

브리지회로의 개선에 의한 직병렬 공진 고주파 유도가열 시스템의 실현

류민섭, 홍순일
부경대학교 전기공학과

Implement of Serial-Parallel Resonant High-Frequency Induction Heating System by Improvement of Bridge Circuit

Ryu Min-Seob, Hong Soon-Il
Pukyung National University

Abstract - 고주파 열처리 유도로의 설계에서 품질의 향상을 위하여 인버터의 고주파 기술이 요구되고 있다. 본 연구에서는 고주파 유도가열 장치의 대용량, 고주파화를 실현하기 위하여 회로 설계 기술과 제어방식을 제안하였다. 부하 공진 인버터는 H형 전-브리지로 구성하고 각 암 당 IGBT를 2병렬로 조합하여 구성하고 부하는 직병렬 공진회로로 구성한다. 스위칭 동작은 8개의 IGBT중 각 암 당 2개씩 순차제어하여 고속 대용량의 고주파 전력을 출력시킨다. 또한 스위칭은 스위치 턴온·오프시에 스위칭 손실을 줄이기 위해 ZVS기법을 도입한다. 제어는 고정주파수 PWM제어를 하여 전력 변환 효율을 극대화한다.

인버터 양단의 기본파 입력전압의 실효값은 $E_{IN} = V_s \cdot \sin \delta/2$ 이고 공진회로의 입력력 전압비는 식 (1)이 얻어진다.

$$\frac{V_0}{E_{in}} = \frac{RC_s s}{RL_{eq}C_s C_s s^3 + L_{eq}C_s s^2 + (RC_s + RC_L)s + 1} \quad (1)$$

여기서 C_s 는 직렬공진 콘덴서이고 C_L 는 병렬공진 콘덴서이다. 식 (1)의 분모를 실수부와 허수부로 분리하고 무차원 스위칭 주파수 y 를 도입하여 정리하면 식 (2)이 된다.

$$V_0/E_{IN} = 1/D_1 + jD_2 \quad (2)$$

여기서 $D_1 = 1 + (C_L/C_s)(1 - y^2)$

$$D_2 = Q_s [y - (1/y)]$$

$$Q_s = (\omega_s L_{eq}) / R' L = \sqrt{L_{eq}/C_s} / R' L \quad (3)$$

$\omega_s = 1/\sqrt{L_{eq}C_s}$ rad/s이므로 등가합성 인덕턴스는 $L_{eq} = L + L_p + L_s$ 이다. 그리고 무차원화 한 스위칭 주파수는 $y = f_0/f_s = \omega_0/\omega_s$ 이 된다. 여기서 f_0 는 출력주파수 이고 인버터의 스위칭 주파수에 의해 결정되며 식(3)에서 $\omega = \omega_0$ 가 된다. 식(4)에서 변환되는 출력 전압은

$$V_{0rms} = \frac{\sin(\delta/2)}{[D_1^2 + D_2^2]^{1/2}} p.u. \quad (4)$$

이고 $\delta = \pi$ 일 때 부하전류는 최대이고 출력전압도 최대로 된다. 식(4)에서 부하의 변화에 따라 요구되는 출력전압 V_0 는 δ 를 제어하여 얻을 수 있다. 인버터 출력단에서 본 직·병렬 공진회로의 합성임피던스는 다음과 같이 유도된다.

$$Z = \frac{a_2\omega^4 + b_2\omega^2 + c_2 + j(a_3\omega^3 + b_3\omega)}{a_1\omega^4 + b_1\omega^2 + c_1} \quad (5)$$

합성임피던스의 허수부를 "0"이라고 하면

1. 서 론

고주파 전력변환기의 인버터 분야에서는 다양한 변환 기술이 채택되고 있고 PWM 뿐만 아니라 공진 기술 원리도 오랜 시간 동안 연구되고 발전되어 왔다. 고주파 열처리 유도로의 설계에서 품질의 향상을 위하여 인버터의 고주파 기술이 요구되고 있다.

개발대상 연구 목표는 변압기 코일단 처리용 Cu 합금의 용해 주조 및 비철금속 파이프 용접을 목적으로한 산업용 용접기 연구의 일환으로 IGBT를 이용한 전압형 인버터 직·병렬공진회로 방식의 유도가열 장치를 개발하는 것이다.

반도체 스위치에 의한 공진 전압회로는 브리지 형태로 거의 유사하게 되어 있고 그 동작은 각 ARM의 스위칭 소자는 병렬회로 2개가 동시에 ON, OFF한다. 따라서 각 ARM의 스위칭 소자는 항상 1/2주기씩 반복 동작하므로 스위칭 소자가 OFF되는 시간이 짧고 ON, OFF의 주기가 짧기 때문에 주파수 특성이 매우 불리하고 고주파화가 어렵다. 그러나 본 연구에서는 각 ARM의 스위칭 소자가 항상 1/4주기씩 반복 동작되도록 회로와 제어알고리즘을 구성함으로써 소자의 한계주파수 특성보다 2배 이상의 주파수 발생이 가능하며 병렬회로수에 따라 1/8주기, 1/16주기의 동작이 가능하다.

2. 고주파 유도가열 시스템

본 연구에서 제안한 고주파 열처리 유도장치는 인버터, 고주파 변압기, Working coil 및 제어부 등으로 구성되고 고정 펄스폭 PWM 제어이다.

인버터의 PWM제어 기술을 이용한 스위칭 순서는 한 제어신호 주기 내에서 H형 브리지의 각 암에는 처음 1/2주기에 스위치 S1, S2(모드1) 및 S5, S6(모드2)가 다음 1/2주기에 스위치 S3, S4(모드3) 및 S7, S8(모드4)가 순차로 동작한다. 그리고 전력제어를 위한 각 스위치의 동작은 전압영점에서 스위칭하는 영전압 루프동작 (Zero volt loop operation)을 채택한다.

$a_3\omega^3 + b_3\omega = 0$ 이고 $\omega = \pm \frac{b_3}{a_3}$ 에서 공진 한다.

PU 단위의 등가 임피던스는 식 (6)과 같이 놓고 식 (5)에서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Z_{eqpu} = \frac{B_1 + j B_2}{B_3} \quad p.u. \quad (6)$$

여기서, $B_1 = [(Q_s/y)(C_s/C_t)]^2$

$$B_2 = Q_s[y - (1/y)] B_3 - (Q_s/y)(C_s/C_t)$$

$$B_3 = 1 + [(Q_s/y)(C_s/C_t)]^2$$

무차원 PU로 표시한 최대인버터 출력전류는 스위칭 소자로 흐르는 전류와 같고 식 (7), (10)에서 다음이 된다.

$$I_{ppu} = \sin(\delta/2) / |Z_{eqpu}| \quad p.u. \quad (7)$$

여기서 I_{ppu} 는 Q_s 및 y 의 함수임을 알 수 있고 최대 부하 전류에 상응하는 첨두전류로(Peak current)이다. 이상 공진 인버터 설계에 필요한 식을 유도하였고 인버터는 공진상태에서 최고 출력이 나오도록 각 파라미터를 설계할 수 있다.

3. 시뮬레이션

시뮬레이션은 시스템 등가모델에서 설계한 사양에 의 해 파라미터값을 변화시키면서 Pspice 프로그램으로 행 한다. 실험은 정전용량 비 C_s/C_t 와 스위칭 주파수를 변화하면서 입력 구형파 전압, 부하전류 및 부하전압 파형을 관측하였다.

그림 1은 정전용량비 $C_s/C_t=2$, 부하저항 $R_t=18\Omega$, $C_s=0.0527\mu F$, $C_t=0.0276\mu F$ 일 때 인버터 출력주파수 40, 30(KHz)로 변화시키면서 입력전압, 출력전압 및 출력전류를 측정 한 것이다. 인버터 출력 주파수가 40(KHz)에서는 공진 상태로 되므로 출력이 최대로 되고 부하전압 및 전류가 동위상이 됨을 알 수 있다. 그러나 주파수가 30(KHz)에서는 공진 상태를 벗어나서 부하전류와 전압이 급격히 감소하고 있다.

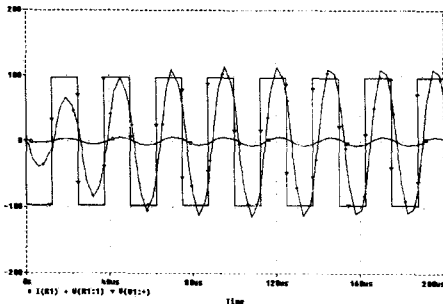


그림 1(a) 동작 주파수 40KHz일 때의 출력 파형

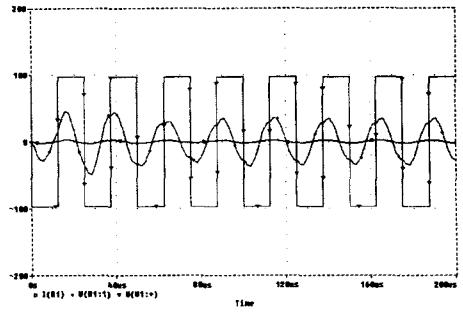


그림 1(b) 동작 주파수 30KHz에서의 출력 파형

그림2는 정전용량비 $C_s/C_t=1$, 출력주파수 40, 30(KHz)일 때 파형이고 정전용량비 $C_s/C_t=2$ 일 때와 비교해 보면 30(KHz)에서는 출력전압에 공진점이 2개 가 나타나고 파형의 외형이 많이 생긴다.

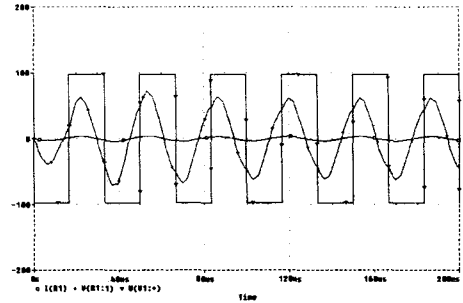


그림 2(a) 동작 주파수 40KHz일 때의 출력 파형

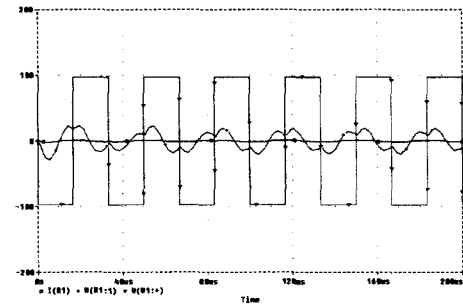


그림 2(b) 동작 주파수 30KHz일 때의 출력 파형

4. 결 론

고주파 유도 가열 장치에서 전력용 반도체 스위치 IGBT를 이용한 2병렬 브리지회로 방식의 전압형 인버터를 제안하였다.

1) 직렬공진 콘덴서와 병렬공진 콘덴서의 정전용량비 $C_s/C_t=2$ 인 경우 각부의 동작 파형을 관측한 결과에서 알 수 있는 것과 같이 양호하게 동작하고 안정한 출력을 얻을 수 있음을 확인하였다.

2) 인버터는 일정 PWM 제어방식을 채택함으로써 전력 변환 효율이 98%로 양호하고 공진부하에서 최대효율을 전달하는 것이 가능함을 실험으로 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] S.Bottari, L.Malesani & P.Tenity, " High Frequency 200KHz Inverter for Induction Heating Applications", IEEE PESC, pp.308-309, 1985.
- [2] 難波江, " STIお用いた 電流形インバータ 並列共振回路 方式の高周波誘導加熱装置 電學論 D, 107, 906 소화62-7
- [3] R.L Steigerwald, " A comparison of half bridge resonant converter topologies, " IEEE Power. Electron., vol. 3, pp. 174-182, Apr. 1988.