

단위 역률을 갖는 3상 BUCK 다이오드 정류기에서의 DC 리플-전압 저감

이동윤\*, 송중호\*\*, 최주엽\*\*, 최 익\*\*, 김광배\*\*, 현동석\*  
 \*한양대학교 전기공학과 \*\*한국과학기술연구원 지능제어연구센터

DC Ripple-Voltage Suppression in three Phase BUCK DIODE Rectifiers with Unity Power Factor

D.Y.Lee\*, J.H.Song\*\*, J.Y.Choi\*\*, I. Choy\*\*, G.B.Kim, D.S.Hyun\*

\*Dept. of Electrical Eng. HanYang Univ. \*\*KIST Intelligent System Control Research center

**Abstract** - A technique to suppress the low frequency ripple voltage of the DC output voltage in three-phase buck diode rectifiers is presented. A pulse frequency modulation method is employed to regulate the output voltage of the rectifier and guarantee zero-current switching of the switch over the wide operating range. The pulse frequency control method used in this paper shows generally good performance such as low THD of the input line current and unity power factor. In addition, the pulse frequency method can be effectively used to suppress the low frequency voltage ripple appeared in the dc output voltage. The proposed technique illustrates its validity and effectiveness through the respective simulations and experiments.

1. 서 론

최근 많은 응용분야에서 거의 정현적인 입력전류를 만들어내는 AC/DC 정류기가 널리 사용되고 있으며, 이러한 정류기를 많은 논문에서 다루고 있지만, PFC (Power Factor Correction) 기능이 있는 경우 대부분이 승압형 컨버터들이다. 하지만, 일반적인 전기통신 전원 장치의 경우, 전체 시스템의 전압 변환은 높은 입력 전압에서 낮은 출력전압으로 강압하는 변압흐름을 가지고 있다. 또한, 3상 전원에서 PFC를 이루기 위해 단일 스위치를 이용한 저가의 시스템에 많은 관심이 이루어지고 있다 [1]-[2]. 본 논문에서는 최근 발표된 단일 스위치 3상 Zero-Current-Switching (ZCS) 강압형 정류기 회로를 사용하여 제어회로에 관한 연구를 수행하였다 [1]. 이 회로에서 사용된 모든 반도체 소자는 ZCS 조건하에서 동작이 이루어지며, 전 부하에 대한 THD는 약 5%미만이다. 또한, 시스템의 전체 효율 역시 스위칭 손실의 감소에 따라 상대적으로 높다 [2]-[4]. 이 시스템의 제어를 위해서는 다중 공진형 컨버터에 따른 펄스 주파수 변조 기법이 사용되었으며, 이로 인한 출력전압 조절을 이룰 수 있었다. 본 논문에서 사용된 펄스 주파수 변조 기법은 기본적으로 출력부하와 동작 주파수 사이의 관계를 통하여 이루어진다. 따라서, 이러한 제어기법은 특히 부하 변화에 대해 민감하게 대처하여 빠른 출력전압 조절이 가능하게 된다 [5]. 하지만, 이런 출력전압은 입력전원에 따른 저주파 리플-전압을 갖게 되고 이에 따른 리플 전류가 발생하게 된다. 이런 리플 전류는 출력측에 연결된 커패시터를 통하여 흐르게 된다. 이것은 커패시터 동작 온도를 상승시키며 커패시터의 수명을 단축시키게 된다. 또한, 이런 저주파 리플-전압은 전압 제어기에 피드백 되고 입력전류

의 어떤 파형의 왜곡을 유발하게 된다. 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 지니고있다.

따라서, 본 논문에서는 출력전압의 저주파 리플 전압 저감을 이룰 수 있는 새로운 제어기법을 제시하고자 한다. 제안한 제어 기법은 저주파 리플-전압의 저감을 이루기 위해 부하전류의 리플-전압만을 피드백하여 제어 루프에 피드포워드로 적용하여 쉽게 이루어진다. 제안한 새로운 제어기법의 타당성을 시뮬레이션 및 실험 결과를 통하여 그 타당성을 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 회로 설명

그림 1은 단일 스위치 3상 강압형 정류기의 기본 회로도이며 그림 2는 컨버터의 주요 파형을 나타내고 있다. 이 회로에서 공진 인덕터  $L_r$  과 공진 커패시터  $C_{r1,2,3}$  그리고  $C_d$ 는 공진 회로를 형성하며 입력 리액터  $L_{a,b,c}$ 는 입력전류의 고조파 필터링 및 돌입전류 제한 등의 역할을 하고 있으며, 스위치는 공진 회로의 동작에 의해 영전류 스위칭을 이루게되며 그리고 다이오드는 영전압 스위칭으로 동작한다.

동작모드의 구분은 표1과 같이 크게 스위치가 오프 되어있을 때와 스위치가 온 되어있을 때로 나뉘지고, 이는 다이오드  $D_1 \sim D_6$  또는  $D_d$ 의 도통에 따라 모두 8개의 동작모드로 구분되어진다 [5].

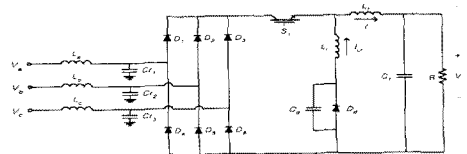


그림 1. 컨버터의 회로도

2.2 제어 기법

본 논문에서 사용한 단일 스위치 3상 ZCS 강압형 정류기는 부하변화에 대해 안정적인 출력전압을 얻기 위해서는 펄스 주파수 변조 기법을 사용하여 제어를 수행한다. 이것은 기본적으로 스위치 턴-온 시간이 공진 소자들의 파라미터에 의해 결정되므로, 듀티비가 감소하면 충분한 공진 현상이 발생할 수 없고 스위치는 ZCS로 동작할 수 없게 된다. 따라서, ZCS 강압형 정류기의 제어 기법은 그림 3과 같다.

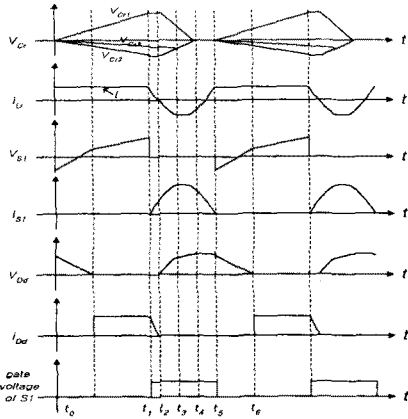


그림 2. 컨버터 주요 소자의 이상적인 파형

표 1. 모드 구분

| 스위칭 Si | 다이오드 Di-D6         | 다이오드 Di | 모드   |
|--------|--------------------|---------|------|
| OFF    | OFF                | OFF     | 모드 1 |
|        |                    | ON      | 모드 2 |
| ON     | D1~D6중 2개의 다이오드 도통 | OFF     | 모드 3 |
|        |                    | ON      | 모드 4 |
|        | D1~D6중 3개의 다이오드 도통 | OFF     | 모드 5 |
|        |                    | ON      | 모드 6 |
|        | 다이오드 D1~D6이 모두 도통  | OFF     | 모드 7 |
|        |                    | ON      | 모드 8 |

그러므로, 시스템에 필요한 스위칭 주파수는 3가지 루프에 의해 결정된다. 이 제어 루프에서 스위칭 주파수를 결정함에 있어 중요한 인자는 출력전압을 위한 PI 제어 루프 및 부하전류와 정상상태에서 측정된 스위칭 주파수 사이의 함수를 근간으로 해서 얻어진다. 여기서, 부하전류는 시스템의 동작주파수가 부하변동에 따라 변화하기 때문에 일종의 외란 형태로 고려되어진다. 또한, 스위칭 주파수는 출력전압조절을 위한 전압 제어기 루프이며, 이것은 주로 과도 상태에서 동작하여 출력전압의 세밀한 조절을 이루게 된다. 다른 제어루프는 DC 출력전압에서의 저주파 리플-전압 저감을 이루기 위해 추가된다. 리플-저감은 출력 전압의 저주파 리플 성분만을 필터링 하여 제어 회로에 피드포워드 함으로써 이루어진다.

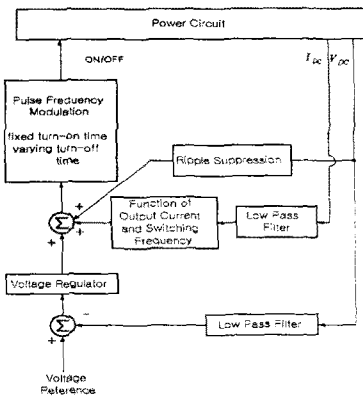


그림 3 제어 블럭도

### 2.3 제안한 리플 저감

DC 출력전압에서의 저주파 리플-전압은 전력회로에 어떤 전력 반도체 소자의 사용이나 전기적으로 큰 용량의 커패시터 사용 없이 기존의 펄스 주파수 변조 기법에 제안한 리플 저감 회로를 추가하여 쉽게 감소될 수 있다. 그림 4는 리플-전압 저감을 위한 스위칭 주파수의 결정을 이루는 제어기법을 보여준다.

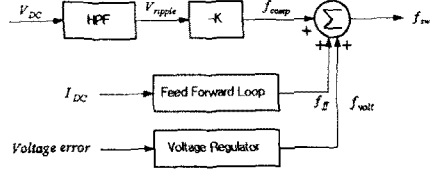


그림 4 스위칭 주파수의 결정

리플-전압 저감을 위한 제어 신호는 측정된 DC전압으로부터 고역 통과 필터와 역 이득을 통하여 쉽게 이루어진다. 고역 통과 필터의 차단 주파수는 360Hz의 저주파 리플-전압의 ac 성분만을 고려하기 위한 값으로 선택된다. 그림 5에 리플-저감을 이루기 위한 제어 신호가 실제 DC 리플-전압 파형으로부터 얻어지는 것을 보여준다. 고역 통과 필터의 사용에 따른 DC 리플성분을 외부에 스위칭 주파수의 범위를 나타내고 있다. 그림 6은 스위칭 주파수의 제어 신호가 부하전류와 리플-전압의 ac 성분에 의해서만 결정되어지는 것을 그래프로 나타내고 있다. 스위칭 주파수의 증가는 리플-전압 파형의 양의 범위에서 이루어지며 반면 스위칭 주파수의 감소는 부의 영역에서 이루어진다.

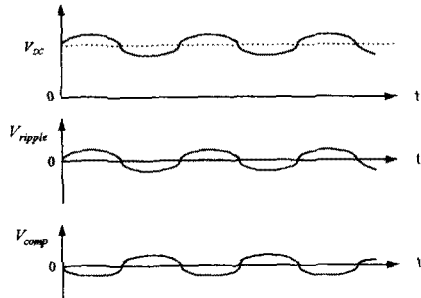


그림 5 Ripple Suppression 회로의 파형

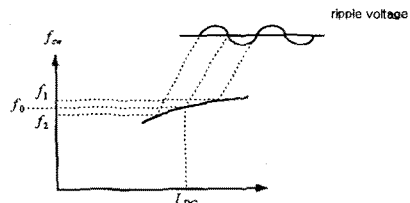


그림 6 스위칭 주파수 결정의 그래프

### 2.3 시뮬레이션 및 실험 결과

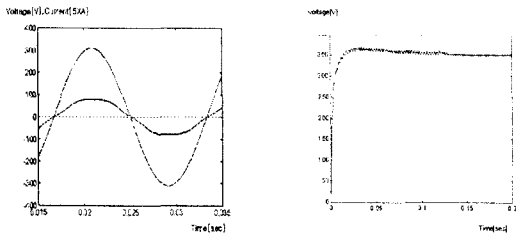
제안한 단일 스위치 3상 강압형 정류기의 저주파 리플-전압 감소를 이루기 위한 제어기법의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 시뮬레이션 및 실험은 다음과 같은 파라미터를 사용하였다. 입력 전압: 3상 60Hz 380 Vac, 출력 전압: 350Vdc, 6kW 컨버터를 제작하였다. 소자의 파라미터는 각각 다음과 같다. L<sub>a,b,c</sub>: 1mH, C<sub>r1,2,3</sub>: 180nF, L<sub>r</sub>: 40 μH, C<sub>a</sub>: 120nF, L<sub>f</sub>: 2mH, C<sub>f</sub>: 175 μF, S<sub>1</sub>: SGL40N150D.

그림 7(a)는 100%조건에서 시뮬레이션을 수행한 입력 전압과 전류를 나타내고 있으며 단위 역률을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림 7(b)는  $t=0.12\text{sec}$ 에서 100%부하에서 50%부하로 부하를 스텝 변화한 경우의 출력전압에 과도응답을 나타내고 있다.

그림 8은 100%, 50%, 그리고 10%의 부하조건에서의 실험한 각각의 입력전압과 전류를 나타내고 있다. 실험결과로부터 각각의 부하에서 시뮬레이션결과와 동일한 단위 역률을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

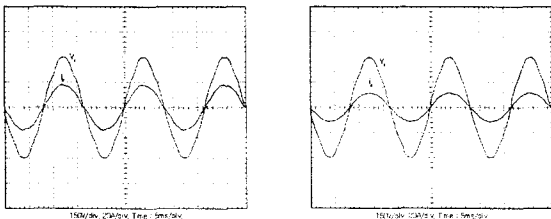
그림 9는 100%, 50% 그리고 10%부하에서의 스위치의 전압과 전류를 각각 나타내고 있다. 파형으로부터 알 수 있듯이 턴-온 및 턴-오프 시 모두 영전류 스위칭이 이루어짐을 확인할 수 있다.

그림 10은 50%부하에서 본 논문이 제안한 제어기법의 타당성을 실험로부터 알 수 있다. 그림 10(a)는 제안한 제어기법을 적용하지 않은 경우의 실험결과를 나타내고 있다. 리플의 크기는 약 5V로 정도로 약 1.4%의 저주파 리플-전압 성분을 확인할 수 있다. 그림 10(b)는 제안한 제어기법을 적용하였을 경우의 실험 파형이다. 출력 DC 전압에 저주파 리플-전압이 현저히 감소하였음을 알 수 있다.

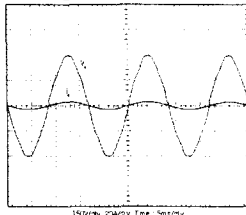


(a) 입력 전압 과 전류 (b) 부하변동에 따른 출력전압 (100% → 50%)

그림 7 100%부하에서 시뮬레이션을 수행한 입력 전압 과 전류 파형



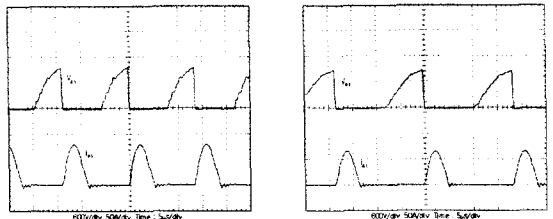
(a) 100% 입력전압과 전류 (b) 50% 입력전압과 전류



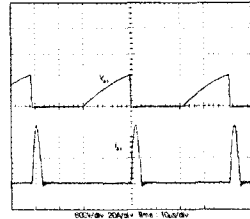
(c) 10% 입력 전압과 전류  
그림 8 입력 전압과 전류 파형

### 3. 결 론

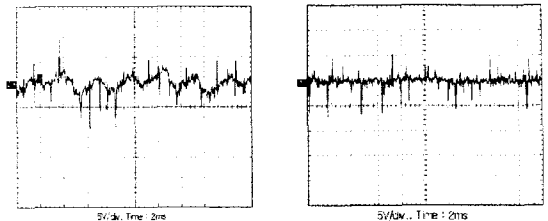
본 논문에서는 저주파 DC 리플-전압 저감을 이루기 위한 새로운 제어기법을 제안하였다. 그리고, 제안한 제어기법의 그 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 제안한 제어기법의 장점은 다음과 같다.



(a) 100% 스위치 전압과 전류 (b) 50% 스위치 전압과 전류



(c) 10% 스위치 전압과 전류  
그림 9 스위치 전압과 전류



(a) 기존의 DC 리플-전압 (b) 제안한 제어기법적용시 DC 리플-전압

그림 10 제안한 저주파 DC 리플-전압의 실험결과

- 단위 역률과 낮은 THD의 입력전류를 가진다.
- 넓은 부하범위에서의 영전류 스위칭을 보장한다.
- 제안한 제어기법에 의한 출력 DC전압의 저주파 리플-전압이 현저히 감소하였다.
- 리플-전압의 감소에 따른 출력 DC 커패시터의 기계적인 용량을 감소시킬 수 있다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Yungtaek Jang and M.M. Jovanovic, Design considerations and performance evaluation of a 6KW, single-switch, three-phase, high-power-factor, multiresonant, zero-current-switching buck rectifier, IEEE INTELEC Conference proceedings, paper no. 30-3, 1997.
- [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] F.S. Dos Reis, J. Sebastian, and J. Uceda, Applying FM control to PFP converters, IEEE Industrial Electronics Conference Proceedings, pp. 1814-1819, 1996.
- [4] 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 Power Electronics Specialist Conference, pp. 569-575, 1994.
- [5] 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.