

가정용 IH Cooktop의 동작 주파수 제한 조건을 고려한 경부하 영역 전력 제어 방안 비교 및 분석

고관영, 김현수, 황운성, 강승현, 권만재, 이병국[†]
 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Comparison and Analysis of Power Control Method in Light Load Region of Domestic IH Cooktop Considering Operating Frequency Range

Kwan Young Ko, Hyeon Soo Kim, Yun Seong Hwang, Sung Hyun Kang, Man Jae Kwon, and Byoung Kuk Lee[†]

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 Induction Heating (IH) Cooktop의 주파수 제한 조건을 고려한 경부하 전력 제어 방안을 비교 분석한다. IH Cooktop은 경부하 운전을 위해 높은 주파수 동작이 요구되나 시스템 내 Microcontroller Unit (MCU) 및 전력반도체 소자 사양에 따라 가용 주파수 범위가 제한된다. 이에 따라 최대 동작 주파수 조건에서 Pulse Density Modulation (PDM) 및 Asymmetric Modulation (AM)을 통한 경부하 전력 제어가 요구된다. 본 논문에서는 PDM 및 AM 제어 방안의 손실 및 효율 분석을 통해 고효율 달성에 유리한 제어 방안을 선정한다.

1. 서 론

가정용 Induction Heating (IH) Cooktop 시스템은 워킹 코일과 용기를 직렬 R-L 부하로 투영하여 나타낼 수 있는 특성을 활용하여 일반적으로 그림 1과 같이 Half Bridge-Series Resonant Inverter (HB-SRI) 토폴로지를 주로 적용한다. HB-SRI 기반 IH Cooktop의 경우 주파수에 따라 가변하는 직렬 R-L 부하의 특성을 활용하여 Pulse Frequency Modulation (PFM) 기반 전력 제어 기법을 적용한다^[1]. PFM 기반 전력 제어 기법 적용 시 경부하 동작을 위해 높은 스위칭 주파수 (f_{sw}) 대역이 요구되나, 가정용 IH 시스템의 Microcontroller Unit (MCU) 및 전력반도체 소자 사양을 고려할 경우 f_{sw} 대역이 제한된다. 따라서 최대 주파수 동작 조건에서 f_{sw} 증가 없이 부하 감소 제어를 위해 추가적인 전력 제어 방안이 요구된다.

최대 주파수 동작 조건에서 부하 감소 제어를 위한 추가적인 전력 제어 방안으로 Pulse Density Modulation (PDM) 및 Asymmetric modulation (AM)이 존재한다. PDM의 경우 일정 구간 내 스위칭 신호의 밀도를 변조하는 방안으로 가열 동작을 수행하지 않는 T_{off} 구간 설정을 통해 입력 평균 전력을 감소시켜 f_{sw} 고정 조건에서의 부하 감소 제어를 수행한다. 그러나 PFM에 비해 상대적으로 높은 전력 대역에서의 시스템 on/off를 반복함에 따라 효율 측면에서의 고려가 요구된다. 또한 가열 동작이 중단되는 구간이 존재하여 사용자 편의성에 대한 고려가 필요하다. AM의 경우 시스템 내 스위치 레그를 기존 PFM에서의 상/하단 스위치 듀티비 50%의 대칭이 아닌 비대칭으로 제어하는 방안이다. 스위치 간 비대칭 동작에 의한 공진 네트워크 입력 전압 (V_{pole}) 변동을 통해 f_{sw} 고정 조건에서의

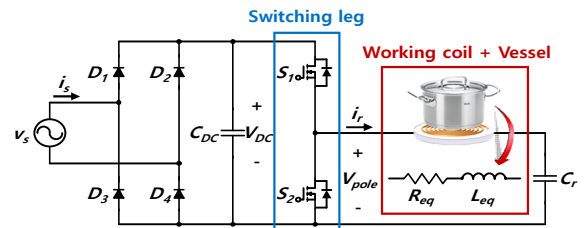


그림 1 HB-SRI 기반 유도 가열 시스템
 Fig. 1 HB-SRI induction heating system.

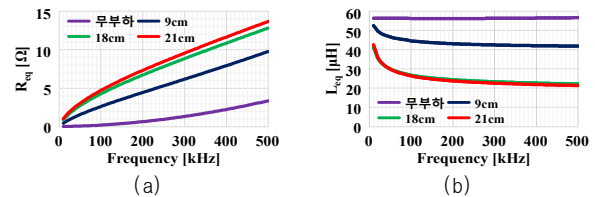


그림 2 스위칭 주파수에 따른 워킹코일 및 용기 등가 파라미터
 (a) 등가 저항 (R_{eq}) (b) 등가 인덕턴스 (L_{eq})

Fig. 2 Equivalent parameters of working coil and vessel according to the switching frequency.
 (a) Equivalent resistance (R_{eq}) (b) Equivalent inductance (L_{eq})

부하 감소 제어를 수행한다. 그러나 해당 동작 시 생성된 짝수 고조파에 의해 공진 전류의 왜곡이 증가하여 PFM 제어 대비 전류 첨두값 변화에 의한 각 스위치 전류 스트레스에 대한 고려가 요구된다.

따라서 본 논문에서는 PDM 및 AM 제어 방안 간 비교를 통해 IH 시스템의 경부하 운전 시 고효율 달성에 유리한 제어 방안을 선정한다. 제어 방식에 따른 손실 및 효율 비교 분석을 위해 3.2 [kW]급 가정용 IH Cooktop 시스템의 공진 네트워크를 설계한다. 설계 결과를 토대로 PSIM 시뮬레이션을 진행하고 각 제어 방안 적용에 따른 손실 및 효율 분석을 통해 고효율 달성에 유리한 제어 방안을 제시한다.

2. IH Cooktop 공진 네트워크 설계 및 경부하 영역 제어 방안 분석

2.1 HB-SRI 기반 IH Cooktop 공진 네트워크 설계

본 절에서는 제어 방안에 따른 손실 및 효율 분석을 위해 동작 주파수에 따른 워킹 코일 및 용기의 등가 파라미터 (L_{eq} , R_{eq}) 측정을 통한 3.2 [kW]급 가정용 IH Cooktop 시스템을 설계한다. 그림 2 (a), (b)는 다양한 크기의 용기 조건에 따라

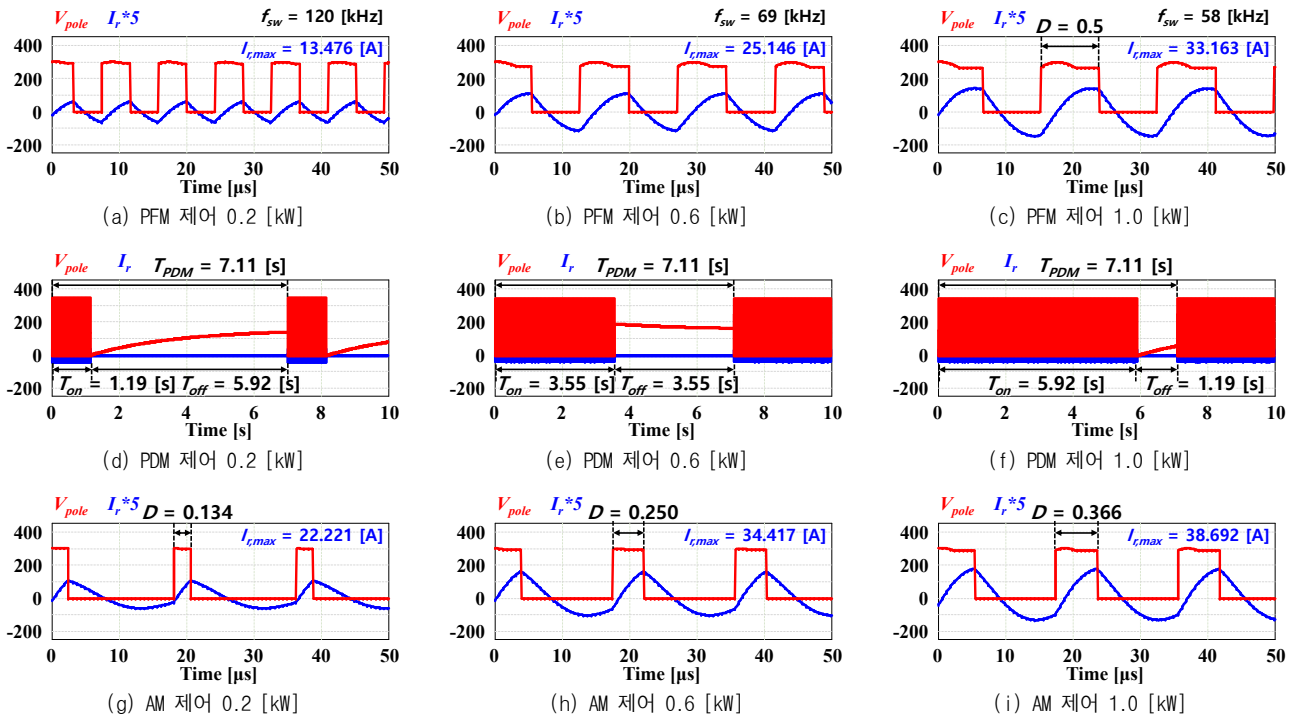


그림 3 IH Cooktop 시스템 전력 제어 모드에 따른 시뮬레이션 파형 (a) PFM 제어 0.2 [kW] (b) PFM 제어 0.6 [kW] (c) PFM 제어 1.0 [kW] (d) PDM 제어 0.2 [kW] (e) PDM 제어 0.6 [kW] (f) PDM 제어 1.0 [kW] (g) AM 제어 0.2 [kW] (h) AM 제어 0.6 [kW] (i) AM 제어 1.0 [kW]

Fig. 3 Simulation waveforms according to power control mode of IH Cooktop system. (a) PFM 0.2 [kW] (b) PFM 0.6 [kW] (c) PFM 1.0 [kW] (d) PDM 0.2 [kW] (e) PDM 0.6 [kW] (f) PDM 1.0 [kW] (g) AM 0.2 [kW] (h) AM 0.6 [kW] (i) AM 1.0 [kW]

표 1 IH Cooktop 시스템 설계 사양

Table 1 Design specifications of IH Cooktop system

Parameters	Value
입력전압 (V_{in}) / 주파수	220 [V _{rms}] / 60 [Hz]
최대 출력전력 (P_{max})	3.2 [kW]
공진 주파수 (f_r)	40 [kHz]
공진 커패시턴스 (C_r)	508 [nF]
PDM / AM 적용 전력	< 1.2 [kW]

LCR meter를 통해 R_{eq} , L_{eq} 를 각각 측정된 결과를 나타낸다. HB-SRI 기반 IH Cooktop 조건에서 V_{pole} 기본과 실효값 ($V_{l,rms}$)과 공진 네트워크 등가 임피던스 (Z_{eq})는 각각 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있으며, 식 (1), (2)를 통해 시스템 최대 출력 (3.2 [kW])을 만족하는 Z_{eq} 는 2~3 [Ω] 수준임을 확인할 수 있다. 이때 모든 용기 조건에서 목표 출력을 만족하기 위해 최대 크기 용기 조건에서 Z_{eq} 가 2~3 [Ω]을 만족하도록 공진 주파수 (f_r)를 40 [kHz]로 설계하고, 이에 따른 공진 커패시턴스 (C_r)는 식 (3)에 따라 508 [nF]으로 설계한다. 본 논문에서는 낮은 부하 영역의 제어 방안에 따른 비교 분석을 위해 1.2 [kW] 출력 이하의 부하에 대해서 PDM 및 AM 제어를 적용한다. 표 1의 설계 조건을 바탕으로 0.2, 0.6, 1.0 [kW] 출력 시 기존의 PFM을 적용했을 때 V_{pole} 와 공진 전류 (i_r)의 PSIM 시뮬레이션 파형은 각각 그림 3(a), (b), (c)와 같다.

$$v_{l,rms} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_s \quad (1)$$

$$Z = \sqrt{R_{eq}^2 + \left(\omega L_{eq} - \frac{1}{\omega C_r} \right)^2} = \frac{v_{l,rms}^2}{P} \quad (2)$$

$$C_r = \frac{1}{L_{eq}(2\pi f_r)^2} \quad (3)$$

2.2 Pulse Density Modulation (PDM)

Pulse Density Modulation (PDM)은 일정한 스위칭 주파수에서 PDM 주기 (T_{PDM}) 내 PWM 제어를 수행하는 T_{on} 구간과 제어를 수행하지 않는 T_{off} 구간을 설정하여 전력을 제어하는 방안이다. 경부하 영역에서 PDM 제어를 수행함으로써 f_{sw} 는 고정된 값을 유지하며 T_{off} 구간 변동을 통해 입력 평균 전력을 감소시키는 제어를 수행한다. 해당 동작 시 시스템의 on/off가 반복적으로 발생하므로 계통 측 플리커 영향을 최소화하기 위해 국제 규격 (IEC-61000-3-3) 만족이 요구된다. PDM 제어 시작 지점이 1.2 [kW]인 경우 플리커 규격 만족을 위한 T_{PDM} 은 7.11 [s]로 도출할 수 있다^[2]. 해당 값을 기반으로 1.2 [kW] ~ 0.2 [kW] 전력 조건에서 PDM 제어를 적용하며, 표 1의 설계 조건을 바탕으로 0.2, 0.6, 1.0 [kW] 출력 조건에서 V_{pole} 와 I_r 의 PSIM 시뮬레이션 파형은 그림 3(d), (e), (f)와 같다. PDM 제어의 경우 동일한 평균 전력 조건에서 T_{on} 구간 동안 PFM 제어 대비 상대적으로 높은 전력 대역에서의 동작이 요구되기 때문에 전력반도체 소자 손실 측면에서의 분석이 필요하다.

2.3 Asymmetric Modulation (AM)

Asymmetric Modulation (AM)은 스위치 간 듀티비 변화를 통해 V_{pole} 의 기본과 성분을 감소시켜 전력을 제어하는 방안이다. AM 제어 시 HB-SRI 구조에서의 스위치 레그 내 상단 스위치 (S_1)와 하단 스위치 (S_2) 간 상보적 비대칭 제어를 수행하며, S_1 의 duty를 최대 50%의 값을 가지는 D 로 제어할 경우 S_2 는 $1-D$ 의 duty를 가진다. 이때 식 (1)을 통해 나타낸 $V_{l,rms}$ 에 대하여 S_2 의 duty 증가에 따라 $V_{l,rms}$ 를 식 (4)와 같이 감소시켜 부하 감소 제어를 수행한다. D 변화에 따른 공진 네트워크 입력 전압의 기본과 성분은 식 (4)를 통해 도출하며, 식 (2),

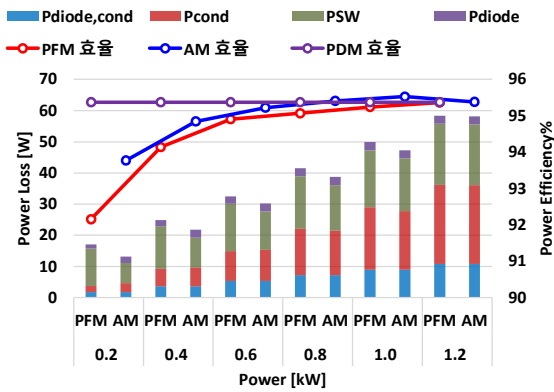


그림 5 제어 방식에 따른 전력 손실 및 효율 그래프

Fig. 5 Power loss and efficiency according to power control.

표 2 IH Cooktop 시스템 제어 방안 비교 결과

Table 2 Results of comparison by IH Cooktop system control

Type	PFM	PDM	AM
효율	Low	High	Medium
제어 용이성	f_{sw} 제어	f_{sw} 제어	$f_{sw} + D$ 제어
사용자 편의성	High	Low	High

(4)를 통해 1.2 [kW] ~ 0.2 [kW] 전력 조건에서 AM 제어를 수행한다.

$$v_{1,rms} = \frac{V_s}{\pi} \sqrt{1 - \cos(2\pi D)} \quad (4)$$

표 1의 설계 조건을 바탕으로 0.2, 0.6, 1.0 [kW] 출력 시 AM을 적용했을 때 V_{pole} 과 I_r 의 PSIM 시뮬레이션 파형은 그림 3(g), (h), (i)와 같다. AM 제어 시 그림 3(a), (b), (c)의 PFM 제어 대비 D 감소로 인해 동일 출력 조건에서 일정 시간 동안 상대적으로 더 짧은 입력 측 전력 전달 구간을 가지며, di/dt 증가로 인해 I_r 의 양의 침투값이 증가하여 S_1 의 Turn off 전류가 증가하는 특징이 있다. 또한 S_2 의 경우 S_1 에 상보적으로 동작하므로 부하가 감소할수록 S_2 를 통한 도통 구간이 증가하는 특징을 보인다.

3. 제어 방식에 따른 손실 및 효율 분석

본 절에서는 2장에서 설계된 IH Cooktop 시스템을 기반으로 PSIM 시뮬레이션 기반 각 제어 방식에 따른 손실 및 효율 분석을 통해 고효율 달성에 유리한 제어 방안을 선정한다. 본 논문에서는 전력반도체 스위치로 Infineon 社 IPW65R080CFD, 다이오드 정류기로 Vishay 社 PB5006-E3 소자를 각각 선정하여 1.2 [kW] 이하 출력 조건에서 각 제어 방식에 따른 전력반도체 소자 손실 및 효율 분석을 진행한다. 이때 전력반도체 소자에서 발생하는 주요 손실로 스위치 도통 손실 (P_{cond}), 스위칭 손실 (P_{sw}), 역병렬 다이오드 도통 손실 (P_{diode})를 고려하며 다이오드 정류기의 주요 손실로 다이오드 도통 손실 ($P_{Diode,cond}$)을 고려하였다^[3].

시스템 내 0.2 [kW] 단위의 출력 조건에서 PFM, PDM, AM 제어 방안을 각각 적용한 경우 전력 손실 및 효율 그래프는 그림 5와 같다. 1.0 [kW] 이상 영역에서는 IH 시스템이 높은 i_r 값을 가지므로 P_{cond} 의 비중이 P_{sw} 보다 크다. 하지만 0.8 [kW] 이하 영역에서는 i_r 의 감소로 인해 P_{cond} 의 비중이 감소하는 반면 P_{sw} 의 비중이 점차 증가하게 된다. 0.8 [kW] 이상 영역에서는 PFM 제어 수행 시 AM 제어에 비해 더 큰 i_r 값이

도통하기 때문에 AM의 효율이 평균 0.21% 더 높다. 한편 0.6 [kW] 이하 영역에서는 AM 제어 방안 적용 시 PFM 제어 방안보다 더 큰 i_r 값을 가져 더 높은 P_{cond} 값을 가지나, PFM 제어는 f_{sw} 증가로 인해 AM 제어 대비 더 높은 P_{sw} 값을 가져 해당 영역에서도 AM이 평균 0.88%의 더 높은 효율을 가진다. PDM 제어의 경우 1.2 [kW] 출력 조건에서의 PFM 제어를 T_{on} 구간 동안 적용하므로 1.2 [kW] 이하 모든 부하 영역에서 동일한 전력 손실 및 효율을 가지며, T_{off} 구간에서는 전류가 도통하지 않으므로 손실이 발생하지 않는다. 따라서 PDM의 경우 PFM 및 AM과 달리 모든 부하 영역에서 일정한 효율을 가지며, 전력반도체 효율 측면에서는 PFM 및 AM 제어 방안 대비 평균 0.62%, 최대 3.21%의 높은 효율을 가진다.

표 2는 시스템 내 1.2 [kW] 이하 경부하 조건에서 PFM, PDM, AM을 각각 적용 시 시스템 손실에 따른 효율, 제어 방식의 용이성, 사용자 편의성 항목을 정리한 결과이다. PFM과 PDM 제어의 경우 f_{sw} 단독 제어를 통해 전 부하 전력 제어가 가능하나, AM 제어의 경우 전체 부하 영역에서 f_{sw} 제어에 추가적으로 전력 대역에 따른 D 제어가 요구된다. 한편 PDM 제어의 경우 불연속 가열 구간의 존재로 인해 연속적인 가열 동작이 가능한 PFM 및 AM에 비해 가열 효율 및 사용자 편의성 측면에서 불리한 특성을 가진다. 분석 결과를 기반으로 제어 방안 적용에 따른 비교 결과 불연속적인 가열 동작을 수행함에 따라 사용자 편의성 측면에서 불리하나 상대적으로 낮은 제어 난이도 및 높은 효율을 가지는 PDM 제어가 1.2 [kW] 이하 경부하 영역 운전 시 고효율 달성에 유리함을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 PDM 및 AM 제어 방식에 따른 IH 시스템의 경부하 운전 시 고효율 달성에 유리한 제어 방안 선정을 진행하였다. 주파수에 따른 워킹 코일 파라미터를 도출하여 3.2 [kW] 급 IH Cooktop 시스템을 설계하였으며, 1.2 [kW] 이하 경부하 영역에서 각 제어 방식 적용에 따른 손실 및 효율 분석을 진행하였다. 시뮬레이션 결과 각 제어 방식의 정상 동작을 확인하였으며 손실 및 효율 비교를 통해 해당 영역에서 PDM 제어 적용 시 시스템의 고효율 달성에 유리함을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] O. Lucia, P. Maussion, E. J. Dede, and J. M. Burdio, "Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 5, pp. 2509-2520, May, 2014.
- [2] O. Lucia, J. M. Burdio, I. Millan, J. Acero, and D. Puyal, "Load-Adaptive Control Algorithm of Half-Bridge Series Resonant Inverter for Domestic Induction Heating", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 8, pp. 3106-3116, Aug, 2009.
- [3] M. J. Kwon, E. Jang, S. M. Park, and B. K. Lee, "Design and Hardware Verification of Power Conversion System for GaN-HEMT Based Anyplace Induction Cooktop", *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 25, No. 6, pp. 451-458, Dec, 2020.