

새로운 복합변압기를 적용한 영전압 풀브릿지 컨버터에 관한 연구

安泰榮[†], 奉相澈^{*}, 金敦植^{**}

A Study on the ZVS Full Bridge Converters using the New Integrated Magnetics Transformer

Tae-Young Ahn, Sang-Cheol Bong and Don-Sik Kim

요 약

본 논문에서는 영전압 스위칭 풀브릿지 컨버터에 적용할 수 있는 새로운 방식의 복합 변압기(Integrated magnetics) 구조를 제안하고 시험용 컨버터에 적용하여 실험 결과를 보고한 것이다. 제안된 복합변압기의 권선 방법은 두 개의 1차측 권선을 병렬로 하고 2차측 권선은 중앙에 탭이 있는 배전압 방식으로 구성이 된다. 복합변압기의 구조는 기본적으로 EE, EI 코어를 이용하며 코어 양쪽 다리에 변압기의 1, 2차 권선이 각각 위치하고, 중앙의 다리에는 출력 필터용 인덕터 권선을 구성한다. 제안된 복합변압기의 성능을 평가하기 위해서 100kHz의 스위칭 주파수, 12V 출력전압과 최대출력 720W급의 컨버터를 제작하였으며 복합변압기는 전 범위에서 동작이 안정되었으며 컨버터는 최대 92%의 전력변환효율을 나타내었다.

ABSTRACT

This paper presents the structure and performance of a new integrated magnetics-based transformer, which can be readily adapted to zero-voltage switching full bridge dc-to-dc converters. The proposed transformer features with two paralleled primary windings and a center-tapped secondary winding. The transformer can be fabricated on standard EE or EI cores where the primary and secondary windings are placed on the outer legs while the output filter inductor is wound on the middle leg. The performance of the proposed transformer is demonstrated with a 100 kHz 720 W experimental dc-to-dc converter which recorded a 92% conversion efficiency at 12 V output voltage.

Key Words : IM transformer, ZVS, Full bridge converter, Phase shift control, Integrated magnetics

1. 서 론

일반적으로 스위칭 전원장치는 많은 전력을 변환시키기 때문에 반드시 전력손실이 발생하게 된다. 특히 전력변환 효율이 낮아지는 경우에는 전력손실은 발생 열에 비례하며, 경우에 따라서는 제품의 수명을 단축시키는 요인이 된다. 또한 중대형 컴퓨터에서 사용되는 대용량의 전원장치의 경우에는 전력변환 효율뿐만 아니라 전원장치의 사이즈가 제한 받게 되어 제품 개발 단계에서 체적과 부피, 무게를 줄일 수 있는 설계

[†]교신저자 : 정회원, 칭주대 전자정보공학부 부교수
E-mail : tyahn@cju.ac.kr

^{*}정회원, 삼성전기 파워사업팀 선임연구원

^{**}정회원, 삼성전기 파워사업팀 수석연구원

접수일자 : 2008. 6. 18 1차 심사 : 2008. 8. 7

심사완료 : 2008. 9. 11

와 제조방법이 절실히 요구되고 있다. 일반적으로 전 원장치에서 사용되고 있는 변압기와 인덕터와 같은 자 성체 소자를 적절한 권선방법과 자성 기술을 이용하여 소형화 시키는 것을 복합변압기(IM Integrated magnetics) 기술로 알려져 있으며, 복합변압기 기술에 의해 스위칭 주파수와 고효율 전력변환으로 더 이상 소형화가 어려운 전원장치의 전력밀도를 높일 수 있는 대안의 하나로 알려져 있다^[1-6]. 서버용 고속의 컴퓨팅 분야와 같은 대용량 전원장치의 기본 회로방식으로 널리 사용되고 있는 영전압 스위칭 풀브릿지 컨버터는 높은 안정성과 고효율 동작, 낮은 전압스트레스, 소프트 스위칭 등의 장점이 있어서 설계 시 가장 선호되고 있는 회로방식 중의 하나이다^[7,8]. 그러나 회로를 구성 하는 경우 변압기와 출력 인덕터와 같은 복 수의 자성 체 코어를 사용하기 때문에 시스템의 사이즈가 제한되 고 필터의 사이즈가 커지는 단점이 있었다.

본 논문에서는 영전압 스위칭 풀브릿지 컨버터에 적 용할 수 있는 새로운 방식의 복합 변압기 구조를 제안 하고 시험용 컨버터에 적용하여 실험 결과를 보고한 것이다. 제안된 복합변압기의 성능을 평가하기 위해서 100kHz의 스위칭 주파수, 12V 출력전압, 60A 최대출 력전류, 최대출력 720W급의 영전압 스위칭 풀브릿지 컨버터를 제작하여 특성을 확인하였다.

2. 병렬 권선 변압기 구조의 ZVS 풀브릿지 컨버터

그림 1에는 본 논문에서 제안하는 병렬 권선 변압기 를 적용한 영전압 스위칭 풀브릿지 컨버터의 기본회로 가 나타나 있다. 제안 회로방식은 기본적으로 풀브릿 지 컨버터를 기본회로로 이용하였기 때문에 변압기의 1차 측에는 총 4개의 스위치가 사용되었고, 2차 측에 는 배전압 방식의 정류기가 사용되었다. 그림에서 변 압기는 두 개를 사용하며 2차측의 권선과 각각 결합되 어 있다는 것을 알 수 있다. 변압기의 2차측에서 사용 되고 있는 정류기는 기본적으로 센터 탭이 있는 전파 정류기를 사용하고 있으며 다이오드 정류기나 동기정 류기 모두 적용 가능하다는 특징이 있다.

그림 2에는 그림 1의 기본 회로에 대한 등가회로가 나타나 있다. 등가회로에서는 반도체 스위치를 이상적 인 스위치로 가정하였고, 변압기는 자화인덕터만 고려 하였으며, 출력단의 커패시터를 정상상태에서 정전압 으로 대체하였다.

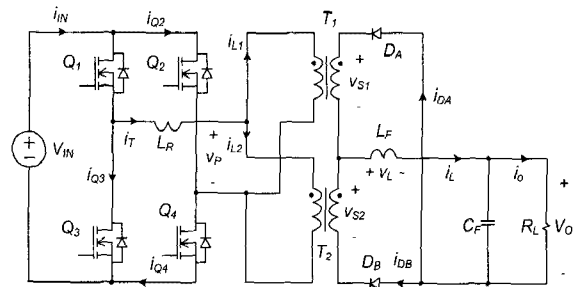


그림 1 병렬 권선 변압기 구조의 영전압 풀브릿지 컨버터
Fig. 1 The ZVS full bridge converter using the transformers with parallel winding

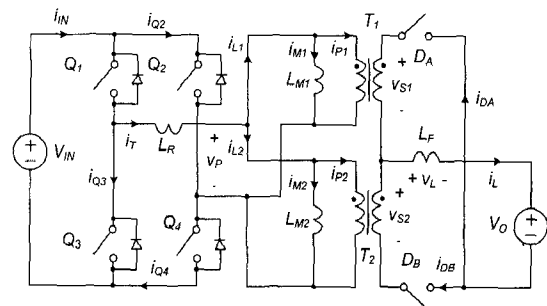
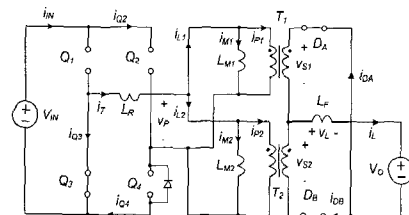
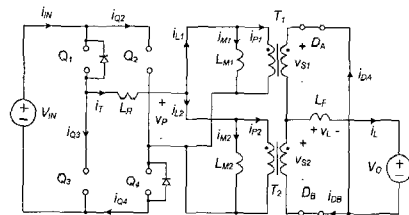


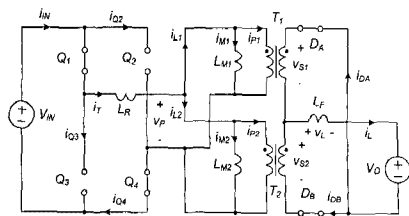
그림 2 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit



(a) $t_0 - t_1$



(b) $t_1 - t_2$



(c) $t_2 - t_3$

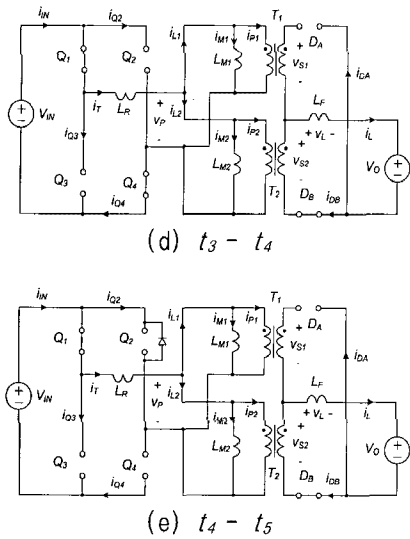


그림 3 컨버터의 상태별 등가회로
Fig. 3 Equivalent circuits for the ZVS full bridge converter

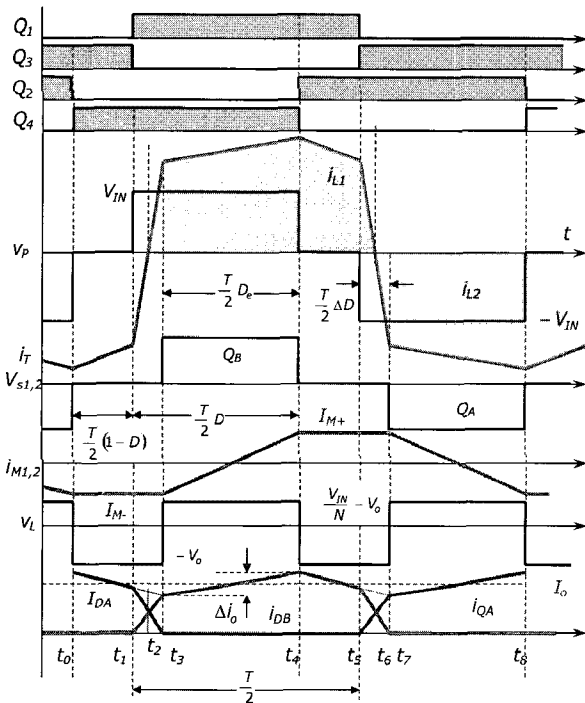


그림 4 영전압 스위칭 풀브릿지 컨버터의 동작파형
Fig. 4 Operational waveforms for the ZVS full bridge converter

그림 3에서는 각각의 스위치 상태에 따른 상태별 등가회로를 나타내었으며, 그림 4에서는 등가회로 내부의 주요 소자에 대한 동작파형이 나타나 있다. 상태별 등가회로와 동작파형으로부터 컨버터의 동작은 다음과 같이 간단하게 설명된다.

시간 t_0 에서 스위치 Q_4 가 턴온 되면 변압기 전압 v_p 는 0이 되고 출력전류 i_o 는 다이오드 D_A 를 통해 흐르게 된다. 시간 t_1 에서 스위치 Q_1 이 턴온 되면 변압기 전압 v_p 는 입력전압이 되고 출력전류 i_o 는 다이오드 D_A 와 D_B 를 통해 흐르게 된다. 시간 t_2 에서 변압기 전류 i_T 가 양이 되며 변압기 전압 v_p 는 입력전압이 되고 출력전류 i_o 는 다이오드 D_A 와 D_B 를 통해 흐르게 된다. 시간 t_3 에서 스위치 Q_1 과 Q_4 를 통해 흐르고 출력전류 i_o 는 다이오드 D_B 를 통해 흐르게 된다. 시간 t_4 에서 스위치 Q_2 가 턴온 되면 변압기 전압 v_p 는 0이 되고 출력전류 i_o 는 다이오드 D_B 를 통해 흐르게 된다. 시간 t_4 에서 반주기가 끝나게 되며 나머지 반주기는 파형이 상하 대칭되며 앞의 동작설명과 동일하게 된다. 정상상태에서 각 동작설명과 등가회로부터 변압기 전류의 천이시간 ΔD 는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta D = \frac{2L_{r}f_s}{NV_{IN}} \left(2I_o - \frac{V_o}{2L_{r}f_s} (1-D) \right) \quad (1)$$

식에서 N 은 변압기의 2차측에 대한 1차측 권선비이며 입출력 전압비는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{NV_o}{V_{IN}} = (D - \Delta D) \quad (2)$$

식(1)과 (2)는 기존의 영전압 풀브릿지 컨버터의 특성식과 동일하다는 것을 알 수 있다^[7]. 이것은 변압기의 양 전류는 상단의 변압기가 담당하고 음의 전류는 하단의 변압기가 담당하지만 2차측의 전류는 모두 합쳐져서 기존의 컨버터와 같아지기 때문이다. 참고로 출력 인덕터의 리플전류는 다음과 같다.

$$\Delta i_L = \frac{V_o}{2L_{r}f_s} (1 - D + \Delta D) \quad (3)$$

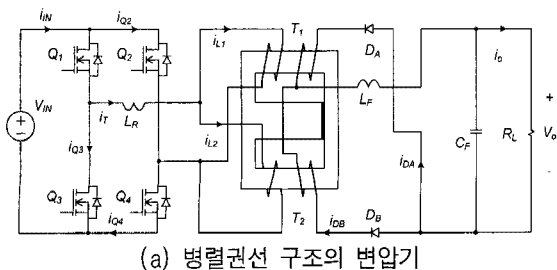
3. 복합 변압기 적용한 영전압 풀브릿지 컨버터

그림 1의 병렬권선 변압기 구조의 풀브릿지 컨버터는 변압기 권선을 위해서 두 개의 변압기를 사용할 수 있지만 본 논문에서는 한 개의 코어를 사용하여 컨버터를 구성할 수 있는 방법을 제안하였다. 일반적으로 단일권선으로는 복합변압기를 구현하는 것이 비효율적이다. 그림 5에는 본 논문에서 제안하고 있는 변압기 권선 방법을 나타내었다. 그림 5(a)에서는 EE, ER 또

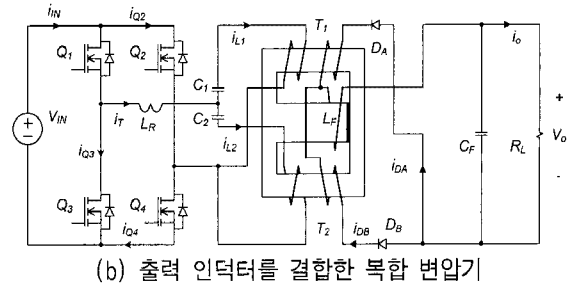
는 EI코어를 사용하여 양쪽 다리에 변압기 1차, 2차 권선을 하여 컨버터를 구성할 수 있는 병렬구조 복합 변압기를 이용한 풀브릿지 컨버터를 나타내었다^[9]. 그림 5(b)에서는 EE코어 또는 EI코어를 사용하여 양쪽 다리에 변압기 1차, 2차 권선을 하고 중앙에 출력단의 인덕터 권선을 추가한 복합변압기 구조를 이용한 풀브릿지 컨버터를 나타낸 것이다. 그림 5(b)에서는 변압기의 편자(Unbalancing flux)현상을 억제하기 위해서 변압기 1차 측 병렬권선과 직렬로 직류전류 제거용 커패시터를 각각 추가하였으며 인덕터의 자속을 양쪽 자로에 의해 분산시켜서 과도한 자속이 편자 되지 않도록 함으로서 보다 효율적인 컨버터 동작을 기대할 수 있게 하였다.

특히 변압기의 높은 자화 인덕턴스 특성을 유지하기 위해서 코어의 양단에서는 별도의 공극(Air gap)을 두지 않는다. 또한 코어의 중앙에는 변압기 2차측의 필터용 인덕터를 구성한다. 이때 필터용 인덕터는 많은 전류가 흐르기 때문에 자속 밀도가 높아 질 수 있으므로 자기 포화를 막기 위해 코어의 중앙에는 공극을 마련한다. 이때 변압기의 양단에 설치하는 병렬 변압기 구조를 변압기의 자속을 중앙에서 서로 상쇄시키기 위해서 양단의 변압기 자속의 방향을 같은 방향으로 할 수 있다. 이와 같이 구성된 복합변압기는 효과적으로 변압기 내부의 자속을 제어 할 수 있기 때문에 효율적으로 자성체를 이용할 수 있다는 장점이 있다.

본 논문에서 제안한 복합변압기를 이용한 풀브릿지 컨버터는 앞서 설명한 바와 같이 기본적으로 기존의 컨버터에서 변압기의 1차측이 단일권선으로 되어 있는 경우와 유사한 정상상태 특성을 갖고 있으며 변압기 2차 측의 동작 특성도 같은 특성을 나타내고 있다. 따라서 대전류 컨버터를 설계하는 경우 전도손실을 저감시켜서 전력변환 효율을 개선하기 위한 방법으로 2차측의 정류방식을 기존의 다이오드 대신 낮은 도통 저항의 MOSFET로 대체한 동기정류기가 사용되고 있는데 그림 5의 제안 컨버터는 기본적으로 동기정류기 구성이 가능하다.



(a) 병렬권선 구조의 변압기



(b) 출력 인덕터를 결합한 복합 변압기

그림 5 복합변압기를 적용한 풀브릿지 컨버터
Fig. 5 The ZVS full bridge converter using the integrated magnetic transformers

4. 실험 결과

본 논문에서 제안한 병렬 구조형 복합변압기를 적용한 영전압 스위칭 풀브릿지 컨버터의 성능을 검증하기 위해서 실험용 시제품을 제작하였다. 이때 컨버터의 전기적 사양은 다음과 같이 정하였다. 정상 입력전압은 350V, 최대 입력전압 400V, 출력전압 12V, 최대출력전류는 60A, 최대출력 720W, 스위칭주파수는 100kHz이다. 시제품 설계는 정상상태 특성이 같기 때문에 기존 연구에서 알려진 컨버터의 설계방법을 사용하였다. 복합 변압기는 기판 점유 면적을 최소화하기 위해서 두 개의 EI40 코어를 적층하여 제작하였으며 2차측 출력전류가 크기 때문에 전도손실을 저감시키기 위해서 2차 권선과 인덕터 권선은 ㄷ형태의 클립을 제작하여 기판의 위에서 코어를 덮는 방법으로 구성하였다. 식 (1), (2)에 의해서 변압기의 권선비는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$N = \frac{N_p}{N_s} = \frac{350 \times 0.8}{12 + 1} = 21.5 \approx 20 \tag{4}$$

변압기의 2차측 권선은 전류밀도 제한에 의해서 2턴으로 정하면 변압기 1차측 병렬권선은 각각 40턴이 되고, 2차측 권선의 폭은 코어의 사이즈에 의해 5mm 이하로 제한되며 전류밀도를 4A/mm²로 기준으로 하면 권선 두께 h는 다음과 같다.

$$h = \frac{I_{rms}}{W \times J_L} = \frac{40}{5 \times 4.0} = 2mm \tag{5}$$

따라서 2차측 권선은 폭이 5mm, 두께가 2mm인 클립으로 제작하였다. 또한 변압기의 최대자속밀도는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta B = \frac{V_{IN} D}{2N_p A_e f_s} \approx 0.14 T \quad (6)$$

두 개의 병렬 변압기 자속과 인덕터 자속은 바깥쪽 다리에 합쳐져서 돌기 때문에 충분한 여유를 갖도록 설계하였다. 그림 6에는 본 논문의 시험에서 사용된 복합변압기의 완성된 모습을 사진으로 나타내었다. 표 1에는 변압기 권선 사양을 정리하여 나타내었다. 시험용 컨버터는 2차측 전류가 크기 때문에 정류기 손실을 저감시키기 위해서 동기정류기 방식을 사용하였으며 각 다이오드 대신 MOSFET SI7478 ($V_{DS} = 60V$, $I_D = 20A$, $R_{DS} = 7.5m\Omega$) 4개를 병렬로 사용하였으며 1차측 주스위치는 SPP20N60C3 ($V_{DS} = 650V$, $I_D = 20.7A$, $R_{DS} = 0.19\Omega$)을 한 개씩 사용하였다. 주스위치의 PWM 제어는 대표적인 위상제어 소자인 UCC3895를 이용하였다.

그림 7에는 본 논문에서 제안한 복합변압기를 적용한 풀브릿지 컨버터의 시험회로를 제작하여 관찰한 정상상태의 동작 파형을 나타내었다. 그림 7의 동작 파형은 위에서부터 변압기의 1차 측 전류 $i_T [2A/div]$, 변압기의 1차 측 전압 $v_P [350V/div]$, 동기정류기의 양단 전압 $v_{A,B} [50V/div]$ 파형을 각각 나타내고 있다. 그림

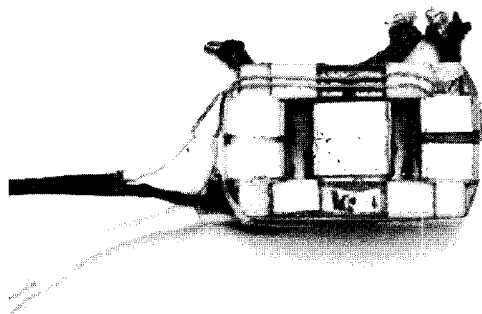
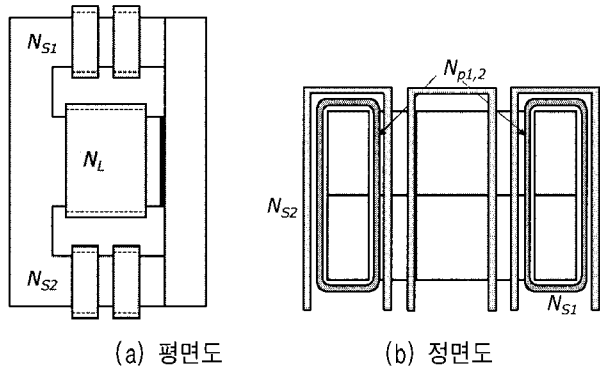
표 1 복합변압기 권선 사양

Table 1 Specifications of IM transformer

명칭	변수	값	단위
변압기 코어	T	EI40	-
변압기 권선비	N	40:2:1	-
자화 인덕턴스	L_M	600	μH
누설 인덕턴스	L_{LK}	13.77	μH
필터용 인덕턴스	L_F	1.7	μH
2차 권선	W_1	5×2	mm
1차 권선	W_2	0.5	mm

에서는 부하 전류가 1A, 10A, 30A, 50A로 점차 증가시켰을 때 각 주요부분의 동작파형이 나타나 있고, 다음과 같이 정리할 수가 있다.

앞 절에서 설명한 정상상태 특성과 이론 동작파형이 거의 일치하고 있으며 낮은 부하전류에서 높은 부하전류로 증가하면서 실효 시비율이 증가하며, 변압기 전류의 피크값이 커지고 있음을 알 수 있다. 특히 동기정류기 양단 전압이 변압기 전압과 동상으로 동작하며 따라서 정상적인 정류기능을 하고 있음을 알 수 있었다. 그림 7의 실험파형으로부터 제안한 복합변압기는 기존 풀브릿지 컨버터와 유사한 정상상태 동작을 하고 있으며 위상제어와 영전압 스위칭, 낮은 스위치 전압 스트레스 등의 장점이 기대되며 복합압기를 적용한 경우에도 최대부하까지 안정된 동작을 확인 할 수 있었다. 그러나 직렬권선 방식과는 달리 병렬권선 방식은 자화인덕턴스가 반으로 저감되어 1A의 낮은 부하전류에서 비교적 높은 자화전류를 나타내고 있다는 것을 알 수 있으며 권선수 조정과 코어형상 조절에 의해 개선해야 될 부분이라고 판단된다. 그림 8은 복합변압기를 적용한 풀브릿지 컨버터 시험회로의 전력변환 효율을 측정하여 그래프로 나타낸 것이며 그림 9는 측정된 전력변환 효율이다. 그림에서 알 수 있듯이 실험회로의 출력전류가 22A에서 효율은 90% 이상이었고, 출력전류가 40A에서 약 92%의 최대 전력변환 효율이 관측되었고, 최대 출력 전류 60A에서는 90.8%의 효율이 측정되었다. 한편 내부 전력손실은 그림 9로부터 22A에서 약 30W, 최대 출력전류 60A에서 약 72W로 측정되었으며 본 논문에서 제안한 복합변압기를 적용한 풀브릿지 컨버터가 넓은 부하전류 범위에서 안정되게 동작하고 있으며 동기정류기 적용과 함께 고효율 전력변환 효율을 나타냄으로서 중대용량의 전력변환 회로에서 유용한 방식이라고 판단된다.



(c) 시제품 사진

그림 6 복합 변압기 구조

Fig. 6 Configuration of the IM transformer

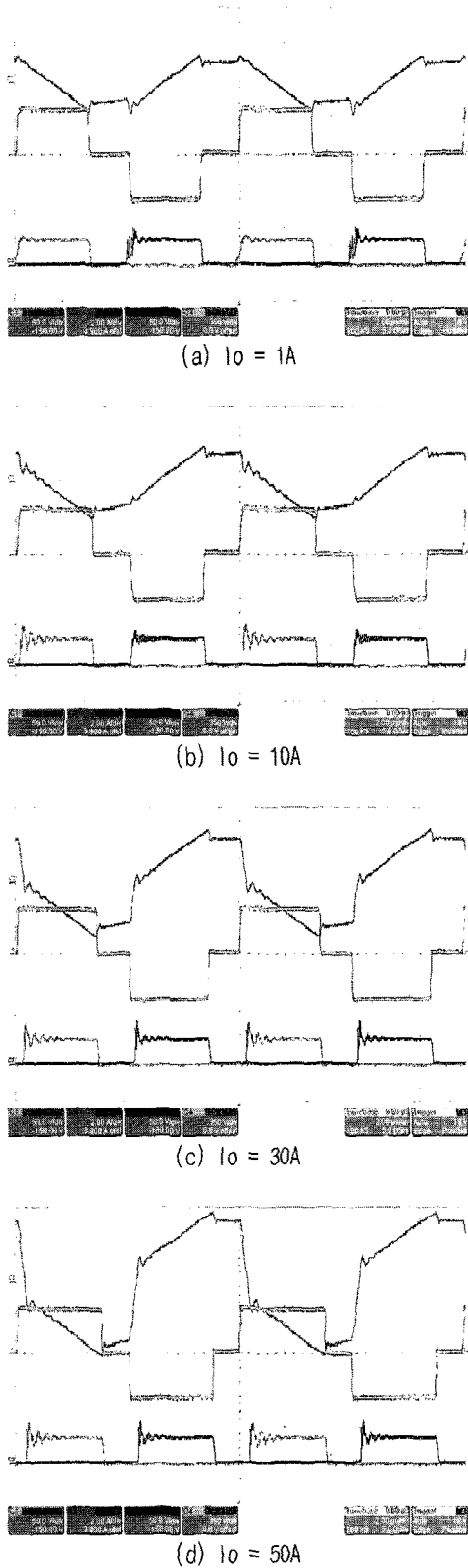


그림 7 실험용 컨버터의 주요 동작파형
 Fig. 7 Key waveforms for the experimental converter
 (i_T 2A/div, v_T 350V/div, v_{O1} 50V/div, v_{O2} 50V/div, t 2 μ s/div)

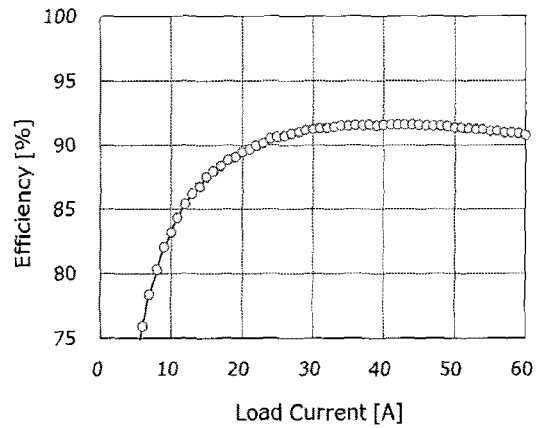


그림 8 전력 변환 효율
 Fig. 8 Power conversion efficiency

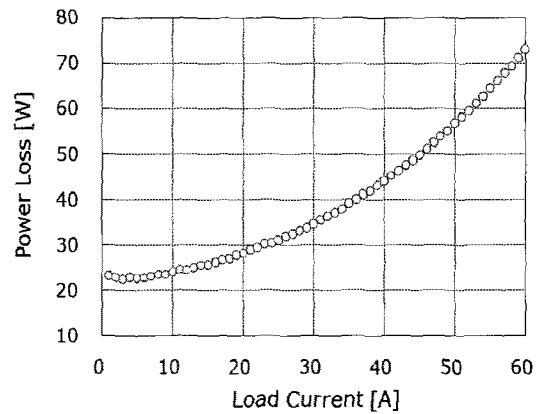


그림 9 전력 손실
 Fig. 9 Power conversion losses

5. 결 론

본 논문에서는 영전압 스위칭 풀브릿지 컨버터에 적용할 수 있는 새로운 방식의 복합 변압기 구조를 제안하고 시험용 컨버터에 적용하여 실험 결과를 보고하였다. 제안된 복합변압기의 권선 방법은 두 개의 1차측 권선을 병렬로 하고 2차측 권선은 중앙에 탭이 있는 배전압 방식으로 구성이 된다. 복합변압기의 구조는 기본적으로 EI 코어를 이용하며 코어 양쪽 다리에 변압기의 1, 2차 권선이 각각 위치하고, 중앙의 다리에는 출력 필터용 인덕터 권선을 구성한다.

제안된 복합변압기의 성능을 평가하기 위해서 정상 입력전압은 350V, 최대 입력전압 400V, 출력전압 12V, 최대출력 720W, 스위칭주파수는 100kHz의 컨버터를 시험 제작하여 전기적 특성을 관찰하였다. 시험결과로부터 제안한 복합변압기를 적용한 풀브릿지 컨버터는

기존 회로방식과 유사한 정상상태 동작을 하고 있으며 위상제어와 영전압 스위칭, 낮은 스위치 전압스트레스 등의 장점이 기대되고 최대부하까지 안정된 동작을 확인할 수 있었다. 실험회로의 최대 전력변환 효율은 중부하에서 약 92%이며, 최대 출력 전류 60A에서는 90.8%의 효율이 측정되었다.

따라서 본 논문에서 제안한 복합변압기를 적용한 풀브릿지 컨버터가 동기정류기 적용과 함께 고효율 전력변환 효율과 안정된 동작특성을 나타냄으로서 중대용량의 컨버터 회로 중에서 유용한 회로방식이 될 것으로 판단되며, 향후 본 논문에서 복합변압기의 자기 해석을 통해 변압기의 설계 방법과 컨버터의 최적 설계에 대한 연구를 진행할 예정이다.

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

[1] D. K. Cheng, L. Wong, and Y. S. Lee, "Design, modeling, and analysis of integrated magnetics for power converters", in *Proc. IEEE PESC*, pp. 320-325, 2000.

[2] L. Yan and B. Lehman, "Better understanding and synthesis of integrated magnetics with simplified gyrator model method", in *Proc. IEEE APEC*, pp. 433-438, 2001

[3] G.W. Ludwig and S.E. Hamamsy, "Coupled inductance and reluctance models of magnetic components", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 6, No. 2, pp. 240-250, 1991, April.

[4] Liang Yan, Dayu Qu, Brad Lehman, "Integrated Magnetic Full Wave Converter With Flexible Output Inductor", *IEEE transactions on power electronics*, Vol. 18, No. 2, pp. 670-678, 2003, March.

[5] J. M. Lopera, Miguel J. Prieto, Alberto M. Pern'ia, Fernando Nuno, Martinus J. M. de Graaf, Jan Willem Waanders, and Lourdes Alvarez Barcia, "Design of Integrated Magnetic Elements Using Thick-Film Technology", *IEEE transactions on power electronics*, Vol. 14, No. 3, pp. 408-414, 1999, May.

[6] O. S. Seiersen, "Power Supply Circuit with Integrated Magnetic Components," U.S. Patent 5.335.163, 1994, Aug. 2.

[7] 구관본, 김태성, 문건우, 윤명중, "직렬 연결된 두 개의 트랜스포머를 갖는 새로운 위상 천이 풀 브릿지 컨버터", *전력전자학회 논문지*, 제7권 제5호, pp. 443-452, 2002. 10.

[8] Gerry Moschopoulos, Jayesh Shah, "A Comparative Study of Simple Ac-Dc PWM Full-Bridge Current-Fed and Voltage-Fed Converters", *Journal of Power Electronics*, Vol. 4, No. 4, pp. 246-255, 2004. 10.

[9] V. Mehrotra, Jian Sun, Sriram Chandrasekaran, "Vertically packaged switched mode power converter", United states patent US7,012,414 B1, 2006, Mar. 14.

저 자 소 개



안태영(安泰英)

1984년 한양대 전자공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 큐슈대 전자공학(공학박). 1995년 일본 세이코 전기 선임연구원. 1996년 삼성전자 반도체 선임연구원. 1997년~현재 청주대 전자정보공학부 부교수. 현재 당 학회 학술이사.



봉상철(奉相澈)

1974년 1월 3일생. 2005년 한양대 전자전기 제어계측공학과 대학원 졸업(석사). 2005년~현재 삼성전기 파워사업팀 선임연구원.



김돈식(金敦植)

1964년 10월 26일생. 1989년 단국대 전자공학과 졸업. 1994년~현재 삼성전기 파워사업팀 수석연구원.