전력전자학술대회 논문집 2003. 7. 14 ~ 7. 17

Active clamp 컨버터의 주파수 변조 제어

백주원, 손호섭, 류명효, 유동욱
한국전기연구원 산업전기연구단

Frequency modulation control for active clamp converter

J.W. Baek, H.S. Son, M.H. Ryu, and D.W. Yoo
Industrial Electronics Research center, KERI

ABSTRACT

A zero voltage soft switching inverter using active clamp is presented for induction heating application. This converter have long been attractive because of its simplicity, high efficiency, and low cost compared to other schemes. In addition to those merits, input power factor can be improved with a variable frequency control. In this paper, it describe the control method and operational principle to improve a power factor with a single stage ZVS converter using active clamp for induction heating application.

1. 서 론

최근에 전력용 반도체 소자의 비약적인 발전과 더불어 고성능 공진형 또는 유사 공진형 유도가열 전원장치가 표면처리, 제련, 이종 금속의 용융과 합금, 가공등에 이용되어 왔다. 이러한 유도가열전원 분야에 있어서 전자계 유도에 의한 유도가열전원은 전압형, 전류형, 공진형등 여러 가지 형태의 회로를 이용하여 각종 산업 분야에 적용되어 왔다. 유도가열전원은 일반 가정에서는 가열기나 건조기기, 주방기기로 활용되어 왔으며 폐가스 처리기로 산업체에서 활용되기도 하였다.

한편, 점차 고조파에 대한 규제가 강화되면서 입력역율을 높게 하면서 바라는 고주파 가열을 얻도록 전원설계를 할 필요성이 점증하고 있다. 이에 따라 이단의 전원을 통한 구성 외에 일단의 전원을 통해 역률보상과 동시에 고주파 공진회로를 구성하는 방안이 연구되어 왔다.[1,2,3]

본 논문에서는 유도가열 전원장치로서 입력역률 보상기능과 간단한 회로 구성 그리고 고밀도화가 가능한 능동 클램프 인버터를 살펴보고 이를 위한 제어회로 구성과 보조 스위치의 구동에 대해 고찰한다.

2. 능동형 클램프 인버터 회로

2.1 회로 구성 및 동작원리

그림 1은 유도가열 전원장치에 적용한 영전압 스위칭 능동 클램프 인버터의 회로를 나타낸 것이다. 컨버터는 기본적인 능동 클램프 컨버터 회로 구조에서 능동 클램프 회로가 추가된 회로 형태이며 주 스위치는 제어회로에 의해 구동되며 보조 스위치는 클램프 커패시터의 전압에 의해 간접 구동되게 하였다.

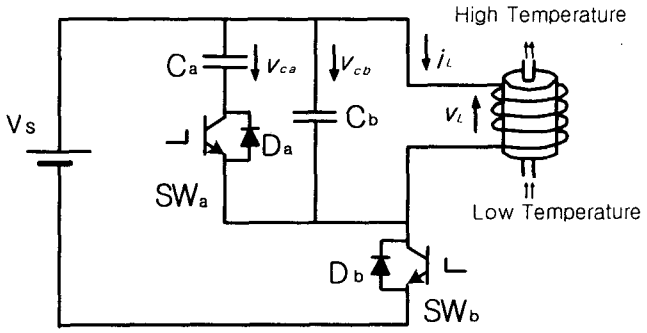

그림 1 능동 클램프 회로를 이용한 영전압 스위칭 인버터
Fig. 1 ZVS inverter using active clamp circuit

다음 그림 2와 3은 제안한 회로의 주요 동작파형과 동작 모드를 나타낸 것이다. 그림 2에서 주 스위치 S_{Wb}와 보조 스위치 S_{Wa} 그리고 클램프 커패시터 전압 파형을 나타내었다.

동작모드는 설명을 간단히 하기 위해 데드타임에 의한 효과는 무시하고 소자는 이상적이라 가정한다.

모드 1 : 스위치 SWb는 켜지고 입력전압이 부하에 인가되어 등가적으로 R-L 부하에 전압이 가해지고 가열된다. 이때, 턴 온은 누설인덕턴스에 의해 거의 ZCS 그리고 역병렬 다이오드가 턴 온되도록 동작 되므로 ZVS로 동작한다.

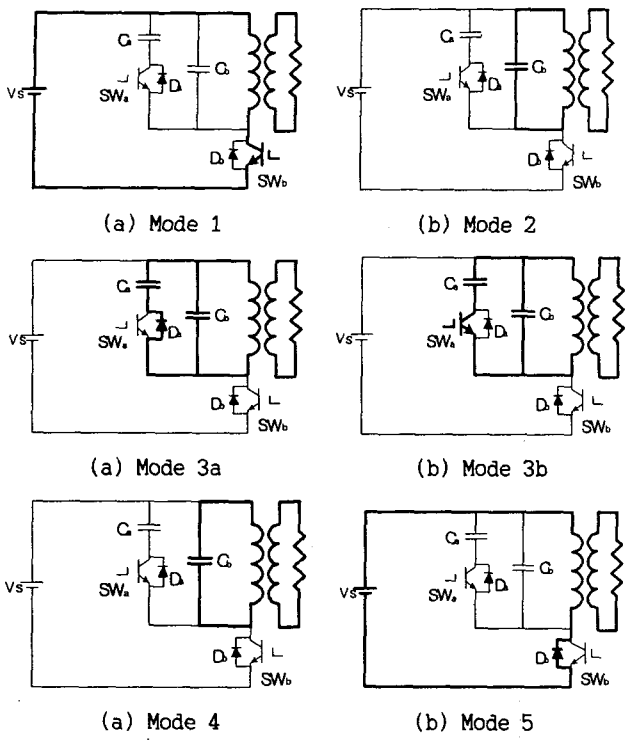

그림 2 제안한 회로의 동작 파형
Fig. 2 operational waveform of the proposed circuit

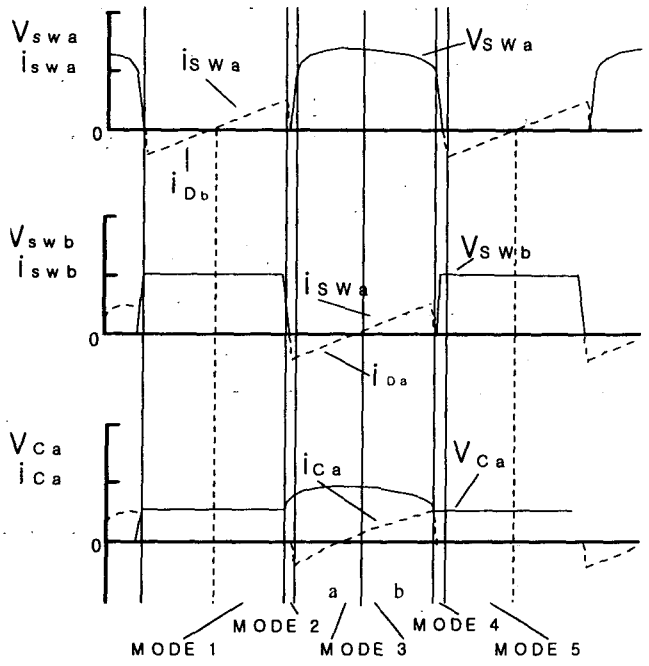

그림 3 동작 모드
Fig. 3 operational modes

모드 2 : 스위치 SWb가 턴 오프하고 전류 i_L은 Cb를 통해 흐른다.

모드 3a : Cb의 전압이 Ca에 도달하면 보조 스위치 SWa의 역병렬 다이오드가 켜지고 커패시터 Ca와 Cb가 병렬로 충전된다.

모드 3b : 다이오드가 켜진 상태에서 보조스위치 SWa는 영전압 스위칭한다. Ca와 Cb의 충전전압은 방전을 시작하고 i_L 전류는 정방향에서 역으로 흐르게 된다. Ca가 보조스위치를 구동할 수 있는 최소전압까지 감소한다.

모드 4 : 다시 보조스위치는 턴 오프하고 Cb가 영전압 까지 방전한다.

모드 5 : 이후에, 주 스위치의 역병렬 다이오드는 인덕터에 흐르는 전류가 전원으로 회생하면서 턴 온 하게 되고 이때 주스위치는 영전압 스위칭이 가능하게 된다. 이후의 동작 모드는 다시 반복된다.

2.2 제어기 구성

제어기는 영전압 스위칭을 이루고 동시에 입력역률을 보상할 수 있도록 하기 위해 주 스위치의 전압을 감시하면서 스위치 구동을 하고 입력전압의 크기에 따라 주파수 변조가 일어나서 입력전류가 개선되도록 하였다.

그림 4는 제안한 회로의 제어기의 블록도이다.

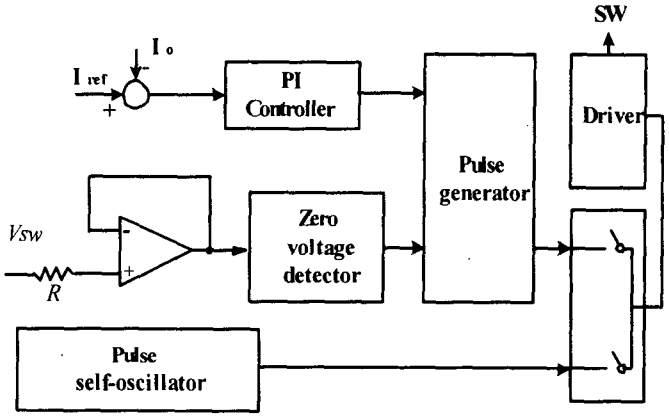

그림 4 제안한 제어기 블록도
Fig. 4 block diagram of the proposed controller

제어기는 출력 제어를 위해 펄스 폭을 결정하는 부분과 스위치의 영전압 스위칭을 확보하기 위해 스위치 전압을 센스하여 스위칭 시점을 결정하는 부분으로 구성되어 정상상태에서 스위칭 동작을 제어하는 것과 항상 일정한 펄스를 발생하여 시작과 과도상태에서 스위칭을 이루게 하는 두 가지 블록으로 구성되어 있다.

블록도에서 처럼 회로의 동작이 시작되거나 입력전압이 매우 낮아져서 영전압 스위칭이 이뤄지지 못하는 과도상태에서는 일정한 펄스폭의 발진회로로 스위칭 동작이 이뤄진다. 주 스위치의 전압이 보조 스위치와 클램프 커패시터의 충 방전 동작에 의해 턴 온 전에 영전압이 되면 다시 발진회로에서 제어 출력으로 절체되어 출력신호를 구동한다.

그러므로 스위칭 주파수는 영전압 조건을 추종하는 과정에서 달라진다. 특히, 입력전압이 정류 파형의 모양을 가지므로 낮은 전압에서는 주파수가 낮고 입력전압이 큰 영역에서는 주파수가 높아지는 특징을 갖는다.

보조 스위치의 구동은 클램프 커패시터 전압에 의해 구동 되도록 구성하였다. 즉, 클램프 커패시터 전압을 분압한 회로를 구성하고 이를 보조 스위치에 인가하여 보조 스위치를 구동하였다. 따라서 클램프 커패시터가 충전되면 방전이 완료될 때까지 보조 스위치가 턴 온된다.

다음 그림 5는 보조 스위치를 구동하기 위한 분압회로의 개략도이다.

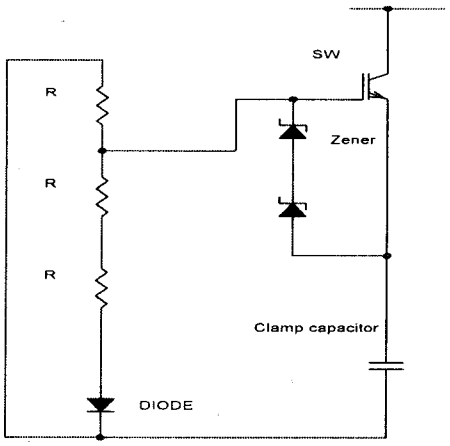

그림 5 보조 스위치 구동회로 개요도
Fig. 5 Driver circuit for auxiliary switch

3. 유도가열용 능동형 클램프 전원장치

가열하고자 하는 도체에 코일을 감고 이 코일에 고주파 교류 전류를 흘리면 도체 내에는 고주파 자속에 의해 히스테리시스 손실(Hysteresis Ioss)이 나타나고 손실은 P_h는 Steinmetz 식으로 다음과 같다.

$$P_h = \eta f B_m^{1.5} V [W] \quad (1)$$

여기서, η: Hysteresis 계수, f : 주파수,
B_m : 최대자속밀도 [T], V : 철심의 체적 [m^3]

도체 내에는 전자유도 작용에 의하여 코일내에 있는 금속은 변압기의 2차권선에 기전력이 발생하는 것과 같이 유도전류가 발생하여 와전류(Eddy current)가 흐른다.

이 와전류가 임의의 저항을 가진 도체 내를 흐르면 그 도체 내에 주울 열이 발생하며 이것을 와전류 손실(Eddy current loss)이라 하며 다음과 같다.

$$P_e = \frac{(\pi f a B_m)^2 V}{4\rho} [W] \quad (2)$$

여기서, a : 철심의 반지름 [m], f : 주파수 [Hz]
B_m : 최대자속밀도 [T], ρ : 저항률 [Ω/m]
V : 철심의 체적 [m^3]

와전류는 금속의 표면에 집중하여 흐르며 원주 금속내를 흐르는 유도전류는 가열온도에 따라 일부 달라지지만 큰 변화가 없는 상태라고 볼 수 있으며 전원측에서 일정한 부하로 가정할 수 있다.

본 연구에서는 능동 클램프 회로 방식을 채택하여 인버터 손실을 최소화하고 변압기 일차측 에너지의 전력전달과 함께 클램프 에너지를 역시 부하로 회생하므로 인버터 동작에 의한 유도가열 동작이 원활히 일어나게 하였다. 변압기의 이차측에는 턴수비만큼 증폭된 전류가 흐르며 이를 통해 발생한 자속에 의해 챔버 내부의 판에 전력을 전달하였다. 인버터는 영전압 스위칭에 의해 인버터의 손실을 줄일 수 있었으며 누설을 최소화하기 위해 결합도를 높이고자 하였다.

4. 실험 결과

제안한 회로의 동작을 시험하기 위해 인버터 시험장치를 구성하였다. 다음 그림 6은 실험에 사용된 회로를 나타낸 것이다. 주 스위치는 900V 50A IGBT 스위치를 사용하였으며 보조 스위치는 600V 30A 스위치를 사용하였다.

제어기는 주파수 변조와 영전압 스위칭이 가능하도록 스위치 전압과 입력전압 파형을 가지고 주 스위치를 동작 시키게 구성하였다.

다음 그림 7은 스위치 전압과 보조 스위치 전압 그리고 클램프 커패시터 전압을 나타낸 파형이다. 동작모드에서 예상한 파형과 동일한 동작파형을 얻을 수 있었다.

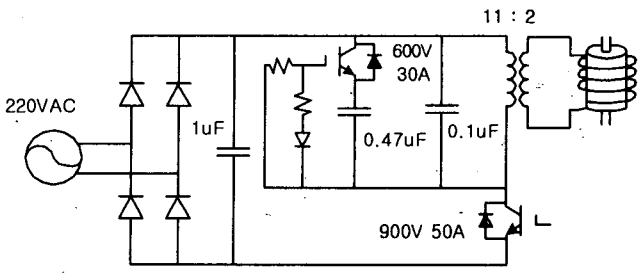

그림 6 실험에 사용한 회로
Fig. 6 Experimental circuit

다음 그림 8은 주 스위치 전류와 전압 파형을 나타낸 것으로 영전압 스위칭에 의해 스위칭 손실이 최소화됨을 알 수 있다. 스위치 전류 측정을 위해 추가한 전선에 의해 오실레이션이 심하게 나타났으며 경부하에서 측정하였다.

입력전류와 전압 파형은 그림 9에 나타내었고 입력 역률이 약 0.9이상 됨을 알 수 있다.

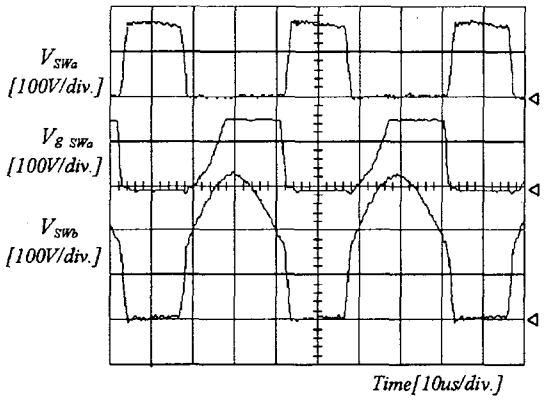

그림 7 보조 스위치 전압과 게이트 전압 그리고 주 스위치 전압

Fig. 7 Voltage for main switch, auxiliary switch, and clamp capacitor

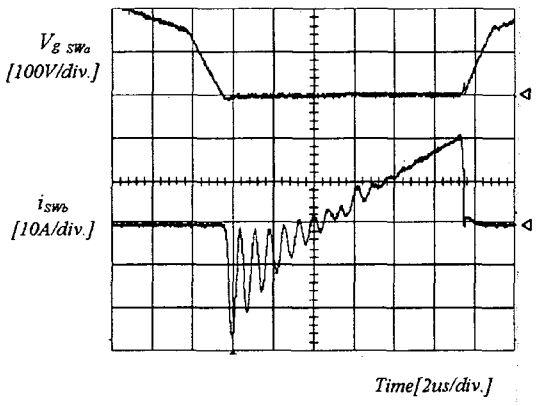

그림 8 주 스위치 전압과 전류 파형

Fig. 8 Voltage and current of main switch

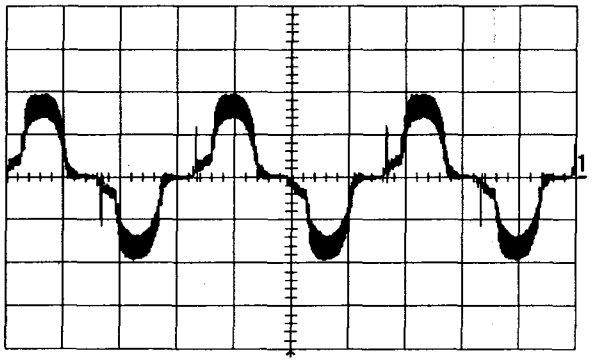

그림 9 입력 전류파형 (4A/div, 5ms)

Fig. 9 Input current waveform

5. 결 론

본 논문에서는 능동 클램프 인버터를 유도가열 전원장치에 응용하기 위한 제어기와 전력회로에 대해 고찰하였으며 제안한 회로의 동작을 시험하기 위해 능동 클램프 인버터를 제작하고 결과를 나타내었다.

입력역률을 고려하여 스위칭 잡음 필터를 위한 작은 값의 정류 커패시터만이 사용되었으며 주파수 변조 제어를 통해 입력 역율을 개선하고자 하였다. 제안한 제어기는 영전압 스위칭을 얻기 위해 스위치 전압을 센스하여 영전압에 도달하면 다시 스위칭이 일어 나도록 동작을 구성하였다. 그리고 보조 회로 스위치는 클램프 커패시터 전압에 의해 구동되게 함으로써 부가적인 구동회로가 필요없도록 하였다.

제안한 능동 클램프 유도가열 전원장치는 소형 유도가열기의 경제적인 구성에 유용할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] T. Nakamizo, M. Kaneda, S. Hishikawa, Bin Guo, H. Iwamoto, M. Nakaoka, "New Generation Fluid Heating Appliance using High-Frequency Load Resonat Inverter", Proceeding of PEDS Hong Kong, pp. 309-314, 1999.

[2] D.W. TEEB and L.Hhbson, "Design of Matching Circuitry for 100KHz MOSFET Induction Heating Power Supply", IEEE. Industrial Electronics, Vol. IE-34, No. 2, May 1987.

[3] Akao, T., "Applications of pressurized superheated steam to food processing. In Chemical Engineering Symposium Series I, 13-18. Tokyo, Japan: The Society of Chemical Engineers.