

배전계통에서의 Superharm을 이용한 고조파 분석에 관한 연구

황광욱, 김용겸, 김철환, 허정용  
성균관대학교

A Study on the Harmonics Analysis in Distribution System using SuperHarm

G.W. Hwang, Y.K. Kim, C.H. Kim, J.Y. Heo  
Sungkyunkwan University

**Abstract** - In recent years, both utilities and users have expressed their deep concerns about the quality of electric power. The harmonic is the one of power quality disturbance, it can raise a problem on the power system.

In this paper, the increasing application of power electronic equipment [especially (ASDs : adjustable speed drives)] on distribution systems has led to a growing concern for harmonic distortion and the resulting impacts on system equipment and operations.

The purpose of this study is to calculate the quantity of harmonic voltage by varying the RECT side ASD load and to design the optimal harmonic filter for the elimination of harmonics.

1. 서 론

전력의 품질은 전력계통의 고유한 전원 전압과 주파수를 유지하는 것이다. 이에 반해, 외란은 정격 전압의 크기와 주파수에서 변동, 왜곡 혹은 정현파 전압 파형의 이탈을 나타낸다[1].

최근 전력품질(Power Quality)에 대한 개념이 전력회사 및 전력의 최종 사용자인 수용가에서 관심의 대상이 되고 있다. 이러한 전력품질에 주요한 영향을 끼치는 외란은 여러 가지가 있으나 그 중에서도, 계통과 부하간에서 가장 빈번하게 일어나는 발생하는 현상으로 고조파(harmonic) 현상을 들 수가 있다. 고조파는 비선형 부하 등 여러 가지 고조파 발생원과 연결될 때 나타나며 고조파 전류로 인한 계통 리액턴스 전압강하로 인하여 심각한 전압 왜곡을 초래한다. 전력계통에서 사용하는 전력전자 설비들은 스위칭에 의한 제어특성으로 인해 전력계통에 많은 고조파를 주입시키고, 역을까지 저하시키는 문제점을 발생시키고 있다.

본 논문에서는 배전계통에서 비선형 부하로 인해 발생하는 고조파의 분석 및 영향을 살펴보는데 유용한 SuperHarm을 사용하여 전력전자 설비 중에서도 가변속 구동장치(Adjustable Speed Drive)를 특정한 모션에 설치하여 PCC(point of common coupling)에서의 고조파 분석 및 저감을 위한 방법을 모의하였다. 그리고 부하의 형태와 특성에 따라 모의 배전계통도에 고조파가 미치는 영향을 PCC를 중심으로 살펴보았다.

2. 본 론

2.1 고조파 (Harmonic)

배전계통에서 전력 품질 외란(Power Quality Disturbance)에 영향을 미치는 요소 중 가장 일반적인 현상이 고조파(Harmonic)이다. 고조파는 전자회로의 코일(L), 콘덴서(C)등 비선형 부하에 의한 전류 왜곡에 의해 발생되며 안정된 정현파가 일그러진 형태로 나타난다. 이것은 상용전원의 기본파(60Hz)에 대한 정수 배

인 주파수 성분의 합성으로 분석되며 기본파 전류에 대한 전체 고조파 성분의 전류를 전류 고조파 함유율이라고 한다.

2.1.1 PCC (Point of Common Coupling)

PCC(Point of Common Coupling)란 수용가가 공급자로부터 연결된 지점을 말한다[3-4]. 일반적으로 PCC는 다음 그림 1과 같이 수용가 변압기의 고압 측이 되는 지점을 지시하지만, 다음 그림 2와 같은 경우에는 다른 수용가로 연결되는 지점인 변압기의 저압 측을 지시한다. 이러한 PCC에서는 고조파 제한 기준을 적용받게 된다.

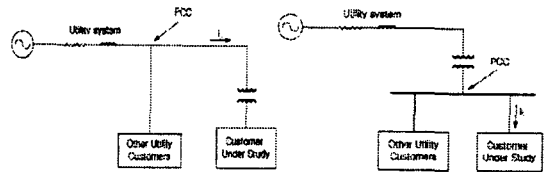


그림 1 PCC (수용가 변압기 고압 측)      그림 2 PCC (수용가 변압기 저압 측)

2.1.2 고조파 이론

선형 네트워크에 정현파의 정전압이 인가되었을 때, 정현파의 전류가 생기게 되는데, 이 때 비선형적인 요소들이 유입되면 고조파가 발생한다. 고조파 성분은 기본 주파수의 정수 배에 해당하는 주파수들이며, 주기적인 파형들이다. Fourier series 전개식을 이용하면, 고조파의 전압과 전류는 다음 식 (1)과 같이 표현된다.

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

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

여기에서, n은 고조파 수, 또는 고조파의 차수라고 부를 수 있다. 이들 식에서, DC성분은 (변압기에 의해 차단되어) 없다고 가정한다. 기본 주파수는 n=1이며 크기와 고조파의 차수는 왜곡을 일으키는 장치의 종류에 따라 다르게 나타난다.

고조파 성분의 표시에 대표적으로 표현되는 기준으로서는 THD(Total Harmonic Distortion)가 있다. THD는 왜곡된 파형에 대한 고조파 성분의 가장 효과적인 값을 나타내게 되는데, 다음 식 (2)와 같이 표현된다 [1].

$$THD = \frac{1}{M_1} \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} M_k^2} \tag{2}$$

여기에서,  $M_k$ 는  $M_1$ 의 크기를 가지는 k차 고조파의 실효치이다. 그리고, 왜곡된 전압 및 전류에 대한 고조파 성분을 각각  $THD_v$ ,  $THD_i$  등으로 나타낼 수 있다.

### 2.1.3 고조파 제한

전력계통에 유입되는 고조파를 억제하기 위한 관리 기준 중에서 가장 널리 사용되고 있는 IEEE 519에서는 수용가로부터 계통에 유출되는 고조파 전류의 제한인 전류 왜곡 제한과 수용가의 전력계통과 공급자의 전력계통의 연결 지점에서 고조파 전압의 제한인 전압 왜곡 제한을 적용하고 있다[3-4].

다음 표 1에서는 전력 공급자에게 적용되는 IEEE 519 전압 왜곡 제한을 나타내었다.

표 1 IEEE 519 전압왜곡 한계치

Bus Voltage at PCC ( $V_n$ )	Individual Harmonic Voltage Distortion(%)	Total Harmonic Distortion - THD <sub>V</sub> (%)
$V_n \leq 69$ [kV]	3.0	5.0
$69 < V_n \leq 161$ [kV]	1.5	2.5
$V_n > 161$ [kV]	1.0	1.5

### 2.2 SuperHarm

전력계통에서 비선형 부하로 인해 발생하는 고조파의 분석 및 영향을 살펴보는 데 매우 유용한 프로그램이다. 현재 전력계통에서 가장 널리 사용되고 있는 전력 계통 과도해석 프로그램으로는 EMTP(Electromagnetic Transients Program)가 있지만, EMTP에서의 모의 결과는 시간 영역에 대해서 표현하고 있다. 하지만, 고조파 분석에 있어서는 주파수 영역에서 모의 결과를 분석해야 한다. 즉, EMTP를 통해서 모의 실험을 할 경우에는 모의된 결과를 시간영역에서 다시 주파수 영역으로 푸리에 변환 등을 사용하여 바꾸어 주어야 하는 불편이 있는 반면, SuperHarm을 통해서 모의 실험을 할 경우에는 모의된 결과를 변환 없이 TOP(The Output Processor)에서 주파수 스펙트럼으로 표현된다.

SuperHarm은 다양한 장치와 소스 모델을 제공하고 있다. 본 논문에서는 간단한 3상 RLC branch 모델, 커패시터 모델, 평형 3상 선로 모델, 변압기 모델 등이 사용되었다. 그리고 SuperHarm을 통해서 모의된 결과 데이터를 TOP 프로그램을 이용하여 원하는 모션에서의 전압과 전류의 변화를 그래프로 살펴볼 수 있다.

### 2.3 비선형 부하와 필터 모델

본 논문에서 RECT 모션에 연결되는 비선형 부하 측에는 다음 그림 3과 같은 ASD(Adjustable Speed Drives) 형태의 모델이 사용되었다.

그림 3에서 모션 S는 전압원(Vsource) 모델이고 모션 A와 B에는 Adjustable Speed Drives(ASD)가 연결되어 있다.

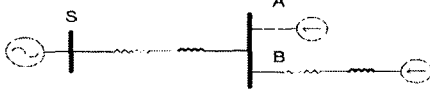


그림 3 비선형 부하를 이용한 고조파 전류투입

고조파 저감기법으로는 상수 증대법, 수동필터, 능동필터, 변압기 델타(delta)결선 등 여러 가지 기법이 있는데 전력계통에서는 고조파 저감대책으로 필터가 널리 사용되고 있다.

수동필터는 R, L, C로 구성되며 그 크기는 제거하고자 하는 고조파의 주파수에서 직렬 공진이 발생되도록 설정한다. 본 논문에서는 다음 그림 4와 같은 직렬필터를 사용하여 고조파를 저감시키는데 사용하였다. 각각의 직렬필터에 속하는 성분은 그림 4의 식으로 표현하여 정의를 할 수 있다.

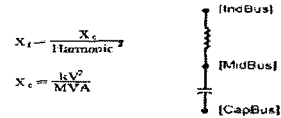


그림 4 직렬필터 성분

## 2.4 시뮬레이션 및 결과 고찰

### 2.4.1 모의 계통

다음 그림 5는 본 논문에서 모의된 모델 배전계통도를 나타낸다.

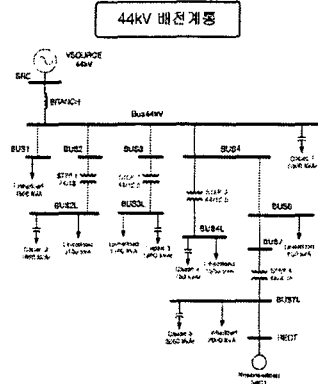


그림 5 모의 배전계통도

그림 5의 계통도를 SuperHarm 프로그램을 이용하여, 비선형 부하로 인한 여러 가지 고조파 현상을 모의하였다. 44[kV]의 전원을 가지는 본 전력계통은 44/13 kV, 44/12.5 kV, 44/4.16 kV의 강압용 변압기 4개 및 역률 개선용 커패시터 뱅크 5개, 6개의 선형 부하, 비선형 부하 등으로 구성되어 있다. 또한 모션 RECT에 위치한 비선형 부하로 표시되어있는 부분은 고조파 발생원인 ASD(Adjustable Speed Drive)로 계통 내에 고조파 전류를 유입시키고, 이에 따른 전압왜곡을 발생시킨다.

표 2 모델 계통 데이터

배전선로	44 kV - BUS1 모션	Z = 0.058 + j1.2778[Ω]	집중 R, L, C 정수
	44 kV - BUS2 모션	Z = 3.678 + j8.0150[Ω]	
	44 kV - BUS3 모션	Z = 0.987 + j2.9810[Ω]	
	44 kV - BUS4 모션	Z = 1.804 + j1.7040[Ω]	
선형부하	BUS4 - BUS6 모션	Z = 3.717 + j7.8410[Ω]	정상상태에서 무입상태
	BUS6 - BUS7 모션	Z = 0.620 + j1.3340[Ω]	
	BUS1 모션	4500[kVA], 44.0[kV]	
	BUS2L 모션	3100[kVA], 13.0[kV]	
	BUS3L 모션	1100[kVA], 12.5[kV]	
	BUS4L 모션	1300[kVA], 12.5[kV]	
	BUS6 모션	600[kVA], 44.0[kV]	
커패시터 뱅크	BUS7L 모션	2000[kVA], 4.16[kV]	정상상태에서 무입상태
	44 kV 모션	6000[kVA], 44.0[kV]	
	BUS2L 모션	1050[kVAR], 13.0[kV]	
	BUS3L 모션	1800[kVAR], 12.5[kV]	
	BUS4L 모션	750[kVAR], 12.5[kV]	
	BUS7L 모션	3600[kVAR], 4.16[kV]	
	BUS7L 모션	3600[kVAR], 4.16[kV]	
변압기	STEP1 BUS2 - BUS2L 모션	10[MVA], 44/13[kV]	Δ-Y 결선
	STEP2 BUS3 - BUS3L 모션	10[MVA], 44/12.5[kV]	
	STEP3 BUS4 - BUS4L 모션	10[MVA], 44/12.5[kV]	
	STEP4 BUS6 - BUS6L 모션	10[MVA], 44/4.16[kV]	

\* 커패시터 뱅크 접지 방식 : Y-접지 방식

본 모델 계통은 SuperHarm을 이용하여 모델링 하였으며, 배전계통 모델링에 있어서는  $\Delta$ -Y결선으로 구성된 변압기를 통하여 연결되는 모선에서 부하와 역률 개선용 커패시터를 표현하였다. 표 2에서는 본 모델 계통을 구성한 요소들의 간략한 데이터를 나타내었다.

### 2.4.2 모의 형태

다음 표 3은 비선형 부하(ASD) 측의 부하에 대한 모의 형태를 나타내었으며, 각각의 다른 모의 형태에 대하여 PCC에 나타나는 고조파 전압 왜곡 현상을 살펴보았다. 그림 5에서 제시된 모델 배전계통도에서 PCC는 44 kV 모선이다.

표 3 모의 형태

Type	RECT 모선에서 비선형부하 변동
Type 1	100 % Load, 858.2 kVA, 2.4 kV

다음 표 4는 RECT 모선에 고조파 발생 장치인 ASD를 설치한 후의 결과에 대하여 구성하였고, 부하 변동에 따른 PCC(모선 44kV)에서의 전압 성분은 표 5에서 정리하였다.

표 4 RECT 측 부하(ASD) 변동에 따른 각 모선의 THD

Name	44kV	BUS1	BUS2	BUS3	BUS4	BUS6	BUS7
Type 1	5.9836	4.9472	4.6841	4.9134	5.6601	9.1737	9.8076

표 5 PCC 모선에서의 고조파 성분

Type	Fund	%THD	%H3	%H5	%H7
Type 1	25116.8	5.9836	0.0000	2.6543	4.1806

표 5에서 THD가 IEEE 519 고조파 제한 기준인 5%를 초과함을 볼 수 있다. 따라서, IEEE 519 고조파 제한 기준인 5% 이내의 THD를 가지기 위해서는 고조파 필터를 사용하여 THD 값을 감소시킬 수 있다.

### 2.4.3 THD 향상을 위한 Filter 선정

2.4.2를 통해서 PCC에서 IEEE 519 고조파 제한 기준인 5% 이내의 THD를 가지기 위해서는 고조파 저감 기법이 필요함을 알 수 있었다. 필터 설계에 있어서는 계통의 주파수 응답을 계산하는 Frequency scan을 이용하였으며, 표 5에서 나타난 바와 같이 7<sup>th</sup>고조파 성분이 가장 크게 나타나므로 7<sup>th</sup>고조파 필터를 적용하였으며 RECT 모선에 각각 5<sup>th</sup>, 7<sup>th</sup>, 11<sup>th</sup>, 13<sup>th</sup>고조파 필터를 설치하였을 때를 비교함으로써 최적의 고조파 필터를 선정하였다.

표 6 44kV 모선에서 고조파 필터 설치 전과 각 고조파 필터 설치후의 고조파 전압 성분 (100 % Load)

Name	%THD	%H3	%H5	%H7	%H9	%H11
without filter	5.9836	2.40E-14	2.6543	4.1806	3.19E-14	0.3477
5 <sup>th</sup> filter	1.0925	2.59E-14	0.0739	1.0660	1.49E-14	0.1394
7 <sup>th</sup> filter	1.0182	2.47E-14	1.2097	0.0402	1.07E-14	0.0694
11 <sup>th</sup> filter	3.0870	2.42E-14	2.9138	1.0194	2.77E-14	0.0011
13 <sup>th</sup> filter	3.4757	2.42E-14	3.2593	1.2073	5.92E-14	0.0158

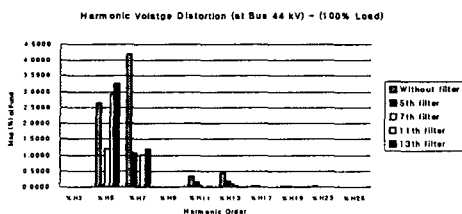


그림 6 PCC 모선에서 고조파 필터 설치 전과 각 고조파 필터 설치 후의 주파수 스펙트럼 (100% Load)

표 6에서 PCC인 44kV 모선에서 필터의 유무 및 각 고조파 필터의 적용에 따른 고조파 전압 성분을 나타내었다. 또한 그림 6에서는 각 고조파 필터를 설치하였을 때와 필터를 설치하지 않았을 때의 배전계통 각 모선에서의 고조파 전압 왜곡 스펙트럼의 형태로 나타내었다. 표 6과 그림 6을 통해 알 수 있듯이 5<sup>th</sup>, 11<sup>th</sup>, 13<sup>th</sup> 고조파 필터보다 7<sup>th</sup>고조파 필터를 적용하였을 때 배전계통에서 고조파 저감 현상이 두드러지게 나타남을 알 수 있다. 최적의 필터인 7<sup>th</sup>고조파 필터를 적용하였을 때, 각 모선에서 고조파 전압 왜곡에 대한 스펙트럼을 다음 그림 7에서 나타내었다.

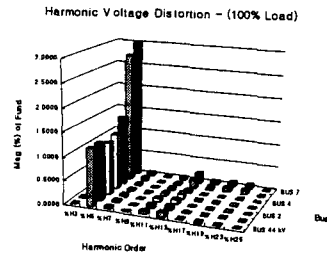


그림 7 7<sup>th</sup>고조파 필터 설치시 각 모선에서의 고조파 전압 (Case 1 - 100 % Load)

## 3. 결 론

본 논문에서는 고조파 발생원인 RECT 측의 부하변동(ASD - adjustable speed drive)에 따른 배전계통 내의 각 모선에서의 고조파 전압 왜곡을 살펴보고, 부하 변동 및 여러 가지 고조파 필터를 적용함으로써 고조파 저감을 나타내었다. RECT 측의 부하변동(ASD)과 필터 적용에 대하여 다음과 같은 결론을 정리하였다.

RECT 모선의 ASD 부하에 따른 고조파 전압 왜곡 현상의 변화가 있었는데, 100% Load인 경우 PCC에서의 THD는 5.9836의 값으로 IEEE 519 고조파 제한 기준 이상으로 나타났다. 이 경우 7<sup>th</sup>고조파 필터를 적용할 때 가장 효과적인 저감 효과를 나타냄을 알 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(03519) 주관으로 수행된 과제임.

### [참 고 문 헌]

- [1] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, H. Wayne Beaty, "Electrical Power Systems Quality", McGraw-Hill.
- [2] IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, "Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks, Part 1 & 2", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, pp. 452-474, 1996.
- [3] Mark F. McGranaghan, David R. Mueller, "Designing Harmonic Filters for Adjustable-Speed Drives to Comply with IEEE-519 Harmonic Limits", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 35, No. 2, March/April, pp.312-318, 1999.
- [4] James K. Phipps, et al, "Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 30, No. 2, March/April, pp. 476-484, 1994.