

3상 다이오드 정류기의 고조파 해석 및 LISN을 이용한 노이즈 측정에 관한 연구

চেয়িং* 최규하* 목형수** 이은용** 홍순찬^ 백수현^^
 (건국대* 서울산업대** 충남대** 단국대^ 동국대^^)

Harmonic Analysis of Three-Phase Diode Rectifier and Measurement of Conducted EMI Emission Using LISN

Y. M Chae* G. H Choe* H. S Mok** E. W Lee** S. C Hong^ S. H Baek^^
 *Kon-Kuk Univ. **Seoul National Polytechnic Univ.
 ^^ChungNam Univ. ^Dan-Kook Univ. ^^Dong-guk Univ.

ABSTRACT

In this paper, The characteristic of Harmonic spectrum is studied for generally used three-phase diode rectifier . and filter design criteria is shown in the sense of THD,DPF, and PF. As the becoming of Automotive and informative era, the demand of critical and stable control becomes more and more important. But much EMI emissions are generated for more critical and stable control in power electronic system . these EMI emissions can be measured using LISN(Line Impedance Stabilization Network).So we are to investigate the behavior of Conducted EMI emission in Diode Rectifiers using LISN in frequency domain.

1. 서 론

일반적으로 대용량 인버터나 유도전동기 제어사 많이 사용되는 다이오드 정류기는 AC전원을 DC전원으로 변환하는 반도체 전력변환장치들중 하나로서 전력회로가 간단하고 가격이 저렴한 특성을 가지고 있으나 입력으로 교류를 사용하고 출력은 직류이므로 직류측에서 출력전압의 맥동이 발생한다. 따라서 이러한 맥동의 감소를 위하여 큰 용량의 필터 커패시터를 출력측에 연결하나 이때 입력측에서는 필터 커패시터를 충전하기 위한 충전전류가 흐르게 되고 이로 인하여 고조파를 많이 함유한 스파이크형태의 입력전류가 전원선으로 흐르게 된다. 이러한 전류의 고조파성분으로 인하여 전원측에서는 전압의 왜형이 발생되고 이러한 고조파성분들이 전원측으로 넘겨져 다른 아타 장치에 악영향을 끼치며 시스템의 역율을 현저히 저하시킨다. [3] 이러한 저차 고조파문제와 함께 최근에 디지털공학의 발전과 더불어 반도체 소자제작기술의 발달로 인하여 장치들이 소형, 집적화 및 고속화됨에 따라 EMI (Electro Magnetic Interference)가 큰 문제점으로 부각되고 있다. 특히 전력 전자분야에서는 가장 스위칭 주파수를 피하기 위하여 에너지 변환장치들을 고속 스위칭함으로 인하여 발생하는 노이즈가 전자파장해를 발생할 우려가 있다. [4]~[5] 따라서 본 논문에서는 다이오드 정류기에서 발생하는 고조파의 발생량에 대한 분석과 이를 토대로하여 입력전류의 DPF(Displacement Power Factor), THD(Total Harmonic Distortion) 및 PF(Powe Factor)의 관점에서 다이오드 정류기 필터의 설계 외 EMI측면에서의 전도성

노이즈 측정기구인 LISN을 사용하여 노이즈 발생량을 Simulation전용 Language인 Design Center(Version 6.2)를 사용하여 분석하였다.

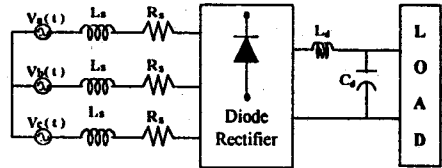


그림 1 전체시스템 회로도

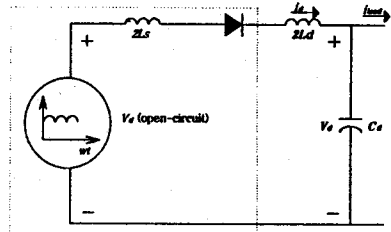


그림 2 다이오드 정류기의 등가회로

2. 다이오드 정류기의 회로구성

그림 1은 삼상 다이오드 정류기의 회로도이며 그림에서 L_s 와 R_s 는 각각 전원측 임피던스이며 L_d 및 C_d 는 필터 인덕턴스와 필터 커패시턴스이다. 삼상 다이오드 정류기의 회로동작은 전기각으로 120도씩 위상지연된 삼상전원중에서 가장 큰 양의 전압과 가장 작은 음의 전압이 도통되므로 다이오드 정류기를 통한 출력전압은 전압 1수기의 시간에 대하여 항상 6개의 펄스를 가진 전압이 출력된다. 식 1에서 식3은 삼상전압의 표현식이다

$$V_{an} = V_M \times \sin(\alpha t) \tag{1}$$

$$V_{bn} = V_M \times \sin(\alpha t + 120^\circ) \tag{2}$$

$$V_{cn} = V_M \times \sin(\alpha t + 240^\circ) \tag{3}$$

그림 2는 다이오드 정류기의 등가회로이다. 일반적으로 삼상 다이오드정류기에서 출력 전류파형의 개선과 dc링크단 출력전압맥동의 개선을 위하여 정류기와 필터 커패시턴스 사이에 필터 인덕턴스를 추가한다. 정류기 출

력전류 i_d 를 연속적으로 하기 위한 인덕터스의 최소값은 아래식 (4)로 표현이 가능하고 출력전압은 식 (6)로 표현될 수 있다. (1)

$$L_{d-min} = \frac{0.013 \times V_{LL}}{\omega \times I_d} \quad (4)$$

$$V_d = \frac{A_d}{\pi/3} = \frac{3 \times \sqrt{2}}{\pi} = 1.35V_{LL} \quad (5)$$

윗식에서 V_{LL} 은 선간전압의 rms값이고 ω 는 선주파수이다.

3. 필터설계

상상 다이오드정류기의 입력전류는 아래 식 (6)에서의 같이 기본파 성분과 고조파성분으로 구분되며 필터의 계수 비교를 위한 평가계수인 입력역율 (Input Power Factor) 과 DPF (Displacement Power Factor) 및 THD (Total Harmonic Distortion)는 아래식(7), (8), (9)로 표현될 수 있다.

$$I_s = \sqrt{I_1^2 + \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad (6)$$

$$PF = \frac{1 \times \cos(\Phi_1)}{\sqrt{1 + DF^2}} \quad (7)$$

$$DPF = \frac{I_s}{I_1} \times PF = \cos(\Phi_1) \quad (8)$$

$$THD = DF \times 100 \quad (9)$$

I_1 은 기본파성분의 실효치이고, I_h 는 고조파성분의 실효치이며 $\cos(\Phi_1)$ 는 기본파 전류와 전압간의 역율이다.

3-1. 필터 인덕턴스 및 커패시턴스의 설계

필터 인덕턴스의 설계를 위하여 인덕턴스값을 변화시키면서 입력전류의 DPF, THD 및 입력역율의 특성을 조사하였다. 필터 커패시턴스의 값을 5000uf로 설정하고 인덕턴스값을 변화시키면서 특성해석을 행하였다. 아래 그림 3은 정류기의 인덕턴스를 0에서 5mH 까지 변화시켰을때의 DPF, THD 및 PF특성으로써 필터 인덕턴스는 DPF에 거의 영향을 미치지 않는 것을 알수있으며 인덕턴스값이 2mH이상일 때는 입력전류의 THD특성이 크게 변화하지 않고 인덕턴스값이 1mH이상일 때는 입력전류의 PF특성이 0.94 이상임을 볼수 있었다.

전력 불균형을 완충시키는 소자인 필터 커패시턴스의 값은 부하에서 필요로 하는 출력 전력을 기준으로 식 10과 같이 전하량으로 산정하거나 정류기 출력전압의 맥동의 크기로 식 11 을 이용하여 산정할수도 있다. (2)

$$C = \Delta Q_d \times (V_d(normal) - V_d(under)) \quad (10)$$

$$W_s C R_L = \frac{\pi I_s \sin^{-1}(1 - e_r) / 30^\circ - \tan^{-1}(1 / W_s C R_L) / 30^\circ}{6 \ln(\cos(\tan^{-1}(1 / W_s C R_L)) / 1 - e_r)} \quad (11)$$

윗식에서 $V_d(normal)$ 는 부하단에서의 정상전압이고, $V_d(under)$ 는 부하단에서의 부족전압이며 E_2 는 최소 출력전압, E_{pk} 는 출력전압의 최대값, ω_s 는 전원 주파수, T는 1주기 시간, $e_r = (E_{pk} - E_2) / E_D$ 이다.

이러한 필터 커패시턴스 설계값을 기준으로 필터 인덕턴스의 값을 0.5mH, 2mH, 5mH로 설정하고 필터 커패시턴스값을 변화시키면서 입력전류의 입력역율, DPF 및 THD 특성을 조사하였다.

그림 4 (a)(b)(c)는 정류기의 인덕턴스를 각각 0.5mH, 2mH, 5mH로 하고 필터 커패시턴스의 값을 500uf에서 5000uf 까지 변화시켰을때의 특성으로써 DPF 및 PF 특성은 필터커패시턴스에 영향을 받지 않고 THD특성은 필터 커패시턴의 값이 2500uf 이상에서는 더이상 낮아지지 않고 일정하다.

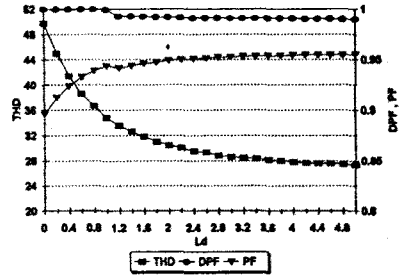


그림 3 필터인덕턴스 변화시의 입력전류의 특성 ($L_d=5mH$)

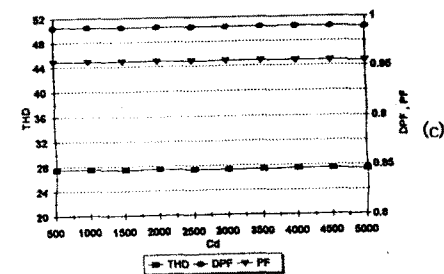
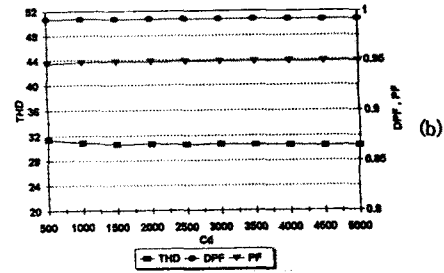
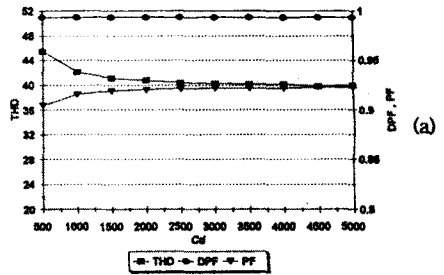


그림 4 필터커패시턴스 변화시의 입력전류의 특성
(a) $L_d=0.5mH$ 시 입력전류의 특성변화
(b) $L_d=2.0mH$ 시 입력전류의 특성변화
(c) $L_d=5.0mH$ 시 입력전류의 특성변화

3-2. 고조파 특성해석

삼상 다이오드 정류기에서는 3의 배수 고조파를 뺀 기수의 고조파가 발생하므로 전원전류에서 발생하는 고조파의 차수는 5차, 7차, 11차, 13차, 17차, 19차...등이다. 본 연구에서는 삼상 다이오드정류기에서 DFT 알고리즘을 이용한 시뮬레이션을 통하여 발생하는 고조파의 크기의 변화를 정규화한 값으로 비교하였다. 그림 5는 필터 커패시턴스의 값을 5000 μ F 으로하고 필터 인덕턴스의 값을 0mH 에서 5mH 까지 변화 시켰을때 입력전류의 FFT분석 결과로써 60Hz 기본파 스펙트럼의 크기를 1로 기준한 정규화한 값이다. 필터 인덕턴스의 크기증가에 따라 5차 및 7차 고조파 성분의 스펙트럼이 분산되어 줄어들고 줄어든만큼의 고조파 크기가 11차 및 17차 고조파로 분산되어 나타난다. 그림 6은 필터 인덕턴스의 값을 2mH로 하고 필터 인덕턴스의 값을 500 μ F 에서 5000 μ F 까지 변화 시켰을때 입력전류의 FFT분석 결과로써 필터 커패시턴스의 크기 변화가 입력전류의 고조파에 영향을 미치지 않는다.

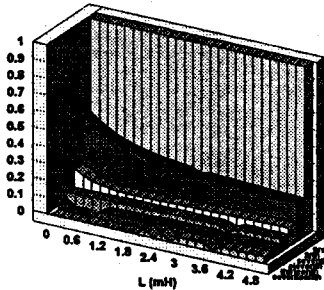


그림 5 필터인덕턴스 변화시의 고조파 특성

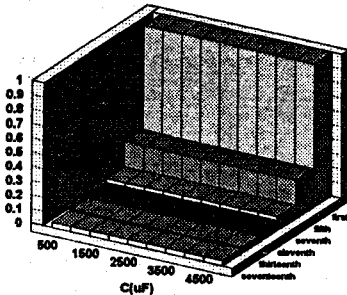


그림 6 필터커패시턴스 변화시의 고조파 특성

4. 노이즈의 측정

노이즈란 의도적으로 발생시키는 신호 이외에 발생하는 불필요한 신호가 발생하여 다른 전기전자 기기에 나쁜 영향을 주는것이라 정의할수 있다. 이러한 노이즈는 그 발생원인 및 전파로에 따라 아래와같이 구분할 수 있다. 특히 DM (Differential Mode) 및 CM (Common Mode) 노이즈로 구분되는 전도성 노이즈(Conducted Noise)는 노이즈가 회로내에서 도통되므로 부하 및 여타다른기와 전원예 악영향을 미친다. 이상의 전도성 노이즈는 그림 7로 모델링 할 수 있다.

- 노이즈
 - 자연 노이즈
 - 인공 노이즈
 - 방사성 노이즈 (Radiated Noise)
 - 전도성 노이즈 (Conducted Noise)
 - 디퍼런셜 노이즈 (Differential Noise)
 - 코몬 노이즈 (Common Noise)

전도성 노이즈는 L과 C소자로 구성된 전도성 노이즈 측정회로인 LISN(Line Impedance Stabilization Network)를 이용하여 측정한다. 그림 8은 간략화된 LISN의 회로도이다. LISN은 전원측 임피던스에 영향을 미치지 않고 시험 하고자하는 장치인 EUT(Equipment Under Test)에서 발생하는 노이즈를 LISN의 50 Ω 저항을 통하여 스펙트럼 어널라이저의 입력에 연결하여 노이즈를 측정한다. 그림 8의 LISN의 회로에서 L, C1과C2는 전원 주파수에 대하여 임피던스가 각각 식 12에서 식14와 같으므로 전원주파수에 대하여 L은 Short-Circuit로 동작되고 C1, C2는 Open-Circuit으로 동작되고 스위칭 소자에 의해서 발생되어 전원측으로 유입되는 높은 주파수 성분의 노이즈에 대해서는 반대로 L은 큰 임피던스로 인해 Opent-Circuit가 되고 C1과 C2는 각각 낮은 임피던스로 인하여 Short-Circuit으로 동작하므로 높은 주파수 성분의 노이즈는 LISN의 C2를 거쳐 저항으로 흐르게 된다.

$$Z = \omega \times L \quad (12)$$

$$Z_1 = \frac{1}{\omega \times C_1} \quad (13)$$

$$Z_2 = \frac{1}{\omega \times C_2} \quad (14)$$

선로와 접지사이에 연결된 하나의 LISN에 대하여 전달함수를 구하면 식 18과 같이 표현되며 그림 7은 선로와 접지사이에 연결된 하나의 LISN에 대한 전달함수식 (15)을 주파수 특성해석 한 결과이다.

$$G(s) = \frac{R_N C_N^2 L_N C_N S^3 + (C_N C_L (R^2 C_N + L_N)) S^2 + R_N C_N (C_L + 2 C_N) S + (C_L + C_N)}{L_N C_N C_L S^2 + R_N C_N S + (C_L + C_N)} \quad (15)$$

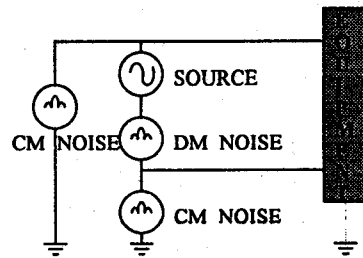


그림 7. 전도성 노이즈의 모델링

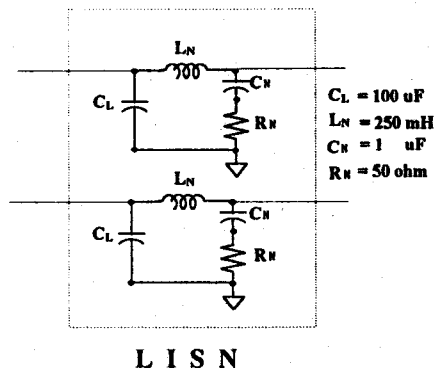


그림 8. LISN의 회로도

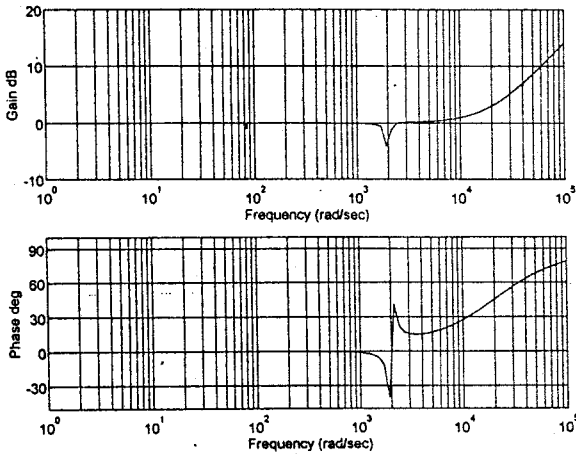


그림 9. LISN의 주파수 특성

5. 시뮬레이션

시뮬레이션에서 사용한 파라미터의 값은 아래 표 1과 같다. 또한 전술한 노이즈 측정장치인 LISN을 사용하여 LISN에서 상간에 존재하는 DM 노이즈의 주파수 특성 해석을 하였다.

구분	크기
전원전압	3상 220 V
전원측 저항	0.6 Ω
전원측 인덕턴스	0.22 mH
필터 인덕턴스	2 mH
필터커패시턴스	3000 μF
부하저항	20 Ω

표 1 사용한 파라미터값

그림 10은 전원전류의 기본파에 대해 정규화된 스펙트럼파형으로 5, 7, 11, 13, 17차 고조파 성분이 존재함을 보인다. 그림 11은 출력전류의 파형으로 필터 인덕턴스로 인하여 연속적으로 흐름을 알 수 있다. 그림 12는 출력전류의 파형으로 맥동이 거의 없는 적류 전압파형을 보여준다. 그림 13은 LISN에서 검출된 상간에 존재하는 DM노이즈의 양으로 매우 적은 값을 보여준다.

7. 결론

본 연구에서는 삼상 다이오드 정류기에서 발생하는 고조파의 특성해석 및 입력전류의 DPF, THD 및 입력역률의 측면에서 필터설계 및 필터 파라미터 변화시의 고조파 발생량을 조사하였으며 EMI측면에서 다이오드 정류기에서 발생하는 전도성 노이즈의 발생량을 시뮬레이션을 분석하였다.

참고문헌

[1] N. Mohan, "Power Electronics" John wiley, 1993.
 [2] R. E. Tarter, "Solid - State Power Conversion Handbook" John wiley, 1993.
 [3] W. Kelley, W. F. Yadusky, "Rectifier Design for Minimum Line-Current Harmonics and Maximum Power Factor" IEEE Trans. Power Electronics, April, vol. 7, No. 2, pp. 332-341, 1992.

[4] F. Lin, D. Y. Chen, "Reduction of Power Supply EMI Emission by Switching Frequency Modulation" IEEE Trans. Power Electronics, January, vol. 9, No.1, pp.132-137, 1994.
 [5] R. Scheich, J. Roudet "EMI Conducted Emission in Differential Mode Emanating from a SCR : Phenomena and Noise Level Prediction" IEEE. APEC, pp.815-821, 1993.

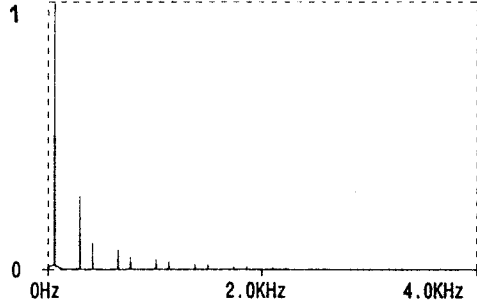


그림 10. 전원전류 고조파 스펙트럼

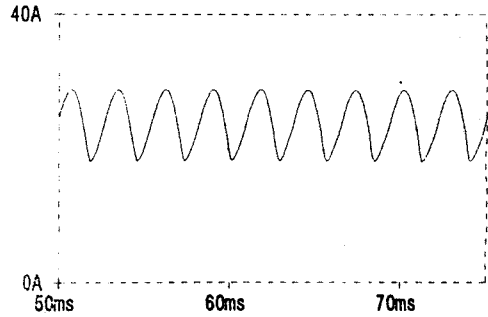


그림 11. 출력전류파형

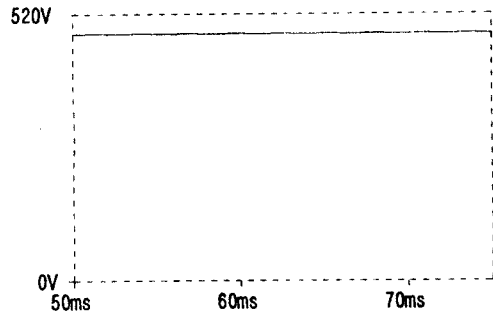


그림 12. 출력전압 파형

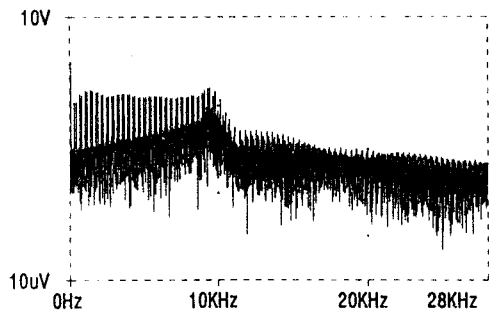


그림 13. DM 노이즈의 주파수 특성