

직·병렬 공진형컨버터를 이용한 비접촉전원

김은수, 구대현*, 김종무*, 강도현*, 신병철**, 공영수, 양승철
 전주대학교, 한국전기연구원*, (주)신성이엔지**

Contact-less Power Supply Using Series-Parallel Rasonant Converter

E.S. Kim, D.H. Goo*, J.M. Kim*, D.H. Kang*, B.C. Shin**, Y.S. Kong, S.C. Yang
 Jeonju Uni., KERI*, Shinsung ENG Co., Ltd.**

ABSTRACT

A contact-less power supply system (CPS) allows electrical energy to supply to mobile consumers without any electrical or mechanical contact. CPS works in the same principle as a transformer, with the track litz cable forming the primary circuit and the pickup as the secondary. The track power supply generates the high frequency alternating current in the track cable. The captured AC magnetic field generated by the track conductors produces electrical energy in the pickup coil and the pickup rectifier converts the high frequency AC power to DC while regulating the power to the load. This paper presents the theoretical analysis, simulation and experimental results of the series-parallel resonant converter working as contact-less power supply system.

1. 서 론

반도체 제조장비에 적용되고 있는 리니어모터 구동 및 자기부상시스템의 전원 공급을 Power Cable에 의한 전원공급대신 Inductive Coupler(Non-contact Transformer)에 의한 비접촉 전원 공급 방식을 적용함에 있어 비접촉 변압기의 1차 권선 길이가 100m 정도 길어서 누설인덕턴스가 크고, 실제, 2차측 Pick-coil은 1차권선상의 일부분에서 Magnet Coupling에 의해 에너지를 유도하여 전달받기 때문에 에너지 전달이 어렵고, 또한 비접촉에 의해 전달받기 때문에 변압기 1차권선과 2차 Pick-coil 사이의 갭(Gap)이 커서 커플링계수가 적다. 따라서, 비접촉 전원장치에 적용할 수 있는 컨버터로써 누설인덕턴스를 이용할 수 있는 공진형 컨버터를 적용 검토 실험하였다.

특히, 비접촉 변압기의 누설인덕턴스 및 커플링 계수를 고려하여 적용함으로써 직렬 공진컨버터, 병

렬 공진컨버터와 직·병렬 공진컨버터의 주회로를 해석하여 각 회로에 대한 특성을 비교 검토하고 직·병렬공진형컨버터에 대한 실험결과를 서술했다.

표 1. 직·병렬 공진형 플-브리지 컨버터 주요정격

입 력	220V _{AC}
출력전압 제어범위	350V _{DC} , ±15%
출력 용량	10kW
스위칭 주파수 및 주 회로 방식	20kHz ~60kHz, 직·병렬 공진형 플-브리지 컨버터
부 하 조 건	BLDC Motor 와 제어 전원
효 율	85%이상 (측정효율 88%, 5Kw에서)
적 용 소 자	IGBT (600V _{DC} , 300A)
냉 각 방 식	팬 냉각

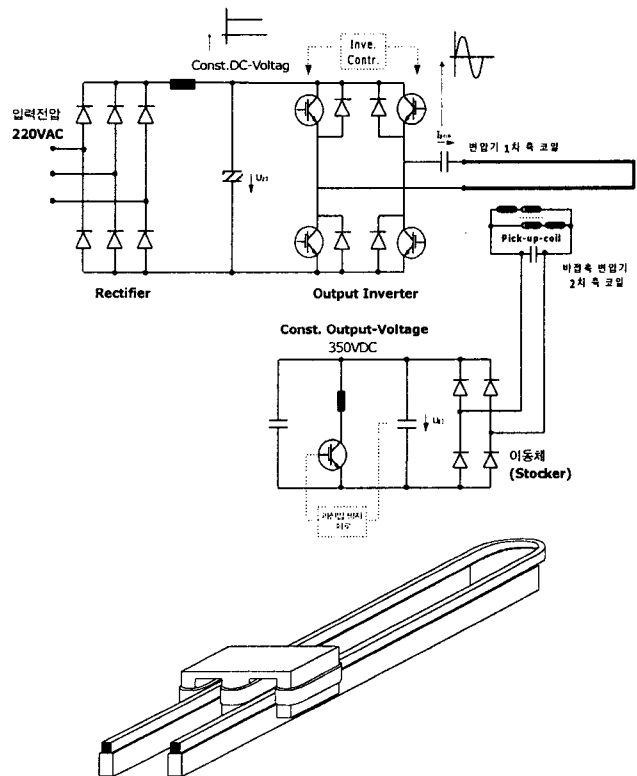


그림 1. 비접촉 전원 주회로도

2. 비접촉 변압기 및 주 회로 특성

2.1 비접촉 변압기

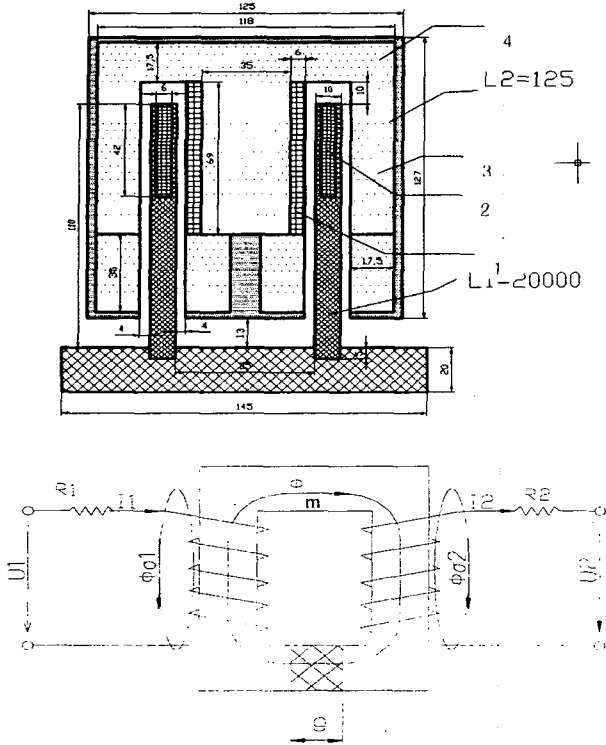


그림 2. Air-gap을 갖는 비접촉 변압기

비접촉 변압기의 1차측 전압과 2차측 전압을 페이저로 표현해서 수식을 전개하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V_1 = R_1 I_1 + j\omega L_1 I_1 - j\omega M I_2$$

$$V_2 = -R_2 I_2 - j\omega L_2 I_2 + j\omega M I_1 = (R + j\omega L) I_2$$

단, $M = L_{12}$ 이다.

2차측 수식을 전개해서 1차측에 대입하면

$$V_1 = I_1 \left[R_1 + j\omega L_1 + \left(\frac{\omega^2 M^2}{(R + R_2)^2 + \omega^2 (L + L_2)^2} \right) \cdot (R + R_2 - j\omega(L + L_2)) \right]$$

$$P^2 = \frac{\omega^2 M^2}{(R + R_2)^2 + \omega^2 (L + L_2)^2} = \frac{1}{\left(\frac{R + R_2}{\omega M} \right)^2 + \left(\frac{L + L_2}{M} \right)^2}$$

로 놓자.

$$V_1 = I_1 (R_1 + P^2(R_2 + R) + j\omega(L_1 - P^2 L_2 - P^2 L))$$

로 다시 쓸 수 있다.

그리고 여기서에서 $R + R_2 \ll \omega M, L = 0$ 이라면

$$P^2 = \left(\frac{M}{L_2} \right)^2 = k^2 \cdot \frac{L_1}{L_2} \approx k^2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \text{로 표현할 수 있다.}$$

따라서, 갭(Gap)이 크고 1차 측 권선이 길어서 비접촉 변압기에서의 누설인덕턴스 고려 및 커플링 계수를 적용함으로써 2차측 병렬커패시터 및 부하를 1차측으로 Reflect 시켜 변압기 특성에 따른 비접촉전원의 주회로인 공진형컨버터에 대한 입·출력 게인특성을 해석하여 구하고자 한다.

2.2 비접촉 전원 주 회로 특성

100m 정도 길게 늘어선 큰 누설인덕턴스를 갖는 변압기 1차 측 권선에서 갭(Gap)을 통해 2차 측 Pick-up 코일에 비접촉에 의한 에너지를 전달하는 전원을 구성하는 공진형 컨버터에 있어서 먼저 두 가지 방법의 LC공진 회로를 검토 할 수 있다. 변압기 1차측으로 Reflect된 출력부하가 공진하는 LC회로와 직렬로 연결되어 있을 때의 회로를 직렬공진 회로(SRC)라 하고, 변압기 1차측으로 Reflected된 출력부하와가 공진 커패시터와 병렬로 연결되어 있을 때의 회로를 병렬공진 회로(PRC)라 한다.

이들 공진형 컨버터의 DC출력은 스위칭 주파수를 가변 시킴으로 제어되고 Reflec된 부하에 인가되는 AC전압의 동작특성이 공진회로의 Q를 따라 이동할 때 주파수에 따라 어떻게 변화되는지를 알 필요가 있다.

2.2.1 직렬공진컨버터(SRC) 회로특성

그림 3에 직렬 공진 폴-브리지 컨버터를 나타냈다. 직렬 공진커패시터 C_r 은 변압기 1차측에 연결되어 있고 공진주파수 $F_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$ 에서 비접촉 변압기의 1차권선의 누설인덕턴스 L_r 과 함께 공진한다.

공진 주파수 F_r 이상의 주파수에서의 스위칭 동작은 공진 주파수 F_r 아래의 주파수에서 스위칭 동작하는 것보다 스위칭소자의 소프트스위칭 등 많은 이유 때문에 스위칭 주파수 제어를 공진주파수 F_r 이상에서 제어해야한다.[1] 직렬 공진커패시터 C_r 에서 본 임피던스는 변압기 권선비와 커플링계수 제공에 의해 곱해진 저항이다. 비접촉전원에 적용된 변압기는 긴 1차측권선에 따른 누설인덕턴스 L_r 를 가지고 있고, 1차와 2차권선 사이에 큰 에어갭이 존재하므로 변압기(Inductive Coupler)의 자화 전류가 많이 흘러서 회로동작에 영향을 준다.

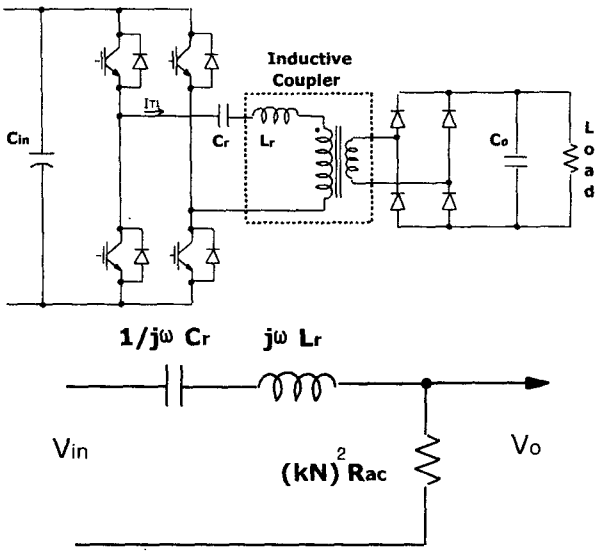


그림 3. 직렬 공진 컨버터와 등가회로

입출력에 대한 이득비

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1 + j \frac{\omega_s L_r}{RN^2 k^2} \left(\frac{\omega}{\omega_s} - \frac{\omega_s}{\omega} \right)}$$

여기서, $\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_r C_s}}$

직렬 공진형 컨버터는 부하전류의 경로에 직렬로 공진회로가 구성되므로 순환전류가 존재하지 않고 부하전류에 비례하는 공진전류가 흐르는 장점을 가진다. 그렇지만 출력전류가 감소하면 공진형 컨버터의 공진 주파수 보다도 높은 스위칭주파수 대역으로 이동시켜 직렬 공진 컨버터의 전압 이득 ($\frac{V_{in}}{V_o}$)을 저감시킬여고 하지만, 그림 4의 시뮬레이션 결과에서처럼 직렬 공진 컨버터의 전압 이득 ($\frac{V_{in}}{V_o}$)이 줄어들지 않아서, 특히 경부하 및 무부하에서의 제어가 불가능한 단점을 가진다.

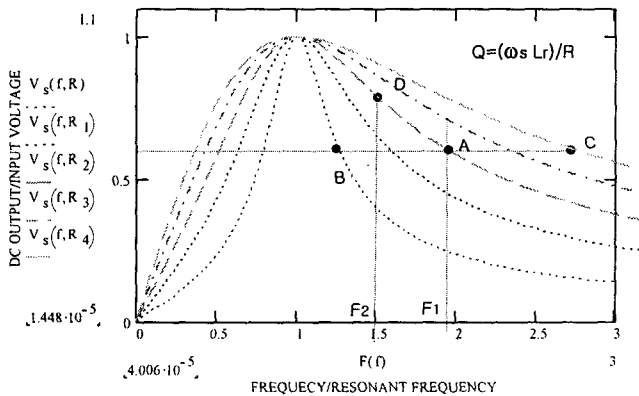


그림4. 직렬커패시터 $C_s = 0.35\mu F$, Coupling factor $k = 0.5$ 일 때의 직렬 공진 컨버터의 전압 이득

2.2.2. 병렬공진컨버터(PRC) 회로특성

입출력에 대한 이득비는

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\frac{N^2 k^2 R}{1 + jR\omega C_p}}{j\omega L_r (1 + j\omega C_p R) + N^2 k^2 R} \frac{1}{1 + jR\omega C_p}$$

$$= \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{Nk\omega_p} \right)^2 + j \frac{\omega L_r}{N^2 k^2 R}}$$

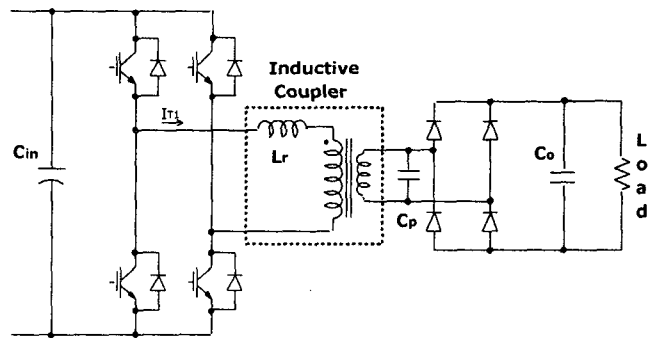


그림 5. 병렬 공진 컨버터 등가회로

수식전개된 방정식으로부터 폴-브리지 병렬공진 컨버터의 부하이득곡선을 아래에 나타냈다.

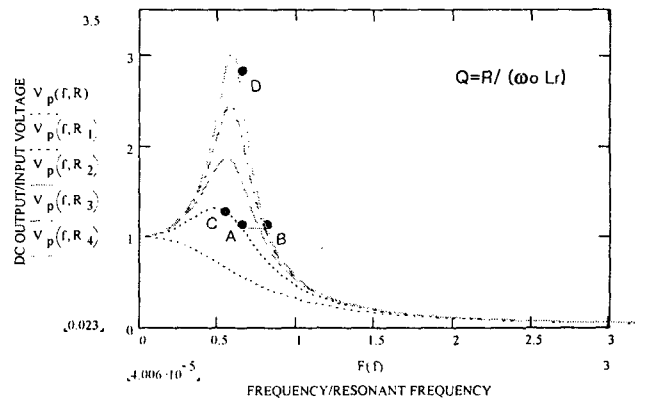
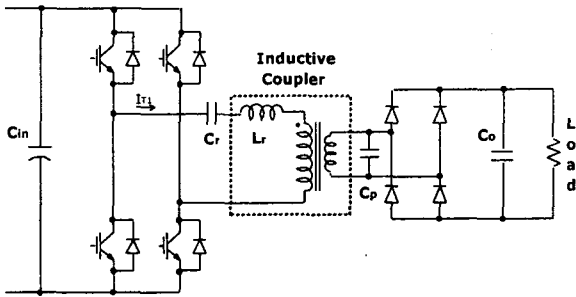


그림6. 병렬커패시터 $C_p = 0.1\mu F$, Coupling factor $k = 0.5$ 일 때의 병렬 공진 컨버터의 전압 이득

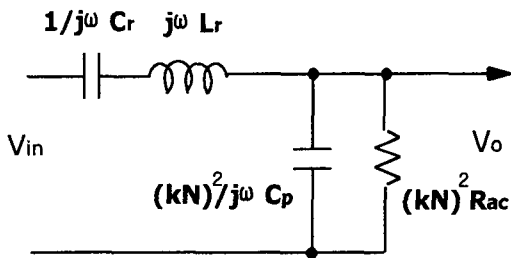
그림 6의 이득곡선에서, 중부하에서와 무부하에서의 동작이 가능하다는 것을 보여준다. 따라서, 병렬공진형 컨버터(PRC)는 무부하에서 중 부하에 이르기까지 제어가능한 장점을 가지며 병렬공진형 커패시터에 의해 컨버터는 전압원으로 동작한다. 그러나 부하변동에 영향을 받지 않는 동작을 얻기 위해서는 병렬 커패시터 C_p 가 상당히 커져야 하고 이로 인한 순환전류가 상당히 커지는 단점이 있다.

2.2.3 직·병렬공진컨버터(SPRC) 회로특성

병렬 공진 컨버터(PRC)의 경부하와 무 부하에서의 제어 능력과 직렬 공진 컨버터(SRC)의 경부하에서의 높은 효율특성의 장점을 취할 수 있는 회로가 그림 7 (a)의 직·병렬 공진컨버터(SPRC)이다.



(a) 직·병렬 공진 컨버터



(b) 등가회로

그림 7. 직·병렬 공진 컨버터 등가회로

C_s 와 C_p 의 적절한 선택에 의해서 직렬 공진 컨버터(SRC)와 병렬 공진 컨버터(PRC)의 장점들을 사용할 수 있는 범위로서 얻게 될 수 있다.

직·병렬공진 탱크회로의 전압이득은 다음과 같다.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\frac{k^2 N^2 R}{1 + jR\omega C_p}}{R \left(\frac{C_p}{C_s} + k^2 N^2 \right) - \omega^2 L_r C_p R + j \left(\omega L_r - \frac{1}{\omega C_s} \right)}$$

$$= \frac{1}{\left(\frac{C_p}{k^2 N^2 C_s} + 1 \right) - \left(\frac{\omega}{Nk\omega_p} \right)^2 + j \frac{\omega_s L_r}{RN^2 k^2} \left(\frac{\omega}{\omega_s} - \frac{\omega_s}{\omega} \right)}$$

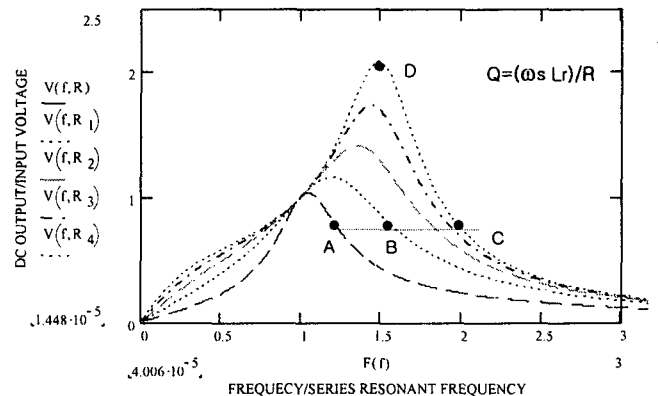
여기서, $\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_r C_s}}$, $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_r C_p}}$

Q값이 적은 중 부하에서는(낮은 주파수 영역에서는) 직렬 공진형 컨버터와 유사한 동작을 하고 Q값이 큰 경부하 및 무부하에서는(주파수가 높아질수록) 병렬 공진형 컨버터에 가까운 특성을 나타낸다. 따라서 제어를 위해 주파수 변동폭이 다소 넓으나 직렬 공진 커패시터 C_s 와 병렬 공진커패시터 C_p 를 적절히 선정하므로 우수한 제어특성과 낮은 순환전류손실이 얻어진다.

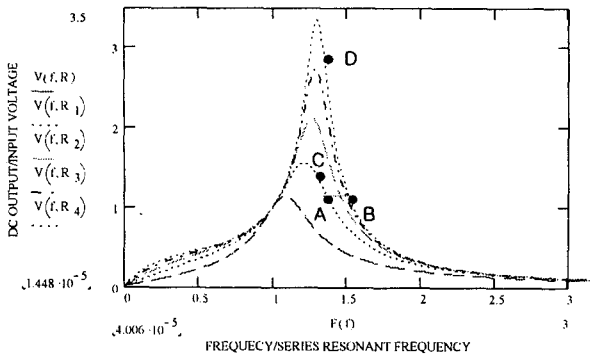
특히, 비접촉전원에 적용되는 변압기(Inductive Coupler)는 1차 측 권선 길이가 길어서 누설인덕턴스 L_r 이 크고, 2차측 Pick-coil은 1차권선상의 일부분에서 Magnet Coupling에 의해 에너지를 유도하여 전달받기 때문에 커플링계수($k = 0.1 \sim 0.5$)가 적고 비접촉에 의해 전달받기 때문에 변압기 1차권선과 2차 Pick-coil 사이의 갭(Gap)이 크다. 따라서, 누설인덕턴스 및 커플링 계수를 고려하여 적용함으로써 2차측 병렬공진 커패시터 및 부하를 1차측으로 Reflect 시켜 증가화 함으로서 그림 8에 직·병렬 공진컨버터의 전압이득($\frac{V_{in}}{V_o}$)에 대한 특성을 비교 검토했다.

공진 커패시터 C_s , C_p 의 크기와 커플링계수 k 의 값에 따라 전체 컨버터의 전압이득은 크게 달라진다.

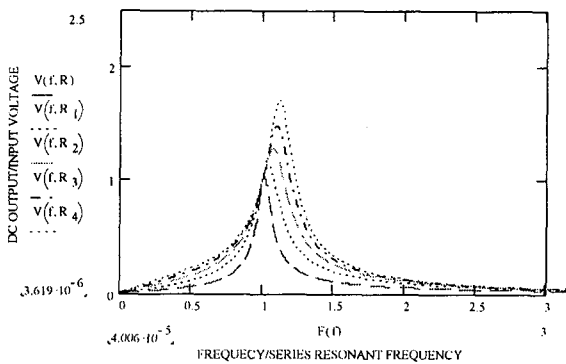
그림 8(a), (b)는 $C_s = 0.35 \mu F$, 커플링계수(Coupling factor) k 값이 0.5에서 $C_p = 0.05 \mu F$ 와 $C_p = 0.025 \mu F$ 값을 적용시 스위칭 주파수를 변화시켰을 때 각각의 직·병렬공진 컨버터 전압이득곡선을 보여준다. 병렬 커패시터 C_p 값을 증가시 적은 주파수제어범위에서 제어의 용이성 및 이득특성은 우수하지만 순환전류에 의한 손실이 증가하는 단점이 있다. 그림 8(a), (c)는 $C_s = 0.35 \mu F$, $C_p = 0.025 \mu F$ 에서 커플링계수(Coupling factor) k 값을 0.5와 0.25일때의 전압이득 곡선의 변화를 나타 냈다. 커플링계수(Coupling factor) k 값이 클수록 입력 대 출력전압 이득특성이 좋아짐을 알수있다. 따라서, 높은 효율 및 에너지 전달을 위해서는 비접촉 변압기의 결합도를 높일 수 있는 구조로 설계되어야 한다.



(a) $C_s = 0.35 \mu F$, $C_p = 0.025 \mu F$, Coupling factor $k = 0.5$ 일 때의 전압 이득



(b) $C_S = 0.35\mu F$, $C_p = 0.05\mu F$, Coupling factor $k = 0.5$ 일 때의 전압 이득

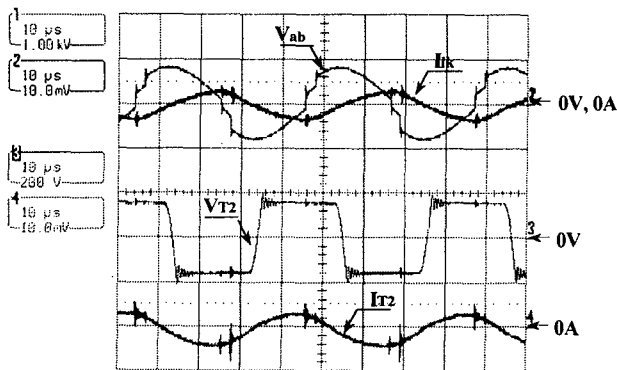


(c) $C_S = 0.35\mu F$, $C_p = 0.025\mu F$, Coupling factor $k = 0.25$ 일 때의 전압 이득

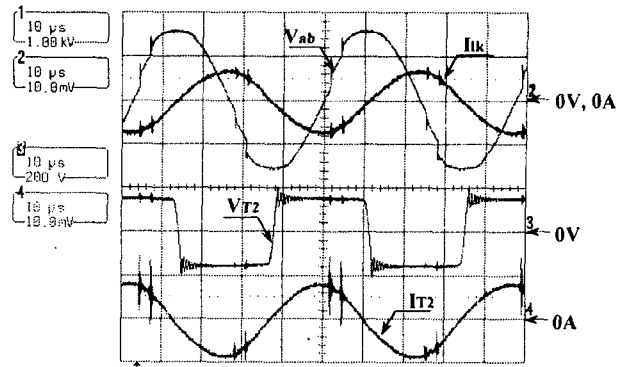
그림 8. 직-병렬 공진 컨버터의 전압 이득

3. 실험 및 고찰

그림 9. (a), (b)는 경부하시와 중부하시 일때의 고주파 인버터 1차 측 전압, 전류 및 고주파 변압기 2차 측 전압, 전류 실험파형을 나타냈고, 그림 10은 입력전압 220VAC, 출력전압 350VDC에서 부하변화(무부하 \Rightarrow 4kW \Rightarrow 8kW \Rightarrow 4kW \Rightarrow 무부하)에 대한 출력전압 응답특성 실험파형을 보여준다.

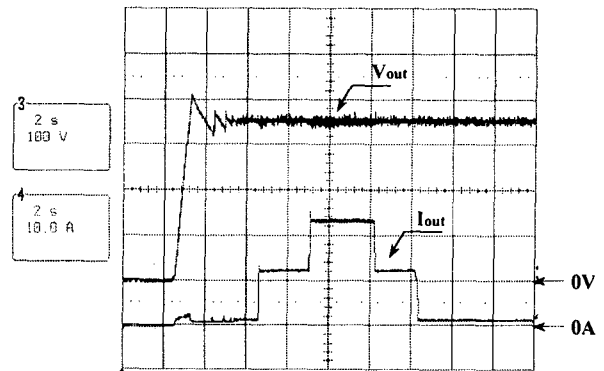


(1k/div, 200A/div, 200V/div, 100A/div, 10us/div)
(a) 입력(Vin): 220VDC, 출력(Vo):150VDC, 출력 : 2.5kW



(1k/div, 200A/div, 200V/div, 100A/div, 10us/div)
(b) 입력(Vin): 220VDC, 출력(Vo):150VDC, 출력 : 7.5kW

그림 9. 고주파 인버터 1차 측 전압, 전류 및 고주파 변압기 2차 측 전압, 전류 실험파형



(100V/div, 10A/div, 2s/div)
그림 10. 입력전압 220VAC, 출력전압 350VDC에서 부하변화에 대한 출력전압 응답특성 실험파형

이 논문은 한국전기연구원의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] Robert L. Steigerward, "A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies", *IEEE Trans, PE*, 1988.
- [1] A. I. Pressman, "Switching Power Supply Design", McGraw-Hill, Second Edition, 1999.