

커패시터-분할타입 능동전력디커플링회로를 위한 가상 d-q 전류제어기 설계

김동희, 오원현, 박성민
 홍익대학교 전자전기융합공학과

Design of a Virtual d-q Current Controller for Capacitor-split-type Active Power Decoupling Circuits

Dong-Hee Kim, Won-Hyun Oh, Sung-Min Park
 Dept. of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University

ABSTRACT

본 논문에서는 커패시터-분할타입 능동전력디커플링 회로를 위한 가상 d-q전류 제어기 설계방법을 제안한다. 설계한 제어기의 주파수 특성을 분석하고 MATLAB/Simulink 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서론

단상 시스템에서 발생하는 2차 리플 전력은 전체시스템의 성능을 저하시킨다. 일반적으로 전해 커패시터를 사용하는 수동 디커플링방식이 많이 사용되지만 전해 커패시터의 사용은 시스템의 전력밀도를 낮추고 수명을 단축시킨다. 이 문제를 해결하기 위해 능동전력디커플링(Active Power Decoupling: APD)회로가 연구되고 있다^[1].

일반적으로 커패시터-분할타입 APD회로를 제어하기 위하여 비례공진(Proportional Resonant: PR) 제어기를 포함한 제 3형 보상기를 사용한다. 이러한 제어기는 시스템의 정상상태 오차를 0으로 만들 수 있지만 제어기 설계 및 구현이 복잡하다. 본 논문에서는 커패시터-분할타입 APD회로를 위한 가상 d-q전류 제어기의 설계방법을 제안한다. 가상 d-q변환을 사용하여 ac 성분을 포함하는 커패시터-분할타입 APD 회로의 인덕터 전류를 dc 성분으로 변환하기 때문에 간단한 비례적분(Proportional Integral: PI) 제어기로 ac 성분을 제어할 수 있다.

2. 커패시터-분할타입 능동전력디커플링 모델링 및 제어기 설계

그림 1은 커패시터-분할타입 APD회로를 포함하는 컨버터이다. dc링크를 $C=C_1=C_2$ 인 동일한 커패시터가 분할한다. 각 커패시터의 전압은 180도 위상차이를 갖고 동작하며 dc링크 리플을 제거한다. 커패시터 전압으로부터 APD회로의 전력을 구할 수 있고, APD회로에서 리플 전력을 모두 처리한다고 하면 APD 인덕터 전류의 피크 값과 위상을 구할 수 있다.

2.1 커패시터-분할타입 능동전력디커플링 모델링

그림 2는 S_1, S_2 의 스위칭 상태에 따른 커패시터-분할타입 APD회로의 등가회로이다. R_L, i_m 은 각각 APD회로의 인덕터 저항 값과 ac/dc 컨버터의 출력 전류이다. 스위칭 상태에 따른 등가회로에 따른 커패시터분할타입의 state-space average model은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

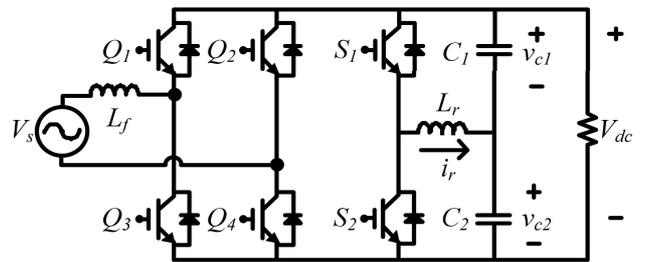


그림 1 커패시터-분할타입 APD 회로가 적용된 단상 ac/dc 컨버터 시스템

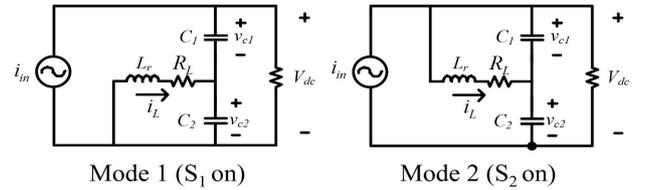


그림 2 S_1, S_2 의 상태에 따른 커패시터-분할타입 APD 회로

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dv_{C1}}{dt} \\ \frac{dv_{C2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L_r} & \frac{d}{L_r} & \frac{d-1}{L_r} \\ -\frac{d}{C} & -\frac{1}{RC} & -\frac{1}{RC} \\ \frac{d-1}{C} & -\frac{1}{RC} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ v_{C1} \\ v_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{C} \\ \frac{1}{C} \end{bmatrix} i_{in} \quad (1)$$

또한 APD회로의 인덕터 전류 식은 다음과 같다.

$$i_L(t) = i_{c1}(t) + i_{c2}(t) \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)를 Laplace 변환을 통하여 듀티비와 APD 인덕터 전류에 관한 식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{APD}(s) = \frac{i_L(s)}{d(s)} = \frac{2V_{dc}Cs}{2L_rCs^2 + 2R_LCs + 1} \quad (3)$$

2.2 가상 d-q 전류 제어기

그림 3은 커패시터-분할타입 APD회로의 인덕터 전류 제어기의 블록다이어그램이다. $D(s)$ 는 APD 인덕터 전류와 직교하는 가상의 전류를 생성하기 위하여 사용된 전역 통과 필터이며 전달함수는 다음과 같다.

$$D(s) = \frac{s - w_0}{s + w_0} \quad (4)$$

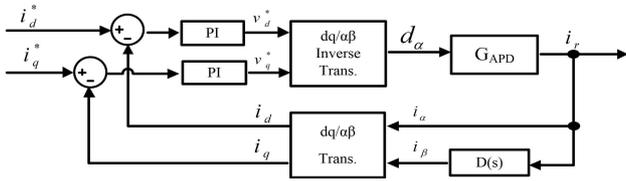


그림 3 가상 d-q 전류 제어기의 블록다이어그램

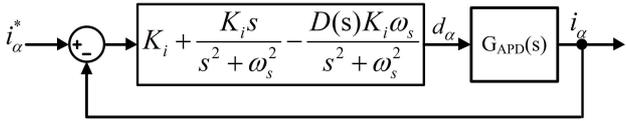


그림 4 식 (6)을 대입한 가상 d-q 전류 제어기의 블록다이어그램

다중입력-다중출력 제어 시스템의 출력 값에 대한 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} d_d(s) \\ d_q(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11}(s) & H_{12}(s) \\ H_{21}(s) & H_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_d(s) \\ E_q(s) \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)에서 $E_q(s)$ 와 $E_d(s)$ 는 d-q축에서의 오차이다. 식 (5)를 사용하여 가상 d-q 전류 제어기의 전달함수를 구하면 식 (6)처럼 표현 가능하며, 그에 따른 블록다이어그램은 그림 4와 같다[2].

$$G_c(s) = \frac{d_α(s)}{E_d(s)} = K_p + \frac{K_i s}{s^2 + ω_s^2} - \frac{D(s)K_i ω_s}{s^2 + ω_s^2} \quad (6)$$

식 (6)에서 $ω_s$ 는 APD 인덕터 전류의 주파수이고 K_p , K_i 는 각각 PI제어기의 이득 값이다. 가상 d-q 전류 제어기는 PR제어기와 D(s)에 의한 식으로 나눌 수 있다.

그림 5는 APD회로의 인덕터 전류 제어기 개루프 보드선도이다. 이득여유는 매우 크며 위상여유는 약 90도이다. 그림 6은 APD회로의 인덕터 전류제어기의 폐루프 보드선도이다. 설계한 제어기는 저역 통과 필터의 보드선도와 비슷하며 제어기의 대역폭은 약 2kHz이다.

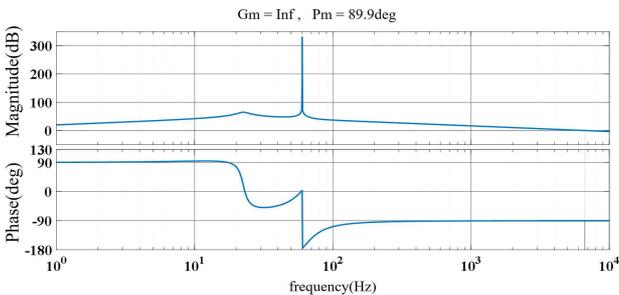


그림 5 APD회로 인덕터 전류 제어기 개루프 보드선도

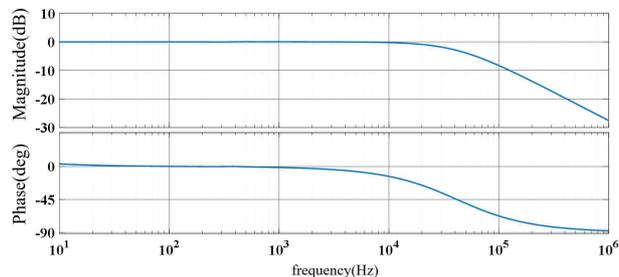


그림 6 APD 인덕터 전류 제어기 폐루프 보드선도

표 1 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Values
Output Power(kW)	3
DC-link Voltage(V)	380
Capacitor-split-type capacitor(μF)	250
Capacitor-split-type inductor(mH)	1.2
Inductor resistance(Ω)	0.0142
Switching frequency(kHz)	30

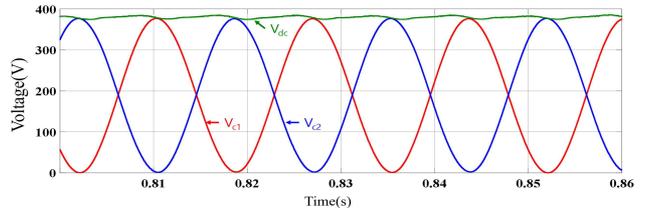


그림 7 dc링크 전압과 커패시터-분할타입 APD 커패시터 전압

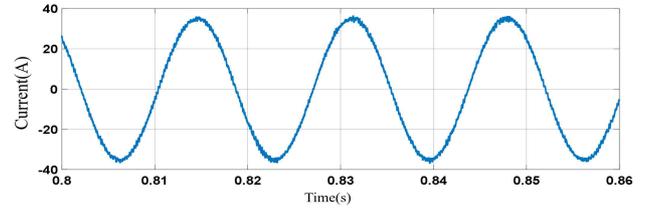


그림 8 커패시터-분할타입 APD회로의 인덕터 전류

3. MATLAB 시뮬레이션 결과

본 논문에서 설계한 전류 제어기의 성능을 검증하기 위하여 표 1과 같은 조건에서 MATLAB/Simulink 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 7은 dc 링크 전압과 커패시터-분할 타입의 상단, 하단 커패시터의 전압을 나타낸다. 상단, 하단 커패시터는 180도의 위상 차이를 갖고 정상상태 dc 링크의 전압 리플 값은 10V를 가지며 dc 링크 평균값의 약 2%의 리플 값을 갖는다. 그림 8은 APD 인덕터 전류의 파형이다.

4. 결론

본 논문에서는 커패시터-분할타입 APD회로를 수학적으로 모델링하고 가상 d-q전류 제어기를 설계하였다. 설계한 제어기의 주파수 특성을 분석하였다. 설계한 제어기의 성능을 확인하기 위하여 MATLAB/Simulink 시뮬레이션을 사용하여 제어기 설계방법을 검증하였다.

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

참고 문헌

- [1] Y. Sun, Y. Liu, M. Su, W. Xiong, and J. Yang, "Review of active power decoupling topologies in single-phase systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 31, pp. 4778-4794, Jul. 2016.
- [2] Y. Gu, Y. Wang, X. Xiang, W. Li, and X. He, "Improved Virtual Vector Control of Single-Phase Inverter Based on Unified Model," *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol.29, pp.611-617. Step. 2014