

포화특성을 고려한 리액터의 특성 분석

(Characteristics Analysis of Reactor Considering Magnetization Saturation)

김종겸* · 박영진

(Jong-Gyeum Kim · Young-Jeen Park)

Abstract

As the increasing of non-linear load, filter is coming to be high gradually in order to reduce the harmonic which occurs from the power conversion. The maintenance of passive filter is easier than active filter and it has been widely used in the industrial site. This passive filter is connected with condenser and reactor by series and parallel and it is installed at the front of nonlinear load. The breakdown of passive filter occurs frequently at the reactor side rather than capacitor. So the breakdown cause close examination is necessary.

In this paper, we analyzed that the electric stress of reactor which is considered magnetization saturation at the passive filter. we confirm that the reduction of harmonics and the electric stress of reactor is influenced by the linear and non-linear element of reactor

Key Words : Magnetization Curve, Nonlinear Load, Reactor, Capacitor, Harmonics

1. 서 론

산업현장에서는 전등, 전열 부하와 같은 선형부하 외 정류기 또는 가변속 구동장치와 같은 비선형 부하가 많이 사용되고 있다. 비선형 부하는 전력변환과정에서 고조파가 발생된다. 이 고조파를 줄이기 위해 수동형 필터가 널리 사용되고 있다.

비선형 부하에서 발생하는 고조파를 가장 쉽게 저감하기 위해 설치하는 수동형 필터에서 전류 고조파는

리액터와 콘덴서가 같지만, 전압 고조파는 대부분 리액터에 집중되어 리액터가 전압 스트레스가 많이 받는 것으로 알려져 있다[1-5]. 실제 수동형 필터에 사용되는 리액터와 커패시터 중에서 리액터가 커패시터보다 고장비율이 약간 높게 보고되었다[6].

수동형 필터는 특정차수의 고조파를 저감하기 위해 설계하는 것으로서 사용되는 리액터의 경우 전류의 증가에도 선형 특성을 유지하도록 하지만, 전류가 증가할 경우 포화되는 경우가 있다. 이때 정격전류 범위가 초과할 경우 인덕턴스 값이 달라지므로 이에 따른 특성 해석이 필요하다.

본 연구에서는 리액터의 포화성분을 고려하여 콘덴서와 연결하여 필터로서 사용하는 경우에서 전압 및 전류 특성을 분석하였다.

* 주저자 : 강릉원주대학교 전기공학과 교수
Tel : 033-760-8785, Fax : 033-760-8780
E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr
접수일자 : 2012년 1월 2일
1차심사 : 2012년 1월 5일
심사완료 : 2012년 1월 11일

2. 필터용 리액터와 콘덴서

비선형부하에서 발생하는 고조파를 저감하기 위해 리액터와 콘덴서를 직렬 연결한 수동형 필터가 많이 이용되고 있다. 고조파 전류를 저감하기 위해 설치하는 수동형 필터에서는 콘덴서 보다 리액터가 더 많은 스트레스를 받고 있다[2-3]. 리액터와 콘덴서를 직렬 연결할 경우 전압에 의해 스트레스는 리액터가 대부분 받게 된다. 그러나 리액터에 대해서는 콘덴서보다 전압 및 전류 허용범위가 낮게 설정되어 있다[7]. 비선형 부하에서 발생하는 고조파 전류를 흡수하기 위해 설치하는 수동형 필터에서 리액터는 선형특성 외 전류 값이 높아질 경우 비선형 요소가 고려되어야 한다. 따라서 리액터가 비선형 요소가 포함될 경우 받는 전압 및 전류 특성 분석은 리액터 설계에도 도움이 될 것이다.

2.1 리액터 특성

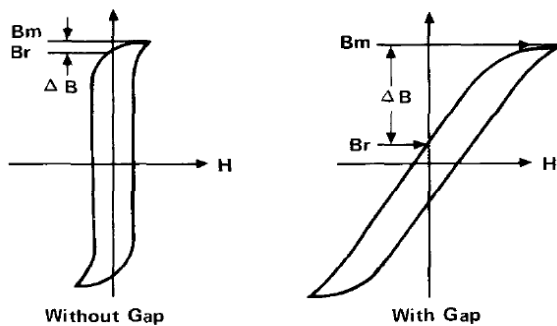


그림 1. 공극의 유무에 따른 리액터의 자화곡선
Fig. 1. Magnetization curve of reactor with/without airgap

리액터는 변압기 철심과 달리 공극을 갖도록 설계하고 있다. 공극이 포함될 경우 높은 자화를 감자하는 효과를 가져 히스테리 루프를 깎아 변형시키고, 높은 투자율을 가진 재료의 투자율에도 상당히 감소시킨다. 그림 1은 공극의 유무에 따른 자로의 유효길이를 비교한 것으로서 공극이 포함되지 않는 것은 변압기가 해당되고, 공극이 포함된 경우는 리액터에 이용되는 것으로서 자로 길이가 변압기에서

이용하는 것보다 약간 큰 것을 알 수 있다. 또한 공극이 없는 경우 잔류자속밀도와 최대자속밀도의 크기에서는 큰 차이가 없지만, 철심에 공극이 고려된 경우에는 이 두 경우의 차이는 높은 편이다[7]. 따라서 자계와 자속밀도의 기울기에 차이가 존재함을 알 수 있다.

리액터에 사용되는 철심에서 공극의 고려는 변압기 포화 때문에 누설 인덕턴스에 의해 발생한 전압 스파이크를 상당히 제거하거나 줄이는 역할을 하고 있다.

2.2 커패시터 특성

커패시터는 리액터와 달리 전류의 증가에 따라 포화 특성을 가지지 않는다. 그러나 리액터에 연결할 경우 커패시터의 전압(V_C)은 직렬로 설치한 리액터(L)에 의해 다음과 같이 전압이 상승한다[2,6].

$$V_C = \frac{V}{1 - \frac{L(\%)}{100}} [V] \quad (1)$$

커패시터에 연결되는 리액터의 전압(V_L)은 식 (1)의 커패시터 전압으로 부터 구할 수 있다[2,6].

$$V_L = \frac{1}{\sqrt{3}} \times V_C \times \%L [V] \quad (2)$$

3. 해석 및 분석

비선형부하에서 발생하는 고조파 전류를 줄이기 위해 설치하는 수동형 필터에서 리액터가 선형성분만을 고려한 경우와 포화성분을 고려한 두 가지에 대하여 해석하였다. 리액터의 비선형 특성 해석은 전자계과도해석 프로그램(EMTP)[8]의 type 93을 이용하였다.

그림 2는 비선형 전류를 발생하는 대표적인 3상 전력변환회로도를 나타낸 것이다. 이 전력변환과정에서 발생하는 전류 파형을 그림 3에 나타내었다. 역시 정류과정에서 고조파 성분이 발생하므로 이를 저감하기 위해 수동형 필터가 필요하다.

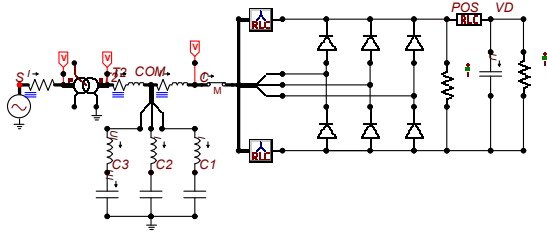


그림 2. 해석 회로도
Fig. 2. Analysis circuit diagram

그림 3은 그림 2의 전력변환과정에서 컨버터 앞단에 서 발생하는 전류파형을 나타낸 것으로서 한 주기에 2 개의 피크와 딥이 포함된 고조파 성분을 지니고 있다. 이 고조파 전류성분은 임피던스가 낮은 쪽에 나쁜 영향을 줄 수 있다.

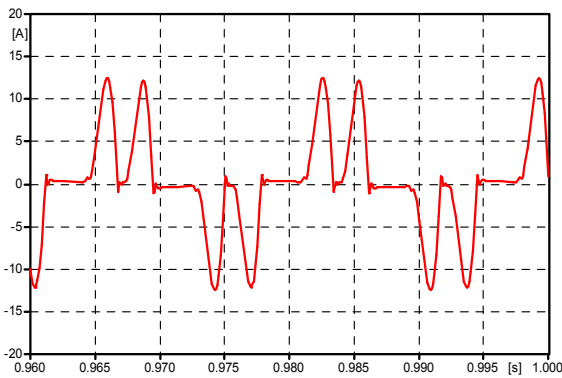


그림 3. 비선형 부하의 사용시 발생하는 전류
Fig. 3. Current waveform by using nonlinear load

그림 3과 같은 전류파형에서 고조파 성분을 저감하기 위해서는 발생하는 고조파의 차수별 크기를 분류해야 한다. 그림 4는 그림 3과 같은 전류파형을 고조파 스펙트럼 분석을 실시한 것이다.

그림 4에서 기본파를 제외하면 6개의 전력변환 소자를 사용한 경우 고조파는 $(6n \pm 1)$ 의 고조파가 발생하는데 그 중에서 5차 고조파가 가장 높으므로 수동형 필터는 주로 5차 고조파를 저감하도록 설계하는 경우가 많다. 그래서 본 연구에서도 5차 고조파를 저감하는 필터의 설계시에 리액터 파라미터에 따라 선형 및 비선형 성분에 따른 특성 해석을 실시하였다.

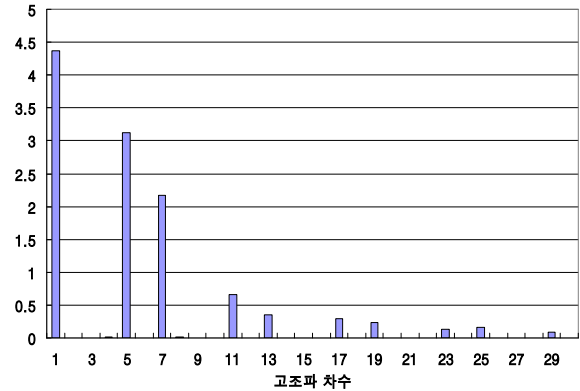


그림 4. 전류 고조파 스펙트럼 분석
Fig. 4. Current harmonics spectrum analysis

3.1 선형 요소만 고려한 경우 동작특성

수동형 필터로 사용된 리액터와 커패시터 파라미터는 각각 $3.75[mH]$ 와 $75[\mu F]$ 이다. 이 리액터의 전류에 대한 자화곡선은 그림 5와 같이 전류 증가에 쇄교자속은 선형적으로 변화하는 특성을 고려하였다.

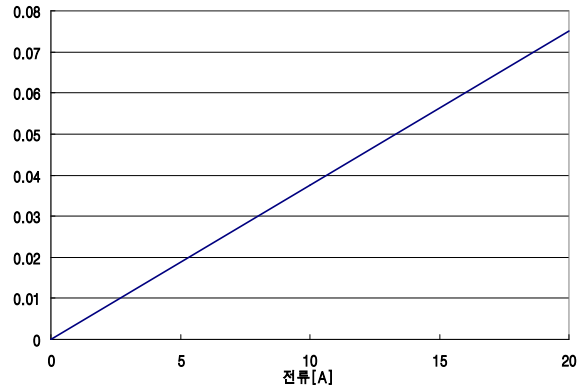


그림 5. 리액터의 자화곡선(선형)
Fig. 5. Magnetization curve of reactor(linear)

그림 5와 같이 리액터가 선형 요소만으로 사용되는 동작하는 조건에서 커패시터와 직렬로 연결하고서 그림 2와 같은 비선형 부하에서 발생하는 고조파 전류를 저감하기 위해 수동형 필터로 부착한 리액터의 전류파형은 그림 6과 같이 고조파 성분이 포함되어 있다.

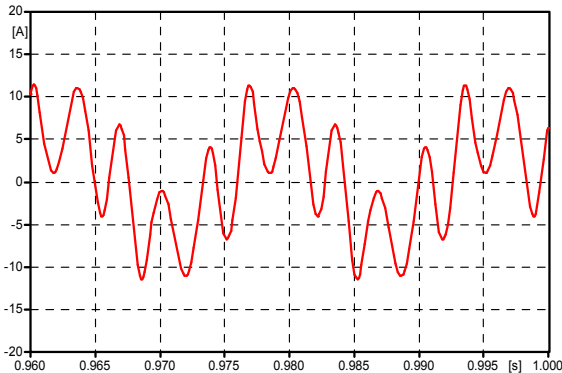


그림 6. 리액터 전류
Fig. 6. Reactor current

리액터의 선형성분만 고려한 경우 전류파형은 그림 6과 같이 고조파 성분이 포함된 전류파형을 차수별로 고조파 스펙트럼분석을 실시할 경우 결과는 그림 7과 같다.

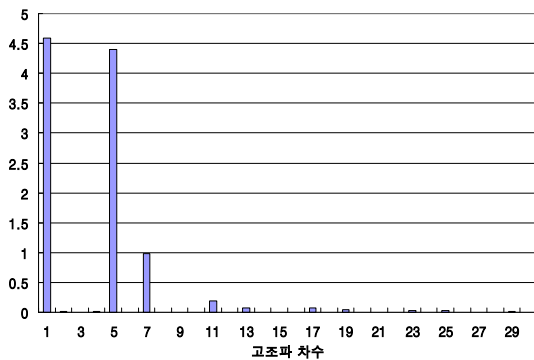


그림 7. 리액터 전류 고조파 스펙트럼
Fig. 7. Harmonics spectrum for reactor current

그림 7에서 5고조파성분이 기본파에 가까울 정도로 높은 값을 나타내고 있어 비선형 부하에서 발생하는 고조파 중에서 가장 높은 비율을 차지하고 있는 5차 고조파를 저감하기 위한 수동형 필터로서의 역할이 가장 잘 이루어짐을 알 수 있지만, 전기적 스트레스 또한 상대적으로 높은 편이라고 볼 수 있다.

그림 8은 수동형 필터로 작용하고 있는 커패시터의 전압파형으로 약간의 고조파 성분을 포함한 실효치는 229.16[V]로서 리액터를 부착하지 않은 경우 218.9[V]보다 10.26[V]가 상승하였다.

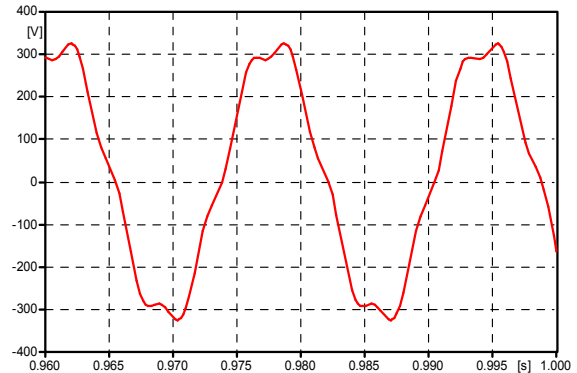


그림 8. 커패시터 전압
Fig. 8. Capacitor voltage

그림 9는 그림 8의 전압 파형에 대한 고조파 분석을 실시한 결과이다. 기본파의 전압은 식 (1)로 구한 결과의 값과 같은 크기를 나타내지만, 5고조파는 추가로 발생한 것을 알 수 있다. 따라서 리액터의 추가로 커패시터에 걸리는 전압은 식 (1)로 구한 값보다 약간 높은 값을 포함하고 있다.

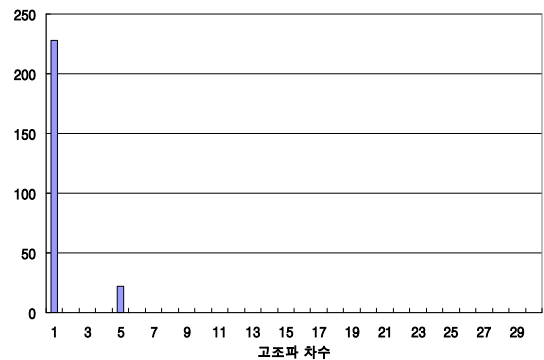


그림 9. 커패시터 전압 고조파 스펙트럼
Fig. 9. Harmonics spectrum of capacitor voltage

그림 10은 리액터의 전압파형을 나타낸 것으로서 기본파와 같은 크기로 반복되는 주기의 차수가 포함된 것을 확인할 수 있다.

위와 같이 왜형된 전압파형에서 차수별 크기를 알기 위해서는 고조파 스펙트럼 분석을 실시한다. 그림 11은 리액터에 걸리는 차수별 전압 크기를 나타낸 것으로서 기본파 전압은 9.12[V]로서 식 (2)에서 계산한 결과가 그대로 반영된 것이지만, 5고조파 전압은 기본파

전압보다 높은 21.97[V]로서 기본파의 2.4배에 해당하는 값이다. 리액터에 걸리는 실효치 전압은 23.8[V]가 된다.

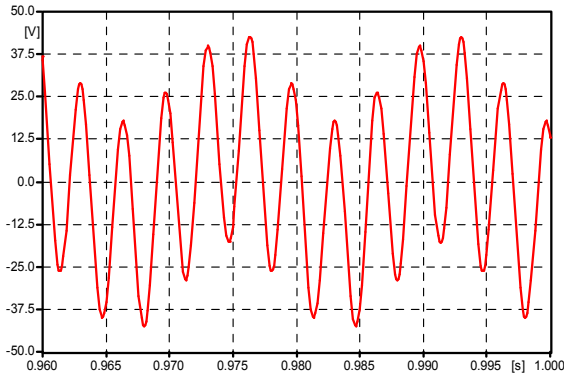


그림 10. 리액터 전압
Fig. 10. Reactor voltage

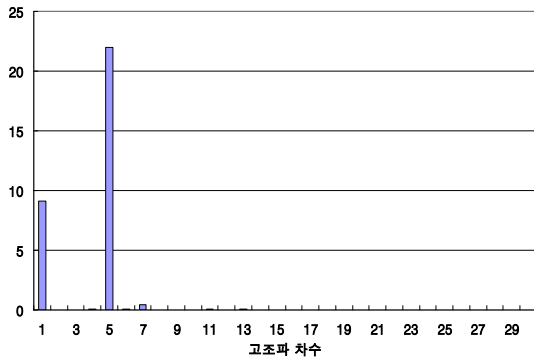


그림 11. 리액터 전압 고조파 스펙트럼
Fig. 11. Harmonics spectrum of reactor voltage

리액터의 선형 성분만을 고려하여 해석한 결과 비선형 부하에서 발생하는 고조파 전류를 저감하기 위해 설치한 리액터와 커패시터에서 특정 차수를 저감하기 위해 설계한 필터 성분 중에서 리액터가 커패시터 보다 많은 스트레스를 받고 있다는 것을 확인할 수 있다.

3.2 비선형 요소를 고려한 경우 동작특성

그림 12는 리액터의 비선형 자화특성곡선을 나타낸 것으로서 그림 1의 공극을 가진 자화곡선에 근접한 것으로서 전류가 일정 범위 내에서는 선형적으로 변화

하지만, 어느 범위를 넘을 경우 포화되는 비선형 요소를 지니고 있는 것으로서 이 특성에 가까운 전자계 과도해석 프로그램[8]의 구성요소로서는 type 93이 해당되어 이를 이용하여 해석하였다.

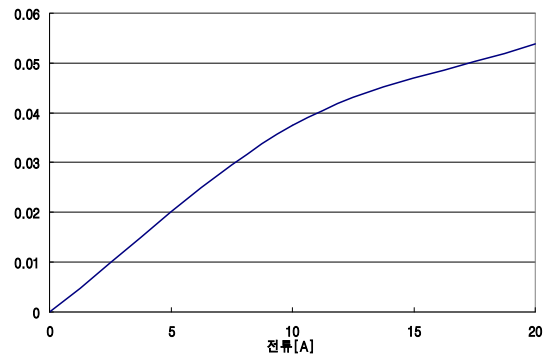


그림 12. 리액터 비선형 자화 곡선
Fig. 12. Reactor nonlinear magnetization curve

그림 13은 그림 12와 같은 자화특성을 가지는 리액터를 사용하여 수동형 필터로서 동작할 경우 리액터에 흐르는 전류 파형을 나타낸 것이다. 이 파형은 리액터가 완전 선형 특성을 가진 경우 그림 6의 해석결과와는 달리 정현파에 가까운 형태를 나타내고 있다.

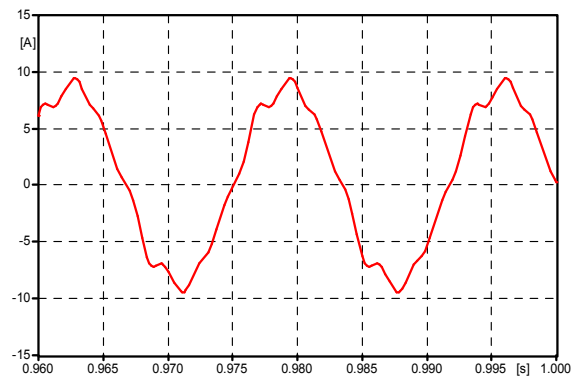


그림 13. 리액터 전류
Fig. 13. Reactor current

그림 14는 그림 13과 같은 전류가 흐를 경우에 대한 전류 고조파 스펙트럼을 분석한 것이다. 그림 14에서 기본파를 제외한 나머지 차수의 전류는 아주 작은 값이지만, 7차가 5차보다 약간 높은 상태임을 알 수 있다.

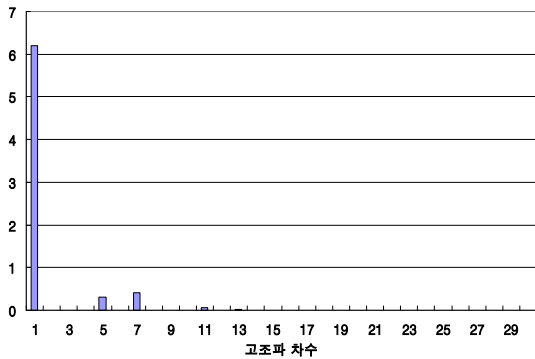


그림 14. 리액터 전류의 고조파 스펙트럼
Fig. 14. Harmonics spectrum of reactor current

위와 같이 특정 차수를 줄이기 위해 설계한 필터가 리액터의 포화성분이 포함된 경우 필터로서 역할이 어렵게 됨을 알 수 있다.

그림 15는 커패시터 전압을 나타낸 것으로서 고조파 성분이 거의 포함되지 않은 정현파에 가까운 것을 확인할 수 있다.

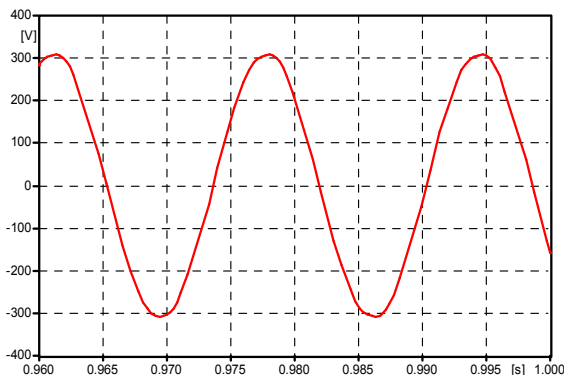


그림 15. 커패시터 전압
Fig. 15. Capacitor voltage

그림 16은 그림 15의 커패시터 전압에 대한 고조파 스펙트럼을 분석한 결과로 기본파 외 5차와 7차는 매우 작은 값으로서 무시할 정도이다. 이 파형의 실효치는 219.6[V]로서 5차에 해당하는 리액터를 추가할 경우 식 (1)에서 구한 값보다 약간 작은 값을 나타내었다.

그림 17은 리액터의 비선형 성분 포함시 리액터에

나타나는 전압을 나타낸 것이다. 전압에는 기본파 외 고조파 성분이 약간 포함된 것을 알 수 있다.

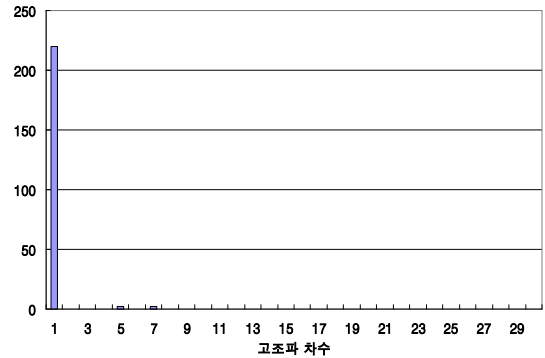


그림 16. 커패시터 전압 고조파 스펙트럼
Fig. 16. Harmonics spectrum of capacitor voltage

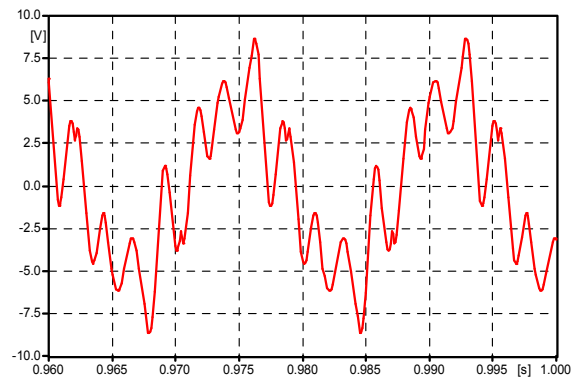


그림 17. 리액터 전압
Fig. 17. Reactor voltage

그림 17의 리액터 전압 파형에 고조파 분석은 그림 18과 같다. 그림 18에서 당초 5차 고조파를 줄이기 위해 설계할 경우 리액터는 5차 고조파가 가장 많이 포함되어야 하지만, 실제 7차가 5차 보다 약간 높은 값을 가지므로 당초 목표한 고조파 필터로서 역할을 하기 힘들다는 것을 알 수 있다.

그림 18에서 실효치 전압은 식 (2)로 계산한 값보다 매우 작은 4.34[V]가 됨을 알 수 있다.

필터로서 사용되는 리액터의 경우 특정 차수 고조파를 흡수하기 때문에 가장 다른 차수에 비해 설계한 차수의 전압이나 전류가 가장 높아야 하지만, 자화곡선이 비선형에서는 이 범위가 포함되지 않는다는 것을

확인할 수 있다. 따라서 필터로서의 역할이 어렵게 됨을 알 수 있다.

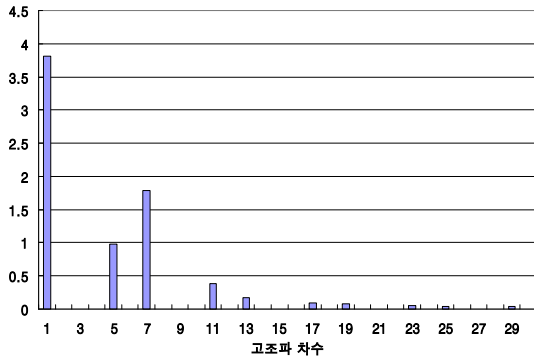


그림 18. 리액터 전압 고조파 분석
Fig. 18. Harmonics spectrum of reactor voltage

4. 결 론

본 연구에서는 비선형 부하에서 발생하는 고조파 전류를 저감하기 위해 설치하는 수동형 필터의 리액터에 대해 선형 및 비선형 자화곡선을 적용할 경우 받을 수 있는 전기적인 스트레스를 분석하였다.

리액터의 자화곡선이 선형적인 경우 특정 차수의 고조파를 저감하는데 아주 효과적으로 작용하지만, 전압 및 전류 스트레스가 높아 고장의 원인을 제공할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 리액터가 포화되는 경우에 대한 비선형 곡선을 적용하여 해석한 결과, 전압 및 전류값을 아주 낮아 전기적인 스트레스를 받지 않지만, 당초 목표한 특정차수의 고조파를 저감하지 못하는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구결과는 향후 수동형 필터에서 리액터의 설계에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2011년도 추계학술대회(2011. 11. 23, 과학기술회관)에서 발표하고 우수추천 논문으로 선정된 논문임.

References

- [1] Thomas M. Blooming, "Capacitor Application Issues", IEEE Trans on IAS, Vol.44, No.4, pp.1013-1026, Jul/Aug.2008.
- [2] 김종겸, 박영진, 이은웅, "고조파 필터용 커패시터와 리액터의 특성해석", 대한전기학회 논문지, 제58P권, No.1, pp.1-8, 2009. 03.
- [3] 김일중, 김종겸, "수동형 필터의 리액터 및 커패시터 특성 해석", 조명전기설비학회 논문지, Vol.23, No.2, pp.82-88, 2009. 02.
- [4] IEEE Standard for Shunt Power Capacitor, IEEE Std 18-2002.
- [5] 김종겸, 김일중, "필터용 리액터의 포화특성에 따른 동작 분석", 조명전기설비학회 추계학술대회 발표논문, pp.30~31, 2011, 11.
- [6] 지식경제부, "전기품질 변동에 따른 콘덴서의 전기적 스트레스 해석 및 저감 방안 연구", 2009. 12.
- [7] IEC 60076-6, "Power transformer-part 6: Reactors".
- [8] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP Theory Book)", BPA 1986.

◆ 저자소개 ◆



김종겸(金宗謙)

1961년 10월 3일생. 1984년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1996년 충남대 공대 전기공학과 졸업(박사). 1987~1988년 한국통신공사 근무. 1988~1996년 한국수자원공사(K-Water) 근무. 1996년~현재 국립 강릉원주대학교 전기공학과 교수. 대한전기학회 평의원. 전기기기 및 에너지변환 시스템부문 학술위원장. 한국조명·전기설비학회 학술이사.

Tel : (033)760-8785

E-mail : jgkim@gwnu.ac.kr



박영진(朴永鎭)

1959년 11월 19일생. 1982년 단국대학교 전기공학과 졸업. 1996년 단국대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 강릉원주대학교 전기공학과 교수.

Tel : (033) 760-8784

E-mail : popspark@gwnu.ac.kr