

# 고효율 및 소형 스위치모드 라인 트랜스포머

김진홍<sup>1</sup> 양정우<sup>1</sup> 장두희<sup>2</sup> 강정일<sup>2</sup> 한상규<sup>†</sup>  
 국민대학교POESLA<sup>1</sup>, 삼성전자<sup>2</sup>

## High Efficiency and Small Size Switch Mode Line Transformer(SMLT)

Jin Hong Kim<sup>1</sup>, Jung Woo Yang<sup>1</sup>, Du Hee Jang<sup>2</sup>, Jeong Il Kang<sup>2</sup>, Sang Kyo Han<sup>†</sup>  
 Kookmin University POESLA<sup>1</sup>, Samsung Electronics. Co. Ltd<sup>2</sup>

### ABSTRACT

본 논문은 고효율 및 소형 스위치모드 라인 트랜스포머를 제안한다. 종래의 절연을 위한 라인 트랜스포머와 역률개선 회로를 이용한 전원회로는 60Hz 저주파 트랜스포머의 사용으로 전원회로의 크기와 중량이 큰 단점이 있다. 본 논문에서 제안하는 스위치모드 라인 트랜스포머(SMLT)는 고주파수 구동이 가능한 LLC 공진형 컨버터의 트랜스포머로 절연 규격 및 부피 저감을 동시에 달성하였다. 또한 2차 측의 풀브리지 정류기를 이용하여 출력전압을 120Hz 사인파로 복원하여, 기존의 역률개선 회로 앞단에 제안 회로를 적용하여 역률개선이 가능하다. 제안방식의 타당성을 검증하기 위해 350W급 시작품에 대한 실험결과를 제시한다.

### 1. 서론

최근 전기기기의 전원을 공급하는 어댑터의 소형화에 대한 연구가 많이 진행되어왔다. 어댑터는 사용자의 안전을 위해 절연이 필요하며, 75W급 이상의 어댑터는 역률 및 고조파 규제를 만족하기 위한 회로가 추가적으로 필요하다. 이러한 규제를 만족하기 위해 기존에는 역률개선회로(PFC)와 DC/DC 컨버터로 이루어진 회로가 주로 사용되었다. 그러나 이는 2단 구조의 전력단으로 어댑터의 소형화에 한계가 존재했다. 또한 전기적 절연을 위해 60Hz 저주파 트랜스포머를 적용 후 PFC 컨버터단을 통해 역률개선을 할 경우 구조가 간단한 장점을 갖지만 60Hz 트랜스포머의 사용으로 사이즈 및 무게가 큰 단점이 존재했다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터를 이용한 스위치모드 라인 트랜스포머(SMLT)를 제안한다. 제안 SMLT는 입출력간 전기적 절연이 가능하고 영전압 스위칭(ZVS)동작으로 고효율을 달성할 수 있다. 또한 고주파수 구동을 통해 트랜스포머의 사이즈 및 무게를 기존 60Hz 트랜스포머 대비 저감할 수 있으며, 어댑터를 라인트랜스포머로 만들어 사이즈를 기존 PFC DC/DC 컨버터 대비 줄일 수 있다. 본 논문에서는 60Hz 저주파 트랜스포머를 대체하며, 어댑터를 라인트랜스포머로 구성하여 사이즈를 줄일 수 있는 SMLT를 제안한다.

### 2. 본론

#### 2.1 스위치모드 라인 트랜스포머

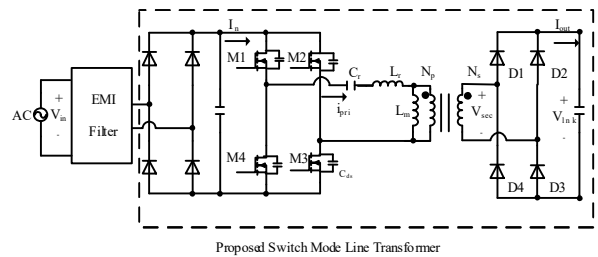


그림 1 제안 스위치모드 라인 트랜스포머(SMLT)  
 Fig. 1 A proposed Switch Mode Line Transformer(SMLT)

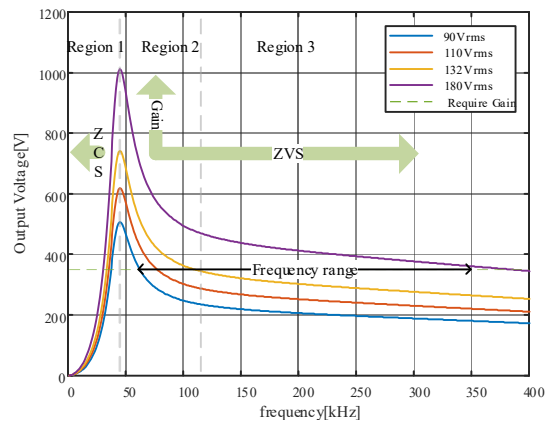


그림 2 입력전압에 따른 전압이득 곡선  
 Fig. 2 Voltage gain according to Input Voltage

그림 1은 제안 SMLT를 나타낸다. 제안 SMLT의 1차 측은 4개의 스위치(M1~M4)가 풀브리지 형태로 연결되어 있으며, 공진 캐패시터  $C_r$ , 공진 인덕터  $L_r$ , 자화인덕터  $L_m$  으로 구성되어 있으며, 2차 측은 4개의 다이오드(D1~D4)가 풀브리지 형태로 구성된다. 제안 SMLT는 LLC 공진형 컨버터로 이루어져 있으며, 넓은 입력전압에 대응 가능한 필요전압이득을 만족하기 어렵다. 이러한 한계를 극복하기 위해 입력전압에 따라 하프브리지, 풀브리지 방식으로 나누어 동작한다.<sup>[1]</sup>

#### 2.1.1 제안방식의 모드 구분

표 1은 입력전압에 따른 제안 SMLT의 동작모드를 나타낸다. 그림 2는 입력전압 및 스위칭 주파수에 따른 전압이득 곡선을 나타낸다. 일반적인 LLC 공진형 컨버터는 ZVS동작이 가

표 1 제안 SMLT 동작방식

Table 1 Operation of Proposed SMLT

$V_{in}$	Operation		Key waveform
	Topology	Control	
90 $V_{rms}$ ~ 132 $V_{rms}$	Full Bridge	PFM	
저전압 PFM 모드			
133 $V_{rms}$ ~ 179 $V_{rms}$	Full Bridge	PS	
저전압 PS 모드			
180 $V_{rms}$ ~ 264 $V_{rms}$	Half Bridge	PFM	
고전압 PFM 모드			

능하고, 주파수에 따른 전압 이득의 범위가 넓은 Region 2에서 동작하도록 공진탱크를 설계한다. 하지만 넓은 입력전압범위에 전압이득을 만족하기 위해서는 스위칭주파수의 과도한 상승이 불가피하다. 제안 SMLT는 이러한 일반적인 제어 방식의 LLC 공진형 컨버터가 갖는 한계점을 극복하기 위해 그림 2와 같이 각 입력전압에 따라 필요이득을 만족할 수 있도록 저전압 PFM(Pulse Frequency Modulation) 모드, 고전압 PFM 모드 및 저전압 PS(Phase Shift)모드로 나누어 동작한다. 저전압 PFM 모드는 입력전압 90V<sub>rms</sub>~132V<sub>rms</sub> 조건에서 풀브리지 동작을 수행하며, 출력전압 피크를 센싱 받아 주파수 제어를 통해 출력전압을 제어한다. 또한 저전압 PFM의 2배전압인 180V<sub>rms</sub>~264V<sub>rms</sub>에서는 M2는 상시 턴 오프, M3는 상시 턴 온 상태로 하프브리지 동작을 수행하며, 풀브리지와 동일하게 제어한다. 두 동작 범위 이외인 133V<sub>rms</sub>~179V<sub>rms</sub>전압에서는 저전압 PFM모드와 동일하게 풀브리지 동작하지만 Region 3에서 동작하므로 스위칭 주파수의 과도한 상승을 방지하기 위해 고정주파수 위상천이(PS) 방식으로 출력전압을 제어한다.[2]

### 2.1.2 공진탱크 설계

제안 SMLT의 Region 2 동작을 위해 최대전압인 264V<sub>rms</sub>를 공진주파수에서 동작하도록 하고, 풀브리지 기준 최소전압인

90V<sub>rms</sub>의 2배인 180V<sub>rms</sub>에서 최대전압이득이 나오도록 설계한다. 사양으로 주어진 입력전압 90V<sub>rms</sub>~264V<sub>rms</sub>, 출력 피크 전압 350V로 제안 SMLT의 설계 순서는 그림 3과 같다. 트랜스포머의 턴 비( $N=N_p/N_s$ )는 입력전압 264V<sub>rms</sub>일 때 피크전압 350V를 만족하기 위해 식(1)과 같이 트랜스포머의 턴 비를 산출할 수 있다.(하프 브리지 기준) 그 후 공진주파수 및 최소주파수를 설정한다. 이때 최소주파수에서 최대 전압이득이 나오는 특성임피던스(Z)를 구한다.[3]

$$N = \frac{V_{in}}{2V_{O_{peak}}} \quad (1)$$

$$Z = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (2)$$

$$K = \frac{L_m}{L_r} \quad (3)$$

$$L_m = \frac{T_s t_{dead}}{16C_{ds}} \quad (4)$$

수식 (2)는 특성 임피던스(Z)를 나타낸 것이며, Z값이 커지면 전압이득은 작아지고 최대 전압이득이 나오는 주파수는 높아진다. 수식 (3)은 자화인덕턴스와 공진 인덕턴스의 비율로, K값이 커지면 최대전압이득은 커진다. 수식 (4)는 ZVS를 만족시키는 최대 L<sub>m</sub> 값이며, 이는 스위치의 기생 캐패시턴스(C<sub>ds</sub>), 스위칭 주기, 및 데드타임(t<sub>dead</sub>)에 연관이 있다. 또한 LLC 공진형 컨버터의 도통 손실은 자화인덕턴스에 주요하게 영향을 받으며, ZVS를 보장하는 K값 설계가 중요하다.[4] 기존 LLC 공진형 컨버터의 경우 입력전압이 일정하지만, 제안 SMLT는 입력전압이 변하므로 입력전압에 따른 전압이득 곡선이 그림 2와 같이 나타난다. 그림 3의 설계 순서로 K값 및 Z값의 설정을 변경하며, 그림 2와 같이 입력전압 별 전압이득 곡선을 그리고 각 입력조건에서 필요이득을 만족하는지 확인한다. 이 과정을 반복하여 필요이득, 최소 및 공진주파수 조건에 부합한 C<sub>r</sub>, L<sub>r</sub>, L<sub>m</sub>의 값을 찾는다.

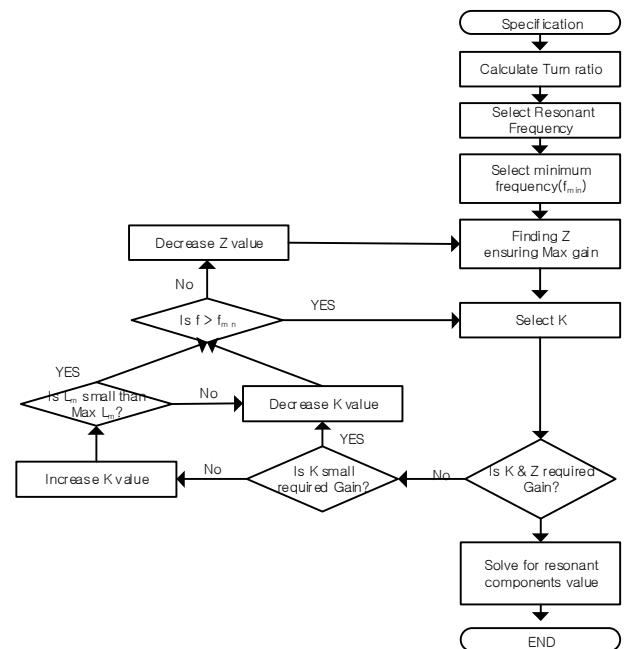


그림 3 공진탱크 설계 순서

Fig. 3 Design of Resonant Tank

### 3. 실험 결과

본 논문에서 제안한 SMLT의 타당성을 검증하기 위해 그림 6과 같이 350W급 시작품을 제작하여 실험을 진행했다. 제안 컨버터의 IC는 Microchip사의 dsPIC33FJ09GS302를 사용했고, 입력 사양은  $90V_{rms} \sim 264V_{rms}$ 이며, 출력전압 피크는 350V이다. 턴 비는 0.533,  $L_m$ 은 80 $\mu$ H,  $L_r$ 은 14 $\mu$ H,  $C_r$ 은 136nF이며, 최소 주파수는 60kHz, 공진주파수는 110kHz로 실험을 진행했다. 그림 4는 입력전압에 따른 입출력 전압전류의 정상상태파형 및 세부파형을 나타낸다. 그림 4(a)는 저전압 PFM모드로 설계 값인 61kHz로 동작하며, 폴브리지 동작을 확인할 수 있다. 그림 4(b)는 저전압 PS모드로 고전주파수 위상천이 되는 것을 확인할 수 있다. 그림 4(c)는 고전압 PFM모드로 하프브리지 동작을 확인할 수 있으며, 공진주파수로 동작함을 확인할 수 있다. 또한 모든 입력전압에서 동일한 출력이 나옴을 확인할 수 있다. 제안 SMLT의 효율은 그림 5와 같이 부하 350W일 때 입력 110V<sub>rms</sub>에서 최대 92.9%, 입력 220V<sub>rms</sub>에서 최대 94%를 보이고 있다.

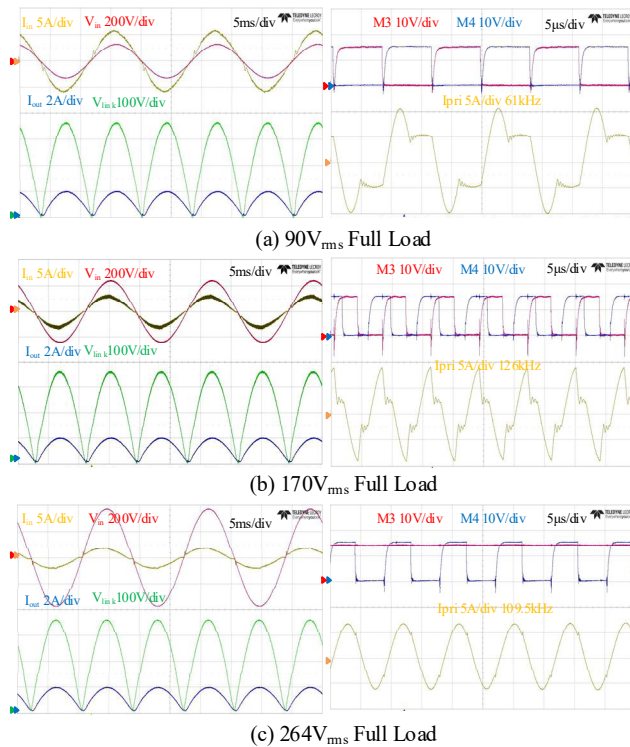


그림 4 입력전압 별 실험파형  
Fig. 4 Experimental Wave Form by Input Voltage

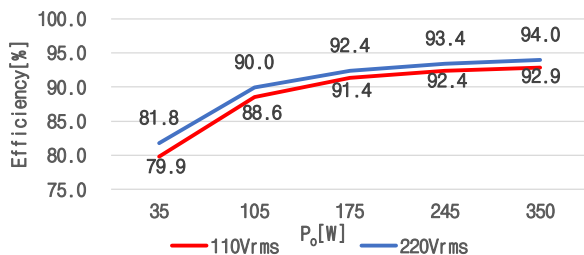


그림 5 부하별 효율  
Fig. 5 Efficiency by Load condition

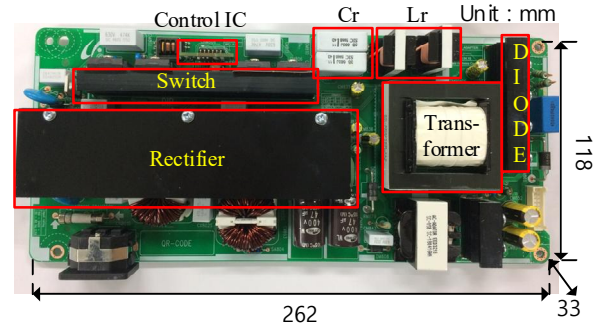


그림 6 350W급 시작품  
Fig. 6 350W Prototype

### 4. 결론

본 논문에서 제안한 스위치모드 라인 트랜스포머는 고주파수 구동으로 트랜스포머의 사이즈 및 무게가 기존 60Hz 저주파 트랜스포머에 비해 감소했으며, 기존 2단 구조인 PFC DC/DC 컨버터를 라인트랜스포머로 구성하여 어댑터의 사이즈를 감소할 수 있었다. 또한 모든 입력전압( $90V_{rms} \sim 264V_{rms}$ )에 전압이득을 만족하기 위하여 저전압 PFM 모드, 저전압 PS 모드, 고전압 PFM 모드로 나누어 동작했다. 350W급 시작품 테스트 결과를 제시하여 제안 SMLT의 타당성을 검증했다. 따라서 본 논문에서 제시한 SMLT는 기존 60Hz 저주파 트랜스포머를 대체하며, 어댑터의 사이즈를 줄일 수 있음을 확인했다.

이 논문은 (주)삼성전자의 연구비 지원에 의하여 수행되었음

### 참고 문헌

- [1] M. M. Jovanovic, B. T. Irving, "On the fly topology Morphing control efficiency optimization method for LLC resonant converters operating in wide input and/or output voltage range," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, No. 3, pp. 2596-2608, Mar. 2016
- [2] H. Wu, X. Zhan, Y. Xing, "Interleaved LLC resonant converter with hybrid rectifier and variable frequency plus phase shift control for wide output voltage range applications," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 32, No. 6, pp. 4246-4257, 2017.
- [3] S. Abdel Rahman(2012, Sep.), Resonant LLC Converter : Operation and Design, Infineon Technologies application note [Online]. Available: www.infineon.com
- [4] B. Lu, et al, "Optimal design methodology for LLC resonant converter," Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC'06. Twenty First Annual IEEE, 2006.