

유도 가열용 SEPP 인버터의 특성 해석

문창수, 백승면, 심광열*
 LG전자 리빙시스템 연구소, 울산 전문대 전기과*

Analysis of SEPP type Inverter for Induction Heating

Chang Soo Moon, Seung Myun Baek, Kwang Yeal Sim*

Living System Research Lab, LG Electronics Co., Department of Electrical Engineering, UI-San College

Abstract - This paper has described about a SEPP Inverter for induction heating load.

It is analyzed theoretically about the Inverter operation for induction heating. According to the parameters of induction heating load, it is proposed a method of circuit analysis and operation characteristics of the Inverter.

In addition, the soft switching technology known as ZVS(Zero Voltage Switching) is used to reduce turn on and off loss at switching.

The proposed inverter shows it can be practically used as power source system for high frequency induction heating appliances.

1. 서 론

산업 응용에서 전력 전자 기술이 널리 이용되고 있으며, 특히 고주파 유도 가열은 최근 가전 산업에도 응용되어 관심의 대상이되고 있다. 고주파 유도 가열은 특성상 가열 부하의 종류나 응용목적에 따라 수십 ~ 수백 kHz의 고속 동작을 이용한 전력 변환 회로 기술이 필요하다.

전력용 스위칭 반도체 소자를 고속 동작으로 구동함에 따라 회로 내의 누설인덕턴스, 스위칭 소자의 Charge Dump 등으로 인한 dv/dt, di/dt 스트레스, 스위칭 손실의 증가 등의 여러 가지 문제들이 발생되어지고 있다. 따라서 이를 극복하기 위한 한 방안으로 주 전력 변환 회로를 공진형으로 구성하기도 하고, 또 스위칭손실을 저감시키기 위한 기술로 E급 스위칭, ZVS(Zero-Voltage Switching) 및 ZCS(Zero-Current Switching) 등이 제안되고 있다.⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾

본 연구에서는 상기와 같은 기술적 배경으로 SEPP (Single-Ended-Push-Pull) 전압형 전류 공진형 고주파 인버터에 ZVS기법을 도입하여 Turn On/Turn Off 손실을 최소화하여 유도 가열 부하를 모델로 선정하여, 이 인버터의 특성 및 설계에 관해 기술하고 있다.

2. 고주파 인버터 회로

2.1 유도 가열 부하의 전기적인 등가 모델

그림 1.(a)은 유도 가열 부하를 전기적인 등가 회로로 변환한 것이다. L2, R2는 유도 가열의 피가열체의 등가회로이고, 1차측 코일(L)은 가열 코일을 나타낸 것이다. 피 가열체와 가열 코일은 결합 계수 k를 통해 자기적으로 결합되어 있으므로 그림 1.(a)처럼 나타낼 수 있다. R2는 피 가열체의 저항 성분이다.

유도 가열을 부하로 삼장할 경우 부하특성이란 다음 2가지 특성을 내포한다.⁽²⁾

- 1) 부하의 재질이나 가열 온도에 따라 부하가 갖는 고유한 물성(τ)

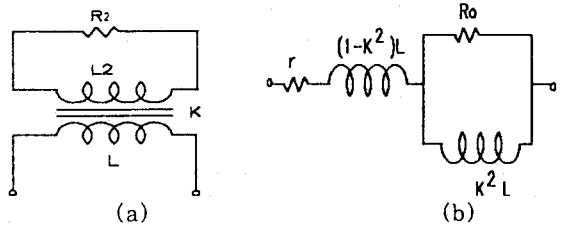


그림 1. a) 유도 가열 부하의 등가 회로
 b) a)회로의 등가 회로

Fig. 1. a) Electric circuit of Induction Heating
 b) Equivalent circuit of a)

- 2) 인버터와 유도 가열 부하의 구조적인 위치에 따른 결합 계수(k)에 의한 특성

그림 1의 (b)는 유도가열 부하를 1차측으로 등가 변환된 회로이다.

기존의 공진 인버터 해석시 부하를 단순히 상수 R로 나타내서는 이러한 유도가열 부하의 특성을 표현 할 수가 없다.

본 논문에서 제안한 유도 가열 부하 Ro는 τ와 k의 함수이므로, 각각의 특성에 따른 인버터 특성 해석이 가능하다.

k는 가열 코일과 피 가열체와의 결합계수이고, Ro는 피 가열체의 저항성분을 표현한 것이다.

r은 코일의 내부 저항, 스위치의 손실, 전원의 내부 저항, 공진콘덴서의 ESR 등을 포함한 손실분을 나타낸다.

$\tau = L_2/R_2$ 로 두게되면, τ는 부하의 전기적인 물성을 나타낸다.

유도 가열부하 Ro는 아래의 식으로 주어진다.

$$R_o = \frac{k^2 L}{\tau} \quad (\text{단, } \tau = \frac{L_2}{R_2}) \quad (2.1)$$

따라서, 그림 1. b)의 회로를 해석함으로써 유도 가열 부하에 대한 인버터의 운전특성을 파악 할 수 있다.

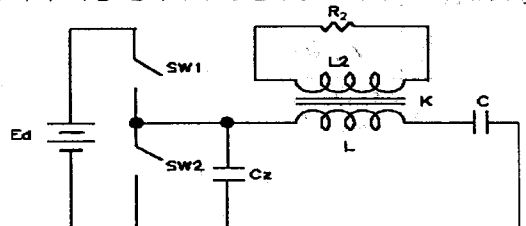


그림 2. SEPP type Inverter 회로 구성

그림 2는 본 논문에서 해석하고자 하는 고주파인버터의 주 회로 구성이다. 이 회로의 기본적인 동작 패턴은 여러 논문들에 소개되어져있다.⁽¹⁾⁽⁴⁾

스위칭 양단에 Cz를 연결함으로써, 스위치의 기생 커패시턴스를 흡수할 수 있고, ZVS동작을 통해 SEPP형이 유도동작으로 동작할때 발생하는 Turn-Off손실을 최소화

할수 있다.

2.2 회로 해석

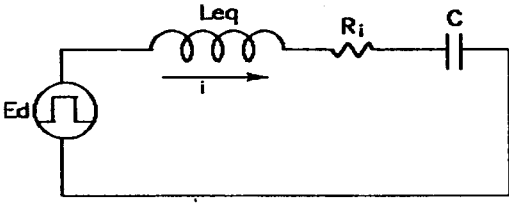


그림 3. SEPP Inverter의 간략화된 모델
Fig. 3. A simplified model of SEPP Inverter

공진 인버터의 해석시, 부하의 Q(Quality Factor)를 변수로써 인버터의 운전 특성을 주로 기술하지만, 유도 가열의 경우 부하 Q로써만 인버터의 특성을 기술하기 어렵다. 따라서 본 논문은 부하의 Q를 실제의 유도 가열부하 QL과 인버터의 입력 측에서본 등가 부하QR를 각각 나누어 해석하여 유도가열부하의 변동 조건에 따른 인버터 운전 특성에대해서 해석하였다.

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 할수 있다.

그림 3의 회로를 해석하기 위하여 회로 파라메타를 다음과 같이 정의하였다.

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\omega_r: \text{공진 각주파수}) \quad (2.2)$$

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}} = \omega_r L = \frac{1}{\omega_r C} \quad (Z_o: \text{특성임피던스}) \quad (2.3)$$

$$Q_L = \frac{\omega_r L}{R_o} = \frac{Z_o}{R_o} \quad (Q_L: \text{유도가열부하Q}) \quad (2.4)$$

$$Q_o = \frac{\omega_r L}{r} = \frac{Z_o}{r} \quad (Q_o: \text{무부하Q}) \quad (2.5)$$

$$Q_r = \frac{\omega_r L}{R_i} = \frac{Z_o}{R_i} \quad (Q_r: \text{등가 부하Q}) \quad (2.6)$$

(2.4)식에서 유도 가열 부하 QL은 주파수, 부하의 재질, 결합 계수의 함수로 주어진다. 부하의 재질의 특성은 가열중 부하가 온도에 따라 조금씩 변하게되고, 큐리에 온도를 지나면 급격하게 부하의 물성적인 특성이 변하게 된다. 따라서 이러한 부하를 인버터의 입력임피던스로 환산하면 QR의 변화로 나타나고, 인버터는 동작중 이 입력측에서 본 부하 QR의 변동에 적절히 대처하여야한다. 이때 회로의 입력임피던스는

$$Z_i = R_i + X_i \quad (2.7)$$

$$R_i = \frac{(\frac{\omega k^2}{\omega_r})^2 Z_o Q_L}{1 + (\frac{\omega k^2 Q_L}{\omega_r})^2} + r = R_L + r \quad (2.8)$$

$$\left(\text{단, } R_L = \frac{(\frac{\omega k^2}{\omega_r})^2 Z_o Q_L}{1 + (\frac{\omega k^2 Q_L}{\omega_r})^2} \right) \quad (2.9)$$

$$X_i = j Z_o \left(K_c \frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right) \quad (2.10)$$

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

여기서, RL은 입력측에서 본 유도 가열 부하의 등가 저항분이고, 이 등가 저항은 스위칭 주파수, 결합계수(k), 유도 가열 부하 재질(τ)의 함수로 주어진다. 따라서, 입력임피던스의 크기와 위상은 다음과 같다.

$$|Z_i| = Z_o \sqrt{\frac{1}{Q_r^2} + \left(\frac{K_c \omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right)^2} \quad (2.11)$$

$$\cos \phi = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_r^2 \left(\frac{K_c \omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right)^2}} \quad (2.12)$$

다음에 인버터의 출력을 구하기 위해 입력 전압을 푸리에 해석을 통해 입력 전압의 기본파 성분을 구하면 식(2.13)으로 주어진다.

$$E_{1m} = \frac{2E_d}{\pi} \quad (E_{1m}: \text{기본파성분의 최대치}) \quad (2.13)$$

$$\therefore I_m = \frac{E_d}{|Z_i|} = \frac{2E_d \cos \phi}{\pi R_i} \quad (2.14)$$

따라서, Cz의 충전전 전류 Icz는

$$I_{\alpha} = I_m \cdot \sin \phi \quad (2.15)$$

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

Cz 충전시간은 식(2.16)으로 나타낼수 있다..

$$\therefore t_c = \frac{E_d \cdot c_z}{I_{\alpha}} = \frac{E_d \cdot c_z}{I_m \sin \phi} \quad (2.16)$$

그러므로 식(2.15), 식(2.16)에 따라서 Cz의 충전 시간 tc는 식(2.17)로 주어진다.

$$t_c = \frac{\pi C_z Z_o \cdot \left[\left(\frac{1}{Q_r} \right)^2 + \left(K_c \frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right)^2 \right]}{2 \left(K_c \frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right)} \quad (2.17)$$

공진콘덴서 C의 최대값은 다음식으로 주어진다.

$$V_{cm} = \frac{I_m}{\omega C} = \frac{2E_d}{\pi \omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{Q_r^2} + \left[K_c \frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right]^2}} \quad (2.18)$$

공진 주파수에서 이값은 최대가 되고 이때 공진 전압은

$$V_{cm} = \frac{2V_{DD}}{\pi} Q_r \quad (\text{단, } f_r = f_s)$$

인버터의 출력 Po는 식(2.19)로 주어진다.

$$P_o = \frac{2 E_d^2 R_L}{\pi^2 Z_o^2 \left[\frac{1}{Q_r^2} + \left(K_c \frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right)^2 \right]} \quad (2.19)$$

공진주파수에서 인버터는 최대전력으로 동작하고, 이때의 출력은 식(2.19)으로 주어진다.

$$P_o = \frac{2 E_d^2 R_L}{R_i^2 \pi^2} \quad (\text{단, } fr = fs \text{에서}) \quad (2.20)$$

3. 특성 평가

인버터의 특성평가를 위해 각 회로 변수들을 Normal-ize하였고, Normalize된 기준 값은 표1.에 기술 되어져있다. 유도 가열 부하에서 결합 계수(k)의 변화의 의미는 인버터의 가열 코일에 대해 유도 가열 부하가 구조적으로 연결된 형상, 가열 코일과 피 가열체와의 거리, 또 인버터 운전중 유도 가열 부하의 이동등으로 나타낼수 있다. 따라서 인버터 동작중 유도 가열 부하가 이동하는 경우, 인버터의 특성의 변화는 k의 특성을 살펴봄으로써 명확히 규정할수 있다

표 1. 정규화 파라메타
Table 2. Normalized parameter

	Reference Values	Normalized Values
공진 전압	E_d	$V_{cmN} = V_{cm} / E_d$ $= 2Z_o f_o / \pi Z_i $
공진 전류	$I_s = E_d / Z_o$	$I_{mN} = I_m / I_s$ $= 2Z_o / \pi Z_i $
Time	Tr	$t_{cN} = t_c / Tr$ $= \frac{\pi C_o R_i}{(2Z_o \sin \phi \cos \phi)}$
Frequency	$f_r = 1/2\pi\sqrt{LC}$	$f_o = f_r / f_s$
Power	$P_s = P_o / E_d I_s$	$P_{oN} = P_o / P_s$ $= \frac{2R_L Z_o}{\pi^2 Z_i ^2}$

(Remarks)
 f_s : Operating Frequency of Inverter
 f_r : Resonant Frequency of Load Circuit
 Tr : Resonant Period of Load Circuit
 $C_o = C_z / C$

그림4 (a)에서 k가 작아질수록 인버터의 출력은 급격히 줄어든다. 이는 가열코일에 흐르는 전류에 의한 자계 에너지가 낮은 결합계수로 인해 2차측 부하로 잘 전달되지 못하기 때문이다.

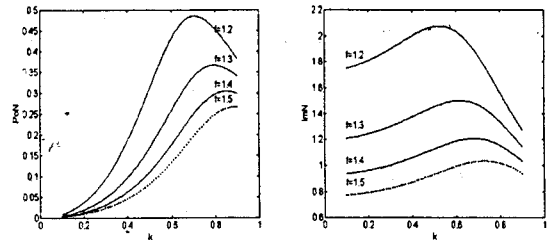
그러나 스위치의 전류는 결합 계수 k의 감소에 대해 오히려 증가한다.(그림4 b) 따라서 본 논문의 인버터로 유도 가열 부하를 운전할 경우, 부하의 이동시 과 전류에 대한 주의가 필요하다. 인버터의 제어부에서 주파수 제한 등의 방법을 통해 과도한 전류가 흐르지 않는 등의 대책이 필요하다.

유도 가열부하에서 결합 계수외에 또 하나의 부하특성으로 나타나는 것이 부하의 물성적인 특성이다. 이러한 재질에 대한 특성을 전기적인 입장에서 나타낸 변수가 τ 이다. τ 값에 대한 인버터의 특성을 해석함으로써, 부하의 변동에 대한 인버터의 전체적인 특성을 알수 있게 된다.

그림 5.는 k=0.8일 경우, 부하 Q_L 이 변할 경우의 특성이다. $Q_L(k, \tau) = \omega_r L / R_o$ 이므로, 부하가 고정될 경우 Q_L 의 특성은 유도 가열 부하 물성적 특성인 τ 에 대한 특성이 된다. Q_L 값의 증가에 따라 인버터의 출력 및 스위칭전류 증가됨을 볼수 있다.

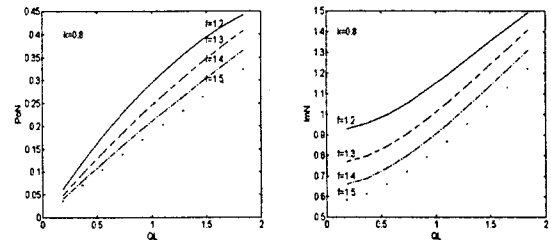
유도 가열을 금속 용해 등에 응용될 경우, 피가열체가 큐리에 온도시상온도가 상승하므로 인버터의 운전중에 피가열체의 재질이 급격하게 변화하므로, Q_L 의 변

화를 가져오게 된다.



(a) k에 따른 출력특성 (b) k에 따른 전류특성
그림 4. 결합계수 k에 따른 특성

Fig 4. Characteristics to k
(a) Characteristics of PoN to k
(b) Characteristics of current to k



(a) Q_L 에 따른 출력특성 (b) Q_L 에 따른 전류특성
그림 5. 부하 시정수(τ)에 대한 특성

Fig 5. Characteristics to Q_L
(a) Characteristics of PoN to Q_L frequency(f_o)
(b) Characteristics of current to Q_L

4. 결론

본 논문은 유도 가열 부하를 대상으로 SEPP형 고주파 공진 인버터의 특성을 해석하였다. 유도 가열 부하의 특성인 피 가열체와 가열 코일과의 관계 및 피 가열체의 재질에 따른 특성을 전기적인 등가 회로로 변환하여, 이를 정성적으로 해석함으로써, 유도 가열 부하의 운전시 인버터의 특성을 평가하였으며, 이를 통해 인버터의 설계나 운전시 인버터의 운전 범위를 일목 요연하게 알수 있게 하였다.

또한, 인버터를 고주파로 운전하기 위하여 ZVS기법을 이용하여 스위칭 손실을 최소화하였다.

향 후 이러한 평가를 토대로 인버터의 실제적인 설계법을 도출해내고 고주파 인버터의 응용 장치에 관하여 연구를 계속 할 계획이다.

(참고 문헌)

- [1] W.Koertzen: "Design of the Half-Bridge, Series Resonant Converter for Induction cooking" -ormers", IEEE, Ind. pp.729 ~ 735, 1995
- [2] H.W.E.Koretzen: "An Induction of the analytical computation of Inductance and ac Resistance of the Heatcoil for the Induction Cookers", IEEE, Ind. pp. 1113 ~ 1119, 1992
- [3] 문창수: "Zero Voltage Switching을 이용한 부하 공진형 고주파 인버터의 특성해석", 영남대학교 석사 학위논문, 1993, 2
- [4] 김종해, 민병재, 노채균, 김동희, 문창수: "ZVS를 이용한 고주파 공진 인버터(SEPP형) 특성해석과 설계", 전력전자학회지, pp. 19 ~ 27, 1997, 12
- [5] R.L.Steigerwald: "A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies", IEEE Tran. Power Elec., vol.3, No 3, April 1988
- [6] L.Hobson: "Transistorized power supplies for induction heating", INT.J.Electronics, vol.59, No.5, pp.543-552, 1985.