

# 높은 턴 수의 코일을 탑재한 유도 가열 장치용 하프 브릿지 인버터의 전력 변환 효율 향상을 위한 입력전압 선정 기법

진주일, 김민아, 정지훈  
울산과학기술원 (유니스트)

## Input Voltage Selection Methodology to Improve Power Transfer Efficiency of Half-Bridge Series Resonant Inverter Employing High Turn-numbered Coil for Induction Heating Application

Juil Jin, Mina kim, and Jee-Hoon Jung

Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

### ABSTRACT

낮은 저항 용기를 가열할 수 있는 유도 가열 장치는 유도가열 장치용 하프 브릿지 직렬 공진형 인버터의 높은 입력 전압과 높은 턴 수의 코일을 통해 낮은 저항의 용기를 가열한다. 그러나 자성체 용기는 높은 턴 수의 코일에서 높은 저항 값을 가지므로 적절한 전력을 내기 위해서는 높은 입력 전압이 필요하다. 이러한 경우 부스트 토폴로지의 역률 개선 회로를 사용할 수 있다. 하지만 입력 전압의 변동에 따라 직렬 공진형 인버터의 출력 전력 제어를 위한 동작 점 변동이 필요하므로 인버터의 손실이 변동한다. 본 논문에서는 낮은 저항 용기를 가열하기 위하여 높은 턴 수의 코일을 탑재한 유도 가열 장치용 하프 브릿지 직렬 공진형 인버터에서 자성체 용기의 가열 시 입력 전압 변동에 따른 인버터의 손실 분석을 통해 최적의 입력 전압 조건을 선정하고자 한다. 제안하는 입력전압 선정 기법은 2-kW 급 유도 장치용 하프 브릿지 직렬 공진형 인버터 시제품을 통해 타당성을 검증한다.

기의 유효 저항이 증가하므로 비 자성체 물질 알루미늄을 가열할 수 있다. 하지만 알루미늄을 가열하기 위해 워킹 코일의 턴 수를 증가시킬 경우 자성체 물질의 저항은 입력 전압 220 Vac에서 원하는 출력 전력을 내기 불가능하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 3고조파 방식은 PFC와 같은 추가 전력 변환 장치를 사용하여 유도 가열 장치 인버터의 입력 전압을 증폭시킨다.

그림 2와 같은 구조인 유도 가열 장치용 하프 브릿지 공진형(HB-IH) 인버터는 비 자성체 용기를 가열하기 위하여 높은 턴 수를 가지는 워킹 코일과 PFC를 이용한다. HB-IH 인버터는 일정한 출력 전력을 얻기 위해 입력 전압에 따라 동작점이 변동한다. 본 논문에서는 HB-IH 인버터의 입력 전압에 따라 변동하는 도통 손실과 스위칭 손실을 계산하고 최소의 손실을 가지는 최적의 입력 전압을 선정한다. 선정된 입력 전압은 2 kW 급 HB IH 인버터 시제품을 통해 예측된 성능과 효율의 타당성을 검증한다.

### 1. 서 론

유도 가열장치는 가스레인지와 비교 했을 때 안정성과 빠른 가열 시간으로 주방 조리환경에 많은 영향을 미치고 있다. 하지만 높은 저항을 가지는 자성체 용기를 사용하려면 하는 한계를 가지고 있다. 알루미늄과 같이 비자성체 물질은 낮은 유효 저항을 가지기 때문에 공진 전류가 상승하여 스위칭 정격을 초과하게 된다. 선행 논문에서는 제안된 LAM 방식<sup>[1]</sup>과 3고조파 방식<sup>[2]</sup>은 워킹 코일에 인가되는 전압의 주파수를 높여 용기가 가지는 유효 저항을 높인다. LAM 방식은 스위칭 변조를 통해 스위칭 패턴에 영 벡터를 추가함으로써 스위칭 주파수보다 2배 혹은 3배의 높은 주파수를 가진 공진 전류를 워킹 코일에 인가시킨다. 3고조파 방식은 3고조파 성분만 통과하는 공진 탱크를 설계함으로써 워킹 코일에 스위칭 주파수 대비 3배 높은 주파수를 가지는 공진 전류가 인가된다. 높은 스위칭 주파수는 용기의 유효 저항을 증가시킬 수 있지만 높은 주파수만으로는 원하는 등가 저항 값을 얻기가 어려우므로 높은 턴 수의 워킹 코일을 사용한다.

그림 1은 워킹 코일의 턴 수에 따른 각 용기들의 등가 저항과 스위칭 주파수에 따른 용기의 등가 저항 변화를 나타낸다. 워킹 코일의 턴 수와 용기에 인가되는 주파수가 증가할수록 용

### 2. 동작 분석과 최소 입력 전압 선정

#### 2.1 공진 전류

그림 3은 HB-IH 인버터 등가회로를 나타낸다. 여기서,  $\omega_s$

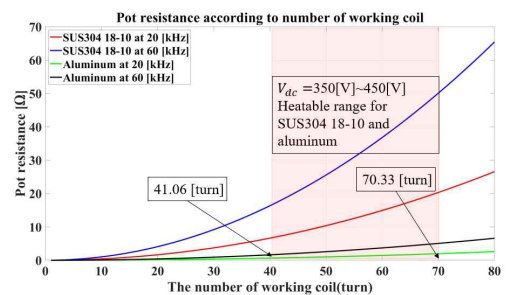


그림 1 워킹 코일 턴 수에 따른 용기 저항  
Fig. 1 Pot resistance according to applied frequency

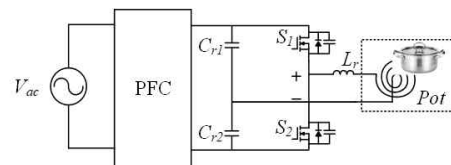


그림 2 PFC HB-IH 인버터 구조  
Fig. 2 Circuit diagram of PFC HB-IH inverter

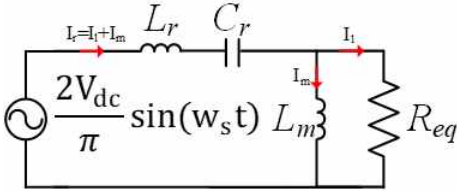


그림 3 공진 주파수에서의 HB-IH 인버터 등가회로  
Fig 3. Equivalent circuit of HB-IH inverter at resonant frequency

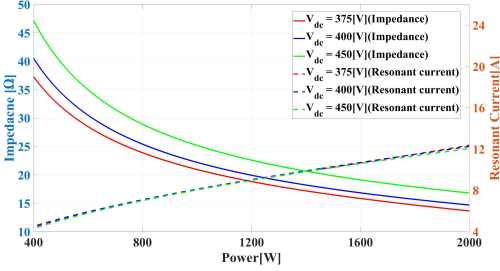


그림 4 SUS304 10-18 공진 전류와 임피던스  
Fig 4. SUS304 10-18 resonant current and impedance

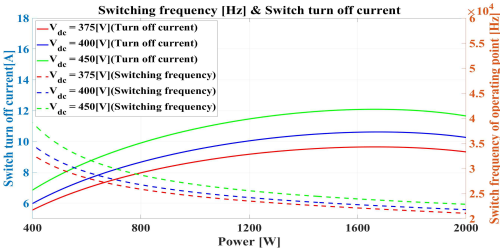


그림 5 SUS304 10-18 스위치 턴 오프 전류와 스위칭 주파수  
Fig 5. SUS304 10-18 switch turn off current and frequency

는 스위치 각 주파수,  $L_r$ 은 누설 인덕턴스,  $C_r$ 은 공진 커패시턴스,  $L_m$ 은 자화인덕턴스,  $I_r$ 은 공진 전류,  $I_l$ 은 부하 전류,  $I_m$ 은 자화 전류,  $R_{eq}(V(t), i(t), f_s, temp)$ 는 워킹 코일과 용기의 등가 저항이다<sup>[3]</sup>.  $R_{eq}$ 는 SUS304 18-10의 HB-IH 인버터 동작 중 측정된 저항 값의 추세를 통해 도출하고 입력 전압은 1차 고조파만을 분석하는 FHA(First Harmonic Approximation)<sup>[4]</sup>를 사용하였다. 그림 3에 나타난 HB-IH 인버터의 등가 회로를 통해 공진 전류를 유도 할 수 있다.

$$Z = j\omega_s L_r + \frac{1}{j\omega_s C_r} + \frac{j\omega_s L_m R_{eq}}{j\omega_s L_m + R_{eq}} \quad (1)$$

여기서  $Z$ 는 HB-IH 인버터의 등가 임피던스이다. 공진 전류는 입력 전압에 등가 임피던스를 나눈 값이다.

$$I_r(rms) = \frac{2V_{dc}}{\sqrt{2}\pi|Z|} \quad (2)$$

그림 4는 HB-IH 인버터가 자성체 물체인 SUS304 10-18 가열 시 HB-IH 인버터의 입력 전압에 따른 임피던스와 공진 전류를 나타낸다. HB-IH 인버터의 임피던스는 입력 전압에 비례하므로 입력전압에 따른 공진전류 변동 폭은 작다.

## 2.2 손실분석

본 논문에서는 HB-IH 인버터의 손실 분석을 위해 스위칭 손실과 도통 손실을 고려한다. HB-IH 인버터는 전 부하 영역에서 ZVS (Zero voltage switching) 조건을 만족하기 때문에 스위칭 턴 온 손실을 무시할 수 있다. 턴 오프 시 스위칭 손실은 스위치 양 단 전압, 턴 오프 전류, 스위칭 주파수에 비례한다. 스위치의 양단 전압은 HB-IH 인버터 입력 전압에 비례하

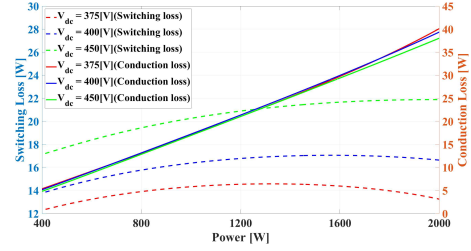


그림 6 SUS304 10-18 스위칭 손실과 도통 손실  
Fig 6. SUS304 10-18 switching loss and conduction loss

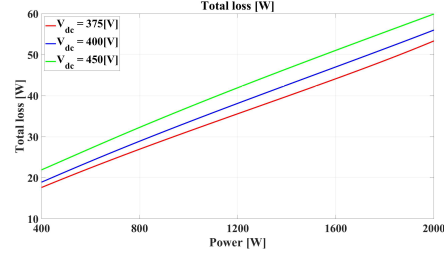


그림 7 SUS304 10-18 총 손실  
Fig 7. SUS304 10-18 Total loss

므로 턴 오프 손실은 HB-IH 인버터 입력 전압에 비례한다. 턴 오프 전류는 공진 전류에  $t = T_s/2$  시점 값으로 근사할 수 있다.

$$I_{turn\ off} = I_r \left( \frac{T_s}{2} \right) = \frac{2V_{dc}}{\pi|Z|} (\sin(\angle Z)) \quad (3)$$

여기서,  $I_{turn\ off}$ 는 턴 오프 시 스위치 전류,  $\angle Z$ 는 HB-IH 인버터의 등가 임피던스에 의해 발생하는 전류의 위상 지연이다. 입력 전압에 등가 임피던스를 나눈 값은 각 입력 전압에 대해 비교적 일정한 값을 가지므로 스위치 턴 오프 전류는  $\sin(\angle Z)$  값에 영향을 받는다.  $\sin(\angle Z)$ 는 전류의 위상 지연에 비례하므로 동작 점의 스위칭 주파수가 공진 점의 주파수가 가까울수록 작은  $\sin(\angle Z)$  값을 가지므로 작은 턴 오프 전류를 갖게 된다. 따라서 HB-IH 인버터의 입력 전압이 작을수록 작은 스위칭 손실을 갖는다. 그림 5은 HB-IH 인버터가 SUS304 10-18 가열 시 입력 전압과 출력 전력에 따른 스위칭 주파수와 턴 오프 전류를 나타낸다. 입력 전압이 작을수록 높은 전압 이득을 얻기 위하여 스위칭 주파수가 감소한다. 따라서 위상 지연이 작아지므로 더 낮은 턴 오프 전류를 가지는 것을 확인 할 수 있다.

HB-IH 인버터의 도통 손실은 공진 전류의 RMS와 기생 저항, 턴 온 저항의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$I \quad (4)$$

식 (4)는 IH 인버터에서 발생하는 총 도통 손실이다. 여기서,  $R_{ds(on)}$ 은 스위치 도통 손실,  $R_c$ 는 공진 커패시턴스의 기생 저항,  $R_{coil}$ 은 워킹 코일의 저항이다. 도통 손실에서의 공진 전류 값은 HB-IH 인버터 입력 전력에 따른 변화가 미미하므로 HB-IH 인버터의 입력 전압에 따른 손실의 차이는 작다.

그림 6은 HB-IH 인버터의 입력 전압 변동과 출력 전력 변동에 따른 스위칭 손실과 도통 손실 변화를 나타낸다. 스위칭 손실은 HB-IH 인버터 입력 전압에 따라 큰 차이가 있다. 하지만 도통 손실에 영향을 끼치는 공진 전류 차이는 HB-IH 인버터의 입력 전압에 따라 변동이 작으므로 HB-IH 인버터 입력 전압에 따라 도통 손실의 차이는 미미하다. 따라서 그림 7과

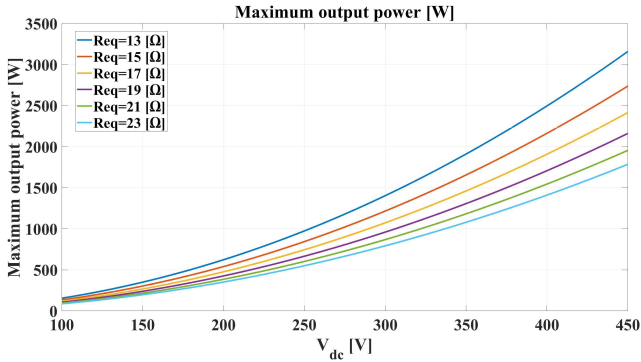


그림 8 SUS304 10-18 HB-IH 인버터의 입력 전압에 따른 최대 출력  
Fig 8. SUS304 10-18 Maximum output according to input power of HB-IH inverter

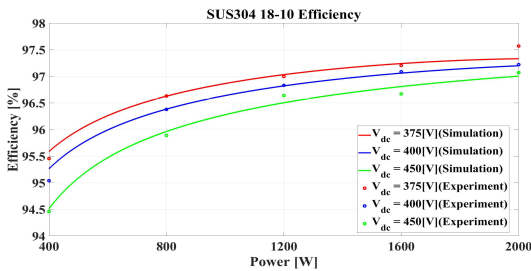


그림 9 SUS304 10-18 계산 및 실험 결과  
Fig 9. SUS304 10-18 Result of Calculation & Experiment

표 1 HB-IH 인버터의 설계 사항  
Table 1. Design considerations of Half-Bridge Series Resonant Inverter

용기	SUS304 18-10
입력 전압(출력 전력)	375 V ~ 450 V(2 kW)
워킹 코일 턴 수	42 턴
Resonant Cr, Lr	276 nF, 229 μH

같이 HB-IH 인버터의 입력 전압이 높을수록 스위칭 손실에 의한 총 손실이 크다.

### 2.3 HB-IH 인버터 입력 전압 선택

SUS304 18-10의 등가저항은 12 Ω에서 25 Ω의 범위를 가지고 변동한다. 입력 전압에 따른 최대 출력은 참고 문헌 [5]의 최대 출력을 구하는 식을 통해 구할 수 있다. 그림 8은 HB-IH 인버터 입력전압 변동에 따른 최대 출력을 나타낸 그래프이다. 저항 값이 증가함에 따라 원하는 출력을 내기 위한 HB-IH 인버터 입력 전압이 증가한다. 총 손실 측면에서는 HB-IH 인버터 입력전압이 낮을수록 효율이 개선되나 원하는 출력 전력을 달성하기 위한 최소전압이 존재한다. 따라서 출력 전력 달성 가능한 최소 전압을 선택하는 것이 효율 개선과 요구된 출력 전력을 모두 달성할 수 있다.

### 3. 실험 결과

표 1은 HB-IH 인버터 회로의 설계치를 나타낸다. SUS304 18-10의 HB-IH 동작 시의 저항은 2 kW 출력 전력에서 13.05 Ω에서 13.51 Ω을 가진다. 용기의 온도와 용기와 워킹 코일의 위치를 고려하여 출력 저항을 14.2 Ω으로 가정하면 그림 8에 의해 최소 전압이 374.1 Vdc 이상이 되어야 함을 확인할 수 있다. 따라서 HB-IH 인버터 입력 최소 전압을 375 Vdc로 선정하였다. 그림 9는 HB-IH 인버터의 표 1의 조건을 기반으로

한 계산 결과와 실험 데이터를 비교한 그림이다. 그림 9의 실험효율은 계산된 효율에 비해 0.4 %의 오차를 가진다. 2 kW 급 HB-IH 인버터 실험을 통해 입력 전압 375 Vdc의 동작 효율이 450 Vdc 동작 효율에 비해 정격 출력 2 kW에서 0.5 %, 경부하 출력 400 W에서 1.0 % 개선되는 것을 확인하였다. 이를 통해 제안하는 최대 효율을 얻기 위한 입력 전압 선정 방법이 타당함을 2 kW 급 HB-IH 인버터를 통해 검증하였다.

### 4. 결론

본 논문에서는 HB-IH 인버터의 입력 전압에 따른 스위칭 손실과 도통 손실을 계산하고 총 손실이 낮아지는 최적의 HB-IH 인버터의 입력 전압 조건과 2 kW가 가열 가능한 최소의 입력 전압을 설계하였다. HB-IH 인버터의 입력전압에 대해 도통 손실에 비해 스위칭 손실의 변동 폭이 더 유효함을 확인하였다. 스위칭 손실은 HB-IH 인버터 입력 전압에 반비례하므로 낮은 입력 전압을 선정하는 것이 유리하다. 하지만 원하는 출력 달성을 위해 HB-IH 인버터 입력전압이 제한되므로 출력 전력을 달성할 수 있는 최소 전압을 선정하였다. 2 kW HB-IH 인버터 시제품 실험을 통해 선정된 최소 전압이 2 kW 출력이 가능함을 검증하였다. 2 kW 가열이 가능한 최소 전압인 375 Vdc를 인가할 경우 450 Vdc 대비 정격 출력 2 kW에서 0.5 %, 경 부하 출력 400 W에서 1.0 % 높은 효율을 가지는 것을 확인하였다.

이 논문은 2018년도 LG전자의 지원을 받아 UNIST에서 수행된 선형연구사업임 (No.2190333.01)

### 참고 문헌

- [1] H. Park and J. Jung, "Load-Adaptive Modulation of a Series-Resonant Inverter for All-Metal Induction Heating Applications," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 9, pp. 6983-6993, Sept. 2018.
- [2] H. Sadakata et al., "Latest practical developments of triplex series load resonant frequency-operated high frequency inverter for induction-heated low resistivity metallic appliances in consumer built-in cooktops," 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Palm Springs, CA, 2010, pp. 1825-1832.
- [3] D. Puyal, C. Bernal, J. M. Burdío, I. Millan and J. Acero, "A new dynamic electrical model of domestic induction heating loads," 2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Austin, TX, 2008, pp. 409-414.
- [4] H. Wang et al., "Common Capacitor Multiphase LLC Converter With Passive Current Sharing Ability," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 1, pp. 370-387, Jan. 2018.
- [5] S. Jeong, H. Park and J. Jung, "Design Methodology of 3 kW Induction Heating System for both Low Resistance and High Resistance Containers in a Single Burner," 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia), Niigata, 2018, pp. 289-295.