

IH Cooktop 시스템의 부하 임피던스 특성을 고려한 능동 전력 제어 방안

김현수, 황윤성, 강승현, 권만재, 이병국[†]
성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

Active Power Control Technique Considering Load Impedance Characteristics for IH Cooktop Systems

Hyeon Soo Kim, Yun Seong Hwang, Seung Hyun Kang, Man Jae Kwon
and Byoung Kuk Lee[†]

Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 Induction Heating (IH) Cooktop 시스템의 부하 임피던스 특성을 고려한 능동 전력 제어 방안 (Active Power Control, APC)을 제안한다. 용기 종류에 따라 등가 파라미터가 상이하어 IH Cooktop 시스템의 안정적인 제어를 위해 용기 종류 판별이 요구된다. APC 방안 적용 시 용기 판별을 위해 용기 조건에 따른 추가적인 데이터 확보 없이 유연한 전력 제어가 가능하다. 따라서 본 논문에서는 IH 부하의 등가 파라미터 분석을 통한 APC 알고리즘을 설계하며 용기 종류에 따른 실험을 통해 제어 방안의 유효성을 검증한다.

1. 서론

가정용 Induction Heating (IH) Cooktop 시스템은 주파수에 따라 가변하는 워킹코일과 용기의 등가 파라미터 특성을 이용하여 주파수 변조 기법 (Pulse Frequency Modulation, PFM) 기반의 전력 제어를 주로 적용한다^[1]. 이때 워킹코일 상단에 위치하는 용기의 종류 및 상태에 따라 등가 파라미터 성분이 상이하므로 이에 대한 고려가 필요하다. 다양한 용기 종류 중 이중 용기 (Double-bottom pot)의 경우 자성체 용기 (Ferro magnetic pot) 대비 낮은 등가 저항 (R_{eq}) 특성으로 인해 동일 입력 전력 (P_{in}) 상황에서 상대적으로 더 높은 공진전류 (i_r)가 도통한다. 이때 이중 용기에 대해 PFM을 적용하는 경우 지령 전력 (P_{ref}) 만족을 위해 i_r 이 과도하게 증가하게 되어 시스템 설계 시 선정된 전력용 반도체 스위칭 소자의 정격을 초과하는 범위에서 동작하는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 안정적인 전력 제어 및 시스템 손상 방지를 위해 용기 종류 및 상태 판별이 가능한 전력 제어 기법이 요구된다. 이를 위해 스위칭 주파수 (f_{sw})에 따른 용기의 전력 곡선을 추종하는 Power Curve-Fitting Method (PCFM)을 적용할 수 있다^[1]. PCFM을 적용할 경우 전력 곡선을 확보한 용기에 대해 효과적으로 P_{in} 및 f_{sw} 의 제한이 가능하다. 하지만 다양한 용기의 판별을 위해 각 용기의 전력 곡선을 수동적으로 확보해야 하며 확보된 전력 곡선 이외의 용기 위치 시 전력 제어의 신뢰성 및 용기 판별 정확성이 감소하는 단점을 갖는다.

따라서 본 논문에서는 그림 1과 같이 IH 부하 임피던스 특성을 고려한 i_r 양상 분석 기반의 능동 전력 제어 (Active Power Control, APC) 기법을 제안한다. APC를 적용하는 경우

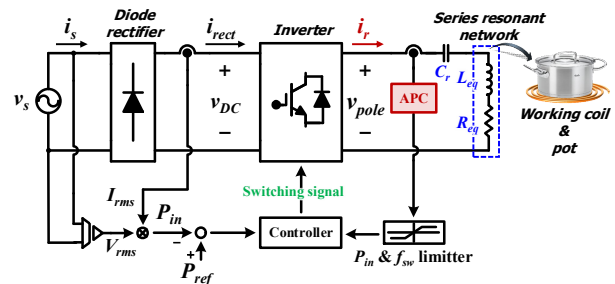


그림 1 가정용 IH Cooktop 시스템 토폴로지 및 제어기 블록 다이어그램
Fig. 1. System configuration and controller block diagram of domestic IH Cooktop systems.

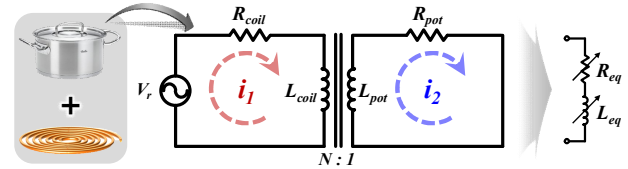


그림 2 워킹코일 및 용기의 전기적 등가 회로
Fig. 2. Electrical equivalent circuit of a working coil and pot.

초기 동작 주파수 (f_{start}) 부근 등가 파라미터에 따른 i_r 크기를 감지하여 용기 조건에 따라 능동적인 가열 동작이 가능하다. 이를 검증하기 위해 IH 부하에 대한 등가 파라미터의 수학적 모델링 및 시뮬레이션을 통해 APC 알고리즘을 설계한다. 또한 Full Bridge Series Resonant Inverter (FB-SRI) 기반 3.2 [kW] 급 IH Cooktop 시스템 test-bed를 구성하고, 용기 종류 및 상태에 따른 P_{ref} 추종 실험 결과 분석을 통해 제안하는 APC 알고리즘의 유효성 및 타당성을 검증한다.

2. IH 부하 모델링 및 용기 종류에 따른 i_r 분석

2.1 용기 종류에 따른 등가 파라미터 분석

워킹코일과 용기는 그림 2의 전기적 등가 회로와 같이 변압기 등가 모델을 통해 각 인덕턴스 성분이 상호 유도 결합된 구조로 해석할 수 있다. 2차 측 성분을 1차 측으로 투영하여 주파수에 따라 가변하는 직렬 등가 저항 (R_{eq}) 및 직렬 등가 인덕턴스 (L_{eq})로 나타낼 수 있으며 공진 네트워크 입력 측에서 바라본 R_{eq} 및 L_{eq} 는 식 (1), (2)를 통해 표현할 수 있다^[2]. 식 (1), (2)를 통해 확인할 수 있듯이 워킹코일 및 용기의 등가 임

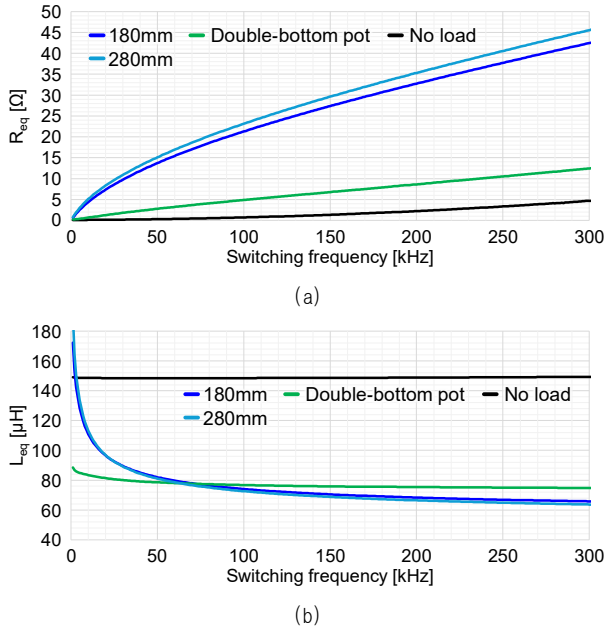


그림 3 워킹코일 및 용기 종류에 따른 등가 파라미터
(a) 등가 저항 (R_{eq}) (b) 등가 인덕턴스 (L_{eq})

Fig. 3. Equivalent parameters of working coil with various type of pots according to the f_{sw} .
(a) Equivalent resistance (R_{eq}) (b) Equivalent inductance (L_{eq})

$$R_{eq} = R_{coil} + \frac{\omega^2 M^2 R_{pot}}{R_{pot}^2 + \omega^2 L_{pot}^2} \quad (1)$$

$$L_{eq} = L_{coil} - \frac{\omega^2 M^2 L_{pot}}{R_{pot}^2 + \omega^2 L_{pot}^2} \quad (M = k \sqrt{L_{coil} L_{pot}}) \quad (2)$$

피턴스는 스위칭 각주파수 ($\omega = 2\pi f_{sw}$)와 상호 인덕턴스 (M)의 영향에 따라 가변하는 특성을 갖는다. 또한 M 은 워킹코일과 용기 간 결합계수 (k)에 영향을 받기 때문에 용기 종류와 크기 및 상태에 따라서 등가 파라미터가 다양하게 측정된다. 그림 3은 HIOKI 社의 IM3536 LCR 미터를 통해 크기가 다른 두 자성체 용기와 이중 용기 및 무부하 조건의 등가 파라미터 측정 결과를 보여준다. 그림 3과 식 (1), (2)를 통해 확인할 수 있듯이 자성체 용기의 경우 워킹코일과 용기 간 높은 k 에 따른 큰 M 으로 인해 R_{eq} 는 높게 측정되며 낮은 L_{eq} 특성을 가진다. 또한 용기의 크기 증가는 코일과의 결합 면적 증가로 해석할 수 있어 용기 크기에 비례하여 k 가 증가하기 때문에 R_{eq} 는 증가하며 L_{eq} 는 감소한다. 이중 용기의 경우 자성체 용기 대비 낮은 k 에 따른 작은 M 으로 인해 자성체 용기의 등가 파라미터 대비 낮은 R_{eq} 와 높은 L_{eq} 특성을 가진다.

2.2 수학적 모델링 기반 i_r 분석 및 시뮬레이션 검증

본 절에서는 용기 종류에 따른 i_r 분석을 위해 FB-SRI 기반 IH Cooktop의 공진 네트워크를 설계하고 수식 분석 및 시뮬레이션을 진행한다. 직렬 공진형 인버터 기반 IH Cooktop 시스템 설계 시 식 (3)을 통해 설계한 공진주파수 (f_r)에서의 공진 커패시턴스 (C_r)를 도출할 수 있다. 이를 통해 공진 네트워크 입력 측에서 바라본 부하 등가 임피던스 (Z_{eq})는 식 (4)와 같이 도출할 수 있으며 i_r 의 rms 값 ($I_{r,rms}$) 및 공진 네트워크 입력 전압 (V_{pole})과 i_r 간 위상각 (θ)는 식 (5), (6)과 같이 도출된다. θ 는 용기에 따른 R_{eq} 와 L_{eq} 특성에 영향을 받으며 이중 용기의 경우 동일 f_{sw} 기준 자성체 용기 대비 낮은 R_{eq} 및 높은 L_{eq} 특성

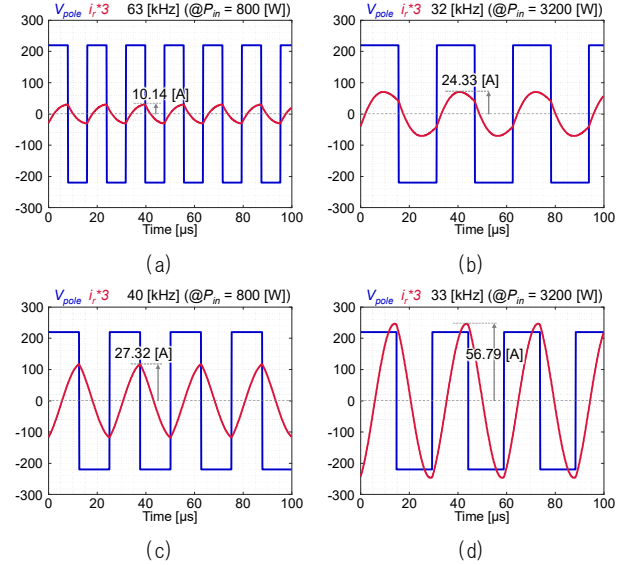


그림 4 용기 종류에 따른 IH Cooktop 시뮬레이션 결과

(a) 자성체 용기 (800 [W]) (b) 자성체 용기 (3200 [W])
(c) 이중 용기 (800 [W]) (d) 이중 용기 (3200 [W])

Fig. 4. Simulation results of IH Cooktop according to pots.

(a) Ferrromagnetic pot (800 [W]) (b) Ferrromagnetic pot (3200 [W])
(c) Double-bottom pot (800 [W]) (d) Double-bottom pot (3200 [W])

표 1 P_{in} 에 따른 용기 종류 별 $i_{r,peak}$ 및 $I_{r,rms}$

Table 1 $i_{r,peak}$ and $I_{r,rms}$ by pot type according to P_{in} .

P_{in}	자성체 용기		이중 용기	
	$i_{r,peak}$ [A]	$I_{r,rms}$ [A _{rms}]	$i_{r,peak}$ [A]	$I_{r,rms}$ [A _{rms}]
800 [W]	10.14	6.93	27.32	17.46
1600 [W]	14.92	11.21	39.45	23.55
2400 [W]	19.24	14.67	49.28	34.05
3200 [W]	24.33	18.26	56.79	39.72

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

$$Z_{eq} = \sqrt{R_{eq}^2 + \left(\frac{\omega^2 - \omega_r^2}{\omega} L_{eq} \right)^2} \quad (4)$$

$$I_{r,rms} = \frac{V_{pole,rms}}{\sqrt{R_{eq}^2 + \left(\frac{\omega^2 - \omega_r^2}{\omega} L_{eq} \right)^2}} \quad (5)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{(\omega - \omega_r)^2 L_{eq}}{\omega R_{eq}} \right) \quad (6)$$

으로 인해 상대적으로 더 큰 지상각을 가진다. 180 [mm] 자성체 용기와 그림 3의 이중 용기의 등가 파라미터를 기반으로 최대 부하 및 경부하 P_{in} 조건에서의 시뮬레이션 결과는 그림 4와 같으며 용기 종류에 따른 i_r 의 최대값 ($i_{r,peak}$) 및 $I_{r,rms}$ 는 표 1과 같다. 그림 4(a)와 같이 800 [W] 경부하 조건에서 자성체 용기의 경우 $i_{r,peak}$ 는 10.14 [A], $I_{r,rms}$ 는 6.93 [A_{rms}]이다. 그림 4(c)를 통해 동일 800 [W] 조건에서 이중 용기는 $i_{r,peak}$ 는 27.32 [A], $I_{r,rms}$ 는 17.46 [A_{rms}]으로 자성체 용기 대비 $i_{r,peak}$ 와 $I_{r,rms}$ 값이 모두 큰 것을 볼 수 있다. 또한 3200 [W]의 P_{in} 조건에서 자성체 용기는 그림 4(b) 및 표 1과 같이 $i_{r,peak}$ 는 24.33 [A], $I_{r,rms}$ 는 18.26 [A_{rms}] 수준이며 이중 용기의 경우 $i_{r,peak}$ 는 56.79 [A], $I_{r,rms}$ 는 39.72 [A_{rms}]이다. 자성체 용기 조건의 최대 부하 동작과 이중 용기 조건의 800 [W] 경부하 동작 상황 간 i_r 의

유사함을 통해 동일 P_{in} 조건에서 이중 용기는 자성체 용기 대비 공진 네트워크에 높은 i_r 도통을 확인할 수 있다. 따라서 이중 용기 위치 상황에서 자성체 용기와 같이 P_{ref} 만족을 위한 가열 모드 및 PFM 제어 지속 시 높은 i_r 로 인해 전력용 반도체 스위칭 소자의 설계 정격을 초과할 수 있어 i_r 양상에 따른 f_{sw} 및 P_{in} 제한이 요구된다.

3. APC 알고리즘 설계 및 유효성 검증

3.1 APC 알고리즘 원리 및 설계

APC 적용 IH Cooktop 시스템은 초기 운전 시 안전 동작을 고려하여 f_{start} 조건에서 P_{ref} 를 만족하도록 PFM을 수행하는 soft-start 기법을 적용한다. 그림 5는 2.2절에서 설계한 IH Cooktop 시스템에 soft-start 적용 시 부하 임피던스 특성을 고려한 APC 기반 P_{in} 및 f_{sw} 설정 알고리즘의 플로우 차트를 나타낸다. 초기 운전 시 f_{sw} 는 f_{start} 에서 70 [kHz] 이하 조건에서 사용자 설정에 따른 P_{in} 이상인 경우 가열 동작을 수행한다. f_{sw} 감소에 따른 위크코일 및 용기의 등가 임피던스 변동에 의해 i_r 및 P_{in} 은 증가하며 i_r 의 실시간 모니터링을 통해 $I_{r,rms}$ 를 계산한다. 자성체 특성을 가진 용기의 경우 이중 용기 대비 높은 R_{eq} 특성으로 인해 f_{sw} 가 70 [kHz] 도달 시 $I_{r,rms}$ 가 9 [A_{rms}] 이하로 측정된다. 이 경우 자성체 용기로 판별 및 P_{ref} 를 만족하기 위한 PFM 수행을 위해 f_{sw} 는 감소할 수 있다. 하지만 이중 용기처럼 자성체 용기 대비 낮은 R_{eq} 특성을 갖는 용기는 동일 f_{sw} 에서 $I_{r,rms}$ 의 9 [A_{rms}]를 초과하게 되며 이 경우 이중 용기로 판단한다. 이때 이중 용기에 P_{ref} 만족을 위한 PFM 제어 적용 시 P_{ref} 에 관계없이 P_{in} 을 제한하며 현재 f_{sw} 를 유지한다. 따라서 PCFM 적용을 위한 curve fitting data의 수동적인 확보 없이 APC 알고리즘 적용을 통해 시스템 보호 및 용기의 종류 혹은 상태 예측이 가능하다.

3.2 IH Cooktop 시스템 적용 APC 유효성 검증

본 절에서는 3.2 [kW] 급 IH Cooktop 시스템의 test-bed 제작을 통해 APC 알고리즘의 유효성을 검증하며 자성체 및 이중 용기 위치 상황의 가열 실험 결과는 그림 6과 같다. Soft-start를 통한 IH Cooktop 시스템 동작 시 PFM 제어에 의해 f_{sw} 가 감소하며 70 [kHz] 이하 조건에서 P_{in} 의 모니터링을 통해 용기 위치 여부를 판단한다. 70 [kHz] 이하 상황에서 70 [W] 이상의 P_{in} 을 만족하지 않는 경우 무부하로 판단 후 f_{sw} 는 f_{start} 로 초기화하며 70 [W] 이상 만족 시 $I_{r,rms}$ 모니터링을 통해 용기의 종류 및 상태를 판별한다. 그림 6의 이중 용기 위치 상황 발생 시 자성체 용기 대비 상대적으로 낮은 R_{eq} 및 높은 L_{eq} 로 인해 경부하 동작 영역에서도 공진 네트워크에 높은 $I_{r,rms}$ 가 도통한다. 이 경우 이중 용기와 같은 특성을 갖는 용기로 판별 후 PFM 제어 중단 및 P_{ref} 에 관계없이 현재 f_{sw} 를 유지한다. 자성체 용기 위치 상황의 경우 이중 용기 대비 높은 k 에 따른 상대적으로 높은 R_{eq} 및 낮은 L_{eq} 로 인해 낮은 $I_{r,rms}$ 가 도통한다. 따라서 70 [kHz] 이하인 상황에서 9 [A_{rms}] 이하의 $I_{r,rms}$ 도통 시 자성체 용기와 유사한 특성을 가진 용기로 판별 후 P_{ref} 를 만족하기 위한 가열 모드 지속 및 PFM 제어를 수행한다. 그림 6을 통해 이중 용기 위치 시 자성체 용기 대비 P_{in} 은 더 낮지만 $i_{r,peak}$ 및 $I_{r,rms}$ 의 유사함을 확인할 수 있다. 따라서 APC 알고리즘 적용 시 용기 종류 및 상태에 따른 i_r 양상

을 통해 효과적인 f_{sw} 및 P_{in} 의 제한이 가능한 것을 확인하였으며 APC 알고리즘의 유효성을 검증하였다.

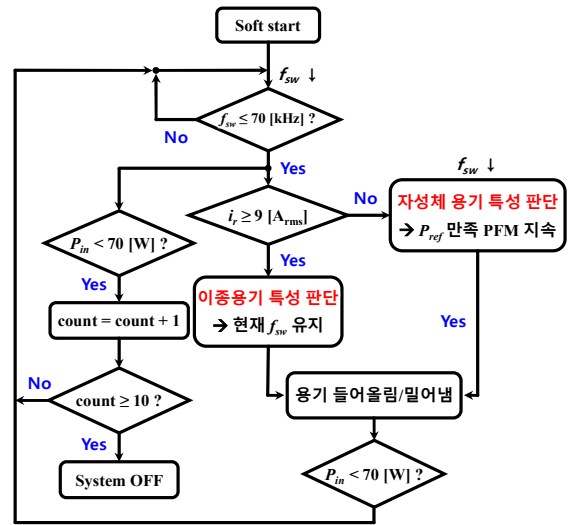


그림 5 APC 알고리즘 플로우 차트
Fig. 5. Flow chart of APC algorithm.

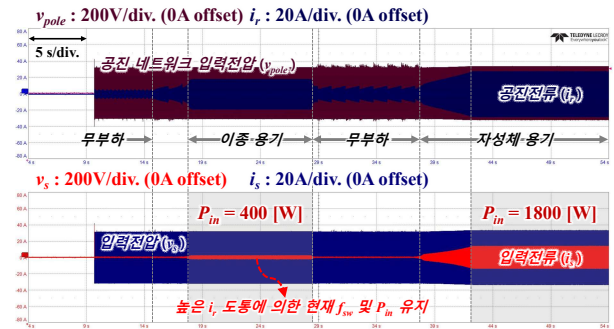


그림 6 APC 적용 실험 결과
Fig. 6. Experimental result of APC algorithm.

4. 결론

본 논문에서는 IH Cooktop 시스템의 전력 제어를 위해 용기 종류 및 상태에 따른 i_r 양상 기반의 APC 알고리즘을 제안하였다. 다양한 용기 조건에 따라 상이한 i_r 를 통해 초기 동작 시 자성체 및 이중 용기 판단을 통해 가열 지속 여부를 결정한다. 3.2 [kW] 급 IH Cooktop 시스템 test-bed 및 용기 종류에 따른 가열 실험을 통해 APC 알고리즘의 유효성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] E. Jang, M. J. Kwon, S. M. Park, H. M. Ahn and B. K. Lee, "Analysis and Design of Flexible-Surface Induction-Heating Cooktop With GaN-HEMT-Based Multiple Inverter System," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 10, pp. 12865-12876, Oct. 2022
- [2] J. Acero, R. Alonso, J. M. Burdío, L. A. Barragan and D. Puyal, "Analytical equivalent impedance for a planar circular induction heating system," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, no. 1, pp. 84-86, Jan. 2006.