

개방 권선형 전동기 시스템을 이용한 능동 전력 디커플링 회로

김남형, 박성민

홍익대학교 전자전기융합공학과

Active Power Decoupling Circuit using an Open End Winding Motor System

Nam-Hyung Kim, Sung-Min Park

Dept. of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University

ABSTRACT

본 논문은 개방 권선형 영구자석 동기전동기를 이용한 커패시터 분할 타입 병렬형 능동 전력 디커플링(Active Power Decoupling, APD) 구동 회로를 제안한다. 제안하는 회로의 성능은 MATLAB/Simulink를 통해 검증한다.

1. 서론

최근 전기자동차 시장이 활성화되고 있다. 이에 따라 전동기 구동에 관련된 연구 개발이 중요해지면서, 그중 개방 권선형(Open End Winding, OEW) 전동기에 관한 연구와 관심이 증가하고 있다. 듀얼 인버터를 적용한 OEW 전동기의 사용은 기존 형태의 전동기 대비 동일한 dc-link 전압에서 전동기에 더 큰 전압 인가가 가능하며 이에 고속 운전영역이 확장되며 동일전력에서 전류의 저감을 통해 효율을 증가시킬 수 있다. 또한, 하나의 인버터 고장 시 나머지 인버터를 통한 비상 제어 운전이 가능한 장점을 가지고 있다. 본 논문은 전기자동차 시스템의 ac/dc 컨버터 부하단에 발생하는 저주파 리플 전력을 제거하기 위해 사용되는 전해 커패시터를 대신하는 APD 회로를 OEW 전동기를 이용한 회로로 제안한다. 제안하는 APD 회로의 성능은 MATLAB/Simulink를 통해 검증한다.

2. 제안하는 능동전력 디커플링 회로

2.1 OEW-PMSM을 적용한 병렬형 APD 회로

Fig. 1은 ac/dc 컨버터 부하단에 전해 커패시터를 사용하는 기존 공통 전압 모드의 OEW 회로를 보여준다. Fig. 2의 (a)는 Fig. 1의 ac/dc 컨버터 부하단의 전해 커패시터를 필름 커패시터를 사용하는 APD로 대체한 회로를 보여준다. APD 회로의 사용을 통해 시스템의 수명과 신뢰성을 증가시킬 수 있지만, APD 구조를 사용하게 되며 회로를 구성하는 전력 반도체 및 APD 인덕터, 방열판 등 추가 부품 발생으로 인해 가격과 부피가 증가한다는 단점이 생긴다. Fig. 2의 (b)는 본 논문에서 제안하는 OEW 시스템을 이용한 APD 회로를 보여준다. 기존 OEW 전동기 시스템에 적용된 APD 회로는 추가적인 전력 반도체 및 인덕터를 사용한다. 또한, APD의 전력 반도체를 이용한 고주파 제어로 인해 발생하는 열을 감소시키기 위해 사용되는 방열판이 추가되므로 부피 감소에 어려움이 있다. 제

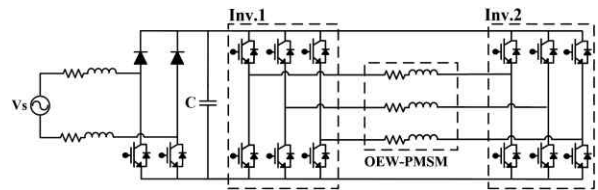


Fig. 1 Dual inverter fed OEW-PMSM system

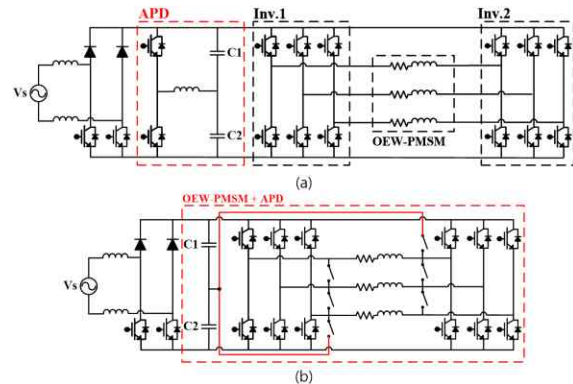


Fig. 2 (a) Dual inverter fed OEW-PMSM with capacitor-split type APD, (b) Proposed OEW-APD topology

하는 회로는 추가되는 전력 반도체 및 인덕터 그리고 방열판 없이 OEW 전동기를 구성하는 소자와 전자기 릴레이를 사용하여 부피 감소 및 비용 절감을 기대할 수 있다. 제안하는 회로는 OEW를 구성하는 인버터의 전력 반도체와 전동기 고정자 권선의 인덕턴스를 APD 회로의 전력 반도체와 인덕터로 대체하여 회로를 구성한다.^[1] 각 상의 개별 APD 인덕터 전류를 키르히호프 전류 법칙에 따라 총 APD 인덕터 전류로 생성하기 위해 중성점을 생성해야 한다. 중성점을 생성하기 위해 제안하는 회로는, 권선 사이에 전자기 릴레이를 추가한다. OEW 전동기는 듀얼 인버터를 사용하지만 제안하는 APD 회로의 동작은 단일 인버터를 사용하기 때문에 특정 인버터만 사용 시, 인버터 간의 수명 불균형을 일으킬 수 있다. 인버터를 교대로 사용하기 위해 양단의 인버터와 전동기의 연결 부분 모두 권선 사이에 릴레이를 추가한다.

제안하는 회로의 동작은 Fig. 3과 같다. OEW 전동기의 구동과 달리, 듀얼 인버터가 아닌 단일 인버터로 동작하기 때문에 APD 동작 시, 사용하지 않는 인버터의 전력 반도체 및 릴

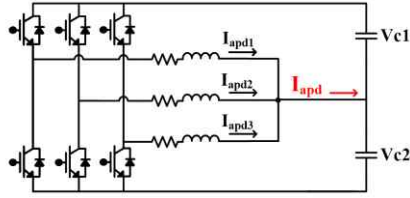


Fig. 3 Proposed OEW-APD circuit operation

레이 스위치는 모두 개방 상태로 유지한다. 반대로, 동작에 사용되는 인버터의 전력 반도체에 게이트 신호를 인가한다. 릴레이 스위치는 단락으로 유지하여 권선에 중성점을 형성해 커패시터에 연결되어 APD 전류가 형성된 마디를 통과한다.

2.2 OEW-PMSM 병렬형 APD 제어방법

Fig. 4는 OEW-PMSM을 이용한 능동 전력 디커플링 제어 블록도를 나타낸다. 전압 제어기는 대역 통과 필터를 통해 생성된 dc-link 전압의 2차 리플 전압을 피드백 제어와 비례적분 제어를 통해 인덕터 전류의 지령치로 출력한다. 전류 지령치를 나눠 각 상의 개별 인덕터 전류의 지령치가 된다. 전류 제어는 단상 시스템의 d-q 변환을 이용하기 위해 전역 통과 필터를 통한 개별 인덕터 전류의 가상 q축 성분을 생성한다. 인덕터 전류는 PLL회로를 통해 출력된 입력전압의 위상과 입력전압과 상단 커패시터의 위상차의 합으로 동기화한다. 비례-적분 제어 및 d-q 변환을 통해 생성된 듀티는 120도 위상차의 캐리어를 이용하는 인터리빙 방식을 통해 PWM을 생성하여 인버터의 전력 반도체를 제어한다.

3. 실험 결과

본 논문은 OEW-PMSM을 이용한 병렬형 APD의 구동 회로를 제안한다. 회로의 성능을 검증하기 위해 표 1의 조건을 통해 MATLAB/Simulink 시뮬레이션을 진행했다. 그림 5와 6은 제안하는 회로의 시뮬레이션 결과를 보여준다.

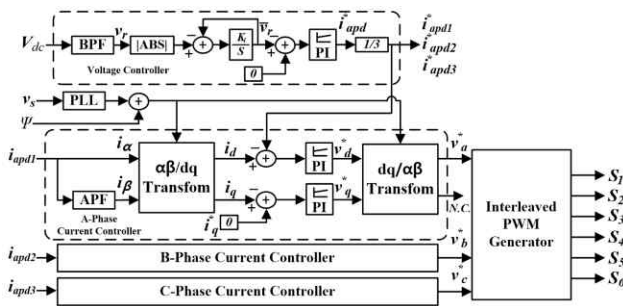


Fig. 4 OEW-APD control block diagram

Table 1 Simulation parameter

Parameter	Values
Input Voltage (V/Hz)	220/60
Output Power (kW)	3
DC-link Voltage (V)	380
APD Inductor (mH)	1.2
APD Inductor Resistance (Ω)	0.0142
APD Capacitor (μ F)	250
Switching Frequency (kHz)	40

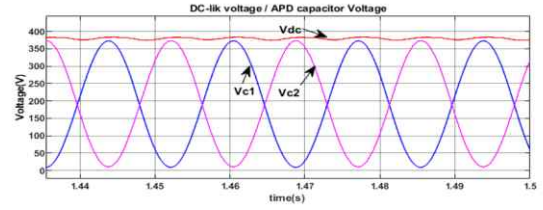


Fig. 5 DC-link voltage and APD capacitor voltage

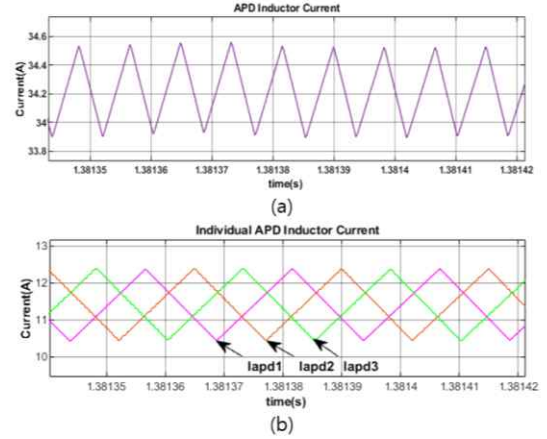


Fig. 6 (a) Sum of APD inductor current, (b) Individual APD inductor current

Fig. 5는 부하단의 출력전압과 APD 상단, 하단 커패시터 전압의 위상차를 보여준다. 부하단 출력전압의 평균 전압은 380V이며, 출력전력은 3kW이다. 리플 전압의 크기는 약 5V로 2% 미만의 수준으로 정상적인 제어가 된다. APD 상단, 하단 커패시터 전압의 위상차는 180도이다. 두 커패시터 전압의 180도 위상차를 통해 저주파 리플이 제거되어 출력전압을 이상적인 정전압으로 만든다.

Fig. 6의 (a)는 총 인덕터 전류를 보여주고 있으며, Fig. 6의 (b)는 개별 인덕터 전류의 120도 위상차를 보여준다. 인터리브드 PWM 방식을 통해 각 상의 개별 APD 인덕터 전류에 120도 위상차가 발생하게 되고 각 전류의 리플을 상쇄한다. 인덕터의 전류는 인터리빙 방식을 사용하지 않았을 때 리플은 약 6A이며, 인터리빙 방식을 사용했을 시, 전류의 리플은 약 0.6A로 1/10만큼 감소하게 된다.

4. 결론

본 논문에서는 권선 개방형 영구자석 동기전동기를 이용한 능동 전력 디커플링 회로를 제안하였다. 제안하는 회로가 동작할 때, 개방되는 인버터 및 릴레이에 의해 회로가 정상적인 동작이 되는지 확인했다. 시뮬레이션을 통해 dc-link 전압과 APD 커패시터 전압, 각 상의 개별 APD 인덕터 전류의 정상적인 제어를 확인했다. 이를 통해 가격과 부피가 감소한 고신뢰성 전해 커패시터가 없는 권선 개방형 전동기 시스템 구현이 가능함을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Dong-Hee Kim, Sung-Min Park, "Power decoupling method with robust voltage control strategy for electric vehicle applications," Journal of Power Electronics, vol. 20, pp. 1352-1363, NOV. 2020.