

벽-타입 능동 전력 디커플링 회로를 위한 새로운 듀티 사이클 생성 방법

백기호, 박성민
홍익대학교 전자전기공학과

New Duty Cycle Generation Method for Buck-type Active Power Decoupling Circuits

Ki-Ho Baek, Sung-Min Park
Dept. of Electronic & Electrical Engineering, Hongik University

ABSTRACT

본 논문에서는 벽-타입 능동 전력 디커플링 회로의 새로운 듀티 사이클 생성 방법을 제안한다. 기존의 듀티 사이클 생성 방법에 비해 단순해진 듀티 사이클 계산 방식은 저성능 마이크로 프로세서에도 적합함과 동시에 보다 효과적으로 능동 전력 디커플링 회로를 제어할 수 있다. 제안하는 회로는 전류 불연속 모드로 동작하며, 전류 지령치는 DC링크 전류의 1차 리플 성분에 전류 이득을 보상하여 생성하기 때문에 모든 구간에서 효과적으로 DC링크의 전압 리플을 줄일 수 있다. 제안하는 듀티 사이클 생성 방법의 효과는 MATLAB-Simulink를 통해 검증하였다.

1. 서 론

단상 컨버터에서 DC링크 전압에 생기는 리플 성분을 흡수하기 위해 일반적으로 부피가 큰 전해 커패시터를 사용한다. 전해 커패시터의 크기와 수명은 단상 컨버터의 전력 밀도와 수명에 크게 관여한다.^[1] 따라서 고수명과 고전력밀도를 갖는 전력변환장치를 위한 컨버터 DC링크 커패시터의 용량을 줄이기 위한 연구들이 근래에 많은 각광을 받고 있다. 하나의 커패시터, 인덕터와 2개의 전력용 스위치를 포함하는 양방향 벽-부스트 컨버터는 전력 리플 에너지 저장회로로서 동작할 수 있으며, DC링크의 1차 전류 리플 성분을 전류지령치로 사용하여 듀티 사이클을 계산함으로써 2개의 스위치를 제어하게 된다.^[2]

본 논문에서는 벽-타입 능동 전력 디커플링 회로를 제어하기 위한 듀티 사이클 생성 방법을 기존의 방법보다 단순화하였고 제안된 방법의 성능을 검증하기 위해서 MATLAB 시뮬레이션을 진행하였다.

2. 벽-타입 능동 전력 디커플링 회로

2.1 벽-타입 능동전력 디커플링

단상 컨버터의 역률보상회로를 통과한 후에 DC링크로 흘러가는 전류(i_{dc})의 1차 리플 성분이 능동 전력 디커플링 회로로 흐르게 함으로써 리플 에너지가 저장되도록 스위치 S_1 과 S_2 를 제어한다. 그림 1에서 보조 커패시터(C_r)는 에너지 저장요소로 동작하고, 보조 인덕터(L_r)는 DC링크와 보조 커패시터 사이에서 에너지를 전달 하는데 사용된다. 충전 모드에서 S_2 는 항상 꺼져 있고 S_1 은 PWM 신호에 의해 제어된다. S_1 이 켜졌을 때, DC 링크가 보조 인덕터와 커패시터를 모두

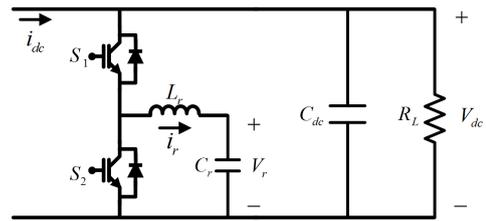


그림 1. 벽-타입 능동전력 디커플링 회로

충전한다. S_1 이 꺼지면 보조 인덕터는 S_2 의 바디 다이오드를 통해 커패시터로 계속 에너지를 방출한다. 방전 모드에서 S_1 은 항상 꺼져 있고 S_2 는 PWM 신호에 의해 제어된다. S_2 가 켜져 있을 때, 보조 인덕터는 보조 커패시터에 의해 방전된다. S_2 가 꺼져 있을 때, 보조 커패시터 모두 에너지를 DC링크로 방출한다. 따라서, 능동 전력 디커플링 회로는 DC링크 커패시터로부터 보조 커패시터로 리플 에너지를 전달할 수 있다.

2.2 제안하는 듀티 사이클 생성 방법

DC링크 커패시터의 전압 리플을 줄이기 위해서 리플 에너지를 보조 커패시터로 전달해야한다. 따라서 디커플링 회로에 흐르는 전류(i_r)는 DC링크 전류(i_{dc})의 리플 성분을 따라가도록 해야 한다. 따라서 보조 인덕터의 전류 지령치(i_r^*)는 DC링크전류의 대역통과필터(Band Pass Filter: BPF) 출력값을 통해 추출된다. 충전모드와 방전모드의 듀티 사이클은 각각 (1), (2)로 계산된다.^[2]

$$D_1 = \sqrt{\frac{2 i_r^* L}{T_s (V_{dc} - V_r)}} \quad (1)$$

$$D_1 = \sqrt{\frac{2 i_r^* L (V_{dc} - V_r)}{T_s V_r^2}} \quad (2)$$

(1), (2)와 같은 계산식에는 제곱근연산을 포함하므로 마이크로 프로세서의 연산부담이 크다. 따라서 저성능의 마이크로 프로세서에서도 적합하도록 계산식을 단순화 하였다.

그림 2는 제안된 듀티 사이클 계산 방식을 위한 제어 블록 다이어그램을 나타낸다. 제곱근연산을 없애기 위해 대역통과필터를 통해 추출한 전류 지령치에 보상 이득을 곱하여 새로운 전류 지령치 i_{r_new} 를 구한 후에 듀티 사이클 생성을 위한 새로운 계산식을 도출하였다. 보상 이득은 DC링크 전압을 측정하여 리플 전압을 계산하고, 리플의 변화에 따라 보상 이득을 변화시키는

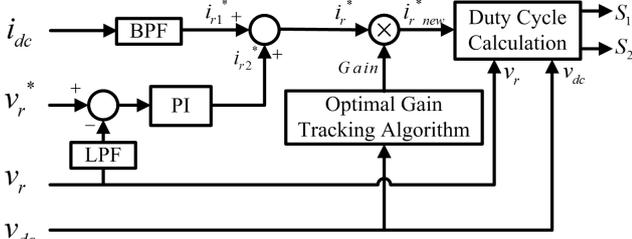


그림 2. 디커플링 회로의 제어 블록 다이어그램

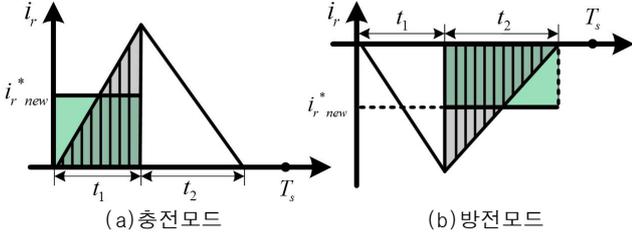


그림 3. 충전모드와 방전모드의 듀티 사이클 생성 방법

방법으로 최저 리플을 추종하는 알고리즘을 통해 최적의 보상이득을 얻는다. DC링크와 디커플링 회로 사이에서 흡수되거나 방출되는 전류는 모두 스위치 S_1 을 통과한다. 스위치 S_1 에 흐르는 전류는 운전모드에 따라 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 충전모드에서는 t_1 동안 흐르는 보조 인덕터 전류와 같고, 방전모드에서는 t_2 동안 흐르는 보조 인덕터 전류와 같다. 따라서, 충전모드와 방전모드에서 S_1 에 흐르는 스위치 전류는 한 스위칭 주기 동안의 보조 인덕터 전류를 결정한다. 보조 인덕터 전류가 i_{ac} 의 리플 성분을 추적하려면, 스위치 전류의 평균도 i_{ac} 의 리플 성분을 보상하여 추적하여야 하므로 다음과 같이 충전모드와 방전모드에서 각각 듀티 사이클을 계산할 수 있다.

충전 모드에서 각 스위칭 주기마다 스위치 S_1 을 통과하는 스위치전류의 평균은 그림 3에서 음영 처리한 삼각형영역(t_1)의 넓이를 통해 (3)과 같이 계산될 수 있다. 스위치 전류의 평균은 i_{ac} 의 리플 성분을 추적 해야 하므로, i_r^* 과 같다. 스위치 S_1 의 듀티 사이클 D_1 은 (4)와 같이 계산된다.

$$i_r^* \times t_1 = \frac{V_{dc} - V_r}{L_r} t_1 \times t_1 \times \frac{1}{2} \quad (3)$$

$$D_1 = \frac{2 i_r^* L_r}{T_s (V_{dc} - V_r)} \quad (4)$$

방전 모드에서는 스위치 S_2 가 꺼져있는 시간 t_2 동안 스위치 S_1 을 통과하는 스위치전류의 평균은 그림 3에서 음영 처리한 삼각형영역(t_2)의 넓이를 통해 계산될 수 있다.

$$i_r^* \times t_2 = \frac{V_{dc} - V_r}{L_r} t_2 \times t_2 \times \frac{1}{2} \quad (5)$$

마찬가지로, 스위치 S_2 의 듀티 사이클 D_2 은 계산될 수 있다.

$$D_2 = \frac{2 i_r^* L_r}{T_s V_r} \quad (6)$$

전류 지령치 i_r^* 는 i_{ac} 에서 대역통과필터를 통해 추출한 뒤 알고리즘을 통해 얻어진 보상 이득과 곱하여 얻는다. 보상 이득은 DC링크의 전압 리플 최소점을 추종하도록 보상 이득을 변화시키는 알고리즘을 통해 얻는다. 따라서 모든 운전 구간에서 효과적으로 DC링크의 전압 리플을 줄일 수 있다.

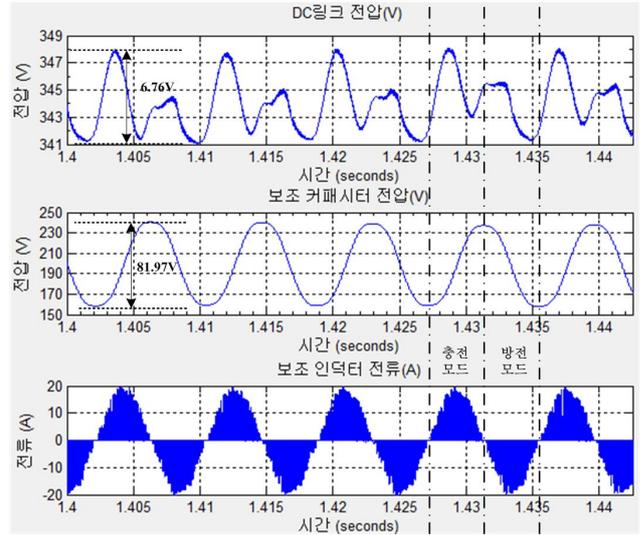


그림 4. MATLAB 시뮬레이션 결과

3. 시뮬레이션 결과

그림 4는 벡-타입 능동 전력 디커플링 회로에 단순화된 듀티 사이클 생성 방법을 적용한 MATLAB시뮬레이션 결과이다. DC링크전압(v_{dc}), 보조 커패시터 전압(v_r), 보조 인덕터 전류(i_r)에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 정상상태에서의 DC링크 전압 리플은 약 6.76V로 평균값에 비해 약 2%수준이다. 보조 커패시터 전압은 피링치(v_r) 200V에서 약 $\pm 41V$ 의 리플 전압을 가지며 충전과 방전을 반복한다. 보조 인덕터 전류는 i_{ac} 에서 대역 통과필터를 통해 추출한 1차 리플 성분을 따라 정현파 모양으로 제어되며, 전류 불연속 모드로 동작한다.

4. 결론

본 논문에서는 벡-타입 능동 전력 디커플링 회로에 대해 간략하게 소개하고, 기존의 듀티 사이클 생성 방법에서 제공된 연산을 제거하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법을 적용하여 MATLAB 시뮬레이션을 통해 디커플링 회로의 동작을 확인하였다. 듀티 계산식의 전류 지령치를 변경하여 제공된 연산을 배제함으로써 마이크로 프로세서의 연산 부담을 줄일 수 있고, 저성능 마이크로 프로세서를 사용하여도 구현이 가능함과 동시에 효과적으로 DC링크의 전압 리플을 제어할 수 있다.

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2017R1C1B2008200)

참고 문헌

- [1] R. Wang, F. Wang, D. Boroyevich, R. Burgos, R. Lai, P. Ning, and K. Rajashekara, "A high power density single-phase PWM rectifier with active ripple energy storage", IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 5, pp. 1430-1443, May 2011.
- [2] Hoang Vu Nguyen, Yoon-Cheul Jeung, and Dong-Choon Lee, "Battery Charger with Small DC-Link Capacitors for G2V Applications", in 2016 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET), pp. 315-319, November, 2016.