

중성점을 가진 단상 PWM 정류기에 관한 연구

최연옥*, 김평호**, 한엄용***, 이진섭***, 조금배*

* 조선대학교 전기·제어계측 공학부, ** 서강정보 대학, *** 첨단시스템

A Study on the Single-Phase PWM Rectifier with Neutral Leg

* Choi Youn-Ok, ** Kim Pyoung-Ho, *** Han Eu-m-Young, Lee Jin-Seob. * Cho Geum-Bae,
*Chosun University, **Seokang Information College, ***Chumdan System

Abstract

A single-phase PWM current source rectifier with a neutral leg is presented and thoroughly analyzed in this paper. This novel topology is implemented by adding an extra leg a step-down single phase PWM space vector modulation method to reduce the dc output voltage harmonics is proposed. The PWM pattern generation need a digital system. As compared with a conventional single-phase PWM rectifier, over 20% improvement of the total harmonics distortion in the output voltage can be obtained. Different SVM techniques are analyzed for this PWM rectifier and simulation result are presented.

스위치의 효율적인 조합에 의하여 스위치를 선택함으로써 개선되어질 수 있다. 또한 PWM 정류기와 인버터의 성능을 개선하기 위한 하나의 방법은 스위칭 상태를 증가시키는 전력회로에 Extra leg를 추가함으로써 해결 할 수 있다. 전압원 인버터의 경우에 용량을 조절하는 입력전압 불균형이 개선되었고 전압원 정류기의 경우에는 출력 리플과 필터의 감소를 가져오게 되었다.

앞에서 서술한 문제를 최소화하기 위해서 본 논문에서는 중성점을 가진 단상 PWM 전류원 정류기를 제안하여 DC 고조파를 감소하고 출력단에서 액티브 필터로 사용되는 부피가 큰 콘덴서를 제거할 수 있고 제안된 회로에 공간벡터 변조방식을 적용함으로써 전력 스위치의 스위칭을 최소화 할 수 있음을 시뮬레이션 결과를 통하여 검증하고자 한다.

I. 서론

일반적으로 AC를 DC로 변환하는 컨버터에서 정류회로는 콘덴서 입력형 정류회로가 많이 사용되고 있으나 이러한 회로에서 입력전류는 입력 전압의 피크 부분에서 흐르는 펄스형으로 되어 입력 역률이 낮으며 많은 고조파 성분이 포함되어 전류로서 전원계통에 나쁜 영향을 주게 된다. 따라서 지난 10년간 단상 및 삼상 PWM 정류기와 인버터에 관한 연구가 진행되어 여러 가지 방법이 제시되어져 왔다. 최근에는 공간벡터 변조방식 및 4극 PWM 정류기방식이 개발되었으며 이러한 정류기의 장점은 출력전압의 DC 왜곡 리플을 크게 감소시키므로 DC 출력 리액터를 최소화할 수 있게 되었다. 특히 공간 벡터 변조 방식은

II. 회로 설계

제안된 PWM 정류기에 대한 전력회로는 그림 1과 같이 나타내었다. 그림 1과 같이 Neutral leg에 의해 입력 필터의 각각 커패시터의 중간 전압 레벨은 출력 전압 합성이 되며 중성점에 연결된 스위치들은 출력 전압 왜곡을 감소하는 전환 순서를 찾기 위해 부가적으로 새로운 스위치 상태를 필요로 한다. 이 정류기의 온/오프 스위치들의 위치 전환은 기존의 브리지형식과 비슷하다. 본 논문에서 제안한 스위치의 상태는 표 1과 같이 9가지 모드로 구성되어 있다. 표 1은 스위치의 상태, 입력 전류와 출력전압을 나타내고 기존 단상 정류기의 스위칭 상태는 1, 3, 0, 0가 있다.

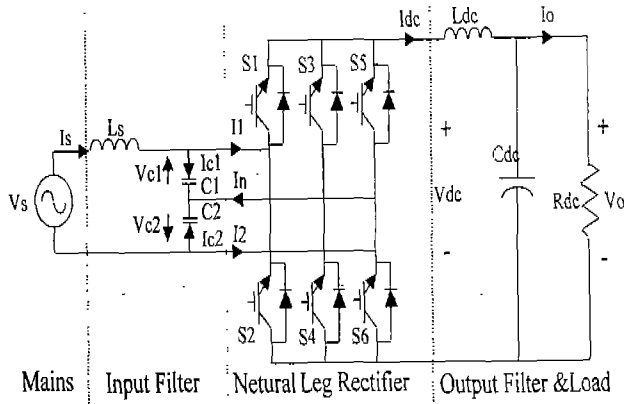


Fig. 1 Power circuit of the Single-Phase Current Source Rectifier with a Neutral Leg

Table1. Switching states CSR with Neutral Leg

State	On Switches	I_1/I_d	I_2/I_d	I_n/I_d	V_{dc}
1	s1, s4	1	-1	0	$V_{c1}-V_{c2}$
2	s1, s6	1	0	-1	V_{c1}
3	s3, s2	-1	1	0	$-V_{c1}+V_{c2}$
4	s3, s6	0	1	-1	V_{c2}
5	s5, s2	-1	0	1	$-V_{c1}$
6	s5, s4	0	-1	1	$-V_{c2}$
O_I	s1, s2	0	0	0	0
O_{II}	s3, s4	0	0	0	0
O_{III}	s5, s6	0	0	0	0

III. PWM 패턴 발생

PWM 방식은 전류원 컨버터에 단상 공간벡터 변조의 원리를 적용 하였으며 입력 전류 기준의 불연속 접근은 미리 정해진 스위칭 주기를 가진 스위칭 상태의 세트에 의해 이루어진다. 따라서 정상 입력 기준 전류의 샘플 상수 k 는 다음 식과 같이 일반화 될 수 있다.

$$I_1 \frac{T_1}{T_s} + I_2 \frac{T_2}{T_s} = I_{ref_{ac}}(k) m \quad (1)$$

$$T_1 + T_2 = T_s \quad (2)$$

여기서 I_i : 스위칭 상태, $i=1,2$

T_i : 조건 시간

T_s : 스위칭 주파수

$I_{ref_{ac}}(k)$: 샘플된 기준 입력전류

m : 변조지수 ($m < 1$)

식(1)과 식(2)를 풀면 결과적으로 T_1 과 T_2 의 온 시간은 그림2에 정의된 순서로 정해진다. 그림 2는 단상 공간 벡터 변조방식의 순서도를 도식화 하여 나타내었다. 이러한 방식은 다음과 같은 장점을 가지고 있다. 1) PWM 컨버터의 제어는 DSP로 구현하기에 적합하며 2) 출력전압 왜곡과 스위칭 주파수를 최소화 할 수 있다.

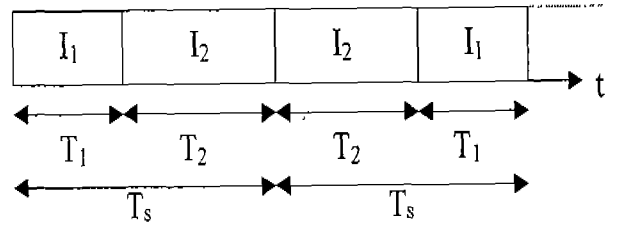


Fig. 2. Sequence application for single-phase SVM

A. 기존의 PWM 브릿지 정류기

기존의 브리지는 그림 1에서 스위치 s1과 s2가 동작하므로 식(1)과 식(2)를 적용하면 표 1로부터 스위칭 순서를 발생하기 위한 상태 1, 3, O_I, O_{II} 가 선택되어진다. 그림 3에 나타내어진 AC 파형은 유니폴라와 바이폴라 변조 방식에 등가 공간벡터 변조방식을 적용함으로써 얻어질 수 있다. 바이폴라 변조일 경우 상태 1과 상태 3(표1에서)은 식(1)과 식(2)를 풀기 위해 고려할 수 있다. 이 때 스위치의 각 시간과 같은 공식에 의해 얻어질 수 있다.

$$T_1 = [1 + m I_{ref_{ac}}(k)] \frac{T_s}{2} \quad (3)$$

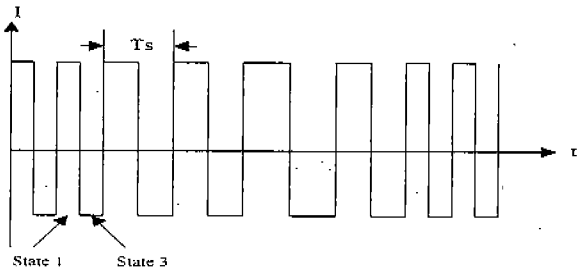
$$T_2 = T_s - T_1 \quad (4)$$

유니폴라 변조 패턴에 대하여 상태 1과 상태 O_I 은 양의 반주기동안 얻어질수 있고 상태 3과 상태 O_{II} 는 음의 반주기동안에 얻어질 수 있다.

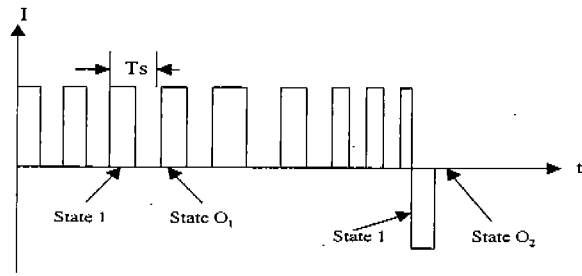
양, 음의 주기 양쪽 모두의 경우를 고려하면 각각의 시간은 다음 식으로 얻어진다.

$$T_1 = [m I_{ref_{ac}}(k)] T_s \quad (5)$$

$$T_2 = T_s - T_1 \quad (6)$$



a) Bipolar



(b) Unipolar

Fig. 3. Conventional single-phase rectifier input current PWM switching pattern

B. Neutral leg를 가진 PWM 정류기

제안한 정류기의 9개 모드 상태는 전력회로 제어의 스위치 순서의 발생에 의해 조합 할 수 있으며 몇가지 다른 PWM 제어 모드(CM)로 정의될 수 있다. 본 논문에서는 이들 중 3가지 모드를 제안하여 이를 검증하고자 하며 이러한 모드의 명은 CM1, CM2, CM3라 하였다. 제어모드 CM1은 공간벡터 변조 방식을 적용하여 정류기의 입력 전류파형의 바이폴라 변조방식으로 설계하였다. 이 방식은 상태 2와 상태 5의 조합을 사용하거나 상태 4와 상태 6을 사용하였다(표1에서 그림 4(a) 참조) 첫 번째 조합은 두 번째 조합이 AC입력 전류 I_2 로 사용될 동안 I_1 의 바이폴라 패턴 파형을 만들기 위해 사용된다. 식 (1)과 식(2)에 의해 스위치의 각 시간은 다음과 같이 정의된다.

$$T_1 = [1 + 2mI_{ref_{ac}}(k)] \frac{T_s}{2} \quad (7)$$

$$T_2 = T_s - T_1 \quad (8)$$

CM2제어 모드는 neutral leg의 스위치 출력전압의 반주기동안 시작과 끝의 기간 동안에만 동작하게 되며 중간에는 유니폴라 변조 패턴의 스위칭이 되도록

위 설계되어있다. 이러한 방식은 그림 4(b)에 보여진 것과 같이 상태 1과 상태 6, 상태 1과 상태 0_I에 의해 스위칭 된다. 각 시간에 대한 식은 다음과 같다.

$$T_1 = mI_{ref_{ac}}(k) T_s \quad (9)$$

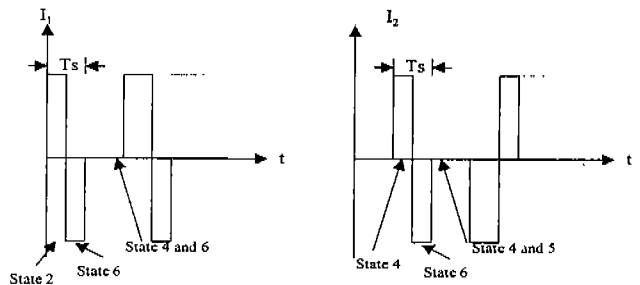
$$T_2 = T_s - T_1 \quad (10)$$

CM3제어 모드는 양의 반주기에서 상태 1과 상태 6, 상태 1과 상태 2에 의해 형성된 조합에 의해 결정되어진다. 또한 표1에서의 상태 3과 상태 4, 상태 3과 상태 5에 의해 실현 될 수 있다.

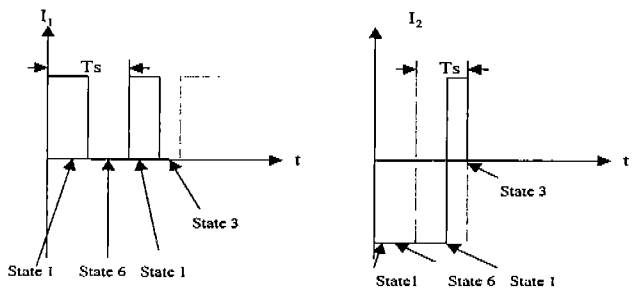
각 시간에 대한 식은 다음과 같이 나타난다.

$$T_1 = [2mI_{ref_{ac}}(k) - 1] T_s \quad (11)$$

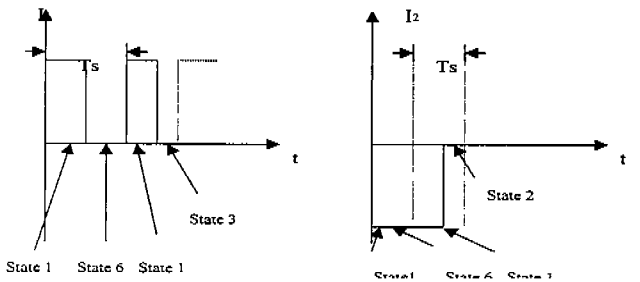
$$T_2 = T_s - T_1 \quad (12)$$



(a) CM1



(b) CM2



(c) CM3

Fig. 4. Neutral-legged rectifier control modes

IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

시뮬레이션은 표3에서 나타낸 것과 같은 입력 데이터를 사용하여 수행하였다. 그림5와 6은 바이폴라와 유니폴라 PWM 패턴으로 동작된 단상 브릿지 정류기에 대한 시뮬레이션 결과이다.

그림 7은 CM3제어모드에 의해 neutral leg 정류기의 시뮬레이션 결과이며 그림 8은 기존의 PWM 정류기와 제안된 PWM 정류기의 FFT 분석을 나타내었다.

Table 2. Simulation input data

파라미터		값
Vm	전압원 최대	1[V] =1p.u
f	전원 주파수	50[Hz] =1 p.u
fs	스위칭 주파수	4800[Hz] =96p.u
m	변조지수	1

표3은 기존과 제안된 정류기에 대한 출력전압과 입력정류기 전류의 THD의 비교표이다.

THD에 대한 식은 다음의 식을 사용하였다.

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_{dc_n})^2}}{V_{dc_0}} \cdot 100 \quad (13)$$

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (I_n)^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (14)$$

여기서 V_{dc_n} : dc 출력전압의 n차 고조파

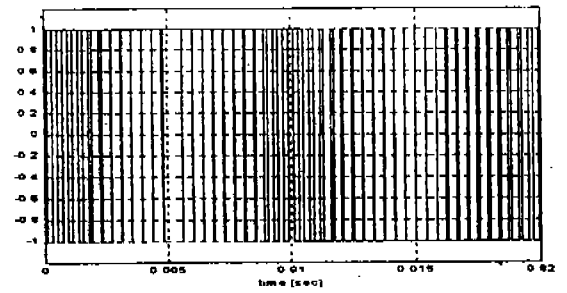
I_n : 정류기 입력전류의 n차 고조파

V_{DC_0} : m=1에 대한 DC 출력 전압

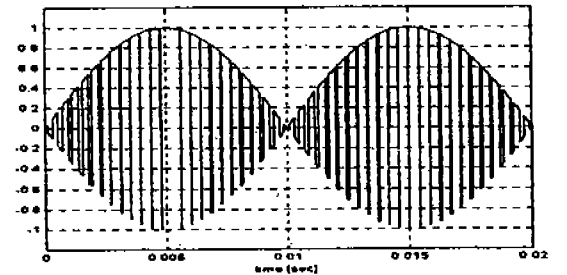
I_1 : 정류기 입력전류의 기본파

Table 3. Output voltage and Input current

정류기	THDV(%)	THDi(%)	ΔV_{max}
바이폴라	122.89	85.32	2V _{smax}
유니폴라	111.77	43.08	V _{smax}
CM1	125.90	61.54	2V _{smax}
CM2	101.48	43.08	V _{smax} /2
CM3	91.43	42.12	V _{smax} /2

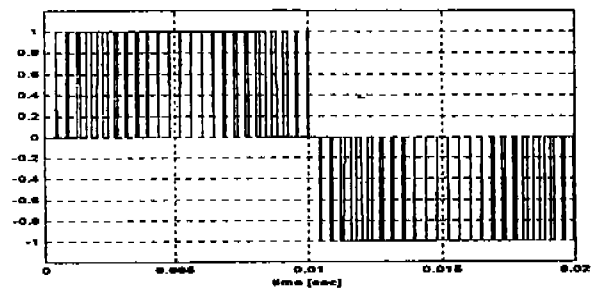


(a) Rectifier input current

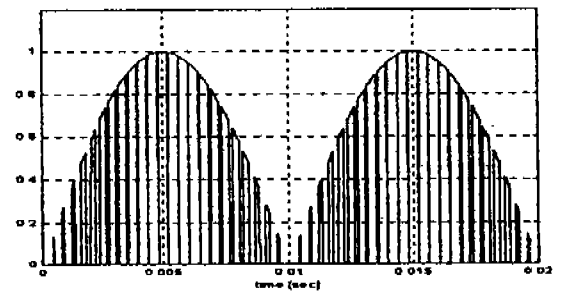


(b) Output voltage

Fig. 5 Bridge single-phase rectifier using Bipolar equivalent SVM

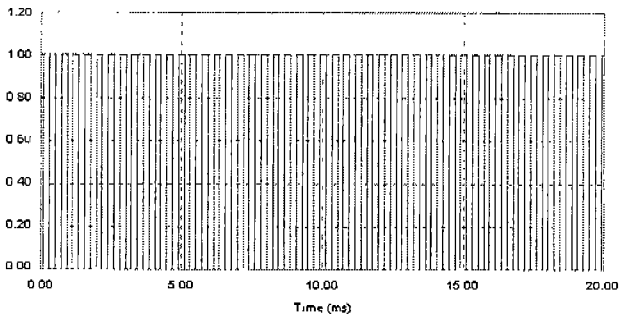


(a) Rectifier input current

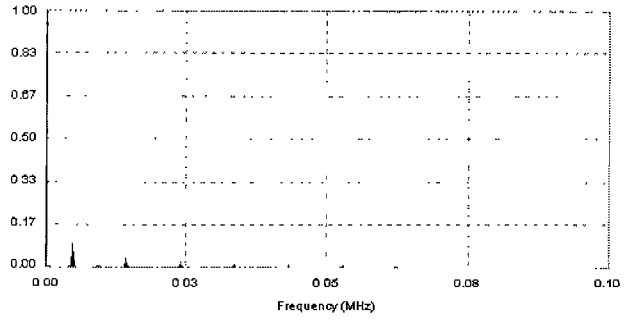


(b) Output voltage

Fig. 6 Bridge single-phase rectifier using Unipolar equivalent SVM



(a) Rectifier input current (I_i)



(b) FFT of Proposed PWM Rectifier

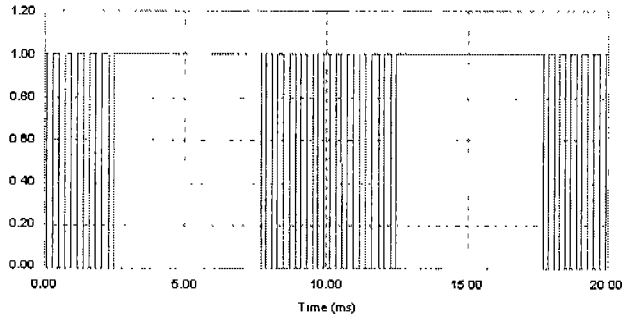
Fig. 8. FFT Analysis

V. 결 론

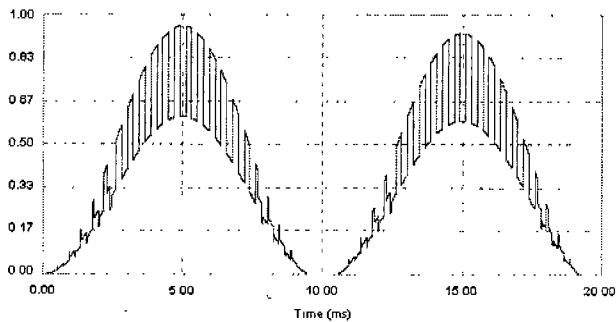
본 논문에서는 Neutral leg를 가진 단상 PWM정류기를 제안하였고 바이폴라와 유니폴라 PWM 스위칭 패턴은 공간벡터 변조 방식을 적용하여 스위칭 손실을 최소화 하였다. 또한 제어모드는 CM1, CM2, CM3로 나누어 기존의 단상 브릿지 정류기의 유니폴라와 바이폴라 PWM 패턴에 의한 출력전압의 THD를 비교하였다. 바이폴라 스위칭 패턴으로 동작하는 기존의 PWM 브리지 정류와 비교하여 CM2 모드는 전압 THD를 21% 그리고 CM3 모드는 30% 감소시켰다. 제안된 정류기의 제어모드 중에서 제어모드 CM3이 가장 우수하였고 유니폴라 전류 PWM 스위칭 패턴을 가지고 수행된 기존의 브릿지 정류기와 비교하여 DC 출력 전압의 왜곡은 20% 개선됨을 시뮬레이션 결과를 통하여 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] L. Salazer, F.Zapata and E. Wiechmann, "Analysis and Experimental Evaluation of Four-Pole PWM Rectifier", in Conf. Rec. PESC'97, pp. 484-490
- [2] T.Shimizu, T. Fujita, G. Kimura and J. Hirose, "A Unity power Factor PWM Rectifier with DC Ripple Compensation", IEEE Trans, Industrial Electron., vol. 44, no. 4, pp 447-455, August 1997
- [3] J. Espinoza and G. Joos, "Current Source Converter On-Line Pattern Switching Frequency Minimizatio," IEEE Trans, Industrial Electron., Vol 44, no. 2, pp. 447-455, August 1995
- [4] S. Nonaka and Y. Neba, "New GTO Current Source Inverter with Pulsewidth Modulation Control Techniques", IEEE Trans, Industry Application, vol. 22, no. 4, pp. 666-672. July/August 1986

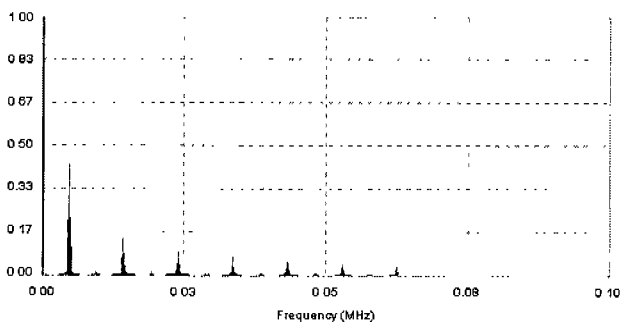


(b) Rectifier input current (I_n)



(c) Output voltage

Fig. 7 Single-phase rectifier with neutral leg CM3



(a) FFT of Conventional PWM Rectifier