

비자성 부하 유도 가열용 Half-Bridge Inverter의 효율 향상에 대한 연구

*정진우, 이병국, 서범석, 현동석, **정윤철, 박병욱, 김정태

*한양대학교 전기공학과, **LG전자 생활 시스템 연구소

A High Efficient Half-Bridge Inverter for Induction-Heating Applications with Non-Magnetic Load

*Jin-Woo Jung^O, Byoung-Kuk Lee, Bum-Seok Suh, Dong-Seok Hyun, **Yun-Cheol Jung,
Byoung-Wook Park, Jeong-Tae Kim*Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, **Living System Researcher Laboratory
LG Electronics Inc.

Abstract- A strategy that can maximize the efficiency of the inverter system for the non-magnetic material is proposed. Frequency control and variable DC-Link voltage control are compared and analyzed by the experimental results. The experimental results show the variable DC-Link voltage control is superior to the frequency control with respect to improve the efficiency of the inverter system. MOSFETs and IGBTs are used as switching devices and IGBTs are considerable as better switching devices for improving the efficiency of the inverter system.

1. 서론

유도 가열은 Faraday의 전자유도 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 Joule 열이 발생하게 되는 원리이다 [1], [2]. 이러한 기본 원리를 이용한 유도 가열 시스템의 적용 범위를 증대시키고자 비자성 부하를 유도 가열 할 수 있는 방안에 대해 많은 연구가 진행되고 있다 [1]. 비자성체는 자성체와 비교 시 저항율과 비투자율이 월등히 작기 때문에 자성체의 경우와 유사한 출력을 얻기 위해서는 스위칭 주파수와 가열 코일의 턴 수를 증가시키는 것이 필수적이다. 스위칭 주파수와 가열 코일의 턴 수가 증가함에 따라 인버터 손실과 가열 코일의 손실은 시스템 효율을 저하시키는 주된 요인이 된다 [1]. 인버터 손실은 도통 손실과 스위칭 손실로 구분되며, 고주파 시스템으로 갈수록 도통 손실에 비해 스위칭 손실이 인버터 손실을 크게 좌우하게 된다. 스위칭 손실을 줄이기 위해 일반적으로 영전압 스위칭 방식(Zero-Voltage Switching)을 사용한다 [3], [4]. 영전압 스위칭 방식을 적용하면 턴-온 시의 손실은 현저히 줄일 수 있으나 턴-오프 시에는 하드 스위칭을 하게 되므로 심각한 스위칭 손실이 발생하게 된다. 유도가열에 널리 사용되는 Half-Bridge 공진형 인버터에서는 무손실 스너버를 사용하여 턴-오프 시의 손실을 줄일 수 있으나, 스너버 용량을 무한정 증가 시킬 수 없기 때문에 턴-오프 손실은 여전히 심각한 문제가 된다 [3], [4]. 또한, 일반적으로 사용되는 주파수 제어방식(Frequency Control) [3], [4]의 경우, 큰 전압과 전류에서 턴-오프를 하게 되므로 앞서 언급한 턴-오프 손실을 줄이기 위해서는 비자성체 유도가열의 경우 특히 적합하지 않다. 따라서, 턴-오프 스위칭 손실을 줄이기 위해서는 무손실 스너버의 사용과 더불어 작은 전압과 전류에서 턴-오프를 시킬 수 있는 제어방법이 요구된다 [5].

본 논문에서는 비자성체 유도가열 시스템의 효율을 증가시키는 방안으로 인버터 입력전압 제어 방안을 적용하고자 한다. 또한, 고주파 시스템에 일반적으로 사용되는 전압제어 소자인 MOSFETs와 IGBTs를 대상으로 주파수 제어방식과 인버터 입력전압 제어방식을 비교하여 인버터 입력전압 제어 방식의 우수성을 실험을 통하여 입증하고자 한다.

2. 부하 특성 고찰

그림 1에 유도 가열의 기본 원리와 변압기 등가 모델을 나타내었다.

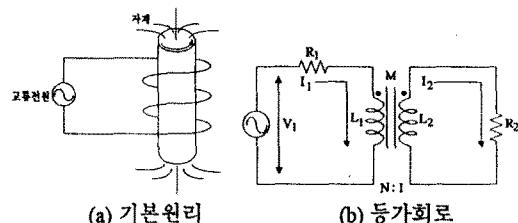


그림 1 유도 가열의 기본원리와 변압기 등가 모델

피가열체로써 철재와 같은 강자성체와 알루미늄과 같은 비자성체의 물리적 성질을 표 1에 나타내었다.

표 1 철재와 알루미늄의 물리적 성질 비교

재질	저항율 (Ω/m)	비투자율
철재	9.8×10^{-8}	100
알루미늄	2.5×10^{-8}	1

침투깊이 (δ)는 식 (1)과 같으며, 주파수, 비투자율, 그리고 저항율의 함수가 됨을 알 수 있으며

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega \cdot \mu}} = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu_r}} \quad (1)$$

where ρ : 저항율, ω : 각주파수, $u (= u_0 u_r)$: 투자율, $u_0 = 4\pi \times 10^{-7} (\text{H}/\text{m})$, u_r : 비투자율

또한, 2차(표피)저항은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$R_2 = \frac{\rho}{\delta} = K \cdot \sqrt{f \cdot \mu_r \cdot \rho} \quad (2)$$

where $K: 0.0019869$

따라서, 2차 측 전력 P_2 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_2 = R_2 \cdot I_2^2 = K \cdot (Nl_1)^2 \cdot \sqrt{f \cdot \mu_r \cdot \rho} \quad (3)$$

표 1과 식 (1), (2), (3)에서 알 수 있듯이 철재와 알루미늄의 $\mu_r \cdot \rho$ 가 약 400:1 정도가 되어, 동일 조건하에서 알루미늄의 경우 철재에 비해 약 20분의 1정도로 작은 표피 저항과 전력이 발생하게 된다. 따라서, 저항율과 비투자율이 작은 알루미늄과 같은 비자성 부하의 유도 가열 시 발생 전력을 증대시키기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다.

- 1) 가열 코일에 흐르는 교류 전류의 주파수를 증가시켜야 한다.
- 2) 가열 코일의 Ampere-turn을 증가시켜야 한다.

위와 같은 조건에 의해 비자성체 부하는 강자성체 부하일 때보다 인버터의 손실(도통 손실+스위칭 손실)과 가열 코일의 손실(턴 수 증가로 인한 코일 저항 증가와 주파수 증가로 인한 표피 저항 증가 손실)이 훨씬 증가되는 결과를 초래한다.

3. 제어 기법에 따른 효율 분석

비자성체 유도가열을 위한 인버터 시스템 회로를 그림 2에 나타내었으며 파라메타 값은 표 2와 같다. 주파수 제어방식과 인버터 입력전압 제어 방식에 따른 효율 비교를 위해 아래와 같은 가정을 한다.

- 1) C_r, L_r 의 값은 주파수와 온도에 무관하다.
- 2) R_L 값은 온도에 무관하다. 즉, 가열 코일에서의 전력 손실로 인한 코일 저항의 증가와 용기의 온도 상승에 따른 코일에의 영향을 무시한다.

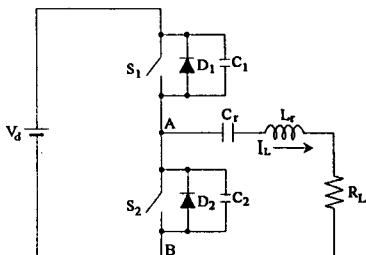


그림 2 비자성체 유도가열을 위한 Half-Bridge 공진형 인버터 회로

표 2 시스템 파라메타

C_1, C_2	22 nF	R_L	1.326 Ω
L_r	122 μH	f_0	77.576 kHz
C_r	34.5 nF	P_{in}	500 W

가. 주파수 제어방식

일반적으로 사용되는 제어방식으로 인버터의 DC-Link 전압의 크기를 일정하게 유지하고 인버터 스위칭 주파수를 가변하여 원하는 출력을 얻는 제어방식이다. 표 2의 파라메타 값으로부터 500W의 출력을 얻기 위해서는 입력전압 150V 하에서 스위칭 주파수는 79.7kHz로 계산되며, 이에따른 출력전압과 부하 전류의 지연 시간(t_{delay})은 2.3μs로 계산된다. 또한, 부하전류의 실효치(I_L)는 19.418A로 계산된다.

그림 3에 스위치를 이상적으로 모델링 하였을 때의 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 그림 3에서 보듯이 부하전류의 최대치와 t_{delay} 는 계산치와 거의 일치함을 알 수 있으며, 턴-오프 시의 스위치 전류값은 26A로 확인 되었다.

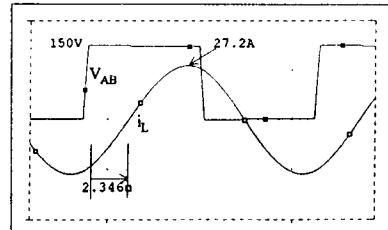


그림 3 주파수 제어 방식에 따른 공진 탱크 전압과 전류 시뮬레이션 과정

스위칭 소자로는 Hitachi사의 MOSFETs 2SK1522와 Harris사의 IGBTs IE50N60E를 사용하고, 가열코일은 Litz wire를 사용하여 그림 2의 인버터 시스템을 제작하였다. MOSFETs를 사용한 경우의 실험파형을 그림 4에 나타내었고, IGBTs를 사용하였을 때의 실험결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 4의 결과에서 알 수 있듯이 MOSFETs를 사용하였을 때는 출력전류 최대치가 24.2A이며 턴-오프 전류는 22.3A로 확인이 되어 효율은 77.65%로 계산이 된다. 또한, 그림 5의 결과에서 알 수 있듯이 IGBTs를 사용하였을 때는 출력전류의 최대치가 24.4A, 턴-오프 전류는 22.3A로 나타났으며, 따라서 효율은 78.78%로 계산이 된다. MOSFETs의 경우 IGBTs에 비해 온-저항(on-resistance)에 따른 도통손실이 크므로 IGBTs를 사용하였을 때의 효율이 MOSFETs의 경우보다 더 크게 나타난 것으로 사료된다.

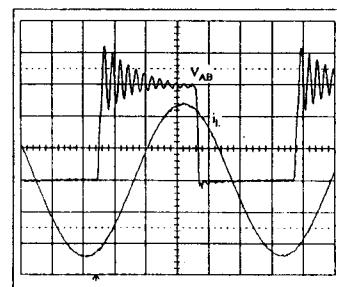


그림 4 주파수 제어방식에 따른 공진 탱크 전압과 전류 실험파형 (사용소자: MOSFETs; 전압: 50 V/div., 전류: 10 A/div., 시간: 2 us/div.)

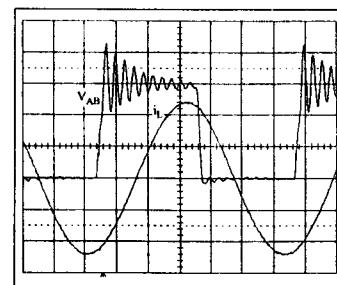


그림 5 주파수 제어방식에 따른 공진 탱크 전압과 전류 실험파형 (사용소자: IGBTs; 전압: 50 V/div., 전류: 10 A/div., 시간: 2 us/div.)

나. 인버터 입력 전압 제어 방식

주파수 제어방식은 큰 전압과 전류에서 턴-오프를 감행하므로 턴-오프 스위칭 손실이 뿐만 아니라 출력전압과 전류의 지연에 따른 인버터 용량 증가의 문제점을 가진다. 이와같은 문제점을 해결하기 위해 DC-Link 전압을 가변함과 동시에 아울러 출력전압과 전류의 지연각을 최소한 작게하여 작은 전압과 전류에서 스위치가 턴-오프 되게 한다. C_1, C_2 의 충방전 시간과 스위치 턴-온 지연시간을 고려하여, 공진 탱크 전압과 부하 전류의 t_{delay} 을 1.3 μ s로 결정하였다. 1.3 μ s를 만족하는 스위칭 주파수는 78.26kHz로 계산되며, 500W의 출력을 얻기 위한 입력전압 (V_d)은 72.8V로 계산이 된다. 그 외의 조건은 표 2의 경우와 동일하다. 그럼 6에 인버터 입력전압 제어에 따른 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 그림 6의 결과에서 알 수 있듯이 부하 전류의 최대치와 t_{delay} 은 이론치와 거의 일치하며, 턴-오프 전류 값은 16.9A로 확인되었다.

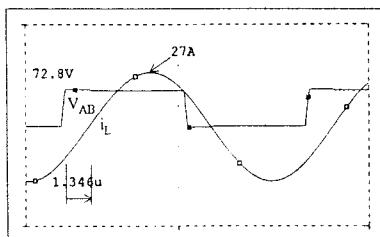


그림 6 인버터 입력전압 제어에 따른 공진 탱크 전압과 전류 시뮬레이션 파형

그림 7과 8에 인버터 입력전압 제어방식을 적용한 경우의 실험파형을 나타내고 있다. 그림 7에서 알 수 있듯이 출력전류의 최대치가 24.75A로 나타났으며, 스위치는 16.5A에서 턴-오프가 됨을 알 수 있다. 따라서, 효율은

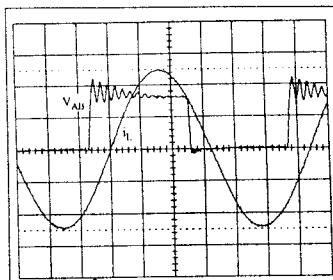


그림 7 인버터 입력전압 제어방식에 따른 공진 탱크 전압과 전류 실험파형 (사용소자: MOSFETs; 전압: 50 V/div., 전류: 10 A/div., 시간: 2 us/div.)

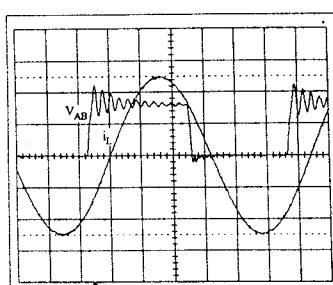


그림 8 인버터 입력전압 제어방식에 따른 공진 탱크 전압과 전류 실험파형 (사용소자: IGBTs; 전압: 50 V/div., 전류: 10 A/div., 시간: 2 us/div.)

81.2%로 계산이 된다. 주파수 제어방식의 경우와 비교해 보면, 인버터 입력전압 제어 방식을 적용한 경우가 효율이 더 높은 결과를 나타냈다. 이러한 결과는 고주파 시스템인 경우 스위칭 손실이 도통 손실에 비해 인버터 손실에 더 큰 요인으로 작용하는데서 기인한 것으로 사료된다. IGBTs를 사용하였을 때에도 MOSFETs와 같은 결과를 확인할 수 있으며, 이때에는 출력전류 최대치 25.1A, 턴-오프 전류 16.15A로 효율 83.5%의 결과를 확인하였다. 주파수 제어방식의 경우에서 나타난 결과와 마찬가지로 MOSFETs보다는 IGBTs가 더 높은 효율을 나타내었다.

4. 결론

본 논문에서는 비자성 부하 유도 가열 시스템의 효율 개선방안에 대해 고찰하였다. 비자성 부하 가열 시에는 자성부하의 경우보다 스위칭 주파수가 상대적으로 높아야 한다. 따라서, 시스템 효율을 개선시키기 위해서는 스위칭 손실을 줄이는 것이 필수적이다. 주파수 제어방식의 경우에 비해 인버터 입력전압 제어방식이 턴-오프 스위칭 손실을 줄이는 데는 더 효과적인 것으로 확인되었으며 MOSFETs보다 IGBTs가 더 높은 효율을 산출시키는 것으로 확인 되었다. 앞에서 살펴본 결과를 종합해보면 표 3과 같이 나타낼 수 있다.

표 3 제어방식과 스위칭 소자에 따른 효율 분석

소자	주파수 제어방식	인버터 입력전압 제어방식
MOSFETs	77.65 %	81.2 %
IGBTs	78.78 %	83.5 %

따라서, 비자성 부하 유도가열 시스템의 효율을 개선시키기 위해서는 IGBTs를 사용한 인버터 입력전압 제어방식을 적용하는 것이 효과적인 것으로 사료된다.

(*상기 효율은 인버터 효율임)

5. 참고문헌

- [1] 권경안, 정윤철, 김정태, 양우종, "비자성 금속용기 가열 유도 조리기," *대한전자공학회 학제학술대회*, pp. 864-867, 1995.
- [2] H. W. Koertzen, J. D. Wyk, J. A. Ferreira, "Design of the Half-Bridge Series Resonant Converter for Induction Cooking," *IEEE-PESC Conf. Rec.*, pp. 729-735, 1995.
- [3] M. K. Kazimierczuk, "Class-D Voltage-Switching MOSFET Power Amplifier," *IEE Proc.*, vol. 138, No. 6, pp. 285-296, Nov., 1991.
- [4] M. K. Kazimierczuk, W. Szaraniec, "Class-D Zero-Voltage-Switching Inverter with only One Shunt Capacitor," *IEE Proc.*, vol. 139, No. 5, pp. 449-456, Sept., 1992.
- [5] Hideaki Fujita, Hirofumi Akagi, "Pulse-Density-Modulated Power Control of a 4kW, 450kHz Voltage-Source Inverter for Induction Melting Application," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 32, No. 2, pp. 279-286, March/April, 1996.