

Half-Bridge 직렬 공진컨버터 적용 비접촉 충전시스템

송환국, 김주훈, 강성인, 김은수, 김윤희*
 전주대학교, 중앙대학교*

Half-Bridge Series Resonant Converter for The Contact-less Power Charging System

Hwan-Kook Song, Chu-Hoon, Sung-In Kang, Kim, Eun-Soo Kim, Yoon-Ho Kim*
 Jeon-Ju University, Chung-Ang University*

1. 서론

본 논문에서 적용하고자 하는 비접촉 시스템의 변압기는 기존의 변압기와 달리 공극이 크고 자성체로 투자율이 적은 페라이트 시트를 사용하였기 때문에 누설인덕턴스가 커지게 되며 자화인덕턴스는 상대적으로 작아서 결

합계수($k = \frac{L_m \frac{1}{N}}{\sqrt{L_p L_s}}$)가 작게 나오게 된다. 따라서 2차측

으로 에너지를 전달하는데 많은 어려움이 있고, 효율이 매우 저감되는 특성이 나타난다.

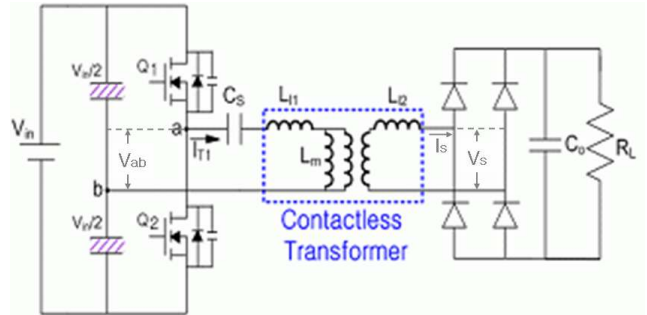
이러한 문제점의 해결방법으로 직렬 공진컨버터가 널리 이용되고 있다. 그러나 기존의 직렬 공진컨버터를 적용한 비접촉 시스템에서는 소프트 스위칭 동작을 위해 스위칭 주파수를 공진주파수보다 높은 주파수에서 연속모드의 공진전류로 스위칭 동작하는 것이 일반적이다^[2]. 이러한 기존의 직렬 공진컨버터를 적용한 비접촉 시스템은 주스위칭 소자의 영 전압 스위칭(ZVS)은 이룰 수 있으나 공진주파수보다 높은 영역에서 스위칭 동작을 하기 때문에 전압 이득특성이 낮고 1차측 순환전류가 많이 흘러 손실을 증가시키는 요인이 된다.

따라서 본 논문에서는 비접촉 시스템에 있어 스위칭 소자의 영 전압 스위칭(ZVS)뿐만 아니라 2차측 정류 다이오드 역시 영 전류 스위칭(ZCS)을 이룰 수 있는 비접촉 변압기를 적용한 Half-Bridge LLC 공진컨버터를 이용한 비접촉 충전 시스템을 제안하였다. 아래 그림 1.의 (a)와 (b)는 본 논문에서 제안한 비접촉 변압기를 적용한 Half-Bridge LLC 직렬 공진컨버터의 주회로와 등가회로이다. 제안된 LLC 공진컨버터는 중부하 범위에서는 공진 주파수보다 낮은 영역에서 스위칭 동작이 되기 때문에 높은 전압 이득특성에 따라 적은 턴수비의 변압기 사용과 불연속 모드 공진전류에 의한 효율특성을 개선할 수 있다.

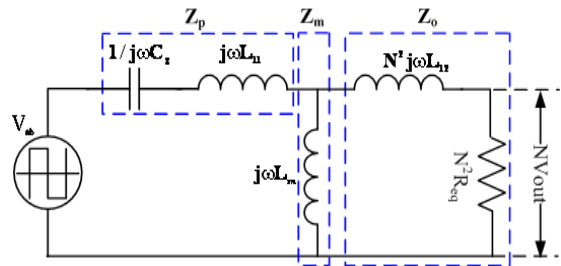
2. 설계사양 및 비접촉 변압기의 커플링 변화에 따른 특성분석

본 논문에서 직렬 커패시터(C_s)와 등가 누설 인덕턴스

(L_{eq})가 공진 할 때의 공진 주파수는 $w_r = 1/\sqrt{L_{eq}C_s}$ 이고, 그림 1. (b)의 등가회로로부터 각각의 규준화 된 값들을 아래의 식 (1) ~ (5)와 같이 정의하였다.



(a) 주회로



(b) 등가회로

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

$$w_n = w_s / w_r \quad (1)$$

$$Q = w_r L_{eq} / N^2 R_{ac} \quad (2)$$

$$A = L_{l1} / L_m \quad (3)$$

$$B = N^2 L_{l2} / L_m \quad (4)$$

$$L_{eq} = L_{l1} + \left(\frac{N^2 L_m L_{l2}}{L_m + N^2 L_{l2}} \right) \quad (5)$$

여기서 ω_n 는 스위칭 주파수(ω_s)와 공진주파수(ω_r)의 비로써 표준화 된 공진주파수를 나타낸 것이며, L_{eq} 는 부하가 단락 되었을 때 등가 누설인덕턴스를 나타낸 것이고, Q 는 부하의 Quality Factor를 나타낸 것이다. 그리고 A 는 자화인덕턴스(L_m)와 1차측 누설 인덕턴스 (L_{l1})의 비율을 나타낸 것이고, B 는 자화인덕턴스(L_m)와 2차측 누설인덕턴스 (L_{l2})의 비율을 나타낸 것이다. 위의 그림 1. (b)와 식(1) ~ (5)에 의해 얻은 전압이득 특성식은 아래의 식(6)과 같다.

$M=$

$$\left| \frac{1}{1 + A - \left(\frac{1}{f_n}\right)^2 \left(A + \frac{B}{1+B}\right) + jQ(1+B)\left(\omega_n - \frac{1}{\omega_n}\right)} \right| \quad (6)$$

본 논문에서 적용한 비접촉 변압기는 변압기 1,2차측 사이의 gap을 4.14mm로 두었으며 각각의 변압기 바깥쪽에 페라이트 시트를 덮어씌워 1,2차측 누설인덕턴스(L_{l1} , L_{l2})를 줄이고 자화인덕턴스(L_m)를 키울 수 있도록 제작 하였다. 그림 2.는 비접촉 변압기의 1차측과 2차측 권선의 위치를 일치시킨 사진이고, 그림 4.는 비접촉 변압기의 2차측 권선위치를 1/5(8mm)정도 어긋나게 했을 경우의 사진이다. 표 1, 2를 통해서 2차측 권선의 위치변화에 따라 각종 파라미터 값과 결합계수(k)가 변화하는 것을 볼 수 있다. 그림 4.와 같이 2차측 권선을 1차측 권선과 4/5(32mm)만큼 겹쳐지게 했을 경우 표2, 3을 통해 알 수 있듯이, 권선이 중앙에서 가장자리로 이동 할수록 중앙에 위치했을 때보다 결합계수(k)가 낮아지고 1,2차측 누설인덕턴스(L_{l1} , L_{l2})가 자화인덕턴스(L_m)보다 커지게 된다.

표 1 LLC 직렬공진 컨버터의 입출력 설계사양

입력전압(V_{in})	15VDC
출력전압(V_{out})	4.2 ~ 5.2VDC
출력용량(P_{out})	3.15W
스위칭 주파수(f_s)	222kHz
스위칭 소자	IRFZ24N, 55V, 17A
턴수 및 턴수비	$n_1=24, n_2=18 \quad N=1.33(n_1/n_2)$
출력 정류다이오드	B330, 60V, 3A

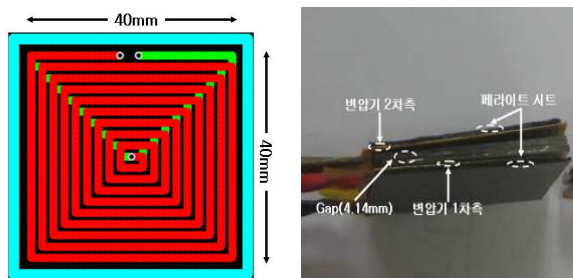


그림 2. 1, 2차측 권선이 일치한 상태

표 2 권선이 일치할 때의 파라미터

1차측 자기인덕턴스(L_p)	17.03uH
2차측 자기인덕턴스(L_s)	8.57uH
자화인덕턴스(L_m)	10.09uH
등가 누설인덕턴스(L_{eq})	10.35uH
1차측 누설인덕턴스(L_{l1})	6.944uH
2차측 누설인덕턴스(L_{l2})	2.894uH
직렬 공진커패시터(C_s)	47nF
1, 2차측 Gap	4.14mm
커플링 계수(k)	0.626

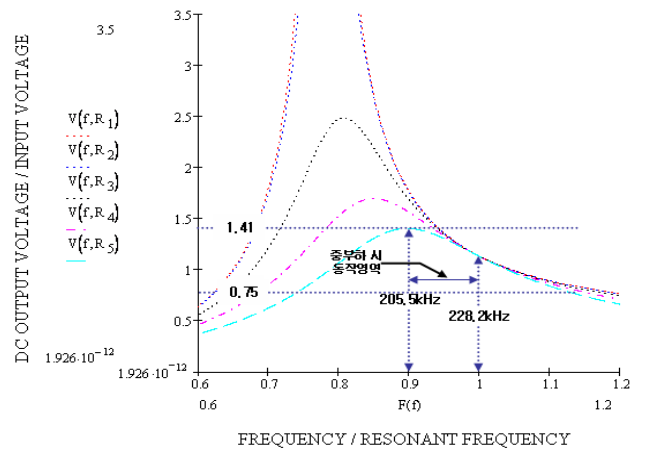


그림 3. 전압이득 특성(1, 2차측 권선이 일치한 상태)

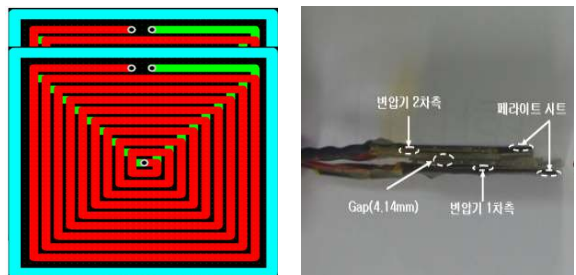


그림 4. 2차측 권선 위치가 1/5(8mm) 어긋난 상태

표 3 권선이 1/5(8mm) 어긋났을 때의 파라미터

1차측 자기인덕턴스(L_p)	16.89uH
2차측 자기인덕턴스(L_s)	8.55uH
자화인덕턴스(L_m)	7.758uH
등가 누설인덕턴스(L_{eq})	12.91uH
1차측 누설인덕턴스(L_{l1})	9.132uH
2차측 누설인덕턴스(L_{l2})	4.164uH
직렬 공진커패시터(C_s)	47nF
1, 2차측 Gap	4.14mm
커플링 계수(k)	0.485

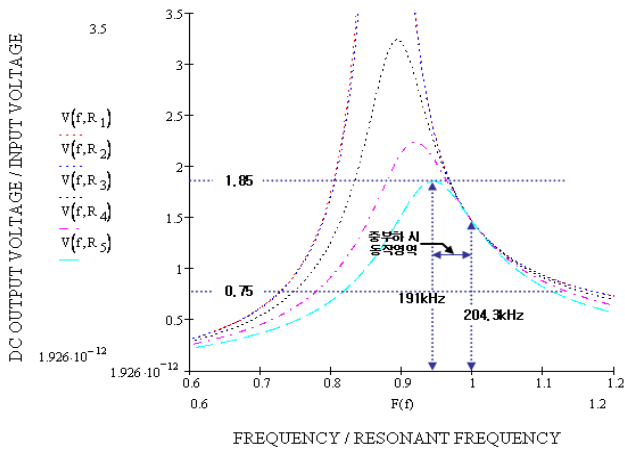


그림 5. 전압이득 특성(2차측 권선 위치가 1/5(8mm) 어긋난 상태)

위의 특성곡선에서 알 수 있듯이, 2차측 권선이 중앙에서 가장자리로 이동하면 결합계수(k)가 감소($k=0.626 \Rightarrow k=0.485$)하고 누설인덕턴스(L_{l1}, L_{l2})가 증가하기 때문에 주파수 제어범위가 좁아지며, 기울기 역시 달라지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 규준화 된 주파수(ω_n)가 1인 지점에서 높은 전압이득을 얻을 수 있고, 2차측 누설인덕턴스(L_{l2}) 증가에 따른 경부하 시 일정 출력전압을 제어 할 수 있는 특성이 향상되었다. 또한, 불연속 모드 공진전류에 따른 2차측 정류다이오드 역회복 특성에 따른 스위칭 손실이 저감된다.

제작된 비접촉 변압기에서 각각의 파라미터 L_{l1}, L_{l2}, L_m 을 추출하여 MathCAD를 이용하여 부하 변화($56\Omega \sim 5.6\Omega$)에 따른 전압이득 특성을 확인하였다. 부하변화에 따른 전압이득 특성을 알아보기 위한 수식은 아래의 식(7) ~ (10)과 같다.

$$V(f, R) = \frac{1}{N} \left| \frac{1}{1 + L_e - \beta(f) + jQ_s(f, R) \left(\frac{f_r}{f_s} - \frac{f_s}{f_r} \right)} \right| \quad (7)$$

$$\alpha = \left(\frac{1}{N^2} + \frac{L_2}{L_m} \right) \quad (8)$$

$$\beta(f) = \frac{1}{(2\pi f)^2 L_m C_s} \quad (9)$$

$$Q_s(f, R) = \frac{2\pi f_r \alpha L_{eq}}{N^2 R} \quad (10)$$

시뮬레이션 결과 커플링이 완전하게 이루어진 경우의 전압이득 범위는 중부하에서 0.75~1.41까지가 되기 때문에 입력전압의 범위가 $V_{in} = 15VDC$ 에서 출력전압 4.2VDC ~ 5.2VDC를 제어할 수 있다. 또한 주 스위칭 소자가 영전압 스위칭(ZVS)을 할 때의 스위칭 동작 영역은 205kHz ~ 228kHz 사이가 된다.

3. 실험결과

본 논문에서는 Half-Bridge 직렬 공진컨버터를 이용하여 입력전압 15VDC에 대해 출력(4.2VDC, 750mA),

3.15W에 대하여 실험을 하였다. 그림 7.은 커플링이 일치할 때 4.2V 일정 출력전압 제어 상태에서 중부하($R_L=5.6\Omega$)에서의 1차측 단자전압(V_{ab})과 전류(I_{T1}) 및 2차측 단자전압(V_s)과 전류(I_s)의 측정파형을 나타낸 것이다. 중부하(5.6 Ω)에서는 공진점 이하에서 스위칭 동작을 하므로 주 스위칭 소자는 ZVS (Zero Voltage Switching)를 하게 되고 2차측 정류다이오드의 역회복 특성에 따른 손실을 저감 하여 기존 연속모드에서 동작하는 컨버터에 비해 효율이 개선됨을 확인하였다.

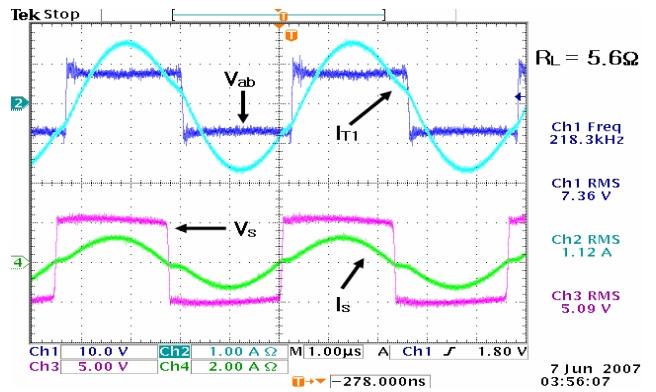


그림 7. 1,2차 권선을 일치시킨 커플링 경우 1, 2차측 단자전압 (V_{ab}, V_s) 및 전류(I_{T1}, I_s) (10V/div, 1A/div, 5V/div, 2A/div)

아래의 그림 8.은 1, 2차 권선이 1/5(8mm)정도 어긋난 경우 4.2V 일정 출력전압 제어상태에서 중부하($R_L=5.6\Omega$)에서의 1차측 단자전압과 전류 및 2차측 단자전압과 전류의 파형을 측정된 것이다. 이때에는 커플링이 낮아지기 때문에 이득을 높이기 위해서 그림 7에서의 동작주파수(218kHz)보다 더 낮은 주파수(200kHz)로 스위칭을 하는 것을 볼 수 있다. 1, 2차 권선이 어긋난 경우 역시 공진주파수보다 아래에서 동작하고 있기 때문에 2차측 전류(I_s)가 불연속으로 흐르고 있는 것을 확인할 수 있다.

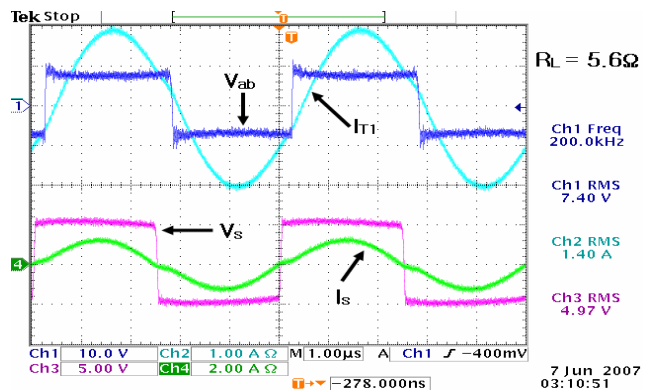


그림 8. 1,2차 권선을 어긋나게 커플링한 경우 1, 2차측 단자전압 (V_{ab}, V_s) 및 전류(I_{T1}, I_s) (10V/div, 1A/div, 5V/div, 2A/div)

아래의 그림 9.는 Half-Bridge 적용 직렬 공진컨버터의 부하변화에 따른 효율특성을 그래프로 나타낸 것이다. 아래의 그림에서 알 수 있듯이 1, 2차 권선이 일치되어 커플링 된 경우 기존 변압기 적용 LLC 직렬공진 컨버터

의 동작 조건과 비슷하기 때문에 높은 효율특성을 보여 주고 있고, 1/5(8mm) 어긋나게 커플링 하였을 경우 효율이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 커플링이 나빠지면 누설인덕턴스가 증가하고 상대적으로 자화인덕턴스가 낮아지기 때문에 그만큼 에너지 전달에 어려움이 있어서 효율 면에서도 많은 손실이 생기는 것을 확인 하였다.

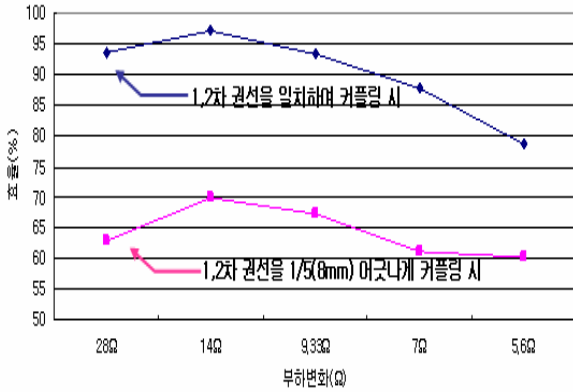


그림 9. 효율특성

4. 결 론

본 논문에서는 3.15W급 Half-Bridge 직렬 공진컨버터에 대해 시제품을 제작하여 실험한 결과를 서술하였다. 실험결과에서 볼 수 있듯이 Half-Bridge 직렬 공진컨버터의 모든 주스위칭 소자는 소프트 스위칭을 이룰 수 있었고, 기존 연속모드에서만 동작되던 비접촉 장치의 경우보다 중부하시 불연속 모드영역에서 동작되므로 보다 높은 효율특성을 얻을 수 있었다.

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 (R01-2005-000-11173-0(2007) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] 이현관, 공영수, 김은수, 김윤희, 이기식, 강성인, 정봉근 "태양광 발전 시스템을 위한 무접점 전원장치" 2005년 전력전자학회 논문지 pp. 216-223
- [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, February 2004