

무접점 전원장치의 특성분석

이현관, 이기식, 정봉근, 강성인, 공영수, 김은수, 김윤희*
 전주대학교, 중앙대학교*

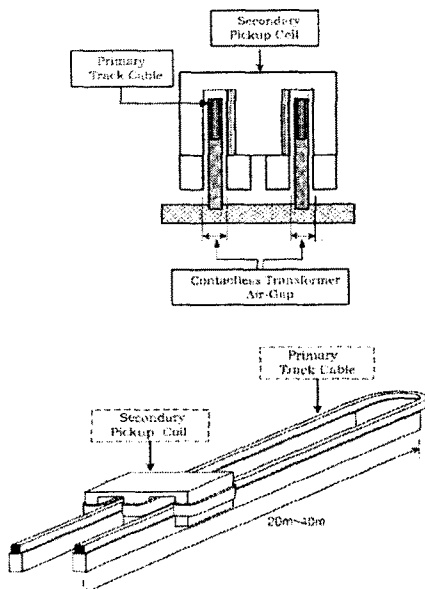
An Analysis on the Characteristics of the Contact-less Power Supply

Hyun-Kwan Lee, Gi-Sik Lee, Bong-Geun Chung, Sung-In Kang, Young-su Kong, Eun-Soo Kim, Yoon-Ho Kim*
 Jeon-Ju University, Chung-Ang University*

Abstract - Comparing with the conventional transformer without the air gap, a contact-less transformer with the large air-gap (4.8cm) between the long primary winding and the secondary winding has the increased leakage inductance and the reduced magnetizing inductance. By the increased leakage inductance and the reduced magnetizing inductance on the primary of the contact-less transformer, a good deal of the primary current circulates through magnetizing inductance, which results in a massive loss in contact-less power supply (CPS). In this paper, the efficiency characteristics of the contact-less power supply using a series resonant converter is analyzed and simulated. The results are verified on the simulation based on the theoretical analysis and the 1.8kW experimental prototype.

1. 서 론

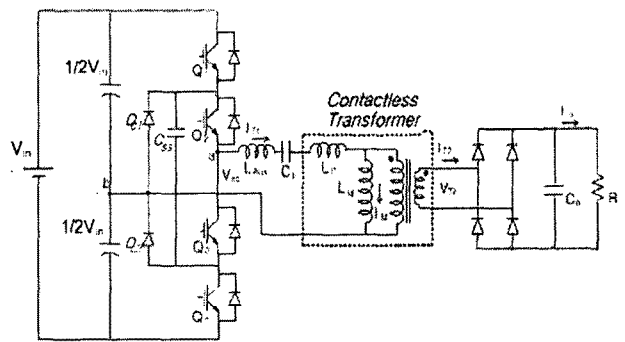
무접점 전원은 전원 공급을 전력선에 의한 전원공급 대신 유도적인 결합을 사용하여 어떠한 기계적인 접촉 없이 전기에너지를 공급할 수 있는 전원장치이다. 비접촉 변압기를 적용한 무접점 전원 장치는 1차측 에너지를 2차측으로 전달하기 위해 고주파 직렬 공진 컨버터가 널리 사용되어 왔다. 그림 1에서 무접점 전원의 비접촉 변압기는 1차측 긴 트랙케이블로 인해 누설 인덕턴스가 크고 변압기 1차측과 2차측 사이에 큰 공극을 가지고 있다. 이러한 비접촉 변압기를 적용한 비접촉 직렬 공진 컨버터는 기존의 변압기를 적용한 직렬 공진 컨버터와 달리 비접촉 변압기의 누설 인덕턴스가 자화 인덕턴스에 비해 크기 때문에 1차측 전류의 대부분이 자화인덕턴스를 통해 흐르고 부하 변화에 대해 높은 전압이득뿐만 아니라 비접촉 변압기의 1차측 단자 전압과 전류의 위상이 변하여 전체 시스템 특성에 많은 영향을 가져온다. 이러한 비접촉 변압기를 적용한 3레벨 직렬 공진 컨버터의 특성을 분석하였다. 또한 이 특성을 이용하여 직렬공진 인버터와 변압기 2차측 정류부로 나누어서 효율을 이론적으로 분석하고, 시뮬레이션을 하였으며, 1.8kW 용량의 시제품을 제작하여 실험한 결과에 대해 비교 서술하고자 한다.



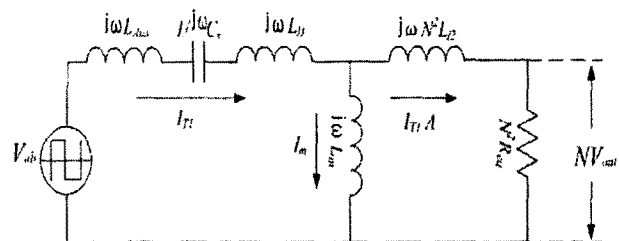
〈그림 1〉 비접촉 변압기의 구성도

2. 직렬 공진 컨버터 회로 특성 분석

그림 2(a)는 3레벨 직렬공진 컨버터의 주 회로이고 그림 2(b)는 등가회로를 나타내었다. 그림 2(b)에서 V_{ab} 는 주스위칭소자의 스위칭에 의한 구형파 전압이고, L_{AUX} , L_{L1} , C_s 는 외부 인덕턴스와 변압기 1차측 누설인덕턴스 및 직렬 커패시터이며, L_m 은 자화인덕턴스, $N^2 L_{L2}$ 은 1차측에서 권선비($N = \frac{n_1}{n_2}$)를 고려하여 바라본 2차측 누설 인덕턴스이다. 또한 ($N^2 R_{eq} = N^2 \frac{\pi^2}{8} R_L$)는 변압기 2차측 정류다이오드와 커패시터 필터 및 부하저항을 등가화하여 1차측에서 권선비를 고려하여 바라본 등가부하저항이다. L_{eq} 는 비접촉 변압기의 2차측 권선을 단락시켜 측정된 등가누설인덕턴스이며 C_s 와 L_{eq} 가 함께 공진할 때 직렬공진 주파수는 $f_o = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{eq} \cdot C_s}}$ 이다. 또한 그림 2(b) 등가회로에서 입력 임피던스(Z_{in})는 식 (1)로 나타냈으며, 입력 임피던스의 위상각(θ)은 식 (2)로 나타냈다. 또한 직렬공진 컨버터의 변압기 2차측 정류부는 비접촉 변압기의 1차측 공진 전류에 의해 AC 기본파 성분만을 DC로 정류시키므로, 변압기 2차측 정류부를 직렬 공진 인버터의 AC 부하로 사용할 수 있고, 직렬 공진 인버터는 변압기 2차측 정류부와 독립적으로 효율 분석을 할 수 있다. 따라서 직렬 공진 컨버터의 효율 분석을 직렬공진 인버터와 변압기 2차측 정류부 두 부분으로 나누어 해석하였으며, 이를 바탕으로 직렬공진 컨버터를 적용한 무접점 전원의 전체효율특성을 분석하고 시뮬레이션을 하였다.



(a) 주회로



(b) 등가회로

〈그림 2〉 3레벨 직렬공진 컨버터 주회로 및 등가회로

$$Z_{in} = \frac{1 + \frac{L_{l1} + L_{Aux}}{L_m} - \frac{1}{\omega^2 L_m C_s} + j \frac{\omega_o L_{eq}}{R_{eq}} \cdot \alpha \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right)}{\frac{\alpha}{R_{eq}} - j \frac{1}{\omega L_m}} \quad (1)$$

$$\theta = \arctan^{-1} \left(\frac{\frac{1}{\omega L_m} \left(1 + \frac{L_{l1} + L_{Aux}}{L_m} + \frac{\alpha^2}{R_{eq}} \left[\frac{\omega_o L_{eq}}{R_{eq}} \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega} \right) \right] - \frac{1}{\omega^2 L_m^2 C_s} \right)}{\frac{\alpha}{R_{eq}} \left(1 + \frac{L_{l1} + L_{Aux}}{L_m} \right) - \frac{\alpha}{\omega L_m} \left(\frac{\omega_o L_{eq}}{R_{eq}} \frac{\omega}{\omega_o} \right)} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (2)$$

$$\eta_I = \frac{P_o}{P_o + P_r} = \frac{1}{1 + \frac{P_r}{P_o}} = \frac{1}{1 + \frac{(I_{T1})^2 (R_C + R_{LP} + R_{LAux}) + \left(\frac{I_{T1} A}{\sqrt{2}} \right)^2 R_{LS} + \frac{I_{T1} \cdot 4}{\pi \cdot 180} (2V_{CF} \cdot (180 - \theta) + 2V_{df} \cdot \theta)}{\frac{(I_{T1})^2 A^2 N^2 R_{eq}}{2}}} \cdot 100 \quad (3)$$

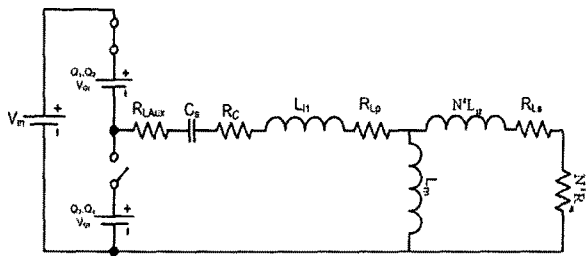
2.1 3레벨 직렬공진 인버터 효율 분석

직렬공진 컨버터에서 비접촉 변압기의 1차측 단자 전류가 사인파 공진전류에 의해서 변압기 2차측 정류부는 AC 기본파 성분만을 DC로 정류시킨다. 따라서 변압기 2차측 정류부의 입력임피던스는 인버터의 AC 부하로 사용할 수 있으며, 직렬 공진 인버터는 정류부와 독립적으로 효율 분석을 할 수 있다. 또한 직렬공진 인버터는 일정 주파수에서 제어를 하므로 직렬공진 인버터의 동작모드는 크게 두 모드로 동작되어진다. 전력을 부하에 전달하는 파워링 모드와 1차측 누설 인덕턴스에 의해 전류가 순환하는 순환모드로 동작되어진다. 또한 파워링 모드와 순환모드의 주기는 부하저항 변화($R_L=18\Omega-180\Omega$)에 대한 입력 임피던스 위상각(θ) 변화에 따라 결정된다. 따라서 이러한 동작특성을 고려하여 그림 3(a), (b)와 같이 파워링 모드와 순환 모드를 등가회로로 나타내었다. 그림 3(a)와 (b)의 등가회로에서 V_{CF} 는 주스위칭소자의 전압강하 성분이고, V_{df} 는 주스위칭소자의 역병렬다이오드 전압강하 성분이다. 또한 R_{LAux} 는 외부 인덕터의 내부저항이며, R_c 는 직렬공진 커패시터의 내부저항이며, R_{LP} 는 비접촉 변압기 1차측 권선저항이며, R_{LS} 는 비접촉 변압기 2차측 권선저항으로 나타내었다.

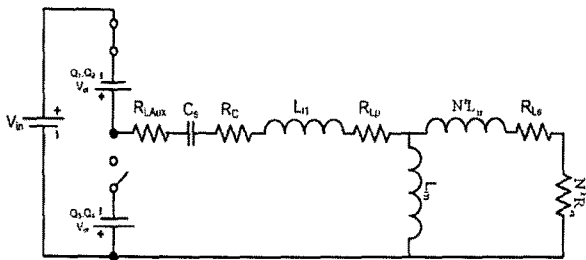
$$I_{T1} = \frac{\frac{2}{\pi} \cdot V_{in}}{Z_{in}} \quad (4)$$

$$I_{avg} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi I_{T1} \sin \omega t \, d\omega t \quad (5)$$

$$A(j\omega) = \frac{j\omega L_m}{j\omega L_m + j\omega L_{l2} \cdot N^2 + N^2 \cdot R_{eq}} \quad (6)$$



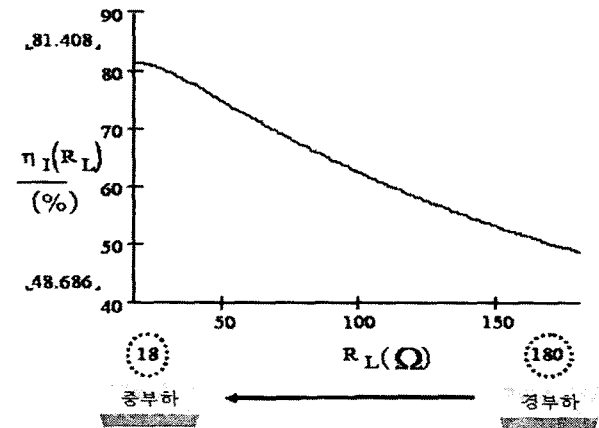
(a) 파워링 모드



(b) 순환모드

〈그림 3〉 직렬 공진 인버터의 파워링 모드와 순환모드 등가회로

식(1)-(2)과 식(4)-(6)로부터 직렬공진 인버터 효율식은 식 (3)과 같다. 식 (4)의 I_{T1} 는 부하 변화에 대한 입력 전류이고, 식(5)의 I_{avg} 는 입력 전류의 평균 전류이며 식(6)의 A는 입력 전류(I_{T1})에 따른 부하 전류(I_{T2}/N)의 비를 나타내었다. 직렬공진 인버터 효율 특성식은 스위칭 소자 턴 온시의 전압강하 성분($V_{CF}=0.017 \cdot I_{T1} + 0.7$)에 의한 손실과 스위칭소자 턴 오프시 바디 다이오드의 전압강하($V_{df}=0.016 \cdot I_{T1} + 0.7$)성분에 의한 손실, 직렬 커패시터의 내부 저항(R_c) 및 변압기 1차측 및 2차측 권선저항(R_{LP} , R_{LS})에 의한 손실을 고려하였다. 식 (1)은 입력 임피던스(Z_{in})를 나타내며, 순환 모드와 파워링 모드 주기는 식 (2)의 위상각(θ)에 의해 결정되며, 입력 임피던스의 위상각은 부하저항 변화($R_L=18\Omega-180\Omega$)에 달라진다. 따라서 직렬공진 인버터 효율특성식 (3)을 이용하여 그림 4는 부하 변화에 대해 직렬공진 인버터 효율 특성 시뮬레이션이다. 경부하($R_L=180\Omega$)에서 중부하($R_L=18\Omega$)로 갈수록 효율이 높아짐을 확인할 수 있다.



〈그림 4〉 직렬공진 인버터 효율 특성

2.2 직렬공진 컨버터의 변압기 2차측 정류부 효율 분석

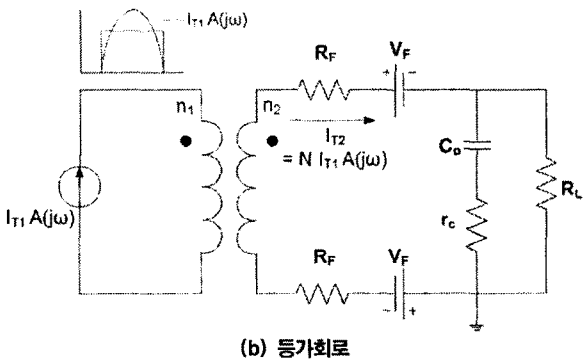
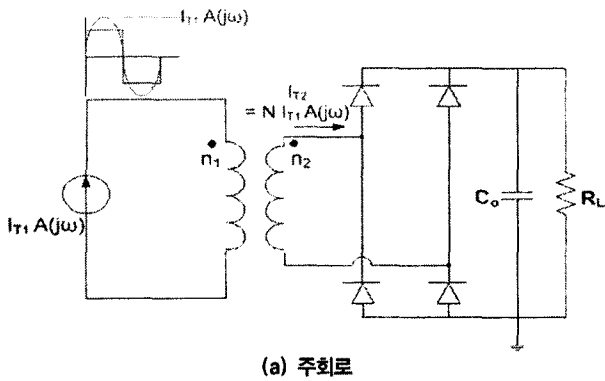
그림 5(a)는 직렬공진 컨버터의 변압기 2차측 정류부 주회로이고 그림 5(b)는 다이오드의 손실 부분과 출력 커패시터의 손실 부분을 고려한 변압기 2차측 정류부 등가회로이다. 등가회로에서 입력 전류($I_{T1} \cdot A(j\omega)$)는 비접촉 변압기 1차측 단자전류에 의한 기본파 전류이고, 변압기 2차측 전류(I_{T2})는 입력 전류($I_{T1} A(j\omega)$)의 턴수비($N=n_1/n_2$)를 고려한 전류이다. 변압기 2차측 전류(I_{T2})의 평균전류는 출력전류(I_o)와 같으며, 변압기 2차측 정류부에서 효율 분석을 위해 고려할 부분은 부하 변화에 따른 입력 전류 변화(I_{in})와 출력 전압(V_o) 변화 그리고 그림 5(b) 등가회로에서 다이오드 전압강하($V_F=0.022 \cdot I_{T2} + 0.7$)성분과 다이오드 턴온 저항(R_F), 커패시터 필터의 내부저항(r_c) 등을 고려하였다. 다이오드 손실은 식 (7)의 출력 전류(I_o)로 손실을 구할 수 있고, 출력 커패시터 내부저항 손실은 식 (8)의 커패시터에 흐르는 실효전류(I_{CF})로 커패시터 필터 내부저항 손실을 구할 수 있다. 따라서 식 (9)는 변압기 2차측 정류부의 부하 변화($R_L=18\Omega-180\Omega$)에 대한 효율 특성식을 나타낸다. 또한 그림 6은 변압기 2차측 정류부 효율 특성식 (9)를 이용하여 부하 변화에 대한 시뮬레이션 한 결과이다. 결과에서 볼 수 있듯이 경부하(R_L

=180Ω)에서 중부하($R_L=18\Omega$)까지 높은 효율 특성(98% 이상)을 가지고 있으므로 전체 시스템 효율특성에 영향이 미소함을 확인할 수 있다.

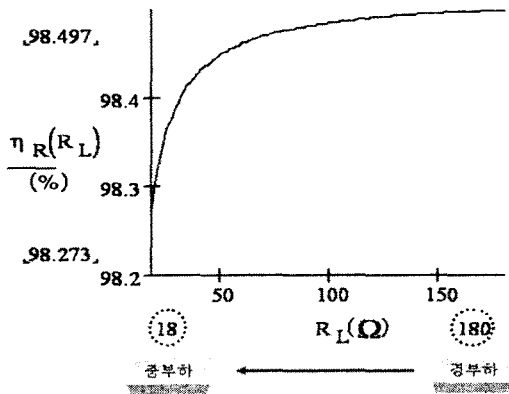
$$I_o = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi N \cdot I_i \cdot A \sin \omega t \, d\omega t \quad (7)$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi I_o^2 \left(\frac{\pi}{2} \sin \omega t - 1\right)^2} \quad (8)$$

$$\eta_{rc} = \frac{1}{1 + \frac{P_r}{P_o}} = \frac{1}{1 + \frac{2 \cdot I_o \cdot V_F + R_F \cdot \left(\frac{I_o}{2}\right)^2 \cdot \pi^2 + I_o^2 \cdot \left(\frac{\pi^2}{8} - 1\right) \cdot r_c}{I_o^2 \cdot R_{eq}}} \cdot 100 \quad (9)$$



〈그림 5〉 직렬공진 컨버터 변압기 2차측 정류부 주회로 및 등가회로

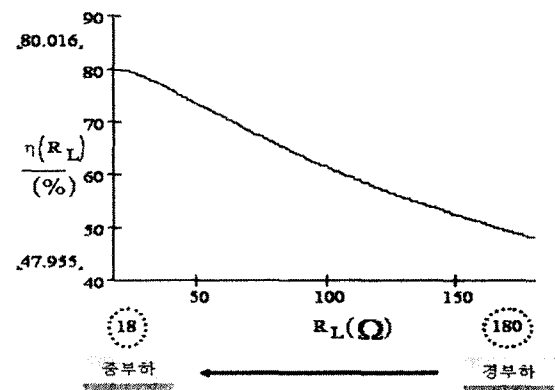


〈그림 6〉 2차측 정류부 효율 특성 곡선

2.3 3레벨 직렬공진컨버터를 적용한 비접촉전원 효율 특성

앞에서 직렬공진 인버터와 변압기 2차측 정류부의 효율 특성식 (3),(9)을 이용하여 전체 시스템의 효율 특성식은 식 (10)과 같다. 또한 그림 7은 효율 특성식 (10)을 이용하여 부하 변화에 대한 3레벨 직렬공진 컨버터의 효율특성 시뮬레이션이다. 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 전체시스템 효율 특성은 직렬공진 인버터 효율특성에 많은 영향을 받는 것을 알 수 있다. 또한 3레벨 직렬공진 컨버터 효율 특성을 이론적으로 분석하여 시뮬레이션 한 결과를 검증하기 위해 표1의 실험조건을 적용하여 실험을 한 결과, 그림 9의 부하 변화 ($R_L=18\Omega-180\Omega$)에 대한 효율특성을 얻었다. 위의 시뮬레이션 결과와 실험을 통한 결과를 비교해 볼 때 효율 특성이 일치하는 경향을 확인할 수 있다. 따라서 이론적으로 전개된 수식에 대해 타당함을 검증할 수 있었다.

$$\eta = \eta_I \cdot \eta_{rc} \quad (10)$$



〈그림 7〉 3레벨 직렬공진 컨버터 효율특성 곡선

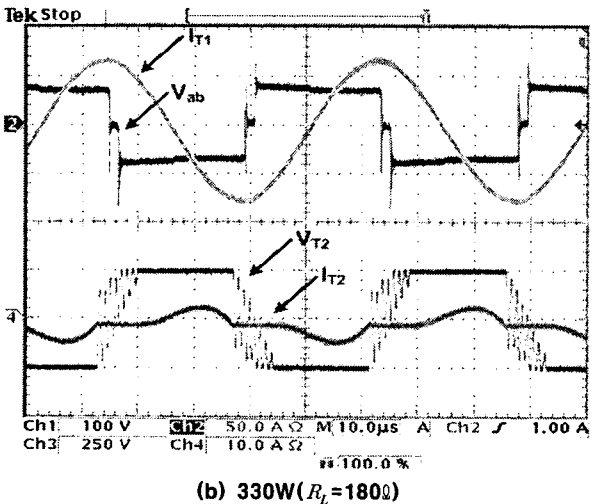
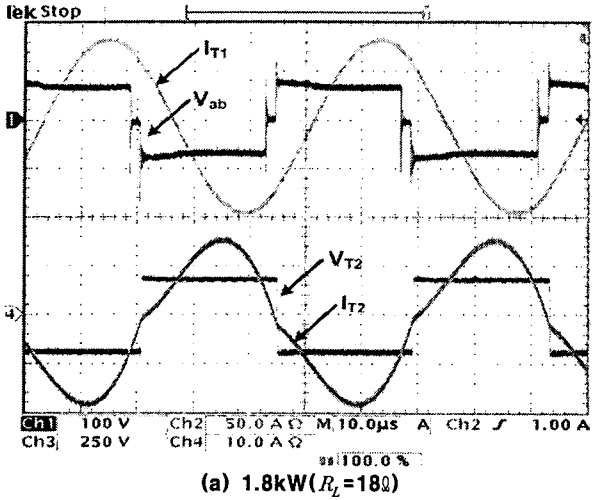
3. 실험 결과

〈표 1〉 3레벨 직렬공진 컨버터 주요정격

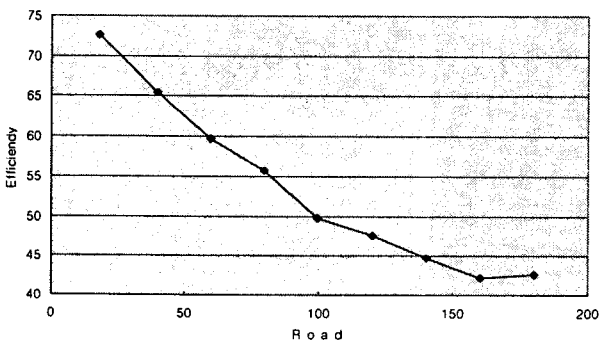
입력전압 (V_{in})	150VDC		
출력전압 범위 (V_o)	190VDC~250VDC		
출력용량 (P_o)	1.8kW		
스위칭 주파수(f_s) 및 주회로	20.6kHz, 3레벨 직렬공진컨버터		
공진 주파수(f_o)	20.06kHz		
직렬 공진 커패시터(C_s)	3000VDC, 0.9uF, ESR=0.89mΩ		
1차측 누설인덕턴스(L_{l1})	13.22uH	2차측 누설인덕턴스(L_{l2})	0.788uH
1차측 자화인덕턴스(L_m)	8.662uH	외부 인덕턴스(L_{Aux})	56.7uH
변압기 1차측 권선저항(R_{Lp})	70mΩ	변압기 2차측 권선저항(R_{Ls})	25mΩ
외부 인덕터 권선저항($R_{L_{Aux}}$)	20mΩ		
적용소자	IGBT 600VDC, 300A ($V_{GT}=2.5V, V_{GT}=1.9V$)		
	정류다이오드 ($V_F=1.2V, R_F=0.047\Omega$)		
출력 커패시터(C_o)	450V 8200uF, ESR=0.05Ω		
턴 수비	$N(n_1/n_2)=0.25$		

본 논문에서는 3레벨 직렬공진 컨버터 일정 입력전압 150VDC에 대해 출력전압(190VDC~250VDC), 1.8kW에 대하여 실험했다. 그리고 본 논문의 실험조건과 적용된 소자정격에 대해 표 1에 나타내었다. 그림 8(a)와 그림 8(b)는 일정 입력전압 상태에서 1.8kW, 350W

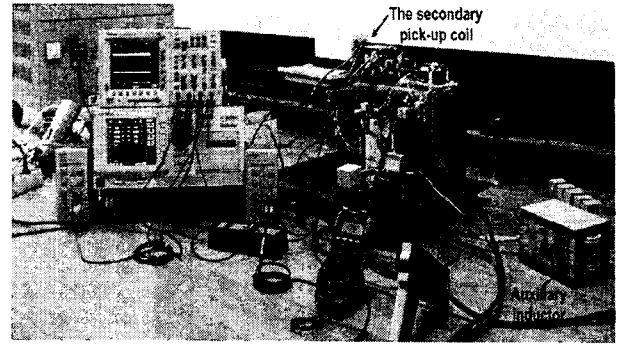
에 대한 실험파형이다. 그림 8(a)와 그림 8(b)를 통해 알 수 있듯이 경부하(180Ω)에서 중부하(18Ω)까지 3레벨 직렬공진 인버터의 단자전류는 항상 지상전류가 흐르는 것을 볼 수 있다. 그림 9는 부하 변화에 대한 효율 특성을 나타낸 것이다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 경부하에서 중부하로 부하 변화에 대한 효율 특성이 나아지지 않던 전체적인 효율 특성은 낮음을 볼 수 있다. 또한 그림 10은 1.8kW급 3레벨 직렬공진 컨버터에 대한 시제품 사진이다.



<그림 8> 3레벨 직렬공진컨버터 1차측 단자전압(V_{ab}), 전류(I_{T1})와 2차측 단자전압(V_{T2}), 전류(I_{T2}) 실험파형(100V/div., 50A/div., 250V/div., 10A/div., 10u/div.)



<그림 9> 부하 변화에 대한 효율특성



<그림 10> 시제품 사진

4. 결 론

본 논문에서는 1.8kW급 3레벨 직렬 공진 컨버터에 대해 이론적으로 효율특성을 분석하였으며, 1.8kW급의 시제품을 제작하여 실험한 결과와 비교하였다. 실험결과에서 볼 수 있듯이 3레벨 직렬공진 컨버터의 모든 주스위칭소자는 소프트 스위칭을 이룰 수 있었지만, 단자전압과 전류의 지연시간에 의해 모든 부하 변화에 대한 낮은 효율 특성을 얻었으며, 이론적인 효율특성 분석과 실험을 통한 효율특성을 비교 검토하여 유사한 효율특성을 확인하였다.

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2005-000-11173-0(2006)) 지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] Robert L. Steigerward, "A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies", IEEE Trans, Power Electronics, Vol 3, pp.174-182, 1988.
- [2] M. K Kazimierczuk "Class D voltage-switching inverter with tapped resonant inductor" IEE PROCEEDING-B vol.140, No 3, pp.177-185 1993
- [3] 공영수, 김은수, 이현관, 조정구, 김윤호 "낮은 커플링 변압기를 갖는 LCLC 공진 컨버터 동작특성", 전기학회논문지 제 54B권, 7호, pp.343-349, 2005