

배전선로에서의 비선형부하에 따른 중성선 고조파 분석

왕태희, 김현수, 이상봉, 김철환
성균관대학교

Analysis of Neutral Harmonic Currents according to Non-linear Loads in Distribution Lines

Tae-Hee Wang, Hyoun-Su Kim, Sang-Bong Rhee, Chul-Hwan Kim
Sungkyunkwan University

Abstract - In this paper, the THD(Total Harmonic Distortion) in distribution systems according to the ratio of non-linear loads was calculated and analyzed. The PCC(Point of Common Coupling) is selected to analyze THD of a 3-phase current and a neutral current.

1. 서론

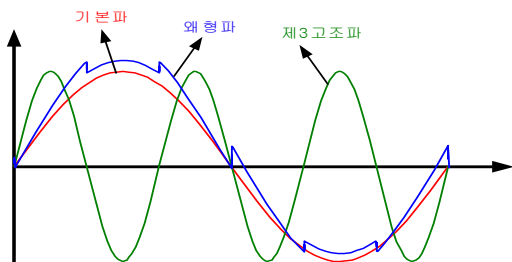
최근 전기기기에서는 효율을 향상시키기 위해서 전력전자 소자와 같은 비선형부하를 사용하는 일이 급증하고 있다. 이와 같은 비선형부하는 전력계통의 전기품질을 저하시키는 고조파 발생의 주요한 원인이 되고 있다. 전력 계통에서의 고조파 영향에 대비하기 위해 이미 배전계통의 고조파 전압 계획레벨 및 고조파 유출 전류 제한치를 제정하여 이를 기반으로 전체 전력계통의 체계적인 전기품질 관리가 이루어지고 있다. 그러나 이와 같은 배전계통 고조파 관리기준의 세부적인 제정을 위해서는 고조파 수준, 배전계통의 특성, 고조파 발생원의 분포, 부하의 형태 등 많은 사항을 고려해야 하기 때문에 합리적인 고조파 관리기준을 제정하는 것은 쉽지 않은 일이다[1].

우리 나라가 채용하고 있는 3상 4선식의 배전 계통에서 중성선에는 과다한 고조파의 영향이 발생한다. 특히, 전력변환기인 컨버터는 고조파 전류의 발생원으로서 전원에서부터 부하단까지의 부하 임피던스에 의한 전압강하를 일으키고 전압파형의 일그러짐 현상으로 각종 계전기의 오동작, 정밀 전자기기의 손상, 전동기의 과열 및 손상의 원인이 될 수 있다. 본 논문에서는 배전계통에서 비선형부하의 비율에 따른 3상 전류의 왜형률과 중성선 전류의 왜형률을 비교, 분석하였다.

2. 고조파

2.1 고조파의 정의 및 영향

공급계통의 정현파 전압을 비선형부하에 인가하면 정현파의 전원전압은 왜형파가 된다. 이러한 주기성을 갖는 왜형파는 기본주파수와 정수배 주파수 성분으로 분해하여 해석할 수 있으며 이 정수배 성분을 고조파라 한다. 일반적으로 왜형파는 그림 1과 같이 기본파와 고조파로 분해할 수 있다.



〈그림 1〉 고조파 분해 및 합성원리

고조파 평가 기준은 종합왜형률(THD: Total Harmonic Distortion)로 나타낼 수 있다. 왜곡된 파형에 대한 고조파 성분을 나타내는 식 (1), (2)와 같이 표현된다. 본 논문에서는 I_{THD} 의 계산식을 이용하였다[2].

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

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

여기서, V_1, I_1 : 기본파(60Hz)의 전압, 전류
 V_n, I_n : 각 차수별 고조파 전압, 전류

고조파가 기기에 미치는 영향은 표 1과 같이 분류할 수 있다.

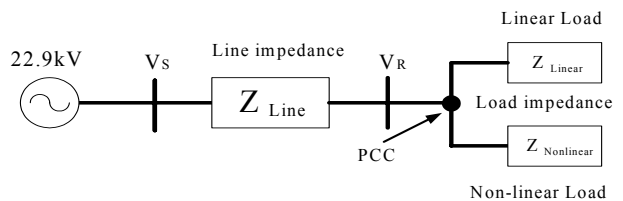
〈표 1〉 기기별 고조파 영향

기기명	영향
변압기	철손, 동손의 증가와 함께 용량 감소 철심의 자화현상으로 소음 발생, 손실 증가
보호계전기	설정레벨의 초과 또는 위상 변화에 따른 오동작 각종 계기오차 증대
케이블	고조파 전류에 의해 과열
유도전동기	정상 진동 토크 발생에 의해 회전수의 주기적 변동 철손, 동손 등의 손실 증가
배전용차단기	오동작 발생
통신선	전자유도에 의해 잡음 발생 및 유도전압 증가

3. 사례 연구

3.1 배전 계통 및 컨버터 모델링

그림 2는 사례연구를 위한 적용한 모의시험 배전계통도이다. 배전선로의 고조파 특성을 해석하기 위하여 공통결합점 PCC(Point of Common Coupling)를 선택하였다. 그림에서 보듯이 PCC는 서로 다른 부하들이 선로 상에서 공통 접속되는 지점을 뜻하고 고조파 전압, 전류 왜형률을 분석하는데 기준이 된다[3].



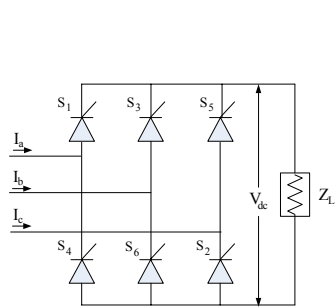
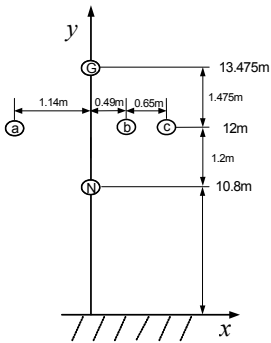
〈그림 2〉 모의시험 배전계통도

그림 3은 사례연구에 적용한 가공 배전선로의 1단 장주도이다. 배전선로의 고조파 분석을 위해 중성선이 물리적으로 구현되는 EMTP 내의 LCC(Line & Cable Constants) 소자를 사용하였다. 여기서 선종의 제원은 표 2와 같고, 선로 길이는 1 [km], 주파수는 60 [Hz], 대지고유저항은 100 [$\Omega \cdot m$]을 적용하였다[4].

〈표 2〉 가공배전선로 선종의 제원

구분	선종	반경	직류저항
가공 지선	ACSR 32 [mm^2]	0.39 [cm]	0.898 [Ω/km]
전력선	ACSR 160 [mm^2]	0.91 [cm]	0.182 [Ω/km]
중성선	ACSR 95 [mm^2]	0.675 [cm]	0.301 [Ω/km]

그림 2에서 계통에 투입된 비선형부하의 모델링은 그림 4와 같고, 일반적으로 고조파 분석을 위해 많이 적용하는 3상 컨버터를 사용하였다. 3상 컨버터 모델링은 EMTP 내의 프로그래밍 언어인 MODELS를 이용해 6개의 TACS switch 소자를 제어하도록 하였고, 스위칭 소자의 점호각은 60°이다[5].



〈그림 3〉 가공 배전선로 장주도

〈그림 4〉 3상 전파 컨버터 모델링

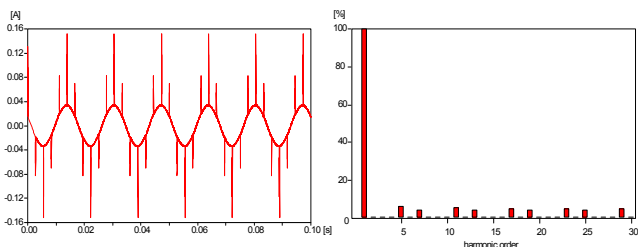
3.2 사례 연구 결과

사례 연구를 위해 표 3과 같이 선형 부하 조건과 비선형 부하 조건을 적용하였다. 모의 계통에서 선형부하와 비선형부하의 합을 3000[kW]로 적용하였고 비선형 부하는 Case 1의 경우 부하의 5%, Case 2의 경우 부하의 10%, Case 3의 경우 부하의 20%를 적용해서 고조파에 대한 상전류의 THD와 중성선 전류의 THD 결과를 서로 비교하였다.

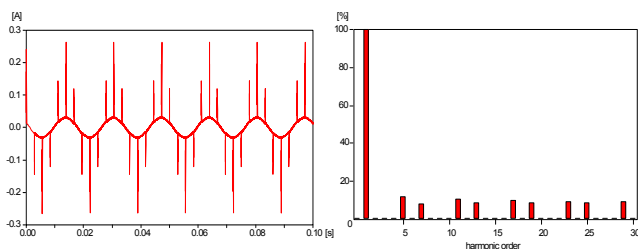
〈표 3〉 평형 부하 조건의 사례 연구 결과

	Case 1	Case 2	Case 3
선형 부하 [kW]	2850	2700	2400
비선형 부하 [kW]	150	300	600

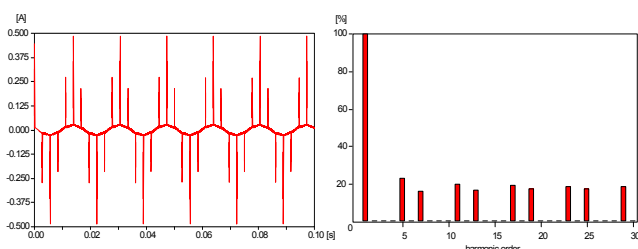
그림 5, 6, 7은 고조파 중성선 전류 파형과 고조파 분석이다. 사례연구 결과 계통에서 비선형부하가 증가함에 따라 중성선 전류의 왜곡이 심해짐을 알 수 있다.



〈그림 5〉 고조파 중성선 전류 파형과 왜형을 분석(Case 1)



〈그림 6〉 고조파 중성선 전류 파형과 왜형을 분석(Case 2)



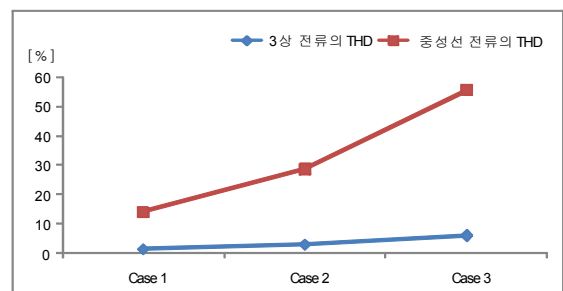
〈그림 7〉 고조파 중성선 전류 파형과 왜형을 분석(Case 3)

표 4는 3상 전류와 중성선 전류의 고조파 차수에 따른 왜형율을 비교하였다. 여기서, 30th 고조파 차수까지 모의하였으며 짝수 차수는 왜형율이 적어 홀수 차수만 나타내었다. 표에서 P는 3상 전류의 왜형율이고 N는 중성선 전류의 왜형율이다.

〈표 4〉 3상 전류와 중성선 전류의 왜형율 비교

Harmonic order	Case 1		Case 2		Case 3	
	P	N	P	N	P	N
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%
3	0.003%	0.008%	0.004%	0.011%	0.006%	0.016%
5	1.173%	5.753%	2.336%	11.46%	4.631%	22.722%
7	0.586%	4.067%	1.166%	8.093%	2.308%	16.023%
9	0.001%	0.009%	0.002%	0.017%	0.003%	0.033%
11	0.470%	5.049%	0.935%	10.06%	1.855%	19.983%
13	0.334%	4.291%	0.665%	8.541%	1.316%	16.915%
17	0.294%	4.840%	0.585%	9.658%	1.161%	19.216%
19	0.234%	4.336%	0.465%	8.674%	0.919%	17.194%
21	0.001%	0.071%	0.001%	0.035%	0.003%	0.073%
23	0.214%	4.711%	0.426%	9.413%	0.846%	18.775%
25	0.180%	4.363%	0.357%	8.696%	0.705%	17.26%
27	0.001%	0.022%	0.001%	0.044%	0.003%	0.093%
29	0.168%	4.603%	0.335%	9.211%	0.665%	18.429%
THD	1.52%	14.09%	3.02%	28.08%	5.98%	55.80%

그림 8은 3상 전류와 중성선 전류의 THD를 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 고조파의 영향으로 인해 중성선 전류의 THD가 크게 증가함을 확인할 수 있다.



〈그림 8〉 고조파 3상 전류와 중성선 전류의 THD 비교

4. 결 론

본 논문에서는 배전 계통에서의 고조파로 인한 3상 전류와 중성선 전류의 왜형율을 분석하였다. 사례연구 결과는 다음과 같다. 비선형 부하의 증가에 따라 3상 전류와 중성선 전류의 왜형율이 증가함을 알 수 있었다. 이러한 고조파 문제해결은 기기 제조자, 전력 수용가, 전력회사의 상호 협력하에 종합적인 관리가 필요하며, 수용가측에서의 고조파 전류의 흐름 억제 및 대책이 필요하다. 보다 효과적인 고조파 대책과 고조파에 의한 각 전력설비의 영향 분석을 위해서는 지속적인 체계적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] 이해기, "고조파 장애의 진상에 관한 연구", 한국안전학회지, 제13권, 제4호, pp.162-171, 1998.
- [2] 대한전기학회편, "최신 배전 시스템 공학", 북스힐, 2006.
- [3] IEEE std.519, "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", 1992.
- [4] 성노규, 이명희, 이유진, 박건우, 이상봉, 김철환, "EMTP를 이용한 3상 converter의 점호각 변화에 따른 실 계통 영향 분석", 대한전기학회 전력기술분회 추계학술대회 논문집, pp.142-144, 2007.
- [5] 푸준, 박건우, 김철환, "배전계통에서 수동필터를 이용한 고조파저감에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2007.