무선전력전송 시스템에서 2차측 DC-DC 컨버터에 관한 연구

서상화*, 김 용*, 배진용**, 윤홍민***, 이성호§, 조영일§§, 박승하§§§
동국대학교*, 특허청**, LS산전***, 네오파워텍§, 나라기술단§§, 대림대학교§§§

A study on the Secondary Side Control DC-DC Converter in Wireless Power Transfer System

Sang-Hwa Seo*, Yong Kim*, Jin-Yong Bae**, Hong-Min Yun***, Sung-Ho Lee§, Young-il Cho§§, Seung-Ha Park§§§
Dongguk University*, KIPO**, LSIS***, NeoPowerTech§, Nara Engineering Consultant§§, Daelim University§§§

Abstract - Recent improvement in semiconductor technology make efficient switching possible at higher frequencies, which benefits the application of wireless inductive energy transfer. However, a higher frequency does not alter the magnetic coupling between energy transmitter and receiver. Due to the still weak magnetic coupling between transmitting and receiving sides that are separated by a substantial air gap, energy circulates in the primary transmitting side without being transferred to the secondary receiving side.

This paper proposes an analysis on the system efficiency to determine the optimal impedance requirement for coils, rectifier and DC-DC Converter. A novel Boost DC-DC Converter is designed to provide the optimal impedance matching in WPT(Wireless Power Transfer) system for various loads.

1. 서 론

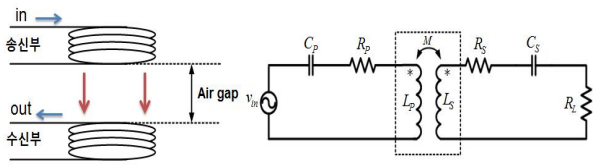
근거리 전송의 자기 공명방식을 이용한 무선 전력전송 방식은 2007년 MIT에서 비방사(non-radiated)을 이용하여 제안한바 있다.[1] 이 방식은 저용량을 높은 주파수를 이용하여 전력을 전송하면서 근거리 전송의 새로운 패러다임을 제시하였다. 이를 통하여 지금까지 전선이 필요 없는 새로운 전력시스템의 연구와 개발이 활발히 이루어지고 있다.

WPT 시스템은 높은 효율과 넓은 거리를 위하여 송신부 코일의 크기가 커지는 특징을 지니고 있다. 이런 시스템에서는 송신부와 수신부의 임피던스 매칭 뿐만 아니라 부하의 임피던스 매칭도 중요한 부분을 차지하며 임피던스회로는 부하의 임피던스를 보통 사용한다.[2] 그러므로 DC-DC 컨버터를 기존 회로에 추가함으로써 부하 임피던스를 제어하는 부분을 제시하고자 한다.

실제 WPT 시스템에서는 송수신간의 거리와 부하값을 통한 동작조건에 따라 변화한다. 그러므로 이런 거리 및 부하가 변화했을 때 가장 높은 효율을 향상시키기 위해 DC-DC 컨버터는 필수적이다. 본 논문에서는 무선전력전송 시스템에서 2차측인 부하에 DC-DC 컨버터를 추가함으로써 그 특성을 살펴보고자 한다.

2. 본 론

2.1 무선전력전송의 원리



〈그림 1〉 송수신부 등가회로

그림 1은 일반적으로 커플링된 트랜스포머 형태의 등가회로이다. 송신부에서 전달되는 전력은 Air gap을 통하며 자기에너지는 수신부로 전달된다. 1,2차 인덕터의 내부 저항성분 R_P, R_S를 포함하며 인덴턴스 L_P와 L_S 그리고 상호인덕턴스 M을 가지는 두 개의 결합된 인덕터로 표현된다. 송신부의 공진주파수는 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며 1차측 대비 2차측 전력비율인 전송효율 A_P는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_P C_P}} = \frac{1}{\sqrt{L_S C_S}} \tag{1}$$

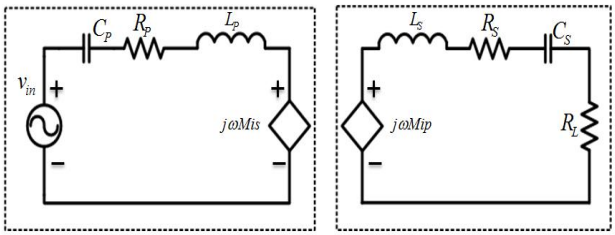
$$A_P = \frac{(\omega_0 M)^2 R_L}{(R_L + R_S)(R_P R_L + R_P R_S + (\omega_0 M)^2)} \tag{2}$$

그림2는 정상상태 해석을 위하여 나타냈으며 커패시터 C_P, C_S와 인덕터 L_P, L_S가 직렬공진으로 1,2차측에 연결되어있고 1차측 전류 i_p와 함께 $\omega M i_S$을 통하여 1차측 등가 임피던스 Z_r은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_r = \frac{\omega^2 M^2}{Z_S + R_L} \tag{3}$$

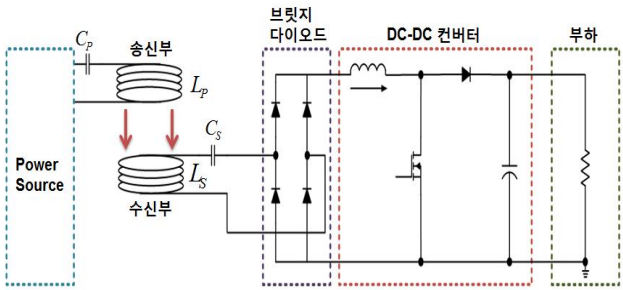
여기서 2차측 등가 임피던스 Z_S는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_S = j\omega L_S + \frac{1}{j\omega C_S} + R_S \tag{4}$$



〈그림 2〉 송수신부 등가회로 모델

2.2 회로 구성과 동작 원리



〈그림 3〉 제안된 회로 구성도

그림 3은 DC-DC 컨버터를 포함하는 무선전력전송의 회로 구성도를 나타낸다. DC-DC 컨버터단에는 승압형 컨버터를 추가하여 구성하였으며 응용분야에 따라 강압형 또는 강압-승압형 컨버터등을 추가하여 사용할 수 있다. 그림 4는 스위치가 온 또는 오프시에 따른 모드를 나타낸다.

표1은 6개의 DC-DC 컨버터 회로의 출력전압 및 입력 저항에 관하여 비교하여 나타내었다.

<표 1> DC-DC Converter 비교표

Converter	Vout	Rin	Rin(range)
Buck	DVin	$\frac{R_L}{D^2}$	$R_L \sim \infty$
Boost	$\frac{1}{1-D}V_{in}$	$(1-D)^2R_L$	$0 \sim R_L$
Buck-Boost	$\frac{D}{1-D}V_{in}$	$\frac{(1-D)^2}{D^2}R_L$	$0 \sim \infty$
Cuk	$\frac{-D}{1-D}V_{in}$	$\frac{(1-D)^2}{D^2}R_L$	$0 \sim \infty$
SEPIC	$\frac{D}{1-D}V_{in}$	$\frac{(1-D)^2}{D^2}R_L$	$0 \sim \infty$
Zeta	$\frac{D}{1-D}V_{in}$	$\frac{(1-D)^2}{D^2}R_L$	$0 \sim \infty$

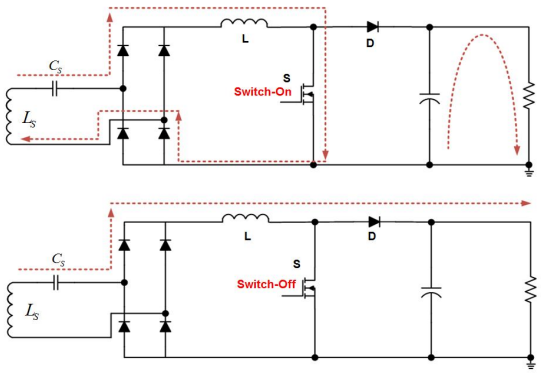
1) 스위치 On 모드

스위치 S가 턴온일 경우 모드가 시작되며 다이오드 D는 턴오프 된다. 그에 따른 인덕터 전류 L의 전류 기울기는 점차적으로 상승하며 이 구간에서 스위치 전류의 기울기는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{IN} = L\frac{di_L}{dt} \quad (3)$$

2) 스위치 Off 모드

스위치 S은 턴오프 되고 다이오드 D을 통하여 출력전압이 전달된다. 또한 스위치 전류 iS는 인덕터 전류 L의 전류 기울기와 같이 점차적으로 하강한다. 스위치 S의 On, Off-상태에서 모드별 동작 및 해석을 하였고 같은 동작을 반복한다.



<그림 4> 스위치 온/오프모드

2.3 실험 결과

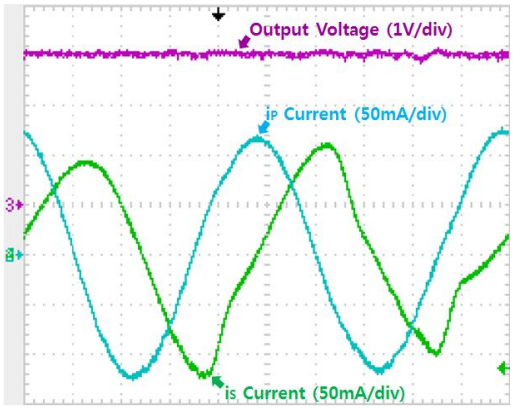
제안된 무선전력전송 방식의 2차측 컨버터는 승압형 컨버터를 이용하였고 그 특성 파악을 위해 시작품을 제작하여 스위칭 주파수 55[㎑]에서 실험하였다. 표 2은 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터 값을 나타낸다.

<표 2> 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터

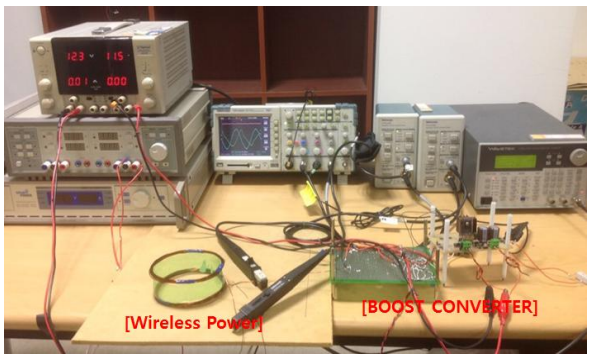
입력전압 (V_{in})	AC 20 [V]
출력전압 (V_{out})	DC 3 [V]
1차측 인덕턴스 (L_P)/저항[R_P,]	87.96 [uH]/2.18 [Ω]
2차측 인덕턴스 (L_S)/저항[R_S]	84.41 [uH]/1.8 [Ω]
1차측커패시턴스 (C_P)	10 [μF]
2차측커패시턴스 (C_S)	10 [μF]
자기공진 주파수 (f_p)	200 [KHz]
코일 직경 (C_D)	97 [mm]

그림 5는 본 실험에서의 최대 전력전달 거리인 30mm에서의 1차측 전류 i_P와 2차측 전류 i_S 그리고 출력전압 V_{out}을 나타낸다. 공진주파수 매칭을 위하여 직렬공진인 커패시터 C_P, C_S는 10nF으로 구성하였다.

그림 6은 제안된 무선전력전송 회로와 함께 2차측 승압형 컨버터를 회로를 나타내며 실험 장비를 구성하였다.



<그림 5> 인터리브 승압형 컨버터의 입력 전압·전류 파형 (1us)



<그림 6> 제안된 회로의 실험 장비

3. 결 론

본 논문에서는 자기유도방식의 무선전력전송을 분석하였고 2차측 승압형 컨버터의 모드별 동작을 파악하였다.

또한, 본 논문에서는 무선전력전송 방식에서 2차측에 DC-DC Converter를 포함하는 회로 구성하였으며 여기에는 승압형 컨버터를 이용하여 정전압원으로 임피던스매칭 뿐만 아니라 그에 따른 최대 30mm Air gap으로 회로의 구동 특성을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

[1] Andre Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos, Peter Fisher, MarinSoljacic, “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances,” Science Express, Vol.317, No.5834, pp.83- 86, 7 June 2007

[2] Teck Chuan Beh, Takehiro Imura, Masaki Kato, Yoichi Hori, "Basic Study of Improving Efficiency of Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling Based on Impedance Matching", IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2010

[3] Wei Zhang, Siu-Chung Wong, Chi K. Tse, Qianhong Chen, "Design for Efficiency Optimization and Voltage Controllability of Series-Series Compensated Inductive Power Transfer Systems," IEEE Power Electronics, pp. 191-200, Jan. 2014.

[4] Minfan Fu, Chengbin Ma, Xinen Zhu, "A Cascaded Boost-Buck Converter for High-Efficiency Wireless Power Transfer Systems," IEEE TRANSACTIONS ON, vol. 10, no 3, pp. 1025-1035, Aug. 2014.

[5] Masaki Kato, Takehiro Imura, Yoichi Hori, "Study on Maximize Efficiency by Secondary Side Control Using DC-DC Converter in Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling," Electric Vehicle Symposium and Exhibition(EVS27), pp. 1-5, Nov. 2013.