

## 부하모델을 위한 주거용 부하의 고조파 영향 분석

지평식\*, 임재택\*, 이대중\*\*, 이종필\*\*, 박재원\*\*\*, 임재윤\*\*\*  
 충주대학교\*, 충북대학교\*\* 대덕대학\*\*\*

### Analysis of Harmonic Effect of Residential Loads for Load Modeling

P.S. Ji\*, J.T. Lim\*, D.J. Lee\*\*, J.P. Lee\*\*, J.W. Park\*\*\*, J.Y. Lim\*\*\*  
 Chungju Nat'l University\*, Chungbuk Nat'l University\*\* Daeduk College\*\*\*

**Abstract** - 산업의 발달과 함께 전력계통에는 첨단 제어장치, 전력전자 기기로 대표되는 다양한 반도체 전력설비와 전력기기인 변압기, 회전기기 등의 비선형 특성을 나타내는 부하설비의 사용이 증가하고 있다. 이러한 비선형 부하들은 고조파를 발생시켜 입력전압의 왜곡뿐만 아니라 연계된 계통내로 고조파 전류가 흘러 들어가 다른 부하설비에 까지 영향을 미친다. 따라서 본 논문에서는 고조파가 포함된 조건하에서 부하 모델링에 필수 요소인 유효전력과 무효전력에 대한 특성을 주거용 부하를 대상으로 실험하여 고조파에 대한 주거용 부하의 특성을 분석하고자 한다.

#### 1. 서 론

신뢰성 높은 부하의 유효전력 및 무효전력을 추정하는 부하모델링 기법은 안정적이고 경제적으로 전력계통을 운용하는데 필요한 기본요소이다[1]. 이를 위해 다양한 부하모델링 기법이 제안 및 적용되고 있으나, 모선의 전압 및 주파수에 의해 부하모델은 다양한 특성을 나타냄으로 기존 방법들을 적용하여 정확한 부하를 모델링 하는 데는 한계가 있다[2]. 특히, 최소자승법에 근거한 대표적인 부하 모델링 기법인 다항식 방법은 선형부하모델에는 효과적인 것으로 나타났으나, 전력변환기기 등이 포함된 비선형 부하모델에는 부정확한 결과치를 산출하는 것으로 보고되고 있다[3]. 특히, 최근에 비선형 부하의 증가에 따라 증가추세에 있는 고조파가 존재하였을 경우 다항식 방법은 추정능력이 저하되는 것으로 보고되고 있다[4].

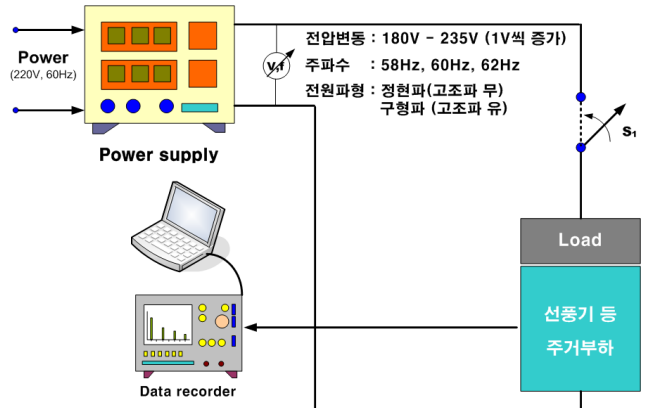
따라서 고조파가 존재하는 경우에도 효과적으로 부하모델을 개발하기 위해서는 전력계통에 고조파가 존재할 경우 부하의 특성 및 변화를 해석 및 분석할 필요성이 제기되나 이와 관련된 연구는 거의 이루어지지 않았다. 특히, 고조파에 의해 민감한 특성을 보이는 비선형 부하에 대해서는 실험을 통한 해석방법이 시도되지 않고 있다. 이에 본 논문에서는 고조파가 포함된 조건하에서 부하모델링에 필수 요소인 유효전력과 무효전력에 대한 특성을 주거용에서 대표적으로 사용되는 9가지의 부하를 대상으로 실험하여 고조파에 대한 주거용 부하의 특성을 체계적으로 분석하고자 한다.

#### 2. 본 론

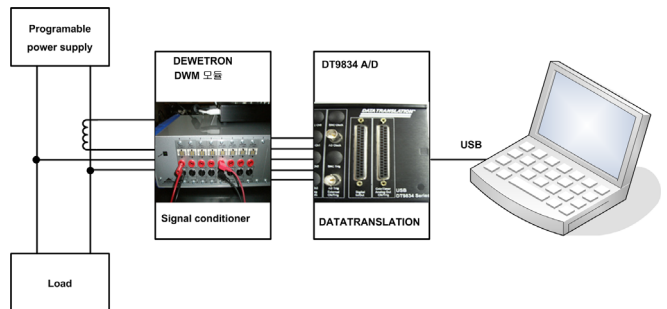
##### 2.1 주거용 부하에 대한 고조파 특성 실험

일반적으로 개별부하 실험은 입력전압과 주파수를 변화시키면서 부하가 소비한 유효전력과 무효전력을 취득한다. 그림 1에서는 주거용 개별부하에 대한 고조파 특성실험 구성도를 나타냈다. 그림 3에서 보는 바와 같이 부하에 입력전압, 주파수, 및 고조파 유무 조건에 따라 부하의 유효전력과 무효전력을 측정하였다. 우선, 입력전압은 180[V]에서 235[V]까지 1[V]씩 총 56개의 전압변동에 따른 유효전력과 무효전력을 측정하였다. 또한 입력주파수는 58[Hz], 60[Hz], 62[Hz]로 변동시키면서 실험하였다. 마지막으로 계통의 고조파 유무를 가정하여 입력파형을 고조파가 없는 정현파와 다수의 고조파가 포함된 구형파를 설정된 전압과 주파수를 고려하여 인가하였다. 이와 같은 조건은 정현파일 때는 고조파가 존재하지 않고, 구형파일 때는 기수파의 고조파가 다수 존재하는 것에 기초를 하고 있다.

부하에 인가되는 전원의 파형, 전압과 주파수 변환을 위해 고조파 전원이 가 장치 4500LS(California Instruments)를 사용하였고, 데이터 취득과 고조파 분석을 위해 그림 2에 나타낸 DT9834 A/D변환모듈과 DEWE Soft 6.3 프로그램을 이용하였다. 실험에 사용된 부하는 가정에서 대표적으로 사용되는 “선풍기”, “형광등”, “백열등” 등 총 9가지의 주거용 부하를 대상으로 하였다.



〈그림 1〉 주거용 개별부하에 대한 고조파 특성실험



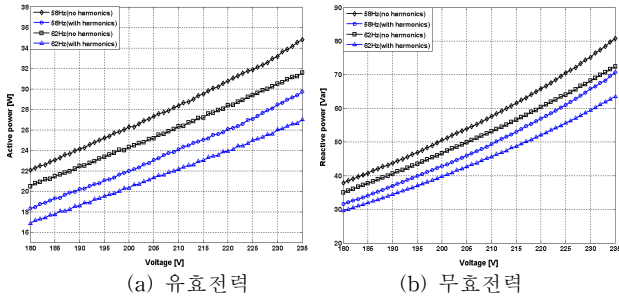
〈그림 2〉 데이터 취득과정

##### 2.2 주거용 부하에 대한 고조파 영향 분석

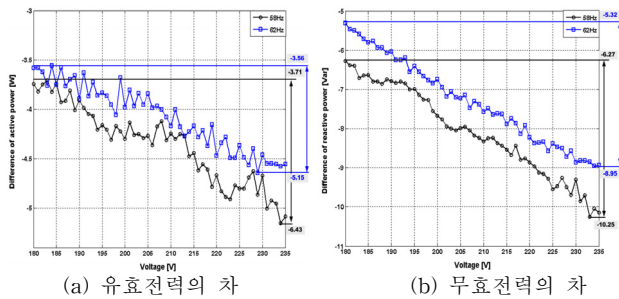
본 실험에 사용된 9가지의 주거용 부하 중에서 고조파 함유량을 다수 포함하고 있는 형광등에 대해서 중점적으로 분석을 하고자 한다. 그림 3에서는 형광등을 대상으로 실험하여 취득한 유효전력과 무효전력을 나타냈다. 즉, 그림 3에서는 주파수가 58[Hz]와 62[Hz]일 때 인가전압과 고조파 유무에 따른 부하 특성을 나타냈다. 고조파 유무 조건은 인가전압의 파형이 정현파일 때를 고조파가 없는 조건으로, 인가전압이 구형파일 때를 고조파가 존재하는 조건으로 설정하였다.

고조파 유무에 따른 형광등의 특성을 분석해 보면, 전압증가에 따라서 유효전력과 무효전력이 모두 증가하였다. 주파수에 대해서는 동일한 전압을 기준으로 고려해 볼 때 주파수가 58[Hz]에서 62[Hz]로 증가할수록 유효전력과 무효전력은 감소하였다. 고조파 유무에 따른 부하특성을 분석해보면, 고조파가 존재할 경우 고조파가 존재하지 않은 경우에 비해 유효전력과 무효전력은 감소하였다. 그림 4에서는 고조파 유무 조건(고조파가 존재하는 조건에서 취득한 값에서 고조파가 존재하지 않은 조건에서 취득한 값을 차감)에 따른 유효전력과 무효전력의 차이를 나타냈다. 그림 4(a)에서 보는 바와 같이 주파수가 58[Hz]일 때 유효전력은 -3.7[W]에서 -6.4[W]의 변동범위를 나타냈으며, 주파수가 62[Hz]일 때 유효전력은 -3.5[W]에서 -5.2[W]의 변동범위를 보여 주파수가 증가할수록 고조파 유무에 따라 유효전력의 변동범위가 적은 것으로 나타났다. 무효전력의 경우에는 그림 4(b)에서 보는 바와 같이 주파수가 58[Hz]일 때 -6.3[Var]에서 -10.3[Var]의 변

동범위를 나타냈으며, 주파수가 62[Hz]일 때 -5.3[Var]에서 -9.0[Var]의 변동범위를 보여 주파수가 증가할 수록 고조파 유무에 따라 무효전력의 변동범위가 적은 것으로 나타났다. 또한, 유효전력에 비하여 무효전력이 고조파 유무에 따라 민감한 부하 특성을 나타냈다. 즉, 주파수가 58[Hz]일 때 유효전력은 -3.7[W]에서 -6.4[W]의 변동범위를 나타냈으나 무효전력은 -6.3[Var]에서 -10.3[Var]의 변동범위를 보여 무효전력이 고조파에 민감한 특성을 보인 것으로 나타났다.



〈그림 3〉 형광등에 대한 유효전력과 무효전력



〈그림 4〉 형광등에 대한 고조파 유무에 전력의 차이

표 1에서는 지금까지 실험한 9개의 개별 부하에 대한 특성을 표로 정리하여 나타냈다. 여기서 성능지표는 부하별 용량에 상관없이 일관적인 특성을 보이기 위해 평균변동율 (AER), 최대 변동율 및 최소변동율을 고려하였다. 평균오차율은 식 (1)에 의해 구해진다. 식 (1)에서  $P_{ti}$ 와  $P_{ci}$ 는 고조파가 없는 조건하에서 취득한  $i$  번째 데이터의 값과 고조파가 존재하는 조건하에서 취득한  $i$  번째 데이터의 값을 각각 나타내며,  $n$ 은 사용된 데이터의 개수를 의미한다. 또한, 최대 변동율과 최소 변동율은 모든 데이터에 대해서 구해진 변동율  $((P_{ti} - P_{ci}) * 100 / P_{ci})$  중에서 가장 변동이 큰 값과 작은 값을 기준으로 선정하였다. 따라서 최대 변동율 및 최소변동율에서 음의 값으로 표시된다면 고조파가 존재한 경우 유효전력 또는 무효전력이 증가함을 의미하고, 이와 반대로 양의 값으로 표시된다면 고조파가 존재한 경우 값이 유효전력 또는 무효전력이 감소함을 의미한다.

$$AER = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|P_{ti} - P_{ci}|}{P_{ci}} [\%] \quad (1)$$

개별부하에 대한 실험을 정리한 표 1(a)에서 유효전력의 경우를 살펴보면, “TV”와 “유도전동기”, “형광등”, “선풍기” 순으로 고조파에 민감한 것으로 나타났다. 특히, “TV” 부하는 유효전력의 평균변동율이 40[%] 이상을 나타내 고려 대상의 부하들 중에서 고조파에 가장 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 그러나 “백열등”, “전기난로”, “전기로”, “전기발열”, “헤어드라이기” 부하들은 고조파 유무에 상관없이 유효전력이 크게 변동되지는 않았다. 다음으로 표 1(b)에 나타난 무효전력의 경우를 살펴보면, “전기히터”, “TV”, “헤어드라이기”, “전기발열”, “전기로” 순으로 고조파에 변동이 심한 것으로 나타났다. 특히, “전기히터”와 “TV” 부하들은 고조파 유무 조건에 따라 평균 변동율이 58[Hz]일 때 80[%] 이상을 나타내 고조파에 가장 민감한 것으로 나타났다. 그림 5에서는 고조파에 의해 무효전력의 변화가 가장 큰 “전기히터”에 대한 유효전력과 무효전력의 실측값을 나타냈다. 그림 5에서 보는 바와 같이 무효전력이 유효전력에 비하여 상대적으로 매우 적은 값을 나타냈지만 고조파 유무에 대해서는 유효전력에 비교하여 무효전력의 변동폭이 크게 나타남을 확인할 수 있다.

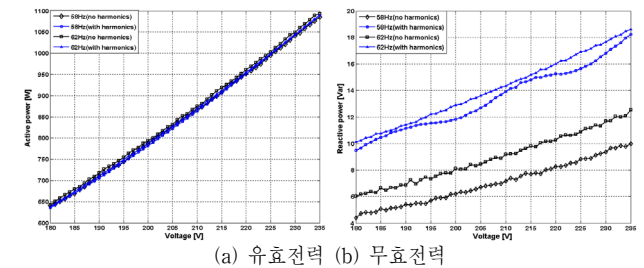
이러한 특성은 “전기히터”에만 국한되는 특성이 아니고 전반적으로 모든 주거용 부하설비에 대해서 유효전력에 비하여 무효전력이 고조파에 의해 변동이 심하게 나타난 것으로 분석되었다.

〈표 1〉 실험에 사용된 주거용 개별부하기 (a) 유효전력

부 하	58 [Hz]			62 [Hz]		
	AER	최 대	최 소	AER	최 대	최 소
선풍기	10.1	12.0	8.1	10.1	11.3	8.8
형광등	15.7	17.1	14.1	15.9	17.8	14.4
백열등	0.7	1.0	0.6	0.4	0.8	0.0
전기히터	0.3	0.8	-0.4	0.7	1.2	0.3
전기로	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.2
전기발열	0.3	0.5	-0.8	0.1	0.3	-0.2
헤어드라이기	0.6	1.4	0.0	0.5	1.2	-0.2
TV	40.9	44.8	34.8	41.7	45.6	35.8
유도전동기	18.9	-21.2	-16.3	18.8	-21.2	-15.8

(b) 무효전력

부 하	58 [Hz]			62 [Hz]		
	AER	최 대	최 소	AER	최 대	최 소
선풍기	12.6	-15.3	-8.3	18.7	-22.2	-14.0
형광등	14.5	16.9	12.4	14.1	15.4	12.3
백열등	12.8	16.0	9.2	10.7	17.1	3.6
전기히터	93.5	-115.9	-76.9	58.9	-69.8	-48.8
전기로	68.4	-80.2	-57.5	47.9	-54.4	-42.9
전기발열	71.5	-63.0	-80.9	46.6	-41.1	-57.2
헤어드라이기	71.5	76.8	65.7	71.4	75.0	65.8
TV	82.6	84.0	81.4	82.3	82.7	81.8
유도전동기	9.7	-10.7	-6.6	11.0	-11.6	-10.6



〈그림 5〉 전기난로에 대한 무효전력과 유효전력

### 3. 결 론

본 논문에서는 고조파가 존재 유무에 따른 대표적인 9가지의 주거용 부하에 대한 유효전력과 무효전력의 특성을 분석하였다. 분석결과, 유효전력의 경우를 살펴보면, “TV”와 “유도전동기”, “형광등”, “선풍기” 순으로 고조파에 민감한 것으로 나타났다. 무효전력의 경우를 살펴보면, “전기히터”, “TV”, “헤어드라이기”, “전기발열”, “전기로” 순으로 고조파에 변동이 심한 것으로 나타났다. 일반적으로 무효전력이 유효전력에 비하여 상대적으로 매우 적은 값을 나타냈지만 고조파 유무에 대해서는 유효전력에 비교하여 무효전력의 변동폭이 크게 나타난 것으로 분석되었다.

### [참 고 문 헌]

- [1] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, “Load representation for dynamic performance analysis,” IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 2, pp. 472-482, 1993.
- [2] C. Concordia and S. Ithara, “Load Representation in Power System Stability Studies,” IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-101 1982.
- [3] A. Keyhani, W. Wu, G. T. Heydt, “Composite Neural Network Load Models for Power System Stability Analysis,” IEEE PES 2004, Vol. 2, pp. 1159 - 1163, 2004.
- [4] Mau Teng Au and J. V. Milanovic, “Development of Stochastic Aggregate Harmonic Load Model Based on Field Measurements,” IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 22, pp. 323-330, 2007.