

유도형 탄약의 조종날개 제어용 Sensorless BLDC 전동기 구동시스템 개발

김상훈¹, 이태형¹, 조창연², 박장호², 김재호²
 강원대학교 전기전자공학과¹, (주)풍산 기술연구원²

Sensorless BLDC Motor Control to Drive Fins for Flight Attitude Control of a Guided Artillery Munition

Sang Hoon Kim¹, Tae Hyung Lee¹, Chang Yeon Cho², Chang Ho Pak², Jae Ho Kim²
¹Kangwon National University, ²Poongsan R&D Institute

ABSTRACT

본 논문에서는 유도형 활공 탄약의 비행경로 제어와 자세유지를 위해 장착된 꼬리 날개 구동을 위한 BLDC 전동기 제어 시스템을 개발하였다. 이 시스템에서는 높은 고도에서의 비행 시 압력에 취약한 홀(Hall) 센서와 같은 회전자의 위치 검출 센서를 사용하지 않는 센서리스(Sensorless) 구동 방식을 적용하였다. 측정된 극전압으로부터 상전환 신호를 추출하여 BLDC 전동기의 센서리스 구동을 실현하였으며, 또한 상전환 신호로부터 추정된 속도를 사용하여 속도 제어를 통해 꼬리날개의 변위 명령 추종을 위한 위치 제어를 수행하였다. 실제 구현된 시스템에서의 실험을 통해 개발된 센서리스 제어 알고리즘을 적용하여 위치 제어의 성능이 우수함을 확인하였다.

1. 서론

본 논문의 연구 대상인 유도형 탄약(Guided artillery munition)은 기존 유도형 탄약의 사거리와 타격 정밀도를 향상시키기 위해 정밀 유도 기술과 활공 개념을 도입한 무기체계이다. 그림 1에 보이는 유도형 탄약에는 기존 포탄에 활공을 위한 활공날개와 자세 제어를 위한 조종날개가 장착된다. 본 연구에서는 유도형 탄약의 자세 제어용 4개의 꼬리 날개를 제어한다. 조종 날개의 구동을 위해 높은 고도에서 비행 시 압력에 취약한 회전자 위치 검출 센서인 홀(Hall) 센서를 사용하지 않는 센서리스 BLDC 전동기를 사용하여 역기전력의 회전자 정보를 검출하여 센서리스 구동을 하였다. 또한 유도형 탄약의 비행경로나 자세유지에 요구되는 4축 꼬리 날개의 변위 명령 추종을 위한 위치 제어를 수행하였다.



그림 1. 유도형 탄약의 구조

2. 조종 날개 구동을 위한 센서리스 BLDC 전동기 제어

2.1 센서리스 제어 기법

센서리스 BLDC 전동기를 구동하기 위해 비교적 구현이 간단한 역기전력의 정보를 이용하여 센서리스 제어하는 방법을 적용하였다. 3상 BLDC 전동기 구동 시 두 상만 여자 되므로 개방된 나머지 한 상 권선에서는 역기전력이 나타난다. 따라서 비 여자상의 극전압을 측정하면 역기전력을 측정할 수 있다. 역기전력이 0을 통과하는 지점(Zero Crossing Point, ZCP)을 검출하여 상 전환 시점에 대한 정보를 얻을 수 있다. BLDC 전동기 구동 시 요구되는 지령 전압을 발생시키기 위해 유니폴라(Unipolar) PWM방식 중 상단 스위치 기법을 적용하였다.^[1]

ZCP 검출은 전동기의 중성점 전압의 사용 없이 PWM 오프(Off) 구간에서 비 여자상의 극전압과 영전압과의 비교를 통해 검출할 수 있다.^[2] 하지만 PWM의 듀티(Duty)가 1에 가까워지는 고속 영역에서는 오프 구간이 매우 작아지기 때문에 비교 동작이 어려워진다. 그래서 본 연구에서는 꼬리 날개 구동 시 비행 외력으로 인해 큰 토크가 요구되어 큰 듀티비로 동작해야 하기 때문에 PWM 신호의 온(On) 구간에서 비교 동작을 수행하도록 하였다. 온 구간에서 비교 동작을 수행하는 경우 ZCP를 검출하기 위한 비교 값은 0이 아닌 다른 값으로 선정해야 되는데 그 값은 다음과 같이 얻을 수 있다.

그림 2의 PWM 신호의 온 구간에서 비 여자상인 C상의 극전압은 다음과 같다.

$$v_c = e_c + v_n \quad (1)$$

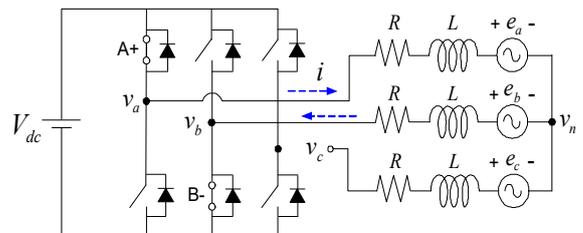


그림 2. PWM 온 구간에서의 회로

여기서 중성점 전압 v_n 은 다음과 같은 A상과 B상의 전압방정식으로부터 구할 수 있다.

$$V_{dc} = Ri + L \frac{di}{dt} + e_a + v_n \quad (2)$$

$$0 = -Ri - L \frac{di}{dt} + e_b + v_n \quad (3)$$

이들 두 식으로부터 중성점 전압 v_n 을 구해보면 다음과 같다.

$$v_n = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{e_a + e_b}{2} = \frac{V_{dc}}{2} + \frac{e_c}{2} \quad (4)$$

이 중성점 전압을 식(1)에 대입하면 다음과 같은 C상의 극전압 v_c 를 구할 수 있다.

$$v_c = \frac{V_{dc}}{2} + \frac{3}{2}e_c \quad (5)$$

이 식으로부터 C상 극전압이 $V_{dc}/2$ 가 되는 시점이 바로 역기전력이 0이 되는 지점(ZCP)임을 알 수 있다. 실제 상 전환 시점은 ZCP로부터 전기각 30° 이후의 지점이 된다. 따라서 검출된 극전압 신호를 $V_{dc}/2$ 와 비교하여 ZCP를 검출하고, ZCP로부터 속도를 계산하여 전기각 30° 이후의 상 전환 시점을 알아내어 BLDC 전동기를 센서리스로 구동한다. 또한 얻어진 3상 역기전력의 ZCP로부터 BLDC 전동기의 회전속도를 T방식으로 구하여 속도 제어와 위치 제어를 수행하였다.^[1]

2.2 센서리스 BLDC 전동기의 구동과정

그림 3에 조종 날개 구동용 BLDC 전동기의 전체 구동 시스템이 보인다. 구동 시스템은 위치 제어기, 속도 제어기, 전류 제어기로 구성된다. BLDC 전동기의 센서리스 구동 과정은 크게 세 단계로 구분되는데, 기동을 위한 회전자의 초기위치 정렬 과정, 필요한 역기전력의 정보를 확보하기 위한 기동과 동기 가속 과정 그리고 센서리스 구동 과정으로 구성된다.

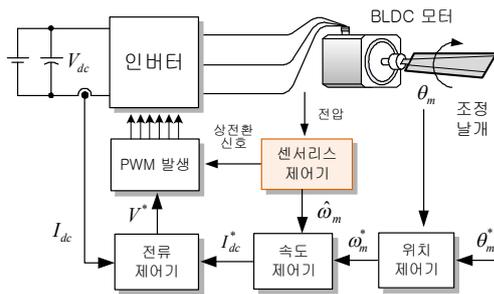


그림 3. BLDC 전동기 구동 시스템 블록도

3. 실험 결과

그림 4는 실험에 사용된 BLDC 전동기와 조종 날개의 모습으로 BLDC 전동기는 감속기를 통해 조종 날개와 연결되어 있다. 그림 5는 검출 회로로부터 측정된 3상 극전압을 이용하여 얻은 역기전력의 ZCP에서 토글(Toggle)시킨 신호이다. 그림 6은 45° 의 위치 지령에 대한 추종 결과이다. 위치 지령에 따른 속도 지령 패턴에 따라 동기 가속 후 센서리스 제어로 전환하여 일정한 속도로 구동한 다음에 속도를 감속하고 지령위치에 접근하면 정지시켜 최종위치에 도달하도록 하였다.

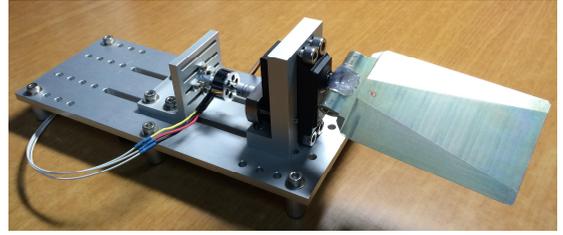


그림 4. Sensor less BLDC 전동기와 조종날개

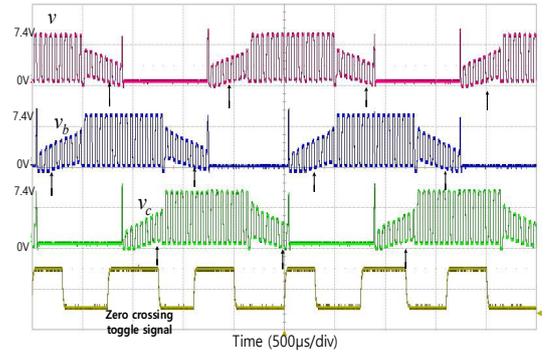


그림 5. 3상 극전압과 역기전력의 ZCP 토글 신호

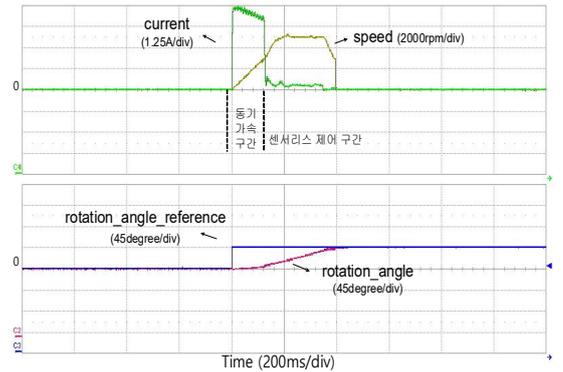


그림 6. 회전각 지령 45° 에 대한 위치 제어 특성

4. 결론

본 논문에서는 유도형 탄약의 자세 제어에 사용되는 조종 날개 구동을 위한 BLDC 전동기의 센서리스 제어 시스템을 개발하였다. 측정된 극전압으로부터 얻은 역기전력의 ZCP 정보를 기반으로 하는 센서리스 기법을 적용하여 상 전환 신호와 속도를 추정하였는데, 높은 PWM 듀티가 필요한 본 응용분야에 적합하도록 PWM 온 구간에서 ZCP를 검출하도록 하여 안정된 센서리스 제어가 가능하도록 하였다. 실제 조종 날개 구동 세트에 대한 실험을 통해 개발된 알고리즘에 의한 조종 날개의 회전각 제어가 원활히 수행됨을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] 김상훈, *DC, AC, BLDC 모터제어*, 북두출판사, 3판 2013.
- [2] Jianwen Shao, "An Improved Microcontroller Based Sensorless Brushless DC(BLDC) Motor Drive for Automotive Applications" *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 42, no. 5, pp. 1216 1221, Sep/Oct, 2006.