

단일 반송파를 이용한 비엔나 정류기의 전압 제어

윤병철¹, 김학원[†], 조관열², 임병국²

A single-carrier comparison PWM for Voltage Control of Vienna Rectifier

Byung-Chul Yoon¹, Hag-Wone Kim[†], Kwan-Yuhl Cho², and Byung-Kuk Lim²

Abstract - In this paper, a new simple PWM method for Vienna rectifier is proposed. The previous SVPWM method for Vienna rectifier is very complex and difficult to implement. To solve these problems, a new single-carrier comparison PWM method for voltage control of Vienna rectifier is proposed. Because of using the only single carrier, implementation of the proposed PWM is very simple. In the proposed PWM method, carrier comparison parts of the PWM block is only changed from the 2 level PWM control block. The usefulness of the proposed PWM method is verified by the simulation and experiment.

Keywords : Vienna Rectifier, Carrier Comparison PWM, Single Carrier PWM

1. 서 론

3상 3레벨 비엔나 형태의 정류기(Vienna Type Rectifier)는 단방향의 전력 변환이 요구되는 AC/DC 컨버터(Converter)의 입력 전류 고조파 저감을 위한 회로로 검토되고 있다.^[1] 3레벨의 비엔나 정류기는 2레벨의 펄스 폭 변조 (Pulse Width Modulation, 이하 PWM) 정류기에 비해 출력 전압의 총 왜곡률 (Total Harmonic Distortion, 이하 THD)이 낮아, 전류 THD를 작게 하기에 용이하고, 낮은 내압의 전력용 소자를 사용할 수 있으며, 스위칭 손실이 작아 컨버터의 고효율화에 유리한 장점을 가지고 있다.

한편, 비엔나 정류기를 제어하기 위한 PWM 방법은 크게 공간 전압 벡터를 이용하여 전압 벡터의 인가 시간을 직접 계산하는 공간 전압 벡터 PWM 방법과 반송파 비교 PWM 방법으로 나눌 수 있다. 공간 전압 벡터 상에서 인가 전압 벡터와 인가 시간을 직접 계산하는 방법은 3상 계통 전압의 상태에 따라 다이오드 (Diode)의 통전 상태가 모두 달라, 공간 전압 벡터 생성을 위한

유효 전압 벡터의 선택이 복잡하고, 유효 전압 벡터 및 영 전압 벡터의 인가 시간 계산이 복잡하여, 실제 구현을 위하여 많은 계산을 필요로 하는 단점이 있다.^[2-5] 반면, 반송파를 사용하여 PWM 제어를 행하는 반송파 비교 PWM 방법은 유효 전압 벡터 및 인가 시간 계산이 간단한 장점이 있으나^[6], 각 상별 각각 두 개의 반송파를 요구하므로 많은 반송파 비교 PWM 모듈을 요구하며, 두 개의 반송파간 동기화 등이 필요하여 실제 제품에 적용이 용이하지 않다.

본 논문은 단일 반송파를 이용한 비엔나 컨버터의 반송파 비교 PWM 방법을 제안한다. 제안한 단일 반송파 비교 PWM 방법은 단일 반송파를 사용하기 때문에 구현이 용이한 장점을 갖는다. 2장에서는 제안한 단일 반송파 비교 PWM 방법에 대한 이론적 배경을 설명하며, 3장에서는 이에 대한 모델에 대하여 다룬다. 마지막으로 제안한 단일 반송파 비교 PWM 방법으로 비엔나 정류기를 제어한 실험 결과를 보여 제안한 방법의 효용성을 검증한다.

2. 비엔나 정류기

2.1 비엔나 정류기의 동작

그림 1은 3레벨의 비엔나 정류기 회로 이다. 비엔나 정류기는 3상의 정류 다이오드와 3개의 양방향 스위치로 구성된다. 그림 1에서 e_{abc} 는 3상의 계통 입력 전압이며, i_{abc} 는 3상 입력 전류를 의미 한다. Q_{abc} 는 MOSFET와

Paper number : TKPE-2012-17-2-6

ISSN : 1229-2214

[†] Corresponding Author : khw@cju.ac.kr, Dept. of Cont. & Inst. Eng., Korea Nat'l Univ. of Trans.

Tel : +82-43-841-5322 Fax : +82-43-841-5320

¹ R&D Center Dongah Elecomm.

² Dept. of Cont. & Inst. Eng., Korea Nat'l Univ. of Trans. Manuscript received Nov. 24, 2011; accepted Dec. 28, 2011

— 본 논문은 2011년 전력전자학술대회 외부장학금 수혜논문임

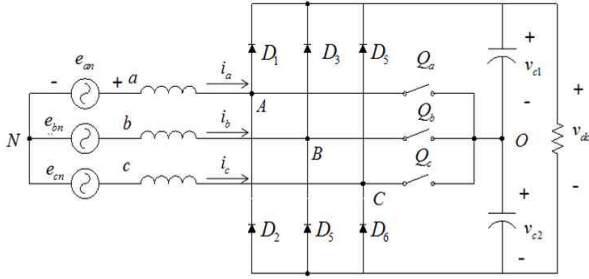


Fig. 1 Circuit Diagram of Vienna Rectifier

Diode를 사용한 양방향 스위치를 의미한다. $D_1 \sim D_6$ 의 동작 상태는 3개의 양방향 스위치의 상태와 3상 입력 전류의 방향에 따라 결정 된다. 양방향 스위치의 온, 오프에 따른 비엔나 정류기의 출력 단자 전압은 다음과 같다. Q_{abc} 가 켜지면, 각 상의 단자 전압은 0V 이며, Q_{abc} 가 꺼지면 각 상의 단자 전압은 상전류의 값이 양이면 $V_{dc}/2$, 상전류의 값이 음이면 $-V_{dc}/2$ 이다. 즉, 단자 전압의 상태는 $V_{dc}/2V, 0V, -V_{dc}/2V$ 로써, 3가지 상태가 존재하기 때문에 비엔나 정류기는 3 레벨 컨버터이다. 스위칭 함수와 전류에 따른 단자전압을 식 (1)에 나타내었다.

$$v_{AO} = \begin{cases} 0 & \text{if } S_a = 1 \\ 0.5V_{dc} & \text{if } S_a = 0 \text{ and } i_a \geq 0 \\ -0.5V_{dc} & \text{if } S_a = 0 \text{ and } i_a < 0 \end{cases} \quad (1)$$

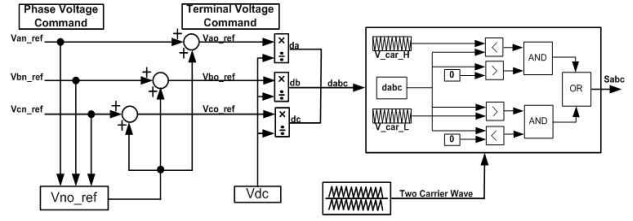
여기서, 스위치 Q_a 가 켜지면 $S_a=1$ 이고 꺼지면 $S_a=0$ 으로 스위칭 함수를 정의한다.

2.2 비엔나 정류기의 반송파 비교 PWM 방법

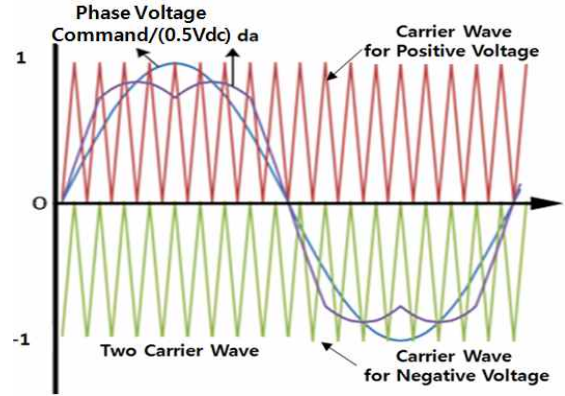
그림 2의 (a), (b)는 비엔나 정류기를 위한 두 개의 삼각파를 반송파로 이용한 삼각파 비교 방식의 전압 변조 블록도와, 반송파 및 단자전압 지령을 나타내었다. 그림에서 d_a 는 PWM 인버터의 듀티 지령을 의미하며, 단자전압 지령에 직류링크 전압의 절반으로 나누어서 구한다. 두 개의 반송파 비교 PWM 방법은 듀티 지령 d_a 가 0보다 클 때는 상단의 반송파와 비교되며, 듀티 지령 d_a 가 0보다 작으면 하단의 반송파와 비교된다. 비교된 결과는 각 상에 위치한 양방향 스위치를 켜고 끄기 위한 스위칭 함수 S_a 를 발생한다. d_a 가 0보다 클 때 스위칭 함수는 식 (2)에 의해서 결정되고, d_a 가 0보다 작을 때는 식 (3)에 의해서 스위칭 함수가 결정된다.

$$S_a = \begin{cases} 1 & d_a \leq \text{Carrie_Positive} \\ 0 & d_a > \text{Carrie_Positive} \end{cases} \quad d_a \geq 0 \quad (2)$$

$$S_a = \begin{cases} 1 & d_a \geq \text{Carrie_Negative} \\ 0 & d_a < \text{Carrie_Negative} \end{cases} \quad d_a < 0 \quad (3)$$



(a) Carrier Comparison PWM using Two Carrier Wave



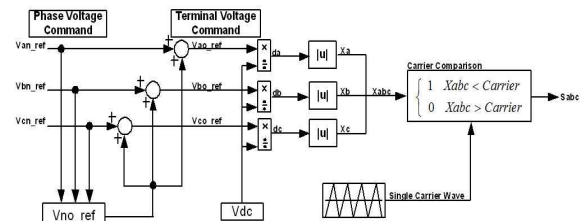
(b) Voltage Commands and Carrier Wave

Fig. 2 Block Diagram of Previous Two Carrier Wave Comparison PWM Method^[6]

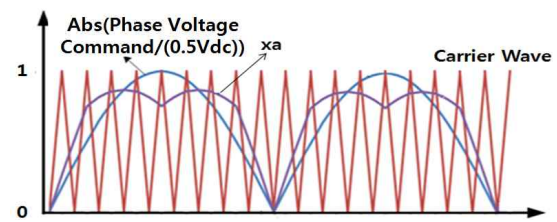
위의 식에서 본 바와 같이 기존의 비엔나 정류기의 PWM 방법은, 2개의 반송파를 사용하기 때문에 S/W 및 H/W 구현이 힘든 단점이 있다.

2.3 제안하는 단일 반송파 비교 PWM 방법

그림 3은 제안하는 단일 반송파 비교 PWM 방법을 설명한 것이다. 단일 반송파를 사용할 수 있는 수학적 배경은 식 (4)와 같다.



(a) Carrier Comparison PWM using Single Carrier Wave



(b) Voltage Commands and Single Carrier Wave

Fig. 3 Block Diagram of Single Carrier Comparison PWM

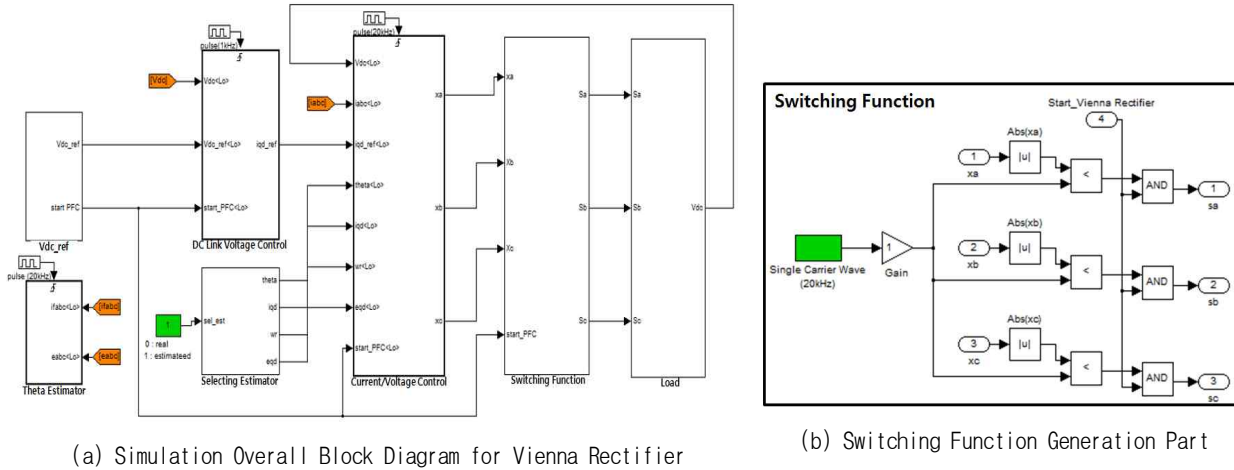


Fig. 4 Simulation Block Diagram using MATLAB/SIMULINK

$$S_a = \begin{cases} 1 & |d_a| \leq |Carrie_Negative| \\ 0 & |d_a| > |Carrie_Negative| \end{cases} \quad (4)$$

식 (4)는 식(3)에 절대값을 취한 결과이다. 만약, 하단의 반송파가 상단의 반송파와 절대값이 같고, 부호가 반대인 반송파를 사용한다면 식 (3)을 식(4)로 쓸 수 있다. x_a 를 d_a 의 절대값으로 정의하면 비엔나 컨버터의 스위칭 함수는 아래의 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$S_a = \begin{cases} 1 & x_a \leq CarrierWave \\ 0 & x_a > CarrierWave \end{cases} \quad (5)$$

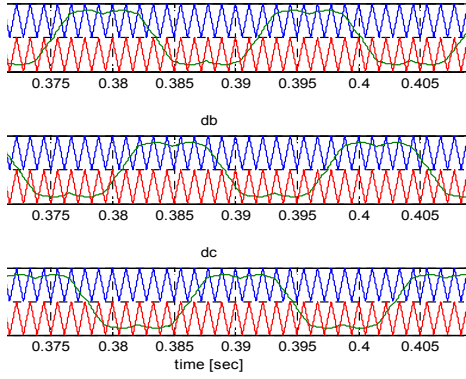
그림 3(a)는 단일 반송파를 이용한 PWM 방법의 블록 다이어그램을 나타낸다. 기존의 2 레벨 컨버터의 전압변조 방식에서 삼각파 비교부만 비엔나 정류기에 맞게 바꾸면, 비엔나 정류기의 SVPWM 방식을 이용하여 간단한 전압제어를 할 수 있다. 비엔나 정류기의 삼각파 비교부는 그림 3의 (b)와 같다. 단자 듀티 지령 d_a 를 절대값으로 정의하면 단자 전압 명령 x_a 가 만들어지며, 만들어진 x_a 와 단일 반송파를 이용하여 스위칭 명령을 만든다. 그러므로 단일 반송파를 이용하면 S/W 및 H/W 구현이 매우 간단하다.

3. 모의해석 및 실험

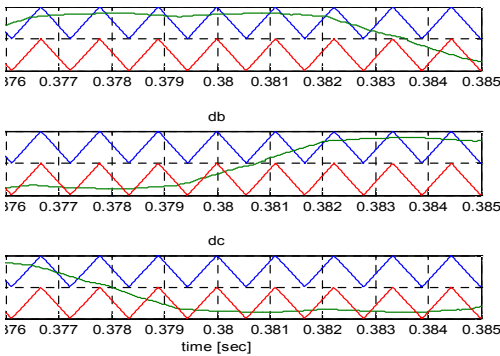
그림 4는 MATLAB/SIMULINK를 활용한 PWM 방법에 따른 모의해석 및 스위칭 함수 블록도이다. 그림 4의 (a)는 비엔나 정류기의 전압 제어를 위한 모의해석 블록도이다. 비엔나 정류기의 전압 제어는 일반적인 PWM 정류기의 전압 제어와 동일하게 제어하며, 전압 제어기의 출력은 입력 전류의 명령이 된다. 입력 전류

명령은 전류 제어기를 거쳐 단자 전압 명령으로 출력된다. 비엔나 정류기의 전압 제어 블록도에서 기존의 3상 PWM 정류기와 다른 부분은 스위칭 함수 발생부이다. 그림 4의 (b)는 그림 4의 (a)에서 스위칭 함수 생성 부분으로써, 스위칭 명령을 만들어 주는 블록도이며 단자 전압 명령과 단일 반송파를 비교하여 스위치 명령을 만든다. 기존의 2레벨 컨버터의 삼각파 비교부에 그림 4의 (b)를 적용하면, 비엔나 정류기를 간단하게 제어 할 수 있다. 그림 5는 PWM 방법에 따른 모의해석 결과 이다. 그림5의 (a), (b), (c)는 PWM 방법으로 두 개의 반송파를 이용한 PWM 방식이며, 그림 5의 (d), (e), (f)는 본 논문에서 제안한 단일 반송파 방식으로 두개의 PWM 방식을 비교 하였다. 그림 5의 (a)는 각 상의 스위칭 지령 x_{abc} 와 두 개의 반송파를 비교하는 파형이다. 스위칭 지령 x_{abc} 가 0보다 크면 0~0.5 구간의 반송파와 비교를 하고, x_{abc} 가 0보다 작으면 0~-0.5구간의 반송파와 비교를 한다. (b)는 그림 (a)를 임의의 시간에 대하여 확대한 파형이며, 그림 (c)는 각 상의 스위칭 지령 x_{abc} 와 두 개의 반송파와 비교하여 출력 된 스위칭 명령이다. (d)는 각 상의 스위칭 지령 x_{abc} 와 단일 반송파를 비교하는 파형이다. 단자 듀티 지령 d_{abc} 를 절대값으로 정의 하여 만들어진 x_{abc} 와 단일 반송파를 비교 하는 방법이다. (e)는 그림 (d)를 임의의 시간에 대하여 확대한 파형이며, 그림 (f)는 각 상의 스위칭 지령 x_{abc} 와 단일 반송파와 비교하여 출력 된 스위칭 명령이다. 두 개의 PWM 방법을 비교 하였을 때, PWM 방식은 다르지만 스위칭 명령이 같다는 것을 알 수 있다. 단일 반송파를 이용한 SVPWM방법을 이용하면 S/W 및 H/W의 구현이 간단하다.

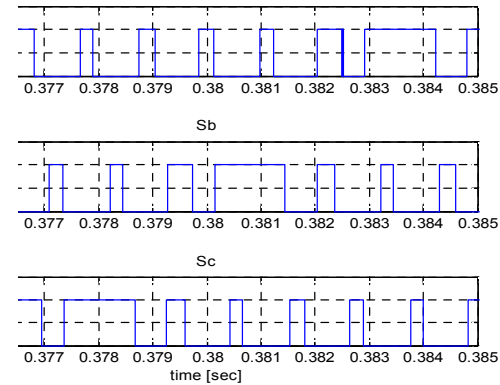
표 1은 비엔나 정류기의 모의해석 및 실험에 사용된 파라미터 값이다. 모의해석 및 실험에서 사용한 스위칭 소자는 MOSFET를 사용 하였다.



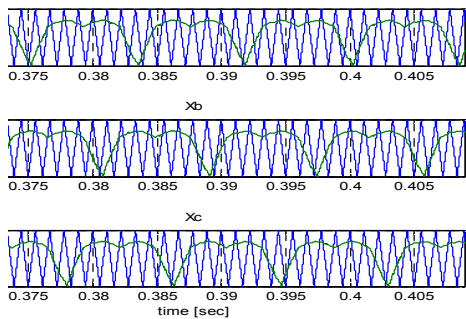
(a) Carrier Waves and Duty Command(d_{abc})



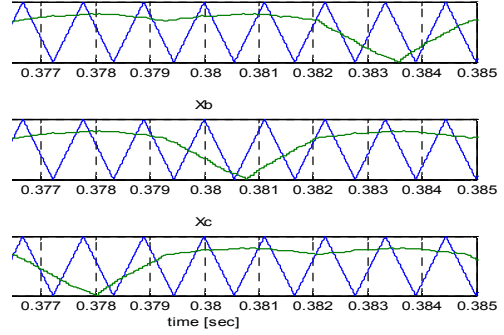
(b) Enlarged Waveform of Carrier Waves and Duty Command(d_{abc})



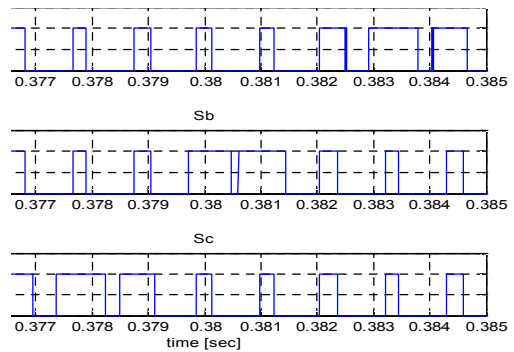
(c) Switching function (S_{abc}) using Two Carriers



(d) Single Carrier and Switching Command(x_{abc})



(e) Enlarged Waveform of Single Carrier and Switching Command(x_{abc})



(f) Switching function (S_{abc}) using Single Carrier

Fig. 5 Switching Function Comparison by the PWM Method

Table 1 Parameters of Vienna Rectifier

Power		2.8kW
Input	Line to Line Voltage	220Vrms
Output	Reference Voltage	392V
Current(Load)		7A
Switching Frequency		20kHz
Inductor		1mH
Capacitor		1360uF

3.1 비엔나 정류기의 전압 제어 및 입력 전류 시뮬레이션 결과

그림 6은 비엔나 정류기의 단일 반송파를 이용한 비엔나 정류기의 입력 전류 및 전압 제어에 대한 시뮬레이션 결과이다. 그림 6의 첫 번째 파형은 입력 상전압(e_{abc})이며 파란색 선이 e_a , 초록색 선이 e_b , 붉은색 선이 e_c 이다. 두 번째 파형은 입력 상전류(I_{abc})이다. 파란색 선이 i_a , 초록색 선이 i_b , 붉은색 선이 i_c 이다. 세 번째 파형은 출력 V_{dc} 이다. 단일 반송파를 이용한 SVPWM방식을 적용한 비엔나 정류기의 시뮬레이션 결과 제어가 잘되는 것을 확인 할 수 있다.

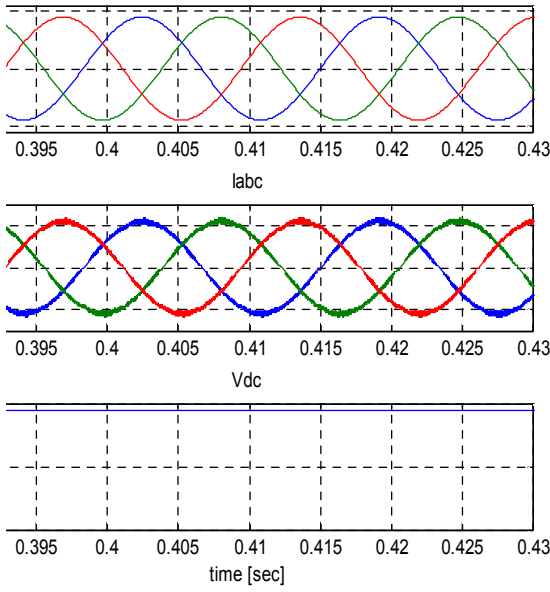


Fig. 6 Simulation Result for Input Current and DC Link Voltage Control of Vienna Rectifier

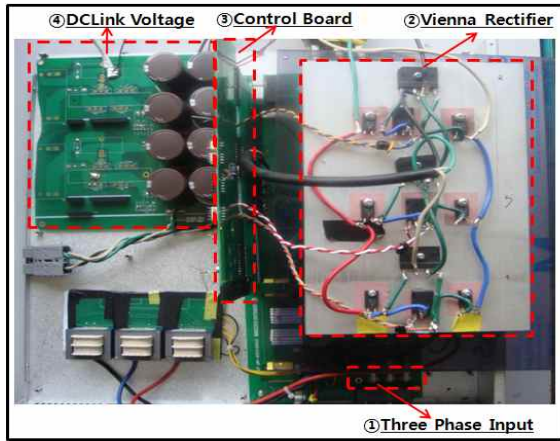
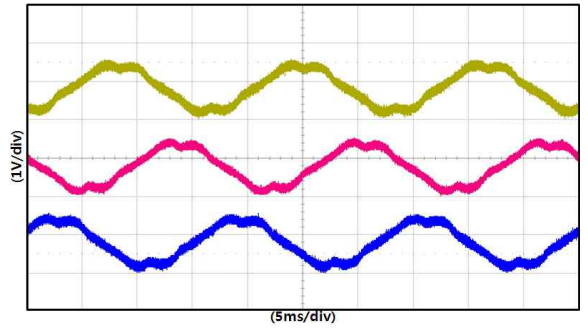


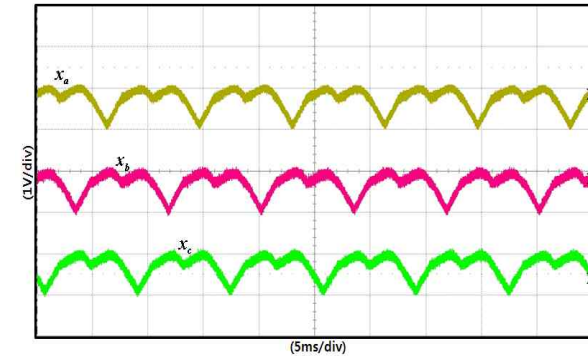
Fig. 7 Photograph of the Experimental Circuit of Vienna Rectifier

3.2 비엔나 정류기의 실험 결과

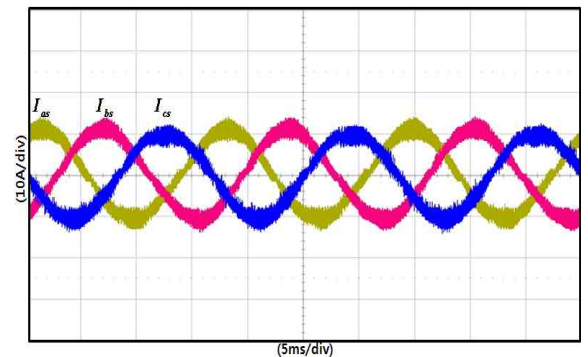
그림 7은 비엔나 정류기의 실제 실험에 사용된 회로의 사진이다. 그림 7의 ①은 3상 입력 부분이며, ②는 비엔나 정류기의 메인 전력 회로 부분이며, 다이오드와 MOSFET 스위치를 사용 하였다. ③은 비엔나 정류기의 전체 시스템을 제어하는 부분이며, 사용된 컨트롤러는 연가형 DSP인 피콜로(Piccolo) 시리즈의 TDS28035를 사용 하였다. 또한 제어부는 입력 전압 및 전류 그리고 출력 Vdc 전압을 계측하여 제어 기능을 갖는다. ④는 Vdc 전압을 출력 하는 부분이다. 그림 8은 비엔나 정류기의 실험 결과이다. 비엔나 정류기의 실험을 위한 조건은 표1의 모의해석 조건과 동일하다. 입력전압 조건은 60[Hz]의 120[Vrms]이 입력된다. DC 출력을 위한 부하는 저항 부하를 사용하였으며, 출력 파워는 2.8[kW]이다. 입력 인덕턴스는 1[mH]이며 PWM 제어 주파수는



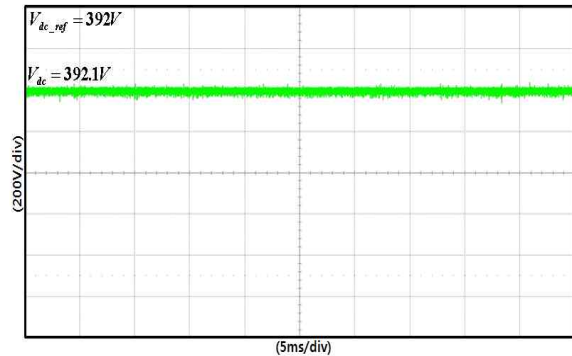
(a) Duty Command of Vienna Rectifier (d_{abc})



(b) Switching Command of Vienna Rectifier (x_{abc})



(c) Input Phase Current (I_{abc})



(d) DC Link Output Voltage (V_{dc})

Fig. 8 Experimental Result for Current and Voltage Control of Vienna Rectifier

20[kHz]로 설정하였다. 그림 8의 (a) 비엔나 정류기 제어를 위한 듀티 지령이며, (b)는 이를 스위칭 지령으로

바꾼 파형이다. 그림 8의 (c)는 제안한 단일 반송파를 이용하여 동작하는 비엔나 정류기의 입력 상전류(I_{abc})이며, 그림 8의 (d)는 제안한 단일 반송파를 이용하여 동작하는 비엔나 정류기의 직류 링크 출력 Vdc(V_{dc}) 값이다. 실험 결과 제안된 단일 반송파를 이용하여 비엔나 정류기를 제어한 결과, 직류 링크 전압 및 입력 전류가 잘 제어됨을 확인하였다.

4 결 론

본 논문에서는 비엔나 컨버터의 단일 반송파 비교 PWM 방법을 제안 하였다. 기존의 2 레벨 컨버터의 총 고조파 왜곡률 THD를 줄이기 위해 3 레벨 컨버터를 사용 하였지만, 3 level 컨버터의 공간 전압 벡터를 이용한 SVPWM 방법의 계산이 복잡하고, 실제 구현이 어려운 문제점이 있었다. 한편, 이 문제점을 해결하기 위해 비엔나 정류기의 두 개의 캐리어 비교 SVPWM 방식을 제안 하였지만, 계산은 간단하지만 실제 구현이 어려운 문제점이 있었다. 이 문제점을 해결하기 위해 단일 반송파를 이용한 비엔나 정류기를 이용하여 제어 및 구현이 간단하다는 것을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제어가 잘 되는 것을 검증 하였다.

이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (한국연구재단-2010-0017029)

참 고 문 헌

- [1] J. Kolar and F. Zach, "A Novel Three-phase utility interface minimizing line current harmonics of high-power telecommunications rectifier modules", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 44, No. 4, pp. 456-467, 1997, August.
- [2] Jarmo Alahuhtala, Heikki Tuusa "Space Vector Modulation Method for Unidirectional Four-Wire Three-Phase/Level Switch (Vienna) Rectifier", *The 7th international Conference on Power Electronics*, pp. 742-748, 2007, October.
- [3] Grzegorz Radomski, "Voltage Space Vector Control System of Vienna Rectifier I", *EUROCON 2007 The International Conference on "Computer as a Tool"*, pp. 1666-1673, 2007, Sept. 9-12.
- [4] Hesameddin Mirzaee Teshnizi, Ali Moallem, and Mohammad Reza Zolghadri Mehdi Ferdowsi, "A Dual-Frame Hybrid Vector Control of Vector-Modulated VIENNA I Rectifier for Unity Power Factor Operation Under Unbalanced Mains Condition", *APEC 2008*, pp. 1402-1408, 2008, Feb. 24-28.
- [5] H. S. Jung, S. J. Nho, J. H. Choi, K. B. Jung "Improvement of Input Current using VIENNA Rectifier" *Proceedings of Electrical Engineering Spring Conference, Part of Machine and Energy Conversion*, pp19-21, 2007, January
- [6] Byung-Chul Yoon, Hee-Keun Shin, Hag-Wone Kim, Kwan-Yuhl Cho, Byung-Kuk Lim, Soon-Sang Hwang "Carrier Comparison SVPWM for Voltage Control of Vienna Rectifier" *Proceedings of Power Electronics Autumn Conference*, 2010.11 pp183-185, 2010, July



윤병철(尹炳喆)

1985년 11월 1일생. 2010년 충주대학교 정보제어공학과 졸업. 2010년~2012년 2월 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 현재 동아일렉콤 연구원.



김학원(金學源)

1968년 3월 30일생. 1989년 고려대 전기공학과 졸업. 1991년 한국과학기술원 전자전산학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전자전산학과 졸업(공학박). 1991년~2008년 LG전자(주) 디지털 어플라이언스 연구소 책임연구원. 2008년~현재 한국교통대(구 충주대학교) 제어계측공학과 조교수. 당 학회 학술위원.



조관열(趙官烈)

1964년 2월 20일생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(공학박). 1993년~2004년 LG전자(주) DA연구소 책임연구원. 2004년~현재 한국교통대(구 충주대학교) 제어계측공학과 부교수. 당 학회 기획이사.



임병국(林炳國)

1951년 1월 17일생. 1978년 숭실대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1972년~1977년 현 지식경제부 기술공무원. 1978년~1987년 수원공업전문대학 조교수. 1987년~현재 한국교통대(구 충주대학교) 제어계측공학과 교수.