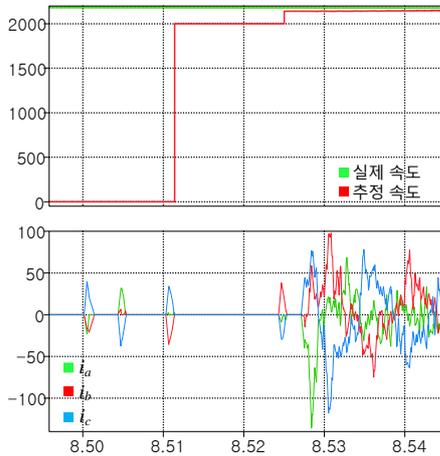


그림 6 시뮬레이션 결과

실험 결과는 그림 7과 같다. 실험에서도 속도 추정에서 더 나은 정확도를 보여주는 것을 확인할 수 있다.

파라미터	값
P	8
R_m	900[m Ω]
λ_f	0.183[V/s/rad]
L_d	9.4[mH]
L_q	18.1[mH]
T_s	100[μ s]
T_{sh}	500[μ s]
V_{dc}	310[V]

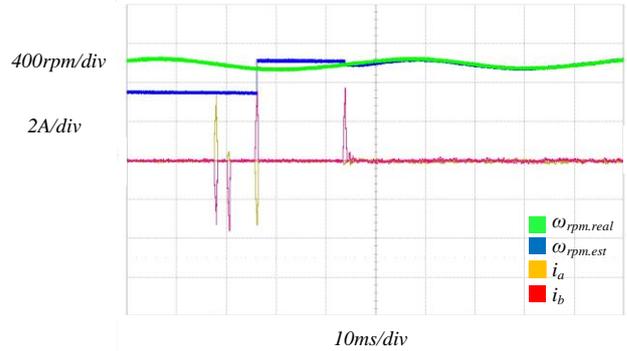


그림 7 실험 결과

3. 결론

본 논문에서는 철도차량의 영구자석 센서리스 운전 시 플라잉 스타트에서의 속도 추정의 오차를 줄일 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 통해 기존의 방법보다 2배 이상의 속도 추정 정확도를 얻을 수 있으며, 이는 전류 측정의 오차가 큰 시스템에서 더욱 효과적이다. 또한 속도가 낮을수록 영전압 합성 시 낮은 전류 유도로 인해 속도 추정 오차가 더욱 큰 성격을 보이는데, 제안하는 방법은 기존 방법에 비해 낮은 속도일수록 속도 오차를 더욱 줄일 수 있다.

이 논문은 2020년도 BK21플러스 사업에 의하여 지원되었음
이 논문은 2019년도 한국연구재단의 국제협력사업의 지원을 받아 연구되었음(0666-20190033)

참고 문헌

- [1] M. N. Razavi, H. Abniki, and M. K. Zadeh, "An optimal control strategy for the IPM motor drives," in Proc. of the IEEE Conference on Electrical Power & Energy Conference (EPEC), pp. 1-6, Oct. 2009.
- [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. Ind. Appl., vol. 38, pp. 1054-1061, Jul./Aug. 2002
- [3] S. Taniguchi, S. Mochiduki, T. Yamakawa, S. Wakao, K. Kondo, and T. Yoneyama, "Starting procedure of rotational sensorless PMSM in the rotating condition," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 45, no. 1, pp. 194-202, Jan./Feb. 2009.