

유도 가열용 Half-Bridge 인버터 시스템의 신뢰성 향상 및 최적제어에 관한 연구

A Study on the Reliability and Optimal
Control of Half-Bridge Inverter for
Induction Heating System

글 | 庾相鳳

(Yoo, Sang Bong)

건축전기설비·발송배전·전기안전·전기응용·소방설비기술사,
공학박사, 용인송담대학 산학협력처장 / 전기설비과 교수.

E-mail; sbyoo@dargon.ysc.ac.kr

목 차

1. 서론
2. 유도 가열의 원리 및 특성
3. 유도 가열용 Half-Bridge 인버터의 특성 개선
4. 유도 가열용 Half-Bridge 인버터 효율향상
5. 유도 가열용 Half-Bridge 인버터 최적 제어
6. 결론

Abstract

The purpose of this paper is to obtain the improved reliability and optimal control of the half-bridge inverter for induction heating system.

Parasitic inductance components within the inverter circuit for induction heating including the loss-less turn-off snubber capacitor considerably affect stable operation and noise level of the system. This paper analyzes the effect of the inductance in detail and presents a new snubber configuration suitable for the half-bridge inverter to effectively reduce it.

In the half-bridge inverter for induction heating the capacity of the loss-less snubber capacitor determines the switching losses because the zero voltage turn-on switching is used. However, the increase of the capacitor is limited by the system specifications, so that it is not easy work to reduce the switching loss. To effectively overcome the limitation, this paper introduces an active auxiliary resonant circuit suitable for the half-bridge inverter circuit, which operates actively according to the variation of load condition.

It is also one of the most important study issues for the half-bridge inverter driven induction heater that the development of optimal control scheme considering varied load condition should be achieved. The control strategy ensures a very stable operation of overall inverter system and zero voltage turn-on switching irrespective of sensitive load parameter variations, in particular, even under the non-magnetic materials.

1. 서론

유도 가열(Induction Heating)은 Faraday의 전자 유도 현상을 이용하는 것으로 가열 코일에 고주파 교류 전류가 흐를 때 발생하는 고주파 교류 자계 중에 도전성의 금속 물질을 위치시키면 금속 물질의 표면에 유도 와전류(Eddy Current)가 발생하여 금속의 표피 저항에 의한 Joule열이 발생하게 된다.

이러한 유도 가열 방식은 연소에 의한 발열과 비교하여 다음과 같은 우수한 장점을 지니고 있다.

- 가열효율이 높기 때문에(가스기기: 70%, 유도가열: 90%이상) 경제적이다.
- 신속한 가열을 통하여 Warming Up 등을 위해 소비되는 손실을 줄일 수 있다.
- 출력 및 온도의 제어가 용이하여 사용이 편리하다.
- 안전성이 뛰어나다.
- 배출가스 등의 오염 물질의 발생이 없어 위생적이며 청결하다.

1980년대 이후 MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor)와 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 그리고 MCT(Mos-Controlled Thyristor)와 SITH(Static Induction Thyristor) 등의 고속 스위칭이 가능한 전력용 반도체 소자들의 특성 개선 및 새로운 개발이 활발히 이루어지면서 유도 가열 시스템의 성능 및 적용 분야에 많은 변화가 일어나기 시작하였다. Class-E 나 Class-D 전력변환회로를 적용한 새로운 유도 가열 시스템의 개발이 이루어짐은 물론 특성 향상을 위한 많은 연구가 수행되었다.

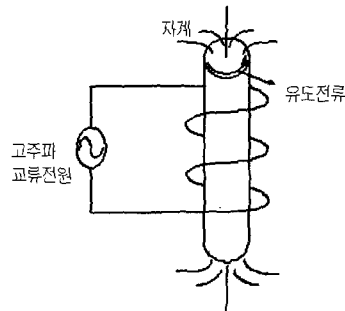
본 논문에서는 이러한 고주파 Class-D, 즉 Half-Bridge 인버터에 의해 구동되는 Induction

Heating Jar를 대상으로 유도 가열 시스템의 신뢰성을 향상시키고, 제어 특성을 최적화 시키고자 하는 연구를 수행하였다.

2. 유도 가열의 원리 및 특성

2.1 유도 가열의 원리

회로에 있어서 자속왜교수가 변화하면 그 시간적 변화율에 비례하는 기전력이 회로에 유기 된다는 Faraday의 전자계 유도 법칙을 기본으로, 유기된 기전력에 의해서 발생하는 전류, 즉 와전류(Eddy Current)에 의한 저항열이 유도 가열의 기본 원리이다. <그림 2-1>은 이러한 유도 가열의 원리를 설명하기 위한 기본 구성도 이다. 고주파 교류 전원, 가열 코일 그리고 피가열체(도전성의 금속)로 이루어져 있다. 고주파의 교류 전류에 의해 고주파의 자계가 형성되고, 자계 중에 위치한 금속의 표면에 와전류가 유기되어 Joule 열이 발생하게 된다 [1], [2].



<그림 2-1> 유도 가열 시스템의 기본 구성도

<그림 2-1>에서 보듯이 Solenoid Coil 중에 위치한 금속원주에 흐르는 유도 전류의 표면으로부터 깊이 $x(m)$ 에서의 전류 밀도 $i(A/m^2)$ 는 Solenoid Coil과 원주의 길이 및 직경이 충분히 크다고 가정하면, 식 (2-1)과 같다.

$$i = i_0 e^{-\left(\frac{x}{\delta}\right)} \quad (2.1)$$

여기서, i_0 : 금속 원주 표면의 전류 밀도 (A/m^2)

이러한 열의 대부분은 식 (2.2)로 표현되는 표피두께 δ (Skin Depth) 내에 분포하게 되며, δ 는 유도 가열의 여러 응용분야에서 인버터 동작 주파수를 결정하는 주요한 요소이다.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{4\pi^2 \times 10^{-7}} \cdot \frac{\rho}{\mu_r f}} \quad (2.2)$$

여기서, ρ :저항률, f :주파수, μ_r :비투자율

2.2 등가 회로 해석

일반적으로 유도 가열 시스템은 <그림 2-2>(a)와 같이 가열 코일과 부하를 각각 1, 2차측으로 하는 변압기 등가 모델로 표현되며, 이 등가 모델은 <그림 2-2>(b)와 같이 하나의 등가 인덕턴스 L_{eq} 와 등가 저항 R_{eq} 의 직렬 연결로 된 등가 회로가 된다.

이때 2차(표피) 저항 (R_2)은 식 (2.3)과 같으며

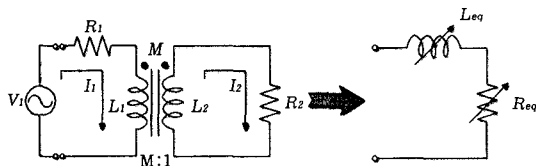
$$R_2 = \frac{\rho}{\delta} = K \cdot \sqrt{f \cdot \mu_r \cdot \rho} \quad (2.3)$$

여기서, $K=0.0019869$

2차측 발생 전력 (P_2)은 식 (2.4)와 같다 [3].

$$P_2 = R_2 \cdot I_2^2 = K \cdot (NI_1)^2 \cdot \sqrt{f \cdot \mu_r \cdot \rho} \quad (2.4)$$

여기서, N : 가열코일의 턴(Turn)수



(a) 변압기 등가 모델

(b) 등가 회로

<그림 2-2> 유도 가열 시스템의 등가 회로

또한, 등가화된 파라미터 L_{eq} , R_{eq} 는 식

(2.5), (2.6)과 같다.

$$R_{eq} = R_1 + \frac{(\omega M)^2 \cdot R_2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} = R_1 + A^2 R_2 \quad (2.5)$$

$$L_{eq} = L_1 - \frac{(\omega M)^2 \cdot L_2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} = L_1 - A^2 L_2 \quad (2.6)$$

여기서, 결합 인수

$$A = \frac{\omega M}{\sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}} \approx \frac{M}{L_2} \quad (\omega L_2 \gg R_2 \text{ 일 경우})$$

2.3 부하 특성

<그림 2-2>(b)에서 이 등가화된 파라미터 L_{eq} , R_{eq} 는 가열 부하의 크기와 위치, 가열 코일과 부하사이의 거리, 부하의 도전율과 투자율, 동작 주파수 등에 의해 변하게 되는 값이다.

그러나, 기존의 유도 가열 시스템은 일반적으로 높은 저항률과 비투자율을 가지는 자성체 부하에 대해 제한적으로 적용되어 왔고, 일반 가정에서 많이 사용되는 알루미늄과 같은 비자성체 부하에 대해서는 다음과 같은 이유로 실제적 적용에 많은 문제점을 지니고 있다.

- 낮은 저항률과 비투자율
- 부하 조건에 따른 민감한 파라미터 변동
- 민감한 출력 전력 제어 특성

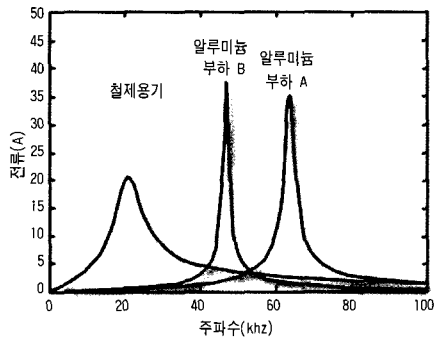
<표 2-1>은 20kHz의 주파수에서 금속 재질에 따른 전기적 특성을 나타내고 있다. <표 2-1>에서 확인할 수 있는 바와 같이, 알루미늄과 같은 비자성체는 철과 같은 자성체에 비해 훨씬 낮은

<표 2-1> 금속의 재질에 따른 전기적 특성

특성 \ 재질	철	알루미늄
저항률(ρ)	9.8×10^{-8}	2.5×10^{-8}
비투자율(μ_r)	100	1
표피두께(δ)	0.11	0.56
표피저항(R_2)	8.8×10^{-4}	0.45×10^{-4}

저항률과 비투자율을 가지므로 가열 부하로 비자성체를 적용 시에 출력 전력을 증가시키기 위해서는 식 (2.4)로부터 다음과 같은 조건이 필요하다.

- 가열 코일에 흐르는 전류의 주파수 증가
- 가열 코일의 턴(Turn) 수 증가



〈그림 2-3〉 부하 재질에 따른 출력 전류 특성

그러나, 이런 조건을 만족시키기 위한 주파수와 턴수의 증가는 가열 코일의 표피효과(Skin Effect)와 근접효과(Proximity Effect)로 인해 코일의 저항을 증가시켜 인버터 시스템의 효율을 저하시킬 뿐만 아니라 인버터 출력 전력 특성을 자성체에 비해 상대적으로 훨씬 더 민감하게 한다. 〈그림 2-3〉은 실제 유도 가열 시스템에서 부하 재질과 주파수에 따른 출력 전류 특성의 한 예를 나타낸다. 〈그림 2-3〉에서 확인할 수 있는 것처럼, 특히 비자성체 부하의 유도 가열 시 부하 파라미터 변화는 인버터 시스템의 전력 및 주파수 제어 시 심각한 문제점으로 작용한다 [3].

3. 유도 가열용 Half-Bridge 인버터의 특성 개선

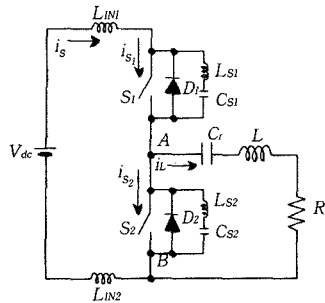
Half-Bridge 공진형 인버터는 스위치 양단간의 전압이 입력전압으로 구속된다는 장점에 의해 고전압, 고주파 시스템에서 널리 사용되어왔다. 하지만, Half-Bridge 공진형 인버터의 성능에 영

향을 주는 주요한 요인 중의 하나가 스위칭 손실이다. 공진 주파수 이하에서 동작하는 경우에는 영전류 스위칭에 의해 턴-오프 시 스위칭 손실이 제거되나 턴-온 시에는 큰 스위칭 손실이 발생한다. 또한, 턴-온과 턴-오프 과도상태에서 다이오드 전류의 역회복 전류가 스위치 전류에 큰 스파이크를 유발하게 된다. 이 스파이크 전류의 크기는 정상상태 전류의 크기에 비해 상당히 클 수가 (예:10배) 있으므로 스위칭 소자를 파괴할 수가 있으며, 심각한 스위칭 손실을 유발하게 된다.

따라서, 본 장에서는 지금까지 사용되어온 Half-Bridge 인버터에 대한 과도상태 특성을 고찰하고 부유 인덕턴스가 인버터 동작에 미치는 영향에 대해 해석하여 부유 인덕턴스에 의한 고주파 공진 현상을 저감시킬 수 있는 새로운 회로를 제시한다.

3.1 기존의 Half-Bridge 인버터

지금까지 유도 가열용 Half-Bridge 인버터에 대한 많은 연구가 이루어져왔다 [1], [4], [5]. 그러나, 기존의 해석은 시스템의 여러 곳에 존재할 수 있는 부유 인덕턴스의 영향을 고려하지 않았다. 부유 인덕턴스를 고려하면 턴-오프 시 무손실 스너버 커패시터와의 공진에 의해 심각한 고주파 공진 전류가 발생하게 되며, 부유 인덕턴스에 의해 과전압이 스위치에 인가된다. 고주파 공진 현상은 큰 di/dt 를 야기하므로 전자파 장애(EMI)문제를 심각하게 나타내며, 게이트 드라이버에 간섭을 일으켜 안정적 동작을 방해하는 원인이 된다. 또한, 이러한 문제는 전류가 작은 저출력의 시스템에서는 크게 문제가 되지 않을 수 있으나 유도가열 장치와 같은 고출력이 요구되는 시스템에서는 심각한 문제가 된다. 그러므로, 시스템의 보다 안정한 동작과 고주파 노이즈를 감소시키기 위해서는 부유 인덕턴스의 영향에 대한 고려를 반드시 해야 하며 그 영향을 줄여야만 한다.

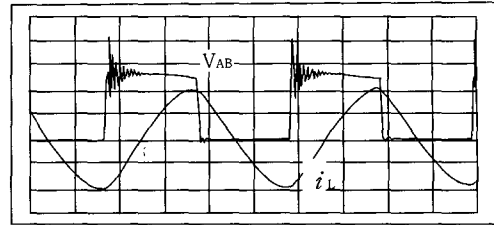


〈그림 3-1〉 부유 인덕턴스를 고려한 Half-Bridge인버터

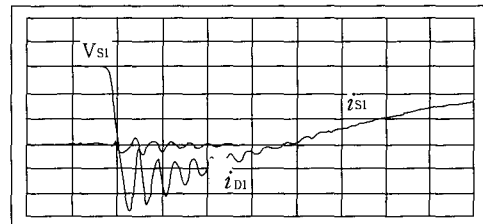
〈그림 3-1〉은 부유 인덕턴스의 영향을 고려한 Half-Bridge 인버터 회로이다. L_{IN1} 과 L_{IN2} 는 DC-Link와 스위치 사이에 존재하는 부유 인덕턴스를 나타낸 것이고, L_{S1} 과 L_{S2} 는 스위치와 턴-오프 스너버 커패시터 사이에 존재하는 부유 인덕턴스를 나타낸 것이다. 이 회로의 특성을 살펴보기 위한 시스템 파라미터 값은 〈표 3-1〉과 같으며, L_{IN1} 과 L_{IN2} 는 각각 $0.2\mu\text{H}$, L_{S1} 과 L_{S2} 는 각각 0.5nH 로 선정하였다. 〈그림 3-2〉는 부유 인덕턴스를 고려한 인버터 회로의 실험결과를 보여주고 있다. 실험결과에서 나타난 바와 같이 턴-오프 시 부유 인덕턴스와 스너버 커패시터의 공진에 의해 심한 고주파 공진전류가 발생하였고, 턴-오프 시 스위치에 과전압이 유기 되었다. 이것은 부유 인덕턴스를 고려하지 않은 상황하에서는 나타나지 않았던 현상이다.

〈표 3-1〉 시뮬레이션을 위한 시스템 파라미터 값

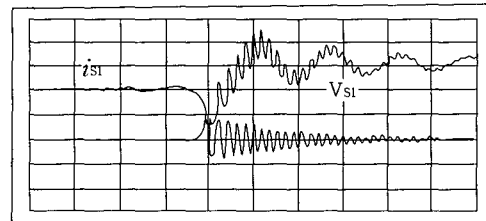
입력전압 (V_{dc})	150 (V)
부하저항 (R)	1 (Ω)
부하 공진커패시터 (C_r)	0.94 (μF)
부하 인덕터 (L)	70 (μH)
스너버커패시터 ($C_{S1,2}$)	33 (nF)
특성 임피던스 (Z_0)	8.63
양호도 (Q)	8.63
공진 주파수 (f_0)	19.6kHz
스위칭 주파수 (f_s)	25kHz
스위칭 주파수 비 (ω)	1.27
Dead Time	2 μs
출력전류 ($i_{L,max}$)	22.8A



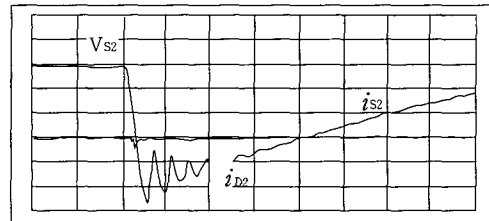
(a) V_{AB} , i_L (time : 10 $\mu\text{s}/\text{div.}$)



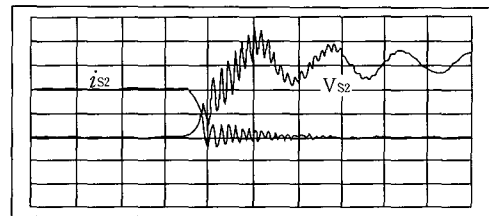
(b) 스위치 S_1 턴-온 시 V_{S1} , i_{S1} , i_{D1} (time : 0.5 $\mu\text{s}/\text{div.}$)



(c) 스위치 S_1 턴-오프 시 V_{S1} , i_{S1} (time : 2 $\mu\text{s}/\text{div.}$)



(d) 스위치 S_2 턴-온 시 V_{S2} , i_{S2} , i_{D2} (time : 0.5 $\mu\text{s}/\text{div.}$)

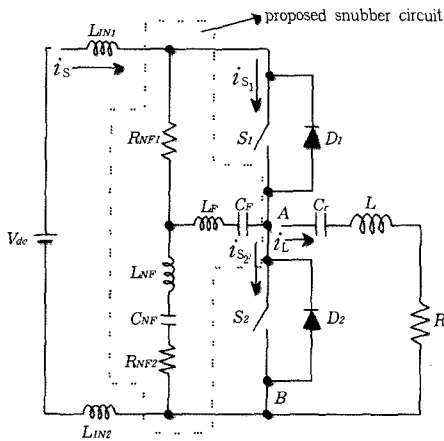


(e) 스위치 S_2 턴-오프 시 V_{S2} , i_{S2} (time : 2 $\mu\text{s}/\text{div.}$)

〈그림 3-2〉 부유 인덕턴스를 고려한 두 개의 턴-오프 스너버 커패시터를 사용한 Half-Bridge 인버터 회로의 전압, 전류 실험 파형 (전압 : 50V/div., 전류 : 10A/div.)

3.2 제안한 Half-Bridge 인버터

부유 인덕턴스와 스너버 커패시터와의 공진현상으로 인한 고주파 공진전류의 발생을 억제하며, 여러 문제점들을 해결하기 위하여 <그림 3-3>과 같은 Half-Bridge 인버터 회로를 새로이 제안하였다. 제안된 회로는 한 개의 턴-오프 스너버 커패시터(C_F), 과전압 스너버 커패시터(C_{NF})와 감쇄저항(R_{NF1} , R_{NF2})으로 이루어져 있으며, 스위치와 부하부는 기존의 Half-Bridge 인버터 회로와 동일하다. L_{IN1} , L_{IN2} , L_F , L_{NF} 는 제안된 회로의 특성을 고찰하기 위해서 임의로 선정된 부유 인덕턴스들이다. 스위치 S_1 과 S_2 의 턴-온 시 공진 주파수 이상에서 스위칭을 하여 영전압 턴-온이 이루어져 스위칭 손실이 영이 되도록 하였다.



<그림 3-3> 부유 인덕턴스를 고려하여 제안한 Half-Bridge 인버터

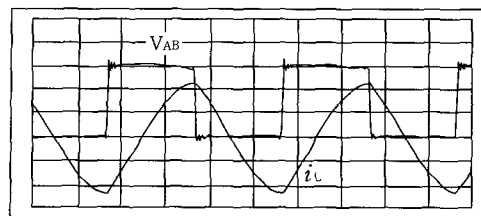
3.3 실험 결과 검토

새로이 제안하는 Half-Bridge 직렬 공진형 인버터 회로의 특성을 살펴보기 위해 <표 3-2>와 같은 시스템 파라미터 값을 갖고 시뮬레이션 및 실험을 하였다. <표 3-2> 외의 다른 파라미터 값은 <표 3-1>과 동일하다.

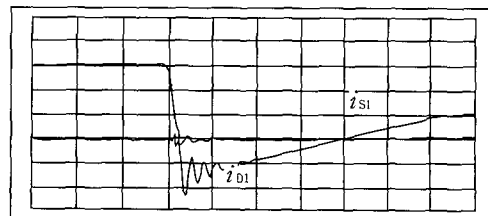
<표 3-2> 제안한 Half-Bridge 인버터 회로의 시뮬레이션을 위한 시스템 파라미터 값

부유 인덕턴스 (L_{IN1})	0.2 (μH)
부유 인덕턴스 (L_{IN2})	0.2 (μH)
부유 인덕턴스 (L_F)	0.5 (nH)
부유 인덕턴스 (L_{NF})	0.5 (nH)
감쇄저항 (R_{NF1})	0.1 (Ω)
감쇄저항 (R_{NF2})	1 (Ω)
턴-오프 스너버 (C_F)	66 (nF)
과전압 스너버 (C_{NF})	2 (μF)

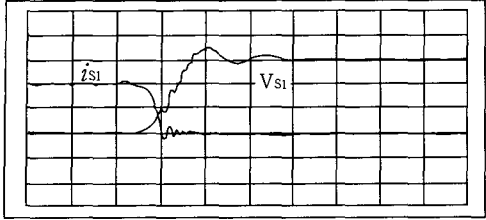
<그림 3-4>에는 실제 시스템을 제작하여 실험한 실험 파형을 제시하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 고주파 공진현상이 현저히 감소되었으며 과전압 발생이 상당히 줄어든 것을 확인 할 수 있었다. 실제 시스템에서는 과전압의 크기가 DC-Link 전압의 약 17%인 25V 정도 발생하여 커패시터 스너버만을 사용한 경우의 실험 결과에서 나타난 70V보다 약 30% 더 줄어든 것으로 확인되었다. 또한, 제안한 회로의 경우 과전압 커패시터의 값을 조절함에 따라 과전압 발생을 더 억제할 수 있으므로 고 출력의 시스템으로 갈수록 더 안정된 회로 동작을 보장할 수 있다.



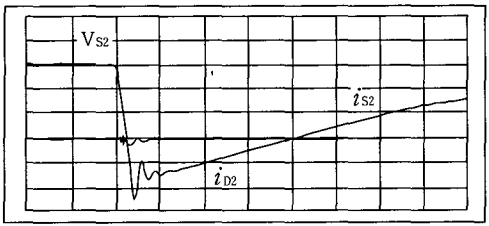
(a) V_{AB} , i_L (time : 10 $\mu\text{s}/\text{div}$.)



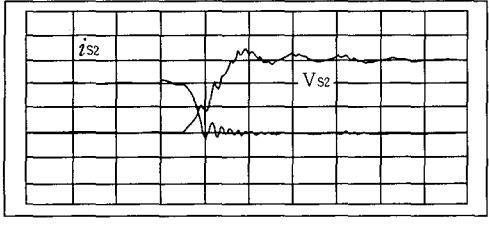
(b) 스위치 S_1 턴-온 시 V_{S1} , i_{S1} , i_{D1} (time : 0.5 $\mu\text{s}/\text{div}$.)



(c) 스위치 S₁턴-오프 시 V_{S1}, i_{S1} (time : 2μs/div.)



(d) 스위치 S₂턴-온 시 V_{S2}, i_{S2}, i_{D2} (time : 0.5μs/div.)



(e) 스위치 S₂턴-오프 시 V_{S2}, i_{S2} (time : 2μs/div.)

(그림 3-4) 제안한 Half-Bridge 인버터 회로의 전압, 전류 실험파형(전압: 50V/div., 전류: 10A/div.)

4. 유도 가열용 Half-Bridge 인버터 효율향상

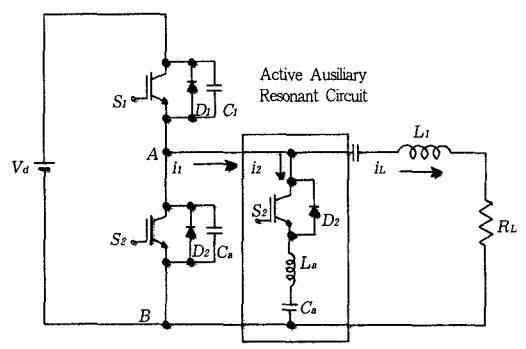
유도 가열용 인버터에서는 낮은 도통 손실을 갖는 IGBT의 특성은 유도 가열과 같은 큰 공진 전류가 흐르는 시스템에 매우 적합하다. 그러나, IGBT는 구조적으로 후미 전류(Tail-Current)가 발생하는 특성을 가지고 있어 스위칭 손실면에서 상대적으로 불리한 단점을 지니고 있다.

특히, IGBT와 같이 후미 전류가 발생하는 경우에는 턴-오프 스위칭 손실을 줄이기 위해서는 상대적으로 큰 용량의 턴-오프 스너버를 사용해야만 한다. 하지만, 기존의 Half-Bridge 인버터

에서는 동작 주파수에 따라 턴-오프 과도 상태 동안에 턴-오프 스너버가 완전히 충·방전하기에 충분한 전류를 공급해 주지 못하는 주파수 영역이 발생하기 때문에 턴-오프 스너버의 용량을 상대적으로 크게 사용할 수 없다. 따라서, 큰 용량의 턴-오프 스너버를 사용하기 위해서는 이와 같은 문제를 해결해야만 한다. 또한 자성체 및 비자성체 유도 가열용 IGBT Half-Bridge 인버터를 위한 능동 보조 공진 회로를 사용하여 Half-Bridge 인버터의 턴-오프 스너버에 따른 부하 제한성을 해결하고자 한다. 또한, 사용한 능동 보조 공진 회로는 큰 용량의 무손실 턴-오프 스너버 커패시터를 활용할 수 있도록 하는 특성을 갖는다.

4.1 능동 보조 공진회로를 갖는 Half-Bridge 인버터

(그림 4-1)은 능동 보조 공진 회로를 갖는 Half-Bridge 인버터 시스템을 보여주고 있다. 능동 보조 공진회로는 스위치 S_a와 D_{a1}, 공진소자 L_a, C_a로 이루어져 있다. 제안한 능동 보조 공진 회로는 턴-오프 스너버의 용량이 증가하더라도 동작 주파수내의 전 범위에 걸쳐 턴-오프 스너버가 항상 충방전 할 수 있는 최소 전류를 확보해주는 역할을 한다.



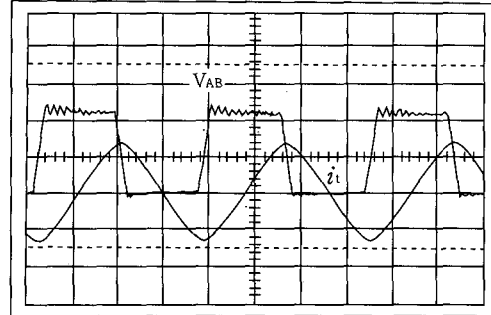
(그림 4-1) 제안한 능동 보조 공진 회로를 갖는 유도 가열용 Half-Bridge 인버터 회로

4.2 실험 결과 검토

60nF의 턴-오프 스너버 커패시터를 사용한 보조 공진회로를 갖는 알루미늄 유도 가열용 Half-Bridge인버터 시스템의 동작 특성을 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다.

〈그림 4-2〉는 부하 A일 때 초기 기동 시 ($f_s=55\text{kHz}$)의 전압, 전류를 보여주는 실험 파형이다. 〈그림 4-2〉에서 보듯이 부하 전류 i_L 이 흐르나 보조 공진회로의 동작으로 i_a 가 흘러 턴-오프 시 스위치의 안전한 충 방전을 확보해 준다.

따라서 보조 공진 회로를 사용하지 않을 경우에는 위의 조건과 같은 상황에서 턴-오프 스너버가 충방전이 되지 못하여 시스템에 단락 전류가 흐르게 되나 보조 공진회로의 동작으로 인하여 큰 용량의 스너버를 사용해도 시스템 동작의 신뢰성이 확보됨을 알 수 있다.



(c) V_{AB} , i_L (100 V/div., 20 A/div., 5 $\mu\text{s}/\text{div.}$)

〈그림 4-2〉 전압, 전류 실험 파형 (조건: 부하 A, 55kHz)

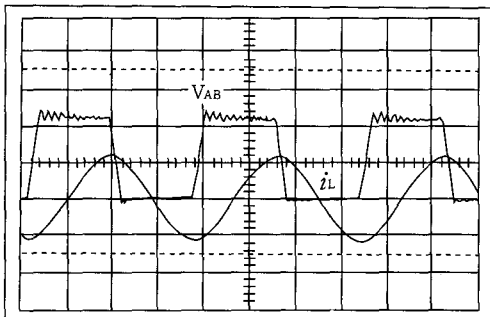
5. 유도 가열용 Half-Bridge 인버터 최적 제어

유도 가열 시스템(Induction Heating System)은 고주파 전력 변환 회로와 시스템 기술에 의한 고주파 인버터의 주요한 응용분야 중 하나로서 기존의 연소에 의한 직접적인 가열 시스템에 비해 청결성, 안전성, 고효율, 고출력밀도, 신뢰성, 제어의 용이성 등의 많은 장점을 지니고 있다.

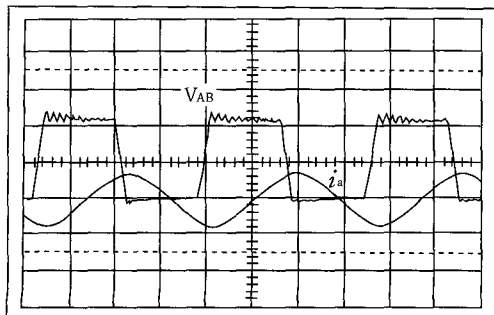
그러나, 〈표 2-1〉에서 알 수 있는 바와 같이, 알루미늄과 같은 비자성체는 철과 같은 자성체에 비해 훨씬 낮은 저항률과 비투자율을 가지므로 가열 부하로 비자성체를 적용 시에 출력 전력을 증가시키기 위해서는 다음과 같은 조건이 필요하게 된다.

- 가열 코일에 흐르는 전류의 주파수 증가
- 가열 코일의 턴(Turn) 수 증가

하지만, 이런 조건을 만족시키기 위한 주파수와 턴수의 증가는 가열 코일의 표피효과(Skin Effect)와 근접효과(Proximity Effect)로 인해 코일의 저항을 증가시켜 인버터 시스템의 효율을 저하시킬 뿐만 아니라 인버터 출력 전력 특성을 자성체에 비해 상대적으로 훨씬 더 민감하게 한



(a) V_{AB} , i_L (100 V/div., 10 A/div., 5 $\mu\text{s}/\text{div.}$)



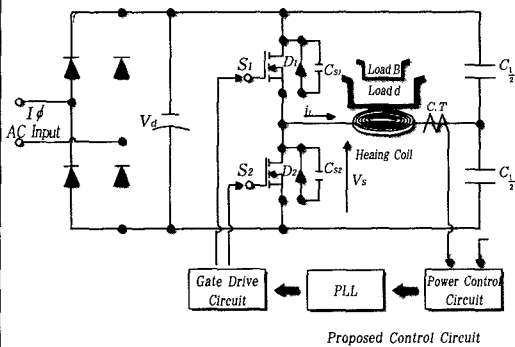
(b) V_{AB} , i_a (100 V/div., 20 A/div., 5 $\mu\text{s}/\text{div.}$)

다. <그림 2-3>에서 확인된 것처럼, 특히 비자성체 부하 유도 가열 시 부하 파라미터 변화는 인버터 시스템의 전력 및 주파수 제어 시 심각한 문제점으로 작용하게 된다.

그러므로, 일정 주파수 제어로는 부하 조건에 따른 부하 파라미터 변화에 대해 인버터의 안정된 동작을 보장할 수 없으며, 부하 파라미터의 변화에 관계없이 일정한 출력 전력을 유지하기 위해서는 동작 주파수의 변화가 필요하게 된다. 이는 인버터의 동작 주파수가 파라미터 변화로 인한 공진 주파수의 변화에 따라서 적응적으로 변해야 함을 의미한다.

5.1 최적 제어 방안

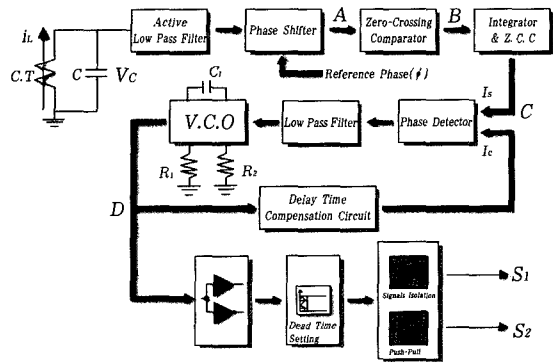
<그림 5-1>은 Half-Bridge 인버터 시스템에 제안한 최적 제어 기법을 적용한 실제 인버터 시스템 구성도이다. 제어회로는 위상검출기와 PLL(Phase Locked Loop) 및 게이트-드라이버 회로로 구성 되어있다.



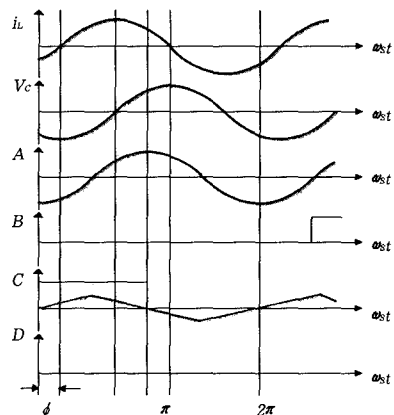
<그림 5-1> 최적 제어를 위한 Half-Bridge 인버터 시스템

<그림 5-2>는 유도 가열용 Half-Bridge 인버터의 안정된 동작을 위해 제안한 전반적인 제어회로의 블럭 다이어그램과 각 부의 주요 파형을 보여주고 있다. 이 제어 블럭은 크게 출력 조절을 위한 회로와 PLL(Phase Locked Loop) 및 그 주변회로로 구성된다.

사용된 CMOS형 PLL(CD4046)은 부하의 파라미터 변화에 대해 공진 주파수를 자동적으로 추적하므로써 인버터 동작에 주요한 역할을 담당한다.



(a) 제어 회로의 블럭 다이어그램



(b) 제어 회로 각 부의 파형

<그림 5-2> 제안한 인버터 제어 회로

5.2 실험 결과 검토

제안한 유도 가열 시스템을 위한 부하 적응 제어 회로에 대한 타당성을 시뮬레이션 및 실험 결과를 통해 입증하였다. 스위칭 소자로 Mitsubishi사의 MOSFET FM50DZ-10S(500V/50A)를 사용하였으며, 부하로는 비자성체 부하인 알루미늄 용기를 사용하였다. 가열 코일은 주파수와 턴(Turn)수의 상승으로 인한 코일의 손실을 줄이기 위한 및

쓰(Litz) 선으로 이루어진 65 턴의 코일을 사용하였다. 각 시스템 파라미터는 다음과 같다.

$V_{dc} = 100\text{ V}$, $C_r = 50\text{ nF}$, $C_{S1} = C_{S2} = 10\text{ nF}$,
Dead Time = $1.1\text{ }\mu\text{s}$ 로 각각 설정했다. 또한, 가열 코일과 중앙에 위치한 부하사이의 거리는 절연체를 사용하여 4mm로 유지하였다. 이때, 각 부하에 따른 파라미터는 <표 5-1>과 같다.

<표 5-1> 부하에 따른 파라미터

파라미터 \ 부하	부하 A	부하 B	무부하
등가 인덕턴스(L)	126 μH	233 μH	421 μH
등가 저항(R)	1.8 Ω	1.7 Ω	0.4 Ω
공진 주파수(f_0)	63.4kHz	46.6kHz	34.6kHz

우선, 이러한 부하 조건하에서 인버터 시스템의 부하 파라미터 변화에 대한 민감성을 확인하기 위해 인버터의 스위칭 주파수(47kHz)가 일정할 때 실험 파형이 <그림 5-3>에서 각각 보여진다. 그림 5-3(a)는 부하 B에 대한 출력 전압 V_{AB} 와 전류 i_L 의 파형을 보여주며, 5-3(b)는 부하 B에서 부하 A로 변했을 경우, 그림 5-3(c)는 부하 B에서 무부하 상태로 변할 때의 인버터 출력 전압, 전류 파형을 각각 보여주고 있다. 그림에서 확인할 수 있는 것처럼 정상상태에서 인버터는 부하 B에 대해 안정된 동작을 이루지만, 부하 A에 대해서는 스위칭 주파수가 부하 A에 대한 공진 주파수보다 낮으므로 전류의 위상이 전압에 앞서게 되고, 무부하에 대해서는 지상 전류로서 크기가 감소하여 무손실 스너버로 사용된 C_{S1} , C_{S2} 를 완전히 충·방전을 시키지 못하게 되어 오히려 역효과를 나타내고 있다. 따라서, 일정 주파수 제어로는 인버터의 안정된 동작과 출력 특성을 얻을 수 없음을 확인할 수 있다.

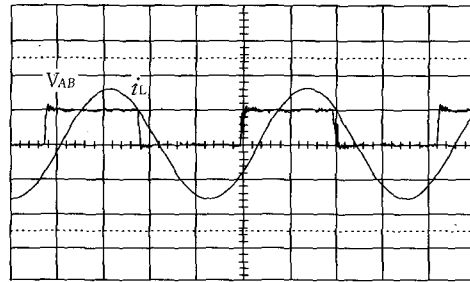
반면, <그림 5-4>에서는 부하 A, B에 대해 제안한 제어 기법을 적용했을 경우 인버터 출력 전

압 V_{AB} , 전류 i_L 의 실험 파형을 보여주고 있다.

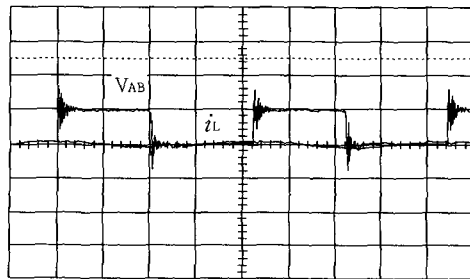
위상이 $\phi = 30^\circ$ 일 때 각 부하에 대한 전압과 전류 파형으로부터 제안한 제어회로가 부하 파라미터 변화에 적응하여 추종 제어함으로써, 인버터 시스템에 안정된 출력특성과 동작특성을 제공할 수 있다. 무부하 조건에서는 시스템의 낮은 등가 저항으로 인해 인버터에 큰 전류가 흐르게 되므로, PLL의 최소 주파수를 36kHz로 제한했을 경우를 나타내고 있다.

<그림 5-5>는 부하 A, B가 가열 코일의 중앙에서 3cm 정도 이동되었을 경우 출력 전압, 전류의 실험 파형을 나타내고 있으며, 위치에 따른 부하 파라미터 변화에도 마찬가지로 인버터가 안정된 동작을 수행함을 확인할 수 있다.

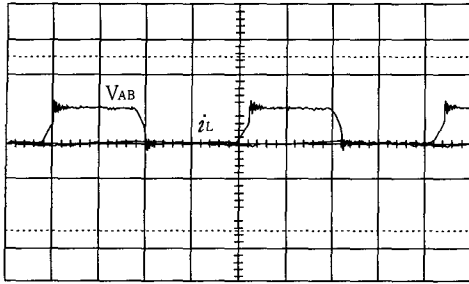
이상과 같은 결과로부터 본 논문에서 제안한 제어회로의 적용은 유도 가열 시스템의 부하로서 특히 부하조건에 따라 민감한 파라미터 변화를 보이는 비자성체 부하의 경우에도 인버터 시스템 동작의 신뢰성을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다.



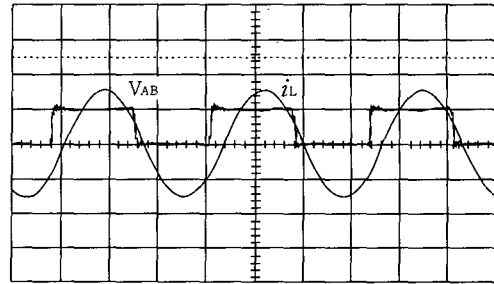
(a) 부하 B



(b) 부하 B → 부하 A

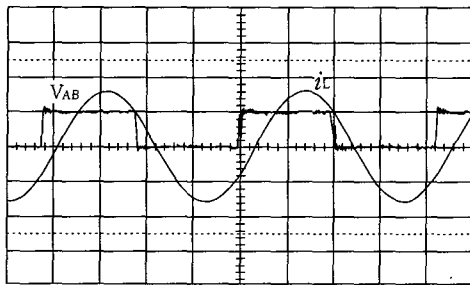


(c) 부하 B → 무부하

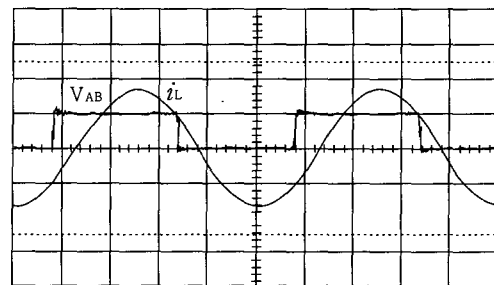


(a) 부하 B

〈그림 5-3〉 일정 주파수(47kHz) 제어 시 V_{AB} , 전류 i_L 의 실험 파형(100V/div., 20A/div., 5 μ s/div.)

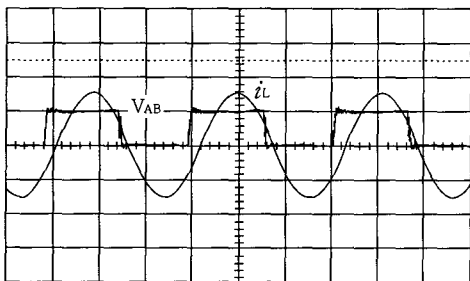


(a) 부하 B

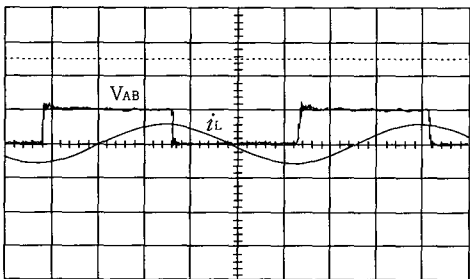


(b) 부하 B

〈그림 5-5〉 부하를 중심에서 3cm 이동 시 V_{AB} , 전류 i_L 의 실험 파형(100V/div., 20A/div., 5 μ s/div.)



(b) 부하 B → 부하 A



(c) 부하 B → 무부하

〈그림 5-4〉 제한한 제어회로 적용 시의 V_{AB} , 전류 i_L 의 실험 파형(100V/div., 20A/div., 5 μ s/div.)

6. 결론

본 논문에서는 유도 가열용 Half-Bridge 공진형 인버터 시스템의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 인버터 회로 방안과 부하 파라미터 변화를 실시간으로 추종하여 언제나 최적 동작 주파수 조건하에서 동작할 수 있도록 할 수 있는 적응제어 알고리즘을 제안하고, 시뮬레이션 및 실험결과를 통하여 제안한 방안들의 타당성을 각각 검증하였다.

첫째, 턴-오프 스위칭 동작시 부유 인덕턴스와 스너버 커패시터와의 공진으로 발생하는 고주파 공진전류를 효과적으로 억제시킬 수 있는 새로운 Half-Bridge 직렬부하 공진형 인버터 회로용 스너버 회로를 고안 설계하였다.

둘째, 가열 시스템의 특성에 의해 결정되어지는 무손실 턴-오프 스너버 커패시터의 용량을 증가 시켜 인버터의 효율 및 신뢰성을 향상시킬 수 있는 능동 보조 공진 회로를 고안 설계하였다.

셋째, 유도 가열용 Half-Bridge 공진형 인버터의 부하 파라미터 변화에 민감하게 동작하는 효과적인 제어회로를 개발하였다. 제안한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 비자성체 부하를 갖는 유도 가열 조리기를 제작 실험을 수행하였다.

이상의 결과로부터 매우 안정적인 그리고 고효율 고성능의 특성을 갖는 Half-Bridge 인버터 구동 유도 가열 시스템의 실현이 기대되며, 특히 본 연구의 결과는 효율 향상과 안정적 동작 조건의 확보가 필수적인 비자성 가열 부하를 갖는 유도 가열 시스템 연구 분야에 많은 공헌을 할 수 있을 것이라 생각된다.

또한, 본 논문에서 제안하고 있는 스너버 회로와 제어 알고리즘 및 제어회로 구현 방법은 전자식 안정기 등 다른 인버터 회로 응용 분야에도 효과적인 적용이 가능할 것으로 생각된다.

(원고 접수일 1999. 10. 18)

참고문헌

[1] Henry W. Koertzen, Jacobus D. van Wyk, Jan A. Ferreria, Design of the Half-Bridge, Series Resonant Converter for Induction Cooking, IEEE-PESC, Conf., Rec., pp. 729-735, 1995.
 [2] 권경안, 정윤철, 김정태, 양우중, "비자성 금속용기 가열 유도 조리기", 대한전자공학회 하계 학술대회, pp. 864-867, 1995.
 [3] 関丙才, 盧采均, 金東熙, 金鍾海, 文昶瑒, "ZVS를

이용한 고주파 공진 인버터(SEPP형)의 특성해석과 설계", 대한전력전자학회 논문집, Vol. 2, No. 4, pp. 19-27, 1997년 12월.
 [4] M. K. Kazimierzuk, "Class-D Voltage-Switching MOSFET Power Amplifier", IEE Proc., Vol. 138, No. 6, pp. 285-296, November, 1991.
 [5] M. K. Kazimierzuk, et al., "Class-D Zero-Voltage-Switching Inverter with only One Shunt Capacitor", IEE Proc., Vol. 139, No. 5, pp. 449-456, September, 1992.
 [6] B. K. Lee, S. B. Yoo, B. S. Suh and D. S. Hyun, "A New Class-D Voltage Source Series-Loaded Resonant Inverter Topology Considering Stray Inductance Influence", IEEE-APEC Conf. Rec., pp. 187-193, 1996.
 [7] J. W. Jung, B. K. Lee, B. S. Suh and D. S. Hyun, "IGBT Half-Bridge Inverter for Induction Heating Applications with Active Auxiliary Resonant Circuit", EPE Conf. Rec., Vol. 4, pp. 344-349, 1997.
 [8] 鄭鎮佑, 李秉國, 徐範錫, 玄東石, "능동 보조 공진 회로를 갖는 유도 가열용 IGBT HALF-BRIDGE 인버터", 대한전기학회 논문집, Vol. 46, No. 4, pp. 533-544, 1997년 4월.
 [9] J. W. Jung, B. K. Lee, "A New Half-Bridge Inverter Topology with Active Auxiliary Resonant Circuit using Insulated Gate Bipolar Transistors for Induction Heating Applications", IEEE-PESC Conf. Rec., Vol. 2, pp. 1232-1237, 1997.
 [10] Y. S. Kwon, S. B. Yoo and D. S. Hyun, "Half-Bridge Series Resonant Inverter for Induction Heating Applications with Load-Adaptive PFM Control Strategy", IEEE-APEC Conf. Rec., pp. 575-581, 1999.
 [11] S. D. Bocus, S. E. Baroudi, F. Bernot and A. Berthon, "EMC Behavior and Modelization of High Frequency Converter for Induction Heating", EPE Conf. Rec., Vol. 2, pp. 845-850, 1997.
 [12] H. Calleja and R. Ordonez, "Control Circuit for an Induction Heating Inverter with Active PFC", IEEE-PESC Conf. Rec., pp. 485-490, 1998.
 [13] M. Bartoli, N. Noferi and A. Reatti, "Modeling Litz-Wire Winding Losses in High-Frequency Power Inductors", IEEE-PESC Conf. Rec., pp. 1690-1696, 1996.