

유도가열 부하를 갖는 인버터 회로의 해석에 관한 연구

⁰ 노희석, 권경안, 양우종
LG 전자 생활 시스템 연구소

The Analysis of Inverter Circuit with Induction Heating Load

H. S. Roh, K. A. Kwon, W. J. Yang
LG Electronics Inc. Living System Laboratory

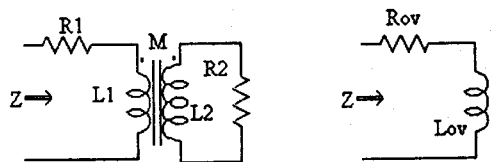
Abstract - This paper proposes an analysis of an inverter circuit which has an induction heating load. Two major kinds of the inverters are E-class quasi resonant and half-bridge type. The analyses of induction heating load property and operation property are introduced. A simulation program which implements those properties is also introduced. The results of the simulation program are verified through experimental results.

1. 서론

최근, 주요 업계를 중심으로 유도가열 원리를 IH 밥솥 등 첨단 가전제품에 적용하는 등, 유도가열의 응용기술이 새롭게 주목받고 있다. 유도가열이란 Faraday의 전자유도 현상에 의한 것으로 유도가열 코일에 전류가 흐를 때 유기되는 자장이 철재용기와 결합하여 와전류가 흐르게 함으로써 용기를 가열하는 것이다. 이러한 유도가열을 응용한 조리기는 가열효율이 높고, 안전하며, 배출 가스 등의 오염물질이 거의 없어 위생적인 면 등 많은 장점을 가지고 있다. 이러한 밥솥 등 조리기에 이용하는 유도가열 시스템의 회로형식은 비교적 간단하지만 비선형 특성에 의한 해석의 곤란, 일반 상용 PROGRAM의 적용시 한계 및 불합리성, 유도가열 부하 MODELING의 어려움 등으로 인해 현실적으로 simulation기법을 이용한 설계에는 많은 어려움이 있었다. 따라서, 본 논문에서는 유도가열 부하 MODELING기법이 적용된 해석 및 구동 인버터의 특성, 영전압 스위칭 특성, 실험결과와의 비교 등을 소개한다.

2. 유도가열 부하 해석

유도 가열회로에서 WORK-COIL과 용기로 이루어진 부하를 전기회로적으로 MODELING하면 그림 1. (a)와 같이 표현할 수 있다. 그림 1. (b)와 같이 2차측 부하를 1차측으로 변환하여



(a) MODELING한 유도가열 부하 (b) 1차측에서 본 유도가열 부하
그림 1. 등가 MODELING한 유도가열 부하

부하의 전체 IMPEDANCE를 구하면

$$Z = \left\{ R_1 + \left(\frac{(\omega M)^2 R_2}{R_2^2 + (\omega M)^2} \right) \right\} + j\omega \left\{ L_1 - \left(\frac{(\omega M)^2 L_2}{R_2^2 + (\omega M)^2} \right) \right\} \quad (1)$$

이다. 부하의 결합계수 k, 용기 특성 상수 τ는

$$k = M / \sqrt{L_1 L_2} \quad (2)$$

$$\tau = L_2 / R_2 \quad (3)$$

로 정의되므로, (1)식을 다시 표현하면

$$Z = \left\{ R_1 + \left(\frac{\omega^2 k^2 \tau L_1}{1 + \tau^2 \omega^2} \right) \right\} + j\omega \left\{ L_1 - \left(\frac{\omega^2 k^2 \tau^2 L_1}{1 + \tau^2 \omega^2} \right) \right\} \\ = (R_1 + R_o) + j\omega(L_1 - L_o) \quad (4)$$

이다. (2), (3)식을 정리하면

$$k = \sqrt{\frac{(1 + \tau^2 \omega^2)(L_o - L_1)}{\tau^2 \omega^2 L_1}} \quad (5)$$

$$\tau = \frac{L_o}{R_o} \quad (6)$$

로 표현할 수 있다. τ는 용기가 WORK-COIL에 미치는 영향을 나타내는 것으로 부하의 Q값(주파수에 따른 에너지 밀집도)을 좌우한다. k는 용기와 가열코일 간의 전자기적 밀착특성을 나타낸다. 이상의 식들에서 τ, k는 주파수 ω에 따라 변화하며 τ, k에 따라 부하의 특성이 크게 변화함을 알 수 있다. 그리고, IMPEDANCE Z는 주파수 ω 및 온도에 따라서 변화한다.

3. 구동 인버터의 특성

3.1. E급 준공진 인버터의 특성

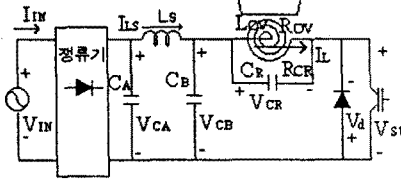


그림 2. E급 준공진 인버터 회로

이 인버터의 동작상태를 그림 3.과 같이 4개의 MODE로 세분할 경우 정상적인 E급 동작MODE는 M1 → M2 → M3의 순으로, 단락 동작MODE는 M1 → M2 → M4의 순으로 변화한다.

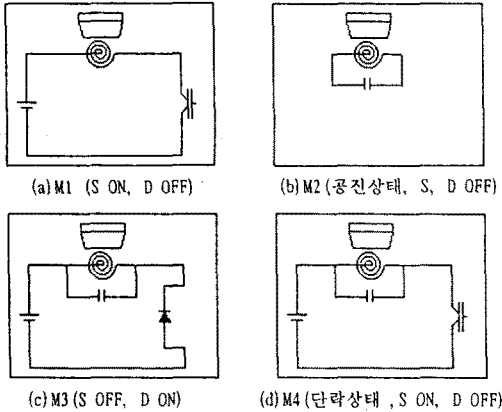


그림 3. E급 준공진 인버터의 각 MODE별 전류 경로

이 회로의 모드별 상태 방정식은 다음과 같다. (그림 2. 참조)

(a) M1	(b) M2
$\dot{I}_L = (V_{CB} - R_{ov}I_L) / L_{ov}$	$\dot{I}_L = (V_{CB} - R_{ov}I_L) / L_{ov}$
$\dot{V}_{CR} = (I_{LS} - I_L) / (C_R + C_B)$	$\dot{V}_{CR} = -I_L / C_R$
$\dot{V}_{CB} = (I_{LS} - I_L) / (C_R + C_B)$	$\dot{V}_{CB} = I_{LS} / C_B$
(c) M3	(d) M4
$\dot{I}_L = (V_{CB} + V_d - R_{ov}I_L) / L_{ov}$	$\dot{I}_L = (V_{CB} - R_{ov}I_L) / L_{ov}$
$\dot{V}_{CR} = (I_{LS} - I_L) / (C_R + C_B)$	$\dot{V}_{CR} = (V_{CB} - V_{CR}) / R_{CR} / C_R$
$\dot{V}_{CB} = (I_{LS} - I_L) / (C_R + C_B)$	$\dot{I}_{CR} = C_R V_{CR}$
(e) 모든 MODE의 경우	
● $I_{IN} \leq 0$ 인 경우	● $I_{IN} \geq 0$ 인 경우
$\dot{I}_{IN} = (V_{IN} - R_{e}I_{IN} - V_{CA}) / L_e$	$\dot{I}_{IN} = (V_{IN} - R_{e}I_{IN} + V_{CA}) / L_e$
$\dot{V}_{CA} = (I_{IN} - I_{LS}) / C_A$	$\dot{V}_{CA} = -(I_{IN} + I_{LS}) / C_A$
$\dot{I}_{LS} = (V_{CA} - V_{CB}) / L_s$	$\dot{I}_{LS} = (V_{CA} - V_{CB}) / L_s$

(L_e, R_e 는 입력전원의 선로 IMPEDANCE)

3.2. Half-Bridge 인버터의 특성

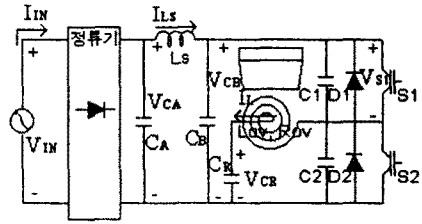


그림 4. Half-Bridge 인버터 회로

이 인버터의 동작상태를 그림 5.와 같이 5개의 모드로 구분할 때 정상동작은 M1 → M3 → M4 → M2 → M3 → M5 → M1의 순으로 변화한다.

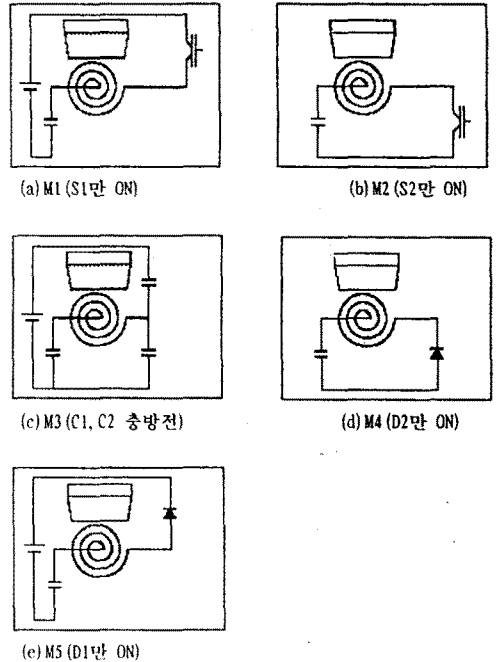


그림 5. Half-Bridge 인버터의 각 MODE별 전류 경로

이 회로의 모드별 상태 방정식은 다음과 같다. (그림 4. 참조)

(a) M1	(b) M2
$\dot{I}_L = (V_{CB} - V_{CR} - R_{ov}I_L) / L_{ov}$	$\dot{I}_L = -(V_{CR} + R_{ov}I_L) / L_{ov}$
$\dot{V}_{CR} = I_L / C_R$	$\dot{V}_{CR} = I_L / C_R$
$\dot{V}_{S1} = 0$	$V_{S1} = V_{CB}$
$\dot{V}_{CB} = (I_{LS} - I_L) / C_B$	$\dot{V}_{CB} = I_{LS} / C_B$
(c) M3	
$\dot{I}_L = (V_{CB} - V_{CR} - V_{S1} - R_{ov}I_L) / L_{ov}$	
$\dot{V}_{CR} = I_L / C_R$	
$\dot{V}_{S1} = I_L / (C1 + C2)$	
$\dot{V}_{CB} = -C1 I_L / (C1 + C2) / C_B$	

(d) M4 $\dot{I}_L = -(V_{CR} + V_{D2} + R_{OV}I_L) / L_{OV}$
 $\dot{V}_{CR} = I_L / C_R$
 $V_{S1} = V_{CB} + V_{D2}$
 $\dot{V}_{CB} = I_{LS} / C_B$

(e) M5 $\dot{I}_L = (V_{CB} - V_{CR} - V_{S1} - R_{OV}I_L) / L_{OV}$
 $\dot{V}_{CR} = I_L / C_R$
 $V_{S1} = -V_{D1}$
 $\dot{V}_{CB} = (I_{LS} - I_L) / C_B$

(f) 모든 MODE의 경우

● $I_{IN} \geq 0$ 인 경우 $\dot{I}_{IN} = (V_{IN} - R_{E}I_{IN} - V_{CA}) / L_e$
 $\dot{V}_{CA} = (I_{IN} - I_{LS}) / C_A$
 $\dot{I}_{LS} = (V_{CA} - V_{CB}) / L_s$

● $I_{IN} \leq 0$ 인 경우 $\dot{I}_{IN} = (V_{IN} - R_{E}I_{IN} + V_{CA}) / L_e$
 $\dot{V}_{CA} = -(I_{IN} + I_{LS}) / C_A$
 $\dot{I}_{LS} = (V_{CA} - V_{CB}) / L_s$

(단, L_e, R_e 는 입력전원의 선로 IMPEDANCE)

4. 영전압 스위칭 특성 해석

영전압 스위칭 특성이란 인버터 회로에 있어서 스위칭의 안전 동작 여부를 결정짓는 중요한 특성으로 스위치의 파손방지 및 스위칭 손실을 최소화하기 위해 스위치 전압이 0 [V] 일 때 스위치가 TURN ON하는 현상이다. HALF-BRIDGE 인버터의 경우, 스위칭 주파수가 TANK의 공진 주파수보다 크고, 부분공진 CAPACITOR의 충방전을 완전히 할 수 있는 충분한 DEAD-TIME을 확보해야 영전압 스위칭이 가능하다. 스위칭 주파수, 부하 inductance, 공진 capacitance, 보조공진 capacitance 등의 PARAMETER값이 달라짐에 따라 영전압 스위칭 여부가 결정된다. 따라서 선택된 회로정수 PARAMETER들의 일정범위에 대해 반복 simulation함으로써 ZVS 가능영역의 판정도 가능해진다. E급 준공진 인버터는 M3을, HALF-BRIDGE 인버터는 M4와 M5를 매주기마다 거쳐야만 영전압 스위칭을 한다.

5. PROGRAM 소개

전술한 유도부하 MODELING을 적용한 해석 PROGRAM의 형식은 표1.과 같다. 그리고, 이 형식은 E급 준공진 인버터와 Half-Bridge 인버터에 공통으로 적용된다.

표1. PROGRAM 형식

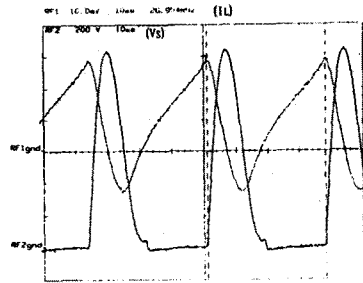
PASSIVE 특성	
부하 특성	부하의 k, τ 등을 해석
POWER 특성	동작 주파수 별 POWER 분포 해석
ACTIVE 특성	
WAVE 특성	회로소자의 전압, 전류 파형 해석
MODE 특성	MODE 변화 추이 해석
ZVS 특성	PARAMETER에 대한 ZVS가능영역 해석
DEVICE 특성	각 소자의 전압, 전류의 허용치 해석

6. 실험결과와의 비교

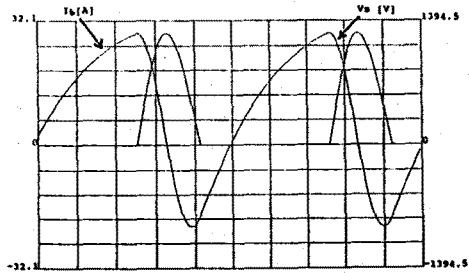
본 실험에 사용된 해석 ALGORITHM은 일반적인 RUNGE-KUTTA 방정식을 사용하였다. 한편, 실험시에 발생하는 열로 인한 온도상승때문에 WORK-COIL의 INDUCTANCE, 저항이 변화하여 실제로 LCR METER로 측정하는 값과는 달라진다. 그래서, ACTIVE 해석시에는 INDUCTANCE 및 저항의 보정계수 L_r, R_r 등을 부하INDUCTANCE L_{ov} , 부하저항 R_{ov} 에 곱하여 해석한다.

6.1. E급 준공진 인버터 회로

실험대상 MODEL은 철계 CLAD-METAL 용기를 가지는 RJ-IH181H 밥솥으로 하였다. 그리고, 부하저항 $R_{ov} = 7.49 [\Omega]$, 부하 INDUCTANCE $L_{ov} = 139.7 [\mu H]$ 를 25 [kHz]에서 LCR meter (HP4284A)로 측정하였다.



(a) 실험 결과



(b) 시뮬레이션 결과

그림 6. 실험 결과와 시뮬레이션 결과의 비교

두가지를 비교 분석한 결과는 그림 6. 및 표2. 와 같다.

표2. 비교표 (I)

	실험결과	SIMULATION 결과	오차 [%]
최대 공진 전압 Vc	1210 [V]	1255 [V]	4
최대 부하 전류 IL	29 [A]	29 [A]	0

6.2. Half-Bridge 인버터 회로

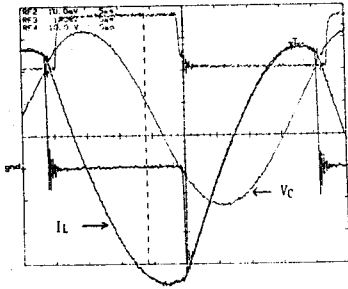
본 결과는 아래와 같은 부하조건 하에서 실험한 결과이다.

- 용기종류 - 철계 CLAD-METAL 용기
- 물의 양 - 2000 [cc]
- 초기 수온 - 20~30 [°C]
- 부하 저항 $R_{ov}=1.87 [\Omega]$, 부하 INDUCTANCE $L_{ov}=76.1 [\mu H]$ 를 25 [kHz]에서 LCR meter (HP4284A)로 측정

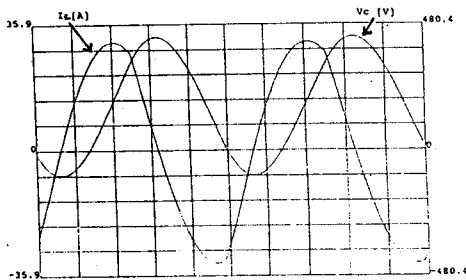
두가지를 비교 분석한 결과는 그림 7. 및 표3. 과 같다.

표3. 비교표 (1)

	실험결과	SIMULATION 결과	오차 [%]
최대 공진 전압 V_c	420 [V]	432 [V]	2.8
최대 부하 전류 I_L	38 [A]	31 [A]	18.5



(a) 실험 결과



(b) 시뮬레이션 결과

그림 7. 실험 결과와 시뮬레이션 결과의 비교
전체적인 파형모양은 유사하게 나옴을 알 수 있다.

7. 결론

본 논문에서는 유도가열 부하인 금속용기를 전기회로적으로 MODELING하여 해석하는 방법을 소개하고, 이 방법에 의해 유도가열 부하를 갖는 E급 준공진 인버터 및 Half-Bridge 인버터 회로에 대한 해석 및 개발 PROGRAM을 소개하였다. 또한 이의 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교할 때 현실적으로 설계에 적용할 수 있음을 확인하였다. 앞으로의 연구 과제로는 온도 및 주파수 변화에 따른 유도가열부하의 특성 변화 해석을 들 수 있다.

참고문헌

- [1] 大森 英樹, '誘導加熱 調理器用 一石共振形 高周波 인버터에 관한 研究', 神戸大 博士論文, 1988
- [2] 橋本 降志, 中岡 睦雄, 'ACTIVE FILTER 機能을 갖는 高周波 ZVS INVERTER SERIES의 CAD에 관한 研究', 神戸大 論文, 1993