

전기자동차 응용을 위한 양방향 전류원 인버터

최남섭
전남대학교

Bidirectional Current Source Inverter for EV Applications

Nam Sup Choi
Chonnam National University

ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차 응용을 위한 양방향 전류원 인버터를 제안한다. 본 논문에서는 회로 DQ변환에 의하여 얻어진 DC 등가회로를 바탕으로 3상 시스템의 DC 특성을 보이고 직류측 전류, 전압과 같은 변수에 대한 식을 유도한다. 본 논문에서는 시뮬레이션을 통하여 제안된 양방향 전류원 인버터가 전기자동차 응용에 적합하게 사용될 수 있음을 확인한다.

1. 서론

기존의 전기자동차용 전력변환장치는 낮은 배터리 전압(200~300 V)을 승압하기 위한 DC DC 컨버터와 고압(600 V 또는 650 V)으로 승압된 직류전압으로 구동되는 전압원 인버터로 구성된다. 이러한 구성에서 특히 전기모터의 출력이 증가할수록 높은 인버터 출력전압이 요구되는데 인버터는 전압 부스팅 기능이 없으므로 별도의 DC DC 컨버터가 요구되어 2단 전력변환이 불가피 하다. 또한 직류 입력전압을 공급하는 DC 커패시터는 전력변환장치 전체 부피의 35 % 가까이 차지하고, 무게는 전력변환장치 전체 무게의 23 % 정도를, 가격은 전력변환장치 전체가격의 25 %에 이른다. 또 엔진룸내의 전기구동 시스템은 120°까지 상승하는데 대부분의 DC 커패시터는 특히 열에 취약하고 폴리프로필렌 필름 커패시터는 105° 이상에서 특성이 급격히 저하되기도 한다^[1].

3상 전류원 PWM 인버터는 정현파형의 출력전압을 발생시킬 수 있고, 전압원 인버터가 buck 전압이득을 갖는 것과 비교하여 boost된 전압이득을 갖는다. 또, 전류원 입력전원의 특성상 단락전류제한(short current limitation) 특성을 가지므로 인버터의 보호측면에서 유리하다. 그동안 전류원 인버터는 대용량 수준에서 전동기 구동시스템에 주로 사용되어왔으나 최근에는 앞서 언급한 전류원 인버터의 고유한 장점을 살려 계통연계 시스템이나 전기자동차(electric vehicle)의 구동 컨버터로도 사용되면서 응용분야가 확대되고 있다.

본 논문에서는 전기자동차 응용을 위한 양방향 전류원 인버터를 제안한다. 본 논문에서는 시뮬레이션을 통하여 제안된 양방향 전류원 인버터의 특성을 밝히고 전기자동차의 응용에 적합함을 보인다.

2. 양방향 전류원 인버터의 동작특성

그림 1은 양방향 스위치로 구성된 3상 양방향 전류원 인버터 시스템의 회로도이다. 그림 1에서 변조지수 $M(=d\sqrt{2}/3)$ 인 인버터의 스위칭 함수를 S_a, S_b, S_c 라고 할 때 인버터의 출력전압과 입력전류는 다음과 같이 표현된다.

$$i_{oa} = S_a i_{dc}, \quad i_{ob} = S_b i_{dc}, \quad i_{oc} = S_c i_{dc} \quad (1)$$

$$v_i = S_a v_{oa} + S_b v_{ob} + S_c v_{oc} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} d \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \alpha) \\ \sin(\omega t + \alpha - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + \alpha + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3)$$

abc축상의 3상 변수 x_{abc} 를 qdo축상의 변수 x_{qdo} 로 변환시키기 위해 전원의 위상에 동기되어 회전하는 다음과 같은 변환행렬 식 $x_{qdo} = Kx_{abc}$ ($K^{-1} = K^T$)의 K 를 정의한다^[2]. 즉,

$$K = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \beta) \cos(\omega t + \beta - \frac{2}{3}\pi) \cos(\omega t + \beta + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin(\omega t + \beta) \sin(\omega t + \beta - \frac{2}{3}\pi) \sin(\omega t + \beta + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

그림 1의 시스템의 정상 상태 특성을 얻기 위하여 회로 DQ 변환된 DC 등가회로를 구하면 그림 2와 같다. $\sigma_{ac} = \omega\sqrt{LC}$, $\sigma_{ac} = \omega Cr$, $\sigma_{dc} = \omega Cr_{dc}$ 라고 정의하고 $\sigma_{ac} \ll 1$, $\sigma_{ac}\sigma_{dc} \approx 0$, $\sigma_{ac}^2 \approx 0$, $\sigma_{ac}D\sin(\theta) \approx 0$ 의 근사적인 조건하에서 인버터의 각부의 전압과 전류는 다음과 같다.

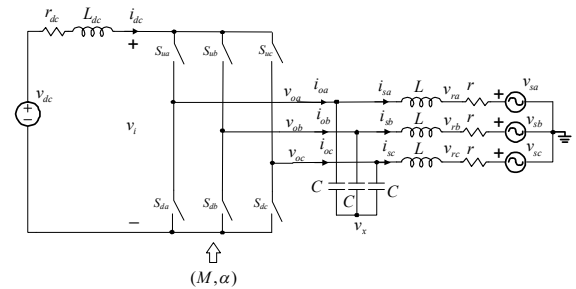


그림 1. 양방향 전류원 인버터로 구성된 3상 시스템

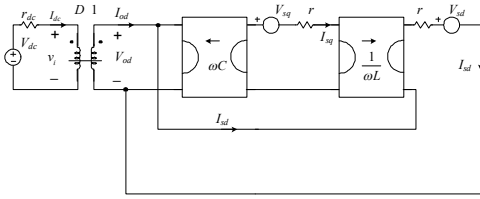


그림 2 DC 등가회로

$$I_{sd} = \frac{\sigma_{dc} V_{sq} - D^2 V_{sd} + D V_{dc}}{r_{dc} + r D^2}, \quad I_{sq} = \frac{-\sigma_{dc} V_{sd} - \sigma_{ac} D V_{dc}}{r_{dc} + r D^2} \quad (5)$$

$$V_i = \frac{r_{dc} D V_{sd} + r D^2 V_{dc}}{r_{dc} + r D^2}, \quad I_{dc} = \frac{-D V_{sd} + V_{dc}}{r_{dc} + r D^2} \quad (6)$$

변조비수 D 의 최대값 D_{max} 는 선형 영역에서의 동작만을 고려했을 때 $M_{max} = 1$ 이므로, $D_{max} = \sqrt{3/2} \cdot M_{max} \approx 1.225$ 이다. 그림 3은 식 (6)으로부터 얻은 것으로 인버터 제어변수 D ($= M/\sqrt{3/2}$)와 AC측 3상 전압의 위상에 대한 인버터 제어위상각 θ 에 대한 DC 전류와 인버터의 DC 측 입력전압을 나타낸다.

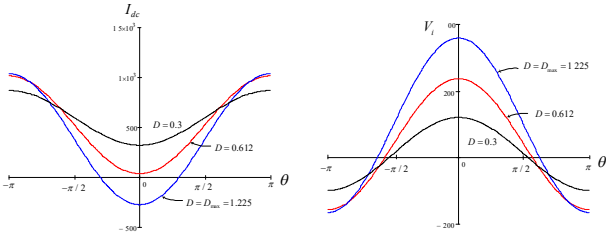


그림 3 DC 전류와 인버터의 DC 측 입력전압

3. 시뮬레이션

양방향 전류원 인버터의 동작특성을 보기 위하여 PSIM 시뮬레이션을 실시하였다^[3]. 파라미터는 다음과 같다. $V_{dc} = 250$ V, AC측 전원의 선간전압 실효값 $V_s = 380$ V, $r_{dc} = 0.4$ Ω , $r = 0.2$ Ω , $L_{dc} = 2$ mH, $L = 1$ mH, $C = 15$ μ F, 3상 AC 전원의 주파수 $f = 60$ Hz. 그림 4는 $t = 0.12$ sec인 순간 $\theta = 5.42^\circ$ 를 유지한 상태에서 M 을 0.515에서 0.556으로 step change했을 경우 직류측 전류(i_{dc}), 직류측 전압(V_i), AC측 커패시터 전압(v_{oa} , v_{ob} , v_{oc}), A상 출력 전류(i_{oa})를 나타낸다. 그림 4에서 보듯이 직류측 전류 i_{dc} 는 21 A에서 21 A로 변하는데 이러한 동작은 인버터가

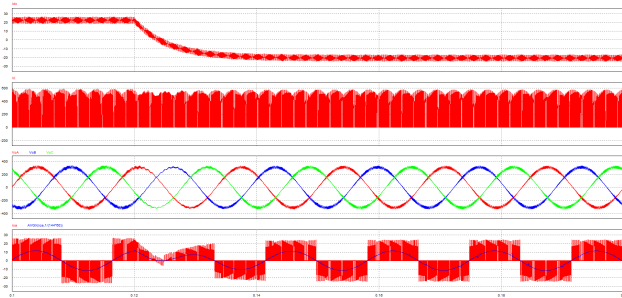


그림 4 시뮬레이션 결과; 위에서부터 직류측 전류(i_{dc}), 직류측 전압(V_i), AC측 커패시터 전압(v_{oa} , v_{ob} , v_{oc}), A상 출력 전류(i_{oa})

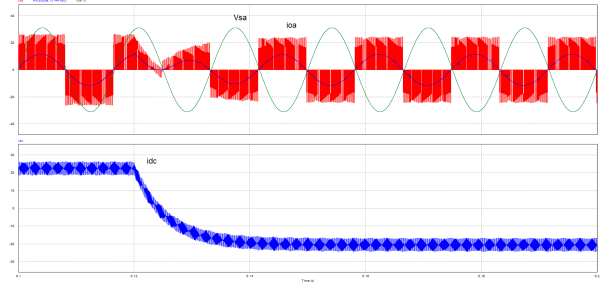


그림 5 시뮬레이션 결과; (상) A상 출력전류(i_{oa})와 i_{oa} 의 이동평균, A상 전압(v_{sa}), (하) 직류측 전류(i_{dc})

powering mode에서 회생모드 또는 충전모드로 전환함을 의미한다. 인버터가 공급하는 전력은 5 kW에서 5 kW로 전환된다. 그림 4에서 인버터 입력전압 V_i 는 거의 변동없이 유지됨을 확인할 수 있다.

그림 5에서 A상 출력전류(i_{oa})와 i_{oa} 의 이동평균, A상 전압(v_{sa})을 볼 수 있는데 M 을 0.515에서 0.556으로 step change하면 i_{oa} 전류와 v_{sa} 전압이 동상이던 것이 180° 위상차가 남을 볼 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 전기자동차 응용을 위한 양방향 전류원 인버터를 제안한다. 본 논문에서는 회로 DQ변환에 의하여 얻어진 DC 등가회로를 바탕으로 전류원 인버터를 포함하는 3상 시스템의 DC 특성을 보이고 직류측 전류, 전압과 같은 변수에 대한 식을 유도하였다. 본 논문에서는 시뮬레이션을 통하여 제안된 양방향 전류원 인버터가 전기자동차 응용에 적합하게 사용될 수 있음을 보였다.

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 결과임 (No. NRF 2013R1A1A4A01012606)

참고 문헌

- [1] Zhiqiao Wu and Gui Jia Su, "High performance permanent magnet machine drive for electric vehicle applications using a current source inverter", Conf. Record on IECON2008, pp. 2812 2817, Orlando, FL, 10 13 Nov., 2008.
- [2] C. T. Rim, D. Y. Huh and G. H. Cho, "The graphical D Q transformation of general power switching converters", IEEE IAS Annual Meeting Conference Records, pp. 940 945, 1988.
- [3] Nam Sup Choi, Kwang Woon Lee and Byung Moon Han, "A novel carrier based PWM for current source converter", Conf. Record on Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), 2012 7th International, pp. 1945 1950, Harbin, China, 2 5 June 2012.