

강압 트랜스를 이용하지 않은 3상 저전압 다이오드 정류회로

문상필, 서기영, 이현우, 김영문, 강옥중  
 경남대학교, \*마산대학, \*\*경남전문학교

Three-phase Low Voltage Diode Rectifier Circuit not using a Step-Down Transformer

S.P.Mun\*, K.Y.Suh\*, H.W.Lee\*, Y.M.Kim\*\*, W.J.Kang\*\*\*  
 Kyungnam Univ\*, Masan College\*\*, Kyungnam Junior College\*\*\*

**Abstract** - In conventional three-phase rectifiers, it was necessary to use a transformer to obtain low output voltage. In this paper, we propose a new three-phase rectifiers circuit that achieves low voltage by using a very simple circuit configuration that does not have a transformer and does not need any complex control. We also describe the operation principle of the proposed circuit, and derive a theoretical formula for its current waveform. On the basis of this formula it also explores the theoretical input/output current characteristics, theoretical current amplification factor, and theoretical output voltage characteristics of these theoretical values with experimentally obtained input /output current characteristics, current amplification factor, and output voltage characteristics, allowed us to confirm the soundness of our theoretical analyses.

1. 서 론

일반적으로 3상 다이오드 정류회로에 있어서 저전압화를 실현하기 위해서는 강압 트랜스가 이용되어지고 있지만 실제적으로 강압 트랜스를 이용하여 저전압을 실현하기는 거의 불가능하다. 본 논문에서는 복잡한 제어를 필요로 한 3상 다이오드 정류회로를 간단한 회로구성으로 저전압화가 가능한 새로운 3상 다이오드 정류회로를 제안하고자 한다. 그리고 제안한 3상 저전압 다이오드 정류회로의 동작원리 및 입력전류의 파형, 입출력전류특성, 출력전압특성등에 대해서 고찰하고자 한다. 이러한 모든 사항은 실험과 시뮬레이션을 통하여 그 유용성을 증명하고자 한다.

2. 본 론

2.1 제안한 회로의 구성 및 동작원리

그림 1은 본 논문에서 제안한 3상 저전압 다이오드 정류회로를 나타낸 것이다. 그림 1에서 제안한 회로는 입력측에 리액터와 다이오드를 직렬로 접속한 것을 3개의 병렬로 접속하고, 출력측에 부하를 연결하였다. 이와 같이 제안회로는 리액터와 다이오드를 이용한 간단한 회로로 구성된다. 그림 1에 있어서 R, S, T의 각상전압을  $e_1, e_2, e_3$ 로 하였으며, RS사이의 선간 전압을  $e_{12}$ , R상의 상전류를  $i_1$ , 출력직류전압을  $V_{out}$ , 출력전류를  $I_{out}$ , 리액터를 각각  $L_1, L_2, L_3$ , 리액터의 내부저항을  $r$ , 다이오드를 각각  $D_1, D_2, D_3$  부하저항을  $R_0$ 로 하였다.

제안한 정류회로는 입력전압의 한 주기동안에 3가지 모드로 동작되어진다. 그림 2에 나타난 3상 입력전압의 구간은  $T_1, T_2, T_3$ 로 나눌 수 있다.

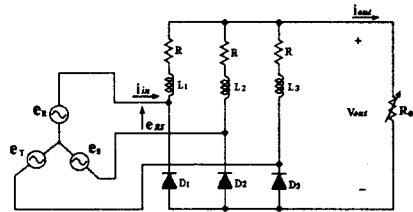


그림 1 제안한 회로  
 Fig. 1 Circuit of proposed

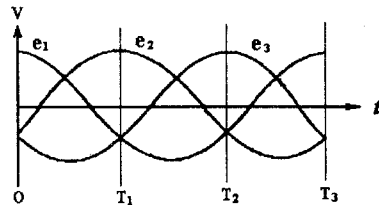


그림 2 3상 입력전압  
 Fig. 2 Three-phase input voltages

각 리액터 전류의 이론식을 도출하기 위해서 리액터  $L_1$ 에 흐르는 전류를  $i_{L1}$ ,  $L_2$ 에 흐르는 전류를  $i_{L2}$ ,  $L_3$ 에 흐르는 전류를  $i_{L3}$ 로 한다. 그림 3은 모드 1의 루프를 나타낸 것이다. 그림 3에서 루프의 전류를  $y_1(t), y_2(t), y_3(t)$ 로 하면 각 리액터와 루프의 전류에는  $i_{L1} = y_1(t), i_{L2} = y_2(t), i_{L3} = y_3(t)$ 의 관계가 성립한다.  $y_1(t), y_2(t), y_3(t)$ 의 초기값을 각각  $I_1, I_2, I_3$ 로 하여 3상 전원을 나타내면 다음과 같다.

$$e_1 = asin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (!)$$

$$e_2 = asin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{2}{3}\pi\right) = asin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \quad (2)$$

$$e_3 = asin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \frac{4}{3}\pi\right) = asin\left(\omega t - \frac{5}{6}\pi\right) \quad (3)$$

위 식을 이용해서 그림 3의 루프, .의 연립미분방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$a \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) - a \sin\left(\omega t - \frac{5\pi}{6}\right) = L \frac{dy_1(t)}{dt} + r y_1(t) + R_0 \{y_1(t) + y_2(t) + y_3(t)\} \quad (4)$$

$$a \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) - a \sin\left(\omega t - \frac{5\pi}{6}\right) = L \frac{dy_2(t)}{dt} + r y_2(t) + R_0 \{y_1(t) + y_2(t) + y_3(t)\} \quad (5)$$

$$0 = L \frac{dy_3(t)}{dt} + r y_3(t) + R_0 \{y_1(t) + y_2(t) + y_3(t)\} \quad (6)$$

식 4, 식 5, 식 6에 의해서 일반해가 얻어진다. 일반적으로 초기치를 결정하는 방법으로 전원 한 주기를 기준으로 하여 초기값과 최종값을 같게 함으로서 해를 도출하고 있지만 본 논문에서는 수식을 간소화하기 위해서 전원 1/3 주기를 기준으로 하여 초기값과 최종값을 구하고자 한다.

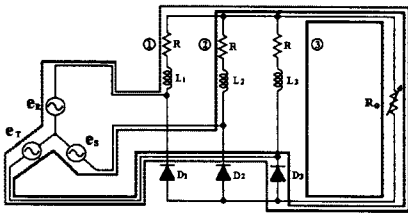


그림 3 회로의 전류루프  
Fig. 3 Current loops of circuit

그림 2에 있어서 각 모드의 시간을 독립적으로  $t_1, t_2, t_3$ 로 해석한다. 즉 기준시간  $t_1$ 은 그림 2의 변수로 같게 하며 기준시간  $t_2$ 는  $t_2 = t + T/3$  되는 변수로서 기준시간  $t_3$ 는  $t_3 = t + 2T/3$  되는 변수로 되게 하면 모드 1의  $e_1, e_2, e_3$  은 모드 2의  $e_2, e_3, e_1$ 과 모드 3의  $e_3, e_1, e_2$ 와 등가 관계가 성립된다. 여기서 모드 1일 때 리액터  $L_1, L_2, L_3$ 에 흐르는 전류의 식을 각각  $y_1(t_1), y_2(t_1), y_3(t_1)$ 로, 모드 2일 때 리액터  $L_1, L_2, L_3$ 에 흐르는 전류의 식을 각각  $y_4(t_2), y_5(t_2), y_6(t_2)$ 으로, 모드 3일 때 리액터  $L_1, L_2, L_3$ 에 흐르는 전류의 식을 각각  $y_7(t_3), y_8(t_3), y_9(t_3)$ 로 하면 모드 1의 각 루프에 흐르는 전류의 식의 초기값은 모드 3을 모드 1로 이동했을 때의 값을 의미한다. 결국 모드 3의 다이오드에 흐르는 전류의 최종값일 때 즉 식을  $t_3 = \frac{2\pi}{3\omega}$ 로 될 때의 루프 전류의 값이다. 따라서 다음과 같이 식 6으로 나타낼 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} y_1(0) &= y_7\left(\frac{2\pi}{3\omega}\right) \\ y_2(0) &= y_8\left(\frac{2\pi}{3\omega}\right) \\ y_3(0) &= y_9\left(\frac{2\pi}{3\omega}\right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

정상해에 의해서  $y_1(t_1) = y_5(t_2) = y_9(t_3), y_2(t_1) = y_6(t_2) = y_7(t_3), y_3(t_1) = y_4(t_2) = y_8(t_3)$ 가 성립한다. 이것을 다시 정리하면 식 7과 같다.

$$\left. \begin{aligned} y_1(0) &= y_2\left(\frac{2\pi}{3\omega}\right) \\ y_2(0) &= y_3\left(\frac{2\pi}{3\omega}\right) \\ y_3(0) &= y_1\left(\frac{2\pi}{3\omega}\right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

표 1은 본 논문에서 제안한 회로의 정수를 나타낸 것이다. 그림 4는 입력전류와 출력전류의 관계를 나타내는 특성 그래프이다. 그림 5는 전류 증폭율을 나타내는 그래프이다. 그림 6에서 전류 증폭율은 교류측의 실효값과 직류 출력측의 직류성분(평균값)의 비를 의미한다.

표 1 회로정수  
Table. 1 Circuit parameters

입력전압 ( $e_1, e_2, e_3$ )	3상 220[V]/60[Hz]
리액터(내부저항)	Mn-Zn Ferrite Core 300[mH]
다이오드 ( $D_1, D_2, D_3$ )	Fast Recovery Diode ERD60-100 1000[V]/60[
부하저항 ( $R_0$ )	가변 (16.3[Ω] 40.3[Ω] 119[Ω])

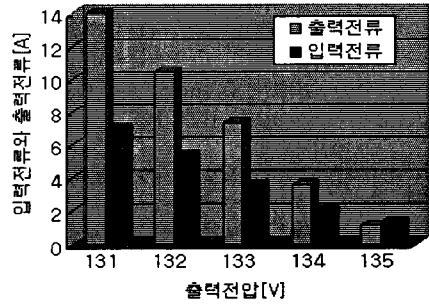


그림 4 입·출력 전류의 특성  
Fig. 4. Characteristics of input and output current

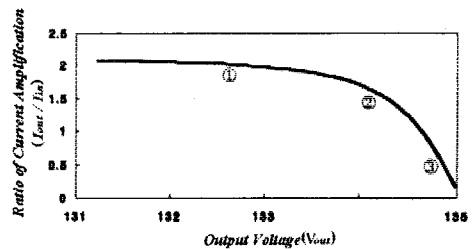


그림 5 출력전압에 대한 입력전류의 비(전류증폭율)  
Fig. 5. Current of amplification ratio

그림 4와 그림 5의 그래프에서 알 수 있듯이 중부하시에는 입력전류에 비해 출력전류가 크므로 전류 증폭율이 일정하다는 알 수 있다. 그러나 점차적으로 경부하로 변화가면서 전류 증폭율도 변화하는 것을 알 수 있다. 결국 제안한 정류회로는 전류증폭특성을 가진 영역으로 되지 않은 영역이 존재하는 것을 알 수 있다. 이 특

이한 현상은 출력측이 무부하시에 출력측의 전류는 0으로 되고, 입력측에는 3개의 L에 의해서 순환전류(무효전류)가 흘러서 전류 증폭율은 0이 되기 때문이다. 만일 부하시 있어서의 앞선 순환전류성분과 부하전류성분과를 중량(重量)시켜서 입력측에 전류가 흐르게 되므로 부하전류가 크게 될 경우 순환전류성분은 상대적으로 무시하는 것이 가능하다. 순환전류성분을 무시하는 것이 가능한 영역이 전류 증폭율은 거의 2의 영역이 되며, 그렇지 않은 영역의 전류 증폭율은 1정도이하의 영역으로 된다고 말할 수 있다. 표 2는 그림 3에 나타난 각 전류의 루프에 대한 시물레이션 해석포인트를 나타낸 것이다.

표 2 해석 포인트  
Table 2 Analysing points

	$R_0[\Omega]$	$I_{input}[A]$	$I_{out}[A]$	$V_{out}[V]$
①	16.3	4.05	8.12	132.73
②	40.3	2.03	3.33	134.12
③	119	1.36	1.13	134.78

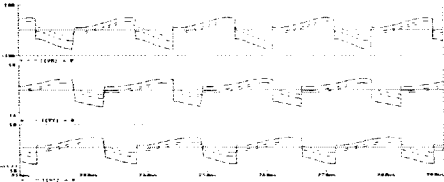


그림 6 상 전류  $i_1$ 의 시물레이션 파형  
Fig. 6 simulation waveform of phase current  $i_1$

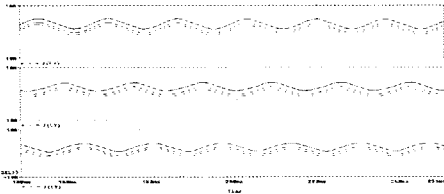


그림 7 리액터 전류  $i_{L1}$ 의 시물레이션 파형  
Fig. 7 simulation waveform of reactor current  $i_{L1}$

그림 6과 그림 7에서 포인트에 따라 전류증폭이 큰 영역에서는 상전류  $i_1$ 의 파형은 방형파에 가깝게 되고 있는 것을 알 수 있으며 리액터 전류  $i_{L1}$ 의 파형에서는 전류증폭이 크게됨에 따라서 리액터 전류  $i_{L1}$ 의 직류성분은 서서히 크게되는 것을 알 수 있다.

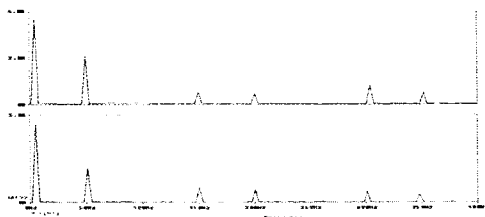


그림 8 주파수 분석  
Fig. 8 frequency spectrum

그림 8은 표 2의 해석 포인트 ①에 있어서의 입력전류의 주파수 스펙트럼 분석을 나타낸 것이다. 그림 8에서 입력전류에는 주파수가 기본적으로 많이 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 특히, 제 2차 고조파 성분은 기본파에 대해서 46.7[%]로 높은 값을 나타내기 때문에 대용량의 분야에서의 실용화가 불가능하다는 문제점이 발생하는데 본 연구에서는 이러한 부분을 이론적으로 부가하여 설명하고자 한다. 먼저 리액터 L의 크기를 무한대로 하였으며 내부저항 r을 영으로 한 이상적인 조건에서 이론적인 해석을 하였다.

## 2.2 실험결과 및 검토

시물레이션 결과와 실험결과를 비교하기 위해 실험조건은 표 1의 회로정수와 동일하게 하였다. 그림 9는 상전압  $e_1, e_2, e_3$ 와 상 전류  $i_1, i_2, i_3$  그리고 리액터 전류  $i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}$  및 다이오드 전류  $i_{D1}, i_{D2}, i_{D3}$ , 출력전류  $i_{out}$ 의 실험 파형을 나타낸 것이다. 해석상의 편리성을 고려하여 표 2에 표현된 해석 포인트 . . . 을 . . . 으로 설정하여 3단계의 부하가 변한 경우의 상 전류  $i_1$ 와 리액터 전류  $i_{L1}$ 의 실험 파형을 그림 10과 그림 11로 나타내었다.

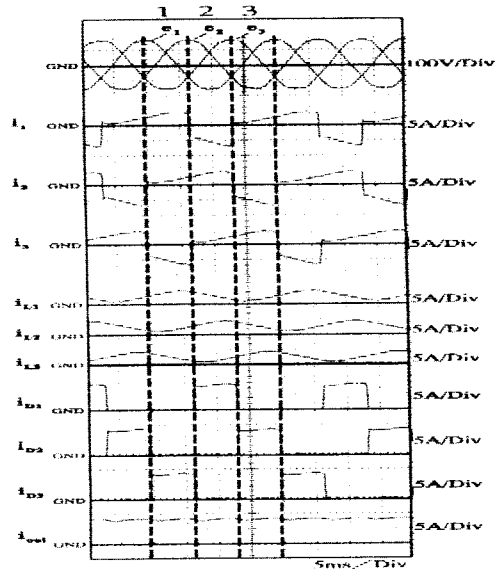


그림 9 각 부의 실험 파형  
Fig. 9 Experimental waveforms of each part

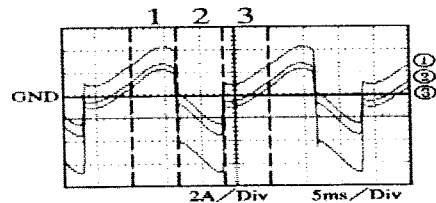


그림 10 상 전류  $i_1$ 의 실험 파형  
Fig. 10 Experimental waveforms of phase current  $i_1$

그림 9의 전류의 실험 파형에서 시뮬레이션과 동일하게 각상의 리액터 전류  $i_{L1}$ ,  $i_{L2}$ ,  $i_{L3}$  가 기본형 리플이 위상을 120로 하고 있다는 것을 알 수 있다. 그것에 의해 제안된 회로 있어서 기본파의 리플을 서로 효과적 평활화시킨 출력전류  $i_{out}$ 로 되는 특성을 가지고 있는 것을 실험을 통하여 검증하였다.

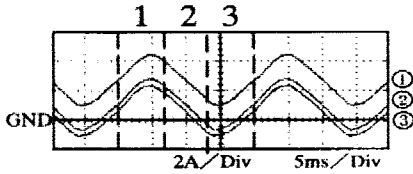


그림 11 리액터 전류  $i_{L1}$ 의 실험 파형  
Fig.11 Experimental waveform of reactor current  $i_{L1}$

그림 10과 그림 11에서 상전류  $i_1$ 는 전류 증폭이 큰 영역에서 구형파에 가깝게 되고 있다는 것을 알 수 있다. 여기서 리액터 전류  $i_{L1}$ 에서는 전류 증폭이 크게 되면 리액터 전류  $i_{L1}$  직류성분을 서서히 크게 되는 것을 알 수 있다.

이상과 같이 실험결과와 시뮬레이션 결과가 양호하게 일치하였으며 그 타당성을 확인하였다. 제안한 정류회로를 효율을 알기 위해서 부하저항을 경부하에서의 중부하로 변환시켜 입력 전력과 출력 전력의 비를 비교하면 제안된 정류회로가 전류증폭특성을 나타낸 영역(중부하시)에서는 효율을 95[%]이상으로 높은 값을 나타내었다. 그러나 경부하시에 있어서는 효율은 급속히 저하하고 있는 것을 알 수 있다.

### 3. 결 론

일반적으로 3상 다이오드 정류회로에 있어서 저전압화를 실현하기 위해서는 강압 트랜스가 이용되어지고 있지만 실제적으로 강압 트랜스를 이용하여 저전압을 실현하기는 거의 불가능하다. 이러한 문제점을 개선하고자 본 논문에서는 복잡한 제어를 필요로한 간단한 회로구성에서 저전압화가 가능한 새로운 3상 다이오드 정류회로를 제안하였다. 제안한 회로는 3개의 다이오드와 3개의 리액터로 구성되며, 리액터에 흐르는 직류전류의 기본파 리플 성분은 거의 출력측에는 나타나지 않는다. 때문에 본 제안회로는 효과적으로 평활화시킨 출력전류로 되는 특징을 가지고 있는 것을 시뮬레이션과 실험결과에서 의해서 검증하였다.

### (참 고 문 헌)

- [1] A. R. Prasad, P. D. Ziogas : An Active Power Factor Correction Technique for Three-Phase Rectifiers, IEEE PESC, pp.58-66, 1989
- [2] A. R. Prasad, P. D. Ziogas : An Active Power Factor Correction Technique for Three-Phase Diode Rectifiers, IEEE Trans, Vol.6, No. 1, pp.83-92, 1991
- [3] G. Rim and R. Krishnan : AC to DC power converter with unity power factor and sinusoidal input current, APEC, Conf. Rec., pp.400-406, 1991
- [4] 中野, 平地 : 配電流整流回路, 電氣論D, Vol. 116, No. 10, pp. 1081-1082, 1996
- [5] 古賀外 1人 : コンデンサ入力形三相整流回路の力率改善における非線形リアクトルの影響, 平成12年 電氣學會全國大會, 2000 IEE Japan, No.4, pp1374-1375, 2000
- [6] Hirotsami, Nakano, S. Murakami, T. Okubo, Y. Nishi : Discussion of Design for Step-Down Three-Phase DC-DC Converter, 2000 IEE Japan, No.4, pp1434-1435, 2000