

3상 비엔나 정류기의 효율 향상을 위한 소자 선정 방법

권용대, 박진혁, 이교범
아주대학교

Selection Method of Power Semiconductors for Efficiency Improvement of a 3-phase Vienna Rectifier

Yong Dae Kwon, Jin Hyuk Park, Kyo Beum Lee
Ajou university

ABSTRACT

본 논문은 3상 비엔나 정류기의 효율 향상을 위한 전력 반도체 소자 선정 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 비엔나 정류기의 스위칭 상태에 따른 전류 특성을 고려하여 전력 반도체 소자를 선정한다. 한 레그에서 스위칭 한 주기에 세 개의 다이오드가 사용되며 직류단 및 증성단 연결된 다이오드는 고속 스위칭을 하고 입력단에 연결된 다이오드는 라인 주파수에 맞춰 저속 스위칭을 한다. 따라서, 다이오드 동작을 고려하여 전력 반도체 소자를 선정하여 비엔나 정류기의 효율을 향상시킬 수 있다. 제안하는 소자 선정 방법은 실험 결과를 통하여 그 타당성을 확인한다.

1. 서론

최근 전기차 산업의 발달과 더불어 충전 인프라 구축이 증가하고 있으며 그 중 전기차 배터리 충전소의 확충이 시급하다. 고속 충전을 위해 급속 충전기의 설치 수요가 증가하고 있으며 이에 따라 고전력 및 고효율 급속 충전기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근에는 구성이 간단하고 효율이 우수한 비엔나 정류기가 PWM 컨버터로 많이 사용되고 있다.^{[1][2]}

본 논문에서는 3상 비엔나 정류기의 각 부 동작특성 분석을 통해 비엔나 정류기의 효율을 높일 수 있는 반도체 소자 선정 방법을 제시한다. 3상 비엔나 정류기의 한 레그는 하나의 스위치와 여섯 개의 다이오드로 구성된다. 스위칭 상태에 따른 다이오드의 동작 특성을 고려하여 반도체 소자를 선정하면 비엔나 정류기의 효율을 향상시킬 수 있다. 실험을 통해 제안하는 반도체 소자 선정 방법의 타당성을 검증한다.

2. 3상 비엔나 정류기의 동작 및 손실 분석

3상 비엔나 정류기의 회로는 그림 1과 같다. 한 레그는 하나의 스위치와 여섯 개의 다이오드로 구성된다. 스위칭 한 주기에 D_{xu1} , D_{xp} , D_{xd2} 또는 D_{xu1} , D_{xp} , D_{xd2} ($x=a, b, c$) 세 개의 다이오드가 동작한다. 본 논문에서는 [2]에서 제안한 Carrier based PWM을 스위칭 방법으로 사용한다.

3상 비엔나 정류기의 동작을 고려한 반도체 소자 결정을 위해서 비엔나 정류기의 손실 분석이 필요하다. 비엔나 정류기에서 발생하는 스위치와 다이오드의 평균 전력 손실은 다음과 같이 식(1), (2), (3), 그리고 (4)로 표현된다.^[3]

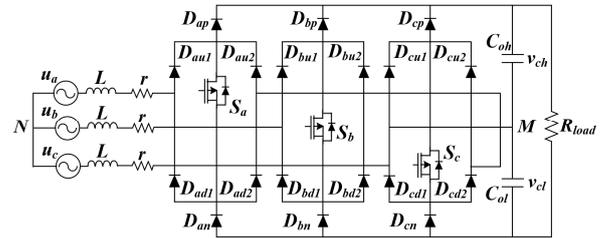


그림 1 3상 비엔나 정류기 회로도
Fig. 1 3-phase vienna rectifier circuit

$$P_{SW,cond,loss} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} P_{on} \cdot kd\theta \quad (1)$$

$$P_{D,cond,loss} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} P_{on} \cdot kd\theta \quad (2)$$

$$P_{D,switching,loss} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} E_{rec} \cdot i_c \cdot f_{sw} d\theta \quad (3)$$

$$P_{SW,switching,loss} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} (E_{on} + E_{off}) \cdot i_c \cdot f_{sw} d\theta \quad (4)$$

여기서 P_{on} 은 스위치 소자의 온 상태 전력 손실이며 k 는 스위치 소자의 온 상태 비율이다. 또한 E_{rec} , E_{on} , E_{off} 는 각각 역회복 에너지 상수, 턴 온 스위칭 에너지 상수, 턴 오프 스위칭 에너지 상수를 의미한다.

식 (1)과 (2)의 P_{on} 은 온 상태일 때 스위치 소자의 저항성분에 의해서 발생하며 식 (5)와 같이 표현이 가능하다. 따라서 전도손실은 온 드롭 저항에 의한 손실로 나타낼 수 있다.

$$P_{on} = R_{on} i_c^2 \quad (5)$$

여기서 R_{on} 은 온 드롭 저항이며 i_c 는 부하 전류이다.

식 (3)과 (4)의 스위칭 손실은 스위칭 에너지 상수와 스위칭 주파수에 의해서 결정되는 것을 알 수 있다.

3상 비엔나 정류기의 다이오드는 크게 입력단 다이오드 D_{xu1} , D_{xd1} 과 직류단 다이오드 D_{xp} , D_{xd} 및 증성단 다이오드 D_{xu2} , D_{xd2} 로 구분 할 수 있다. 그림 2는 상전류 파형과 시간 축을 확대한 다이오드 각 부 파형이다. 직류단 및 증성단 다이오드 D_{xp} , D_{xd} , D_{xu2} , D_{xd2} 는 스위치의 온 오프에 따라서 전류의 흐름이 결정되므로 스위칭 주파수와 동일한 주파수로 스위칭을 하는 것을 확인 할 수 있다. D_{xp} , D_{xd} , D_{xu2} , D_{xd2} 는 다이오드의 역회복 특성을 고려해야 한다. 그러므로 (3)에서 E_{rec} 이 작은FR 다이오드를 사용하면 스위칭 손실을 줄일 수 있다. D_{xu1} , D_{xd1} 은 S_x 의 스위칭 상태와 관계없이 라인 주파수의 반 주기 동안

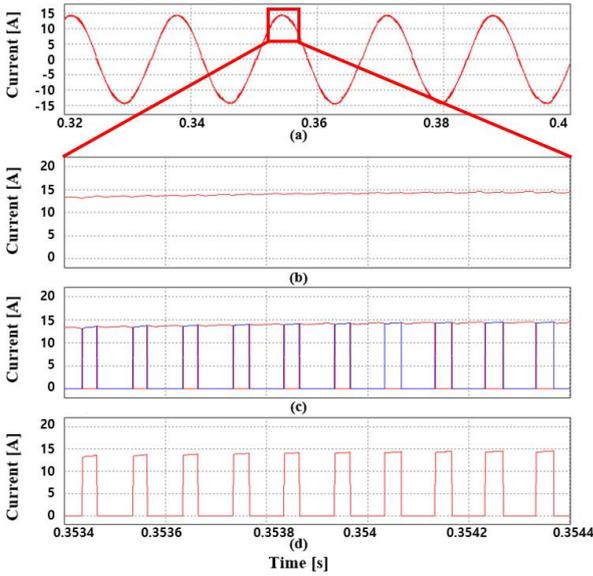


그림 2 (a) a상 전류 파형
(b) D_{au1} 전류 확대 파형
(c) D_{ap} 및 D_{ad2} 전류 확대 파형
(d) S_a 전류 확대 파형

Fig. 2 (a) Phase a current
(b) Close-up D_{au1} current
(c) Close-up D_{ap} and D_{ad2} current
(d) Gate signal of a-leg switch

정류 동작만 수행하므로 라인 주파수와 동일하게 낮은 주파수로 스위칭을 한다. 그러므로 (2)에서 R_{on} 이 작은 소자를 선정하면 D_{xu1} , D_{xd1} 의 전도 손실을 줄일 수 있으므로 비엔나 정류기의 효율을 향상시킬 수 있다.

4. 실험 결과

제안한 방법의 타당성을 검증하기 위해 실험을 통하여 3상 비엔나 컨버터의 효율 측정을 수행하였다. 130 V_{rms}/60 Hz 계통 및 3.5 kW 정격 조건에서 실험을 진행하였다. 인덕터는 3 mH이며 스위칭 주파수는 25 kHz이다. 표 1.은 실험에 사용된 FET와 다이오드의 사양을 나타낸다.

표 1 스위치 소자의 사양
Table 1 Specification of switching devices

	FR Diode	Low Loss Diode	FET
Name	DSEI 60	VS-60EPSPbF	IPW60R045
V_F	2.5 V	1.09 V	-
I_{FSM}	100 A	60 A	60 A
R_{on}	8.3 m Ω	3.96 m Ω	45 m Ω
t_{rr}	40 ns	-	600 ns

본 논문에서 제시한 소자 선정 방법에서 순방향 전압이 낮은 저손실 다이오드는 D_{xu1} , D_{xd1} 에 적용하였고 역회복 특성이 우수한 FR 다이오드는 D_{xp} , D_{xb} , D_{xu2} , D_{xd2} 에 적용하였다. 그림 3은 열화상 카메라를 통해 비엔나 정류기의 각 부 소자에서 발생하는 열을 측정된 결과이다.

그림 3(a)의 경우 D_{xu1} , D_{xd1} 에 FR 다이오드를 사용하기 때문에 큰 전도 손실에 의해 온도가 높은 것을 확인 할 수 있다. 그림 3(b)의 경우 D_{xu1} , D_{xd1} 에 R_{on} 이 작은 다이오드를 사용하기 때문에 그림 3(a)와 비교했을 때 온도가 낮은 것을 확인 할 수 있다.

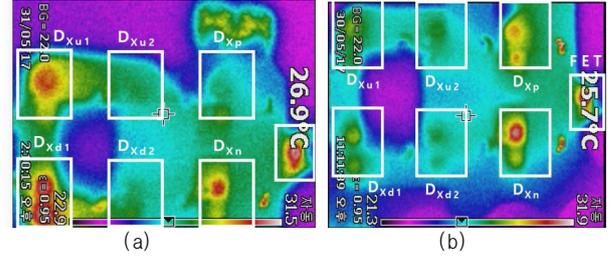


그림 3 (a) 기존의 비엔나 정류기의 손실 분포
(b) 제안한 방식을 이용한 비엔나 정류기의 손실 분포

Fig. 3 (a) Loss distribution of conventional Vienna rectifier
(b) Loss distribution of proposed Vienna rectifier

그림 4는 전 부하 영역에서의 효율 측정 결과를 나타낸다. 제안하는 방식의 효율이 기존 방식보다 정격 조건에서 약 0.8 % 높고 전 부하 영역에서 높은 것을 확인 할 수 있다.

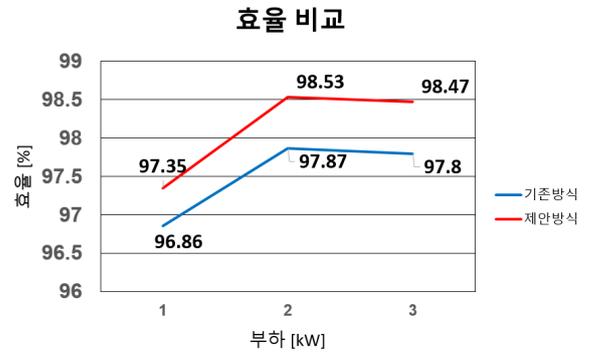


그림 4 부하에 따른 효율 측정 비교
Fig. 4 Efficiency comparison according to partial load

5. 결론

본 논문에서는 각 소자의 동작 특성을 고려한 스위치 소자 선정 방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 R_{on} 이 적은 다이오드를 입력단에 적용하여 전도손실을 줄임으로써 비엔나 정류기의 효율을 개선하였다. 실험을 통해 제안하는 소자 선정 방법을 타당성을 검증 하였다.

참고 문헌

- [1] S. H. Yang, J. H. Park and K. B. Lee, "Current Quality Improvement for a Vienna Rectifier with High Switching," The Trans. of the Korean Power Electron., pp. 181-184, Apr. 2017.
- [2] J. S. Lee and K. B. Lee, "A Novel Carrier Based PWM Method for Vienna Rectifier With a Variable Power Factor," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 1, pp. 3-12, Jan. 2015.
- [3] T. J. Kim, Y. H. Lee and D. S. Hyun, "The Analysis of Conduction and Switching Losses in Multi Level Inverter System," The Trans. of the Korean Power Electron., pp. 111-120, Apr. 2002.