

무선전력전송을 위한 단일전력단 교류-직류 컨버터

김민지, 유경중, 우정원, 김은수[†], 황인갑
전주대학교

A Single Stage AC-DC Converter for Wireless Power Transfer

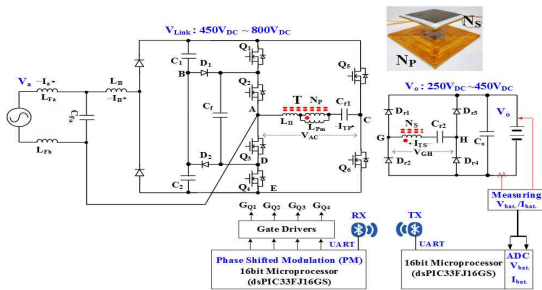
M.J Kim, K.J Yoo, J.W Woo, E.S Kim[†], I.G Hwang
JeonJu University

1. 서론

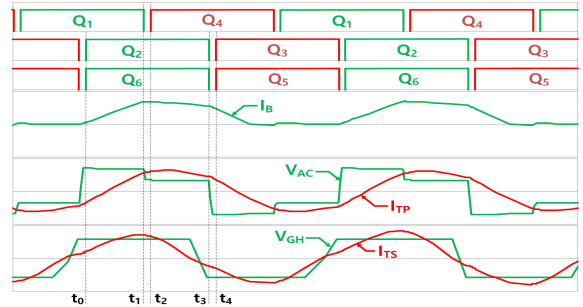
전기자동차(EV) 무선충전시스템은 주로 단상AC전원을 입력 받아 입력역률개선을 위한 PFC 컨버터와 배터리 충전을 위한 무선전력전송 DC/DC 컨버터로 2 단계 전력변환장치로 구성되어 있다. 본 논문에서는 단가 및 사이즈 저감, 입력역률과 효율 개선을 위해 일정스위칭주파수에서 위상제어(D: Phase-shifted control)에 의해 동작되는 단일전력단 AC/DC 컨버터를 무선전력전송 충전시스템으로 활용 할 수 있도록 검토하였다^[1,2]. 또한, 무선전력전송의 다양한 공진네트워크 기술 중 CLLC 회로구성의 토폴로지를 적용 하였고, 1kW 시제품을 제작, 실험을 통해 적용 가능성을 제안 검토하였다^[1,3].

2. 무선전력전송시스템을 위한 단일전력단 AC/DC 컨버터

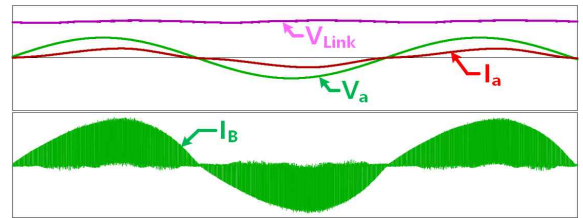
무선전력전송 충전시스템을 위한 단일전력단 AC/DC 컨버터는 입력필터(L_{Fa}/L_{Fb} , C_{Fa}) 및 승압인덕터(L_B), 입력정류다이오드, 분압커패시터(C_1, C_2) 및 순환다이오드(D_1, D_2), 주스위칭소자($Q_1 \sim Q_6$)를 갖는 3레벨 하이브리드 풀-브리지 컨버터로 구성되며, 무선전력전송을 위한 1, 2차측에 커플러와 공진커패시터(C_{r1}/C_{r2})를 포함한 주회로를 그림 1(a)에 나타냈다. 단상AC전원의 입력역률(PF) 및 전고조파왜형율(THD)을 개선하기 위해 단상입력단에 필터커패시터(C_{Fa})와 필터인덕터(L_{Fa}/L_{Fb})가 연결되어 있고, 필터커패시터(C_{Fa})를 주스위칭소자 Q_2 소스, Q_3 드레인 사이에 연결하였다. 승압인덕터(L_B)를 입력정류다이오드에 연결하여 Q_1/Q_4 및 Q_2/Q_3 이 동시에 턴-온 동작 시 승압인덕터(L_B)에 단상AC전압이 인가되고, 에너지가 축적된다. 주 스위칭소자 Q_1 (또는 Q_2)이 턴-오프 되면 승압인덕터(L_B)에 축적된 에너지는 필터커패시터(C_{Fa})와 정류다이오드, 링커패시터(C_1/C_2), 순환다이오드(D_1/D_2), 및 스위칭 소자 (Q_2/Q_3)의 경로로 리셋되며 불연속모드로 동작하게 된다. 따라서 일정 스위칭주파수에서 주스위칭소자($Q_1 \sim Q_6$)의 위상제어(Phase-shifted control)동작에 의해 V_{AC} 양단에 $V_{Link}/2$ 전압이 인가되는 하프-브리지 동작과 V_{Link} 전압이 인가되는 풀-브리지 동작에 따라 넓은 범위의 출력전압을 제어(V_o : 200V_{DC}~300V_{DC})할 수 있다.



(a) Single stage AC/DC converter's schematic



(b) Operating waveforms of gate signals, boost inductors, the primary/secondary voltage and current

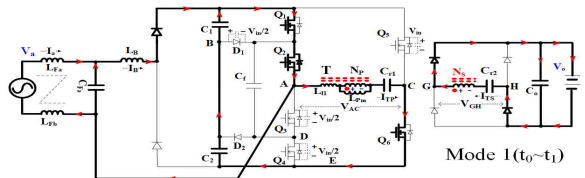


(c) AC line input voltage/current (V_a, I_a) and boost inductor current (I_B) waveforms

그림 1. The proposed single stage AC/DC converter for WPT and its operating waveforms

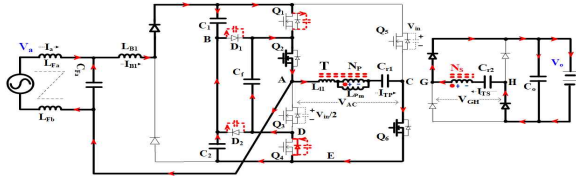
그림 1(a)의 3레벨 하이브리드 풀-브리지 AC/DC 컨버터 적용의 경우 더블러(Doubler) 정류기처럼 단상AC전원전압(V_a)이 분압커패시터(C_1, C_2)에 각각 인가되어 승압 정류 동작된다.

Mode 1($t_0 \sim t_1$) : $t_0 \sim t_1$ 구간의 동작모드 1에서는 주스위칭소자 Q_1 과 Q_2 및 Q_6 이 턴-온 되어있으므로 무선전력전송을 위한 공진회로부 양단(A-C)에 링크전압(V_{Link})이 인가되어 공진전류(I_{TP})가 흐르면서 커플러 2차측 출력단(G-H)에 전력 전달하는 구간이다. 또한 주스위칭소자 Q_1 과 Q_2 가 턴-온 되어 있기 때문에 승압인덕터(L_B)에 필터커패시터전압(V_{CFa})이 인가되어 $C_{Fa} \rightarrow L_B \rightarrow$ 입력정류다이오드 $\rightarrow Q_1 \rightarrow Q_2 \rightarrow C_{Fa}$ 의 전류경로로 흐르며 에너지를 축적한다.

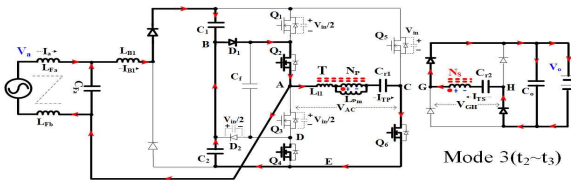


Mode 2($t_1 \sim t_2$) : 동작모드2에서는 t_1 시점에서 주스위칭소자 Q_1 이 턴-오프 되면 Q_1 및 Q_4 의 기생커패시터는 링크전압(V_{Link})의 1/2 및 0전압으로 각각 충전 및 방전을 하고, 동시에 링크전압(V_{Link})의 1/2로 충전되어 있던 순환다이오드 D_1 의 기생커패시터는 0전압으로 방전하고, D_2 의 전압은 링크전압

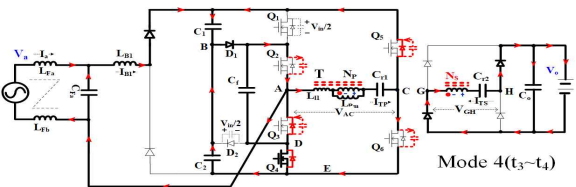
(V_{Link})의 1/2로 충전한다. t_2 시점에서 주스위칭소자 Q_4 의 역·병렬다이오드를 통해 전류가 흐를 때 턴-온 되면 영전압스위칭(ZVS) 동작된다.



Mode 3 ($t_2 \sim t_3$): 동작모드 3에서는 주스위칭소자 Q_2 와 Q_6 이 턴-온 되어있어 분압커패시터(C_2)→순환다이오드(D_1)→주스위칭(Q_2)→1차측공진회로부→주스위칭(Q_6)→분압커패시터(C_2)의 전류경로로 1차측공진회로부 양단(A-C) 전압(V_{AC})은 링크전압(V_{Link})의 1/2이 인가되어 공진전류(I_{TP})가 흐르고, 이득변화에 따라 커플러 2차측 출력단(G-H)에 에너지를 전달하는 구간이다. 이때 이전동작모드 1에서 저장된 승압인덕터(L_B)에너지는 $C_{Fa} \rightarrow L_B \rightarrow$ 입력정류다이오드 → 링크커패시터(C_1) → 순환다이오드(D_1) → 주스위칭(Q_2) → C_{Fa} 의 전류경로로 리셋되며 전류(I_B)가 감소하기 시작한다.



Mode 4 ($t_3 \sim t_4$): 동작모드 4에서는 t_3 시점에서 주스위칭(Q_2 , Q_6)가 턴-오프 되면, 주스위칭소자(Q_2 , Q_3)의 각 기생커패시턴스는 링크전압(V_{Link})의 1/2전압과 0전압으로 충·방전을 동작을 하고, 이와 동시에 주스위칭소자(Q_6 , Q_5)의 각 기생커패시턴스는 링크전압(V_{Link})과 0전압으로 각각 충·방전을 동작을 한다. 이때 주스위칭소자 Q_3 와 Q_5 의 기생커패시턴스가 0전압으로 방전된 후 역·병렬다이오드를 통해 전류가 흐를 때 턴-온 되면 영전압스위칭(ZVS) 동작된다.



3. 이득특성

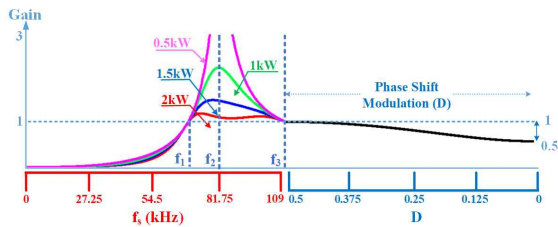


그림 2. Voltage gain simulation of the resonant circuit when the coils are aligned

그림 2 는 스위칭주파수(f_s)를 부하용량 변화에 이득변화가 없는 f_3 기준으로 위상제어(D) 및 주파수(f)변화에 따른 전압이득 특성을 식(1)에 준하여, 시뮬레이션 하여 나타내었다.

$$G = \frac{\sqrt{10 - 6\cos(2\pi D)}}{4} \left| \frac{s^3 R_{ac} C_r C_s L_m}{s R_{ac} C_s (1 + s^2 C_r L_1) + (1 + s^2 C_r L_1) \left(1 + s^2 \left(C_r L_2 + C_r L_m \frac{1 + s^2 C_r L_2}{1 + s^2 C_r L_1} \right) \right)} \right| \quad (1)$$

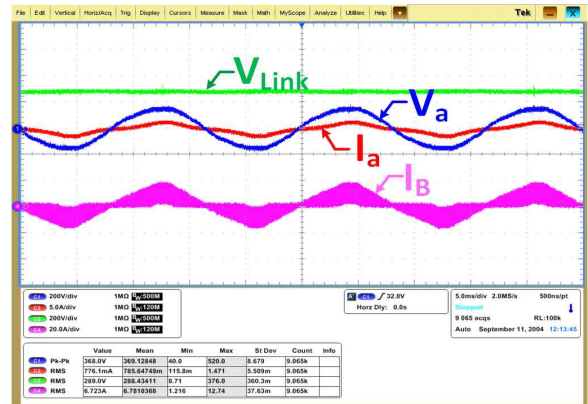
4. 실험 결과

본 논문에서는 넓은 출력전압 제어범위($200V_{DC} \sim 300V_{DC}$)를 갖는 1kW 무전력전송 시스템을 위한 브릿지리스 단일전력단 AC/DC 컨버터의 동작 특성을 비교하기 위해 표1에 나타난 주요 입력력 사양과 사용된 소자들을 적용하여 시제품을 제작하였고, dsPIC33FJ16GS502 16bit DSP를 사용하여 SAE J2954규격에 근거한 고정스위칭주파수(f_s : 85kHz)에서 위상제어(D)를 통해 출력전압(V_o)을 제어 실험하였다.

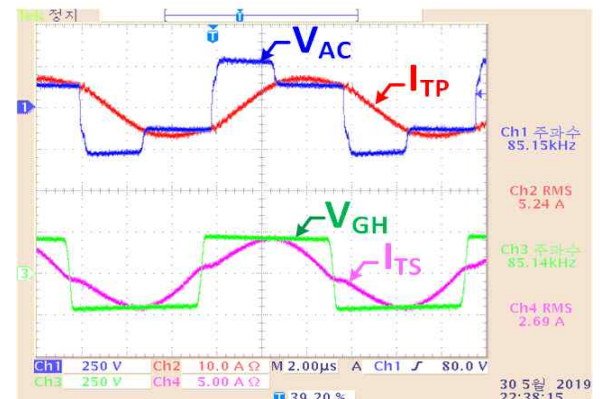
단일전력단 AC/DC 컨버터의 최대효율은 출력전압 $250V_{dc}$ 일 때 1kW 부하에서 92.52%로 측정되었고, 모든 출력전압($200V_{dc} \sim 300V_{dc}$) 및 부하(500W~1kW) 범위에서 평균효율은 91.18%로 측정되었다.

표 1 주요 정격 및 변압기 파라미터

Input Ratings	Input voltage(V_a)	110V _{rms}	
	Output voltage(V_o)/ Output current($I_{o,max}$)	200V _{DC} /5A, 300V _{DC} /3.33A (1kW)	
Used Devices	Switching frequency(f_s)/ Resonance frequency(f_r)	85.1kHz / 85kHz	
	Switching devices($Q_1 \sim Q_6$, Q_5)	STW65N65DM2AG(650V/60A/50mΩ)	
Parameters	Input rectifier diodes	UJ3C120040K3S(1200V/65A/35mΩ/SIC)	
	Clamping diodes($D_1 \sim D_2$)	SCS240KE2 [1200V/20A/1.4V/SIC]	
Loosely coupled transformer (T)	Output diodes	GP2D050A120B [1200V/50A/1.6V/SIC]	
	L_{Fa} , L_{Fb} , C_{Fb} , L_B	3.6mH/2.2uF/26uH	
Parameters	C_{r1} / C_{r2}	34.62nF/37.43nF	
	Self-inductance	L_r / L_s	180.2uH/174uH
	Leakage inductance	L_{leak}	142.3uH
	Turn ratio, [Coupling coefficient]	N_p/N_s , [k]	22T/22T [0.45]

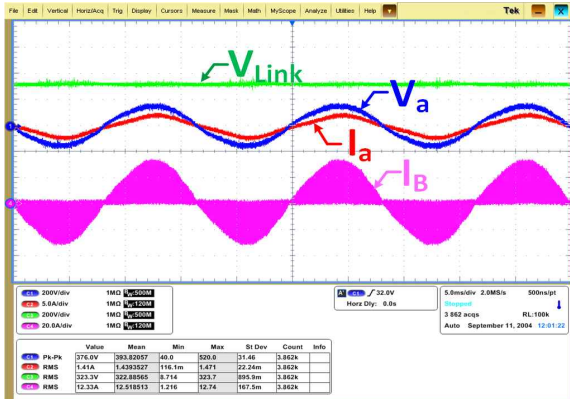


(a) Ch1:200V/div, Ch2:5A/div, Ch3:200V/div, Ch4:20A/div, 5ms/div

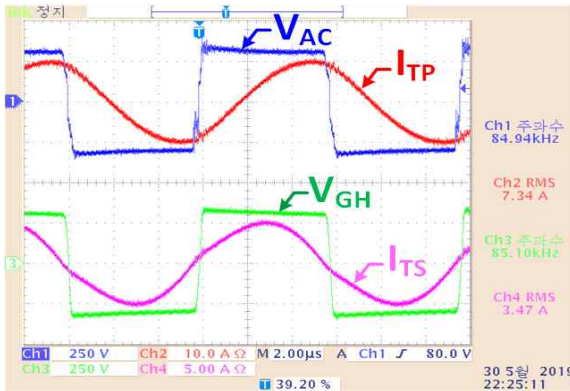


(b) Ch1:250V/div, Ch2:10A/div, Ch3:250V/div, Ch4:5A/div, 2us/div.

그림 3. Experimental waveforms (a) the PFC Circuit (b) the current/voltage across the loosely coupled transformer's primary and secondary side [V_o : 200V / P_o :500W]



(a) Ch1:200V/div, Ch2:5A/div, Ch3:200V/div, Ch4:20A/div, 5ms/div



(b) Ch1:250V/div, Ch2:10A/div, Ch3:250V/div, Ch4:5A/div, 2μs/div.

그림 4. Experimental waveforms (a) the PFC Circuit (b) the current/voltage across the loosely coupled transformer's primary and secondary side [V₀: 300V / P₀:1000W]

이 논문은 2018년 정부(교육부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구사업 임 (NRF-2018R1A2B6008925)

참 고 문 헌

- [1] Hulong Zeng, Shuitao Yang, Fang Z. Peng, Design Consideration and Comparison of Wireless Power Transfer via Harmonic Current for PHEV and EV Wireless Charging”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.32, pp.5943-5952, 2017
- [2] W. Y. Choi, J. S. Yoo, J. Y. Choi, “정류용 브릿지 다이오드가 없는 고효율 하프 브릿지 AC-DC 컨버터”, 전력전자학회 논문지, 제16권, 제3호, pp.293 ~ 301, June. 2011.
- [3] 김은수, “단일전력단 교류-직류 컨버터”, 특허출원예정. 2019년 7~8월