



비선형 부하의 특성과 역률 관리에 미치는 영향 및 대책

김세동 <두원공과대학 교수/공학박사/기술사>

1 서론

최근 초고층 복합용도의 첨단정보 빌딩(최신의 빌딩자동화시스템, 사무자동화시스템, 정보통신시스템과 양질의 건축자재, 구조를 갖고 경제성이 종합적으로 고려되며, 장래 정보화에 완벽하게 대응할 수 있는 유연성을 가진 건축물)과 정보화주택, 사이버주택 등이 증가하고 있다. 이와 같은 건축물에 있어서는 순간 정전도 허용하지 않는 대형 컴퓨터 및 OA기기의 사용이 급증함은 물론 빌딩 기능이 고도화되면서 냉방 부하용 전력소비가 크게 증가되어 전기 에너지 소비가 매년 급속히 증가하고 있는 실정으므로 효율적인 전력관리 및 전기수용설비의 적절한 수요 관리가 절실하게 필요하다.

효율적 전력관리 기법은 크게 부하관리, 역률관리, 전압관리로 나눌 수 있으며, 무엇보다도 역률관리는 중요하다. 전력부하는 일반적으로 유도성 부하로 인하여 낮은 역률의 무효전력이 발생하게 되며, 전기설비 중 비교적 역률이 나쁜 부하는 동력부하로서 전체 전력부하의 약 2/3 정도에 해당한다. 이로 인하여 선로 손실과 변압기 부하손실이 증가하고, 전압강하 및 수전설비용량이 커지게 된다.

또한, 고조파 발생원 부하의 사용 증가로 인하여

역률의 저하가 우려되며, 이 때문에 유효전력이 적어지고, 변압기 용량을 증가시킬 우려가 있으므로 수변전설비의 설계시에 역률 문제를 신중하게 다루어야 한다.

본고에서는 전기설비 기술자들이 소홀히 취급하고 있는 비선형부하의 특성에 대해 알아보고, 비선형 부하가 역률 관리에 미치는 영향 및 대책에 대해서 알아보고자 한다.

2. 비선형 부하의 특성과 역률 관리에 미치는 영향

2.1 고조파발생원인 비선형 부하의 특성

일반적으로 상용전압과 부하전류 파형 사이의 관계가 직선상인 경우의 부하를 선형 부하(Linear Load)라 하며 그림 1과 같다. 즉 전류파형은 전압파형과 동일한 형태이다. 이러한 경우 정현파 전압은 정현파 전류를 만들며, R-L-C로 구성된 부하를 말한다.

반면에 상용 전압과 전류 파형 사이의 관계가 비직선상인 경우를 비선형 부하(Nonlinear Load)라 하며, 정류 회로를 갖는 부하가 해당된다. 그림 2는 비선형부하의 특성을 나타낸 것이며, 정현파 전압과 모

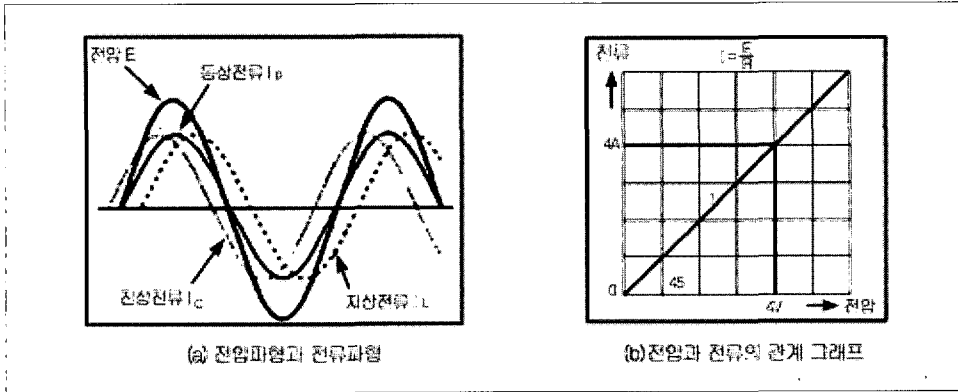


그림 1. 선형 부하의 특성

양이 다른 전류 파형 사이의 관계를 나타내고 있다. 이로 인해 이 둘 사이의 관계는 직선상이 아니며, 이러한 형태의 전류 파형은 왜형파이며, 이 파형은 기함수파이므로 기수차수의 성분만 존재하며, 중앙의 피크값이 크고 좌우의 값은 낮으므로 3, 5, 7, 9조파 등 낮은 차수의 고조파가 대부분이다.

비선형 부하의 대표적인 부하인 Capacitor 입력형 정류회로는 그 입력측에 브리지 전파 정류회로와 평활용 캐패시터를 갖는 구조이다. 대표적인 것으로는 TV, 음향기기 등의 가전제품을 비롯하여 복사기 등 각종 OA기기, PLC 등 각종 FA기기 및 컴퓨터에 내장된 SMPS(Switching Mode Power Supply) 등이 있으며, 이들 모두 그 보급이 날로 확대되는 추세이기 때문에 비선형 부하의 대표적인 예이다.

일반적으로 가정에서 사용하고 있는 가전기기의 전류 왜곡률 발생 현황을 살펴보면, 반파 정류회로로서 평활용 캐패시터가 없는 경우(예, 전자오븐, 전자레인지)의 전류의 왜곡률은 20~40(%), 브리지 전파 정류 회로로서 평활용 캐패시터가 있는 경우(TV수상기, 라디오, 카세트 등)의 전류 왜곡률은 40~110(%), SCR 또는 TRIAC 등의 소자를 이용하여 교류 양방향의 위상을 제어하는 형태(예, 전기 담요, 조광기) 등의 전류 왜곡률이 0~110(%) 발생하고 있다.

이상과 같은 부하는 그 자체의 성질상 전원으로 부터 왜형파 전류를 소모하므로 계통 전체에 대해서 고조파 전류원으로 동작하여 계통내를 순환하는 고조파 전류를 흘리거나 계통내의 전압파형을 찌그러뜨려서

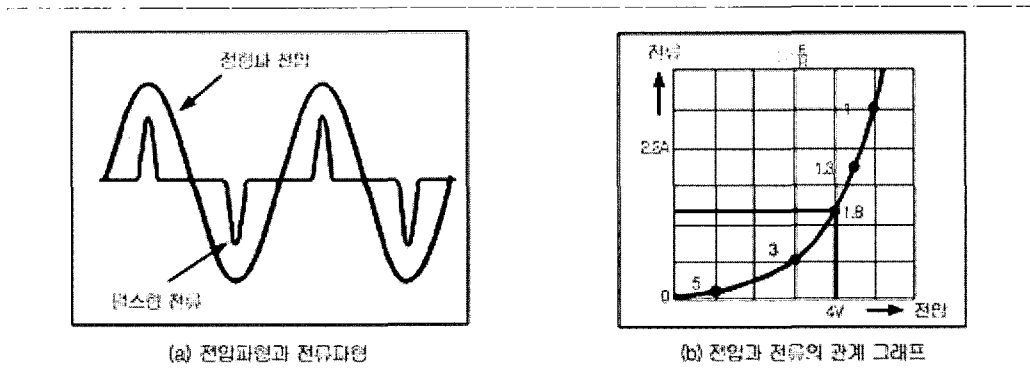


그림 2. 비선형 부하의 특성

기술해설

다른 기기에 영향을 준다.

즉, 이상과 같은 부하로부터 발생하는 고조파 전류는 수용가의 수변전설비에 흘러 전력계통에 유출하게 된다. 따라서, 사이리스터 응용기기의 보급에 따라서 발생하는 고조파가 전력계통에 접속된 다른 부하나 주변의 전자기기 또는 통신과 신호선 등에 미치는 영향도 고려해야 할 것이다.

2.2 비선형 부하가 역률 관리에 미치는 영향

비정현파의 교류 전류는 같은 파형이 주기적으로 반복된다는 가정 하에서 식 (1)과 같이 풀이에 급수 형태로 나타낼 수 있다.

$$i_{(t)} = \sqrt{2} I_1 \cos(\omega t - \Phi_1) + \sqrt{2} I_2 \cos(2\omega t - \Phi_2) + \sqrt{2} I_3 \cos(3\omega t - \Phi_3) \cdots \sqrt{2} I_n \cos(n\omega t - \Phi_n) \quad (1)$$

여기서, 우변의 첫 항은 기본파 성분을 나타내고, 나머지 성분이 고조파 성분이 된다.

$$i_i = \sqrt{2} I_1 \cos(\omega t - \Phi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{2} I_n \cos(n\omega t - \Phi_n) = i_1 + i_H \quad (2)$$

여기서, 고조파 성분만의 실효치는 식 (3)과 같다.

$$I_H = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \cdots + I_n^2} \quad (3)$$

따라서, 전체 실효치와 기본파 실효치 사이에는 식 (4)와 같다.

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_H^2} \quad (4)$$

여기서, 기본파 성분을 전압과 동상인 유효 성분과 전압과 직교하는 무효 성분으로 나누어 나타내면, 위

의 식은 식 (5)와 같다.

$$I = \sqrt{I_P^2 + I_Q^2 + I_H^2} \quad (5)$$

한편, 고조파에 의해 전류 파형이 왜곡된 정도를 나타내기 위해서 총고조파 왜형률(Total Harmonic Distortion, THD)이라 불리는 지수가 사용되는데, 이는 식 (6)과 같이 기본파 실효치에 대한 고조파 성분의 실효치의 비율로 정의된다.

$$THD_i = \frac{I_H}{I_1} \quad (6)$$

식 (6)에 식 (4)를 대입하여 정리하면 식 (7)과 같다.

$$THD_i = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (7)$$

보통은 고조파 전류를 직접 측정하기 보다는 전체 실효치와 기본파 실효치를 측정하여 고조파 성분의 실효치가 간접적으로 측정하는 것이 보다 용이하기 때문에 위의 식이 많이 사용된다. 위의 식에서 보듯이 고조파 성분이 존재하면, 전체 전류의 실효치는 기본파 성분만 있을 경우에 비하여 항상 커지게 된다. 그리고, 고조파 성분은 위상과 관계없이 유효 전력 전달에는 전혀 기여하지 않는다. 즉 아래와 같이 주파수가 다른 정현파 성분간의 곱은 평균적으로 영이 되기 때문에 기본파 주파수의 전압과 고조파 전류의 곱은 유효 전력에 기여하지 않는다.

$$\int_0^{2\pi} \cos(\omega t) \cos(k\omega t - \Phi_k) d(\omega t) = 0 \quad (k \neq 1) \quad (8)$$

따라서, 유효 전력은 기본파 성분만 있을 경우와

동일하며, 식 (9)와 같다.

$$P = V I_1 \cos \Phi_1 = V I_P \quad (9)$$

그리고, 기본파에 의한 무효 전력은 마찬가지로 식 (10)과 같다.

$$Q = V I_1 \sin \Phi_1 = V I_Q \quad (10)$$

이와 같은 형태로 고조파 성분에 의한 무효 전력을 식 (11)과 같이 정의한다.

$$H = V I_H \quad (11)$$

이들간의 상호 관계는 위의 식들로부터 식 (12)와 같이 표현한다.

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2 + H^2)} \quad (12)$$

식 (12)를 그림으로 나타내면 그림 3과 같이 육면체의 의 대각선과 세변의 관계로 나타낼 수 있다. 일반적으로 역률은 실제 전달되는 유효 전력과 피상 전력간의 비율로서 정의되며, 식 (13)과 같다.

$$PF = \frac{P}{S} \quad (13)$$

식 (13)에 $P = V I_1 \cos \Phi_1 = V I_P$ 를 대입하면 식 (14)와 같다.

$$PF = \frac{V I_1 \cos \Phi_1}{V I} = \frac{I_1}{I} \cos \Phi_1 \quad (14)$$

따라서, 고조파를 포함한 일반적인 경우의 역률은 기본파 실효치가 전체 실효치에서 차지하는 비중이 곱해진 형태로 된다. 고조파가 없는 경우에는 전체 실효치가 기본파 실효치와 같아지므로 위의 식은 기본파만 있을 경우의 역률과 같아진다. 이러한 의미에서 $\cos \Phi_1$ 을 기본파 역률 FPF(Fundamental Power Factor)이라 하며, 혹은 전압과 전류간 위상의 차이에서 나타나는 지수라는 의미에서 변위를 (Displacement Factor)이라 하기도 한다. 고조파가 포함된 역률을 식 (15)와 같이 표현하기도 한다.

$$\text{역률} = (\text{기본파 성분의 변위율}) \times (\text{고조파율} : \text{HF(harmonic factor)}) = \text{DF} \times \text{HF} \quad (15)$$

한편, 식 (7)과 식 (14)로부터 식 (16)을 유도할 수 있다.

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{THD}^2}} \cos \Phi_1 \quad (16)$$

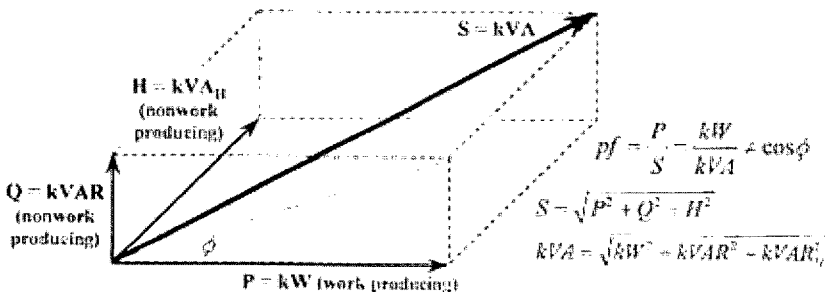


그림 3. 고조파 전류를 포함한 피상 전력의 벡터 표현

이로부터 고조파에 의해 전류 파형이 왜곡되면 시스템의 역률이 저하함을 알 수 있다. 예를 들면, 고조파 전류의 실효치가 기본파 전류의 실효치와 같은 크기일 경우, 즉 고조파 왜율이 100[%]인 경우에 역률은 기본파 성분만 있을 경우에 비해 약 70[%] 수준이 된다.

3. 비선형 부하의 고조파 측정 분석 사례

3.1 다이오드 정류기형 185[kW]인버터 부하

측정하고자 하는 계통의 구성은 3상 4선식 380/220[V] 회로로 인버터 1차측 전압은 중성선과 상간의 전압을 측정하였고, 전류는 인버터 1차측 선 전류의 고조파를 측정하였다. 그림 4는 측정 파형을 나타낸 것이며, 전압파형과 전류파형을 분석하여 표 1에 나타내었다.

인버터 장치의 사용 목적은 전압 및 주파수를 변환하여 유도 전동기의 속도를 조정하기 위한 것이다. 인버터 1차측의 전압 파형은 종합 왜형률은 2.6[%]로 다른 설비 및 타 수용가에 영향을 미칠 수 있는 값은 아니나, 전류 파형의 종합 왜형률은 78.1[%]로 매우 높게 나타나고 있다. 종합 왜형률 중에는 5, 7, 11차의 고조파가 대부분을 차지하는데, 이는 인버터 설비의 전형적인 파형 특성이라 할 수 있다. 이로 인한 역률은 식 (16)으로부터 78.7[%]로 떨어지게 된다.

따라서, 인버터 부하를 담당하는 변압기의 손실과 선로 손실을 생각할 수 있다.

표 1. 실측 파형 분석

(1) 전압

종합 왜형률 [%]	기수 고조파 [%]	우수 고조파 [%]	대표적인 고조파와 함유율				실측값[V]
			차수	차수	차수	차수	
			함유율	함유율	함유율	함유율	
2.6	2.7	0.1	7	13	17	13	224.4
			2.0	0.8	0.7	0.7	

(2) 전류

종합 왜형률 [%]	기수 고조파 [%]	우수 고조파 [%]	대표적인 고조파와 함유율				실측값[A]
			차수	차수	차수	차수	
			함유율	함유율	함유율	함유율	
78.1	78.1	1.1	5	7	3	11	135.9
			63.5	41.1	13.7	8.2	

전류의 종합 왜형률은 높지만, 전류 용량이 크기 않기 때문에 전류의 증가로 인한 장애는 심하지 않을 것으로 생각된다. 즉, 변압기 용량에는 큰 문제가 없으나 단지 전류의 주파수가 높으므로 소음에 의한 철심의 떨림으로 인한 장애에 대한 주의가 요망된다.

3.2 고조파 저감장치 설치 전후의 역률 비교

고조파 억제 대책에는 기기로부터 발생하는 고조파

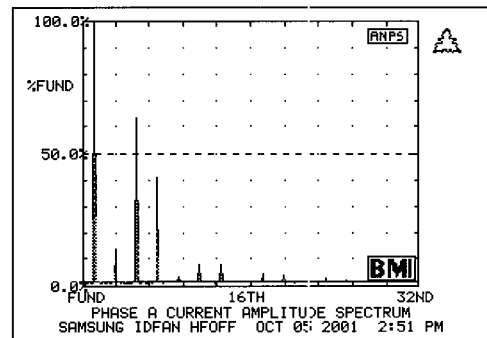
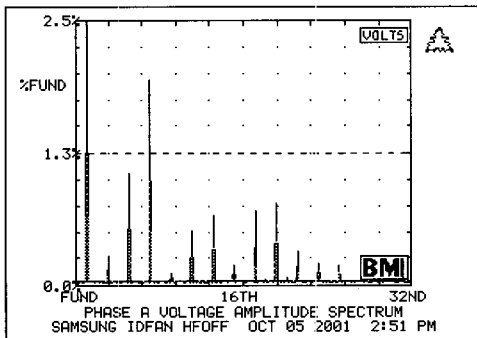


그림 4. 고조파 전압 및 전류 스펙트럼

전류 등을 저감시키는 방법과 기기로부터 발생한 고조파 전류를 분류시켜 유출 전류를 저감시키는 방법, 그리고 고조파에 대해서 장애를 받지 않도록 하는 방법으로 크게 3종류로 나눌 수 있다. 고조파로 인한 장애를 저감하기 위해서는 다음과 같은 종합적인 대책을 검토할 필요가 있다.

- (1) 기기로부터 발생하는 고조파 전류 등을 저감시키는 방법 : 변환장치의 다펄스화
- (2) 기기로부터 발생한 고조파 전류를 분류시켜 유출 전류를 저감시키는 방법
 - ① 리액터(ACL, DCL)의 설치
 - ② 콘덴서의 설치(고압측 또는 저압측)
 - ③ 필터의 설치(수동필터, 능동필터)
- (3) 고조파에 대해서 장애를 받지 않도록 하는 방법
 - ① 직렬리액터의 용량 증가(전기저널 2001. 5월호 참조)
 - ② 계통 분리
 - ③ 변압기의 고조파 내량 증가
 - ④ 단락용량의 증대

표 2. 고조파 저감장치 설치 전후의 역률 실측 자료

① 고조파 전압 저감장치 설치 전					
ALL CHANNELS SUMMARY REPORT f=50.00Hz (A)					
	I	***R***	***C***	***D***	***PF***
V	216.7	217.7	217.0	0.101	216.7
I	72.53	76.45	75.52	0.000	72.53
PF	0.776	0.781	0.776	0.000	0.766
Ithd	74.75	73.30	73.30		

② 고조파 전압 저감장치 설치 후					
ALL CHANNELS SUMMARY REPORT f=50.00Hz (A)					
	I	***R***	***C***	***D***	***PF***
V	216.9	217.9	217.3	0.107	216.9
I	59.59	68.01	61.63	0.000	59.59
PF	0.998	0.988	0.984	0.000	0.988
Ithd	6.588	6.533	5.737		

표 2는 비선형 부하에서의 역률 실측 자료를 비교

한 것이며, 고조파 저감 장치의 설치 전후의 역률을 살펴 보면 고조파 제거 전 역률 76(%)가 제거 후에는 98(%)로 개선되었음을 알 수 있다.

따라서, 고조파 발생 기기의 사용으로 인하여 역률의 저하가 우려되며, 이 때문에 유효전력이 적어지고, 또한 변압기 용량을 증가시킬 우려가 있으므로 수변전 설비의 설계시에 역률 문제를 신중하게 다루어야 한다.

4. 맺음말

전압이 정현파이면, 전류도 정현파가 된다. 물론 이때 위상 차가 존재하기는 하지만, 전류 파형이 전압 파형을 그대로 반영하게 된다. 이에 대응하여 교류에서 부하가 비선형 특성을 지니게 되면 정현파 전압이 인가되어도 전류는 정현파가 되지 않는다. 일반적으로 전압도 비정현파 성분을 포함하는 왜곡된 파형을 지니고 있는 경우가 흔히 있을 수 있으나, 보통의 전력 계통에서 그것이 부하전류에 미치는 영향은 크지 않으므로 여기서 전압 관계는 전류에 의해서 결정되는 것으로 가정한다. 왜곡된 전류 파형은 전력 전달에 있어서 불필요한 성분을 포함하게 된다. 이에 따라 시스템 내에 전력 전달과 무관한 무효 전력이 존재하게 되고, 역률을 저하시키는 원인이 되며, 중첩의 원리에 의해서 별도의 전력원으로 볼 수 있으므로 전력 손실을 야기시키게 된다. 과거에는 비선형 특성을 지니는 부하들이 많지 않아 고조파에 의한 역률 저하가 그다지 문제시 되지 않았지만 근래에 와서 전력 계통내에 중요한 문제 중의 하나로 부각되게 되었다.

앞으로 고조파 문제는 부하설비의 다양화, 반도체 응용 기기의 사용이 급증함에 따라서 더욱 더 전력품질 문제에 나쁜 영향을 미치리라 예상된다. 그러므로 현장의 전기기술자는 고조파와 장애의 심각성을 인식하고 향후 전기사용장소에서 고조파로 인한 문제가 최소화되도록 많은 관심을 가져야 한다고 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) 김세동, 합리적 역률관리에 의한 전기설비 절감기술, 전기저널, 대한전기협회, No. 2, 2000.
- (2) 김세동, 고조파란 무엇인가, 전기저널, 대한전기협회, No. 3, 2001.
- (3) 김세동, 콘덴서 및 직렬리액터의 고조파 장애 영향과 대책, 전기저널, 대한전기협회, No. 5, 2001.
- (4) 김세동, 변압기의 특성과 고조파 장애 영향에 대한 고찰, 전기저널, 대한전기협회, No. 8, 2001.
- (5) 김인수 외, 고조파 사용실태 조사 및 개선 방안 연구보고서, 에너지관리공단, 2002.
- (6) 박지현 외, 전기사용장소의 고조파 장애분석 연구, 한국전기안전공사, 1995.
- (7) 강창원, 고조파SOLUTION, (주)피에스디테크, PSD-H12, 2002.

◇ 저 자 소 개 ◇



김세동(金世東)

1956년 3월 3일생. 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1986년 동대학원 졸업. 2000년 서울시립대 전기전자공학부 대학원 졸업(박사). 한국전력공사(1979~1984) 근무. 한국건설기술연구원(1984~1997.2) 수석연구원 역임. 현재 두원공과대학 전기공학과 교수. 전기설비기술사. 본 학회 학술이사, 편수위원. 관심분야 : 전력설비 진단 및 DSP. 전기설비 최적설계.