

캐패시터-분할 타입의 능동전력디커플링 회로를 위한 전압제어 방법

김동희, 박성민

홍익대학교 전자전기융합공학과

A Voltage Control Method for Capacitor-Split-type Active Power Decoupling Circuits

Dong-Hee Kim, Sung-Min Park

Dept. of Electronic & Electrical Engineering, Hongik University

ABSTRACT

본 논문에서는 캐패시터-분할 타입 능동전력 디커플링 회로를 위한 전압제어 방법을 제안한다. 능동전력 디커플링 회로는 시스템에 필요한 커패시턴스를 낮추어 전해커패시터를 필름 커패시터로 대체하여 시스템 수명과 전력밀도를 높일 수 있는 장점이 있다. 그러나 일반적으로 오픈 루프 제어방식의 전압제어 방식을 사용하여 파라미터 값의 변화에 민감하다는 단점을 가지고 있다. 이에 본 논문에서는 캐패시터-분할 타입 능동전력 디커플링 회로를 위한 폐루프 제어 방법을 제안한다.

1. 서론

단상 ac 전원을 이용하는 시스템에서 내제된 2차 리플 전력 문제는 전체 시스템 성능을 저하시킨다. 기존의 단상 ac 전원을 사용하는 시스템에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 전해 커패시터를 이용한 수동 디커플링 방식을 많이 사용한다. 하지만 전해 커패시터는 부피가 크고 수명이 짧기 때문에 전체 시스템의 전력밀도를 높이고 수명을 단축시키는 문제가 있다. 이러한 전해 커패시터의 문제를 해결하기 위해 능동전력디커플링(Active Power Decoupling: APD)이 연구 되고 있다.^[1]

다양한 APD회로 중에 캐패시터-분할 타입 방식은 전류가 연속전도 모드로 동작하고 제어가 설계가 비교적 용이하다는 장점이 있다. 그러나 기존 전압 제어기는 오픈 루프 제어방식을 사용하여 파라미터 값을 이용한 계산식에 의해 제어된다. 따라서 파라미터 값에 민감하고 파라미터 값이 바뀌게 되면 제어기의 기능이 저하된다는 단점이 있다.

본 논문에서는 파라미터 값을 사용하는 기존의 제어기를 dc 링크 전압 값을 피드백 받아 제어하는 폐루프 제어기를 제안한다. 제안하는 폐루프 제어기는 기존 제어기에 비해 파라미터 값 변동에 대한 영향을 적게 받기 때문에 제어 성능을 높일 수 있다.

2. 본론

2.1 캐패시터-분할타입 능동전력디커플링 원리

그림 1은 캐패시터-분할 타입 APD회로가 적용된 ac-dc 컨버터이다. 캐패시터-분할 타입 APD 회로의 두 캐패시터는 동일한 커패시턴스를 가지며 상단 캐패시터와 하단 캐패시터의 전압은 180도의 위상 차이를 갖는다. 각각의 캐패시터 전압의 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_{c1} &= \frac{\overline{V_{dc}}}{2} + V_c \sin(\omega t + \psi) \\ v_{c2} &= \frac{\overline{V_{dc}}}{2} - V_c \sin(\omega t + \psi) \end{aligned} \quad (1)$$

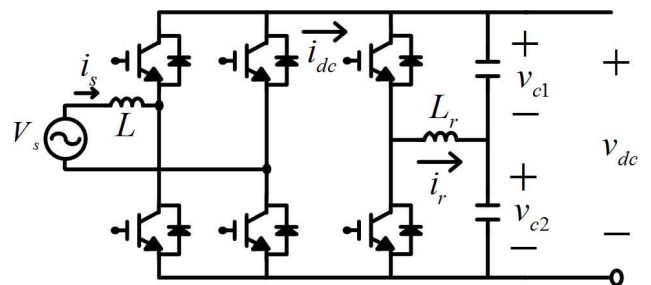


그림 1 캐패시터-분할 타입 APD회로가 적용된 단상 ac-dc 컨버터

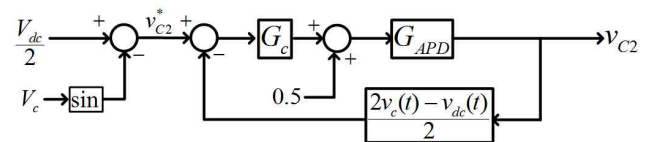


그림 2 기존 캐패시터-분할 타입 APD회로 제어 블록다이어그램

$\overline{V_{dc}}$ 는 dc 링크 전압의 평균값이고 V_c 는 입력주파수로 변동하는 APD 캐패시터 전압의 크기이다. 각각의 캐패시터 전압을 이용하여 APD회로의 전력(P_{APD})을 계산할 수 있다. 역률보상 회로가 이상적으로 동작하고, APD 회로에서 리플 전력을 모두 처리한다고 가정하면 다음과 같이 V_c 의 크기와 위상을 구할 수 있다.

$$V_c = \sqrt{\frac{\sqrt{\left(\frac{V_s I_s}{2}\right)^2 + \left(\frac{L I_s \omega}{2}\right)^2}}{\omega C - 2\omega^3 C^2 L_r}} \quad (2)$$

$$\psi = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{V_s}{L I_s \omega}\right) \quad (3)$$

2.2 기존 제어 방법

그림 2는 캐패시터-분할 타입을 위한 기존의 제어 블록다이어그램이다. 기존의 제어 방법은 계산 가능한 식 (2)의 V_c 를 이용하여 하단 캐패시터의 전압 $v_{c2}(t)$ 의 지령치를 생성한다. $v_{c2}(t)$ 는 ac성분을 포함하기 때문에 대역폭이 높은 비례-적분 (PI)제어기를 필요로 한다. 따라서 기존의 제어 방법은 비례-공진(PR)제어기를 포함한 제 3형 보상기를 사용한다. 제어기의 전달함수 $G_c(s)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$G_c(s) = K_p \frac{\left(\frac{s}{\omega_{z1}} + 1\right)\left(\frac{s}{\omega_{z2}} + 1\right)}{\left(\frac{s}{\omega_p} + 1\right)} \frac{s}{s^2 + \omega^2} \quad (4)$$

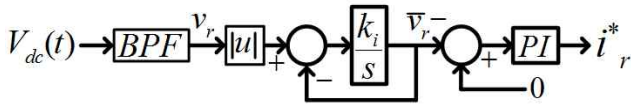


그림 3 제안하는 전압제어 블록다이어그램

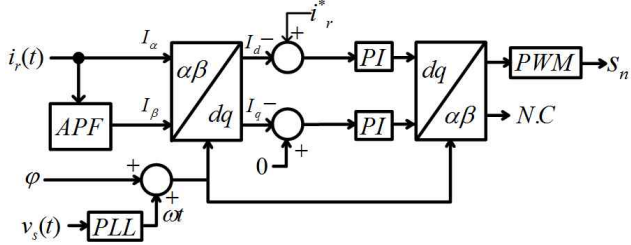


그림 4 제안하는 전류제어 블록다이어그램

기존의 제어 방법은 시스템을 안정화 시킬 수 있지만 제어기 설계 및 구현이 복잡하고 제어변수 V_c 값은 파라미터 값 및 외란에 의해서 많은 영향을 받는다.

2.3 제안하는 제어 방법

제안하는 전압 제어기는 직류단에 120Hz 주파수를 갖는 리플 전력을 제거하기 위해서 직류단 전압을 피드백 받아 APD 인덕터 전류 지령치(i_r^*)를 출력한다. 직류단 전압의 120Hz성분을 추출하기 위해서 대역필터(Band Pass Filter: BPF)를 사용한다. BPF를 통과한 v_r 값을 적분제어기를 사용하여 리플 전압의 평균 값을 구한다. 직류단에 dc전력만 공급하기 위해서는 리플 전압의 평균값이 0이 되어야 함으로 이를 위한 전압제어기를 그림 3과 같이 구성한다. 제안하는 전압 제어기는 ac성분을 제어하는 것이 아니기 때문에 간단한 PI제어기를 사용하여 제어가 가능하다. 또한 파라미터 값에 의해 계산 가능한 식 (2)의 V_c 을 이용하여 한 단 커패시터 전압 $v_{c2}(t)$ 의 지령치를 생성하는 기존의 제어 방법보다 파라미터 값, 외란에 영향이 적다.

그림 4는 본 논문에서 사용한 인덕터 전류 제어기의 블록다이어그램이다. 기존 제어 방법은 ac성분을 제어하기 위하여 PR 제어기를 사용하였다. PR제어기는 시스템을 안정화 시킬 수 있지만 제어기 설계 및 구현이 복잡하다는 단점이 있다. 본 논문에서는 가상 d-q변환을 사용한 d-q 전류제어기를 사용한다. 가상 d-q변환을 사용하여 ac 성분을 포함하는 APD 인덕터 전류를 dc 성분으로 변환하기에 일반적인 PI제어기로 ac 성분을 제어할 수 있다. APD 인덕터 전류는 가상 d-q 변환을 통하여 d축 성분과 q축 성분으로 나누어진다. d축 성분은 APD 인덕터 전류의 피크 값으로 제안된 전압 제어기의 출력값을 이용하여 PI제어기를 통하여 제어된다.

3. MATLAB 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 제어기의 성능을 검증하기 위하여 MATLAB/simulink 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션은 표1의 조건에서 진행되었다. 그림 5는 직류단 전압과 APD 상,하단 커패시터의 전압이다. 각각의 커패시터 전압은 180도 위상차를 갖고 흔들리고 있다. 직류단의 전압리플 크기는 약 10V수준으로 평균 직류단 전압의 3.8%이다. 그림 6은 파라미터 값에 대한 제어기의 성능을 비교한 직류단 전압이다. 식 (2)에 의해 계산하는 V_c 값을 이용한 d-q 전류제어기와 제안하는 전압제어 방법을 포함한 d-q 전류제어기를 파라미터 값에 대한 제어기 성능을 검증하기 위하여 본 논문에서는 APD 동작 중에 APD 커패시터의 커패시턴스를 $250\mu F$ 에서 $300\mu F$ 으로 변경하여 운전하였다.

표 1 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Values
Output Power(kW)	3.3
dc-link Voltage(V)	380
APD capacitor(μF)	250
Changed APD capacitor(μF)	300
APD inductor(mH)	1.2
Switching frequency(kHz)	30

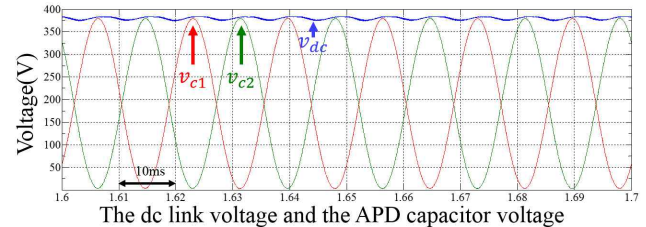
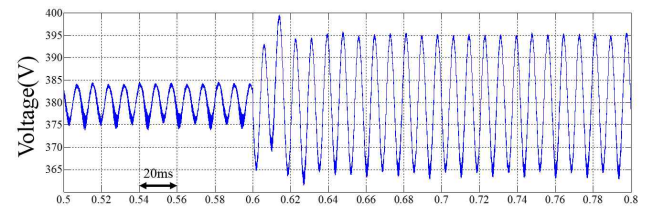
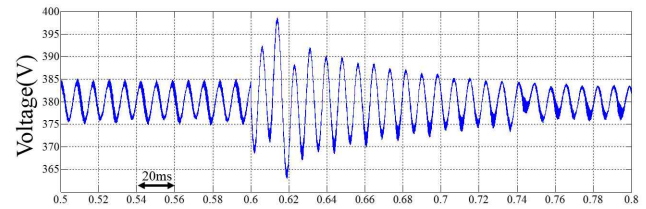


그림 5 제안하는 제어기를 사용한 직류단 전압과 APD 커패시터 전압



(a)



(b)

그림 6 파라미터 변경에 따른 직류단 전압

그림 6의 (a)는 V_c 값을 이용한 제어 방법을 사용한 시뮬레이션 도중 파라미터 값을 변경했을 때 직류단 전압이다. 정상상태에서 리플 크기는 약 10V의 크기를 갖지만 파라미터가 변경된 이후 리플 크기가 약 30V 크기를 갖는다. 그림 6의 (b)는 제안하는 전압 제어 방법을 사용한 직류단 전압이다. 정상상태에서 리플 크기 10 V의 크기를 갖고 파라미터 값을 변경했을 때 직류단 전압의 리플이 다시 정상 상태로 복귀하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문은 커패시터-분할 타입 APD회로를 위한 페루프 제어 방법을 제안했다. 제안한 전압 제어 방법은 기존의 제어 방법보다 파라미터 값 영향에 대하여 성능이 우수한 것을 시뮬레이션 결과를 통하여 확인하였다.

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

참고 문헌

- [1] Y. Sun, Y. L. M. Su, W. Xiong, and J. Yang, "Review of active power decoupling topologies in single-phase systems," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 31, pp. 4778-4794, Jul. 2016.