

## 초고층빌딩에 대한 고조파 시뮬레이션 및 실측데이터 분석

조수환\*, 이한상\*, 정재안\*, 장길수\*, 이경호\*\*  
고려대학교\*, 삼성물산\*\*

### Harmonic Simulation and Measurement Analysis for a Skyscraper

Soohwan Cho\*, Hansang Lee\*, Jaeahn Jung\*, Gilsoo Jang\*, Kyungho Lee\*\*  
Korea University\*, Samsung C&T Corporation\*\*

**Abstract** - The interest on harmonics which is one of the matters related with power quality problem is not limited in only the system where the large scale industrial load is connected. The harmonics phenomenon not only causes the malfunction of devices, but also lowers the energy efficiency of power system. This paper focuses on the harmonic analysis process to establish the harmonic mitigation method, considering the harmonics distortion as a major cause to reduce the energy efficiency of a skyscraper. A system diagram of building is modelled with PSCAD simulator. Based on the harmonic analysis results of it, the electrical locations with the high priority to install the mitigating devices are selected. Finally, the result of PSCAD simulations and the site-measured data are compared, verifying that they reach a common conclusion.

하를 포함하고 있다. 각 부하들은 구성 요소에 따라 비선형부하의 비율이 다르고, 동작 특성에 따라 고조파의 함유정도가 다르다. 특히 주목할 만한 부하군은 TR#4, #6, 그리고 #7이다. 우선, TR#4에 연결된 부하군의 경우, 소방펌프를 비롯한 각종 펌프로 구성되어 있기 때문에, 기동 시에만 고조파 발생에 기여를 하고 정상상태에서는 미량의 고조파만을 발생시킨다. 또한, 부하군 전체가 동시에 기동 또는 동작하는 경우가 거의 없이, 일부만 동작한다. TR#6과 #7에 연결된 부하군의 경우, DVM(Digital Variable Multi)으로 공조를 담당하는 부하인데, 이것은 TR#5의 공조기와는 다른 공조 동작을 담당하며 고조파 발생에는 전혀 기여를 하지 않는다.

### 1. 서론

기존의 전력계통에서 선형적 전압-전류 특성을 나타내는 저항성 부하로 이루어져서 전압과 주파수의 유지를 위한 계통 운영이 가장 큰 이슈였다면, 현재의 전력계통은 그 만큼이나 전력품질에 대한 관심이 높다. 발전단과 송전단은 규모에서의 비약적 증대를 제외하고는, 기본 구성이 거의 같다고 할 수 있다. 그러나 생산된 에너지의 소비를 담당하는 부하는 과거 전력계통에서 찾아볼 수 없었던 비선형적인 전압-전류 특성을 나타내는 부하의 비중이 상당히 높아져있는 상태이다. 이러한 부하의 비선형적 특징은 고조파(harmonics)라는 용어로 정의되고 있는데, 고조파는 전압 및 전류의 파형에 포함되어 있는 전력주파수(60Hz)이외의 성분을 나타낸다. 특히 전력변환장치를 사용하여 구동하는 부하의 비중이 높아짐에 따라, 배전계통에서 발생하는 고조파는 주로 전력주파수의 정수배에 해당하는 성분으로 발현된다. 고조파의 발생은 전력변환장치에서 채용하는 반도체 스위칭 소자의 동작으로 발생한다. 반도체 스위칭 소자는 가정에서 사용하는 전자제품에서부터 산업용 기계에까지 다양하게 활용되고 있다. 이러한 부하에서 발생하는 고조파는 계통의 전력손실 증가를 유발할 뿐만 아니라, 불특정 다수 산업설비 또는 전력계통설비 오동작의 원인이 되고, 통신선 유도장애와 같은 전력설비 이외의 설비에 악영향을 미칠 수 있다.

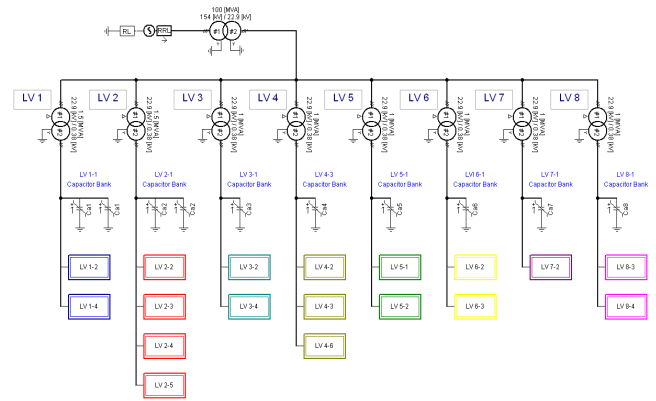
본 논문에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 초고층빌딩의 소내 계통에 대한 고조파 해석을 수행하고, 실측을 통하여 해석 결과를 검증하여 고조파 저감 대책을 제안한다. 컴퓨터 시뮬레이션은 초고층빌딩의 배선 설계도면을 바탕으로 해석되었고, 2008년 2월 빌딩의 소내 계통에 대한 고조파 측정을 수행하였다.

### 2. 초고층빌딩 소내계통 구성

초고층빌딩에 대한 고조파해석을 위해, PSCAD/EMTDC를 이용하여 그림 1과 같이 소내계통을 구성하였다. 본 논문에서 고조파 해석을 수행한 초고층빌딩은 22.9kV를 수신하고, 총 8개의 22.9/0.38kV의 변압기를 통하여 빌딩 내 부하에 전력을 공급하는 구조를 가지고 있다. 각 변압기는 역할별 부하군에 대한 전력공급을 담당하고 있고, 설계 상 수용률을 고려하여 부하용량을 결정하고 변압기 용량이 선정되었다. 또한, 고층 건물의 특성상, 소내 배선이 길어짐에 따라 큰 전압강하가 발생하기 때문에 각 변압기 2차측에는 전압강하 보상을 위하여 커패시터 뱅크를 설치, 운전하도록 설계하였다.

22.9/0.38kV 결선비의 변압기에 대한 정보를 표 1에 나타내었다. 각 변압기는 서로 다른 동작을 하는 부하에 대한 공급을 담당하고 있다. TR#1과 #3는 조명부하, TR#2는 여름부하용 냉방부하, TR#4는 소방펌프를 비롯한 각종 펌프, TR#5는 공조기, TR#6과 #7은 DVM 부하, 그리고 TR#8은 엘리베이터 및 각종 개별 부하를 담당하고 있다.

각 변압기 2차측에 연결된 부하는 표 1에서 보는 바와 같이 비선형부



〈그림 1〉 초고층빌딩 소내계통

〈표 1〉 변압기 및 부하 특성

No.	용량 (kVA)	%Z	총부하 (kVA)	수용부하 (kVA)	비선형부하 (kVA)	비율 (%)
TR#1	1,500	5%	2,175.460	1,458.497	56.250	3.86
TR#2	1,500	5%	2,311.075	1,405.268	391.281	27.84
TR#3	1,000	5%	1,404.164	960.348	2.750	0.29
TR#4	1,000	5%	1,629.575	983.988	454.313	46.17
TR#5	1,000	5%	1,627.475	982.938	463.375	47.14
TR#6	1,000	5%	1,367.338	893.939	18.750	2.10
TR#7	1,000	5%	1,345.688	941.981	0.000	0.00
TR#8	1,000	5%	1,152.702	878.909	41.250	4.69

〈표 2〉 비선형부하의 특성고조파

차수	5	7	11	13	17	19
주파수(Hz)	300	420	660	780	1020	1140
비율(%)	20.00	14.29	9.09	7.69	5.88	5.26
차수	23	25	29	31	35	37
주파수(Hz)	1380	1500	1740	1860	2100	2220
비율(%)	4.35	4.00	3.45	3.23	2.86	2.70

### 3. 시뮬레이션 사례연구

초고충빌딩에 대한 고조파 해석을 위한 PSCAD/EMTDC를 사용하였다. PSCAD/EMTDC로 모델링된 초고충빌딩의 소내계통은 그림 1과 같다.

#### 3.1 고조파원

각 변압기 2차측에 연결된 비선형 부하에 대한 고조파원 모델링을 수행하였다. 비선형부하로 분류한 대부분의 부하는 6-pulse 방식을 채용한 컨버터로 구성되어 있다. 총부하에 대한 수용률을 고려하여 수용부하를 산정하고, 수용부하에 대한 비선형부하의 용량을 계산하여 각 변압기에 대한 부하를 구성하였다. 비선형부하의 특성고조파는 표 2에 나타내었다.

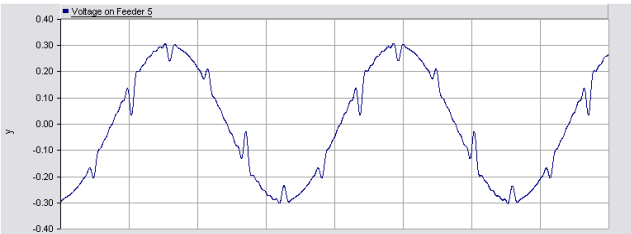
#### 3.2 PSCAD/EMTDC simulations

PSCAD/EMTDC를 이용하여 그림 1의 초고충빌딩의 계통을 구성하고, 각 변압기 이하의 부하군에 대한 고조파 모델을 적용하여 고조파 해석을 수행하였다. 고조파 해석의 결과는 표 3과 같다.

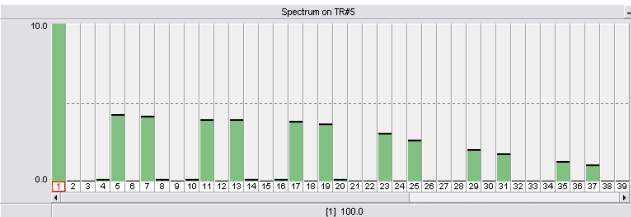
〈표 3〉 PSCAD/EMTDC를 이용한 고조파 해석 결과

TR No.	TR#1	TR#2	TR#3	TR#4
THD	2.061	5.524	1.869	1.838
TR No.	TR#5	TR#6	TR#7	TR#8
THD	11.310	1.970	1.880	1.872

표 3에서 볼 수 있듯이 TR#2와 TR#5의 2차측 모선에서의 전압왜곡이 매우 높음을 알 수 있다. TR#4의 부하 운전 특성이 지속적이지 않음을 고려하면, 비선형 부하의 왜곡이 높은 두 변압기의 2차측에서 매우 높은 전압왜곡이 발현됨을 알 수 있다. 또한, TR#7의 경우, 각 변압기 2차측에 위치한 비선형부하에 의하여 상위로 주입되는 고조파 전류가 공급되고 변압기 1차측 모선의 전압 왜곡을 유발하기 때문에, 비선형 부하의 비율이 매우 작은 변압기의 2차측에서도 일정 수준 이상의 전압왜곡이 발생함을 알 수 있다. 변압기 1차측 모선의 종합왜곡율은 1.719%이다. 그림 2와 3은 고조파 왜곡이 가장 심하게 나타난 TR#5의 2차측 모선 전압의 순시치 파형과 그에 대한 FFT 분석 결과이다.



〈그림 2〉 TR#5 2차측 모선전압 (X-axis: second, Y-axis: kV)



〈그림 3〉 TR#5 2차측 A상 전압에 대한 FFT 분석

모의 결과에 기반하여, 해석된 초고충빌딩의 계통은 TR#2와 TR#5의 2차측에 고조파 대책이 필요하다는 결론을 얻을 수 있다. 특히 TR#2에 비하여 TR#5의 2차측에 대한 고조파 저감 대책이 더 필요한데, 이것은 TR#5의 부하가 공조부하이기 때문에 상시 운전되기 때문이다.

### 4. 고조파 실측 사례연구

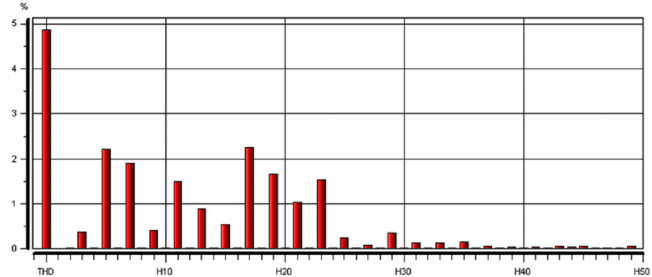
언급된 초고충빌딩은 갓 완공된 건축물로서, 아직 전체적인 부하의 운전이 되고 있지 않은 상태이다. 빌딩 계통의 정상적인 운전 이전에 고조파 실측을 통하여 분석하고 저감 대책을 수립하기 위하여 일부 운전에 대한 실측을 통해 고조파 분석을 수행하였다. 측정을 위하여 Dranetz BMI PX5를 이용하였고, 256sample/cycle의 샘플링비로 R, S, T, N의 네 도체에 대한 측정을 수행하였다.

〈표 4〉 실측데이터에 기반한 초고충빌딩의 고조파 해석

TR No.	THD	부하율(%)
TR#1	2.0465	30.56
TR#2	1.2131	38.25
TR#3	2.0854	22.52
TR#4	1.5925	3.15
TR#5	4.4490	23.82
TR#6	0.8011	15.60
TR#7	0.5400	15.33
TR#8	0.7355	21.93

#### 4.1 실측에 따른 고조파 분석

실측을 통한 초고충빌딩의 고조파 해석 결과는 표 4와 같다. 표 3의 시뮬레이션 결과와 비교할 때, 다소 낮은 왜곡으로 나타남을 알 수 있다. 이것은 수용부하 대비 부하량, 즉 부하율에 기인한 결과임을 추측할 수 있다. 특히, 시뮬레이션 결과와 비교할 때 가장 큰 차이를 나타내는 TR#2와 TR#5의 경우를 들 수 있다. TR#2의 경우, 2차측 모선전압의 왜곡률이 낮게 나타난 원인은 다음과 같이 분석할 수 있다. 수용부하 기준 비선형부하의 비율이 27.84%로 높은 비율을 나타내지만, 냉동부하를 주로 포함하는 부하 역할과 측정시기가 겨울이었던 점을 고려할 때, 냉동부하 이외의 다른 부하의 운전율이 높은 상태임을 알 수 있다. 또한, TR#5 2차측 고조파 분석결과와 경우도 표 3의 수치와 상당히 큰 차이를 나타내는데, 수용부하 대비 낮은 부하율에 기인한 것으로 판단된다. 주목할 만한 점은, 약 24%의 부하율에 대하여 전압왜곡율이 4.44%로 나타났다는 것이다. 이것은 전부하 운전에 대하여 매우 심각한 고조파 왜곡이 발생할 수 있음을 시사하고, 이로 인하여 다른 변압기 2차측 전압에의 왜곡이 심화될 수 있음을 나타낸다.



〈그림 4〉 TR#5 2차측 R상의 고조파 분석 결과

그림 4는 TR#5 2차측의 세 상 중에 가장 높은 THD값을 나타내는 R상에 대한 고조파 FFT 분석 결과이다. 시뮬레이션에서의 고조파 주입원 모델에 의한 분석 결과와 실제 운전상에서의 고조파 발생이 다소 차이는 있지만, 특히 그림 4의 결과는 triplen 고조파 성분이 있다는 점에 주목할 필요가 있다. 특히 triplen 고조파의 발생은 부하량 대비 상당히 높은 수준임을 알 수 있고, 이것은 중성선에서의 중점을 통하여 중성선과 전류에 의한 사고로 이어질 수 있음에 유의하여야 한다.

### 5. 결 론

초고충빌딩에 대한 에너지 효율 증대의 일환으로, 고조파를 진단하고 저감 방안 적용 위치 선정을 위하여 고조파 해석을 수행하였다. 설계된 계통을 전력시스템 해석 시뮬레이터를 이용하여 구성 및 모의하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 고조파 분석 결과, 비선형 부하의 부하비율이 높은 TR#2와 TR#5의 2차측 모선에서 높은 고조파 왜곡의 발생이 모의되었다. 특히 TR#5에서 상위로 주입되는 높은 고조파 전류는 다른 변압기의 2차측 전압왜곡이 상당히 기여함을 알 수 있다. 또한, 완공 후 부분 운전 상태에 있는 동일한 초고충빌딩에 대한 실측을 통하여 고조파 해석을 수행하였다. 실측을 통한 분석 결과는 부하율이 낮음에 기인하여 시뮬레이션 결과보다 낮은 수치를 나타냈지만, 전체적인 고조파 수준이 비슷함을 알 수 있다. 또한, 모의에서 모델링되지 못한 triplen 고조파에 대한 측정 결과에 기반하여, 중성선 과전류 억제 필요성이 있음을 알 수 있다.

#### [참 고 문 헌]

[1] IEEE Standard 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems"  
 [2] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Geat, "Electrical Power Systems Quality"