

단위 역률을 갖는 3상 강압형 다이오드 정류기에서 고조파 주입에 의한 DC 리플전압 저감 기법

최주엽, 고종진, 송중호*, 최익*
 광운대학교, 한국과학기술연구원*

A DC Ripple Voltage Suppression Scheme by Harmonic Injection in Three Phase Buck Diode Rectifiers with Unity Power Factor

Ju-Yeop Choi, Jong-Jin Ko, Joong-Ho Song, Ick Choy
 Kwangwoon Univ., KIST*

ABSTRACT

A technique to suppress the low frequency ripple voltage of the DC output in three phase buck diode rectifiers is presented in this paper. The proposed pulse frequency modulation methods and duty ratio modulation methods are employed to regulate the output voltage of the buck diode rectifiers and guarantee zero-current-switching(ZCS) of the switch over the wide load range. The proposed control methods used in this paper provide generally good performance such as low THD of the input line current and unity power factor. In addition, control methods can be effectively used to suppress the low frequency ripple voltage appeared in the dc output voltage. The harmonic injection technique illustrates its validity and effectiveness through the simulations.

1. 서 론

최근 많은 응용분야에서 거의 정현적인 입력전류를 만들 어내는 AC/DC 정류기가 널리 사용되며 많은 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나, 역률개선 (Power Factor Correction) 기능을 갖는 경우 대부분이 승압형 컨버터 형태를 취하고 있다. 하지만, 일반적인 전기통신 전원 장치의 경우, 전체 시스템의 전압변환은 높은 입력전압에서 낮은 출력전압으로 강압하는 변압흐름을 가지고 있다. 또한 3상 전원에서 PFC를 이루기 위해 단일 스위치를 이용한 저가의 시스템에 많은 관심이 이루어지고 있다^{[1]-[3]}.

따라서, 본 논문에서는 3상 ZCS 강압형 정류기 회로^[1]를 이용하여 출력전압의 저주파 리플전압 감소를 이루는 제어회로에 관한 연구를 수행하였다. 본 논문에 사용된 회로는 전 부하에 대한 입력전류의 THD는 약 5% 미만이며, 또 스위치는 ZCS 조건하에서 동작이 이루어지므로, 시스템의 전체 효율은 상당히 높다^{[2]-[3]}. 그리고 다중 공진형 컨버터에 따른

이 시스템의 제어는 펄스 주파수 변조 기법이 사용되어 부하 가변에 대해 출력전압 조절과 역률제어를 이룰 수 있었다. 즉, 펄스 주파수 변조 기법은 특히 부하 변화에 대해 민감하게 대처하여 빠른 출력전압 조절이 가능하게 되는 장점을 가지고 있다^[4]. 하지만, 이런 출력전압은 입력전원에 따른 저주파 리플전압을 갖게 되고 이에 따른 리플전류가 발생하게 된다. 이런 리플전류는 출력측에 연결된 DC-Link 커패시터를 통하여 흐르게 된다. 이것은 커패시터 동작 온도를 상승시키며 커패시터의 전기적인 수명을 단축시키게 되는 문제점을 가지고 있다. 뿐만 아니라, 이런 저주파 리플전압은 전압 제어기에 피드백 되고 입력전류의 파형 왜곡을 유발하게 된다. 따라서, 이런 문제점을 해결하기 위해서는 상대적으로 전기적인 커패시터의 용량을 증가시키거나 또는 출력 저주파 LC 필터의 크기를 증가시켜야만 된다. 이것은 시스템의 비용상승과 전체 크기를 증가시키게 하는 단점을 지니고 있다.

따라서, 본 논문에서는 출력전압의 저주파 리플전압 저감을 이룰 수 있는 여러 제어기법들을 제시하고자 한다. 기존에 제안한 출력전압을 필터링하여 리플성분을 고려하여 주파수를 가변하는 제어기법^[4]과 승압형 컨버터에서 많이 쓰이는 고조파 주입에 의한 듀티비 변조로 저조파리플을 감소시키는 방법^{[5]-[6]}에 대하여 알아본다. 그리고 고조파 주입에 의한 듀티변조에 대하여는 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

2. 동작원리

2.1 회로설명

그림 1은 단일 스위치 3상 강압형 정류기의 기본 회로도이다. 이 회로에서 인덕터 L_r 과 커패시터 $C_{1,2,3}$ 그리고 커패시터 C_n 는 공진회로를 형성한다. 그리고 입력 리액터 L_{abc} 는 입력전류의 고조파 필터링 및 돌입전류 제한 등의 역할을 하고 있으며, 스위치는 공진회로의 동작에 의해 영전류 스위칭을 이루게되고 다이오드는 영전압 스위칭 조건으로 동작한다. 동작모드는 스위치 동작에 따라 8개의 동작모드로 구분되어진다.

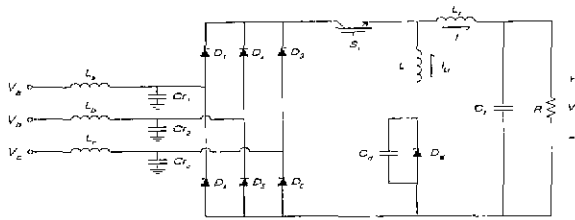


그림 1 단일 스위치 강압형 다이오드 정류기의 회로도
Fig. 1. Basic circuit of the single-switch three-phase buck diode rectifier

3. 출력 리플 전압억제를 위한 제어방법

3.1 일반적인 제어방법의 종류

출력전압의 리플전압을 감소시키기 위한 방법으로 일정 주파수에서 듀티비를 제어하거나 일정 듀티비에서 주파수를 제어함으로써 우리가 원하는 출력 전압(본 논문에서는 350V)

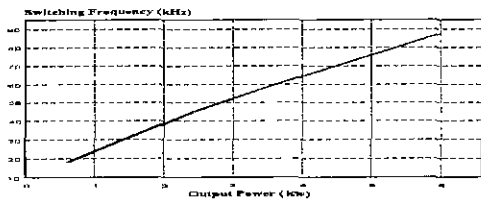


그림 2 출력 대 스위칭 주파수

Fig. 2. Output power vs. Switching frequency

을 얻을 수 있다. 그림 2는 부하용량 가변에 따른 일정 출력 전압을 만들기 위하여 필요한 스위치의 스위칭 주파수와 출력과의 관계를 나타낸다. 일정 주파수에서(50kHz) 일정한 전압을 만들기 위한 듀티비의 변화는 그림 3과 같다. 그러나 강압형 다이오드가 ZCS조건으로 동작하기 위해서는 일정 이상의 듀티비가 필요하다. 따라서 그림 3과 같이 거의 50%부하(3kW)이하에서는 듀티비가 감소하여 3상 강압형 컨버터가 ZCS로 동작하지 않는다. 그리고 부하변화가 심하면 듀티비 변환만으로는 회로를 제어하기는 힘들다. 따라서 본 논문에서는 회로가 적절히 동작하기 위한 주파수를 선택한 후 주파수와 듀티비를 변화함으로써 우리가 원하는 출력전압의 리플을 감소할 수 있는 방법을 제안한다. 또 각 방법에는 출력전압으로부터 필터링하거나 입력으로부터 얻어진 6고조파성분을 고려하여 주파수와 듀티비를 변화함으로써 출력전압 리플

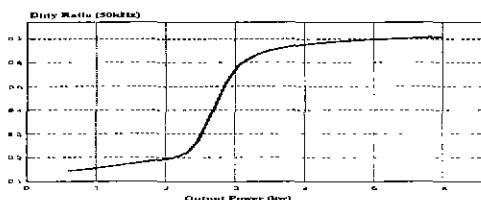


그림 3 출력 대 듀티비

Fig. 3. Output power vs. duty ratios

을 감소할 수 있다. 출력전압의 리플을 감소시키기 위한 방법은 총 4가지로 요약된다.

- (1) $f + \Delta f$ (2) $f + \Delta D$
(by harmonic injection through input)
- (3) $f + \Delta f$ (4) $f + \Delta D$
(by harmonic injection through output)

위의 방법들 중 (3)번 방법은 논문과 같은 구조를 가진 단일 스위치 강압형 컨버터에 적용하여 출력전압 리플이 감소함을 보였다^[4]. 그리고 (2)번의 방법은 단일 스위치 승압형 컨버터에 적용된 예는 많이 있다^{[5]-[6]}. 하지만 (1), (4) 번의 경우에는 제안된 경우가 없다. 따라서, 위의 관계를 이용하면 이용하여 출력전압의 리플을 감소시키는 것이 충분히 가능하다는 것을 알 수 있다.

3.2 주파수 변조방법

단일 스위치 3상 ZCS 강압형 컨버터의 출력과 스위칭 주파수가 선형적으로 비례한다고 가정하면, 출력전압의 저주파 리플전압을 감소시키기 위한 스위칭 주파수는 식 (1)과 같이 구할 수 있다. 이때 K_1 은 출력에 대한 스위칭 주파수의 이득 (gain)이고, K_2 는 최소 주파수가 된다. 또한 출력전압과 전류를 함께 고려한 스위칭 주파수 차이 (Δf_s)는 식(2)와 같이 나타난다.

$$f_s \text{ (Switching frequency)} = \frac{K_1 \times P \text{ (Output power)} + K_2 + \Delta f_s}{1} \quad (1)$$

where, K_1 : 기울기, K_2 : y 절편

$$\Delta f_s = k_r \left[\frac{V_{dc} \times V_{dc}}{R} - \frac{V_{dc-ref} \times V_{dc-ref}}{R} \right] \quad (2)$$

where, k_r : Ripple suppression gain

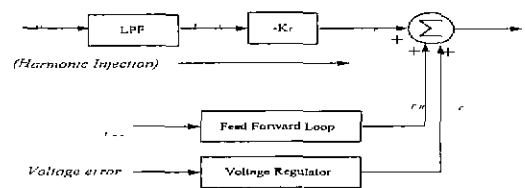


그림 4 스위칭 주파수의 결정

Fig. 4. Determination of the switching frequency

그림 4는 리플전압 저감을 이루기 위한 스위칭 주파수가 결정되는 제어블럭도를 나타내었다. 스위칭 주파수는 출력전압을 제어하기 위한 PI제어루프와 정상상태에서 측정된 부하 전류의 스위칭 주파수 사이의 함수를 근간으로 해서 얻어진다. 그리고 출력전압의 저주파 리플전압을 저감하기 위한 두 가지 방법이 있을 수 있다. 그림 5는 이 두 가지 방법이 적

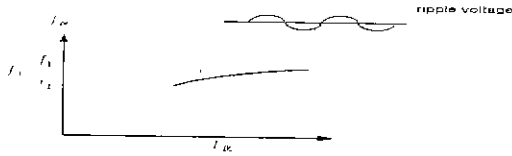


그림 5 스위칭 주파수 결정의 그래프
Fig. 5. Graphical presentation of the switching frequency determination

용되는 예이다. 출력전압과 부하전류에 의해 결정된 f_o 와 리플 전압을 고려한 Δf_s 의 관계를 보여주고 있다. 리플 전압을 저감하기 위한 방법으로 입력측에 역으로 고조파를 주입하거나, 출력전압의 리플성분을 필터링하여 Δf_s 의 성분을 고려하게 된다.

3.3 듀티 변조방법

승압형 컨버터의 경우 고조파 주입에 의한 듀티 변조에 관하여 많은 연구들이 수행 되어왔다. 제안된 고정스위칭 고조파 주입 PWM기법의 듀티비 D 를 변경하기 위하여 식 (3)과 같은 6고조파를 사용한다. 여기서 $m_1(0 < m_1 < 1)$ 은 6고조파가 주입되는 양을 결정한다.

$$D_{MOD}(t) = D(1 + d(t)) \quad (3)$$

여기서, D_{MOD} : Modulated duty cycle,

$$d(t) = m_1 \sin(6\omega t + \frac{3}{2}\pi) \quad (4)$$

본 논문에서는 6고조파를 주입하는 방법 중 비교적 간단하고 경제적인 방법을 이용하여 설명하고 시뮬레이션을 행하였다^[6]. 식 (5)에서의 m_2 값도 식 (3)의 m_1 값과 같은 의미를 갖는다. 식 (5)와 같은 파형을 만들기 위해서는 그림 6과 같은 회로를 이용하면 가능하다. 그림 6에서 V_e 에 걸리는 전압은 자동적으로 출력전압에서 리플성분 전압과 같은 모양과

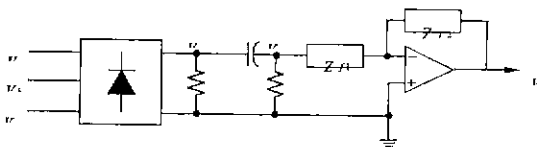


그림 6 고조파 주입 회로도

Fig. 6. Harmonic injection schematic diagram

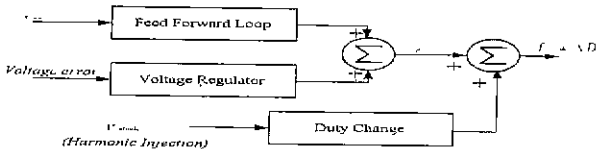


그림 7 결정된 스위칭 주파수에서의 듀티 결정

Fig. 7. Determination of duty ratio in selected frequency

위상을 갖는다. 출력전압의 리플성분을 감소시키기 위해 이 전압에 반대되는 모양으로 크기를 조절하여 넣어주면 그림 7과 같이 결정된 주파수에 대하여 듀티비가 변화하게 된다.

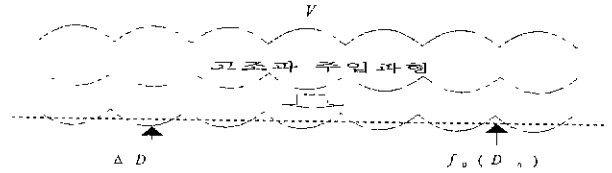


그림 8 결정된 주파수에서의 듀티비의 변화

그림 8은 이것이 적용된 예이다. 이와 함께 출력전압의 리플성분을 필터링하여 고조파 주입과 같은 방법으로 넣어주면 출력전압 리플을 감소시킬 수 있다.

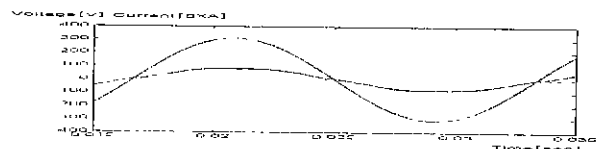
$$d(t) = \frac{m_2}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n 6}{(6n)^2 - 1} \cos(6n\omega t) \quad (5)$$

4. 시뮬레이션

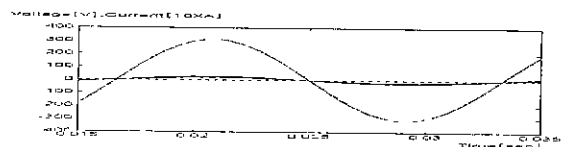
제안한 단일 스위치 3상 강압형 정류기의 저주파 리플전압 감소를 이루기 위한 고조파 주입과 출력전압 필터링을 통한 듀티변화를 이용하여 출력전압 리플이 감소됨을 검증하기 위해 다음과 같은 조건하에서 시뮬레이션을 수행하였다. 입력전압: 3상 60Hz 380 Vac, 출력 전압: 350Vdc, 6kW 컨버터를 제작하였으며, 수동소자의 파라메타는 각각 다음과 같다. $L_{ab,c}$: 1mH, $C_{1,2,3}$: 180nF, L_r : 40 μ H, C_a : 120nF, L_f : 1mH, C_f : 220 μ F. 시뮬레이션 툴로는 PSIM을 사용하였다.

4.1 시뮬레이션 결과

그림 9는 입력전압과 전류를 나타내고 있다. 그림 9(a)는 100% 부하조건일 경우 그리고 그림 9(b)는 10% 부하조건에서 제안한 펄스 주파수 제어 기법을 적용시 각각의 결과를 나타낸다. 파형으로부터 전 부하 범위에서 단위 역률을 나타내고 있음을 알 수 있다.



(a) 100% 부하



(b) 10% 부하

그림 9 100%, 10% 부하 시 입력 전압과 전류 파형

Fig. 9. Input voltage and current waveforms under 100% and 10% load condition

그림 10은 컨버터 주요소자의 전압과 전류를 나타내고 있다. 파형으로부터 알 수 있듯이 스위치는 영전압 턴-온과 영

전류 턴-오프가 이루어짐을 알 수 있으며 또한 이론적인 파형과 거의 동일함을 알 수 있다. 그림 11(a)(100% 부하)와 그림 11(b)(50% 부하)는 제안한 고조파 주입 제어기법 적용 시의 출력전압 파형을 나타내고 있다. 파형에서 알 수 있듯이 리플 저감 기법을 사용하지 않았을 경우 저주파 즉 360

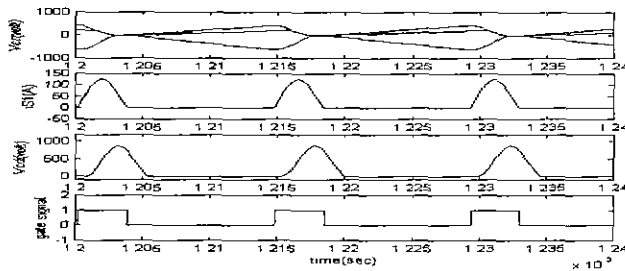
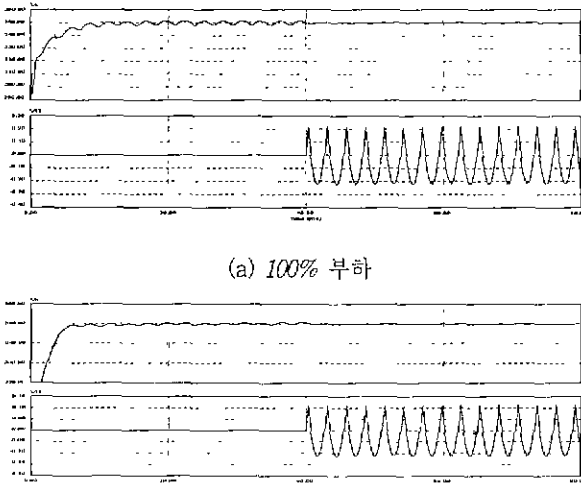


그림 10 컨버터 주요소자의 전압과 전류 파형

Fig. 10. Voltage and current waveforms of the converter

Hz 리플이 출력전압에 있다. 하지만 0.04sec에서 제안한 리플 저감 제어기법을 적용하였을 경우 출력전압의 저주파



(a) 100% 부하

(b) 50% 부하

그림 11 고조파 주입 시 출력전압 파형과 듀티비의 변화(100%, 50% 부하)

Fig. 11. Output voltage waveform using harmonic injection method through input and duty ratio change(100%, 50% Load)

리플전압이 현저히 감소함을 알 수 있다. 부하가 변화한 경우 그림 11 과 같이 스위칭 주파수가 결정된 후 듀티비를 변화하여 출력전압 리플을 감소할 수 있다. 그림 12(100% 부하)는 출력전압에서 필터링하여 듀티비가 변화할 때의 출력 파형이다. 고조파를 주입했을 경우에서처럼 출력 리플 전압이 많이 감소함을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 저주파 DC 리플전압 저감을 이루기 위한 여러 제어기법을 제안하였다. 그리고, 제안한 제어기법 중 고

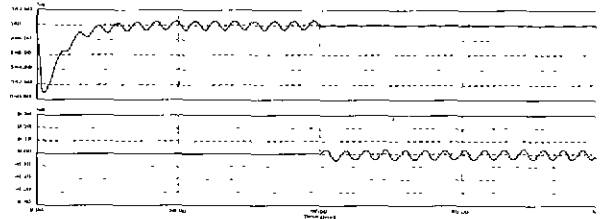


그림 12 출력 측 리플을 주입한 경우 출력전압과 듀티비의 변화(100% 부하)

Fig. 12. Output voltage waveform using ripple voltage injection method through output and duty ratio change(100% Load)

조파 주입과 출력전압 필터링을 통한 듀티변화를 이용하여 출력전압 리플이 감소됨을 시뮬레이션을 통해 검증했다. 제안한 제어기법의 장점은 다음과 같다.

- 1) 단위 역률과 낮은 THD의 입력전류를 가진다.
- 2) 넓은 부하범위에서의 턴-온 및 오프시 영 전류 스위칭을 보장한다.
- 3) 제안한 제어 기법에 의한 출력 DC 전압에 의한 360Hz 저주파 리플전압이 현저히 감소하였다.
- 4) 리플전압의 감소에 따른 출력 DC 커패시터의 전기적인 용량을 감소시킬 수 있다.

따라서, 이와같은 특성을 갖는 제안한 펄스 주파수 제어를 적용한 단일 스위치 3상 영전류 스위칭 강압형 다이오드 정류기는 통신용 전원장치 및 각종 정류기 분야에 안정적인 전원을 공급하는 전원장치로 더욱더 적합할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Yungtaek Jang and Robert W Ericksojn, "New single-switch three-phase high power factor rectifiers using multi-resonant zero current switching", IEEE Applied Power Electronics Conference, pp. 711-717, 1994.
- [2] D.S.L. Simonetti, J. Sebastian, and J. Uceda, "Control conditions to improve conducted EMI by switching frequency modulation of basic discontinuous PWM preregulators", IEEE Power Electronics Specialist Conference, pp. 1180-1187, 1994.
- [3] M.M. Jovanovic, D.M.C. Tsang, and F.C. Lee, "Reduction of voltage stress in integrated high-quality rectifier regulators by variable-frequency control", IEEE Applied Power Electronics Conference, pp. 569-575, 1994.
- [4] Joong-Ho Song, Yong-Duck Kim, Dong-Yun Lee, Ick Choy, and Joo-Yeop Choi, "Control characteristics of Single-Switch, Three-Phase Buck Rectifiers" ICPE'98, pp. 658-662, 1998.
- [5] Yungtaek Jang, M. M. Jovanovic, "A novel robust harmonic injection method for single-switch three-phase discontinuous-conduction-mode boost rectifiers", IEEE Trans on Power Elec., Vol. 13, No. 5, pp. 824-834, 1998.
- [6] L. Simonetti, J. Sebastian, and J Uceda, "Single-switch three-phase power factor under variable switching frequency and discontinuous input current." in IEEE Power Electronics Specialists Conf. (PESC) Rec., 1993, pp. 657-662.