

# 고속철 부하의 고조파 측정, 평가 및 시뮬레이션에 관한 연구

(A Study on the Harmonics Measurement, Assessment and Simulation of the High Speed Electric Train Loads)

김경철\* · 진성은\* · 이주홍\* · 이일무\* · 김주락\*\*

(Kyung-Chul Kim · Seong-Eun Jin · Joo-Hong Lee · Il-Moo Lee · Joo-Rak Kim)

(\* 홍익대학교 · \*\* 한국철도기술연구원)

## Abstract

High speed electric trains have nonlinear loads including converters and inverters for the control synchronous motors. Harmonic field measurements have shown that the harmonic contents of a waveform varies with time. Direct application of the harmonic assessment to the snapshot measurements would result in ambiguous conclusions depending on which instant is sampled. A cumulative probabilistic approach is the most commonly used method to solve time varying harmonics. This paper provides an in depth analysis on harmonics field measurement of the high speed electric train loads, harmonics assessment by the international harmonic standards IEC 61000-3-6 and IEEE Std. 519-1992, and harmonics simulation using EDSA program for the case study.

## 1. 서론

대용량의 가변부하를 가진 고속전철은 변압기, 전차선, 급전선, 레일 및 보호선 등 일련의 수송설비와 이들을 유기적으로 결합시키고 효율적으로 운용, 관리하기 위한 운용설비로 구성되어 있다.

고속전철의 전력변환 시스템은 컨버터와 인버터로 이루어지는데, 위상 제어 및 펄스 폭 변조방식에 의하여 제어되기 때문에 많은 고조파를 발생시킨다.[1]

고조파 원에 대한 정확하고 신뢰성 있는 측정과 평가는 전력시스템의 고장과 오동작 등을 예방할 수 있게 할 뿐만 아니라, 공통결합점(PCC, the Point of Common Coupling)에서 수용가와 전력회사의 역할과 책임을 분담하게 한다. 수용가는 할당된 범위 내에서 고조파 전류를 방출하여 전력시스템의 전력품질이 일정 수준 이상 유지되어야 하고, 전력회사는 공통결합점에서의 고조파 전압이 일정 수준 이하가 되도록 유지시켜야 한다.

본 논문에서는 시간에 따라 변하는 고조파를 측정하고, 국제기준에 의거하여 평가하며, 시뮬레이션으로 고조파 전류와 전압을 예측하고자 한다.

## 2. 고조파 측정

### 2.1. 사례연구 시스템

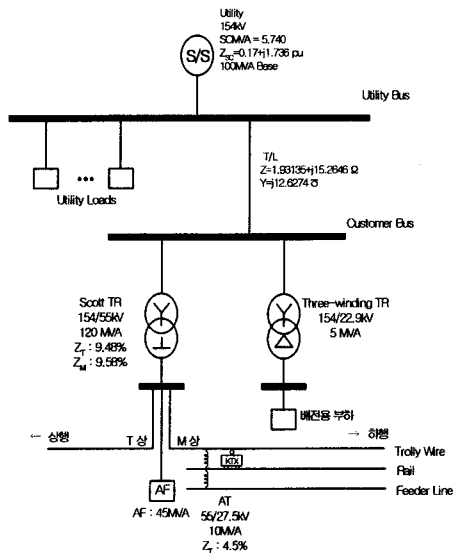


그림 1. 사례연구 시스템의 단선도  
Fig. 1. One-line diagram of the case study system

## 2.2. 고조파 측정장비

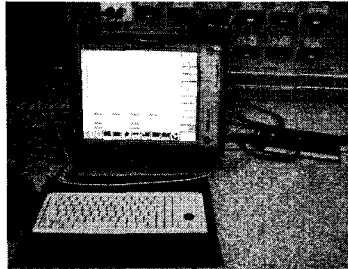
고조파 측정과 평가는 전력회사와 수용가가 만나는 점, 즉 공통결합점에서 이루어지는데, 사례연구 수용가의 모선(Customer Bus)이 된다.

고조파는 시간에 따라 변하므로 IEC 61000-4-7 [2]에 따라 측정시간을 순시치(Snapshot)와 3초(Very short time)으로 한다.

고조파 측정장비는 순시치 측정용으로 BMI-PX5 [3], 3초 측정용으로 PNA-2010 [4] 장비가 사용되었다. BMI-PX5는 윈도우 크기가 12 사이클로 측정하고, PNA-2010은 12사이클 측정에 36사이클 간격, 즉 0.8초에 한번씩 측정한다.



(a) BMI-PX5



(b) PNA-2010

그림 2. 측정 장비  
Fig. 2. Measuring equipment

## 2.3. 순시치 측정

BMI-PX5 장비로 측정된 데이터를 요약하면 표 1과 같다.

표 1. BMI-PX5에 의해 측정된 데이터  
Table 1. Measured data by BMI-PX5

	A 상	B 상	C 상
전압 [V]	92.260	92.886	92.871
전류 [A]	94.52	87.73	131.96
전압왜형률[%]	1.209	1.203	1.134
전류왜형률[%]	10.897	6.144	8.781

그림 3은 BMI-PX5로 측정된 전압과 전류 파형으로 편의상 A상만 나타낸다.

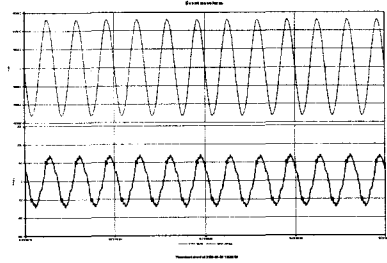


그림 3. 측정된 전압 및 전류 파형  
Fig. 3. Measured voltage and current waveforms

표 2는 각 차수별 고조파 전류 함유율과 위상각을 간추려 놓은 것이다. 고조파 시뮬레이션 시 고조파 발생 원으로 전류원을 주로 사용하고 있다.

표 2. 고조파 전류 왜형률  
Table 2. Harmonic current THD

order	Phase A		Phase B		Phase C	
	THD[%]	Phase[°]	THD[%]	Phase[°]	THD[%]	Phase[°]
1	100	151.79	100	70.55	100	280.82
2	0.109	260.96	0.231	96.14	0.094	280.38
3	2.625	356.78	1.159	98.78	1.963	207.53
4	0.006	90.69	0.05	98.88	0.034	320.38
5	7.653	308.66	3.65	209.06	5.413	99.78
6	0.038	297.93	0.038	171.35	0.028	83.5
7	2	226.99	2.922	223.81	3.675	46.2
8	0.016	271.36	0.022	332.68	0.009	193.86
9	2.616	15.53	0.384	280.95	1.759	190.21
10	0.022	110.13	0.009	306.95	0.028	19.69
11	4.475	297.43	1.063	29.85	3.234	137.49
12	0.016	10.84	0.009	38.25	0.034	215.16
13	2.594	128.49	1.15	33.66	1.872	285.82
14	0.022	181.93	0.016	9.89	0.009	239.78
15	2.528	276.78	0.838	353.94	2.047	121.41
16	0	359.65	0.016	149.47	0.003	71.79
17	2.113	96.61	0.35	344.85	1.372	273.54
18	0.022	288.05	0.016	65.95	0.016	198.85
19	0.703	40.13	0.456	187.2	0.3	275.91
20	0.006	236.66	0.022	341.83	0.041	105.69
21	1.303	255.49	1.584	197.93	1.844	48.49
22	0.006	251.35	0.022	116.15	0	245.13
23	0.822	312.06	1.841	188.84	1.209	35.44
24	0.016	5.45	0.044	189.38	0.022	16.55
25	0.766	319.95	1.703	169.23	0.878	8.58
~						
50	0.006	189.1	0.003	278.86	0.003	158.4

주)  $I_{A1}=93.95$  (A),  $I_{B1}=87.56$ (A),  $I_{C1}=131.44$  (A)

## 2.4. 3초 측정

고조파가 시간에 따라 매우 빠르게 변하는 경우는 3초 측정을 권하고 있다. 3초 측정은 전기 설비의 순간 영향이나 오동작을 일으키는 원인을 파악하는데 유용하게 쓰이고 있다.

PNA-2010 장비로 24시간 동안 측정된 데이터를 요약하면 표 3과 같다.

표 3. PNA-2010에 의한 측정된 데이터  
Table 3. Measured data by PNA-2010

	A 상	B 상	C 상
상전압 [kV]	91.4	92.6	92.3
전류 [A]	153.72	141.00	146.68
전압 왜형률 [%]	2.1	1.5	1.9
전류 왜형률 [%]	20.5	15.8	18.0

그림 4는 PNA-2010으로 24시간 동안 측정된 전압의 실효값과 왜형률(THD, Total Harmonic Distortion)로 편의상 A상만 나타낸다.

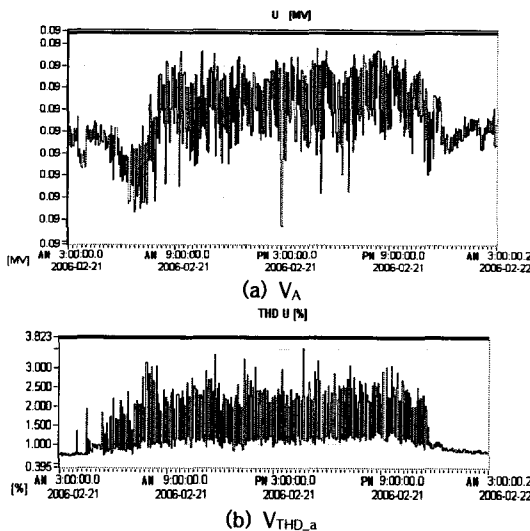


그림 4. 측정된 전압 실효값과 왜형률의 시간 경향  
Fig. 4. Measured voltage magnitude and THD time trends

그림 5는 PNA-2010으로 24시간 동안 측정된 전류의 실효값과 왜형률(TDD, Total Demand Distortion)로 편의상 A상만 나타낸다.

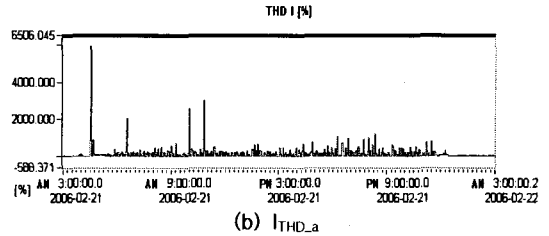
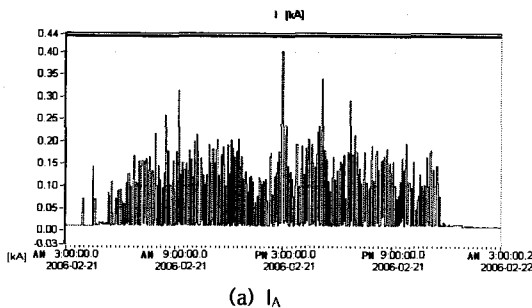


그림 5. 측정된 전류 실효값과 왜형률의 시간 경향  
Fig. 5. Measured current magnitude and TDD time trends

그림 4와 5에서 알 수 있듯이, 전압 왜형률과 전류 왜형률은 시간에 따라 변하는 특성을 가지고 있다. 이와 같이 시간에 따라 변하는 고조파를 평가하기 위해서는 누적확률(CP, Cumulative Probability)을 사용한다. 95% 누적확률 값이 측정기간 동안의 대표값으로 간주된다[5, 6].

그림 6은 PNA-2010 장비로 24시간 동안 측정된 누적확률 분포도이고, 편의상 A상만 나타낸다.

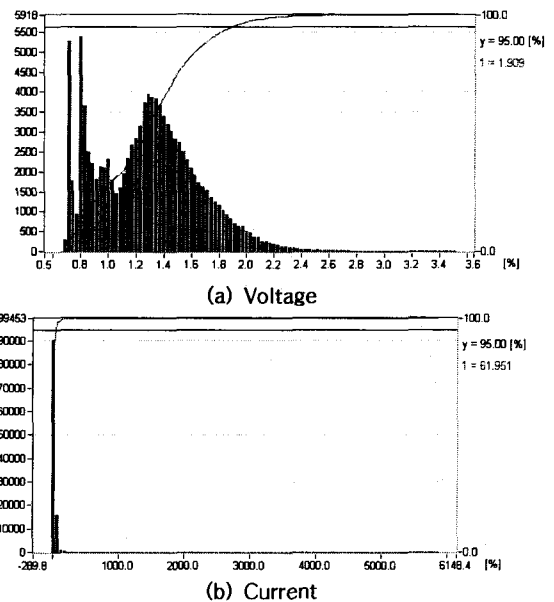


그림 6. 측정된 전압 및 전류 왜형률의 누적분포  
Fig. 6. Measured voltage and current THD cumulative probability distribution

### 3. 고조파 평가

고조파 평가의 원칙은 전력회사와 수용가가 역할과 책임을 분담하는데 있다.

고조파 전압 평가는 IEC 61000-3-6[7]을 적용한다. 계획레벨 (Planning level)은 전력회사가 채택하는 값이

고, 부하 유출 제한치를 결정하는데 사용한다.

표 4는 고조파 전압 평가를 간추려 놓은 것이다.

표 4. 고조파 전압 평가  
Table 4. Harmonic voltage evaluation

order	IEC 61000-3-6 Planning Level	A 상		B 상		C 상	
		snap shot	95% CP	snap shot	95% CP	snap shot	95% CP
2	1.5	0.025	0.099	0.006	0.098	0.013	0.099
3	2.0	0.191	0.291	0.059	0.182	0.203	0.2
4	1.0	0.016	0.035	0.013	0.032	0.003	0.035
5	2.0	1.134	1.34	1.163	1.113	1.044	1.059
6	0.5	0.006	0.021	0	0.021	0.003	0.016
7	2.0	0.2	0.409	0.1	0.356	0.159	0.381
8	0.4	0.006	0.023	0.003	0.021	0	0.023
9	1.0	0.063	0.295	0.022	0.167	0.059	0.281
10	0.4	0.006	0.023	0.003	0.019	0.006	0.023
11	1.5	0.072	0.492	0.056	0.15	0.15	0.463
12	0.2	0.013	0.018	0	0.014	0.006	0.021
13	1.5	0.103	0.522	0.034	0.145	0.063	0.506
14	0.2	0.006	0.02	0	0.013	0.006	0.023
15	0.3	0.106	0.791	0.006	0.145	0.106	0.766
16	0.2	0.013	0.032	0	0.016	0	0.033
17	1.0	0.063	0.784	0.044	0.17	0.081	0.75
18	0.2	0.013	0.023	0.003	0.015	0.003	0.026
19	1.0	0.047	0.404	0.003	0.232	0.034	0.407
20	0.2	0.006	0.016	0.003	0.018	0.003	0.021
21	0.2	0.091	0.263	0.094	0.335	0.134	0.264
~							
50	0.2	0.016	0.008	0.003	0.013	0.006	0.017
THD <sub>v</sub> [%]	3.0	1.21	2.11	1.20	1.51	1.13	1.95

고조파 전류 평가는 IEEE Std. 519-1992 [8]을 적용한다. 표 5는 고조파 전류 평가를 간추려 놓은 것이다.

표 5. 고조파 전류 평가  
Table 5. Harmonic current evaluation

order	IEEE 519 limits	A 상		B 상		C 상	
		snap shot	95% CP	snap shot	95% CP	snap shot	95% CP
3	3.5	2.625	5.67*	1.159	6.59*	1.963	8.26*
5	3.5	7.653*	7.67*	3.65*	2.56	5.413*	7.16*
7	3.5	2*	1.47	2.922	2.2	3.675*	2.56
9	3.5	2.616	3.91*	0.384	1.8	1.759	2.71
11	1.75	4.475*	5.28*	1.063	1.62	3.234*	3.76*
13	1.75	2.594*	6.91*	1.15	1.18	1.872*	5.51*
15	1.75	2.528*	7.29*	0.838	1.25	2.047*	5.33*
17	1.25	2.113*	2.99*	0.35	1.67*	1.372*	2.27*
19	1.25	0.703*	1.35	0.456	1.02	0.3	1.24
21	1.25	1.303*	1.51*	1.584*	1.52*	1.844*	0.95
~							
49	0.25	0.509*	1.68*	0.022	1.8*	0.469*	1.29*
THD <sub>i</sub> , TDD <sub>i</sub> [%]	4.0	10.90*	20.5*	6.14*	15.8*	8.781*	18*

주) \*는 기준치를 초과하는 값을 나타낸다.

고조파 전압 평가 결과는 IEC 61000-3-6 계획레벨이었다. 하지만 순시치 측정에 의한 결과는 전압 왜형률이 약 1.18%이었고, 3초 측정에 의한 결과는 약 1.86%으로 차이가 나고 있다. 즉, 순시치에 의한 전압 평가는 측정 순간에 따라 값의 차이가 많이 나므로 오류를 범하기 쉽다.

고조파 전류 평가 결과는 IEEE Std. 519 제한치 4.0%보다 순시치 측정 결과는 약 8.61%로, 3초 측정 결과는 약 18.1%로 기준치를 많이 초과 하였다. 사례연구 수용기는 고조파 필터를 보강할 필요가 있다고 사료된다.

#### 4. 고조파 시뮬레이션

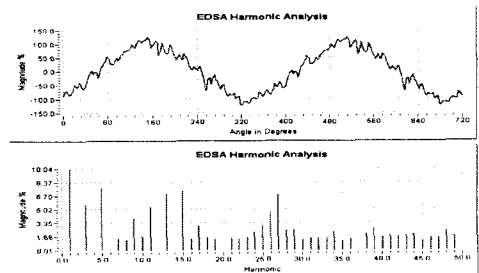
고조파 시뮬레이션은 고조파 문제를 파악하고 분석하는데 중요한 역할을 한다. 커패시터 뱅크를 설치하고자 할 때, 고조파 발생장비를 설치하고자 할 때, 고조파 필터를 설치하고자 할 때 등 고조파 시뮬레이션은 여러 가지 조건 하에서 가능한 해결 방안과 유효성을 평가하는 수단으로 쓰인다.

고조파 시뮬레이션은 상용화된 EDSA[9] 프로그램을 사용하였다. BMI-PX5 장비에 의한 순시치 측정은 고조파 전류의 크기와 위상의 데이터를 취득할 수 있지만, 시간에 따라 변하는 고조파를 대표하지는 못할 수 있다.

시간에 따라 변하는 고조파를 평가하는 데는 대표성을 가진 95% 누적확률 값을 쓰고 있다. 하지만 누적확률 값을 가진 고조파 전류와 전압의 크기만으로 표시되므로 고조파 모델링에 필요한 위상값은 알 수가 없다.

본 논문에서는 고조파 전류원으로 3초 측정에 의한 95% 누적확률 값의 크기와 순시치 측정에 의한 위상을 사용하여 고조파 시뮬레이션을 하여 측정된 값과 비교하고자 한다.

그림 7은 EDSA로 시뮬레이션 한 전류 파형과 스펙트럼이고, 그림 8은 전압 파형과 스펙트럼이다.



(a) A상

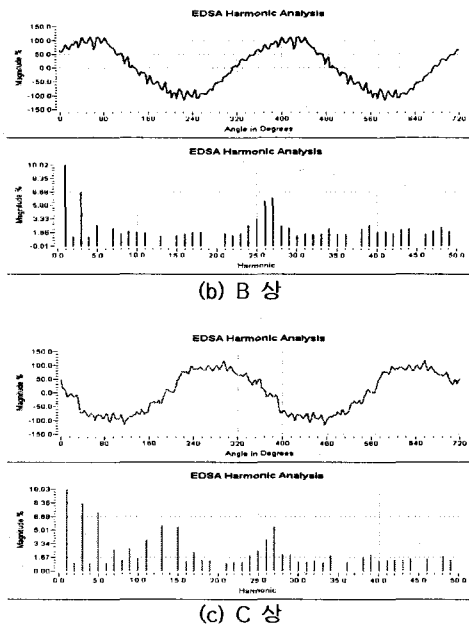


그림 7. EDSA 시뮬레이션에 의한 전류 파형과 스펙트럼  
Fig. 7. Current waveform and spectrum by EDSA Simulation

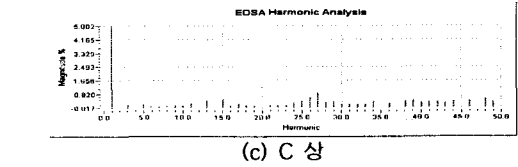
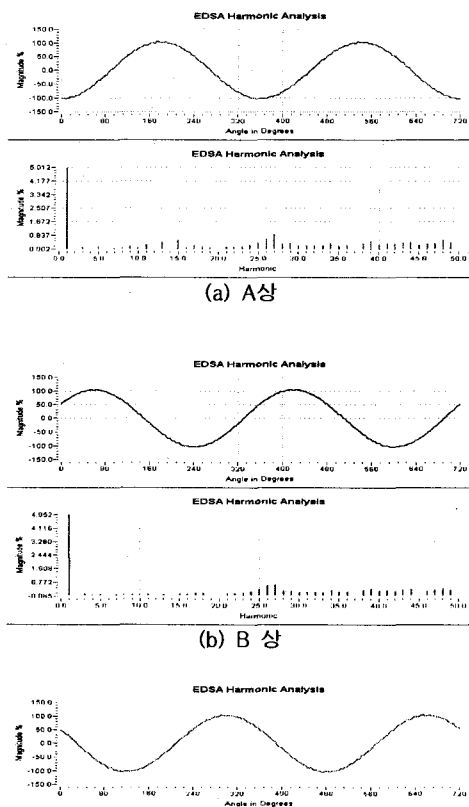


그림 8. EDSA 시뮬레이션에 의한 전압 파형과 스펙트럼  
Fig. 8. Voltage waveform and spectrum by EDSA Simulation

표 6은 3초 측정에 의한 95%누적 확률값과 EDSA로 시뮬레이션 한 고조파 전류를 비교한 것이다.

표 6. 고조파 전류 비교  
Table 6. Harmonic currents comparison

order	A상		B상		C상	
	95% CP	Simulated	95% CP	Simulated	95% CP	Simulated
1	100	100	100	100	100	100
2	0.89	0.00	1.10	1.11	0.90	0.93
3	5.67	5.67	6.60	6.59	8.30	8.26
4	0.74	0.00	1.10	1.10	0.90	0.88
5	7.67	7.67	2.60	2.56	7.20	7.16
6	0.93	0.00	1.10	0.00	1.00	0.97
7	1.47	1.47	2.20	2.20	2.60	2.56
8	1.25	1.25	1.50	1.48	1.30	1.25
9	3.91	3.91	1.80	1.80	2.70	2.71
10	1.68	1.68	1.70	1.66	1.50	1.47
11	5.28	5.28	1.60	1.62	3.80	3.76
12	0.82	0.00	1.30	0.00	1.10	0.00
13	6.91	6.91	1.20	1.18	5.50	5.51
14	0.01	0.00	1.00	0.00	0.80	0.00
15	7.29	7.29	1.30	1.25	5.30	5.33
16	1.33	1.33	1.50	1.49	1.20	1.17
17	2.99	2.99	1.70	1.67	2.30	2.27
18	1.57	1.57	1.70	1.72	1.30	1.32
19	1.35	1.35	1.00	0.00	1.20	1.24
20	1.00	0.00	1.10	0.00	0.80	0.00
21	1.51	1.51	1.50	1.52	0.90	0.95
~						
50	0.99	0.00	1.40	0.00	0.80	0.00
TDD[%]	20.50	20.36	15.80	15.47	18.00	17.86

고조파 전류원을 고조파 발생원으로 하였으므로 95% 누적확률값(약 18.1%)과 EDSA로 시뮬레이션 한 고조파 전류값(약 17.9%)은 거의 오차가 없는 결과로 나타났다.

표 7은 3초 측정에 의한 95% 누적확률값과 EDSA로 시뮬레이션 한 고조파 전압을 비교한 것이다.

표 7의 결과 전압왜형률은 95% 누적확률값 약 1.86% 이고, EDSA 시뮬레이션 한 고조파 전압왜형률은 약 1.87%으로 차이가 크지 않으나 각 차수별은 많은 차이가 발생 하였다. 고조파 발생원을 전류원으로 한 것도 오차의 원인이 될 수 있다. 일반적으로 고조파 발생원은 전류와 전압의 혼합원이라 할 수 있으므로, 고조파 차수별까지 일치하려면 많은 선행 연구가 필요하다고 판단된다.

표 7. 고조파 전압 비교  
Table 7. Harmonic voltages comparison

order	A상		B상		C상	
	95% CP	Simulated	95% CP	Simulated	95% CP	Simulated
1	100	100	100	100	100	100
2	0.10	0.00	0.10	0.01	0.10	0.01
3	0.29	0.08	0.18	0.07	0.20	0.15
4	0.04	0.00	0.03	0.02	0.04	0.02
5	1.34	0.18	1.11	0.05	1.06	0.21
6	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02	0.03
7	0.41	0.05	0.36	0.06	0.38	0.10
8	0.02	0.05	0.02	0.04	0.02	0.06
9	0.30	0.17	0.17	0.06	0.28	0.14
10	0.02	0.08	0.02	0.06	0.02	0.09
11	0.49	0.28	0.15	0.07	0.46	0.24
12	0.02	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00
13	0.52	0.43	0.15	0.06	0.51	0.42
14	0.02	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00
15	0.79	0.52	0.15	0.07	0.77	0.47
16	0.03	0.10	0.02	0.09	0.03	0.11
17	0.78	0.24	0.17	0.11	0.75	0.23
18	0.02	0.13	0.02	0.11	0.03	0.14
19	0.40	0.12	0.23	0.00	0.41	0.14
20	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00
21	0.26	0.15	0.34	0.12	0.26	0.12
~						
50	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00
THD[%]	2.11	2.09	1.51	1.53	1.95	1.99

## 5. 결론

고속철 부하는 전인 전동기를 구동하기 위한 컨버터와 인버터를 사용하고, 정지 및 가속을 수시로 하는 변동 부하와 스코트 변압기, 단권변압기 등의 비선형 부하가 많아 고조파 발생이 많고, 고조파가 시간에 따라 변하는 특성을 가지고 있다.

고조파 평가의 원칙은 전력회사와 수용가가 역할과 책임을 분담하는데 있다. 순시치 측정에 의한 결과는 전압왜형률이 약 1.18%이었고, 하루 동안의 95% 누적 확률에 의한 결과는 약 1.86%으로 차이가 나타났다. 사례연구와 같이 순시치 측정에 의한 고조파 평가는 오류를 범하기 쉬우므로 시간에 따라 변하는 고조파를 평가하는 데는 95% 누적 확률값으로 하면 통계자료에 의한 대표값이 되어 올바른 평가가 된다고 할 수 있다.

고조파 전류 평가 결과는 IEEE Std. 519 제한치인 4.0%보다 순시치 약 8.61%와 95% 누적확률 18.1% 모두 많이 초과 하므로, 사례연구 수용가는 고조파 필터를 보강할 필요가 있다고 사료된다.

고조파 시뮬레이션은 고조파 문제를 파악하고 분석하는데 중요한 역할을 한다. 본 논문에서는 사례연구 수용가의 고조파 수준을 대표하는 95% 누적확률값을 사용하여 고조파 전류원으로부터 고조파 전압왜형률을 예

측하였다. 고조파 시뮬레이션 결과 고조파 전류 왜형률은 약 17.9%로 95% 누적확률값 약 18.1%과 거의 같았다. 고조파 전압왜형률은 95% 누적확률값은 약 1.86%이었고, 시뮬레이션 결과는 약 1.87%로 차이가 없었지만, 각 차수별은 전류와는 달리 차이가 있어, 좀 더 많은 연구가 선행되어야 한다고 판단되었다.

## 참고 문헌

- [1] 이장우, 창상훈, 외 6명, "경부고속철도 서울-대구 구간 전력품질 안정화 대책 연구", 한국철도시설공단, 2004.
- [2] IEC 61000-4-7, "General Guide on Harmonics and Inter-harmonics Measurement and Instrumentation for Power Supply Systems", 1991.
- [3] BMI-PX5, "Basic Measuring Instrument PowerXplorer", Dranetz Co., 2004.
- [4] PNA 2010, "Power Network Analyzer", Chauvin Arnoux Co., 2004.
- [5] T. Ortmeyer and w. Xu, "Setting Limits on Time-Varying Harmonics", IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2003.
- [6] M. Steurer, "Real Time Simulation for Advanced Time-Varying Harmonic Analysis", IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005.
- [7] IEC 61000-3-6, "Assessment of Emissions Limits for Distorting Loads in MV or HV Power Systems", 1996.
- [8] IEEE Std. 519-1992, "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonics Control in Electrical Power Systems".
- [9] EDSA User's Guide, "Electrical Power System Harmonic Analysis Program", EDSA Micro Co. 2005.