

단일전력단 교류-직류 컨버터 적용 무선전력전송 보상회로

유경중, 김민지, 우정원, 김은수[†]
 전주대학교

WPT Compensation Circuits Using Single Stage AC/DC Converter

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

1. 서론

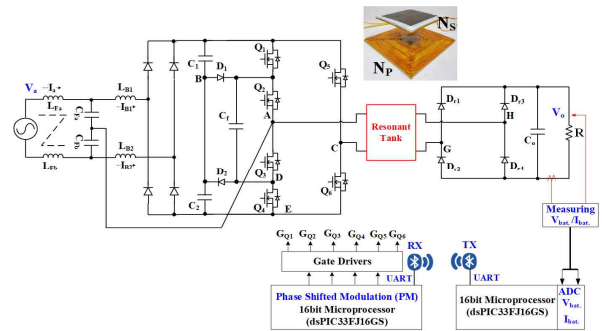
최근 전기자동차(EV) 및 무인운반차(AGV)의 편리성과 안정성을 위하여 기존의 접촉식 플러그인 충전방식이 아닌 비접촉 무선충전방식이 확대 및 보급되고 있다. 이러한 무선충전전원 장치는 주로 입력역률개선을 위한 PFC 컨버터와 배터리 충전을 위한 비접촉변압기(Loosely coupled transformer) 커플러가 적용된 DC/DC 공진컨버터, 2단(Two Stage) 전력변환장치로 구성되어 있다.

본 논문에서는 단가 및 사이즈 저감, 입력역률과 효율개선을 위해 일정스위칭주파수에서 위상제어(D: Phase shift control)에 의해 동작되는 단일전력단 AC/DC 컨버터를 무선전력전송 충전시스템으로 활용 할 수 있도록 검토하였다 [1]. 또한, 공극이 매우 큰 무선전력전송 비접촉변압기는 누설자속이 커서 커플링(k)이 작기 때문에 전력전달에 있어서 한계성이 있다 [2,3]. 이를 보상하기 위해서 본 논문에선 다양한 보상회로 중 CLLC 공진회로를 적용한 SS 보상회로와 LCC-Series 보상회로를 제안된 단일전력단 AC/DC 컨버터에 적용하여 각 보상회로의 장 단점에 대해 시뮬레이션 결과를 통해 검증하고자 한다.

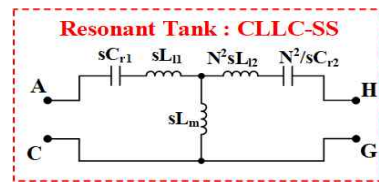
2. 무선전력전송시스템을 위한 단일전력단 AC/DC 컨버터

제안된 단일전력단 AC/DC 컨버터는 그림 1(a)에 나타났다. 단상교류전원의 입력역률(PF) 및 전고조파왜형율(THD)을 개선하기 위해 필터커패시터(C_{Fa}/C_{Fb}), 필터인덕터(L_{Fa}/L_{Fb}), 승압인덕터(L_{B1}/L_{B2}) 및 입력정류다이오드가 연결되어 있고, 그림 1(b)과 그림 1(c)에 CLLC-SS 보상회로와 LCC-Series 보상회로를 나타냈다. 단일전력단 AC/DC 컨버터는 일정 스위칭주파수(f_s)에서 주스위칭소자($Q_1 \sim Q_6$)의 위상제어(D) 동작에 의해 PFC단 제어와 무선전력전송을 위한 DC/DC단을 동시에 제어한다. $Q_1/Q_2/Q_6$ 및 $Q_3/Q_4/Q_5$ 가 동시에 턴-온 동작 시 승압인덕터(L_{B1}/L_{B2})에 단상교류전압(V_a)이 인가되고, 에너지가 축적되며, 단자 A-C 양단에 V_{Link} 전압이 인가되며 풀-브리지 동작을 한다. 주 스위칭소자 Q_1 (또는 Q_4)이 턴-오프 되면 승압인덕터(L_{B1}/L_{B2})에 축적된 에너지는 필터커패시터(C_{Fa}/C_{Fb})와 입력정류다이오드, 링크커패시터(C_1/C_2), 순환다이오드(D_1/D_2), 및 스위칭 소자 (Q_2/Q_3)의 경로로 리셋 되며 불연속모드로 동작하게 된다. 또한, 단자 A-C 양단에 $V_{Link}/2$ 전압이 인가되는 하프-브리지 동작을 통해 넓은 출력전압을 제어(V_o) 할 수 있다.

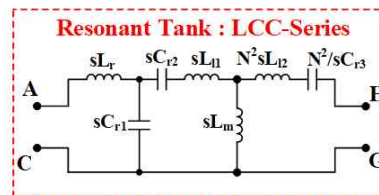
무선전력전송을 위한 비접촉변압기 커플러의 형태는 그림 2(a)에 나타냈으며, 그림 2(b)와 그림 2(c)는 정 중앙에 일치된 (Misalignment 0cm) 즉, 커플링(k)이 좋을 때와 2차측 커플러를 좌측 상단으로 5cm 이동시켰을 때(Misalignment 5cm)를 각각 나타냈다. 1차측 및 2차측 비접촉변압기 커플러의 측정된 파라미터를 표 1에 나타냈다.



(a) 무선전력전송 충전시스템을 위한 단일전력단 AC/DC 컨버터 주회로도

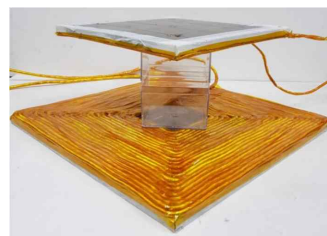


(b) CLLC SS보상 토폴로지 등가회로

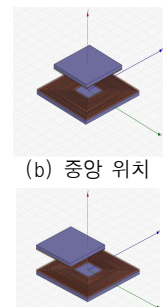


(c) LCC-Series 보상 토폴로지 등가회로

그림 1. 주 회로도 및 보상 토폴로지 등가회로



(a) WPT Coupler (N_p/N_s , 22T/22T)
 1차측커플러 (30cm×30cm)
 2차측커플러 (20cm×20cm)
 (5cm/10cm air-gap)



(b) 중앙 위치
 (c) 좌측 상단

그림 2. 비접촉변압기 커플러 형상 및 위치

표 1. 커플러 위치에 따른 비접촉 변압기 파라미터

	중앙 위치 커플러 형상 air-gap: 5cm	좌측 상단 커플러형상 air-gap: 5cm
커플러 1차측 자기인덕턴스(L_1)	180.2uH	186.9uH
커플러 2차측 자기인덕턴스(L_2)	174uH	172.3uH
커플러 등가누설인덕턴스(L_{eq})	142.3uH	171.5uH
1차측 커플러 자화인덕턴스(L_m)	81.21uH	51.51uH
k(Coupling Coefficient)	0.45	0.28

3. 시뮬레이션 결과

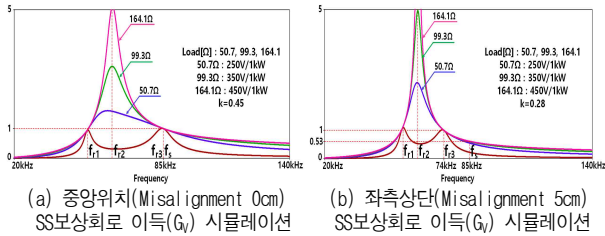
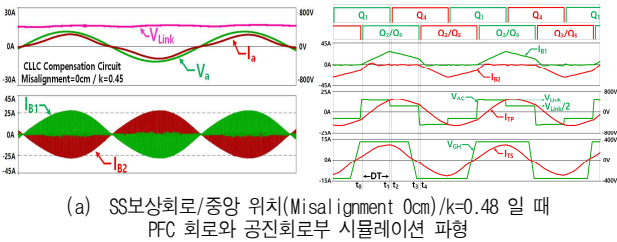
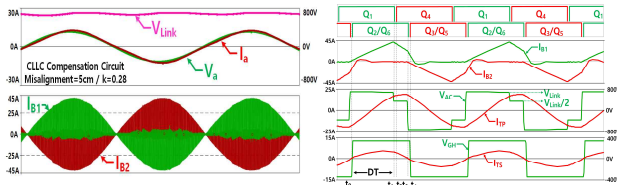


그림 3. 제안된 단일전력단 AC/DC 컨버터 SS 보상회로 전압이득 시뮬레이션



(a) SS보상회로/중앙 위치(Misalignment 0cm)/k=0.48 일 때 PFC 회로와 공진회로부 시뮬레이션 파형



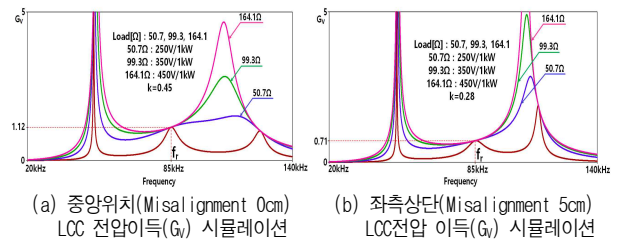
(b) SS보상회로/좌측상단(Misalignment 5cm)/k=0.28 일 때 PFC 회로와 공진회로부 시뮬레이션 파형

그림 4. SS 보상회로 적용 단일전력단 AC/DC 컨버터의 PFC단 파형 및 WPT DC/DC 단 1/2차측 전압/전류시뮬레이션

그림 3(a)와 그림 3(b)는 비접촉변압기 커플러 1, 2차측의 공극(Air gap)이 5cm인 경우 각각 2차측 커플러가 정중앙에 위치했을 때와 좌측상단으로 5cm 이동하였을 때 SS 보상회로 전압이득(G_V)특성 시뮬레이션 결과를 나타냈다. 그림 3(a)와 그림 3(b)에 나타난 것처럼 공진주파수 f_{r2} 에서의 이득특성은 부하(N^2R_{ac})에 따라 크게 변하기 때문에 이득제어가 어려운 단점을 가지고 있다. 그에 반해 공진주파수 f_{r3} 에서의 이득은 부하(N^2R_{ac}) 변화에 크게 상관없이 일정 전압이득을 가지고 있어 고정주파수에서 위상제어(D)를 통해 출력전압(V_o) 조절이 가능하므로 스위칭주파수 f_s 를 공진주파수 f_{r3} 로 두고 일정스위칭주파수로 스위칭동작을 하였다. 그리고 공진주파수 (f_{r3})는 비접촉변압기 커플러 1, 2차측 누설인덕턴스(L_{11}/L_{12})와 공진커패시터(C_{r1}/C_{r2}) 사이의 공진으로부터 선정(85kHz)하였다. 그림 4(a)와 그림 4(b)는 출력전압(V_o) 350V_{dc} 1kW일 때 SS 보상회로를 접목한 제안된 단일전력단 AC/DC 컨버터에서 커플링변화($k=0.45 \Rightarrow k=0.28$)에 따른 PFC단 및 공진회로부 시뮬레이션 파형으로 커플링 k값에 따라 이득변화 커서, 커플링 k 값이 작아질 경우 원하는 이득을 얻기 위해 위상제어(D)가 크게 변화되어 링크전압(V_{Link})이 상승하고, 그에 따라 승압인덕터전류(I_{B1} , I_{B2}) 또한 증가하여 도통손실에 의해 효율개선이 어렵다는 것을 알 수 있다. 그림 5(a)와 그림 5(b) 또한 LCC-Series 보상회로가 접목된 단일전력단 AC/DC 컨버터에 있어서 비접촉변압기 커플러 1, 2차측 공극이 5cm인

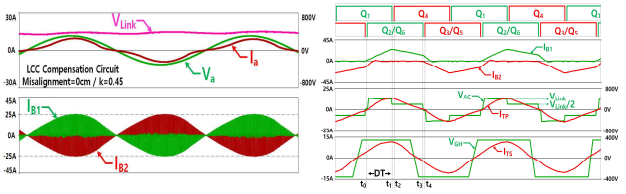
경우에 각각 2차측 커플러가 정중앙에 위치했을 때와 좌측상단 5cm로 이동하여 위치했을 때 이득(G_V)특성 시뮬레이션을 나타냈으며, 공진주파수(f_r)에 있어서 이득은 커플링 k값 변화에 따라 크게 차이 나지 않음을 볼 수 있다.

그림 6(a)와 그림 6(b)는 출력전압(V_o) 350V_{dc} 1kW일 때 LCC-Series 보상회로가 접목된 단일전력단 AC/DC 컨버터에서 커플링변화($k=0.45 \Rightarrow k=0.28$)에 따른 PFC단 및 공진회로부 시뮬레이션 파형으로 SS 보상회로가 접목된 이득변화에 비해 LCC-Series 보상회로가 접목된 이득변화의 경우 커플링 k값에 따른 이득변화가 작고, 공진주파수에서의 임피던스가 증가하여 위상제어(D) 및 링크전압(V_{Link})이 작아 승압인덕터전류(I_{B1} , I_{B2})에 흐르는 전류 또한 감소하여 효율개선이 될 수 있음을 시뮬레이션 파형을 통해 알 수 있다.

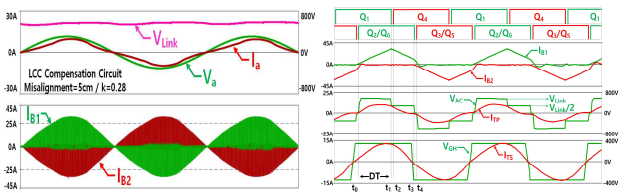


(a) 중앙위치(Misalignment 0cm) LCC 전압이득(G_V) 시뮬레이션 (b) 좌측상단(Misalignment 5cm) LCC 전압 이득(G_V) 시뮬레이션

그림 5. 제안된 단일전력단 AC/DC 컨버터 LCC 전압이득 시뮬레이션



(a) LCC 보상회로/중앙 위치(Misalignment 0cm)/k=0.48 일 때 PFC 회로와 공진회로부 시뮬레이션 파형



(b) LCC 보상회로/좌측상단(Misalignment 5cm)/k=0.28 일 때 PFC 회로와 공진회로부 시뮬레이션 파형

그림 6. 제안된 단일전력단 AC/DC 컨버터 LCC보상회로 PFC회로 파형 및 WPT Coupler의 1/2차측 전압/전류시뮬레이션

본 논문에서는 제안된 무선전력전송을 위한 단일전력단 AC/DC 컨버터에 있어서 SS 보상회로 및 LCC-Series 보상회로에 따른 커플링 k에 의한 이득특성변화와 동작특성 분석을 하였으며 향후 이를 토대로 1kW 시제품을 제작하여 실험을 통해 이를 검증하고자 한다.

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

참고 문헌

- [1] Minji Kim, KyungJong Yoo, SangJae Woo, EunSoo Kim, InGab Hwang, "A Single Stage AC-DC Converter for Wireless Power Transfer System", Internal Conference on Power Electronics and ECCE Asia(ICPE 2019-ECCE Asia), 2019
- [2] 김민아, 박화평, 정지훈, "500W급 무선전력전송 컨버터의 고효율 설계 방법", 전력전자학회 논문지, 제21권, 제4호, pp.356-363, August. 2016.
- [3] Jianghua Lu, Guorong Zhu, Yatao Shou, Fei Liu, "Coupling-and Load-Independents Output Voltage and ZPA Operation in LCC-Series Compensated IPT System", IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE), 2018.