

전류연속모드 토렘폴 부스트 역률보상회로에서의 SiC MOSFET 적용 연구

김동현*, 최성진*, 이흥희*, 장바울**

*울산대학교 전기공학부, **서울대학교 전기정보공학부

A Feasibility Study on CCM Totem-pole Boost Bridgeless Power Factor Correction Converters using SiC MOSFET

Dong Hyun Kim*, Sung Jin Choi*, Hong Hee Lee*, Paul Jang**

*University of Ulsan, **Seoul National University

ABSTRACT

토렘폴 구조는 브리지리스 부스트 역률보상회로 중에서도 저 손실, 고효율, 저비용 그리고 낮은 전도 EMI의 특징으로 인해 많이 사용된다. 토렘폴 구조의 역률보상 회로는 내부 다이오드의 역회복 문제로 인해 Si MOSFET을 이용한 전류연속모드 구동할 수 없어 전류 불연속 모드 혹은 임계 도통 모드로 동작시키는 것이 통상적이다. 본 논문에서는 역회복 문제를 해결해 전류연속모드 구동하기 위해 기존 Si MOSFET보다 낮은 역회복 전하(Q_{rr})와 역회복 시간(T_{rr})를 가지는 SiC MOSFET을 이용하여 토렘폴 역률 보상 회로를 구현하고 이를 시뮬레이션과 실험을 통해 검증했다.

1. 서론

일반적으로 기존 역률보상회로에 사용되는 전력용 스위치 소자로는 실리콘 기반의 MOSFET 소자가 있다. 하지만 토렘폴 구조의 부스트 역률보상회로에서는 전류연속모드로 동작 시 MOSFET 내부 다이오드의 역회복 문제로 인해 Si MOSFET에 큰 열 손실이 발생하여 효율과 신뢰성이 떨어지게 된다. 이러한 기존의 전력용 스위치 소자의 효율을 높이기 위해 실리콘보다 우수한 물성 특성을 가지는 SiC(탄화규소)를 이용하여 높은 효율을 갖는 전력용 스위치 소자를 개발되었고 SiC MOSFET은 큰 밴드갭과 우수한 열 방출특성을 가지고 있고 고속 스위칭 시 발생하는 손실을 줄일 수 있으며 고내압, 대전류에서도 사용이 용이하다^[1]. 본 논문에서는 SiC의 특성을 이용하여 토렘폴 구조의 역률보상회로의 전류연속모드 동작을 가능하게 하고 효율과 신뢰성을 높이는 방안에 대하여 검증한다. 또한, SiC MOSFET과 Si MOSFET의 특성을 비교하여 SiC MOSFET의 성능을 확인하고 역률보상회로 시뮬레이션과 실험을 통해 그 구현 가능성을 확인한다.

2. SiC와 Si MOSFET의 비교

SiC MOSFET과 Si MOSFET의 성능 비교를 위하여 표 1에 비슷한 정격의 두 소자를 각각 Si MOSFET (SiHP28N65EF), SiC MOSFET (SCT2120AF)로 선정하였다. 데이터시트 특성 비교 결과 SiC MOSFET의 스위칭 상승/

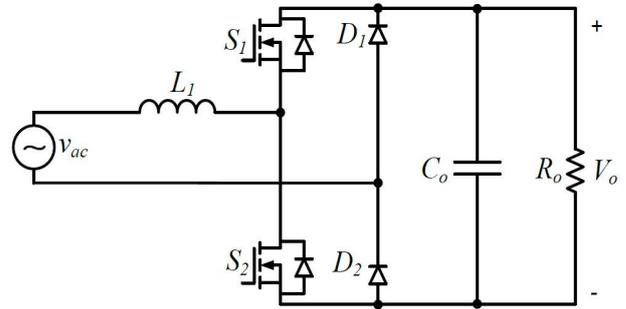


그림 1 토렘폴 부스트 역률보상회로

표 1 Si MOSFET과 SiC MOSFET의 특성 비교

Parameter	Si MOSFET	SiC MOSFET
V_{DS}	650V	650V
I_D	28A	29A
R_{DS}	102m Ω	120m Ω
T_r	44ns	31ns
T_f	51ns	19ns
E_{ON}/E_{OFF}		61/51uJ
T_{rr}	174ns	33ns
Q_{rr}	1.1uC	53nC

하강 시간(T_r/T_f), 스위치 온 저항(R_{DS}), 역회복 시간/전하(T_{rr}/Q_{rr})가 Si MOSFET에 비해 더 좋은 특성 값을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 그러므로 Si MOSFET 대신에 SiC MOSFET을 사용한다면 턴 온/오프 스위칭 손실, $R_{DS(ON)}$ 로 인한 도통 손실 그리고 역회복 과도 손실이 급격히 줄어들어 효율이 더 높아질 것이라는 사실을 확인할 수 있다.

3. 토렘폴 구조의 부스트 역률보상회로

3.1 회로 구성

그림 1은 토렘폴 구조의 부스트 역률보상의 회로도도를 나타낸다. 이 회로는 기존 역률보상회로에서 브리지 다이오드 정류단을 제거하고 한 쪽 레그에는 스위칭 소자 SiC MOSFET(S_1, S_2), 다른 한 쪽 레그에는 저주파수 다이오드 Diode(D_1, D_2)를 위치시키고 입력단에는 교류입력 전원과 인덕터(L_1), 출력단에는 커패시터(C_o)로 구성되어 있다.

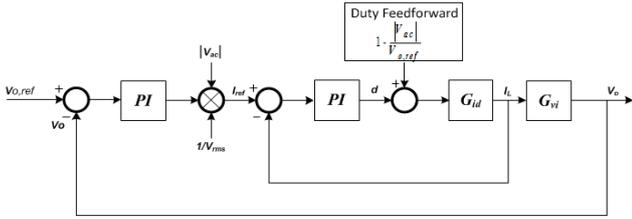


그림 2 토템폴 제어 블록도

3.2 동작 특성

이 토템폴 구조의 부스트 역률보상회로는 기존 부스트 역률보상회로와 달리 교류 입력 전압이 양일 때는 \$S_2\$가 주 스위칭, \$D_2\$가 60Hz 동기 스위칭, \$S_1\$가 보조 스위칭 동작을 하고 입력 전압이 음일 때는 \$S_1\$가 주 스위칭, \$D_1\$가 60Hz 동기 스위칭, \$S_2\$가 보조 스위칭 동작을 한다.

입력 전압이 양일 때와 음일 때의 동작을 회로의 방정식으로 나타내면 식 (1), (2)과 같다.

$$L \frac{di_L}{dt} = DV_{ac} + (1-D)(V_{ac} - V_o) \quad (1)$$

$$C \frac{dv_o}{dt} = (1-D)i_L - \frac{v_o}{R} \quad (2)$$

3.3 전류 및 전압 보상기 설계

위의 식(1), (2)을 통해 토템폴 부스트 컨버터 소신호 모델링으로부터 얻은 시비율 전류 전달함수(\$G_{id}\$) 및 출력전압 기준전류 전달함수(\$G_{vi}\$)를 각각 식 (3)과 식 (4)로 나타낸다.

$$G_{id} = \frac{\hat{i}}{d} = \frac{CV_o s + 2(1-D)I_L}{(LC)s^2 + (\frac{L}{R})s + (1-D)^2} \approx \frac{V_o}{sL} \quad (3)$$

$$G_{vi} = \frac{\hat{v}_o}{\hat{i}_L} = \frac{(1-D)V_o - LI_L s}{CV_o s + 2(1-D)I_L} \approx \frac{1}{sCV_o} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)을 통해서 전류루프게인과 전압루프게인을 얻은 다음 PI제어기를 사용하여 전류제어기(Inner Loop)는 교차주파수를 5kHz, 위상 여유는 60도 이상으로 설계하였고 전압 제어기(Outer Loop)는 교차주파수를 20Hz, 위상 여유는 60도 이상으로 설계하였다. 그림 2는 전체 제어루프를 블록도로 나타낸 것이다.

4. 시뮬레이션 결과

그림 3는 시뮬레이션에 사용된 회로로 전력단, DLL 블록, PWM 블록으로 구성되어 있다. 디지털 제어기는 c 코드로 구현하여 DLL 블록을 생성하였고 입력 전압의 극성에 따라 각각의 스위치에 게이트 신호가 인가될 수 있게 PWM 블록을 구현하였다. 그림 4는 입력 전압과 입력 전류의 위상을 확인하기 위해서 인덕터 전류 스케일을 10배 크게 하고 전력이 1kW인 부하에서 입력전압, 입력전류, 출력전압의 시뮬레이션 파형을 보인 것으로 입력전압과 입력전류의 역률은 0.993, THD는 11%가 관측되는 것을 알 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 SiC MOSFET를 이용한 토템폴 구조의 역률보상회로에서 전류연속모드 동작을 위한 회로를 구성하고 교

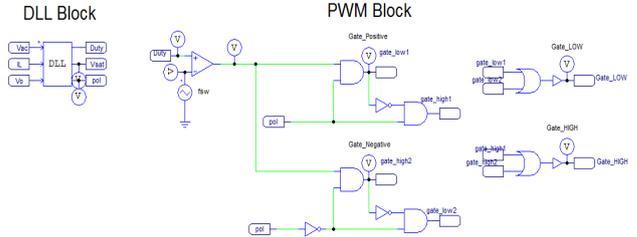
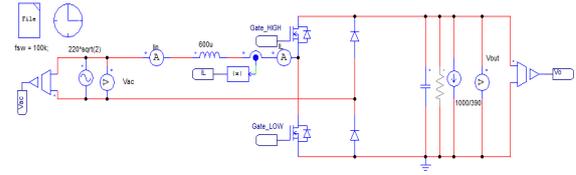


그림 3 토템폴 구조의 부스트 역률보상회로 시뮬레이션 PSIM 회로도

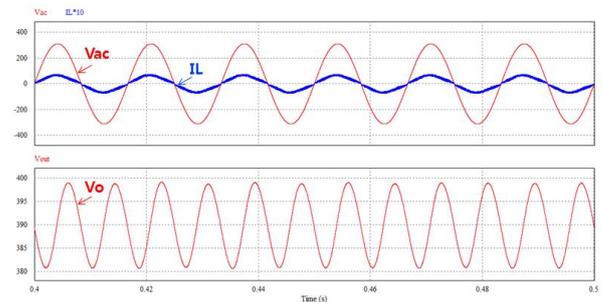


그림 4 시뮬레이션 파형

표 2 디지털 전압/전류 제어기 설계 사양

Control Loop	Inner Loop	Outer Loop
PI controller	\$K_p = 0.65, K_i = 20\$	\$K_p = 0.001, K_i = 5\$
\$f_c\$ (Crossover frequency)	5kHz	20Hz
PM (Phase Margin)	\$60^\circ\$	\$62.3^\circ\$

류 입력전압 220V, 출력 직류 전압 390V, 출력 전력 1kW, 스위칭 주파수 100kHz 조건에서 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 확인했다. 향후 PSIM의 Thermal model 블록을 이용하여 SiC MOSFET 성능 예측과 함께 실험을 통해 승압용 직류전원장치에 적용하고, 기존 Si MOSFET보다 SiC MOSFET 소자가 고속 스위칭과 역회복 특성이 우수하고 역률보상회로에서도 다양하게 사용될 가능성을 확인하고자 한다.

참고 문헌

- [1] 강인호, "SiC 전력반도체 소자기술 동향", 세라미스트 16(4), 한국 세라믹학회, 2013.7
- [2] Paul Jang, Sang Woo Kang, Bo Hyung Cho, Jin Han Kim, Han Sol Seo, and Hyun Soo Park "Totem pole Bridgeless Boost PFC Converter Based on GaN FETs", The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 20, No. 3, June 2015
- [3] Je Hyun Yi, Paul Jang, Sang Woo Kang and Bo Hyung Cho, "A CCM Interleaved Totem pole Boost Bridgeless Power Factor Correction Circuit", Power Electronics Annual Conference, 33 34pg, Nov 2015