

# 개방 권선형 영구자석 동기전동기 구동을 위한 공통 전원 이중 인버터의 영상분 전류 저감

이형우\*, 이교범\*  
아주대학교\*

## Zero-Sequence Current Reduction of Dual Inverters using Common DC Bus for Driving Open-End Winding Permanent Magnet Synchronous Motors

Hyung-Woo Lee\*, Kyo-Beum Lee\*  
Ajou University\*

### ABSTRACT

본 논문에서는 개방 권선형 영구자석 동기전동기(Open-End Winding Permanent Magnet Synchronous Motor, OEW PMSM)를 구동하는 공통 전원 이중 인버터의 영상분 전류 저감 기법을 제안한다. 공통 전원을 사용하는 이중 인버터는 토폴로지의 특성으로 인해 영상분 전류가 발생하며 이로 인해 OEW PMSM의 제어 성능이 저하된다. 제안하는 공통 전원 이중 인버터의 영상분 전류 저감 기법은 각 인버터에서 인가하는 전압 벡터의 위상각을 변경하여 인버터 측에서 발생하는 영상분 전압을 저감한다. 추가적인 영상분 전류의 저감을 위해 위상 고정 루프와 비례-적분 제어기가 사용된다. 제안하는 기법의 타당성을 시뮬레이션 결과를 통하여 검증한다.

### 1. 서론

이중 인버터는 두개의 인버터를 사용하여 개방형 부하에 전력을 공급하는 구조를 가진다. 두 인버터의 출력 전압은 부하 양단에 인가되며 부하에 인가되는 전압은 각 인버터 출력 전압의 차로 결정된다. 이와 같은 구조적 특성으로부터 이중 인버터는 부하에 인가되는 전압의 승압 효과를 가지며 기존 단일 인버터를 사용하는 시스템의 승압 설비를 대체하거나 시스템의 출력을 향상시킬 수 있다<sup>[1]</sup>.

이중 인버터는 직류단 전압 생성을 위해 사용되는 전원의 종류에 따라 제어 기법이 변경된다. 각각의 인버터가 독립된 2개의 전원을 사용하는 경우 제어 기법에 제한 사항이 발생하지 않아 토폴로지의 전압을 최대로 사용할 수 있다. 하지만 두 개의 독립된 전원을 구성하기 위해 시스템의 무게 및 부피와 설계 비용이 증가한다. 두 인버터가 하나의 공통 전원을 사용하는 경우 시스템 구성이 단순화되지만 이중 인버터와 공통 전원의 경로를 따라 영상분 전류가 생성된다. 이러한 영상분 전류는 부하 전류를 왜곡시켜 제어 성능을 크게 감소시키며 시스템의 신뢰성을 저하시키는 원인이 된다. 따라서 공통 전원을 사용하는 이중 인버터의 제어를 위해서는 영상분 전류를 저감하기 위한 추가적인 제어 기법이 필요하다<sup>[2]</sup>.

영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)는 높은 출력 밀도와 우수한 동특성으로 인해 다양한 산업 분야에서 사용된다. 이중 인버터를 사용하여 PMSM을 구동하기 위해 전동기의 고정자 권선 양단을 개방한 개방 권선형 영구자석 동기전동기(Open-End Winding PMSM,

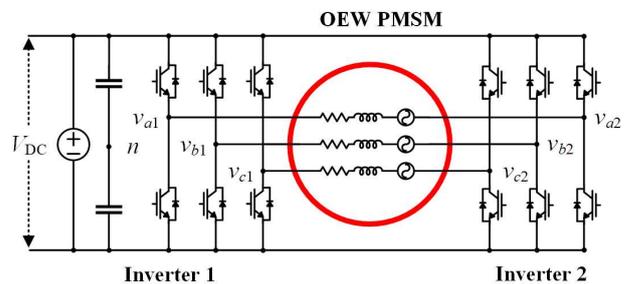


그림 1 OEW PMSM 구동을 위한 공통 전원 이중 인버터 시스템  
Fig.1 Dual inverters system with common voltage source for driving OEW PMSM

OEW PMSM)이 사용된다. 공통 전원을 사용하는 이중 인버터로 OEW PMSM을 구동하는 경우 영상분 경로에 영구자석에 의한 추가적인 영상분 전압이 생성된다. 영구자석에 의한 영상분 전압으로 인해 공통 전원을 사용하는 이중 인버터로 OEW PMSM을 구동하는 시스템은 인버터 측에서 발생하는 영상분 전압과 더불어 전동기 측에서 발생하는 영상분 전압이 가중되어 제어 성능이 저하된다<sup>[3]</sup>.

본 논문은 OEW PMSM 구동을 위한 공통 전원을 사용하는 이중 인버터의 영상분 전류 저감 기법을 제안한다. 제안하는 영상분 전류 저감 기법은 지령 전압 생성을 위해 각 인버터가 출력하는 전압 벡터의 위상각 변경을 통하여 인버터 측에서 생성되는 영상분 전압을 저감한다. 전동기의 영구자석에 의해 생성되는 영상분 전압의 제어를 위하여 위상 고정 루프(Phase-Locked Loop, PLL)와 비례-적분(Proportional-Integral, PI) 제어기가 추가적으로 사용된다. 제안하는 기법의 유효성 및 타당성을 시뮬레이션 결과를 통하여 검증한다.

### 2. 공통 전원을 사용하는 이중 인버터 시스템

공통 전원을 사용하는 이중 인버터는 하나의 공통 전원이 두 인버터의 직류단에 공통으로 연결된다. 그림 1은 OEW PMSM 구동을 위한 공통 전원을 사용하는 이중 인버터 시스템의 회로도이다. OEW PMSM의 특성은 단일 인버터로 구동되는 일반적인 PMSM과 동일하므로 회전자 좌표계  $d-q$ 축 상에서 고정자 전압 방정식은 식 (1)과 같이 표현된다.



표 1 OEW PMSM의 시뮬레이션 파라미터

Table 1 Simulation parameters of OEW PMSM

파라미터	값
직류단 전압 $V_{DC}$	300 [V]
정격 출력	2.2 [kW]
정격 토크	12 [Nm]
극수	12
고정자 저항 $R_s$	0.213 [ $\Omega$ ]
$d$ 축 인덕턴스 $L_d$	1.60 [mH]
$q$ 축 인덕턴스 $L_q$	2.18 [mH]
회전자 쇄교 자속 $\phi_f$	0.113 [Wb]

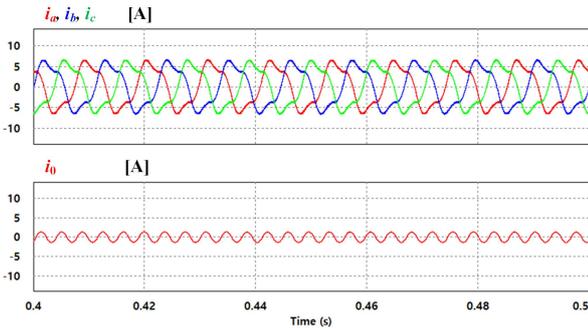


그림 6 기존 SVPWM 기법의 시뮬레이션 결과  
Fig.6 Simulation result of SVPWM method

$$\begin{aligned}
 V_{oa} &= V_{ref1} - V_{ref2} \\
 V_{ref1} &= \frac{1}{\sqrt{3}} e^{-j\pi/6} V_{ref} \\
 V_{ref2} &= \frac{1}{\sqrt{3}} e^{-j5\pi/6} V_{ref}
 \end{aligned} \quad (4)$$

그림 2의 3차 영상분 전압으로 인한 영상분 전류는 추가적인 PI 제어기를 통하여 저감된다. 영상분 전류의 주파수는 기본과 주파수의 3배로 나타난다. 따라서 PI 제어기의 적용을 위해 영상분 좌표계  $d_0-q_0$ 축으로의 동기화가 필요하다. 동기화를 위한 영상분 전류의 위상각  $\theta_0$ 는 전역 통과 필터(All Pass Filter, APF)를 사용한 단상 PLL 기법으로 추정된다. 그림 4는 단상 PLL의 블록 다이어그램을 나타낸다. 그림 4의  $i_{d0}, i_{q0}, i_{qs0}, i_{ds0}$ 는 각각 영상분 전류,  $90^\circ$  위상 지연된 영상분 전류,  $d_0-q_0$ 축에서 표현된 영상분 전류를 의미한다.  $i_0$ 는 APF를 통해  $90^\circ$  위상 지연되어  $i_{d0}$  및  $i_{qs0}$ 로 변환되며 이후 좌표변환 및 PI 제어를 통하여 영상분 전류의 위상각  $\theta_0$ 가 추정된다. 그림 5는 제안하는 영상분 전류 저감 기법의 제어 블록도를 나타낸다. 그림 5의  $n^*$ ,  $n$ 은 각각 OEW PMSM의 지령 속도와 속도를 나타낸다.

#### 4. 시뮬레이션

제안하는 영상분 전류 저감 기법의 타당성을 시뮬레이션 결과를 통하여 검증한다. 시뮬레이션에 사용된 OEW PMSM의 파라미터는 표 1과 같다.

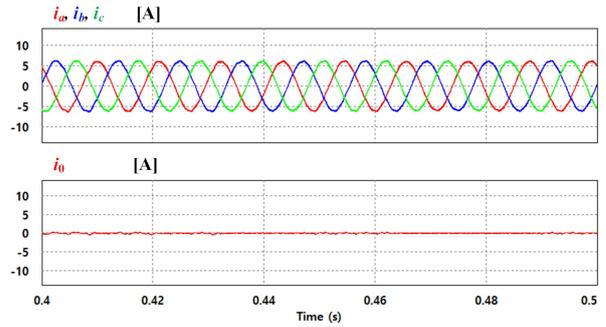


그림 7 제안하는 영상분 전류 저감 기법의 시뮬레이션 결과  
Fig.7 Simulation result of the proposed method

그림 6은 기존 SVPWM 기법이 적용된 이중 인버터의 OEW PMSM의 속도제어 시뮬레이션 결과를 나타내며 지령 속도 1000 rpm, 토크 부하 6 Nm 조건이 적용되었다. 인버터의 스위칭 상태에 따라 발생하는  $v_{0min}$ 와 영구자석에 의한 3차 영상분 전압에 의해 영상분 전류가 생성된다. 생성된 영상분 전류는 3상 고정자 전류를 왜곡시키며 이에 따라 OEW PMSM의 제어 성능이 저하된다.

그림 7은 제안하는 영상분 전류 저감 기법이 적용된 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 7의 시뮬레이션 조건은 그림 6의 조건과 동일하게 적용되었다. 두 인버터의 CMV가 동일한 스위칭 상태만이 사용되므로  $v_{0min}$ 의 크기는 0으로 유지된다. 3차 영상분 전압에 의한 영상분 전류는 PI 제어기를 통해 0으로 제어되며 영상분 전류의 저감으로 3상 고정자 전류의 왜곡이 개선되며 OEW PMSM의 제어 성능이 향상된다.

#### 5. 결론

본 논문은 OEW PMSM 구동을 위한 공통 전원 이중 인버터의 영상분 전류 저감 기법을 제안하였다. 제안하는 기법에서 인버터의 스위칭 상태에 따라 발생하는 영상분 전압은 지령 전압 벡터의 위상 및 크기를 변조하여 저감되었다. 추가적으로 발생하는 영상분 전류를 APF 기반의 단상 PLL 기법과 PI 제어기를 사용하여 저감하였다. 제안하는 기법의 유효성을 시뮬레이션 결과를 통하여 검증하였다.

#### 참고 문헌

- [1] Y. Lee and J. Ha, "Hybrid modulation of dual inverter for open-end permanent magnet synchronous motor," IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 6, pp. 3286–3299, Jun. 2015.
- [2] X. Yuan, C. Zhang, and S. Zhang, "Torque ripple suppression for open-end winding permanent-magnet synchronous machine drives with predictive current control," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 67, no. 3, pp. 1771–1781, Mar. 2020.
- [3] W. Hu, H. Nian, and D. Sun, "Zero-sequence current suppression strategy with reduced switching frequency for open-end winding PMSM drives with common DC bus," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 66, no. 10, pp. 7613–7623, Oct. 2019.