

論文96-33B-5-17

공진형 직류 링크 인버터의 공진 펄스 제어기

(A Novel Resonant Pulse Control in Resonant DC Link Inverter)

俞東旭*, 元忠淵**

(Dong -Wook Yoo and Chung-Yeun Won)

요 약

본 연구는 무정전 전원장치에 적용하기 위한 공진형 직류 링크인버터의 새로운 공진 펄스 제어기를 제시하였다. 제시한 제어기법은 종래에 공진형 직류 링크 인버터의 공진 전압 억제용으로 사용되어 왔던 능동 및 수동 회로를 첨가하지 않고 공진전압을 일정 수준 이하로 제한시키며 시스템 전체의 특성 및 효율을 개선시키는 특징을 갖는다. 이러한 출력전압 제어는 외부의 전압제어기와 내부의 전류제어기 그리고 두 개 피드 포워드 제어기로서 조절된다. 본 연구에서는 제시된 제어기의 설계 및 분석을 행하였으며 실제 5kVA 무정전 전원장치용 단상, 삼상 인버터를 설계·제작하여 제안한 제어기의 타당성을 검증하였다.

Abstract

A novel resonant pulse control technique which generates high-quality sinusoidal output voltage from a resonant dc link inverter is presented for UPS applications. The proposed control technique limits resonant voltage overshoot without any passive or active clamp circuit, resulting in resonant pulses with uniform amplitude and high efficiency. The output voltage is controlled by the third order controller with an inner loop of the filter inductor current and the feedforward controller. Analysis and design of the proposed control technique are illustrated and verified on a 5kVA experimental unit.

I. 서 론

무정전 전원장치에서는 매우 낮은 왜형율을 갖는 정현파 출력이 요구되어 진다. 이러한 요건을 충족하기 위해 출력 전압 파형은 비선형 부하에서도 매우 낮은 고조파 성분을 가져야만 한다. 현재, 기존의 하드 스위칭 방식의 인버터는 이러한 요건을 충족시키고 있다. 또한 전력용 반도체 소자기술의 비약적인 진보에 힘입어, 시스템의 동작 주파수 역시 수 kHz까지 가능하게 되었다. 그렇지만, 무정전 전원장치에서 요구사항과 기

술수준이 점차 발전하고 있으며 효율, 신뢰성, 출력 고조파 감소, 장치의 소형화등 다수의 목적으로 시스템의 동작 주파수는 수십 kHz로 증가될 가능성도 있다. 이러한 문제에 있어서, 기존의 하드 스위칭 방식은 스위칭 주파수를 증가시킬 때에 수반되는 손실증가로 인해 주파수 증가는 곤란하게 된다^{[1][2]}.

이러한 문제를 해결하기 위한 노력으로 많은 소프트 스위칭 방식의 전력회로들이 연구되어 왔다. 여러가지 회로들에서 실제적인 응용을 위해서는, 장치의 구성이 간단할 수록 효율이나 가격면에서 유리하게 되므로 이 점이 응용분야에서 상당히 중요하게 된다. 따라서 공진형 직류 링크 인버터가 가장 적합한 회로 중의 하나이다. 공진형 직류 링크 인버터는 기존의 하드 스위칭 인버터에 비해 단지, 공진 인덕터와 공진 커패시터만이 전력 회로 구성에서 추가된다. 이 회로는 역시 영전압 스위칭에 의해, 많은 스위치 손실의 증가없이 스위칭

* 正會員, 韓國電氣研究所, 電力電子研究部

(Power Electronics Division, KERI)

** 正會員, 成均館大學校 電氣工學科

(Dept. of Electrical Engineering in Sung Kyun Kwan University)

接受日字:1996年1月25日, 수정완료일:1996年4月20日

주파수를 증가시킬 수 있다. 그렇지만, 단점으로, 회로의 동작 상태에 따라서 직류 링크 전압이 입력전압의 수배로 대단히 높게 되어 소자 파괴의 우려가 있다. 이러한 점을 개선 하기 위해 여러가지 형태의 클램프 회로와 입력 단에 스위치를 추가한 형태의 준 공진 직류 링크 인버터가 연구되어 왔으나 부가적인 소자와 손실이 수반되는 단점이 있다.

본 논문에서는 무정전 전원장치에 공진형 직류 링크 인버터를 적용 하기 위한 공진 펄스 제어를 제시한다. 제시된 제어기는 출력 전압 제어와 공진 전압 제어를 통해, 매우 낮은 고조파를 갖는 정현파 출력전압과 일정한 수준의 높이를 갖는 공진전압을 만든다. 그러므로 여러가지 공진회로를 이용한 인버터 장치와 비교해 볼 때, 가장 간단한 장치 구성과 낮은 가격, 높은 효율을 얻을 수 있다. 제시한 제어기에서 출력 전압 제어는 외부의 전압제어와 내부의 전류제어기 그리고 두개의 피드 포워드 루프로 구성되어 있다. 또한 정류부하에서 출력전압 파형을 개선시키기 위해 내부 전류 제어기의 기준전압이 출력 전압의 기준 전압에 따라 변화하도록 하였다. 공진 전압은 허용할 수 있는 수준으로 제어기에 의해 조절되며 이것은 공진 전류의 예측 제어에 의해 이뤄진다. 따라서 공진전압의 침투치에 의한 소자 파괴 문제가 없어지며 어떠한 부가적인 소자가 필요없게 된다.

본 논문 내용에서는 단상과 3상의 공진형 직류 링크 인버터에 대한 동작원리와 해석 및 제시한 제어기법을 설명하고 이것을 이용하여 전력회로와 제어회로를 구성하였으며, 각각의 단상과 3 상 인버터에 대한 5kVA의 실험장치를 제작, 실험하여 제시된 제어기의 타당성을 검증한다.

II. 동작원리

1. 단상 공진형 직류 링크 인버터

단상의 공진형 직류 링크 인버터를 그림 1에서 나타내었다. 실제적으로 공진 동작에서 손실이 발생하므로 공진전압은 점차 감소하게 된다. 그러므로 각 공진주기에서 공진 인덕터의 초기 전류를 적절히 제어하여 공진전압을 일정하게 발생, 유지시켜야만 한다. 이렇게 발생된 일련의 공진 전압 펄스들은 적절히 합성되어 정현파 교류 출력전압이 얻어진다. 이러한 과정은 3상 인버터에서도 역시 마찬가지이다.

만약, 회로 소자가 이상적이라고 가정하면, 공진 링크에서의 공진전압과 전류는 다음식으로 표현할 수 있다^[1].

$$V_{cr} = V_s + e^{-at} [-V_s \cos \omega t + \omega L_r I_p \sin \omega t] \quad (1)$$

$$I_{Lr} = I_o + e^{-at} [I_p \cos \omega t + \frac{V_s}{\omega L_r} \sin \omega t], \quad (2)$$

여기서, $a = \frac{R}{2L_r}$, $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$, $w = \sqrt{\omega_o^2 - a^2}$

V_{cr} ; 공진 전압, I_o ; 출력 전류, I_{Lr} ; 공진 전류, I_p ; 인버터 전류

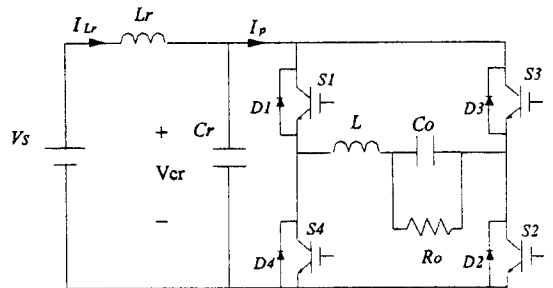


그림 1. 단상 공진형 직류 링크 인버터 회로
Fig. 1. Circuit topology of single phase RDCLI.

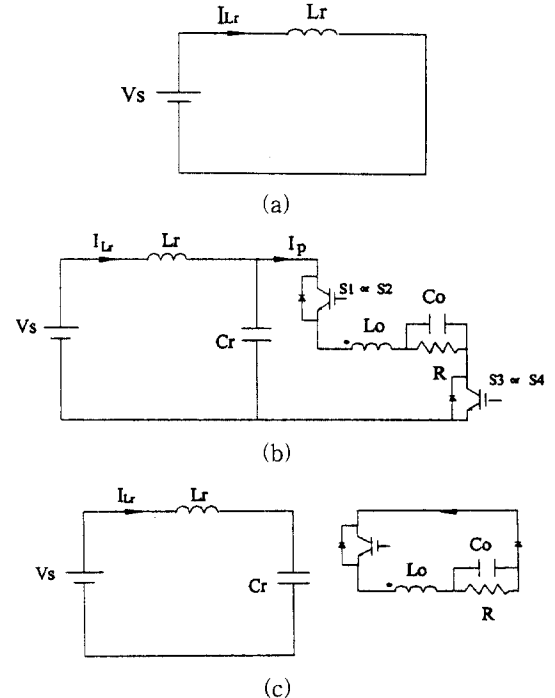


그림 2. 동작 모드 : (a) 초기화 모드, (b) 전력 전달 모드, (c) 환류 모드
Fig. 2. Operation modes : (a) initializing mode, (b) powering mode, (c) freewheeling mode.

식 (1), 식(2)에서 알 수 있듯이 공진 전압과 전류는 인버터 전류 I_p 와 밀접한 관계를 갖는다. 따라서 인버터 전류 I_p 에 따라 공진 인덕터 전류를 적절히 제어함으로써 공진전압의 크기를 제어 할 수 있음을 알 수 있다. 스위치의 선택에 따라 부하측에 전달되는 전력은 조절되며 따라서 그림 2에서 나타내어진 것 처럼 3 가지의 동작 모드를 갖는다.

Mode 1 (초기화 모드) : 전체 스위치를 턴 온하여서 공진 인덕터 전류가 초기화 된다.

Mode 2 (전력 전달 모드) : 전체 스위치의 턴 온 상태에서 두개의 대각선 방향 스위치들이 턴 오프되고 이때 $L_r - C_r$ 공진이 시작되며 공진전압은 부하에 인가되고 전력이 부하로 전달된다.

Mode 3 (환류 모드) : 출력 전압 제어에 따라, 전체 스위치의 턴 온 상태에서 상단이나 하단의 두개 스위치가 턴 오프되고 부하 전류는 환류한다. 이때 L_r, C_r 는 공진한다.

2. 3 상 공진형 직류 링크 인버터

3 상 공진형 직류 링크 인버터가 그림 3 에서 나타나 진다. 회로의 동작 원리와 제어 기법은 단상 인버터와 유사하다. 출력단자에 중성점을 주기 위해, 그림 3 의 필터 인덕터 L은 실제 시스템의 구성에서 적절한 누설 인덕턴스를 갖는 $\Delta-Y$ 변압기를 사용하였다.

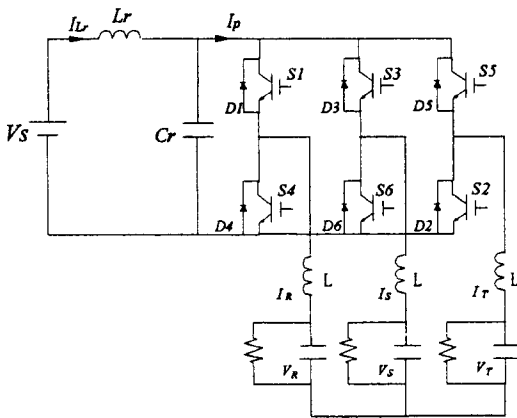


그림 3. 3 상 공진형 직류 링크 인버터 회로
Fig. 3. Circuit topology of three phase RDCL.

공진 전압의 발생과 제어는 단상 공진형 직류 링크 인버터의 것과 동일하다. 3 상 공진형 직류 링크 인버터에서 각 상의 스위칭 상태는 하나의 인버터 폴에서 상단의 스위치가 턴온하는 양(+)과 하단의 스위치가 음

(-)의 두가지를 가지며 따라서 역시 세가지의 동작 모드 즉, 초기화 모드, 전력 전달 모드, 환류 모드를 갖는다. 부하의 불균형에도 잘 대처할 수 있도록 각 상의 전압과 전류정보가 센스되며, 부하 전류를 공급할 수 있는 인버터 전류를 주기 위해, 초기화 모드를 통해 공진 인덕터 전류가 요구되는 인버터 전류보다 큰 값으로 증가된다. 이때 필요한 인버터 전류에 따라 전력전달모드 또는 환류모드가 계속 이어진다. 즉, 필요되는 인버터전류가 부하전류이하이면 전력전달모드로 계속 동작이 연계되며, 각 상에서 상전압과 상전류 정보에 따라 양의 전류 기울기가 요구되면 상단의 스위치가, 음의 전류 기울기가 요구되면 하단의 스위치가 턴온된다. 인버터 전류가 감소하거나 영인 상태가 되면, 환류모드가 초기화모드에 뒤이어 환류모드가 이뤄진다. 또한 인버터 전류치가 급격한 감소를 보이면, 이후 절에서 설명될 공진전압 크기 제어에 의해 초기화 모드가 일어나지 않고 전력전달모드에서 환류모드로 동작이 연계된다. 각 상에서 요구되는 전체 부하 전류를 공급할 수 있게 충분한 인버터 전류를 공급하여야 한다.

III. 제어 기법

제시된 전력 회로를 이용하여 바라는 정현파 출력 전압을 얻으면서 공진 전압의 과대 현상을 막기 위해 제어기는 크게 출력 전압 제어와 공진 전압 제어의 두가지로 구성된다. 먼저, 출력 전압 제어 부분을 살펴 보면, 그림 4에서 나타내어진 블록도에서 처럼 외부 출력 전압 제어부분에 내부 전류 제어 루프가 시스템 동특성을 향상시키기 위해서 더해지며 또한 피드 포워드 제어가 시스템의 파라미터 변동에 대처하기 위해 더해진다. 이러한 제어 루프와 함께 공진 전압 제어가 독립적으로 수행되며 최종 게이트 신호에서 두개의 제어에서 발생된 신호가 적절히 결합된다.

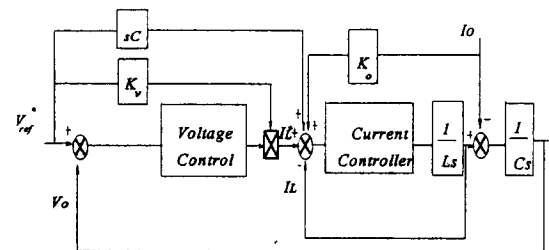


그림 4. 출력 전압 제어기의 블록도
Fig. 4. Constitution of output voltage control system.

이 제어 방법은 3상 인버터에서 각 상의 출력 전압 제어와 공진 전압 제어에 그대로 확장 될 수 있다.

1. 출력 전압 제어기

1) 전압 제어 루프

외부 전압 제어 루프는 3차의 증폭기로 구성되어 진다. 제어기의 전달함수는 다음과 같다.

$$G = \left(\frac{S^3 + aS^2 + bS}{cS^2 + dS + e} \right) K_v \quad (3)$$

여기서, a, b, c, d, e 는 상수이다. K_v 는 기준전압에 따라 변화하는 값이다. 그러므로, G는 기준 전압에 따라 변화하며 이것은 전압 제어 루프의 이득이 시간에 따라 정류된 기준전압 파형의 모양에 따라 변화하는 것을 의미한다. 이것으로 비선형의 정류 부하에서 출력 전압의 왜형이 개선된다. 필터 커패시터의 진상 전류를 보상하기 위해 이득 sC 를 통해 기준전압이 피드 포워드 된다. 비선형 부하에서 시스템 동특성을 향상시키기 위해 역시 부하 전류 피드 포워드 루프도 더해진다. 3 상의 시스템에서, 3개의 전압 제어 루프가 독립적으로 동작된다. 그러므로, 각 상이 부하조건에 무관하게 독립적으로 운전된다.

2) 전류 제어 루프

그림 4에서 알 수 있듯이, 전류 제어기는 전체 제어 기에서 상당히 중요한 부분을 차지한다. 이 제어 루프의 동작으로 외부 출력 전압 제어 루프의 전달함수는 단일 극점을 가지게 되며 따라서 바라는 폐루프 동작을 얻기가 상당히 쉬워진다. 전류 제어기는 히스테리시스 비교기와 기준 전압의 영점 교차 감지 회로로 구성된다.

단상 인버터의 전류 제어기와 3상 인버터의 전류 제어기는 약간 다르게 구성된다. 단상에서는 외부 전압 제어기의 출력, 즉 필터 인덕터 전류 기준치 I_L^* 가 필터 인덕터 전류치 I_L 보다 크면 $+V_{cr}$ 또는 $-V_{cr}$ 을 부하에 인가하고 I_L^* 가 I_L 보다 작으면 부하측을 환류시켜서 공진전압을 부하측에 인가하지 않는다. 이것은 4 가지의 스위칭 상태를 준다.

S 를 스위칭 상태의 함수로 정의하면,

$$S_n = (U_i U_j), \text{ 여기서 } I, j = 1, 2, n = 1, 2 - 4. \quad (4)$$

각 스위칭 순간에서, 항상 초기화 모드가 존재하며 이후에 다음과 같은 4가지의 상태에서 하나가 선택된다.

$$\begin{aligned} S1 &= (+ -), \text{ if } I_L^* > I_L, V_o^* > 0, \\ S2 &= (- +), \text{ if } I_L^* > I_L, V_o^* < 0, \\ S3 &= (+ +), \text{ if } I_L^* < I_L, V_o^* > 0, \\ S4 &= (- -), \text{ if } I_L^* < I_L, V_o^* < 0. \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)에서 나타낸 것처럼 전류 제어기는 출력 전압이 너무 높을 때 환류 모드를 선택하며, 이것으로 전류 리플이 많이 감소된다.

3 상 공진형 직류 링크 인버터에서, 전력전달모드와 환류모드에서 각 상의 스위치는 양(+)이나 음(-)의 두가지 상태로 구동된다. 여기서 초기화모드는 역시 전체 스위치가 턴온하는 경우로서 공진 인덕터의 전류를 증가시키기 위해 필요하다. 그러므로 초기화 모드를 제외하고 다음과 같은 스위칭 상태를 가진다.

$$S_n = (U_R U_S U_T) \quad (6)$$

여기서 R,S,T = 1, 2, 3, n=1,2 - 8.

그러므로, 동작모드는 다음과 같이 S_n 의 함수에 따라 나눌 수 있다.

(i) 전력 전달 모드;

$$S1=(+ + -), S2=(+ - +), S3=(+ - -), S4=(- + +), S5=(- - +), S6=(- + -).$$

(ii) 환류 모드;

$$S7=(+ + +), S8=(- - -).$$

S7 과 S8은 환류 모드이며 만약, 스위칭 상태의 변화가 다음과 같다면 환류 모드가 선택된다.

(i) S1 - S2, (ii) S1 - S4, (iii) S1 - S5,

(iv) S2 - S4, (v) S2 - S6, (vi) S3 - S4,

(vii) S3 - S5, (viii) S3 - S6, (ix) S5 - S6,

환류 모드의 선택은 역시 공진 전압 제어기의 동작에 의해서도 선택될 수 있다.

2. 공진 전압 제어기

무 부하에서, 링크 전압은 입력 직류 전압의 거의 두 배 정도가 된다. 그렇지만, 부하 전류가 급격히 감소되면 입력 전압의 3 내지 4배의 대단히 높은 공진 전압이 발생된다. 그러므로, 매 스위칭 순간에 부하전류의 상태를 예측한 뒤에, 공진전압을 억제할 수 있도록 공진전류의 초기 전류를 제어할 필요가 있다. 식(1), (2)에서 알 수 있듯이 공진전압의 상태는 I_p 의 상태와 밀접한 관계를 가지므로 예측 조건은 다음과 같다.

$$I_p^* < 0, \quad (7)$$

여기서, I_p^* 는 I_p 의 예측값을 의미하며 식 (7)은 다음 스위칭 패턴으로 판단되는 예측 조건이다. 이러한 제어 알고리즘은 그림 5에서 나타내었다. 이 알고리즘에 따른 제어 동작에 의해 공진전압은 거의 일정한 수준의 크기로 제한된다.

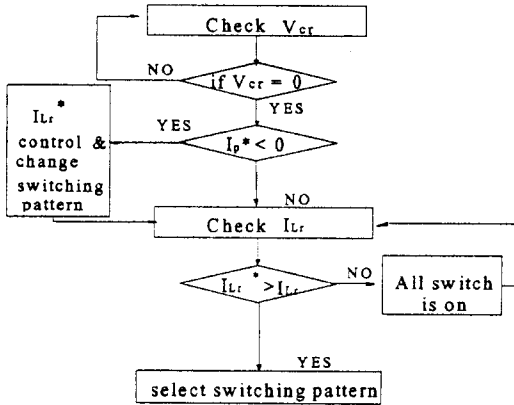


그림 5. 공진 전압 제어 알고리즘
Fig. 5. Resonant voltage control algorithm.

IV. 실험 결과

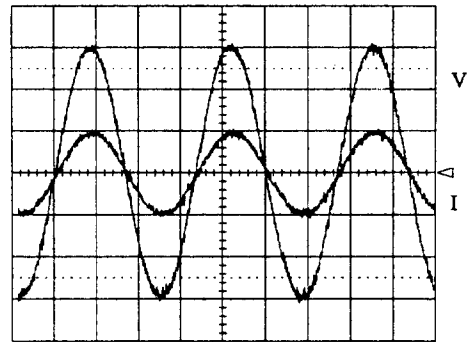
제시된 제어기를 검증하기 위해, 5kVA의 공진형 직류 링크 인버터가 단상과 3 상에 대해 각각 제작되었다. 인버터의 정격 입력전압은 250V이며 소자의 스위칭 주파수는 최대 40kHz이며 그외의 회로의 파라미터들은 표 1과 2에서 나타내었다.

표 1. 단상 공진형 직류 링크 인버터의 회로 파라미터

Table 1. Circuit parameters of single phase RDCLI.

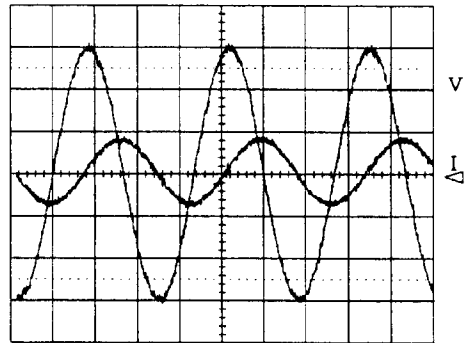
Resonant capacitor C_r	0.5 μ F	Output frequency	60Hz
Resonant Inductor L_r	20 μ H	Resonant frequency	40kHz
Input Voltage V_s	200-270V	Output voltage V_o	110V
Filter Inductor L	380 μ H	Filter capacitor C_o	375 μ F

그림 6은 단상 인버터에서 여러가지 부하에 대한 출력전압과 전류를 나타낸다. 그림 7은 3 상 시스템의 각 상에 저항 부하, 인덕터 부하, 정류부하를 각각 연결하여 시험한 결과 파형이다.



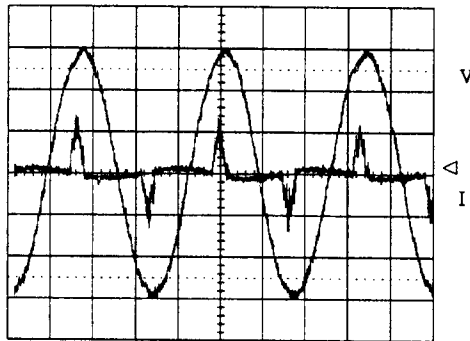
50V/div, 50A/div, 5ms/div

(a)



50V/div, 50A/div, 5ms/div

(b)



50V/div, 50A/div, 5ms/div

(c)

그림 6. 여러가지 부하에서의 출력전압과 전류파형 (a) 저항 부하, (b) 인덕터 부하, (c) 정류 부하

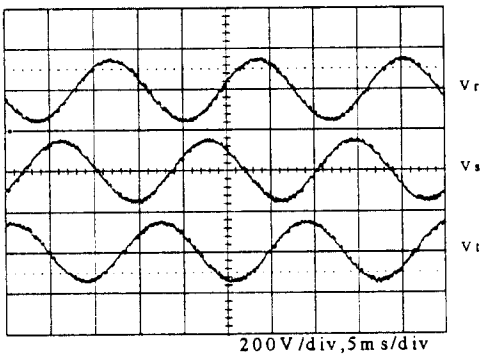
Fig. 6. Output voltage and current waveform at the various load (single phase): (a) Resistive load, (b) Inductive load, (c) Simple diode rectifier load

정류부하는 출력전압을 다이오드 정류기를 통해 전파정류한 다음 후단에 1000 μ F 평활용 콘덴서를 부착한 뒤에 저항부하를 연결하여 구성하였다.

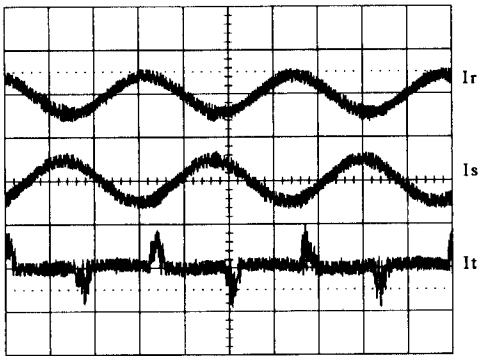
표 2. 3상 공진형 직류 링크 인버터의 회로 파라미터

Table 2. Circuit parameters of three phase RDCLI.

Resonant capacitor Cr	1 μ F	Output frequency	60Hz
Resonant Inductor Lr	14 μ H	Resonant frequency	40kHz
Input Voltage Vs	200-270V	Output voltage (Line-Line Voltage)	208V
Filter Inductor L	150 μ H	Filter capacitor Co	200 μ F



(a)



(b)

그림 7. 여러가지 부하에서의 출력 상전압과 상전류(3상) (a) 3상 인버터의 출력 상전압, (b) 3상 인버터의 출력 상전류

Fig. 7. Output phase voltage and current waveforms at the various load (three phase): (a) Output phase voltage for three phase inverter, (b) Output current for three phase inverter

그림 8은 100% 부하와 입력 최소전압과 최대전압

간의 급변시 출력전압 변동을 특성 (1% 이하)을 보여주고 있으며, 그림 9는 시험 인버터(단상, 3상)의 출력파형 왜형을 특성 (THD 3% 이하)을 보여준다. 그림 10은 인버터의 공진전압과 공진 인덕터의 파형을 보여주고 있으며, 그림 11은 비선형 부하에서도 균일하게 제어되는 공진전압 파형을 보여준다. 각 파형들에서 알 수 있듯이 제시한 시스템이 여러가지 부하에 대해 우수한 특성과 낮은 왜형율을 가짐을 알 수 있다.

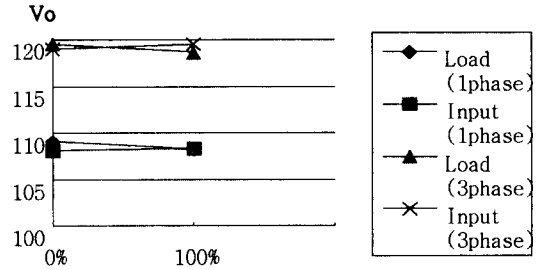


그림 8. 100% 부하와 입력 전압의 급변 시의 출력 전압 변동

Fig. 8. Output variation at the step change of 100% load and input voltage.

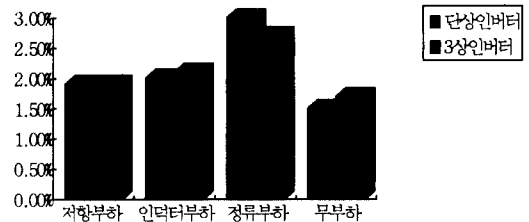


그림 9. 출력전압의 왜형률

Fig. 9. Harmonic distortion of output voltage.

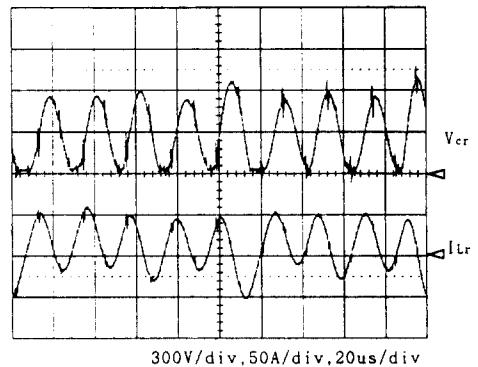


그림 10. 공진전압과 공진 인덕터 전류 파형

Fig. 10. Waveform of resonant voltage and resonant inductor current.

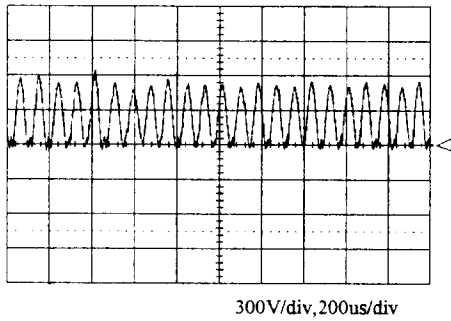


그림 11. 비선형 부하에서의 공진전압 파형(3상 인버터)

Fig. 11. Resonant voltage waveform with non-linear loads (three phase).

V. 결론

공진형 직류 링크 인버터를 UPS에 적용하기 위한 우수한 특성을 갖는 제어기가 제시되었다. 제시된 제어기의 유용성을 검증하기 위해 단상과 3 상에 대한 5kVA의 실험 장치가 각각 제작, 시험 되었다. 내부 전류 제어 루프와 피드 포워드 루프들을 갖는 제어기는 비선형 부하에 대해서도 우수한 특성을 나타내었으며 공진전압 제어기에 의해 부가적인 클램프 회로없이 공진전압을 제어함으로써 보다 간단한 시스템의 구현, 낮은 시스템 가격, 고효율의 장점을 얻을 수 있었다.

따라서 제시된 제어기를 사용한 공진형 직류 링크 인버터는 UPS 응용분야에 매우 효과적으로 응용될 수 있으리라고 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] D. M. Divan, "The Resonant DC link Converter - A New Concept in Static Power Conversion", IEEE-IAS Conference Record, 1986, pp. 648-656.
- [2] D. M. Divan, T. M. Jahns, "Discrete Pulse Modulation Strategies for High-Frequency Inverter Systems", IEEE/PESC, pp. 1013-1020, 1989.
- [3] R. C. Castanheira, B. J. Cardoso, B. R. Menezes, P. D. Garcia, A. F. Moreira, "A Control Technique to Eliminate Irregular Current and Voltage Pulses in Resonant DC Link Power Converters", IEEE/PESC, pp 671-676, 1994.
- [4] V. V. Deshpande, S. R. Doradla, A Current Prediction Scheme for the PRDCL Inverter-fed Induction Motor Drive, IEEE/PESC, pp 1151-1157, 1995.

저 자 소 개



俞東旭(正會員)

1959년 11월 3일생. 1983년 2월 성균관대학교 전기공학과 졸업(공학사). 1985년 8월 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1994년 8월 성균관대학교 대학원 전기공학과 박사과정 수료.

1983년 1월 ~ 1985년 8월 한국과학기술연구원 전기제어연구실 근무. 1985년 11월 ~ 현재 한국전기연구원 전력전자연구부 전력변환연구팀 선임연구원. 주 관심분야는 Resonant Inverter 응용, High-Frequency High-Voltage Converter, Soft-Switching Tech. 응용, Ultra-Fast Charger for 2nd Battery

元忠淵(正會員) 第 33卷 B編 第4號 參照

현재 성균관대학교 전기공학과 부교수