

능동 전력 디커플링 회로의 커패시턴스 불균형 보상 제어

김남형 이현민* 박성민

홍익대학교 전자전기융합공학과, 삼성전자*

Capacitor Imbalance Compensation Control for Active Power Decoupling Circuits

Nam Hyung Kim, Hyeon Min Lee*, Sung Min Park

Dept. of Electronic & Electrical Engineering, Hongik University, Samsung Electronics*

ABSTRACT

본 논문은 AC/DC 전력 변환 장치 부하단의 저주파 리플을 처리하기 위해 사용되는 커패시터 분할형 능동 전력 디커플링 회로의 커패시턴스 불균형 문제로 발생하는 1차 리플 전력을 보상하기 위한 제어 방법을 제안한다. 제안하는 제어 방법은 MATLAB/Simulink 시뮬레이션을 통해 성능을 검증한다.

1. 서론

고온에 취약하여 수명이 짧은 전해 커패시터를 대신하여, AC/DC 전력 변환 장치 부하단의 저주파 리플을 해결하기 위해 필름 커패시터를 사용하는 커패시터 분할형 능동 전력 디커플링 (Capacitor Split type Active Power Decoupling, CS-APD) 회로를 사용할 수 있다. CS-APD는 동일한 용량을 갖는 두 개의 필름 커패시터를 직렬로 사용하는 구조로, 두 커패시터 전압의 180도 위상차를 이용하여 저주파 리플을 효과적으로 처리한다^{[1]-[2]}. 하지만, 주변 환경 및 제작 과정 등 여러 요인으로 인해 커패시터의 커패시턴스는 불균형이 발생한다. 커패시턴스 불균형은 1차 리플 전력 발생을 야기하여 CS-APD 및 전체 시스템의 신뢰성 및 성능을 감소시킨다.

본 논문은, APD 커패시터의 커패시턴스가 불균형일 때 발생하는 1차 리플 전력을 처리하기 위한 오프셋 보상 제어 방법을 제안한다. 제안하는 제어 방법 MATLAB/Simulink 시뮬레이션을 이용하여 검증한다.

2. 커패시턴스 불균형 보상 제어

2.1 CS-APD 커패시턴스 불균형 보상 원리

APD 상·하단의 커패시터의 커패시턴스가 불균형일 때, APD 커패시터에 인가되는 전력은 다음과 같이 계산된다.

$$P_C = \frac{1}{2} \bar{V}_{dc} V_C \omega (mC - C) \cos(\omega t + \psi) + \frac{1}{2} \omega V_C^2 (mC + C) \sin(2\omega t + 2\psi) \quad (1)$$

mC 와 C 는 각각 APD 상단과 하단 커패시터의 불균형한 커패시턴스를 나타내고, m 은 커패시턴스의 감소량을 나타낸다. (1)을 통해 두 커패시턴스의 불균형이 발생했을 때 1차 리플 전력이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 커패시턴스의 불균형이 발생하면 직류 성분의 전류가 두 커패시터 전압의 차이를 만들어 직류 성분 전압의

불균형을 야기시킨다. 이러한 문제는 저항 부하 일 때 전압의 형태로 dc-link에 나타나게 되며, 그 결과, dc-link 전압 리플을 증가시켜 시스템의 신뢰성을 감소시킨다.

위의 문제는 불균형 보상 제어를 통해 해결할 수 있다. 오프셋 보상 제어를 통해 출력되는 직류 성분의 오프셋을 APD 전류 제어를 통해 출력되는 교류 성분의 듀티에 보상하게 된다. 교류 성분의 듀티에 오프셋 보상을 하면 각 커패시터에 흐르는 직류 전류 성분이 변하게 된다. 직류 전류 성분을 통해 커패시터 전압의 직류 성분은 변하게 되고, 달라지는 상단과 하단의 커패시터 전압은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_{C1} = \frac{1}{1+m} \frac{\bar{V}_{dc}}{2} + V_C \sin(\omega t + \psi) \quad (2)$$

$$v_{C2} = \frac{m}{1+m} \frac{\bar{V}_{dc}}{2} - V_C \sin(\omega t + \psi) \quad (3)$$

(2)-(3)을 통해 커패시터에 인가되는 전류는 다음과 같다.

$$i_{C1} = mC \frac{dv_{C1}}{dt} = m\omega CV_C \cos(\omega t + \psi) \quad (4)$$

$$i_{C2} = C \frac{dv_{C2}}{dt} = -\omega CV_C \cos(\omega t + \psi) \quad (5)$$

(2)-(5)를 통해 APD 커패시터에 인가되는 전력을 구할 수 있다.

$$P_C = v_{C1} i_{C1} + v_{C2} i_{C2} = \frac{1}{2} \omega (1+m) CV_C^2 \sin(2\omega t + 2\psi) \quad (6)$$

(6)의 결과를 통해 커패시턴스의 불균형이 발생했을 때, 직류 성분의 오프셋 보상으로 1차 리플 전력을 제거할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

2.1 제안하는 APD 커패시터의 커패시턴스 불균형 보상 방법

그림 1은 불균형 보상 제어가 추가된 APD 제어 블록도를 나타낸다. 커패시턴스 불균형으로 인해 발생하는 dc-link 전압의 1차 리플 성분을 BPF를 이용하여 추출한다. 추출된 1차 리플 전압은 α 축 성분으로 지정하고, APF를 지나 90도 위상 지연된 1차 리플 성분을 가상의 β 축 성분으로 지정하여 단상 dq 변환을 한다. 이후, 1차 리플 성분을 제거하기 위해 d축 성분이 0이 되도록 PI 제어하여, dc-link의 1차 리플을 제거하고, 직류

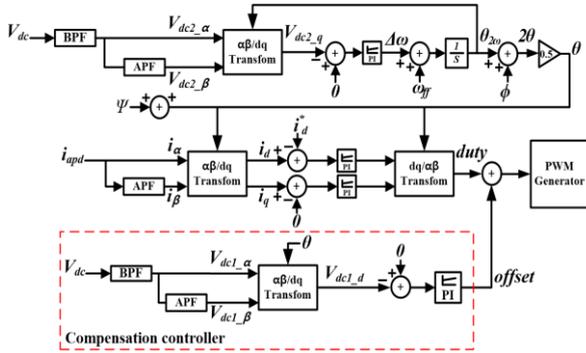


그림 1 오프셋 보상 제어 블록 다이어그램

표 1 시뮬레이션 파라미터

Parameter(Unit)	Value
Output Power(kW)	1
Input Voltage(Vrms/Hz)	220/60
DC-link Voltage(V)	380
Switching Frequency(kHz)	40
APD Inductor(mH)	2
APD Capacitors(μF)	100, 130

성분의 오프셋을 생성한다. 생성된 오프셋은 교류 성분의 듀티를 보상하며, 이에 따라, 커패시터에 흐르는 직류 성분의 전류 및 커패시터 전압이 바뀌게 된다. 그 결과, 1차 리플 전력이 제거가 되며, dc-link 전압의 리플이 감소한다.

3. 시뮬레이션

APD 상·하단 커패시터의 커패시턴스 불균형 보상 제어에 대한 검증은 MATLAB/Simulink를 통해 진행한다. 발생할 수 있는 두 가지 경우의 불균형에 대해 시뮬레이션을 진행한다. 시뮬레이션의 파라미터는 표 1의 조건을 이용한다.

그림 2는 두 커패시터의 커패시턴스 불균형이 발생했을 때 커패시터 전압과 dc-link 전압을 보여준다. 두 개의 커패시터의 커패시턴스 불균형으로 인해 발생하는 1차 전력 리플은 저항 부하로 인해 dc-link 전압에 나타나는 것을 확인할 수 있다. 리플 전압은 평균 dc-link 전압의 19%로 흔들리는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 커패시턴스의 불균형은 시스템의 성능을 저하시키며, 고장의 원인이 될 수 있다.

그림 3은 보상 제어를 추가했을 때 커패시터 전압과 dc-link 전압의 파형이다. 보상 제어를 통해 dc-link 전압에 나타나는 1차 리플 성분은 제거되어, dc-link 전압의 리플은 19%에서 약 3% 미만으로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문은 커패시터 분할형 능동 전력 디커플링 회로의 커패시턴스 불균형으로 인해 발생하는 1차 전력 리플을 제거하는 보상 제어 방법을 제안했다. 보상 제어를 통해 출력되는 직류 성분의 오프셋을 전류 제어를 통해 출력되는 듀티에 보상함으로써 1차 전력 리플을 제거할 수 있었다. 시뮬레이션 결과, dc-link 평균 전압의 19%로 흔들리던 리플 전압은 보상 제어를 통해 약 3%로 감소하는 것을 확인했다. 보상 제어 방법은 MATLAB/Simulink을 통해 성능 검증을 진행했다.

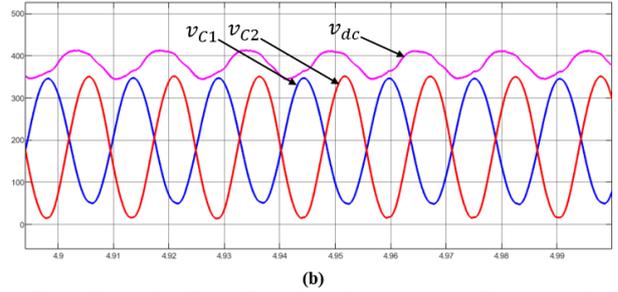
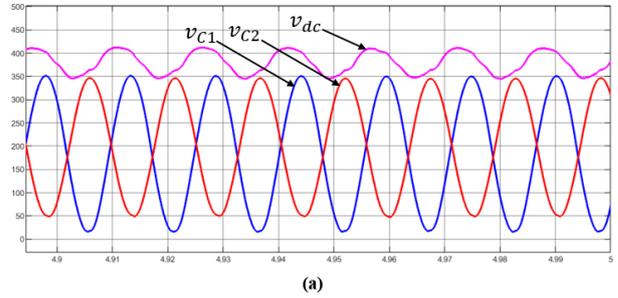


그림 2 보상 제어를 적용하지 않은 dc-link 전압과 APD 커패시터 전압

(a) C1: 100 μF, C2: 130 μF (b) C1: 130 μF, C2: 100 μF

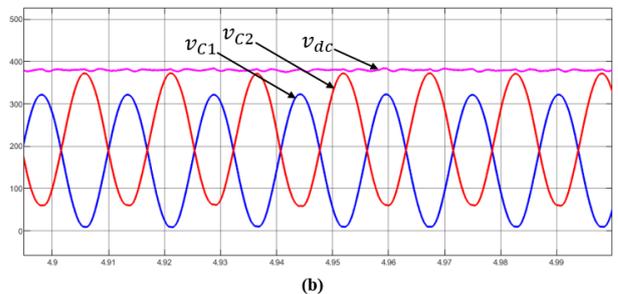
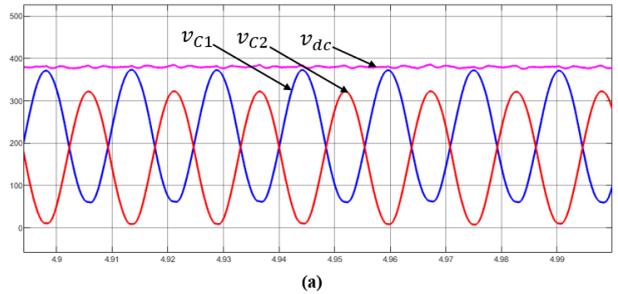


그림 3 보상 제어를 적용한 dc-link 전압과 APD 커패시터 전압

(a) C1: 100 μF, C2: 130 μF (b) C1: 130 μF, C2: 100 μF

참고 문헌

[1] D. H. Kim, S. M. Park, "Power decoupling method with robust voltage control strategy for electric vehicle applications," J. Power Electron. 20, 1352-1363 (2020).
 [2] 김정태, 이현민, 박성민 (2021), "모듈형 플러그인 능동 전력 디커플링 회로를 위한 제어 방법," 전력전자학회 학술대회 논문집, 314-315.