

Half-Bridge 직렬 공진컨버터 적용 비접촉 충전시스템

金柱勳^{*}, 宋煥國^{*}, 金恩洙[†], 朴聖鎬^{**}, 金倫鎬^{***}

A Contactless Power Charging System using Half-Bridge Series Resonant Converter

Joo-Hoon Kim, Hwan-Kook Song, Eun-Soo Kim, Sung-Ho Park and Yoon-Ho Kim

요 약

본 논문에서는 비접촉 시스템에 있어서 스위칭 소자의 영 전압 스위칭(ZVS)뿐만 아니라 2차측 정류 다이오드 역시 영 전류 스위칭(ZCS)을 이룰 수 있는 비접촉 변압기를 이용한 Half-Bridge 직렬 공진 컨버터 적용 비접촉 충전 시스템을 제안 적용하였다. 본 논문에서 제안한 비접촉 변압기 적용 Half-Bridge 직렬 공진컨버터는 공진 주파수보다 낮은 영역에서 스위칭 동작이 가능하기 때문에 불연속 공진전류에 의한 2차측 정류 다이오드의 영 전류 스위칭(ZCS)이 가능하다. 또한 좁은 주파수 영역에서 제어가 가능하며 높은 전압 이득특성에 따라 적은 턴-수비의 변압기를 사용할 수 있으므로 기존의 비접촉 시스템과 비교해 보았을 때 효율특성을 개선시킬 수 있다. 시뮬레이션과 이론적인 분석을 토대로 3.15W 시제품을 제작하고 실험내용을 서술했다.

ABSTRACT

In this paper, a contactless power supply using half-bridge series resonant converter that achieves ZVS operation of main switches and ZCS operation of secondary side diodes is proposed. Since the proposed contactless power supply using half-bridge series resonant converter operates with lower switching frequency than the resonant frequency, it can achieve ZCS operation of secondary side diodes due to discontinuous resonant current. And it is also possible to control the converter in narrow frequency range and to obtain high voltage gain, which, in turn, offers low turns ratio for the transformer and high efficiency. Based on the theoretical analysis and simulation results, the 3.15W prototype is built and the final experimental results are described.

Key Words : Contactless Power Supply, Half-Bridge Series Resonant Converter, Magnetic Coupler

1. 서 론

본 논문에서 적용하고자 하는 비접촉 시스템의 커플러(비접촉변압기)는 기존의 변압기와 달리 공극(gap)이 크고 자성체로 투자율이 적은 페라이트 시트(CNS-L100, $\mu = 60H/m$)를 사용하였기 때문에 1, 2차측 누설 인덕턴스(L_{11} , L_{22})가 커지게 되며 자화 인덕턴스(L_m)는 상대적으로 작아서 결합계수(k =Coupling coefficient)가 감소하게 된다. 따라서 2차측으로 에너지를 전달하는데 많은 어려움이 있고, 누설 인덕턴스의 증가로 인해 효율이 매우 저감되는 특성을 갖기 때문

[†]교신저자 : 정회원, 전주대 전기전자정보통신공학부 교수
E-mail : eskim@jj.ac.kr

^{*}학생회원: 전주대 전기전자공학 석사과정

^{**}정회원: 전주대 기초과학과 교수

^{***}정회원: 중앙대 전자전기공학부 교수

접수일자 : 2008. 4. 24 1차 심사 : 2008. 5. 19
2차 심사 : 2009. 5. 7 심사완료 : 2009. 5. 14

에 효율이 높은 직렬 공진컨버터가 널리 이용되고 있다. 그러나 기존의 직렬 공진컨버터를 적용한 비접촉 시스템에서는 소프트 스위칭 동작을 위해 스위칭 주파수를 공진 주파수보다 높은 주파수 범위에서 연속모드의 공진전류를 이용해 동작시키는 것이 일반적이었다^[1,2]. 이러한 기존의 직렬 공진컨버터를 적용한 비접촉 시스템은 주스위칭 소자의 영 전압 스위칭(ZVS)을 이룰 수 있으나 공진 주파수보다 높은 영역에서 스위칭 동작을 하기 때문에 전압이득 특성이 낮고 연속모드의 공진전류에 의해 2차측 정류 다이오드의 역 회복 특성에 따른 단락전류에 의한 스위칭 손실이 발생하게 된다. 또한 자화 인덕턴스가 작아져서 순환전류가 많이 흐르기 때문에 도통손실(Conduction loss)을 증가시키는 요인이 된다.

따라서 본 논문에서는 비접촉 시스템에 있어서 스위칭 소자의 영 전압 스위칭(ZVS)뿐만 아니라 2차측 정류 다이오드 역시 영 전류 스위칭(ZCS)을 이룰 수 있는 비접촉 변압기를 이용한 Half-Bridge 직렬 공진 컨버터 적용 비접촉 충전 시스템을 제안, 적용하였다.

적용 실험된 Half-Bridge 직렬 공진컨버터는 중부하일 때 공진 주파수보다 낮은 영역에서 스위칭 동작이 가능하기 때문에 기존 연속모드에서만 동작되던 방식과는 다르게 불연속모드 동작이 가능하므로 불연속 공진전류에 의한 2차측 정류 다이오드의 영 전류 스위칭(ZCS)이 가능하다. 또한 좁은 주파수 영역에서 제어가 가능하며 높은 전압 이득특성에 따라 적은 턴수비의 변압기를 사용할 수 있으므로 기존의 비접촉 시스템과 비교해 보았을 때 효율특성을 개선시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다^[3].

2. 설계사양 및 비접촉 변압기의 커플링 변화에 따른 특성분석

그림 1은 비접촉 변압기 적용 Half-Bridge 직렬 공진컨버터의 주 회로와 등가회로이다. 그림 1 (b)에서 V_{ab} 는 주스위칭 소자인 Q_1 과 Q_2 의 스위칭 동작에 의해서 얻어진 단자전압을 구형파 전원(V_{ab})으로 등가화 한 것으로, 고조파성분을 무시하고 기본파 (FHA: First Harmonic Approximation) 성분만을 고려한 것이고, C_s 와 L_{11} 은 1차측 직렬 커패시터와 1차측 누설 인덕턴스를, L_m 은 자화 인덕턴스를 나타내며 L_{12} 와 R_{eq} 은 1차측에서 바라본 2차측 누설 인덕턴스와 등가 부하저항을 나타낸다. 그리고 등가 부하저항(R_{eq})은 부하저항과 2차측 정류 다이오드, 그리고 커패시터 필터(C_o)를 등가

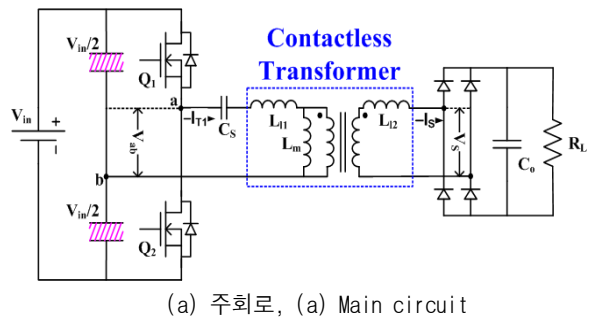
화한 값이다^[5]. 또한, f_n 은 스위칭 주파수(f_s)와 공진 주파수(f_r)의 비로써 규준화 된 공진 주파수를 나타낸 것이며, L_{eq} 는 부하가 단락 되었을 때의 등가 누설 인덕턴스를 나타낸 것이다. 본 논문에서 직렬 커패시터(C_s)와 등가 누설 인덕턴스(L_{eq})가 공진 할 때의 공진 주파수(f_r)는 $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C_s}}$ 으로 표현할 수 있고, 그림 1 (b)의 등가회로로부터 각각의 정규화 된 값 들을 아래의 식 (1) ~ (4)와 같이 정의하였다.

$$R_{eq} = \frac{8}{\pi^2} R_L \tag{1}$$

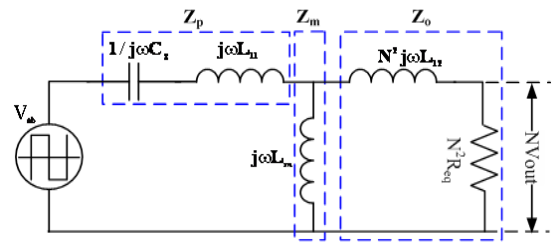
$$f_n = \frac{f_s}{f_r} \tag{2}$$

$$L_{eq} = L_{11} + \left(\frac{N^2 L_m L_{12}}{L_m + N^2 L_{12}} \right) \tag{3}$$

$$k = \frac{L_m \frac{1}{N}}{\sqrt{(L_m + L_{11}) \left(\sqrt{L_m \frac{1}{N^2} + L_{12}} \right)}} \tag{4}$$



(a) 주회로, (a) Main circuit



(b) 등가회로, (b) Equivalent circuit

그림 1 비접촉 변압기를 적용한 Half-Bridge 직렬 공진컨버터 주회로 및 등가회로

Fig. 1 Half-bridge series resonant converter using a contactless transformer and its equivalent circuit

본 논문에서 적용된 비접촉 변압기는 1차측에서 2차측으로 에너지를 전달하는데 있어서 1차측과 2차측 사이에 큰 공극(gap)이 존재하므로 이러한 큰 공극(gap)을 갖는 비접촉 변압기는 기존 변압기와 달리 자화 인덕턴스(L_m)가 상대적으로 작은 값을 가지게 되고, 1, 2차측 누설 인덕턴스(L_{l1}, L_{l2})의 값이 증가하게 되어 식 (4)의 결합계수(k)가 낮아지는 특성을 갖게 된다. 이러한 특성을 갖는 비접촉 변압기의 경우 자화 인덕턴스(L_m)를 통한 자화전류(I_m)가 많이 흐르게 되어 1차측 에너지를 2차측으로 전달하는데 많은 어려움이 있다. 뿐만 아니라, 1차측과 2차측 권선방법 및 결합구조에 따라 1, 2차측 누설 인덕턴스(L_{l1}, L_{l2})와 자화 인덕턴스(L_m) 값의 변화가 많이 발생하기 때문에 회로해석에 있어서 매우 중요한 고려사항으로 작용하게 된다. 부하 변화에 따른 전압이득 특성을 알아보기 위한 수식은 아래의 식 (5) ~ (9)와 같다.

$$V(f, R) = \frac{1}{N} \left| \frac{1}{1 + L_c - \beta(f) + jQ_s(f, R) \left(\frac{f_s}{f_r} - \frac{f_r}{f_s} \right)} \right| \quad (5)$$

$$L_c = \frac{L_{l1}}{L_m} \quad (6)$$

$$\alpha = \left(\frac{1}{N^2} + \frac{L_{l2}}{L_m} \right) \quad (7)$$

$$\beta(f) = \frac{1}{(2\pi f)^2 L_m C_s} \quad (8)$$

$$Q_s(f, R) = \frac{2\pi f_r \alpha L_{eq}}{N^2 R_{eq}} \quad (9)$$

그림 2는 스위칭 주파수에 따라 Half-Bridge 직렬 공진컨버터의 동작영역을 표현한 것이다. 기존 비접촉 변압기 적용 직렬 공진컨버터는 스위칭 동작영역이 공진 주파수(f_r)보다 높은 구간(연속모드 동작영역)에서 스위칭 동작을 하는 것이 일반적이었다^[1, 2]. 그러나 본 논문에서는 기존의 비접촉 변압기 적용 직렬 공진컨버터와는 달리 부하가 중부하일 때 스위칭 주파수 동작영역을 공진 주파수(f_r)보다 낮은 구간(불연속모드 동작영역)에서 스위칭 동작이 가능하도록 설계 및 제작하였다. 이러한 경우 기존의 비접촉 변압기 적용 직렬 공진 컨버터에서 발생하는 문제점인 2차측 정류 다이오드의 스위칭 손실을 줄일 수 있어 효율특성을 높일 수

있다. 그러나 비접촉변압기 1, 2차 측 권선이 어긋나거나, 1, 2차측 권선 사이의 공극(gap)이 증가하게 되면 1, 2차측 누설 인덕턴스(L_{l1}, L_{l2})가 증가하게 되고 자화 인덕턴스(L_m)가 작아지게 되어 전압이득 상승과 함께 공진 주파수(f_r)가 낮아지고 스위칭 주파수 동작영역이 연속모드로 넘어가게 된다. 그렇기 때문에 주 스위칭 소자의 영 전압 스위칭(ZVS)은 이를 수 있지만 2차측 정류 다이오드의 영 전류 스위칭(ZCS)은 이를 수 없다.

그림 3은 본 논문에 적용된 비접촉 변압기를 제작하기 위해 설계한 PCB Layout 모습으로, 그림 3 (a)와 (b)는 PCB Layout된 비접촉변압기 1차측 권선과 2차

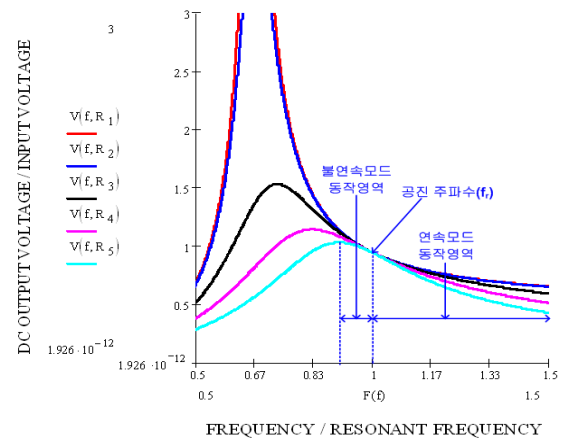


그림 2 비접촉변압기적용 하프브리지 직렬 공진컨버터의 스위칭 주파수 동작영역

Fig. 2 Switching frequency operating range of half-bridge series resonant converter using a contactless transformer

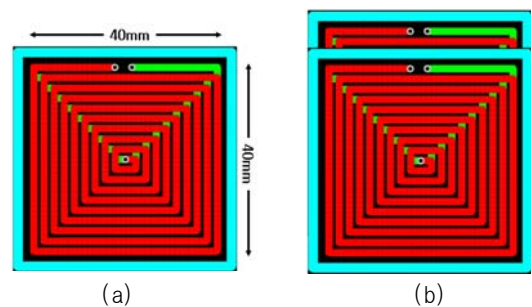


그림 3 PCB Layout을 이용 비접촉 변압기 (a) 1, 2차측 권선이 일치한 상태, (b) 1/6(6.5mm) 정도 어긋난 상태
Fig. 3 Contactless transformer using PCB Layout (a) Aligned condition of the primary-secondary winding, (b) Miss-aligned condition of the primary-secondary winding as extent as 1/6 (6.5mm)

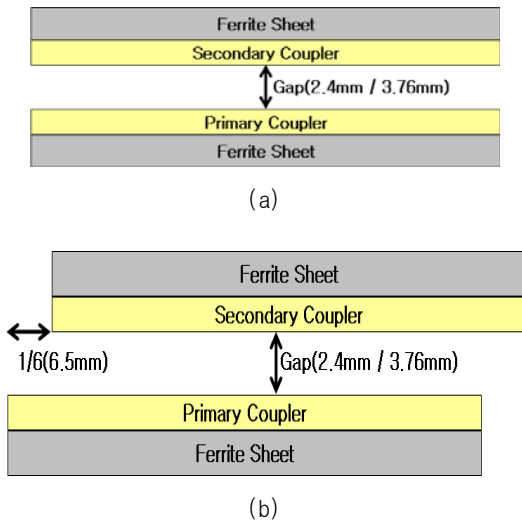


그림 4 비접촉 변압기의 측면모습

- (a) 1, 2차측 권선이 일치한 상태
- (b) 1/6(6.5mm)정도 어긋난 상태

Fig. 4 Lateral view of contactless transformer

- (a) Aligned condition of the primary-secondary winding
- (b) Miss-aligned condition of the primary-secondary winding as extent as 1/6 (6.5mm)

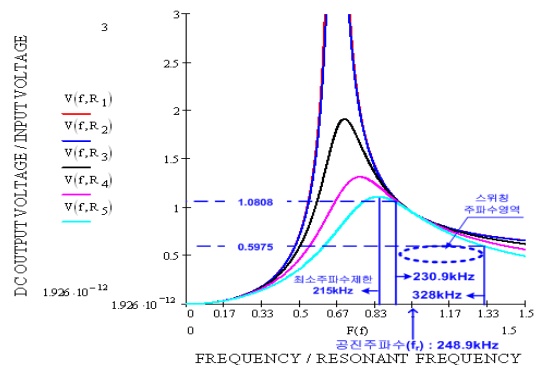
측 권선이 일치한 상태와 1/6(6.5mm)정도 어긋난 상태를 윗면에서 바라본 그림이고, 그림 4 (a), (b)는 그림 3 (a), (b)를 측면에서 바라본 것으로 비접촉 변압기의 1, 2차측 권선사이의 공극(gap)을 2.4mm와 3.76mm로 변화시켜 각각 공극(gap)의 차이에 따라 비접촉 변압기 1, 2차측 권선을 일치시킨 상태와 1/6(6.5mm)정도 커플링이 어긋나도록 결합시킨 상태에 대한 측정값을 표 1과 표 2에 나타내었고, 측정값을 토대로 공진 주파수(f_r) 변화 및 전압이득 특성변화를 관찰하였다.

그림 5 (a), (b)는 표 1을 근거로 비접촉 변압기 1, 2차측 권선 사이의 공극(gap) 변화에 따른 전압이득 특성을 나타내었다. 비접촉 변압기 1, 2차측 권선 사이의 공극(gap)이 2.4mm이고, 커플러가 일치하는 경우 중부하($R_L=5.6\Omega$)일때 시뮬레이션 결과 주 스위칭 소자의 영전압 스위칭(ZVS) 및 2차측 정류 다이오드의 영전류 스위칭(ZCS)은 각각 230.9kHz ~ 233.1kHz와 228kHz ~ 231.2kHz의 스위칭 주파수 동작영역에서 가능하다. 그리고 본 논문에서는 최소 스위칭 주파수를 비접촉 변압기 1, 2차측 권선 사이의 공극(gap)이 2.4mm이고, 커플러가 일치하는 상태의 중부하($R_L=5.6\Omega$)시 이득특성을 고려하여 최소 스위칭 주파수인 215kHz로 제한하였다. 만약 다른 조건상태의 경우(공극이 3.76mm이거나 커플

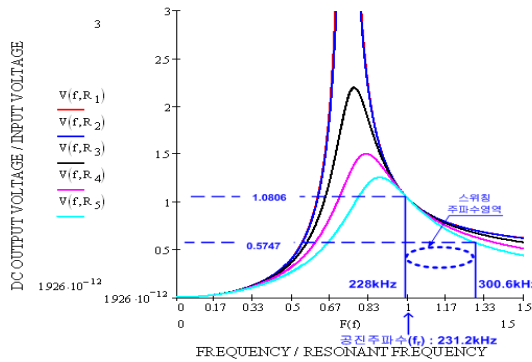
러가 어긋난 경우) 비접촉 변압기 1, 2차측 누설인덕턴스(L_{l1}, L_{l2})가 증가하게 되고, 자화인덕턴스(L_m)가 감소하게 되어 전압이득은 높아지지만 공진주파수(f_r)가 낮아짐으로 비접촉 변압기의 커플링 변화에 의해 하드스위칭을 할 위험이 있기 때문에 그림 5(a)의 이득특성에 대한 동작조건을 관찰하여 최소스위칭 주파수를 선정하여 적용하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 최소스위칭 주파수를 215kHz로 제한하여 1, 2차측 비접촉 변압기 의 공극과 어긋남 등 모든 변화에 대해 하드스위칭이 이루어지지 않도록 설계 및 적용하였다. 표 1과 2를 통해서 2차 측 비접촉 변압기의 위치변화와 1, 2차측 권선 사이의 공극(gap)의 변화에 따라 각종 파라미터 값과 결합계수(k)가 변화하는 것을 확인할 수 있다.

표 1 1,2차측 권선이 일치할 때 비접촉변압기 파라미터
Table 1 Parameters of contactless transformer with the primary-secondary winding aligned

	공극(gap) (2.4mm)	공극(gap) (3.76mm)
1차측 자기인덕턴스(L_p)	19.79uH	18.58uH
변압기 1차측 내부저항	3.035 Ω	2.54 Ω
2차측 자기인덕턴스(L_s)	9.99uH	9.33uH
변압기 2차측 내부저항	1.68 Ω	1.4 Ω
자화 인덕턴스(L_m)	14uH	11.84uH
등가 누설인덕턴스(L_{eq})	8.7uH	10.08uH
1차측 누설인덕턴스(L_{l1})	5.79uH	6.74H
2차측 누설인덕턴스(L_{l2})	2.07uH	2.64uH
커플링 계수(k)	0.749	0.676
직렬 공진 커패시터(C_s)	47nF	47nF

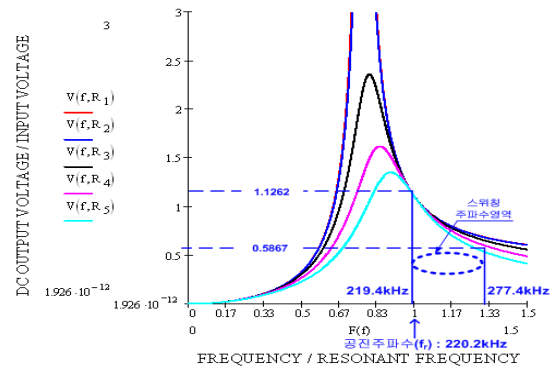


(a) 공극 2.4mm, (a) Gap 2.4mm



(b) 공극 3.76mm, (b) Gap 3.76mm

그림 5 비접촉변압기 1, 2차측 권선이 일치되었을 때 하프 브리지 공진컨버터 전압이득특성
Fig. 5 Voltage characteristics of the half-bridge resonant converter using a contactless transformer with the primary-secondary winding aligned



(b) 공극 3.76mm, (b) Gap 3.76mm

그림 6 비접촉변압기 1, 2차측 권선이 1/6(6.5mm) 어긋난 상태에서의 하프브리지 공진컨버터 전압이득특성
Fig. 6 Voltage characteristics of half-bridge resonant converter using a contactless transformer with the primary-secondary winding miss-aligned as extent as 1/6(6.5mm)

표 2 비접촉변압기가 1/6(6.5mm) 어긋났을 때의 파라미터
Table 2 Parameters of contactless transformer with the primary-secondary winding miss-aligned as extent as 1/6(6.5mm)

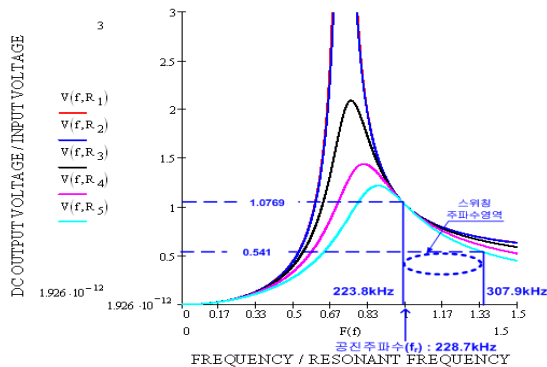
	공극(gap) (2.4mm)	공극(gap) (3.76mm)
1차측 자기인덕턴스(L_p)	19.7uH	18.6uH
변압기 1차측 내부저항	3.02Ω	2.51Ω
2차측 자기인덕턴스(L_s)	9.91uH	9.28uH
변압기 2차측 내부저항	1.64Ω	1.4Ω
자화 인덕턴스(L_m)	12.84uH	11.09uH
등가 누설인덕턴스(L_{eq})	10.3uH	11.11uH
1차측 누설인덕턴스(L_{l1})	6.86uH	7.51uH
2차측 누설인덕턴스(L_{l2})	2.65uH	3.01uH
커플링 계수(k)	0.691	0.635
직렬 공진 커패시터(C_s)	47nF	47nF

표 2는 비접촉 변압기의 1, 2차측 권선이 1/6(6.5mm) 정도 어긋난 상태에 대한 측정 파라미터이다. 2차측 비접촉 변압기 권선이 중앙에서 가장자리(6.5mm)만큼 어긋나게 될 경우로 이동하게 되면 결합계수(k)와 공진 주파수(f_r)는 감소하고 전압이득은 상승하게 된다. 이것은 표 1과 표 2에서 확인할 수 있듯이 1, 2차측 비접촉 변압기 사이의 공극(gap)이 증가하거나 커플러가 어긋나게 되면 1, 2차측 자기 인덕턴스(L_p, L_s)와 자화 인덕턴스(L_m)가 감소하고 누설 인덕턴스(L_{l1}, L_{l2})와 자화 전류(I_m), 그리고 등가 누설 인덕턴스(L_{eq})는 증가하기 때문에 공진 주파수($f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C_s}}$)는 감소하게 된다.

그림 6은 공극(gap)이 2.4mm와 3.76mm일때 1, 2차측 비접촉 변압기가 1/6 (6.5mm)정도 어긋난 상태에 대한 전압이득 특성으로 1, 2차측 비접촉 변압기가 일치한 상태보다 공진 주파수(f_r)는 낮아지고, 전압이득은 증가한 것을 확인할 수 있다.

3. 마그네틱 커플러를 이용한 주파수 제어

기존 비접촉 변압기 적용 직렬 공진컨버터는 2차측에서 별도의 레귤레이터를 사용하여 정전압 제어를 하였다. 이러한 방식은 전체 시스템의 효율저감과 함께 비접촉 변압기 2차측 정류부에서 별도의 안정화 전원 시스템을 사용하기 때문에 부피가 증가하는 단점을 가지게 된다.



(a) 공극 2.4mm, (a) Gap 2.4mm

따라서 본 논문에서는 그림 7과 같이 출력전압을 제어하기 위한 신호를 V-F Converter를 통해 주파수로 변환하고, 변환된 주파수는 제어용 2차측 마그네틱 커플러를 통해 비접촉으로 제어회로에 연결된 1차측 마그네틱 커플러로 전달되도록 설계 및 제작하였다. 전달된 주파수는 F-V Converter를 통해 다시 DC전압으로 변환된다. 변환된 전압은 제어회로를 통해 스위칭 주파수를 제어하게 되어, 일정하게 출력전압과 전류를 제어하게 된다. 그러나 적용하고자 하는 제어용 마그네틱 커플러에는 전력전달용 메인 커플러인 비접촉변압기에 비해 상대적으로 아주 적은 전류가 흐르고 있어 비접촉변압기의 자속에 의해 쇄교된 유기전압에 따라 제어용 마그네틱 커플러가 불안정한 제어를 하게 된다. 그리고 적용하고자 하는 마그네틱 커플러는 누설 인덕턴스가 크고 자화 인덕턴스는 상당히 작아 마그네틱 커플러의 커플링 계수는 작은 값($k=0.239$)을 가지게 되어 1차측의 신호가 2차측에 제대로 전달되지 못하는 단점을 가지고 있다. 또한 마그네틱 커플러가 일정하게 고정되어 있지 않기 때문에 커플러가 이동하여도 제어가 가능하도록 설계해야 하는 문제점을 가지고 있다.

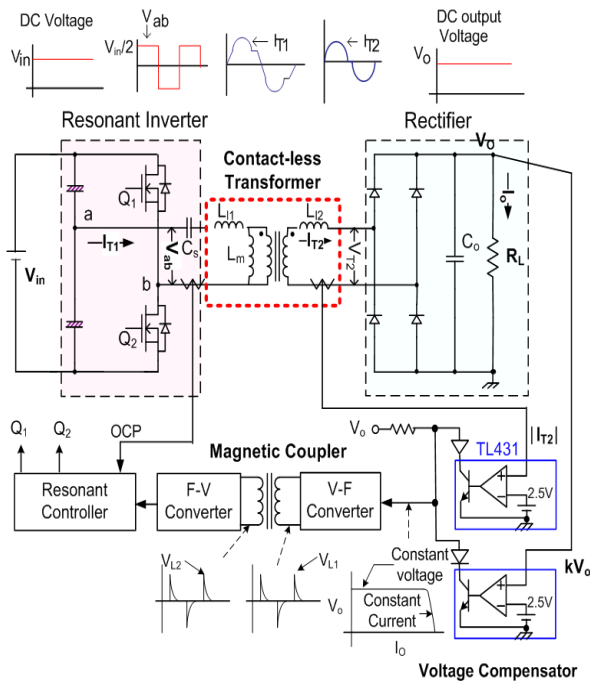


그림 7 V-F Converter와 F-V Converter를 적용한 주파수 제어 시스템 회로
 Fig. 7 Frequency control circuit using V-F Converter and F-V Converter

표 3 마그네틱 커플러 주요 정격 비교
 Table 3 Specifications of magnetic coupler

	커플링이 일치하는 경우	커플링이 어긋(1/6)났을때
1차측 자화인덕턴스	26.29uH	20.19uH
1차측 누설인덕턴스	83.23uH	89.95uH
2차측 누설인덕턴스	84.43uH	91.49uH
커플링 계수	0.239	0.184

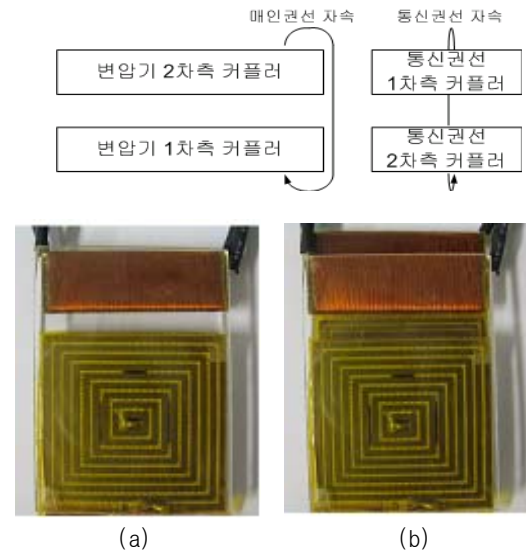


그림 8 비접촉변압기와 커플러 (a) 1, 2차 권선이 일치한 상태 와 (b) 1/6(6.5mm)정도 어긋난 상태
 Fig. 8 Contactless transformer and magnetic coupler (a) when the primary-secondary winding is aligned (b) when the primary-secondary winding is misaligned as extent as 1/6(6.5mm)

따라서 본 논문에서는 그림 8에서처럼 권선방법을 통해 메인 커플러인 비접촉변압기 자속에 의해 제어용 마그네틱 커플러의 자속이 영향을 받지 않고, 제어용 1차측 커플러의 신호가 2차측 커플러에 전달될 수 있도록 각 코일의 유도부분 자속이 서로 90도가 되도록 배치하여 권선사이의 커플링 영향을 최소화하도록 배치하였으며, 제어용 마그네틱 커플러의 1, 2차측 커플러 면적을 넓혀 커플러가 이동하여도 1/6(6.5mm) 범위 안에서 1차측의 신호를 2차측으로 전달할 수 있도록 설계 및 제작하였다.

4. 실험결과

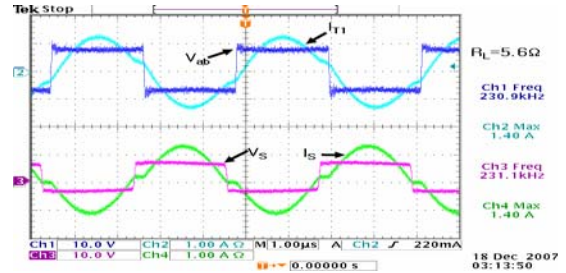
본 논문에서는 Half-Bridge 직렬 공진컨버터를 이용

하여 입력전압 15VDC에 대해 출력전압 4.2VDC(3.15W)에 대하여 실험을 하였다. 표 4는 본 논문에 적용된 소자의 정격이고, 그림 9는 비접촉변압기의 1, 2차측 권선을 일치시켰을 때 4.2VDC 일정 출력전압 제어상태에서 공극(gap)의 변화(gap=2.4mm, 3.76mm)와 부하변화($R_L=5.6\Omega$, 28Ω , $I_0=750mA$, $150mA$)에 따른 1차측 단자전압(V_{ab})과 전류(I_{T1}) 및 2차측 단자전압(V_s)과 전류(I_s)의 파형을 측정된 것이다.

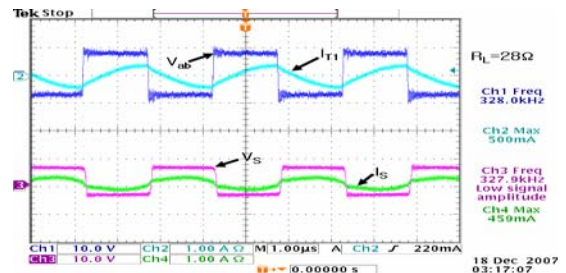
공극(gap)이 2.4mm이고, 1, 2차측 비접촉 커플러가 일치하는 상태일 때 부하가 중부하($R_L=5.6\Omega$)의 경우 1차측 불연속모드의 공진전류가 2차측으로 전달되어 2차측 정류 다이오드에도 불연속 공진전류가 흐르는 것을 그림 9 (a)를 통해 확인할 수 있다. 따라서 중부하($R_L=5.6\Omega$)시 주 스위칭 소자의 ZVS(Zero Voltage Switching)가 가능하고, 2차측 정류 다이오드 역시 ZCS(Zero Current Switching)가 가능하므로 스위칭 손실을 줄일 수 있어 연속모드에서만 동작했던 기존의 비접촉 직렬 공진컨버터에 비해 효율을 개선시킬 수 있다. 그러나 그림 9 (b) ~ (d)처럼 부하가 경부하로 넘어가거나 비접촉변압기 1, 2차측 권선의 커플링이 어긋나는 경우 높은 이득특성에 따라 스위칭 주파수(f_s)가 공진 주파수(f_r) 이상에서 동작하게 되므로 기존 비접촉 직렬 공진컨버터와 같이 연속모드에서 동작하게 된다.

표 4 Half-bridge 직렬 공진 컨버터의 주요정격
Table 4 Specifications of half-bridge series resonant converter

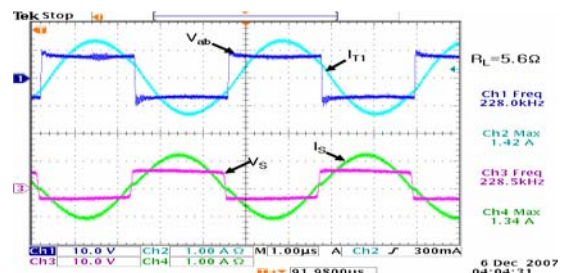
입력전압(V_{in})	15VDC
출력전압(V_{out})	4.2VDC
출력용량(P_{out})	3.15W
스위칭 주파수 범위	230.9kHz~328kHz
공진 주파수(f_r)	233.1kHz
주 스위칭 소자 (Q_1, Q_2)	IRFZ24N (55V, 17A, $R_{DS}=0.07\Omega$)
공진 커패시터(C_s)	47nF, 250V
턴수 및 턴수비	$n_1=24, n_2=18$ $N=1.33(n_1/n_2)$
출력 정류다이오드	B330(60V, 3A, $V_F=0.5V$)
페라이트시트투자율(μ)	60H/m(CNS-L100)



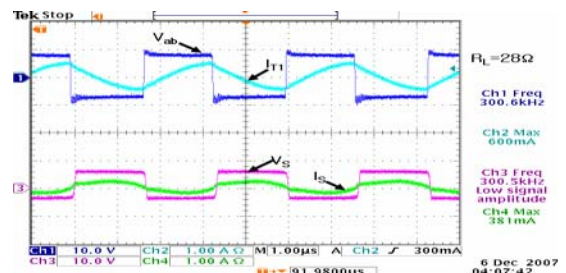
(a) 2.4mm 공극 (4.2VDC / 750mA)
(a) 2.4mm gap (4.2VDC / 750mA)



(b) 2.4mm 공극 (4.2VDC / 150mA)
(b) 2.4mm gap (4.2VDC / 150mA)



(c) 3.76mm 공극 (4.2VDC / 750mA)
(c) 3.76mm gap (4.2VDC / 750mA)

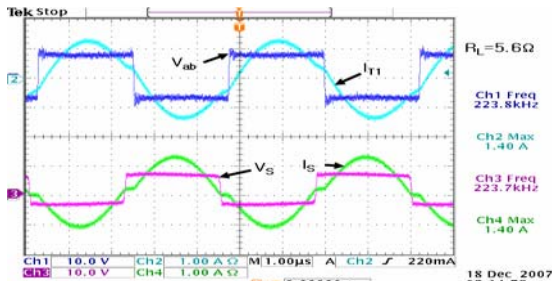


(d) 3.76mm 공극 (4.2VDC / 150mA)
(d) 3.76mm gap (4.2VDC / 150mA)

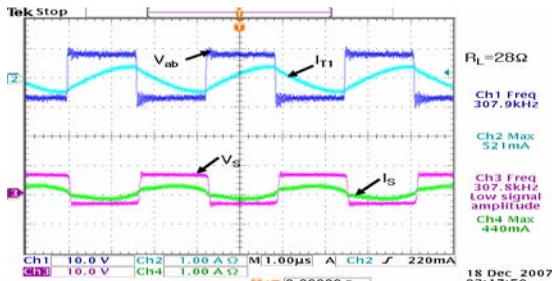
그림 9 비접촉변압기 1, 2차측 권선을 일치시킨 상태에서의 1, 2차측 단자전압(V_{ab}, V_o) 및 전류(I_{T1}, I_s) (10V/div, 1A/div)

Fig. 9 Experimental waveforms of the voltage(V_{ab}) and current(I_{T1}) in the primary, and of the voltage (V_s) and current(I_s) in the secondary of contactless transformer with the primary-secondary winding aligned (10V/div, 1A/div)

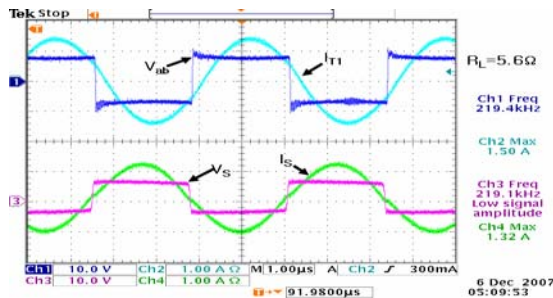
그림 10은 1,2차측 비접촉 변압기 1, 2차측 권선이 1/6(6.5mm)정도 어긋나도록 커플링 시켰을 때 4.2VDC 일정 출력전압 제어상태에서 공극(gap)의 변화(gap=2.4mm, 3.76mm)와 부하변화($R_L=5.6\Omega, 28\Omega$)에 따른 1차측 단자전압(V_{ab})과 전류(I_{T1}) 및 2차측 단자전압(V_s)과 전류(I_s)의 파형을 측정된 결과이다. 그림 10 (a)는 중부하(4.2VDC / 750mA)시 스위칭 주파수(f_s)가 공진 주파수(f_r)보다 낮은 영역에서 동작하기 때문에 2차측 전류(I_s)가 불연속모드의 공진전류로 흐르는 것을 확인할 수 있다. 그러나 경부하 및 공극이 클 경우의 그림 10 (b) ~ (d)는 스위칭 주파수(f_s)가 공진 주파수(f_r)보다 높은 주파수 영역에서 동작하기 때문에 연속모드의 영역에서 동작하는 것을 확인할 수 있다.



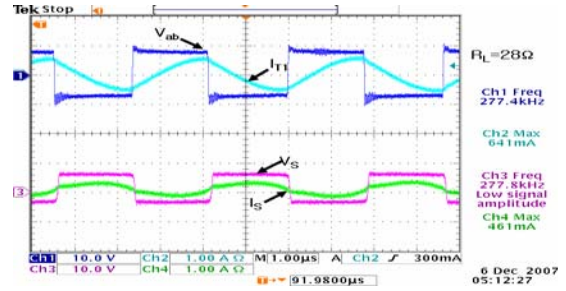
(a) 공극(gap) 2.4mm (4.2VDC / 750mA)
(a) Gap 2.4mm (4.2VDC / 750mA)



(b) 공극(gap) 2.4mm (4.2VDC / 150mA)
(b) Gap 2.4mm (4.2VDC / 150mA)



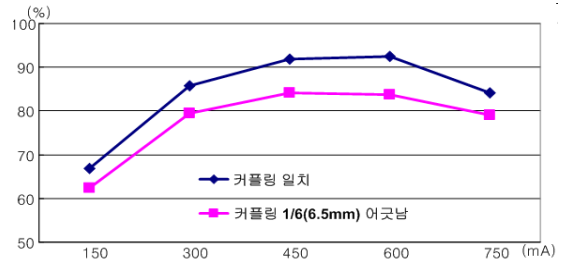
(c) 공극 3.76mm (4.2VDC / 750mA)
(c) Gap 3.76mm (4.2VDC / 750mA)



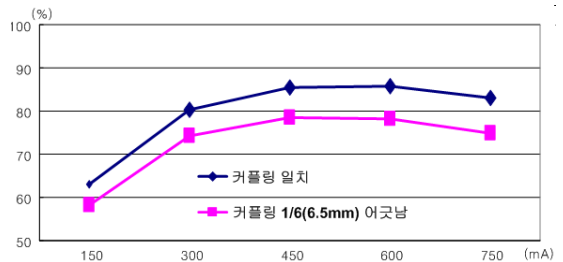
(d) 공극 3.76mm (4.2VDC / 150mA)
(d) Gap 3.76mm (4.2VDC / 150mA)

그림 10 1, 2차측 비접촉 커플러를 1/6(6.5mm)정도 어긋나게 커플링한 상태 1, 2차측 단자전압(V_{ab}, V_o) 및 전류(I_{T1}, I_s) (10V/div, 1A/div)

Fig. 10 Experimental waveforms of the voltage(V_{ab}) and current(I_{T1}) in the primary, and of the voltage (V_s) and current(I_s) in the secondary of contactless transformer with the primary-secondary winding miss-aligned as extent as 1/6(6.5mm) (10V/div, 1A/div)



(a) 공극 2.4mm, (a) Gap 2.4mm



(b) 공극 3.76mm, (b) Gap 3.76mm

그림 11 전류변화에 따른 효율특성

Fig. 11 Efficiency characteristics for load variations

그림 11은 본 논문에서 적용한 Half-Bridge 직렬 공진컨버터의 부하변화에 대해 비접촉 변압기 1, 2차측 권선의 커플링이 일치하는 상태와 커플링이 1/6(6.5mm)정도 어긋난 상태에 따른 효율특성을 그래프로 나타낸 것이다. 그림 11 (a)에서 확인할 수 있듯이 비접촉 변압기 1, 2차측 권선의 커플링이 일치하는 경우 중부하($R_L=5.6\Omega$)시 불연속모드의 공진전류에 의해

2차측 정류 다이오드에서 발생하는 스위칭 손실을 줄일 수 있어 높은 효율을 얻을 수 있었다. 그리고 그림 11 (b)를 통해 1, 2차측 비접촉 변압기 권선 사이의 공극(gap)이 증가하거나 커플링이 어긋나게 되면 누설 인덕턴스(L_{11} , L_{22})가 증가하고 상대적으로 자화 인덕턴스(L_m)는 감소하여 결합계수(k)가 낮아지므로 ($k=0.749 \rightarrow 0.691$, $k=0.676 \rightarrow 0.635$) 그만큼 에너지 전달의 어려움이 발생하여 효율 측면에서도 많은 손실이 생기는 것을 확인 할 수 있었다.

5. 결 론

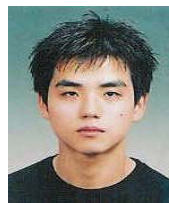
본 논문에서는 3.15W급 Half-Bridge 직렬 공진컨버터에 대해 시제품을 제작하여 실험한 결과를 서술하였다. 기존 연속모드에서만 동작되던 비접촉 장치와 다르게 본 논문은 1, 2차측 비접촉 커플러 사이의 공극(gap)이 2.4mm인 경우 중부하($R_L=5.6\Omega$)일 때 불연속모드 영역에서의 동작이 가능하므로 2차측 정류 다이오드의 스위칭 손실을 줄일 수 있어서 보다 높은 효율특성을 얻을 수 있었다. 그리고 기존의 방식은 일정 출력전압을 제어하기 위해 2차측에 별도의 레귤레이터를 사용하였으나 본 논문에서는 데이터 통신용 마그네틱 커플러를 사용하여 일정 출력전압을 제어함으로써 전체 시스템의 효율을 향상시키고 부피를 줄일 수 있었다.

이 논문은 한국 과학재단 과제인 “무접점 전원 시스템의 효율향상 및 최적설계에 관한 연구” 과제(R01-2005-000-11173-0(2007))로 수행하였음.

참 고 문 헌

- [1] Chang-Gyun Kim, Dong-Hyun Seo, Jung-Sik You, Jong-Hu Park, Bo H Cho, “Design of a Contactless Battery Charger for Cellular Phone”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 48, No. 6, pp. 1238-1247, 2001, December.
- [2] Byungcho Choi, Jaehyun Nho, Taeyoung Ahn, Seungwon Choi, “Design and Implementation of Low-Profile Contactless Battery Charger Using Planar Printed Circuit Board Windings as Energy Transfer Device”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 51, No. 1, 2004, February.
- [3] 이현관, 공영수, 김은수, 김윤호, 이기식, 강성인, 정봉근, “태양광 발전 시스템을 위한 무접점 전원장치”, *전력전자학회 논문지*, Vol. 11, No. 3, pp. 216-223, 2006. 6.
- [4] T Bieler, M Perrotect, V Nguyen, Y Perriard, “Contactless Power Information Transmission”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 38, No. 5, pp. 1266-1272, 2002, Sept./Oct.
- [5] Robert L. Steigerward, “A Comparison of half-Bridge Resonant Converter Topologies”, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 41, pp. 118-124, 1994.
- [6] L Gamage, M Ishitobi, M Nakaoka, “Performance Evaluations of a Novel Prototype of High Frequency Non-Contact Power Transformer”, *Journal of Power Electronics*, Vol. 4, No. 1, pp. 12-17, 2004.

저 자 소 개



김주훈(金柱勳)

1982년 11월 20일생. 2008년 전주대 전기전자공학부 졸업. 현재 동 대학원 석사과정.



송환국(宋煥國)

1982년 2월 8일생. 2007년 전주대 전기전자공학부 졸업. 현재 동 대학원 석사과정.



김은수(金恩洙)

1964년 3월 26일생, 1986년 중앙대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1989년~2001년 한국전기연구원 전력전자연구그룹 선임연구원. 2001년 9월~현재 전주대 공과대학 전기전자정보통신공학부 부교수. 당 학회 편집위원.



박성호(朴聖鎬)

1954년 9월 10일생. 1982년 공주대 과학교육과 졸업. 1984년 연세대 화학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 화학 고체물리학과 졸업(공박). 1989년 9월~현재 전주대 공과대학 기초과학과 교수.



김윤호(金倫鎬)

1949년 6월 20일생. 1974년 서울대 전기공학과 졸업. 1987년 미국 Texas A&M대 졸업(공박). 2003년 전력전자학회 회장 역임. 현재 한국철도학회 회장. 중앙대 전자전기공학부 교수.