

## ZVS-LCC형 고주파 공진 인버터의 특성해석

원 재선\*, 김 종해\*, 서 철식\* · 배 영호\*\*, 김 동희\*, 노 채균\*

\* : 영남대학교 전기전자공학부, \*\* : 경일대학교 전기공학과

### Characteristic analysis of ZVS-LCC type high frequency resonant inverter

Jae-Sun Won\*, Jong-Hae Kim\*, Cheol-Sik Seo\*, Young-Ho Bae\*\*,  
Dong-Hee Kim\*, Chae-Gyun Ro\*  
Yeungnam University\*, Kyungil University\*\*

#### Abstract

This paper has described about principle and form of proposed circuit made use of soft switching technology ZVS(Zero-Voltage-Switching) to reduce turn on and off loss at switching. Also, the analysis of the proposed circuit was described by using normalized parameter and operating characteristics has been evaluated as to switching frequency and parameters. Based on the characteristics value, a method of the circuit design is proposed. The theoretical results are in good agreement with the experimental ones. The proposed circuit is considered to be useful for induction heating and discharge lamp.

#### 1. 서 론

최근, 고내압, 고출력 및 고속동작으로 각광받고 있는 Power-MOSFET, IGBT, SIT 등을 이용한 전력 변환 기술이 연구·개발되고 있다.

전력용 스위칭 반도체소자를 고속 스위칭 함에 따른 문제점으로는 스위칭 손실의 증가를 들 수 있다.

기존의 하드 스위칭 방식에서는, 스위칭 시마다 특정전압에서 특정전류를 턴-온 또는 턴-오프 시키기 때문에, 다이오드의 역회복 시간과 턴-온 구간에서의 링킹 그리고 턴-오프 구간에서의 꼬리전류로 인해, 스위칭 시 스위칭 손실을 발생하게 되고, 이것은 스위칭 주파수에 비례하여 증가하므로 고주파화를 실현 하는데 있어서 상당한 장애요인이 된다.

출력주파수의 고주파화에 따른 스위치에 발생하는  $dv/dt$ ,  $di/dt$ 의 스트레스 경감과 스위칭 손실의 최소화를 위해 ZVS, ZCS 및 E급 스위칭 등의 스위칭 기법을 적극 도입한 전력변환회로에 관한 연구가 널리 행해지고 있다.

따라서, 본 연구에서는 상기와 같은 기술적 배경을

기초로 하여 종래부터 널리 사용되어 온 HB형 고주파 인버터의 전원 분할용 커패시터를 공진용 커패시터로 사용하여, ZVS기법을 도입한 부하공진방식의 고주파 인버터에 관한 특성 등에 관해 기술하고 있다.

또한, Power-MOSFET를 연구대상회로의 스위칭 소자로 적용해 실험을 통해 이론해석과 특성평가 등의 정당성을 입증하고 있다.

#### 2. ZVS-LCC형 고주파 공진 인버터

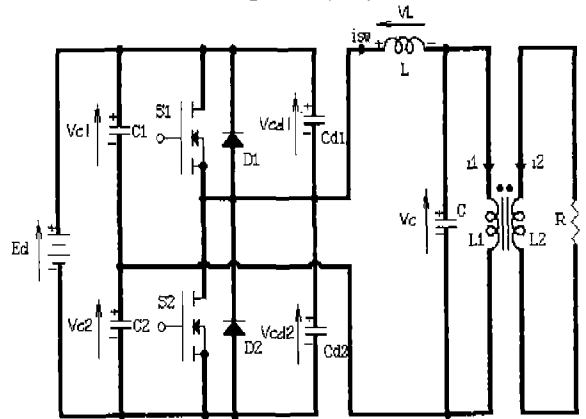


그림 1. ZVS-LCC형 고주파 인버터

그림 1은 HB형 고주파 공진 인버터의 전원 분할용 커패시터( $C_1$ ,  $C_2$ )를 공진용 커패시터로 사용하고 스위치 양단( $S_1$ ,  $S_2$ )에 병렬 커패시터( $C_{d1}$ ,  $C_{d2}$ )를 첨가하여 스위칭 손실을 최소화 시킬수 있는 ZVS-LCC형 인버터 회로구성을 나타내고 있다.

스위칭 소자( $S_1$ ,  $S_2$ )는 자기소호 기능을 갖는 소자라면 어떤 것이나 사용이 가능하며, 역병렬 다이오드( $D_1$ ,  $D_2$ )는 회로안전 특성상 나타나는 무효전류를 흘려주기 위한 통로로 사용되고 있다.

부하로는 형광등과 같은 방전등을 상정하고 있으며, 회로의 특징으로는 회로구성이 간단하며, 전원분할용 커패시터의 크기가 작아 소형 경량화 및 저코스트화가 가능하다.

### 3. 회로 해석

그림 1의 회로의 동작모드는 (S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>)와 (D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>)의 온·오프 동작과 (C<sub>d1</sub>, C<sub>d2</sub>)의 충·방전에 의해서 표 1과 같이 분류할 수 있다.

표 1. 동작 모드

MODE	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	Total Mode
1					방전	충전	Mode A
2			ON				Mode B
3	ON						Mode B
4					충전	방전	Mode C
5				ON			Mode D
6		ON					Mode D

$$\text{Mode A : } J_1 = \frac{4\pi}{\mu}, J_2 = 0, J_3 = 0, J_4 = \frac{4\pi}{\mu}, J_5 = -\frac{4\pi}{\mu}$$

$$\text{Mode B : } J_6 = 0, J_7 = -\frac{4\pi}{\mu}, J_8 = 0, J_9 = 0, J_{10} = \frac{4\pi}{\mu}$$

$$\text{Mode C : } J_1 = 0, J_2 = -\frac{4\pi}{\mu}, J_3 = -\frac{4\pi}{\mu}, J_4 = 0, J_5 = \frac{4\pi}{\mu}$$

$$\text{Mode D : } J_6 = \frac{4\pi}{\mu}, J_7 = 0, J_8 = 0, J_9 = 0, J_{10} = -\frac{4\pi}{\mu}$$

그림 1의 회로는 전원에서 본 부하상태가 유도성일 때만 동작이 가능하고 용량성 일때는 동작이 불가능하다. 만약, 그림 1의 회로가 용량성 동작을 할 경우, 다이오드의 역회복 시간에 따른 역회복 전류와 (C<sub>d1</sub>, C<sub>d2</sub>)의 충·방전 전하가 스위치의 턴-온·오프 과도 상태에서 전원단락 현상을 일으키므로, 정상운전 시의 전류보다 수십배에 달하는 스파크성 전류가 흘러 스위칭 소자를 파괴한다.

Mode A, C

$$A^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{4\pi}{\mu} & J_1 & J_2 & J_3 & J_4 \\ 0 & 0 & -\frac{4\pi\lambda d}{\mu} & -\frac{4\pi b d}{\mu c} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{4\pi\lambda a d}{\mu c} & \frac{4\pi d}{\mu} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \left(\frac{\alpha}{\alpha+1}\right)\frac{\pi}{\mu} & -\left(\frac{\alpha}{\alpha+1}\right)\frac{\pi}{\mu} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\left(\frac{1}{\alpha+1}\right)\frac{\pi}{2\mu} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \left(\frac{1}{\alpha+1}\right)\frac{\pi}{2\mu} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \left(\frac{\alpha}{\alpha+1}\right)\frac{\pi\beta}{2\mu} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\left(\frac{\alpha}{\alpha+1}\right)\frac{\pi\beta}{2\mu} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B^* = [J_5 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$C^* = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

표 2. 무차원화 파라메타

	Reference Values	Normalized Values
Voltage	$E_d$	$V^*(z) = V_c(t)/E_d$
Current	$I_b = E_d/Z_b$	$i^*(z) = i(t)/I_b$
Time	$T_{sw} = 1/f_{sw}$	$z = t/T_{sw}$
Frequency	$f_r = 1/2\pi\sqrt{L_b C_b}$	$\mu = f_{sw}/f_r$
Impedance	$Z_b = 2\sqrt{L_b/C_b}$	$\lambda = R/Z_b$
Power	$P_b = E_d \cdot I_b$	$P^*(z) = P(t)/P_b$
Remarks	$f_{sw}$ : Operating Frequency of Inverter $T_o$ : Operating Period of Inverter $L_b = L, C_s = C_1 = C_2, C_d = C_{cd1} = C_{cd2}$ $C_b = \frac{C \cdot C_s}{C_s + C_s}, \alpha = \frac{C_s}{C}, \beta = \frac{C}{C_d}$ $a = \frac{L_1}{L_b}, b = \frac{L_2}{L_b}, c = k\sqrt{ab}, d = \frac{c}{c^2 - ab}$	

또, 회로해석의 범용성을 부여하기 위하여 각 모드에 따른 회로 상태방정식은 표 2에 나타난 무차원화 제어변수를 도입하여 표현하였다.

무차원화 파라메터를 도입한 무차원화 상태방정식은 다음과 같다.

$$\frac{dX^*}{dz} = A^* \cdot X^* + B^* \cdot U^*$$

$$Y^* = C^* \cdot X^*$$

여기서,  $X^* = [i_{sw}^* \ i_1^* \ i_2^* \ v_c^* \ v_{d1}^* \ v_{d2}^* \ v_{cs1}^* \ v_{cs2}^*]^T$

$U^* = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$  이고 각 모드별  $A^*, B^*, C^*$  는 다음과 같다.

Mode B, D

$$A^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{4\pi}{\mu} & J_6 & J_7 & J_8 & J_9 \\ 0 & 0 & -\frac{4\pi\lambda d}{\mu} & -\frac{4\pi b d}{\mu c} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{4\pi\lambda a d}{\mu c} & \frac{4\pi d}{\mu} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (\frac{\alpha}{\alpha+1})\frac{\pi}{\mu} & -(\frac{\alpha}{\alpha+1})\frac{\pi}{\mu} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -(\frac{1}{\alpha+1})\frac{\pi}{2\mu} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (\frac{1}{\alpha+1})\frac{\pi}{2\mu} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B^* = [J_{10} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$C^* = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

그림 2(a)(b)는  $\mu = 1.118, \lambda = 7, \alpha = 1, \beta = 50$ 로 하였을 경우, 인버터 각 부분의 정상운전시 이론파형을 보여주고 있다

그림 4(a)에서 알 수 있듯이  $\lambda$ 가 증가함에 따라 출력도 점점 증가한다는 것을 알 수 있는데, 이는 전원에서 부하측을 보았을 때 부하 임피던스는 계동계수가 작은 R-L-C 직렬형으로 보이기 때문에 스위치에 흐르는 전류가 증가하여 커패시터 양단의 전압이 상승하여 출력은 증가하기 때문이다. 그림 4(b)의 특성도로부터,  $\alpha$ 비가 감소함에 따라 출력이 증가하고 최대공진점도 상당히 변화하고 있다는 것을 알 수 있는데, 이는  $\alpha$ 가 작아짐에 따라 부하 임피던스가 감소하여 스위치에 흐르는 공진전류가 증가하였기 때문이며, 또한  $\alpha$ 가 작아짐에 따라 공진주파수가 증가하여 ZVS동작 범위가 넓어질 뿐만 아니라 인버터의 안정동작 영역이 넓어짐을 알 수 있다.

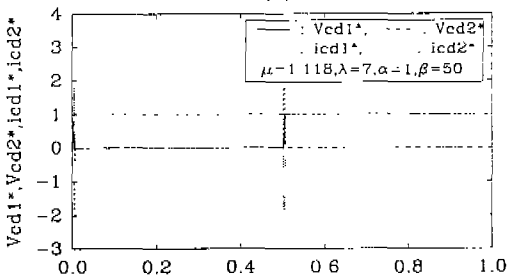
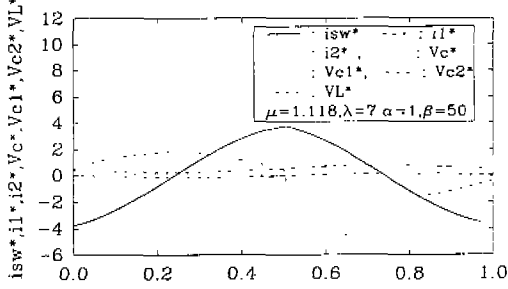


그림 2. 이론 파형

4. 특성 평가 및 실험

그림 3은  $\alpha, \lambda$  및  $\mu$ 를 파라미터로 하였을 경우, 안정운전 동작영역을 나타내고 있다. 3차원 표면상 이하의 값에서 정상동작이 이루어지지 않는 영역을 나타내고, 표면상 이상의 값을 갖는 부분에서는 인버터의 정상동작 영역을 나타낸다.

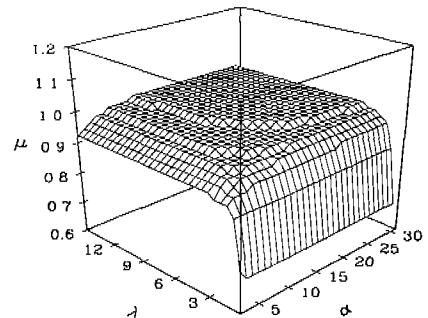
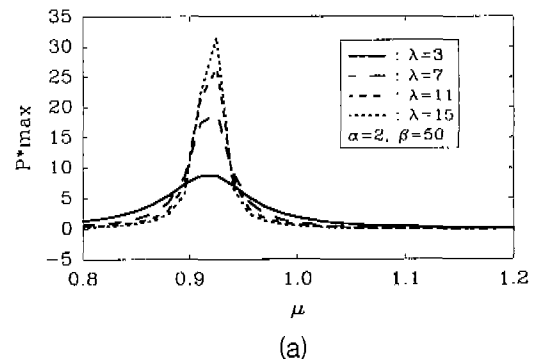
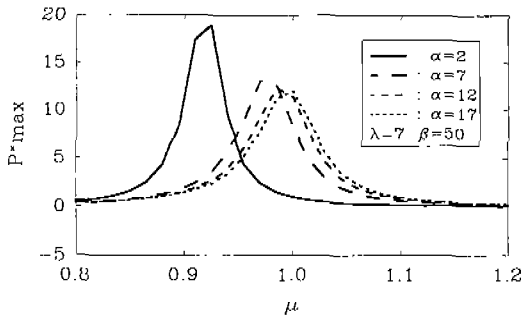


그림 3. 인버터의 안전동작 영역

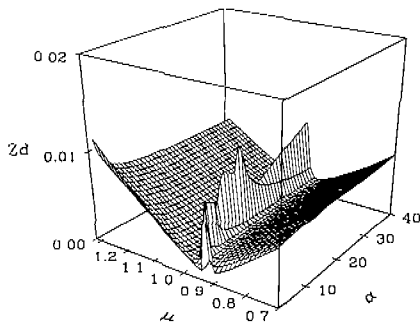
그림 4(a)는  $\alpha = 2, \beta = 50$ 로 하였을 경우,  $\mu$ 와  $\lambda$ 에 따른  $P^*_{max}$  특성을, (b)는  $\lambda = 7, \beta = 50$ 로 하였을 경우,  $\mu$ 와  $\alpha$ 에 따른  $P^*_{max}$  특성을 나타내고 있다.



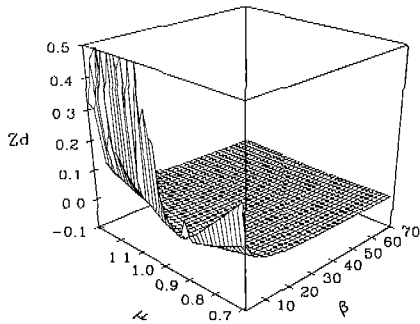


(b)

그림 4. 출력 전력 특성



(a)

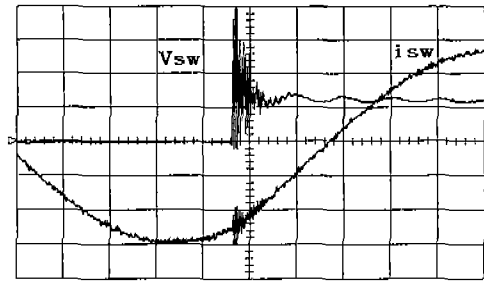


(b)

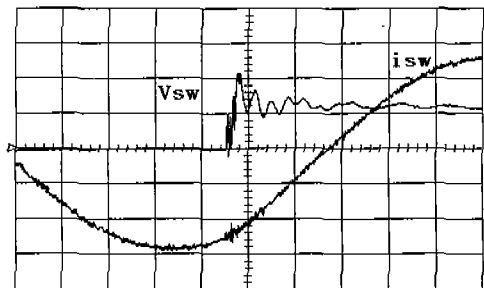
그림 5. Zd특성

그림 5(a)는  $\lambda=7$ ,  $\beta=50$ 으로 고정하고,  $\alpha$ 와  $\mu$ 를 파라미터로 하였을 경우, (b)는  $\lambda=7$ ,  $\alpha=1$ 로 고정하고,  $\beta$ 와  $\mu$ 를 파라미터로 하였을 경우, ZVS용 커패시터의 충·방전시간( $Z_d$ )특성을 나타내고 있다.

그림 5(a)에서  $\alpha$ 가 커짐에 따라  $Z_d$ 의 특성치도 감소한다는 것을 알 수가 있는데, 이는  $\alpha$ 가 커짐에 따라 스위치에 흐르는 공진전류가 줄어들다가  $\alpha$ 가 30 이상이 되었을때는 거의 일정한 값으로 나타나기 때문이다. 그림 5(b)에서는  $\beta$ 가 커질수록  $Z_d$ 의 값이 감소한다는 것을 알 수가 있는데, 이는  $\beta$ 가 커짐에 따라 ZVS용 무손실 커패시터가 작아져 충·방전하여야 할 시간이 짧아졌기 때문이다. 그림 6은  $\alpha$ 를 2로 하고 출력주파수가 36[kHz]인 경우, 스위칭소자의 양단전압( $V_{sw}$ ) 및 스위치의 전류( $I_{sw}$ )의 실험파형을 나타내고 있다. ZVS동작을 시켜본 결과 스위치 양단에 발생하는  $dv/dt$  및  $di/dt$ 가 상당히 감소하였다는 것을 확인할 수 있었다.



(a) Without ZVS capacitor

(b) ZVS capacitor (0.04[ $\mu$ F])

(Voltage: 50V/div, Current: 2A/div, Time: 1.8  $\mu$ S/div)

그림 6. 스위치 양단전압( $V_{sw}$ )과 스위칭 전류( $I_{sw}$ )

## 5. 결 론

본 연구는 HB형 고주파 인버터의 전원 분할용 커패시터를 공진용 커패시터로 사용하여 출력주파수의 고주파화에 따른 스위칭 손실을 저감시킬수 있는 ZVS-LCC형 고주파 공진 인버터를 연구 대상으로 하여 회로동작과 특성을 이론적으로 검토하였다.

직·병렬 커패시터 비( $\alpha$ )의 변화에 따라 출력도 증가하고 최대공진점도 상당히 변화하고 있다는 것을 알 수 있었고, 또한  $\alpha$ 가 작아짐에 따라 공진 주파수가 증가하여 ZVS동작 범위가 넓어질뿐만아니라 인버터의 안전 동작 영역이 넓어짐을 알 수 있었다.

더욱이 스위칭 소자로 Power-MOSFET를 사용하여 실험을 행한 결과, 이론해석의 정당성을 확인하였다.

본 연구는 99년도 영남대학교 정보통신 특성화 사업단의 조성비에 의하여 연구되었음.

## [참고문헌]

- [1] A. Takeuchi et. al: "Zero-Voltage-Switching Controlled High Power-Factor Converter", PESC'96, Vol. 1, pp. 1859~1864, 1996
- [2] 김 중해, 김 동희, 노 채균, 배 영호, 백 승면, 문 창수, "IH-Jar용 ZVS-SEPP 고주파 공진 인버터에 관한 연구(I)", 대한전기학회 논문지, Vol. 48B, No. 2, PP.69~74, 2, 1999