

불평형 전원전압을 갖는 정류시스템에서의 입력전류 고조파 분석

강수현, 구자경, 김상훈
강원대학교

Analysis of Input Current Harmonics in the Rectifier with Unbalanced Supply Voltage

S.H. Kang, J.K Khoo and S.H. Kim
kangwon National University

ABSTRACT

실제 3상 시스템에서의 공급전압은 다양한 이유로 인하여 불평형이 되는데, 정류시스템의 특성과 입력 전류의 질은 이 같은 불평형의 증가와 함께 더 나빠지게 된다. 또한 정류기 선전류 고조파는 전력시스템의 동작을 방해하고, 정류기 역률을 줄이며, 공급되는 전력으로부터 사용 가능한 전력을 제한하게 된다. 이에 정류기의 출력 필터 인덕턴스의 적절한 설계가 정류기 선전류 파형과 선전류 고조파, 역률을 결정하는 중요한 역할을 하게 된다. 이에 이 논문에서는 출력 필터 인덕턴스 값의 변화에 따른, 단상과 삼상 정류기의 선전류 고조파와 역률을 해석하고, 또한 지금까지 3상 평형상태의 전압에서만 해석되어 오던 것을 3상 불평형상태의 공급전압에까지 확대하여 성능을 평가하였다. 그리고 그것은 5%, 10%, 15%의 3가지의 불평형 레벨을 가지고 해석 되었고, 시뮬레이션과 실제적인 실험을 통하여 적절한 출력 필터 인덕턴스의 디자인 값을 선정하는데 기준을 제시하였다.

1. 서 론

전력 품질(Power Quality)이란 용어가 사용된 것은 실제로는 1968년부터라고 알려져 있으나 전기 에너지의 송전, 배전 분야에서의 전력 품질의 중요성이 대두된 것은 1990년대 후반부터이다.^[3] 불과 몇 년 전까지만 해도 전기를 사용하는 수용가들의 주된 관심사는 전력 공급의 안정성이었다. 최근의 부하들은 과거의 선형적인 부하와는 달리 마이크로 프로세서를 이용한 제어 장치나 전력 전자 기술을 응용한 기기들을 내장하게 되어 그 자체가 공급되는 전력의 품질에 매우 민감해지는 경향을 가지게 되고 아울러 이러한 부하들이 자동화 장치 등을 이

용하여 커다란 망에 서로 연결되어지는 경향을 나타내게 되어 부하 시스템 전체가 전력품질에 매우 민감하게 되었다.^{[6][7]} 전력 품질에 영향을 주는 문제점들은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째는 전력의 공급신뢰성에 영향을 주는 요인으로서 전력 공급이 일시적으로 완전히 중단되거나 사고 등의 원인으로 인해 전압 공급이 순간적으로 중단되었다가 다시 공급되는 것과 같은 것들이 있다. 두 번째는 전압의 질을 떨어뜨리는 것으로서 고조파(harmonics) 문제, 전압 불평형(unbalance)등을 들 수 있다.^[2]

그림 1은 LC 필터를 가진 삼상 정류기를 나타낸 것이다. 일반적인 정류기 해석에서는 출력 필터 인덕턴스를 무한한 값으로 가정을 하여, 선전류 고조파와 역률을 평가하게 되는데, 실제에서는 비용과 효율성에의 측면에서 인덕턴스값을 무한히 크게 할 수 없는 것이 사실이다. 그림으로 인하여 시스템 평가 자체에 상당한 에러를 포함하게 된다.^[1]

본 논문에서는 출력 필터 인덕턴스 값의 변화에 따른, 단상과 삼상 정류기의 THD와 역률의 두 성분에 관하여, 전원전압이 평형·불평형일 때의 조건과 전력품질이 저하된 전원 전압의 가정을 위하여 고조파를 포함한 조건을 가지고 각각을 시뮬레이션과 실제적인 실험을 통하여 적절한 출력 필터 인덕턴스값을 설정하였다.

단상 정류기에서는 출력 필터 인덕턴스값이 무한할 때 최대 역률이 되지만, 정류기 입력 전류 고조파가 최소가 되는 값은 최대 역률을 가지는 값과는 무관하게 특정한 값에서 최소 입력 전류 고조파를 갖는다. 단상과는 달리 삼상 정류기에서는 출력 필터 인덕턴스값이 무한할 때 최소 정류기 입력 전류 고조파와 최대 역률이 된다. 따라서 경제성과 실용성을 고려한 측면에서 무한 인덕턴스의 값을 근사화할 수 있는 최소의 출력 인덕턴스값을 결정하는 것이 중요하겠다.

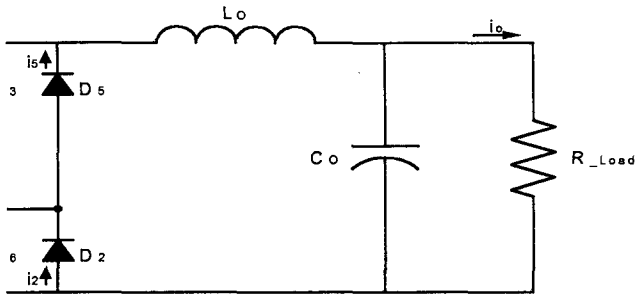


그림 1. 일반적인 3상 정류 시스템

2. 일반적인 디자인 해석

일반적으로 출력필터를 디자인하는데 있어서의 기준은 단순한 출력 전압 리플을 감소시키는 것이므로, 출력 필터 디자인과 선전류 고조파, 역률과의 관계를 무시하는 경향이 있다. 전형적인 입력전류 해석은 출력 필터 커패시터와 인덕턴스를 거의 무한한 값으로 가정을 한 상태에서 해석이 이루어지고 있다. 그러나 실제로 출력 필터 커패시터는 출력 필터 커패시터 전압의 리플을 제로에 가깝게 할 만큼의 값을 선택하는 것이 가능한 반면, 출력 필터 인덕턴스 값이 무한하다는 것과 출력 필터 인덕터 전류의 리플이 제로라는 가정은 실제 응용에서 가능하지 않기 때문에, 정류기 입력전류 고조파와 역률의 일반적인 해석에 상당한 어려움이 발생하게 된다.^[1]

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

3.1 시뮬레이션 조건

출력 필터 인덕턴스값의 변화에 따른 THD와 PF를 측정하기 위해 MATLAB Simulink를 사용하였다. 먼저 전체적인 시스템 구성은 공급 전압 220V, 60Hz의 전원단을 가진 단상과 3상 정류시스템을 simulink로 구현하고, 출력 필터 커패시터는 출력전압 리플이 시뮬레이션에 미치는 영향이 거의 없게 하기 위하여 4700 μ F의 커패시터 값을 설정하였다. 그리고 고조파 주입 방법은 단상과 3상 전원에 전원단 전압고조파를 상정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 전원단 전압은 기본과 전압 이외에 5차 고조파 5%와 7%의 7차 고조파와 11차 고조파를 합성한 전압으로 상정하였다. 이 전원전압의 THD는 11.0587%가 된다. 또한 3상에서는 불평형의 전원을 공급하기 위하여 공급전압의 위상은 그대로 둔 채, 한 상(A상)의 공급전압 크기만 가변하여 세 가지

레벨의 불평형된 전압을 구현하였다.

3.2 시뮬레이션 블록 다이어그램

삼상 다이오드 정류기 시뮬레이션 전체 블록 다이어그램을 그림 2에서 보여주고 있다. 전체 블록 다이어그램은 다시 다이오드 정류기(Diode Rectifier), 입력 전류(input currents), LC filter의 3부분으로 구성되어 진다.

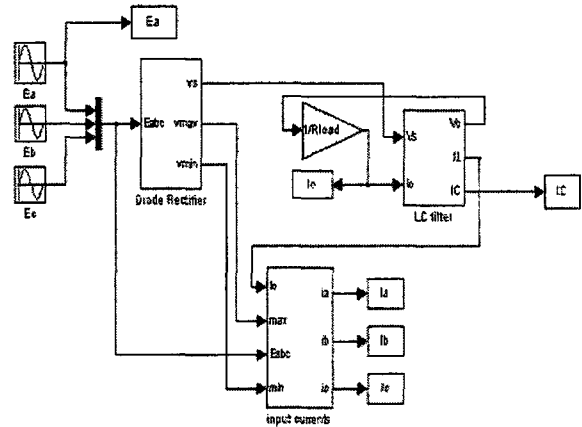
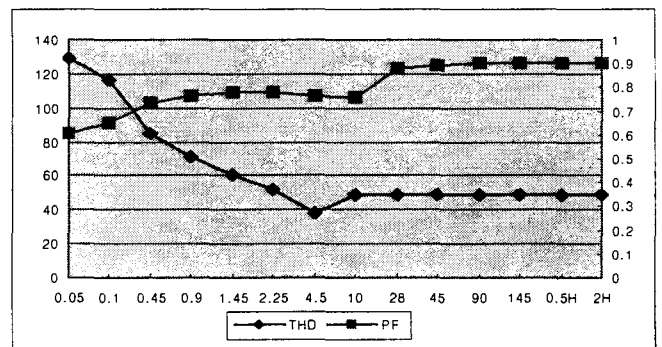


그림 2. 삼상 시뮬레이션 블록 다이어그램

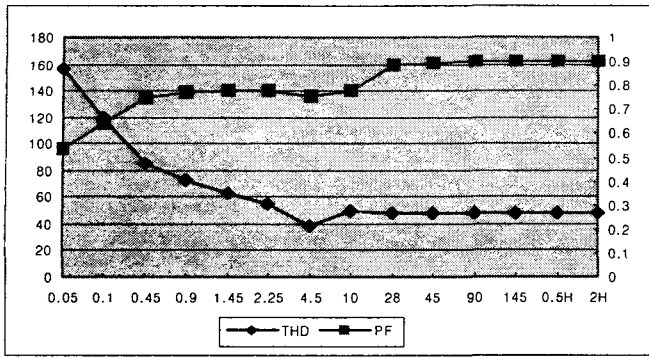
3.3 시뮬레이션 결과

3.3.1 단상 정류시스템

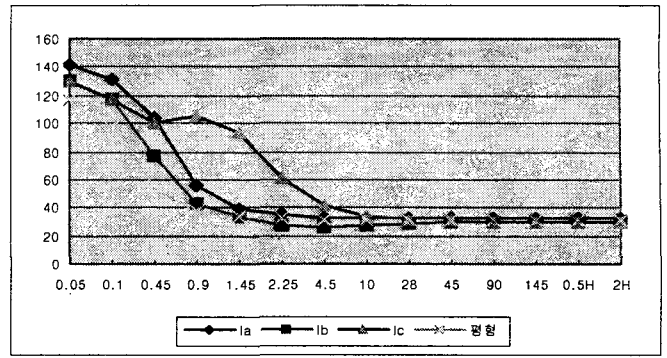
단상 정류기 다이오드의 시뮬레이션 결과를 그림 3에서 보여주고 있다. 그림 3(a)는 평형인 경우를, 그림 3(b)는 고조파를 포함한 경우의 THD와 PF를 각각 나타내주고 있다. 그림 3에서 알수 있듯이 평형이거나, 고조파를 포함한 경우 양쪽 다 역률측에서는 PF=0.78을 가지는 2.25mH의 값에서 최대값을 선택하는 것이 적절하고, 최소 입력전류 고조파를 갖는 출력 필터 인덕턴스값은 전고조파 왜율(THD)이 최소가 되는 값인 4.5mH 근처에서 선택하는 것이 바람직하다.



(a) 평형



(b) 고조파 포함

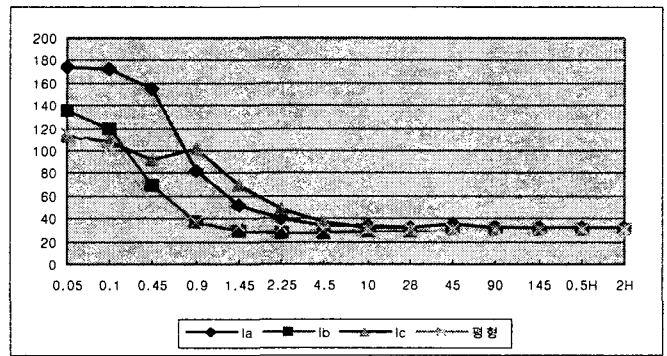


(b) 불평형률 5%

그림 3. 출력필터인덕턴스값에 따른 THD, PF (단상)

3.3.2 삼상 정류시스템

삼상 정류기 다이오드의 시뮬레이션 결과는 그림 4와 그림 5에서 보여주고 있다. 그림 4는 전원전압이 고조파를 포함한 경우와, 세가지 레벨(5%, 10%, 15%)의 불평형률을 가질 때의 THD를 나타내었고, 그림 5는 위의 4가지 경우에서의 PF를 각각 나타내주고 있다. 또한 각 그림은 평형인 상태와의 비교를 위하여 함께 나타내었다. 그림 6에서 알 수 있듯이 각각의 경우에 THD는 10mH에서 최소의 값을 가지는 것을 확인할 수 있고, PF 또한 그 값에서 최대치로 근사화할 수 있는 값을 가지므로 10mH 근처에서 출력 필터 인덕턴스 값을 선택하는 것이 바람직하다.

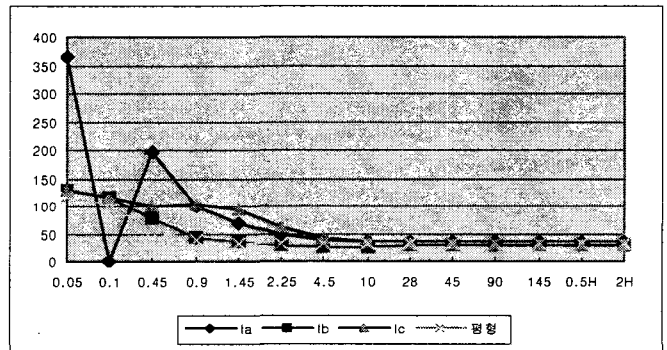


(c) 불평형률 10%

3.4 실험 결과

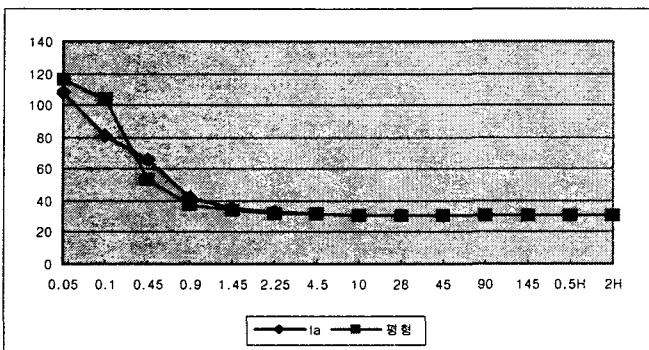
3상 입력 전류의 a, b, c상에 대한 실제적인 실험 파형을 측정하여 시뮬레이션 결과의 THD와 비교하였다.

전체적으로 시뮬레이션 결과치와 THD가 2-3%의 오차범위내에서 일치하였다.

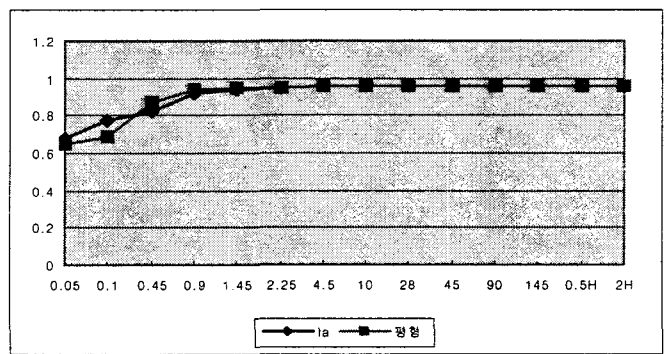


(d) 불평형률 15%

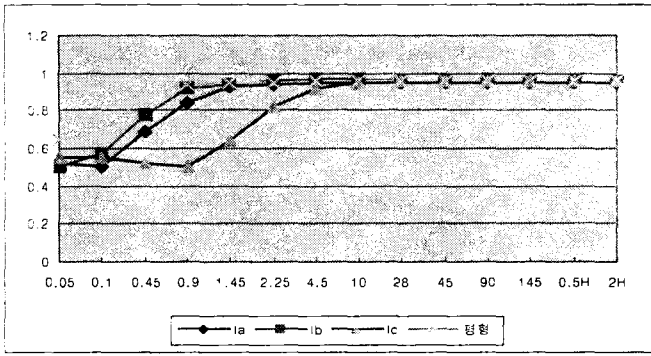
그림 4. 출력필터인덕턴스값에 따른 THD (3상)



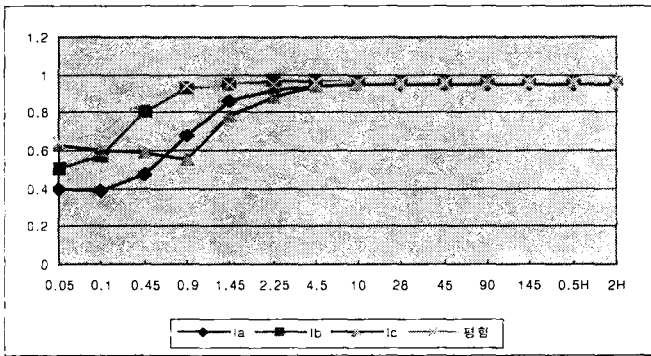
(a) 고조파 포함



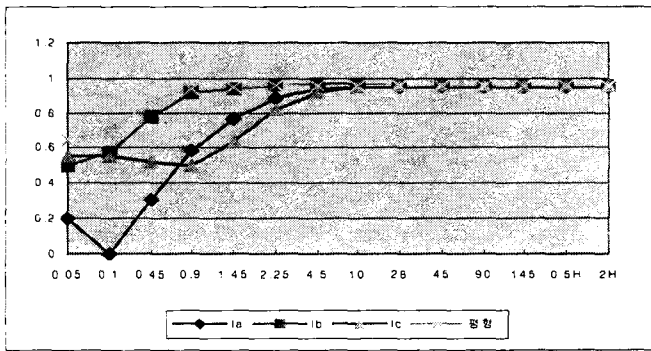
(a) 고조파 포함



(b) 불평형률 5%



(c) 불평형률 10%



(d) 불평형률 15%

그림 5. 출력필터인덕턴스값에 따른 PF (3상)

5. 결론

본 논문에서는 공급전압의 평형에서와 함께, 공급 전압의 위상은 고려치 않은 전압의 크기로만 한정되어진 불평형 공급전압에서의 조건하에서, 출력 필터 인덕턴스의 유한한 값과 적절한 전류 리플을 가진 실제 응용을 위하여, 단상과 삼상 정류기의 역률과 THD의 양적인 디자인 데이터를 제공함으로써, 새로운 설비를 설계하고자 하는 설계자나, 기존의 설비에 의해 발생되고 있는 고조파와 역률문제의 평가를 위한 기준을 제시하였다. 단상 정류기에서

는 출력 필터 인덕턴스값이 무한할 때 최대 역률이 되지만, 정류기 입력 전류 고조파가 최소가 되는 값은 최대 역률을 가지는 값과는 무관하게 특정한 값에서 최소 입력 전류 고조파를 갖는다. 단상과는 달리 삼상 정류기에서는 출력 필터 인덕턴스값이 무한할 때 최소 정류기 입력 전류고조파와 최대 역률이 된다. 따라서 경제성과 실용성을 고려한 측면에서 무한 인덕턴스의 값을 근사화할 수 있는 최소의 출력 인덕턴스값을 결정하는 것이 중요하다.

참고 문헌

- [1] 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.
- [2] 이상준, "순간 전압 강하 보상용 직렬 보상기를 위한 새로운 PLL 및 전압 제어기에 관한 연구", 서울대학교 전기·컴퓨터 공학부, 공학박사학위논문, August. 2003.
- [3] Math H. J. Bollen, "Understanding Power Quality Problems : Voltage Sags and Interruptions", IEEE Press, 2000.
- [4] W. F. Ray and R. M. Davis, "The Definition and Importance of Power Factor for Power Electronic Converters" EPE. pp. 799~805, Aachen 1989.
- [5] A. Ghosh G. Ledwich, Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [6] M. McGranaghan, "Overview of Power Quality Standards," PQ Network Internet Site, <http://www.pq-net.electrotek.com/pqnet>.
- [7] Power Quality Tutorial, "PQ103 - Equipment Sensitivity Basics," Power Quality Assurance Internet Site, <http://www.powerquality.com/pqpark>
- [8] A. Arora, K. Chan, T. Jauch, A. Kara, E. Wirth, "Innovative System Solutions for Power Quality Enhancement," ABB Reviews, pp. 2-10, 1998.