

IH-Jar용 ZVS-SEPP 고주파 공진 인버터에 관한 연구(I)

A Study on the ZVS-SEPP Type High Frequency Resonant Inverter with Induction Heating Jar(I)

金鍾海* · 金東熙** · 盧采均** · 裴榮鎬[§] · 白承勉^{§§} · 文昶琇^{§§}
 (Jong-Hae Kim* · Dong-Hee Kim** · Chae-Gyan Ro** · Young-Ho Bae[§] · Seung-Myun Baek^{§§}
 · Chang-Soo Moon^{§§})

Abstract - This paper presents about a example of circuit design and characteristics of proposed circuit in the case of adopted the high frequency resonant Inverter of SEPP type using ZVS(Zero-Voltage-Switching) to the Induction heating load. The soft switching technology known as ZVS is used to reduce turn on and off loss at switching. Also, this paper realizes quantitative circuit analysis which has change the equivalent of Induction heating load to the electric circuit. According to the calculated characteristics value, a method of the circuit designs and operation characteristics of the Inverter is proposed. In addition, this paper proves the propriety of theoretical analysis through the experiment. The proposed inverter shows it can be practically used as power source system for induction heating Jar etc.

Keyword : ZVS-SEPP, Operating characteristics, Circuit Design, Induction heating Jar

1. 서론

최근, 고주파 유도가열은 산업용용 장치 뿐 아니라 가전 민생 기기에도 응용되어 관심의 대상이 되고 있다. 고주파 유도 가열은 특성상 가열 부하의 종류나 응용목적에 따라서 수십 ~ 수백 kHz의 고속동작을 이용한 전력변환회로 기술이 필요하다[1, 2].

전력용 스위칭 반도체소자를 고속동작으로 구동함에 따라 회로 내의 누설인덕턴스, 스위칭소자의 Charge Dump 등으로 인한 dv/dt , di/dt 스트레스, EMI문제, 스위칭손실의 증가 등의 여러 가지 문제들이 발생되어지고 있다.

그래서 이를 극복하기 위한 한 방안으로 주 전력 변환회로를 공진형으로 구성하여 스위칭손실을 저감시키기 위해 ZVS(Zero-Voltage Switching) 및 ZCS(Zero-Current Switching)기법 등이 제안되고 있다[3-5].

본 연구에서는 상기와 같은 기술적 배경으로 SEPP(Single-Ended-Push-Pull)부하 전류 공진형 고주파 인버터에 ZVS기법을 도입해, 유도 가열 부하계로 구성되는 IH-Jar를 모델로 선정하여, ZVS-SEPP인버터의 운전 특성을 해석하였

다.

특성 평가에서 산출한 특성식을 기초로 IH-Jar 회로 인버터를 유도 가열 응용시 회로 설계 기법의 일 예를 제시하고 있다.

또, IGBT를 연구대상회로의 스위칭소자로 적용해 기본 실험을 통하여 이론해석의 정당성을 뒷받침하고 있다.

2. IH-Jar용 고주파 인버터 회로

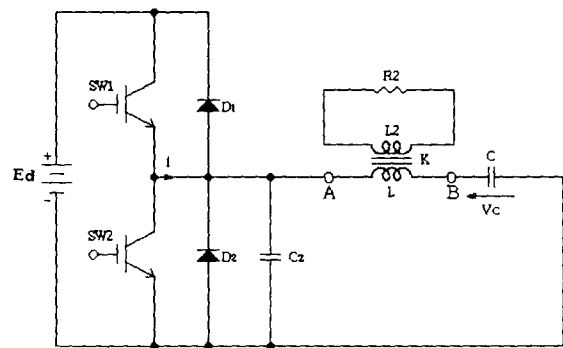


그림 1 ZVS-SEPP형 고주파 공진 인버터 회로

Fig. 1 ZVS-SEPP type the high frequency resonant Inverter circuit

그림 1은 IH-Jar용 ZVS-SEPP 고주파 공진 인버터의 주 회로 구성이다. 이 회로의 기본적인 동작 패턴은 여러 논문을 통해 소개되고있다[6-8].

* 正 會 員 : 嶺南大 工大 電氣工學科 博士課程 修了

** 正 會 員 : 嶺南大 工大 電氣電子 工學部 教授 工博

§ 正 會 員 : 慶一大 工大 電氣工學科 教授

§§ 正 會 員 : LG 電子 生活 System 研究所

接受日字 : 1998년 9월 30일

最終完了 : 1999년 1월 7일

스위치 양단에 Cz를 연결함으로써, 스위칭시의 피크전압을 억제 할 수 있고, ZVS동작을 통해 SEPP형이 유도성으로 동작할 때 발생하는 Turn-Off손실을 최소화 할 수 있다.

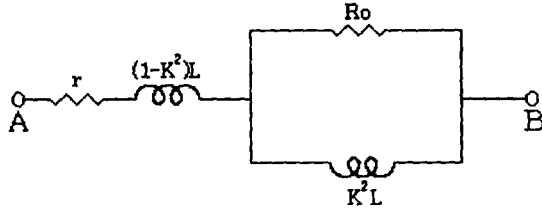


그림 2 등가 회로
Fig. 2 Equivalent circuit

그림 2는 그림 1의 유도 가열 부하인 단자 A-B를 결합계수를 고려하여 전기적 등가 회로로 변환한 것이다. 회로 정수 L2, R2는 유도 가열의 피가열체의 등가회로이고, 1차측 코일(L)은 가열 코일을 나타낸 것이다. 피가열체와 가열 코일은 결합계수 k를 통해 자기적으로 결합되어 있고, R2는 가열체의 저항 성분이다.

IH-Jar의 부하특성을 표현하기 위해 i) 부하의 재질이나 가열 온도에 따라 부하가 갖는 고유한 물성(τ), ii) 인버터와 유도 가열 부하의 구조적인 위치에 따른 결합 계수(k)에 의한 특성을 고려하였다.

이 등가회로에서 알 수 있듯이, 부하 Ro는 $r(=L2/R2)$ 와 k의 함수로 주어진다.

τ는 피 가열체인 부하의 물성적인 특성을 나타내고, 유도 가열부하 $R_o=k^2L/\tau$ 으로 주어진다.

3. 회로 해석

그림 2의 회로 해석시 부하의 Q를 유도 가열부하 QL과 인버터의 입력측에서 본 등가 부하Qr로 각각 나누어 해석하였다. QL은 유도 가열 부하가 갖는 고유한 특성이 되고, Qr은 피가열체와 가열 코일과의 결합 형태에 의해 인버터의 입력측에서 본 등가 임피던스로 주어진다.

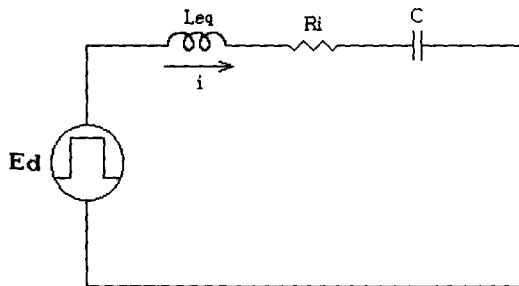


그림 3 SEPP Inverter의 간략화된 모델
Fig. 3 Simplified model of SEPP Inverter

그림 2의 회로에서 부하 Qr(>2.5)이 높다면 거의 정현파 전류가 부하로 흐른다. 또, Cz의 값이 작아서 입력임피던스에 거의 영향을 미치지 않는다고 가정하면, 그림 3의 등가

회로를 생각 할 수 있다.

회로 해석을 위하여 회로 파라미터를 다음 식으로 나타내었다.

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\omega_r: \text{공진각주파수}) \quad (3.1)$$

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}} = \omega_r L = \frac{1}{\omega_r C} \quad (Z_o: \text{특성임피던스}) \quad (3.2)$$

$$Q_L = \frac{\omega_r L}{R_o} = \frac{Z_o}{R_o} \quad (Q_L: \text{유도가열부하Q}) \quad (3.3)$$

$$Q_o = \frac{\omega_r L}{r} = \frac{Z_o}{r} \quad (Q_o: \text{무부하Q}) \quad (3.4)$$

$$Q_r = \frac{\omega_r L}{R_i} = \frac{Z_o}{R_i} \quad (Q_r: \text{전원측에서본등가부하Q}) \quad (3.5)$$

유도 가열 부하의 QL은 주파수, 부하의 재질, 결합계수의 함수로 주어진다. 부하의 재질은 원래 부하가 갖는 물성적인 특성 외에도 가열중 부하가 고온이 되면, 부하의 전기적인 특성이 서서히 변하게되고, 큐리온도를 지나면 급격하게 부하의 물성적인 특성이 변하게 된다. 따라서, 인버터는 안정한 동작을 위해 부하변동에 적절히 대처하여야한다.

그림 3 회로에서 저항분과 리액턴스분으로 나눈 회로의 입력임피던스는

$$Z_i = R_i + X_i \quad (3.6)$$

$$R_i = \frac{(\frac{-\omega k^2}{\omega_r})^2 Z_o Q_L}{1 + (\frac{\omega k^2 Q_L}{\omega_r})^2} + r \quad (3.7)$$

$$= R_L + r$$

$$\left(\text{단, } R_L = \frac{(\frac{-\omega k^2}{\omega_r})^2 Z_o Q_L}{1 + (\frac{\omega k^2 Q_L}{\omega_r})^2} \right)$$

여기서 RL은 입력측에서 본 유도 가열의 등가 저항분이고, 이 저항은 스위칭 주파수, 결합계수(k), 유도 가열 부하 재질의 함수로 주어진다. r은 코일의 내부 저항, 스위치의 손실, 전원의 내부 저항, 공진 콘덴서의 ESR(Equivalent Series Resistor)등을 포함한 손실분을 나타낸다.

$$X_i = j Z_o \left(K_c \frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right) \quad (3.8)$$

$$\left(\text{단, } K_c = \frac{1 + (1 - k^2) \left(\frac{\omega Q_L k^2}{\omega_r} \right)^2}{1 + \left(\frac{\omega Q_L k^2}{\omega_r} \right)^2} \right)$$

따라서, 입력임피던스의 크기와 위상은 다음과 같다.

$$|Z_i| = \sqrt{R_i^2 + X_i^2}$$

$$= Z_o \sqrt{\frac{1}{Q_r^2} + \left(\frac{K_c \omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right)^2} \quad (3.9)$$

$$\cos \phi = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_r^2 \left(\frac{K_c \omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right)^2}} \quad (3.10)$$

인버터의 출력(Po)을 구하기 위해 입력 전압(E_{dn})을 푸리에 전개를 하면,

$$E_{dn} = \frac{E_d}{n \cdot \pi} (1 - \cos n\pi) \quad (\text{단, } n=1, 3, 5, \dots)$$

기본파 성분을 구해보면,

$$E_{1m} = \frac{2E_d}{\pi} \quad (E_{1m}: \text{기본파성분의 최대치}) \quad (3.11)$$

$$\therefore I_m = \frac{E_d}{|Z_i|} = \frac{2E_d \cos \phi}{\pi R_i} \quad (3.12)$$

인버터의 출력 Po는 식(3.7)과 식(3.12)로부터 식(3.13)으로 주어지며, 공진 주파수에서 인버터는 최대전력변환점으로 동작함을 알 수 있다.

$$P_o = \frac{2 E_d^2 R_L}{\pi^2 Z_o^2 \left[\frac{1}{Q_r^2} + \left(K_c \frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right)^2 \right]} \quad (3.13)$$

식(3.12)으로부터 C_z의 충전 전류 I_{cz}는 식(3.14)로 주어진다.

$$I_{cz} = \frac{2E_d}{\pi R_i} \cdot \frac{\left(K_c \frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right)}{Z_o \left[\frac{1}{Q_r^2} + \left(K_c \frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right)^2 \right]} \quad (3.14)$$

C_z의 충전시간은 식(3.15)로 주어진다.

$$\therefore t_c = \frac{E_d \cdot C_z}{I_{cz}} = \frac{E_d \cdot C_z}{I_m \sin \phi} \quad (3.15)$$

식(3.15)에 식(3.14)를 대입하면 C_z의 충전 시간 t_c는 식(3.16)으로 주어진다.

$$t_c = \frac{\pi C_z Z_o \cdot \left[\left(\frac{1}{Q_r} \right)^2 + \left(K_c \frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right)^2 \right]}{2 \left(K_c \frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right)} \quad (3.16)$$

따라서 본 회로의 상/하 스위치의 데드타임은 식 (3.16)보다 커야한다. 그렇지 않으면 C_z에 충전된 전하가 다음에 온 되어지는 스위치를 통해 단락 전류가 흘러 스위치내부의 손실로 발생하게되어 스위치의 접합온도가 상승하게 된다. 공진 콘덴서 C의 전압은 다음 식으로 주어지고, 공진주파수에서 이 값은 최대가 된다.

$$V_c = \frac{I_m}{\omega C} = \frac{2E_d}{\pi \omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{Q_r^2} + \left[K_c \frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right]^2}} \quad (3.17)$$

전원에서 공급된 입력전력 P_{DD}는 (E_d · I_{DC})로 주어지고 입력 전류는 스위치 SW1을 통해 흐르는 전류로 볼 수 있다.

즉,

$$I_{SW1} = \begin{cases} I_m \sin \phi (\omega t - \phi) & \text{for } 0 < \omega t \leq \pi \\ 0 & \text{for } \pi < \omega t \leq 2\pi \end{cases}$$

따라서,

$$I_{DC} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_{SW1} d(\omega t) = \frac{2E_d R_i}{\pi^2 |Z_i|^2} \quad (3.18)$$

$$\therefore P_{DD} = \frac{2E_d^2}{\pi^2 R_i} \cos^2 \phi \quad (3.19)$$

또, 인버터의 등가 손실 P_{loss}는 다음과 같다.

$$P_{loss} = \left(\frac{I_m}{\sqrt{2}} \right)^2 r = \frac{2 E_d^2 r}{\pi^2 |Z_i|^2} \quad (3.20)$$

따라서, 효율을 구해보면,

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_{loss}} = \frac{R_L}{R_L + r} \quad (3.21)$$

4. 특성

특성평가를 위해 회로 정수를 무차원화하여 특성해석을 하였고, 무차원화 파라메타는 표1에 나타내고 있다.

표 1 무차원화 파라메타

Table 1 Normalized parameter

	Reference Values	Normalized Values
Resonant Voltage	E _d	V _{cmN} = V _{cm} / E _d = 2Z _o f _o / π Z _o
Resonant Current	I _s = E _d /Z _o	I _{mN} = I _m / I _s = 2Z _o /π Z _i
Discharge/Charge time of C _z	T _r	t _{cN} = t _c / T _r = πC _o R _i / (2Z _o sinφcosφ)
Frequency	f _r = 1/2π√LC	f _o = f _r /f _s
Equivalent Resistance	Z _o	RoN = Ro/Z _o
Power	P _S = P _o / E _d I _s	P _{oN} = P _o / P _S = 2R _L Z _o / π ² Z _i ²
<Remarks> f _s : Operating Frequency of Inverter f _o : Resonant Frequency of Load Circuit T _r : Resonant Period of Load Circuit C _o : ratio of the resonant condenser and C _z		

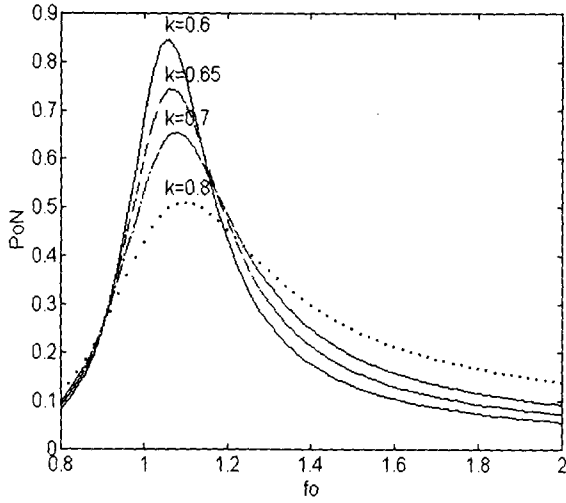


그림 4 주파수(f_o)에 따른 출력 특성
Fig. 4 Characteristics PoN to f_o

그림 4는 스위칭 주파수를 가변 하였을 경우의 출력 특성을 나타낸다.

전력의 피크치를 기준으로 좌측은 용량성 동작을 하고 있고, 우측은 유도성 동작을 하고 있음을 나타낸다. SEPP의 안정한 동작을 위해서는 유도성영역에서 동작을 시켜야만 한다

유도 가열부하에서 결합 계수(k)의 변화의 의미는 인버터의 가열 코일에 대해 유도 가열 부하가 연결된 형태, 가열 코일과 피 가열체와의 거리, 또 인버터 운전중 유도 가열 부하의 이동 등으로 나타낼 수 있다.

따라서 인버터 동작중 유도 가열 부하가 이동하는 경우, 인버터의 특성의 변화는 결합 계수 k 의 특성을 살펴봄으로써 명확히 규정할 수 있다.

그림 5, 6 및 7, 8은 여러 파라메타의 변동에 따른 인버터의 특성을 보여주고 있다.

그림 5에서 알 수 있듯이, k 가 작아질수록 인버터의 출력은 급격히 줄어든다.

가열코일에 흐르는 전류에 의한 자계 에너지가 낮은 결합 계수로 인해 2차측 부하로 잘 전달되지 못하기 때문이다.

그러나 스위치의 전류는 그림 7에서와 같이 결합 계수 k 의 감소에 대해 오히려 증가하다가 k 가 더욱 낮아지게 되면 전류도 다시 감소한다.

따라서 그림 2의 인버터로 유도 가열 부하를 운전할 경우, 부하의 이동시 과전류에 대한 주의가 필요하다는 것을 알 수 있다.

유도 가열부하에서 결합계수 외에 또 하나의 부하특성으로 나타나는 것이 부하의 물성적인 재질이다.

τ 는 유도 가열부하의 재질의 종류나 인버터의 운전 중 부하가 가열되면서 변화되고, R_o 는 τ 에 반비례한다.

식 (3.3)의 Q_L 특성을 살펴봄으로써 물성적인 변동에 대한 인버터의 운전특성을 알 수 있다.

그림 8에서 피가열체의 등가 부하 Q_L 이 증가에 따라, τ 의 증가에 따라 출력이 증가함을 알 수 있다.

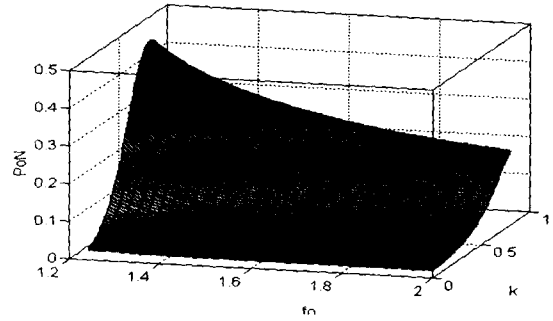


그림 5 주파수(f_o)와 결합계수(k)에 대한 출력 특성
Fig. 5 Output characteristic for f_o vs. k

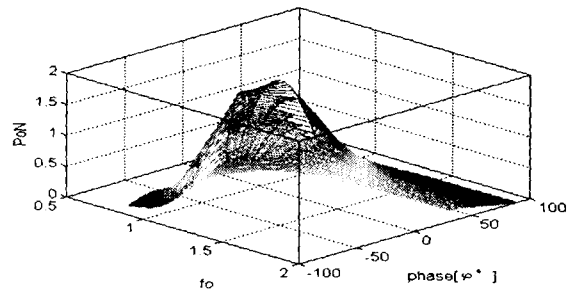


그림 6 주파수(f_o)와 공진 전류위상에 대한 출력 특성
Fig. 6 Output characteristic for f_o vs. ϕ

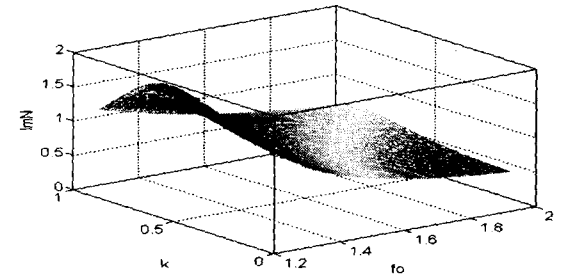


그림 7 주파수(f_o)와 결합계수(k)에 대한 스위치 전류(ImN) 특성
Fig. 7 Switch current characteristic for f_o vs. k

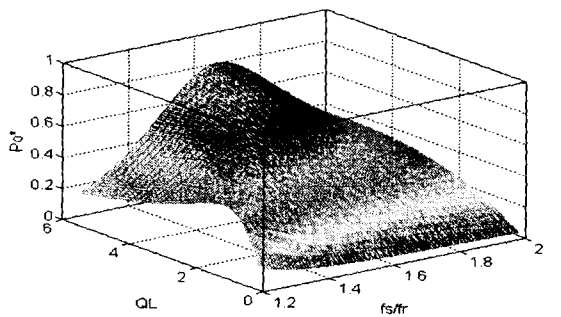


그림 8 주파수(f_o)와 Q_L 에 대한 출력 특성
Fig. 8 Output characteristic for f_o vs. Q_L

5. 회로 설계

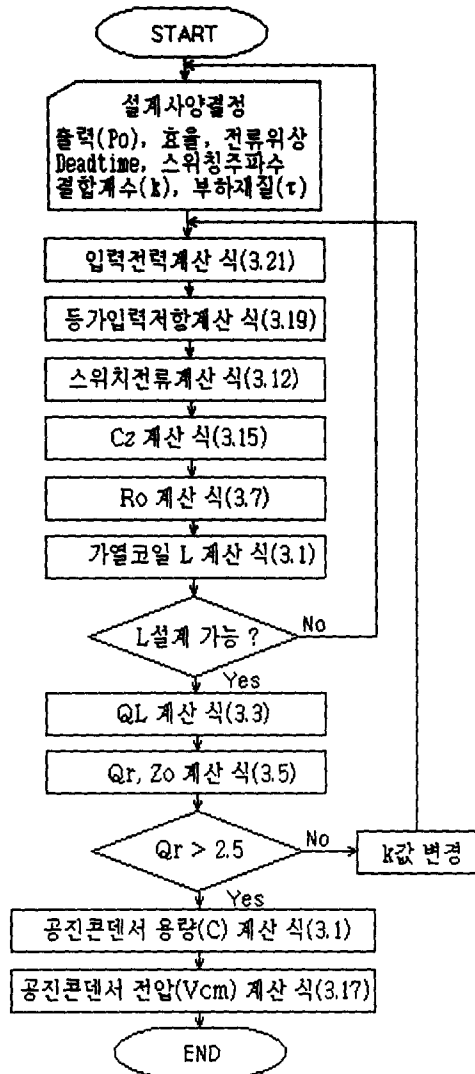


그림 9 설계 Flow chart
Fig. 9 Design Flow chart

그림 9는 설계 과정의 흐름도를 나타내고 있다. 설계 흐름도에 따른 1.3kw급의 유도 가열용 인버터의 설계 예는 다음과 같다.

Example) 1300W/220V, 25kHz, k=0.8, $\phi = 25^\circ$, 효율 90%, Cz의 Charge time = 1.0[μ sec]로 설정하였을 경우, 상기의 설계 단계를 거쳐 나온 각 값은 다음과 같다.

$$L = 95 [\mu H], C = 0.8 [\mu F]$$

$$C_2 = 60 [nF], I_m = 32 [A]$$

$$V_{cm} = 540 [V],$$

이러한 설계 값을 가지고, 수치해석을 통해 Simulation을 하였을 경우, 인버터 각부분의 정상운전시 스위치 전류(i_{sw}), 커패시터 양단 전압(V_c) 그리고 스위치(SW2) 양단전압(V_{sw2})의 이론 파형을 그림10에 나타내고 있다.

그림 11은 이론 해석의 정당성을 입증하기 위해서 실험을

통한 스위치 전류(i_{sw}), 커패시터 양단 전압(V_c) 그리고 스위치(SW1, SW2) 양단전압(V_{sw1} , V_{sw2})의 실측 파형을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 이론 파형과 실측 파형의 결과가 거의 일치함을 볼 수 있으며, 또한 그림 11의 하단 그림을 확대한 상단 그림에서 스위치 턴-오프시 오버슈트가 나타나지 않아 ZVS동작이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. 실험에 사용한 실험 정수는 표 2와 같다.

표 2 실험 정수
Table 2 Experimental Parameters

Circuit Parameter	Rating	Circuit Parameter	Rating
Input Voltage	311(V)	Resonant Capacitor(C)	0.8(μ F)
IGBT (SGH40N60UFD)	600(V) 40(A)	Resonant Reactor(L)	95(μ H)
ZVS Capacitor(Cz)	60(nF)	Switching Frequency	25(Khz)

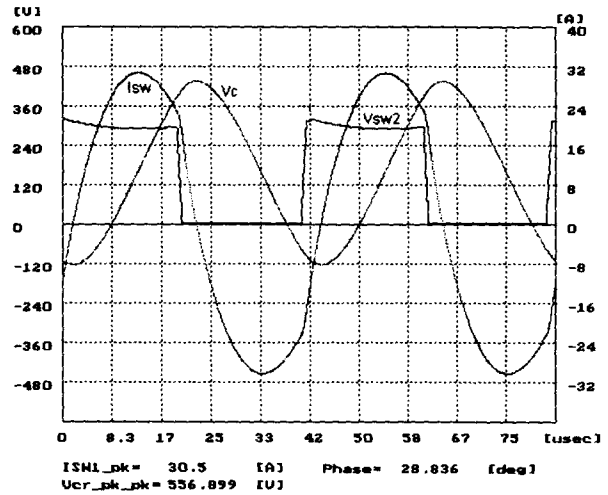


그림 10 Simulation 파형
Fig. 10 Simulation waves for the SEPP Inverter

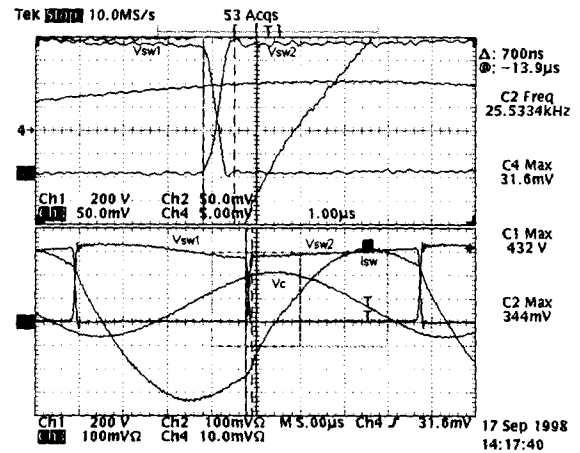


그림 11 실험 파형
Fig. 11 Experimental waveforms

6. 결론

본 논문은 유도 가열을 이용한 가전기기용 IH-Jar를 운전하기 위해서 고주파 전원인 ZVS-SEPP형 고주파 공진 인버터를 연구대상 회로로 하였다. 유도 가열 부하를 전기적 등가 회로로 변환하여, 부하의 상태 변화에 따른 인버터의 특성 평가를 행하였고, 이론 적인 해석에서 도출된 식을 이용해, 손쉽게 인버터를 설계할 수 있는 설계기법의 일 예를 제시하였다.

제안된 설계 기법으로 산출된 회로 정수에 의해 인버터를 실제 설계하여 IGBT를 스위칭 소자로 하여 기초 실험을 행한 결과 제안된 설계법이 유용하게 사용됨을 입증하였다.

현재, 본 연구대상 회로를 주 변환 회로로 한 IH-Jar 시스템을 구성해, 실제 응용면등을 고려한 연구가 진행 중에 있으며, 그 결과를 종합적으로 검토하여 발표할 예정에 있다.

감사의 글

본 연구는 영남대학교 전력전자 연구실과 (주)LG전자 리빙 시스템 연구소(창원)의 산·학협동연구에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] W. E. Frank et. al: "New Induction Heating Transformers", IEEE, Vol. MAG18, No. 6, pp 1752-1755, 1982
 [2] T. Tanaka: "A New Induction Cooking Range for Heating any kind of metal vessels", IEEE, Vol.35, No.3, pp.635 ~ 641, Aug. 1989
 [3] A. Takeuchi et. al: "Zero-Voltage-Switching Controlled High Power-Factor Converter", PESC'96, Vol. 1, pp 1859-1864, 1996
 [4] J. M. Alonso et. al: "A Novel Low-Loss Clamped Mode LCC Resonant Inverter", PESC95, Vol. 2, pp 736-742, 1995
 [5] Alexandru Ivascu et. al: "Class E Half-Wave Low di/dt Rectifier Operating at Frequency Around Resonance", PESC95, Vol. 2, pp. 743-749, 1995
 [6] M. K. Kazimierczuk: "Class-D Voltage Switching MOSFET Power Amplifier", IEE ProcB. Vol. 138, No. 6, pp. 285~296, 1991
 [7] 민병재, 노채균, 김동희, 김종해, 문창수: "ZVS를 이용한 고주파 공진인버터의(SEPP형)의 특성 해석과 설계", 전력 전자 학회지, pp. 19 - 27, 1997, 12
 [8] 김종해, 민병재, 노채균, 김동희, 원재선: "ZVS를 이용한 SEPP형 D급 고주파 공진 인버터의 특성해석", 전력전자 학술대회 논문집, pp. 116 - 123, 1997, 7

저 자 소 개



김 종 해(金 鍾 海)

1968년 3월 11일 생. 1994년 경일 대학교 전기공학과 졸업. 1996년 영남대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1996년 ~ 현재 영남대 전기공학과 박사과정. 경일대, 안동정보대학 시간강사.



김 동 희(金 東 熙)

1950년 11월 20일 생. 1973년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 Kobe대학 졸업(공학). 1987년~1989년 한국전기연구소 전력전자 부장. 현재 영남대

공대 전기전자공학부 교수.



노 채 균(盧 采 均)

1938년 10월 7일 생. 1961년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1975년 영남대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1982년~1983년 쉐넹 주립대학 교환교수.

1968년~현재 영남대 공대 전기전자공학부 교수.



배 영 호(裵 榮 鎬)

1953년 9월 11일 생. 1978년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 경남대학교 졸업(공학). 현재 경일대 공대 전기공학과 교수.



백 승 면(白 承 勉)

1960년 9월 24일 생. 1984년 경북대 공대 전자공학과 졸업. 1998년 부산대 대학원 지능기계 시스템학과 졸업(석사). 1984~현재 (주) LG전자 리빙 시스템 연구소 책임연구원.



문 창 수(文 昶 琇)

1964년 7월 9일 생. 1990년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 영남대 공대 전기공학과 졸업(석사). 현재 (주) LG전자 리빙 시스템 연구소 주임 연구원.