

순시전류합성형 부하병렬 고주파 공진 인버터의 특성해석

(Characteristics Analysis of Instantaneous Current Resultant Type Load Parallel High Frequency Resonant Inverter)

조규판·원재선*·이봉섭[&]·심광렬[#]·배영호^{\$}

(Kyu-Pan Cho · Jae-Sun Won* · Bong-Seob Lee[&] · Kwang-Yeal Sim[#] · Young-Ho Bae^{\$})

김천대학·영남대학교*·삼척대학교[&]·울산과학대학[#]·경일대학교^{\$}

(Kimcheon College · Yeungnam University* · Samcheok National University[&] · Ulsan College[#] · Kyungil University^{\$})

Abstract

This paper describes the instantaneous current resultant type load parallel high frequency resonant inverter consisting of three unit half-bridge serial and parallel resonant inverter can be used as power source of induction heating. This proposed inverter can reduce distribution of the switching current because of using the current of serial resonant circuit to the input current of the parallel one. The analysis of the proposed circuit is generally described by using the normalized parameters. Also, the principle of basic operating and the its characteristics are estimated by the parameters such as switching frequency(μ), load resistance(λ). Experimental results are presented to verify theoretical discussion. This proposed inverter will can be practically used as a power supply in various fields as induction heating application, DC-DC converter etc.

1. 서론

고주파 공진 인버터는 부하의 종류나 응용목적에 따라서 수십[kHz]에서 수백[kHz]의 주파수대에서 고속 동작하는 MOSFET, GTO, SIT, IGBT 등과 같은 전력용 반도체 스위칭 소자를 이용한 전력변환회로와 제어방식에 관련된 전력용기술이 필요하다.[1~3]. 공진형의 회로 방식은 직렬 공진과 병렬 공진 회로로 대별 될 수 있는데, 직렬 공진 회로를 이용하여, 최대 전력변환점에서 운전할 경우 스위칭 전류가 과다하게 흐르는 단점이 있고, 병렬 공진 회로를 이용할 경우 직류 리액터를 전 원단에 추가하여야 하므로 기동 시간이 늦어지는 것이 문제점으로 지적된다[4].

본 논문에서는 상기와 같은 문제점을 보완할 수 있는 회로로서 종래의 직렬 공진 회로에 병렬 공진 회로를 추가하여 직렬 공진회로의 전류를 병렬공진회로의 주입 전류로 작용하게 하여 스위치의 전류 부담을 감소시키는 효과를 갖는 복공진형 고주파 인버터를 단위 인버터로 하여 직류전원에 병렬로 3조를 배치한 형태로 구성된 순시전류합성형 부하병렬 고주파 공진 인버터를 연구의 대상으로 하였다[5]. 회로의 해석은 정규화 파라메타를 도입하여 범용성 있게 기술하였고, 이론해석의 정당성을 입증하기 위하여 반도체 스위칭 소자 중에 대전류·고내압에 유리하다고 알려진 IGBT를 스위칭소

자로 사용하여 제안된 회로의 특성해석의 정당성과 고주파 전원으로서의 실용화 가능성을 검토하였다.

2. 본론

2.1. 주회로 구성 및 동작원리

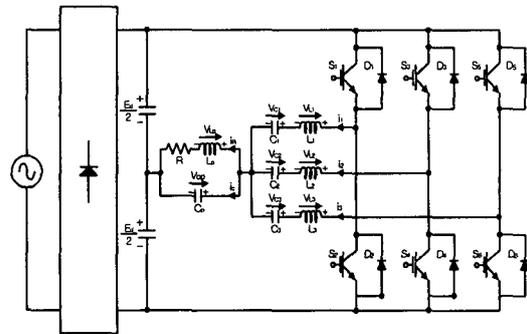


그림 1. 순시전류 합성형 부하병렬 고주파 공진 인버터
Fig. 1. Instantaneous current resultant type load parallel high frequency resonant Inverter

그림 1은 연구대상 회로로 전압형 하프 브리지 복 공진형 인버터를 단위 인버터로 하여 직류전원에 병렬로 3조를 배치한 형태로 구성된 순시전류 합성형 부하병

릴 고주파 인버터를 보여주고 있다.

회로구성에서 알 수 있듯이, 상단부에는 정(+)의 전류를 공급하는 정 스위치군(S_1, S_3, S_5)와 하단부에는 부(-)의 전류를 공급하는 부 스위치군(S_2, S_4, S_6)의 조합으로 구성되어 있다. 3조의 상단 및 하단 인버터로 구성된 회로는 주회로 소자 그룹간의 게이트 신호를 순차적으로 인가하여 직렬공진회로의 독립된 출력을 합성하여 병렬공진회로를 통하여 고주파 전력을 부하에 공급하도록 구성되어 있다. 스위칭 소자($S_1 \sim S_6$)는 자기소호 기능을 갖는 소자라면 어떤 것이나 사용이 가능하며, 다이오드($D_1 \sim D_6$)는 회로 운전 특성상 나타나는 무효전류를 흘려주기 위한 통로로 사용되고 있다. ($L_1 \sim L_3$) 및 ($C_1 \sim C_3$)는 스위칭 소자의 온·오프에 따라 직렬공진회로를 구성하기 위한 공진용 리액터와 커패시터이고, C_p 는 유도가열 부하계($R-L_p$)의 역률보상용 커패시터이다.

2.2. 회로해석

그림 2는 그림 1의 인버터 회로에서 고주파 출력전력을 제어하기 위한 방법으로 스위칭 소자($S_1 \sim S_6$)에 인가하는 구동신호 패턴과 이에 따른 각 소자에 나타나는 정상적인 전압 및 전류 파형을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 회로의 기본적인 동작상태는 3개의 출력이 부하단에서 합성되므로 부하회로에 나타나는 출력 주파수(f)는 소자의 스위칭 주파수(f_{sw})의 3배가 된다.

그림 1의 스위칭 소자($S_1 \sim S_6$)와 ($D_1 \sim D_6$)의 온·오프 동작에 따른 동작모드는 모드 a에서 모드 h까지 8개의 동작 모드로 표현 할 수 있으며 모드천이를 동작모드로써 종합적으로 정리한 것이 표 1이다.

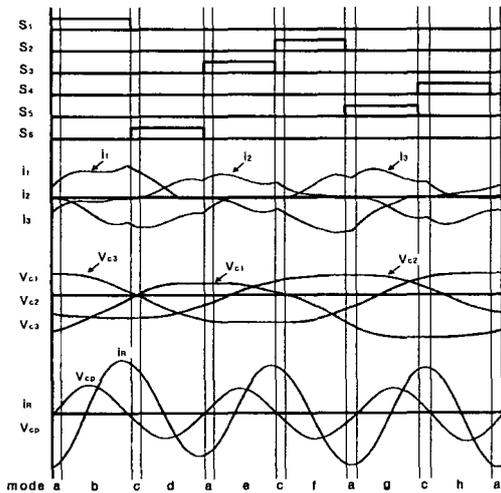


그림 2 구동신호 패턴과 이론파형
Fig. 2. Driving signal pattern and theoretical waveforms

표 1. 동작 모드
Table 1. Operating mode

구간	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	모드
1 구간	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	a
	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	b
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	c
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	d
	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	b
	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	d
2 구간	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	e
	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	f
	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	a
	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	b
	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	g
	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	e
3 구간	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	g
	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	e
	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	h
	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	h
	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	f
	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	a
3 구간	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	c
	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	g
	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	h
	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	c
	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	d
	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	h
0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	f	

1 : on, 0 : off

각 모드별 회로 상태 방정식은 표 1에서 나타난 정규화 제어변수를 도입하여 식 (2)~(9)와 같이 대표적으로 8개의 정규화 회로 상태 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dX^*}{dz} = A^* \cdot X^* + B^* \cdot U$$

$$Y^* = C \cdot X^* \quad (1)$$

여기서, $X=[i_1^*, i_2^*, i_3^*, i_L^*, v_{c1}^*, v_{c2}^*, v_{c3}^*, v_{cp}^*]^T$, $U=[0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 이고, 각 모드별 A^* , B^* , C 는 다음과 같다.

$$K = -\frac{4\pi}{\mu\beta}, \quad L = -\frac{4\pi\lambda}{\mu}, \quad N = \frac{\pi}{\mu\alpha},$$

$$M = \frac{\pi}{\mu}, \quad P = -\frac{\pi}{\mu}, \quad Q = \frac{2\pi}{\mu\beta}, \quad R = -\frac{2\pi}{\mu\beta}$$

Mode a

$$A^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & K & 0 & 0 & K \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K & 0 & K \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K & K \\ 0 & 0 & 0 & L & 0 & 0 & 0 & M \\ N & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M & M & M & P & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B^* = [Q \ R \ Q \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

며, 부하에는 유효전력성분이 아닌 무효전력성분을 많이 포함하기 때문에 실제 유도가열시에는 이 구간에서는 인버터를 운전하지 않는 것이 좋은 줄로 사료된다. 부하의 제동계수의 증가는 부하 임피던스의 감소를 초래하기 때문에 전원에서 본 전체 부하 임피던스가 용량성 상태가 되어 출력값은 증가하게 된다.

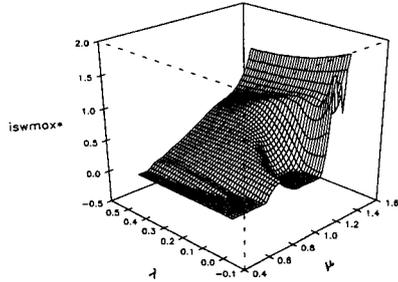


그림 5. 스위치 최대전류특성
Fig. 5. Characteristics of peak switch current

그림 5는 (μ , λ)의 변화에 따른, 스위칭 전류의 최대치(i_{swmax}^*)특성을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, $\mu=1.0$ 부근에서 공진용 커패시터(C)와 리액터(L)에 의한 최대 공진점으로 나타내고 있는데 이는 전원에서 전체 임피던스를 보았을 때, 전원에서 부하측을 보았을 때 저항성 부하 상태이다. 그러나, 저항성 부하 상태에서 스위치 전류가 증가한다는 의미는 부하 임피던스가 감소하여 스위치 전류가 상승한다고 사료된다.

또한, μ 가 1.0부근을 제외한 임의의 μ 에 대해서 λ 가 증가함에 따라 스위치 전류가 조금씩 증가하고 있는데, 이는 λ 가 증가하면 부하 제동계수가 증가하게 되어 부하 임피던스가 감소하게 되어 스위치 전류는 증가하게 된다.

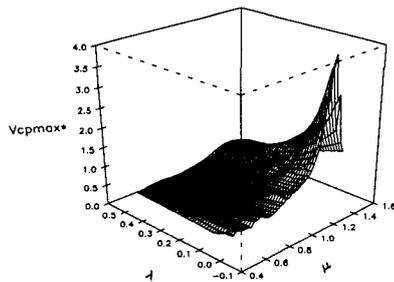


그림 6. 공진용 커패시터 최대전압특성
Fig. 6. Characteristics of peak resonant capacitor voltage

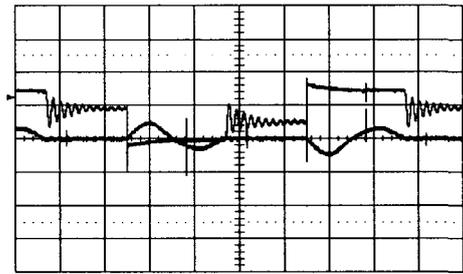
그림 6은 (μ , λ)의 변화에 따른 경우, 병렬공진용 커패시터의 최대 전압 특성(v_{cpmax}^*)을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 병렬 공진에 의한 최대 공진점인

$\mu=1.0$ 부근에서 공진용 커패시터 전압특성(v_{cpmax}^*)이 최소가 됨을 알 수 있다. 병렬공진용 커패시터 최대전압(v_{cpmax}^*)은 시분할방식 복공진 고주파 인버터의 스위칭 전류 최대치를 적분 한 것이므로 스위칭 소자에 흐르는 전류의 적분한 값으로 주어진다. 이러한 특성은 설계시 병렬공진용 커패시터(v_{cpmax}^*)의 내압을 결정하는 중요한 자료로 사용된다.

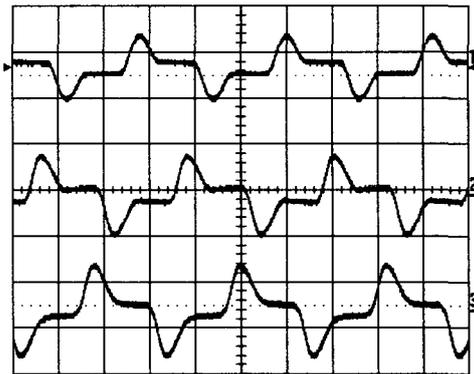
4. 실험 및 고찰

제안한 인버터의 회로 특성해석에서 얻은 결과를 기초로 한 회로 설계법에 의해서 설계된 회로정수에 스위칭 소자로 IGBT를 사용하여 실험을 행하였다. 실험에 사용된 실험정수는 IGBT(GA100TS120U)를 스위칭소자로 사용하고, $E_s=50[V]$, $C_1=C_2=C_3=0.9[\mu F]$, $L_1=L_2=L_3=90[\mu H]$, $L_p=28[\mu H]$, $C_p=0.45[\mu F]$ 로하여 회로를 구성하였다.

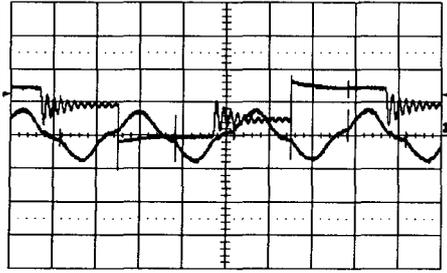
그림 7은 스위칭 주파수가 51[kHz]일 경우, 이론해석의 정당성을 입증하기 위하여 인버터의 각 부분의 정상 운전 시에 실험을 통해서 얻어진 실측파형을 나타내고 있다.



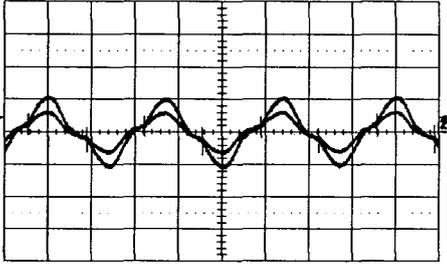
Voltage : 30(V)/div, Current : 20(A)/div, Time : 2.5(μ s)/div
(a) 스위치 전압(V_{sw})과 스위치 전류(i_{sw})



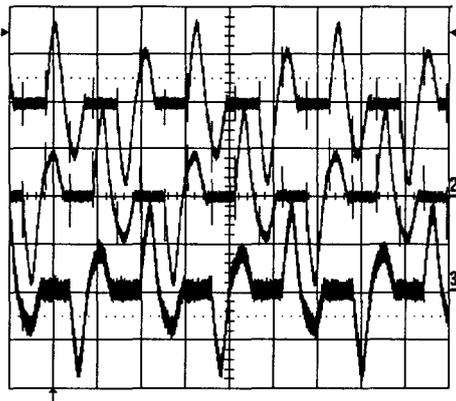
Voltage : 30(V)/div, Time : 3(μ s)/div
(b) 직렬 커패시터 양단전압(V_{c1} , V_{c2} , V_{c3})



Voltage : 30[V]/div, Current : 20[A]/div,
Time : 2.5[μs]/div
(c) 스위치 전압(V_{sw})과 부하 전류(i_L)



Voltage : 30[V]/div, Current : 20[A]/div,
Time : 3[μs]/div
(d) 부하 전류(i_L)와 병렬 커패시터 전압(V_{co})



Current : 5[A]/div, Time : 2.5[μs]/div
(e) 스위치 전류(i_1, i_2, i_3)

그림 7. 실측 파형

Fig. 7. Experimental waveforms

5. 결론

본 논문은 종래의 직렬 공진 회로에 병렬 공진 회로를 추가하여 직렬 공진회로의 전류를 병렬공진회로의 주입전류로 작용하게 하여 스위치의 전류 부담을 감소시키는 효과를 갖는 복공진형 고주

파 인버터를 단위 인버터로 하여 직류전원에 병렬로 3조를 배치한 형태로 구성된 순시전류합성형 부하병렬 고주파 공진 인버터를 연구의 대상으로 하여 그 동작 특성을 도식적으로 명확하게 표현하였다. 향후, 현재 스위칭 소자로 널리 사용되고 있는 Power-Tr, Power-MOSFET, IGBT 등과 같은 자기 소호형 소자에 시분할 구동기법을 사용하여 부하 회로의 출력주파수를 증가시킬 수 있어, 단위소자의 구동 스위칭 주파수 보다 높은 범위로 부하에 고주파 전력을 공급할 수 있음을 확인하였다. 향후 제안한 인버터는 유도가열 응용을 비롯하여 고주파 발전을 이용한 DC-DC 컨버터 및 중·대용량의 전력변환 장치에 그 응용이 기대되는 바이다.

참 고 문 헌

- (1) Mustansir H.K , "Coaxially Wound Transformer for High-Power High-Frequency Applications", IEEE TRANS on PE, VOL. 7, pp. 54~62, JANUARY,1992.
- (2) Bimal K. Bose, "Evaluation of Modern Power Semiconductor Devices and Future Trends of Converters", IEEE TRANS on IND, APP, VOL. 28, pp. 403~413, APRIL, 1992..
- (3) Thomas A. Lipo, "High Frequency Series Resonant dc Link Power Conversion", IEEE TRANS on IND APP. VOL 28, No. 6, pp. 1277~1285, NOV/DEC, 1992.
- (4) Rudy Sevens, "MOSPOMER Applications Hand-book", Siliconix, pp. 139~142, 1984.
- (5) 조 규판, 김 종해, 남 승식, 김 동희, 노 채균, 배 영호, "Phase-Shift를 이용한 복공진형 고주파 인버터의 특성에 관한 연구", 조명·전기설비학회논문지, Vol.14, No.1, pp. 109~117, January 2000.
- (6) Alan H. Weinberg, "A New Zero Voltage and Zero Current Power-Switching Technique", IEEE TRANS on PE, Vol. 7, NO. 4 pp. 655~665, OCT, 1992.
- (7) Richard Redl, "A Novel Soft-Switching Full-Bridge DC/DC Converter : Experimental Results at 1.5kW, 100KHz", IEEE TRANS on PE, VOL. 6, NO.3 pp. 408~418, JULY, 1991.
- (8) Romeo Letor, "Static and Dynamic Behavior of Paraleled IGBT,s", IEEE TRANS on IND APP, VOL. 28, NO.2 pp 395~402, MAR/APR, 1992.
- (9) LOUISE. E. FRENZEL , "Communication electronics", McGRAW-HILL, pp. 172~185, 1989.