

# 유도 가열 시스템의 낮은 저항 용기 가열 성능 향상을 위한 최적 고조파 선택 기법

정원식, 허경욱, 이준석, 정지훈  
울산과학기술원, 전기공학과

## Optimal Harmonic Selection Technique for Improving Induction Heating Performance of Low Resistance Pot

Wonsik Jeong, Kyungwook Heo, Jun-suk Lee, Jee-Hoon Jung  
Department of Electrical Engineering

Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

### ABSTRACT

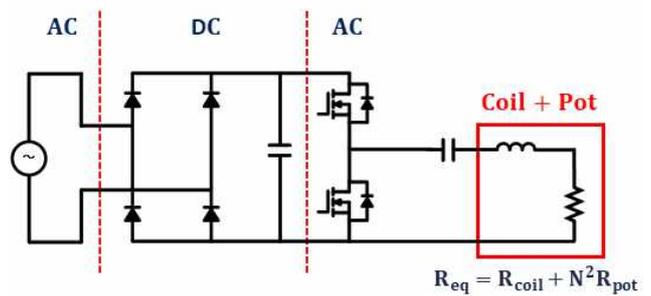
가정용 유도 가열기는 기존의 가열 방식과 비교하여 높은 효율과 높은 안전성 그리고 고속 가열의 이점으로 인해 빠르게 성장하고 있다. 그러나 유도 가열 방식의 단점 중 하나는 제한적인 용기의 가열 범위이다. 낮은 저항을 갖는 용기는 큰 전류를 유도하기 때문에 스위치의 전류 제한으로 인해 적절한 가열을 위한 출력 전달이 불가능하다. 이는 코일의 턴 수를 증가시키거나 스위칭 주파수를 높여 용기의 등가저항을 증가시킴으로써 해결할 수 있다. 그러나 코일의 턴 수를 증가시킬 경우 높은 저항을 갖는 용기의 가열이 불가능한 문제가 있다. 또한 스위칭 주파수를 높이는 방식의 경우 고성능 스위치를 요구하기 때문에 전체 시스템 비용이 증가한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기존에 Third Harmonic Modulation (THM) 방식이 제안되었으나, 기본파의 영향으로 인해 ZVS 실패의 가능성이 높아 제한된 가열 성능을 가진다. 본 논문에서는 낮은 저항을 갖는 용기 가열 성능 향상을 위한 최적 고조파 선택 기법을 제안한다. 1-kW급 직렬 공진형 인버터 시작품을 통해 제안된 기법의 타당성을 검증한다.

### 1. 서론

유도 가열(Induction Heating)은 다른 가열 기술들과 비교하여 높은 효율과 높은 안전성 그리고 고속 가열의 이점으로 인해 산업계, 가정 및 의료계 등의 다양한 분야에서 성장하고 있다. 가정용 유도 가열 인버터는 그림 1과 같이 AC 전원을 DC로 전환하는 정류 다이오드, DC를 AC로 다시 전환하는 스위칭 소자 및 공진 탱크로 구성되어 있다. 유도 가열은 스위칭을 이용하여 생성한 고주파 전류를 유도 가열 코일을 통해 자계를 발생시키고 자계에 의하여 용기에 와전류를 유도하여 용기를 가열한다. 다만 유도 가열의 가열 방식으로 인해 Ferromagnetic 재질 이외의 낮은 저항을 갖는 용기는 스위치에 큰 전류를 유도하기 때문에 적절한 가열이 불가능한 문제가 있다. 이를 해결하기 위한 방안에는 등가 저항을 크게 하기 위하여 코일의 턴 수를 크게 하거나 동작 주파수를 높이는 것이 있다.

다만 코일의 턴 수를 크게 할 경우 Ferromagnetic 계열의

용기의 등가 저항이 과도하게 커져 적절한 가열이 불가능하고 코일 턴 수로 인한 추가적인 비용의 문제가 있으며 동작 주파수를 높게 하는 경우 또한 고성능의 전력 스위치를 요구하기 때문에 비용 상승의 문제가 존재한다. 서술한 문제를 해결하기 위한 방안으로 3고조파 변조 기법 (Third Harmonic



Modulation, THM)이 제안되었다 [1].

그림 1. 다이오드 정류기 및 IH 시스템

### 2. 3고조파 변조 기법 (THM)

그림 1에서 DC를 스위칭 소자를 이용하여 AC로 변환하면 구형파가 나타나게 되는데 구형파의 경우 홀수 차수의 고조파들이 존재한다. 유도 가열 시스템의 경우 고조파 중 성분의 크기가 가장 큰 기본파에 맞춰 공진탱크를 설계하는 것이 일반적이다. 하지만 3고조파 변조 기법은 고조파 중 기본파를 제외하고 가장 높은 전압을 얻을 수 있는, 스위칭 주파수의 3배의 주파수를 갖는 3고조파를 이용하는 방식이다.

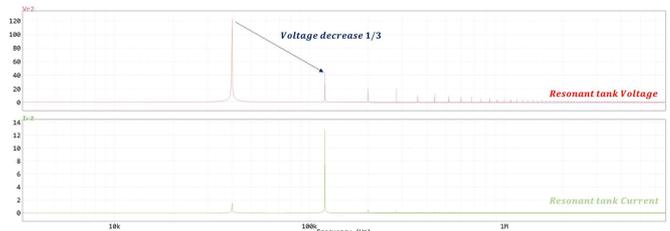


그림 2. 3고조파 변조 기법 공진탱크 전압 및 전류의 고조파 성분

데 유효 시비율과 고조파들의 크기 수식은 식 (1)과 같다.

$$Amp_{p_h} = \frac{1}{h\pi} [2\sin(h\pi D)] \quad (1)$$

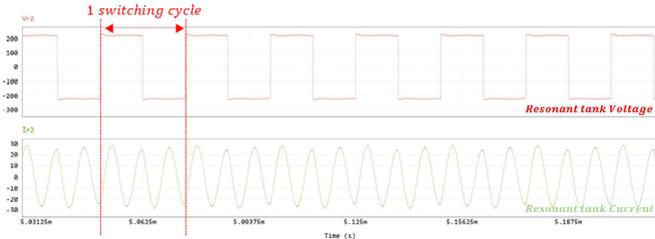


그림 3. 3고조파 변조 기법 공진탱크 전압 및 전류 파형

그림 2와 같이 3고조파의 경우 기본파 대비 1/3배의 전압 성분을 가지고 있으며 등가저항이 높아지기 때문에 스위치에 인가되는 전류가 감소하여 낮은 저항을 갖는 Non-ferromagnetic 재질의 용기에서도 유도 가열이 가능하게 한다. 다만 그림 3의 공진탱크 전류 그래프와 같이 3고조파 변조 기법은 기본파 성분을 감소시키지만 완전히 제거하지 못하기 때문에 기본파에 의한 전류의 왜곡이 나타나게 된다. 3고조파 변조 기법에서 기본파 성분은 공진점보다 낮은 주파수를 가지므로 Capacitive 영역에 존재하기 때문에 전류가 전압 대비 Leading 하는 효과가 있다. 따라서 3고조파 변조 기법의 경우 하드 스위칭의 가능성이 높아지는 문제가 있다. 3고조파 변조 기법의 문제점을 개선하기 위해 제안하는 위상 천이 3고조파 변조 기법은 위상 천이를 통해 고조파 성분의 크기를 조절하여 기존의 3고조파 변조 기법의 하드 스위칭의 가능성을 낮추고 가열 성능을 향상시킬 수 있다.

### 3. 위상 천이 3고조파 변조 기법 (PS-THM)

#### 3.1 위상 천이 변조(Phase Shift Modulation)

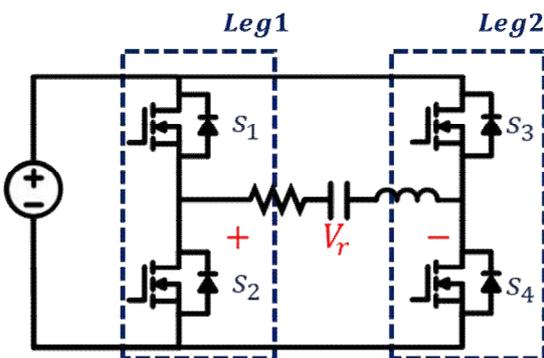


그림 4. Full-Bridge 유도 가열 인버터의 회로도

그림 4는 Full-Bridge 유도 가열 인버터를 나타낸 그림이다. 위상 천이 기법은 Full-Bridge Leg간의 위상을 다르게 하여 공진탱크에 인가되는 전압의 유효 시비율을 조절하는 방식이다. 유효 시비율을 조절 시, 각 고조파들의 성분 크기가 변화하는

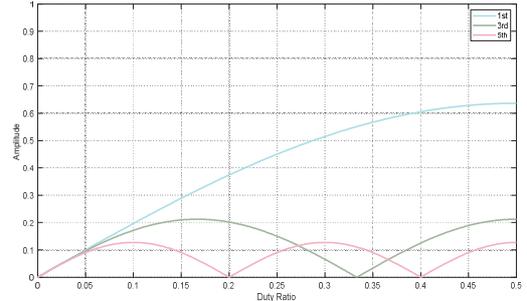


그림 5. 유효 시비율에 따른 1, 3, 5 고조파 성분

그림 5는 식 (1)을 통해 기본파 및 3, 5 고조파 성분들을 나타낸 그림이다 [2]. 위상 천이 없이 유효 시비율을 0.5로 하여 스위칭 동작할 경우 나타낸 고조파의 성분 크기는 최대가 된다.

#### 3.2 위상 천이 3고조파 변조 기법 (PS-THM)

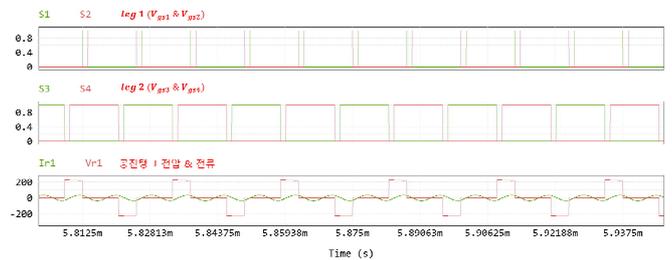


그림 6. Phase Shift - Third Harmonic Modulation 기법의 동작 파형

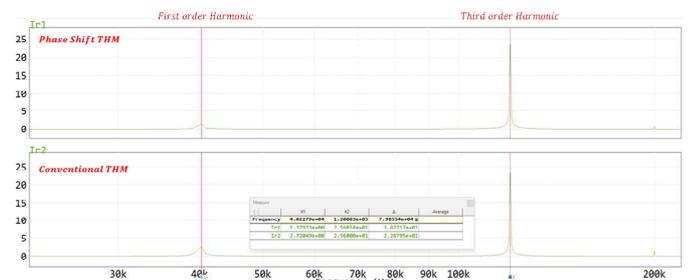


그림 7. Third Harmonic Modulation 기법의 기본파, 3고조파 성분

그림 6과 같이 유효 시비율을 1/6으로 설정하고 스위칭 동작할 경우와 유효 시비율을 0.5로 스위칭 동작할 경우와 비교했을 때 필요한 3고조파 성분의 크기는 동일하게 최대를 갖지만 1고조파 성분의 크기는 절반으로 감소하게 된다. 그림 6과 그림 7 모두 동일한 회로 구성에 유효 시비율만 다른 상태에서 진행한 시뮬레이션 결과이다. 그림 7을 통해 40 kHz 스위칭

기준으로 기본파인 40 kHz와 3고조파인 120 kHz의 성분 크기를 비교하면 3고조파 성분은 동일하고 기본파의 크기가 절반으로 감소한 것을 확인할 수 있다.

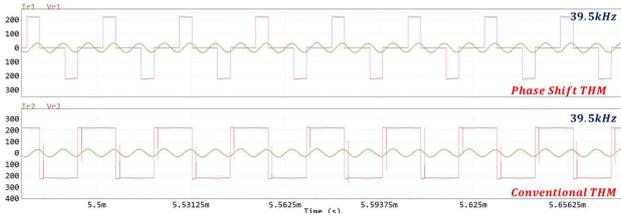


그림 8. 39.5kHz 동작 시 주파수 시뮬레이션 파형

그림 8을 보면 동일한 회로 및 동작 주파수에서 시뮬레이션을 진행한 결과 기존의 3고조파 변조 기법의 경우 Hard Switching 하는 것을 알 수 있고, 제안한 위상 천이 3고조파 변조 기법의 경우 Soft Switching 하는 것을 알 수 있다. 따라서 제안한 방식이 기존의 3고조파 변조 기법 대비 공진 탱크에서 더 높은 전압 이득을 얻을 수 있기 때문에 더 높은 출력 전력이 가능하다.

#### 4. 실험 결과

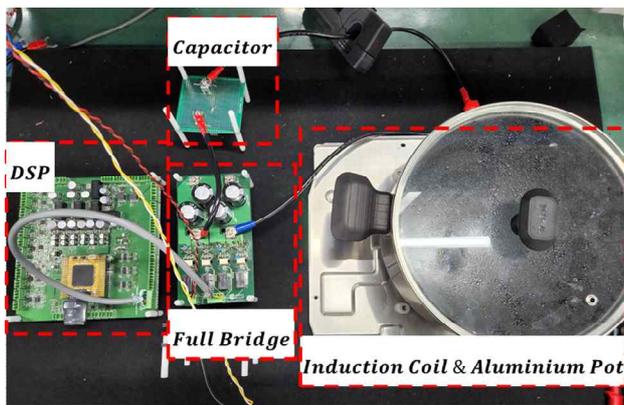


그림 9. 1 kW급 유도 가열 인버터 시작품

제안한 위상천이 3고조파 변조 (PS-THM) 기법의 실효성을 검증하기 위해 그림 9와 같이 1 kW급 Full-Bridge 유도 가열 인버터를 구성하여 실험하였다. 표 1은 실험의 설계 사양을 나타낸다.

	Parameter	Value
$V_{in}$	Input Voltage	220 Vdc
$f_{sw}$	Switching Frequency	38.5 kHz ~ 38.9 kHz
$C_r$	Resonant Capacitance	45 nF
$L_r$	Resonant Inductance	45.1uH
n	Coil Turn	28
	Pot Material	Aluminium

표 1 실험에 사용된 유도 가열 인버터의 설계 사양

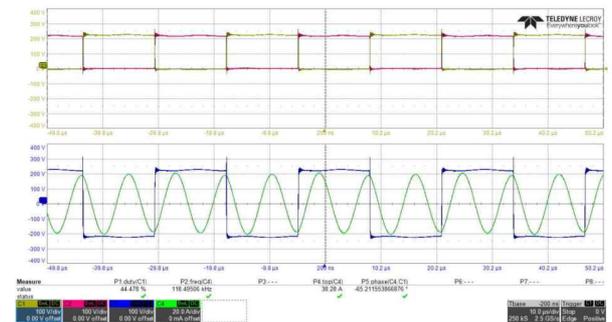


그림 10. 기존 3고조파 변조 기법의 실험 파형

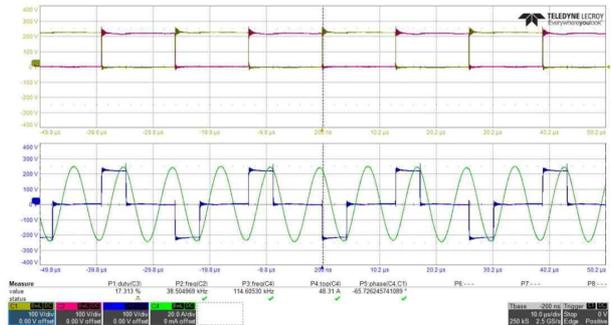


그림 11. 제안하는 위상천이 3고조파 변조 기법의 실험 파형

그림 10의 기존 3고조파 변조 기법의 경우 38.8 kHz 까지 소프트 스위칭이 가능하였으며 해당 주파수에서 650 W 출력을 보여주었다. 그러나, 그림 11의 제안하는 위상천이 3고조파 변조 기법의 경우 38.5 kHz 까지 Soft Switching이 가능하였으며, 해당 주파수에서 954 W 출력을 나타냈다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 낮은 저항을 갖는 용기도 유도 가열을 통한 가열 성능 향상을 위하여 위상천이 3고조파 변조 기법을 제안하였다. 실험 결과 소프트 스위칭 범위 내에서 기존 650 W 출력에서 954 W 출력으로 출력 성능이 약 1.5배 향상 되었다. 실제 3고조파 변조 기법 대비 가열 성능이 향상 되었음이 검증 되었다.

이 논문은 2023년도 LG전자의 지원을 받아 수행된 선형  
연구사업임 (No. 2.230145.01)

## 참 고 문 헌

- [1] Millán, I.; Burdío, J.M.; Acero, J.; Lucía, O.; Llorente, S.: 'Series resonant inverter with selective harmonic operation applied to all-metal domestic induction heating', IET Power Electronics, 2011, 4, (5), p. 587-592, 2010.0107
  
- [2] H. Cai, L. Shi and Y. Li, "Harmonic-Based Phase-Shifted Control of Inductively Coupled Power Transfer," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 2, pp. 594-602, Feb. 2014