

배전 시스템의 고조파 분석 및 모델링에 관한 연구

성병화\* 왕용필\* 정형환\* 박희철\*\* 박인표\*\*\*  
\*동아대학교 \*\*한국전력연구원 \*\*\*한국전기연구원

Harmonics Analysis and Modelling for Distribution System

Byung-H Sung\* Yong-P Wang\* Hyuong-H Chung\* Hea-C Park\*\* In-P Park\*\*\*  
\*Dong-A University \*\*KEPCO \*\*\*KERI

**Abstract** - Recently, due to increasing the application of power electronic equipment, harmonics generated from the non-linear load are fairly produced. Harmonics can cause a variety of problems such as the overheating of distribution transformer, the breakdown of device and communication interference. Interest about power quality decline of distribution system is very increased.

In this paper, we are measured the harmonic voltage and current of distribution system to analyze harmonic characteristics, and it is analyzed Total Harmonic Distortion(THD). Also, we are modeled distribution system using PSCAD/EMTDC. And it is analyzed harmonic voltage and current in steady-state. The study results have been indicated the utility about harmonics analysis and modelling for distribution system.

1. 서 론

최근 각 국의 전력 회사 및 전기를 사용하는 수용가들은 전력 품질에 대한 관심과 요구가 점점 증대되고 있다. 전력 품질에는 Transient, Sags/Swells, Interruptions, Voltage Regulation, Harmonics, Flicker 등이 있는데 이 중에서 최근에 관심을 많이 가지는 부분이 고조파이다.

최근에는 전력전자 응용 기기의 사용 증가로 비선형 특성 부하에 의한 고조파가 상당히 발생하고 있으며, 주입된 고조파는 배전 시스템의 변압기 열화, 소자의 고장, 통신 간섭 등의 여러 가지 문제를 일으키고 있다.

현재 우리나라의 배전 시스템은 3상 4선식을 채택하고 있으며 이로 인해 3배수 고조파 전류가 불평형 전류와 함께 중성선에 다량으로 흐르게 되어 배전 시스템에서 OCGR 트립, NGR 과열, 중성선 과열 등의 문제를 야기하고 있다.

본 논문에서는 배전시스템의 고조파 특성을 분석하기 위하여 부인 변전소 배전시스템의 고조파 전압, 전류를 측정하여, 고조파 종합 왜형률 (Voltage/Current Total Harmonic Distortion :THD)를 분석하였다. 고조파 분석을 위한 배전시스템을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 정확히 모델링하였다. 배전시스템의 고조파 분석 및 모델링에 대한 유용성을 입증하고자 정상상태와 고조파 전류원 주입시에 시뮬레이션한 고조파 전압, 전류, 고조파 임피던스를 비교, 분석하였다.

2. 고조파

2.1 고조파의 정의

일반적으로 고조파(High Frequency)는 전력관제에 서 상용 주파수보다 높은 주파수로 정의하며, 고조파

(Harmonics)는 기본파에 대하여 그의 정수배의 주파수로 정의한다.

선형 네트워크에 정현파의 정전압이 인가되었을 때, 정현파의 전류가 생기게 되는데, 이 때 비선형적인 요소들이 유입되었을 때 고조파는 발생한다.

고조파 성분은 기본 주파수의 정수 배에 해당하는 주파수들이며, 주기적인 파형들이다. 푸리에 급수 전개식을 이용하면, 고조파의 전압과 전류는 식 (1), (2)와 같이 표현된다.

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega_0 t + \theta_n) \tag{1}$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega_0 t + \psi_n) \tag{2}$$

여기서,  $n$ 은 고조파 수 또는 고조파의 차수

2.2 고조파 발생원과 영향

각종 전력변환 시스템은 비선형 부하로 구성되어 있으므로, 여기에서 발생하는 고조파 전류는 전원 계통의 전압왜곡을 일으킨다. 따라서 발생원의 내부 임피던스와 전기설비의 임피던스가 공진 조건을 만족하면 고조파 전류는 증폭되어 전자유도장해를 일으킨다. 고조파 전류의 발생원은 대부분 전력전자소자를 사용하는 기기에서 발생한다. 그 종류를 들어보면 변환장치(인버터, 컨버터, 무정전 전원장치, 정류기), 아크로, 전기로, 형광등, 회전기, 변압기 등이 있다. 이중에 변환장치, 아크로, 전기로는 지속적으로 고조파 전류성분이 크기 때문에 다른 기기나 선로에 미치는 영향이 대단히 크다. 이상과 같은 고조파 부하는 그 자체의 성질상 전원으로 부터 왜형과 전류를 소모하므로 계통 전체에 대해서 고조파 전류원으로 동작하여 시스템내를 순환하는 고조파 전류를 흘리거나 시스템내의 전압 파형을 찌그러뜨려서 다른 기기에 영향을 준다. 고조파 전류가 유입하는 경우 위와 같은 직접적인 영향 이외에도 각종 전기설비 및 기기의 온도상승이 높아지고 절연물의 수명도 저하하게 된다.

2.3 고조파 관리 기준

고조파 지수를 정량화 하는 대표적인 기준은 고조파 종합 왜형률이다. THD는 왜곡된 파형에 대한 고조파 성분이 가장 효과적인 값을 나타내게 되는데, 식 (3), (4)와 같이 표현된다.

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100(\%) , n \geq 2 \tag{3}$$

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100(\%) , n \geq 2 \tag{4}$$

여기서,  $V_1, I_1$  : 기본파 전압, 전류의 실효치

$V_n, I_n$  : 제  $n$ 차 고조파 전압, 전류의 실효치

### 3. PSCAD/EMTDC를 이용한 모델링

배전시스템의 고조파 해석을 효과적으로 수행하기 위하여 PSCAD/ EMTDC를 이용하여 모델링을 하였다.

#### 3.1 발전기

전원모델의 선정은 시스템 구성과 연구목적에 따라 달라질 수 있으나 일반적으로 송-배전시스템에는 이상 정현파전원이 사용된다. 차과도(sub-transient) 리액턴스를 포함한 이상전원은 연계시스템을 가지는 큰 발전소를 표현하는데 사용되며, 계통관성은 무관하고, 외란에 의해 주파수는 변하지 않는다.

#### 3.2 변압기

본 논문에 사용한 변압기 사양은 표 1과 같다.

표 1. 변압기 명세표

정격전압	1차 : 154kv	2차 : 23kv	3차 : 안정권선
용량	1차 : 60000kva	2차 : 60000kva	3차 : 20000kva
탭전압	1차 : 154kv±12.5%(21 tap) 2차 : -		
결선	1차 : Wye	2차 : Wye	3차 : Delta
%임피던스	#1	M-X : 14.51% M-Y : 8.0% X-Y : 2.0%	
	#2	M-X : 14.41% M-Y : 8.0% X-Y : 2.0%	
	#3	M-X : 19.12% M-Y : 10.44% X-Y : 2.68%	

#### 3.3 전송선로

전력을 수송하는 전송선은 전기적 특성을 갖는 일반 전기회로로 나타낼 수 있으며, 또한 전기적 특성인 저항(R), 인덕턴스(L) 전력용량(C), 누설컨덕턴스(G)로 표현할 수 있다. 배전선로에서 선종별로 단위 km당 정상, 영상 임피던스는 표 (2)와 같다. 단, 선로에서 정상 임피던스와 역상 임피던스 값은 동일한 것으로 보고 계산한다. PSCAD/ EMTDC를 이용한 설계 방법으로 T-LINE과 PI SECTION을 사용하였다.

표 2. 22.9kV 배전선로 임피던스

선종	Ω 임피던스						
	정상임피던스			영상 임피던스			
전압선	중성선	R	C	L	R	C	L
ACSR-95	ACSR-58	0.3068	0.4449	0.0012	0.7417	1.7118	0.0045
ACSR-95	ACSR-95	0.3068	0.4449	0.0012	0.7142	1.632	0.0043
ACSR-160	ACSR-95	0.1836	0.3946	0.001	0.6343	1.5479	0.0041

#### 3.4 부하

부하는 일반적으로 유효전력(P)과 무효전력(Q)으로 표현된다. 따라서 식 (5)를 이용하여 전기적 파라메타인 R과 X로 모델링 할 수 있다.

$$R = \frac{V^2}{P}, X = \frac{V^2}{Q} \quad (5)$$

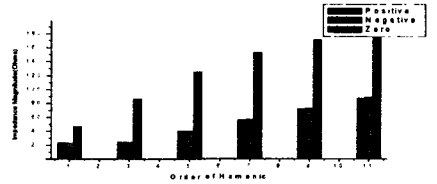
### 4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 고조파 전류 주입시 임피던스의 주파수 영역의 응답 특성을 파악하고, 정상 상태에서 전압, 전류 파형을 분석하였다. 그리고 고조파 전류원 발생시에 전압, 전류 파형을 검토하여 배전시스템에서의 각 상별로

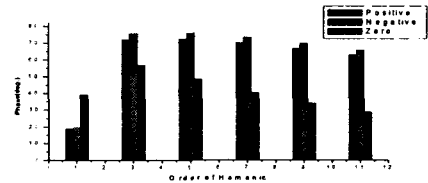
고조파 함유량과 왜형률을 확인하고 시스템에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

#### 4.1 고조파 임피던스 분석

시간 영역 시뮬레이션에서 외부 시스템의 전압파형을 구하고, 이 파형을 이산 푸리에 변환을 이용하여 주파수 영역 응답을 구할 수 있다. 그림 (1)은 배전 시스템의 임피던스와 위상의 크기를 나타내었다. 배전 시스템은 부하가 대부분 직렬로 연결되어 있어 임피던스가 증가함을 알 수 있다. 그리고 정상분과 역상분이 거의 유사함을 보인다.



(a) 임피던스 크기



(b) 임피던스 위상

그림 1. 임피던스 주파수 응답

#### 4.2 정상상태에서의 배전시스템

그림 (2)은 정상 상태에서의 A상 전류파형과 N상 전류파형 그리고 A상 전압파형을 보여준다. 측정 위치를 변압기 2차측 지점(1), 시스템의 중간 지점(2), 및 말단 지점(3)에 측정하였다. 전압과 전류파형을 보면 왜곡이 거의 일어나지 않음을 알 수 있다. 전압은 변압기 2차측 지점과 말단 지점을 비교하면 전압강하는 0.2%로 나타났다. 이상의 결과에서 배전시스템 모델링결과가 정확함을 보여준다.

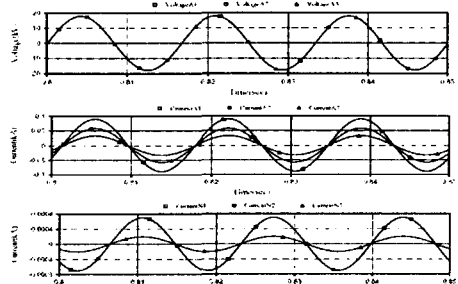


그림 2. 정상상태에서의 전압, 전류파형

#### 4.3 고조파 전류원 주입시의 배전시스템

그림 (4)는 고조파 전류원이 시스템의 말단에 각 상별로 3고조파(3.7%), 5고조파(2.7%), 7고조파(1.7%), 9고조파(1.1%), 11고조파(0.5%)가 주입되었을 경우 A상 전류파형과 N상 전류파형 그리고 A상 전압파형을 나타내었다. 측정 위치를 변압기 2차측 지점(1), 시스템의 중간 지점(2), 및 말단(3)에 측정하였다. 이상의 결과에서 전압과 전류파형은 고조파원의 주입으로 왜곡이 나타남을 알 수 있다. 전압은 변압기 2차측 지점과 말단 지점을 비교하면 전압강하는 0.17%로 나타났다.

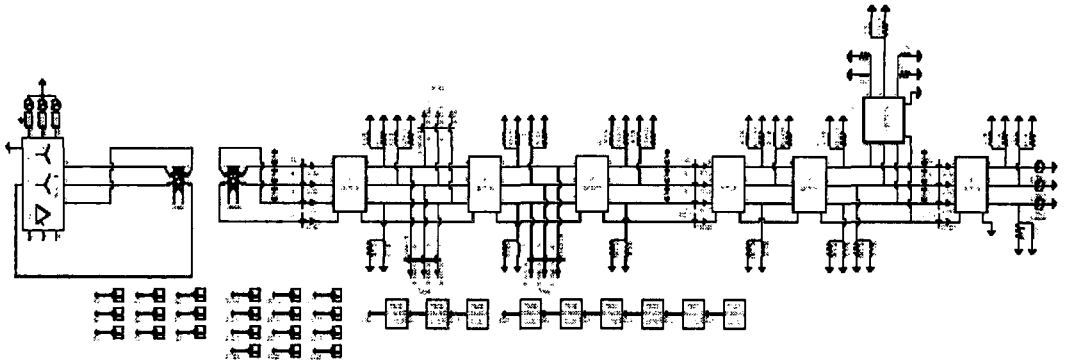


그림 3. 22.9kV 배전시스템

그림 (5)는 고조파 전압과 전류의 차수별 성분을 나타내었다. 중성선으로는 3고조파 성분이 많이 흐르는 것을 알 수 있다. 여기서, 각 상별  $V_{THD}$ ,  $I_{THD}$ 는 표 (4)와 같다.

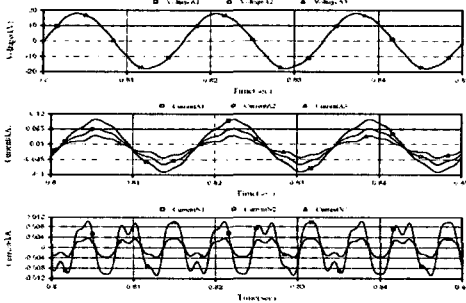
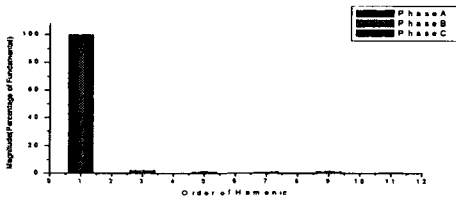
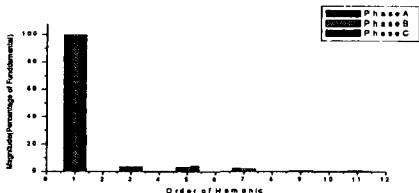


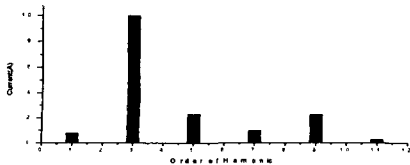
그림 4. 고조파 전류원 주입시 전압, 전류파형



(c) 고조파 전압그림



(a) 고조파 전류



(b) 중성선 전류

그림 5. 고조파 전압, 전류 및 중성선 전류

표 4. 상별  $V_{THD}$ ,  $I_{THD}$

Phase	$V_{THD}$	$I_{THD}$
A	2.74	5.54
B	2.95	5.33
C	2.94	5.97

### 5. 결론

본 논문에서는 시스템에 발생하는 고조파 분석을 효과적으로 수행하기 위해서 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하였다. 또한 시스템의 고조파 임피던스를 측정하여 고조파 분포를 확인하였다. 정상 상태와 고조파 전류원 주입시 전압, 전류파형을 측정, 분석하였다.

1. 모델링한 시스템에서의 임피던스의 크기가 실제와 같이 측정되었다.
2. 정상 상태에서의 전압, 전류파형 분석 결과 모델링한 배전시스템이 실제 시스템과 동일하게 모델링 되었음을 확인하였다.
3. 고조파 전류원 주입시 각 상별 고조파 성분을 분석하여 각 차수별 고조파량을 파악하였고, 중성선에 많은 양의 3고조파가 발생함을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소(02340-17) 주관으로 수행된 과제임.

### [참 고 문 헌]

- [1] Burch, R and Chang, G "Impact of aggregate linear load modeling on harmonic analysis: a comparison of common practice and analytical models". Power Delivery, IEEE Transactions on , Volume: 18 , Issue: 2, pp.625 - 630, April 2003
- [2] Stones, J and Cillinson, A, "Power quality", Power Engineering Journal , Volume: 15 , Issue: 2, pp:58 - 64 , April 2001
- [3] Mack Grady, W and Santoso, S, "Understanding power system harmonics", Power Engineering Review, IEEE , Volume: 21 , pp:8-11, Nov. 2001
- [4] IEC 1000-3-6, "Electromagnetic Compatibility, PART3 : Section6 : Assessment of emission limits for distorting loads in MV and HV power systems.", 1996