

# Extended Double Carrier PWM을 이용한 3상 영구자석 동기 전동기의 구동

이준혁, 양형규, 박정욱  
연세대학교

## Application of Extended Double Carrier PWM to Three Phase Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System

Junhyuk Lee, HyoungKyu Yang, Jung Wook Park  
Yonsei University

### ABSTRACT

최근 차량용 인버터의 소형화 문제가 대두되고 있는 가운데, 3상 인버터의 구성품인 DC 링크 커패시터와 방열 시스템은 인버터에서 큰 부피를 차지하고 있다. DC 링크 커패시터의 부피는 커패시터에 흐르는 전류에 의해 결정되므로, 커패시터의 RMS 전류를 저감하는 것이 중요하다. 또한, 인버터의 스위칭 손실을 저감하면 방열 시스템의 크기를 줄일 수 있다.

본 논문에서는 추가적인 하드웨어 없이 PWM 방식 변경만으로 DC 링크 커패시터 RMS 전류와 스위칭 손실을 저감할 수 있는 Extended Double Carrier PWM을 소개한다. 또한, PSIM 시뮬레이션으로 이를 영구자석 동기 전동기의 구동에 적용하고, 기존에 널리 쓰이는 방식인 Space Vector PWM 및 Discontinuous PWM과 비교하여 그 특성을 살펴본다.

### 1. 서론

최근 자동차 분야에서는 전력변환장치의 고효율화 및 소형화 연구가 활발히 진행되고 있다. 그중에서도 인버터의 DC 링크 커패시터와 방열 시스템은 인버터에서 큰 부피를 차지하므로, DC 링크 커패시터의 부피 저감 연구와 스위칭 손실 저감 연구가 많이 진행되고 있다.

DC 링크 커패시터의 부피를 줄이기 위해서는 커패시터 RMS 전류를 줄이는 것이 중요하다. 커패시터 RMS 전류를 저감하면 DC 전압 리플 저감 효과가 있을 뿐만 아니라, 등가직렬저항으로 인한 손실도 줄일 수 있어 커패시터의 수명과 효율 개선 효과도 있다. DC 링크 커패시터의 전류는 인버터 입력 전류의 리플 성분이므로, 인버터 입력 전류의 리플을 저감하면 DC 링크 커패시터 RMS 전류를 저감할 수 있다.

본 논문에서는 3상 인버터의 DC 링크 커패시터 RMS 전류와 스위칭 손실을 저감시키는 Extended Double Carrier PWM(Ext DCPWM)에 대해 소개하고, 시뮬레이션으로 3상 영구자석 동기 전동기에 적용해 보고자 한다. 또한, 가장 널리 쓰이는 방식인 Space Vector PWM(SVPWM) 및 Discontinuous PWM(DPWM)과 비교하여 그 특성을 살펴보고자 한다.

### 2. 본문

#### 2.1 Space Vector PWM과 Discontinuous PWM

SVPWM은 출력 특성이 우수하여 현재 가장 널리 사용되고

있는 PWM 방식으로, 3상 지령 전압을 하나의 공간 벡터로 표현하고 이를 유효 전압 벡터 여섯 개와 영 전압 벡터 두 개로 나타내는 방식이다. 이때 영 전압 벡터 배분 방식이 변조 성능에 많은 영향을 끼치는데, 유효 전압 벡터를 전압 변조 주기 내의 정중앙에 위치시키고 영 전압 벡터를 두 번에 나누어 동일 시간 동안 인가하는 방식이 가장 일반적이다. 이와는 다르게, 영 전압 벡터를 분리하지 않고 한 번에 인가하는 방식이 DPWM이다. DPWM은 SVPWM에 비해 출력 특성이 좋지 않지만, 스위칭 횟수를 줄일 수 있어 스위칭 손실 저감 효과가 있다.

SVPWM 및 DPWM을 인버터에 적용할 경우 인버터 입력 전류 파형은 그림 1과 같으며, 영 전압 벡터를 사용할 때 전류의 값은 0이 된다. 이때 영 전압 벡터를 사용하지 않고 유효 전압 벡터만으로 지령 전압 벡터를 나타낼 수 있다면 인버터 입력 전류의 리플 성분을 저감할 수 있다.<sup>[1]</sup>

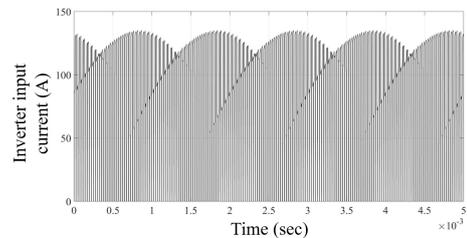


그림 1 SVPWM 및 DPWM 적용 시 인버터 입력 전류 파형  
Fig. 1 Inverter input current for SVPWM and DPWM

#### 2.2 Extended Double Carrier PWM

SVPWM과 DPWM은 인접한 두 유효 전압 벡터와 영 전압 벡터로 지령 전압 벡터를 나타내는 반면, Ext DCPWM은 인접한 세 유효 전압 벡터 또는 인접하지 않은 두 유효 전압 벡터와 영 전압 벡터로 지령 전압 벡터를 나타내는 방식이다.<sup>[1]</sup>

Ext DCPWM은 그림 2와 같이 두 영역으로 구분할 수 있다. Internal triangle( $T_{int}$ )과 External triangle( $T_{ext}$ ) 영역은 연속한 세 유효 전압 벡터만으로 지령 전압 벡터를 나타낼 수 있는 영역으로, 영 전압 벡터를 사용하지 않아 그림 3과 같이 인버터 입력 전류의 리플 성분이 저감된다.<sup>[1]</sup>

반면, Internal hexagon( $H_{int}$ ) 영역은 영 전압 벡터를 반드시 사용해야 하므로 인접하지 않은 두 유효 전압 벡터와 하나의 영 전압 벡터로 지령 전압 벡터를 나타내는 영역이다. 이때 두 유효 전압 벡터를 사용하는 시간의 합은 SVPWM이나 DPWM

보다 길고 영 전압 벡터를 사용하는 시간은 더 짧다. 따라서 이 경우에도 그림 3과 같이 인버터 입력 전류의 리플 성분이 저감된다.<sup>[2]</sup>

Ext DCPWM은 두 영역 모두에서 출력 특성이 나빠지지만 DPWM과 같이 스위칭 횟수를 줄일 수 있어 스위칭 손실 저감 효과가 있다.

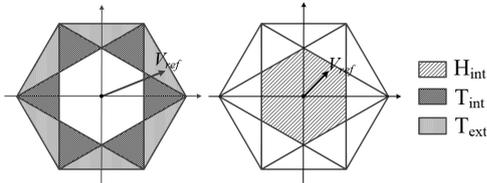


그림 2 Ext-DCPWM의 영역 분할  
Fig. 2 Division of Ext-DCPWM

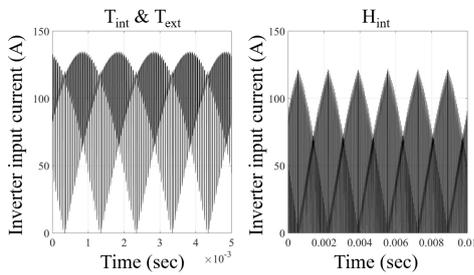


그림 3 Ext-DCPWM 적용 시 인버터 입력 전류 파형  
Fig. 3 Inverter input current for Ext-DCPWM

### 2.3 PSIM Simulation

시뮬레이션은 PSIM으로 진행하였으며, 표면 부착형 영구자석 동기 전동기를 인버터 부하로 사용하였다. 모터 부하 토크는 4Nm와 20Nm로 고정하고 모터 속도를 2500rpm까지 증가시켰다.

그림 4는 세 PWM에 대한 DC 링크 커패시터 RMS 전류를 비교한 그래프이다. 전 구간에서 Ext DCPWM를 적용했을 때 SVPWM과 DPWM 적용했을 때보다 DC 링크 커패시터 RMS 전류가 저감되는 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 세 PWM에 대한 인버터 출력 전류의 Total harmonic distortion(THD)을 비교한 그래프이다. 전 구간에서 SVPWM의 THD가 가장 우수하고 Ext DCPWM의 THD가 가장 좋지 않은 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 세 PWM에 대한 인버터 효율을 비교한 그래프이다. 전 구간에서 DPWM과 Ext DCPWM이 스위칭 손실 저감으로 인해 SVPWM보다 우수한 것을 확인할 수 있다. 이는 시뮬레이션에 한정된 것으로 실제 하드웨어 실험에서는 더욱 극명하게 나타날 것으로 예상된다.

### 3. 결론

본 논문에서는 인버터 고효율화 및 소형화를 위한 PWM 제어 방법인 Ext DCPWM에 대해 살펴보고, 이를 PSIM 시뮬레이션을 통해 표면 부착형 영구자석 동기 전동기 구동에 적용해 보았다. Ext DCPWM을 사용하면 SVPWM과 DPWM보다 인버터 고효율화 및 소형화에 유리하다는 장점이 있지만, 인버터 출력 전류의 특성이 나빠진다는 단점이 있다는 것을 확인할 수 있다.

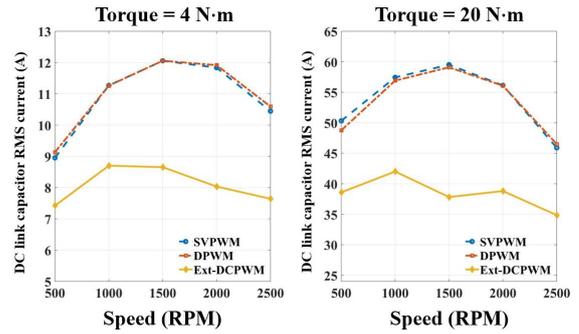


그림 4 모터 속도에 따른 DC 링크 커패시터 RMS 전류 비교  
Fig. 4 DC link capacitor RMS current versus motor speed

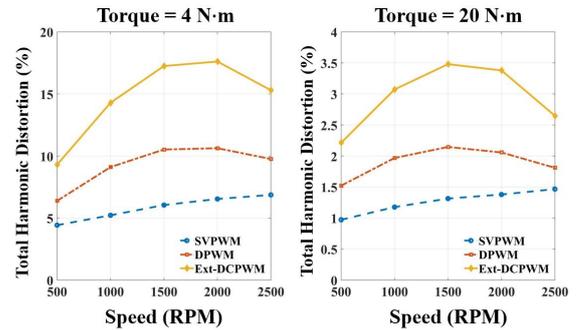


그림 5 모터 속도에 따른 인버터 출력 전류의 THD  
Fig. 5 THD of inverter output current versus motor speed

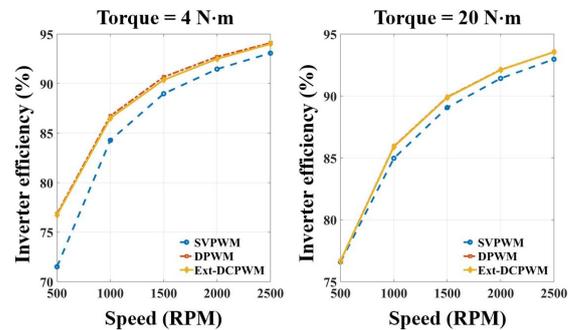


그림 6 모터 속도에 따른 인버터 효율  
Fig. 6 Inverter efficiency versus motor speed

이 논문은 2016년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구자지원(도약 전략연구(No.2016R1E1A1A02920095))입니다.

### 참고 문헌

- [1] J. Hobraiche, J. P. Vilain, P. Macret, and N. Patin, "A new PWM strategy to reduce the inverter input current ripples," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 1, pp. 172-180, Jan. 2009.
- [2] T. D. Nguyen, N. Patin, and G. Friedrich, "Extended double carrier PWM strategy dedicated to RMS current reduction in DC link capacitors of three phase inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 1, pp. 396-406, Jan. 2014.