

유도형 탄약의 조정날개 구동용 Sensorless BLDC 전동기의 출력 토크 향상을 위한 여자 기법

Excitation Scheme to Enhance Output Torque of Sensorless BLDC Motor to Drive the Flight Attitude Control Fins of a Guided Artillery Munition

이 태 형* 김 상 훈**
Lee, Tae-Hyung Kim, Sang-Hoon

Abstract

In this paper, a new excitation scheme is developed to increase the output torque of the sensorless BLDC(Brushless DC) motor(BLDCM), which drives fins to control the flight attitude of a guided artillery munition. The proposed scheme is based on a 12-step excitation strategy combining two-phase and three-phase excitations. The proposed 12-step excitation scheme can produce more torque than a typical 6-step scheme for the start-up and synchronous operation in the sensorless BLDCM drive. The simulation and experimental results on the sensorless BLDCM drive system to control the fin were verified the validity of the proposed scheme.

키워드 : BLDC 전동기, 유도 무기, Sensorless 제어, 12-스텝 여자 방식
Keywords : BLDC motor, Guided artillery munition, Sensorless control, 12-step excitation scheme

1. 서론

BLDC(Brushless DC) 전동기는 구동 방식이 간단하고 가격이 저렴하며 고효율, 고출력밀도, 고토크/관성 비의 특성과 고속 운전이 가능한 장점으로 인하여 현재 에어컨과 냉장고의 압축기, 팬(Fan), 송풍기, 세탁기의 드럼(Drum), 재봉틀 등의 가전기기로부터, HDD, DVD, CD 플레이어 등의 정보통신기기와 서보 구동 및 전기 자전거, 전기 스쿠터 등에 이르기까지 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다.

유도형 탄약은 탄약의 사거리와 타격 정밀도를

향상시키기 위해 정밀 유도 기술과 활공 개념을 도입한 초장사정 무기체계이다. 그림 1에 보이듯이 유도형 탄약에는 활공 시 양력 생성을 위한 활공 날개 이외에 자세 제어용으로 4개의 꼬리 날개가 장착되어있다. 유도형 탄약에 장착된 조종날개의 구동을 위해서 구동이 쉽고 소형화가 가능한 BLDC 전동기가 사용된다. 이러한 BLDC 전동기 구동 시에는 높은 고도에서의 비행 시 압력에 취약하고 신뢰성이 떨어지는 회전자 위치 검출 센서인 홀(Hall) 센서를 사용하지 않는 센서리스 제어가 적용되고 있다[1][2]. 센서리스 기법으로는 역기전력의 정보를 이용하여 회전자의 위치를 추정하는 통상적인 방법이 사용된다[1]~[4]. 이러한 방식의 센서리스 제어의 경우 충분한 크기의 역기전력이 검출되는 속도에 이르기까지는 동기 가속이 필요하다. 이와 같은 개루프 방식으로 운전되는 저속

* 강원대학교 전기전자공학과 석사과정

** 강원대학교 전기전자공학과 교수, 교신저자

영역의 동기 가속 구간에서는 유도형 탄약의 조종날개가 받는 큰 외력에 대해 동기 이탈을 방지하고 제어 성능을 향상할 수 있도록 BLDC 전동기의 출력 토크를 향상시키도록 할 필요가 있다.

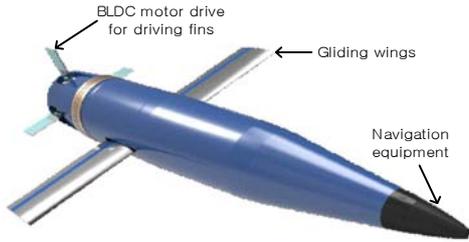


그림 1. 유도형 탄약의 구조

3상 BLDC 전동기는 120° 간격으로 배치된 홀 센서의 위치 정보로부터 한 주기를 6구간으로 구분하여 6-스텝(Step)으로 운전한다. 각각의 구간에서의 권선 여자 방식으로는 통상적으로 3상 권선 중에 두 권선만 여자하는 2상 여자 방식이 사용된다[5]. 그러나 이러한 2상 여자 방식은 유도 전동기나 동기 전동기 등의 교류 전동기 구동에 사용되는 3상 여자 방식보다 권선에 흐르는 전류의 크기와 도통 구간이 감소되어 출력 토크를 효과적으로 발생시킬 수 없다.

본 논문에서는 통상적인 BLDC 전동기의 2상 여자 방식에 추가로 교류 전동기 구동 시에 사용되는 3상 여자 방식을 혼합한 12-스텝 운전 방식을 제안하였다. 제안된 혼합 여자 방식은 통상적인 2상 여자 방식에 의한 6-스텝 구동 방식보다 출력 토크를 12.5% 향상시킬 수 있다. 따라서 제안된 기법으로 조종날개의 동기 가속 구간에서 구동하는 경우 동기 이탈 방지와 제어 성능을 향상시킬 수 있다.

그림 2에 보이는 조종날개의 구동을 위해 시제품으로 선정된 센서리스 BLDC 전동기 구동 시스템에 대한 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 여자 방식이 전통적인 6-스텝 방식보다 우수한 출력 토크 특성을 보임을 확인하였다.

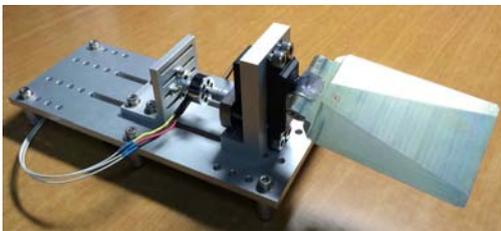


그림 2. 유도형 탄약 날개 구동 시스템

2. 제안된 BLDC 전동기의 여자 방식

조종날개 제어를 위한 BLDC 전동기는 측정된 역기전력의 정보를 기반으로 한 센서리스 기법으로 구동된다[1][2]. 그 구동 과정은 그림 3과 같이 초기위치 정렬, 동기 가속, 센서리스 제어 과정으로 구분된다. 기동부터 센서리스 제어를 위해 충분한 역기전력이 발생하는 속도까지는 운전 주파수를 일정하게 증가시키는 개루프 방식의 동기 가속이 사용된다. 이 과정에서 유도형 탄약과 같이 활공 중 조종날개가 받는 외력이 큰 경우 원활한 기동과 동기 운전이 어려워져 기동자체가 불가능하거나 가속 시 동기 이탈이 발생하여 회전자가 정지되는 경우가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하고자 12-스텝 여자 방식의 동기 구동 기법을 제안하였다.

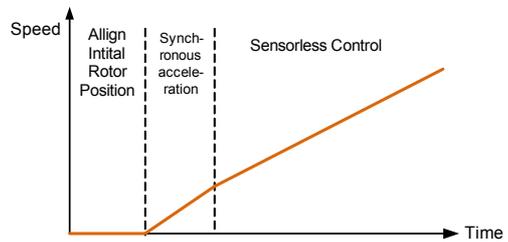


그림 3. 센서리스 BLDC 전동기 구동 과정

통상적으로 3상 BLDC 전동기는 삼상 권선 중 두상만이 여자되는 2상 여자 방식의 6-스텝 구동 방식으로 운전된다. 그림 4는 홀 신호(H_1, H_2, H_3)를 바탕으로 한 BLDC 전동기의 전통적인 6-스텝 구동 방식의 동작을 보이고 있다[5].

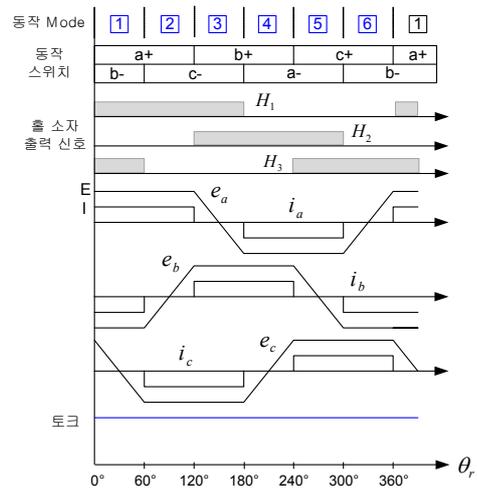


그림 4. 6-스텝 구동 방식

그림 5에 6-스텝 구동 방식에서 2상 여자 시의 회로 구성의 예가 보인다. 여기서 BLDC 전동기의 고정자 권선은 Y-결선으로 가정하였고, 모드 1에서의 동작을 보이고 있다. 두 상 권선에 인가되는 전압의 크기는 동일하게 $V_{dc}/2$ 이며, 따라서 두 권선에는 동일 크기 $I(=V_{dc}/2R)$ 의 전류가 흐른다.

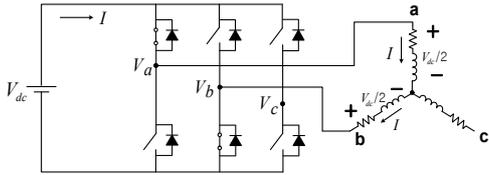


그림 5. 2상 여자 시 회로 구성 (모드1)

그림 4에 따른 6-스텝 구동 방식에서의 인가 전압 벡터가 그림 6에 보인다. 각 모드에서 인가 전압 벡터의 크기는 모두 $V_{dc}/\sqrt{3}$ 으로 동일하다. 한주기에 6개의 전압 벡터가 전기각으로 60° 마다 순차적으로 인가된다.

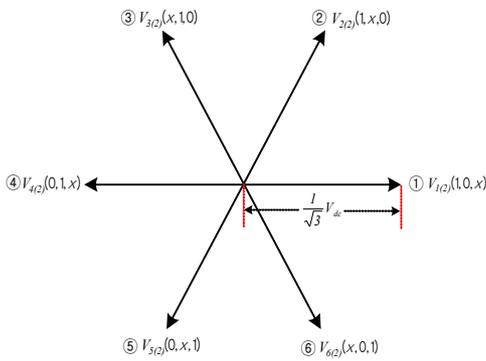


그림 6. 2상 여자 방식의 인가 전압 벡터

그림 7은 3상 권선 모두가 여자되는 3상 여자 시의 회로 구성의 예가 보인다. 그림 8은 2상 여자 와 3상 여자 시의 등가회로를 각각 보이고 있다. 3상 여자 방식의 경우 각 권선에 인가되는 상전압과 전류는 2상 여자 방식과 차이가 있음을 알 수 있다.

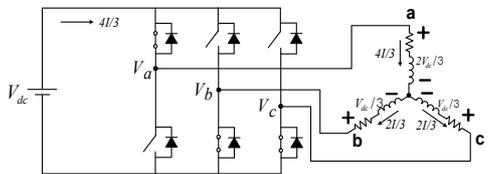


그림 7. 3상 여자 시 회로

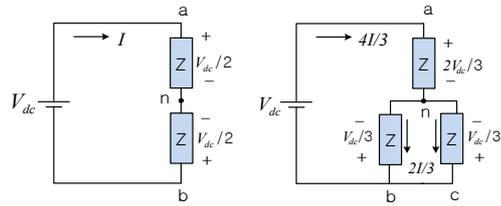


그림 8. 2상 및 3상 여자 시 등가회로

3상 여자 시 인가 전압 벡터의 크기는 $2V_{dc}/3$ 로서 2상 여자 시보다 더 크다[3]. 따라서 동일한 직류 입력 전압 V_{dc} 하에서 더 큰 전류가 권선에 흐르게 된다. 2상 여자 시에 두 상 권선에 흐르는 전류의 크기는 같으며, 그 크기를 I 라고 한다면, 3상 여자 시에 각 상 권선에 흐르는 전류는 각각 $4I/3$, $2I/3$, $2I/3$ 가 된다. 3상 여자로 구동 시에는 3상 권선에 모두 전류가 흐르므로 2상 여자 시보다 더 큰 출력 토크가 발생할 수 있다. 그러므로 3상 여자 방식을 사용하는 경우 출력 토크를 향상시킬 수 있는데, 3상 여자 방식을 전적으로 사용하는 경우 역기전력을 검출할 수 있는 비여자상이 존재하지 않으므로 통상적인 센서리스 기법을 적용할 수 없다.

따라서 본 논문에서는 전통적인 2상 여자 방식에 3상 여자 방식을 혼합한 여자 방식을 제안한다. 제안된 혼합 여자 방식의 경우 30° 마다 2상 여자와 3상 여자를 번갈아 사용하는데 3상 여자로 인해 2상 여자만을 사용한 경우보다 12.5% 더 큰 출력 토크를 얻을 수 있다. 제안된 12-스텝 운전 방식에서의 인가 전압 벡터가 그림 9에 보이는데, 각각의 스위칭 상태는 표 1에 나타나 있다. 여기서 S_a , S_b , S_c 는 인버터 각 상의 스위칭 함수를 나타낸다. 이들 스위칭 함수는 위 스위치가 켜져 있는 경우에는 1로, 꺼져 있는 경우에는 0으로 정의된다.

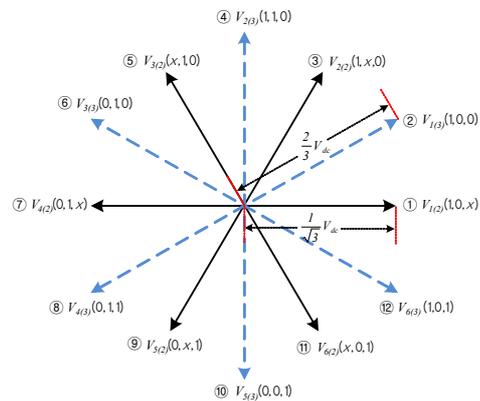


그림 9. 혼합 여자 방식에서의 전압 벡터

표 1. 2상 여자 및 3상 여자를 혼합한 경우의 스위칭 상태

2상 여자			3상 여자				
No.	S_a	S_b	S_c	No.	S_a	S_b	S_c
①	1	0	x	②	1	0	0
③	1	x	0	④	1	1	0
⑤	x	1	0	⑥	0	1	0
⑦	0	1	x	⑧	0	1	1
⑨	0	x	1	⑩	0	0	1
⑪	x	0	1	⑫	1	0	1

3. 시뮬레이션 결과

제안된 혼합 여자 방식의 유효성을 검증하기 위해 Matlab Simulink를 이용한 시뮬레이션이 실행되었다. 대상 전동기로는 실제 조종날개 구동에 사용되는 14W, 2.7A, 12극 3상 BLDC 전동기가 사용되었다.

그림 10에 BLDC 전동기의 구동 블록도가 보인다. 인버터의 스위칭 주파수는 10kHz이다.

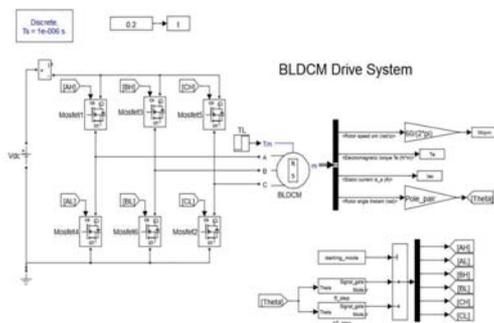
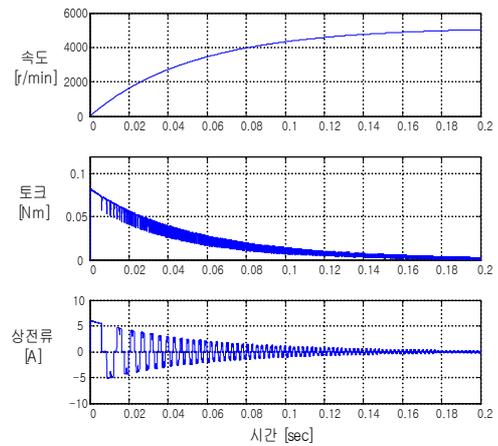


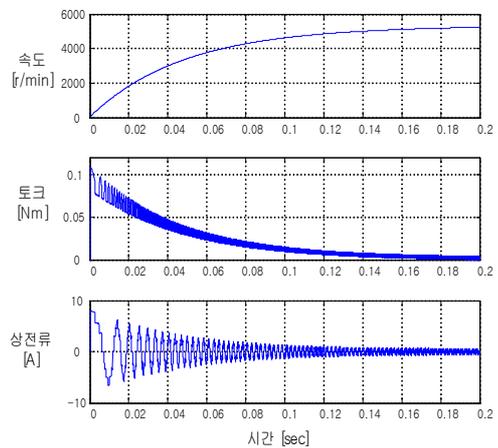
그림 10. BLDC 전동기 시뮬레이션 모델 블록

그림 11에 100% PWM 듀티비(Duty ratio)로 6-스텝과 12-스텝 여자 방식으로 운전 시의 속도, 토크 및 상전류 파형이 보인다. 6-스텝의 경우 최대 속도는 5000r/min인데 비해 12-스텝의 경우 최대 속도는 5500r/min으로 더 높은 속도에 도달할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 제안된 방식이 동일한 직류 전압 하에서 운전 가능 속도가 더 클 수 있다. 또한 상전류의 크기가 더 커짐을 확인할 수 있고 이에 따라 출력 토크도 향상됨을 볼 수 있다.

그림 12는 이 경우 속도에 대한 출력 토크의 특성이 보인다. 제안된 12-스텝 운전에서는 3상 여자 구간에서의 토크 증가로 더 큰 출력 토크가 발생한다는 것을 알 수 있다.

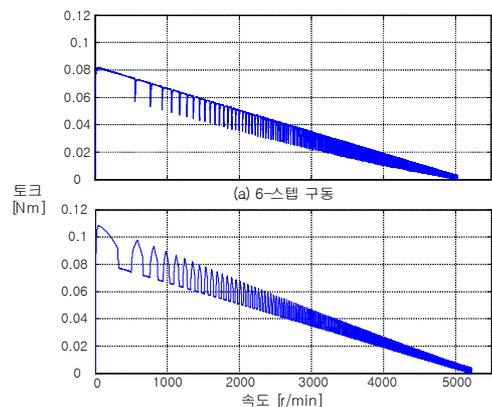


(a) 6-스텝 구동



(b) 12-스텝 구동

그림 11. 운전 특성 (100% 듀티비)



(a) 6-스텝 구동

(b) 12-스텝 구동

그림 12. 속도-토크 특성 비교

4. 실험 결과

제안된 혼합 여자방식의 유효성을 검증하기 위해 그림 14에 보이는 14W급 BLDC 전동기, 3상 인버터, TMS320F28335의 디지털 컨트롤러로 구성된 조종날개 구동 시스템에서 실험을 실행하였다.

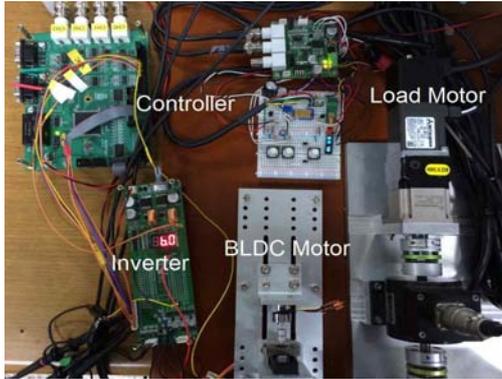


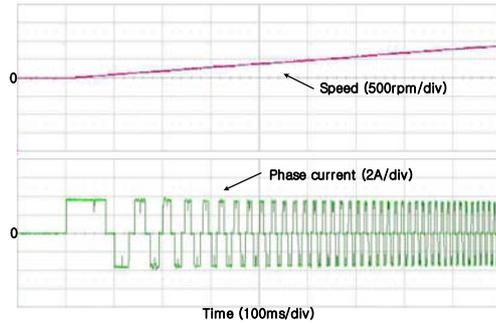
그림 14. 실험 시스템

그림 15에 동일한 듀티비로 6-스텝과 12-스텝 여자 방식으로 동기 가속한 경우에 속도 및 상전류 파형이 보인다. 시뮬레이션에서와 동일한 상전류 파형이 얻어짐을 알 수 있다. 동기 가속이므로 두 경우 속도 증가 비율은 동일하다. 출력 토크의 크기가 매우 작아 이를 직접 측정하기 힘들기 때문에 상전류로서 두 방식의 토크를 비교할 수 있는데, 시뮬레이션에서와 같이 제안된 12-스텝 운전에서 더 큰 상전류가 흐르므로 더 큰 출력 토크가 발생한다는 것을 알 수 있다.

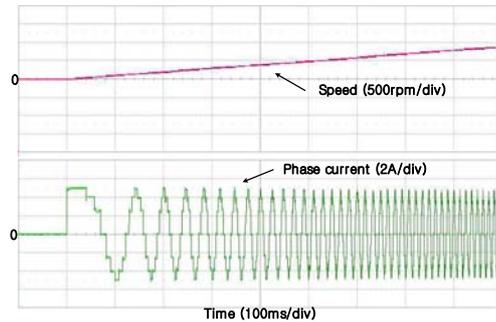
5. 결론

본 논문에서는 유도형 탄약에 장착된 조종 날개의 구동을 위한 센서리스 BLDC 전동기 구동 시 출력 토크를 향상시키도록 하는 여자 기법을 제안하였다. 제안된 여자 방식은 출력 토크를 크게 할 수 있는 3상 여자 방식을 2상 여자 방식과 혼합한 12-스텝 구동 방식이다. 제안된 여자 기법을 조종날개 구동 시스템에 적용하는 경우 외력토크가 크게 작용하는 기동과 동기 가속 구간에서 제어 특성을 향상시킬 수 있다.

제안된 기법의 유효성은 실제 조종 날개의 구동에 사용되는 BLDC 전동기에 대한 시뮬레이션과 실험을 통해 확인하였다.



(a) 6-스텝 여자 방식



(b) 12-스텝 여자 방식

그림 15. 동기 가속 시 속도와 상전류

참고 문헌

- [1] 이태형, 김상훈, 조창연, 박장호, 김재호, “유도형 탄약의 조종날개 제어용 Sensorless BLDC 전동기 구동 시스템 개발”, *전력전자학회 논문지*, 제19권, 제4호, pp.297-392, 2014. 8.
- [2] 이태형, 김상훈, 조창연, 박장호, 김재호, “Sensorless BLDC 전동기를 이용한 유도형 탄약의 조종날개 구동시스템 개발”, *한국군사과학기술학회 종합학술대회*, pp.1329-1330, 2014. 6. 19~20.
- [3] 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.
- [4] Ajay Nair, and K. R. Rajagopal, “A Novel Back-EMF Detection Scheme Based Sensorless Control of Permanent Magnet Brushless DC Motor Drive”, *IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems*, pp.978-983, 2010.
- [5] 김상훈, *모터 제어 - DC, AC, BLDC*, 3장, 북두출판사, 2014.