

고 전력 응용을 위한 유도가열 Jar용
Active-Clamped Class-E 인버터 시스템의 새로운 Hybrid 제어 기법

이동윤*, 이만광*, 현동석*, 김정철**, 최 익***

*한양대학교 전기공학과, **LG 디지털 어플라이언스, ***한국과학기술연구원 지능제어 연구센터

A New Hybrid Control Scheme with Active-Clamped Class-E Inverter system of Induction Heating Jar for High Power Applications

Lee Dong-Yun, Lee Min-Kwang, Hyun Dong-Seok, Kim Jung-Chul and Choi Ick
HanYang Univ., LG Digital Appliance, KIST

Abstract - This paper presents a new hybrid control scheme using Active-Clamped Class-E (ACCE) inverter of induction heating(IH) jar for high power applications. The proposed hybrid control scheme has characteristics, which act as class-E inverter at lower switch voltage and ACCE inverter at higher switch voltage than reference voltage of the main switch by feeding back voltage one as well as advantages of conventional ACCE inverter such as zero-voltage switching(ZVS) of the main switch and the reduced switch voltage due to the clamping circuit. Moreover, the proposed control method makes higher output power than conventional ACCE inverter control one since ACCE inverter is operated like class-E inverter at low voltage condition. The principle of the proposed control are explained in detail and the validity of the proposed control scheme is verified through the several interesting simulated and experimental results.

1. 서 론

유도 가열 (Induction Heating)은 1831년 Michael Faraday의 전자 유도 현상을 이용하는 것으로 가열 코일에 고주파 교류 전류가 흐를 때 발생하는 고주파 교류 자기장에 도전성의 금속 물질을 위치시키면 금속 물질의 표면에 유도 와전류 (Eddy Current)가 발생하여 금속의 표피 저항에 의한 Joule열이 발생하게 되는 원리이다. 이러한 유도가열방식은 연소에 의한 발열과 비교하여 다음과 같은 우수한 장점을 지니고 있다.

- 가열효율이 높기 때문에 (가스기: 70%, 유도가열: 90%이상) 경제적이다.
- 신속한 가열을 통하여 Warming Up 등을 위하여 소비되는 손실을 줄일 수 있다.
- 출력 및 온도의 제어가 용이하여 사용이 편리하다.
- 안전성이 뛰어나다.
- 배출가스 등의 오염 물질의 발생이 없어 위생적이며 청결하다.

이러한 유도가열 기술은 현재 산업용 및 가정용 응용 분야에 폭 넓게 사용되어지고 있으며 이에 대한 많은 연구가 활발히 이루어지고 있다 [1-3].

이중에서 IH Jar를 위한 주 회로는 주로 Class-E 인버터를 이용하여 구성되어 있으며 그림 1은 Class-E 인버터 시스템의 전체 회로를 보여주고 있다. 이러한 Class-E 인버터 시스템은 다른 인버터 시스템과 다르게 하나의 스위치만을 이용하여 동작이 이루어지므로 저가의 시스템을 구현할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 뿐만 아니라 턴-온 시 공진에 의한 스위치의 영전압 스위칭을 이루는 장점을 지니고 있다.

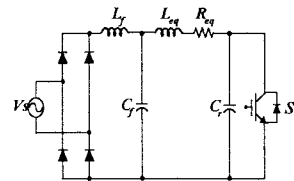


그림 1 IH Jar용 Class-E 인버터

하지만, 턴-오프 시 공진에 의한 스위치의 전압 스트레스에 의한 단점으로 인한 도통손실의 증가 및 스위치의 이용률이 감소하는 문제점을 지니고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 ACCE 인버터가 제안되어 연구가 이루어지고 있다. ACCE 인버터는 Class-E 인버터보다 주 스위치 전압의 클램핑 효과에 따른 주 스위치의 전압 스트레스의 감소 효과에 의해 현재 DC-Link 인버터에 많이 응용되어지고 있다 [4].

하지만, ACCE 인버터는 전체 공진 전압의 클램핑 역할을 동시에 수행하게 되므로 동일한 전력회로 및 제어를 수행하는 경우 Class-E 인버터 시스템 보다 출력전력이 훨씬 더 낮게 되는 단점을 지니고 있다. 즉 공진 에너지의 감소로 전체 출력전력이 감소함을 의미한다. 따라서 ACCE 인버터를 이용하여 동일한 출력을 얻기 위해서는 Class-E 인버터시스템 보다 훨씬 더 큰 스위치의 전류 스트레스를 요구하게 된다. 뿐만 아니라 이는 인버터 시스템의 도통손실을 증가시키며 이로 인해 인버터 시스템의 전체 손실을 감소시키게 된다. 또한 고가의 스위치를 요구하게 되며 사용된 스위치의 이용률을 감소시키게 되는 심각한 문제점을 가지고 있다.

따라서 이러한 단점을 해결하기 위해 ACCE 인버터 시스템의 고출력을 위한 새로운 제어 기법을 제시하고자 한다. 제안된 제어기법은 ACCE 인버터 시스템을 이용하여 Class-E 인버터 시스템의 동작과 ACCE 인버터 시스템의 동작을 동시에 수행하도록 하는 하이브리드 (Hybrid) 제어기법이며 이는 앞서 언급한 문제점을 감소시키게 된다. 제안한 제어의 원리를 자세하게 설명하며 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제안된 제어기법의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 AACE 인버터 시스템

그림 2은 유도 가열 Jar용 ACCE 인버터의 전체 시스템을 보여 주고 있다. 인버터 시스템의 주 회로 구성은 기존의 Class-E인버터 시스템과 동일한 공진 커패시터 C_r , 가열 코일과 피가열체인 용기를 등가화한 등가 인덕터 L_{eq} 와 등가 저항 R_{eq} 로 구성되어 있으며 보조회로 즉, 보조 스위치 S_a 클램프 커패시터 C_b 가 추가되어 구성 되어있다.

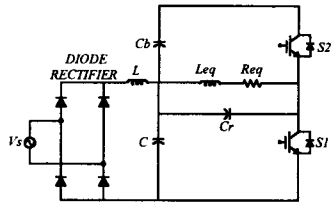
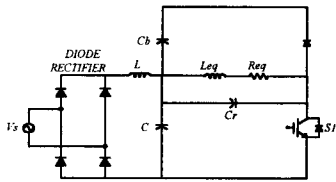


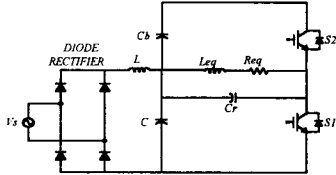
그림 2 IH Jar용 ACCE 인버터의 시스템 회로도

2.2 제안된 제어 기법에 의한 AACE 인버터 시스템의 동작 원리

새로운 제어기법을 추가한 ACCE 인버터 시스템의 동작 모드를 보여주려고 있다. 동작 모드는 두 가지 형태로 크게 구분되어진다. 스위치 전압이 클램프 전압보다 작은 경우 그림 3(a)처럼 ACCE 인버터 시스템은 Class-E 인버터 시스템과 동일한 동작을 이루게 되며 그리고 스위치의 전압이 클램프 전압과 같은 경우 ACCE 인버터 시스템은 그림 3(b)처럼 보조 회로의 동작을 통하여 Active Clamped Class-E 인버터 시스템으로 동작을 이루게 된다.



(a) 클램핑 전압 보다 낮은 경우(Class-E 인버터)



(b) 클램핑 전압 보다 높은 경우(Active Clamped Class-E)

그림 3 새로운 제어기법을 추가한 ACCE 인버터 시스템의 동작 모드

그림 4는 ACCE 인버터의 주 스위치 및 보조 스위치의 듀티와 데드타임에 의해 특정한 클램프 레벨(KVs)이 정해지는 관계식을 그림을 통하여 나타내고 있다. 주 스위치 전압의 일정한 클램프 레벨까지 증가하게 되면 ACCE 인버터의 보조 스위치의 역병렬 다이오드는 도통하게 되고 이로인하여 클램프 커패시터를 포함한 공진이 발생하게 되어 일정한 전압으로 주 스위치의 전압을 클램핑 하게된다.

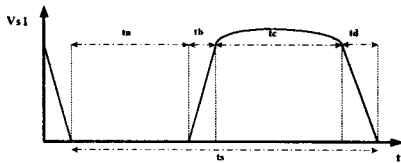


그림 4 클램프 레벨

ACCE 인버터로 동작할 경우의 주 스위치의 클램핑 전압의 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$V_s \approx \frac{1}{2} t_b \times KV_s + t_c \times KV_s + \frac{1}{2} t_d \times KV_s \quad (1)$$

여기서, $K \approx \frac{2t_s}{2t_c + t_b + t_d}$

2.3 제안된 제어기법

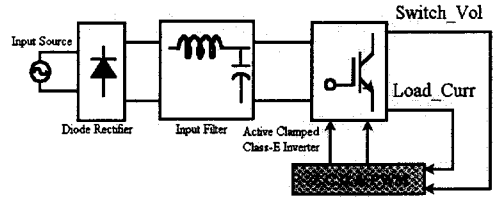


그림 5 새로운 제어기법을 추가한 Active clamped class-E 인버터 시스템의 블록도

그림 5의 제안된 제어기법은 부하전류의 영전류 검출(Zero-Crossing-Detector)과 주 스위치 전압을 피드백(Feedback)하여 Class-E 인버터와 Active-Clamped Class-E 인버터 시스템의 동작을 결정하게 되며 보조 스위치의 온 타임을 조절하여 주 스위치의 전압을 일정한 클램프 전압의 크기로 제어하게 된다. 따라서 시스템의 클램핑 동작은 보조 회로의 동작 여부에 따라 결정됨을 알 수 있다.

그림 5에서처럼 제안한 제어기법의 회로는 크게 2가지 제어루프로 구성되어 있다. 그 중 하나는 서로 다른 공진 주파수로 동작되는 시스템의 주 스위치 영전압 스위칭(Zero-Voltage-Switching)을 보장하기 위한 전류 제어 루프로 보조 회로의 동작이 이루어지지 않을 경우 Class-E 인버터 시스템으로 동작하게 되며 이때 Class-E 인버터 시스템의 회로 공진 주파수 f_{rE} 는 식 (2)과 같으며 보조 회로의 동작이 이루어지는 경우 즉 Active Clamped Class-E 인버터 시스템의 공진 주파수 f_{rA} 는 식 (3)과 같다.

$$f_{rE} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq} C_r}} \quad (2)$$

여기서, f_{rE} : Class-E 인버터의 공진 주파수

$$f_{rA} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq} (C_r + C_b)}} \quad (3)$$

여기서, f_{rA} : ACCE 인버터의 공진 주파수

따라서, 회로의 공진 주파수 변동에 따른 주 스위치의 안정적인 영전압 스위칭을 보장하기 위해서는 부하전류의 영전류를 검출하여 펄스 폭 변조 기법에 의해 주 스위치의 영전압 스위칭 턴-온을 보장하게 된다.

또 다른 하나의 제어 루프는 주 스위치 전압을 클램프 하기 위한 전압 제어 루프로 구성되어 있다. 전압 제어 루프의 동작은 주 스위치의 전압을 검출한 후 일정한 전압으로 동작할 수 있도록 보조 스위치의 동작 및 동작시의 턴-온 시간을 결정하며 이때 인버터의 동작은 ACCE 인버터로 동작하여 주 스위치의 전압을 일정한 전압으로 클램프 할 수 있도록 동작하게 된다.

그림 6은 입력전압에 따른 제안된 제어기법에 의한 ACCE 인버터 시스템의 Class-E 인버터와 ACCE 인버터의 동작 구간을 나타내고 있다.

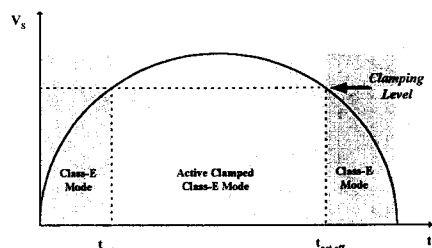


그림 6 입력전압에 의한 Class-E와 Active Clamped Class-E 인버터의 동작구간

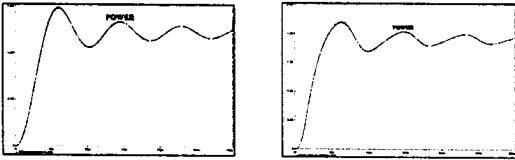
2.4 시뮬레이션 및 실험 결과

제안한 제어 기법의 타당성을 확인하기 위해 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 시뮬레이션 및 실험을 수행하기 위해 동일한 파라메타를 사용하였으며 각각의 파라메타는 표 1과 같다.

표 1. 시뮬레이션 조건

parameter	L_{eq}	C_r	R_{eq}	C_b	F_s	F_r
value	127.3uH	160nF	5Ω	800uF	20kHz	32.25kHz

그림 7은 시뮬레이션을 통한 기존의 ACCE 인버터와 제안한 제어 기법의 출력전력을 시뮬레이션을 통하여 비교하였다. 제안한 제어 기법을 적용하였을 경우 전체 전력 약 27% 정도 증가함을 확인하였다.

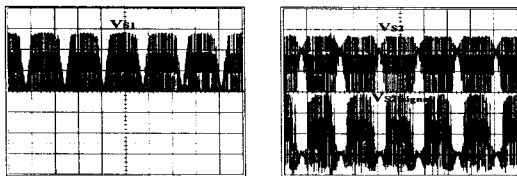


(a) ACCE 인버터의 경우 (b) 제안된 제어 기법의 경우

그림 7. 시뮬레이션을 통한 출력전력의 비교

그림 8은 제안한 제어 기법을 적용한 ACCE 인버터의 실험 결과를 나타내고 있다.

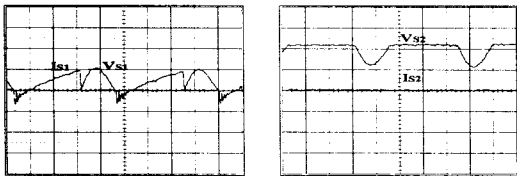
그림 8(a)-(f)는 주 스위치 및 보조 스위치의 실험 결과를 나타내고 있다. 각각의 경우 모두 보조 회로의 동작에 의해 Class-E 인버터 및 Active Clamped Class-E 인버터 시스템으로 동작이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 그림 (g)-(h)는 공진 탱크의 전압과 전류를 나타내고 있다.



(250V/div., time: 5ms)

(250V/div., 5V/div., time: 5ms)

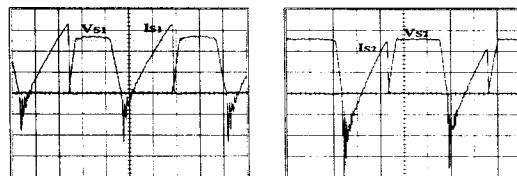
(a) 주 스위치 전압(전체 주기) (b) 보조 스위치 전압 및 게이트 신호(전체주기)



(250V/div., 10A/div., time: 10us)

(250V/div., 10A/div., time: 10us)

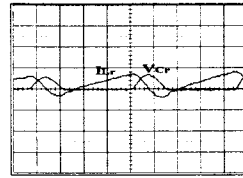
(c) 주 스위치 전압, 전류(low voltage) (d) 보조 스위치 전압, 전류(low voltage)



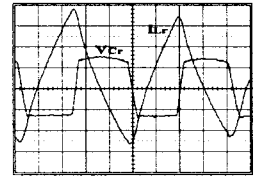
(250V/div., 10A/div., time: 10us)

(250V/div., 10A/div., time: 10us)

(e) 주 스위치 전압, 전류(high voltage) (f) 보조 스위치 전압, 전류(high voltage)



(250V/div., 10A/div., time: 10us)



(250V/div., 10A/div., time: 10us)

(g) 공진 탱크 전압, 전류(low voltage) (h) 공진 탱크 전압, 전류(low voltage)

그림 8 새로운 제어 기법을 적용한 ACCE 인버터 각 부의 실험 결과 파형

3. 결 론

본 논문에서는 Active Clamped Class-E(ACCE) 인버터 시스템을 이용한 새로운 고효율 제어 회로를 제시하였으며 각각의 회로에 대한 시뮬레이션 및 실험을 수행하여 그 이론적인 타당성을 검증하였다. 그리고 본 연구에서 제안한 새로운 제어 기법은 복잡한 회로의 추가 없이 ACCE 인버터 시스템만을 간단히 이용할 수 있는 특징이 있다.

제안한 제어 기법은 다음과 같은 장점을 얻을 수 있다.

1. 스위치의 전압 스트레스 감소
2. ACCE 인버터 시스템의 고효율화
3. 보조 스위치의 스위칭 감소로 스위칭 손실 감소
4. 시스템의 스위치 이용률의 극대화
5. EMI 감소

따라서 본 논문에서 제안된 하이브리드 제어 기법은 IH Jar용 인버터 시스템 및 2kW급 인버터에 사용 적합할 것으로 사료되며 또한 다동용 전자식 안정기와 같은 고정 부하를 사용하는 인버터 시스템에 응용 가능하다.

[참 고 문 헌]

- [1] M. K. Kazimierzuk, et al., "Class-D Voltage-Switching MOSFET Power Amplifier", *IEE Proc.*, Vol. 139, No. 5, pp. 449-456, September, 1992.
- [2] S. Nagai, et al., "A New Phase-Shifting PWM Regulated-Mode Resonant Inverter Using Static Induction Power Devices for Induction-Heating and Melting Application", *EPE Conf. Rec.*, pp. 347-352, 1989.
- [3] M. K. Kazimierzuk, et al., "Class-D Zero-Voltage-Switching Inverter with only One Shunt Capacitor", *IEE Proc.*, Vol. 139, No. 5, pp. 449-456, September, 1992.
- [4] H. Omori, H. Yamashita, M. Nakaoka, T. Maruhashi., "A Novel Type Induction-Heating Single-Ended Resonant Inverter Using New bipolar Dairington-Transistor", *IEEE PESC Conf. Rec.*, pp. 590-599, 1985.
- [5] DEEPAKRAJ M. Divan, and GARY SKIBINSKI, "Zero-Switching-Loss Inverters for High-Power Applications", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 25 no. 4, July/August, 1989.
- [6] H. J. Kim, C. S. Leu, R. Farrington, and F. C. Lee, "Clamp Mode Zero-Voltage-Switched Multi-Resonant Converters", *IEEE PESC Conf. Rec.*, pp. 18-24, 1992.
- [7] Ying, Jianping and Heumann, Klemens, "Design and Application of Class-E Amplifier" *IEEE-IPEC Conf. Rec.*, pp. 1191-1196, 1995.
- [8] B. Grzesik, W. Burlikowski, J. Junak and Z. Kaczmarczyk, "Levitation System for Melting with Class-E Inverter", *EPE Conf. Rec.*, Vol. 2, pp. 262-267, 1997.