

# 건축물 비선형 부하의 진상 역률 및 고조파가 종합 역률에 미치는 영향에 관한 연구

이재천\*, 김치연\*, 조수환\*

\*상명대학교 일반대학원 에너지그리드학과  
e-mail:dahaesystem1@gmail.com

## A Study on the Effect of Leading Power Factor and Harmonics on the Total Power Factor in the Non-linear Building Loads

Jae-Cheon Lee\*, Chi-Yeon Kim\*, Soo-Hwan Cho\*

\*Dept. of Energy-grid, Graduate School, Sangmyung University

### 요약

전력전자 기술이 발전하기 이전에는 선형 부하의 비율과 용량에 비해 비선형 부하의 비율이 낮아서 지상 역률에 초점을 두고 개선대책이나 기준을 선정하였다. 전력전자 기술의 발전 및 에너지 절감과 기기의 첨단화로 인하여 비선형 부하의 부하율이 계속 증가하고 있다. 최근 건축물에는 이들 부하의 특성으로 인하여 변위 역률은 진상이고 전류 고조파로 인하여 종합 역률은 더욱더 진상으로 저하되는 사례에 대해서 측정 데이터로 분석하고 검증하였다. 기존의 역률 개선대책인 전력용 커패시터로는 한계가 있으므로 비선형 부하의 특성을 고려한 역률 대책 방안을 제안한다.

### 1. 서론

산업 초창기에는 전기부하의 전원이 주로 교류였지만, 전력전자 기술의 발전으로 인하여 안정적인 직류 전원이 다양하게 공급할 수 있게 되어 폭넓은 분야에 사용되고 있다. 효율적인 에너지 사용을 위해 전력전자 기술이 적용되고, 이들 부하는 고조파를 발생시키는 비선형 부하이다.

IEC 555 및 EN 60555에서 가전 기기나 소용량 전기 장비에 내장된 전원 공급장치의 전류 고조파를 규제하고 있다. 대표적으로 가전 및 기기의 전원 공급장치 및 가변 주파수 드라이브(VSD: Variable Speed Drive)와 같은 다양한 종류의 주 전원으로 동작하는 전자기기에 역률 보상기(PFC: Power Factor Corrector)를 설치해야 한다.

비선형 부하 회로의 PFC와 선로의 커패시터스로 인하여 최근 건축물에서는 진상 역률이 되는 사례가 증가하고 있다.

본 연구는 비선형 부하의 진상 역률, 건축물의 진상 역률 사례와 개선 방향에 대하여 살펴볼 것이다.

### 2. 종합 역률과 고조파의 관계

산업 초창기는 선형부하(Linear load) 중에서 전동기와 같은 유도성 부하의 비율이 높아서 특수한 조건을 제외하고는 역률은 지상이었다. 역률 개선은 지상 역률에 대한 대책으로

목표 역률에 맞는 전력용 커패시터 용량을 선정하고 계통에 연결하여 개선하였다.

최근에는 폭넓은 분야에 전력전자 기술을 적용하고 있으며, 전력전자 기술을 활용하는 부하를 비선형 부하(Non-linear load)라고 한다. 비선형 부하는 고조파 전류를 발생시키고, 발생한 고조파 전류로 인하여 계통의 임피던스에 해당하는 전압 고조파가 발생한다.

역률에는 3가지 즉, 종합 역률(TPF: Total Power Factor), 변위 역률(PF<sub>disp</sub>: Displacement Power Factor)과 왜형 역률(PF<sub>dist</sub>: Distortion Power Factor)로 구분된다. 변위 역률(PF<sub>disp</sub>)은 기본 주파수 전압과 전류의 위상 차이로 계산되고, 왜형 역률(PF<sub>dist</sub>)은 비선형 부하에서 발생하는 종합 고조파 왜형률(THD: Total Harmonic Distortion)로 계산된다. 종합 역률(TPF)은 변위 역률(PF<sub>disp</sub>)과 왜형 역률(PF<sub>dist</sub>)의 곱이고, 이들 관계는 식 (1)과 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$TPF \approx \frac{P_{1avg}}{V_{RMS1} I_{RMS1}} \times \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} = PF_{disp} \times PF_{dist} \quad (1)$$

종합 역률은 변위 역률이 일정하다고 가정하면 THD 크기에 따라 영향을 받는다. 식 (1)에서 THD가 높으면 높을수록 TPF는 더욱더 감소하게 된다. TPF의 진상 또는 지상 역률의 결정은 THD와 무관하고 변위 역률에 의해서 결정된다.

### 3. 사례 연구

#### 3.1 전력품질 데이터의 측정 및 분석

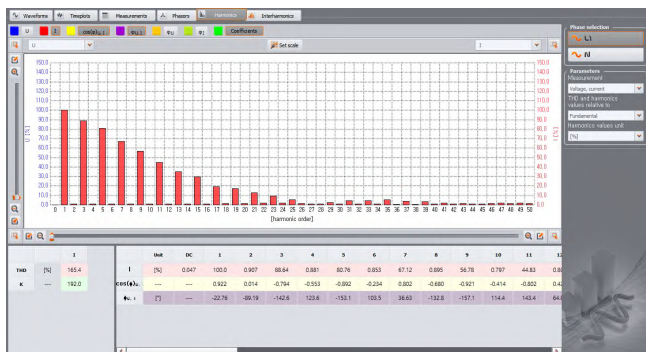
사무실에서 보편적으로 사용하고 있는 비선형 부하의 개별 부하와 건축물의 측정 데이터를 통하여 진상 역률 사례를 확인하고 종합 역률과 고조파의 관계를 분석 및 검증한다.

개별 부하의 실측 데이터는 표 2와 같으며, 비선형 부하의 회로 특성과 PFC로 인하여 표 2에서와 같이 진상 무효전력으로 인하여 변위 역률은 진상이다. 종합 역률은 식 (2), (3)과 같이 THD로 인하여 더욱더 진상으로 저하된다.

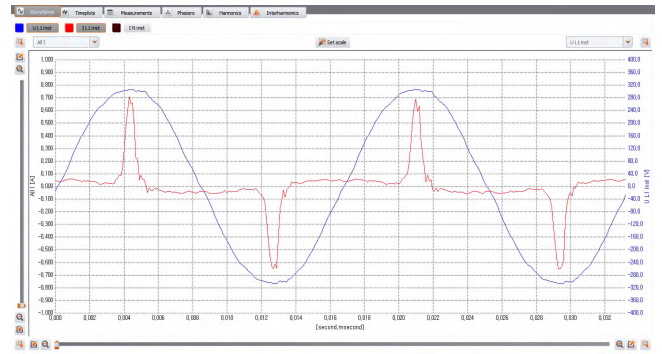
[표 2] 개별 부하의 측정 데이터

항목	단위	측정 데이터	
		복합기	공기청정기
U	[V]	218.9	219.8
I	[A]	0.391	0.17
P	[W]	57.08	17.59
Q	[var]	-57.79	-7.511
D	[var]	26.8	31.96
S	[VA]	85.69	37.38
TPF	[-]	0.666	0.471
PF <sub>disp</sub>	[-]	0.704	0.922
THD <sub>I</sub>	[%]	32.27	165.1

공기청정기에서 발생하는 전류 고조파 스펙트럼(적색)은 그림 1과 같이 모든 홀수 차수에서 발생하고 고차 고조파의 발생량이 매우 적다. 비선형 부하에서 발생하는 부하전류는 그림 2와 같이 매우 왜곡된 파형이다.



[그림 1] 공기청정기의 전류 고조파 스펙트럼



[그림 2] 공기청정기의 파형(전압: 청색, 전류: 적색)

복합기의 측정 데이터는 변위 역률 0.704(진상), THD<sub>I</sub> 0.32, 종합 역률 0.666(진상)이다. 종합 역률의 계산 값은 식 (2)에서 0.67로 측정 데이터와 거의 유사하다. 공기청정기의 측정 데이터는 변위 역률 0.922(진상), THD<sub>I</sub> 1.65, 종합 역률 0.471(진상)이다. 종합 역률의 계산 값은 식 (3)에서 0.478로 측정 데이터와 거의 유사하다. 두 개의 개별 부하 모두 THD로 인하여 종합 역률은 변위 역률보다 더욱더 저하된다. 따라서 개별 부하의 회로 특성으로 인하여 변위 역률이 진상인 상태에서 전류 고조파로 인하여 종합 역률은 진상으로 더 저하되는 것을 확인할 수 있다.

$$TPF = \frac{PF_{disp}}{\sqrt{1+THD_I^2}} = \frac{0.704}{\sqrt{1+0.32^2}} = 0.670 \quad (2)$$

$$TPF = \frac{PF_{disp}}{\sqrt{1+THD_I^2}} = \frac{0.922}{\sqrt{1+1.65^2}} = 0.478 \quad (3)$$

건축물의 변압기 2차 측에서 측정된 데이터는 표 3과 같으며, 표 3에서와 같이 건축물 비선형 부하의 진상 무효전력으로 인하여 변위 역률은 진상이다. 표 3에서 종합 역률은 변위 역률과 왜형 역률의 곱으로 THD로 인하여 종합 역률은 더욱더 진상으로 저하된다.

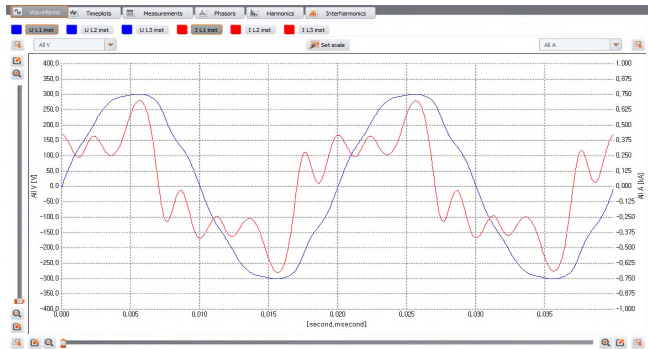
[표 3] 건축물 부하의 측정 데이터

항목	THD <sub>I</sub> [%]	전력			역률			
		P [kW]	Q [kvar]	S [kVA]	PF <sub>disp</sub>	PF <sub>dist</sub>	TPF	
A 건축물	L1	57.0	59.4	-41.8	83.1	0.83	0.87	0.71
	L2	57.7	56.8	-37.1	77.6	0.85	0.87	0.73
	L3	52.0	57.6	-32.9	75.2	0.88	0.89	0.77
B 건축물	L1	22.3	58.5	-10.3	59.3	0.98	0.98	0.96
	L2	23.0	57.3	-13.1	58.7	0.97	0.97	0.95
	L3	26.2	44.7	-10.9	46.0	0.97	0.97	0.94

그림 3은 A 건축물 변압기 2차 측의 전류 고조파 스펙트럼(적색)으로, 홀수 차수에서 발생하고 고차 고조파는 매우 적다. 비선형 부하에서 발생하는 고조파로 인하여 변압기 2차 측의 부하전류는 그림 4와 같이 매우 왜곡된 파형이다.



[그림 3] A 건축물 변압기 2차 측의 전류 고조파 스펙트럼



[그림 4] A 건축물 변압기 2차 측의 파형(진압: 청색, 전류: 적색)

A 건축물의 측정 데이터(L2)는 변위 역률 0.85(진상), THD<sub>r</sub> 0.577, 종합 역률 0.73(진상)이다. 종합 역률의 계산 값은 식 (4)에서 0.736으로 측정 데이터와 유사하다. B 건축물의 측정 데이터(L2)는 변위 역률 0.97(진상), THD<sub>r</sub> 0.23, 종합 역률 0.95(진상)이다. 종합 역률의 계산 값은 식 (5)에서 0.945로 측정 데이터와 유사하다. 두 개의 건축물 모두 THD로 인하여 종합 역률은 변위 역률보다 더욱더 저하되고, 비선형 부하의 회로 특성과 배전선로의 커패시턴스로 인하여 변위 역률이 진상인 상태에서 전류 고조파로 인하여 종합 역률은 진상으로 더 저하되는 것을 확인할 수 있다.

$$TPF = \frac{PF_{disp}}{\sqrt{1+THD_I^2}} = \frac{0.85}{\sqrt{1+0.577^2}} = 0.736 \quad (4)$$

$$TPF = \frac{PF_{disp}}{\sqrt{1+THD_I^2}} = \frac{0.97}{\sqrt{1+0.23^2}} = 0.945 \quad (5)$$

개별 부하와 건축물 변압기의 측정 데이터를 분석한 결과 비선형 부하의 회로의 특성이나 배전선로의 커패시턴스로 인

하여 변위 역률이 진상이고, 이들 부하에서 발생하는 고조파로 인하여 종합 역률은 진상으로 더욱더 저하하게 된다. TPF의 진상 또는 지상 역률의 결정은 THD와 무관하고 변위 역률에 의해서 결정되는 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 역률 개선에 대한 경제성 분석

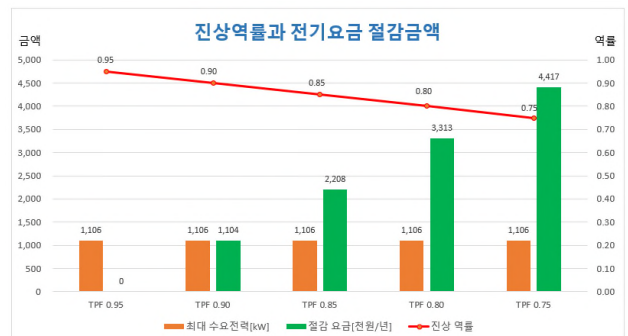
3.1장의 측정 데이터와 같이 최근의 건축물에서는 진상 역률이 되는 사례가 증가하고 있다. 3.2장에서는 진상 역률 사례를 통하여 진상 역률을 개선하였을 때 경제성을 분석하였다.

한국전력공사의 진상에 대한 역률요금은 심야 시간(23시 ~ 다음 날 09시)에 적용된다. 건축물의 부하는 주간에도 진상 역률이 되지만, 심야 시간에는 공용부위나 주차장의 전등과 사무기기의 대기전력으로 인하여 진상 무효전력이 작지만, 주간에 비교하여 유효전력이 매우 감소하여 주간보다 쉽게 진상 역률이 된다. 그림 5는 실제로 건축물에서 진상 역률로 인하여 한국전력공사에 전기요금에 추가로 납부하고 있는 전기요금 청구서의 사례이다.

청구내역		고객사항	
기본 요금	9,201,920	계약종류	산업용(을)고압A
전력량요금	6,027,841	선선택요인	II
지상역률료	-92,019	계량기배수	3600
진상역률료	607,326	지상역률	95
자동납부할인	-1,000	진상역률	62
전기요금계	15,744,068	계약전	3700
부가가치세	1,574,407	년 월 일 현재미납내역	
전력기금	582,530	미납월	금액
원단위절사	-5	미납요금 없음	
당월요금계	17,901,000	계	
청구금액	<b>17,901,000 원</b>		

[그림 5] 전기요금 청구서

진상 역률의 영향에는 페란티(Ferranti) 현상으로 인하여 송전단보다 수전단 전압이 상승하고, 피상전력이 증가하여 전력 손실 증가, 전기설비 용량의 여유율 감소 및 전기요금 추가 납부, 등과 같은 나쁜 영향이 발생한다.



[그림 6] 진상 역률에 따른 전기요금 절감 금액

진상 역률에 대한 경제성 분석을 위하여 동일한 조건 즉, 최대 수요전력과 전기요금 단가를 하나의 건축물에 적용하고 진상 역률별로 경제성을 분석하면 그림 6과 같이 된다.

진상 역률 95 [%] 미만에서 전기요금을 추가로 납부하게 되고, 역률이 낮을수록 전기요금의 절감효과가 크다. 따라서 진상 역률에 대한 영향을 최소화하고 전기요금을 절감하기 위하여 진상 역률을 개선하여야 한다. 부가적으로 전류 고조파를 개선하면 종합 역률은 가장 이상적인 상태로 개선된다. 고조파를 저감하면 추가적인 종합 역률 개선 및 안정적인 전력설비 운전이 가능하게 된다.

#### 4. 결론

전기부하의 안정적인 전원을 공급을 위하여 전원공급 장치의 사용 폭이 점차 확대되고 있으며, 최근에 준공되는 건축물은 “녹색건축 인증제도”, “제로에너지건축물 인증” 및 “건축물에너지 효율등급 인증”와 관련하여 고효율 인증제품의 제품 적용과 조명은 LED 등기구, 공조설비에는 가변 주파수 드라이브(VSD)를 채택하고 있다. 이들 부하의 대부분은 변위 역률이 진상이고, 이들 부하에서 발생하는 고조파로 인하여 종합 역률(TPF)은 더욱더 진상으로 저하한다.

국내 역률 개선대책은 여전히 기존 선형부하의 역률 개선 대책인 전력용 커패시터만 한국전력공사와 국토교통부에서 의무 또는 권고사항으로 채택하고 있으나, 변위 역률이 진상 이면 커패시터는 투자비만 낭비하고 설치공간만 차지하게 된다. 그리고, 전류 고조파 발생량이 많은 개소에 직렬리액터 없이 전력용 커패시터만 단독으로 계통에 설치하게 되면 계통의 임피던스와 결합하여 병렬 공진(Parallel Resonance)이 발생하여 안정적인 전력계통 운영에 지장을 초래한다.

변위 역률의 진상 역률을 개선하기 위해서는 전력계통에 지상 무효전력을 공급해 주는 장치를 설치하여야 하고, 고조파로 인하여 종합 역률이 저하된 경우에는 고조파 저감장치가 설치하여야 한다. 전력계통에 지상 무효전력 공급과 고조파 저감을 동시에 수행할 수 있는 능동필터와 같은 대책은 이십 년 이전부터 상용화되어 있으나, 역률 개선대책으로 선정되지 못하고 있고, 통관할 때도 무관세 혜택을 받지 못하고 있다.

따라서, 진상 역률과 고조파를 개선하는 장치들도 역률 개선 장치로 반영되어야 하고 한국전력공사와 국토교통부의 의무 또는 권고사항에 추가되어야 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

(No.20164030300230)

#### 참고문헌

- [1] 이재천, “실측 데이터 기반 비선형 부하에서 고조파 저감 이 역률 개선에 미치는 효과”, 조명·전기설비학회논문지, 34(5), pp. 1-10, 5월, 2020년
- [2] 김종겸 외 4명, “ 선형 및 비선형 부하 운전시 역률 보상 커패시터의 특성 해석”, 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 23-25, 4월, 2009년
- [3] ST Microelectronics, “APPLICATION NOTE: CIRCUITS FOR POWER FACTOR CORRECTION WITH REGARDS TO MAINS FILTERING”, 1999년
- [4] W. Mack Grady. and Robert J. Gilleskie., “HARMONICS AND HOW THEY RELATE TO POWER FACTOR,” Proc. of the EPRI Power Quality Issues & Opportunities Conference(PQA '93), pp. 1-8, 11월, 1993년
- [5] 산업자원부, “SMPS용 역률보상모듈 개발(최종보고서)”, 10월, 2000년