

복 공진형 고주파 인버터의 특성해석과 설계

김 중해* · 원 재선* · 김 동희* · 조 규판* · 심 광열** · 이 봉섭***
 영남대학교전기·전자공학부* · 울산전문대학** · 삼척산업대학교***

Design and characteristics analysis of Double resonant type High frequency Inverter using Phasor shift

Jong-Hae kim* · Jae-Sun Won* · Dong-Hee Kim* · Kyu-Phan Cho* · Kwang-Yul Sim** · Bong-Seop Lee***
 School of Electronics and Electrical Eng. Yeungnam University* · Ul San Junior College** · Samchok National University***

Abstract - A full bridge double resonant type inverter using Phasor shift suitable for heating magnetic and nonmagnetic at high frequency is described. A series-parallel arrangement of capacitor is adopted and optimum mode of operation is proposed. Also, Based on the characteristics value, a method of circuit design is proposed.

1. 서 론

산업의 발달로 전기에너지가 다양한 형태로 이용되고 있으며, 여기에 응할 수 있는 전력변환 기술, 제어기술 및 전력변환장치에 사용되는 전력용 스위칭 반도체 소자의 개발과 납땜, 표면담금질과 같은 금속의 열처리를 위해 고주파전류를 이용한 공진형 인버터, 컨버터등에 대한 관심이 급증하고 있으며, 더욱이, 10khz ~ 200khz 사의 주파수 범위에서 유도 가열 부하에 고출력을 공급할 수 있는 인버터 개발에 상당한 관심을 가지고 있으며, 현재 활발하게 연구중이다.

전력변환장치에 직렬 공진 회로를 이용하여, 공진점 부근에서 운전할 경우, 스위칭 전류가 과다하게 흐르는 단점이 있고, 병렬 공진 회로를 이용할 경우, 직류 리액터를 전단단에 부가하여야 하므로 기동시간이 늦어지는 것이 문제점으로 지적된다. 또한, 출력주파수의 고주파화를 실현 할 수 있는 부하 공진형 고주파 인버터는 유도 가열 부하계, 강력 초음파 발전기, 그리고 방전등, 안정기등의 전원 시스템으로 응용되어지고 있다.⁽¹⁾⁽²⁾

따라서, 본 논문은 종래의 직렬 공진 고주파 인버터 회로에 병렬공진회로를 부가하여 직렬공진회로의 전류를 병렬공진회로의 주입전류로 작용하게 하여 스위치의 전류분담을 감소시키는 효과를 갖는 Phasor shift를 이용한 복공진형 고주파 인버터를 연구대상회로로 하였다.

무차원화 파라메타를 도입하여 범용성있게 기술하고 있으며, 연구대상회로의 기본 동작원리와 회로해석을 통하여 얻은 특성평가도 기술하고 있으며, 더욱이 특성평가들 기초로한 회로 설계법의 일 예도 제시하고 있다.

2. Phasor shift를 이용한 복공진형 고주파 인버터

2.1 주회로 구성 및 동작원리

그림 1은 본 논문에서 연구대상회로로 선정한 Phasor shift를 이용한 복공진형 고주파 인버터의 회로 구성을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 기본 회로 구성은 기준상(S1, S4)와 제어상(S2, S3)로 구성된 풀브릿지 구성되어 있으며, 직·병렬 공진을 이용하여 고주파 전력을 부하(RL)에 공급하도록 구성되어 있다. 스위칭 소자(S1~S4)는 자기 소호형 소자(예로: MOSFET, IGBT등)라면 어떤 소자라도 사용이 가능하며, 다이오드(D1~D4)는 회로의 운전상태에 따라

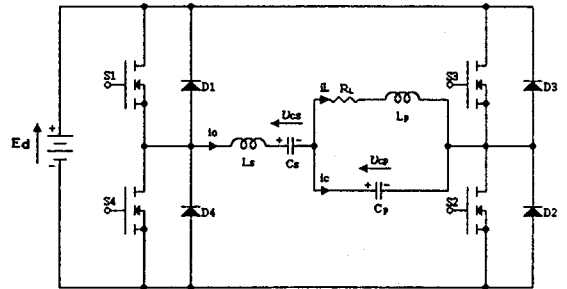


그림 1. Phasor shift를 이용한 복공진형 고주파 인버터

나타나는 무효 전류를 흘려주기 위한 통로로 사용되고, Ls 및 Cs는 스위칭 소자의 온·오프에 따라 직렬공진회로를 구성시키기 위한 공진용 리액턴스와 캐패시터이고, Cp는 유도 가열 부하계(RL-Lp)의 역률 보상을 캐패시터이며, 실제 전체 시스템의 효율적인 면에서 주로 역률용 커패시터 Cp에 의해 결정되며, Cs와는 무관하다.

그림 1은 회로 부하는 유도 가열 부하계를 상정하였고, RL과 Lp는 유도 가열 부하계의 등가저항과 등가 리액턴스를 나타낸다.

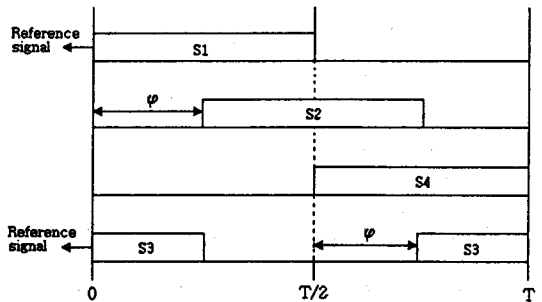


그림 2. 스위치의 스위칭 패턴

그림 2는 그림 1의 스위칭 소자(S1, S4), (S2, S3)의 스위칭 패턴을 나타내고 있다. 출력전압제어는 스위치(S1, S4)와 (S2, S3)를 동기한 상태에서 상대적 S1(S4)에 대해서 S2(S3)의 위상차각을 0~T/2까지 연속적으로 시프트시켜 출력전압 제어를 실현하고 있다.

따라서, 출력전압 제어는 스위치의 구동 펄스신호에 위상차각(phi)을 부여함으로써 고주파 출력을 연속제어할 수 있다.

2.2 회로해석

그림 1의 고주파 인버터의 동작 모드 분류는 스위치(S1~S4)의 온·오프의 상태에 의해 4개의 동작 모드

로 분류된다.

각 모드별 회로 상태 방정식을 표 1에서 나타낸 무차원화 제어 변수를 도입하여 표현하면 다음과 같다.

표 1. 무차원화 변수와 파라메타

	Reference Values	Normalized Values
Voltage	E_d	$V^*(z) = V(t)/E_d$
Current	$I = E_d/Z_b$	$i^*(z) = i(t)/I$
Time	$T_{sw} = 1/f_{sw}$	$Z = t/T_{sw}$
Frequency	$f_r = 1/2\pi\sqrt{L_b C_b}$	$\mu = f_{sw}/f_r$
Impedance	$Z_b = 2\sqrt{L_b C_b}$	$\lambda = R_l/Z_b$
Power	$P_b = E_d \cdot I$	$P^*(z) = P(t)/P_b$

<Remarks>
 f_{sw} : Operating Frequency of Inverter
 T_{sw} : Operating Period of Inverter
 $L_b = L_p, C_b = C_p, C_p/C_r = \alpha, L_p/L_r = \beta$

각 모드별 회로상태방정식을 회로해석의 범용성을 부여하기 위해 표 1에서 나타낸 정규화 제어변수를 도입하였다.

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

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

여기서 $X = [i_{sw}^*(z), iL^*(z), V_{cs}^*(z), V_{cp}^*(z)]^T$.

$U = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$ 이고 A, B, C는 다음과 같다.

Mode 1(S1, S3: ON)

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{4\pi}{\mu\beta} & -\frac{4\pi}{\mu\beta} \\ 0 & -\frac{4\pi\lambda}{\mu} & 0 & \frac{4\pi}{\mu} \\ \frac{\pi}{\mu\alpha} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\pi}{\mu} & -\frac{\pi}{\mu} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{4\pi}{\mu\beta} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$C = [0 \ 1 \ 0 \ 0] \quad (2)$$

Mode 2(S1, S2: ON)

A = Mode 1의 A와 동일

$$B = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$C = [0 \ 1 \ 0 \ 0] \quad (3)$$

Mode 3(S2, S4: ON)

A = Mode 1의 A와 동일

$$B = [-\frac{4\pi}{\mu\beta} \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$C = [0 \ 1 \ 0 \ 0] \quad (4)$$

Mode 4(S4, S3: ON)

A = Mode 1의 A와 동일

$$B = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$C = [0 \ 1 \ 0 \ 0] \quad (5)$$

3. 특성평가

그림 3은 무차원화 부하저항(λ), 무차원화 제어 주파수(μ)를 파라메타로 하였을 경우, Phasor shift를 하지

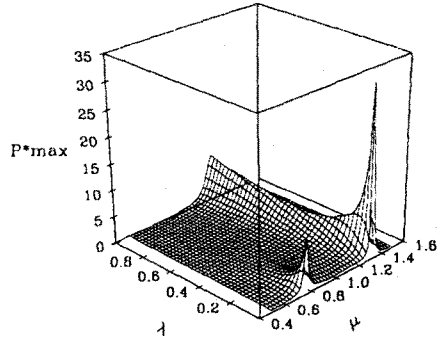


그림 3. P^*_{max} 특성 (No Phasor shift)

않았을 경우의 최대 출력 전력 특성을 나타내고 있다. 동작 주파수에의 변화에 따라 출력전력이 변화하고 있어, 스위칭 주파수에 따른 출력 전력을 제어 할 수 있음을 알 수 있다.

그림에서 알 수 있듯이, 무차원화 저항(λ)이 작을 경우, 출력이 커진다는 것을 알 수 있는데, 이는 부하측의 임피던스가 매우 낮아 거의 단락 상태로 볼 수 있다.

또한, 무차원화 저항(λ)이 변화함에 따라 무차원화 제어 주파수(μ)가 0.8부근과 그리고 1.34부근에서 P^*_{max} 가 최대가 되는 것을 알 수 있다. 이는 직·병렬 공진을 하기 때문에 최대 공진점이 두지점에서 나옴을 알 수 있다.

실제 본 회로를 유도 가열 부하계에 적용할 경우 무차원화 저항(λ)의 변화에 대해 스위칭 주파수를 가변시킴으로써 최대 출력 전력 제어를 실현시킬 수 있다.

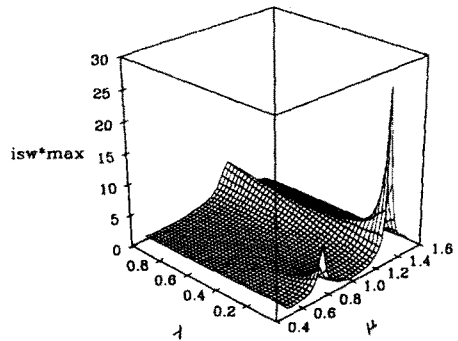


그림 4. $i_{sw}^*_{max}$ 특성 (No Phasor shift)

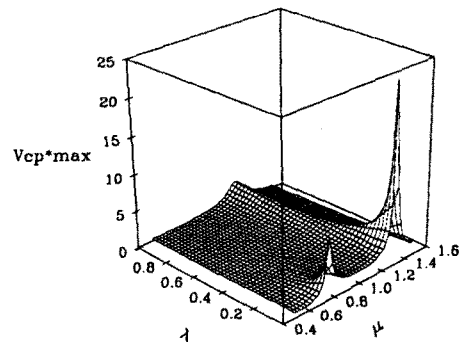


그림 5. $V_{cp}^*_{max}$ 특성 (No Phasor shift)

그림 4와 5는 무차원화 부하 저항(λ)과 무차원화 제어 주파수(μ)를 파라메타로 하였을 경우 스위치에 흐르

는 최대전류 특성과 부하 양단의 역률 보상을 커패시터 최대 전압 특성을 나타내고 있다.

그림4에서 알 수 있듯이, 무차원화 저항(λ)이 작을 경우 스위치에 흐르는 전류가 최대가 된다는 것을 알 수 있는데, 이는 전원측에서 직·병렬 임피던스를 보았을 때 병렬형 부하 임피던스가 최소이므로 전체 임피던스는 최대가 된다.

즉 다시 말해서, 스위치에 흐르는 전류는 최소가 되고 부하에 흐르는 전류는 최대가 된다는 것을 의미한다.

그림4에서 알 수 있듯이, 최대 전류도 무차원화 제어 주파수(μ)가 0.8부근과 1.34부근에서 최대인 것을 알 수 있다.

그림 5의 역률 보상을 커패시터의 최대전압은 인버터의 부하의 최대전류를 적분한값으로 주어진다.

이 특성치는 설계시 공진용 커패시터의 내압을 결정하는데 중요한 자료로 사용된다.

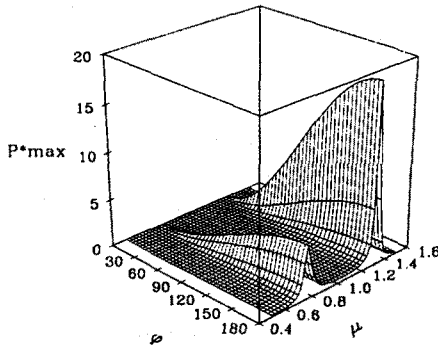


그림 6. P*max 특성(Phasor shift)

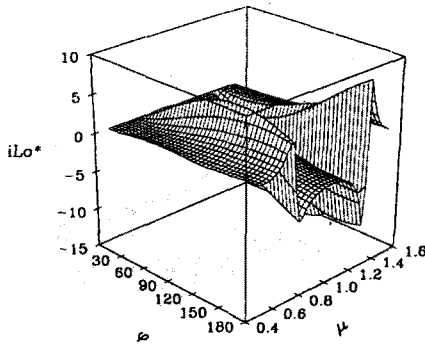


그림 7. 부하 전류의 초기치(iLo^*) 특성

그림 7과 8은 무차원화 제어 주파수(μ)와 위상차각(ϕ)를 파라메타로 하였을 경우, P*max 특성과 부하전류의 초기치 특성(iLo^*)을 나타내고 있다.

그림 7에서 알 수 있듯이, 위상차각(ϕ)을 0~180°까지 변화를 시켰을 경우 위상차각이 180°에 가까워 질수록 출력이 점점 증가한다는 것을 알 수가 있다.

위상차각이 40°부근에서는 거의 출력값이 나타나지 않는다는 것을 알 수 있다. 이는 전원측에서 공급되는 에너지가 부하로 거의 공급이 되지 않아, 전원측에서 부하측을 보았을 때, 부하측의 제동계수가 상당히 크게 보이기 때문이다.

또한, 위상차각(ϕ)가 증가함에 따라 무차원화 제어 주파수(μ)의 최대 공진점은 그림 3과 같은 부근에서 최대가 된다는 것을 알 수 있다.

그림 8은 부하전류의 초기치 특성을 나타내고 있는데, 특성도에서 알 수 있듯이, 초기치 전류가 0인 부근이 최대 출력전력특성을 얻기위한 최대 부하전류가 흐르는

것을 의미한다. 실제 설계시 그림 7의 특성치는 출력전력 특성을 얻는데 중요한 자료로 이용되어진다.

4. 회로 설계

복 공진형 고주파 인버터의 회로 특성해석에서 얻은 결과를 기초로 하여 입력전압 $E_d(V)$, 출력전력 $P(kw)$, 출력주파수 f_{sw} 가 주어진 경우 회로 설계법의 흐름도의 일례를 그림 8에 나타내었다.

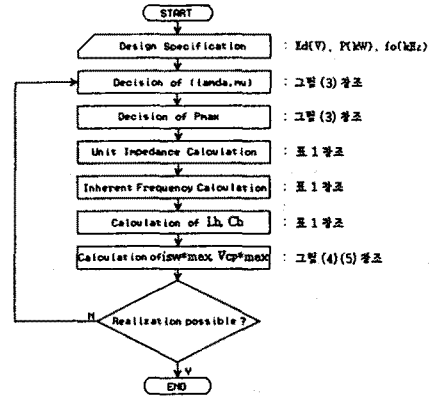


그림 8. 회로 설계의 흐름도

표 2. 설계 수치 예

Circuit Parameter	$E_d=50(V)$, $P=1(kw)$
Lp	0.93[μH]
Cp	1.8[μF]
Ls	3.2[μH]
Cs	0.6[μF]
$V_{cp}^*_{max}$	66.5[V]
$i_{sw}^*_{max}$	10.8[A]

5. 결 론

본 논문은 종래의 직렬공진 고주파 인버터 회로에 병렬공진회로를 추가하여 직렬공진회로의 전류를 병렬공진회로의 주입전류로 작용하게하여 스위치의 전류 분담을 감소시키는 효과를 갖는 인버터회로의 스위치에 위상차각을 부여하여 출력을 제어하는 Phasor shift형 복공진 고주파 인버터를 연구대상 회로로 하여 회로 동작과 특성을 이론적으로 고찰 하였다. 또한, 실제 전 단계에 필요한 특성해석을 무차원화 파라메타를 도입하여 범용성 있게 기술 하였으며, 무차원화 저항(λ)과 무차원화 제어 주파수(μ)를 제어함으로써 스위치의 전류와 부하의 전류의 변환 효율을 높일 수 있다. 더욱이, 특성평가에서 얻어진 설계 기초자료를 토대로 한 회로 설계법의 일 예도 제시하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Mokhtar Kamli, Shigehiro Yamamoto and Minoru Abe, "A 50-150kHz Half Bridge Inverter for Induction Heating Applications", IEEE Transactions on Industrial Electro. Vol. 43, No. 1, pp. 163~172, Feb. 1996.
- [2] H. Ogiwara and M. Nakaoka, "Induction-heating high frequency inverters using static induction heating.", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 31, no. 1, pp. 34-36, Feb. 1984.