

심플한 단상 에어컨의 역률개선회로에 관한 연구

(A Study on Simple Single phase Air-conditioner of Power Factor Correction Circuit)

문상필** · 서기영* · 이현우* · 김영문*** · 김영철****

(Sang-Pil Mun · Ki-Young Suh · Hyun-Woo Lee · Young-Mun Kim · Young-Cheal Kim)

요 약

본 논문은 심플한 단상 에어컨의 역률 개선회로에 대해 설명한다. 정류기에 역률제어회로를 적용함에 의해서 전원선으로의 고조파 삽입을 줄일 수 있고, 효율을 향상시킬 수 있으며, 기존의 인버터와 비교해서 전체 시스템 가격을 낮출 수 있다. 또한 역률제어회로의 출력전압을 안정화함에 의해서 시스템 성능을 향상시킨다. 다이오드 정류기의 전류 파형을 향상시키기 위해 전압 다이오드 정류기에 대한 새로운 원리를 제안한다. 제안한 회로의 설계방법은 시뮬레이션과 실험에 의해 확인하였다. 그리고 기존의 펄스폭변조 인버터와 반펄스폭변조 인버터를 비교하였으며, 제안된 HPWM 인버터에 의해서 낮은 스위칭 손실과 오버슈팅을 제어할 수 있다.

Abstract

This paper describes the simple single phase air-conditioner of power factor correction (PFC) circuit. By adopting PFC in the rectifier, we can reduce harmonic into power line, improve the efficiency and lower the total system cost compared to conventional inverter only. Also, system performance is improved by stabilizing the output voltage of PFC. To improve the current waveform of diode rectifiers, we propose a new operating principle for the voltage diode rectifiers. A circuit design method is shown by experimentation and confirmed simulation. It explained that compared conventional pulse-width modulated (PWM) inverter with half pulse-width modulated (HPWM) inverter. Proposed HPWM inverter eliminated dead-time by lowering switching loss and holding over-shooting.

1. 서 론

우리나라에서는 90년대 중반부터 비로소 인버터 에어컨을 생산하고 있으나 비싼 가격 때문에 아직까지는 폭넓게 확산되고 있지는 못하는 실정이다. 예나

지 절약을 위해서 적용했던 인버터 방식에서는 주로 정류부 다음에 큰 전해 캐패시터를 사용하고 있기 때문에 인입선에 펄스성 전류가 흐르게 된다. 이러한 전류 때문에 역률이 낮아지고 고조파전류가 많아져서 송전 효율이 낮아지고 가정에서는 에어컨 사용시 실효 전력의 부족으로 누전 차단기가 떨어지는 현상들이 발생한다[1~6]. 이러한 문제점들을 개선하기 위해서 본 연구에서는 중용량 정류회로인 인버터 에어컨용 직류전원에 새로운 방식을 제안하여 효율이

* 정회원 : 경남대학교 전기공학과 교수

** 정회원 : 경남대학교 전기공학과 박사수료

*** 정회원 : 마산대학 전기과 교수

**** 정회원 : LG산전(주)

접수일자 : 2001년 2월 16일

심플한 단상 에어컨의 역률개선회로에 관한 연구

나 경제성 및 전자 노이즈 등의 문제점들을 해결하고자 한다. 또한 인버터 에어컨의 전부하 범위에서 역률을 높이고 총고조파 왜곡률(THD; Total Harmonic Distortion)을 낮추기 위해서 스위칭 소자를 일정주파수로 제어하면서 전류특성이 우수한 평균전류제어기법을 사용한 Boost방식의 DC-DC 컨버터를 적용하여 역률 및 THD를 저감시키고자 한다. 역률개선회로를 설계함에 있어서 가장 중요한 부품 선택에 기준이 되는 것은 인덕터 및 스위칭 주파수의 선정이다. 먼저 Boost 컨버터에 있어서는 인덕턴스의 값이 크고 스위칭주파수가 높을수록 입력전류의 리플성분이 감소하게되어 THD를 저감시킬 수 있으며, 1에 가까운 역률을 달성하고자 한다. 그리고 스위칭 주파수의 선정은 사용할 인덕터의 코어 및 스위칭소자의 스위칭 특성을 잘 고려하여 결정하여야 하며, 만일 순시전압이 아주 낮은 경우에는 스위칭소자의 스위칭주파수는 낮아지고 인덕터의 인덕턴스의 값이 작아져 전류(commutation)의 왜곡이 아주 심하게되어 고조파의 성분이 증가하는 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하고자 본 논문에서는 부분공진 스위칭 컨버터에서 출력되는 DC 전원측에 변조된 신호를 이용한 단상용 인버터를 구성하여 기존의 PWM인버터의 출력 파형에서 발생하는 여러 가지 문제점들을 제거하여 고조파성분을 상쇄시키고 스위칭 손실의 최소화를 기하고, 오버슈팅의 방지로 데트라이프를 생기지 않는 전력변환장치를 제안하고자 한다. 이 모든 사항은 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 타당성을 입증하고자 한다.

2. 회로구성 및 동작원리

2.1 단상정류회로

그림 1과 2는 일반적인 에어컨의 전원부 회로와 입력전압, 전류의 파형을 나타낸 것이다.

그림 3은 제안한 단상 정류 회로를 나타낸 것이다 [10~11]. 그림 3의 회로 구성은 기존의 배전압형과 유사하지만 C_1, C_2 를 소용량으로 하였으며, 교류측에 리액터 L 를 삽입하여 그림 4와 같이 콘덴서 C_1 및 C_2 의 전압 V_{C1}, V_{C2} 가 전원의 반사이클간에 0[V]와 부하전압 V_d 사이에서 충방전하는 것이 기존의 배

전압정류회로와 동작이 다르다. 전원 반사이클의 전반에 걸쳐 입력전류의 위상은 L 과 C_1, C_2 의 공진으로 실현하고, 도통구간의 확대는 리액터 L 에 축적된 에너지를 이용하는 것이다.

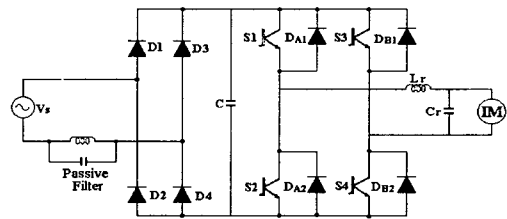


그림 1. 일반적인 에어컨의 전원부 회로
Fig. 1. Source part circuit of generally air-conditioner

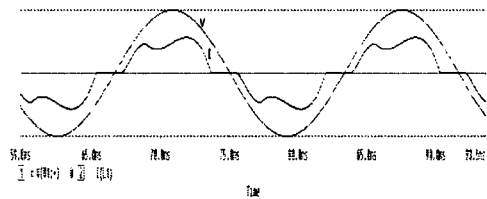


그림 2. 기존의 단상 정류회로의 입력전압·전류파형
Fig. 2. Conventional voltage·current waveform of single phase rectifier circuit

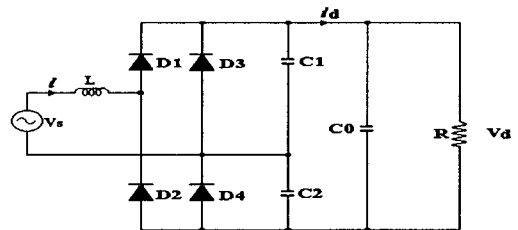


그림 3. 제안한 단상 정류회로
Fig. 3. Proposed single phase rectifier circuit

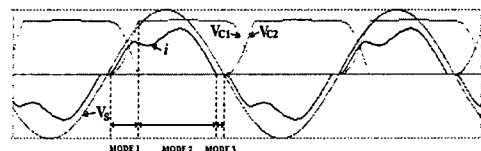


그림 4. 제안한 단상 정류회로의 입력전압·전류의 파형
Fig. 4. Proposed single phase rectifier circuit of voltage and current waveform

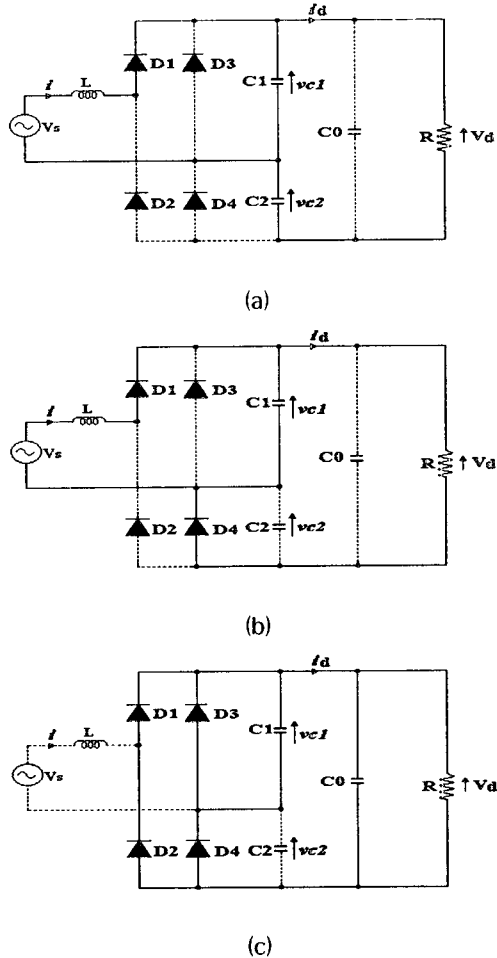


그림 5. 제안회로의 동작모드

- (a) 모드 1
- (b) 모드 2
- (c) 모드 3

Fig. 5. Operating modes of proposed circuit

- (a) mode 1
- (b) mode 2
- (c) mode 3

그림 4에 나타낸 것과 같이 C_1, C_2 가 전원의 부(-)반 사이클간에 $V_{C1}=0, V_{C2}=V_d$ 에 충전되어 있다고 가정하면 전원의 정(+) 반사이클의 동작은 그림 5(a)~(c)에 나타낸 바와 같이 3가지 모드로 분류할 수 있다.

먼저 모드 1은 전원이 정(+)으로된 상태에서 C_1 의 충전회로 ($V_s-L-D_1-C_1-V_s$)와 C_1 의 방전전

류회로 ($V_s-L-D_1-R-C_2-V_s$)가 형성되는 모드이다. 이때 입력전류 i 는 상승한다. 모드 2에서 전류 i 는 감소하지만, 모드 1에서 L 에 축적된 에너지가 연속적으로 흐르고 그 후 전원전압 V_s 가 부하전압 V_d 에 의해 높게되어 전류 i 는 다시 증가하는 모드이다. 이때 전원전압 V_s 가 부하전압 V_d 에 의해 낮아지면 전류 i 는 다시 감소하게 된다. 그리고 L 에 축적된 에너지가 방전되면 모드 3으로 전환된다. 모드 3은 부하와 전원이 분리되는 모드로써 부하에는 평활콘덴서 C_0 와 C_1 에 의한 전력이 공급된다. 모드 2와 모드 3에 의해서 D_4 가 도통하고 있는 구간에서는 $V_{C1}=V_d, V_{C2}=0$ 이 된다

2.2 HPWM 인버터

그림 6은 스위치 $S_1 \sim S_4$ 로 이루어진 일반적인 단상 브리지 회로로 양쪽의 스위치가 각각 서로 다른 시간에 동작을 한다. 즉 스위치 S_1, S_2 가 입력신호의 정의 반주기 동안 스위칭 동작을 하며 부의 반주기 스위치 S_3, S_4 는 휴지하는 기간을 가지게 된다.

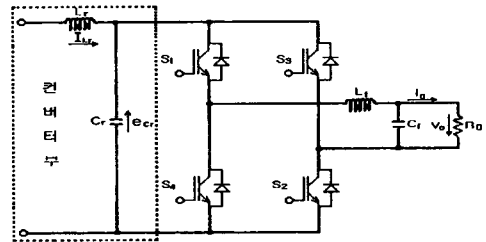


그림 6. 제안한 단상 인버터의 주 회로도

Fig. 6. Main circuit of proposed single phase inverter

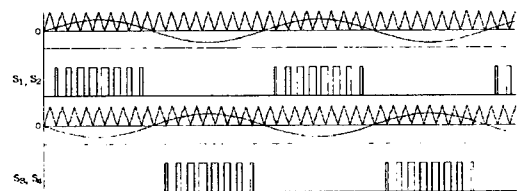


그림 7. 제어신호의 파형

Fig. 7. Waveform of control signal

심플한 단상 에어컨의 역률개선회로에 관한 연구

그림 7은 인버터부의 제어신호를 나타낸 것이다. 그림 8은 불연속모드를 설명하기 위한 이상적인 경우를 그림으로 나타낸 것이며, 실제에 있어서는 주스 위치의 오프 이후 C_r 의 영향에 의해 L_r 이 0이 되기까지는 약간의 시간지연이 발생한다.

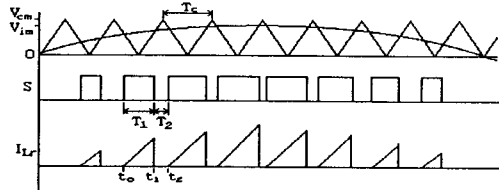


그림 8. 반주기에 대한 동작 파형
Fig. 8. Operation waveform for half period

그림 8에 제어신호와 전류파형 I_{Lr} 를 나타내고, 인버터의 PWM 제어신호는 정현파 입력신호 $v_i = V_{im} \sin \omega_i t$ 와 삼각파 캐리어신호 $v_c = V_{cm} \cdot t_r(\omega_c t)$ 을 비교하여 얻는다. 삼각파 캐리어신호 주기 T_c , 스위칭 온기간 T_1 , 오프기간 T_2 에 대한 상태는 다음 식으로 정리된다.

$$T_1 = t_1 - t_0 = T_c a \sin \omega_i t_0 \quad (1)$$

$$T_2 = T_c - T_1 = T_c (1 - a \sin \omega_i t_0) \quad (2)$$

여기서, $\omega_i = 2\pi f_i$, a 는 변조율로 $a = V_{im}/V_{cm}$ 로 정의된다.

전류 I_{Lr} 은 다음과 같다.

$$I_{Lr} = \frac{e_{c_r}}{L} t \quad (3)$$

전류 I_{Lr} 의 피크치 $I_{Lr}(t_1) \equiv I_{LP}$ 는 식(1), (3)으로부터 다음과 같이 된다.

$$I_{LP} = \frac{aT_c}{L_r} e_{c_r} \sin \omega_i t_0 \quad (4)$$

전류 I_{Lr} 는 펄스 폭과 진폭이 ω_i 와 ω_c 의 변조에 의한 것으로, $\omega_i t$ 와 $\omega_c t$ 의 함수로 표현되며 이를 2

중 푸리에 급수로 전개하면 다음 식을 얻는다.

$$I_{Lr}(\omega_c t, \omega_i t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} K_{mn} e^{j(m\omega_c + n\omega_i)t} \quad (5)$$

여기서,

$$K_{mn} = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^\pi \int_0^{\theta_1} I_{Lr} e^{-j(m\theta + n\varphi)} d\theta d\varphi \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \omega_c T_1 = 2\pi a \sin \varphi \\ \theta &= \omega_c t, \quad \varphi = \omega_i t \\ m, n &= 0, 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \right\}$$

식 (6)으로부터 I_{Lr} 의 직류성분 K_{00} , 입력신호 주파수 f_i 의 고조파성분 K_{0n} , 캐리어주파수 f_c 의 고조파성분 $K_{mn} (m \geq 1)$ 등에서 식 (1), (4), (6)으로부터 직류성분 K_{00} 를 구하면 다음과 같다.

$$K_{00} = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^\pi \int_0^{2\pi a \sin \varphi} \frac{E_{c_r}}{\omega_c L_r} \theta d\theta d\varphi \quad (7)$$

$$= \frac{a^2}{4f_c L_r} E_{c_r}$$

$$K_{0n} = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^\pi \int_0^{2\pi a \sin \varphi} \frac{E_{c_r}}{\omega_c L_r} \theta e^{-jn\varphi} d\theta d\varphi \quad (8)$$

$$= -\frac{a^2}{8f_c L_r} E_{c_r} \quad (n=2)$$

3. 시뮬레이션 결과 및 검토

제안된 단상 전력변환장치의 제어 스위치는 가변 저항 스위치로 가정하고 그 외 소자는 이상적인 소자로 하여 PSpice에 의한 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션에 사용된 회로 정수들은 표 1에 나타내었다.

표 1. 시뮬레이션 회로의 정수
Table 1. Parameters of simulated circuit

입력교류전압 V_s	220 [V], 60 [Hz]		
리액터 L	2.5[mH]	3.0[mH]	5.0[mH]
콘덴서 $C_r(=C_{r1}, C_{r2})$	88[μ F]	73[μ F]	78[μ F]
삼각파 캐리어 신호 f_c	2160[Hz]		
변조도 M	0.9		
출력측 필터리액터 L_f	3[mH]		
출력측 필터콘덴서 C_f	10[uF]		
저항부하 R_0	100[Ω]		

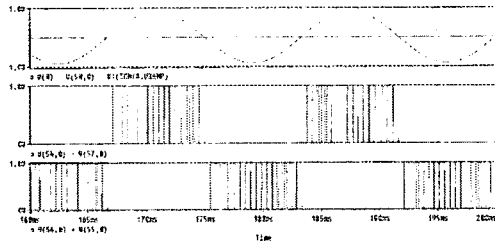


그림 9. 제안한 HPWM 인버터의 게이트 신호
Fig. 9. Gate signal of proposed HPWM inverter

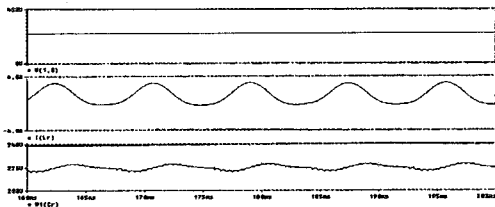


그림 10. 입력측의 전압, 전류 및 공진 Cr의 전압파형
Fig. 10. Waveform of input voltage, circuit and voltage of Cr

인버터의 스위칭 소자에 정현파 입력전압과 삼각파 캐리어 신호에 의해 만들어진 인버터의 게이트 신호를 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 그림 10은 입력측의 전압, 전류 및 공진 C_r 의 전압파형을 나타낸 것이다. 그림 11은 인버터의 스위칭 소자에 정현파 입력전압과 삼각파 캐리어 신호에 의해 만들어진 HPWM 파형을 인가할 경우의 인버터의 출력전압, 전류의 파형을 나타낸 것이다.

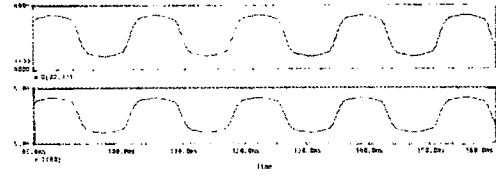
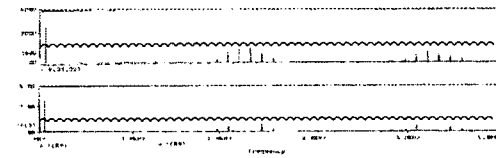
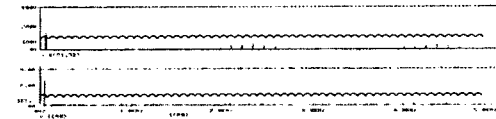


그림 11. 제안한 HPWM 인버터의 출력전압, 전류파형
Fig. 11. Output voltage, circuit waveform of proposed HPWM inverter



(I)



(II)

그림 12. 출력전압·전류의 주파수 스펙트럼
{ I } 기존의 PWM 인버터
{ II } 제안한 HPWM 인버터

Fig. 12. Frequency spectrum of output voltage and current
(I) PWM inverter of conventional
(II) HPWM inverter of proposed

그림 11에서 전류의 파형은 정현파에 가까운 반면 전압파형은 많이 일그러져 있는 이유는 순시출력전력에는 상용전원 주파수의 우수배 리플성분이 포함되어 있어 인버터의 출력전압이 왜곡된 파형으로 나타나며, 그림 11에서 저차고조파가 나타나지 않는 이유는 입력신호 주파수에 의한 저주파 리플성분에 대한 푸리에 해석을 통한 필터설계로 특정차수를 제거함으로써 가능하게 된다. 따라서 본 논문에서는 단상 인버터시스템에 발생하는 전원주파수 60[Hz]의 2배(우수배)주파수를 제거하기 위한 필터를 설계하므로써 그림 11에서와 같이 저차 고조파가 나타나지 않는 결과를 얻을 수 있다.

그림 12는 기존의 PWM방식(I)과 제안한 HPWM 방식(II)의 출력측 전압, 전류에 대한 주파수 스펙트럼을 나타내고 있다. 여기서 알 수 있듯이 맥동분을 제거하기 위하여 인버터 입력전류를 불연속으로 하

심플한 단상 에어컨의 역률개선회로에 관한 연구

여 입력신호 주파수의 저주파 리플성분과 캐리어 주파수에 대한 고주파 리플성분으로 분리하여 해석함으로써 인버터의 우수배 고주파 성분을 제거할 수 있으며, 인버터의 스위칭 동작을 정현파 한 주기 동안에 반주기만 PWM동작을 하도록 함으로써 인버터의 손실을 최소화 할 수 있었다.

4. 실험결과 및 검토

그림 13은 제안한 역률개선회로를 갖는 에어컨용 전력변환장치의 실험 회로도를 나타낸 것이다. 실험회로에 사용된 전원장치의 전압은 출력전압을 고려하여 설정하여야하므로 본 연구에서는 50[V]의 입력전압에 DC 110[V]의 출력전압으로 하였다. 또한 전력용 스위치는 IGBT 시리즈1MBH40-60 (VCE = 600[V], IC=40[A], Toff=640[ns], 20[kHz]기준)을 사용하고, 사용된 다이오드들은 정류형 다이오드를 사용하였다. 인덕터 L , L_r 는 Mn-Zn 페라이트 코어로 0.5[mm]공극으로

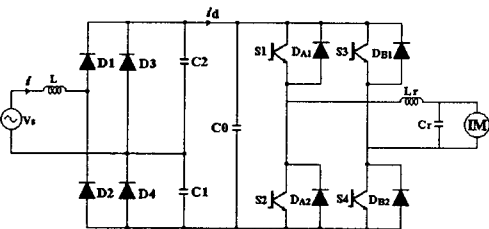


그림 13. 샘플한 단상 에어컨의 역률개선 회로의 실험 회로도
 Fig. 13. Experimental circuit diagram of simple single phase air-conditioner of power factor correction circuit

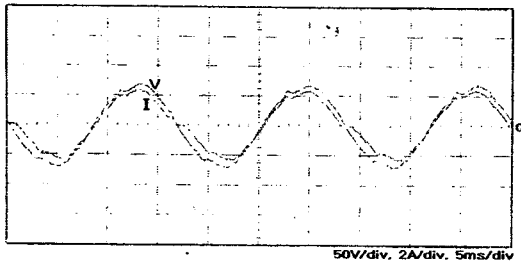


그림 14. 입력전압과 입력전류의 파형
 Fig. 14. Waveform of Input voltage and Input current

2.5[mH], 3[mH], 5[mH]으로 변화를 주어 구성하고, 콘덴서 C_1, C_2 는 전해콘덴서를 이용하여 88[μF], 73[μF], 78[μF]으로 변화를 주었다. 본 실험에서는 가장 적절한 인덕터와 콘덴서로 각각 3[mH]와 73[μF]를 선정하였다.

그림 14는 입력전압과 입력전류의 파형을 나타낸 것이다. 그림 14에서 알 수 있듯이 시뮬레이션의 결과와 같이 거의 단위 역률을 이루고 있다.

그림 15는 인버터 스위치에 인가되는 각각의 제어 신호를 나타낸 것이다. 그림 16은 입력 220[V], 출력 1.0[kW]급 인버터의 실험회로에 대한 파형을 나타낸 것이다. 그림 17은 필터를 설치했을 때의 출력전압전류의 파형을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 Low pass filter를 설치할 경우 출력전압전류는 정현파 성분을 띄고 있는 것을 알 수 있으며, 거의 단위 역률로 존재하는 것을 알 수 있다. 이상의 실험 파형들은 시뮬레이션 결과와 잘 일치된다.

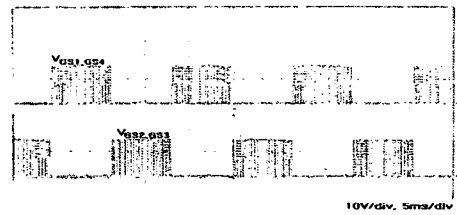


그림 15. 인버터 스위치 S1, S4와 S2, S3의 제어신호
 Fig. 15. Control signal of inverter switch S1, S4 and S2, S3

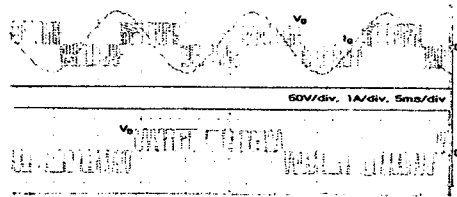


그림 16. 출력전압과 출력전류의 파형
 Fig. 16. Waveform of output voltage and output current

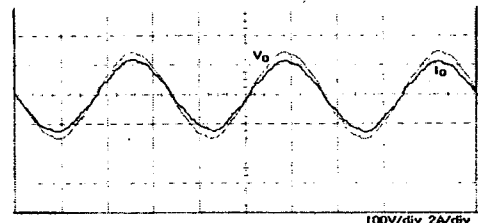


그림 17. 출력전압과 출력전류의 파형 (필터포함)
 Fig. 17. Waveform of output voltage and output current (Low pass filter)

5. 결 론

본 논문에서는 기존의 배전압 정류회로에 있어서 대용량 콘덴서를 소용량에 적용함과 동시에 교류측에 리액터를 삽입해서 공간적으로 콘덴서를 충방전시키는 것에 의해 다이오드 정류회로의 과형을 개선하였다. 그리고 제안한 정류회로는 수동소자만으로 구성되기 때문에 신뢰성과 경제성이 높고, 스위칭 동작을 이용하지 않기 때문에 전자노이즈등을 문제점이 발생하지 않는다.

본 논문에서는 회로정수의 변환에 따른 최적의 전압 전류 특성을 선정하여 시뮬레이션과 실험을 통해 최대 효율과 고역률을 얻을 수 있었다. 또한 일반적으로 직류측에서 발생하는 맥동주파수에 의한 교류 출력전력의 왜형과 발생을 제거하기 위하여 인버터 스위칭 동작을 정현파 주파수에 대하여 정의 반주기 동안 HPWM 동작을 하도록 각각의 스위치에 신호를 입력하고 인버터 입력전류가 불연속이 되도록 함으로써 맥동율을 현저히 감소할 수 있었다. 또한, 정현파 부의 반주기는 휴지시간으로 됨으로서 스위칭 손실을 기존의 한 주기 스위칭 동작때보다 반으로 줄일 수 있었다. 그리고 제안한 시스템은 인버터 에어컨을 전부하영역에서 1에 가까운 역률과 THD를 저감할 수 있으며, 부하변동에 관계없이 고정된 출력전압을 보장하여 인버터부의 신뢰성 향상에도 기여했으며, 회로구성의 간소화 및 전자파 장애(EMI; Electro Magnetic Interference)가 저감될 수 있는 잇점이 있다.

본 연구는 2000년도 경남대학교 부설 신소재연구
구조 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] T. Kawabata, T. Miyasita & Y. Yamamoto "Dead beat Control of Three Phase PWM Inverter" IEEE. Trans. Power Elect, 5 no. 1, 1990.
- [2] P.N. Enjeti, P.D. Ziogas, and J.F. Lindsay. "Programmed PWM techniques to eliminate harmonics a critical evaluation" IEEE Trans. Ind. Applicat. vol. 26. Mar /Apr. 1990.
- [3] B. Alizadeh, "EM & Thermal Consideration In Off-line Boost Converter-based Power Factor Controllers" Power

- Conversion June 1991 Proc. pp.149~156.
- [4] J.C Salmon, "Performance of A Single Phase PWM Boost Rectifier Using Hysteresis Current Control," EPE'91 Proc. pp.4-384~4-389.
- [5] J. Holtz. "Pulsewidth Modulation-A Survey", IEEE - PESC Conf. Rec., pp.11~18, 1992.
- [6] Fujiwara and Nomura: "A Power Factor Correction for Single-phase Diode Rectifiers without Employing PWM Strategy", IPEC-Yokohama, pp.1501- 1506, 1995.
- [7] 野村 : 「單相ダイオード整流回路の高調波電流低減法」, 電氣學會半導體電力變換研究會資料, SPC-96-3, 1996.
- [8] Bimal K. Bose, "Power Electronics and Variable Frequency Drives", IEEE Press, 1996.
- [9] K. Fujiwara and H. Nomura: "Improvement of Current Waveform for 200V Input Single-phase Rectifier Using Modified Voltage-doubler Circuit", Proceedings of Power Conversion Conference- NAQOACKA, pp. 897~900, 1997.
- [10] 문상필, 서기영, 이현우, 김영문. "220(V) 단상 에어컨용 전력변환장치에 관한 연구", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.1-2~1-3, 1999.
- [11] 문상필, 서기영, 이현우, 김영문, 고태연. "에어컨용 부분공진 스위칭 컨버터의 역률개선", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.2662~2664, 1999.
- [12] Philip C. Todd, "UC3854 Controlled Power Factor Correction Circuit Design", Unitorde Application Note U-134, pp.10-303~10-322.

◇ 저자소개 ◇

문 상 필 (文相弼)

1997년 부경대 전기공학과 졸업. 1999년 경남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현 동 대학원 전기공학과 박사 수료.

서 기 영 (徐基永)

1965년 한양대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현 경남대 전기전자공학부 교수.

이 현 우 (李鉉雨)

1979년 동아대 전기공학과 졸업. 1984년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동아대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현 경남대 전기전자공학부 교수.

김 영 문 (金永文)

1982년 경남대 전기공학과 졸업. 1985년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 경남대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현 마산대학 전기과 부교수.

김 영 철 (金永喆)

1991년 동아대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 경남대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현 LG산전(주) 근무.