

개방 권선형 영구자석 동기전동기 구동을 위한 이중 인버터의 Level-Shift 기반 가변 불연속 변조 기법

이형우*, 이교범*
아주대학교*

Level-Shift based Variable DPWM Method of Dual Inverter for Open-End Winding Permanent Magnet Synchronous Motor

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

ABSTRACT

본 논문에서는 개방 권선형 매입형 영구자석 동기전동기를 구동하는 이중 인버터의 스위칭 손실 저감을 위한 전압 변조 기법을 제안한다. 개방 권선형 매입형 영구자석 동기전동기를 구동하는 이중 인버터에서 기존 멀티 레벨 인버터에서 적용되던 level-shift 기반 변조 기법과, 가변 불연속 변조(Discontinuous Pulse Width Modulation, DPWM)기법을 적용한다. 이와 같은 클램핑 동작을 통하여 기존 변조 기법에 비하여 스위칭 횟수를 크게 감소시켜 전체 스위칭 손실의 저감 효과를 구현한다. 제안하는 이중 인버터의 스위칭 손실 저감을 위한 새로운 변조 기법은 시뮬레이션 결과를 통해 유효성을 검증한다.

1. 서 론

개방 권선형 영구자석 동기전동기(Open-End Winding Permanent Magnet Synchronous Motor, OEW PMSM)는 Y-결선 또는 Δ -결선의 형태로 사용되는 기존 전동기의 고정자 권선 구조에서 각 상의 권선 양단을 개방한 구조를 가진다. 개방 형태의 고정자 권선의 양단에 전압 인가를 위하여 이중 인버터가 사용되며 이러한 이중 인버터를 기반으로 하는 OEW PMSM 시스템은 두 인버터의 전압 차로부터 고정자 권선에 인가되는 전압의 승압이 가능하다는 장점을 가진다^[1]. 이러한 이중 인버터의 승압 효과는 단일 인버터에 의해 구동되는 기존의 영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)시스템에서 인버터의 직류단 전압 승압을 위해 사용되는 DC/DC 컨버터를 대체할 수 있다^[2]. 이를 통해 전체 시스템의 부피와 무게에서 큰 비중을 차지하는 인덕터가 불필요하며 따라서 전체 시스템의 부피 및 무게가 감소한다는 이점을 가진다. 또한, 이중 인버터는 단일 인버터에 비해 높은 멀티 레벨 효과를 가지며 이를 응용한 다양한 전압 변조 기법 및 허용 제어 기법 등을 적용할 수 있다^[3].

이중 인버터를 사용하는 OEW PMSM 시스템은 싱글 인버터를 사용하는 기존 PMSM 시스템에 비하여 앞서 기술한 바와 같은 다양한 장점을 가진다. 하지만 근본적으로 추가적인 하나의 인버터를 더 사용하므로 전체 시스템의 스위칭 횟수와 스위칭 손실이 증가하게 된다^[4].

본 논문에서는 OEW PMSM 구동을 위한 2-level 이중 인버터의 level-shift 기반 가변 불연속 변조(Discontinuous Pulse Width Modulation, DPWM)기법을 제안한다. 제안하는

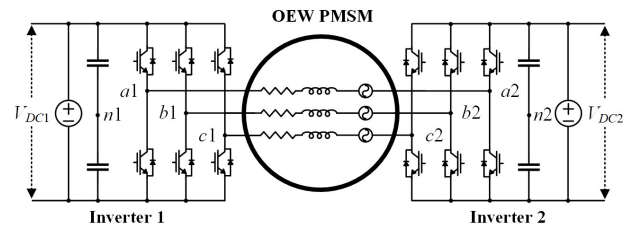


그림 1 독립 전원을 사용하는 이중 인버터의 OEW PMSM 구동 시스템
Fig.1 Dual inverter fed OEW PMSM with two isolated voltage sources

스위칭 손실 저감 기법은 기존 멀티 레벨 토폴로지에서 사용되는 level-shift 기반 변조 기법과 전류 위상각에 따라 DPWM의 불연속 영역을 변경하여 이중 인버터의 스위칭 손실을 저감한다. 제안하는 기법의 유효성은 시뮬레이션 결과를 통하여 검증한다.

2. 독립전원을 사용하는 2-level 이중 인버터

이중 인버터는 두 개의 인버터에 사용되는 전압 소스의 종류에 따라 추가적인 제어 알고리즘을 필요로 한다. 하지만 독립 전원을 사용하여 제어하는 경우 추가적인 제어 기법이 불필요하다는 장점을 가진다. 그림 1은 각각의 인버터가 독립 전원을 사용하는 이중 인버터의 OEW PMSM 구동 시스템을 나타낸다. 그림 1로부터 이중 인버터에 의해 3상 고정자 권선에 인가되는 전압은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} v_{as} &= v_{an1} - v_{a2n2} + v_{nn2} \\ v_{bs} &= v_{bn1} - v_{b2n2} + v_{nn2} \\ v_{cs} &= v_{cn1} - v_{c2n2} + v_{nn2} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, v_{as} , v_{bs} , v_{cs} 는 3상 고정자 전압을 의미하며 v_{xy} ($x=abc1, abc2, n1, y=n1, n2$)는 x 와 y 사이의 전압 차를 의미한다. OEW PMSM의 전압 방정식은 고정자 전압이 권선 양단의 전압 차로 결정된다는 점을 제외하면 기존 PMSM과 동일하며 이를 회전자 좌표계 $d-q$ 축에서 표현하면 식 (2)와 같다.

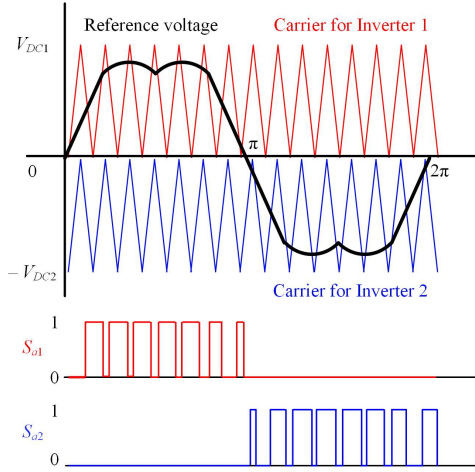


그림 2 Level-shift 전압 변조 기법을 적용한 이중 인버터의 스위칭 동작
Fig.2 Switching operation of dual inverter with level-shift based voltage modulation method

표 1 전류 위상각에 따른 level-shift 전압 변조 방식의 오프셋 전압

Table 1 Offset voltage for level-shift based voltage modulation method according to current phase angle

전류 위상각 (θ_i)	Level-shift 방식의 오프셋 전압(v_{offset})
$-\pi/6 < \theta_i < \pi/6$	$(V_{DC1} + V_{DC2}/2) - v_{as}$
$\pi/6 < \theta_i < \pi/2$	$(V_{DC1} + V_{DC2}/2) - v_{cs}$
$\pi/2 < \theta_i < 5\pi/6$	$(V_{DC1} + V_{DC2}/2) - v_{bs}$
$5\pi/6 < \theta_i, \theta_i < -5\pi/6$	$(V_{DC1} + V_{DC2}/2) - v_{as}$
$-5\pi/6 < \theta_i < -\pi/2$	$(V_{DC1} + V_{DC2}/2) - v_{cs}$
$-\pi/2 < \theta_i < -\pi/6$	$(V_{DC1} + V_{DC2}/2) - v_{bs}$

$$v_d = v_{d1} - v_{d2} = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q$$

$$v_q = v_{q1} - v_{q2} = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \phi_f$$
(2)

여기서, v_{d1} , v_{q1} , v_{d2} , v_{q2} 는 인버터 1과 인버터 2의 d - q 축 고정자 전압, v_{dq} , i_{dq} 는 각각 OEW PMSM의 d - q 축 고정자 전압 및 고정자 전류를 의미한다. R_s , ω_r 은 각각 고정자 저항과 회전자의 각속도를, ϕ_f 는 회전자 쇄교 자속을 의미하며 L_{dq} 는 d - q 축 인덕턴스를 나타낸다.

3. 제안하는 스위칭 손실 저감 기법

3.1 Level-shift 기반 전압 변조 기법

Level-shift 변조 기법은 기존 멀티 레벨 토폴로지에서 사용되는 전압 변조 기법이다. 그림 2는 이중 인버터에서 level-shift 기반 전압 변조 기법이 적용되는 경우 각각의 인버터의 스위칭 동작을 나타낸다. 여기서 S_{a1} 과 S_{a2} 는 각각 인버터 1과 인버터 2의 a 상 스위칭 함수를 나타내며 V_{DC1} , V_{DC2} 는 각각 인버터 1과 인버터 2의 직류단 전압을 의미한다.

표 2 OEW-IPMSM의 시뮬레이션 파라미터

Table 2 Simulation parameters of OEW-IPMSM

파라미터	값
직류단 전압 V_{DC1} , V_{DC2}	100 [V]
정격 출력	2.2 [kW]
정격 토크	12 [Nm]
극수 P	12
고정자 저항 R_s	0.213 [Ω]
d 축 인덕턴스 L_d	1.60 [mH]
q 축 인덕턴스 L_q	2.18 [mH]
회전자 쇄교 자속 ϕ_f	0.113 [Wb]

해당 전압 변조 기법이 이중 인버터에 적용되는 경우 멀티 캐리어를 기반으로 3상 지령 전압의 부호에 따라 두 인버터 중 하나의 인버터만이 지령 전압의 출력을 위해 스위칭 동작을 수행한다. 그림 2에서 a 상의 지령 전압의 부호가 양(+)인 경우 인버터 2는 클램핑 되며 스위칭 동작은 인버터 1에서만 이루어지며 지령 전압의 부호가 음(-)인 경우 반대로 인버터 1이 클램핑 되며 스위칭은 인버터 2에서만 이루어진다.

3.2 전류 위상각 기준 가변 DPWM

제안하는 스위칭 손실 저감 기법은 level-shift 전압 변조 기법을 기반으로 전류 위상각을 기준으로 하는 가변 DPWM 동작을 수행한다. 통상적으로 불연속 구간은 스위칭 손실 저감 효과를 최대화하기 위하여 부하의 상전류가 최대가 되는 지점으로 선정한다. 하지만 PMSM과 같은 유도성 부하에서는 전류 위상이 인가 전압의 위상에 비해 지연이 발생하므로 실제 불연속 구간은 상전류의 최대 지점에 비해 앞서게 된다. 이와 같은 부하 특성에 따라 전류와 전압 위상각의 차이가 발생하면 DPWM에 의한 스위칭 손실 저감 효과가 감소하게 된다.

통상적으로 전압각을 기준으로 상전류가 최대가 되는 지점의 60도 불연속 구간을 배치하는 DPWM의 경우 level-shift 방식을 위해 지령 전압에 추가되는 오프셋 전압은 식 (3)과 같이 결정된다.

$$v_{offset} = \begin{cases} (V_{DC1} + V_{DC2}/2) - v_{max} & (v_{max} + v_{min} \geq 0) \\ -(V_{DC1} + V_{DC2}/2) - v_{min} & (v_{max} + v_{min} < 0) \end{cases} \quad (3)$$

여기서, v_{offset} 은 오프셋 전압, v_{max} 와 v_{min} 은 3상 지령 전압의 최대값과 최소값을 의미한다. 식 (3)에 의해 결정되는 오프셋 전압은 부하에 인가되는 전압의 위상을 기준으로 불연속 구간을 형성한다. 제안하는 기법은 해당 불연속 구간을 전류 위상각을 기준으로 변경하기 위해 기존 방식에서 사용되는 오프셋 전압의 v_{max} 와 v_{min} 을 전류 위상각을 기반으로 설정한다. 표 1은 전류 위상각(θ)를 기준으로 level-shift 방식에서 적용되는 오프셋 전압을 나타낸다.

4. 시뮬레이션

제안하는 독립전원을 사용하는 이중 인버터의 스위칭 손실

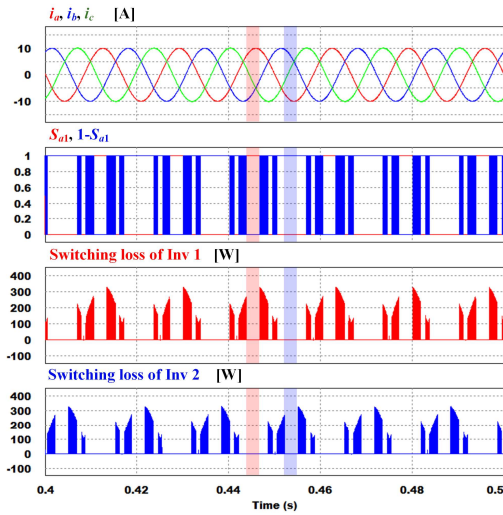


그림 3 Level-shift 기반 전압 변조 기법과 기존 DPWM 기법을 적용한 시뮬레이션 결과

Fig.3 Simulation results of level-shift based conventional DPWM method

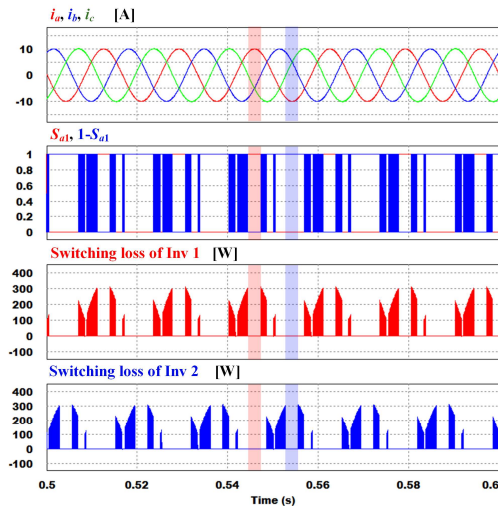


그림 4 제안하는 이중 인버터의 스위칭 손실 저감 기법 시뮬레이션 결과

Fig.4 Simulation results of proposed method for switching loss reduction in dual inverter

저감 기법은 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 시뮬레이션에 사용된 조건 및 전동기의 파라미터는 표 2와 같다.

그림 3은 level-shift 기반 전압 변조 기법과 전압 위상을 기준으로 하는 통상적인 DPWM 기법을 적용한 결과를 나타낸다. 그림 3에서 i_a , i_b , i_c 는 3상 고정자 전류, S_{a1} 은 인버터 1의 a상 스위칭 함수를 의미하며 인버터 1과 인버터 2의 a상에서 발생하는 스위칭 손실이 나타나 있다. 하나의 상의 지령 전압을 출력함에 있어 a상 지령 전압의 부호에 따라 하나의 인버터가 스위칭 동작을 수행하며 나머지 인버터는 클램핑 상태를 유지한다. 이를 통하여 인버터에서 발생하는 스위칭 손실이 저감되거나 상전류가 최대치가 되는 지점과 불연속 변조 영역 사이의 오차로 인하여 스위칭 손실 저감 효과가 감소한다.

그림 4는 제안하는 스위칭 손실 저감 기법을 적용한

시뮬레이션 결과를 나타내며 결과 파형의 순서는 그림 3과 같다. 제안하는 스위칭 손실 저감 기법은 level-shift 기반 전압 변조 기법으로 인한 저감 효과와 함께 상전류의 최대 지점에 불연속 영역이 배치되어 DPWM 기법으로 인한 스위칭 손실 저감 효과가 증가한다.

5. 결 론

본 논문은 level-shift 전압 변조 기법을 기반으로 하는 OEW PMSM 구동을 위한 이중 인버터의 스위칭 손실 저감 기법을 제안한다. 제안하는 이중 인버터의 스위칭 손실 저감 기법은 한 상에 대한 지령 전압의 부호에 따라 각각의 인버터가 상대적으로 동작하는 level-shift 전압 변조 기법과 상전류를 기준으로 하는 DPWM 방식으로 스위칭 손실을 저감한다. 제안하는 기법은 부하의 특성에 따른 제안하는 이중 인버터의 스위칭 손실 저감 기법의 유효성은 시뮬레이션 결과를 통하여 검증하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20206910100160)

참 고 문 헌

- [1] D. Casadei, G. Grandi, A. Lega, and C. Rossi, "Multilevel Operation and Input Power Balancing for a Dual Two-Level Inverter with Insulated DC Sources," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 44, no. 6, pp. 1815–1824, Nov./Dec. 2008.
- [2] 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.
- [3] Z. Song, F. Zhou, Y. Yu, R. Zhang, and S. Hu, "Open-phase fault tolerant predictive control strategy for open-end-winding permanent magnet synchronous machines without postfault controller reconfiguration," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 68, no. 5, pp. 3770–3781, May 2021.
- [4] R. T. Arumalla, S. Figarado, and N. Harischandrapa, "Dodecagonal voltage space vector based PWM techniques for switching loss reduction in a dual inverter fed induction motor drive," IEEE J. Emerg. Sel. Top. Ind. Electron., vol. 1, no. 2, pp. 182–191, Oct. 2020.