

개방 권선형 영구자석 동기전동기 구동을 위한 독립 전원을 갖는 이중 인버터의 불연속 구간 적용각에 따른 전력 손실 분석

김재성*, 이상준*, 이형우*, 이교범*
아주대학교*

Analysis of Power Loss in Dual Inverters with Isolated Source for Open-End Winding Permanent Magnet Synchronous Motor using Discontinuous Modulation Region

Jae-Seong Kim*, Sang-Jun Lee*, Hyung-Woo Lee*, Kyo-Beum Lee*
Ajou University*

ABSTRACT

본 논문에서는 개방 권선형 영구자석 동기전동기 구동을 위한 독립 전원을 갖는 이중 인버터의 불연속 구간 적용각에 따른 전력 손실을 분석한다. 두 개의 독립 전원으로 구동되며 레벨 천이 방식을 사용하는 이중 인버터의 동작 원리와 불연속 변조 기법을 이해한다. 이를 기반으로 스위칭 손실과 전도 손실을 분석하고 손실의 합이 최소가 되는 불연속 변조 기법의 적용각을 도출한다. 분석한 자료의 타당성을 시뮬레이션 결과를 통해 검증한다.

1. 서 론

개방 권선형 영구자석 동기전동기(Open-End Winding Permanent Magnet Synchronous Motor, OEW PMSM)는 기존의 전동기 고정자 권선에서 각 상 권선의 양단을 개방한 구조이다. 개방 구조의 고정자 권선 양단에 이중 인버터를 사용하여 전원을 공급하여 단일 인버터에 비해 출력 전압의 승압이 용이하다^[1]. 하지만, 이중 인버터는 전력 반도체 수의 증가로 인해 단일 인버터에 비해 전력 손실이 증가한다. 전력 반도체에서 발생하는 전력 손실은 인버터의 성능과 효율에 밀접한 관련이 있기 때문에 인버터를 설계할 때 주요 전력 손실인 스위칭 손실과 전도 손실이 고려되어야 한다^[2].

통상적으로 전력 반도체에서 발생하는 스위칭 손실은 변조 기법과 스위칭 방식의 변경을 통해 저감이 가능하다. 불연속 변조(Discontinuous Pulse Width Modulation, DPWM) 기법은 특정 구간에서 스위칭 횟수를 감소시킬 수 있기 때문에 공간 벡터 변조(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 기법에 비해 스위칭 손실을 저감할 수 있다^[3]. DPWM 기법을 사용하여 동상 부하를 구동하는 경우 상전압을 기준으로 불연속 구간을 설정하여 상전류의 절댓값이 최대인 구간에서 스위칭 횟수를 감소시킬 수 있다. 하지만, 유도성 부하인 영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)를 구동하는 경우에는 전압과 전류의 위상에 차이가 발생하여 상전압을 기준으로 불연속 구간을 설정해도 상전류의 절댓값이 최대인 구간에서 스위칭 횟수를 감소시킬 수 없다^[4]. 이중 인버터의 스위칭 방식은 분기된 지령 전압을 단일 캐리어와 비교하는 방식과 단일 지령 전압을 멀티 캐리어와 비교하는 레벨 천이 방식으로 크게 구분된다. 레벨 천이 방식을 사용하는

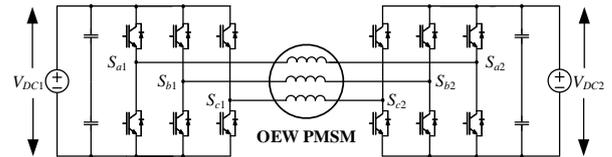


그림 1 두 개의 독립 전원을 갖는 이중 인버터로 구동되는 OEW PMSM
Fig.1 Dual inverters with isolated voltage sources for OEW PMSM

경우에는 지령 전압의 부호에 따라 한 상에 대하여 한 개의 인버터만 동작하기 때문에 한 상에 대해 두 개의 인버터를 모두 사용하는 기존의 기법에 비해 스위칭 손실이 감소한다^[5].

본 논문에서는 OEW PMSM 구동을 위한 2레벨 이중 인버터의 DPWM 기법과 레벨 천이 방식을 기반으로 전력 손실을 분석하고, 전력 손실이 최소가 되도록 하는 조건을 찾는다. 이를 위해 기존 이중 인버터에서 사용되는 레벨 천이 전압 변조 방식을 기반으로 전류 위상각에 따라 DPWM의 불연속 구간을 변경하며 스위칭 손실과 전도 손실을 분석하고 손실의 합이 최소가 되는 적용각을 도출한다. 제안하는 분석 결과의 타당성은 시뮬레이션 결과를 통해 검증한다.

2. 독립 전원을 갖는 이중 인버터의 동작 원리

그림 1은 두 개의 독립 전원을 갖는 이중 인버터로 구동되는 OEW PMSM이다. 인버터 1과 인버터 2는 각각 입력 전압 V_{DC1} 과 V_{DC2} 로 구동되고 부호에 인가되는 전압은 두 인버터의 출력 전압의 차이이다. OEW PMSM의 상전압을 스위칭 함수에 대한 식으로 나타낼 수 있고, 식 (1)과 같다.

$$\begin{cases} v_{ax} = \frac{V_{DC1}}{3} \cdot (2S_{a1} - S_{b1} - S_{c1}) - \frac{V_{DC2}}{3} \cdot (2S_{a2} - S_{b2} - S_{c2}) \\ v_{bx} = \frac{V_{DC1}}{3} \cdot (2S_{b1} - S_{c1} - S_{a1}) - \frac{V_{DC2}}{3} \cdot (2S_{b2} - S_{c2} - S_{a2}) \\ v_{cx} = \frac{V_{DC1}}{3} \cdot (2S_{c1} - S_{a1} - S_{b1}) - \frac{V_{DC2}}{3} \cdot (2S_{c2} - S_{a2} - S_{b2}) \end{cases} \quad (1)$$

여기서 v_{xy} 는 OEW PMSM의 x 상 상전압을 의미한다. S_{xy} 는 인버터 y 의 x 상의 상단 스위치가 ON 상태일 때 1의 값을 가지고 OFF 상태일 때 0의 값을 가지는 스위칭 함수를 의미한다. 또한, v_{xy} , S_{xy} 에서 x 는 a, b, c 상을 나타내고, y 는 인버터 1 또는 인버터 2를 나타낸다. 식 (1)에서와 같이 12개 스위치의 스위칭 동작을 통해 OEW PMSM이 구동되고, 인버터 1과 인버터 2가 역상의 관계일 때 최대의 상전압이 출력된다.

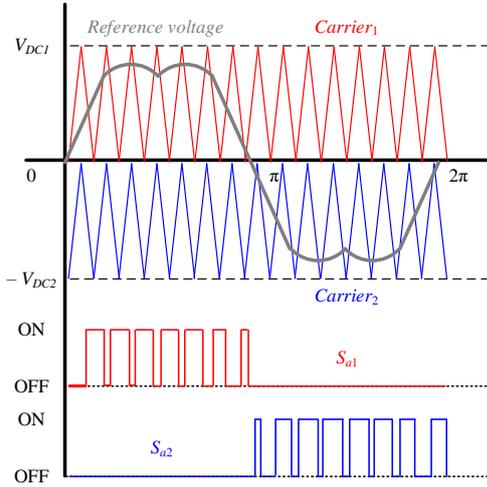


그림 2 레벨 천이 방식을 사용한 이중 인버터의 스위칭 파형
Fig.2 Waveform of dual inverters using level-shift

표 1 OEW PMSM의 시뮬레이션 파라미터

Table 1 Simulation parameters of OEW PMSM

입력 전압	100 [V]	영구자석의 자속	0.113 [Wb]
스위칭 주파수	10 [kHz]	고정자 저항	0.213 [Ω]
회전 속도	1200 [rpm]	d 축 인덕턴스	1.60 [mH]
극 수	12	q 축 인덕턴스	2.18 [mH]

$$V_{ds}^e = V_{d1}^e - V_{d2}^e = R_s i_{ds}^e + L_{ds} \frac{di_{ds}^e}{dt} - \omega_e L_{qs} i_{qs}^e \quad (2)$$

$$V_{qs}^e = V_{q1}^e - V_{q2}^e = R_s i_{qs}^e + L_{qs} \frac{di_{qs}^e}{dt} + \omega_e (L_{ds} i_{ds}^e + \lambda_f) \quad (3)$$

인버터 1과 인버터 2의 전압 차이가 OEW PMSM의 고정자 전압이므로 고정자 전압 방정식은 식 (2)와 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 V_{ds}^e 와 V_{qs}^e 는 각각 동기 좌표계 d 축과 q 축의 고정자 전압을, V_{d1}^e 와 V_{q1}^e 는 각각 인버터 1의 동기 좌표계 d 축과 q 축의 상전압을 의미하고, V_{d2}^e 와 V_{q2}^e 는 인버터 2의 동기 좌표계 d 축과 q 축의 상전압을 의미한다. i_{ds}^e 와 i_{qs}^e 는 각각 동기 좌표계 d 축과 q 축의 고정자 전류를, R_s 는 고정자 저항을 의미한다. L_{ds} 와 L_{qs} 는 각각 고정자 저항과 동기 좌표계 d 축과 q 축의 인덕턴스를 의미하고 ω_e 는 회전자의 각속도를, λ_f 는 영구자석의 자속을 의미한다.

3. 이중 인버터의 스위칭 손실 저감 기법

이중 인버터의 스위칭 손실 저감 기법으로 3.1절에서 레벨 천이 방식을 설명하고 3.2절에서 전류각 기반의 DPWM 기법을 제시한다.

3.1 레벨 천이 방식

레벨 천이 방식은 각 상의 지령 전압을 두 개의 캐리어와 비교하여 스위칭 동작을 수행하는 전압 변조 기법이다. 지령 전

표 2 레벨 천이 방식 사용 여부에 따른 SVPWM의 스위칭 손실과 전도손실

Table 2 Switching and conduction loss of SVPWM about level-shift

레벨 천이 방식	스위칭 손실	전도 손실
사용	41.9 [W]	101.0 [W]
미사용	83.8 [W]	101.3 [W]

표 3 레벨 천이 방식 기반의 DPWM 적용각에 따른 스위칭 손실과 전도 손실

Table 3 Switching and conduction loss of level-shift based on discontinuous modulation region

변조 기법	스위칭 손실	전도 손실	전력 손실
30° DPWM	28.9 [W]	100.2 [W]	129.1 [W]
60° DPWM	24.8 [W]	101.1 [W]	125.9 [W]
120° DPWM	25.6 [W]	100.6 [W]	126.2 [W]
전류각 기반 60° DPWM	23.5 [W]	101.2 [W]	124.7 [W]

압의 부호에 따라 하나의 인버터만이 스위칭 동작을 수행하므로 스위칭 손실이 저감된다.

그림 2는 레벨 천이 방식을 사용한 이중 인버터의 a상 스위칭 파형을 나타낸다. 지령 전압이 양 (+)인 구간의 경우, 캐리어 1과 지령 전압이 비교되어 인버터 1의 a상 스위치만 스위칭 동작을 한다. 지령 전압이 음 (-)인 구간의 경우, 캐리어 2와 지령 전압이 비교되어 인버터 2의 a상 스위치만 스위칭 동작을 한다.

3.2 전류각 기반의 DPWM 기법

전류각 기반의 DPWM 기법을 사용한 경우 PMSM을 구동할 때 상전류의 절댓값이 최대가 되는 구간을 불연속 구간으로 설정할 수 있다.

$$V_{ds}^{r*} = V_{ds}^* \cos(\theta_i - \theta_v) - V_{qs}^* \sin(\theta_i - \theta_v) \quad (4)$$

$$V_{qs}^{r*} = V_{ds}^* \sin(\theta_i - \theta_v) + V_{qs}^* \cos(\theta_i - \theta_v) \quad (5)$$

식 (4)와 식 (5)는 지령 전압의 위상 θ_v 를 상전류의 위상인 전류 위상각 θ_i 로 좌표 변환한 것을 나타낸다. 여기서 V_{ds}^* 와 V_{qs}^* 은 동기 좌표계 d 축과 q 축 지령 전압을 의미하고, V_{ds}^{r*} 과 V_{qs}^{r*} 은 전류각 기반의 동기 좌표계 d 축과 q 축 지령 전압을 의미한다. V_{ds}^{r*} 과 V_{qs}^{r*} 을 기준으로 식 (6)과 같이 오프셋 전압 V_{off} 의 범위를 설정한 경우 DPWM의 불연속 구간이 전류각 기반으로 설정된다.

$$V_{off} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{V_{dc1} + V_{dc2}}{2} - V_{max}^* \quad (V_{max}^{r*} + V_{min}^{r*} \geq 0) \\ -\frac{V_{dc1} + V_{dc2}}{2} - V_{min}^* \quad (V_{max}^{r*} + V_{min}^{r*} < 0) \end{array} \right\} \quad (6)$$

여기서 V_{max}^* 과 V_{min}^{r*} 은 각각 지령 전압과 전류각 기반 지령 전압의 최댓값을 의미하고, V_{min}^* 과 V_{min}^{r*} 은 각각 지령 전압과 전류각 기반의 지령 전압의 최솟값을 의미한다. 앞선 과정을 통해 PMSM을 구동할 때 지령 전압과 상전류의 위상 차이가 보상된 DPWM 불연속 구간이 설정된다.

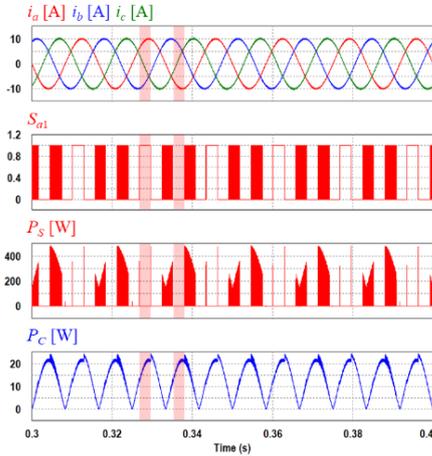


그림 3 레벨 천이 방식을 기반으로 기존의 60° DPWM을 사용한 결과
Fig.3 Simulation results of conventional 60° DPWM method using level-shift

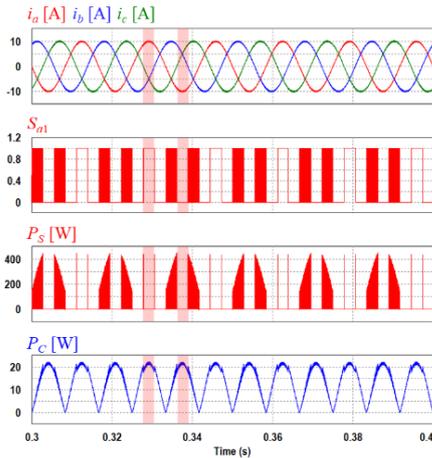


그림 4 레벨 천이 방식을 기반으로 전류각 기준 60° DPWM을 사용한 결과
Fig.4 Simulation results of current angle based 60° DPWM method using level-shift

4. 시뮬레이션

레벨 천이 방식의 사용에 따른 스위칭 손실의 감소 여부를 시뮬레이션을 통해 검증하고, 레벨 천이 방식을 사용한 전류각 기반 60° DPWM 기법의 스위칭 손실 저감 효과를 시뮬레이션을 통해 검증한다.

표 1은 시뮬레이션에 사용된 OEW PMSM의 파라미터를 나타내고, 표 2는 레벨 천이 방식의 사용 여부에 따른 SVPWM의 스위칭 손실과 전도손실을 나타낸다. 레벨 천이 방식을 사용하는 경우 한 상에 대해 한 개의 인버터만 스위칭 동작을 수행하기 때문에 스위칭 손실이 감소한다. 시뮬레이션 결과 약 2배의 손실이 저감되었다. 표 3은 레벨 천이 방식 기반의 DPWM 적용각에 따른 스위칭 손실과 전도손실을 나타낸다. 전류각 기반의 60° DPWM 기법은 전류의 크기가 최대일 때 불연속 구간을 적용하기 때문에 표 3의 다른 기법에 비해 약 0.96~3.53%의 전력 손실 저감 효과가 발생하였다.

레벨 천이 방식의 스위칭 기법과 기존의 60° DPWM을 적용한 결과는 그림 3과 같다. 여기서 i_a , i_b , i_c 는 고정자 3상 전류를 의미하고, P_S 와 P_C 는 각각 인버터 1의 a 상의 스위칭

손실과 전도 손실을 의미한다. 레벨 천이 방식을 통해 인버터의 스위칭 손실이 저감되지만 지령 전압과 상전류의 위상차이로 인해 상전류의 절댓값이 최대인 구간에 불연속 구간이 적용되지 않는다.

그림 4는 레벨 천이 방식의 스위칭 기법과 전류각 기반의 DPWM 기법을 사용한 결과를 나타낸다. 지령 전압과 상전류의 위상차이가 보상되어 상전류의 절댓값이 최대가 되는 구간에 불연속 구간이 적용되므로 그림 3의 경우보다 스위칭 손실이 약 5.53% 감소하였다.

5. 결론

본 논문은 OEW PMSM을 구동을 위한 독립 전원을 갖는 이중 인버터에서 레벨 천이 방식과 DPWM 기법을 기반으로 전력 손실을 분석하였다. DPWM의 다양한 적용각에 대한 스위칭 손실과 전도 손실을 비교하였고 스위칭 손실과 전도 손실의 합이 최소가 되는 지점을 분석하여 전력 손실이 최소가 되는 적용각을 도출하였다. PSIM 시뮬레이션 결과를 통해 분석한 자료의 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] Q. An, J. Liu, Z. Peng, L. Sun, and L. Sun, "Dual-space vector control of open-end winding permanent magnet synchronous motor drive fed by dual inverter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 31, no. 12, pp. 8329-8342, Dec. 2016.
- [2] A. K. Sadigh, V. Dargahi, and K. A. Corzine, "Analytical determination of conduction and switching power losses in flying-capacitor-based active neutral-point-clamped multilevel converter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 31, no. 8, pp. 5473-5494, Aug. 2016.
- [3] L. Zhang, R. Zhao, P. Ju, C. Ji, Y. Zou, Y. Ming, and Y. Xing, "A modified DPWM with neutral point voltage balance capability for three-phase vienna rectifiers," IEEE Trans. Power Electron., vol. 36, no. 1, pp. 263-273, Jan. 2021.
- [4] H. W. Lee, S. J. Jang, and K. B. Lee, "Advanced DPWM method for switching loss reduction in isolated dc type dual inverter with open-end winding IPMSM," in IEEE Access, vol. 11, pp. 2700-2710, 2023.
- [5] S. M. Kim, J. S. Lee, and K. B. Lee, "A modified level-shifted PWM strategy for fault-tolerant cascaded multilevel inverters with improved power distribution," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 11, pp. 7264-7274, Nov. 2016.