

PTW를 이용한 수변전 계통의 고조파 분석 및 저감에 관한 연구

남상현* · 이의용 · 김용래 · 설용태 · 최중문
호서대학교 전기공학과

A study on the Distribution systems of
Harmonics Analysis and reduction using of PTW

Snag-Hyun Nam* · Eui-Yong Lee · Eung-Rae Kim · Yong-Tae Sul · Jong-Moon Choi
Dept.of Electrical Eng. Hoseo University

Abstract

This paper describes how computer simulations can be used to predict harmonic problems before they occur, and evaluate corrective alternatives prior to implementation. PTW(Power Tools for Windows) is used for simulations to the real model system. Harmonic load flow studies, voltage/current distortion levels, harmonic frequency scans and filter selection method are analysed through detailed power system simulation.

1. 서 론

전력계통에서는 변압기와 회전기의 자기포화현상, 아크로와 같은 비선형기기, 사이리스터 위상제어에 의한 전력조정기 및 정류기와 같은 전력 변환기 등에 의해서 고조파가 발생한다. 이러한 고조파는 전원파형의 왜곡화, 고조파 전류에 의한 잡음과 유도장해 등으로 전기기에 진동, 수명과 성능저하는 물론 보호계전기의 오동작 등을 유발 할 수 있다. 최근에는 전력전자 기술의 발전으로 반도체 스위칭 소자의 사용과 비선형 부하가 증가하고 있어 고조파 장애로 인한 전기의 품질에 대한 관심과 중요성이 높아지고 있다. 기존의 고조파 분석방법은 EMTF, EDSA, MATLAB 등을 이용하여 고조파에 대한 대책을 기술하거나 모의 실험을 통한 고조파 발생량을 측정하고, 각종 필터를 설치하여 고조파를 상쇄하였다. 그러나 필터용량에 대한 설명 미비와 잘못된 필터용량 산출로 인한 계통의 악영향에 대한 설명 및 역할 개선용으로 많이 사용되고 있는 커패시터 बैं크와 수동필터의 특성 분석이 미비하였다.

본 연구에서는 수변전 계통에서 발생할 수 있는 고조파 현상과 필터보상을 PTW(Power Tools for Windows)의 Hi-wave를 이용하여 다양한 형태로 시뮬레이션하였다. 아크로, SCR 등과 같은 고조파 발생원들의 고조파 크기와 고조파 조류계산을 통한 각 모선에서의 전압/전류의 왜형률 등과 필터용량에 따른 선로의 용량성과 유도성 특성, 커패시터 बैं크와 수동필터의 특성 등을 실제 운용중인 공장모델을 대상으로 분석하였다.

2. 고조파 분석과 필터설계

PTW를 이용한 고조파 분석방법은 조류계산과 고장 계산 등의 시스템해석을 실행 후 고조파를 분석 할 수 있다. 고조파 분석을 위해서는 계통의 임피던스 값을 정확히 계산하여야 한다. 그림 1은 선로의 케이블 입력 데이터를 나타낸 것이다.

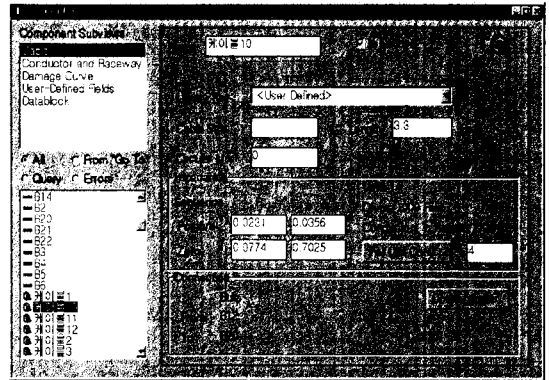


그림 1 입력 데이터 화면

수동필터는 단일 동조 필터와 2차형 고차 필터, 커패시터 बैं크로 나눌 수가 있다. 그림 2는 단일 동조 필터와 2차형 고차 필터를 나타낸 것이다. 단일 동조 필터는 단일의 고조파 흡수에 적용되고 동조주파수에서 작은 임피던스가 된다. 2차형 고차 필터는 복수의 고조파 흡수에 적용되고 넓은 주파수 범위에서 작은 임피던스로 된다. 동조 주파수에서의 필터 임피던스는 단일 동조형에 비해 커지기 때문에 발생량이 비교적 큰 저차(제5차~제13차)에서는 전압변형을 작게 할 수 없고 상용 주파수(기본파)에서의 저항 손실을 작게 하기 위해서는 동조 주파수를 높게 해야 하기 때문에 저차의 단일 동조 필터와 조합하여 사용할 수 있다.

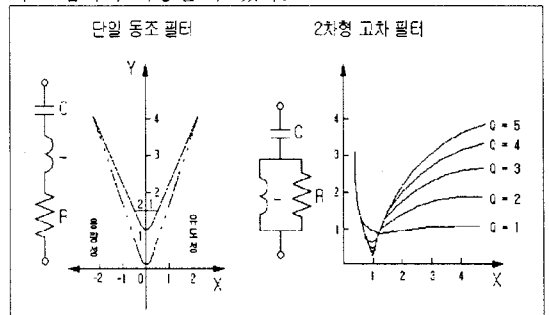


그림 2 단일 동조필터와 2차형 고차필터

본 논문에서는 고조파 저감에 일반적으로 많이 사용되고 있는 단일 동조 필터를 이용하여 고조파를 저감하였다. 수동필터는 L-C의 공진현상을 이용한 것으로 식(1)과 같이 표현된다.

$$n X_L - \frac{X_C}{n} = 0 \tag{1}$$

n : 특정 고조파 차수

n차 고조파 전류는 대부분 흡수되고, 유출전류를 저감시킨다. 수동 필터의 용량은 역률을 이용하여 산출하는데 역률이 높은 부하에 대해서는 수동 필터가 아닌 능동 필터나 변환기의 다펄스화를 이용하며, 부하의 임피던스가 급변하는 경우에도 능동 필터를 사용한다. 필터의 용량(kVAR)은 다음 식에 의하여 구할 수 있다.

$$kVAR = (Q_1 - Q_2) \times \frac{1}{n^2} \quad (2)$$

여기서

Q₁ : 개선 전 무효전력

Q₂ : 개선 후 무효전력

n : 특정 고조파 차수

수동필터는 특정 고조파만을 상쇄하기 때문에 부하에 두가지 이상의 고조파 발생 시에는 수동필터를 병렬로 연결하고 용량은 각 고조파의 발생 크기에 비례하여 산출한다.

3. 사례 연구 및 분석

모델계통은 그림 3과 같은 수전용량 4,500(kVA), 전압 22.9(kV)의 실제 운용중인 공장의 수전설비도의 일부분을 선정하였다. 부하는 전동부하, 아크로, SCR사용 부하, 유도전동기 등으로 다양하게 구성되어 있고, 이때 각각의 부하에 발생하는 고조파의 크기와 무효전력의 크기를 비교하여 각 부하에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 여러 고조파 발생원에 따른 고조파 전압강화, 고조파 왜형률 등의 크기를 비교 분석하였다. 분석 후 여러 가지의 고조파 대책 중에서 수동필터를 이용하여 가장 적합한 필터용량을 선정하여 고조파를 저감시켰다. 또한 각각의 부하 역률 변화 때 고조파 크기와 무효전력, 전압강화 등의 변화량에 따른 전기적 특성을 분석 하였다.

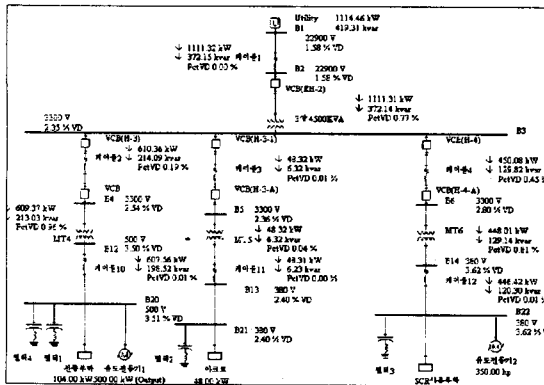


그림 3 공장의 수전계통도

그림 3의 필터 1은 3차 고조파를 저감하기 위한 필터로써 용량은 100(kVAR)이고, 필터 2, 3, 4는 5차 고조파 저감용으로 용량은 30(kVAR), 220(kVAR), 154.5(kVAR)이다. 2차형 고차필터는 13차 이상의 고조파의 발생량이 규정치 이상일 때 사용하지만 본 논문에서는 13차 이상에서는 고조파 발생량이 적어 2차형 고차필터를 사용하지 않았다. 표 1은 각 부하의 고조파 발생원에 따른 차수별 고조파 전압의 크기를 비교하였다. 여러 가지 고조파 발생원들 중에서 특정 고조파가 그에 따라 상이하게 발생하는 것을 알 수 있다. 특히 아크로의 고조파 발생은 5차 고조파만이 IEEE 규정인 3(%)를 초과하는 것을 알 수 있고, AC Drive의 경우는 5차 고조파가 아주 많이 발생하는 것을 알 수 있다.

표 1 고조파 발생원에 따른 전압 고조파의 크기

차수	5차	7차	11차
IEEE 12pulse	0.51	1.87	4.5
ARC Furnace	3.27	0.96	1.12
AC Drive	104	2	2.11
6Pulse SCR	23	10	9
DC Drive	21.89	12.18	9.07
6Pulse IGBT	44	24	7

(단위 : (%))

표 2 유도성 회로와 용량성 회로

모선	전압 변동률(%)		무효전력(kVAR)		전류(A)	
	유도성	용량성	유도성	용량성	유도성	용량성
모선 4	2.54	-0.87	214.09	420.92	115.88	130.88
모선 12	3.50	-2.05	213.03	430.63	115.88	130.88
모선 20	3.51	-2.05	198.52	449.14	764.84	863.84
모선 5	2.36	-0.89	6.32	7.01	8.73	8.42
모선 6	2.80	-0.47	129.82	134.72	83.92	84.48

표 2는 필터 설치 후 유도성 회로와 용량성 회로의 특성을 비교한 것이다. 필터 설계 시 주의할 점은 유도성 회로를 유지하여야 하며 만일 계통이 진상회로가 되면 고조파가 확대될 수 있다. 그림 3에서 전동과 유도전동기 부하가 필터 1과 4의 용량이 150(kVAR), 210(kVAR)이 되면 용량성 회로가 된다. 용량성 회로가 되면 계통에서 왜란 현상이 발생, 수전단의 전압이 송전단 전압보다 높아짐으로써 사용 기기에 손상과 병렬 공진 시 위험도가 유도성 회로일 때보다 아주 높아지게 된다. 따라서 무효전력과 전류가 증가하게 되므로 계통 전체로 파급되어 막대한 악영향을 미치게 된다.

표 3 커패시터 뱅크 사용 시 고조파 변화

고 조 파	모선 12		모선 20	
	커패시터뱅크 설치 전	커패시터뱅크 설치 후	커패시터뱅크 설치 전	커패시터뱅크 설치 후
3차	79.68	3.12	71.13	3.18
5차	23.59	50.01	23.64	50.09
7차	1.21	18.08	1.10	18.11

(단위 : (%))

표 3은 고조파 저감을 위해서 단일 동조필터를 설치하지 않고, 역률 0.8에서 0.95로 보상하기 위해 용량 261.65(kVAR)의 커패시터 뱅크를 모선 20에 설치한 결과, 역률은 보상하였지만 고조파 크기를 감소시키지는 못하였다. 모선 12에서는 3차 고조파의 전압 왜형률은 감소시켰지만 나머지 5차, 7차 고조파에 대해서는 감소시키지 못하고 증가되었다. 표 3에서 보인바와 같이 커패시터 뱅크는 단순히 역률개선 효과만 있었지만 단일 동조필터는 역률개선 및 고조파까지 저감할 수 있다는 사실을 알 수 있다. 따라서 일반적인 수전설비에서는 주로 역률 보상 목적으로 커패시터 뱅크를 설치 운용하고 있으나 역률 개선 및 고조파 저감대책으로서 커패시터 뱅크보다는 필터를 설치 운용하는 것이 계통에 보다 효과적이다.

표 4 모선의 전압 왜형률

전압왜형률[%]	모선4	모선5	모선6	모선20	모선21	모선22
필터 부착 전	32.1	33.5	37.8	22.0	9.4	15.3
필터 부착 후	1.98	1.83	1.83	4.53	1.73	2.93

표 4는 각 모선에서의 차수별 고조파 전압의 크기와 필터의 설치에 따른 경감의 정도를 보여준다.

표 5 각 모선에서의 차수별 고조파 전압의 크기

전압	모선20		모선21		모선 22	
	설치 전	설치 후	설치 전	설치 후	설치 전	설치 후
3차	235.1	1.89	0.096	0.11	0.01	0.01
5차	151	15.38	70.559	3.42	81.76	5.18
7차	4.55	3.01	2.464	1.44	3.76	2.32
11차	3.88	2.765	2.883	2.75	6.26	5.27

(단위 : [V])

표 5는 각 모선에서의 고조파 중 발생량이 많은 3차, 5차, 7차, 11차 고조파 전압의 크기를 나타냈다. 모선 20의 경우는 3차와 5차 고조파가 아주 많이 발생을 하는데 3차 고조파는 전동부하에서, 5차는 유도전동기부하에서 발생한다는 것을 표 5으로부터 알 수가 있다.

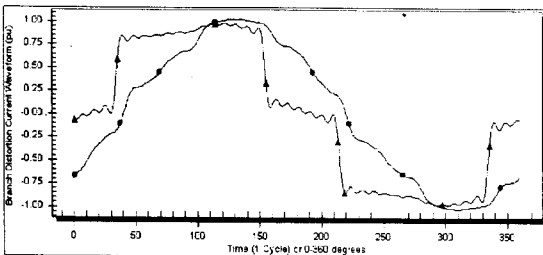
표 6 케이블에서의 고조파 전류의 크기

차수	케이블 10		케이블 11		케이블 12	
	부착 전	부착 후	부착 전	부착 후	부착 전	부착 후
5차	82.28	20.36	43.69	2.61	31.82	29.9
7차	15.26	8.82	2.41	1.04	10.50	8.34
11차	6.12	2.13	0.9	0.2	10.52	1.37

(단위 : [A])

표 6은 필터 설치 전과 후 케이블의 차수별 고조파 전류의 크기를 나타낸 것이다. 국내에는 아직 고조파 전류에 대한 기준치는 없지만, 일본 「고조파 억제대책 Guide Line」 규정인 5차는 1[kW]당 3.5[mA], 7차는 2.5[mA], 11차는 1.6[mA]보다 적음을 알 수 있다. 케이블에서는 전체적으로 5차 고조파의 발생량이 많을 것을 알 수 있다.

그림 3은 모선 20의 전압 고조파 파형 찌그러짐 정도를 나타낸 그래프이다. 필터 설치 전의 파형은 심하게 찌그러짐을 볼 수 있고, 필터 설치 후는 거의 정현파에 가까운 모습을 알 수 있다.



● 필터 설치 후 ▲ 필터 설치 전

그림 3 모선의 고조파 파형 그래프

4. 결 론

본 연구에서는 PTW를 이용한 고조파현상 등을 실계에 대한 시뮬레이션을 통해서 다양하게 분석하였다. 고조파 조류계산으로 부하, 모선은 물론 계통내의 여러 지점에서의 전압/전류의 왜형률 등을 알 수 있었으며, 필터용량에 따른 선로의 용량성과 유도성에 대한 분석도 가능했다. 또한 단일 동조필터와 커패시터 뱅크의 특징에 대하여 분석하였고, 단지 역률개선용인 커패시터 뱅크를 설치하기 보다 필터를 설치하여 전기의 품질을 높여야 할 것이다. 필터 부착 시 무효전력의 변화와 전압 왜형률, 차수별 고조파 전압/전류의 크기를 비교 설명하였고, 부하의 다양한 고조파 발생원 변화 시 어떠한 고조파가 많이 발생하는지를 분석하였다. 고조파를 억제하기 위해서 필터를 설치하였을 때 계통전체에는 큰 효과를 기대할 수 없고, 필터를 설치한 모선에 한하여 고조파를 억제하였다. 또한 필터 설치 시 계통이 진상회로가 되지 않게 정확한 용량산출이 필요하다. 이러한 다양한 분석기법은 수변전계통의 설계 운용에 기본적인 자료로 활용되어 전력계통의 전기품질향상에 기여할 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] "IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems" IEEE Std 519-1992
- [2] SKM Systems Analysis, "HI_WAVE reference manual", 1999
- [3] 日本電氣工業會, "高調波調査技術専門委員會 調査報告書", 1986
- [4] 한국전기 안전공사 "전기사용장소의 고조파 장애분석 연구", pp.99~131, 1996
- [5] 한국전력공사 기술연구원 "전력계통의 고조파 대책연구", pp.13~16, 1988
- [6] SKM Systems Analysis, "DAPPER reference manual, 1998
- [7] Computational Intelligence Applications to Power Systems, song, 1996