

3상 브리지 AC/DC 컨버터의 고조파 저감에 대한 연구

(A Study of New Technique of Harmonic Elimination in Three-Phase Bridge AC/DC Converter)

김병진* · 문학룡* · 김준환** · 김상우** · 전희종***

(Beung-Jin Kim · Hark-Yong Moon · Joohn-Hwan Kim · Sang-Woo Kim · Hee-Jong Jeon)

요 약

본 연구는 산업계에서 많이 사용되고 있는 3상 브리지 다이오드 정류기에서 입력측에 발생하는 고조파 문제를 개선하고자 한다. 다이오드 방식은 제어기가 필요치 않기 때문에 간단하고 높은 신뢰성을 갖지만 입력단 전류의 불연속성으로 인하여 전류파형의 왜곡이 생긴다. 본 연구에서는 기존의 3상 브리지 다이오드 정류기에 부가적으로 부착 가능한 3개의 스위치를 제안하여 매순간 3상의 전류 중에서 다이오드 정류기로 흐르지 못한 한 상의 전류를 제안한 스위치를 통하여 흐르게 하여 전류가 연속적으로 흐르게 하였다. 연속적인 전류의 흐름은 고조파 성분을 감소시키며 역률 또한 개선시키는 것을 모의 실험과 실험을 통하여 입증하였다.

Abstract

A new technique for shaping the line current and reducing the total harmonic distortion in a three-phase rectifier is introduced. A review of the problems inherent in a three-phase diode rectifier feeding capacitive load and the possible solutions are first presented. The proposed 3 bidirectional switches and their operation are presented. The main features of this paper are low cost, high efficiency and simplicity. A simulation and experiment results show its good action.

1. 서 론

본 연구에서는 산업계에서 널리 사용하고 있는 3상 브리지 다이오드 정류기에서 고조파의 영향을 줄일 수 있는 방법을 제안하였다. 직류전원을 얻기 위

한 다이오드 정류 방식은 제어기가 없어서 회로가 간단하고 신뢰성이 높으며 특히 가격이 저렴하다는 장점으로 인하여 아직까지 전기 산업 분야에서 많이 사용하고 있다. 그러나 다이오드 정류기의 입력단 선전류의 불연속성은 상용 전원의 효율을 저감시키

*정회원 : 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사과정

**정회원 : 숭실대학교 대학원 전기공학과 석사과정

***정회원 : 숭실대학교 공과대학 전기공학과 교수

접수일자 : 1997. 10. 21

는 문제, 인근계통에 고조파 장애 그리고 부하에 대한 지속적인 스트레스로 수명단축을 유발한다 [1, 2].

특히 고조파는 전기설비에서 잡음이나 과열을 일으키며 잘못된 게이팅을 유발하여 인버터 또는 컨버터의 오동작을 유발할 수 있고 통신장애의 원인이 되기도 한다. 고조파가 유발하는 이러한 여러 문제점을 고려해 세계 각국은 전기설비가 발생하는 고조파에 대한 규제를 만들어 상용전원 장치가 높은 역률과 낮은 전류왜곡을 갖도록 규제하는 방안이 검토, 실시중이다[3].

본 연구에서는 다이오드 정류기의 입력단 선전류의 불연속성으로 생기는 문제를 해결하기 위해 기존의 3상 브리지 다이오드 정류기에 3개의 스위치를 설치하여 도통되지 않는 상의 전류가 이 스위치를 통해서 연속적으로 흐를 수 있게 함으로써 입력단 전류의 종합고조파왜율(total harmonic distortion)과 역률(power factor)의 개선을 가져왔다. 제안된 방식의 성능을 모의실험과 실험을 통하여 입증하였다.

2. 다이오드 정류기의 고조파 영향과 문제점

그림 1(a)는 일반적인 3상 브리지 다이오드 정류기의 회로구성을 보여주고 있다. 직류 전압보다 입력단 전압이 높은 경우에 입력단에서 부하측으로 전류가 유입된다. 그 결과 대부분의 전류는 콘덴서의 용량에 따라 파형이 왜곡되는 펄스의 형태를 갖는다. 따라서 입력단 선전류는 큰 종합고조파왜율을 가지며 특히 5, 7 고조파 성분이 크게 나타난다.

그림 1(b)는 다이오드 정류기의 입력측의 상전압과 선전류의 파형을 보여주고 있다. 전압이 영점을 지나서 전/후 30° 동안 전류가 흐르지 않음을 알 수 있다. 그림 1(c)는 이 선전류의 주파수 분석을 나타내고 있다. 5차 고조파의 크기가 1차 고조파의 약 76[%]이며 7차 고조파 역시 57[%]에 이르는 것을 볼 수 있다.

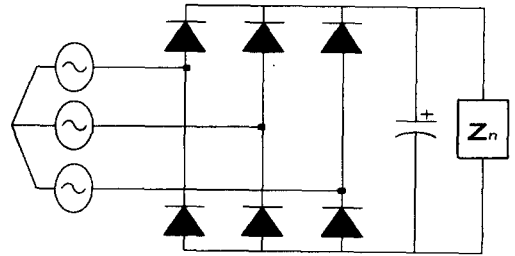


그림 1(a). 일반적인 다이오드 정류기

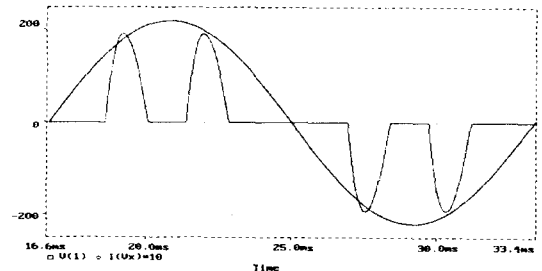


그림 1(b). 일반적인 3상 다이오드 정류기의 상전압과 선전류 파형

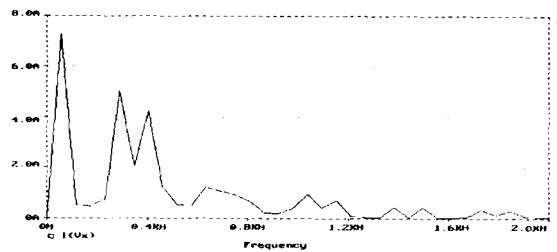


그림 1(c). 일반적인 3상 다이오드 정류기 입력 선전류의 주파수 해석

Fig. 1. Waveforms and harmonic spectrum of the line currents of the conventional rectifier

3. 제안된 스위치의 구성과 동작

그림 2(a)는 본 연구에서 제안된 시스템의 전체 구성도이다. 일반적인 다이오드 정류기에 스위칭 소자와 제어회로가 부가되었고 콘덴서가 병렬로 연결되어 있는 것이 차이점이다. 부하측에 흐르는 전류는 매순간 3상중에서 가장 높은 상에서 가장 낮은 상으로 흐르게 되므로 나머지 한 상의 전류가 불연속적으로 흐르게 된다. 이때 다이오드로 도통되지 않는 상의 전류는 부가한 스위치 S1, S2, S3중에서 한곳을 통하여 흐르게 되어 전류의 연속성을 얻을 수 있

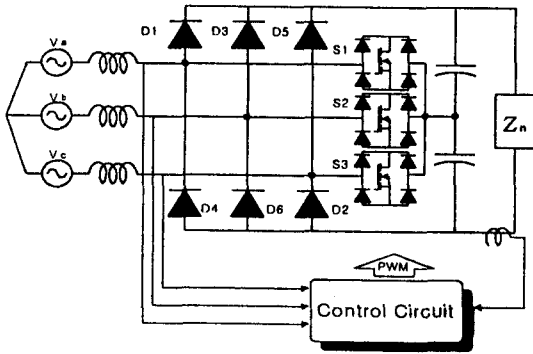


그림 2(a). 제안된 스위치와 정류기

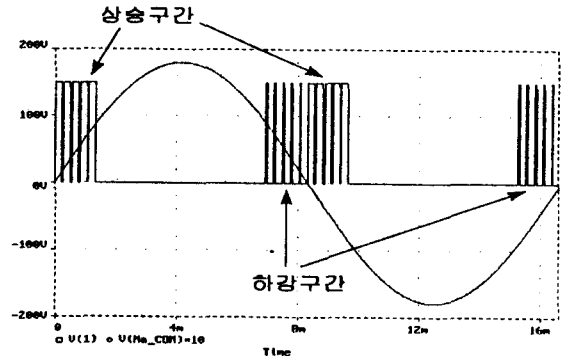


그림 2(b). 상전압 파형과 PWM

그림 2. 제안된 시스템의 상전압과 PWM

Fig. 2. Voltage waveform and PWM of the proposed system

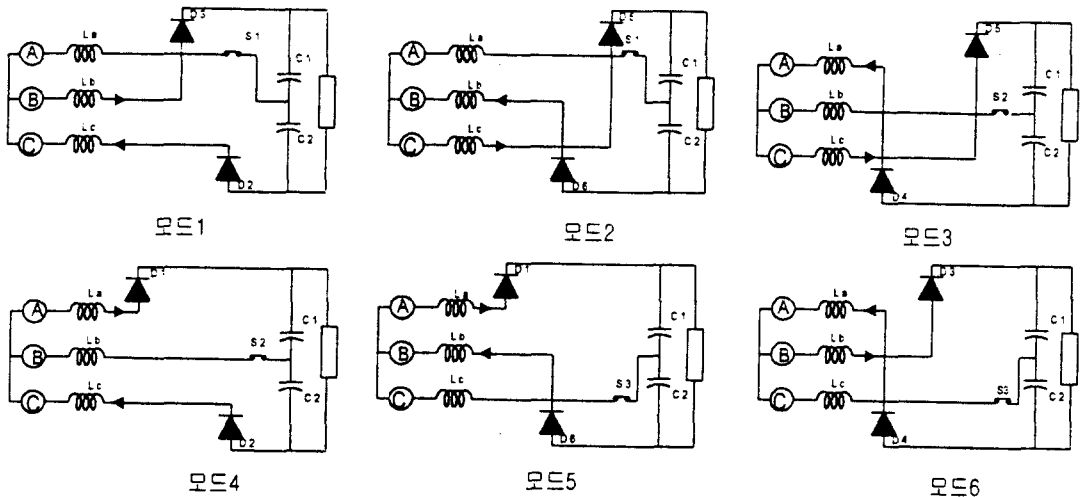


그림 3. 제안된 정류기의 동작 회로

Fig. 3. Stages of operation of the proposed converter

다. 이때 각 상의 스위치 S1, S2 및 S3는 상전압이 영점을 지난 전/후 30° 동안 PWM 동작을 한다. 이 두 구간을 각각 최대나 최소 지점을 향해서 증가하는 30° 동안을 증가구간이라고 하고, 반대로 최대나 최소점에서 하강하는 30° 동안을 감소구간이라고 하였다. 제어회로는 검출부로부터 매 순간 다이오드로 도통되지 않는 상을 검지하여 부하에 따라서 최소의 종합교조파왜율을 갖게 하는 PWM 파형을 인가한다.

그림 2(b)에서는 한 상의 전압의 상승과 하강구간 30° 동안에 인가되는 PWM 파형을 보여준다.

제안된 스위치의 동작은 6개의 모드를 반복하며 동작한다. 각 모드의 동작회로를 그리면 그림 3과 같다. 모드 1에서는 B, C상 전류는 다이오드를 통해서 흐르고, A상 전류는 스위치 S1을 통해서 흐르게 된다. 모드 2에서는 C, B상 전류는 다이오드를 통해서 흐르고, A상 전류는 스위치 S1을 통해서 흐르게 된다. 모드 3에서는 C, A상 전류는 다이오드를 통해서 흐르고, B상 전류는 스위치 S2를 통해서 흐르게 된다. 모드 4에서는 A, C상 전류는 다이오드를 통해서 흐르고, B상 전류는 스위치 S3을 통해

서 흐르게 된다. 모드 5에서는 A, B상 전류는 다이오드를 통해서 흐르고, C상 전류는 스위치 S2를 통해서 흐르게 된다. 모드 6에서는 B, A상 전류는 다이오드를 통해서 흐르고, C상 전류는 스위치 S3을 통해서 흐르게 된다. 스위치를 통해서 흐른 전류는 두개의 콘덴서를 거쳐서 부하로 흐르게 된다.

4. 시스템의 구성

전체 시스템의 블록도는 그림 4와 같다. 매 사이클마다 스위치 S1, S2 및 S3은 각각 120° 동안 동작한다. 즉, 상전압이 한 주기 동안에 갖는 두 개의 영점에서 30° 크기를 갖는 2개의 상승 구간과 하강 구간에서 스위칭을 한다.

부하변동에도 작은 중합고조파왜율을 갖도록 모의 실험을 반복하여 상승구간과 하강구간에서의 듀티비(duty ratio)를 그림 5와 같이 각각 나타내었다. 프로세서의 계산 양을 줄이기 위해서 이 값들을 직선화하여 식 (1)과 (2)를 얻었다. 프로세서는 식 (1)과 (2)를 통하여 입력된 전류의 변화에 따른 듀티비를 결정한다. 따라서 만약 전부하를 인가한 경우에 상승 구간의 PWM 듀티비는 100[%]가 되고 하강 구간에서의 PWM 듀티비는 0[%]가 된다. 실험에서는 작은 부하일 경우에 측정 전압이 작아서 정확한 스위칭 구간을 찾기 어려우므로 전부하의 20 [%]이하인 경우에 스위칭을 하지 않았다.

$$W1[\%] = 0.55 \cdot I_{normal} + 46 \quad (1)$$

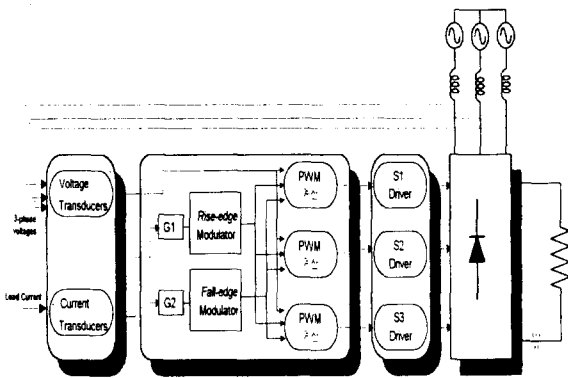


그림 4. 전체 시스템 블록도
Fig. 4. Total system block diagram

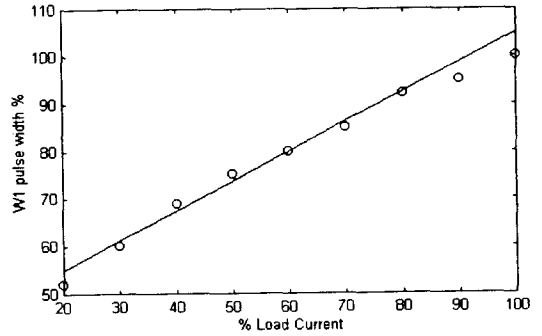


그림 5(a). 상승 구간의 PWM 선정

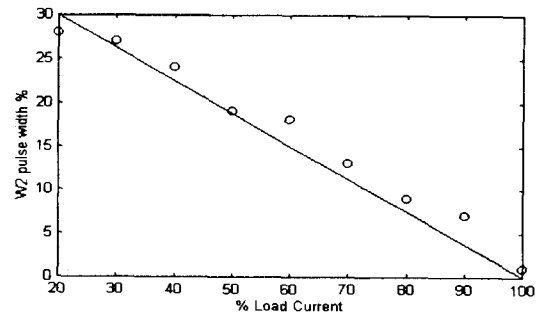


그림 5(b). 하강 구간의 PWM 선정

그림 5. 부하변동에 따른 펄스폭 선정
Fig. 5. Selection of pulse width for varying load

5. 정류기의 설계와 모의실험

본 연구에서 제안한 회로의 동작을 PSPICE를 이용하여 모의실험하였다. 스위치에 전류가 최대로 흐르는 순간은 영점의 전/후 30°이다. 식 (3)에서 스위치에 걸리는 최대 전류는 전부하전류의 60[%] 정도가 된다. 따라서 설계한 정류기의 전부하전류가 약 6.7[A]이므로 스위치의 최대전류는 4.2[A]가 된다. 최대전류 값을 이용하여 스위칭 소자의 정격을 정할 수 있다. 스위치에 흐르는 평균전류는 식 (4)에서 설명된 것과 같이 부하전류의 3.3[%] 정도이다. 따라서 스위치에 흐르는 전류의 실효값은 식 (5)을 통하여 부하전류의 11.1% 정도임을 알 수 있다.

3상 브리지 다이오드 정류기에서 평균 출력전압은 식(6)에 의해 297[V]임을 알 수있고 2[kW]의 출력을 얻기 위해 부하저항은 44.55[Ω]을 사용하였다. 그리고 두 개의 콘덴서(600uF)를 사용하여 직

류출력단의 전압을 평활화 하였다. 스위치를 구성하는 100[%]부하 사용시에 상전압과 입력단 선전류의 파형은 그림 6(a)와 같고 선전류의 주파수 분석은 그림 6(b)와 같다. 전반적으로 일반적인 정류기에 비해서 고조파가 감소함을 볼 수 있다. 따라서 종합고조파왜율은 7%이고 역률 역시 개선되어 0.997 정도의 값을 얻었다.

$$I_{max} = \frac{\sqrt{2}V_i}{2\sqrt{3}\pi fL} (1 - \cos(\alpha_{max}))$$

$$= \frac{\sqrt{2}V_i}{2\pi fL\sqrt{3}} (1 - \cos(\frac{\pi}{6})) = 0.6I_0 \quad (3)$$

$$I_{av} = \frac{1}{\pi} \int_0^{30^\circ} \left\{ \frac{\sqrt{2}V_i}{2\sqrt{3}\pi fL} (1 - \cos(\alpha)) \right\} d\alpha$$

$$= \frac{\sqrt{2}V_i}{2\sqrt{3}\pi^2 fL} (\frac{\pi}{6} - \sin(\frac{\pi}{6})) = \frac{I_0}{30} \quad (4)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{30^\circ} \left\{ \frac{\sqrt{2}V_i}{2\sqrt{3}\pi fL} (1 - \cos(\alpha)) \right\}^2 d\alpha}$$

$$= \frac{I_0}{9} \quad (5)$$

$$V_{dc} = \frac{2}{2\pi/6} \int_0^{30^\circ} \sqrt{3}V_m \cos(\alpha) d\alpha$$

$$= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m = 1.654V_m \quad (6)$$

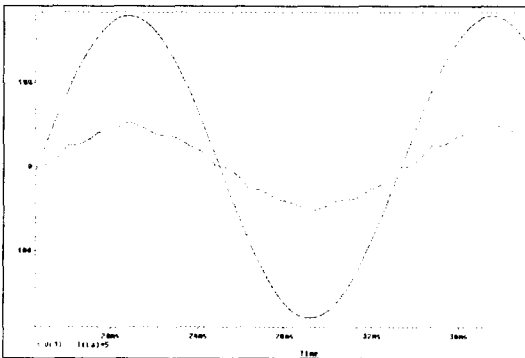


그림 6(a). 전부하시 상전압과 선전류

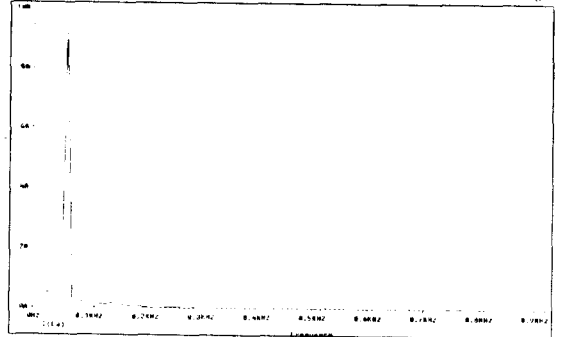


그림 6(b). 전부하시 선전류의 주파수 분석

그림 6. 전부하시 상전압과 선전류파형 그리고 선전류의 주파수 분석

Fig. 6. Waveforms of phase voltage, line current and frequency analysis of current with full load

6. 실험결과 및 고찰

1 제어부는 TI사의 32(bit) 프로세서인 TMS320C31를 사용하였으며 전압 트랜듀서를 사용하여 감지된 전압을 디지털 값으로 변환하였다. 3상의 전압 값들 중에서 중간값을 갖는 상은 그 순간 다이오드를 통하여 전류가 흐르지 않는 상이므로 이 상에 해당하는 스위치를 단락시키면 된다.

그림 7과 같이 MOSFET(IRFP450)를 이용하여 양방향 스위치를 구성하였다. 스너버 회로에 사용되는 콘덴서는 0.1u(F), 저항은 1k(Ω) 그리고 다이오드(SD5)는 1N4004를 사용하였다.

그림 8는 전부하가 인가될 경우에 스위칭되는 실제의 모습을 나타내고 있다. 스위칭은 영점을 기준으로 전/후 30° 동안 일어난다.

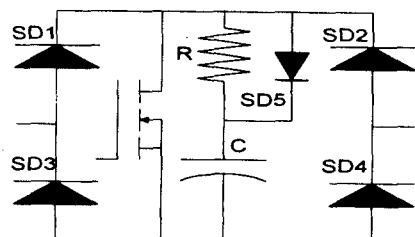


그림 7. 제안된 양방향 스위치

Fig. 7. Proposed bidirectional switch

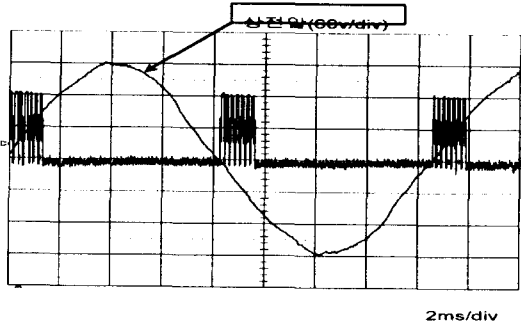


그림 8. 상승구간에서의 상전압과 PWM
Fig. 8. Waveforms of phase voltage and PWM at rising time

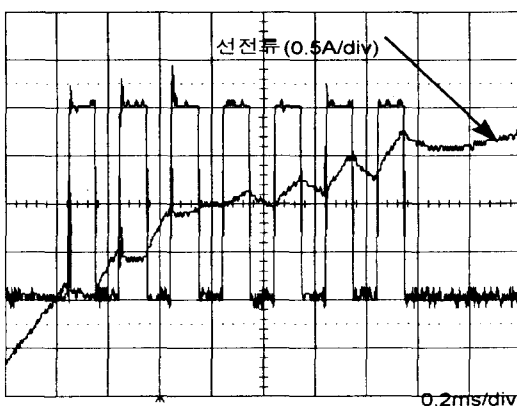


그림 9. 상승구간에서의 PWM인가시 선전류의 증가
Fig. 9. PWM and Line current build up at risin time

그림 9은 전압이 양의 값을 갖는 상승 구간에서 스위칭이 일어나면서 이 상의 전류가 증가함을 나타내고 있다.

그림 10는 일반적인 3상 브리지 다이오드 정류기의 상전압과 선전류 파형이다. 직류링크단에 콘덴서의 영향으로 전류에 고조파 성분이 많이 포함되어 있다. 물론 평활용 콘덴서를 제거하면 입력단 선전류의 종합고조파왜율은 개선되나 출력측의 직류전류에 리플이 크게 포함되게 된다. 영점을 기준으로 30° 구간에서 전류가 흐르지 않는 것을 볼 수 있다. 또한 파워 아날라이저(PM3000A)를 이용하여 입력단 선전류를 주파수 분석하면 5차 고조파가 기본파의 58(%) 정도이고 7차 고조파 역시 기본파의 33(%)에 정도이다. 이 경우 종합고조파왜율은 73(%)이고 역률은 0.8이다.

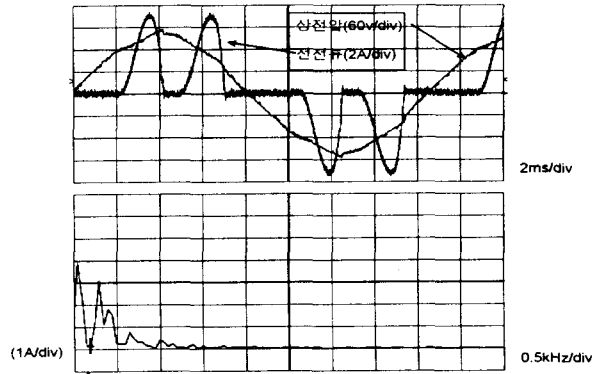


그림 10. 일반적인 다이오드 정류기의 선전류, 상전압과 선전류의 주파수 분석
Fig. 10. Waveforms of line current phase voltage and frequency analysis of line current in the typical diode rectifier

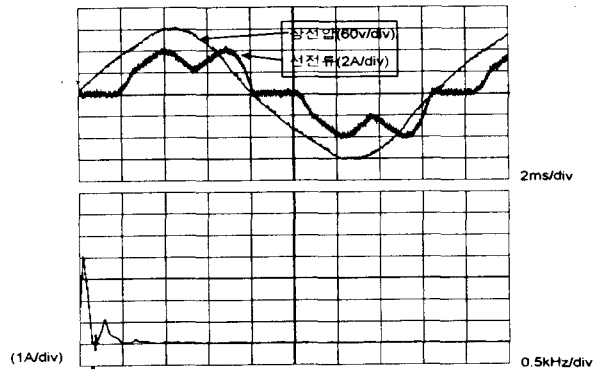


그림 11. 입력필터를 갖는 다이오드 정류기의 선전류, 상전압과 선전류의 주파수 분석
Fig. 11. Waveforms of line current phase voltage and frequency analysis of line current in the diode rectifier with input filter

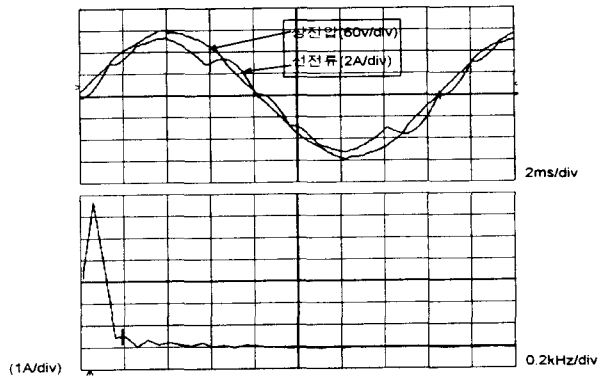


그림 12. 제안된 정류기의 선전류 상전압과 선전류의 주파수 분석
Fig. 12. Waveforms of line current, phase voltage and frequency analysis of line current in the proposed rectifier

그림 11는 일반적인 3상 브리지 다이오드 정류기에 전류 개선을 위해 입력단 필터용 리액터(12mH)를 부착했을 경우의 전압과 전류의 파형이다. 필터가 없었던 경우에 비해 입력단 선전류의 파형은 개선되었지만 영점을 기준으로 30° 구간에서 역시 불연속적인 모습을 보여주고 있다. 선전류에 대한 주파수 분석에서 전류의 5차 고조파가 기본파의 31[%]에 이르고 7차 고조파 역시 기본파에 12% 정도이다. 종합고조파왜율은 35.87[%]로 줄어들었고 역률 역시 0.94로 개선되었다.

그림 12는 제안된 방식의 정류기 입력단의 선전류와 상전압의 모습을 보여 주고 있다. 전류가 연속적으로 흐르며 역률 또한 개선된 모습을 보여 주고 있다.

표 1는 세가지 방법으로 구해진 입력단의 선전류를 주파수 분석한 결과를 나타낸다. 입력단 선전류의 5차 고조파 성분이 제안된 방법의 전류파형 분석 결과 기본파의 3.6[%] 정도로 줄었고, 7차 고조파 역시 기본파의 1.9[%]로 줄어들었다. 따라서 전류 종합고조파왜율이 9.7[%]로 줄어들고 역률이 0.9953이 되었다.

표 1. 선전류의 주파수 분석

Table 1. Frequency analysis of line current

고조파 차수	제안된 정류기	인덕터를 갖은 다이오드 정류기	일반적인 다이오드 정류기
1	1.0000	1.0000	1.0000
5	0.0360	0.3152	0.5848
7	0.0190	0.1256	0.3329
11	0.0109	0.0756	0.1945
13	0.0029	0.0272	0.1727
THD	9.7%	35.87%	73%
역률	0.9953	0.94	0.80

7. 결 론

현재 산업계에서 많이 사용되는 3상 브리지 다이오드 정류기는 제어기를 구성할 필요가 없어 회로 구성이 간단하고 안정성이 높으며 저가라는 장점으로 아직까지 전기 산업 분야에서 많이 쓰이고 있다.

그러나 다이오드 정류기의 입력단 선전류에 포함되는 고조파가 전기설비에 많은 악영향을 준다.

본 연구에서는 3개의 양방향성 스위치 회로를 다이오드 정류기에 부착하여 매순간 3상의 전압을 측정하여 전류가 흐르지 않는 상의 스위치를 단락함으로써 전류가 연속적으로 흐를 수 있게 하였다.

제안된 시스템은 기존의 일반적인 3상 브리지 다이오드 정류기에 비하여 종합고조파왜율의 개선을 이루었고 역률 또한 개선됨을 모의 실험과 실험으로 증명하였다. 또한 제어회로가 간단하기 때문에 기존의 설비에 부가할 수 있다는 탄력성과 경제성 또한 갖추고 있다.

참 고 문 헌

- [1] I. Barbi, J.C. Fagundes and C.M.T. Cruz, "A new low cost high power factor three-phase diode rectifier with capacitive load", IEEE Applied Power Electronics Conference(APEC '94) Proceedings, pp.745~751, February, 1994.
- [2] M. Rastogi and N.Mohan, "A comparative evaluation of harmonic reduction techniques in three-phase utility interface of power electronic loads", IEEE, IAS Annual meeting., Conference record 1993, pp.971~978.
- [3] Salmon and J.C., "Circuit topologies for pwm boost rectifiers operated from 1-phase and 3-phase ac supplies and using either single or split dc rail voltage outputs", IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC '95) Proceedings, pp.473~479.
- [4] A. R. Prasad, P. D. Ziogas and Manias, "An active power factor correction technique for three-phase diode rectifiers", IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC '89) Records, pp. 58-66, June 1989

본 연구는 한국전력공사 지원 기초전력공학연구소 출원 연구비에 의해 수행되었음.

◇ 著 者 紹 介 ◇



김 병 진(金炳鎭)

1970년 6월 20일생. 1994년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1996년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사과정.



김 상 우(金湘祐)

1974년 8월 26일생. 1997년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 현재 숭실대학교 대학원 전기공학과 재학.



문 학 룡(文學龍)

1963년 11월 12일생. 1990년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1993년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사과정.



전 희 중(田喜鐘)

1953년 1월 6일생. 1975년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1977년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1977~1981. 8 공군사관학교 전자공학과 교수부. 1987년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1995년 9월~1996년 4월 Univ.of Victoria, CA. 객원교수. 1983년~현재 숭실대학교 공과대학 전기공학과 교수.



김 준 환(金竣煥)

1973년 11월 12일생. 1997년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 현재 숭실대학교 대학원 전기공학과 재학.