

직류단 단일 전류 센서를 이용한 3상 인버터의 과변조 기법

강민찬, 김준석, 이준석
단국대학교

Overmodulation Method of Three Phase Inverter with Single DC-Link Current Sensor

Min-Chan Kang, Joon-Seok Kim, June-Seok Lee
Dankook University

ABSTRACT

본 논문에서는 직류단 단일 전류 센서를 이용한 3상 인버터의 과변조 제어 기법을 제안한다. 단일 전류 센서를 이용한 3상 인버터 제어 시 상전류 재구축이 불가능한 영역이 존재하여, 3상 전류 센서를 이용하는 3상 인버터의 과변조 기법을 적용할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 지령전압벡터가 상전류 재구축이 불가능한 영역에 존재하거나, 육각형을 벗어나는 경우 크기는 동일하며 위상 오차가 작은 전압벡터로 수정하여 전류 재구축이 가능하도록 한다. 또한, 지령전압벡터의 크기에 따라 수정되는 전압벡터의 위상이 스위칭 주기마다 계산되므로 순시적으로 지령전압벡터의 수정이 가능하다. 본 논문의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서론

단일 전류 센서를 통해 상전류를 재구축 하기 위해선 유효전압벡터가 인가되는 최소한의 시간이 필요하기 때문에 전류를 측정할 수 없는 영역, 즉 데드 밴드가 나타난다. 데드 밴드에서는 PWM Shift 방법을 이용함으로써 전류 측정이 가능하다^[1]. 하지만, 여전히 상전류 재구축이 불가능한 영역이 존재하기 때문에 사용 가능한 전압의 크기가 제한된다. 따라서 상전류 재구축이 불가능한 영역을 피하여 전압을 출력하기 위해 과변조 제어 기법이 제안되었다. 기존 과변조 제어 기법은 지령전압벡터의 기본파와 동일한 크기의 전압을 출력하기 위해 지령전압벡터보다 크기가 큰 고정된 전압벡터를 인가 후 크기가 작은 전압벡터를 인가하는 복잡한 과정을 거친다^[2]. 또한, 지령전압의 크기에 따라 수정되는 전압벡터의 비선형적 위상에 대한 정보를 포함한 LUT(look-up table)의 작성이 요구된다는 단점이 존재한다.

본 논문에서 제안하는 과변조 제어 기법은 지령전압벡터가 상전류 재구축이 불가능한 영역에 존재할 경우 크기는 동일하고 위상 오차가 작은 전압벡터로 수정한다. 이 경우 지령전압벡터의 크기에 따라 수정되는 전압벡터의 위상변화가 선형적이므로 기존 과변조 기법과 비교하여 LUT이 요구되지 않아 구현이 용이하다. 또한 수정되는 전압벡터의 위상이 스위칭 주기마다 계산되기 때문에 순시적인 지령전압벡터의 수정이 가능하다. 제안한 기법

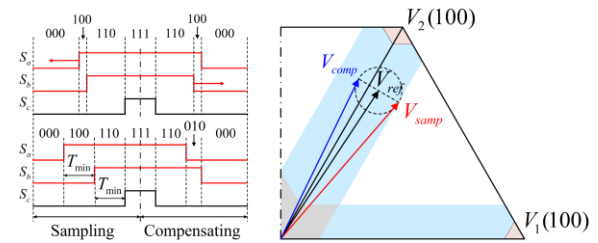


그림 1 지령전압벡터가 데드 밴드 내에 존재하는 경우 수정된 스위칭 상태

Fig.1 Modified PWM pattern when reference voltage vector is lying on dead band

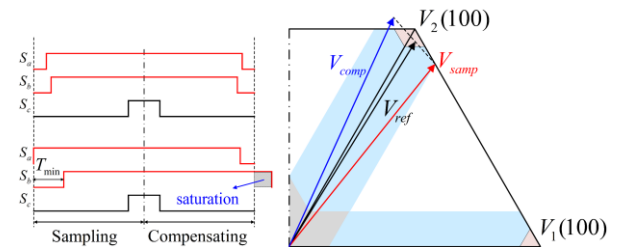


그림 2 지령전압벡터가 상전류 재구축이 불가능한 영역 내에 존재하는 경우 수정된 스위칭 상태

Fig.2 Modified PWM pattern when reference voltage vector is lying on area where phase current cannot be reconstructed

표 1 스위칭 상태에 따른 상전류

Table 1 Current in accordance with the switching state

S_a, S_b, S_c	100	110	010	011	001	101	111, 000
i_{dc}	i_a	$-i_c$	i_b	$-i_a$	i_c	$-i_b$	0

의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

2. 단일 전류 센서를 이용한 과변조 기법

2.1 단일 전류 센서의 상전류 재구축

스위칭 동작 시 직류단 단일 전류 센서를 통해 상전류를 측정하기 위해선 데드 타임(T_{dead}), 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 시간($T_{A/D}$), i_{DC} 의 정착시간(T_{set})

이 필요하다. 이러한 시간들을 합한 시간이 상전류 구축을 위한 최소 인가 시간으로 정의되며 수식 (1)과 같다.

$$T_{\min} = T_{\text{dead}} + T_{A/D} + T_{\text{set}} \quad (1)$$

PWM Shift 방법을 사용하면, 그림 1과 같이 스위칭 상태를 수정함으로써 스위칭 한 주기에 $T_{\min}$ 이 확보된 2개의 유효전압벡터가 나타나므로 표 1에 따라 두 상전류 측정이 가능하다. 또한, 3상이 평형이라는 가정을 통해 나머지 상전류 하나를 추정하여 전류 재구축이 가능하다. 그러나 그림 2와 같이 스위칭 상태를 수정했을 때 스위칭 한 주기에 보상 전압을 온전히 출력할 수 없는 경우 전류 재구축이 불가능하다.

2.2 단일 전류 센서를 이용하는 인버터의 과변조 기법

그림 3과 같이 상전류 재구축이 불가능한 영역에서, 지령전압벡터는 붉은색의 벡터로 수정되며, 수정된 전압 벡터의 각도를 δ 라 할 때, 이를 일반화하면 수식 (2)와 같다.

$$\delta = 60^\circ - \sin^{-1} \left[\frac{\sin(120^\circ)}{|V_{\text{ref}}|} \frac{2}{3} V_{\text{dc}} \left(1 - \frac{T_{\min}}{T_s} \right) \right] \quad (2)$$

또한 육각형의 벡터도를 벗어나는 지점에서, 지령전압 벡터는 푸른색의 벡터로 수정되며, 수정된 전압 벡터의 각도를 α 라 할 때, 이를 일반화하면 수식 (3)과 같다.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{V_{\text{dc}}}{2\sqrt{3}} - \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{|V_{\text{ref}}|^2 - \left(\frac{V_{\text{dc}}}{\sqrt{3}}\right)^2}}{\frac{V_{\text{dc}}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{|V_{\text{ref}}|^2 - \left(\frac{V_{\text{dc}}}{\sqrt{3}}\right)^2}} \right) \quad (3)$$

여기서 T_s 는 스위칭 주기이고, $|V_{\text{ref}}|$ 는 지령전압의 크기를 나타낸다. 위 결과는 다른 Sector에서도 동일하게 적용되어 지령전압벡터가 수정된다. 결과적으로 지령전압 벡터의 크기가 증가할수록 δ 는 증가, α 는 감소하게 되어 δ 와 α 가 같아지는 순간 출력 가능한 최대 크기의 전압을 출력하며, 인버터는 12-step 동작을 수행한다.

3. 시뮬레이션 결과

제안하는 과변조 기법을 PSIM 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증하였다. 시뮬레이션에서 $T_{\min}$ 은 $5\mu\text{s}$ 라 가정하였으며, 입력전원 V_{DC} 는 300V , 스위칭 주기 T_s 는 $100\mu\text{s}$, RL 부하의 저항은 2Ω , 인덕턴스는 1mH 를 사용하였다. 그림 4의 (a)를 보면, 지령전압벡터의 크기가 증가함에 따라 지령전압벡터가 상전류 재구축이 불가능한 영역에 존재할 경우 크기는 동일하며 위상 오차가 작은 순시적으로 수정된 전압벡터를 인가하는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 그림 4의 (b)에서 재구축된 상전류가 실제 전류와 매우 유사한 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 단일 전류 센서를 이용한 인버터의 LUT를 사용하지 않는 과변조 제어 기법을 제안하였다. 지령전압벡터가 상전류 재구축이 불가능한 영역에 존재할 경우, 크기는 동일하고 위상 오차가 작은 수정된 전

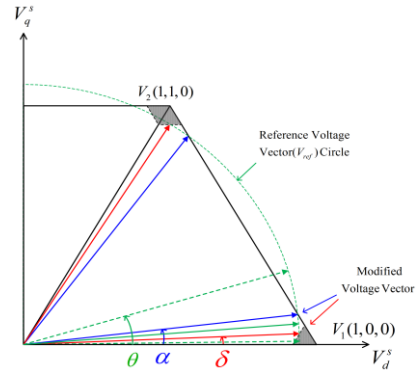
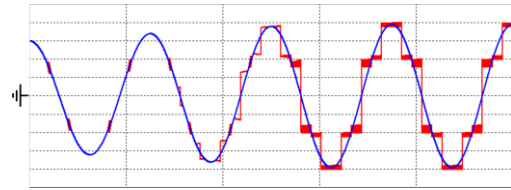
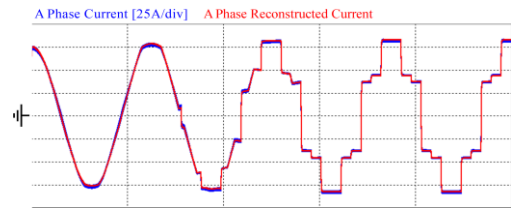


그림 3 측정 불가능한 영역에서 과변조 방법

Fig.3 Overmodulation method on unmeasurable region



(a)



(b)

그림 4 (a) a상 전압 지령과 수정된 전압 지령

(b) a상 실제 전류와 재구축한 a상 전류

Fig.4 (a) a-phase reference voltage and a modified voltage

(b) a-phase actual current and reconstructed current

압벡터를 인가함으로써 상전류 재구축이 가능하도록 하였다. 또한, 수정되는 전압벡터의 위상이 스위칭 주기에 따라 계산되므로 순시적인 지령전압벡터의 수정이 가능하도록 하였다. 제안한 기법을 시뮬레이션에 적용하여 타당성을 검증하였다.

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0017120, 2023년 산업혁신인재성장지원사업)

참 고 문 헌

- [1] Y. Gu, F. Ni, D. Yang and H. Liu, "Switching State Phase Shift Method for Three-Phase-Current Reconstruction With a Single DC-Link Current Sensor," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 11, pp. 5186-5194, Nov. 2011
- [2] B. Jung, T. Lee and K. Nam, "Overmodulation Strategy for Voltage Source Inverter With a Single DC-Link Current Sensor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 58, no. 1, pp. 531-540, Jan.-Feb. 2022