

누설자속을 이용한 sealing-wax용 고주파 공진 인버터에 관한 연구

원 재선 김 동희 노 채균 민 병재 김 경식 정 성균

* : 영남대학교, ** : 안동정보대학, *** : 경북전문대학 **** : Busung ENG

A study on the high frequency resonant inverter for sealing wax using a leaka

J.S.Won, D.H.Kim, C.K.Noh, B.J.Min, K.S.Kim, S.K.Jung

* : Yeungnam University, ** : Andong College, *** : Kyungbuk College, **** : Busung ENG

Abstract - This paper describes a current fed high frequency resonant inverter used as the power supply for sealing-wax. The proposed inverter can reduce switching losses, noise and voltage stress at turn-on and turn-off. The analysis of proposed circuit uses normalized parameter and characteristic estimation which is needed in each step before design is generally described according to normalized frequency (μ), coefficient of coupling(κ) and all parameters. The theoretical analysis is proved through experiment and this circuit shows that it can be used practically as the power supply system for sealing wax and DC-DC converter.

수 있는 고주파 유도가열이 효과적이다.

유도가열에서 원주도체뿐만 아니라 모든 도체에 고주파 전류가 흐르면 가열물체의 표면에서부터 중심으로 깊이 들어갈수록 전류밀도가 작아지고 거의 모든 열에너지는 (1)식과 같이 표현되는 표피두께(δ) 내에 분포하게 된다. 즉, 주파수를 높게 설정하여 표피두께를 아주 작게 한다면 원하는 깊이의 표면부분만 순간적으로 강한 열을 받게되고 나머지 부분은 거의 열을 받지 않는다.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{4\pi \times 10^{-7}}} \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \quad (1)$$

여기서, ρ : 저항률($\Omega \cdot m$), μ : 투자율, f : 주파수(Hz)

1. 서 론

2.2 회로 구성

최근, Power-MOSFETs, IGBTs 및 SITs 등의 자기 소호능력을 가진 전력용 스위칭 반도체 소자가 실용화되어 대전력·고주파 유도가열용 전원, 정보통신용 전원장치 등의 소형 경량화 요하는 전력변환 장치에 관한 연구가 활발히 행해지고 있다. 전력용 스위칭 반도체 소자를 고속 스위칭 함에 따른 문제점으로는 스위칭 시에 발생하는 스위칭 손실의 증가를 들 수 있다.[1-3]

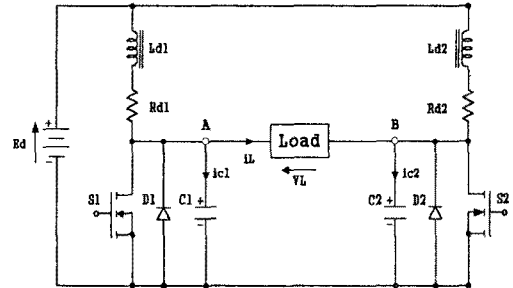


그림 1. sealing wax용 고주파 공진 인버터

Fig. 1. High frequency resonant inverter for sealing wax

공진형 전력변환회로에 ZVS, ZCS, E급 스위칭 등의 소프트 스위칭 기법의 도입은 스위칭 주파수에 비례하여 발생하는 스위칭 손실을 감소시킬 뿐만 아니라 회로의 출력 주파수의 고주파화를 통해서 장치전체의 고효율화 소형·경량화, 무소음화, 안전성, 청결성, 신뢰성 및 관리측면 등의 여러 가지 장점을 가지게 한다.[4-6]

그림 1은 sealing-wax용 전류형 고주파 공진 인버터의 회로구성을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 스위치(S1, S2)양단에 병렬로 공진용 커패시터(C1, C2)를 연결함으로써 별도의 ZVS용 커패시터를 사용함이 없이 스위칭 시 소자에 발생하는 턴·오프 손실을 줄일 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 기존의 1식형 전류형 고주파 공진 인버터를 병렬로 연결하여 스위치의 전류부담을 감소시키고 공진용 커패시터를 ZVS용 커패시터로도 사용할 수 있는 부하 공진방식의 2식형 전류형 고주파 공진 인버터 회로를 제안하고 있다.

sealing-wax용 인버터에 있어서, 부하회로 부분은 그림 2(a)(b)와 같이 가열코일과 직렬(Type I) 또는 병렬(Type II)로 역률 보상 커패시터를 가지는 유도가열부하로 구성되어 있다.

회로해석은 회로해석의 범용성을 부여하기 위하여 무차원화 파라미터를 도입하였고 회로의 동작특성을 스위칭 주파수와 제 파라미터에 따라서 해석 및 평가하였다.

Type I에 대한 기본 동작원리 및 회로해석은 이미 소개된 바 있다.[7] 따라서, 본 논문에서는 Type II를 중점으로 회로해석을 행하였다.

더욱이, sealing-wax를 유도가열부하로 상정하고 Power-MOSFET를 연구대상회로의 스위칭 소자로 적용해 실험을 통해서 이론해석의 정당성을 입증하였다.

2. sealing-wax용 고주파 공진 인버터

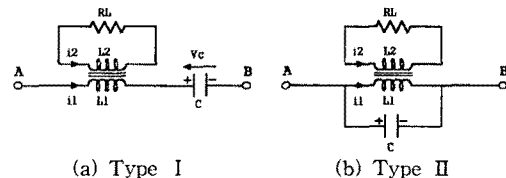


그림 2. 유도가열 부하 회로

Fig. 2. Load circuits for induction heating

2.1 sealing-wax의 유도가열 원리

sealing-wax용 전원장치란 플라스틱 용기에 들어있는 내용물을 장기간 보관하기 위하여 알루미늄 재질이 주성분으로 된 박막을 봉합할 때 사용되는 고주파 발진전원장치를 말한다. 따라서, 두경으로 사용하는 박막의 전체부분이 아닌 봉합면만 순간 가열을 하면 되므로 sealing-wax용 전원은 소형·경량화가 요구되고 표피효과를 이용한 국부적인 가열방식이 봉합효율을 높일

회로구성으로는 전원(E_d)로부터 리플이 적은 정전류를 공급하기 위하여 리액터($Ld1, Ld2$)가 접속되어 있고 스위칭 소자($S1, S2$)는 자기보호 기능을 갖는 소자라면 어떤 것이나 사용이 가능하며, 다이오드($D1, D2$)는 회로 운전 특성상 나타나는 무효전류를 흘려주기 위한 통로로 사용되고 있다.

부하(R)는 sealing-wax를 상정하고 있으며, 그림 1의 공진 회로구성은 공진 리액터 $L1$ 과 병렬 공진용 커패시터 ($C1, C$) 혹은 공진 리액터 $L1$ 과 병렬 공진용 커패시터 ($C2, C$)로 구성 되어진다. 회로구성에서 알 수 있듯이 제한한 인버터는 i) 회로구성이 간단하고 ii) 전류형이면서 ZVS 동작이 가능하고 iii) 공진용 커패시터를 ZVS용 커패시터로도 사용이 가능하고 iv) 기존의 1석형 전류공급 푸시-풀형 인버터에 비해서 스위치의 전류부담이 적을 뿐만 아니라 부하의 사용범위가 현저하게 넓다는 특징을 가지고 있다.

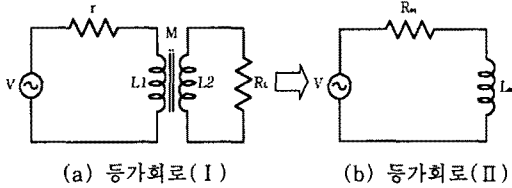


그림 3. 유도가열 시스템의 등가회로
Fig. 3. Equivalent circuit of induction heating system

유도가열시에 피가열물은 가열코일과 자기적으로 결합되어 있기 때문에 그림 3 (a)의 유도가열계의 등가회로로 나타낼 수 있고 그때의 방정식은 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V &= (r + j\omega L_1)I_1 - j\omega M I_2 \\ -j\omega M I_1 + (R_L + j\omega L_2)I_2 &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서, $\tau = L_2/R_L$, $A = 1/\omega^2$ 로 두면 전원으로 부터 부하측을 본 임피던스(Z_i)는 식 (3)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_i = \frac{V}{I} = r + \frac{k^2 \tau}{A + \tau^2} L_1 + j\omega L_1 \left[1 - \frac{k^2 \tau}{A + \tau^2} \right] \quad (3)$$

여기에서, $Z_i = R_{eq} + j\omega L_{eq}$ 로 둔다면, 식(3)은 그림 3 (b)와같이 하나의 등가 인덕턴스(L_{eq})와 등가저항(R_{eq})의 직렬연결로 나타낼 수 있고 등가화된 R_{eq} 와 L_{eq} 는 식 (4)과 식 (5)와 같이 표현 할 수 있다.

$$R_{eq} = r + \frac{k^2 \tau}{A + \tau^2} L_1 \quad (4)$$

$$L_{eq} = L_1 \left(1 - \frac{k^2 \tau^2}{A + \tau^2} \right) \quad (5)$$

sealing-wax의 부하특성을 표현하기 위해 i) 부하의 재질이나 가열온도에 따라 부하가 갖는 고유한 물성(τ), ii) 인버터와 유도 가열 부하의 구조적인 위치에 따른 결합계수(k)에 의한 특성을 고려하였다.

그림 3의 등가회로에서 알 수 있듯이, 부하 R_{eq} 는 τ , k 의 함수로 주어진다.

입력전력 P_I 과 피가열물에서 소비되는 전력 P_o 는 (6),(7)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_I = R_{eq} \times I^2 \quad (6), \quad P_o = (R_{eq} - r) \times I^2 \quad (7)$$

따라서, 유도가열에 있어서 가열코일의 가열효율은 식 (8)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = P_o/P_I = (R_{eq} - r)/R_{eq} \quad (8)$$

2.3 회로 해석

제한한 인버터는 스위칭 소자($S1, S2$)와 다이오드($D1, D2$)의 온·오프 동작과 ($S1, S2$) 양단의 공진용 커패시터($C1, C2$) 충전·방전에 의해 6개의 동작 모드로 분류된다. 그림4는 각각의 동작모드를 나타내고 있다.

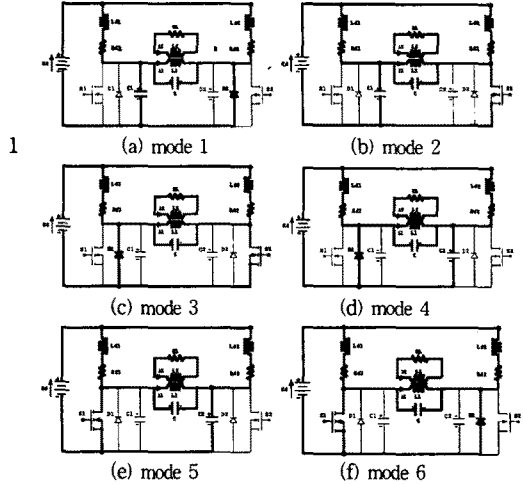


그림 4. 스위칭 동작 모드
Fig. 4. Switching operation Mode

각 모드별 회로 상태 방정식을 회로 해석의 범용성을 부여하기 위해 표 1에서 나타난 정규화 제어변수를 도입하였다

표 1. 무차원화 파라메타
Table 1. Normalized parameters

	Reference Values	Normalized Values
Voltage	E_d	$v'(z) = v(t)/E_d$
Current	$I = E_d/Z_s$	$i'(z) = i(t)/I$
Time	$T_{sw} = 1/f_{sw}$	$z = t/T_{sw}$
Time constant	$\tau_s = L_s/Z_s$	$\tau = \tau(t)/\tau_s$
Frequency	$f_r = 1/2\sqrt{L_s C_s}$	$\mu = f_{sw}/f_r$
Impedance	$Z_s = 2\sqrt{L_s/C_s}$	$\lambda = R/Z_s$
Flux	$\Phi_s = L_s I_s$	$\Phi' = \Phi(t)/\Phi_s$
Power	$P_s = E_s \cdot I_s$	$P'(z) = P(t)/P_s$

<Remarks>
 f_{sw} : Operating Frequency of Inverter
 T_{sw} : Operating Period of Inverter
 $L_s = L_1$, $C_s = C + C_1$ $C_i = C_{s1} = C_{s1}$,
 $\alpha = \frac{L_d}{L_1} = \frac{L_d}{L_1}$, $\beta = \frac{C_{s1}}{C} = \frac{C_d}{C}$

그림 5는 $\mu=1.0$, $\tau=1.26$, $\kappa=0.8$, $\beta=1.0$ 으로 하였을 경우, 인버터 각 부분의 정상운전시 이론파형을 보여주고 있다.

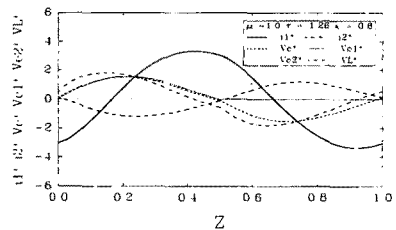


그림 5. 이론 파형
Fig. 5. Theoretical waveform

3. 특성 평가 및 실험

그림 6(a)(b)는 $\beta=1$, $\tau=1.26$ 로 하였을 경우, 결합계수(κ)와 무차원화 주파수(μ)를 파라미터로 하였을 경우의 출력전력특성(P^*_{max})을 나타내고 있다.

유도 가열부하에서 결합계수(κ)의 변화의 의미는 인버터 가열코일에 대해 유도가열 부하가 연결된 형태, 가열코일과 피 가열코일의 거리 또는 인버터의 운전시에 유도가열 부하의 이동 등으로 나타낼 수 있다.

따라서, 인버터의 동작 중에 유도 가열부하가 이동하는 경우, 인버터의 특성의 변화는 결합계수(κ)의 특성을 살펴봄으로써 명확하게 규정할 수 있다.

그림 6에서 알 수 있듯이, κ 가 작아짐에 따라 인버터의 출력은 급격히 줄어드는데 이러한 현상은 가열코일에 흐르는 전류에 의한 자계 에너지가 낮은 결합계수로 인해 2차측 부하로 잘 전달되지 못하기 때문이다.

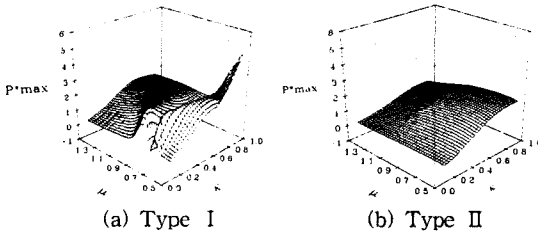


그림 6. 결합계수(κ)와 주파수(μ)에 따른 출력 전력 특성
Fig. 6. Output power characteristics for κ vs. μ

그림 7(a)(b)는 $\beta=1$, $\mu=1.0$ 로 하였을 경우, 결합계수(κ)와 부하 시정수(τ)를 파라미터로 하였을 경우의 부하 전류 특성($I_L^*_{max}$)을 나타내고 있다.

τ 는 유도가열부하의 재질의 종류나 인버터의 정상운전 중에 부하가 가열되면 변화하게 된다. 그림에서 알 수 있듯이, Type I이 Type II에 비해서 τ 의 증가에 따라서 부하전류가 급격히 증가함을 알 수 있다.

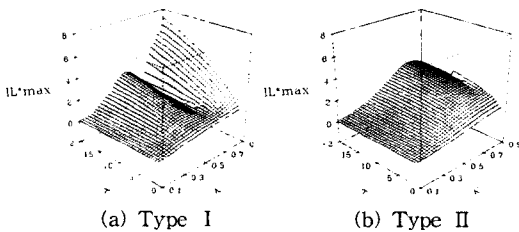


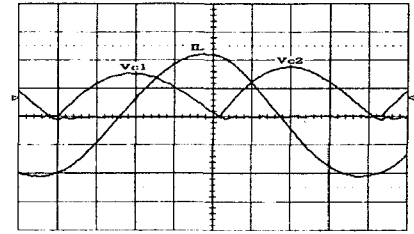
그림 7. 결합계수(κ)와 부하시정수(τ)에 따른 부하 전류특성
Fig. 7. Load current characteristics for κ vs. τ

그림 8은 이론해석의 정당성을 입증하기 위해서 실험을 통한 부하전류(I_L), 스위치 양단 전압(V_{c1} , V_{c2})의 실험파형을 보여 주고 있고, 실험에 사용한 실험정수는 표 2와 같다.

표 2. 실험 정수값

Table 1. Experimental parameters

Circuit Parameter	Rating	Circuit Parameter	Rating
Input Voltage	50(V)	Load Resistor	0.5(Ω)
Power-MOSFET (IRFP 360)	400(V) 28(A)	Resonant Reactor(L)	18(μ H)
Input Reactor (L_{in} , L_{e2})	1(mH)	Resonant Frequency	120Khz
Resonant Capacitor (C_1 , C_2)	50(nF) 640(V)	Resonant Capacitor (C)	50(nF) 640(V)



(Voltage : 100(V)/div, Current : 10A/div, Time : 1 μ s/div)

(b) $\mu=1.0$ ($f_{sw}=120$ (kHz))

그림 8. 실험 파형

Fig. 8. Experimental waveforms

4. 결 론

본 논문은 기존의 1석형 전류공급 푸시-풀형 고주파 공진 인버터를 병렬로 연결한 회로구성을 가지고 공진용 커패시터를 ZVS용 커패시터로도 사용할 수 있는 부하 공진 방식의 전류형 고주파 공진 인버터 회로를 연구대상회로로 하여 유도가열부하의 부하회로 부분에 가열코일과 직렬 (Type I) 또는 병렬 (Type II)로 역률 보상 커패시터를 가설 경우의 회로 동작과 제특성을 이론적으로 검토하였다.

연구를 통해서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1석형 전류공급 푸시-풀형 인버터에 비해서 스위치의 전류 부담을 감소시키고 부하의 사용범위를 증가시켰다.
- 제안한 고주파 인버터에 Sealing Wax를 유도가열부하로 선정하여, 설계 전 단계에 필요한 특성평가를 무차원화 파라미터 (κ , τ , μ)를 도입하여 범용성 있게 기술하였다.
- Power-MOSFET를 사용하여 실험을 행한 결과 실측 파형과 이론 파형이 거의 동일한 경향을 나타내고 있음을 확인하였다.

향후, 본 회로는 Sealing Wax용 전원장치, 방전동용 전원장치, DC-DC 컨버터 등의 전원시스템에 응용 가능성을 확인 하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Guan C yun Hsieh, Chun-Hung Lin, Jyh-Ming Li and Yu-Chang Hsu, "A study of series-resonant DC/AC Inverter," in Proceedings of the 1995 IEEE PESC95, Vol. 1, pp. 493-499.
- [2] A.K.S Bhat, S.B.Dewan, "DC TO AC Utility Using Sin wave Resonant Inverter," in Proceedings of the IEE, Vol. 5, pp. 135-141.
- [3] T.Haneyoshi, A. Kawamura and R. G. Hoft, "Waveform compensation of PWM inverter with cyclic fluctuating loads," in the Proceedings the 1986 PESC Record, pp. 744 751.
- [4] K.Harade, H. Sakamoto and M. Shoyame, "Phase controlled with high frequency switching," IEEE Trans. on Power Electronic, vol. 3, No. 4, pp. 406-411. 1988.
- [5] A. Takeuchi et. al : "Zero Voltage Switching Controlled High Power-Factor Converter", PESC'96, Vol. 1. pp. 1859~1864, 1996.
- [6] Jong Hae Kim, Dong Hee Kim and Chae Gyan Ro etc, "A study on the ZVS SEPP type high frequency resonant inverter with induction heating jar(I)", Trans. KIEE. Vol. 48B, No. 2, pp. 69~74, FEB. 1999.
- [7] 원 재선, 이 경효, 노 재균외 3인, "결합계수를 이용한 LCC 전류형 고주파 공진 인버터의 특성해석", 2000년 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, 2000 4월, pp III-A-16~III-A-20