

역회복 현상을 고려한 전기자동차용 IPT 시스템의 Semi-Bridgeless 정류기 분석 및 설계

손원진, 이재한, 안상준, 변중은, 이병국[†]

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Analysis and Design of Semi-Bridgeless Rectifier in Inductive Power Transfer Systems for Electric Vehicles considering Reverse Recovery Phenomenon

Won-Jin Son, Jae Han Lee, Sangjoon Ann, Jongeun Byun, and Byoung Kuk Lee[†]

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 높은 주파수로 동작하는 전기자동차 충전용 자기유도방식 무선전력전송 (inductive power transfer, IPT) 시스템의 2차 측 semi-bridgeless 정류기 (semi-bridgeless rectifier, SBR)의 설계 방법을 제안한다. 높은 주파수 동작 시 SBR에 발생하는 발열 문제와 역회복 현상에 대해 분석하고, 분석 결과를 바탕으로 SBR용 스위치의 설계 요구 사항을 제안한다. 제안하는 요구 사항을 만족하는 SBR 스위치를 최종적으로 설계하고, 3.3kW급 IPT 시스템 prototype을 이용하여 설계 결과를 검증한다.

1. 서론

전기자동차 (Electric vehicle, EV) 충전용 자기유도방식 무선전력전송 (inductive power transfer, IPT) 시스템은 배터리의 안정적인 충전 제어를 위해 일반적으로 IPT 시스템의 2차 측에 dc-dc 컨버터를 사용한다^[1]. 하지만 dc-dc 컨버터를 사용하면 전력밀도가 낮아지고, 효율이 감소하는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 dc-dc 컨버터를 제거하고 2차 측의 다이오드 정류기 대신 출력전압 제어가 가능한 semi-bridgeless 정류기 (semi-bridgeless rectifier, SBR)가 적용된 IPT 시스템의 다양한 연구가 진행되고 있다^{[2],[3]}.

SBR은 그림 1과 같이 다이오드 정류기 하단의 2개의 다이오드를 스위치로 대체한 AC-DC 컨버터로서, 스위치의 duty 제어를 통하여 출력전압을 제어할 수 있다. SBR은 duty 제어와 더불어 스위치의 턴 온 시점을 제어함으로써 1차 측과 2차 측의 임피던스 불일치를 보상할 수 있지만^[4], 스위치의 온/오프 시 항상 하드 스위칭하는 단점이 있다. 이러한 하드 스위칭은 동작 주파수가 낮은 시스템에서는 큰 문제가 되지 않으나, EV 충전용 IPT 시스템은 SAE 규격에 의하여 81.38-90kHz의 높은 주파수로 동작하기 때문에 SBR의 하드 스위칭으로 인하여 발열 문제가 발생할 수 있다^[5]. 높은 동작 주파수를 갖는 IPT 시스템에 SBR을 적용할 때 발생할 수 있는 또 다른 문제는, 2차 측 공진 전류의 높은 di/dt로 인해 SBR 스위치의 body 다이오드에서 발생하는 역회복 현상이다. SBR에서 역회복 현상은 공진 전류의 부호가 바뀌는 지점에서 발생하며, 역회복 전류가 body 다이오드를 통해 흐르면서 순간적으로 2차 측 교류 등가 출력전압 $V_{o,ac}$ 가 0이 되는 구간이 발생한다. $V_{o,ac}$ 가 0이 되면

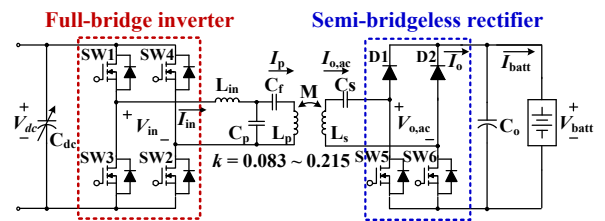


그림 1 SBR을 적용한 3.3 kW IPT 시스템

Fig. 1 3.3 kW IPT system with SBR.

표 1 시스템 파라미터

Table 1 System parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
V_{dc}	200-420 [V]	k	0.083-0.215
P_o	3.3 [kW]	$f_{resonant}$	85 [kHz]
V_{batt}	240-410 [V]	f_{sw}	81.38-90 [kHz]

유효 전력 전달 구간이 감소하기 때문에 공진 전류가 상승하며, 상승한 전류로 인하여 도통 손실 및 스위칭 손실이 증가하게 된다. 따라서 본 논문에서는 높은 주파수로 동작하는 EV 충전용 IPT 시스템에 SBR을 적용할 때 발생하는 발열 문제와 역회복 현상에 대하여 이론적으로 분석하고 이를 최소화 할 수 있도록 SBR용 스위치를 설계한다. 선정된 스위치를 이용하여 3.3kW급 SBR prototype을 제작하고 설계 결과를 실험을 통하여 검증한다.

2. Semi-bridgeless 정류기 스위치 설계

2.1 시스템 구성

그림 1은 SBR을 사용한 3.3kW급 IPT 시스템을 나타내며, 표 1은 주요 시스템 파라미터를 나타낸다. 공진 네트워크는 bifurcation 현상 발생 가능성이 낮으며 부하의 변화에 무관한 정전압 출력 특성을 갖는 LCCL-S 네트워크를 사용하였으며, 공진 네트워크 파라미터는 최소 결합계수 조건에서 85kHz의 공진 주파수를 가지도록 설계한다. 2차 측에는 dc-dc 컨버터 대신 출력전압 제어가 가능하도록 다이오드 정류기의 하단 다이오드 2개를 스위치로 변경한 SBR을 사용한다. LCCL-S 네트워크가 적용된 IPT 시스템에서 SBR은 승압형 컨버터로서 동작하기 때문에 SBR이 다이오드 정류기처럼 동작할 때의 출력전압을 항상 배터리 최소 전압인 240V보다 낮게 설계해야

한다. 네트워크 설계 시 고정 dc-link 전압을 사용하는 경우 최대 결합계수 조건에서 네트워크의 출력전압이 과도하게 증가할 수 있기 때문에 가변 dc-link 전압을 사용하여 높은 결합계수 조건에서는 dc-link를 감소시킨다.

2.2 스위치 설계 시 고려사항

EV 충전용 IPT 시스템은 약 85kHz의 높은 주파수로 동작하기 때문에 SBR의 설계 시 다음과 같은 2가지 사항을 고려해야 한다. 첫 번째로, 그림 2 (a)와 같이, SBR의 스위치는 턴 온/오프 시 항상 하드 스위칭 동작하기 때문에, 스위칭 손실을 최소화하기 위하여 스위칭 특성이 좋은 소자를 선정해야 한다. 두 번째로, MOSFET의 body 다이오드에서 발생하는 역회복 현상을 고려해야 한다. 일반적으로 역회복 현상은 다이오드의 순방향 전류가 급격하게 떨어지는 경우 발생하며, 전류의 하강 기울기가 커짐에 따라 역회복 전하량 Q_{rr} 이 커진다. SBR에서 사용하는 MOSFET의 body 다이오드가 갖는 역회복 특성은 일반적인 고주파수 정류기용 쇼트키 다이오드에 비하여 나쁘기 때문에 그로 인해 발생할 수 있는 역회복 현상을 고려해야 한다. SBR에서 역회복 현상이 발생하는 경우, 그림 2 (b)와 같이, 게이트 신호를 인가하지 않더라도 공진 전류의 부호가 바뀌는 지점에서 스위치가 턴 온 된 것과 동일한 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 역회복 현상은 그림 3과 같이 Infineon 社의 IPW60R125CP를 적용한 SBR의 실험 파형을 통하여 확인할 수 있다. 그림 3 (a)와 같이 게이트 신호를 인가한 지점뿐만 아니라, AC 등가 출력전류인 $I_{o,ac}$ 의 부호가 바뀌는 지점에서도 $V_{o,ac}$ 가 0이 되는 것을 확인할 수 있다. 그림 3(b)는 역회복 현상을 상세하게 분석하기 위하여 게이트 신호를 인가하지 않은 SBR의 실험 파형을 나타내며, 그림 4는 그림 3(b)를 바탕으로 SBR이 동작 모드를 분석한 결과를 나타낸다. 그림 4에서 Mode 1과 3은 일반적인 다이오드 정류기의 음의 반

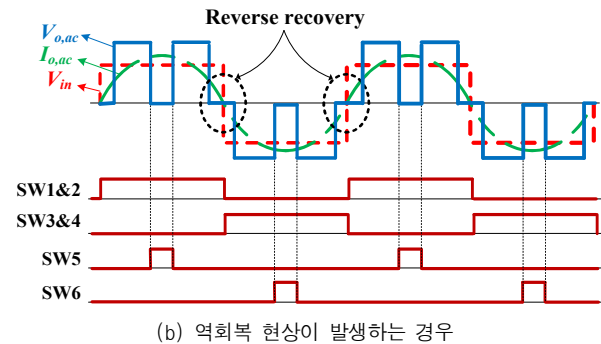
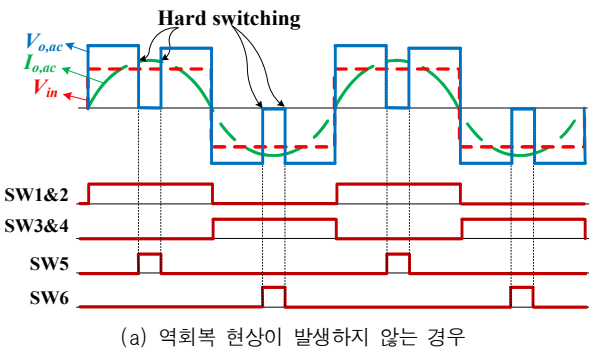
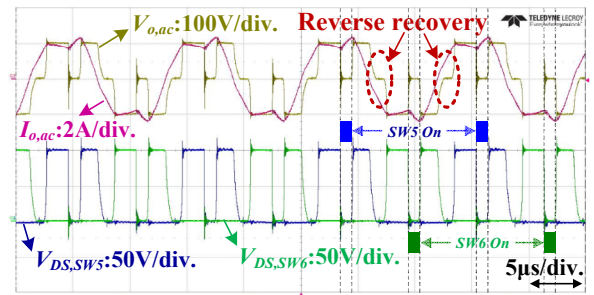
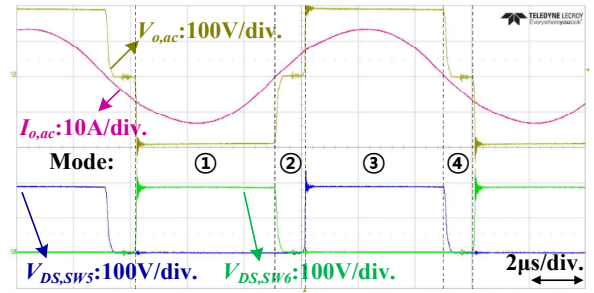


그림 2 SBR의 제어 신호 및 입출력 파형
Fig. 2 Input/Output waveforms and SBR control signal.



(a) SW5, SW6 동작 시



(b) SW5, SW6 미동작 시

그림 3 IPW60R125CP를 사용한 SBR의 역회복 현상 발생 실험 파형

Fig. 3 Experimental waveforms of the SBR with IPW60R125CP in which the reverse recovery phenomenon occurs.

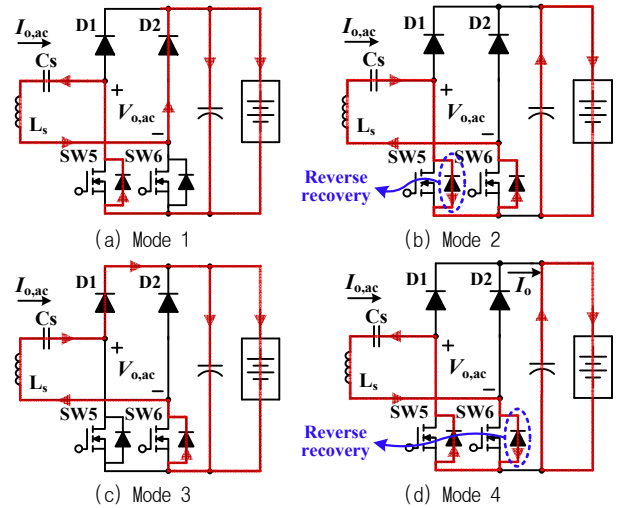


그림 4 그림 3(b)의 파형을 기준으로 한 SBR의 동작 모드
Fig. 4 Operation mode of the SBR based on the waveforms in Fig. 3(b).

주기 및 양의 반주기에서의 동작 모드와 동일하다. 반면, Mode 2와 4에서는 $I_{o,ac}$ 의 높은 di/dt로 인하여 MOSFET의 body 다이오드에서 역회복 현상이 발생하기 때문에 스위치가 턴 온 된 것과 동일하게 $V_{o,ac}$ 가 0이 되는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 $V_{o,ac}$ 가 0이 되면 유효 전력 전달 구간이 감소하기 때문에, 동일한 부하 조건에서 $I_{o,ac}$ 가 증가하게 된다. 그 결과 스위치에서의 통통 손실 및 스위칭 손실이 증가하는 문제가 발생한다. 따라서 SBR의 역회복 현상 발생 가능성을 낮추고 전력 손실을 최소화하기 위해서는 Q_{rr} 이 작은 소자를 선정해야 한다.

2.3 SBR용 스위치 설계 및 검증

표 2 소자의 특성 비교

Table 2 Comparison of device characteristics.

Parameter	Q_g [nC]	C_{oss} [pF]	Q_{rr} [nC]
IPW65R080CFD	167	215	1000
IPW60R125CP	87	120	9000
C3M0065090D	30.4	60	150

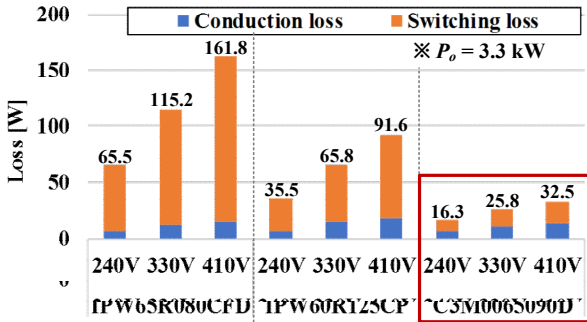


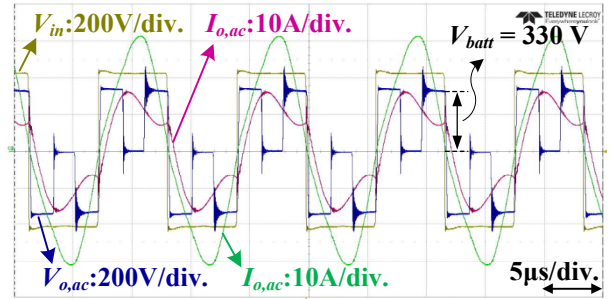
그림 5 스위치 종류별 도통 및 스위칭 손실 분석
Fig. 5 Analysis of conduction and switching losses according to the switches.

표 2는 SBR을 적용한 3.3kW급 IPT 시스템의 스위치 후보로 선택된 유사한 정격을 갖는 MOSFET의 소자 특성을 나타낸다. 앞서 분석한 것과 같이, SBR용 스위치는 Q_g 와 C_{oss} 가 작아 빠른 스위칭이 가능해야 하며, body 다이오드의 Q_{rr} 가 작아 역회복 현상 발생 가능성이 낮아야 한다. 그림 5는 표 2에 나타난 3개의 스위치에 대한 배터리 전압 조건에 따른 3.3kW 부하 조건에서의 손실 분석 결과를 나타낸다. 스위치 종류를 제외한 모든 손실 요소는 동일하기 때문에 그림 5의 손실 분석에서는 스위치의 도통 손실과 스위칭 손실만을 고려하였다. 소자 특성 분석 및 손실 분석 결과를 바탕으로, 제안하는 두 가지 요구 조건을 모두 만족하는 SBR 스위치로서 CREE사의 C3M0065090D가 선정되었다.

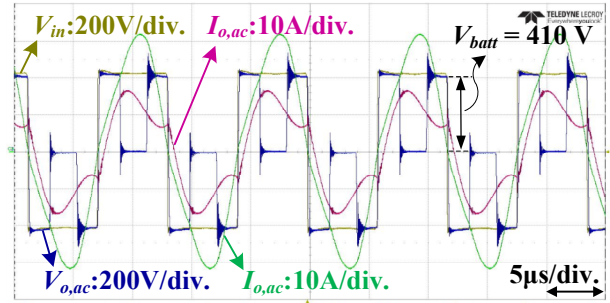
스위치의 설계 결과를 검증하기 위해, 최종 선정된 스위치를 사용하여 3.3kW급 SBR prototype을 제작하고, 그림 6과 같이 최대 부하 조건에서 출력전압에 따른 기본 동작 테스트를 진행하였다. 그림 3에서의 실험 결과와 달리, 제안하는 요구 조건을 모두 만족하는 C3M0065090D를 사용하면 $I_{o,ac}$ 의 부호가 바뀌는 지점에서 역회복 현상이 발생하지 않으며, 최대 부하인 3.3kW까지 정상적으로 동작하는 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문은 높은 동작 주파수를 갖는 EV 충전용 IPT 시스템의 semi-bridgeless 정류기에 대한 스위치 설계 방안을 제안한다. 고주파수 동작에 의한 발열 문제 및 역회복 현상을 분석하고, 이를 바탕으로 semi-bridgeless 정류기용 스위치의 두 가지 요구 사항을 제안한다. MOSFET의 소자 특성 및 손실 분석을 통하여 요구 사항을 만족하는 스위치를 선정하였으며, 3.3kW급 semi-bridgeless 정류기 prototype을 제작하여, 설계 결과를 실험을 통하여 검증하였다.



(a) $V_{batt} = 330$ V and $P_o = 3.3$ kW



(b) $V_{batt} = 410$ V and $P_o = 3.3$ kW

그림 6 C3M0065090D를 사용한 SBR의 실험 파형
Fig. 6 Experimental waveforms of the SBR with C3M0065090D

참고 문헌

- [1] T. Colak, E. Asa, M. Bojarski, D. Czarkowski, and O. C. Onar, "A novel phase-shift control of semibridgeless active rectifier for wireless power transfer", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 11, pp. 6288-6297, Nov. 2017.
- [2] T. Mishima and E. Morita, "High-frequency bridgeless rectifier based ZVS multiresonant converter for inductive power transfer featuring high-voltage Gan_HFET", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 11, pp. 9155-9164, Nov. 2017.
- [3] M. Kim, D. M. Joo, and B. K. Lee, "High efficient power conversion circuit for inductive power transfer charger in electric vehicles", in *Proc. IEEE 3rd Int. Future Energy Electron. Conf.*, Kaohsiung, Taiwan, 2017, pp. 25-29.
- [4] M. Kim, M. Kim, S. J. Ann, J. Byun, and B. K. Lee, "A control of mistuned resonant network of inductive power transfer system with bridgeless rectifier", in *Proc. IEEE 6th Int. Conf. on Renewable Energy Research and Applications*, San Diego, CA, 2017, pp. 279-282.
- [5] SAE international, J2954, "Wireless power transfer for light-duty plug-in / electric vehicles and alignment methodology", [Online]. Available : <http://standards.sae.org/wip/j2954/>