

불평형 전원전압을 갖는 정류시스템에서 출력필터에 따른 입력 특성 분석

Analysis of Input Characteristic in the Rectifier for Output Filter with Unbalanced Supply Voltages

강 수 현* 김 상 훈**
Kang, Su-Heon Kim, Sang-Hoon

Abstract

The rectifier characteristics and the quality of the input current worsens with the increase of unbalances or harmonics of the supply voltages. Rectifier input current harmonics interfere with proper power system operation, reduce rectifier power factor, and limit the power available from a given source. It is of importance to select appropriately the rectifier's output filter inductance to determine the rectifier input current waveform, the input current harmonics, and the power factor. This paper presents a quantitative analysis of single and three phase rectifier input current harmonics, total harmonic distortion, and power factor as a function of the output filter inductance under balanced and unbalanced conditions. Also, its performance under the supply voltage including harmonics be investigated. These results provide a reference for selecting reasonable rectifier's output filter inductance for given harmonics or power factor criterion.

키워드 : 정류기, 필터 인덕턴스, 고조파, 역률

Keywords : *rectifier, filter inductance, harmonics, power factor*

1. 서론

최근 전원 시스템에서의 공급전압은 여러 원인으로 인하여 불평형이 되거나 고조파가 포함되는 등, 전력 품질의 저하가 심화되고 있다. 전력 품질에 영향을 주는 요인 중 전압의 품질을 저하시키는 것들에는 고조파(harmonics), 전압 불평형(unbalance), 순간 전압 상승(voltage swell), 전압 노치(voltage notch) 및 순간 전압 강하(voltage sag) 등이 있다.[1] 이러한 요인들 중에 전압 불평형은 계통의 단상 혹은 불평형 부하가 존재하거나 단상 사고 등으로 인해 발생하는데, 이러한 불평형

은 불특정 고조파를 발생시키고 계통의 제어 성능을 저하시킬 뿐만 아니라 전압강하를 유발한다. 또한 연결된 진동기에 효율을 저하시키며, 3상 다이오드 정류기에도 불평형 전류가 흐르게 하는 등의 악영향을 미친다.[2]

직류 전력이 필요로 하는 대부분의 부하설비들은 주어진 교류 전력으로부터 직류 전력을 얻기 위해 주로 단상 또는 3상 다이오드 정류기를 사용한다. 다이오드 정류기의 경우 비선형적인 특성을 갖기 때문에 입력전압이 순수한 정현파라 할지라도 입력전류의 왜곡과 입력역률 저하 등의 전력품질 저하 현상을 피할 수 없다.[3][4] 더욱이 여러 이유로 인해 발생된 불평형 또는 고조파가 함유된 입력전압을 갖는 정류기에서의 전력품질은 전압 고조파 및 불평형률의 증가와 함께 더욱 나빠지게 되는데, 정류기 입력전류의 왜곡과 역률 저하 현상을 더욱 심화시키며, 출력 직류 전압과 전류의 리

* 강원대학교 대학원 전기공학과, 석사

** 강원대학교 전기전자정보통신공학부 부교수,
공학박사

플을 더욱 증가시키게 된다.[5][6] 또한 직류 출력에 인버터를 사용하는 경우 인버터의 출력에 부수적인 고조파(subharmonic) 성분을 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 불평형 및 고조파가 포함된 전원전압이 정류기에 공급되는 경우 전력품질에 미치는 영향을 분석하고 이러한 문제를 해결하고자 사용하는 출력 필터의 설계 기준을 제시하고자 한다.

대부분의 정류시스템의 출력 필터 설계에서는 출력 직류 전압의 리플감소가 주 목적으로 출력 필터 커패시터의 용량 결정이 주된 관심사이다. 그러나 정류시스템에서 교류 입력전류의 질은 발생된 고조파에 주로 관련이 있으므로 정류기의 출력 필터 인덕턴스의 적절한 설계가 정류기 입력 전류 파형과 고조파 및 역률을 결정하는 중요한 역할을 하게 된다[3]. 일반적인 정류기 해석에서는 출력 필터 커패시턴스와 인덕턴스를 무한한 값으로 가정하여, 입력 전류 고조파와 역률을 평가하는데, 필터 커패시턴스는 대개 출력 전압 리플을 작게 하기 위해 충분히 큰 용량이 사용되는 반면에 필터 인덕턴스는 생략되거나 충분히 큰 용량이 사용되고 있지 않다. 이로 인하여 정류기 입력 전류 파형과 고조파 및 역률에 대한 평가자체에 상당한 오차를 가지게 된다. 이에 본 연구에서는 출력 필터 커패시턴스는 충분히 큰 용량이 사용되고 있다는 가정 하에 출력 필터 인덕턴스 값의 변화에 따른, 단상과 3상 정류기의 입력전류에 대한 고조파와 역률을 분석하였다. 또한 지금까지 3상 평형상태의 공급전압 하에서만 해석되어 왔던 것을 3상 불평형 공급전압 및 고조파가 포함된 공급전압에 까지 확대하여 성능을 평가하였다. 이를 통하여 정류시스템에서 주어진 고조파와 역률 등의 조건에 부합하는 적절한 출력 필터 인덕턴스 값을 선정하는 기준을 제시하였다.

2. 정류 시스템

교류 입력 전원으로부터 직류 출력 전압을 얻기 위한 3상 다이오드 전파 정류회로는 그림 1과 같다. 정류기의 출력단에는 직류 전압과 전류에 포함된 리플 성분을 감소시키고 입력 전류파형을 개선시키기 위해 대개 L-C 필터가 사용된다.[7]

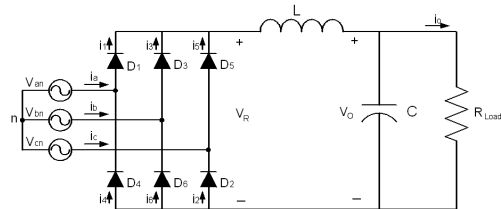


그림 1 3상 전파 다이오드 정류회로

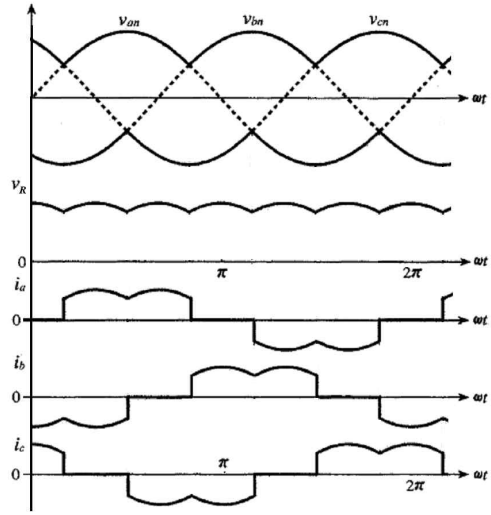


그림 2 3상 전파 다이오드 정류회로에서의 전압 및 전류

그림 2는 3상 전파 정류회로에서 출력 필터 커패시터 및 인덕턴스가 충분히 큰 경우에 각부의 전압과 전류 파형을 나타낸다. 여기서 공급전압은 3상 평형 전압으로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_{an} &= \sqrt{2} V \sin(\omega t) \\ v_{bn} &= \sqrt{2} V \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_{cn} &= \sqrt{2} V \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad (1)$$

전원 전압에 불평형이 있는 경우에 전압 불평형 조건을 계량화하기 위해 불평형 지수(Unbalance Factor : UF)를 도입하였다.[8] 불평형 지수는 abc 상으로 표현되는 3상의 계통 전압을 정상분 전압, 역상분 전압, 영상분 전압으로 분리한 후 정상분 크기에 대한 역상분 전압의 크기의 비로 표현된다. abc 상의 전원전압 v_{an} , v_{bn} , v_{cn} 으로부터 정상분 전압 v_p , 역상분 전압 v_n , 영상분 전압 v_0 은 식 (2)에 의해 구할 수 있고, 불평형 지수는 식(3)과 같이 정의된다.

$$\begin{bmatrix} V_p \\ V_n \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, $a = \exp(j\frac{2\pi}{3})$ 이다.

$$|UF| \leq \Phi_{UF} \equiv \frac{V_n}{V_p} \quad (3)$$

다이오드 정류회로에서 전형적인 입력 교류 전류파형은 그림 2에서 볼 수 있듯이 비정현 주기파이다. 또한 입력전류에 포함된 고조파성분 때문에 역률이 낮다. 이러한 비정현 주기파에서 왜곡(distortion)의 정도는 기본파에 더해진 직류성분과 고조파성분의 양, 즉, 전고조파(total harmonics)에 따라 정해진다. 비정현 주기파형에서 왜곡의 정도를 평가하기 위한 지수로 전고조파 왜율(THD : Total Harmonic Distortion)이 사용된다. 비정현 주기파의 THD는 식(4)와 같이 정의되며, 비정현 파형의 전류에 대한 전고조파 왜율 THD_i 은 식(5)와 같다.[3] 또한 정류기의 역률(Power Factor)을 평가하기 위해 식(6)을 사용한다.

$$THD = \frac{\text{전고조파의 실효값}}{\text{기본파의 실효값}} \times 100 \quad (4)$$

$$THD_i = \frac{I_H}{I_1} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1} I_n^2}}{I_1} \times 100 \quad (5)$$

$$PF = \frac{V_1 I_1 \cos \phi_1}{VI} \quad (6)$$

여기서, V, V_1, I, I_1, I_H 는 각각 비정현과 전압, 기본파 전압, 비정현과 전류, 기본파 전류 및 전 고조파 전류의 실효값이다. ϕ_1 는 기본파 전압에 대한 기본파 전류의 위상으로 $\cos \phi_1$ 는 변위율(DPF : Displacement Factor)된다.

3. 정류시스템의 전력품질 분석

단상 및 3상 정류시스템에서 출력 필터 인덕턴스 값의 변화에 따른 입력 전류의 전고조파 왜율(THD)과 역률(PF)을 평가하기 위해 MATLAB Simulink를 사용하여 시뮬레이션 하였다. 공급 전압 220V, 60Hz의 전원을 가진 단상과 3상 다이오드 정류시스템을 구성하였고, 출력 필터 커패시터는 출력전압의 리플이 시뮬레이션에 미치는 영향이 거의 없게 하기 위하여 충분히 큰 용량의 커패시터를 설정하였다.

3.1 단상 다이오드 정류시스템

단상 다이오드 정류기에 대한 시뮬레이션 블록도가 그림 3에 보인다. 전체 블록도는 다이오드 정류부, 입력 전류 계산부, 출력 LC 필터의 3부분으로 구성된다. 여기서, 공급전압은 임피던스가 0인 전원을 사용하였고, 부하저항은 10[Ω]이며, 다이오드는 이상적인 것으로 가정하였다.

이러한 시뮬레이션 블록도로부터 단상 다이오드

정류기에서 입력 전원전압에 고조파가 없는 경우와 고조파가 포함된 경우에 대해 각각 출력 필터 인덕턴스가 정류기 특성에 미치는 영향을 알아보았다. 고조파가 포함된 입력 전원으로서는 기본파 전압 이외에 5차, 7차 및 11차 고조파가 포함된 THD가 약 10%인 전압을 사용하였다.

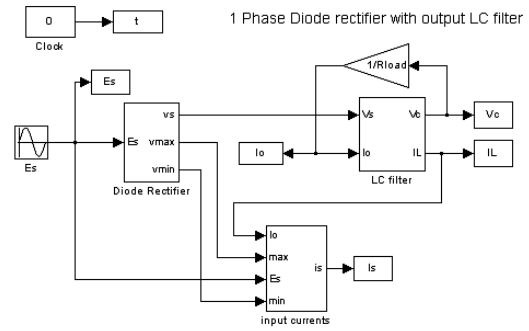
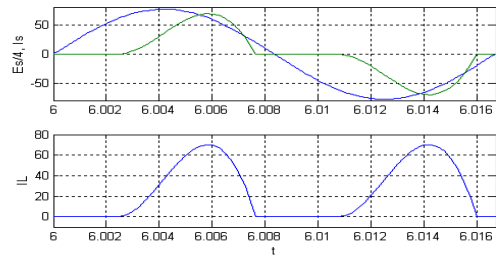
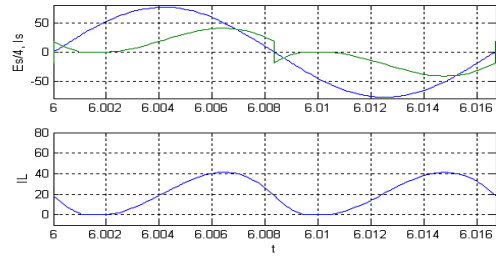


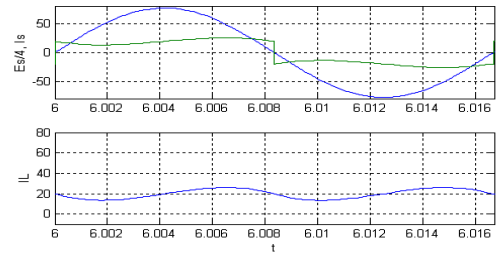
그림 3 단상 전파 정류회로의 시뮬레이션 블록도



(a) 불연속 전류 모드 I



(b) 불연속 전류 모드 II



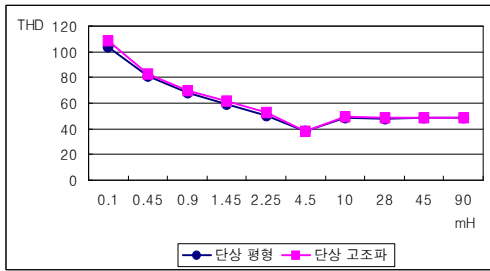
(c) 연속 전류 모드

그림 4 단상 전파 정류회로에서의 입력 전압,

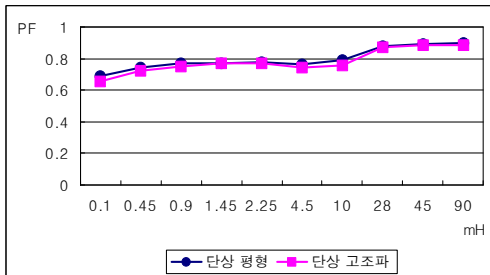
입력 전류 및 인덕터 전류

단상 전파 정류회로는 출력 필터 인덕터스에 흐르는 전류 형태에 따라 그림 4와 같이 불연속 전류 모드 I, II와 연속 전류 모드로 동작된다. 본 시스템의 경우 불연속 전류 모드 II와 연속 전류 모드가 시작되는 인덕턴스 값은 각각 4.5[mH]와 9[mH]이다.

그림 5(a)와 (b)는 정류기의 전원전압으로 고조파가 없는 경우와 고조파가 포함된 경우에 대한 입력 전류의 전고조파 왜율(THD)과 역률(PF)을 각각 나타내고 있다.



(a) 입력 전류의 전고조파 왜율(THD)



(b) 역률(PF)

그림 5 출력 필터 인덕턴스 값에 따른 전고조파 왜율과 역률

그림 5로부터 입력전류의 THD 및 역률은 고조파가 포함된 입력전압의 경우가 고조파가 없는 전원전압의 경우보다는 약간 나쁘지만 거의 비슷한 값을 보임을 알 수 있다. 이는 전원전압에 포함된 고조파는 거의 출력 필터 인덕터스에 의해 제거된다는 것을 의미한다. 두 경우 모두 불연속 전류 모드에서는 연속 전류 모드로 갈수록 THD와 역률은 개선되지만 10[mH]보다 큰 인덕턴스를 갖는 연속 모드에서는 거의 일정해지는 것을 알 수 있다. 두 경우 모두 THD에 대해서는 최소(여기서는 38.8)가 되는 최적의 출력 필터 인덕턴스 값(여기서는 4.5[mH])이 존재함을 알 수 있는데, 이 최적의 값은 불연속 전류 모드 II가 시작되는 인덕턴스 값으로 최소의 THD는 불연속 모드에서 얻어진다. 이

최적의 값보다 큰 용량의 인덕턴스를 선정하는 경우에는 인덕터 전류 및 입력 전류는 연속이 되지만 오히려 THD가 증가하게 되므로, THD 측면에서는 인덕턴스를 크게 사용할 필요가 없음을 알 수 있다. 이에 비해 고조파와 변위율의 곱으로 주어지는 역률을 보면 두 경우 모두 인덕턴스 값의 증가에 따라 향상되다가 약간 감소하는 현상을 보이나, 대체로 증가하는 추세이다. 그러나 연속모드로 운전되는 특정 인덕턴스 값 이상(여기서는 28[mH])에서는 거의 일정하게 되므로, 경제적으로 볼 때 0.9 정도의 PF를 가지는 28[mH]의 값에서 출력 필터 인덕턴스 값을 선정하는 것이 적절하다는 것을 알 수 있다.

3.2 3상 다이오드 정류 시스템

3상 다이오드 정류기의 경우에 대해서는 정류기의 입력전압이 평형 및 불평형인 경우와 고조파가 포함된 경우에 대해 출력 필터 인덕턴스가 정류기 입력 역률과 고조파에 미치는 영향을 분석하였다. 부하저항은 20[Ω]으로 주어졌고, 3상 불평형 전원으로는 표 1과 같이 위상의 변동이 없고 불평형 지수 UF가 5%, 10% 인 공급전압에 대해 시뮬레이션 하였다.

UF	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}
평형	$1 \angle 0^\circ$	$1 \angle 240^\circ$	$1 \angle 120^\circ$
5%	$1 \angle 0^\circ$	$.861 \angle 240^\circ$	$.863 \angle 120^\circ$
10%	$1 \angle 0^\circ$	$1.4 \angle 240^\circ$	$1.1 \angle 120^\circ$

표 1 불평형 전압

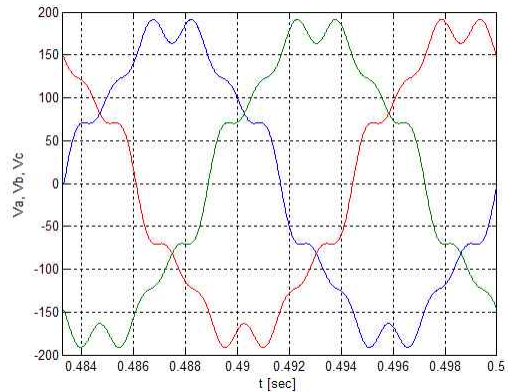


그림 6 10% THD의 3상 전원전압

고조파가 포함된 입력 전원으로는 그림 6과 같이 기본파 전압 이외에 5차 고조파 5%와 7%의 7차 고조파와 11차 고조파가 포함된 10%의 THD를

갖는 전압의 경우에 대해 시뮬레이션 하였다. 3상 다이오드 정류기에 대한 시뮬레이션 블록도가 그림 7에 보인다.

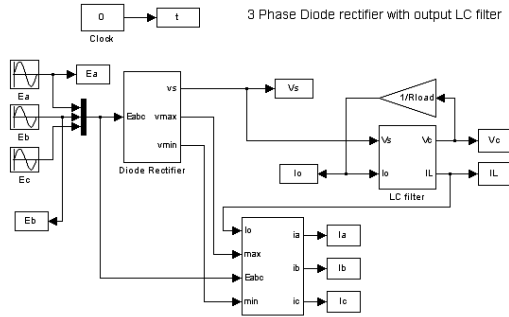
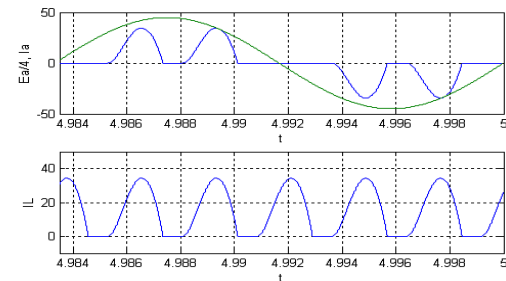


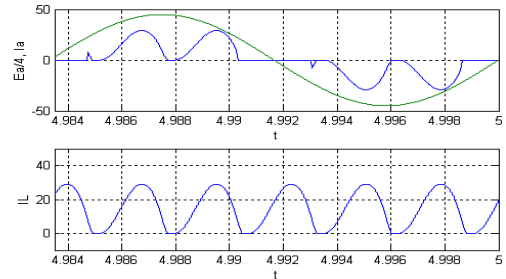
그림 7 3상 전파 정류회로의 시뮬레이션 블록도

3상 전파 정류회로는 단상인 경우와 마찬가지로 출력 필터 인덕턴스에 흐르는 전류 형태에 따라 그림 8과 같이 불연속 전류 모드 I, II와 연속 전류 모드로 동작된다. 본 시스템의 경우 불연속 전류 모드 II와 연속 전류 모드가 시작되는 인덕턴스 값은 각각 0.3[mH], 0.54[mH]이다.

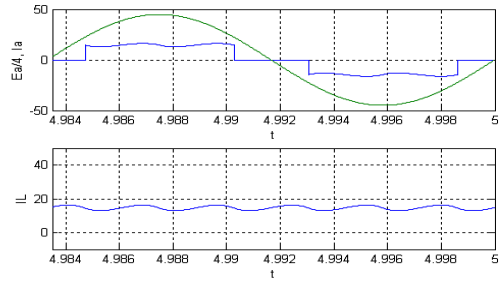
그림 9와 10은 각각 전원전압에 고조파가 포함된 경우와, 2가지 레벨(5%, 10%)의 전압 불평형률을 가질 경우에 대해 정류기 각 상전류의 전고조파 왜율(THD)과 입력 역률(PF)에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다.



(a) 불연속 전류 모드 I

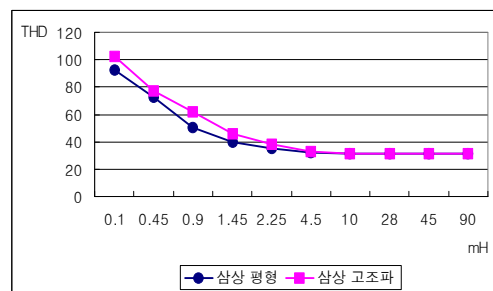


(b) 불연속 전류 모드 II

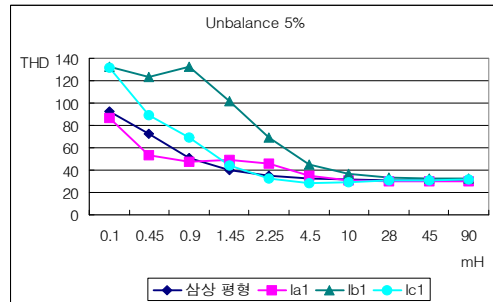


(c) 연속 전류 모드

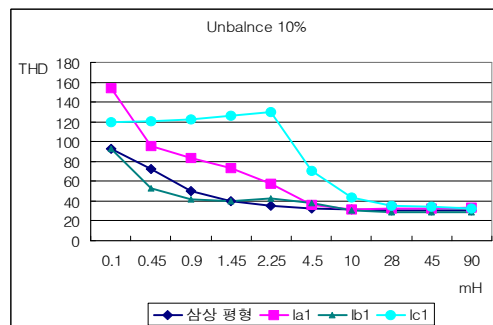
그림 8 입력전압, 입력 전류 및 인덕터 전류



(a) 고조파가 포함된 전원전압의 경우



(b) 불평형 지수 5%의 전원전압의 경우



(c) 불평형 지수 10%의 전원 전압의 경우

그림 9 출력 필터 인덕턴스 값에 따른 입력 전류의 THD

그림 9에서 알 수 있듯이 평형 3상 전원전압을 갖는 경우와 비교하여 불평형 3상 전원전압에 고조파가 포함된 경우와 불평형 전압의 경우에는 입력전류에 포함된 고조파 양의 증가로 인해 THD가 증가한 것을 알 수 있다. 이는 정류시스템이 공급받는 전력의 품질이 나쁜 경우 정류기 입력전류의 품질도 저하된다는 것을 의미한다. 3 종류의 전원전압 모두 불연속 모드에서는 THD는 크며 연속모드로 갈수록 THD는 작아지게 되는데, 출력 필터 인덕턴스가 상당히 큰 경우(여기서는 28[mH] 이상)에 THD는 더 이상 전원전압의 품질에 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. 고조파가 포함된 전원전압의 경우는 평형 3상 전원전압에 비해 THD가 크게 나빠지는 않고 출력 필터 인덕턴스가 커짐에 따라 고조파 성분은 대부분 제거된다. 이에 비해 상전압의 크기가 서로 다르게 되는 전압 불평형인 경우에는 일례로 그림 10에 보이는바와 같이 각 상전류들은 각기 다른 동작모드로 동작되기도 하고, 이에 따라 상전류들의 크기 및 포함된 고조파 양이 서로 크게 다르게 된다. 그 결과 각 상전류에 대한 THD도 서로 다르며, 평형의 경우보다 매우 크게 나빠지는 경우도 발생하게 된다. 불평형 지수 5%의 전원전압의 경우 전원전압 크기가 가장 작은 b상은 불연속 동작모드로 동작되는 경우가 많아 다른 상에 비해 THD가 크게 된다.

단상 정류기에서와는 다르게 3상 정류기에서는 입력 전류의 THD가 최소가 되는 최적의 출력 필터 인덕턴스 값은 존재하지 않으며, 인덕턴스 용량이 커질수록 THD는 감소하게 되나, 3상의 전류모두가 연속으로 동작하게 되는 특정 인덕턴스 값(약 28mH)이상에서는 더 이상 감소하지 않음을 알 수 있다. 따라서 단상의 경우와 마찬가지로 필요 이상의 큰 출력 필터 인덕턴스 값을 선택할 필요는 없음을 알 수 있다.

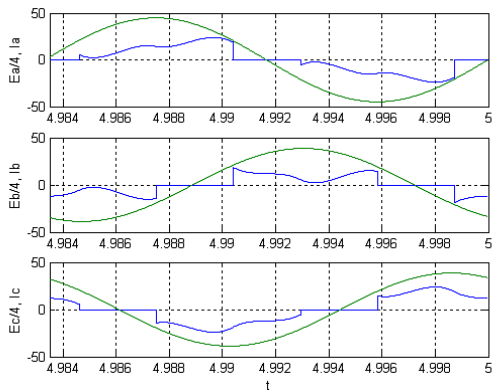
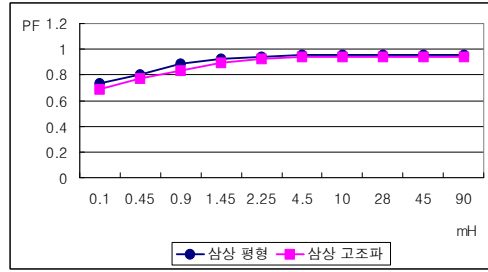
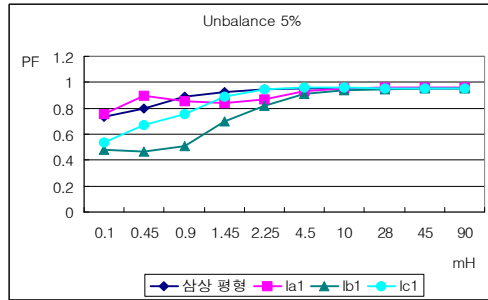


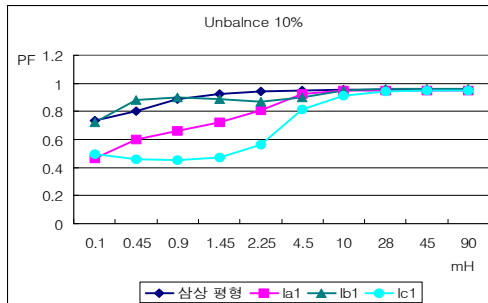
그림 10 5% 불평형 지수의 전원전압의 경우 입력 전압과 전류 (L=2.25[mH])



(a) 고조파가 포함된 전원전압의 경우



(b) 불평형 지수 5%의 전원 전압의 경우



(c) 불평형 지수 10%의 전원 전압의 경우

그림 11 출력 필터 인덕턴스 값에 따른 입력 역률

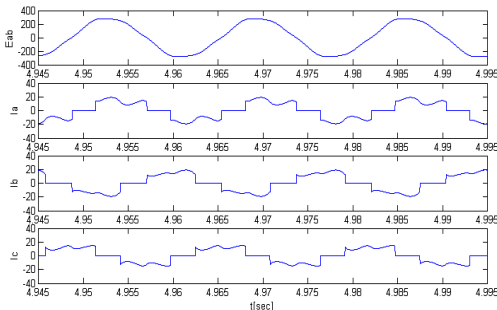
역률을 나타내는 그림 11로부터 고조파가 포함되어 있거나 불평형의 3상 전원전압에 대해 역률은 순수한 평형 3상 전원전압의 경우보다 출력 필터 인덕턴스 값이 충분히 크지 않은 범위에서는 크게 저하됨을 알 수 있고, 불평형률이 클수록 역률의 저하 폭이 더 커짐을 알 수 있다. 또한 인덕턴스 값을 크게 하더라도 특정 인덕턴스 값(약 28[mH])이상에서는 역률이 더 이상 개선되지 않는데, 따라서 최대의 역률을 갖는 약 28[mH] 정도의 출력 필터 인덕턴스 값을 선택하는 것이 경제적인을 알 수 있다.

3상 시스템에서 THD와 역률의 시뮬레이션 결과로부터 전원전압에 고조파가 포함된 경우 보다 불평형 전압의 경우가 THD나 역률에 좀더 나쁜 영향을 끼친다는 사실을 알 수 있다. 또한 THD나 역률을 개선시키기 위한 출력 필터 인덕턴

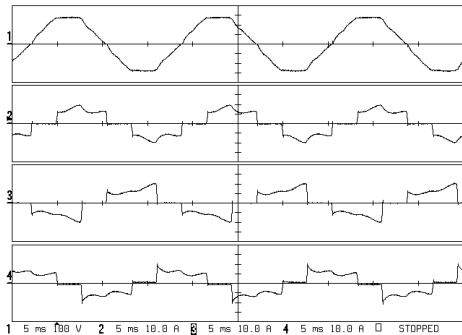
스의 값은 특정 값(약 28[mH])이상에서는 더 이상의 성능 개선이 이루어지지 않는다는 것을 알 수 있으며, 따라서 THD와 역률 개선을 위해 불필요하게 큰 출력 필터 인덕턴스 값을 선택할 필요는 없다는 것을 알 수 있다.

3.3 실험 결과

시뮬레이션 결과를 검증하기위해 3상 다이오드 정류 시스템에 대한 실험을 실시하였다. 실험실의 3상 선간전원에는 그림 12에 보이는바와 같이 각각 4.1%, 5.4% 및 5%의 고조파가 포함되어 있기 때문에 이 경우에 대해 실험을 실시하여 시뮬레이션과 비교하였다. 실험에 사용된 출력 필터 인덕턴스 값은 1.3[mH]이고 다른 실험 조건은 시뮬레이션과 동일하다. 그림 12와 같이 실험 파형과 시뮬레이션 파형은 거의 일치하는 하는 것을 볼 수 있으며, 이 경우 실험에서는 a상, b상 및 c상 전류의 고조파는 각각 42%, 37% 및 34%로 측정되었는데, 시뮬레이션에서도 각각 45%, 38% 및 37%의 거의 비슷한 값을 얻을 수 있었다. 실험과 시뮬레이션과의 오차는 실험회로 및 전원에 포함된 인덕턴스로 인하여 실제 실험에서는 시뮬레이션보다 고조파가 줄어든 것에 의한 영향으로 볼 수 있다.



(a) 시뮬레이션 파형



(b) 실험 파형

그림 12 3상 전파 정류회로에 대한 시뮬레이션 및 실험 파형: 선간전압(Vab), 상전류

5. 결론

본 연구에서는 수배전 계통에 연결되어 사용되는 부하설비 중 그 고유의 비선형 특성으로 인하여 전력의 품질을 저하시키는 정류시스템에 대해 살펴보았다. 본 논문에서는 유한한 값의 출력 필터 인덕턴스를 사용하는 실제의 응용조건에 대해서, 평형, 불평형 및 고조파가 함유된 공급전압에서의 출력 필터 인덕턴스 값에 대한 단상과 3상 정류기의 역률과 THD의 양적인 디자인 데이터를 제공하였다. 이들의 결과는 새로운 설비를 설계하고자 하는 설계자나, 기존의 설비에 의해 발생되고 있는 고조파와 역률문제의 평가를 위한 기준을 제시한다. 단상 정류기에서는 출력 필터 인덕턴스 값이 클수록 역률이 향상되는데 비해, 입력 전류 고조파에 대해서는 그 값이 최소가 되는 최적의 인덕턴스 값이 존재한다. 3상 정류기에서는 전원전압에 고조파가 포함된 경우 보다는 불평형 전압의 경우가 THD나 역률에 좀더 나쁜 영향을 끼치며, 단상과는 달리 출력 필터 인덕턴스 값이 커질수록 입력 전류 고조파 및 역률은 향상되나 특정 인덕턴스 값 이상에서는 더 이상의 성능 개선이 이루어지지 않는다. 따라서 앞에서 제시한 역률과 THD의 데이터를 가지고 경제성과 실용성을 고려한 측면에서 원하는 성능을 보이는 최소의 출력 인덕턴스 값을 결정할 수 있다.

참고 문헌

- [1] Math H. J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems : Voltage Sags and Interruptions*, IEEE Press, Ch.1, 2000.
- [2] 김종겸, 박영진, "3상 4선식 저압 수용가의 전압 불평형을 측정 분석," *조명·전기설비학회 논문집*, 제 18권, 제5호, pp.91-99, 2004. 11.
- [3] Arthur W. Kelley and William F. Yadusky, "Rectifier Design for Minimum Line-Current Harmonics and Maximum Power Factor," *IEEE Trans. on Power. Elec.*, Vol. 7, No. 2, pp. 332 ~ 341, April. 1992.
- [4] M. Grotzbach, "Line Side Behaviour of Uncontrolled Rectifier Bridges with Capacitor DC Smoothing," *proc. of EPE'89*, pp.761~764, Aachen 1989.
- [5] 이상준, *순간 전압 강하 보상용 직렬 보상을 위한 새로운 PLL 및 전압 제어기에 관한 연구*, 서울대학교 전기·컴퓨터 공학부 공학박사학위논문, 2장, 2003.
- [6] W. F. Ray, and M. Davis, "The Definition and Importance of Power Factor for Power Electronic Converter," *proc. of EPE'89*, pp.799~805, Aachen 1989.

산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제25권 B호, 2005.
강 수 현, 김 상 훈

- [7] M. H. Rashid, *Power Electronics : Circuits, Devices, and Applications*, Prentice-Hall Inc., pp. 76~87, 1993.
- [8] K. Haddad, G. Joos, "A Fast Algorithm for Voltage Unbalance Compensation and Regulation in Faulted Distribution Systems," Conf. Rec. IEEE-APEC Annu. Meeting, pp.963-969, 1998.