

전기품질개선을 위한 효율적인 고조파 진단 툴 개발

설용태* · 이의용*

Effective Harmonic Diagnose Tool for Power Quality Problems

Yong-Tae Sul* and Eui-yong Lee*

요약 본 연구는 산업용 전력계통에서의 전기 품질을 개선하기 위한 고조파 진단 툴의 개발에 대한 것이다. 이 시스템은 계통의 다양한 운전상태에서 시뮬레이션과 계측을 통한 전기품질 분석에 적합하도록 구성하였다. 시뮬레이션은 PTW(Power Tools for Windows)를 이용하였고, 고조파 측정에는 Dranetz사의 PP-4300 장비가 RS-232를 통해 개인용 컴퓨터와 연결되어 시뮬레이션과 실측 데이터를 비교분석 할 수 있게 하였다. 케이블의 영상분 임피던스 등 미진한 입력자료는 수정된 T&D와 BICC를 이용하였고, IEEE표준 데이터가 변압기 입력자료 측정에 적용되었다. 제안된 시스템은 대규모 실제 산업용 수변전 계통에 적용한 결과 고조파 진단의 유연성과 효율성을 입증할수 있었다.

Abstract In this paper harmonic diagnose tool is described for electric evaluate the power quality at industrial power systems is described both simulation and experimental testing during various operation conditions. PTW (Power Tools for Windows) and harmonic measuring instrument are organized around personal computer and/or instrumentation study environments interconnected via RS -232. Unknown zero sequence impedance data of cable is calculated by the modified T&D and BICC method. IEEE standard is also used to estimate the transformer input data. the proposed system provides a flexible and effective environment to diagnose the power quality at industrial distribution systems by utilizing simulations and actual field data.

Key Words : harmonics, power quality, PTW(Power Tools for Windows)

1. 서 론

최근 산업사회가 정보화·첨단화되면서 각종 전기설비들이 전압, 주파수의 변동에 민감해 짐에 따라서 높은 공급신뢰도와 함께 전기의 품질에 대한 중요성이 강조되고 있다. 이를 위해서 변전소 종합감시제어 시스템과 디지털 보호 계전기 등의 보호제어설비에 대한 연구 개발이 지속되고, 발전기, 변압기 등 전력 설비의 품질도 향상되어 발·송전 계통의 신뢰성은 높아졌다.

그러나 전력계통에서는 변압기와 회전기의 자기포화 현상, 아크로와 같은 비선형 부하, 사이리스터를 이용한 전력 조정기 및 정류기와 같은 전력 변환기 등에 의해서 고조파가 발생한다. 이러한 고조파는 전원 파형의 왜곡화, 고조파 전류에 의한 잡음과 유도장해 등으로 전기기기에 진동을 유발하여 기기의 성능과 수명저하는 물론 보호 계전기의 오동작 등을 유발한다. 특히 전력 전자 기술의 발전으로 반도체 스위칭 소자의 사용이 증가함에 따라서 고조파 장애로 인한 전기의 품질에 대한

중요성이 높아지고 있다[1, 2].

고조파에 분석을 위한 시뮬레이션 툴은 EMTP(Electro Magnetic Transient Program), PTW, EDSA 등이 이용되고 있는데, 기존 기법들은 필터설계를 위한 간단한 모델 계통의 설계 적용에 주안점을 두었다. 또한 선로 전동기 및 변압기 등의 각종 설비에 대한 정확한 입력 데이터의 부족 등으로 정확성에 한계가 있으며, 대규모 수변전 계통에서의 다양한 운전조건에 따른 고조파 해석도 비효율적이다[3, 4].

본 연구에서는 실제 운용중인 대규모의 산업용 수변전 계통에서의 고조파 특성을 S/W인 PTW를 이용한 시뮬레이션 기법으로 분석하고, 이를 Dranetz사의 계측기 PP4300을 이용한 측정치와 비교·분석하여 기존 시뮬레이션 기법의 정확성을 검증하였다. 먼저 계통의 발전기, 변압기, 선로 등의 각종 구성 요소의 입력 자료를 BICC, T&D를 이용하여 구함으로써 정확성을 기하였다. 조류 계산 등을 통하여 계통의 전기적인 특성을 상세히 분석하였고, 계통내의 여러 고조파 발생원들에 따른 고조파 현상과, 전류특성, 전압의 왜형률 등을 분석함으로써 수변전 계통의 설계와 운용시 전력 품질에 관련된 고조파 현상에 대한 종합적인 해석기법을 제시하였다.

*호서대학교 전기공학과

2. 고조파 이론

2.1 고조파 이론

고조파 성분이 정현파로부터 어느 정도 벗어났는가를 나타내는 파라미터로서 전압, 전류 파형의 왜형률을 정의한다. 각 고조파 전류 I_n 은 증복각 u (기본파 전류와 고조파 전류의 증복각)와 직류 부하 전류 I_d 에 따라 변한다. 계통에서 발생하는 n 차 고조파 전류 I_n 은 식 (1)과 같다.

$$I_n = \frac{I_1}{n} \times \frac{2\sqrt{A^2 + B^2}}{(n^2 - 1)\sqrt{u^2 - u \cdot \sin 2u + \sin^2 2u}} [A] \quad (1)$$

여기서,

n : 고조파 차수

I_1 : 기본파 전류[A]

I_d : 직류 부하전류[A]

$A = n \cdot \sin u \cdot \cos nu - \cos u \cdot \cos nu$

$B = n \cdot \sin u \cdot \sin nu + \cos u \cdot \cos nu$

기본파 전류 I_1 을 다시 쓰면 식 (2)와 같다.

$$I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \times I_d \times \frac{\sqrt{4(1 - \cos^2 u)^2 + (2u - \sin^2 u)^2}}{4(1 - \cos u)} [A] \quad (2)$$

여기서,

I_d : 직류 부하전류 [A]

X_s : 직류 리액턴스 [Ω]

E_{d0} : 직류 무부하전압 [V]

$$u = \cos^{-1} \left(1 - \frac{6X_s I_d}{\pi E_{d0}} \right) [rad]$$

부하 측으로 유입되는 고조파 전류 $I_{H(n)}$ 은 식 (3)과 같다.

$$I_{H(n)} = I_{HG(n)} \times \frac{r_\theta + jnx_\theta}{(r_s + r_\theta) + jn(x_s + x_\theta)} [A] \quad (3)$$

여기서,

$I_{HG(n)}$: 정류기에서 발생하는 고조파 전류[A]

$r_s + jnx_s$: 전원측의 고조파 임피던스 [Ω]

$r_\theta + jnx_\theta$: 부하측의 고조파 임피던스 [Ω]

또한, 전압 왜형률 ΔV_h 는 다음 식 (4)와 같다.

$$\Delta V_h = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{V_{ph}} \times 100 \right)^2} [\%]$$

여기서,

V_n : 고조파 전압[V]

V_{ph} : 교류측 상전압[V]

고조파 발생의 정도를 나타내는 종합 고조파 왜형률 (THD: total harmonics distortion)은 식 (5)와 같이 고조파 전압의 실효치와 기본파 전압의 실효치의 비로 표시된다.

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \times 100 [\%] \quad (5)$$

여기서,

V_1 : 기본파 전압

V_2, V_3, \dots, V_n : 각 차수별 고조파 전압

총 고조파 전류 왜형률 (TDD: total demand distortion)은 고조파 전류 실효치와 기본파 전류 실효치의 비로 나타내고 식 (6)과 같다.

$$TDD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \times 100 [\%] \quad (6)$$

여기서,

I_1 : 기본파 전류

I_2, I_3, \dots, I_n : 각 차수별 고조파 전류

2.2 필터 용량

산업용 수변전 계통에는 일반적으로 역률 개선과 고조파 저감 겸용으로 캐패시터 뱅크가 사용되거나 고조파 저감만을 위한 필터가 사용된다. 필터는 크게 수동 필터와 2차형 고차 필터 등이 있는데, 저차의 고조파 발생량이 많은 수전 계통의 경우는 고가의 능동필터보다는 대부분 수동필터의 한 종류인 단일 동조 필터가 이용된다[2].

단일동조 필터는 R-L-C의 직렬회로로 구성되며, n 차 고조파 필터의 임피던스 Z_N 은 식 (7)과 같다.

$$Z_N = R_n + j \left(\omega L_n - \frac{1}{\omega C_n} \right) [\Omega] \quad (7)$$

여기서

ω : 각속도

R_n, L_n, C_n : 각각 n 차 고조파 필터의 저항, 리액턴스, 커패시턴스

수동필터의 용량 Q_P 는 식 (8)과 같이 역률 변화를 이용하여 구한다.

$$Q_P = (Q_1 - Q_2) \times \frac{1}{n^2} \quad (8)$$

여기서

Q_1, Q_2 : 각각 역률의 개선전, 후의 무효전력

n : 특정 고조파 차수

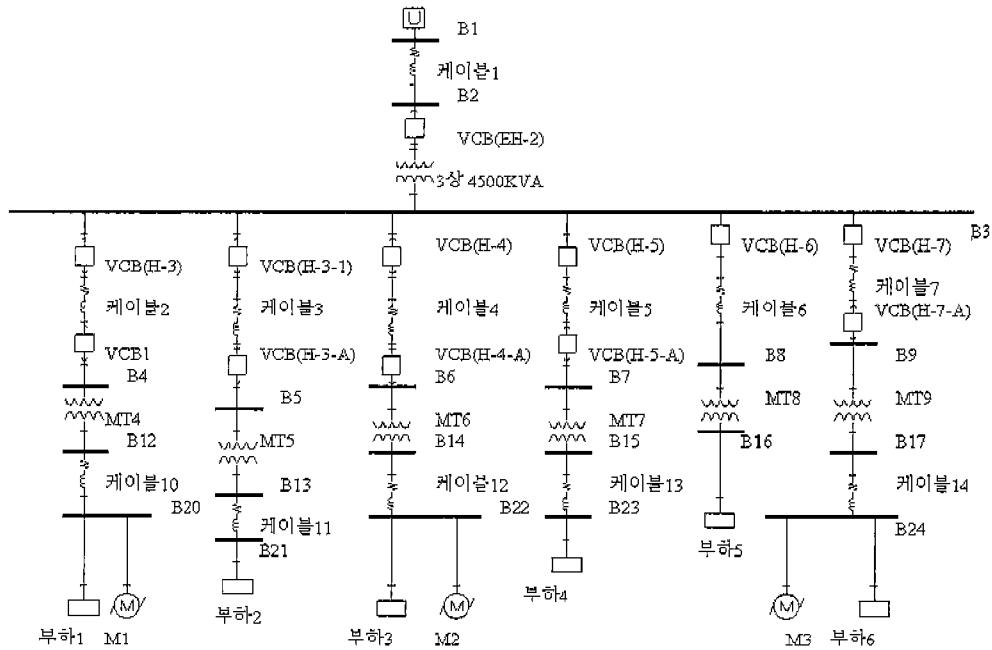


Figure 1. 모델 계통도

3. 사례연구 결과 및 고찰

3.1 모델 계통도

사례 연구를 위하여 그림 1과 같은 수전전압 22.9 [kV], 수전용량은 4,500 [kVA]의 실제 운용중인 공장의 일부를 모델계통으로 선정하였다.

본 연구에서는 수변전 계통의 고조파 분석을 위해서 배전계통의 조류계산, 고장계산, 안정도 및 고조파 등을 시뮬레이션 할 수 있는 종합적인 S/W인 PTW의 HI-WAVE프로그램을 이용하였으며, 모델계통의 입력데이터는 아래와 같다[5].

3.2 입력 데이터

PTW의 HI-WAVE 프로그램을 사용하기 위해서는 케이블, 변압기, 및 부하 등에 대한 계통의 각종 입력 자료가 필요한데, 실제 운용중인 계통의 경우 이러한 구성설비의 정확한 값을 구하기가 어렵다. 본 논문에서는 다음과 같은 방법으로 입력 데이터를 구하였다.

- 케이블: 케이블의 경우는 선로길이와 정·영상분 임피던스가 필요한데 정상분 임피던스 값은 제조회사의 자료로부터 구하고, 영상분 임피던스는 대칭좌표법의 근사화 기법으로 산정하였다.
- 변압기: 변압기의 경우는 임피던스, 결선상태, 1, 2 차측 전압 등이 필요하며, 이러한 자료들은 제조회사의 자료를 이용하였다.
- 전동기 부하: 부하의 경우는 용량, 역률, 효율, 극수

및 차과도 리액턴스 등이 필요하며, 이들 값은 제작회사의 자료를 이용하였다.

- 고조파 발생부하: 고조파 발생 부하는 각 부하에서 발생하는 고조파 발생원을 선택하여 입력하였다.
- 필터: 필터는 종류와 용량에 대한 자료가 필요한데 단일 동조 필터를 사용하고, 용량은 고조파 차수와 개선전 역률과 개선후 역률을 고려하여 산정하였다.

1) 케이블

본 논문에 적용된 22.9[kV] CV 250[mm²] 케이블의 경우 도체의 배열형태는 등가 수평배열, 시스 접지는 양단 접지를 고려하며, 고장전류 귀로 형태는 대지와 시스간으로 한다. 주파수와 대지구류 저항은 각각 60[Hz]와 100[Ω]이다. 또한, 교류도체의 실효저항은 0.0947[Ω], 시스 저항은 0.2130[Ω], 시스의 리액턴스는 0.0855[Ω], 도체의 중심간격은 48.8[mm], 시스 평균 직경은 39.55[mm]이다. 이와 같은 값을 식 (2.2) (2.3)에 적용하여 구하면 저항성분은 0.124[Ω]이고, 유도 리액턴스 성분은 0.151[Ω]이다.

표 1은 케이블 굵기에 따른 정·영상분의 임피던스 값을 나타낸 것이다.

2) 변압기

본 논문에 사용된 변압기의 임피던스는 제조회사의 참고자료와 용량에 따른 X/R값을 추정하여 [%]임피던스 값을 추정하였으며, 그 결과는 표 2와 같다.

3) 전동기

PTW시뮬레이션 프로그램에 동적 부하로써 적용할

Table 1. 수변전 계통의 케이블 데이터

케이블 규격	정상임피던스 [Ω/km]	영상임피던스 [Ω/km]
600[V] 325 SQ	0.0758+j0.1169	0.2538+j2.3049
3,300[V] 50 SQ	0.4889+j0.1620	1.3925+j2.0307
3,300[V] 200 SQ	0.1224+j0.1322	1.1696+j1.6642
22,900[V] 250 SQ	0.1242+j0.1513	0.3047+j0.0978
6,600[V] 3C60×SQ	0.3944+j0.1597	1.3164+j1.9995
6,600[V] 250 SQ	0.0961+j0.1408	1.1433+j1.6742

Table 2. 변압기 입력자료

변압기 용량[KVA]	%저항	%리액턴스
4,500	0.8092	6.9530
2,100	0.7900	6.9459
1,800	0.7850	5.8200
1,100	0.7845	3.9223
1,000	0.6900	3.8400
250	0.3740	3.2600

수 있는 부하는 유도기와 동기기가 있다. 직류기에 대한 소프트웨어는 아직 개발되지 않아 실제로 산업체에

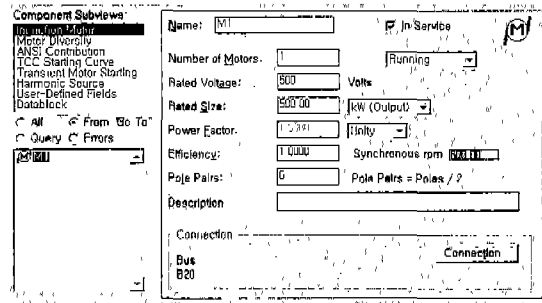


Figure 2. 전동기 데이터 입력 화면

서 사용하는 직류기는 유도기, 또는 동기기로 근사화 시켜서 처리하였다. 본 논문에서는 유도기에 대해서만 적용하였으며, 유도기에 입력되는 데이터는 전동기의 용량, 역률, 효율, 극수, X_d'' (차과도 리액턴스), X/R 값과 SKM사에서 제공하는 라이브러리를 적용하였다. 그림 2는 전동기 데이터 입력에 대한 데이터 값을 나타낸 것이다.

3.3 결과분석

1) 시뮬레이션 결과

그림 3.1의 모델 계통 중에서 유도전동기와 아크로 등 고조파 발생원이 많이 분포된 모선 20, 21, 22에 대해서 PTW를 이용하여 고조파에 대한 시뮬레이션 결과

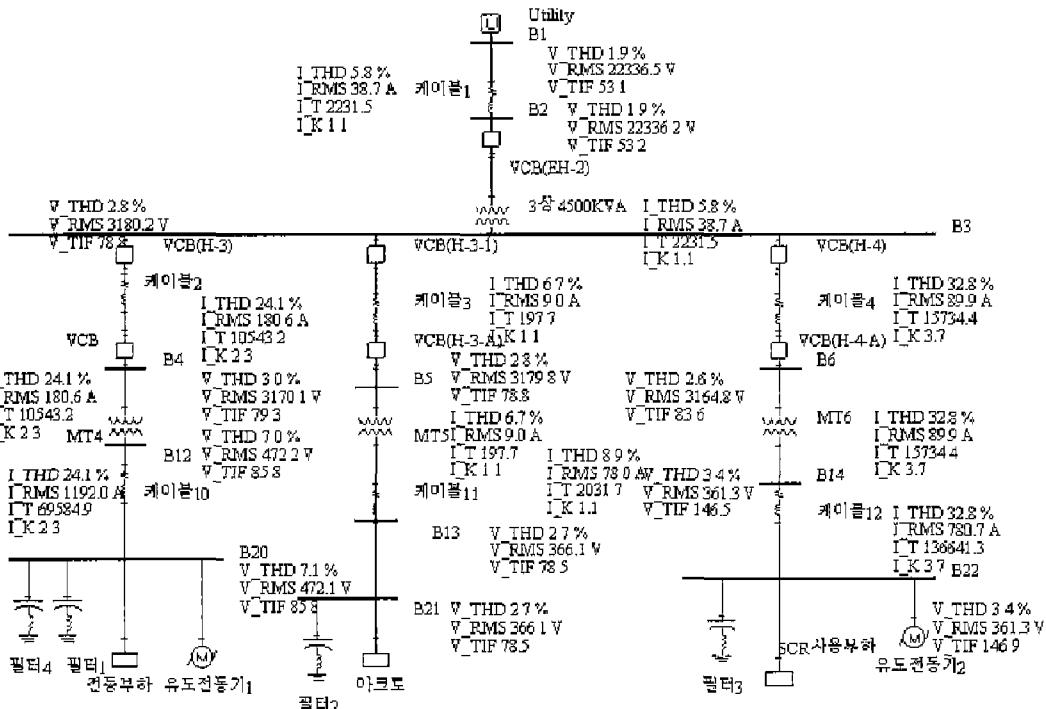


Figure 3. 고조파 흐름 계통도

Table 3. 각 모선에서의 고조파 왜형률

모선	왜형률	전압 (V-THD)	전류 (I-THD)
B1		1.9	5.8
B2		1.9	5.8
B3		2.8	19
B4		3.0	32.8
B5		2.8	6.7
B6		2.6	32.8
B12		7.0	8.9
B13		2.7	32.8
B14		3.4	20.9
B20		7.1	17.9
B21		2.7	28
B22		3.4	19

[단위:%]

는 그림 3과 같다

그림 3에서 22.9[kV]의 특고압 모선인 B1으로부터 3.1[kV]의 고압모선인 B3과 부하가 직렬 연결된 472 [V], 366[V] 및 361[V]의 저압모선인 B20, B21 및 B22까지의 전압 왜형률(V-THD)과 전류 왜형률(I-THD) 등을 상세히 알 수 있으며, 이를 표로 요약하면 표 3과 같다.

표 3에서 특고압 모선인 B1의 경우는 고조파 전압 왜형률이 IEEE기준치 1.5[%]보다 약 30[%] 많은 1.9 [%]로 필터 설치 등의 저감 대책이 요구됨을 보였으나, 고압 모선인 B3의 경우는 IEEE기준치가 4[%]인데 비해서 분석결과는 2.8[%]로서 상대적으로 낮았다. 직접 부하가 연결된 B20, B21 및 B22 모선의 경우는 고조파 전압 왜형률이 각각 7.1[%], 2.7[%] 및 3.4[%]로서 모선 20에서의 고조파는 IEEE기준치 5[%]보다 작아서 고조파 현상이 심하지 않음을 알 수 있었다. 표 4는 IEEE 519 전압 왜형률 기준치를 나타낸 것이다[3].

Table 4. IEEE 519 전압 왜형률

회로전압	왜형률[%]	각차 고조파 전압	
		기수 고조파[%]	우수 고조파[%]
415[V]	5	4	2
6.6[kV]	4	3	1.75
33[kV]	3	2	1
132[kV]	1.5	1	0.5

그러나 유도 전동기1이 접속된 모선 20의 경우는 필터1과 4의 2개의 필터가 설치되어 있음에도 불구하고 고조파 전압 왜형률이 IEEE 기준치 5[%]보다 높은 7.1[%]를 나타냄으로써, 필터 용량을 재산정 하여 고조파 현상을 저감시킬 필요가 있음을 알 수 있다. 모선 4,5,6에서의 왜형률은 각각 3[%], 2.8[%], 2.6[%]로서 기준치 4[%]보다 작아 기준치에 적합하였다. 모선 B12, B13, B14에서의 전압 왜형률은 모선 B20, B21, B22의 값과 거의 동일하게 나타났다.

2) 측정결과

모델계통에서의 고조파를 측정하기 위해서 Dranetz 사의 PP4300을 이용하였으며 측정도는 그림 4와 같다. 그림 4에서 보면 모선 20에 연결된 유도 전동기1의 경우 a상과 b상에서는 3차와 5차 고조파 전류 왜형률이 각각 0.6[%], 1.1[%]이고, c상에서는 5차와 7차가 각각 1.1[%], 0.3[%]로 나타났다. 모선22에 연결된 유도전동기2의 경우 a, b, c상 모두 3차 고조파는 0.6[%], 5차 고조파는 1.8[%] 정도임을 알 수 있다.

그림 5는 시간변화에 따른 모선 20, 22에서의 고조파

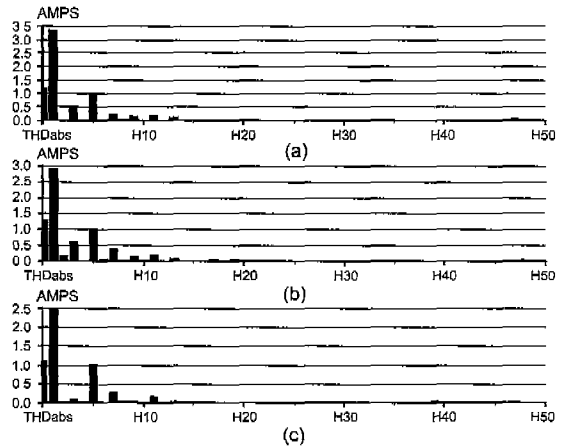


Figure 4. 모선 20에서의 고조파 전류 왜형률 (a) a상 (b) b상 (c) c상

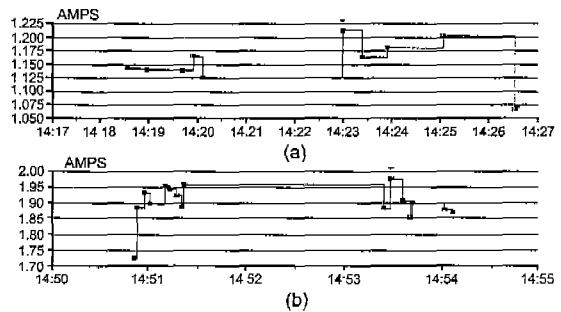


Figure 5. 시간 변화시 고조파 전류 왜형률의 변화 (a) 전동기1 (b) 전동기2

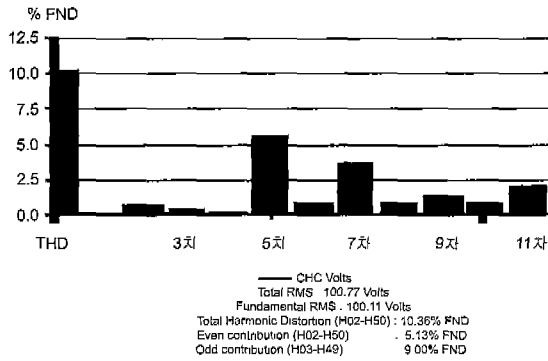


Figure 6. 전동기 1에서의 고조파 전압 왜형률

Table 5. 전동기 1의 고조파 왜형률의 측정치와 시뮬레이션값의 비교

결과치 고조파	전압 왜형률		전류 왜형률	
	시뮬레이션값	측정치	시뮬레이션값	측정치
3차	0.39	0.4	0.9	0.75
5차	2.23	6.0	1.3	1.1
7차	0.81	3.5	0.1	0.3
전체 왜형률	7.1	10.36	17.9	15.3

[단위:%]

전류 왜형률 변화를 나타낸 것이다. 전동기 1에서는 0.2[%] 전동기2에서는 0.26[%]의 변동차이로 전동기 2에서의 변동차이가 0.06[%]로 더 높게 나타났다.

그림 6은 모선 20에서의 전동기1에 대한 고조파 전압 왜형률을 측정된 결과이다. 지금까지 측정된 결과를 앞에서 분석한 시뮬레이션 결과와 비교하면 5차, 7차의 경우는 차이가 남을 알 수 있었고 이를 표로 나타내면 표 5와 같다.

표 5에서 보면 고조파 전압 왜형률이 3차의 경우는 시뮬레이션 0.39[%]가 실측치 0.4[%]와 거의 일치하였다. 그러나 5차, 7차의 경우는 3차와 5차의 경우는 시뮬레이션 값과 실측치가 매우 큰 차이가 있음을 보였다. 전류왜형률의 경우는 3차와 5차의 경우는 시뮬레이션 값이 비교적 측정치에 근사하였으나 7차의 경우는 오차가 큼을 알수 있었다. 이러한 결과는 PTW 시뮬레이션 분석시 각종 시스템 입력 자료 중 케이블에 대한 임피던스의 부정확성에 기인한 것으로 케이블에 대한 정확한 입력자료가 요구된다.

4. 결 론

본 연구에서는 수변전 계통 해석틀인 PTW를 이용하

여 산업용 수변전 계통의 고조파 현상을 시뮬레이션 하였다. 분석 결과는 실측치와 비교 분석함으로써 산업용 전력계통의 전기품질에 대한 검증기법을 제시하였다. PTW를 이용하여 수변전 계통의 여러 지점에서 고조파 전압, 전류 왜형률을 다양하게 계산 할 수 있어, 계통의 종합적인 고조파 현상 분석이 가능함을 알 수 있었고 지금까지 수변전 해석 계통시 전동기, 케이블 및 변압기 등 각종 구성 요소의 정확한 자료가 문제가 되는데, 여러 입력 자료의 상세한 계산을 통해 시뮬레이션에 대한 정확성을 기할 수 있었다. 특히 현재 운용중인 실제의 계통을 모델로 선정하여 분석함으로써 계통 내에서 어느 부분이 고조파에 의해 취약한지를 알 수 있어 전기 품질 향상을 위한 종합적인 방안 수립이 가능함을 입증하였다. PTW를 이용한 결과는 실측치와 비교함으로써 정확성을 분석하였는데, 3차 고조파의 경우는 정확하게 일치하였다. 그러나 5차, 7차 고조파에서는 오차가 발생하였는데, 이는 케이블에 대한 정확한 임피던스 값을 산정하지 못한데 기인한 것으로 사료된다.

따라서 향후 케이블에 대한 정확한 입력 자료의 계산을 통해서 PTW를 이용한 시뮬레이션 기법의 분석치에 대한 정확도를 향상시킬 필요가 있다.

감사의 글

본 논문은 호서대학교 반도체 제조장비 국산화 연구 센터의 지원에 의해 이루어졌음.

참고문헌

- [1] Douglas S. Dorr. "Power System Quality Study 1990 to 1995 Initial Results", Applied Power Electronics Conference, pp. 303-308, 1992.
- [2] 하평동, "수용가 설비에 있어서 고조파 억제 대책에 관한 연구", 경남대학교 대학원, pp. 8-30, 1997.
- [3] "IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power system", IEEE Std. 519, 1992.
- [4] 한국전기안전공사, "전기 사용장소의 고조파 장해 분석 연구", pp. 99-131, 1999.
- [5] SKM System Analysis, "HI_WAVE reference manual", pp. 47-87, 1999.
- [6] "Song Computational Intelligence Applications to power Systems", pp. 71-97, 1996.
- [7] 설용태, 이의용, 이배희, "PTW를 이용한 산업용 수변전 계통의 운영방안", 한국조명 전기설비학회 논문집, Vol. 14, No. 3, pp. 22-28, 2000.