

마이크로 터빈용 브러시리스 직류전동기 구동시스템

이광운¹, 안민혁²
목포해양대학교¹, 전기연구원²

Brushless DC Motor Drive System for Micro Turbine Application

Kwang Woon Lee¹, Min Hyuk An²
Mokpo National Maritime University¹, KERI²

ABSTRACT

본 논문에서는 배터리, 양방향 DC DC 컨버터, 그리고 브러시리스 직류 전동기로 구성되는 마이크로 터빈 구동 시스템의 제어 방식에 대해 소개한다. 브러시리스 직류 전동기 구동용 인버터의 직류링크 전압이 가변되기 때문에 기존의 소신호 모델 기반으로는 양방향 DC DC 컨버터의 과도 응답 제어 성능이 저하되는 문제점이 있다. 본 논문에서는 평균 모델을 이용하여 양방향 DC DC 컨버터를 제어함으로써 과도 응답 제어 성능을 개선하였고, PAM 방식 제어를 이용하여 브러시리스 직류 전동기의 고속 센서리스 운전을 구현하였다.

1. 서론

본 논문에서 다루고자 하는 마이크로 터빈용 브러시리스 직류전동기(BLDC) 구동 시스템의 구성은 그림 1과 같다. 28[V] 배터리에 양방향 DC DC 컨버터가 부착되고, 3상 인버터에 의해 BLDC 전동기가 구동된다. 마이크로 터빈 발전기가 발전 모드로 동작하기 위해서는 BLDC 전동기로 터빈을 20만[rpm]까지 돌려주어야 하고, 20만[rpm]에서 터빈이 점화되면 40만[rpm]의 속도로 BLDC 전동기가 터빈에 의해 구동되어 발전기로 동작한다. 양방향 컨버터는 전동 및 발전 모드에서 각각 부스트(boost) 및 벙크(buck) 컨버터로 동작하고, 본 논문에서 사용된 BLDC 전동기는 SPM 타입으로 사양은 표 1과 같다. BLDC 전동기는 센서리스 방식으로 구동된다.

표 1에 나타낸 바와 같이, BLDC 전동기의 고정자 인덕턴스가 작은 값을 갖기 때문에 원활한 전류 제어를 위해서는 외부에 공심 코어 형태의 인덕터를 추가하거나, 스위칭 주파수를 올려야 한다. 이로 인해 제어 시스템이 복잡도가 증가하기 때문에, 본 논문에서는 PAM(Pulse Amplitude Modulation) 방식으로 BLDC 전동기를 구동하는 방식을 사용하여 제어 시스템의 구성을 간략화 하였다. PAM 방식을 사용하기 위해서는 인버터 DC link 전압을 전동기 회전 속도에 맞추어 적절히 제어할 필요가 있다. 기존의 DC DC 컨버터 제어 방식에서는 특정 동작점을 기준으로 선형화된 전달 함수를 구하고, 이를 기반으로 원하는 대역폭과 위상 여유를 만족하는 제어를 주파수 영역에서 설계한다. PAM 방식의 경우 인버터 DC link 전압이 가변되므로 특정 동작점에 한정되어 DC DC 컨버터가 동작하는 것이 아니다. 따라서, 기존의 소신호 모델 기반 DC DC 컨버터 제어로서는 적절한 과도 응답 제어 성능을 기대하는 것이

곤란하다. 본 논문에서는 상태 공간에서의 평균 모델을 사용하여 PAM 제어에 적합한 DC DC 컨버터 제어 알고리즘을 제안하고자 한다.

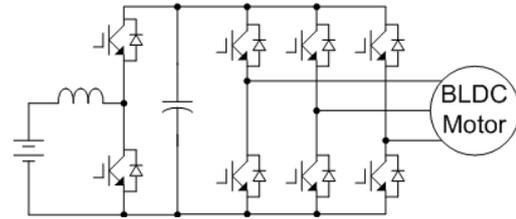


그림 1 마이크로 터빈용 브러시리스 직류전동기 구동시스템
Fig. 1 Brushless DC Motor Drive System for Micro Turbine Application

표 1 BLDC 전동기의 사양
Table 1 Specifications of the BLDC motor

Number of poles	2
Phase resistance	0.26 [Ω]
Stator inductance	68 [μ H]
Line to line back EMF constant	0.67 [V/krpm]

2. PAM 제어를 위한 Boost 컨버터의 제어 방식

입력전원으로 배터리가 사용되는 경우 배터리의 물리적 특성을 고려하여 과도 상태 및 정상 상태에서 최대 출력전류를 제한할 필요가 있다. 또한, 부스트 컨버터를 전압 제어만으로 제어하는 경우 과도 상태에서 오버 슈트에 의한 PAM 제어 성능이 저하될 수 있기 때문에 본 논문에서는 전류 제어 및 전압 제어의 2중 루프로 구성된 제어기로 부스트 컨버터를 제어하였다. 기존의 전류제어기 설계 방식에서는 다음과 같이 부스트 컨버터의 소신호 모델 기반 전달함수를 사용한다.^[1]

$$\frac{i_L(s)}{d(s)} = \frac{RCV_o s + V_o + (1-D)I_L R}{RLC s^2 + Ls + (1-D)^2 R} \quad (1)$$

식 (1)에서, R,L,C는 각각 부하의 등가 저항, 입력 인덕터의 인덕턴스, 출력 커패시터의 커패시턴스 값이고, I_L , V_o , D 는 각각 특정 동작 점에서의 인덕터 전류, 출력 전압, PWM 시비율이다. PAM 제어를 하기 위해서는 전동기 회전 속도에 맞추어서 부스트 컨버터의 출력 전압을 제어해 주어야 한다. 이것은 부스트 컨버터의 동작점이 전동기 속도에 따라서 변화하는 것

을 의미한다. 식 (1)은 모든 동작 영역에서의 PWM 시비율에 대한 부스트 컨버터의 인덕터 전류 응답을 대표하는 전달함수가 아니기 때문에, 기존의 소신호 모델 기반 전류제어기 설계에서는 원하는 과도 응답 특성을 설계를 통해 직접적으로 구할 수 없는 단점이 있다. 부스트 컨버터의 전압제어 성능은 전류제어 성능에 직접적으로 영향을 받는다. 따라서, 기존 소신호 모델 기반의 제어 방식을 사용하는 경우 PAM 제어에 필수적인 적절한 DC link 전압 제어 성능을 얻을 수 없게 된다. 이러한 소신호 모델 기반 제어의 단점은 인덕터 평균 전압 제어를 통해 해결할 수 있다. 부스트 컨버터가 CCM 모드로 동작하도록 설계된 경우, 부스트 컨버터의 PWM 시비율을 다음과 같이 조절함으로써 인덕터 전류 제어 모델을 선형화할 수 있다.^[2]

$$D = \frac{(v_L^* - v_i + v_o)}{v_o} \quad (2)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_L^*}{L} \quad (3)$$

식 (3)을 이용하는 경우 전류 제어기를 포함하는 인덕터 전류제어 폐루프 전달함수는 다음과 같으며, 제어 이득들(k_p , k_i)은 2차 시스템에 대한 설계 기법들을 활용하여 쉽게 설정할 수 있다.^[2]

$$\frac{i_L}{i_L^*} = \frac{k_p s + k_i}{Ls^2 + (k_p + R)s + k_i} \quad (4)$$

부스트 컨버터의 출력 전압은 출력 단에 사용되는 커패시터의 평균 전류 모델을 이용하여 설계할 수 있다. 정상 상태에서 커패시터의 평균 전류는 0이 되며, 커패시터 전압은 커패시터 평균 전류를 제어함으로써 제어할 수 있다. 커패시터 전류를 직접 검출하여 제어하는 것은 어렵기 때문에, 본 논문에서는 커패시터 평균 전류와 인덕터 평균 전류, 부하 전류 간의 관계를 커패시터의 평균 전류 모델로 표현하고, 다음과 같이 인덕터의 평균 전류를 통해 커패시터 평균 전류를 간접적으로 제어하는 방식을 사용하였다.

$$i_C^* = \frac{v_o}{v_{in}} (i_C^* + i_{load}) \quad (5)$$

부하 전류(i_{load})는 BLDC 전동기에 공급되는 전류로서, 전류 센서를 사용하여 검출이 가능하다. 식 (5)에 의해 커패시터 전류 지령(v_C^*)으로부터 인덕터 전류 지령을 만들어 주는 경우 커패시터의 평균 전류를 인덕터 전류 제어를 통해 제어하는 것이 가능해진다. 또한, 출력 커패시터 전압 제어기의 폐루프 전달함수는 커패시터 평균 전류 제어가 적절히 이루어진다는 가정 하에 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\frac{v_C}{v_C^*} = \frac{k_{pv}s + k_{iv}}{Cs^2 + k_{pv}s + k_{iv}} \quad (6)$$

식 (6)에서 전압 제어기의 이득들(k_{pv} , k_{iv})은 2차 시스템에 대한 설계 기법들을 활용하여 쉽게 설정할 수 있다.

그림 2는 제안된 부스트 컨버터 전류 및 전압 제어 방식을 적용하여 모의 실험을 진행한 결과 파형으로, 커패시터 전류 지령에 의해 인덕터 전류 지령이 만들어지고, 인덕터 전류 제어가 적절히 이루어지고 있음을 알 수 있다. 그림 3은 마이크로 터빈 구동용 BLDC 모터를 PAM 방식의 센서리스 제어로 20만[rpm]으로 구동했을 때 정상 상태에서의 주요 파형들을 나타낸 것으로, 센서리스 제어가 적절하게 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

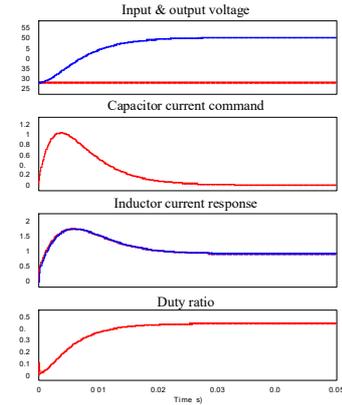


그림 2 제안된 방식에 의한 부스트 컨버터 제어 모의실험 결과

Fig. 2 Simulation results for the boost converter control using the proposed method

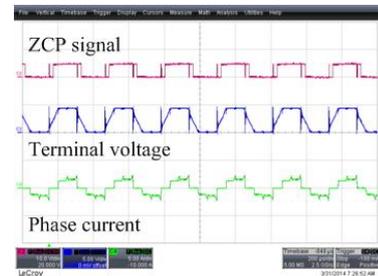


그림 3 PAM 제어에 의한 센서리스 BLDC 모터 제어 실험결과
Fig. 3 Experimental results of the sensorless BLDC motor control using PAM control

3. 결론

본 논문에서는 마이크로 터빈용 BLDC 전동기 구동 시스템의 제어 방식에 대해 기술하였다. BLDC 전동기의 센서리스 구동을 위해 구형과 구동 방식과 PAM 방식을 채택하였으며, 양방향 DC DC 컨버터의 효율적인 제어를 통해 터빈 점화에 필요한 20만[rpm]의 속도까지 BLDC 전동기를 센서리스 방식으로 구동 가능성을 실험적으로 입증하였다. 향후, 발전과 관련된 기계 시스템이 완성되면 배터리 충전 모드에 대한 실험적 검증이 추가적으로 진행될 예정이다.

이 논문은 인더스콘의 연구비 지원에 의하여 연구되었습

참고 문헌

- [1] R.W. Erickson and D. Maksimović, A Fundamentals of Power Electronics. Norwell, MA: Kluwer, 2001.
- [2] K. W. Lee, "Design and Implementation of a Current Controller for Boost Converters Using a DSP," *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 17, No. 3, pp. 259-265, Jun. 2012.