

다중공진 영전류 스위칭을 이용한 고주파 유도가열용 인버터

라병훈\*, 서기영\*, 이현우\*, 김광태\*\*  
 경남대학교, 부산정보대학\*\*

High Frequency Inverter for Induction Heating with Multi-Resonant Zero Current Switching

B. H. Ra\*, K. Y. Suh\*, H. W. Lee\*, K. T. Kim\*\*  
 Kyungnam University\*, Busan Info-Tech College\*\*

**Abstract** - In the case of conventional high frequency inverter, with damage of switch by surge voltage when switch gets into compulsion extinction by load accident and so on because reactor is connected by series to switch, or there was problem of conduction loss by reactor's resistivity component.

Also, it has controversial point of that can not ignore conduction loss of switch in complete work kind action of soft switching.

In this paper, as high frequency induction heating power supply, we propose half bridge type multi resonance soft switching high frequency inverter topology that can realize high amplitude operation of load current with controlling switch current by multiplex resonance, mitigating surge voltage when switch gets into compulsion extinction and to be complete operation of zero current switching by opposit parallel connected reactor to inverter switch, and do circuit analysis for choice of most suitable circuit parameter of circuit.

1. 서 론

기존의 고주파 유도가열용 인버터의 경우 주회로 구성에 있어 스위치에 직렬로 인덕터가 접속되어 있기 때문에 부하급변 등에 의해 스위치가 강제소호 되는 경우 서지전압에 의한 스위치의 파손과 혹은 인덕터의 저항성분에 의한 도통손실이 크게 발생하는 문제점이 있다. 그리고, 소프트 스위칭의 대전류 동작에 있어 스위치의 도통손실도 무시할 수 없는 등의 문제점을 가지고 있다.<sup>(1)-(5)</sup>

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 고주파 유도가열용 인버터의 스위치에 역병렬 접속되는 인덕터에 의해 소프트 스위칭 동작을 확보하면서 스위치의 강제소호 시에 서지를 경감하고, 다중공진에 의해 스위치 전류를 억제하면서 부하전류의 대 진폭동작을 실현할 수 있는 하프 브릿지형 다중공진 영전류스위칭(ZCS) 고주파 인버터 토폴로지를 제안하고, 회로의 최적 회로정수의 선정을 위한 회로 해석을 행하였다.

2. 본 론

2.1 다중공진 영전류 스위칭 고주파 인버터

그림 1에 제안하는 다중공진 영전류 스위칭 고주파 인버터 주회로를 나타내었다. 본 회로는 고주파 인버터 방식을 적용한 유도가열용 전원장치를 위해 고안된 것이다. 회로의 구성은 기존의 인버터 주 스위치에서 서지전압 방지를 위하여 사용하는 RC 스너버 회로를 대체하여 인덕터 L1, L2, 그리고 이 인덕터 직렬로 다이오드 Dp1, Dp2를 주 스위치에 역병렬로 접속하였다. 이 역병렬 보조회로에 의해 주 스위치의 영전류 스위칭 동작

을 확보하면서 부하급변 등에 의한 강제 소호시에 역기전력에 의한 서지전압을 경감할 수 있다. 또한 출력부의 LC공진부(L3, 병렬 커패시터 Cp, 직렬 커패시터 Cs)는 다중 전류공진을 이루어 스위치 전류를 억제하면서 부하전류의 대 진폭동작을 실현할 수 있다.

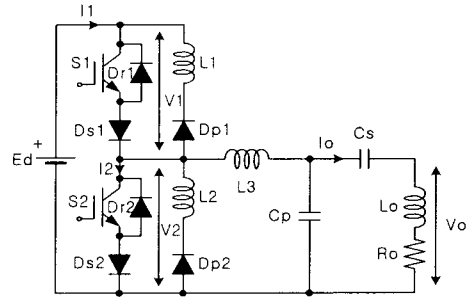


그림 1. 다중공진 영전류 스위칭 고주파 인버터 주회로  
 Fig. 1. Multi-resonance ZCS high frequency inverter

2.2 회로 동작 모드

본 논문에서 제안하는 고주파 인버터는 이론적으로 다음의 10개의 동작모드로 해석할 수 있다. 각 모드별 동작에 따른 각 부 이론파형을 그림 2에 나타내었다.

■ 모드 0 : 직렬 공진회로 L2-L3-Cp의 경로로 공진 전류가 흐르게 되며, 이때 인버터 주 스위치 S1이 영전류 스위칭(ZCS)으로 온 된다. 이 모드는 스위치 S1을 통하여 전류가 흐르기 시작하며 다음 모드로 이어진다.

■ 모드 1 : 스위치 S1이 온 되어 공진회로는 S1-Ds1-L3-Cp의 경로로 형성되며 전류 I1이 증가하고, 직렬 커패시터 Cs는 전압이 점차 낮아져 Vcp=Vcs 일때까지 방전한다. 이때, 출력 전압 Vo는 극성이 정(+)-반전한다.

■ 모드 2 : 직렬 커패시터 Cs의 방전과 인버터 주 스위치 S1을 통한 파워링으로 병렬 커패시터 전압 Vcp과 정(+)출력전압 Vo는 점차 상승하고, 이 모드의 끝에서 부(-)극성 출력전류는 직렬 커패시터 전압이 최저일 때 비로소 정(+)극성으로 흐르기 시작한다.

■ 모드 3 : 직렬 커패시터 전압 Vcs는 다시 상승하고, 병렬 커패시터 전압 Vcp는 상승하였다가 출력전압, 전류의 상승(부하전력 소모)으로 다시 방전하는 모드이다. 이 모드는 전류 I1이 불연속 구간에 이르기 까지도다.

■ 모드 4 : 직렬 커패시터 전압 Vcs는 계속 상승하고, 직렬공진회로 Cp-L3-Dp1-L1을 통해 공진전류가 흐르는 중에 인버터 주 스위치 S1은 오프된다.

■ 모드 5 : 이전의 모드 4에 이어지고 인버터 주 스위치 S2가 영전류 스위칭(ZCS)으로 온 된다.

■ 모드 6 : 스위치 S2의 온과 동시에 공진회로는 Cp-L3 -S2-Ds2로 형성되며 점차 전류 I2가 증가하고, 직렬 커패시터 Cs의 전압이 점차 높아져 Vcp=Vcs

일때까지 방전한다. 이때, 출력전압  $V_o$ 가 다시 부(-)극성으로 반전할 때 까지 지속된다.

■ 모드 7 : 직렬 커패시터  $C_s$ 의 방전과 인버터 주 스위치 S1을 통한 병렬 커패시터 전압  $V_{cp}$ 의 방전으로 부(-)극성 출력전압  $V_o$ 는 점차 상승하고, 이 모드의 끝에서 정(+)극성 출력전류는 직렬 커패시터 전압이 영(0)일 때 비로소 부(-)극성으로 흐르기 시작한다.

■ 모드 8 : 직렬 커패시터 전압  $V_{cs}$ 는 다시 낮아지고, 병렬 커패시터 전압  $V_{cp}$ 는 낮아졌다가 출력전압, 전류의 상승(부하전력 소모)으로 다시 방전하는 모드이다. 이 모드는 전류 I2가 불연속 구간에 이르기 까지이다.

■ 모드 9 : 직렬 커패시터 전압  $V_{cs}$ 는 계속 낮아지고, 직렬공진회로  $C_p$ - $D_p$ 2- $L_2$ - $L_3$ 을 통해 공진전류가 흐르는 중에 인버터 주 스위치 S2은 오프된다. 다음은 모드 0으로부터 일련의 과정을 다시 반복하게 된다.

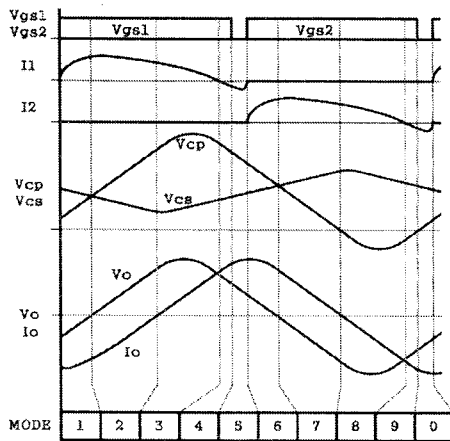


그림 2. 각부 동작 파형  
Fig 2. Operation waveform

### 2.3 시뮬레이션

회로의 모드별 동작과 유도가열용 전원회로의 적절성 및 전력변환의 안정성을 실험에 앞서 살펴보기 위하여 시뮬레이션을 실시하였다. 표 2는 시뮬레이션에 사용된 각 회로정수 값이다. 여기서, 각 소자는 이상적인 것으로 사용하였다.

표 1. 시뮬레이션 회로정수  
Table 1. Simulation parameters

항 목	회로 정수	
입력전압( $E_d$ )	DC 500[V]	
인덕터 $L_1, L_2$	20[ $\mu$ H]	
인덕터 $L_3$	18[ $\mu$ H]	
커패시터 $C_p$	1.2[ $\mu$ F]	
커패시터 $C_s$	2.9[ $\mu$ F]	
부하	인덕터 $L_o$	30.2[ $\mu$ H]
	저 항 $R_o$	1.91[ $\Omega$ ]
스위칭 주파수 $f_o$	35.7[kHz] (28[ $\mu$ s])	
시비율 $D$	46.4[%] (13[ $\mu$ s])	

그림 3은 시뮬레이션에 의한 회로의 각부 동작 파형이다. 그 결과 예상했던 이론적인 파형과 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 즉, 인버터 주 스위치(S1, S2)의 온시에 영전류 스위칭의 실현을 확인할 수 있으며, 또한 적절한 보조 스위칭 회로를 부가한다면 스위치 오프시에 영전압 스위칭의 실현의 가능성을 얻을 수 있었다. 또한, 인덕터 비  $\beta(=L_3/L_o)$  및 커패시턴스 비  $\gamma(=C_p/C_s)$ 의 대소가 영전류 스위칭 동작영역 및 부하전류의 최대치  $I_{omax}$ 와 스위치 전류의 최대치  $I_{smax}$

의 비와 함께 전류 진폭의 대소에 크게 영향을 받을 수 있었다.

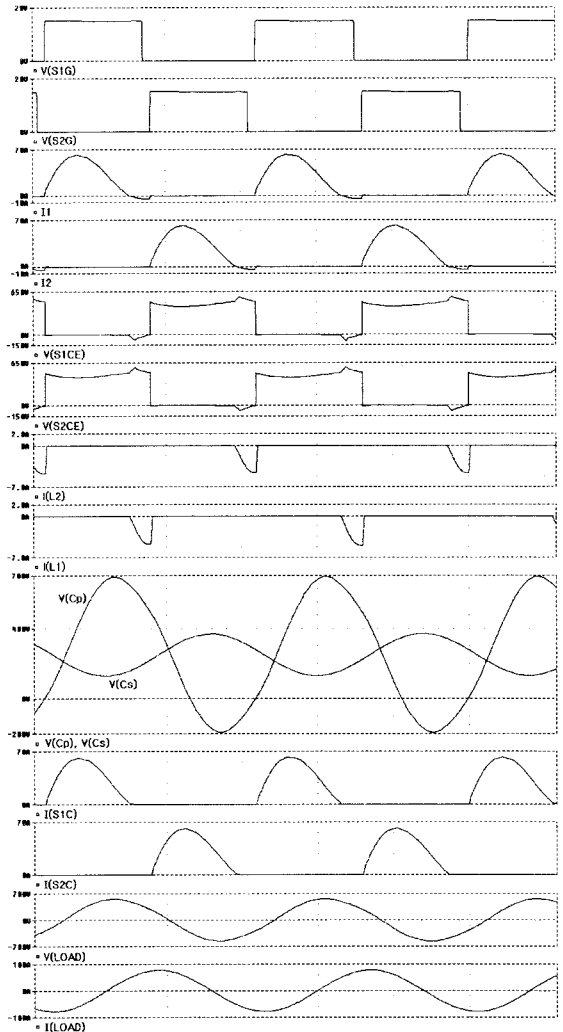


그림 3. 시뮬레이션에 의한 동작모드 각부 파형  
Fig 3. Partial waveform of operation mode by Simulation

### 2.4 회로정수의 선정

본 인버터 회로의 출력 전력 제어폭을 넓게 하기 위한 회로설계법을 유도하기 위해 표 1에 보이는 무차원화 파라미터(Nomalized parameters)를 사용하는 상태방정식을 무차원화하여 해석해를 구했다.

$C_s$ 를 포함한 부하의 직렬 공진 주파수  $f_r$ 은  $L_o, C_s$ 을 사용하여  $f_r = 2\pi\sqrt{L_o C_s}$ 로 나타낸다. 이  $f_r$ 과 인버터 동작 주파수  $f_o$ 와의 비를 무차원화 주파수  $\mu_o$ 로 나타내면

$$\mu_o = f_o/f_r = 2\pi f_o \sqrt{L_o C_s} \quad \text{----- (1)}$$

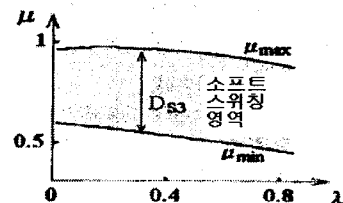


그림 4.  $\mu$ 와  $\lambda$ 에 따른 소프트 스위칭 영역  
Fig. 4. Soft Switchin area with  $\mu$  and  $\lambda$

그림 4는 인버터의 소프트 스위칭을 전제로  $\mu_o$ 보다 높은 상한치  $\mu_{max}$ 와 하한치  $\mu_{min}$ 에 의해 둘러 싸여진 소프트 스위칭 영역을 나타내고 있다. 본 인버터 회로에는 주 스위치 S1, S2가 영전류 스위칭 동작하기 때문에 직렬공진 부하를 용량성 부하로 동작 시킨다. 이 때문에  $\mu_o < 1$ 이다.  $\mu_o$ 가 1에 가까울수록( $\mu_o \approx \mu_{max}$ ) 부하공진 전류가 크게 흐르기 때문에 출력전력이 크게 되고, 역으로  $\mu_o$ 가 작을수록( $\mu_o \approx \mu_{min}$ ) 출력전력은 작게 된다.

표 2. 무차원화 파라미터  
Table 2. Normalized parameters

Standard Values			
Inductor	$L=L3$	Capacitor	$C=Cs$
Resistance	$R=R_o$	Reactance	$X=\sqrt{L/C}$
Voltage	$E=Ed$	Current	$I=E/X$
Power	$P=E \cdot I$		
Normalized Parameters			
Inductor ratio	$\alpha=L1/L=L2/L$		
Frequency	$\mu=2\pi f_o \sqrt{L/C}$		
Time	$T=1/f_o$		
State Variables			
Voltage	$v(z)^*=v(t)/E$		
Current	$i(z)^*=i(t)/I$		
Time	$z=f_o \cdot t$		

### 2.5 실험 및 고찰

제안하는 다중 공진 영전류 스위칭 고주파 인버터를 적용하여 유도가열용 프로토타입을 구성하였다.

표 1에 사용된 회로정수를 나타내었다. 그림 5에 인버터 주 스위치의 동작에 따른 전압, 전류 파형을 나타내었다.

시비율 조절에 따른 출력전력의 변화에도 영전류 스위칭을 실현할 수 있었으며, 인덕터 비  $\beta(=L3/L_o)$ 값 및 커패시턴스 비  $\gamma(=C_p/C_s)$ 값의 대소가 영전류 스위칭 동작영역 및 부하전류의 최대치  $I_{o_{max}}$ 와 스위칭 전류의 최대치  $I_{s_{max}}$ 의 비와 함께 전류 진폭율의 대소에 크게 영향을 주고 있다. 그림 6는  $\beta$ 값에 대한 그 ZCS 동작영역 내에 있어서의 전류 진폭율을 나타낸다.

표 3. 실험 회로정수  
Table 3. Experimental parameters

항 목		회로 정수
입력전압(Ed)		DC 200[V]
인덕터 L1, L2		12[ $\mu$ H]
인덕터 L3		18[ $\mu$ H]
병렬 커패시터 Cp		1.2[ $\mu$ F]
직렬 커패시터 Cs		0.45[ $\mu$ F]
부하	인덕터 Lo	55~65[ $\mu$ H]
	저항 Ro	2.8~3.5[ $\Omega$ ]
스위칭 주파수 fo		20[kHz] (50[ $\mu$ s])

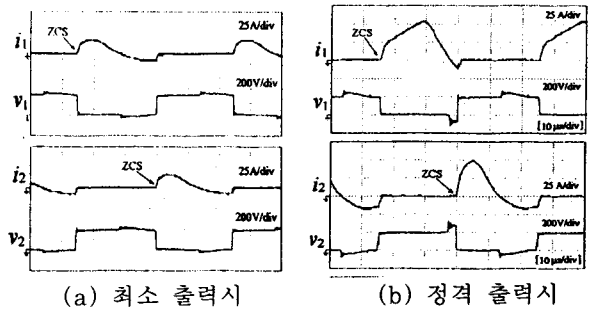


그림 5. 인버터 주 스위치 동작 파형  
Fig 5. Operation waveform of main switch

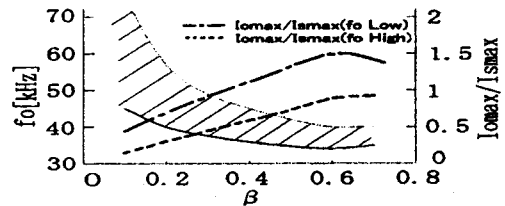


그림 6.  $\beta(L3/L_o)$ 에 따른 영전류 스위칭 동작영역과 전류진폭율  
Fig 6. ZCS operation region and rate of  $I_{o_{max}}/I_{s_{max}}$  with  $\beta$

### 3. 결 론

본 논문에서는 고주파 대전류용 유도가열 전원장치로서 인버터 스위치에 역병렬 접속되는 보조 인덕터에 의해 영전류 스위칭 동작을 확보하고, 다중공진(Multi-Resonance)에 의해 출력전류를 크게 제어할 수 있는 영전류 고주파 인버터를 제안하고, 회로의 최적 회로정수의 선정을 위한 회로해석과 스위칭 주파수 20[kHz]의 340~2800[W] 프로토타입을 제작 실험 하였다.

본 논문은 한국과학재단 특장기초연구(1999-2-302-014-3)지원으로 수행되었음.

### (참고 문헌)

- [1] Michio Tamate, Kazuaki Mino, Seiki Igarashi, "A Direct AC-DC Converter for Induction Heating", 2002 IEE Japan, p.144-145, 2002.3
- [2] Y.Hatanaka, H.Kifune, T.Shimada, "A Novel ZCS High Frequency Inverter with Complex resonance and Design Procedure for High Amplitude of Output Current", Proceeding of IEEE PEDS, pp.443-447, October 2001
- [3] S.Shimajiri, Y.Hatanaka, "A Novel Zero Current Switching High Frequency Inverter For Induction Heating", Proceeding of KIEEJ ICPE, pp.1056-1061, October 1998
- [4] Kuwayama Nobuyuki, Azuma Daisuke, Kifune Hiroyasu, Hatanaka Yoshihiro, "Multi-Resonant ZCS High Frequency Inverter for Super-Heated Steam Generation", pp.138, Vol.4 2002 IEE Japan, 2002. 3.26~29
- [5] S.Okudaira, K.Matsuse, "Dual Frequency Output Quasi- Resonant Inverter for Induction Heating", Trans. IEEJ, Vol.121-D, No.5, 2001