

변전소 고조파 측정 및 분석에 관한 연구

한무호*, 박태준*, 이성희*, 이치환**

*포항산업과학연구원, **위덕대학교

A Study on Measurement and Analysis of Harmonics in Substation

Mu-Ho Han*, Tae-Joon Park*, Seung-Hee Lee*, Chi-Hwan Lee**

*RIST, **UIDUK Univ.

ABSTRACT

Nonlinear loads change the sinusoidal nature of the ac power current, thereby resulting in the flow of harmonic currents in the ac power system that can cause interference with communication circuits and other type of equipment. To minimize the damage, it is needed to limit harmonics current and voltage.

Harmonic measurement system was developed to measure individual voltage and current harmonic continuously and save harmonic data on computer. We measured all 154kV feeders in a steel making company substation. Voltage and current distortion limits for general transmission systems was suggested. We found some feeders exceeded current distortion limits. As result voltage harmonic exceeded standard limits.

1. 서론

대용량의 가변속 장치를 채용하고 있는 제철소에서는 고조파 발생의 문제가 근래 매우 중요한 문제로 대두되고 있다. 가변속 장치는 기본적으로 정류기를 포함하고 있고 교류를 직류로 변환하는 과정에서 다량의 고조파가 발생된다. 고조파 전류가 전원계통에 유입되면 기본적으로 급전선의 선로 임피던스에서 비정현적인 전압강하가 나타나고 이것이 전원계통상에서 전압의 왜형을 유발한다. 이러한 전압의 왜곡은 같은 선로에 접속되어 있는 인근 기기에 인가됨으로 여러 가지 장애를 일으킬 수 있다.^[1-3]

따라서 계통 내에서 발생하는 고조파를 억제하는 것은 전력시스템의 안정적인 운용에 매우 중요한 측면이라고 할 수 있다. 따라서 상황에 맞는 적절한 고조파 억제 대책을 세우기 위해서는 고조파 발생원의 특성을 파악하고 고조파 규제 목표치를 설정하여야 한다. 그 다음 단계로 고조파 억제를 위한 적절한 수단을 강구하여야 한다.

본 논문에서는 제철소 154kV 변전소의 전압 및 전류

고조파를 측정, 분석 및 제한치를 설정하였다. 먼저 여러 피더의 전압 및 전류 고조파를 실시간으로 측정하기 위해서 다채널 온라인 고조파 측정장치를 설계 및 제작하였다. 고조파 규제에 대한 IEEE기준을 이용하여 변전소 피더별 고조파 규제치를 설정하는 방법을 제안하였다. 제안된 규제치 설정 방법을 실제 변전소 피더별 전압 및 전류 고조파에 적용하여 고조파 상황을 분석하였다.

2. 고조파 발생원 및 규제치

2.1 고조파 발생원

본 논문은 제철소의 154kV 변전소를 대상으로 고조파를 측정 및 분석을 행하였다. 대상 변전소의 고조파 발생 부하로는 냉연 및 열연 공장의 다이오드 정류기, SCR 컨버터, 싸이클로컨버터 등이 있고 이러한 비선형 부하로부터 3, 5, 7, 11, 13차수의 전류 및 전압 고조파가 발생된다.^[4-7]

2.2 고조파 규제치

표 1 IEEE 전류고조파 규제치

Harmonic Current Limits for Non-Linear Load at the Point-of-Common-Coupling						
Maximum Odd Harmonic Current Distortion in % of Fundamental Harmonic Order						
I_{sc}/I_L	< 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	TDD
< 20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20 < 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50 < 100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100 < 1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
> 1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

IEEE 519 표준은 공통 접속점(PCC)에서의 고조파 전

압과 전류의 제한치를 설정하고 있다. 이 표준 이면의 기본 개념은 고조파 전류가 전력 계통으로 역류하여 다른 수용가에 영향을 미치는 것을 방지하고자 하는 데에 있다. 먼저 154kV 계통의 전압 고조파 규제치는 다음과 같다. 개별차수는 1.5% 미만, THD는 2.5%미만으로 규제되어야 한다. 전류 고조파의 제한치를 표 1에 나타내었다. 우수 고조파는 표에 나타난 기수 고조파 제한치의 25%를 적용한다. 단락전류 I_{sc} 와 월당 평균 부하전류 요구량의 최대치 I_L 의 비율로 정의되는 단락비가 작을수록 엄격한 제한이 적용되고 있다.^[2]

3. 고조파 측정장치 설계 및 제작

본 논문에서는 다채널 고조파 측정장치를 개발하여 사용하였다. 먼저 변전소에 있는 CTT 및 PTT의 신호에서 고조파 측정장치로 입력을 받기 위해 인터페이스 보드를 설계 및 제작하였다. 실제 고조파를 실시간으로 계산하기 위해 TMS320C32 DSP를 이용하여 전용 보드를 설계 및 제작하였다. 분석의 정도를 높이기 위하여 계인을 부하에 따라 자동으로 가변 가능하도록 하였다. Software PLL을 이용하여 전압 및 전류 신호를 동기시키고 3.8kHz 샘플링을 행하였다. DSP 보드에서 계산된 차수별 고조파는 RS485를 통하여 PC로 전송하여 10초 간격으로 저장하도록 하였다. 그림 1은 제작된 고조파 측정장치의 전체 외관을 나타낸다.

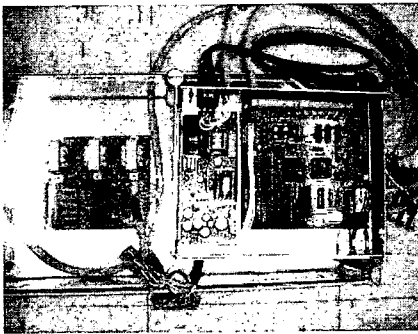


그림 1 고조파 측정장치

4. 154kV 변전소 피더별 고조파 규제치 설정 및 결과 분석

4.1 154kV 변전소 피더별 고조파 규제치 설정

변전소 피더별 고조파 규제치를 설정하기 위해서는 먼저 개별 피더의 공통 접속점(PCC)단에서의 단락전류 및 평균 부하전류를 구한 후 단락비를 구해야한다. 피더의 단락전류는 154kV 피더의 등가임피던스를 구하고 계통전압으로 나누어 구한다. 평균 부하전류는 부하가 정상적인 동작시 하루치 부하전류를 평균하여 구하였다. 변전소 피더의 등가회로를 그림 2에 나타내었다.

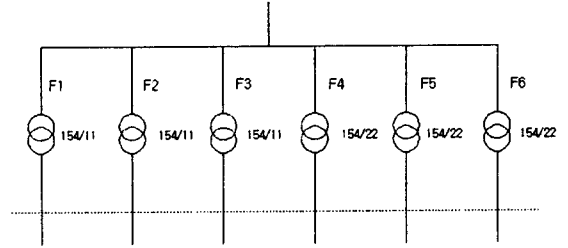


그림 2 변전소 피더 등가 회로

고조파를 측정하고자 하는 변전소 피더의 154kV 차단기 차단 내력 31.5kA이고 이를 통해서 고장 MVA를 구하는 공식을 식 (1)에 나타내었다.

$$\text{고장 MVA} = \sqrt{3} \times V \times I \quad (1)$$

10MVA 변압기를 기준으로 했을 때 등가 임피던스를 구하는 식이 (2)에 나타나 있다.

$$\% Z_{\text{전원}} = \left(\frac{100}{\text{고장 MVA}} \right) \text{기준 MVA} \quad (2)$$

다음으로 피더별로 설치된 154kV 변압기의 등가 임피던스를 구해야 한다. 등가 임피던스를 구하는 공식이 식 (3)에 나타나 있다.

$$\% Z_{TR10MVA} = \% Z_{TR\text{용량 MVA}} \frac{10MVA}{\text{용량 MVA}} \quad (3)$$

변전소 피더별 변압기 데이터를 표 2에 나타내었다.

표 2 변압기 데이터

피더명	사용전압 (kV)	용량 (MVA)	$Z_{TR\text{용량 MVA}}$	$\%Z_{TR10MVA}$
F1	154/11	35	9.51	2.7171
F2	154/11	35	9.43	2.6943
F3	154/11	35	9.61	2.7457
F4	154/22	80	7.79	0.9738
F5	154/22	80	7.85	0.9813
F6	154/22	80	7.88	0.985

따라서 전체 임피던스는 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\%Z = \%Z_{\text{전원}} + \%Z_{TR10MVA} \quad (4)$$

최종적으로 단락전류를 구하기 위해서는 PCC후단 측 3상 단락 고장 MVA를 구해야하며 계산식이 식 (5)에 나타나 있다. 최종적으로 154kV 피더로 유입되는 단락전류는 식 (6)를 이용하여 구한다.

$$\text{고장 MVA} = \frac{100}{\%Z} \text{기준 MVA} \quad (5)$$

$$I_{sc} = \frac{\text{고장 MVA}}{\sqrt{3} \times \text{계통전압}} \quad (6)$$

표 3 피더별 전류 고조파 규제치

피더명	Isc (A)	IL (A)	Isc/IL	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h
F1	1379	65	21.2	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25
F2	1390	42	33	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25
F3	1364	60	22.7	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25
F4	3850	150	25.6	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25
F5	3820	70	54.5	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35
F6	3805	160	23.8	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25

변전소 피더별로 계산한 단락전류, 전류고조파 측정결과로부터 얻은 부하전류, 고조파 제한의 기준이 되는 단락 비율 및 전류 고조파 제한치를 표 3에 나타내었다.

4.2 고조파 측정 결과 분석

154kV 변전소를 1달간 측정하여 부하운전 상태 및 고조파 추이를 관찰해본 결과 일별로 거의 동일한 추이를 나타내므로 대표적인 날을 선택해서 분석을 행하였다. 전압 고조파 하루치 그래프를 그림 3에 나타내었다. 그림 4는 고조파 발생량이 많은 2시간을 확대해서 그린 그림이다. 전압 고조파는 대체로 3차 및 11차 위주로 발생했으며 3차 고조파는 변압기의 델타 권선에서 일부 흡수되므로 발생량이 적고 11차 고조파의 발생량이 많았다. 제안된 규제치로부터 개별 전압 고조파는 1.5% 미만으로 제한되어야 하고 전체 THD는 2.5%미만으로 규제되어야 한다. 그림에서 알 수 있듯이 11차 고조파는 1.5%를 초과하는 구간이 많음을 알 수 있다. 이는 결국 개별 피더에서 발생하는 과도한 고조파 전류에 기인한 것으로 근본적으로 고조파 전류를 감소시켜 전압 고조파의 량을 감소시켜야 한다. F6 피더의 기본파 부하전류를 그림 5에 나타내었다. F6 피더의 24시간 전류 고조파 측정 결과를 그림 6에 나타내었다. 2시간 전류 고조파 측정 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 부하의 기동시 과도한 고조파가 발생되나 짧은 구간에서는 문제가 되진 않고 평균치가 중요하다. 표 4에 전류 및 전압 고조파 평균치 값을 정리하였다. 11차 고조파가 많이 발생되고 그 이외차수의 고조파는 미미한 것으로 측정되었다. 고조파 규제치를 초과하는 대표적인 피더를 보면 F1, F2, F6를 들 수 있다. 이들 피더의 초과된 11차 전류 고조파로 인해 모선단에서의 과도한 11차 전압 고조파가 발생되고 있다. 모선에서의 하루 평균 전압 고조파는 조업하지 않은 구간도 포함하므로 전반적으로 작은 값으로 나오나 실지로는 그림 3에서 알 수 있듯이 규제치를 초과하는 구간이 존재한다. 따라서 향후 F1, F2 및 F6 피더에는 11차 동조필터를 설치하여 전류 고조파를 규제치 이하로 제어하는 방안을 강구하여야 한다.

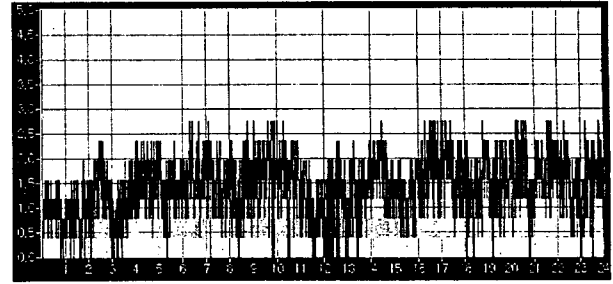


그림 3 24시간 전압 고조파 측정 그래프

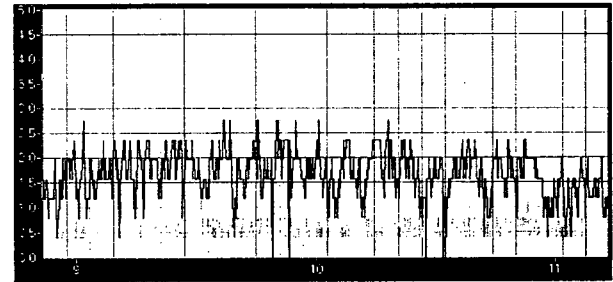


그림 4 2시간 전압 고조파 측정 그래프

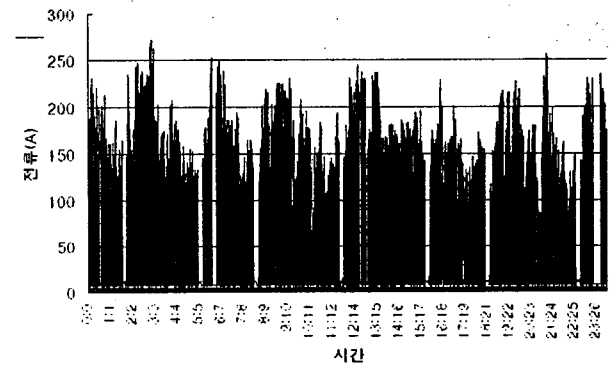


그림 5 24시간 기본파 부하전류 그래프

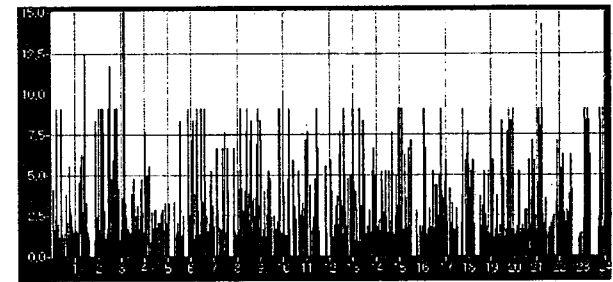


그림 6 24시간 전류 고조파 측정 그래프

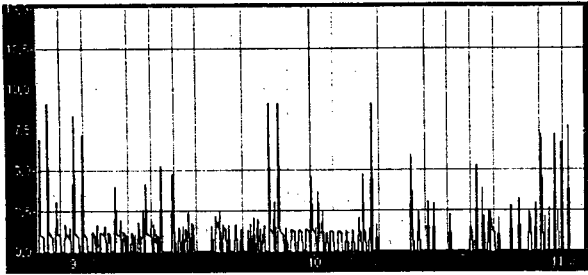


그림 7 2시간 전류 고조파 측정 그래프

표 4 피더별 전압 및 전류 고조파 평균치

피더명	전류 고조파 결과 (24시간 평균)	전압 고조파 결과 (24시간 평균)
F1	11차 : 1.87	3차 : 0.47 11차 : 1.36 THD : 1.54
F2	11차 : 3.11	
F3	11차 : 0.6	
F4	11차 : 0.3	
F5	11차 : 0.15	
F6	11차 : 1.9	

기본적으로 공통접속점(PCC)을 중심으로 각 피더별로 전류 고조파를 측정된 결과 F1, F2 및 F6피더의 11차 고조파가 제안된 고조파 규제치를 초과한다. 3차분 고조파 전류는 우려할 수준이 아니나 11차 고조파는 규제치인 1.75%이하로 규제해야한다.

5. 결 론

본 논문에서는 제철소 154kV 변전소의 피더별 전압 및 전류 고조파의 측정 및 분석에 대하여 다루었다. 먼저 변전소와 같은 여러 피더를 가진 산업체에서 사용할 수 있는 DSP를 이용한 120채널 온 라인 고조파 측정 장치를 개발하였다. 개발된 고조파 측정장치를 이용하여 154kV 변전소의 6개 피더를 동시간대로 측정하고 고조파 결과를 분석하여 제안한 고조파 규제치의 타당성을 검증하였다.

고조파를 규제하기 위해서 합리적인 규제치 설정이 선행되어야 하고 이를 위해서 PCC(공통 접속점)에서 단락비 개념을 도입하여 변전소 피더별 고조파 규제치 설정 방안을 제안하였다. 변전소의 고조파를 측정된 결과 전류 고조파가 규제치를 초과하는 피더를 찾을 수 있었으며 이들 규제치를 초과한 고조파 전류에 의해 고조파 전압 역시 일부 구간에서 규제치를 초과함을 알 수 있었다. 따라서 규제치를 초과하는 피더의 전류 고조파를 규제하여 궁극적으로 전압 고조파를 규제치 이내로 제한하여야한다.

향후 전류 고조파 규제치를 초과하는 피더에 고조파

규제 방안을 수립하여 전압 고조파를 규제하는 연구를 계속할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] N.G. Hingorani, "Power Electronics in Electric Utilities : Role of Power Electronics in Future Power System," Proceedings of the IEEE, Vol. 76, No. 4, pp. 481~482, 1988, April.
- [2] IEEE Std 519-1992 (Revision of IEEE Std 519-1981) IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems(ANSI)
- [3] IEEE Std 518-1982 (Reaff 1992), IEEE Guide for the Installation of Electrical Equipment to Minimize Noise Inputs to Controllers From External Sources(ANSI).
- [4] Arrillaga, J., Bradley, D.A., and Bodger, P.S., Power System Harmonics. New York: John Wiley & Sons, Wiley Interscience, 1985.
- [5] Baggot, A. J., "The Effects of Wave shape Distortion on the Measurement of Energy by Tariff Meters," International Conference on Sources and Effects of Power System Disturbances, London, England, Apr. 22-24, 1974, pp. 261~267.
- [6] Read, J. C., "The Calculation of Rectifier and Converter Performance Characteristics," Journal of the IEE, vol. 92, pt, II 1945, pp. 495~509.
- [7] Mohan, Undeland, Robbins " Power Electronics," John Wiley & Sons, Inc. 1989