직류 전동기의 모델링을 통한 전류 맥동의 특성 분석

김형진, 박형석, 허홍준, 김장목
부산대학교 전기공학과

Analysis of Current Ripple Characteristic by Modeling of DC Motor

Kim Hyeong-Jin, Park Hyung-Seok, Heo Hong-Jun, Kim Jang-Mok
Department of Electrical Engineering, Pusan National University.

ABSTRACT

직류 전동기는 연속적으로 회전하기 위해서 브러시와 정류자로 이루어진 기계적인 정류 회로를 가진다. 회전자의 위치에 따라 브러시와 정류자의 접촉 구조가 변하고 직류 전동기의 등가 회로 또한 달라진다. 이러한 구조적 문제점 때문에 직류 전동기의 저항, 인덕턴스, 역기전력 상수와 같은 파라미터가 변화하고 전동기가 회전하면서 전기자 전류에 맥동이 발생한다. 본 논문에서는 기계적인 정류 회로를 고려한 직류 전동기를 모델링하고 분석하였다. 그리고 브러시와 정류자에 의한 전기자 전류의 맥동이 위치 제어의 응답 특성에 어떤 영향을 미치는지 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

1. 서 론

최근에는 교류 전동기의 제어 기술과 전력 전자 기술 및 마이크로프로세서의 커다란 발전으로 말미암아 직류 전동기를 교류 전동기로 대체하여 사용하고 있다. 하지만 직류 전동기는 로보틱스와 자동차 분야 등과 같이 수십 와트 미만의 저가 응용 분야에서 많이 사용되고 있다. 산업계에서 직류 전동기를 제어할 때 많은 경우에 있어 위치 제어가 필요하게 된다. 그리고 위치 제어 시스템은 점진적으로 정밀 위치 제어를 요구하고 있으므로 위치 제어의 응답 속도, 안정성과 같은 응답 특성이 시스템의 성능을 나타내는 중요한 지표가 된다.[1][2]

직류 전동기에는 연속 회전을 위해 구조상 브러시와 정류자가 요구되는데 브러시와 정류자에 의한 정류 현상이 전동기의 특성에 나쁜 영향을 미친다. 그러므로 브러시와 정류자로 이루어진 기계적인 정류 회로를 가지는 직류 전동기 분석할 필요성이 있다.

본 논문에서는 직류 전동기의 브러시와 정류자의 접촉 구조에 따른 등가 회로를 모델링하고 파라미터의 변화를 분석하였다. 그리고 이러한 파라미터의 변화가 위치 제어의 응답 특성에 어떤 영향을 미치는지 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

2. 일반적인 직류 전동기의 모델링

기계적인 정류 회로의 영향을 고려하지 않은 직류 전동기의 전압 방정식과 역기전력은 수식 (1), (2)와 같다. 저항, 인덕턴스, 역기전력 상수와 같은 전동기의 등가 파라미터는 약간의 오차가 발생하지만 일반적으로 고정된 값을 가진다.

$$V_a = R_{eq} i_a + L_{eq} \frac{di_a}{dt} + E_{eq} \quad (1)$$

$$E_{eq} = k_{eq} \omega_m \quad (2)$$

V_a : 전기자 전압, i_a : 전기자 전류, R_{eq} : 등가 저항
L_{eq} : 등가 인덕턴스, E_{eq} : 등가 역기전력
k_{eq} : 등가 역기전력 상수, ω_m : 전동기의 회전 속도

3. 직류 전동기의 모델링 및 분석

직류 전동기는 회전자의 위치에 따라 브러시와 정류자의 접촉 구조는 달라지고 직류 전동기의 등가 회로 또한 계속해서 변화한다. 본 논문에서는 브러시가 두 개일 때 기계적인 정류 회로의 정류자편의 개수에 따라 변하는 직류 전동기의 등가 회로를 모델링하였다. 직류 전동기(6극 13슬롯 2피치)의 브러시와 정류자편의 개수가 각각 2개, 13일 때 직류 전동기의 등가 회로는 그림 1과 같다.

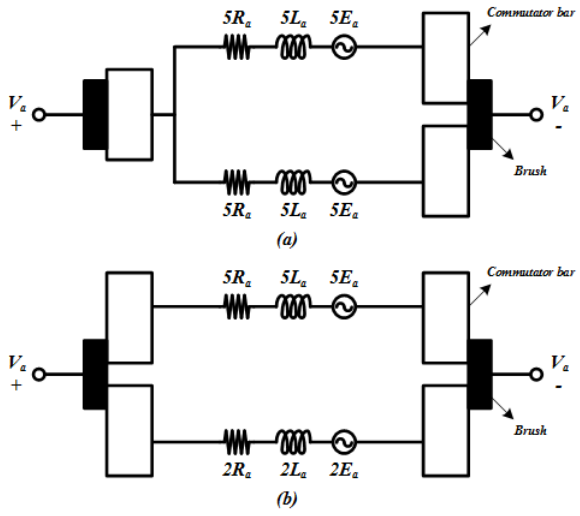

그림 1 기계적인 정류 회로를 가지는 직류 전동기의 등가 회로
Fig. 1 Equivalent circuit of dc motor with mechanical inverting circuit

그림 1 (a)는 브러시와 접촉하는 정류자편의 개수가 각각 1개, 2개일 때, 그림1 (b)는 브러시와 접촉하는 정류자편의 개수가 각각 2개, 2개일 때의 등가 회로다. 직류 전동기의 등가 회로가 회전자의 위치에 따라 달라지므로 직류 전동기의 R_{eq}, L_{eq}, k_{eq}와 같은 등가 파라미터도 또한 고정되지 않고 변한다는 사실을 알 수 있다.

4. 기계적인 정류 회로의 영향

그림 1에서 모델링한 직류 전동기로 전기자 전류와 등가 파리미터의 변화를 분석하였다. 그림 1 (a), (b)의 직류 전동기 등가 회로에 흐르는 전기자 전류는 정상상태일 때 각각 수식 (3), (4)와 같다.

$$i_a = \frac{V_a - 5E_a}{5R_a} + \frac{V_a - 5E_a}{5R_a} = \frac{V_a - 2.5E_a}{2.5R_a} \quad (3)$$

$$i_a = \frac{V_a - 5E_a}{5R_a} + \frac{V_a - 2E_a}{2R_a} = \frac{V_a - \frac{20}{7}E_a}{\frac{10}{7}R_a} \quad (4)$$

수식 (3), (4)를 통해 직류 전동기의 등가 파라미터인 R_{eq}, L_{eq}, k_{eq}가 각각 $2.5R_a$, $2.5L_a$, $2.5k_e$ 이 되는 경우와 $\frac{10}{7}R_a$, $\frac{10}{7}L_a$, $\frac{20}{7}k_e$ 이 되는 경우가 발생한다. 그러므로 회전자의 위치에 따라 달라지는 파라미터에 의해 전기자 전류도 달라지면서 맥동이 발생한다.

5. 위치 제어의 응답 특성 시뮬레이션

직류 전동기의 위치 제어 시스템은 그림 2와 같다. 전동기의 위치를 제어하기 위해 위치 제어기와 하위 제어기인 속도 및 전류 제어기로 시스템을 구성하고 위치, 속도, 전류 제어기는 각각 P, PI, PI 제어기를 사용한다. 전동기가 회전하면서 브러시와 접촉하는 정류자가 바뀔 때마다 전류에 맥동이 발생하기 때문에 전류 제어의 안정성이 떨어지면서 제어가 제대로 되지 않는다. 전류 제어의 응답 특성이 나쁘기 때문에 전류 제어기 뿐만 아니라 상위 제어기인 속도 제어기와 위치 제어기의 응답 특성도 저하된다. 그러므로 위치 제어 시스템에서 응답 특성을 개선하기 위해서는 기계적인 정류 회로에 의한 전류의 맥동을 저감할 필요성이 있다.

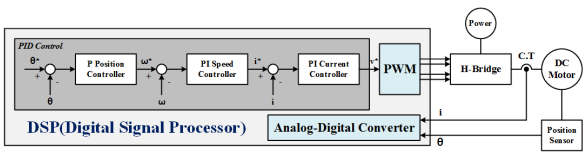

그림 2 직류 전동기의 위치 제어 시스템
Fig. 2 Position control system of dc motor

위치 제어 시스템에서 브러시와 정류자로 이루어진 기계적인 정류 구조가 위치 제어의 응답 특성에 어떤 영향을 미치는지 확인하기 위해 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 3 (a)는 기계적인 정류 회로의 영향이 없는 직류 전동기의 위치 제어 및 속도, 전류 제어의 응답 파형이고 그림 3 (b)는 기계적인 정류 회로의 영향이 있는 직류 전동기의 응답 파형이다. 두 가지의 경우를 비교하기 위해서 같은 대역폭을 사용하여 제어하였다.

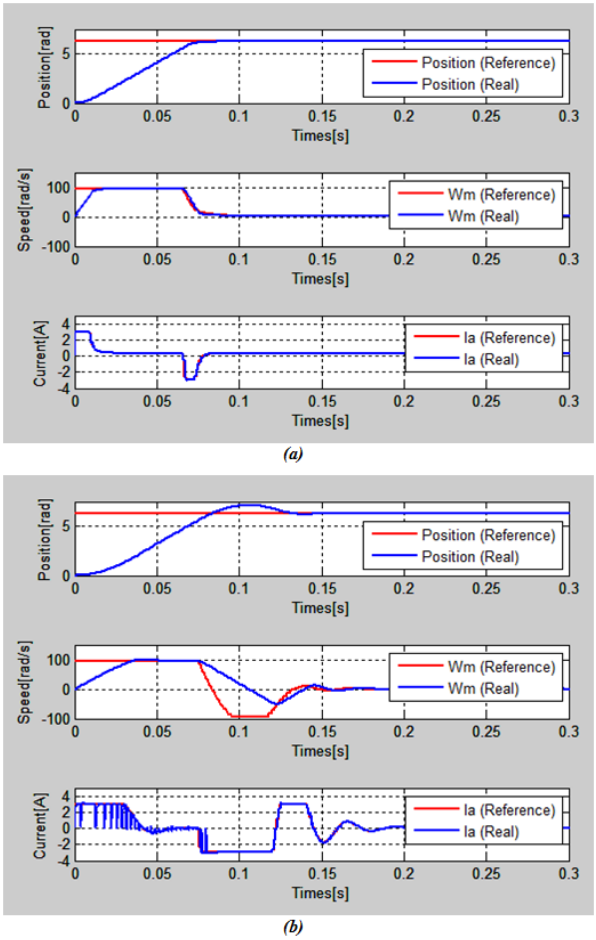

그림 3 직류 전동기의 위치, 속도, 전류 제어의 응답 파형
Fig. 3 Response waveform of Position, speed, current control

5. 결론

본 논문에서는 직류 전동기의 기계적인 정류 회로에 의한 전기자 전류의 맥동을 분석하였고 이러한 맥동이 위치 제어의 응답 특성에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원이 지원하는 경제협력권산업 육성사업으로 수행된 연구결과입니다 [과제번호:R0004017].

참 고 문 헌

[1] 김상훈. DC, AC, BLDC 모터제어. 복두 출판사, 2010.
[2] C. Rossi, A. Tilli, and A. Tonielli, "Robust control of a throttle body for drive by wire operation of automotive engines," IEEE Transaction on Control Systems Technology, vol. 8, pp. 993-1002, 2000.