

단일 전력단 고주파 공진 인버터 링크형 DC-DC 컨버터의 특성평가

원 재선¹, 김 해준², 박 재욱³, 남 승식⁴, 서 철식⁵, 김 동희⁶,
 영남대학교¹, 경일대학교², 구미1대학³

Characteristic Estimation of Single-Stage High Frequency Resonant Inverter Link Type DC-DC Converter

Jae-Sun Won¹, Hae-Jun Kim², Jae-Wook Park³, Seung-Sik Nam⁴, Cheol-Sik Seo⁵, Dong-Hee Kim⁶
 Yeungnam Univ.¹, Kyungil Univ.², Gumi 1 College³

Abstract - This paper presents a novel single-stage high frequency resonant inverter link type DC-DC converter using zero voltage switching with high input power factor. The proposed high frequency resonant converter integrates half-bridge boost rectifier as power factor corrector (PFC) and half-bridge resonant converter into a single stage. The input stage of the half-bridge boost rectifier is working in discontinuous conduction mode(DCM) with constant duty cycle and variable switching frequency. So that boost converter make the line current follow naturally the sinusoidal line voltage waveform. Experimental results have demonstrated the feasibility of the proposed DC-DC converter. This proposed converter will be able to be practically used as a power supply in various fields as induction heating applications, DC-DC converter etc.

1. 서 론

최근, 적은 구동전력으로 고속 스위칭이 가능한 IGBTs, Power-MOSFETs 및 SITs 등의 자기소호능력을 가진 전력용 스위칭 반도체 소자의 제조와 집적화 기술의 발달로 저전력·고주파 유도가열용 전원, 정보통신용 전원장치 등의 소형·경량화를 요구하는 전력변환 시스템에 관한 연구가 활발히 행해지고 있다. 공진형 전력변환회로에 ZVS, ZCS, E급 스위칭 등의 소프트 스위칭 기법의 도입은 스위칭 주파수에 비례하여 발생하는 스위칭 손실을 감소시킬 뿐만 아니라 회로의 출력 주파수의 고주파파를 통해서 장치전체의 고효율화, 소형·경량화 등의 여러가지 장점을 가지게 한다^[1-2]. 전력변환장치에 링크전압을 제공하기 위해서는 대부분이 커패시터 입력형의 정류회로를 사용하며 이러한 정류회로의 사용은 상용전원의 피크치 부근의 짧은 기간동안만 정류기가 도통하여 폭이 좁은 펄스성 전류가 발생하게 하는 낮은 입력역률과 심각한 고주파 왜곡을 발생하게 하는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 일반적으로 역률보상(PFC)회로를 전력변환회로의 입력단에 삽입시켜 역률보상을 하고 있다. 그러나, 이러한 2개의 전력처리단으로 구성된 전력변환장치는 넓은 입력전압 범위 내에서 고역률을 유지할 수 있는 반면에 비용이 증가하고 신뢰성이 감소하며, 또한 시스템 구성이 복잡하게 되고, 시스템 효율이 낮아지게 되는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근에는 단일전력단을 갖는 전력변환장치에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[3-5]

본 논문에서는 단일 전력처리단을 기초로 하여 불연속 전류모드(DCM)에서 동작하는 역률 보상용 부스트 컨버터와 하프 브리지형 고주파 공진 컨버터를 일체화시켜 단일회로 내에서 전력처리 기능을 갖도록 한 새로운 고역률 고주파 공진 DC-DC 인버터 회로를 제안하고 그 기본 동작원리 및 특성에 관하여 검토하였다. 연구대상 회로의 스위칭 소자로 Power-MOSFET를 사용해 실험을 통해 이론해석의 정당성을 검토하였다.

2. 단일 전력단 고주파 공진 DC-DC 컨버터
 2.1 회로구성

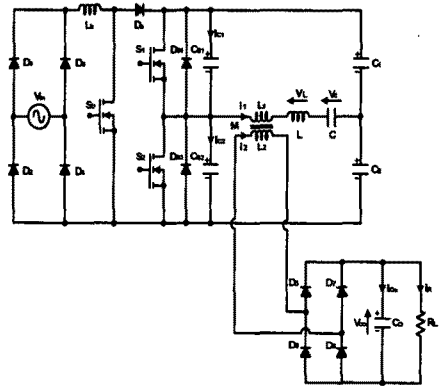


그림 1. 2개의 전력처리단으로 구성된 DC-DC 컨버터

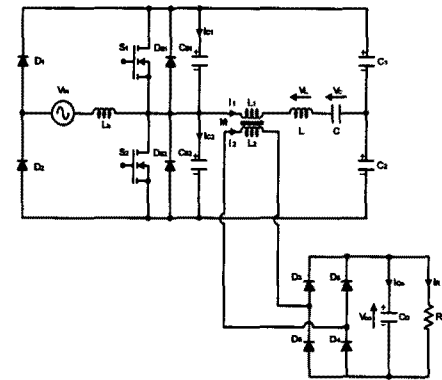


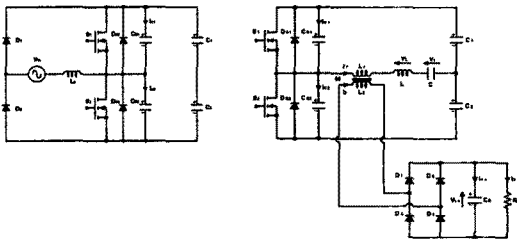
그림 2. 단일 전력단 고주파 공진 DC-DC 컨버터

그림 1은 종래에 사용되어 온 2개단으로 전력처리를 하는 고주파 공진 컨버터를 보여주고 있다. 그림 2는 그림 1의 회로에서 2개의 전력처리단으로 구성된 고주파 공진 컨버터의 각 단을 일체화시켜 회로내부에 역률개선 기능을 부여함과 동시에 한 단계만으로 전력처리를 하는 고주파 공진 컨버터의 토폴로지를 보여주고 있다. 제안된 컨버터 토폴로지는 AC/DC 변환을 브리지 정류회로의 한 래그(leg)를 사용하지 않는 대신에 스위치(S1, S2)로 대용하여 교류입력을 정류하는 다이오드의 역할과 고주파 공진 컨버터의 스위치 기능을 동시에 가지게 하였다. 따라서 종래에 사용하여 온 회로에서 스위칭 개수를 감소시킬 수 있어 회로구성을 간략화 하였고, 스위칭 소자가 감소하였으므로 도통손실을 줄일 수 있어 높은 변환효율뿐만 아니라 부스트 컨버터를 불연속모드(DCM)로 동작시킴으로써 역률도 개선할 수 있다. 또한, 커패시

터 분할형 하프 브리지 고주파 공진 컨버터의 스위칭 양단(S₁, S₂)에 병렬로 ZVS 커패시터(C_{S1}, C_{S2})를 첨가하여 스위칭 시 소자에 발생하는 턴·오프 손실을 줄일 수 있는 회로구성으로 되어있다.

2.2 회로 해석

제안된 회로는 그림 3 (a),(b)와 같이 부스트 컨버터와 커패시터 분할형 하프 브리지 고주파 공진 컨버터의 독립적인 두 개의 동작회로로 나누어 생각할 수 있고 회로의 스위칭 동작모드는 부스트 컨버터가 불연속 모드(DCM)로 동작할 때 교류전원전압의 반 사이클에 대해서 스위칭(S₁, S₂) 및 다이오드(D₁~D₆, D_{S1}, D_{S2})의 온·오프 상태 그리고 ZVS 커패시터(C_{S1}, C_{S2})의 충·방전에 의해서 7개의 모드로 분류된다. 그림 4는 각 모드의 회로동작에 따른 각각의 스위칭 동작모드(a~g)에 대하여 스위칭 소자(S₁, S₂)에 인가되는 구동신호패턴과 이에 따른 각 소자에 나타나는 정상적인 전압 및 전류 파형을 나타내고 있다.



(a) 부스트 컨버터 (b) 하프 브리지 컨버터
그림 3. 제안된 회로의 동작회로

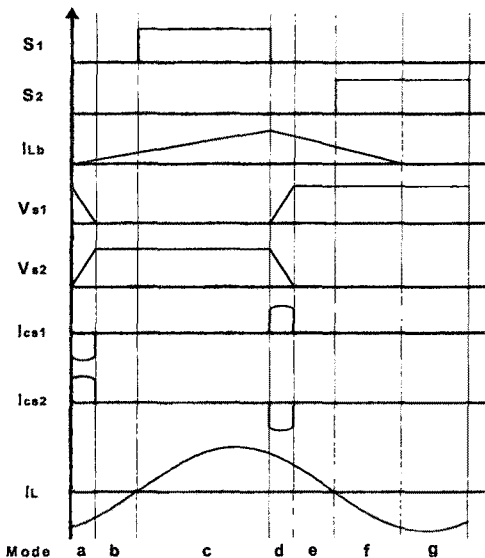


그림 4. 구동신호와 각 부의 정상적인 이론파형

2.2.1 DCM 하프 브리지 부스트 컨버터

그림 3(a)의 정현파 입력전압을 $V_{in}(wt) = V_m \sin(wt)$ 라고 가정하면, 스위칭 기간동안에 부스트 인덕터(L_b)에 흐르는 피크전류($i_{L_{bmax}}$)는 다음과 같다.

$$i_{L_{bmax}} = \frac{V_m \cdot \sin(wt)}{f_s \cdot L_b} D \quad (1)$$

입력전류의 평균값은 다음과 같이 다음과 같이 주어진다.

$$i_{L_{bmax}} = \frac{D^2 \cdot V_o}{2 \cdot L_b \cdot f_s} \left(\frac{\alpha \cdot \sin(wt)}{1 - \alpha \cdot \sin(wt)} \right) \quad (2)$$

여기서, $\alpha = V_m/V_o$.

한 주기동안에 입력전력의 평균치는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{in} = \frac{D^2 \cdot V_m^2}{2 \cdot \pi \cdot L_b \cdot f_s} \cdot y \quad (3)$$

$$\text{여기서, } y = -\frac{2}{\alpha} - \frac{\pi}{\alpha^2} + \frac{2}{\alpha^2 \sqrt{1-\alpha^2}} \left[\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{1-\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} \right) \right]$$

불연속 모드(DCM)로 동작시킴으로써 높은 역률을 얻을 수 있고 듀티비는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$D_{max} \leq (1 - \alpha) \quad (4)$$

부스트 컨버터가 가변 스위칭 주파수와 일정 듀티비(D=0.47)로 동작한다고 한다면, 식 (4)는 다음과 같이 표현된다.

$$V_o \geq 1.89 V_m \quad (5)$$

역률은 α 의 함수로써 다음과 같이 표현된다.

$$PF = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{y}{z} \quad (6)$$

여기서,

$$z = \frac{2}{\alpha \cdot (1-\alpha^2)} + \frac{\pi}{\alpha^2} + \left(\frac{2\alpha^2-1}{\alpha^2(1-\alpha^2)} \right) \cdot \frac{2}{\sqrt{1-\alpha^2}} \left(\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{1-\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}} \right) \right)$$

또한, 고주파 함유율(THD)은 식 (7)와 같이 표현된다.

$$THD = \frac{1}{PF} \cdot \sqrt{1 - PF^2} \quad (7)$$

그림 5는 α 와 P_{in} 의 변화에 따른 부스트 인덕터의 인덕턴스(L_b)의 크기의 변화를 도식적으로 나타내고 있다.

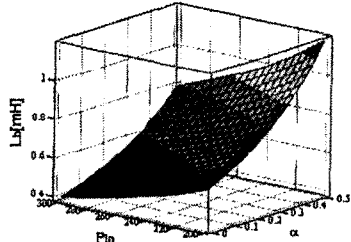


그림 5. α 와 P_{in} 의 변화에 따른 L_b 의 변화

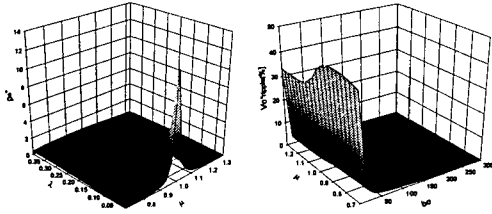
2.2.2 하프 브리지 고주파 공진 컨버터

그림 2의 커패시터 분할형 하프 브리지 고주파 공진 컨버터의 각 모드의 상태방정식은 회로해석의 범용성을 부여하기 위해 표 1에 나타낸 무차원화 파라미터를 도입하여 각 특성값을 산출하였다.

표 1 무차원화 파라미터

	Reference values	Normalized values
Voltage	$E_s = E_d$	$v'(z) = v_c(t)/E_s$
Current	$I_s = E_d/Z_s$	$i'(z) = i(t)/I_s$
Power	$P_s = E_s \cdot I_s$	$P'(z) = P(t)/P_s$
Impedance	$Z_s = 2\sqrt{L_s/C_s}$	$\lambda = R/Z_s$
Inductance	$L_s = L$	$a_0 = L_0/L_s$
Capacitance	$C_s = C$	$b_0 = C_0/C$ $b_3 = C/C_3, b_4 = C/C_4$
Frequency	$f_r = 1/2\pi\sqrt{L_s C_s}$	$\mu = f_{sw}/f_r$
Time	$T_s = 1/f_{sw}$	$z = t/T_s$ $dz = dt/T_s$
Remark)	f_{sw} : Operating frequency of converter f_r : Resonant frequency of convert T_s : Operating period of converter	

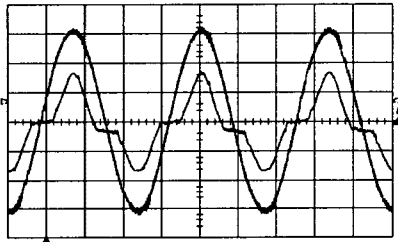
그림 6(a)는 $\lambda=0.2$, $b_3=b_4=30$ 로 고정하고, 무차원화 주파수제어변수(μ)와 b_0 를 파라미터로 하였을 경우 출력전압의 리플특성을 보여주고 있고 그림 6(b)는 $b_0=100$, $b_3=b_4=30$ 로 고정하고, 무차원화 주파수제어변수(μ)와 무차원화 부하제어변수(λ)를 파라미터로 하였을 경우 평균출력전력특성(P_o)을 나타내고 있다.



(a) 평균출력전력 (b) 출력전압의 리플
그림 6. 평균출력전력과 출력전압의 리플 특성

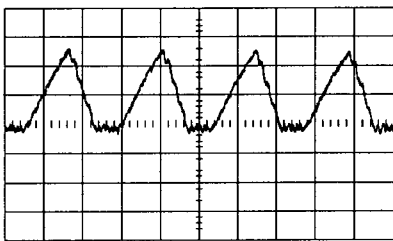
3. 실험 및 고찰

그림 7(a)~(c)은 이론해석의 정당성을 입증하기 위하여 실험을 통한 입력전압과 전류, 확대된 부스트 인덕터 전류 그리고 출력전압의 실측파형을 보여주고 있다. 그림 7(a)(b)에서 알 수 있듯이, 역률 보상용 부스트 컨버터를 불연속 전류모드(DCM)로 동작시킴으로써 부가적인 입력 전류제어기 없이 고역률이 이루어짐을 알 수 있다. 실험에 사용한 정수는 표 2와 같다.



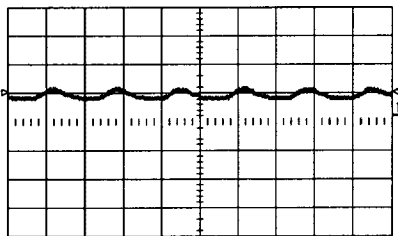
Voltage : 50[V]/div, Time : 5[ms]/div
Current : 1.5[A]/div, Time : 5[ms]/div

(a) 입력전압과 전류



Current : 1.0[A]/div, Time : 10[μs]/div

(b) 확대된 부스트 인덕터 전류



Voltage : 25[V]/div, Time : 5[ms]/div

(c) 출력 전압

그림 7. 실험 파형

표 2. 실험 정수

Circuit Parameter	Rating	Circuit Parameter	Rating
Input Voltage (V_{in})	110[V]	DC Link Capacitor (C_1, C_2)	22[μ F]
Switching Device	IRF740	ZVS Capacitor (C_{s1}, C_{s2})	187[pF]
Input Reactor (L_b)	1.0[mH]	Filter Capacitor (C_o)	2200[μ F]
Resonant Reactor(L)	2.6[mH]	Load Resistor	15[Ω]
Resonant Capacitor(C)	5.6[nF]	Resonant Frequency(f_r)	42[kHz]

4. 결론

본 논문은 단일 전력처리단을 기초로 하여 불연속 전류모드(DCM)에서 동작하는 역률 보상용 부스트 컨버터와 하프 브리지형 고주파 공진 컨버터를 일체화시켜 단일 회로 내에서 전력처리 기능을 갖도록 한 새로운 고역률 단일 전력단 고주파 공진 인버터 링크형 DC-DC 컨버터 회로를 연구대상으로 하고 그 기본 동작원리 및 제특성에 관하여 검토하였다. 제안된 회로의 해석은 부스트 컨버터부와 커패시터 분할형 하프 브리지 고주파 공진 컨버터의 독립적인 두 개의 등가회로로 나누어 행하였으며 이론해석의 정당성을 입증하기 위하여 제안회로의 스위칭 소자로 Power-MOSFET를 사용해 실험을 행한 결과 고주파 전원장치로서의 가능성도 확인하였다. 향후, 본 회로는 Wax-Sealing용 전원장치, 방전등용 전원장치, DC-DC 컨버터 등의 소형·경량화가 요구되는 전원시스템에 응용이 기대된다.

(참 고 문 헌)

- [1] M. K. Kazimierzuk, et al, "Class-D Zero-Voltage-Switching Inverter with only One Shunt Capacitor," IEEE Proc., Vol. 139, No. 5, pp.449~456, Sep. 1992.
- [2] Y. S. Kwan, S. B. Yoo and D. S. Hyun, "Half-Bridge Series Resonant Inverter for Induction Heating Applications with Load Adaptive PFM Control Strategy," IEEE APEC Conf. Rec., pp.575-581, 1999.
- [3] K.-H. Liu, and Y. -L. Lin, "Current waveform distortion in power factor correction circuits employing discontinuous-mode boost converter", in IEEE PESC'89, pp. 825-829, 1989.
- [4] 박재욱, 서철식, 노채균, 김동희, 이경호, 서진우, "고역률 단 일 전력단을 갖는 형광등용 전자식 안정기에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1129~1131, 2001.
- [5] Hengchun Mao, Fred C. Lee, Yimin Jiang, and Dusan Borjovic, "Review of Power Factor Correction Technique," IPESC'99 Conf. Rec., pp.9'19, 1999.
- [6] 김동희, 원재선, "Wax-Sealing용 전류형 고주파 공진 인버터의 특성해석에 관한 연구", 전기학회논문지, Vol. 50B, No. 11, pp. 568~574, NOV, 2001.
- [7] J. S. Won, D. H. Kim, D. Y. Jung, B. S. Lee, J. H. Kim, "Characteristic analysis of ZVS-HB type high frequency resonant inverter according to the variable capacitance of the DC voltage source separation capacitor", EPE2001, Proceedings, DS23-7, August 27th, 2001.