

직류단 1-선트 저항이 적용된 3상 인버터에서 전류 재구축 및 오프셋 PWM 기법

이원희, 정부문, 백현준, 이학준
삼성전자 생활가전사업부

A current construction and offset voltage PWM method for 3-phase inverter applied DC link 1-shunt resistor

Wonhee Lee, Bumun Jung, Hyunjun Baek, Hak-Jun Lee
Samsung Electronics

ABSTRACT

본 논문은 직류단 1-선트 저항이 적용된 3상 인버터의 PWM 구현 시 전류 측정 불가 영역에서 전류 센싱을 위한 전압 보상 기법을 제안한다. 제안하는 전압 보상 기법은 최소 전압 가변 기법을 기반으로 전압 측정 벡터와 보상 벡터를 간단히 계산할 수 있고 기존 기법이 사용 불가능한 영역까지 적용하여 저전압 출력 영역에서도 동일한 기법으로 모터를 구동 할 수 있다. 본 논문은 시뮬레이션을 통해 성능을 검증한다.

1. 서론

3상 모터를 구동하기 위해 2개 또는 3개의 상 전류 센서를 사용하는 3상 인버터와 달리 직류단 1-선트 저항이 적용된 인버터는 시스템 가격에 큰 이점이 있어 비용이 중요한 시스템에서 많이 사용되고 있다. 하지만 한 주기에 하나의 센서로 2상의 전류를 측정해야 함으로 각기 다른 시점에서 전류를 샘플링하여야 한다. 이 때에 데드 타임, 기생 성분, AD 변환 시간 등의 영향으로 측정을 위한 최소한 유효 전압 벡터가 요구 되고 유효 전압 벡터를 충족하지 못하는 측정 불가 영역이 존재하게 된다. 따라서 전류 측정 불가 영역에서도 사용할 수 있도록 보상하는 방법들이 연구 되고 있다[1], [2]. 본 논문에서는 직류단 1-선트 저항 전류 센서가 적용된 3상 인버터에서 동기 모터 제어를 위해 PWM 구현 시 전압 지령 간의 차이를 이용하여 측정 불가 영역을 구분하고 구분된 영역 기준으로 측정 전압 벡터와 보상 전압 벡터를 쉽게 얻을 수 있는 방법을 제안한다.

2. 본론

2.1 최소 전압 가변 기법 기반 제안 전류 재구축 기법

그림 1은 섹터1의 전류 측정 불가 영역에서 전류 지령 벡터가 존재 할 시 전류 측정 벡터와 이에 따른 전압 보상 벡터를 2가지 영역으로 구분하여 보여 준다. 그림 1 (a)에서 붉은색 점선과 같이 전류 측정 불가 영역에 수직으로 적용하여 붉은색 실선을 전류 측정 벡터로 사용하면 전압 지령 변화를 최소가 된다. 이에 대응 하기 위해 전압 보상 벡터는 푸른색 점선으로 이동하여 결정이 된다. 이러한 수직 보상은 그림 1에서 보라색 영역에 해당된다. 이와 달리 그림 1의 (b)는 녹색 영역 전체가 수직으로 보상하여도 여전히 전류 측정 불가 영역 내이다. 이 때에 전압 변화가 최소가 되면서 전류 측정 영역이 되려면 두 보라색 영역이 만나는 꼭지점으로 전류 측정 벡터가

고정이 된다. 마지막으로 그림 1의 붉은색 영역은 파변조영역으로 본 논문에서 다루지 않는다.

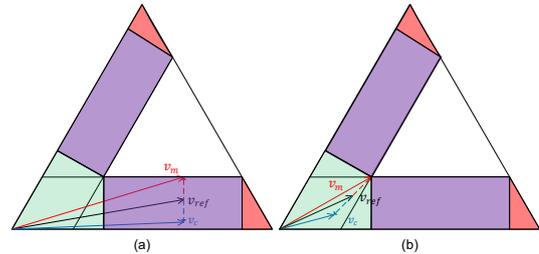


그림 1. 섹터 1의 전류 측정 불가 영역에서 다른 전류 측정 벡터와 전압 보상 벡터

Fig. 2. Measure and compensation voltage vector in unmeasurable area of sector 1

제안하는 방식은 상전압 지령을 이용하여 섹터 내의 벡터의 위치를 판별한다. 이때 측정에 필요한 최소 전압은 수식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{lim} = \frac{T_{min}}{T_s} v_{dc} \quad (1)$$

다음으로 제안하는 방식으로 영역별 조건 구하기 위해서는 각 섹터 별 최대 상전압 v_{max} , 최소 상전압 v_{min} , 그리고 그 중간 상전압 v_{mid} 와, 수식 (2)와 같이 정의한 각 상전압간의 차이 v_{diff1} , v_{diff2} 를 이용한다.

$$v_{diff1} = v_{max} - v_{mid}, \quad v_{diff2} = v_{mid} - v_{min} \quad (2)$$

섹터를 구성하는 두 벡터를 고려하여 표 1과 같이 각 섹터별 전압을 얻을 수 있다.

표 1. 각 섹터 별 v_{diff1} 과 v_{diff2}
Table. 1 v_{diff1} and v_{diff2} of each sector

섹터	v_{max}	v_{mid}	v_{min}	v_{diff1}	v_{diff2}
1	v_a	v_b	v_c	$v_a - v_b$	$v_b - v_c$
2	v_b	v_a	v_c	$v_b - v_a$	$v_a - v_c$
3	v_b	v_c	v_a	$v_b - v_c$	$v_c - v_a$
4	v_c	v_b	v_a	$v_c - v_b$	$v_b - v_a$
5	v_c	v_a	v_b	$v_c - v_a$	$v_a - v_b$
6	v_a	v_c	v_b	$v_a - v_c$	$v_c - v_b$

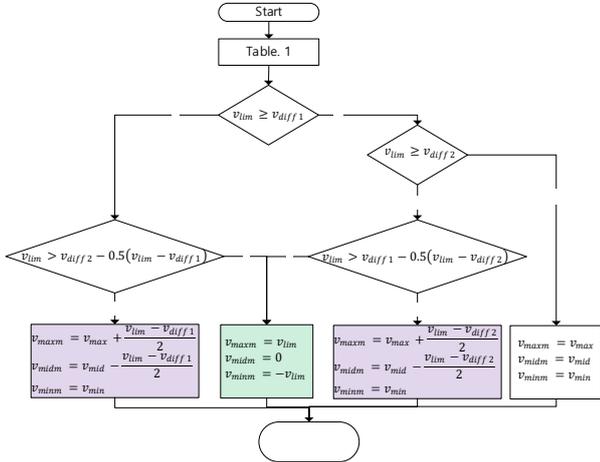


그림 3 전류 재구축을 위한 제안하는 전압 벡터 계산 알고리즘의 플로우 차트
Fig. 2 Flowchart of a proposed voltage vector calculation algorithm for current reconstruction

그림 2는 표 1을 이용하여 제안하는 방법을 표현한 플로우 차트이다. 전류 측정을 위해 충분한 시간을 확보하기 위해서는 각 벡터의 유효 시간이 일정 이상 확보가 되어야 하므로 수식 (3), (4)를 모두 만족하지 않아야 하고 이 경우 전압 지령 벡터를 변경 없이 그대로 사용 할 수 있다.

$$v_{fd} \geq v_{diff1} \quad (3)$$

$$v_{fd} \geq v_{diff2} \quad (4)$$

만약 (3)의 조건을 만족한다면 색터1의 기준으로 그림 1의 위쪽 보라색 영역+녹색 영역, (4)를 만족한다면 아래쪽 보라색 영역+녹색 영역에 해당한다. 수식 (3)을 만족 시 보라색 영역과 녹색 영역을 구분하기 위해서는 수식 (5)를 조건으로 판단 할 수 있다.

$$v_{fd} \geq v_{diff2} - \frac{v_{fd} - v_{diff1}}{2} \quad (5)$$

수식(5)를 만족 시 녹색 영역에 해당하여 측정 전압 벡터는 수식 (6)과 같이 된다.

$$v_{maxm} = v_{fd}, v_{midm} = 0, v_{minm} = -v_{fd} \quad (6)$$

$v_{maxm}, v_{midm}, v_{minm}$ 각각 최대 상전압, 중간 상전압, 전압, 최소 상전압의 측정 전압을 의미한다. 수식(5)를 만족하지 못할 시 보라색 영역에 해당하여 측정 전압 벡터는 수식 (7)과 같이 적용하면 전압 변화가 최소가 된다.

$$v_{maxm} = v_{max} + \frac{v_{fd} - v_{diff2}}{2}, v_{midm} = v_{max} - \frac{v_{fd} - v_{diff2}}{2}, v_{minm} = v_{min} \quad (7)$$

(4)의 조건을 만족 할 시에는 보라색 영역과 녹색 영역을 판단하는 기준은 수식 (8)과 같이 달라진다.

$$v_{fd} \geq v_{diff1} - \frac{v_{fd} - v_{diff2}}{2} \quad (8)$$

이 경우에도 수식 (8)을 만족 시 녹색 영역이 되고 측정 전압은 수식 (6)과 동일하다. 하지만 조건을 만족하지 못할 시 측정 전압은 수식 (9)와 같이 사용한다.

$$v_{maxm} = v_{max} + \frac{v_{fd} - v_{diff2}}{2}, v_{midm} = v_{max} - \frac{v_{fd} - v_{diff2}}{2}, v_{minm} = v_{min} \quad (9)$$

수식 (3), (4)를 동시에 만족하는 경우는 그림 2의 방법으로 하면 녹색 영역 안에 포함되어서 고려하지 않아도 된다. 결정된 측정 전압 벡터를 이용하여 보상 전압 벡터는 수식 (10)과 같이 얻을 수 있다.

$$v_{xc} = 2v_x - v_{xm} \quad (10)$$

v_x 는 $v_{max}, v_{mid}, v_{min}$ 중 하나이고, v_{xm} 은 v_x 에 해당하는 측정

전압 벡터, v_{xc} 는 v_x 에 해당하는 보상 전압 벡터이다. 이렇게 결정된 측정 전압 벡터와 보상 전압 벡터를 PWM 시 반 주기씩 적용하여 전류 측정시간을 확보 할 수 있다.

2.2 시뮬레이션 결과

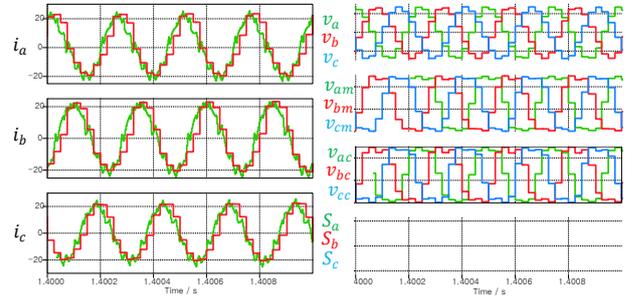


그림 4 (a)실제 상전류(녹색선)와 측정 상전류(붉은색선), (b) 전압 지령에 따른 측정 전압과 보상 전압 스위칭 상태
Fig. 3 (a) Actual phase currents (green line) and sensing phase currents (red line), (b) v_{xm}, v_{xc}, S_x of v_x

제안하는 방법을 검증하기 위해 4극 표면부착형 영구자석 동기모터로 PLECS 시뮬레이션을 수행하였다. 배터리 전압은 25V, 스위칭 주파수는 40kHz를 적용하였다. 그림 3의 (a)는 12,000RPM 동작 중 실제 상전류와 센싱된 상전류를 비교하고 있다. 그림 3의 (b)는 그때의 상전압 지령과 제안된 알고리즘으로 계산된 측정 상전압, 보상 상전압과 최종 PWM 신호를 보여 준다. 두 상전압 지령간의 크기가 차이가 줄어들어 수식 (3), (4)의 조건을 만족하면 전류 측정 불가 영역임을 판단하여 v_m 에서 부족한 상전압을 확보 하고 이에 해당하여 v_c 를 반대로 보상하는 모습을 볼 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 직류단 1-선트 저항 전류 센서를 사용하는 3상 인버터에서 전류 측정 불가 영역에서 측정 전류를 재구축 하기 위해 측정 전압 벡터와 보상전압 벡터를 간략히 구하는 알고리즘을 제안하였다. PWM 구현을 위해 얻은 색터를 기준으로 최대, 중간, 최소 상전압 지령과 그 차이를 이용하여 색터내 전압 벡터의 위치를 추정하고 전류 측정 불가 영역일 시 전압 변화를 최소화하는 측정 전압 벡터를 구하고 이에 대응하도록 보상 전압 벡터를 결정하여 한 PWM 주기에 구현을 하였다. 제안하는 알고리즘은 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] H. Kim and T. M. Jahns, " Phase Current Reconstruction for AC Motor Drives Using a DC Link Single Current Sensor and Measurement Voltage Vectors," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 21, no. 5, pp. 1413-1419, Sep. 2006.
- [2] J. Ha, "Voltage Injection Method for Three-Phase Current Reconstruction in PWM Inverters Using a Single Sensor," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 24, no. 3, pp. 767-775, Mar. 2009.