

배전시스템 고조파 모델링에 관한 연구

한형주*, 왕용필*, 정형환*, 성병화**, 박희철***, 박인표****
 *동아대학교, **희성전자, ***마이크로파워, ****한국전기연구원

Harmonics Modelling for Distribution System

Hyeng-J Han*, Yong-P Wang*, Hyeng-H Chong*, Byung-H Sung**, Hee-C Park***, In-P Park****
 *Dong-a University, **Heesung Electronics, ***MP, ****KERI

Abstract - In this paper, the Point of Common Coupling (PCC) is selected to analyze harmonic characteristic of distribution system by IEC 61000 - 3 - 6 in Electromagnetic Compatibility(EMC). Harmonic voltage and current were measured at the PCC of real distribution system. Harmonic distribution, nonlinear load component and Total Harmonic Distortion(THD) were verified by measurement.

The effective and accurate modelling of real distribution system were proved through a analysis of harmonic impedance, voltage and current in steady-state. Harmonic transfer characteristic in distribution system were summarized and investigated through a analysis of harmonic voltage and harmonic current in harmonic current source.

1. 서 론

최근 산업의 발달과 함께 배전계통에는 컨버터, 인버터, 아크로, 변압기, 사무용기기 등 비선형 부하가 점차 증가하고 있다. 이러한 비선형 부하가 증가하면 전원측으로 많은 고조파 전류가 유출하게 되고 이 유출전류와 전원측 임피던스에 의한 전압의 왜형이 발생하여 전력계통에 악영향을 미친다. 이러한 문제는 수용가구내에만 영향이 국한되는 것이 아니라 인근 다른 수용가와 전력설비에도 영향을 미치고 있으며 그 정도가 우려의 수준을 나타내고 있다.[1,2]

본 논문에서는 배전시스템의 고조파 특성을 분석하기 위하여 부민 변전소 배전 시스템의 공통 결합점(Point of Common Coupling: PCC)에서 고조파 전압, 전류를 측정하여 고조파 분포와 비선형 부하 성분을 파악하였고, 고조파 관리 기준에 필요한 고조파 전압, 전류 종합 왜형률(Voltage/Current Total Harmonic Distortion :VTHD/I THD)을 분석하였다. 그리고, 고조파를 효과적으로 분석하기 위해 배전시스템을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 정확히 모델링하였다. 또한, 실 측정시에 현실적으로 측정이 어려운 지점의 고조파 전압, 전류를 측정하여 고조파의 정확한 흐름을 파악하고 고조파 종합 왜형률을 분석하였다. 실 측정치와 모의 실험치를 비교한 결과 고조파 전달 특성이 일치하였다. 이상의 결과에서 배전시스템의 고조파 분석 및 모델링에 대한 유용성을 입증하였다.

2. 고조파

2.1 고조파의 개념

일반적으로 고조파는 전력관계에서는 상용 주파수보다 높은 주파수, 예를 들면 수백 Hz 이상인 주파수를 말하며, 고조파란 일본의 경우에는 JISG 8106에서 “주기적 복합파의 각 성분 중 기본파 이외의 모든 것이라 하며, 2고조파는 기본파의 2배의 주파수를 말한다.” 라고 정의

하고 있으며, IEEE Std 519-1992 에는 “A sinusoidal component of a periodic wave or quantity having a frequency that is an integral multiple of the fundamental frequency.” 로서 정의되고 있다. 즉 비정현파는 정현파 공급전압과 같은 주파수 성분을 갖는 기본파 성분이고 그 정수 배의 주파수 성분이 합성된 것으로서, 기본파에 대해 정수 배의 주파수 성분이 합성된 것을 총칭하여 고조파라 칭하고 있는 것이다.

2.2 왜형률과 고조파 함유율

왜형파의 질(質)을 나타내는 수치로는 통상 종합 전압 왜형률 및 고조파 함유율로 나타낼 수 있으며, 종합 전압 왜형률은 기본파 성분 실효치에 대한 전체 고조파 성분 실효치의 비율로 나타내면 식 1, 2와 같다.

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100(\%), \quad n \geq 2 \tag{1}$$

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

여기서, V_n, I_n 은 제 n 차 고조파 전압, 전류의 실효치이고 V_1, I_1 은 기본파 전압의 실효치이다.

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 모델링

실 배전시스템의 고조파 전달 특성과 시스템에 미치는 영향을 분석하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 그림 1과 같이 부민변전소의 주 변압기 2번과 천마, 태극, 서대, 대신D/L을 모델링하였다.[3,4]

3.1 발전기

전원모델의 선정은 시스템 구성과 연구목적에 따라 달라질 수 있으나 일반적으로 송·배전시스템에는 이상 정현파전원이 사용된다. 시스템에 사용된 전원은 기준 용량 100[MVA]와 선간 전압 154[kV]를 사용하였다.

3.2 변압기

변압기는 Y-Y-Δ 변압기로 154/22.9[kV]로 모델링 하였다. MTR의 경계전압은 1차 154[kV], 2차 22.9[kV], 3차는 안정 권선으로 되어 있고, 1차와 2차의 용량은 60[MVA], 3차는 20[MVA]로 된 3상 변압기를 결선했다. 변압기의 결선은 Y-Y-Δ 결선을 사용하였고, 변압기 용량은 45/60[MVA]이다.

Table 1. Main transformer

정격전압	1차 : 154kv	2차 : 22.9kv	3차 : 안정권선
용량	1차 : 60000kva	2차 : 60000kva	3차 : 20000kva
상수	3∅		
탭전압	1차 : 154kv±12.5% 2차 : -		
결선	1차 : Wye	2차 : Wye	3차 : Delta
%Impedance	#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), 누설콘덕턴스 (G) 로 표현할 수 있다. 배전선로에서 선종별로 단위 km 당 정상, 영상 임피던스는 표 2와 같다.

Table 2. 22.9kV distribution line impedance

선종	∅ 임피던스				
	정상임피던스		영상 임피던스		
전압선	중성선	R	X	R	X
ACSR-95	ACSR-95	0.3068	0.0012	0.7142	0.0043
ACSR-160	ACSR-95	0.1836	0.001	0.6343	0.0041
CNCV-60	CNCV-60	0.3908	0.0004	1.1439	0.001
CNCV-325	CNCV-325	0.0758	0.0003	0.2363	0.0002

3.4 부하

전기적 파라메타는 유효전력(P)과 무효전력(Q) 그리고 부하의 구성과 특성들에 대한 정보에 의해 유도된다.

표 3은 부하 모델링 방법으로써 전기적 파라메타인 R과 X로 모델링 된다. 본 논문에서는 병렬연결 방식을 선택 하였다. 부하는 계약전력의 60%로 계산하였으며, 역률은 0.9로 하였다.

Table 3. Load model

Model	Parameters
<div style="text-align: center;"> </div>	$R = \frac{V^2}{P}$ $X = \frac{V^2}{Q}$

4. 시뮬레이션 및 고찰

본 논문에서는 배전시스템의 고조파 전달 특성과 시스템에 미치는 영향을 분석하기 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 그림 1의 부민변전소 천마, 태극, 서대, 대신D/L을 모델링하였다. 고조파 전류 주입시 임피던스의 주파수 영역 응답 특성을 파악하고, 정상 상태에서 전압, 전류 파형을 분석하였다. 그리고 고조파 전류원 발생시에 전압, 전류 파형을 검토하였다.

4.1 고조파 임피던스 분석

배전시스템의 고조파 임피던스를 분석하기 위하여 시간 영역에서 외부 시스템의 전압파형을 구하고, 이 파형을 이산 푸리에 변환을 이용하여 주파수 영역 응답을 구하였다. 그림 2는 배전 시스템의 임피던스와 위상의 크기를 나타내었다.

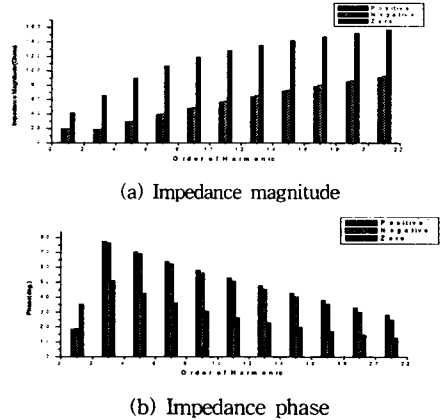


Fig. 2 Frequency response of Impedance

4.2 정상상태에서의 배전시스템

모델링한 배전시스템의 정확성을 평가하기 위하여 정상상태에서 시뮬레이션을 실시하여 전압, 전류파형을 분석하였다. 그림 3은 정상 상태에서의 각상 전압 파형과 전류파형 그리고 N상 전류파형을 보여준다.

전압과 전류파형을 보면 비선형 부하를 고려하지 않았기 때문에 왜곡이 거의 일어나지 않음을 알 수 있다. 각 상별 전압, 전류파형이 일치함으로 모델링된 시스템이 정확함을 알 수 있다. 이상의 결과에서 이 배전시스템은 모델링이 안정적이고 정확하게 이루어 졌다.

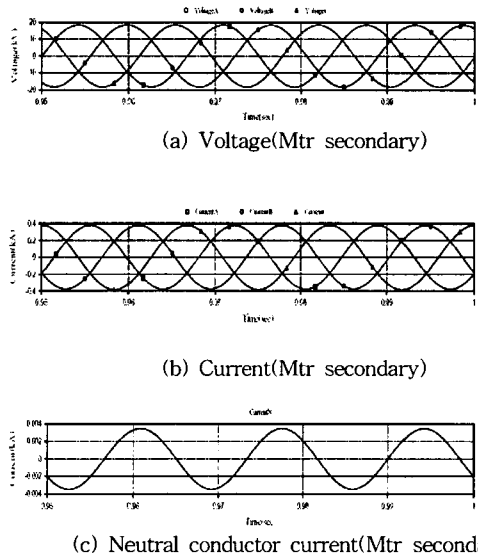


Fig. 3 Total D/L voltage and current at steady-state

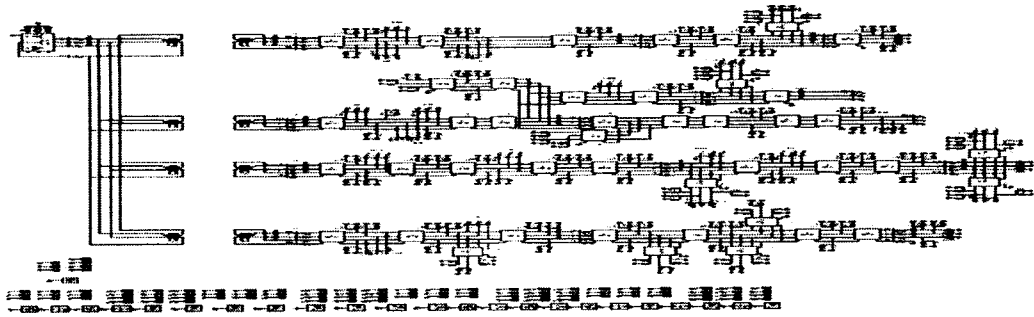


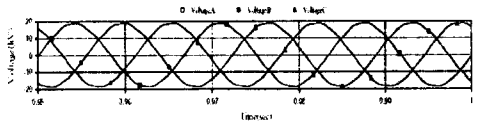
Fig. 1 22.9kV distribution system

4.3 고조파 전류원 발생시의 배전시스템

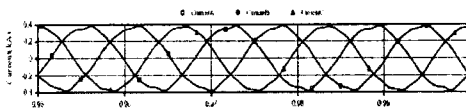
배전시스템에서 비선형 부하 발생 시에 고조파 전달 특성과 시스템에 미치는 영향을 파악하기 위해 고조파 전압, 전류를 분석하였다. 실 측정을 통한 각 D/L별로 발생하는 고조파 전압, 전류원은 표 4와 같다.

Table 4. Harmonic voltage & current fundamental

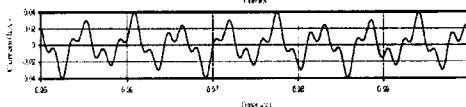
차수	상	측정		시뮬레이션	
		voltage	current	voltage	current
3	A	0.98	4.3	0.87	4.12
	B	1.01	4.38	0.93	4.29
	C	1.05	4.62	0.9	4.5



(a) Voltage(Mtr secondary)



(b) Current(Mtr secondary)



(c) Neutral line current

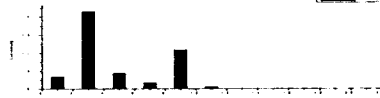
Fig. 4 Total voltage and current at harmonic current source appearance



(a) Harmonic voltage



(b) Harmonic current



(c) Neutral conductor current

Fig. 5 Total harmonic voltage, harmonic current, neutral conductor current

5. 결 론

본 논문에서는 배전시스템에서의 고조파 수준과 전달 특성 분석을 위하여 실 배전시스템의 PCC 지점에서 고조파 전압, 전류를 측정하였으며, PSCAD/EMTDC를 이용하여 실 배전시스템을 정확하게 모델링하였다. 고조파 임피던스 분석과 정상 상태에서의 전압, 전류 분석을 통하여 모델링의 정확성을 입증하고, 고조파 전류원 발생시에 고조파 전압, 전류를 비교, 분석하여 고조파 전달 특성을 파악하였다.

1. 정상 상태에서의 전압, 전류파형 분석 결과 모델링한 배전시스템이 실제 시스템과 유사하게 모델링 되었음을 확인하였다.
2. 고조파 전류원 발생시에 각 상별 고조파 성분을 분석하여 각 차수별 고조파 량을 파악하였고, 중성선에 많은 양의 3고조파가 발생함을 확인하였다.
3. 모델링된 배전시스템과 실제 배전시스템의 고조파 성분의 전달특성이 유사함을 확인하였다.

본 논문에서 PSCAD/EMTDC를 이용한 배전시스템의 모델링은 배전시스템의 고조파 분석에 매우 유용함을 나타내었다.

감사의 글

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

[참 고 문 헌]

- [1] Stones, J and Cillinson, A, "Power quality", Power Engineering Journal, Volume: 15, Issue: 2, pp:58 - 64, April 2001
- [2] Mack Grady, W and Santoso, S, "Understanding powersystem harmonics", Power Engineering Review, IEEE, Volume: 21, pp:8-11, Nov. 2001
- [3] "PSCAD/EMTDC Power System Simulation Software Manual", Manitoba HVDC Research Centre, 1996
- [4] Burch, R and Chang, G "Impact of aggregate linear loadmodeling 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