

적용 백스텝핑 제어를 이용한 스위치드 릴럭턴스 전동기 속도제어기 연구

오주환, 이진우, 권병일
한양대학교 대학원

Speed controller study of Switched Reluctance Motor using An Adaptive Backstepping Control

Juhwan Oh, Jinwoo Lee, Byungil Kwon
Graduate School in Hanyang University

Abstract - In this paper, a backstepping speed controller applied in SRM is presented. The driver of SRM is generally planned with a PI controller. A PI controller is becomes a satisfied structure in the system. it is used in position and speed control loops. However, when the system parameter uncertainties large inertia and load disturbance, it will not be able to expect a satisfied efficiency. Therefore, a backstepping control law was researched, which is able application even to a linear system as well as a nonlinear and it is more excellent than a origin adaptive control law. In this paper, a backstepping control law applied the drive system of SRM was used in the drive controller. The computer simulation result clearly show that the applied backstepping controller can track the speed reference signal generated by internal signals.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(SRM)는 성능면에서 고효율 및 넓은 운전범위를 갖으며, 구조적인 면에서 간단한 전기자기적인 구조로 이루어져 있다. 최근 전력용 반도체 소자의 기술 개발이 급속히 이루어짐에 따라 SRM드라이버는 고유의 직류기와 교류기 드라이버보다 더욱 간단하고 견고한 많은 장점을 가지고 있다.[1] 이러한 구동드라이버의 위치 및 속도 제어기는 대부분 PI 제어기로 설계되어 있어서, 불확실한 큰 관성 및 부하로 인한 빠른 기준속도변화에 대한 실제속도의 수렴성을 감소하기 때문에 근래에는 기준속도변화에 대한 빠른 응답성을 갖는 백스텝핑 제어방법이 연구되고 있다.[2][3] 이런 제어방법 또한 다수의 이득(Gain)설정이 요구되고 정상상태에서 제어입력 변수간의 오차성분이 항상 일정하지 않고 순시적으로 변하기 때문에 많은 떨림 현상이 발생한다.

본 논문에서는 다수의 제어이득(Gain)을 줄이고 기준속도 변화에 빠른 속도 수렴성을 갖기 위해 백스텝핑 제어이론에 기본을 둔 개선된 적용 백스텝핑 제어방법을 SRM시스템에 적용하였다. 적용된 제어방법은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 기존의 제어방법과 비교 및 검증하였다.

2. SRM 속도제어

2.1 SRM 수학적 모델링

SRM의 속도 및 토크는 회전자의 위치와 상전류에 비례하기 때문에 정확한 위치파악과 전류검출이 필수적이다. 회전자의 위치 및 상전류를 해석하기 위한 SRM 수학적 모델링은 식(1)과 같다.

$$\frac{dx}{dt} = f(x) + g(x)v \quad (1)$$

$$x = [i_s \quad \omega]^T$$

$$f(x) = \left[-\frac{R}{L_s} i_s - \frac{1}{L_s} \frac{dL_s}{d\theta} \omega i_s \right], g(x) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} \\ 0 \end{bmatrix}$$

여기서 R 은 권선저항, B 는 마찰계수, v 는 상전압 T_L 은 부하 토크, θ 는 회전자위치, ω 각속도, i_s 는 고정자 상수(1, 2, 3... n), J 는 관성, T_e 전동기에서 발생된 토크, K_θ 는 강성계수, i_s 는 상전류, L_s 는 상 인덕턴스이다.

위의 식에서 알 수 있듯이, SRM의 직접적인 모델링은 전동기의 속도, 위치 그리고 상전류간의 결합으로 높은 비선형이 존재한다.

2.2 백스텝핑 제어

SRM 시스템의 불확실성 및 외란을 고려한 백스텝핑 제어기 설계는 식(1)을 기초로 하여 이루어진다. 식(1)에서 강성계수 K_θ 는 시스템이 연속적인 회전운동을 할 경우 $K_\theta=0$ 이 된다. 또한, 전동기에 부착된 부하 또는 전동기의 관성을 포함한 총 유효관성 J 로 식(1)의 기계방정식은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다. 회전자가 강제라고 보면 회전자의 미소질량 dM 의 회전 각속도는 회전자 어느 곳이든 같으므로 식(2)는 식(3)과 같이 간략화 된다.

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} - B\omega - T_L \quad (2)$$

$$T_e = \frac{d\omega}{dt} \int_0^M a^2 dM = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

여기서 a 는 회전자의 반지름이다.

제어기의 페루프 내에서 기준 속도 및 위치를 추정하면, 제어기에서 위치 추정오차는 식(4)와 같다.

$$e_1 = \theta_{ref} - \theta \quad (4)$$

미소 시간에 대하여 식(4)는 식(5)와 같다.

$$\frac{de_1}{dt} = \frac{d\theta_{ref}}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \quad (5)$$

식(5)에 속도추정오차를 0으로 수렴시키기 위해서 단계제어법인 백스텝핑 제어방법을 적용하였다. 만약 각속도 ω 가 제어입력이라면 식(6)과 같이 선택되고, 식(5)는 식(7)과 같다.

$$\omega = k_1 e_1 + \frac{d\theta_{ref}}{dt} \quad (6)$$

$$\frac{de_1}{dt} = -k_1 e_1 \quad (7)$$

여기서 k_1 은 양의 상수이다.

각속도 ω 는 제어 시스템 변수이며 기준 제어입력 변수

ω_{ref} 로 취급하였다. 따라서 안정화시킨 기준 제어입력 변수는 식(8)과 같이 설정할 수 있다.

$$\omega_{ref} = k_1 e_1 + \frac{d\theta_{ref}}{dt} \quad (8)$$

실제 전동기 각속도 ω 와 기준 제어입력 변수 ω_{ref} 사이에 오차가 발생하면, 오차의 계산은 식(9)과 같이 속도추정오차로 정의할 수 있다.

$$e_2 = \omega_{ref} - \omega \quad (9)$$

여기서 $\omega_{ref} \neq \frac{d\theta_{ref}}{dt}$ 이다.

미소 샘플링시간에 대한 식(9)은 식(10)과 같이 나타낸다.

$$\frac{de_2}{dt} = k_1 (\omega_{ref} - \omega) + \frac{dw_{ref}}{dt} - \frac{T_e^*}{J} \quad (10)$$

여기서 T_e^* 는 제어루프에서 발생된 자령토오크이다.

속도 추정오차 e_2 에 대한 정의로 위치 추정오차 e_1 은 식(11)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{de_1}{dt} = -k_1 e_1 + e_2 \quad (11)$$

식(10)은 제어기 루프에서 발생된 자령토오크 T_e^* 를 제어 입력변수로, 속도 적응능력을 향상시키기 위해서 위치 추정오차 e_1 과 속도 추정오차 e_2 를 모두 이용하여 식(12)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{de_2}{dt} &= k_1 \left(\frac{de_1}{dt} - \frac{dw}{dt} \right) - \frac{T_e^*}{J} \\ &= k_1 (-k_1 e_1 + e_2) + \frac{dw_{ref}}{dt} - \frac{T_e^*}{J} \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)는 토오크 자령값으로 식(13)과 같이 선택될 수 있다. 실제속도와 기준 제어입력 변수간의 오차성분은 항상 일정하지 않고 순시적으로 변하기 때문에 실제속도가 기준 제어 입력 변수인 ω_{ref} 에 수렴하는 시간이 변동된다. 따라서 안정하게 빠른 속도수렴을 하기위해서 적분이득 K_I 을 추가하였다. 제어입력 변수인 T_e^* 로 나타내기위해 식(12)를 식(13)과 같이 정리하였다.

$$T_e^* = J \left\{ (e_1 - e_1 k_1^2) + (k_1 + \frac{K_I}{s}) e_2 + \frac{\omega_{ref}}{dt} \right\} \quad (13)$$

여기서 K_I 는 적분이득이다.

그림 1은 SRM에 적용된 백스텝제어기의 블록도를 나탄낸다. SRM 스위칭 접호각 θ_{on} 과 소호각 θ_{off} 는 고정시킨 상태에서 구동되며, 자령 토오크로 SRM의 전류 요구값을 얻었고, 이렇게 요구된 전류로 인해 실제 속도 및 토오크는 요구된 값에 수렴하게 된다.

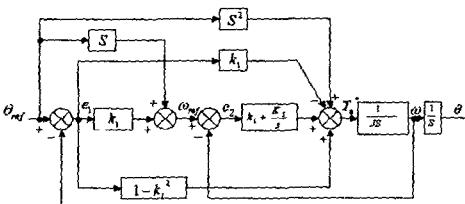


그림 1. SRM에 적용된 백스텝제어기의 블록도

Fig. 1. Block diagram of applied backstepping in SRM

2.3 시뮬레이션에 의한 비교 및 검토

적용한 적용 백스텝핑 제어방법의 성능을 검증하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 기존의 백스텝핑 제어방법의 성능과 비교하여 검증하였다. SRM의 스위칭 접호각 및 소호각은 부하상태를 고려하여 고정된 상태에서 구동되었다. 그림 2와 3은 각각 무부하와 부하일 때 기존의 백스텝핑 제어 응답성이다. 응답성에서 알 수 있듯이 기준속도에 대한 실제속도가 빠르게 수렴함하였다. 정상상태에서는 순차적으로 빠르게 비선형성이 크게 존재함으로 속도 및 토오크 리플이 큼을 알 수 있다.

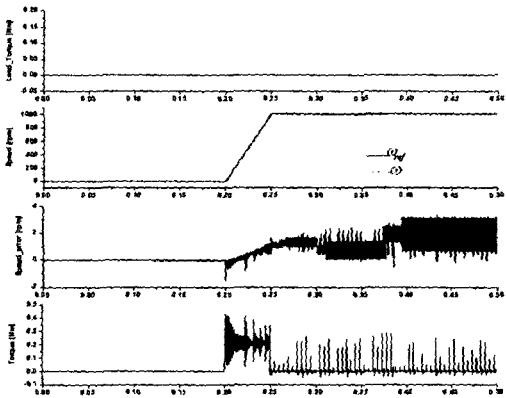


그림 2. 부부하일 때 백스텝핑 제어 응답성

Fig. 2. Response of prototype backstepping controller no-loading

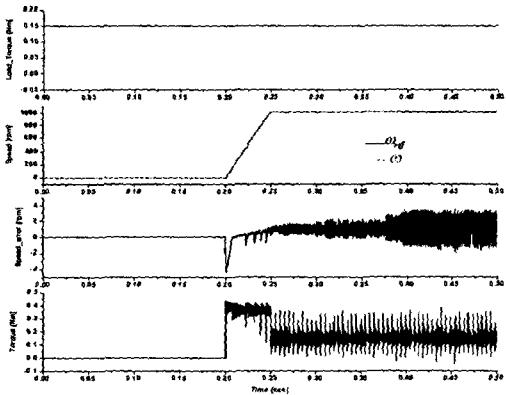


그림 3. 부하인가 시 백스텝핑 제어 응답성

Fig. 3. Response of prototype backstepping controller loading

그림 4와 5는 각각 무부하와 부하상태에서 적용된 적용 백스텝핑방법의 응답성을 보여준다. 실제속도는 기준속도에 빠르게 수렴함을 알 수 있다. 정상상태에 도달한 후 실제속도의 멀림이 줄어들었으며 기존의 백스텝핑방법을 적용했을 때보다 보다 토오크 리플이 감소하였음을 알 수 있다. 여기서 토오크 리플 및 속도 멀림은 제어루프의 이득뿐만 아니라 순차적으로 발생하는 속도 기전력이 갑작스러운 부하로 작용하는 원인중 하나이다. 이를 해결하기 위해 정확한 이득결정과 인더턴스의 기울기에 비례하고 전류 차승에 비례하는 토오크를 고려한 접호각과 소호각을 결정한다면 속도 및 토오크 리플은 줄어들 거라 사료된다. 따라서 본 연구에 적용된 적용 백스텝핑 제어법은 가변부하 및 큰 관성에도 기준속도에 빠른 수렴성과 토오크 리플 저감에 매우 효과적임을 알 수 있었다.

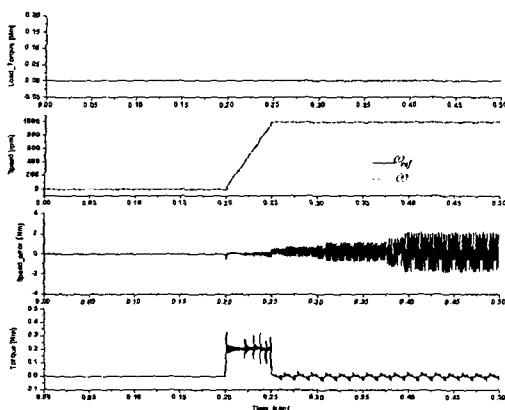


그림 4. 무부하일 때 적용 백스텝핑 제어 응답성

Fig. 4. Response of adaptive backstepping controller no-loading

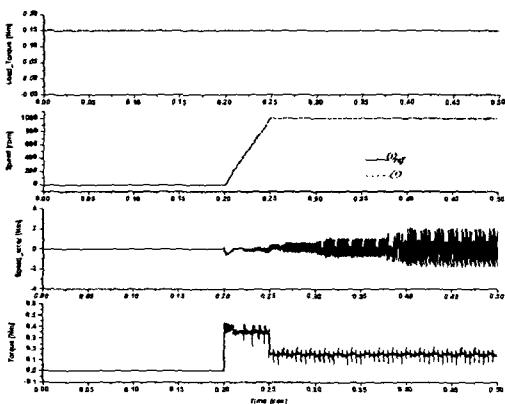


그림 5. 부하인가 시 적용 백스텝핑 제어 응답성

Fig. 5. Response of adaptive backstepping controller loading

3. 결 론

본 연구에서는 기준 제어입력 속도값에 대한 실제 출력 속도값의 오차를 줄이기 위한 제어방법으로 백스텝핑 제어 이론에 기본을 둔 SRM 구동 제어 알고리즘을 제안하였다. 기준속도와 실제속도의 오차는 연속적인 단계 제어방법을 통하여 유도되며, 그 타당성은 시뮬레이션을 통하여 증명하였다.

그 결과 기준 속도변환에 빠른 수렴성과 정상상태에서의 속도 오차를 줄일 수 있었고 속도에 밀접한 관계가 있는 전동기 토크 리플도 감소시킬 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives", CRC Press, pp. 1-23, 2001
- [2] Jen-te Yu, Jie Chang, "A New Adaptive Backstepping Control Algorithm for Motion Control Systems", IEEE proce., Vol. 1, pp.206-210, April 2002
- [3] J. Zhou and Y.Wang, "Adaptive Backstepping Speed Controller Design for A Permanent Magnet Synchronous Motor", IEEE Proc-Electr. Power Appl., Vol. 149, No 2, , pp.165-172, March 2002