

전기자동차 구동시스템을 이용한 병렬형 능동전력디커플링 회로에 관한 연구

김동희, 김승권, 박성민
 홍익대학교 전자전기공학과

A Study on Parallel Active Power Decoupling Circuits Using EV Traction System

Dong-Hee Kim, Seong-Gwon Kim, Sung-Min Park
 Dept. of Electronic & Electrical Engineering, Hongik University

ABSTRACT

본 논문에서는 전기자동차 온-보드 충전기용 단상전력변환 시스템에서 능동전력디커플링 회로를 병렬로 연결하는 시스템 구조 및 그에 대한 제어 방법을 제시한다. 제안하는 시스템은 전기자동차 구동 인버터의 전력반도체와 구동모터의 고정자를 이용하여 능동전력디커플링 회로를 구성함으로써 추가적인 부품을 최소화하고 전체 시스템의 전력밀도를 높임과 동시에 가격 상승을 억제한다. 제안한 방식의 성능은 MATLAB/Simulink 시뮬레이션을 활용한 결과를 통해 비교 분석하였다.

1. 서론

전기자동차 시장의 성장과 함께 고효율, 고전력 밀도, 높은 신뢰성 및 저가의 온-보드 충전기에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.^[1] 전기자동차에 탑재된 온-보드 충전기는 배터리 충전 또는 방전을 위해 단상 ac전원을 일정한 dc전원으로 변환하기 때문에 2차 리플 전력문제가 있다. 2차 리플 전력을 제거하기 위하여 커패시턴스가 큰 전해 커패시터를 사용하는 수동 디커플링 방식이 많이 사용된다. 하지만 전해커패시터의 사용은 시스템 수명을 단축시키고 부피를 증가시켜 전력밀도를 낮추는 문제점이 있다. 이러한 전해커패시터의 문제점을 해결하기 위하여 리플전력을 추가적인 회로에서 운용하는 능동전력디커플링(Active Power Decoupling: APD)방식이 연구되고 있다.^[2] APD를 적용하면 dc링크 커패시턴스를 줄임으로써 전해 커패시터를 필름커패시터로 대체하여 시스템 수명을 늘리고, 전력밀도를 높일 수 있다. 하지만 회로에 추가적으로 다수의 전력반도체와 에너지저장장치가 필요로 하는 단점이 있다.

본 논문에서는 전기자동차 모터의 고정자 인덕턴스와 인버터의 전력 스위치를 사용하는 병렬형 APD 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 APD 회로를 위한 추가적인 부품을 최소화할 수 있으므로 비용을 저감하고 부피가 줄어들어 전력밀도를 향상시킬 수 있고 3상 인터리브 PWM 방식을 사용하여 인덕터 전류의 리플전류를 감소하여 신뢰성을 향상시킨다.

2. 제안하는 병렬형 능동전력디커플링 회로

제안하는 병렬형 능동전력디커플링 회로는 그림 1과 같이 3개의 커패시터-분할타입 능동전력디커플링 회로가 병렬로 연결되어 있는 구조이다. 병렬로 연결된 능동전력디커플링 회로의 추가되는 전력반도체와 인덕터와 같은 에너지 저장장치는 충전 중에는 사용하지 않는 전기자동차 구동모터의 고정자

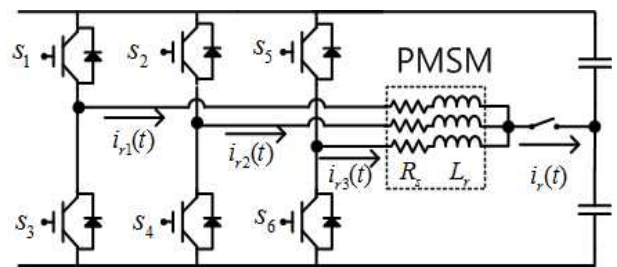


그림 1 제안하는 병렬형 능동전력디커플링 회로

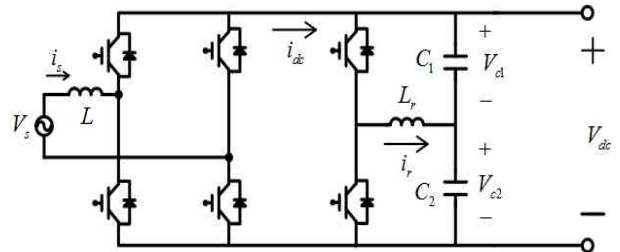


그림 2 PFC 컨버터와 커패시터-분할타입 능동전력디커플링 회로

인덕턴스와 인버터의 전력반도체를 사용하기 때문에 제안된 시스템에서는 추가 부품을 필요로 하지 않는다.

2.1 커패시터-분할타입 능동전력디커플링 방법

커패시터-분할타입 능동전력디커플링방법은 그림 2와 같이 1개의 인덕터와 두 개의 커패시터로 구성된 대칭형 하프-브릿지 회로이며 두 개의 커패시터는 서로 동일한 커패시턴스를 갖는다. 상단 커패시터와 하단 커패시터의 전압은 서로 180도의 위상 차이를 가지고 변동하게 된다. 각각의 dc링크 커패시터 전압의 식은 다음과 같이 표현된다.

$$V_{d1}(t) = \frac{\overline{V}_{dc}}{2} + V_c \sin(\omega t + \psi) \quad (1)$$

$$V_{d2}(t) = \frac{\overline{V}_{dc}}{2} - V_c \sin(\omega t + \psi) \quad (2)$$

\overline{V}_{dc} 는 dc링크 전압의 평균값, V_c 는 커패시터 전압이 흔들리는 크기를 의미한다. 하프-브릿지 전력(P_{HB})은 두 커패시터 전압으로부터 구할 수 있다.^[2]

$$P_{HB} = (\omega C V_c^2 - 2\omega^3 C^2 V_c^2 L_r) \sin(2\omega t + 2\psi) \quad (3)$$

역률보상 회로가 이상적으로 동작하고, 하프-브릿지에서 리플 전력을 모두 처리한다고 가정하면, V_c 의 크기와 커패시터 전압의 위상을 구할 수 있다.

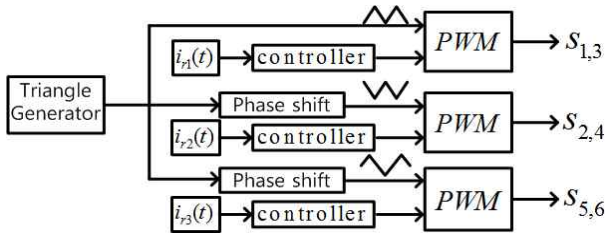


그림 3 병렬형 능동전력디커플링 회로를 위한 3상 인터리브 PWM 방법

$$V_c = \sqrt{\frac{\left(\frac{V_s I_s}{2}\right)^2 + \left(\frac{L I_s \omega}{2}\right)^2}{\omega C - 2\omega^3 C^2 L_r}} \quad (4)$$

$$\psi = \frac{1}{2}\alpha = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{V_s}{L I_s \omega}\right) \quad (5)$$

또한 위와 같은 방법으로 컨버터의 전력(S)에 따라 요구 되는 커패시터-분할타입의 커패시턴스(C)를 구할 수 있다.

$$C = \frac{4S}{\omega(V_{dc})^2} \quad (6)$$

2. 2 3상 인터리브 PWM

그림 3은 병렬형 능동전력디커플링을 위해 120도 위상차를 갖는 캐리어 신호로부터 생성되는 3개의 PWM 생성 방법이다. 각 위상의 인덕터 전류는 개별 전류 제어기를 통해 제어된다. 제안된 제어 방법은 APD 커패시터를 통해 흐르는 리플 전류를 감소시킬 수 있다. 이와 같은 병렬형 능동전력디커플링에 사용되는 3상 인터리브 PWM방식은 dc커패시터에 흐르는 스위칭 리플전류 성분의 전체 크기를 감소시킨다.

3. MATLAB 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안하는 시스템의 성능을 검증하기 위하여 MATLAB/Simulink 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션은 표 1의 조건에서 진행되었고 전기자동차 모터의 고정자 인덕턴스는 이상적인 PMSM의 고정자로 가정하였다. 그림 4는 dc링크 전압과 커패시터-분할 타입의 상단, 하단 커패시터의 전압을 나타낸다. 상단, 하단 커패시터는 180도의 위상 차이를 갖고 크기는 계산된 V_c 값에 의하여 동일하게 제어된다. 정상상태 dc 링크의 전압 리플 값은 14V이며 dc링크 평균값의 약3%의 리플 값을 갖는다. 그림 5는 3상 인덕터 전류의 합이다. 그림 5 (a)는 인터리브 방식을 쓰지 않고 각 상의 인덕터 전류를 각각 제어 했을 때의 커패시터에 들어가는 인덕터 전류의 총합을 나타낸다. 인덕터 전류리플은 인덕터 전류가 피크일 때 최대 15A의 리플 전류값을 갖는다. 그림 5 (b)는 3상 인터리브 PWM 방식을 적용하여 인덕터 전류를 제어 했을 때의 인덕터 전류의 총합을 나타낸다. 인덕터 전류리플은 인덕터 전류가 피크일 때 최대 9A의 리플 전류값을 갖는다. 3상 인터리브 PWM을 사용했을 때 전류 리플의 크기가 약 6A 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 전기자동차 충전기의 2차 리플 전력 문제를 더 효과적으로 해결하기 위해 APD 회로를 병렬로 연결하고 APD 회로에 필요한 전력스위치와 에너지 저장장치를 기존 전기자동차의 부품으로 대체하여 전력밀도를 높일 수 있는 병렬형 APD 시스템과 병렬 운전에 필요한 제어 방법을 제안했다.

표 1 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Values
Output Power(kW)	3
dc-link Voltage(V)	380
APD capacitor(μF)	250
APD inductor(mH)	1.2
Switching frequency(kHz)	30

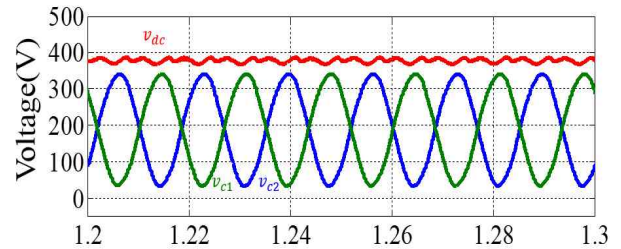


그림 4 dc 링크 전압과 커패시터-분할 타입의 상단, 하단 커패시터 전압

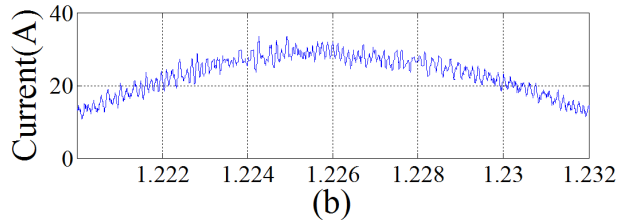
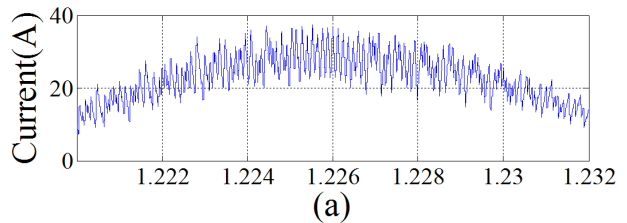


그림 5 커패시터-분할 타입 인덕터 전류 (a)기존 PWM 방식 (b)3상 인터리브 pwm 방식

또한 APD 회로를 사용하여 커패시턴스를 줄여 전해커패시터를 부피가 작고 수명이 긴 필름커패시터로 대체하였다. 제안하는 시스템의 성능은 MATLAB/Simulink를 사용하여 확인하였다.

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

참고 문헌

- [1] B. Kim, M. Kim, and S. Choi, "Single-stage electrolytic capacitor-less AC-DC converter with high frequency isolation for EV charger," IEEE 8th int. Power Electron. Motion Control Conf.(IPEMC-ECCE Asia), Hefei, 2016, pp. 234-238
- [2] 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.