

다중일차권선 비접촉변압기를 이용한 비접촉 전원시스템의 공진주파수 추적에 관한 연구

論 文

55B-3-9

Study on resonant frequency tracking for contactless power system using multiple primary winding contactless transformer

魯成贊[†] · 金倫鎬^{*}

(Sung-Chan, Rho · Yoon-Ho, Kim)

Abstract - Contactless power system is base on power transmission by magnetic force. The transformer loss is large because it separated with the gap. Also the system has unstable factor, since the parameters in the secondary can vary with the system movement. This paper proposes light train power transmission system using contactless transformer with multiple primary winding. To increase the system efficiency and to obtain the stable power transmission to the dynamic load, a resonant inverter is adopted. The proposed system was verified by the simulation using Spice and Maxwell. The designed contactless power transmission system is implementd for 5[kW] class and experimental results are discussed.

Key Words : Inductive Power Transmission, Contactless Transformer

1. 서 론

전기를 이용한 산업용 장치와 전자제품들의 출현에 따라 이를 사용하기 위해 직접적인 전기접촉이 요구되었다. 전기 차량의 경우도 전차선을 가설하여 동력차에 전력공급을 하고 있으나, 이동부하에 대해 직접적인 전기접촉에 의한 전력공급은 접촉부의 저항을 증대시키고 과열을 야기하여 궤도차량 급전선의 단선과 같은 사고를 유발하게 된다. 또한 이선현상과 같은 불안요소가 존재하여 전력품질의 저하와 시스템의 불안정성을 증가시키고, 환경면에서도 좋지 않은 영향을 미치며, 초기에 많은 투자비용을 요구한다.

비접촉 변압기를 이용한 급전시스템은 전기적 또는 기계적인 접촉없이 전기에너지를 차량에 전달하는 시스템으로 유도 결합에 의한 에너지 전달 방식의 원리를 이용하는 것이다[1]. 그러나 비접촉 전력 전송 시스템은 몇가지 문제점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위해서 공극의 크기를 증가시키면서 안정된 에너지를 전송할 수 있는 방법과 시스템의 효율을 증대시키는 방안이 필요하다. 또한 이동 부하에 대해 안정된 전력을 전송할 수 있어야 한다.[2]

본 논문에서는 다중의 일차권선 비접촉 변압기를 이용한 소형궤도 차량에 사용할 수 있는 전력전송 장치를 설계하여 제작하였다. 다중일차 권선을 사용하여 1차측 전류가 자화인

덕턴스를 통하여 흐르는 양을 감소시킴으로써 시스템의 효율을 증대시키고, 이동부하에 대한 안정된 전력전송을 위해 공진 주파수 추적기법을 제시하며, 시뮬레이션과 실험을 통한 그 타당성을 검토하였다.

2. 소형 궤도 차량용 비접촉 변압기의 설계

소형 궤도차량에 사용되는 비접촉 전원 시스템은 일반적인 변압기와는 달리 1차와 2차가 분리된 특수한 선형 유도변압기를 사용한다. 선형유도변압기는 실제 변압기설계와 마찬가지로 공극이 존재하며 그 크기가 대단히 큰 형태이므로 공극에 의한 저항을 무시할 수 없다. 따라서 변압기 모델은 공극에 의한 자기저항을 고려하여 작성하여야 하고, 해석하여야 한다. 소형 궤도차량에 사용되는 비접촉 전원시스템은 일반적으로 1차측에 한 개의 권선을 시설하고 1차측의 일부를 2차 권선이 결합하여 전력을 전송하는 형태를 가지고 있다.[3] 이런 경우 자화인덕턴스가 작아 자화 전류가 증가되고, 누설 인덕턴스가 커져 에너지 전달효율이 감소한다.[5] 따라서 본 논문에서는 1차 권선을 2차권선의 길이와 같게하여 다중으로 설치함으로써 2차 권선이 결합되지 않는 부분을 최소화하여 자화전류의 증가를 막고, 에너지 전달효율을 증대하는 방법으로 변압기를 구성하였다.

그림 1은 본 논문에서 제안하는 변압기 모델 구조를 보여 주고 있다. 이 모델은 다수의 1차권선을 2차 권선의 길이와 같게 제작하여 2차 권선이 결합하는 권선만을 여자시키는 구조로 구성하였다.

† 교신저자, 正 會 員 : 中央大 工大 電氣電子工學部 博士課程
E-mail : scrho@naver.com

* 正 會 員 : 中央大 工大 電氣電子工學部 教授 · 工博
接受日字 : 2005年 11月 16日
最終完了 : 2006年 1月 5日

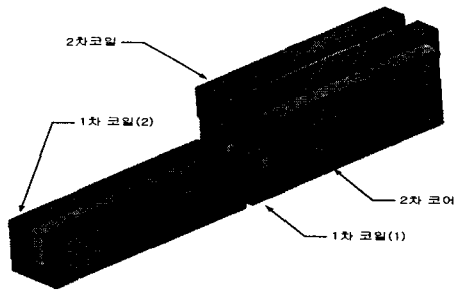


그림 1 비접촉 변압기 모델
Fig. 1 Contactless transformer model

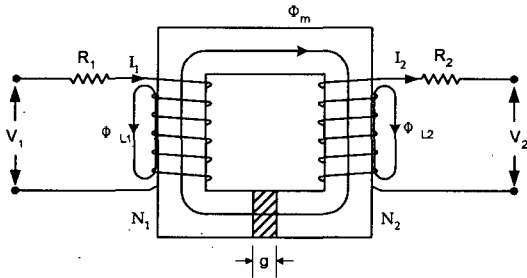


그림 2 선형변압기 등가모델.
Fig. 2 Linear transformer equivalent model.

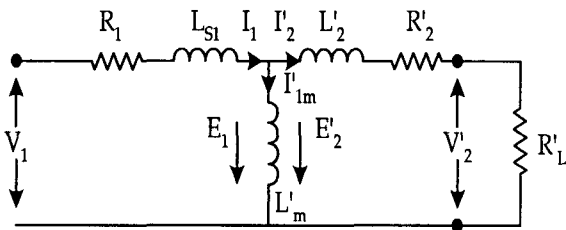


그림 3 선형 유도 변압기의 등가회로 모델
Fig. 3 Linear induction transformer equivalent circuit model

선형유도 변압기의 1차측은 코어가 없는 권선만으로 이루어진 구조이며, 2차측은 I코어를 사용하여 E코어를 제작하여 사용하였다.

다음 식들은 하나의 1, 2차 변압기 등가모델의 파라미터를 나타내고 있다.

$$R_m = R_{mFe} + R_{mg} = \frac{l_{Fe}}{\mu_r \cdot A_{Fe}} + \frac{g}{\mu_0 \cdot A_g} \quad (1)$$

R_m : 자기저항

R_{mFe} : 철심의 자기저항

R_{mg} : 공극의 자기저항

l_{Fe} : 철심자로의 길이

A_{Fe} : 철심자로의 단면적

g : 공극의 길이

A_g : 공극의 단면적

$$V_1 = R_1 i_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} - L_{12} \frac{di_2}{dt} \quad (2)$$

$$V_2 = -R_2 i_2 - L_{22} \frac{di_2}{dt} + L_{12} \frac{di_1}{dt} \quad (3)$$

$$L_{11} = \frac{N_1 \Phi_{L1}}{i_1} + \frac{N_1 \Phi_{m1}}{i_1} = L_{s1} + L'_m \quad (4)$$

$$L_{22} = \frac{N_2 \Phi_{L2}}{i_2} + \frac{N_2 \Phi_{m2}}{i_2} = L_{s2} + L''_m \quad (5)$$

$$L_{12} = L_{21} = \frac{N_1 \cdot N_2}{R_m} \quad (6)$$

$$L'_m = \frac{N_1^2}{R_m} = \frac{N_1}{N_2} \cdot L_{12} \quad (7)$$

$$L''_m = \frac{N_2^2}{R_m} = \frac{N_2}{N_1} \cdot L_{12} \quad (8)$$

$$E'_2 = \frac{N_1}{N_2} \cdot E_2 = E_1 \quad (9)$$

$$V'_2 = \frac{N_1}{N_2} \cdot V_2 \quad (10)$$

$$I'_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 \quad (11)$$

$$R'_2 = \left[\frac{N_1}{N_2} \right]^2 \cdot R_2 \quad (12)$$

$$R'_L = \left[\frac{N_1}{N_2} \right]^2 \cdot R_L \quad (13)$$

다음 표는 선형 유도 변압기의 2차권선 위치에 따른 파라미터를 나타내고 있다.

표 1. 2차 권선 위치에 따른 인덕턴스 변화

Table 1 Inductance variation of secondary coil position

명칭	1권선 결합	연결부 결합
L_{11}	5.2 [μH]	7.4 [μH]
L_{22}	84.7 [μH]	112.9 [μH]
$L_{12} = L_{21}$	7.2 [μH]	15.4 [μH]
L'_m	2.2 [μH]	4.8 [μH]
L''_m	23.04 [μH]	49.3 [μH]
L_{s1}	3 [μH]	2.6 [μH]
L_{s2}	61.66 [μH]	63.6 [μH]

3. 공진형 인버터 설계

비접촉 전력전송 시스템을 본 논문에서 제시한 변압기 구조로 구성하였을 경우 1차 권선이 다중으로 구성되어, 2차 권선이 1차 권선을 다중으로 결합하거나, 진동 등에 의한 공극의 변화가 발생하였을 경우 공진 등가인덕턴스가 변하게 된

다.[4] 따라서 공진주파수의 변화가 발생한다. 공진주파수의 변화는 인버터가 영전압 또는 영전류에서 스위칭을 할 수 없는 조건을 형성하여 인버터의 손실을 증가시키는 원인이 된다. 따라서 공진 주파수의 변동에 대하여 이를 추적하고 인버터가 언제나 공진 또는 준 공진 상태에서 동작하여 인버터의 손실을 감소시키고, 역률을 1 또는 1에 가깝게 운전할 수 있도록 하여야 한다[4]. 그림 4는 논문에서 제안한 비접촉 전력전송 시스템을 보여주고 있다.

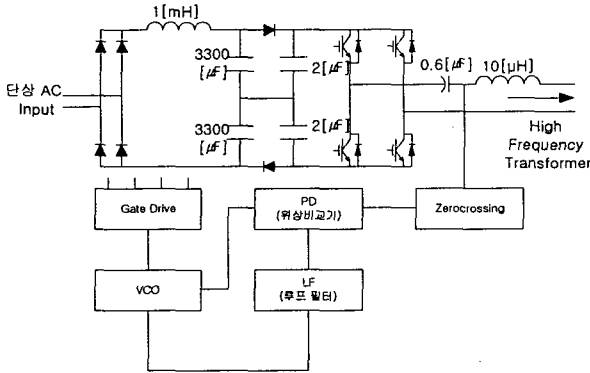


그림 4 비접촉 전력전송 시스템 회로도
Fig. 4 Contactless power transformer system circuit

인버터 출력전압은 스위칭 주파수와 동일한 구형파이다. 이 전압이 공진탱크에 인가되면 출력전류는 입력전압에 비하여 위상차를 가지고 동작한다. 그런데 부하의 주파수 선택도 Q_L 이 1보다 매우 크다고 가정하면 전류는 입력전압의 기본파와 동일하다고 할 수 있다. 따라서 정상상태 해석법을 이용하여 위상차를 구하면 다음과 같다.[6]

$$|I_{inv}| \angle \phi_{inv} = \frac{|V_{in}| \angle 0}{|Z| \angle \phi_Z} = \frac{|V_{in}|}{|Z|} \angle -\phi_Z$$

$$\phi_{inv} = -\tan^{-1} \frac{\omega/\omega_r}{Q_L(1 - (\omega/\omega_r)^2)} + \frac{\pi}{2} \quad (14)$$

여기서 ω_r 은 공진주파수이고, ω 는 VCO의 출력주파수이다. 위 식에서 출력전류의 위상은 입력주파수와 공진주파수의 비에 의하여 결정된다는 것을 알 수 있다. 즉, $\omega > \omega_r$ 이면 전류 위상이 앞서고 $\omega < \omega_r$ 이면 위상이 늦어진다. 또한 주파수-위상관계는 비선형이므로 해석의 어려움이 존재하나 공진주파수 근처에서는 선형임을 감안하여 공진주파수와 스위칭 주파수가 같은 경우를 가정하여 위상을 계산하면 다음 식과 같다.

$$\phi_{inv} = -\frac{2Q_L}{\omega_r} \quad (15)$$

또한 입력 주파수와 공진 주파수의 차는 입력신호의 미분치에 해당하므로 위상전달함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\phi_0 = -\frac{2Q_L}{\omega_r} \frac{d\phi}{dt}$$

$$H_{inv}(s) = \frac{\Phi_{inv}(s)}{\Phi_i(s)} = -sK_{inv} \quad (16)$$

그림 5는 실험에서 사용된 공진 주파수 추적을 위한 제어회로의 블록 다이어그램이다. 그림 5에서 입력신호와 출력신호의 위상차 $\Phi_e(s)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Phi_e(s) &= \Phi_i(s) - \Phi_2(s) \\ &= \Phi_i(s) \frac{1}{1 + \text{loop gain}} \\ &= \Phi_i(s) \frac{s}{s + K_D K_O F(s)} \end{aligned} \quad (17)$$

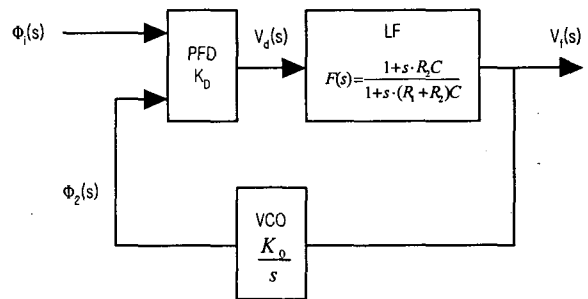


그림 5 인버터 제어회로 블록다이어그램
Fig. 5 Block diagram of inverter control circuit

위 제어회로에서 입력위상 $\Phi_1(s)$ 에 대한 출력신호 위상 $\Phi_2(s)$ 와 입력신호와 출력신호 위상차 $\Phi_e(s)$ 에 대한 전달함수 $H(s)$ 와 $H_e(s)$ 의 전달함수를 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{\Phi_2(s)}{\Phi_1(s)} \\ &= \frac{s \cdot K_D K_O \cdot R_2 C + K_D K_O}{s^2(R_1 + R_2)C + s(1 + K_D K_O R_2 C) + K_D K_O} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} H_e(s) &= \frac{\Phi_e(s)}{\Phi_1(s)} \\ &= \frac{s^2 \cdot (R_1 + R_2)C + s}{s^2(R_1 + R_2)C + s(1 + K_D K_O R_2 C) + K_D K_O} \end{aligned} \quad (19)$$

그림 6에서는 제어회로의 안정성을 평가하기 위하여 Matlab을 이용하여 입력위상과 출력위상의 전달함수 H(s)의 시뮬레이션을 수행하여 보았다. 그 결과 위상교차점에서의 이득의 크기가 음수이고 이득 교차점에서의 위상이 -180° 커서 시스템이 안정함을 알 수 있다.

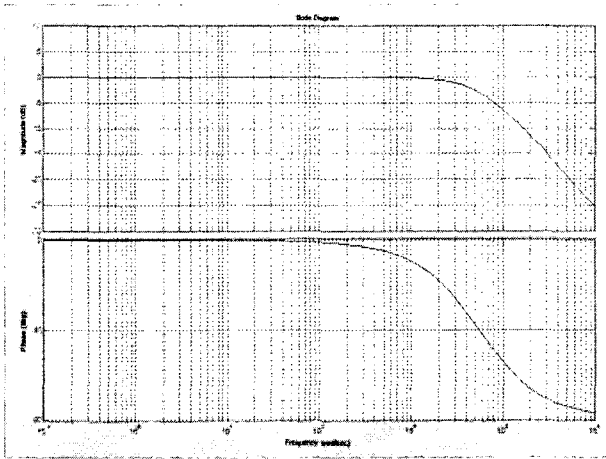


그림 6 전달함수 H(s)의 보드선도
 Fig. 6 Bode diagram of transfer function H(s)

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 7은 제안된 비접촉 변압기의 자속분포를 보기 위하여 Maxwell을 통하여 시뮬레이션을 수행한 결과를 보여주고 있다. 그림 8은 시뮬레이션을 통하여 변압기 1차 전압 100[V]에서 1차측 전류와 2차측 전류를 측정 한 결과, 1차 전류 20[A], 부하저항 10 [Ω]에서 2차전류 5[A]가 유기되는 것을 보여주고 있다.

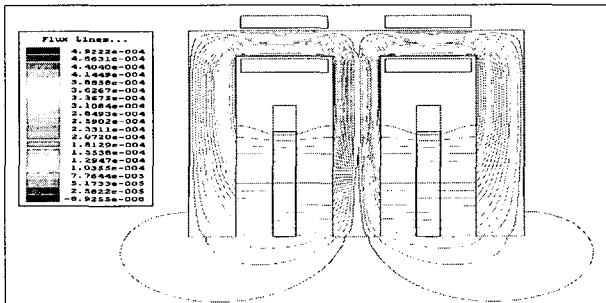


그림 7 제안된 비접촉 변압기의 자속분포
 Fig. 7 Flux distribution of proposed contactless transformer

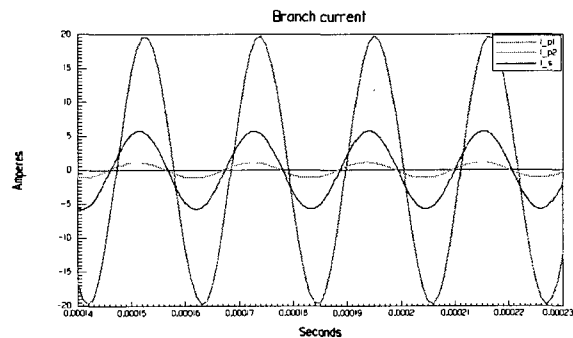


그림 8 변압기 1차측과 2차측 전류 파형
 Fig. 8 The current waveforms of primary and secondary in transformer

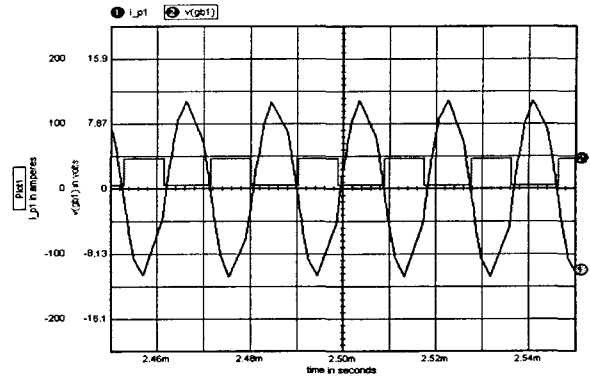


그림 9 공진전류와 게이트 펄스(Lr 15.2uH, Cr=0.6μF)
 Fig. 9 Resonant current and gate pulse

그림 9와 10은 인버터의 제어회로 및 동작을 시험하기 위하여 Spice8을 이용하여 시뮬레이션을 시행한 결과를 나타내고 있다. 그림 9는 선형유도 변압기의 인덕턴스 15.2[μH], 공진 커패시터 0.6[μF]에서 영전류 스위칭이 이루어지는 것을 보여주고 있다.

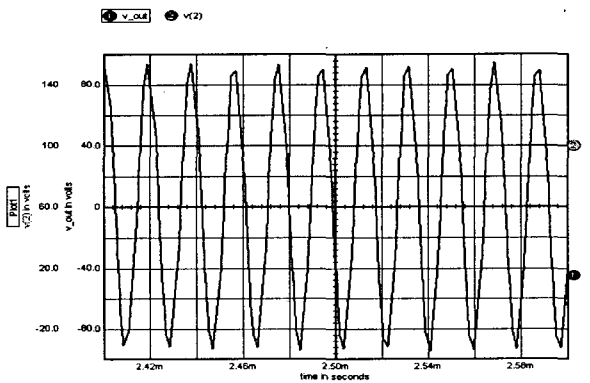


그림 10 직류입력전압과 변압기 출력전압
 Fig. 10 DC input voltage and transformer output voltage

그림 10은 직류입력전압 100[V], 10[Ω]부하에서 선형유도 변압기 2차측 출력전압이 95[V]로 나타남을 보여주고 있다.

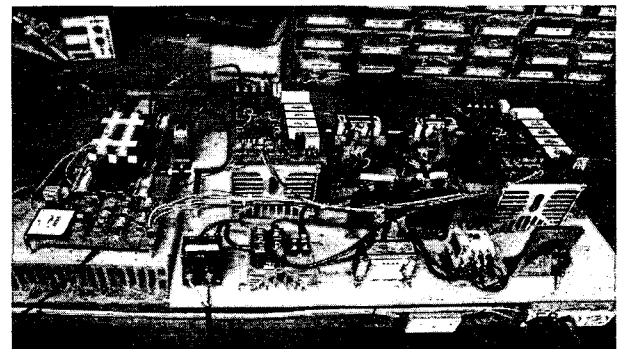


그림 11 제작된 실험 장치
 Fig. 11 produced experiment system

그림 11은 본 논문에 사용된 실험장치를 나타내고 있다. 그림4와 같이 시스템은 인버터부, LC공진부, 비접촉 변압기,

부하단으로 구성되어 있다. 선형유도 변압기는 5회의 1차권선 2개와 16회의 2차권선 1개로 제작하였다. 인버터 시스템에 사용된 주 스위치는 600[V] 100[A] IGBT이고, 공진 커패시터는 0.6[μ F]을 사용하였다. 공진전류의 제한을 위하여 공진 인덕터 10[μ H]를 연결하였다. 공진주파수 변화범위는 45kHz에서 47kHz이고 그에 따라 스위칭 주파수가 45kHz에서 47kHz까지 변화 하였다. 시스템의 공진 주파수 추적범위는 43[kHz]에서 53[kHz]로 설정하였다. 그림 12에서는 비접촉 변압기의 인덕턴스 변화에 따른 공진점 추적기능을 확인하기 위하여 45.55[kHz], 47.04[kHz]대역에서 1차 전류 파형과 케이트 펄스 파형을 비교하였다. 선형유도 변압기 2차측의 위치에 따른 공진 인덕턴스 변화에 따라 스위칭 주파수가 추종하는 것을 보여주고 있다. 이것은 공진 주파수의 변화를 추종하여 스위칭 주파수가 변화함에 따라 언제나 영전류 스위칭이 가능함을 의미한다.

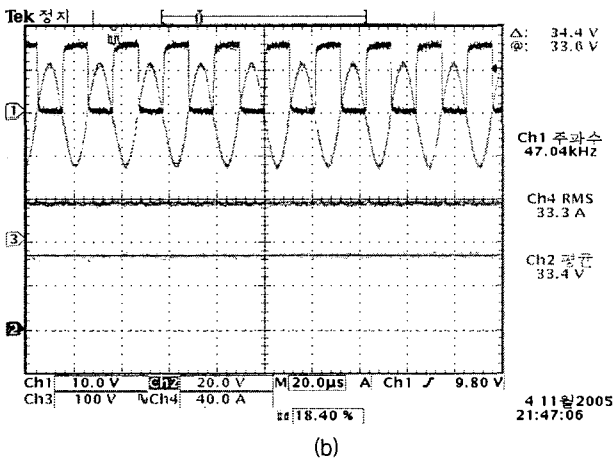
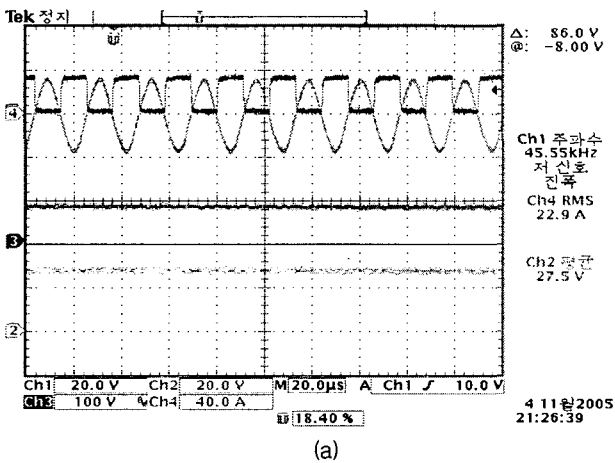


그림 12 공진 검사를 위한 출력파형 (a)45[kHz] (b)47[kHz]
 Fig. 12 The waveform for resonant test (a)45[kHz] (b)47[kHz]

그림 13에서 그림 16까지는 2차권선이 1차권선과 결합하였을 때 공진전류, 출력전압, 게이트 파형, VCO 입력전압 파형을 나타낸 것이다.

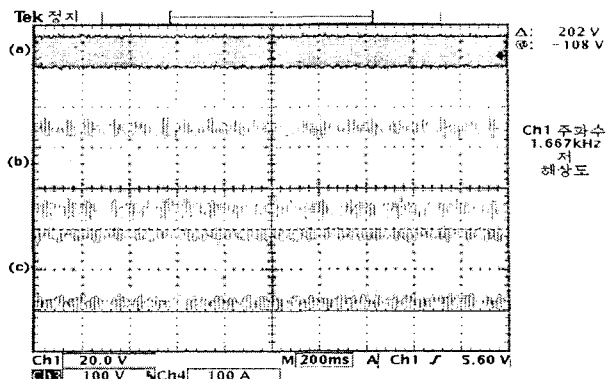


그림 13 1차 권선 1개 결합시 출력파형
 (a) 게이트파형 (b) 공진전류 (c) 2차측 출력전압
 Fig. 13 The waveforms at single combination
 (a) Gate signal (b) resonant current (c) Secondary current

그림 13은 2차권선이 1차권선 1개에 결합하여 움직이고 있을 때의 파형을 나타내고 있다. 10[Ω]의 부하에서 선형 유도 변압기 2차 출력전압은 최대값 108[V]이고 공진 전류는 최대 110[A]로 나타났다. 그림 14는 그림 13의 시간축을 조정하여 나타낸 그림이다.

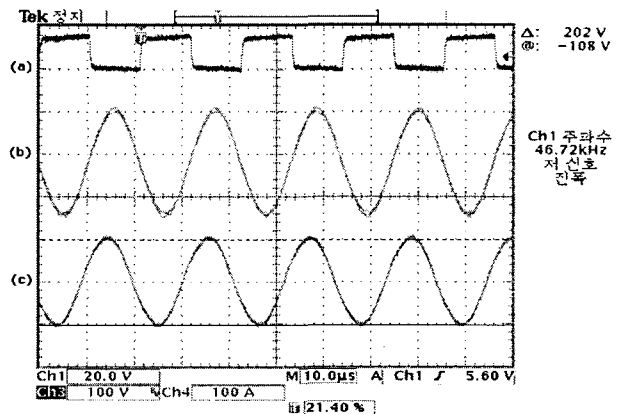


그림 14 1차 권선 1개 결합시 출력파형(2차코일 정지)
 (a) 게이트파형 (b) 공진전류 (c) 2차측 출력전압
 Fig. 14 The waveforms at single combination
 (a) Gate signal (b) resonant current (c) Secondary current

그림 15는 선형유도변압기의 1차측 권선의 연결부에 2차측 권선이 위치할 때의 공진 전류와 출력전압의 파형을 나타낸 것이다. 선형유도 변압기의 2차측 권선이 1차측권선의 연결부에 위치할 경우에는 공진전류가 약간 감소하고 선형유도 변압기의 2차측 출력전압이 최대값 128[V]로 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 1차측 두개의 권선에 모두 전원이 인가된 상태에서 변압기 2차권선에 1개의 1차권선만을 결합한 경우의 채교하는 자속보다 2개의 1차권선을 절반씩 걸치고 있는 경우의 자속이 더 증가하여 출력전압이 증가하고, 회로전체의 상호인덕턴스가 증가하여 공진전류가 감소함을 나타내고 있다.

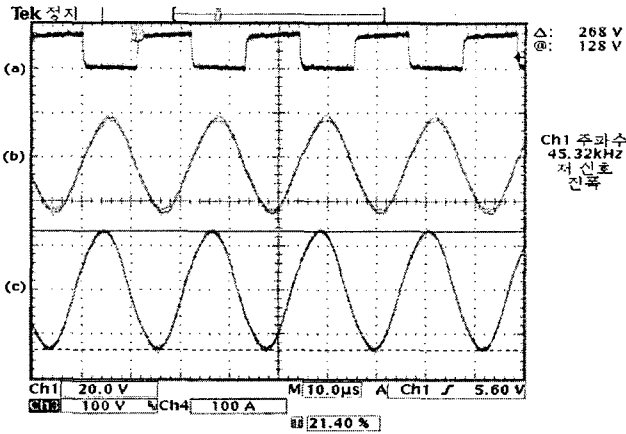


그림 15 1차 권선 연결부 결합시 파형
(a) 게이트파형 (b) 공진전류 (c) 2차측 전압

Fig. 15 The Waveforms at joint part combination

(a) Gate signal (b) resonant current (c) Secondary voltage

그림 16은 1차권선의 연결부에 2차권선이 결합할 때 전압 제어 발진기의 입력전압과 공진전류, 게이트파형을 나타내고 있다. 전압제어발진기의 입력전압은 위상비교기의 출력전압으로 위상차에 따라 전압이 변화하고 고정된다. 따라서 선형 유도변압기의 인덕턴스 변화에 따라 전압제어발진기 입력전압도 변화한다.

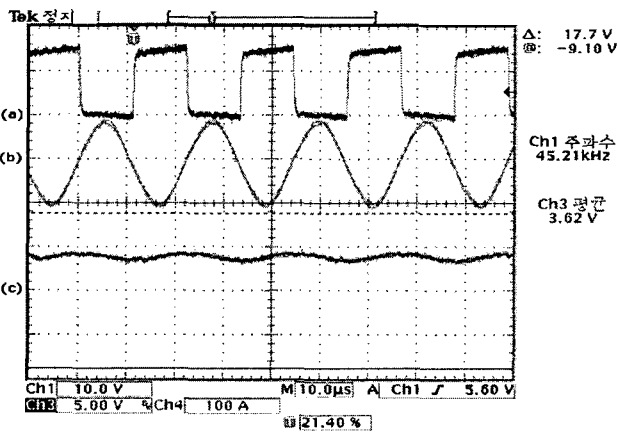


그림 16 1차 권선 연결부 결합시 파형
(a) 게이트파형 (b) 공진전류 (c) VCO입력전압

Fig. 16 The Waveforms at joint part combination

(a) Gate Pulse, (b) resonant current, (c) VCO input voltage

그림 17은 1차권선 1개만을 2차권선에 결합하고 있을 때의 선형유도변압기의 출력파형을 브리지 정류기를 사용하여 정류한 파형을 나타내고 있다. 10[Ω]의 부하에 연결되어 출력전압은 76[V]를 나타내고 있다.

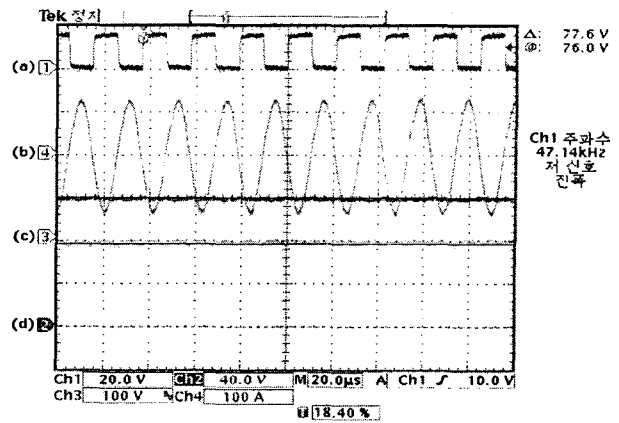


그림 17 직류입력전압과 DC출력전압

(a) 게이트 전압 (b)공진전류 (c) DC입력전압 (d) DC 출력전압

Fig. 17 DC input voltage and DC output voltage

(a) Gate voltage (b) Resonant current (c) DC input voltage (d) DC output voltage

5. 결 론

본 논문에서는 5kW급 다중 1차권선 비접촉 변압기를 이용한 소형케도 차량용 전력전송 장치를 제작하여 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 비접촉 전원 시스템에 사용되는 선형 유도 변압기는 1차권선을 다중으로 설치함으로써 자화전류를 감소시키고, 에너지 전달효율을 증가시키는 방법으로 구성하였으며, 인버터는 이동 부하에 대한 공진점 변화 추적기법을 사용하여 인버터의 손실을 최소화하는 방법으로 제어하였다.

제안된 방법의 타당성 검증을 위하여 시뮬레이션을 수행하고, 실험을 통하여 이를 확인하였다.

실험을 통하여 기존의 1차 권선을 1개로 구성된 비접촉 전력전송시스템보다 제안된 다중 1차권선형 비접촉 전력전송시스템이 1차권선과 2차권선의 결합면적을 증대시키고 자화전류와 누설인덕턴스를 감소시켜 에너지 전달효율이 향상된 것으로 나타났다. 또한 2차권선이 1차권선의 연결부에 결합한 경우가 1개의 1차권선만 결합한 경우보다 에너지 전달효율이 큰 것으로 나타났다. 이는 1차권선이 병렬로 연결되어 전류가 나뉘어 흐르고 있어, 2차권선이 1차권선의 연결부에 있을 때는 전류가 흐르는 1차권선 2개를 부분 결합한 형태이고, 1차권선 1개만 결합한 경우는 결합한 권선에서는 에너지가 전달되지만 결합하지 않은 나머지 권선은 에너지를 전달할 수 없어 자화인덕턴스가 감소하고, 누설인덕턴스가 증가한다는 것을 의미한다.

실험결과 인버터의 공진 주파수의 변화는 45[kHz]에서 47[kHz]정도 까지 변화하였으며, 공진 주파수 추적도 잘 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] Yoshiji Hiraga, "Decentralized control of machines with the use of inductive transmission of power and signal",

Industry Applications Society Annual Meeting, 1994.,
Conference Record of the 1994 IEEE, 2-6 Oct. 1994
Page(s):875 - 881 vol.2

- [2] Secuk Kilinc, "A new mode for voltage output charge-pump phase frequency detector in resonant inverter tuning loops" IEEE International midwest symposium on circuit and system, 2004
- [3] Yong Xiang Xu, "Modeling and Controller Design of ICPT pick-ups", Power System Technology, 2002. Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on Volume 3, 13-17 Oct. 2002 Page(s):1602 - 1606 vol.3
- [4] Christian Hattrup, "Fast Estimation techniques for digital control of resonant converter", Power Electronics, IEEE Transactions on Volume 18, Issue 1, Part 2, Jan. 2003 Page(s):365 - 372
- [5] Don A. G. Pedder, "A Contactless Electrical Energy Transmission System", IEEE Transaction on Industrial Electronics. Vol. 46. No 1 1999. 2
- [6] Boys, J.T., Covic, G.A., Green, A.W, "Stability and control of inductively coupled power transfer systems", Electric Power Applications, IEE Proceedings-Volume 147, Issue 1, Jan. 2000 Page(s):37 - 43

저 자 소 개



노 성 찬 (魯 成 贊)

1966년 7월 4일생. 2000년~현재 중앙대학교 대학원 전기전자공학부 박사과정,

Tel : 031-460-4319

Fax : 031-462-2944

E-mail : scrho@naver.com



김 윤 호 (金 倫 鎬)

1949년 6월 20일생. 1974년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 미국 Texas A&M 대학 졸업(공학) 현재 중앙대학교 전기전자공학부 교수

Tel : 02-820-5290

Fax : 02-812-8417

E-mail : yhkim@cau.ac.kr