

동기좌표계 전압주입을 이용한 3선트 PWM 인버터의 전류 복원 영역 확장 기법

최동민, 조병극*, 조영훈
 건국대학교 전력전자연구소, LS산전*

Expansion method of current reconstruction area using voltage injection in synchronous coordinates system

Dong Min Choi, Byung Geuk Cho*, Younghoon Cho
 Power Electronics Lab. Konkuk Univ., LSIS*

ABSTRACT

When controlling a three phase inverter that drives AC motor, it is important to know the value of the current. In this case, shunt sensing methods are known as low cost and useful performance. However, for certain switching condition, immeasurable areas exist and it is necessary to reconstruct the current in the area. This paper proposes a reconstruction method using voltage injection in synchronous coordinates system at the area, and verify the validity of the method through simulation.

1. 서 론

PWM 인버터는 산업에서 가장 많이 사용되는 기기중 하나이다. 그 중 3상 PWM 인버터의 경우 교류 모터를 구동하는데 주로 사용된다. 이때, 모터를 순시적으로 토크 제어하는 경우에 있어서, 모터에 흐르는 전류를 파악하는 것이 상당히 중요하다.^[1] 전류를 측정하는 방법으로 홀센서나 전력전자 소자의 파일렛 센서 등 여러 가지 방식들이 존재하게 된다. 이러한 방법들 중 저렴한 가격으로 전류를 측정하는 3선트 측정 방법이 있다.^{[2][3]} 이 방법은 인버터 스위치 레그 중 하단 스위치의 아래에 작은 값을 갖는 저항을 삽입하고, 하단 스위치가 도통하는 경우에 흐르는 전압을 측정해 상전류를 구하는 방식이다.

본 논문은 3선트 저항을 이용한 전류복원에서 동기좌표계를 이용한 전압 주입 방법을 제안함으로써 전압의 영역에 관계없이 같은 주입식을 이용하여 전류 복원 영역을 확장하였으며, 모의실험을 통해 제안한 전압 주입 기법을 검증했다.

2. 전류 측정 불가영역과 복원방법

3선트 PWM 인버터의 전류 복원은 각 스위치의 도통 상태에 따라 복원 가능한 전류가 다르게 나타난다. 표 1은 상단 스위치가 도통되었을 경우를 1, 하단이 도통되었을 경우를 0으로 놓고 각 상태에 따른 측정 가능한 전류를 나타내었다. 그러나 기생 커패시터에 의한 공진효과나 데드타임 등의 영향으로 인해 'Tmin' 시간동안 정확한 전류를 복원할 수 없게 된다. 그림 1은 공간벡터에서 복원불가영역을 표시한 것이다. 이 영역 위에 지령 전압벡터가 위치하게 되면 선트 저항에서 전류를 측정할 수 있는 시간이 확보되지 못하여 정확한 전압 값을 파악할

수 없다. 따라서 전압 주입을 통하여 전압지령을 복원가능영역에 위치시켜야 한다.

표 1 스위칭 상태에 따른 측정 가능 전류
 Table 1 measureable current for switching condition

스위칭 상태 (Sa, Sb, Sc)	측정가능전류 (ia, ib, ic)	스위칭 상태 (Sa, Sb, Sc)	측정가능전류 (ia, ib, ic)
(1,0,0)	(x, ib, ic)	(0,0,1)	(ia, ib, x)
(1,1,0)	(x, x, ic)	(1,0,1)	(x, ib, x)
(0,1,0)	(ia, x, ic)	(0,0,0)	(ia, ib, ic)
(0,1,1)	(ia, x, x)	(1,1,1)	(x, x, x)

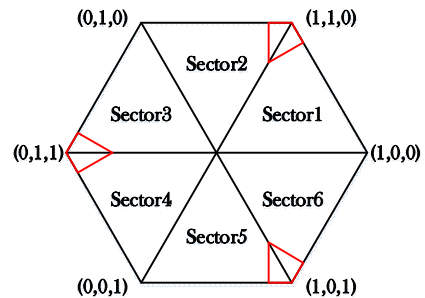


그림 1 공간벡터상의 전류 측정불가영역
 Fig. 1 Immeasurable area on space vector

2.1 제안하는 전압 주입 방법

그림 2 (a)는 복원가능영역에 전압 지령을 위치시키기 위한 최소 주입 전압의 크기를 공간벡터에 표현한 것이다. 여기서 'α'는 전압벡터가 회전할 때, 복원불가영역으로 들어가기 직전의 벡터와 복원 불가영역에 들어간 벡터 사이의 각도이고, 'β'는 복원불가영역에 들어간 벡터와 복원불가영역 경계 사이가 이루는 각도이고, 마지막으로 'θ'는 각 sector내에서 전압 벡터가 회전한 각도이다. 이로부터 주입되는 전압식은 (2)와 같다.

$$\beta = \theta - \frac{\pi}{6} \quad (1)$$

$$V_{e_j} = V_{ref}(\sin(\beta) - \sin(\beta - \alpha)) \quad (2)$$

위와 같이 구해진 주입전압의 크기는 동기좌표계에서 전압벡터가 d축과 이루는 각도에 따라 d축과 q축으로 나뉘어 주입된다. 간단한 식 전개를 위해 전압벡터와 d축이 일치되었을 경우의 전압 주입 값은 그림 2의 (b)와 같이 표현 될 수 있다. 이 그림에서 측정불가영역과 지령 전압 사이의 각은 'β'이고, 주입되는 전압과 d축이 이루는 각도가 '-π/2 - β' 이 된다. 여기서

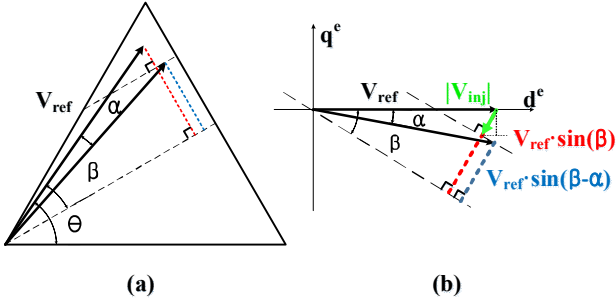


그림 2 (a)직교좌표계에서 주입전압, (b)동기좌표계에서 주입전압
Fig. 2 (a)Injection voltage on stationary coordinate system
(b)Injection voltage on synchronous coordinate system

d축에 주입되는 전압의 값은 주입되는 지령 전압의 크기에 'cos(-π/2-β)'를 곱한 값이고, q축에 주입되는 전압의 값은 지령 전압의 크기에 'sin(-π/2-β)'를 곱한 값이 나오게 된다. 이때, 주입식은 다음과 같이 표현된다.

$$V_{d \in j} = V_{ref}(\sin(\beta) - \sin(\beta - \alpha))\cos(-\pi/2 - \beta) \quad (3)$$

$$V_{q \in j} = V_{ref}(\sin(\beta) - \sin(\beta - \alpha))\sin(-\pi/2 - \beta) \quad (4)$$

위 식을 정리하면 (5), (6)의 식으로 정리가 가능하다.

$$V_{d \in j} = -V_{ref}(\sin(\beta) - \sin(\beta - \alpha))\sin(\beta) \quad (5)$$

$$V_{q \in j} = -V_{ref}(\sin(\beta) - \sin(\beta - \alpha))\cos(\beta) \quad (6)$$

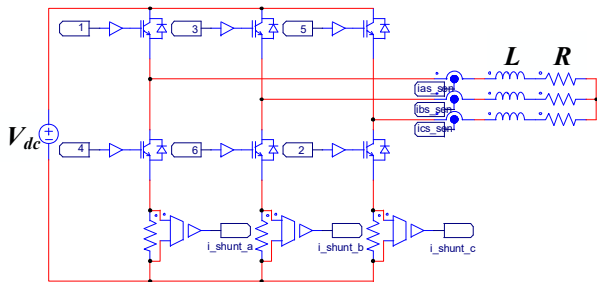
이 주입식은 전압지령이 회전하는 방향의 반대 방향으로 주입될 경우의 식이 되고, 반대로 회전방향과 같은 방향으로 주입되는 주입식은 위와 같은 유도방법을 진행하였을 경우 (5), (6)의 식에서 'α'의 부호만 바뀌게 되고, 부호의 판별은 'β'의 값이 0보다 큰 값인지 작은 값인지에 따라 결정된다. 이에 따른 최종적인 전압주입식은 다음과 같다.

$$V_{d \in j} = -V_{ref}(\sin(\beta) - \sin(\beta \mp \alpha))\sin(\beta) \quad (7)$$

$$V_{q \in j} = -V_{ref}(\sin(\beta) - \sin(\beta \mp \alpha))\cos(\beta) \quad (8)$$

2.2 전류 복원방법의 모의실험 및 분석

앞 절에서 제안한 전압 주입의 방법을 모의실험하기 위해 그림 3과 같은 회로를 구성하였고, 3상 전동기 부하의 모델은 R L 부하로 등가화하여 진행하였다. 이때 제어기는 선트 저항을 통해 얻은 전류를 폐환하는 전류제어기를 사용하였다. 모의 실험 결과는 그림 4의 파형과 같다. 결과 파형을 살펴보면, 복원된 전류와 실제 전류가 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.



$$V_{dc} = 300[V] \quad L = 41 [mH] \quad R = 20[\Omega]$$

그림 3 R-L부하로 등가화한 모의실험 모델
Fig. 3 Equivalent simulation model with R-L load

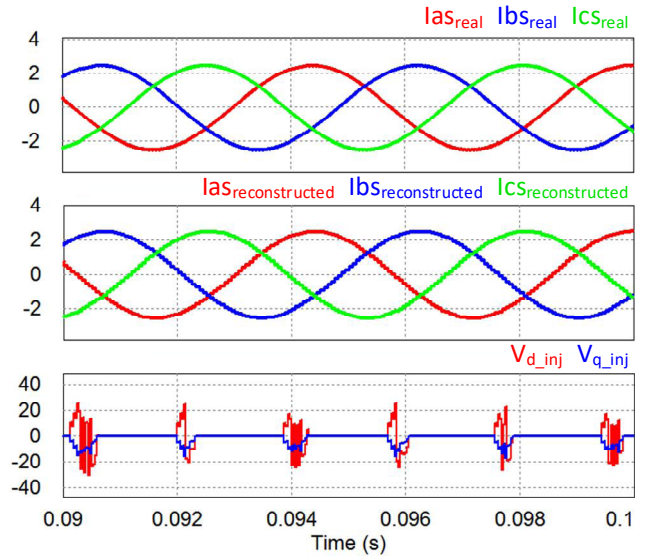


그림 4 실제 전류와 복원된 전류의 파형

Fig. 4 Wave of real current and reconstructed current

또한 전압 주입이 동기좌표계에서 이루어지기 때문에 서로 다른 위상에서 주입되는 전압이 비슷한 형태를 가지고 주입되는 것을 볼 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 복원불가영역에서 전류의 복원을 위해 벡터들 사이의 각도를 이용하여 전압 주입식을 유도하였고, 이 식을 이용하여 동기좌표계에서의 전압주입을 통해 전류복원방법을 제시하고 모의실험을 진행하였다. 이 방식의 경우 전압을 주입하는 과정에서 유효전력의 리플이 발생할 가능성이 있어 이를 최소화하기 위한 연구가 진행될 예정이다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20174030201660)

참고 문헌

- [1] S. Chakrabarti, T.M. Jahns, and R. D. Lorenz, "A current reconstruction algorithm for three phase inverters using integrated current sensors in the low side switches," Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting, pp. 925-932 Vol. 2, Oct. 2003.
- [2] Byung Geuk Cho, Jung Ik Ha, and Seung Ki Sul "Analysis of the Phase Current Measurement Boundary of Three Shunt Sensing PWM Inverters and an Expansion Method", Journal of Power Electronics, pp. 232-242 Vol. 13, No. 2, March 2013.
- [3] Young Hee Jang, Do Yun Kim, An Yeol Ko, Il Kuen Won, Young Real Kim, Chung Yuen Won "Three phase current reconstruction method using predictive current in three shunt sensing PWM inverter", 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia Pacific (ITEC Asia Pacific), pp. 436-440, 2016