

벽-타입 능동 전력 디커플링을 위한 가변 스텝을 적용한 최적 보상 이득 알고리즘

백기호, 김승권, 박성민
홍익대학교 전자전기공학과

The optimal compensation gain algorithm using variable step for buck-type active power decoupling circuits

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

ABSTRACT

본 논문에서는 벽-타입 능동 전력 디커플링 회로의 단순화된 제어 방법을 위한 가변 스텝을 적용한 최적 보상 이득 알고리즘을 제안한다. 고정 스텝을 사용한 기존의 최적 보상 이득 알고리즘보다 유동적인 보상 이득 변화를 통해 DC링크 전압 리플을 효과적으로 줄일 수 있다. 기존의 방법보다 최적 보상 이득을 추적하는 시간이 줄어들어 갑작스런 부하 변동이나 이상 상황에 빠른 대응이 가능하다. 벽-타입 능동 전력 디커플링 회로는 전류 불연속 모드로 동작하며, 전류 지령치는 DC링크 전류의 1차 리플 성분에 전류 이득을 유동적으로 보상하여 생성하기 때문에 모든 구간에서 효과적으로 DC링크의 전압 리플을 줄일 수 있고 빠른 대응이 가능하다. 제안하는 가변 스텝을 적용한 최적 보상 알고리즘의 효과는 MATLAB-Simulink 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

단상 AC-DC 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 높은 전력밀도와 긴 수명 갖는 전력변환장치를 위해 DC링크 커패시터의 용량을 줄이기 위한 연구들이 근래에 많은 각광을 받고 있다. 1개의 커패시터, 1개의 인덕터와 2개의 전력용 스위치를 포함하는 벽-타입 능동 전력 디커플링 (Active Power Decoupling: APD) 회로는 리플 에너지 저장회로로써 동작할 수 있다.^[2] 일반적으로 불연속 전도 모드(Discontinue Conduction Mode: DCM)에서 동작하는 벽-타입 APD회로의 듀티 사이클은 정류된 DC링크의 전류의 1차 리플 성분을 전류지령치로 사용하여 계산된다. [3]에서는 최적 보상 이득 알고리즘을 추가하여 단순화된 듀티 사이클 계산 방법이 제안되었다.

본 논문에서는 최적 보상 이득 알고리즘의 이득 변환 스텝을 기존의 고정된 스텝에서 가변 스텝으로 변경하여 최적의 이득을 찾는 알고리즘의 성능을 향상시켰다. 기존의 고정 스텝방식과 가변 스텝 방식의 비교하고 벽-타입 APD 회로의 동작을 검증하기 위해서 MATLAB 시뮬레이션을 진행하였다.

2. 벽-타입 능동 전력 디커플링

2.1 단순화된 듀티사이클 계산 방법

단상 AC-DC 컨버터에서 역률보상회로를 통과하여 정류된 DC링크전류(i_{dc})의 1차 리플 성분이 APD회로로 흐르게 함으로써 리플 에너지가 저장되도록 스위치 S_3 과 S_4 를 제어한다. 그림 1에서 APD커패시터(C)는 에너지 저장요소로 동작하고, APD인덕터(L_r)는 에너지를 전달요소로 동작한다. 그림 2는 APD회로의 제어 블록 다이어그램을 나타낸다. APD회로에 흐르는 전류(i)는 정류된 DC링크전류(i_{dc})의 리플 성분을 따라야 하므로 APD인덕터의 전류 지령치(i_r^*)은 i_{dc} 의 대역통과필터(Band Pass Filter: BPF) 출력 값과 APD전압 제어기를 통해 얻을 수 있다. i_r^* 와 최적 이득 추적 알고리즘을 통해 얻어진 최적의 보상 이득(Gain)의 곱으로 수정된 전류 지령치(i_r^{*new})를 통해 단순화된 듀티사이클 계산식으로 벽-타입 APD회로를 동작 시킬 수 있다. 식 (1)과 (2)는 각각 충전모드와 방전모드에서 스위치 S_3, S_4 의 듀티사이클 계산식을 나타낸다.

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

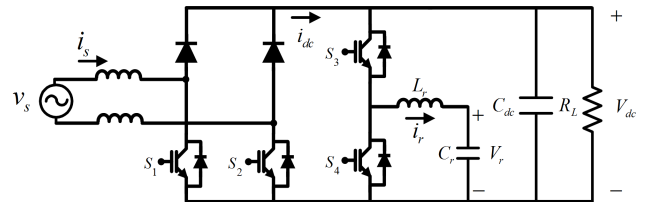


그림 1. 벽-타입 APD 회로를 포함한 단상 AC-DC 컨버터

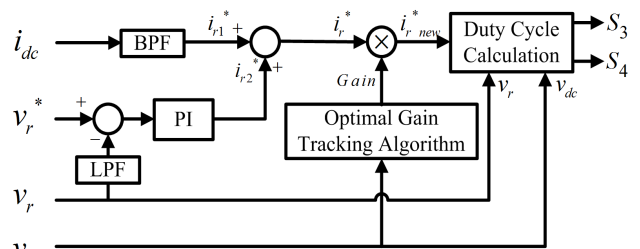


그림 2. APD회로의 제어 블록 다이어그램

3. 시뮬레이션 결과

그림 4는 3kW에서 1.5kW로 부하가 감소할 경우의 응답을 나타낸다. 고정된 스텝을 적용한 최적 보상 알고리즘의 응답 결과는 그림 4(a), (b)에 나타나 있다. 1.2초에 부하 변동이 일어나면, 최적의 보상 이득을 찾지 못해 DC 링크 전압 리플이 최소점을 찾아가지 못한다. 가변 스텝을 적용한 최적 보상 알고리즘의 응답 결과는 그림 4(c), (d)에서 확인 할 수 있다. 고정된 스텝의 결과와는 다르게 부하 변동이 일어난 직후 보상 이득이 리플을 최소로 하는 최적점을 찾아간다. 그림 5는 3kW 정격에서의 APD 회로의 MATLAB 시뮬레이션 결과를 나타낸다. DC링크 전압의 평균값은 400V로 제어되며 정상상태에서 약 17.7V의 리플을 가진다. APD 커패시터 전압은 약 169.8V의 리플을 가지며 충전과 방전을 반복한다. APD 인덕터 전류는 BPF를 통해 추출한 1차 리플 성분을 따라 정현파로 제어되며 DCM에서 동작한다.

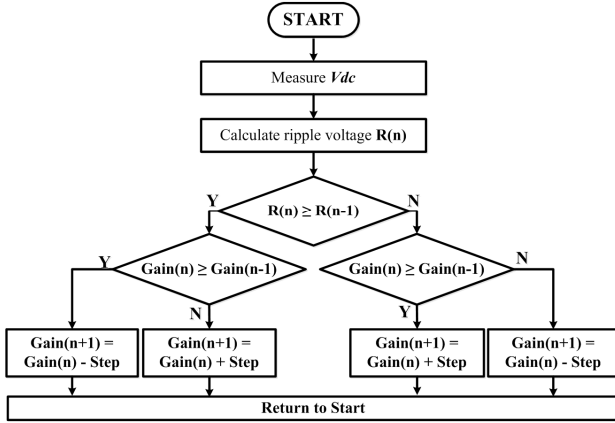


그림 3. 최적의 보상 이득 추적 알고리즘

2.2 최적 보상 이득 추적 알고리즘

그림 3은 최적 보상 이득을 추적하는 알고리즘을 나타낸다. DC링크 전압 리플이 최소가 되게 하는 최적의 보상 이득을 추종하기 위해서 이전의 보상 이득을 교란시킨 뒤 전압 리플을 모니터링하며 보상이득의 최적점을 찾아 낼 수 있다. 스텝 값만큼 이득 값을 증가시켰을 때 전압 리플이 증가한다면 이득 값을 스텝 값만큼 감소시키고, 전압 리플이 감소한다면 이득 값을 계속해서 스텝 값만큼 증가시킨다. 이득 값을 감소시켰을 경우에도 전압 리플이 감소하는 방향으로 이득 값을 변화시키며 전압 리플의 값이 최소가 되는 최적 이득 값을 찾아간다.

스텝 값을 고정된 작은 값으로 설정할 경우 보상 이득의 최적점이 변경되었을 때 빠른 시간 내에 최적 보상 이득을 추종하지 못하고, APD 회로의 효율이 낮아지게 된다. 스텝 값을 고정된 값에서 상황에 따라 가변되는 값으로 변경할 경우 유동적으로 보상 이득을 생성하여 최적점을 추종하는 응답 시간을 줄이고, 기존의 고정된 스텝 방식보다 APD회로를 효과적으로 동작시켜 모든 구간에서 DC링크의 전압 리플을 줄일 수 있다. 보상이득을 교란 시키는 스텝 값을 리플이 작을수록 작게 하고, 리플이 클수록 크게 하여 보상 이득이 리플이 최소화 되는 최적점에 머물게 할 수 있다. 따라서 DC링크 전압의 평균값에 대한 리플 크기를 이용하여 (3)과 같이 가변 스텝을 적용하였다.

$$Step = K \times \frac{V_{ripple}}{V_{dc}} \quad (3)$$

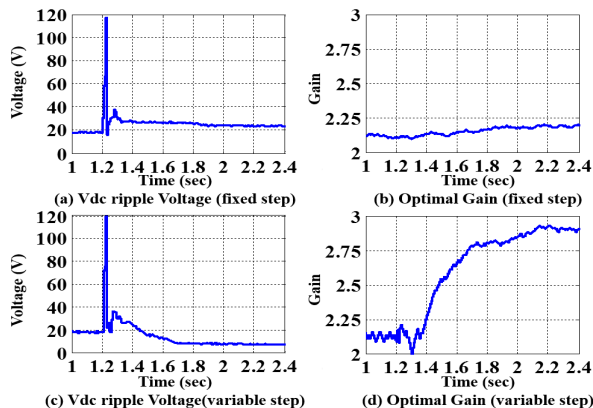


그림 4. 부하 감소에 대한 응답 (3kW → 1.5kW)

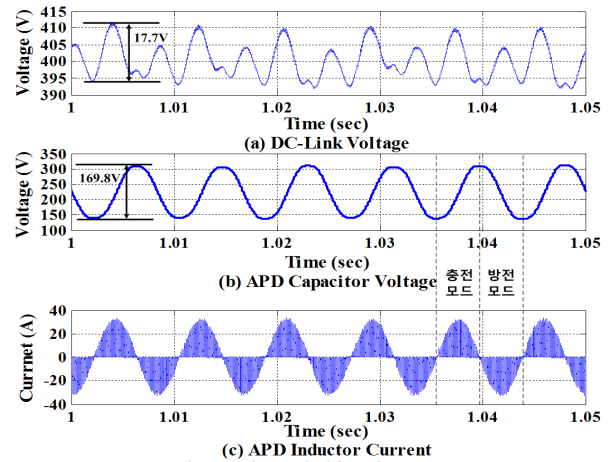


그림 5. MATLAB 시뮬레이션 결과(3kW)

4. 결론

본 논문에서는 벡-타입 APD회로를 위한 최적 보상 알고리즘을 가변 스텝 방식으로 변경하여 효과적으로 APD회로를 동작시킬 수 있음을 MATLAB/Simulink를 통해 확인하였다. 가변 스텝을 적용한 알고리즘으로 DC링크 리플 전압을 최소화 하기 위한 보상이득을 유동적으로 생성할 수 있다. 고정된 방식에 비해 응답시간이 줄어들고, 갑작스런 부하변동에도 APD회로의 최적의 동작이 가능하다

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. Rajashekar, "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.
- [3] 백기호, 박성민, "벡-타입 능동 전력 디커플링 회로를 위한 새로운 듀티 사이클 생성 방법". 전력전자학술대회 논문집(2017) pp. 252-253.