

# 듀얼 인버터 개방 권선형 영구자석 동기 전동기 제어를 위한 PWM 캐리어 생성 방법 및 영벡터 위치에 따른 전류 리플 영향성 분석

심재훈, 최현규, 하정익  
서울대학교 전기정보공학부

## PWM Carrier Generating Method for OEW PMSM with Dual Inverter and Current Ripple Analysis according to Zero Vector Location

Jae-Hoon Shim, Hyeon-Gyu Choi, and Jung-Ik Ha

Department of Electrical Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

### ABSTRACT

듀얼 인버터를 가진 개방 권선형 영구자석 동기 전동기는 같은 DC Link 전압으로 모터에 더 큰 전압을 사용할 수 있게 할 수 있다. 이 때문에 DC Link와 인버터 사이의 DC/DC Boost 컨버터의 필요성을 없애줄 뿐 아니라 배터리의 전압을 낮출 수 있어 안전상의 이점 및 BMS의 요구 조건을 낮추므로 경제적 이점을 가질 수 있다. 이 시스템은 경제적 이점 외에도 모터에 고전압을 인가함으로써 기존에 비해 고속 운전 영역 확장 또는 운전 영역을 기존과 동일하게 유지한다면 인버터의 손실 감소라는 이점 또한 얻을 수 있다.

그러나 1차단 인버터와 2차단 인버터의 합성전압 차이로 인해 생기는 Zero Sequence Voltage (ZSV)로 인해 시스템의 손실을 증대시키는 Zero Sequence Current (ZSC)가 흐를 수 있다.

본 연구에서는 이를 억제하기 위한 스위칭 패턴 형성을 위한 PWM 캐리어 생성 방법에 대해 제시하고, 이 방법을 적용하여 스위칭 순서 상 센터 영벡터의 유/무에 따른 제어 영향성 분석을 추가로 진행하여 전류 리플을 줄일 수 있는 스위칭 패턴 생성 방법을 제시한다.

### 1. 서론

듀얼 인버터를 가진 개방 권선형 영구자석 동기 전동기는 고전압 구동이 필요한 모터에서 고전압 배터리 또는 DC/DC Boost 컨버터를 대체할 수 있는 시스템으로써 스위칭 반도체 소자의 가격 하락과 함께 다양한 산업 분야에서 경제적 이점을 가지며 사용될 수 있는 시스템으로 연구되고 있다. 또한 듀얼 인버터를 가진 모터 설계에 있어서 턴수 비와 전류 정격을 조절하여 모터의 출력을 기존과 같이 유지하며 인버터의 손실을 줄여 모터-인버터 시스템의 효율을 상승 시킬 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 듀얼 인버터를 가진 개방 권선형 영구자석 동기 전동기 토폴로지 중 하나인 그림 1과 같이 ‘하나의 전원이 두 개의 인버터에 연결된 듀얼 인버터’ 구조로 연구를 진행하였다. 이 토폴로지의 장점은 모터에 출력할 수 있는 선형 영역 상전압이 기존 인버터 시스템에 비해  $\sqrt{3}$ 배 증대시킬 수 있으며 각 상이 H-Bridge 구조를 가지고 있어 제어가 용이하다는 점이다.

그러나 이 토폴로지에서 OEW PMSM(Open End Winding Permanent Magnet Synchronous Motor) 전압 방정식을 로터 기준 프레임으로 Clarke and Park 변환을 하면 식(1)과 같은 식을 얻을 수 있고, 여기서  $v_n$ 에 관한 식을 살펴보면 식(2)와

같은 Zero Sequence Current (ZSC)의 값을 얻을 수 있고 이 전류는 그림 1의 노드 ‘N’을 통해 흐르게 된다.

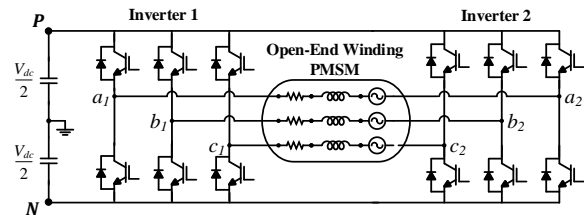


그림1. 하나의 전원이 두개의 인버터에 연결된 듀얼 인버터를 가진 PMSM

Fig.1. OEW PMSM with Dual Inverter Connected on Single Power

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s i_d + L_d s i_d - w_r L_q i_q \\ R_s i_q + L_q s i_q + w_r L_d i_d - w_r \lambda_f \\ R_s i_n + L_k s i_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$i_n = \frac{v_n}{R_s + L_k s} \quad (2)$$

ZSC는 상전류에도 그대로 나타나 모터-인버터 시스템의 동손 뿐 아니라 고조파 성분의 전류를 증대 시켜 모터의 철손 또한 악화시키게 되므로 이를 억제하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다. 수동적인 방법으로는 1차단 인버터와 2차단 인버터로 합성되는 식(3)의  $v_n$  값을 가지는 Zero Sequence Voltage (ZSV)가 0이 되도록 스위칭 하는 방법이 있다<sup>[1]</sup>.

$$\begin{aligned} v_a &= v_{a1} - v_{a2} \\ v_b &= v_{b1} - v_{b2} \\ v_c &= v_{c1} - v_{c2} \\ v_n &= \frac{v_a + v_b + v_c}{3} \end{aligned} \quad (3)$$

ZSV가 0이 아닌 전압까지 사용하여 최대 사용 전압의 크기를 늘리면서  $T_{samp}$  내의 영벡터의 인가 시간을 조절하여 ZSV를  $T_{samp}$  내에 평균적으로 0으로 만드는 방법도 있다<sup>[2]</sup>.

논문[2]에 비해 [1]의 방법은 원리가 간단하다는 장점이 있으나 이 방법을 구현하기 위한 PWM을 발생시키는데 있어 일반적인 캐리어를 사용하면 부가적인 논리 게이트가 필요하다는 단점이 있다<sup>[3]</sup>. 본 연구에서는 이와 같은 단점을 없애기 위해 캐리어의 변형만을 통해 하드웨어의 추가 없이 스위칭 패턴을 생성하는 체계적인 방법을 연구한다. 추가로 본 논문에서 제안 된 방법을 통해 모의 실험 상에서 센터 영벡터의 유/무에 따른 전류 리플 영향성 분석을 진행한다.

## 2. 본 론

### 2.1 스위칭 패턴 생성 방법

논문[1]에 설명된 바와 같이 인버터1과 인버터2에서 합성되는 전압 공간 벡터에서 ZSV가 0이 되는 벡터들만 선택적으로 합성하면 그림2와 같은 굵은 실선의 공간 벡터 영역이 형성되고, 스위칭 손실을 줄이기 위해 인버터 2는 각 섹터별(A~F)로 클램핑 제어를 실시한다. 각 스위칭 상태는 A, B, C상을 0, 1로 나타내며 역 이진법 형태로 넘버링 하였다.

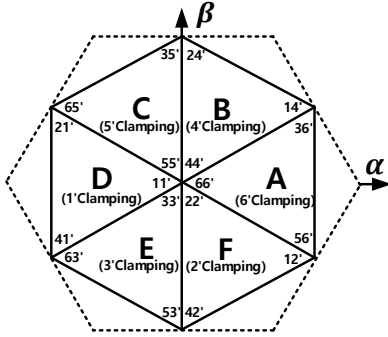


그림2. ZSV가 0이 되는 전압 공간 벡터 영역  
Fig.2. Voltage Space Vector with zero ZSV

이때 각 섹터별로 스위칭 패턴을 생성하는데 있어  $T_{sw}$  (=스위칭 주기)내 센터 영벡터의 유/무에 따라 다음과 같은 두 가지 패턴에 대한 전류 리플 경향을 추가 분석한다. A섹터 전압 합성을 예로 들면 아래 식(4)와 같이  $T_{sw}$  가운데 영벡터를 합성할 수 있고, 식(5)처럼 스위칭 주기 양 끝에서만 영벡터를 합성할 수 있다.

$$66^\circ \rightarrow 56^\circ \rightarrow 36^\circ \rightarrow 66^\circ \rightarrow 36^\circ \rightarrow 56^\circ \rightarrow 66^\circ \quad (4)$$

$$66^\circ \rightarrow 56^\circ \rightarrow 36^\circ \rightarrow 36^\circ \rightarrow 56^\circ \rightarrow 66^\circ \quad (5)$$

### 2.2 PWM 캐리어 생성법

불규칙해보이는 스위칭 패턴을 분석하기 위해 섹터별로 스위칭 패턴에 대해 분석한다. 이때 분석의 간소화를 위해 대칭성을 한번에 고려하지 않고 대칭 패턴 절반을 먼저 고려한 후(그림3의 '패턴 1영역')이 패턴을 대칭시켜 최종 스위칭 형태를 구한다. 이 방법을 통해 스위칭 패턴 형성의 자유도가 올라간다.

#### 2.2.1 전압 공간 벡터 상에서 섹터 별 분석

각 영역의 스위칭 패턴을 그림3의 A섹터 전압 합성 예시와 같이 Duty, 캐리어 극성, 위상을 구분하여 분석한다. 그림3의 분석 예시에서 x축은  $T_{sw}$ 의 절반인  $0.5T_{sw}$ 에 대해 정규화를 함으로써 위상을 정규화된 시간축(=  $t_{normalized}$ )에 표현할 수 있게 된다.

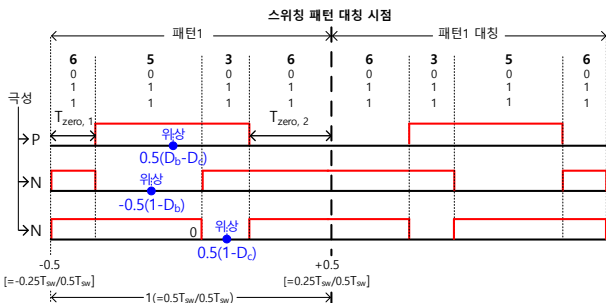


그림3. A섹터의 스위칭 패턴 분석  
Fig.3. Switching Pattern Analysis on 'A' Sector

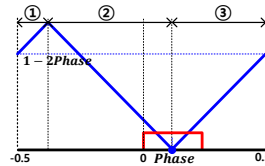
이때 그림3에서 표현된 각 상의 Duty값은 캐리어의 극성에 따라 다음 두 가지로 표시된다. 식(6)은 양의 캐리어 극성일 경우, 식(7)의 경우는 음의 극성일 경우의 Duty값이다.

$$Duty = \frac{V_{ref}}{V_{dc}} \quad (\text{극성} > 0) \quad (6)$$

$$Duty = 1 + \frac{V_{ref}}{V_{dc}} \quad (\text{극성} < 0) \quad (7)$$

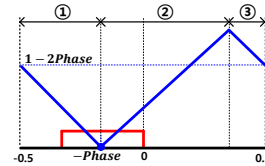
#### 2.2.2 PWM 캐리어의 분류 및 함수화

2.2.1에서 살펴보면 캐리어의 극성(+/-)과 위상(+/-)에 따라  $T_{smp}$  내의 캐리어의 형태가 결정됨을 알 수 있고 그 분류는 다음과 같다. 아래첨자 normalized는  $0.5T_{sw}$  크기로 정규화 된 것을 의미한다.



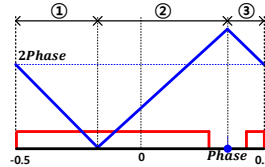
- ① Carrier =  $t_{normalized} + (1-2Phase)$
- ② Carrier =  $-t_{normalized} + 2(1-Phase)$
- ③ Carrier =  $t_{normalized} - (2-2Phase)$

(a)



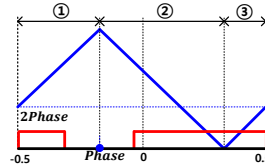
- ① Carrier =  $-t_{normalized} + (1-2Phase)$
- ② Carrier =  $t_{normalized} - (1-2Phase)$
- ③ Carrier =  $-t_{normalized} + (2-2Phase)$

(b)



- ① Carrier =  $t_{normalized} + 2Phase$
- ② Carrier =  $-t_{normalized} + (1+2Phase)$
- ③ Carrier =  $t_{normalized} - (1+2Phase)$

(c)



- ① Carrier =  $-t_{normalized} + 2Phase$
- ② Carrier =  $t_{normalized} - 2Phase$
- ③ Carrier =  $-t_{normalized} + (2+2Phase)$

(d)

그림4. (a) +극성, +위상, (b) +극성, -위상 (c) -극성, -위상 (d) -극성, +위상

Fig.4. (a) +Polarity, +Phase, (b) +Polarity, -Phase, (c) -Polarity, -Phase, (d) -Polarity, +Phase

#### 2.2.3 대칭 스위칭 패턴 및 센터 영벡터 삽입/제거 제어

앞 절에서 절반 스위칭 패턴에 대한 함수화를 바탕으로 대칭 스위칭 패턴 및 센터 영벡터 삽입 및 제거에 대한 패턴 구성을 간단히 할 수 있다. 대칭 스위칭은 전류 리플 측면에서 유리한데, 앞에서 제시된 반쪽 스위칭에서  $T_{zero,1}$  과  $T_{zero,2}$  의 시간을 똑같이 한다고 해도 전압 공간 벡터의 특정 섹터의 전압을 합성할 때 한쪽 방향으로만 스위칭을 하기에 전류 리플이 악화되는 경향이 있다. 이를 해결하기 위해  $0.5T_{sw}$  마다 스위칭 순서를 바꿔줌으로써 대칭 스위칭을 구현하여 해결한다.

대칭 스위칭 구현은 제어 주기마다 번갈아가며 위상을 반대로 해주면서 세 상 중에서 다른 극성을 가지는 한 상의

위상을 정규화된 시간축  $-0.5 \sim 0.5$  범위 가운데인 0에 위치시키면 구현 가능하다. 이때 센터 영벡터는 삽입된 형태의 스위칭 패턴이 생성된다. 영벡터를 제거하기 위해서 상을 이동시킬 때는 앞서 언급된 대칭 스위칭 구현을 위한 위상 이동량에 추가적으로  $0.5(1-Duty)$ 만큼 더 이동시켜주면 간단히 구현된다.

이렇게 구현된 것을 바탕으로 센터 영벡터의 유/무에 따른 전류 리플 분석을 시뮬레이션을 통해 분석한다.

### 2.3 시뮬레이션 결과

제한된 PWM 캐리어 생성 검증 및 스위칭 패턴에 따른 제어성능을 검증하기 위해 PLECS를 통해 듀얼 인버터를 가진 OEW PMSM의 토크 제어 모의 실험을 수행하였다. 정격 조건에서 모의 실험을 진행하였으며 모터 제정수는 다음과 같다.

|               |                    |                |                |
|---------------|--------------------|----------------|----------------|
| $Poles$       | 6                  | $w_{rpm}$      | 4000rpm        |
| $T_{rated}$   | 5.1Nm              | $R_s$          | 0.345ohm       |
| $P_{rated}$   | 2.1kW              | $L_d / L_q$    | 4.54 / 7.66mH  |
| $I_{s,rated}$ | 13 A <sub>pk</sub> | $\lambda_{PM}$ | 0.079V/(rad/s) |

표 1. 모터 상수

Table 1. Motor Parameter

#### 2.3.1 ZSV를 고려한 PWM 캐리어 함수화 방법 검증

그림5는 위의 PWM 생성법을 통해 생성한 대칭 스위칭 패턴 신호의 모의 실험 결과로 식(4)의 패턴이 합성된다.

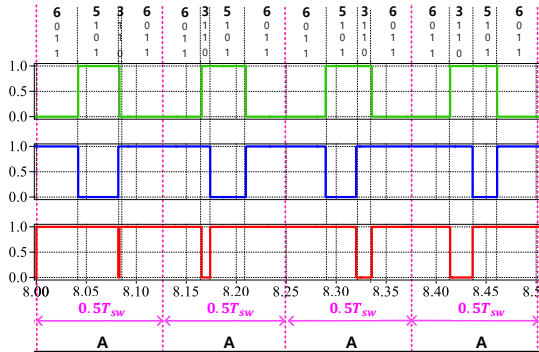


그림5. 대칭 스위칭 패턴 신호

Fig.5. Symmetry Switching Pattern Signal

그림6은 A상 전류를 나타낸 것으로 앞에서 제시된 PWM 캐리어 생성방법을 통해 효과적으로 ZSC가 억제된 것을 볼 수 있다. THD는 11.13%p 감소되었으며 전류 리플크기도 줄어든 것을 알 수 있다.

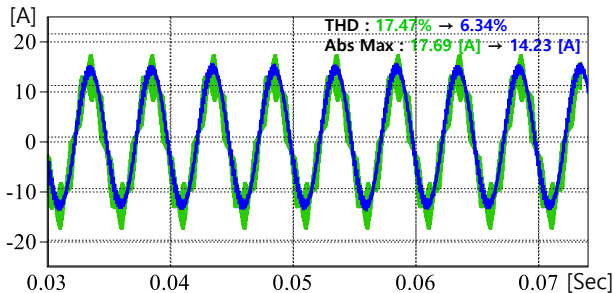


그림6. ZSV를 고려하지 않은 스위칭에서 발생하는 A상 전류(녹색). ZSV가 0이 되는 스위칭 패턴에서 발생하는 A상 전류(파랑색)

Fig.6. (a) A Phase Current without Considering ZSV (b) A Phase Current with Switching Patterns Making Zero ZSV

#### 2.3.2 센터 영벡터 유/무에 따른 제어 영향성 분석

본 연구에서 제한된 PWM 캐리어 생성 방법을 바탕으로 식(4), (5)에서와 같이 센터 영벡터의 유/무에 따른 스위칭을 쉽게 구현할 수 있으며 그에 따른 모의 실험 결과는 다음과 같다.

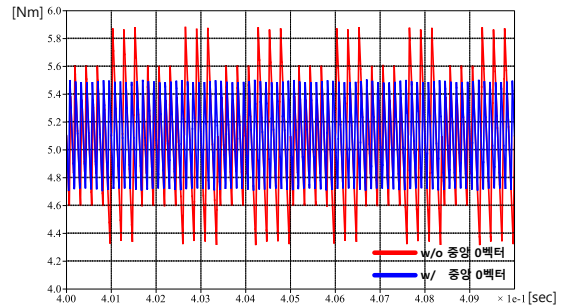


그림7. 센터 영벡터 유/무에 따른 토크(5.1Nm)제어 모의 실험  
Fig.7. Torque(5.1Nm) Control Simulation with/without Center Zero Voltage Vector

그림7에서 알 수 있듯이 센터 영벡터가 위치하는 경우, 즉 식(4)와 같은 순서로 전압을 합성하는 경우 토크 리플이 더 작음을 알 수 있다. 5.1Nm 정격 토크를 제어하는 데 센터 영벡터가 위치할 때와 안할 때의 최대 토크 리플 크기 차이( $=T_{max} - T_{min}$ )는 약 1.96배 차이가 나며, 상전류의 THD는 9.50%로 ZSV를 고려하지 않은 스위칭의 결과보다 좋지만 센터 영벡터가 있는 경우(상전류 THD 6.34%)보다는 악화되었음을 알 수 있다.

## 3. 결론

본 논문에서는 듀얼 인버터를 가진 개방 권선형 동기 전동기에서 ZSV를 고려한 스위칭을 위해 논리 게이트가 필요한 기존의 PWM 방식의 문제점을 PWM 캐리어의 함수화를 통해 가변 캐리어를 구성함으로써 해결하였고, 모의 실험을 통해 ZSC의 억제 효과를 확인하였다. 추가적으로 이 방식을 통해 구현한 스위칭 패턴으로 센터 영벡터의 유/무에 따른 제어 성능을 검토하였다.

본 연구는 BK21플러스 사업, 서울대학교 전력연구소의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

## 참고 문헌

- [1] M. R. Baiju, K. K. Mohapatra and K. Gopakumar, "A Dual Two-Level Inverter Scheme With Common Mode Voltage Limination for an Induction Motor Drive," in *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 19, NO. 3, MAY 2004.
- [2] Quntao An, Zhuang Peng and LizhiSun, "Dual-Space Vector Control of Open-End Winding Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Fed by Dual Inverter," in *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 31, NO. 12, DECEMBER 2016
- [3] Chandini G S. and Shiny, "Common-Mode Voltage Elimination Technique For an Open-End Winding Induction Motor Using Carrier Based PWM," in *2017 IEEE International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy)*