

출력 고조파 특성을 고려한 가변 DC link 시스템의 저스위칭 기법

최현규, 하정익
서울대학교

Low switching techniques considering the output harmonics for the adjustable DC link system

Hyeon gyu Choi, Jung Ik Ha

Department of Electrical Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

ABSTRACT

전동기의 운전 영역을 확대하기 위해 부스트 컨버터를 이용하여 가변 DC link를 합성한다. 가변 DC link 구간에서는 스위칭 손실이 증가하기 때문에 스위칭 횟수를 줄이는 전략이 필요하다. 제안하는 Edge Cutting Pulse Width Modulation(ECPWM)을 통해 스위칭 손실을 1/3로 절감하고, 최적의 고조파 특성을 갖는 직류단 전압의 크기를 결정한다. 이를 이용해 가변 직류단 전압 구간에서 인버터 손실을 감소시키며, Bolognani 과변조 방법을 적용해 안정적인 6 스텝으로의 절환까지 고려한다.

1. 서 론

모터 및 구동 회로에 대한 전력 밀도 증가에 관한 요구가 증가하면서 단일 전기기기의 넓은 운전 영역에 대한 필요성이 증가하고 있다. 이러한 요구는 스위칭 소자의 발달로 이어져 GaN(Gallium Nitride) 및 SiC(Silicon Carbide) 등의 Wide Band Gap(WBG) 소자의 발달로 이어지고 있다. 이러한 소자들의 절연 파괴 전계는 기존 Si 기반 소자 대비 10배가량 높기 때문에 같은 두께 대비 10배 높은 내압의 소자를 제작할 수 있다. 하지만 이에 반해 배터리의 경우 수 V 이내의 낮은 전압을 갖는 셀을 쌓아 제작하고, 밸런싱 등의 문제로 인해 추가적인 회로가 필요하므로 비용 및 부피의 증가를 수반한다. 이를 위한 대안으로 부스트 컨버터를 이용한 직류단 승압 방법이 있다. 컨버터의 도입으로 인해 직류단 캐패시터를 줄일 수 있을 뿐 아니라, 직류단 전압을 가변할 수 있어 이를 출력 전압 제어에 이용할 수 있다는 장점이 있다. 다만 이 방법 역시 추가 스위치 및 인덕터로 인해 출력 밀도가 낮아진다는 단점이 있지만, WBG 소자를 사용하여 이러한 영향을 최소화할 수 있으며, 효율적인 직류단 전압 사용을 통해 인버터 측 효율 개선을 할 수 있다는 장점이 있다.

부스트 컨버터 인버터 회로를 이용한 전압 합성 방법으로 Pulse Width Amplitude Modulation(PWAM)이 있다.^[1] 이는 인버터 3상 중 1상만 스위칭을 함으로써(1/3 스위칭) 스위칭 손실을 줄이고 직류단 전압을 기본과 주파수의 6배 주파수를 갖는 모양으로 합성해줌으로써 매우 낮은 Weighted Total Harmonic Distortion(WTHD)를 갖는 방법이다. 하지만 컨버터의 직류단 전압 합성 대역폭 제한으로 인해 HEV나 EV와 같이 수kHz의 기본과 주파수를 갖는 운전 영역에서는 적용이 힘들다는 단점이 있다.

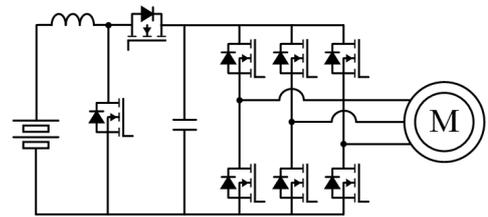


그림 1 부스트 컨버터-인버터 구조

Fig. 1 Boost converter-inverter circuit configuration

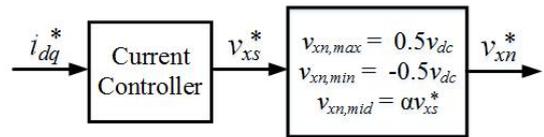


그림 2 ECPWM 전압 합성 블록도

Fig. 2 Voltage modulation block diagram for ECPWM

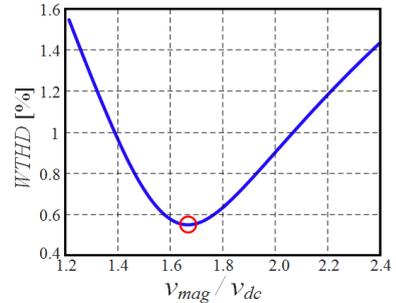


그림 3 직류단 전압 대비 출력 전압 크기에 따른 WTHD 변화

Fig. 3 WTHD transition according to the magnitude ratio of the output voltage to the DC link voltage

2. 본 론

2.1 ECPWM

컨버터 전압 제어 대역폭의 한계로 인해 PWAM과 같은 전압 합성이 불가능한 주파수에서는 안정성을 고려하여 직류단 전압을 일정하게 제어한다. 이 때 스위칭 손실 저감을 위해 PWAM과 같이 1/3 스위칭을 유지하면서, 낮은 고조파 특성(WTHD)을 갖는 직류단 전압 크기를 결정해야 한다. 또한 직류단 전압이 최대값에 도달할 경우 6 스텝 운전으로의 자연스러운 절환 과정이 필요하다.

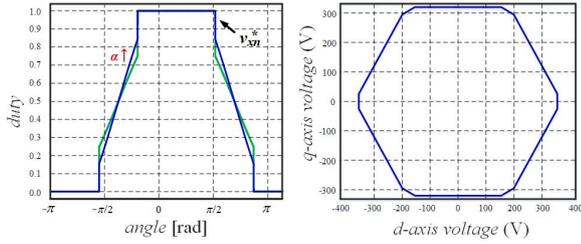


그림 4 가변 직류단 전압 구간에서 듀티 및 정지좌표계 d-q 전압
Fig. 4 Duty and stationary d-q voltage at adjustable DC link voltage region

2.1.1 가변 직류단 전압 구간

스위칭 손실은 직류단 전압의 크기와 근사적으로 비례관계에 있기 때문에 가변 직류단 전압 구간에서는 일반적으로 스위칭 손실이 커지게 된다. 따라서 해당 구간에서 PWM과 같이 1/3 스위칭 기법을 유지하여 스위칭 손실을 저감해야 한다. 이를 위해 그림 2와 같이 전류 제어기의 출력 중 최댓값과 최소값을 각각 $0.5V_{dc}$, $-0.5V_{dc}$ 로 치환한다. 한편 중간값은 제어기 출력에 기본과 결정 상수 α 를 곱하여 치환한다. 이 때 출력 전압의 WTHD 특성 및 기본과 크기는 각각 직류단 전압 및 α 값에 따라 변하게 된다. 따라서 직류단 전압 대비 출력 전압의 크기에 따라 WTHD 특성을 살펴보면 그림 3과 같이 직류단 전압이 출력 전압 크기의 1.66배일 때 최소 WTHD 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이 때 기본과 크기를 만족하는 α 의 값은 1.41이며 듀티 및 정지좌표계 d q 전압을 나타내면 그림 4와 같다. 기존 PWM에서 직류단 전압이 일정할 때와 달리 모서리가 잘린 육각형 모양의 전압이 나타나므로 이러한 전압 합성 방법을 Edge Cutting PWM으로 명하였다.

2.1.2 6-스텝 운전 전환

직류단 전압이 최댓값이 되면 스위칭 손실이 최댓값을 가질 뿐 아니라 전압 부족에 의한 d축 약자속 전류의 증가로 도통 손실까지 증가하게 되어 효율이 급격히 나빠지게 된다. 따라서 해당 구간에서는 6스텝 운전을 통해 스위칭 손실을 최소로 발생시켜야 한다. ECPWM의 경우 6각형의 변을 따라 스위칭을 하게 되므로 모서리 점을 따라 움직이는 6 스텝 운전으로의 전환이 용이하지 않다. 따라서 Bolognani 과변조 기법을 이용하여 6스텝으로 넘어가게 된다.^[2] Bolognani 과변조의 경우 ECPWM과 상보적인 위치에서 스위칭을 하기 때문에 그림 5와 같이 ECPWM에서 연속적으로 6스텝으로 전환이 가능하다. 하지만 Bolognani 과변조의 경우 출력 전압의 불연속 전압 값이 크기 때문에 샘플링 오차에 의한 전류 리플이 상대적으로 크게 나타난다. 따라서 이러한 효과를 최소화하기 위해 ECPWM을 유지하되, 기본과 크기 변동에 따라 α 값을 변동하여 ECPWM에서 출력 가능한 최대 전압에서 Bolognani 과변조로 전환한다.

1.2 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 6은 인버터의 저스위칭에 의한 손실 저감 효과를 보기 위한 시뮬레이션 결과이다. 왼쪽 그림은 일반적인 SVPWM을 이용하여 전구간 스위칭을 했을 때의 결과이고, 오른쪽 그림은 ECPWM에서 6스텝까지 적용했을 때의 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 스위칭 손실이 ECPWM 구간에서 1/3로 감소하고 6 스텝에서는 최소값을 가지므로 전체 손실은 상대적으로

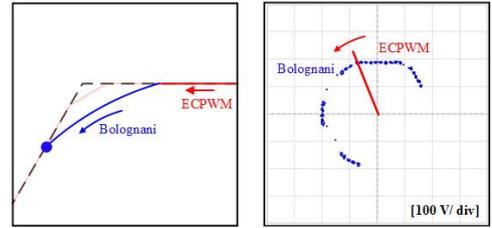


그림 5 ECPWM에서 6스텝 전환 순간 (좌: 개념도, 우: 실험파형)
Fig. 5 Transition from ECPWM to 6 step operation

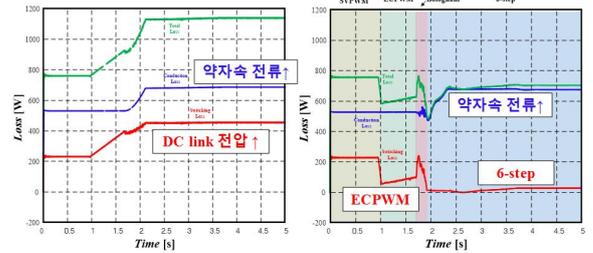


그림 6 인버터 손실 시뮬레이션
Fig. 6 Inverter loss simulation

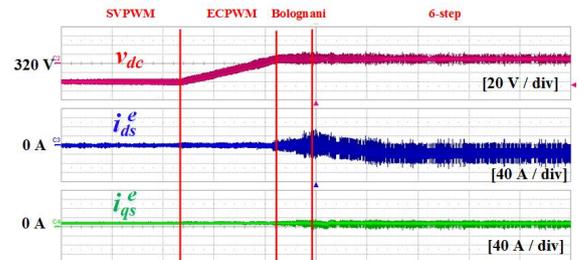


그림 7 직류단 전압, 동기좌표계 d-q 전류 실험 파형
Fig. 7 Experimental waveform of DC link voltage and d-q current

일정한 값을 유지하는 것을 알 수 있다. 또한 그림 7에서 볼 수 있듯이 1/3 스위칭으로도 SVPWM 및 ECPWM 구간에서 d q 전류 고조파 특성이 비슷한 것을 볼 수 있다.

3. 결론

부스트 인버터 시스템을 이용하여 운전영역을 확장 시 스위칭 손실을 고려하여 1/3 스위칭 기법을 적용한다. 이 때 직류단 전압의 크기를 통해 WTHD를 최소화하는 직류단 전압의 크기를 결정할 수 있다. 또한 Bolognani 과변조 기법과의 상보적 특성을 이용하여 6스텝까지의 전환까지 고려하여 고속 영역에서 효율적인 운전을 할 수 있도록 한다.

참고 문헌

- [1] Lei, Qin, and Fang Z. Peng. "PWAM boost converter inverter system for EV engine starter/alternator." 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2012.
- [2] Bolognani, Silverio, and Mauro Zigliotto. "Novel digital continuous control of SVM inverters in the overmodulation range." IEEE Transactions on Industry Applications 33.2 (1997): 525-530.