

# 유도 가열용 PCB Coil의 동작영역 확대를 위한 위상천이 변조기법

임지은, 이준석, 정지훈  
울산과학기술원

## Phase-Shift Modulation for Extending Operation Region of PCB Coil in Induction Heating Applications

Ji-Eun Ihm, Jun-Suk Lee, and Jee-Hoon Jung  
Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

### ABSTRACT

최근 직접 가열을 통한 빠른 가열 속도와 높은 효율의 이점으로 가정과 산업에서 유도 가열기의 사용이 증가하고 있다. 일반적인 가정용 유도 가열기의 워킹 코일은 손실이 적은 Litz Wire로 구성된다. 하지만 Litz Wire로 구성된 코일은 낮은 생산성과 높은 비용으로 제품의 비용을 높이는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 PCB Coil을 이용한 유도 가열기의 연구가 진행되어 왔다. PCB Coil은 높은 생산성과 일정한 품질을 유지할 수 있는 장점이 있지만, 적은 유효 턴수로 인한 낮은 등가 저항으로 인해 큰 전류가 흘러 인버터의 전력 스위치는 물론 PCB Coil의 도통 손실과 발열 관리의 어려움이 있다. 본 논문에서는 PCB Coil을 이용한 유도 가열기에서 전력 스위치와 Coil의 도통 손실을 낮추고 가열시간을 확보할 수 있는 동작 영역 최적화 방법을 제안한다. 제안하는 최적화 방법의 타당성과 실효성을 1-kW 급 직렬 공진형 인버터와 PCB Coil 시작품을 통해 실험적으로 검증한다.

### 1. 서론

높은 가열 효율과 안정성, 그리고 친환경적인 동작으로 유도 가열 시스템 (IH 시스템)은 산업계와 가정용 어플리케이션으로 많이 사용되고 있다. 일반적인 가정용 IH 시스템은 직렬 공진형 인버터를 이용한 고주파 전류를 이용하여 가열한다. 인버터의 고속 스위칭으로 인해 공진 네트워크에 고주파 교류 전류가 흐르게 된다. 이 교류 전류로 인해 IH 시스템의 코일에 유도 자계가 형성되고, 용기에 와전류 (Eddy Current)가 발생하여 가열된다. IH 시스템의 코일과 용기는 일반적으로 인덕터와 저항으로 모델링 되어 공진 네트워크를 구성한다.<sup>[1]</sup> 따라서 IH 시스템의 특징은 코일과 용기의 특성에 의해 결정된다.

IH 시스템은 표피 효과를 저감 시켜 용기에 전달되는 전력의 효율을 높이기 위해 Litz Wire로 구성된 코일을 사용한다. 그러나 Litz Wire 코일은 높은 생산 비용으로 제품 가격을 증가시킨다. 이를 해결하기 위한 방안으로 Litz Wire 코일보다 가볍고 대량생산을 통한 비용 저감이 가능한 Pattern PCB 코일에 관한 연구가

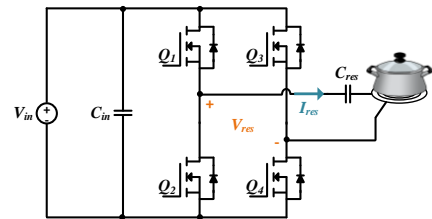


그림 1 유도 가열용 풀-브릿지 직렬 공진형 인버터  
Fig. 1 Circuit diagram of the full-bridge series resonant inverter for IH systems

진행되어왔다.<sup>[2]</sup> PCB 코일은 PCB의 각 층을 이용하여 패턴을 그리게 되면 Litz Wire 코일처럼 사용할 수 있다. 따라서 코일 설계에 자유도가 올라가고 상황에 맞는 모양으로 제작이 가능하다. 또한, Flex-Zone과 같은 더욱 유연한 형태의 조리 환경과 다양한 모양의 조리 용기를 사용할 수 있다. 하지만, PCB 코일의 경우 Litz Wire에 비해 코일 저항이 커서 전력 효율이 낮고, 발열에 취약하다. 또한, 기존의 설계로 PCB 코일의 유효 턴 수 확보가 어려워 용기의 등가 저항이 Litz Wire에 비해 작아 동일한 동작 조건에서 많은 공진 전류가 흐른다. 따라서, 제품의 안정성과 효율이 떨어지고 높은 주파수에서 동작하는 고용량 스위칭 소자를 사용하는 등 안정적인 구현이 어렵다.

본 연구에서는 Litz Wire 코일과 PCB 코일의 전기적인 성능을 비교하고, 인버터에서 스위칭 변조 방식을 통해 PCB 코일로 인한 높은 공진 전류를 제한하는 기술을 제안한다. 제작된 PCB 코일을 이용한 IH 시스템의 타당성과 실효성은 1-kW 급 풀-브릿지 직렬 공진형 인버터 시작품을 통해 실험적으로 검증한다.

### 2. PCB 코일을 이용한 IH 시스템

본 연구에서 제안하는 PCB 코일을 이용한 IH 시스템의 도통 손실을 최소화하기 위해 그림 1과 같이 Full-Bridge 직렬 공진형 인버터를 이용한다. 일반적인 가정용 IH 시스템은 화구의 개수, 출력 전력을 고려하여 Single-Ended (SE), Half-Bridge (HB), Full-Bridge (FB) 직렬 공진형 인버터 (SRI)를 사용한다. 최근 가정용 IH 시스템의 화구 증가로 인해 FB-SRI와 HB-SRI가 널리 사용되고 있다. FB-SRI의 경우 HB-SRI에 비해 스위칭 소자의 개수가 많아 높은 비용이

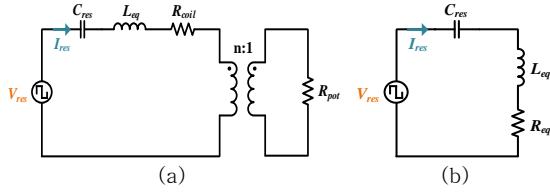


그림 2 유도 가열기의 공진 네트워크: (a) 코일 턴 수를 고려한 공진 네트워크 회로, (b) 공진 네트워크 등가회로  
Fig. 2 Circuit diagrams of the resonant tank for IH systems: (a) Considering the turn numbers of the coil, (b) Equivalent circuit according to the primary side

발생하지만, 동일한 출력 전력 기준에서 전압이득이 두 배로 높아 스위칭 소자와 코일에 부담이 적다. 또한, 스위칭 소자의 개수가 네 개로 IH 시스템 동작에 활용할 수 있는 변조 기법이 다양하다.

IH 시스템의 공진 네트워크는 일반적인 직렬 공진형 컨버터와 같이 공진 캐패시터 ( $C_{res}$ ), 공진 인덕턴스 ( $L_{eq}$ )에 의해 공진 주파수가 결정된다. 또한 용기의 저항과 코일의 저항을 고려하여 공진 네트워크의 Q-Factor도 계산이 가능하다. IH 시스템의 용기의 저항은 그림 2와 같이 코일에 의해 등가 된다. 그림 2(a)와 같이 IH 시스템의 코일의 턴 수를 고려하여 공진 네트워크를 나타낼 수 있다. 이 때 코일의 1차측으로 등가 된 용기의 저항을 그림 2(b)와 같이 표현할 수 있다.

$$R_{eq} = R_{coil} + n^2 R_{pot} \quad (1)$$

따라서, IH 시스템의 코일의 저항과 용기의 저항을 등가 저항  $R_{eq}$ 로 표현하고 식 (1)과 같이 계산할 수 있다. 여기서  $R_{coil}$ 은 코일의 저항이고,  $R_{pot}$ 은 용기의 저항,  $n$ 은 코일의 턴 수를 의미한다. 이 때, 사용하는 코일과 용기가 결정되면  $C_{res}$ 의 설계에 따라 시스템의 공진 주파수와 Q-Factor가 결정된다.

PCB 코일은 Litz Wire와 같이 충분한 도체의 단면적을 유지한 상태에서 턴 수  $n$ 을 늘리는 것에 제한이 있다. 따라서 식 (2)와 (3)에서 기술되는 바와 같이 공진 네트워크의 등가 저항이 상대적으로 작아져 코일과 용기에 흐르는 전류가 커지거나, 코일의 저항이 용기의 저항에 비해 높은 비율이 되어 출력전력이 줄어들게 된다.

$$V_{res} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_s \cdot G_v \quad (2)$$

$$P_o = \frac{V_o^2}{R_{eq}} = \frac{n^4 R_{pot}^2}{(R_{coil} + n^2 R_{pot})^3} V_{res}^2 \quad (3)$$

여기서  $V_{res}$ 는 공진 탱크의 출력 전압,  $V_s$ 는 IH 시스템의 입력 전압,  $G_v$ 는 공진 네트워크의 전압 이득,  $P_o$ 는 출력 전력을 의미한다. 작은  $R_{eq}$ 에 의해 출력 전류의 크기가 커지거나 높은  $R_{coil}$ 에 의해 도통손실이 커지고, 이로 인해 스위칭 소자와 PCB 코일에 부담이 늘어 이를 해소하기 위한 제품의 비용 상승은 물론 신뢰성이 하락한다.

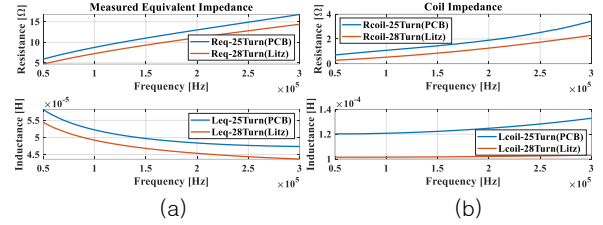


그림 3 IH 시스템의 임피던스 (a)등가 임피던스, (b)코일 임피던스  
Fig. 3 Impedance of IH system (a)Equivalent impedance, (b) Coil impedance

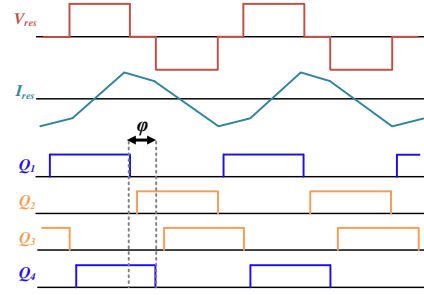


그림 4 FB-SRI의 위상천이 변조 기법 동작 파형  
Fig. 4 Theoretical operating waveforms of the FB-SRI using the PSM

그림 3은 25 턴의 PCB 코일과 28 턴의 Litz wire 코일의 임피던스를 나타낸다. 일반적인 IH 시스템은 FB-SRI에서 높은 출력 전력을 위해 충분한 등가 저항 확보가 필요하다. 다만, 그림 3(b)와 같이 등가 임피던스의 증가를 위해 높은 턴 수의 코일로 설계하면 코일의 저항도 커져 코일의 발열과 전달되는 전력의 손실이 증가한다. 이러한 기술적 한계를 극복하기 위해 본 논문에서 위상 천이 변조기법 (Phase Shift Modulation; PSM)을 통한 출력 전압을 줄이고 전류를 제한하여 IH 인버터와 코일의 부담을 줄이고자 한다.

### 3. 제안하는 IH 시스템 스위칭 기법

그림 4와 같이 제안하는 스위칭 기법은 FB-SRI의 각 레그 간 위상 차이로 전력을 전달하는 PSM을 이용한다. PSM의 위상 천이 각( $\phi$ )의 크기만큼  $V_{res}$ 의 영-전압이 발생한다. 따라서 PCB 코일을 이용하는 IH 시스템에서 주파수 변조 기법 (Pulse Frequency Modulation; PFM)만을 사용할 때보다 제한적인 출력 전류로 인해 도통손실을 최소화할 수 있다.

제안하는 IH 시스템의 스위칭 기법은 식(4), (5)와 같이 기존의 PFM 방식에 PSM을 함께 사용하여 전력을 전달하는 방식으로 영-전압 스위칭 (Zero Voltage Switching; ZVS)를 만족하는 최대의  $\phi$ 로 동작하는 것이 중요하다. 최대 위상  $\phi_{max}$ 는 하기와 같다.

$$A = \angle Z_{in}, \quad B = \cos^{-1} \left( 1 - \frac{4\pi f_{sw} Q_{C_{oss}}}{I_{res, peak}} \right) \quad (4)$$

$$\phi_{max} = 2(A - B_{min}) \quad (5)$$

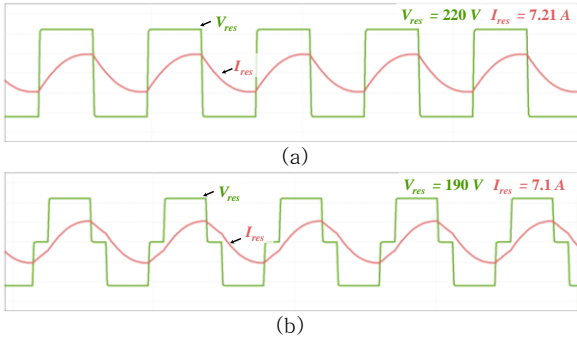


그림 5 IH 시스템의 동작 시뮬레이션 결과: (a) 기존 PFM, (b) 제안하는 PSM  
 Fig. 5 Simulation waveforms of the IH system: (a) Conventional PFM, (b) Proposed PSM

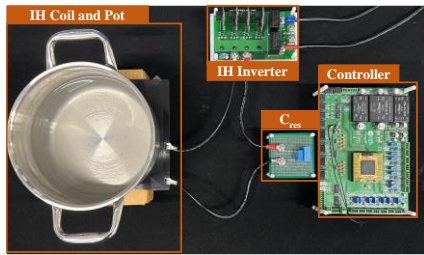


그림 6 IH 시스템 실험 셋업 사진  
 Fig. 6 Photograph of experimental setup of the IH system

표 1 IH 시스템의 설계 사양  
 Table 1 Design parameters of the IH system

	Parameter	Value
$V_{in,DC}$	입력 전압	220 V <sub>DC</sub>
$P_o$	출력 전력	1 kW
$C_{res}$	공진 캐패시턴스	130 nF
	용기	STS-430
$f_{sw}$	동작 주파수	110 kHz ~ 150 kHz

여기서  $A$ 는 공진 네트워크의 임피던스 각,  $B$ 는 출력 전류와 스위칭 소자의 출력 캐패시턴스( $C_{oss}$ )를 고려한  $V_{res}$ 와  $I_{res}$  사이의 위상차를 나타낸다.

그림 5는 PFM으로 동작하는 IH 시스템과 제안하는 스위칭 기법을 이용한 IH 시스템의 모의 실험 결과를 보인다. 공진 주파수는 80 kHz로 설계하였고, 출력 전력이 1 kW일 때, 기존의 PFM 방식은 동작 주파수가 140 kHz로 측정되고, 제안하는 PSM 방식의 동작 주파수는 125 kHz로 약 15 kHz 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 낮은 동작 주파수임에도 제안하는 스위칭 기법을 통한 전류의 제한하고 원하는 출력 전력을 달성할 수 있다.

#### 4. 실험 결과

제안하는 IH 시스템의 스위칭 기법은 그림 7과 같이 실험으로 검증하였다. 실험은 표 1과 같은 설계 사양 하에서 진행됐다. 입력 전압은 220 V, 공진 주파수를 80

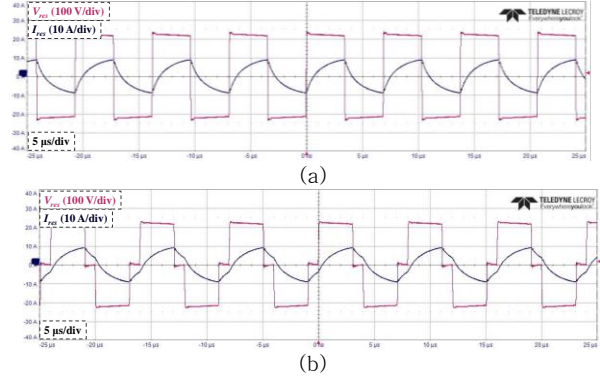


그림 7 IH 시스템 실험 결과: (a) PFM, (b) PSM  
 Fig. 7 Experimental waveforms of the IH system: (a) PFM, (b) PSM

kHz로 설계하기 위해 캐패시턴스를 130 nF로 설계하였다. 그림 7(a)는 1 kW를 위한 PFM 동작 파형을 나타낸다. 동작 주파수는 145 kHz이고, 전압과 전류는 각각 220 V, 6.14 A로 측정된다. 그림 7(b)는 제안하는 스위칭 기법을 이용한 실험 결과를 나타낸다. PSM을 이용하여  $\phi$ 의 크기를 50°로 동작하고, 동작 주파수는 125 kHz로 기존대비 15 kHz 감소하였고 전압과 전류는 각각 190 V, 6.2 A로 측정된다. 따라서 제안하는 스위칭 기법으로 PCB 코일을 이용하는 IH 시스템에서 출력 전류의 제한을 주고 더 낮은 주파수로 동작하여 스위칭 손실을 줄일 수 있다.

#### 5. 결론

본 논문은 PCB 코일을 이용한 IH 시스템의 높은 출력 전류를 제한하고 동작 주파수를 낮추는 스위칭 기법을 제안한다. 낮은 등가 저항으로 인한 높은 출력 전류가 흐르는 PCB 코일을 이용한 IH 시스템에서 PSM을 이용하여 출력 전압의 크기를 약 30 V 낮추고 전류를 6.14 A로 제한하여 동작 주파수를 15 kHz 낮추었다. 따라서 PCB 코일의 낮은 등가 저항으로 인한 출력 전류의 문제를 완화하였고, 동작 주파수를 높이 지 않고 원하는 출력 전력에서의 동작을 확인하였다.

이 논문은 2024년도 LG전자의 지원을 받아 수행된 선행연구사업임 (NO. 2.240467.01)

#### 참고문헌

[1] 정시훈, 박화평, 정지훈. "낮은 저항의 IH 전용용기를 가열할 수 있는 유도 가열 컨버터와 코일 설계", 전력전자학회 학술대회 논문집, 2017, 164-165.  
 [2] I. Lope, J. Acero, J. Burdío, C. Carretero, R. Alonso, "Design and implementation of PCB inductors with litz-wire structure for conventional-size large-signal domestic induction heating applications." *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.51, no.3, pp. 2434-2442, May 2014.