

## 개선된 영전압 스위칭 액티브 포워드 컨버터

최선호\*, 박진영\*, 김은수\*, 강찬호\*\*

\*전주대학교, \*\*동아일렉콤

## An Improved ZVS Active Forward Converter

Sun-Ho Choi\*, Jin-Young Park\*, Eun-Soo Kim\*, and Chan-Ho Kang\*\*

\*Jeonju Uni, \*\*Dongahalecomm Corp

### ABSTRACT

In this paper, active forward converter with snubber circuit - composed of a tapped inductor, a snubber capacitor, two diodes - is proposed. By adding the snubber circuit, ZVS operation became possible even in a smaller magnetizing current conditions than the conventional converter. The operational principles and the equivalent mode analysis of the proposed converter is described and compared to conventional converter. We constructed the prototype active clamped forward converter with 300W output capacity and verified that efficiency of the proposed converter is higher than the conventional converter.

### 1. 서 론

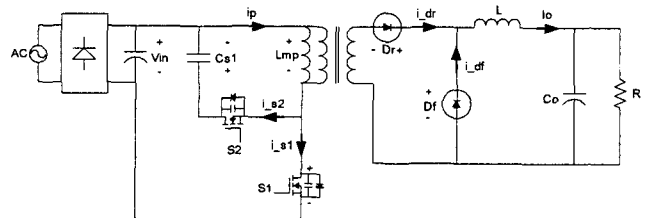
기존의 액티브 포워드 컨버터는 보조스위치와 클램프 커패시터(Cs1)를 적용하여 주스위치와 보조스위치에 영전압 턴-온을 구현하였다. 그러나 컨버터의 부하전류가 증가함에 따라 인덕터의 전류가 연속모드로 동작하면서 주스위치 S1에서 영전압 스위칭이 파괴되는 현상을 볼 수 있다. 이러한 문제를 보완하고자 변압기의 Magnetizing Inductance (Lmp)를 감소시키거나 변압기 2차측에 Saturable Inductor를 사용하는 방법이 제안되었다.<sup>[1][2]</sup> 하지만 Magnetizing Inductance의 감소는 여자전류의 증가로 인한 도통손실과 EMI를 증가시키고 변압기 2차측 Saturable Inductor의 사용은 인덕터 자체 발열로 인해 효율 감소의 원인이 된다. 따라서 본 논문에서는 기존의 액티브 포워드 컨버터의 2차측에 무손실 탭-인덕터 스너버를 적용하여 Magnetizing Inductance를 감소시키지 않고도 보다 확실한

영전압 스위칭이 구현되는 300W급 용량의 컨버터를 제작하여 실험하였고, 그 결과에 대해 서술하고자 한다.

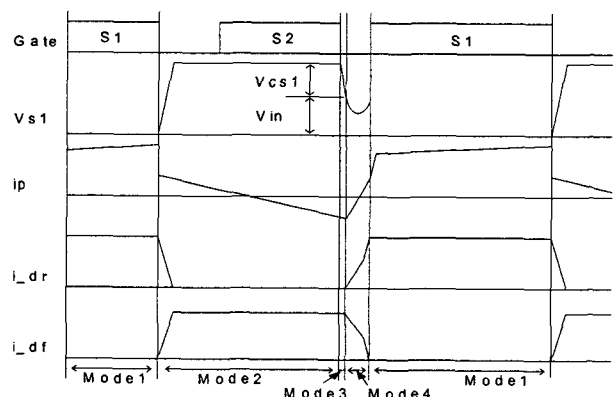
### 2. 본 론

#### 2.1 기존의 액티브 포워드 컨버터의 문제점

기존의 액티브 포워드 컨버터의 회로 및 동작파형은 그림 1과 같으며 각 동작모드에 대한 설명은 다음과 같다.



(a)기존의 액티브 포워드 컨버터



(b)동작파형

그림 1 기존의 액티브 포워드 컨버터와 동작파형  
Fig. 1 Conventional active forward converter and its waveforms

(a)Conventional active forward converter

(b)Operation waveform

**Mode1** - 먼저 S1이 턴-온을 하게 되면 부하전류와 변압기의 여자전류의 합이 S1을 통하여 흐르게 된다.

**Mode2** - S1이 턴-오프 하게 되면 변압기의 여자전류만이 S2의 바디-다이오드를 통하여 흐르게 된다. 이때 S2가 턴-온 하여 영전압 턴-온이 구현된다. S2가 턴-온 된 상태이므로 변압기의 Lm과 Cs1의 공진에 의하여 변압기의 여자전류는 S2를 통하여 역의 방향으로 흐르게 된다.

**Mode3** - 이때 S2가 턴-오프 하게 되면 변압기에 여자된 여자전류의 에너지에 의해서 계속 흐르려 하기 때문에 S2의 스위칭 소자의 기생커패시터에 전압이 Vcs1의 크기만큼 충전하게 되고 S1의 기생커패시터의 전압은 Vcs1만큼 방전하게 된다.

**Mode4** - 변압기의 여자전류는 S1과 S2의 기생커패시터를 통하여 계속해서 흐르게 되는데 이때 변압기에 양(Positive)의 극성전압이 인가되면서 변압기 2차측의 Dr이 턴-온, Df가 턴-오프 하게 되어 Df의 전류는 급격히 감소하고 Dr의 전류는 급격히 증가한다. 이 구간에서 Dr을 통하여 급격히 상승하는 전류는 변압기 1차측에 유도되어 역의 방향으로 흐르던 여자전류의 흐름을 방해한다. 이 여자전류의 크기가 변압기 1차측에 유도된 상승 전류보다 커야지만 S1의 스위치가 영전압 턴-온이 가능하게 된다.

각 Mode에서 살펴본 바와 같이 기존의 액티브 파워드 컨버터는 출력단의 인덕터 전류가 연속모드로 동작하면서 영전압 턴-온을 구현하기 위해서는 보다 큰 여자전류를 필요로 하게 되는 것이다.

## 2.2 개선된 영전압 스위칭 액티브 파워드 컨버터

본 논문에서 제안한 개선된 영전압 스위칭 액티브 파워드 컨버터는 기존의 액티브 파워드 컨버터의 변압기 2차측에 탭 인덕터, 스너버 커패시터(Cs2), 다이오드(D1,D2)로 구성된 무손실 스너버 회로가 적용된 컨버터로써 회로도 및 동작파형은 그림 2와 같다.

**Mode1(t0-t1)** - 앞서 기존방식에서 설명한 바와 같이 변압기 1차측에서는 Lm과 Cs1과 공진하고 있는 구간이며 S2가 영전압 턴-온 하는 구간이다. 변압기 2차측에서는 Cs2의 양단전압은 0V로 방전된 상태이며 탭-인덕터 L1과 L2를 그리고 i\_df를 통하여 프리휠링 하고 있는 구간이다.

$$V_{L2} = \frac{N2}{N1 + N2} \cdot V_o \quad (1)$$

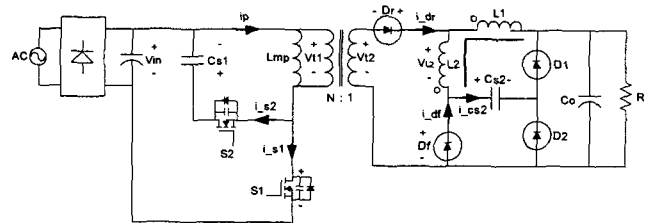
**Mode2(t1-t2)** - S2가 턴-오프 하게 되면 변압기의 1차측에서는 역의 방향으로 흐르던 여자전류의 에너지에 의해서 S2의 기생커패시터에는 충전, S1의 기생커패시터에는 방전이 시작된다. 이 모드

는 변압기의 2차측 전압(Vt2)이 VL2의 전압과 같아지면 끝나게 되며 이때까지 인덕터 전류는 Df를 통하여 여전히 프리휠링 하고 있다.

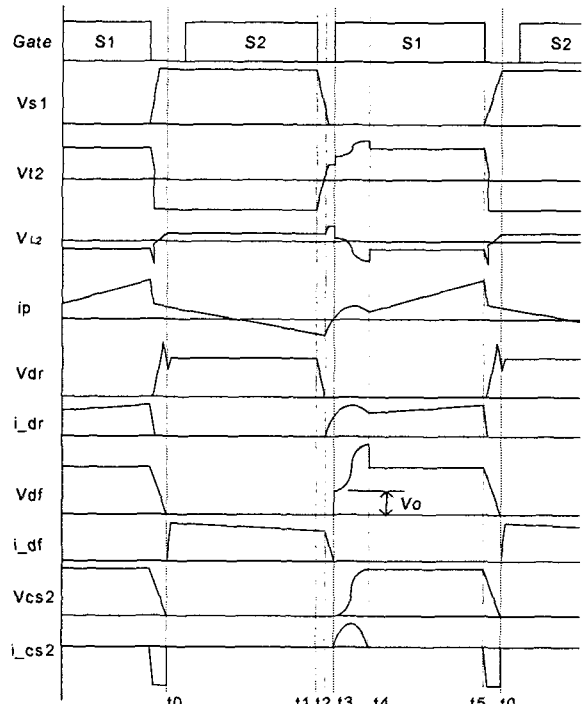
$$V_{t2}(t) = \frac{V_{in}}{N} \cdot \left( \frac{-D}{1-D} + \frac{D \cdot T_s}{4 \cdot L_m \cdot C_{oss}} \cdot (t2 - t1) \right) \quad (2)$$

$$i_m(t1) \cong i_m(t2)$$

**Mode3(t2-t3)** - Vt2의 전압이 탭-인덕터 VL2의 전압보다 높아지게 되면 Vdr이 정방향 바이어스 되어 L2의 극성이 바뀌고 i\_df의 전류는 서서히 감소하게 되며 동시에 i\_dr의 전류는 서서히 증가하게 된다. 이때 i\_dr을 통하여 서서히 증가하는 전류는 변압기 1차측에 유도되지만 완만한 전류상승의 기울기로 인하여 역의 방향으로 흐르는 여자전류의 흐름에 큰 영향을 주지 못한다. 따라서 S1의 기생커패시터의 전압은 역의 방향으로 흐르는 여자전류의 에너지에 의해서 0V로 완전히 방전하게 되며 이 모드는 끝이 난다.



(a) 개선된 영전압 스위칭 액티브 파워드 컨버터



(b) 동작파형

그림 2 개선된 영전압 스위칭 액티브 파워드 컨버터와 동작파형

Fig. 2 Improved ZVS active forward converter and its waveforms  
(a) Improved ZVS active forward converter  
(b) Operation waveforms

**Mode4(t3-t4)** - 이 모드의 t3시점에서 S1이 영전압 턴-온을 하게 되며, 변압기 2차측에서는 변압기와 탭-인덕터의 Leakage Inductance와 Cs2의 공진에 의하여  $i_{dr}$ , L2, Cs2, D1 그리고 Co를 통하여 공진 전류가 흐르게 된다. 이때 D1이 도통되면서 순식간에 Vdf에 Vo가 인가되고 Vt2전압과 Vo의 전압의 차가 탭-인덕터 VL1의 양단에 걸리게 된다. Vcs2의 전압은 공진에 의해 탭-인덕터 양끝에 걸린 전압( $V_{L1}+V_{L2}$ )의 2배만큼 충전이 하게 된다. 따라서 Vdf의 전압은  $V_o+V_{cs2}(t4)$ 의 전압이 걸리고 이 모드가 끝이 난다.

$$i_{L1} = \frac{X_{L2} + X_{Cs2}}{X_{L2} + X_{Cs2} + X_{L1}} \cdot i_{dr} \quad (3)$$

$$i_{cs2} = \frac{X_{L1}}{X_{L2} + X_{Cs2} + X_{L1}} \cdot i_{dr} \quad (4)$$

**Mode5(t4-t5)** - 이 모드에서 id\_1이 턴-오프되면서 Vdf의 전압은 Vcs2(t4)의 전압으로 일정하게 클램프 되며 Vcs2(t) 또한  $V_{L1}+V_{L2}+V_o$ 의 전압 즉, 2배의 출력전압으로 유지하고 있는 구간이다.  $i_{dr}$ 은 L1을 통하여 부하전류가 흐르는 구간이며 S1이 턴-오프 하게 되면 이 모드는 끝이 난다.

**Mode5(t5-t0)** - S1이 턴-오프 하게 되면 Vcs2에 충전되었던 전류는 D2, Cs2, L2, L1 그리고 Co를 통하여 부하로 방전하면서 이 모드는 끝이 난다.

위 동작설명 중 S1이 영전압 턴-온을 하기 위한 조건은 식(5)와 같다.

$$V_{ds1} \leq \frac{1}{2 \cdot C_{oss}} \left( \int_{t1}^{t2} i_m(t) \cdot d(t) + \int_{t2}^{t3} i_m(t) \cdot d(t) \right) \quad (5)$$

$C_{oss}$  = Output capacitors of S1 and S2

위 식(5)에서 보여주는 바와 같이 S1의 영전압 스위칭 조건은 여자전류( $i_m$ )의 크기도 중요하지만 t1에서 t3의 지속시간 역시 매우 중요하다. 따라서 개선된 영전압 스위칭 액티브 파워드 컨버터는 기존의 액티브 파워드 컨버터와 다르게 Mode2의 구간에서 변압기 2차측 Vt2(t)의 전압이 VL2(t2)의 전압과 같아지는 시간만큼 더욱 길게 존재하고, 또한 Mode3에서는 탭-인덕터 L2에 의하여  $i_{dr}$ 의 전류가 완만하게 상승하므로 결국, 변압기의 작은 여자전류의 크기에도 S1에 영전압 스위칭을 가능하게 한다.

### 3. 실험결과

본 논문에서는 개선된 영전압 스위칭 액티브 포

워드 컨버터와 기존의 액티브 파워드 컨버터를 제작하여 실험하였으며 실험 조건은 표 1과 같다. 이 두개의 컨버터를 같은 조건에서 비교 되어질 수 있도록 하기 위하여 각각의 컨버터는 모두 풀부하(300W) 용량에서 같은 Duty로 동작하게 하여 같은 여자전류가 흐르도록 하였다. 표 2에서는 실험에 사용된 부품 및 파라메타를 기록하였으며 기존의 액티브 파워드 컨버터와 개선된 영전압 스위칭 액티브 파워드 컨버터에 모두 같은 소자를 사용하였으며 단, 스너버에 적용된 소자들은 제외한다.

표 1 실험회로의 조건 및 파라메타

Table 1 Electrical specification and parameters of the circuit

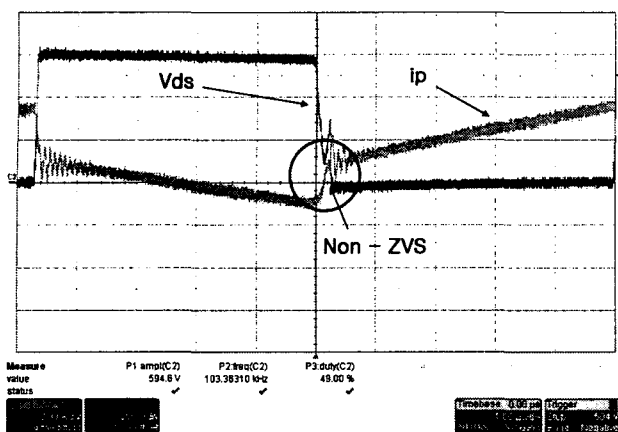
Improved ZVS active forward converter		Conventional active forward converter	
Vin	220Vac	Vin	220Vac
Vo/Io	50V/6A	Vo/Io	50V/6A
fs	100kHz	fs	100kHz
Np/Ns	38/10	Np/Ns	38/14
Lmp/Lms	626.7uH/ 43.7uH	Lmp/Lms	624.6uH/ 85.4uH
N1/N2	19/18 turns	N1	19 turns
L1/L2	157.3uH/ 141.3uH	L	157.3uH

표 2 주요 사용소자

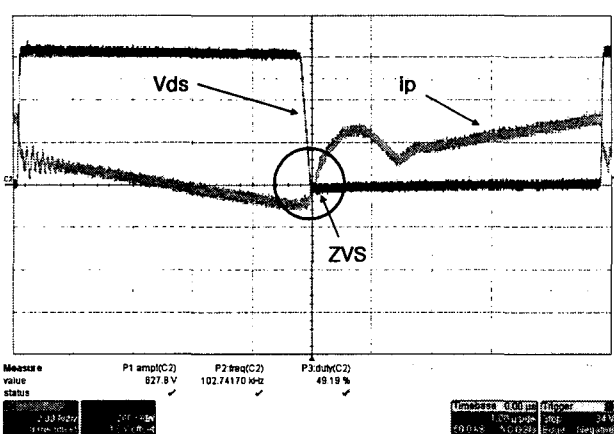
Table 2 Main components of the circuit

		사용소자 및 파라메타
공 통 소 자	S1, S2	900V 6.3A MOSFET (FQPF8N90C)
	Dr,Df	300V 8A DIODE (8ETH03)
	Cs1	220n K HC400V PILKOR
	CORE	이수 PM11 EER 4042
스 너 버	Cs2	30nF
	D1,D2	600V 3A DIODE (UF5406)

그림 3은 풀부하(300W)에서의 S1의 양단 전압파형과 변압기의 전류파형으로 기존의 액티브 파워드 컨버터는 부하전류가 증가함에 따라 인덕터가 연속모드로 동작하면서 영전압 턴-온을 이룰 수 없으나 개선된 영전압 스위칭 액티브 파워드 컨버터는 2차측 부하전류와 무관하게 영전압 턴-온 하는 것을 볼 수 있다.



(a) 기존의 액티브 포워드 컨버터 [200V/div, 2A/div]



(b) 개선된 영전압 스위칭 액티브 포워드 컨버터 [200V/div, 2A/div]

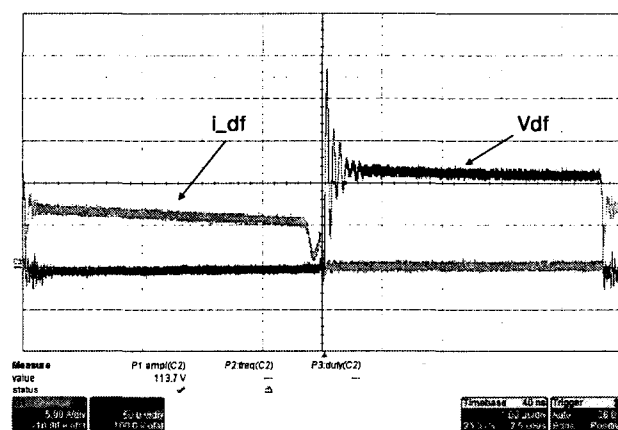
그림 3 최대부하에서 S1의 양단 전압 파형과 변압기 1차측의 전류파형

Fig. 3 Drain-source voltage waveform of S1 and primary current waveform of transformer at full load  
(a) Conventional active forward converter [200V/div, 2A/div]  
(b) Improved ZVS active forward converter [200V/div, 2A/div]

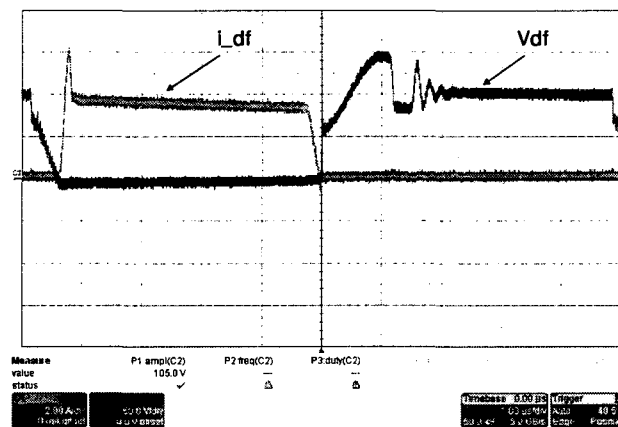
그림 4는 프리휠링 다이오드의 양단 전압과 다이오드를 통하여 흐르는 전류 파형으로 기존의 액티브 포워드 컨버터의 프리휠링 다이오드의 양단 전압(Vdf)은 스파이크성 오실레이션이 발생하는 것을 볼 수 있으나, 개선된 영전압 스위칭 액티브 포워드 컨버터에서는 커패시터 Cs2가 프리휠링 다이오드 Df에 스너버 역할을 해주므로써 스파이크성 오실레이션 없이 보다 낮은 전압으로 클램프 하는 것을 볼 수 있다. 또한 Cs2의 스너버 역할에 의하여 출력전압의 노이즈를 감소시킬 수 있는데 그림 5는 다이오드에 RCD 스너버를 적용하지 않은 풀부하에서의 출력전압 파형으로 기존의 액티브 포워드 컨버터 방식에 비해 개선된 영전압 스위칭 액티브 컨버터에서는 S1 턴-온시 프리휠링 다이오드의 양단전압(Vdf)에 스파이크성 오실레이션 제거로 인

하여 출력 노이즈 역시 제거 되었음을 확인할 수 있다.

그림 6은 본 논문에서 제안한 컨버터의 시제품 사진이며 그림 7은 기존의 액티브 포워드 컨버터와 개선된 영전압 스위칭 액티브 포워드 컨버터의 효율을 비교한 그래프로 100W까지는 개선된 영전압 스위칭 액티브 포워드 컨버터가 작은 여자전류에 의하여 높은 효율특성을 보였으며 250W 이상의 부하에서는 기존의 액티브 포워드 컨버터가 하드 스위칭에 따른 손실증가로 낮은 효율특성을 보였다. 그리고 Lmp를 299.5uH로 낮추어 전부하에서 ZVS로 동작시킨 기존의 액티브 포워드 컨버터는 큰 여자전류에 따른 도통손실로 전부하에서 대체로 낮은 효율특성을 보였다. 따라서 본 논문에서 제시한 탭-인덕터와 스너버 커패시터를 고주파 스위칭 컨버터에 적용시 기존의 액티브 포워드 컨버터와 개선된 영전압 스위칭 액티브 포워드 컨버터의 효율 격차는 더욱 커질 것으로 보여 진다.



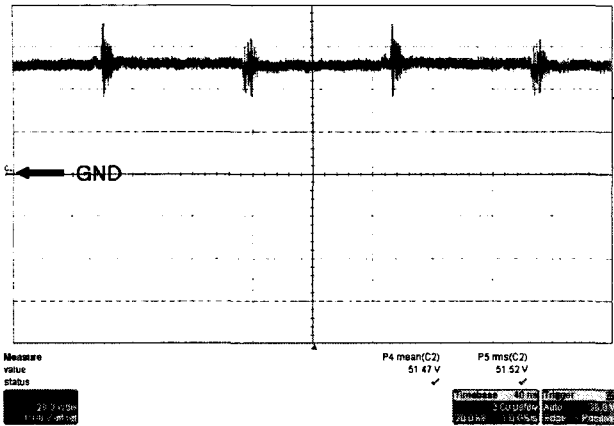
(a) 기존의 액티브 포워드 컨버터 [50V/div, 5A/div]



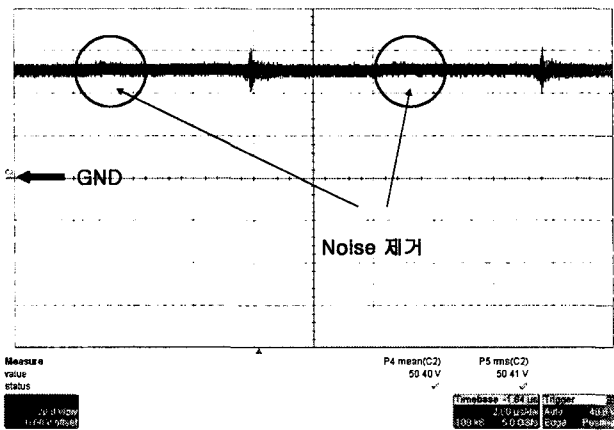
(b) 개선된 ZVS 액티브 포워드 컨버터 [50V/div, 2A/div]

그림 4 최대부하에서 Df의 양단 전압 파형과 전류파형

Fig. 4 Voltage and current waveform of Df at full load  
(a) Conventional active forward converter [50V/div, 5A/div]  
(b) Improved ZVS active forward converter [50V/div, 2A/div]



(a)기존의 액티브 포워드 컨버터 [20V/div]



(b)개선된 영전압 스위칭 액티브 포워드 컨버터 [20V/div]

그림 5 최대부하에서 출력전압파형

Fig. 5 Output voltage waveform at full load

(a)Conventional active forward converter [20V/div]

(b)Improved ZVS active forward converter [20V/div]

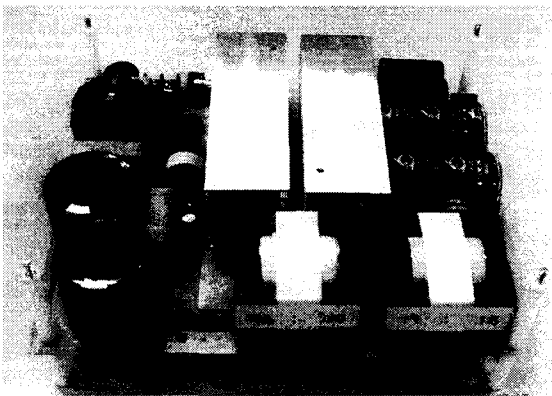


그림 6 개선된 영전압 스위칭 액티브 포워드 컨버터 사진

Fig. 6 Photography of Improved ZVS active forward converter

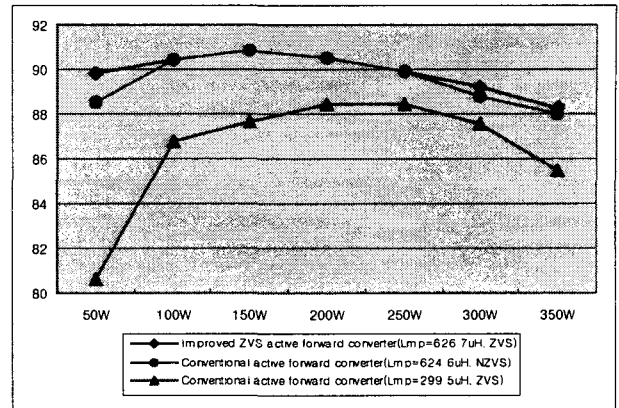


그림 7 액티브 포워드 컨버터와 개선된 영전압 스위칭 액티브 포워드 컨버터의 효율특성

Fig. 7 Efficiency characteristics of the active forward converter and the improved ZVS active forward converter

#### 4. 결 론

본 논문에서는 기존의 액티브 포워드 컨버터가 연속모드로 동작시 영전압 스위칭이 깨지는 문제점을 탭-인덕터와 스너버 커패시터의 사용으로 Magnetizing Inductance를 감소시키지 않고 보다 작은 여자전류에서 영전압 스위칭을 가능하게 하였고, 또한 프리휠링 다이오드의 전압 스트레스를 일정한 전압으로 클램프 시켜 출력전압의 노이즈를 감소시켰다.

이 논문은 에너지관리공단 2003년 학술진흥사업(전원장치의 효율개선 및 고직접화 기술개발, 과제번호 2003-E-EL03-P-02-0-000-2003)의 지원에 의하여 연구되었습

#### 참 고 문 헌

- [1] G.C. Hua, W.A. Tabise, C.S. Leu, N. Dai, R. Watson, F.C. Lee: "Development of a DC Distributed Power System", Applied Power Electronics Conference '94, pp.763-769
- [2] Qiong Li, Fred C. Lee: "Design Consideration of the Active-Clamp Forward Converter with Current Mode Control during Large-Signal Transient", Applied Power Electronics Conference '2000, pp.966-972
- [3] S. Hamada, M. Michihira, M. Nakaoka, Using A Tapped Inductor for Reducing Conduction Losses in a Soft Switching PWM DC-DC converter, EPE, 1993, pp.130-134
- [4] E.S Kim, B.Y Byun, Y.H Kim, Y.G Hong, "A Three Level ZVZCS Phase-Shifted DC/DC Converter Using A Tapped Inductor And A Snubber Capacitor", APEC 2001, 3, pp.980-985