

VIENNA 정류기를 이용한 입력파형의 개선

정헌선, 노세진, 최재호, *정교범
충북대학교, *홍익대학교

Improvement of Input Wave Using VIENNA Rectifier

Hunsun Jung, Sejin Noh, Jaeho Choi, *Gyo-Bum Chung
Chungbuk National Univ., *Hongik Univ.

ABSTRACT

This paper proposes an input waveform improvement using VIENNA Rectifier(three-phase/level/switch). VIENNA Rectifier is based on the combination of a three-phase diode bridge and dc/dc converter. It features low input current ripple and sinusoidal mains current form.

1. 서 론

통상적으로 산업용 시스템들은 반도체 스위칭 디바이스를 사용하는 다이오드 정류기 출력을 통해 장치내의 인버터에 평활한 직류전원을 공급한다. 이 때 다이오드 정류기의 비선형 동작 특성에 의해 전압과 전류의 고조파가 발생한다. 고조파에 의해 왜곡된 입력 전압과 전류의 파형은 전력케이블, 전력용 콘덴서, 변압기 등의 전력계통 소자들에 열을 발생시키고, 오동작, 고장과 같은 문제를 발생시키며, 역률 또한 감소시킨다. 이러한 고조파 문제는 3상 다이오드 브리지 정류기와 dc/dc boost 컨버터를 기초로 고안된 three-phase/level/switch PWM Rectifier (VIENNA Rectifier)를 사용함으로써 해결할 수 있다.

본 논문에서는 출력단의 유효전력을 제어하고, SVPWM을 이용하여 VIENNA 정류기를 동작시킴으로써 입력전압과 입력전류의 파형이 개선되어짐을 입증하였다.

2. 본 문

2.1 VIENNA 정류기의 특징

VIENNA 정류기의 회로구조는 그림 1과 같다. 정류기의 입력측 상전압 V_{i_Rec} ($i = A, B, C$)는 각 상의 VIENNA 스위치 sw_j ($j = 1, 2, 3$)의 스위칭 상태와 각 상의 입력전류의 극성에 따라 식(1)과 같이 결정되며, 결과적으로 $+U_O/2, 0, -U_O/2$ 의 입력 전압 특성을 갖는다. 이와 같은 특성 때문에 VIENNA 정류기는 three-level PWM rectifier라고 한다.

$$u_{U,i} = \begin{cases} \text{sign}\{i_{N,i}\} \frac{U_O}{2} & \text{if } s_i = 0 \\ 0 & \text{if } s_i = 1 \end{cases} \quad (1)$$

또한 다이오드 D_{1j}, D_{2j} 의 동작은 전원전압 특성에 따라 달라지며, 입력전압은 다이오드 D_{1j}, D_{2j} 의 동작과 정류기의 VIENNA 스위치 동작에 따라 결정된다. 이 때 VIENNA 정류기

의 입력측 상전압을 d-q 변환하여 얻은 입력전압 v_α, v_β 의 크기와 위상각은 식 (2)와 같이 구할 수 있다. v_α, v_β 의 크기와 위상각에 따라 SECTOR A-F로 구분하며, 하나의 SECTOR는 REGION 1-4로 구분할 수 있다. 구분된 영역을 벡터도로 나타낼 수 있으며 그림 2 (a)는 입력 상전압이 $V_A > 0, V_B \& V_C < 0$ 와 같을 때 VIENNA 정류기의 동작특성을 보여주고, 그림 2(b)는 각각의 스위칭 동작에 의한 VIENNA 정류기의 입력전압을 벡터도로 표현한 것이다.

$$|V_{ref}| = \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2}, \quad \alpha = \tan^{-1} \frac{v_\alpha}{v_\beta} \quad (2)$$

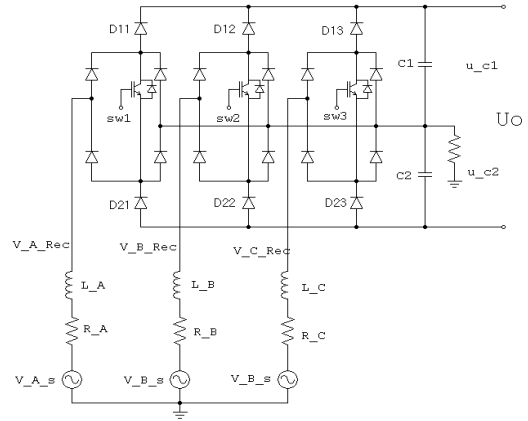


그림 1 VIENNA Rectifier 회로
Fig. 1 VIENNA Rectifier circuit

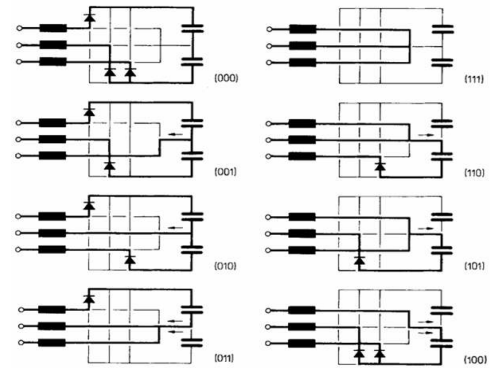


그림 2 (a) $V_A > 0, V_B, V_C < 0$ 에서의 회로 동작
Fig. 2 (a) Operation characteristic for $V_A > 0, V_B, V_C < 0$

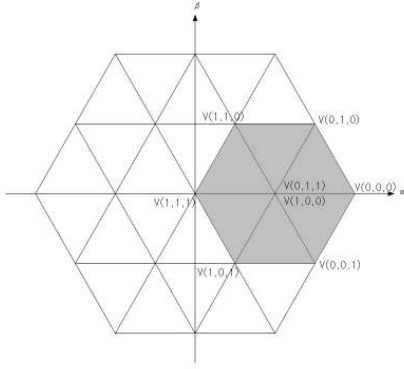


그림 2 (b) VIENNA 정류기의 입력측 전압 벡터도 표현
Fig. 2 (b) Vector diagram of VIENNA Rectifier's input voltage

1.2 PWM 동작

1.2.1 정류기 입력전압 reference 계산

회로의 입력 상전압과 상전류를 d-q변환하여 얻은 $v_\alpha, v_\beta, i_\alpha, i_\beta$ 성분과 원하는 정류기의 입력전압 V_{Rec} 으로부터 P, Q의 Reference P^*, Q^* 값을 구할 수 있고, 이 Reference P^*, Q^* 값으로부터 입력전류의 새로운 $i_\alpha 2^i \beta 2$ 성분을 유도할 수 있다. 유도된 입력전류 $i_\alpha 2^i \beta 2$ 를 통해 회로의 라인 임피던스에서 소모되는 전력을 알 수 있고, 식 (4)와 같이 dc 출력단의 전력 $P_R \cdot Q_R$ 을 계산할 수 있다. 결과적으로, $i_\alpha 2, i_\beta 2$ 와 P_R^*, Q_R^* 로부터 PWM 동작에 필요한 정류기의 입력전압 $v_{R.ref,\alpha}, v_{R.ref,\beta}$ 성분을 식 (5)과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} i_{\alpha 2} \\ i_{\beta 2} \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P^* \\ Q^* \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$= \frac{2}{3(v_\alpha^2 + v_\beta^2)} \begin{pmatrix} v_\alpha - v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P^* \\ Q^* \end{pmatrix}$$

$$P_R = P^* - \frac{3}{2}(i_{\alpha 2}^2 + i_{\beta 2}^2) \cdot R \quad (4)$$

$$Q_R = Q^* - \frac{3}{2}(i_{\alpha 2}^2 + i_{\beta 2}^2) \cdot 2\pi f L$$

$$\begin{pmatrix} v_{R.ref,\alpha} \\ v_{R.ref,\beta} \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} i_{\alpha 2} & i_{\beta 2} \\ i_{\beta 2} & -i_{\alpha 2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_R^* \\ Q_R^* \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$|v_{R.ref}| = \sqrt{v_{R.ref,\alpha}^2 + v_{R.ref,\beta}^2} \quad (6)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{v_{R.ref,\alpha}}{v_{R.ref,\beta}}$$

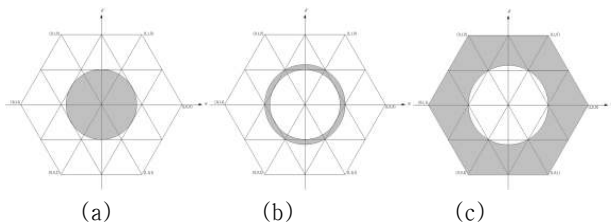


그림 3 기준전압에 따른 Mode 구분
Fig. 3 A classification of Mode by reference voltage
(a) Mode 1, (b) Mode 2, (c) Mode 3

정류기 입력전압의 기준값 $v_{R.ref,\alpha}, v_{R.ref,\beta}$ 의 크기는 식 (5)와

같이 구할 수 있고, 이 기준전압의 크기에 따라 그림 3과 같이 Mode 1, 2, 3로 구분하여 회로의 동작을 확인하였다.

·Mode 1 ($0 \leq |v_{R.ref}| < \frac{1}{2\sqrt{2}}v_d$) : 그림 3 (a)와 같이 $v_{R.ref}$ 의 크기가 안에 위치한 육각형의 내접원보다 작은 경우

·Mode 2 ($\frac{1}{2\sqrt{2}}v_d \leq |v_{R.ref}| < \frac{1}{2}\sqrt{\frac{2}{3}}v_d$) : 그림 3 (b)와 같이 $v_{R.ref}$ 의 크기가 안에 위치한 육각형의 내접원보다 크고, 외접원보다 작은 경우

·Mode 3 ($\frac{1}{2}\sqrt{\frac{2}{3}}v_d \leq |v_{R.ref}| < \frac{1}{\sqrt{2}}v_d$) : 그림 3 (c)와 같이 $v_{R.ref}$ 의 크기가 안에 위치한 육각형의 외접원보다 크고 육각형보다 작은 경우

1.2.2 Time duration

1.1 VIENNA 정류기의 특징에서 언급한 바와 같이 VIENNA 스위칭 동작에 따른 상전압의 벡터도는 VIENNA 정류기의 입력전압의 크기와 위상에 따라 그림 4 (a)와 같이 SECTOR A-F로 구분할 수 있고, 하나의 SECTOR는 다시 네 개의 Region으로 나눌 수 있다. 그림 4 (b)는 Sector A를 네 개의 Region으로 표현한 것이다. 이 때 $v_{R.ref}$ 가 위치하는 Sector와 Region에 따라 벡터 인가시간이 달라진다. 그 중 그림 4 (b)의 V^* 와 같은 벡터의 스위칭 시간 계산은 식 (7)-(11)과 같고, 식 (12)-(15)는 계산된 스위칭 시간이다. 나머지 영역에서의 스위칭 시간 계산도 같은 식을 이용하여 구할 수 있다.

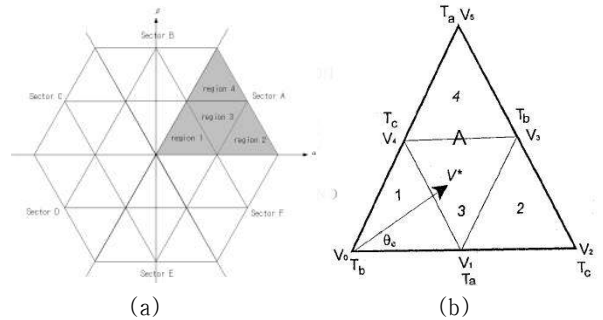


그림 4 (a) Sector A-F의 구분

(b) Sector A에서의 Region 1-4 구분

Fig. 4 (a) A classification of Sector A-F

(b) A classification of Region 1-4 of Sector A

$$V^* = V \cdot e^{j\theta} \quad (7)$$

$$V_1 = \frac{1}{2}, V_3 = \frac{\sqrt{3}}{2}e^{j\frac{\pi}{6}}, V_4 = \frac{1}{2}e^{j\frac{\pi}{3}} \quad (8)$$

$$V_1 \cdot T_a + V_3 \cdot T_b + V_4 \cdot T_c = V^* \cdot T_s \quad (9)$$

$$T_s = T_a + T_b + T_c$$

$$Re: \frac{1}{2}T_a + \frac{\sqrt{3}}{2}\cos\frac{\pi}{6} \cdot T_b + \frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{3} \cdot T_c = V\sin\theta \cdot T_s \quad (10)$$

$$Im: \frac{\sqrt{3}}{2}\sin\frac{\pi}{6} \cdot T_b + \frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{3} \cdot T_c = V\sin\theta \cdot T_s \quad (11)$$

$$T_a = T_s(1 - k\sin\theta)$$

(12)

$$T_b = T_c \{ 2k \sin(\theta + \frac{\pi}{3}) - 1 \}$$

(13)

$$T_c = T_s \{ 2k \sin(\theta - \frac{\pi}{3}) + 1 \}$$

(14)

$$k = \sqrt{\frac{2}{3}} V_d$$

(15)

1.3 시스템의 제어

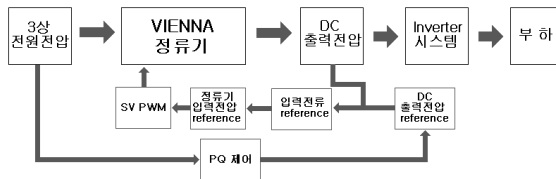


그림 5 전체 시스템 동작의 제어 블록도
Fig. 5 A control block diagram of system

스위칭 컨버터의 입력과형을 개선하기 위한 전체 시스템의 블록도는 그림 5와 같다. 이 때 출력전압과 출력기준전압에 의해 입력전류의 기준전류를 만들 수 있으며, 입력전류의 기준전류로부터 SVPWM의 입력에 필요한 정류기 입력기준전압을 만들 수 있다. 전류 제어 루프는 일반적으로 tolerance band 제어 나 hysteresis 제어로 구성된다. 출력 부분 전압 u_{c1}, u_{c2} 이 각각 $\frac{U_o}{2}$ 가 되어 평형이 되도록 하는 제어가 필요하다.

1.4 시뮬레이션

그림 3에서와 같이 구분된 모드를 사용하여 시스템의 동작을 확인하였고, 각 모드별로 시뮬레이션 한 결과를 그림 6-8에 나타내었다.

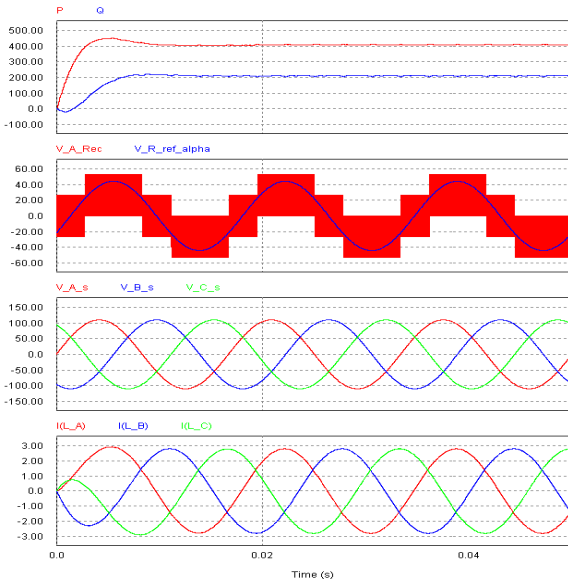


그림 6 Mode 1에서의 P^* , Q^* 를 추종하는 입력단의 전력, 정류기의 입력전압 기준값과 측정값, 입력측 전압과 전류파형
Fig. 6 A VIENNA rectifier input power, input reference

voltage value & measurement value, input voltage & current wave form of Mode 1

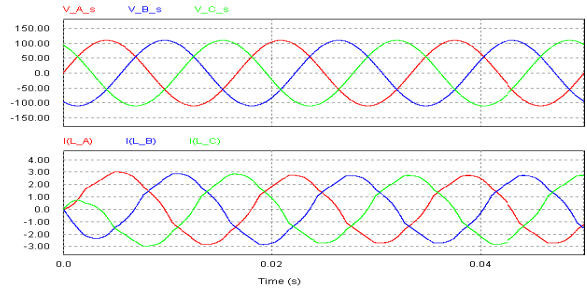


그림 7 Mode 2에서의 입력측 전압과 전류 파형
Fig. 7 A input voltage and current wave form of Mode 2

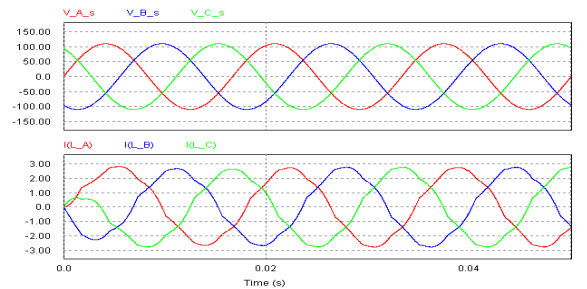


그림 8 Mode 3에서의 입력측 전압과 전류 파형
Fig. 8 A input voltage and current wave form of Mode 3

그림 6은 $v_{R,ref}$ 의 크기가 60으로 모드 1에서 동작할 때, 주어진 P, Q를 추종하는 입력단 전력과 VIENNA 정류기의 입력 전압을 보여준다. 입력전압과 입력전류의 파형이 고조파가 제거된 사인파 형태로 나타남을 볼 수 있다. 그림 7과 그림 8은 각각 Mode 2와 Mode 3로 동작할 때의 입력전압과 입력 전류의 파형이다. Mode 2와 Mode 3 또한 입력전류가 사인파에 가깝게 제어됨을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 VIENNA 정류기를 이용하여 3상 AC전원으로부터 DC전원을 발생시키기 위해 사용되어지던 다이오드 정류기를 이용할 때 발생하는 입력전압과 입력전류의 고조파 문제를 저감시키는 연구를 수행하였으며, 시뮬레이션 결과 입력 전압 전류 파형이 개선되었음을 확인할 수 있다.

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

참고 문헌

[1] Kolar J.W and Franz C. Zach, "A Novel Three-Phase Utility Interface Minimizing Line Current Harmonics of High Power Telecommunicaions Rectifier Modules", *IEEE Transactions Power Electronics*, vol 44, issue 4, page 456-457. 1997

[2] Kolar J.W and Ertl. H and Franz C. Zach, "Space vector-based analytical analysis of the input current distortion of a three-phase discontinuous-mode boost rectifier system", *IEEE Transactions Power Electronics*, vol104, issue 6, page 733-745. 1995

[3] Bimal K. Bose, *Modern Power Electronics And AC Drivers*, pp. 56-62, Prentice-Hall, Inc., 2002