

2-스위치 Buck-Boost 컨버터를 이용한 저가형 PAM 인버터 설계

김준형, 강현수, 이병국
 성균관대학교 정보통신공학부

Design of Cost Effective PAM Inverter using 2-Switch Buck-Boost Converter

Jun-Hyung Kim, Hyun-Soo Kang, Byoung-Kuk Lee
 School of Information & Communication Engineering Sungkyunkwan University

Abstract - 본 논문에서는, 기존의 PAM 인버터와는 달리 저 단가 구현 및 높은 성능을 낼 수 PAM 인버터 구조에 대해 고찰한다. 배터리를 전원으로 사용하는 일반적인 인버터의 경우 초기기동 및 저속운전 영역에서는 배터리 전압으로 인해 전류 및 토크 리플이 크며, 배터리 SOC의 최소치 보다 낮은 역기전력을 갖는 전동기만을 사용할 수 있다. 이를 해결하기 위해 2-스위치 Buck-Boost 컨버터와 4-스위치 인버터로 구성된 새로운 PAM 인버터 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 DC 링크 가변을 통해 역기전력이 낮은 저속운전영역에서는 감압하고 반대로 역기전력이 높은 고속운전영역에서는 승압시킬 수 있어 전류 및 토크 리플을 줄일 수 있다. 마지막으로 시뮬레이션을 통하여 제안된 시스템의 적용 가능성을 검증한다.

1. 서 론

최근에 산업계에서 사용되고 있는 전동기 드라이브 시스템은 고성능, 고 신뢰성, 경제성 등의 요구로 대부분은 PWM(Pulse Width Modulation) 방식의 인버터를 사용하고 있다. 하지만 PWM 인버터의 경우 DC 링크 전압을 항상 일정한 값으로 유지하므로 컨버터 출력 전압을 전동기 속도에 따라 가변 할 수 없다. 이런 경우 DC 링크 전압을 가변 할 수 있는 PAM (Pulse Amplitude Modulation) 인버터 시스템 보다 전류 및 토크 리플이 커지며, 특히 센서리스 운전의 경우 이로 인해 속도 리플이 발생하여 속도제어가 어렵게 된다. 또한 공작기계와 마이크로 머신 같은 정밀 제어가 요구 되는 시스템에서는 토크 리플 및 속도 리플이 큰 악 영향을 주기 때문에 인버터의 출력 전압을 제어하는데 있어 DC 링크를 가변하고 인버터로 주파수를 제어하는 PAM 인버터 시스템의 연구가 수행되고 있다.

일반적으로 사용되고 있는 PAM 인버터 시스템은 다음과 같은 방법들을 적용하고 있다. 가장 일반적인 형태로 인버터 DC 링크 앞 단을 Buck 컨버터 또는 Boost 컨버터로 구성하여 속도에 따라 DC 링크 전압의 크기를 제어 한다 [1]. 또 다른 방법으로 회로 구성은 Buck 컨버터와 동일하지만 정류기를 통해 교류 입력 전압을 직류 전압으로 변환할 때 발생하는 역률 및 고조파를 제거하기 위해 Buck 컨버터에 PFC (Power Factor Correction) 제어 방법을 적용하여 전동기의 토크 리플을 감소시키는 방법이 있다 [2]. 이와 같이 기존의 PAM 인버터 시스템은 DC 링크 앞단에 Buck 컨버터 또는 Boost 컨버터만을 사용함으로써 컨버터 출력 전압을 입력 전압 보다 강압하거나 또는 승압만 할 수 있어 넓은 범위에 적용하기에는 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 DC 링크 앞단에 Buck 컨버터와 Boost 컨버터의 두 가지 기능이 가능하고 큰 범위의 입력 전압을 시스템에 적용할 수 있는 2-스위치 Buck-Boost 컨버터로 구성하여 시스템 성능을 다양화하였다. 2-스위치 Buck-Boost 컨버터는 기존에 사용된 Buck 컨버터에 비해 파워 소자들의 증가를 가져오고 손실 및 단가 상승이 있는 반면에 부하의 전압 정격 범위가 상대적으로 넓기 때문에 부하에서 필요로 하는 전압에 따라 새로운 전력변환 시스템의 교체 없이 제안된 PAM 인버터 시스템에 적용할 수 있다. 또한 전동기를 구동하기 위한 3상 인버터를 6-스위치 인버터 대신 4-스위치 인버터로 대체함으로써 기존에 사용된 PAM 인버터 보다 전체적으로는 성능향상에 대비해서 단가를 감소시킬 수 있는 저가형 PAM 인버터 시스템을 구성하였다.

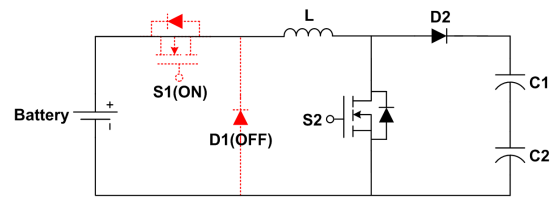
2. 본 론

2.1 2-스위치 Buck-Boost 컨버터의 구조 및 동작원리

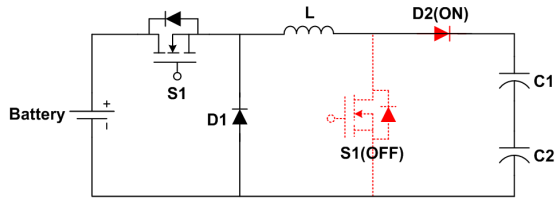
2.1.1 2-스위치 Buck-Boost 컨버터의 구조

기존의 Buck, Boost 컨버터에 스위치와 다이오드를 하나씩 추가한 형태로 구성되며, 배터리 전압이 DC 링크 전압 보다 높으면 Buck 모드로 낮으면 Boost 모드로 동작한다 [3],[4].

2.1.2 2-스위치 Buck-Boost 컨버터의 동작원리



(a) 2-스위치 Buck-Boost 컨버터 (Boost 모드)



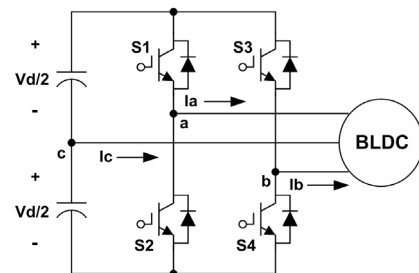
(b) 2-스위치 Buck-Boost 컨버터 (Buck 모드)

<그림 1> 2-스위치 Buck-Boost 컨버터

그림 1(a)은 Boost 모드일 때의 등가회로를 나타내고 있다. Buck 모드와 Boost 모드 각각에 대해 살펴보면 Boost 모드에서 스위치 S1은 항상 ON 상태를 유지하고 Boost 스위치 S2가 PWM 한다. 또한 이때 다이오드 D1은 역방향 바이어스 되어 OFF 된다. 반면에 그림 1(b)와 같이 Buck 모드에서는 스위치 S2는 항상 OFF로 동작하고 Buck 스위치 S1이 PWM 제어한다. 이에 따라 2-스위치 Buck-Boost 컨버터 출력은 항상 전동기의 역기전력에 비례하며, 보다 크게 제어된다.

2.2 4-스위치 인버터의 구조

그림 2는 일반적인 3상 BLDC 전동기 드라이브 시스템을 구동하기 위한 4-스위치 BLDC 전동기를 나타내고 있다 [5].

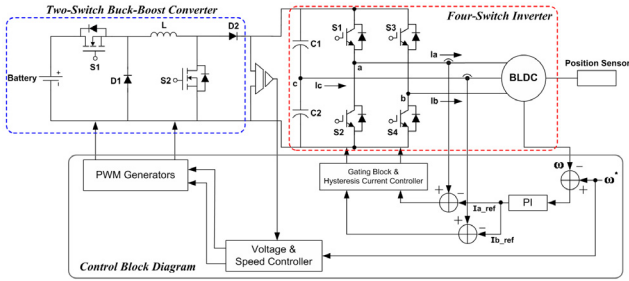


<그림 2> 3상 BLDC 전동기 구동을 위한 4-스위치 인버터

BLDC 전동기는 반주기마다 120도의 전도 구간과 60도의 비전도 구간을 가지며, 사다리꼴 형태의 역기전력이 수평으로 일정한 값을 가지는 120도 구간에서 일정한 토크를 발생하기 위해 준구형파 형태의 전류를 구현한다. 그리고 A, B상의 전류를 각각 독립적으로 제어해 C상으로 유입되는 전류를 차단함으로써 파형의 왜곡을 해결할 수 있다. 반면에 4-스위치 인버터는 6-스위치 인버터에 비해 하나의 커패시터만이 사용되는 구간에서 Vdc/2 만이 출력 단에 인가되기 때문에 전압이용률이 낮은 단점을 가지지만 시스템의 가격 및 부피 측면에서는 장점을 가진다.

2.3 제안된 저가형 PAM 인버터 설계

제안된 PAM 인버터의 출력 단에는 2-스위치 Buck-Boost 컨버터와 직렬 연결된 4-스위치 인버터로 구성되며, 환상을 DC 링크 단의 커패시터 중성점에 연결해 BLDC 전동기를 제어한다. 따라서 전체적으로 스위치 개수는 일반적인 PAM 인버터와 달리 6개의 스위치로 구성되고 DC 링크 전압 가변 범위는 상대적으로 크다. 그림 3은 저가형 PAM 인버터의 전체 시스템 구성도를 나타낸다.



〈그림 3〉 제안한 PAM 인버터의 시스템 구성도

제안한 PAM 인버터의 컨트롤 블록에 표현된 각각의 제어 방법을 살펴보면 BLDC 전동기의 속도는 Hall 센서, 레졸버 혹은 엔코더 같은 회전자 센서를 통해 회전자의 위치를 얻은 다음 그 값을 미분하여 식 (1)과 같이 실제 속도를 구한다.

$$\omega_{real} = \frac{d}{dt} \theta_{real} \quad (1)$$

측정된 속도 값은 컨버터 출력기준 값과 속도 실제 값으로 나누어지고, 속도 실제 값은 속도 기준 값과 비교된 후 에러 값을 생성한다. 에러 값은 PI 제어기를 통해 전류 기준 값을 발생하고 BLDC 전동기의 일정토크 제어를 위해 히스테리시스 전류제어 기법으로 준구형과 전류 형태로 제어된다. 반면에 컨버터 출력 기준 값은 BLDC 전동기의 역기전력에 따라 제어함으로써 역기전력은 식 (2)과 같이 나타낸다.

$$\omega_m \cdot T_e = (e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c) \quad (2)$$

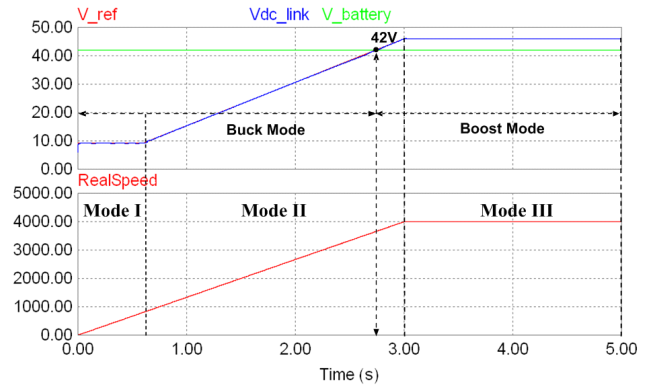
속도와 비례한 역기전력은 저속일 때 DC 링크 전압을 전동기에서 요구하는 최소전압으로 제어하고 속도가 상승 할수록 선형적으로 전압을 상승시킨다. 따라서 컨버터와 인버터 출력단 사이에서 발생하는 낮은 전위차로 인해 DC 링크 전압을 가변하지 않는 PWM 인버터 보다 전류 리플은 감소한다. 전류 리플의 기율기 수식은 식 (3)로 간략화 할 수 있다.

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_{dc} - V_{out}}{L} \quad (3)$$

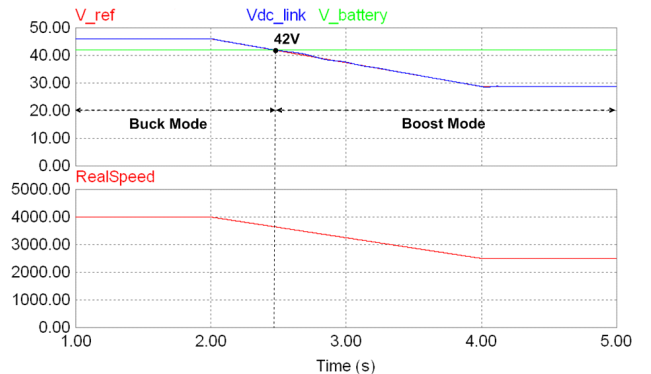
제안한 PAM 인버터 시스템은 BLDC 전동기의 속도와 배터리 입력 전압에 의해서 Buck과 Boost 모드가 결정되며, 2-스위치 Buck-Boost 컨버터와 4-스위치 인버터로 저가형 PAM 인버터를 설계하였다.

3. 시뮬레이션 결과

그림 4(a)는 제안된 PAM 인버터에서 BLDC 전동기의 속도에 따라 2-스위치 Buck-Boost 컨버터의 DC 링크 전압이 가변되는 것을 나타낸다. 그림 4(a)의 모드I 같이 전동기가 정지 상태에서 기동하기 시작할 때 2-스위치 Buck-Boost 컨버터의 출력전압은 최소 DC링크 전압을 유지한다. 모드 II에서는 전동기의 속도가 증가함에 따라 역기전력이 증가하며, 따라서 2-스위치 Buck-Boost 컨버터의 출력전압 역시 역기전력보다 큰 값을 유지하도록 속도와 비례하여 증가한다. 모드 III에서 전동기의 속도는 정격 속도에 도달하고 따라서 2-스위치 Buck-Boost 컨버터의 출력은 전동기의 역기전력 보다 큰 값이 되도록 일정한 전압을 출력한다. 제안된 PAM 인버터에서 4-스위치 인버터부의 출력은 각각의 모드에 히스테리시스 전류 제어를 이용하여 그림 4(a)와 같이 BLDC 전동기의 속도를 제어한다. 그림 4(b)는 그림 4(a)와 반대로 속도가 감소될 때 2-스위치 Buck-Boost 컨버터 출력이 Boost 모드에서 Buck 모드로 변환되는 것을 나타낸다. 전동기의 속도가 감소함에 따라 역기전력 또한 감소하며, 이에 따라 PAM 인버터의 컨버터 출력 또한 그림 4(b)에서와 같이 변한다.



(a) 속도 증가 모드



(b) 속도 감소 모드

〈그림 4〉 BLDC 전동기의 속도에 따른 DC 링크 출력 전압

4. 결 론

본 논문에서는 저 단가 및 높은 성능을 내기 위한 새로운 PAM 인버터를 제안하였다. 제안된 PAM 인버터는 스위칭 손실을 저감할 수 있는 4-스위치 인버터로 구성하였으며, 배터리 출력 전압과 독립적으로 DC 링크 전압을 제어하기 위해 역기전력이 낮은 저속영역구간과 역기전력이 높은 고속영역구간에서도 항상 선형적으로 제어할 수 있는 2-스위치 Buck-Boost 컨버터를 적용하였다. 제안된 PAM 인버터는 가격 및 효율을 증가시키는데 도움이 될 것으로 생각된다.

감사의 글

본 과제는 산업자원부의 출연금으로 수행한 특성화대학원 사업의 연구결과입니다.

참고 문헌

- [1] 김경화, 정문중, 김태덕, 김영만 “DSP를 이용한 Brushless DC 모터의 초고속 센서리스 제어,” 전력전자학회 하계학술대회논문집 pp.37-40, 07. 1999.
- [2] K. Taniguchi, S. Saegusa, T. Morizane, “PAM inverter system with soft-switching pfc converter suitable for PM motore drives,” IEEE Power Electronics and Drive Systems (PEDS2005), vol. 1, pp. 793-798, Jan. 2006.
- [3] G. K. Andersen, F. Blaabjerg, “Designing single phase current-programmed-rectifiers by harmonic currents,” IEEE Industry Applications Conference (IAC2002), vol. 3, pp. 2125 - 2132, Oct. 2002.
- [4] K. Chomsuwan, P. Prisuwana, V. Monyakul, “Photovoltaic grid-connected inverter using two-switch buck-boost converter,” IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PSC2002), vol. 1, pp. 2125 - 2132, May. 2002.
- [5] B. K. Lee, T. H. Kim, M. Ehsani, “On the feasibility of four-switch three-phase BLDC motor drives for low cost commercial applications: topology and control,” IEEE Trans. Power Electronics, vol. 18, Issue.1, pp. 164 - 172, Jan. 2003.