

2상 하이브리드 스텝핑 모터의 디텐트 토크 보상 기법

김도현, 김상훈
강원대학교

Detent Torque Compensation Method for Two-phase Hybrid Stepping Motors

Do-Hyun Kim, Sang-Hoon Kim
Kangwon National University

ABSTRACT

본 논문에서는 2상 하이브리드 스텝핑 모터의 디텐트 토크 보상 기법을 제안하였다. 2상 하이브리드 스텝핑 모터의 회전자 좌표계 d,q축 전압 방정식 및 토크 식으로부터 지령 토크 발생을 위해 필요한 d,q축 전류를 지령으로 사용하며, 디텐트 토크로 인해 발생하는 속도 리플을 제거하기 위해 리플 크기를 추출하여 전류지령에 보상하였다. Matlab/Simulink를 이용한 2상 하이브리드 스텝핑 모터 구동 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 유효성을 확인하였다.

1. 서 론

스텝핑 모터는 입력되는 스텝 펄스에 동기하여 원하는 위치에 위치하도록 전류를 흘려주는 풀 스텝 또는 마이크로 스텝 구동을 통한 개루프 위치 제어가 용이하므로 로봇, 프린터와 같은 각종 위치 제어 분야에 널리 사용된다. 그러나 기존의 풀 스텝 및 마이크로 스텝 제어와 같은 개루프 위치 제어 방식은 출력 토크의 순시적인 변동으로 인해 속도 및 위치 응답에 진동을 발생시키며 이로 인한 탈조의 가능성이 있다.

스텝핑 모터의 순시 토크 제어를 위하여 교류 전동기 구동 시스템에서 널리 사용되는 벡터 제어 기법이 적용될 수 있다. 벡터 제어 기법을 적용하여 토크 발생을 위해 필요한 최적의 전류 지령으로 운전하면 스텝핑 모터의 순시 토크 제어를 효율적으로 실현할 수 있다.

영구자석을 사용하는 하이브리드 스텝핑 모터는 회전자 자석과 고정자 철심 사이의 공극이 최소가 되는 방향으로 회전하려는 디텐트 토크가 존재하는데, 이 토크는 순시 토크 제어 시에 외란으로 작용하여 속도 리플을 발생시킨다.

본 논문에서는 하이브리드 스텝핑 모터의 벡터 제어 시에 디텐트 토크로 인해 발생하는 속도 리플을 제거하기 위하여 속도 리플의 크기를 추출하여 이를 영으로 제어하는 보상 기법을 제안하였다.

2. 2상 하이브리드 스텝핑 모터의 벡터 제어 및 디텐트 토크 보상 기법

2.1 2상 하이브리드 스텝핑 모터의 벡터 제어

2상 하이브리드 스텝핑 모터의 a, b상 전압 방정식 및 출력 토크는 다음 식과 같이 표현된다.^[1]

$$v_a = R_s i_a + L_s \frac{di_a}{dt} - \omega_r \lambda_{pm} \sin \theta_r \quad (1)$$

$$v_b = R_s i_b + L_s \frac{di_b}{dt} + \omega_r \lambda_{pm} \cos \theta_r \quad (2)$$

$$T_e = \frac{P}{2} \lambda_{pm} (-i_a \sin \theta_r + i_b \cos \theta_r) \quad (3)$$

여기서 R_s, L_s 는 상 저항 및 상 인덕턴스, ω_r, θ_r 은 전기적 각속도 및 회전자 위치, λ_{pm} 은 영구자석의 쇄교자속 크기, P 는 극수이다.

상 인덕턴스의 위치에 따른 변화가 매우 작으므로 L_s 를 상수로 가정하고 식(1)~(3)을 회전자 자석의 N극을 d축으로 하는 회전자 좌표계로 좌표 변환할 경우 d, q축 전압 방정식 및 토크 식은 아래와 같이 표현된다.

$$v_d = R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_s i_q \quad (4)$$

$$v_q = R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + \omega_r (L_s i_d + \lambda_{pm}) \quad (5)$$

$$T_e = \frac{P}{2} \lambda_{pm} i_q = K_T i_q \quad (6)$$

식(6)을 통해 회전자 좌표계 q축 전류만이 토크 발생에 기여하는 것을 알 수 있다. 따라서 d축 전류지령은 영으로 하고, 토크 지령으로부터 q축 전류지령을 구하여 그 전류를 제어하면 2상 하이브리드 스텝핑 모터의 벡터 제어를 실현할 수 있다.

2.2 하이브리드 스텝핑 모터의 디텐트 토크

그림 1에 보이는 회전자 자석과 고정자 철심 사이의 공극이 최소가 되는 방향으로 회전하려는 디텐트 토크는 위치에 관한 함수로 식(7)과 같이 표현된다.

$$T_{det} = -K_{det} \sin 4\theta_r \quad (7)$$

여기서 K_{det} 는 디텐트 토크 상수이며 디텐트 토크는 기본과 주파수의 4배의 주파수 성분을 갖는다.

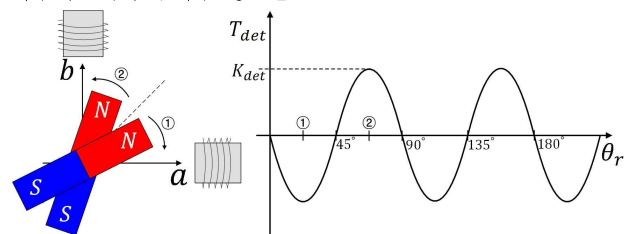


그림 1 하이브리드 스텝핑 모터의 디텐트 토크

하이브리드 스텝핑 모터의 디텐트 토크를 포함한 운동방정식은 식(8)과 같이 표현된다.

$$T_e + T_{det} = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (8)$$

여기서 J 는 관성모멘트, ω_{rm} 은 기계적 각속도, B 는 마찰 토크 상수, T_L 은 부하 토크를 나타낸다. 디텐트 토크는 시스템 외란으로 작용하며 디텐트 토크와 동일한 주파수의 속도 리플을 발생시킨다. 이러한 속도 리플을 제거하기 위하여 디텐트 토크 보상 기법이 요구된다.

2.3 디텐트 토크 보상 기법

디텐트 토크의 영향을 제거하기 위한 보상 토크 발생을 위하여 q축 전류를 사용한다. 요구되는 보상 토크 및 보상 토크 발생을 위한 q축 전류는 아래 식과 같이 표현된다.

$$T_{comp} = K_{det} \sin 4\theta_r \quad (9)$$

$$i_{q_comp} = \frac{T_{comp}}{K_T} = \frac{K_{det}}{K_T} \sin 4\theta_r = K_{det_comp} \sin 4\theta_r \quad (10)$$

식(10)에서 보상 토크 발생을 위한 q축 전류의 크기 K_{det_comp} 를 구할 필요가 있다. 본 논문에서는 디텐트 토크에 의해 발생하는 기본과 주파수의 4배의 속도 리플의 크기를 추출하고, 이를 입력으로 하는 PI 제어기를 사용하여 그 출력을 보상 토크 발생을 위한 q축 전류지령의 크기로 사용하였다.

속도 리플의 크기는 헤테로다인 기법을 사용하여 다음과 같이 간단하게 추출할 수 있다.

$$\omega_r = \omega_{r_DC} + a \sin 4\theta_r + b \cos 4\theta_r \quad (11)$$

$$\frac{a}{2} = LPF(\omega_r \times \sin 4\theta_r), \quad \frac{b}{2} = LPF(\omega_r \times \cos 4\theta_r) \quad (12)$$

$$\omega_r^{4th} = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (13)$$

여기서 ω_r 은 속도, ω_{r_DC} 는 속도의 DC 성분, a, b는 속도 리플의 기저 성분 크기, ω_r^{4th} 는 속도 리플의 크기이다.

그림 2는 제안된 디텐트 토크 보상기의 블록도를 나타낸다. 속도 정보로부터 리플 성분의 크기를 추출 후, 이를 입력으로 하는 PI 제어기의 출력을 보상 전류지령의 크기로 사용하고 전류 응답의 위상 지연 $\Delta\theta_{comp}$ 을 고려한 $\sin 4(\theta_r + \Delta\theta_{comp})$ 을 곱하여 q축 보상 전류지령을 생성한다.

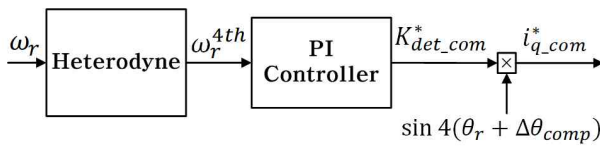


그림 2 제안된 디텐트 토크 보상기

그림 3은 디텐트 토크 보상 알고리즘이 포함된 하이브리드 스텝핑 모터의 속도 제어 블록도를 나타낸다. 속도 제어를 위해 주어지는 q축 전류지령에 디텐트 토크 보상을 위한 성분이 더해져 최종 q축 전류지령이 결정된다.

3. 시뮬레이션 결과

제안된 디텐트 토크 보상 기법의 유효성을 검증하기 위해 Matlab/Simulink를 이용하여 2상 하이브리드 스텝핑 모터 구동 시뮬레이션을 진행하였으며 시뮬레이션에 사용된 스텝핑 모터의 파라미터는 표 1에 나타내었다.

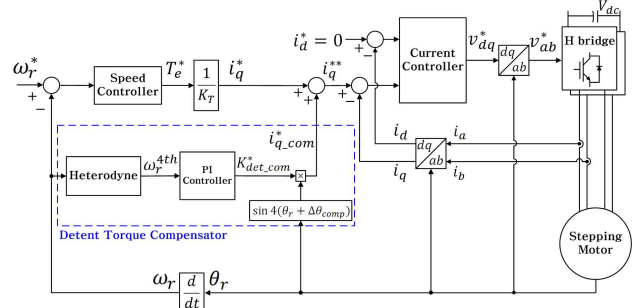


그림 3 디텐트 토크 보상을 포함한 하이브리드 스텝핑 모터의 속도 제어 시스템

표 1 2상 하이브리드 스텝핑 모터 파라미터

Number of Poles	100
Rated current	1.2 A
R_s	3.8 Ω
L_s	8 mH
λ_{pm}	8.333 mWb
J	77 g·cm ²

그림 4는 무부하 시 100r/min으로 속도 제어 중 0.3초에 디텐트 토크 보상 기법이 적용된 경우 출력 토크 및 속도를 나타낸다. 미 보상 시 속도 제어를 위한 출력 토크 T_e 와 디텐트 토크 T_{det} 의 합에 의해 약 1.7r/min의 속도 리플이 발생하지만, 보상 기법 적용 후 디텐트 토크를 상쇄하기 위한 출력 토크가 보상되며 그 결과 속도 리플의 크기가 약 0.03r/min으로 보상 전과 비교하여 98.2% 감소하였다.

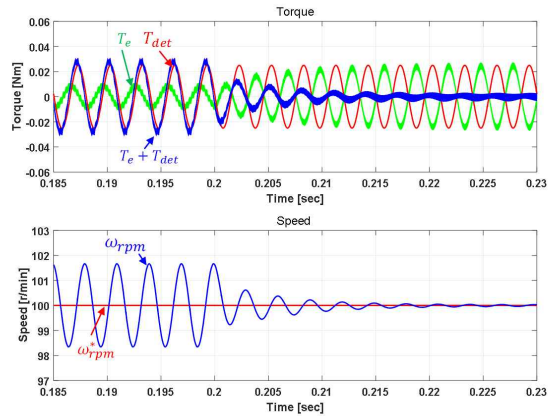


그림 4 정상상태에서 토크 및 속도

4. 결론

본 논문에서는 2상 하이브리드 스텝핑 모터의 벡터 제어 시 디텐트 토크 보상 기법을 제안하였다. 지령 토크 발생을 위해 요구되는 q축 전류지령에 디텐트 토크를 상쇄하기 위해 요구되는 보상 전류지령을 구해 디텐트 토크 보상 제어를 실현하였다. 제안된 디텐트 토크 보상 기법을 적용한 경우 속도 리플이 크게 감소함을 확인하였다.

참고 문헌

[1] T. Kenjo, *Stepping Motors and Their Microprocessor Controls*, Oxford Univ. Press, Ch. 6, 1984.