

3상 인버터의 역률을 고려한 불연속 펄스 폭 변조 기법

서지은, 김한빛, 김도현, 이준석
단국대학교

Discontinuous PWM method Considering Power Factor of Three-Phase Inverter

Ji-Eun Seo, Han-Vit Kim, Do-Hyeon Kim, June-Seok Lee
Dankook University

ABSTRACT

본 논문은 3상 인버터의 역률을 고려한 불연속 펄스 폭 변조(Discontinuous PWM, DPWM) 기법을 제안한다. 단위 역률에서 동작하는 인버터는 스위칭 손실을 최소화하기 위해 상전류의 크기가 최대인 구간에서 불연속 변조 구간이 설정된다. 그러나 단위 역률이 아닌 경우 상전압과 상전류 간 위상이 존재하기 때문에 인버터 손실 최소화를 위해서 불연속 변조 구간의 재설정이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 3상 인버터의 손실 최소화를 위해 역률에 따라 불연속 변조 구간이 변동하는 불연속 펄스 폭 변조 기법을 제안한다. 제안하는 방법은 전 역률 별 불연속 변조 구간에서 상전류의 평균값을 도출하고, 이를 기준으로 스위칭 손실과 전도 손실의 합이 최소가 되는 불연속 변조 구간을 선정함으로써 모든 역률에서 인버터의 손실을 최소화한다. 제안하는 방법의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서론

에너지 저장 시스템(Energy Storage System, ESS)과 정지형 동기 보상기(Static Synchronous Compensator, STATCOM)는 무효 전력을 제어하여 계통의 불안정성 문제에 대응할 수 있는 시스템이다. 이러한 대전력 시스템들은 대용량 IGBT 기반의 인버터를 사용하기 때문에 스위칭 손실 특성이 악화되는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 특정 구간 동안 스위칭을 하지 않는 불연속 펄스 폭 변조 기법(Discontinuous PWM, DPWM)이 사용된다. 하지만 전류와 전압 간의 위상 차가 발생하면 전류의 크기가 최대인 구간에서 불연속 변조 구간이 설정되지 않아 손실 저감을 극대화할 수 없다. 따라서, 전류 위상의 변화를 고려하는 DPWM이 연구되었다. 그러나, 해당 기법은 일정 역률과 범주를 벗어나면 효율이 낮아지기 때문에 ESS와 STATCOM과 같이 낮은 역률에서 작동할 수 있는 시스템에 적용하는 데에 한계가 있다.

본 논문에서는 3상 인버터의 손실을 최소화하기 위해 역률을 고려하여 불연속 변조 구간을 설정하는 DPWM을 제안한다. R-L 부하를 갖는 3상 인버터를 적용하여 전 범위의 역률을 모의하였다. 또한, 전체 손실 저감을 위해 전도 손실과 스위칭 손실을 모두 고려하였고, 상전류 크기를 기준으로 최적의 DPWM 기법을 선정하였다.

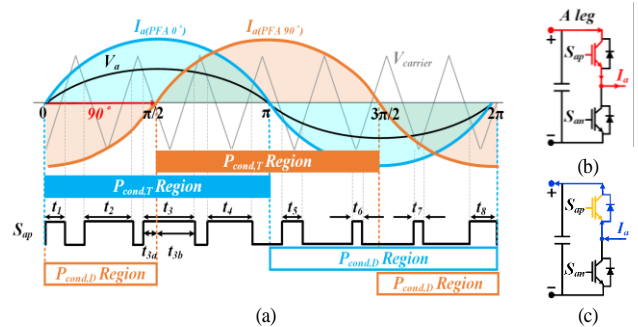


그림1 역률에 따른 전도 손실 발생 구간, 전류 경로 (a) 전도 손실 발생 시간, (b) 상단 트랜지스터, (c) 상단 다이오드.
Fig.1 Conduction losses region based on power factor, Current path (a)Conduction losses duration, (b) Upper transistor, (c) Upper diode.

2. 3상 인버터의 역률을 고려한 불연속 변조

2.1 역률을 고려한 DPWM의 필요성

IGBT의 평균 전도 손실($P_{cond,T}$, $P_{cond,D}$)과 스위칭 손실($P_{sw,T}$, $P_{sw,D}$)은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} P_{cond,T} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} D(\theta) \cdot (R_{CE} \cdot I^2(\theta - \phi) + V_{CE0} \cdot |I(\theta - \phi)|) d\theta \\ P_{cond,D} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} D(\theta) \cdot (R_F \cdot I^2(\theta - \phi) + V_{F0} \cdot |I(\theta - \phi)|) d\theta \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} P_{sw,T} = \frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} (E_{on,k} (I(\theta - \phi)) + E_{off,k} (I(\theta - \phi))) \\ P_{sw,D} = \frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} (E_{rr,k} (I(\theta - \phi))) \end{cases}, \quad (2)$$

식 (1), 식 (2)의 θ 는 상전압의 위상각이며 ϕ 는 상전압과 상전류의 위상차를 나타낸다. $D(\theta)$ 는 Duty-Cycle 함수, V_{CE0} , R_{CE} 는 트랜지스터의 문턱전압과 도통 저항, V_{F0} , R_F 는 다이오드의 문턱전압과 도통저항을 의미한다. 식 (2)의 E_{on} , E_{off} , E_{rr} 는 각각 트랜지스터의 Turn-on/off 시 발생하는 손실과 다이오드의 역회복 손실을 의미하며, N_s 는 발생한 스위칭 이벤트 수를 의미한다.

식 (1), 식 (2)로부터 전도 손실과 스위칭 손실이 상전류 ($I(\theta - \phi)$)에 의해 결정된다. 그러나, 그림 1에서 기본과 한 주기 동안 평균 전도 손실이 역률과 무관하게 일정함을 확인할 수 있다. 상전류와 상전압이 동상 ($I_{a,PFA0}$)에서 위상차가 90° 까지 증가할 때 ($I_{a,PFA90}$), 상전류가 그림 1(b)의 경로를 따라 흐르는 시간 ($t_{3b} \sim t_6$)이 감소하여 $P_{cond,T}$ 가 감소한다. 하지만, 그림 1(c)의 경로로 흐르는 시간 ($t_7 \sim t_8$, $t_1 \sim t_2$)이

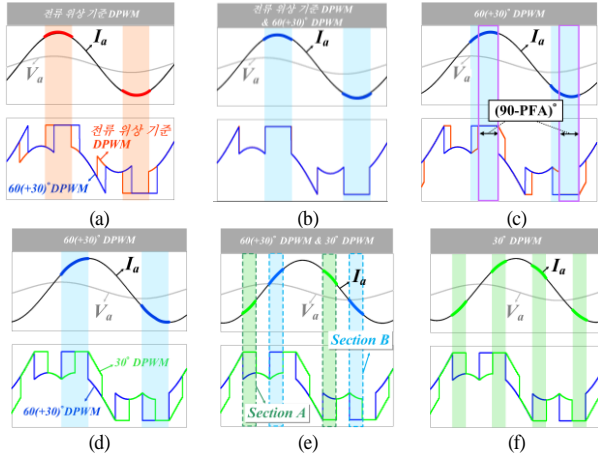


그림2 역률 별 전류의 크기를 고려한 DPWM (a) 10° PFA, (b) 30° PFA, (c) 45° PFA, (d) 60° PFA (e) 75° PFA, (f) 85° PFA.

Fig.2 DPWM considering current magnitude by power factor (a) 10° PFA, (b) 30° PFA, (c) 45° PFA, (d) 60° PFA (e) 75° PFA, (f) 85° PFA.

증가하여 $P_{cond,D}$ 는 증가한다. 따라서, 식 (1)에 근거하여 V_{CE0} 와 V_{F0} 의 편차, R_{CE} 와 R_F 의 편차가 매우 작은 경우, $P_{cond,D}$ 와 $P_{cond,T}$ 를 합한 총 전도 손실은 역률과 무관하게 일정하다. 그 결과, 인버터 총 손실 저감을 위해서는 스위칭 손실의 저감이 필요하다.

2.2 제안하는 불연속 변조 기법

그림 2는 불연속 변조 구간에서의 평균 전류 크기에 따라 최소 손실을 위한 DPWM이 전환됨을 나타낸다. 10° 역률각(Power Factor Angle, PFA) 조건인 그림 2(a)에서, 전류 위상 기준 DPWM이 60(+30)° DPWM보다 상전류의 크기가 큰 구간에서의 불연속 변조 구간이 늘어난다. 30° 역률각 조건인 그림 2(b)에서, 두 DPWM의 전압 지령이 같아져 불연속 변조 구간에서의 평균 전류가 같아진다. 45° 역률각 조건인 그림 2(c)는 전류 위상 기준 DPWM 적용 시, 전압 변조 범위의 한계로 인해 상전류의 크기가 최대인 구간에서의 불연속 변조 구간이 감소함을 보여준다. 따라서, 역률각이 30°를 초과하는 경우에는 60(+30)° DPWM을 적용하여 효과적인 손실 저감이 가능하다. 식 (3)과 (4)는 각각 30° DPWM과 60(+30)° DPWM의 불연속 변조 구간에서의 평균 전류를 나타낸다.

$$I_{avg,A} = \frac{6}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+n\pi}^{\frac{\pi}{3}+n\pi} I_{mag} \cdot \sin(\theta - \phi) d\theta, \quad (3)$$

$$I_{avg,B} = \frac{6}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}+n\pi}^{\frac{2\pi}{3}+n\pi} I_{mag} \cdot \sin(\theta - \phi) d\theta, \quad (4)$$

이때, 식 (3)과 식 (4)의 I_{mag} 는 상전류의 크기이고 A, B는 그림 2(e)의 A, B와 동일하며, 각각 30° DPWM과 60(+30)° DPWM의 불연속 변조 구간을 의미한다.

$$\frac{6}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+n\pi}^{\frac{\pi}{3}+n\pi} I_{mag} \cdot \sin(\theta - \phi) d\theta = \frac{6}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}+n\pi}^{\frac{2\pi}{3}+n\pi} I_{mag} \cdot \sin(\theta - \phi) d\theta, \quad (5)$$

Section A Section B

식 (5)에서 A와 B구간 동안의 평균 전류가 같으면 발생하는 스위칭 손실이 같고, 이 때 ϕ 는 75°이다. 하지만, 그림 2(f)와 같이 ϕ 가 75°를 초과하는 경우, A에서의 평균 전류 크기가 B보다 증가한다. 따라서, 해당 경우에는 30° DPWM을 적용해야 스위칭 손실을 효과적으로 저감할 수 있다.

표 1 시뮬레이션 조건.

Table 1 Condition for simulation.

파라미터	값	파라미터	값
정격전류	1400[A]	스위칭 주파수	10[kHz]
직류단 전압	900[V]	기본파 주파수	60[Hz]
부하저항	0.022411[Ω]	부하인덕턴스	0.679497[mH]

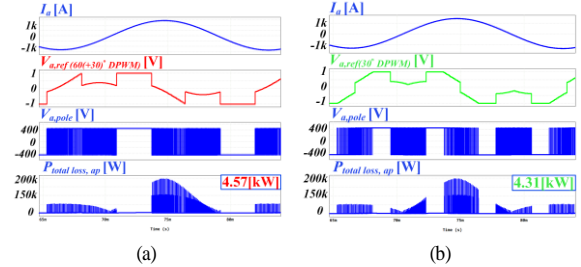


그림3 시뮬레이션 결과 (a) 60(+30)° DPWM, (b) 30° DPWM.

Fig.3 Simulation Results (a) 60(+30)° DPWM, (b) 30° DPWM.

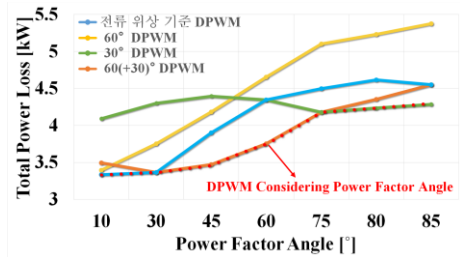


그림4 4개의 DPWM 적용 시 역률에 따른 총 손실 경향.

Fig.4 Total Loss Trends According to Power Factor for Four DPWM.

3. 시뮬레이션

제안하는 기법의 타당성을 검증하기 위한 PSIM 시뮬레이션은 역률각이 85°인 경우를 모의하였으며, 표 1의 조건에 따라 R-L 부하 Open-loop 제어를 수행하였다. 그림 3(a)와 그림 3(b)에서, 60(+30)° DPWM 적용 시보다 30° DPWM 적용했을 때 전체 손실이 284W 감소하였다. 또한, R-L 부하를 갖는 3상 인버터의 전체 역률 조건에서 4개의 DPWM 적용 시 단일 스위치에서 발생하는 총 손실의 경향은 그림 4와 같다. 결과적으로, 3상 인버터의 역률을 고려하는 DPWM은 그림 4의 역률에 따른 최소 손실 경향을 연결한 결과로 볼 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 3상 인버터의 손실 저감을 극대화하기 위해 상전류의 위상과 크기를 고려하는 DPWM을 제안한다. 해당 기법 적용 시, 인버터의 성능 최적화를 통한 효율 개선 효과를 확보할 수 있다. 제안하는 기법의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

이 논문은 정부(교육부-산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0022075, 2024년 미래형자동차 기술융합 혁신인재양성사업)

참고 문헌

- [1] 김태형, 윤범렬, 이준희, 이준석. (2022). 유효 무효전력 분리 제어기반의 DPWM을 이용한 플라잉 커패시터 듀얼 인버터 전력 손실 저감 방법. 전기학회논문지, 71(8), 1108-1116, 10.5370/KIEE.2022.71.8.1108