

배전계통에서의 SuperHarm을 이용한 고조파 분석 및 필터 설계에 관한 연구

이종포 · 이병길 · 김철환
성균관대학교

채영무
충주대학교

A Study on the Harmonic Analysis and Filter Design on Distribution System using SuperHarm

Jong-Po Lee · Byung-Guil Lee · Chul-Hwan Kim
Sungkyunkwan Univ.

Young-Moo Chae
Chungju Univ.

Abstract - 배전계통에서 전력전자 설비의 증가는 고조파 왜곡현상과 더불어 그로 인해 발생하는 계통 설비와 운용에 미치는 영향에 대한 관심의 증대를 가져오게 하였다. 그러므로, 최근에 고조파 연구는 전력계통의 분석과 설계에 있어 중요한 관점이 되고 있다. 고조파와 관련된 컴퓨터 시뮬레이션들은 전력계통에서 전압 왜곡현상을 나타내는 방법으로 사용되어져 왔으며, 많은 디지털 컴퓨터 프로그램들이 고조파 분석을 위해서 사용되고 있다. 주파수 스펙트럼 분석에 있어서, SuperHarm을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션은 다른 프로그램을 사용하는 것보다 효과적인 방법이다.

본 연구에서는 SuperHarm을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션으로 비선형 부하인 가변속 구동장치의 부하 변동에 따른 고조파 전압 분포를 살펴보고, 고조파 저감을 위해 필요한 최적의 고조파 필터를 설계하였다.

1. 서 론

전력계통에서 전력의 품질은 고유한 전원 전압과 주파수를 유지하는 것이다. 반면에, 외란은 정격전압의 크기와 주파수에서 변동, 왜곡 혹은 정현파 전압 파형의 이탈을 나타낸다. 배전계통은 설비회사와 수용가 뿐만 아니라, 수용가 선로들 또한 밀접하게 연결되어 있기 때문에 다양한 부하들의 영향을 받는다. 즉, 각각의 발생된 외란으로 영향을 미치기도 하고, 발생된 외란에 의해 영향을 받기도 한다[1].

이러한 외란 중에서도, 계통과 부하 사이에서 가장 빈번하게 발생하는 현상으로 고조파 현상이 있다. 전력계통에서 발생하는 주요한 고조파 원인은 비선형 부하, 비선형 리액터 등의 포화 설비, 아크로, 용접기 등의 아크 설비, adjustable speed drive, process controllers 등의 전력전자 설비가 있다. 특히, 최근 사용이 급증하고 있는 전력전자 설비들은 스위칭에 의한 제어특성으로 인해 전력계통에 많은 고조파를 주입시키고, 역률까지 저하시키는 문제점을 발생시키고 있다.

본 연구에서는 전력계통에서 비선형 부하로 인해 발생하는 고조파의 분석 및 영향을 살펴보는 데 유용한 SuperHarm을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 전력 전자 설비 중에서도 가변속 구동장치(adjustable speed drive) 측의 부하변동에 따른 PCC(point of common coupling)에서의 고조파 분석 및 저감을 위한 최적 필터를 제시하였다.

2. 고조파

2.1 고조파 이론

고조파는 비선형 부하 등 여러 가지 고조파 발생원과 연결될 때 발생되며, 고조파 전류로 인한 계통 리액턴스 전압강하로 인하여 심각한 전압 왜곡을 초래한다.

고조파 성분의 표시에 대표적으로 표현되는 기준으로는 THD(Total Harmonic Distortion)가 있다. THD는 왜곡된 파형에 대한 고조파 성분의 가장 효과적인

인 값을 나타내게 되는데, 식 (1)과 같이 표현된다[2].

$$THD = \frac{1}{M_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} M_h^2} \quad (1)$$

여기에서, M_h 는 M 의 크기를 가지는 h 차 고조파의 실효치이다. 그리고, 왜곡된 전압 및 전류에 대한 고조파 성분을 각각 THD_v , THD_i 로 나타낼 수 있다.

2.2 PCC (Point of Common Coupling)

PCC란 다른 수용자가 공급자로부터 연결된 위치를 말한다[3-4]. 일반적으로 PCC는 그림 1과 같이 수용가 변압기의 고압측이 되는 지점을 지시하지만, 그림 2와 같은 경우에는 다른 수용가로 연결되는 지점인 변압기의 저압측을 지시하기도 한다. 이러한 PCC에서는 IEEE 519 등과 같은 고조파 제한 기준이 적용되게 된다.

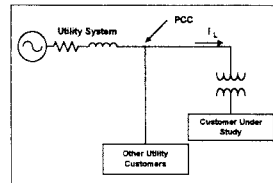


그림 1. PCC (수용가 변압기 고압측)

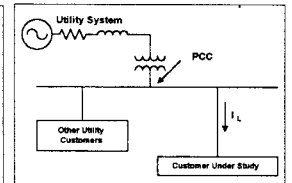


그림 2. PCC (수용가 변압기 저압측)

2.3 고조파 제한

전력계통에 유입되는 고조파를 억제하기 위한 관리 기준으로서는 IEC 555, ANSI/IEEE C57, IEEE 519 등이 있다.

위에서 언급한 고조파 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]. 즉, 전력 공급자는 전력계통 전반의 전압 품질에 책임이 있는 반면, 개별 전력 수용가들은 고조파 전류가 다른 수용가 또는 계통 내에 유입되지 않도록 해야 한다[5].

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_v , (%)
$V_n \leq 69$ [kV]	3.0	5.0
$69 < V_n \leq 161$ [kV]	1.5	2.5
$V_n > 161$ [kV]	1.0	1.5

3. SuperHarm

SuperHarm은 전력계통에서 비선형 부하로 인해 발생하는 고조파의 분석 및 영향을 살펴보는 데 매우 유용한 프로그램이다. 현재 전력계통에서 가장 널리 사용되고 있는 전력 계통 과도해석 프로그램으로는 Electromagnetic Transients Program(EMTP)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.

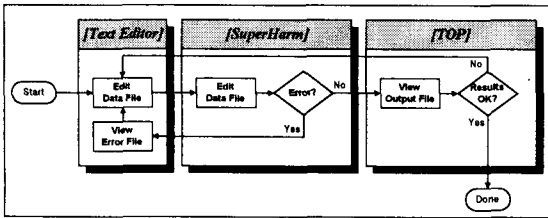


그림 3. SuperHarm 모의 과정

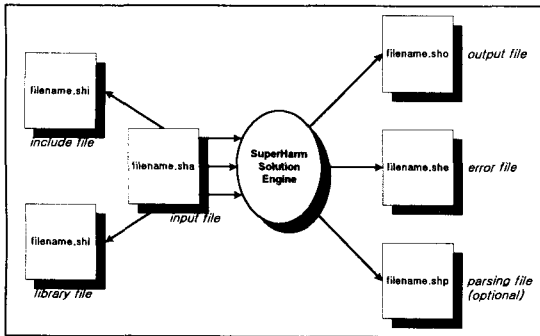


그림 4. SuperHarm 데이터 처리

그림 3과 그림 4에서는 각각 SuperHarm 프로그램에서의 모의 과정과 데이터 처리를 보여준다. 그림을 통해 알 수 있듯이 입력 파일은 include 파일과 library 파일을 subroutine으로 사용할 수 있고, 출력 파일은 TOP을 이용하여 주파수 스펙트럼으로 나타낸다. 한편, SuperHarm 프로그램에 있어서, 데이터 표현은 NONLINEARLOAD, BRANCH, MACHINE, VSOURCE 등의 라이브러리를 사용하고, 지시문으로는 #DEFINE/#UNDEF, #IF/#ELSEIF, Discard/Retain, SCAN, OPTIONS, #INCLUDE, #LIBRARY 등이 있다(6-7).

4. 모의 결과

4.1 배전계통 모델

그림 5는 본 논문에서 모의된 모델 배전계통도를 나타낸다. 69 kV의 전원을 가지는 이 모델은 69/13.8 kV, 13.8/0.48 kV, 13.8/0.44 kV의 강압용 변압기 및 역률 개선용 커패시터 뱅크, 여러 모션에서의 선형 부하로 구성되어 있다. 또한, bus 4에 위치한 전류원으로 표시되어 있는 고조파 발생원 ASD는 계통 내에 고

조파 전류를 유입시키고, 이에 따른 전압왜곡을 발생시킨다.

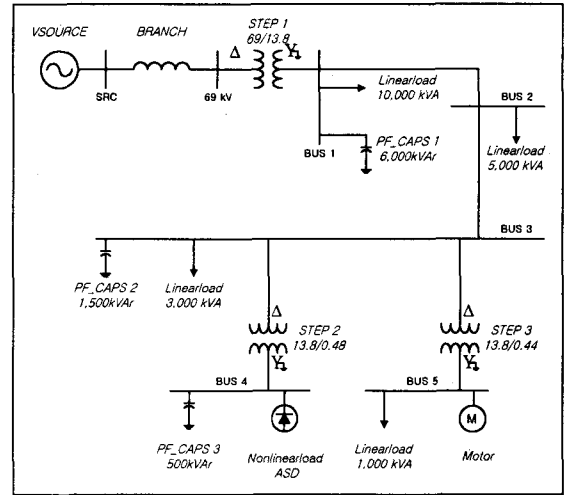


그림 5. 모의 배전계통도

4.2 ASD 측 부하변동에 따른 고조파 분석

고조파 발생원인 ASD 측의 부하가 변동함에 따라, 각 모션에서는 고조파 현상이 발생한다. 표 2는 ASD 측의 부하변동에 따른 각각 다른 모의 형태를 나타내었으며, 각각의 다른 모의 형태에 대하여 PCC에 나타나는 고조파 전압 왜곡 현상을 살펴보았다. 또한, 그림 5에서 제시된 모델 배전계통도에서 PCC는 bus 1이다.

표 2. 모의 형태

	ASD 측 부하 변동
모의 실험 1	100 % 부하
모의 실험 2	75 % 부하
모의 실험 3	50 % 부하

표 3에서는 ASD 측의 부하변동에 따른 각각의 모의 실험에 대한 PCC(bus 1)에서의 고조파 전압 성분을 나타내었으며, 부하가 감소함에 따라 PCC에서의 고조파 성분은 증가함을 볼 수 있다.

표 3. 부하변동에 따른 PCC에서의 고조파 성분

Case	Fund	% THD _r	H3	H5	H7	H9
모의 실험 1	7694.59	7.72819	6.50e-12	579.854	127.335	2.29e-11
모의 실험 2	7690.19	8.95261	1.10e-11	663.928	178.905	1.46e-11
모의 실험 3	7694.59	9.72337	1.00e-11	715.903	208.073	1.10e-11

그러나, 세 가지의 모의 실험 모두 THD가 IEEE 519 고조파 제한 기준인 5 %를 초과하였다. 따라서, IEEE 519 고조파 제한 기준인 5 %이내의 THD를 가지기 위해서는 고조파 필터가 필요함을 알 수 있다.

4.3 최적의 Filter 선정

앞 절을 통해서 PCC에서 IEEE 519 고조파 제한 기준인 5 % 이내의 THD를 가지기 위해서는 고조파 저감 기법이 필요함을 알 수 있었다. 본 연구에서는 그림 5의 모델 배전계통도에서 bus 4의 PF_CAP3를 대신하여 각각 5th, 7th, 11th, 13th 고조파 필터를 설치하였을 때를 비교함으로써 최적의 고조파 필터를 선정하였다.

각 고조파 필터의 구성은 bus 4의 전압이 66 kV이므로, 동조 필터 중에서도 R-L-C로 구성된 것이 아닌 L-C만으로 구성된 필터를 적용하였고, L, C의 값을 공진시키고자 하는 차수의 임피던스를 낮게 선정하여 고조파 전류가 필터 측으로 흐르도록 유도함으로써, 고조파 저감을 확인하였다.

그림 6에서는 100 % 부하일 경우에 대하여, 각 고조파 필터를 설치하였을 때와 필터를 설치하지 않았을 때, PCC인 bus 1 모선에서의 고조파 전압 왜곡 스펙트럼을 나타내었다.

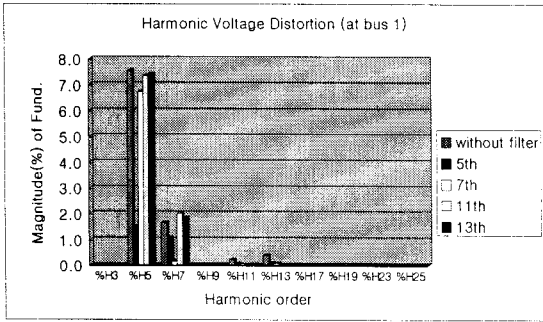


그림 6. PCC에서의 고조파 필터 설치 전과 각 고조파 필터 설치 후의 주파수 스펙트럼 (100 % 부하)

그림 6을 통해 알 수 있듯이 7th, 11th, 13th고조파 필터보다 5th 고조파 필터를 적용하였을 경우에 배전계통에서 고조파 저감 현상이 두드러지게 나타남을 알 수 있었다. 또한, 100 % 부하에서와 마찬가지로 5th 고조파 필터는 75 %, 50 %의 부하의 조건에서도 PCC에서의 THD가 각각 2.2855, 2.5567의 값으로 IEEE 519 고조파 제한 기준 이내의 값을 가진다.

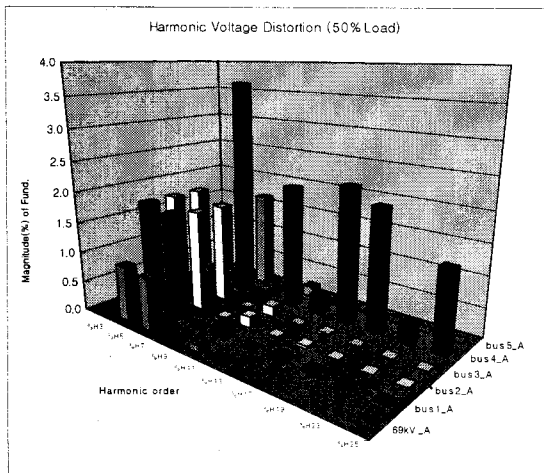


그림 7. 5th 고조파 필터 설치시 각 모선에서의 고조파 전압 (50% 부하)

그림 7에서는 50 % 부하의 경우에 대하여, 최적의 필터인 5th 고조파 필터를 적용하였을 때, 계통 내 각 모선에서 고조파 전압 왜곡에 대한 스펙트럼을 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에서는 고조파 발생원인 가변속 구동 장치 측의 부하변동에 따른 배전계통내의 각 모선에서의 고조파 전압 왜곡을 살펴보고, 여러 가지 고조파 필터를 적용함으로써 고조파 저감을 나타내었다. ASD 측의 부하변동과 필터 적용에 대하여 다음과 같은 결론을 정리하였다.

1. ASD 부하가 감소함에 따라, 배전계통내의 각 모선에서 고조파 전압 왜곡 현상인 THD는 증가하였다.
2. ASD 부하변동에 따른 고조파 전압 왜곡 현상의 변화가 있었지만, 부하변동의 모든 경우 PCC에서의 THD는 7.7282(100 % 부하), 8.9526(75 % 부하), 9.7234(50 % 부하)의 값으로 IEEE 519 고조파 제한 기준 이상으로 나타났다.
3. 5th, 7th, 11th, 13th 고조파 필터를 커패시터 뱅크를 대신하여 설치함에 따른 PCC에서의 THD 변화를 살펴보았다. 5th 고조파 필터 적용시 PCC에서의 THD는 부하변동의 경우에 따라 1.8426(100 % 부하), 2.2855(75 % 부하), 2.5567(50 % 부하)의 값으로 IEEE 519 고조파 제한 기준 이하로 나타났다. 즉, 5th 고조파 필터 적용시 가장 효과적인 저감 효과를 나타냄을 알 수 있다.

(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, John P. Nelson, Pankaj K. Sen, "Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 30, No. 2, March/April, pp. 476-484, 1994.
- [5] 고조파 저감기술 조사전문위원회, "고조파 저감기술 현황과 전망", 기술조사보고, 1993.
- [6] Electrotek, "SuperHarm User's Guide", 1998.
- [7] Electrotek, "TOP User's Guide", 1995.
- [8] Wilson E. Kazibwe, Musoke H. Sendaula, "Electric Power Quality Control Techniques", Van Nostrand Reinhold.
- [9] Wilsun Xu, Hermann W. Dommel, M. Brent Hughes, Gary W.K. Chang, Le Tan, "Modelling of Adjustable Speed Drives for Power System Harmonic Analysis", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 2, pp. 595-601, 1999.
- [10] IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, "Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No. 2, pp. 579-583, 1999.