

유도 가열용 직렬 공진형 인버터의 동작 주파수 변동 최소화를 위한 하이브리드 스위칭 기법에 관한 연구

이준석, 정원식, 허경욱, 정지훈
울산과학기술원 전기공학과

Hybrid Switching Modulation Methods of Series Resonant Inverters to Reduce Operating Frequency Variations in Induction Heating Systems

Jun-Suk Lee, Won-Sik Jeong, Kyung-Wook Heo and Jee-Hoon Jung

Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST) Department of Electrical Engineering

ABSTRACT

유도 가열은 빠른 가열속도, 화석연료를 사용하지 않는 친환경, 직접 가열에 따른 고효율의 이점으로 인해 가정과 산업에서 널리 사용되고 있다. 유도 가열 인버터로 직렬 공진형 토폴로지가 주로 사용되며 주파수 변조 기법 (Pulse Frequency Modulation, PFM)에 의해 전력이 제어된다. PFM은 직렬 공진형 인버터를 유도성 부하 영역에서 동작시킴으로써 ZVS를 달성할 수 있는 이점이 있다. 그러나 저부하 영역에서는 높은 스위칭 주파수로 인한 큰 스위칭 손실을 초래한다. 또한 넓은 스위칭 주파수 변동 범위는 유도 가열 시스템에서 소음을 유발할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 풀-브리지 구조에서 PFM과 위상 천이 변조 (Phase Shift Modulation; PSM)를 결합한 하이브리드 스위칭 알고리즘을 제안하고자 한다. PFM+PSM을 통해 IH 인버터가 저부하에서도 비교적 낮은 스위칭 주파수에서 동작할 수 있어 작은 스위칭 주파수 변동을 달성할 수 있다. 3.3-kW급 직렬 공진형 유도 가열 시스템 시작품을 통해 제안하는 스위칭 알고리즘의 효율성과 타당성을 검증한다.

1. 서론

최근 유도 가열 시스템(IH 시스템)은 높은 가열효율과 안정성 등으로 산업계와 가정용 어플리케이션에 많이 사용되고 있다. IH 시스템의 기본 구성으로는 그림 1과 같이 스위칭 네트워크, 직렬 공진 탱크와 워킹 코일이 있다. IH 시스템의 동작 원리는 스위칭 네트워크에 전원이 인가되면 공진 탱크로 고주파 교류 전류가 흐르게 된다. 이 교류 전류로 인해 부하 코일에 유도 자계가 형성되고, 부하 용기에 와전류(Eddy Current)가 발생하여 가열된다.

IH 시스템의 부하 코일과 용기는 일반적으로 인덕터와 저항으로 모델링한다 [1]. IH 시스템에서는 주로 코일의 턴 수, 용기의 재질 그리고 동작 주파수가 저항의 크기와 출력 전력에 영향을 준다. 또, 모델링 된 인덕터와 공진 탱크의 커패시터의 크기에 의해서 공진 주파수가 결정되고 IH 시스템의 ZVS 달성과 전력 효율을 위해서 공진 주파수에 가까운 유도성 부하 영역에서 동작해야 한다.

최근 가정용 IH 시스템은 2개 이상의 화구를 쓰는 것이 일반적이다. 여러 개의 화구를 동작시킬 때 화구 간의 동작 주파수 차이가 20 kHz보다 가까우면 주파수 간섭에 의한 가청 소음이 생길 수 있다. 이런 가청 소음을 줄이기 위해서는 각 화

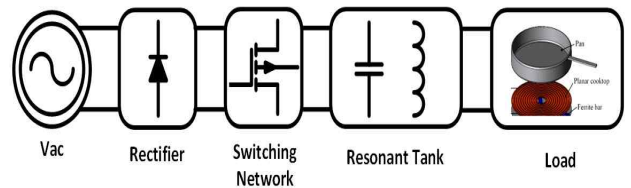


그림 1 다이오드 정류기를 이용한 IH 시스템의 구조

Figure 1 Structure of induction heating system with diode rectifier

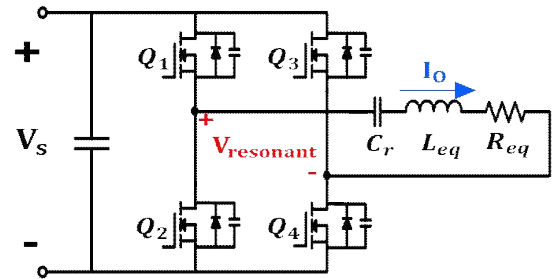


그림 2 풀-브릿지 직렬 공진형 인버터의 회로도

Figure 2 Circuit diagram of full-bridge series resonant inverter

구의 주파수 대역 간의 이격 주파수를 넓게 설정하는 것이 중요하다. 하지만 기존의 주파수 변조(Phase Shift Modulation; PFM) 방식의 경우에는 주파수 변동으로 전력을 제어하기 때문에 추가적인 전력 제어 기법이 필요하다.

본 논문에서는 주파수 변동의 최소화를 통해 다중 화구 IH 시스템에서의 가청 소음을 줄이는 알고리즘을 제안하고 실험을 통해 검증하고자 한다.

2. 하이브리드 스위칭 기법

2.1 IH 시스템의 전력 제어 원리

IH 시스템은 전력 제어를 위해 주파수 변조를 주로 사용한다. 또한 직렬 공진형 인버터는 공진 주파수에서 동작할 때 출력 전압 이득이 최대가 되기 때문에 최대 전력 전달이 가능하다. 따라서 코일과 용기가 결정되면 공진 주파수를 결정하는

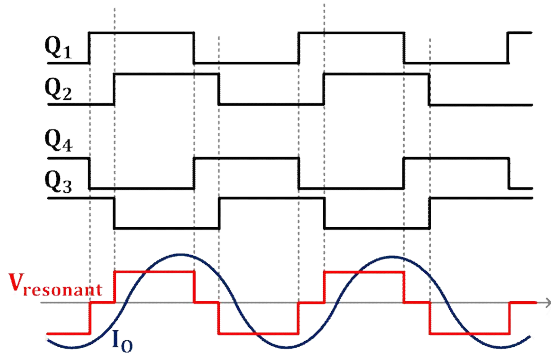


그림 3 Phas Shift Modulation의 공진 탱크 전압과 전류
Figure 3 Waveforms of resonant tank voltage and current using phase shift modulation



그림 4 PFM 방식을 이용한 전력 제어와 Hybrid Modulation을 이용한 전력 제어 시뮬레이션 파형
Figure 4 Power control simulation waveforms of PFM and Hybrid Modulation

공진 캐패시터 설계가 중요하다.

그림 2는 풀-브릿지 직렬 공진형 인버터를 나타내고 있다. 공진 탱크의 입력전압은 식 (1)로 계산할 수 있고 이때 전압 이득 G_v 는 식 (2)로 계산할 수 있다 [1]-[2]. 식(1)에서 $V_{resonant}$ 는 공진 탱크 입력전압, V_s 는 전체 시스템의 입력전압을 나타내고 식(2)에서 w_L 과 w_C 는 등가 인덕턴스의 각 주파수와 공진 캐패시터의 각 주파수, w_o 는 스위칭 주파수를 나타낸다.

$$V_{resonant} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \times G_v \times V_s \quad (1)$$

$$G_v = \frac{1}{1 + j\frac{\pi^2}{8} Q \left(\frac{w_L}{w_o} - \frac{w_C}{w_o} \right)} \quad (2)$$

식(1)과 (2)를 통해서 IH 시스템의 스위칭 주파수가 공진 주파수일 때 전압 이득이 1이 되고 공진 탱크 입력 전압이 최대가 되는 것을 알 수 있다. 따라서 식 (3)과 같이 출력전력을 계산할 수 있다.

$$P_{Transfer} = V_{resonant} I_o = R_{eq} \frac{\frac{2V_s \sqrt{D}}{\pi} \sin(\pi D)}{\sqrt{R_{eq}^2 + \left(\omega L_{eq} - \frac{1}{\omega C_r} \right)^2}} \quad (3)$$

식 (3)을 통해서 IH 시스템의 스위칭 주파수가 높을 때 출력전력이 낮아지는 것을 알 수 있다 [3]-[4]. 식 (3)의 $P_{transfer}$ 은 출력전력, I_o 는 출력 전류, D 는 듀티를 나타낸다. 이런 공진형 인버터의 전력 제어 특징으로 다중 화구를 이용하는 시스템에서 동작 주파수 간의 좁은 간격으로 간섭 소음의 문제가 대두되고 있다. 이런 간섭 소음을 줄이기 위해서는 동작 주파수 변동을 최소화하는 것이 필수이다. 따라서 주파수의 변동을 최소화하기 위해 위상천이 변조(Phase Shift Modulation; PSM) 방식을 이용해 영전압을 만들어 출력 전압을 낮추는 방식을 제안한다.

2.2 하이브리드 스위칭 알고리즘

IH 시스템의 전력을 PFM 방식으로 제어하면 식(1), (2)와 같이 출력 전력에 따라서 주파수 변동이 커진다. 따라서 낮은 출력을 위해서 공진형 인버터는 높은 주파수에서 동작해야하고 다중 화구를 이용한 IH 시스템을 이용할 때 가청 소음은 불가피하다. 따라서 기존의 PFM 방식에 PSM을 추가하여 낮은 출력 전력 구간에서 주파수 변동을 최소화한다.

그림 3은 각 스위치의 위상 변화에 따른 공진 탱크 입력 전압과 전류를 나타내고 있다. 이때 위상이 변한 만큼 영전압 구간이 늘어나면서 식 (3)에 의해 출력 전력을 낮출 수 있다. 이처럼 기존의 PFM 방식으로 전력 제어를 하는 것보다 PFM + PSM 방식으로 전력 제어를 하면 낮은 전력 구간에서 주파수를 크게 늘리지 않고 제어가 가능하다. 따라서 다중 화구 IH 시스템에서 가청 소음을 제거할 수 있는 주파수 대역을 확보할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 하이브리드 스위칭 기법은 그림 4와 같이 주파수 변동을 줄이면서 PFM 방식과 같은 출력 전력을 얻을 수 있다. 그림 4의 시뮬레이션은 STS-430 용기의 저항과 인덕턴스를 측정하여 사용하였고 공진 캐패시터는 $0.48\mu F$ 로 설계하였다. 3.3 kW 출력 전력은 기존 PFM방식으로 동작시키고 2.5 kW부터 1 kW까지 제안하는 하이브리드 알고리즘으로 구동시킴으로써 8 kHz 만큼 스위칭 주파수를 감소시킬 수 있었다.

3. 실험 결과

표 1 직렬 공진 인버터의 설계 사양

Table 1 Design Specifications of Series resonant inverter

	Parameter	Value
$V_{in,DC}$	Input Voltage	220 Vdc
C_r	Resonant Capacitor	480 nF
-	Pot Material	STS - 430
f_{sw}	Switching Frequency	29kHz, 48kHz, 60kHz

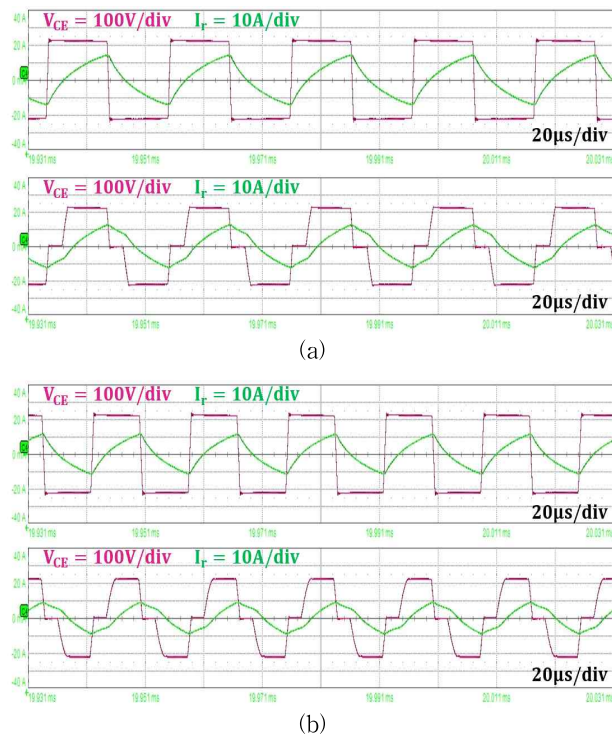
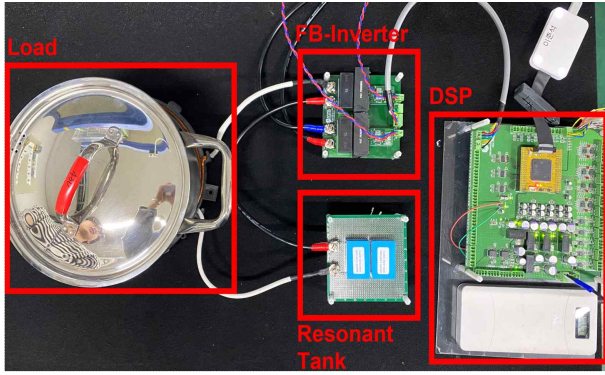


그림 5 (a) 48kHz PFM 방식과 PFM+PSM 방식 동작 파형
(b) 60kHz PFM 방식과 PFM+PSM 방식 동작 파형
Figure 5 (a) Waveform of PFM and PFM+PSM at 48kHz
(b) Waveform of PFM and PFM+PSM at 60kHz

하이브리드 스위칭 기법을 이용한 주파수 변동 최소화 알고리즘을 포함한 IH 시스템은 그림 4와 같이 부하, 풀-브릿지 인버터, 공진 탱크와 DSP로 구성된다. 실험 설계 사양은 표 1과 같이 220 Vdc 입력 전압으로 STS-430 용기를 가열하였고 공진 캐패시터는 0.48 μ F로 설계하였다.

그림 5는 기존의 PFM 방식과 제안하는 하이브리드 알고리즘의 실험 파형을 나타낸다. 그림 5(a)는 48 kHz에서 PFM 방식과 PFM+PSM 방식의 동작 파형을 나타내고 있다. 먼저 기존의 PFM 방식은 1kW의 전력을 출력하고 제안하는 PFM+PSM 방식은 787 W이다. 그림 5(b)는 60 kHz의 스위칭 주파수로 동작 시킨 파형을 나타내고 있다. 먼저 PFM 방식으로 동작하면 745 W의 출력 전력을 얻을 수 있고 제안하는 스위칭 방식의 출력 전력은 630 W이다.

이처럼 그림 6과 같이 동일한 주파수에서 동작할 때 출력 전압이 낮아지는 것을 확인할 수 있었고 제안하는 스위칭 기법

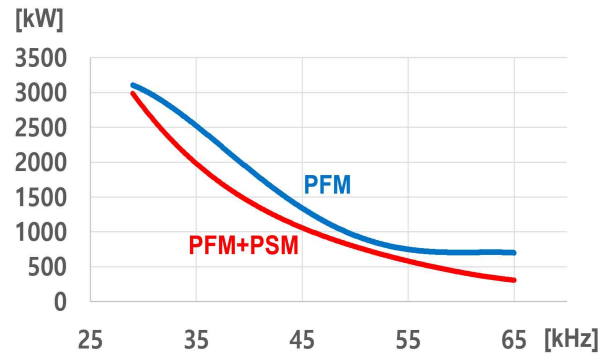


그림 6 기존의 PFM과 제안하는 PFM+PSM 방식의 주파수 변동 차이

Figure 6 Difference of Frequency Variation between Conventional PFM and Proposed PFM+PSM

이용하면 주파수 변동을 최소화하여 다중 화구 IH 시스템에서 코일 간의 가청 소음을 줄일 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 하이브리드 스위칭 기법을 사용하여 IH 시스템의 주파수 변동을 최소화하는 알고리즘을 제안하였다. 최종적으로 3.3 kW 직렬 공진 인버터를 통해 실험을 수행하였고 동작 주파수 변동을 최소화하여 다중 화구 IH 시스템에서 코일 간의 가청 소음을 줄일 수 있는 동작 범위를 확보하였다.

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

참 고 문 헌

- [1] 정시훈, 박화평, 정지훈. “낮은 저항의 IH 전용용기를 가열할 수 있는 유도 가열 컨버터와 코일 설계,” 전력전자학회 학술대회 논문집, 2017,164-165.
- [2] M.K. Kazimierzuk, “Class D voltage-switching MOSFET power amplifier”, in IET Proceedings B vol.138, pp. 285-296, November 1991, doi: 10.1049/ip-b.1991.0035.
- [3] L. Grajales, J. A. Sabate, K. R. Wang, W. A. Tabisz and F. C. Lee, “Design of a 10 kW, 500 kHz phase-shift controlled series-resonant inverter for induction heating,” Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting, Toronto, ON, Canada, vol.2 pp. 843-849, 1993, doi: 10.1109/IAS.1993.298997.
- [4] O. Lucia, J. M. Burdio, I. Millan, J. Acero and S. Llorente, “Efficiency optimization of half-bridge series resonant inverter with asymmetrical duty cycle control for domestic induction heating,” 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, Spain, pp. 1-6, 2009.