

## BLDC 모터 제어를 위한 PWM 분석과 전류리플 최소화

오태석, 신운수, 허남익, 김일환  
 강원대학교 전기전자공학부 전자통신공학과

### Minimization of Current Ripple and Analysis of PWM methods for the Control of BLDCM

Tae-Seok Oh, Yun-Su Shin, Nam-Euk Her, Il-Hwan Kim

Department of Electronic Communication Engineering, College of Information and Technology, Kangwon National University

**Abstract** - 사다리꼴 역기전력을 갖는 BLDC 전동기 제어는 구형과 전류를 인가함으로써 DC 모터와 같은 제어를 할 수 있어 많은 응용 분야에 사용되고 있다. 구형과 전류를 인가하기 위하여 연구된 PWM 방식을 분석해보면 몇 가지 문제점을 가지고 있다. 기존의 연구내용으로는 유니폴라 PWM 방법, 바이폴라 PWM 방법, 하이브리드 PWM 방법이 있으나 PWM을 정확히 분석해보면 원하는 전압을 인가할 수 없는 부분이 있음을 알 수 있다. 특히 방향을 바꾸는 시점이나 속도를 급격히 줄이는 부분에서는 원하는 전압이 인가되지 않음을 알 수 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 분석하고 정확한 전압이 인가될 수 있는 방법을 제안한다.

#### 1. 서 론

구형과 제어 BLDC 전동기의 가장 큰 문제점은 제한된 전압과 인덕턴스 성분으로 인하여 이상적인 구형과 전류를 출력할 수 없기 때문에 토크리플이 발생하는 것이다. 하지만 최근에 소형 BLDC 전동기의 경우에 전기적 시상수가 매우 작은 전동기가 개발되어 거의 구형과에 가까운 전류를 인가할 수 있다. 반면 잘못된 PWM을 사용하여 전류제어 시에 전류 제어 성능이 좋지 않은 문제점이 종종 있다[1][2]. 따라서 본 논문에서는 기존의 Unipolar PWM 방법과 바이폴라 PWM 방법의 문제점을 분석하고 이러한 PWM 문제를 해결하는 PWM 방법을 제안한다.

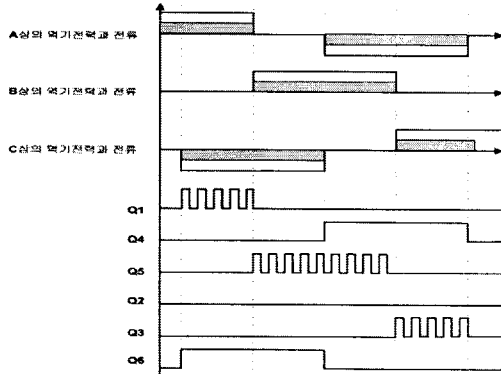
#### 2. 본 론

##### 2.1 Unipolar PWM 방법.

Unipolar PWM 방법은 BLDC 전동기에 인가할 전압을 PWM 듀티에 따라 조절하는 방식으로 스위치 On시에 DC 링크 전압이 인가되고 Off시에 0V를 인가함으로써 전동기에 인가되는 전압을 제어하는 방법이다. 이 방법에서는 같은 방향의 전압만을 인가하여 제어할 때는 문제가 생기지 않는다. 하지만 전류를 급격히 낮추거나 또는 반대 방향의 전류를 인가하고자 할 때는 흐르던 전류의 방향과 반대의 전압을 인가하여야 한다. BLDC 전동기의 인덕턴스 성분으로 인하여 전류의 방향은 전압의 방향을 순간적으로 바꾼다고 해도 전압의 방향과 일치하지 않는 경우가 생긴다. 이러한 경우에 유니폴라 PWM 방법에서는 스위치를 OFF하여도 0V 전압이 인가되지 않는 문제가 있다. 따라서 이 경우에는 전류를 원하는 대로 제어하기 불가능하다.

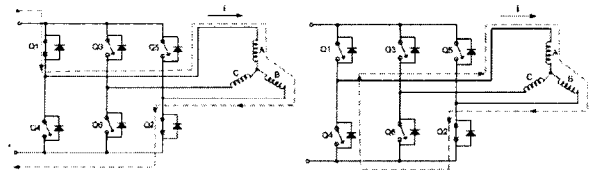
##### 2.1.1 유니폴라 PWM 방법의 분석

그림1은 유니폴라 PWM에서의 스위칭 방법을 나타낸다. 전압을 인가하기 위하여 하나의 스위치만을 On, Off하여 제어하는 방식이다.



〈그림 1〉 유니폴라 PWM 스위칭 방법

그림 2는 전압과 전류의 방향이 같을 경우 유니폴라 PWM 방식의 전압 및 전류의 방향을 표시하고 식(1)은 인가되는 전압을 나타낸 식이다. 그림 3의 스위치의 상태는 그림 2의 경우와 같다. 하지만 이전에 인덕턴스 성분에 인가된 전류로 인하여 스위치의 상태는 같지만 전류는 반대인 경우이다.

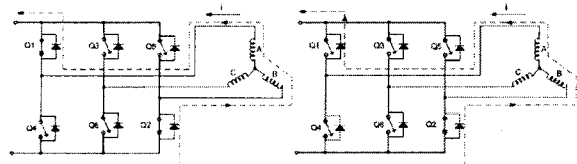


〈그림 2〉 전압과 전류의 방향이 같은 경우 유니폴라 PWM

$$\text{Switch ON(left)} : L \frac{di}{dt} + Ri + E = Vs$$

$$\text{Switch Off(right)} : L \frac{di}{dt} + Ri + E = 0$$

식(1)



〈그림 3〉 전압과 전류의 방향이 다른 경우 유니폴라 PWM

식(1)에서와 같이 유니폴라 PWM을 이용하여 원하는 전압을 인가할 수 있음을 알 수 있다. 그림 3의 경우는 전압과 전류의 방향이 반대인 경우의 예이고 식(2)는 그때의 인가전압을 나타낸다.

$$\text{Switch ON(left)} : L \frac{di}{dt} + Ri + E = -Vs$$

$$\text{Switch Off(right)} : L \frac{di}{dt} + Ri + E = -Vs$$

식(2)

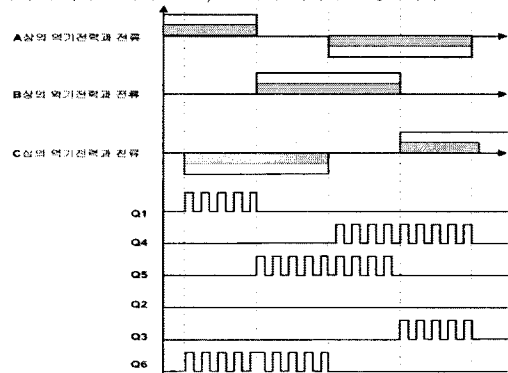
식(2)에서 보듯이 스위치의 상태가 바뀌었는데도 인가된 전압은 변화가 없다. 다시 말해서 PWM 듀티 제어로 원하는 전압을 인가할 수 없음을 뜻한다.

##### 2.2 Bipolar PWM 방법.

바이폴라 PWM 방법은 BLDC 전동기에 인가할 전압을 PWM 듀티에 따라 인가하는 방식으로 유니폴라 PWM 방식과 같다. 스위치 On시에 DC 링크 전압이 인가되고 Off시에 -DC 링크 전압을 인가함으로써 전동기에 인가되는 전압을 제어하는 방법이다. 바이폴라 PWM 방식에서도 전류와 전압의 방향이 다를 경우 듀티 제어만으로 원하는 전압을 인가할 수 없다.

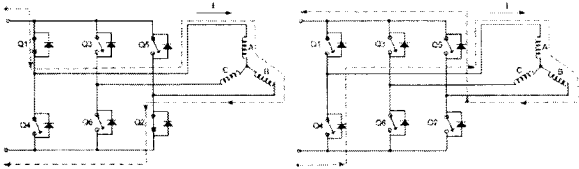
##### 2.1.1 바이폴라 PWM 방법의 분석

그림4는 바이폴라 PWM에서의 스위칭 방법을 나타낸다. 전압을 인가하기 위하여 두개의 스위치를 On, Off하여 제어하는 방식이다.



〈그림 4〉 바이폴라 PWM 스위칭 방법

그림 5는 전압과 전류의 방향이 같을 경우 바이폴라 PWM 방식의 전압 및 전류의 방향을 표시하고 식(3)은 그때에 인가되는 전압을 나타낸 식이다.

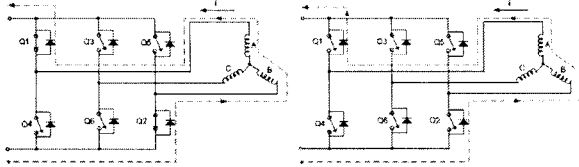


〈그림 5〉 전압과 전류의 방향이 같은 경우 바이폴라 PWM

$$\text{Switch ON(left)} : L \frac{di}{dt} + Ri + E = Vs \quad \text{식(3)}$$

$$\text{Switch Off(right)} : L \frac{di}{dt} + Ri + E = -Vs$$

식(3)에서와 같이 바이폴라 PWM을 이용하여 원하는 전압을 인가할 수 있음을 알 수 있다. 그림 6의 경우는 전압과 전류의 방향이 반대인 경우의 예이고 식(4)는 그때의 인가전압을 나타낸다.



〈그림 6〉 전압과 전류의 방향이 다른 경우 바이폴라 PWM

식(4)에서 전압과 전류의 방향이 다른 경우 유니폴라 PWM에서와 마찬가지로 PWM 듀티 조절에 의하여 원하는 전압을 인가할 수 없다.

$$\text{Switch ON(left)} : L \frac{di}{dt} + Ri + E = -Vs \quad \text{식(4)}$$

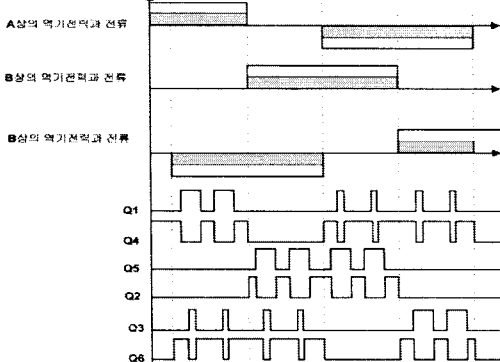
$$\text{Switch Off(right)} : L \frac{di}{dt} + Ri + E = -Vs$$

### 2.3 제안된 PWM 방법.

유니폴라와 바이폴라 PWM 방법의 문제를 해결할 수 있는 PWM 방법을 제안한다. 전압을 인가하기 위하여 상위 스위치가 ON되면 하위 스위치는 OFF 되는 방법으로 스위칭이 된다.

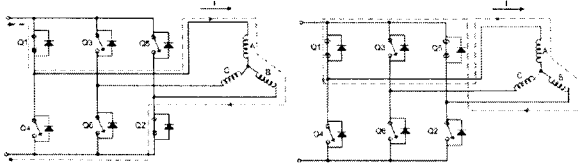
#### 2.1.1 제안된 PWM 방법의 분석

그림 7은 제안된 PWM 방법을 나타낸다.



〈그림 7〉 제안된 PWM 스위칭 방법

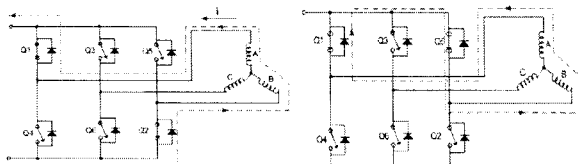
그림 8은 전압과 전류의 방향이 같은 경우 제안된 PWM 방식의 전압 및 전류의 방향을 표시하고 식(5)는 그때에 인가되는 전압을 나타낸 식이다.



〈그림 8〉 전압과 전류의 방향이 같은 경우 제안된 PWM

$$\text{Switch ON(left)} : L \frac{di}{dt} + Ri + E = Vs \quad \text{식(5)}$$

$$\text{Switch Off(right)} : L \frac{di}{dt} + Ri + E = 0$$



〈그림 9〉 전압과 전류의 방향이 다른 경우 제안된 PWM

식(5)에서와 같이 PWM을 이용하여 원하는 전압을 인가할 수 있음을 알

수 있다. 그림 9의 경우는 전압과 전류의 방향이 반대인 경우이고 식(6)은 그때의 인가전압을 나타낸다. 식(6)에서 보듯이 전압과 전류의 방향이 다른 경우도 PWM을 통하여 원하는 전압을 인가할 수 있음을 알 수 있다.

$$\text{Switch ON(left)} : L \frac{di}{dt} + Ri + E = -Vs \quad \text{식(6)}$$

$$\text{Switch Off(right)} : L \frac{di}{dt} + Ri + E = 0$$

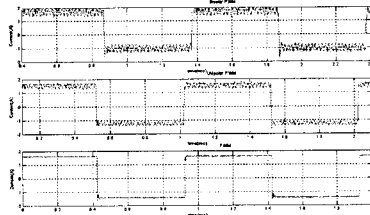
〈표 1〉 PWM 방법에 따른 인가 전압

	전류/전압의 방향이 다른 경우		전류 전압의 방향이 같은 경우	
	On(left)	Off(right)	On(left)	Off(right)
Unipolar	Vs	0	-Vs	-Vs
Bipolar	Vs	-Vs	-Vs	-Vs
Proposed	Vs	0	-Vs	0

표 1은 유니폴라, 바이폴라와 제안된 PWM 방법에서의 인가전압을 표로 나타낸 것이다.

### 2.4 실험 결과

그림 10은 PWM 방법에 따른 전류 제어 결과 파형을 보여준다. PWM 주파수는 모두 같고 전류제어기도 모두 같은 조건에서 실험한 결과이다.



〈그림 10〉 PWM방법에 따른 전류제어 파형

그림 10의 첫 번째 파형은 바이폴라 PWM을 이용한 방법에서의 전류지령과 실제 전류를 나타낸다. 두 번째 파형은 유니폴라 PWM을 이용한 방법이고 세 번째 파형은 제안된 PWM 방법에서의 전류 파형이다. 그림10을 통하여 알 수 있듯이 제안된 방법에서 전류제어 성능이 개선되었음을 알 수 있다. 그림 11은 속도제어기와 전류 제어기를 설계하여 그 성능을 실험한 파형이다.

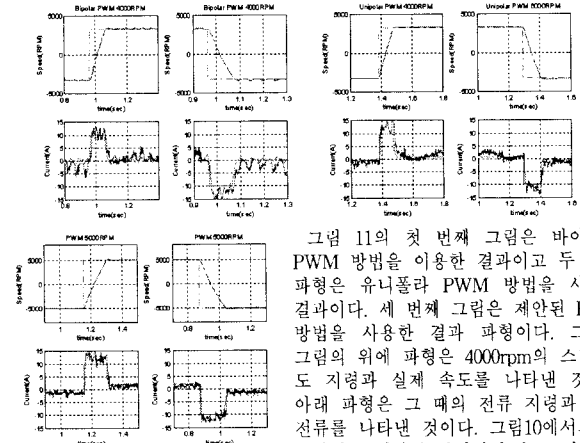


그림 11의 첫 번째 그림은 바이폴라 PWM 방법을 이용한 결과이고 두 번째 파형은 유니폴라 PWM 방법을 사용한 결과이다. 세 번째 그림은 제안된 PWM 방법을 사용한 결과 파형이다. 그리고 그림의 위에 파형은 4000rpm의 스태트 속도 지령과 실제 속도를 나타낸 것이고 아래 파형은 그 때의 전류 지령과 실제 전류를 나타낸 것이다. 그림10에서와 마찬가지로 제안된 방식에서 속도 및 전류

리플이 최소화 됨을 알 수 있다.

〈그림 11〉 PWM 방법에 따른 속도 및 전류제어 파형

바이폴라 PWM의 경우 전체적으로 전류의 리플이 크고 유니폴라의 경우도 제안된 방식에 비하여 리플이 크게 발생함을 알 수 있다. 바이폴라 PWM과 유니폴라 PWM 방식에서는 앞에서 설명한 것과 같은 문제점이 있기 때문에 정확한 전류제어를 할 수가 없다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 바이폴라와 유니폴라 PWM의 문제점을 분석하였고 원하는 전압을 PWM으로 변환하고 이를 전동기에 인가할 때 정확한 전압이 인가될 수 있는 PWM 방법을 제안하였다. 실험을 통하여 제안한 방법의 유효성을 검증하였다.

### 〈참 고 문 헌〉

- [1] 강석주, 김준석, 홍석준, 설승기, "저가형 BLDC 구동장치를 이용한 정밀 위치 제어", 대한전기학회지, 제44권 제4호, pp.447-452, 1995
- [2] 이동훈, 오태석, 김일환, 남부희, "하이브리드 PWM을 이용한 BLDC 전동기의 속도제어 성능향상", 대한전기학회지, 제54D권 7호, pp.491-500, 2004