Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 21, No.2, pp. 71~77 February 2007 논문 21-2-11

고속열차 부하의 고조파 및 플리커 측정에 관한 연구

(A Study on the Harmonics and Flickers Measurement of High Speed Electric Train Loads)

김경철* · 김유준
(Kyung-Chul Kim · You-June Kim)

요 약

고속열차는 전력계통에 전압 변동을 일으키며 시간에 따라 변하는 비선형 부하이다. 시간에 따라 변하는 부하를 해결하기 위해 쓰이는 가장 보편적인 방법은 누적확률을 사용하는 것이다. 플리커는 전압 변동의 크기에 따라 램프의 방출 변화에 의한 인간의 지각 효과로 정의된다. 본 논문에서는 고속열차 부하의 고조파 및 플리커 측정을 심도 있게 분석한다. 그리고 측정 결과는 국제 기준인 IEC 61000-3-6과 IEC 61000-3-7에 의해 평가하고자 한다.

Abstract

High speed electric trains have time-varying nonlinear loads causing voltage fluctuations to the power system. A cumulative probablistic approach is the most commonly used method to solve time varying loads. Flicker can be defined as the effect produced on the human visual perception by a changing emission of light lamps subjected to magnitude fluctuations of their supply voltage. This paper provides an in depth analysis on harmonics and flickers measurement of the high speed electric train loads. And the measurement results are evaluated by the IEC 61000-3-6 and IEC 61000-3-7.

Key Words : High speed electric trains, Cumulative probability, Harmonics, Flickers, IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-15

1. 서 론

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

전력변환 시스템은 컨버터와 인버터로 이루어지는데, 위상제어 및 펄스폭 변조방식에 의해 제어되기 때문에 많은 고조파를 발생시키고, 급격한 속도 조절은 전압 변동을 일으키고 플리커의 원인이 될 수 있다[1].

고조파 원에 대한 정확하고 신뢰성 있는 측정과 평가는 전력 시스템의 고장과 오동작 등을 예방할 수 있게 한다. 플리커는 장비의 효율을 저하시키고,

* 주저자 : 홍익대학교 전기공학과 교수
Tel : 041-860-2568, Fax : 041-863-7605
E-mail : yangjier@hongik.ac.kr
접수일자 : 2006년 11월 6일
1차심사 : 2006년 11월 7일
심사완료 : 2006년 11월 23일

보호계전기 시스템의 장해, 토크 및 전력 동요 등 여러 가지 장해를 일으킨다.

그러므로 고조파와 플리커는 전력회사와 수용가에게 중요한 전력 품질의 평가요소 이므로, 공통결합점 (PCC, the Point of Common Coupling)에서 전력회사와 수용가는 역할과 책임을 분담하게 된다.

수용가는 할당된 범위 내에서 방출을 유지해야 하는 책임이 있고, 전력회사는 일정 수준 이하가 되도록 유지시켜야 한다.

본 논문에서는 시간에 따라 변하는 고속열차 부하의 고조파와 플리커를 국제기준에 의거하여 측정하고 평가하고자 한다.

2. 사례연구 시스템

그림 1은 사례 연구 시스템의 단선도이다. 전력회사는 공급전압이 154[kV], 단락용량이 5740[MVA], 단락 임피던스는 100[MVA] 기준으로 0.17+j1.736 [pu]이다.

송전선로는 선로 임피던스가 1.93135+j15.2646[Ω]이고, 선로 어드미턴스는 j12.6274[℧]이다.

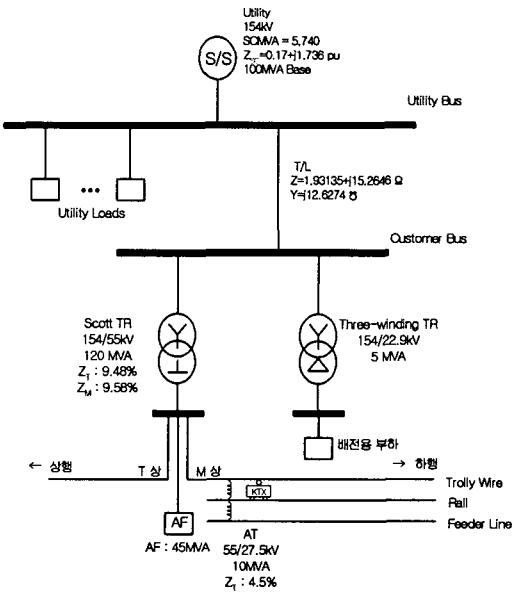


그림 1. 사례연구 시스템의 단선도
Fig. 1. One-line diagram of the case study system

급전 시스템에는 주 변압기로 스코트 변압기 (Scott Transformer) 120[MVA], 소내용 변압기 (Three-winding Transformer) 5[MVA]가 있다. 고속철도는 전력회사로부터 154[kV]를 수전하여 스코트 변압기에 의해 55[kV]으로 변환하여, 단권변압기 (AT, Auto-Transformer)에 25[kV] 전압을 공급한다. AT 급전방식은 변전소에서 급전선(Feeder Line)을 선로에 따라 가선하여 이 급전선과 전차선 (Trolly wire)사이에 약 10[km] 간격으로 AT를 병렬로 설치 접속하여 변압기 권선의 중성점을 Rail에 접속하는 방식이다. 사례연구 수용가에는 고조파 저감을 위한 45[MVA]의 능동필터(AF, Active-Filter)가 설치되어 있다.

3. 고조파 및 플리커 측정 장비

고조파 및 플리커 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 의거하여 3초(very short time) 측정 법칙으로 한다. 12사이클 측정에 36사이클 간격, 즉 0.8초에 한 번씩 24시간 동안 측정한다.

시간에 따라 변하는 플리커는 IEC 61000-4-15[3]에 의거하여 10분 간격으로 24시간 동안 측정한다.

측정 장비는 IEC 61000-4-7과 IEC 61000-4-15에서 요구하는 조건을 갖춘 PNA-2010[4]를 사용한다.

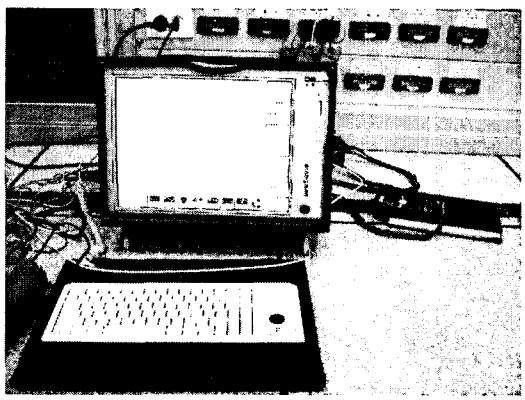


그림 2. PNA 측정 장비
Fig. 2. PNA Measuring equipment

4. 고조파 측정 및 평가

4.1 고조파 측정

PNA-2010 장비로 24시간 동안 측정하였다. 측정 결과는 설비의 순간 영향이나 오동작을 일으키는 원인을 파악하는데 유용하게 쓰일 수 있다.

편의상 측정은 월요일 (익일 03 : 00~다음날 03 : 00)의 24시간 동안 측정된 데이터를 요약하고, 3상 중에 A상만 나타내기로 한다.

그림 3부터 그림 10까지를 간략히 요약하기로 한다. 그림 3은 하루 동안의 전압의 변화를 나타낸다. 평균 전압은 158.3[kV]이다. 그림 4는 전류의 시간 경향을 나타낸다. 하루 동안의 평균 전류는 50[A]이다.

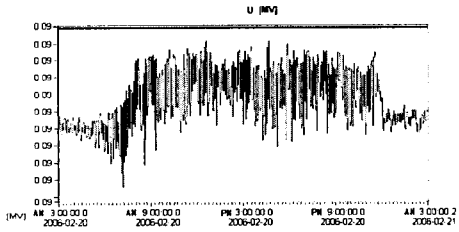


그림 3. 측정된 전압의 시간 경향
Fig. 3. Measured voltage time trends

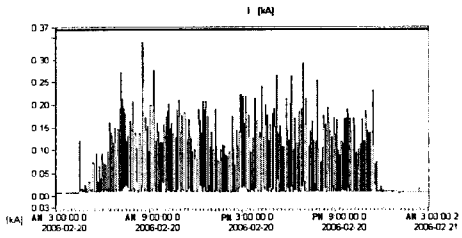


그림 4. 측정된 전류의 시간 경향
Fig. 4. Measured current time trends

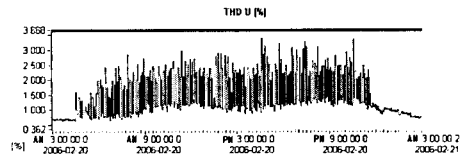


그림 5. 측정된 전압 왜형률의 시간 경향
Fig. 5. Measured voltage THD time trends

그림 5는 하루 동안의 전압 왜형률(THD, Total Harmonic Distortion)의 변화를 나타낸다. 변화의 범위가 넓기 때문에 고조파를 평가하기 위해서는 특별한 기법이 요구됨을 알 수 있다. 그림 6은 전류 왜형률의 시간 경향을 나타낸다. 그림에서는 THD로 나타냈기 때문에 범위가 0~7000[%]까지 되었지만 국제 기준에서는 종합 왜형률(TDD, Total Demand Distortion)으로 평가하게 되면 범위를 대폭 줄일 수 있다. THD는 측정시 기본파의 크기에 대한 고조파 크기를 나타내고, TDD는 정격 혹은 최대값에 대한 고조파의 크기이기 때문이다.

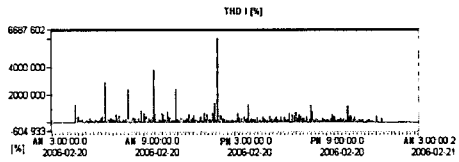


그림 6. 측정된 전류 왜형률의 시간 경향
Fig. 6. Measured Current THD time trends

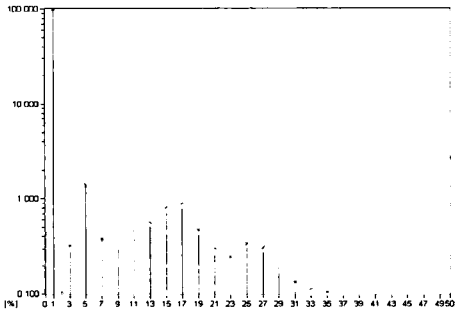


그림 7. 전압 누적 히스토그램
Fig. 7. Voltage cumulative histogram

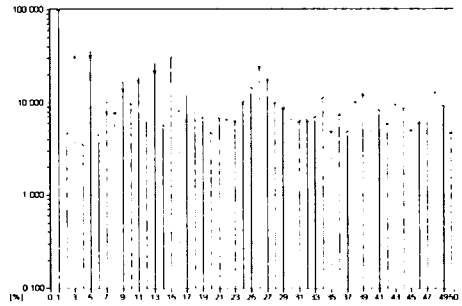


그림 8. 전류 누적 히스토그램
Fig. 8. Current cumulative histogram

그림 7은 하루 동안의 전압 왜형률의 누적값을 나타낸다. 그림 8은 전류 왜형률의 누적값으로 모든 차수의 고조파 성분이 존재함을 알 수 있다.

그림 9는 하루 동안 측정한 전압의 누적확률(CP, Cumulative Probability) 분포도이다. 시간에 따라 변하는 고조파는 누적확률 95[%]를 적용하는 것을 국제기준인 IEC 61000-3-6[5]와 IEEE P519A[6]에서 권장하고 있다. 그림 10은 하루 동안의 전류 누적확률 95%이다. THD로 표시되어 구분하기 어렵지만, 고조파 평가 시에는 TDD로 변환하고 수치를 표로 요약하였다.

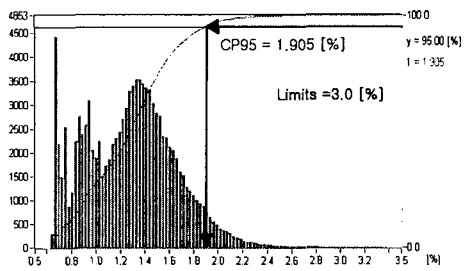


그림 9. 측정된 전압 왜형률의 누적분포
Fig. 9. Measured voltage THD cumulative probability distribution during one day

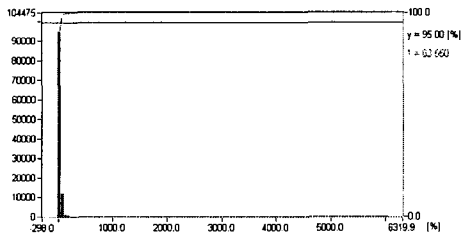


그림 10. 측정된 전류 왜형률의 누적분포
Fig. 10. Measured current THD cumulative probability distribution during one day

4.2 고조파 전압 평가

고조파 평가의 원칙은 전력회사와 수용가가 역할과 책임을 분담하는데 있다. 본 논문에서는 시간에 따라 변하는 고조파를 국제기준인 IEC 61000-3-6를 적용하기로 한다.

표 1은 고조파 전압평가를 간추려 놓았다. IEC는 하루 동안 측정한 3초 측정값의 누적확률 95[%]가 계획 레벨(Planning level)을 넘지 않도록 규정하고 있다. 계획 레벨은 전력회사가 채택하는 값이고, 부하 유출 제한치를 결정하는데 사용한다.

그림 11은 표 1을 그림으로 나타내었다.

표 1. 고조파 전압 평가
Table 1. Harmonic voltage evaluation

차수	IEC 61000-3-6 Planning level	A 상 95[%] CP	B 상 95[%] CP	C 상 95[%] CP
2	1.5	0.101	0.103	0.102
3	2.0	0.291	0.198	0.191
4	1.0	0.035	0.039	0.038
5	2.0	1.405	1.182	1.117
6	0.5	0.021	0.019	0.025
7	2.0	0.367	0.273	0.327
8	0.4	0.028	0.026	0.03
9	1.0	0.298	0.164	0.281
10	0.4	0.023	0.021	0.027
11	1.5	0.492	0.153	0.464
12	0.2	0.018	0.015	0.028
13	1.5	0.5	0.146	0.487
14	0.2	0.025	0.014	0.029
15	0.3	0.703*	0.142	0.682*
16	0.2	0.03	0.015	0.032
17	1.0	0.787	0.156	0.745
18	0.2	0.023	0.014	0.026
19	1.0	0.422	0.228	0.418
20	0.2	0.018	0.016	0.02
~				
50	0.2	0.008	0.012	0.016
THDv ([%])	3.0	2.112157	1.686367	1.933661

주) *는 기준치를 초과하는 값을 나타낸다.

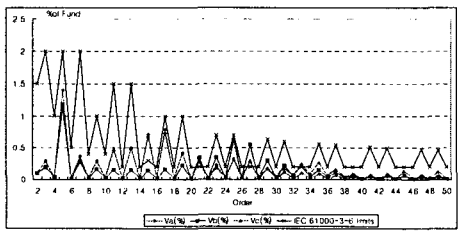


그림 11. 고조파 전압 평가
Fig. 11. Harmonic voltage evaluation

표 1과 그림 11에 의한 전압 평가 결과는 제 15, 21, 27, 33 차수 등에서 IEC 기준치를 약간 벗어난 것을 알 수 있다. 이들 고조파에 대한 정밀 분석과 능동 필터 성능을 재검토할 필요가 있다고 사료된다. 전체 전압 왜형률은 IEC 기준 3[%]에는 못 미치는 약 1.911[%]이지만, 한전 기준 1.5[%] 보다 높으므로 검토할 사항이다.

4.3 고조파 전류 평가

IEC에서는 고조파 전압 평가만 하고, 신규 수용가인 경우에는 계획단계에서 검토 사항으로 제 5, 7, 11, 13차 등과 전체 왜형률이 IEC에서 정한 기준치를 초과 하는지를 평가한다. 전류 왜형률을 구할 때 기본 주파수 전류(I_1)는 계약전력에 상당하는 전류로 한다.

표 2는 IEC에 의한 고조파 전류 평가를 간추려 놓았다. 24시간 동안 3초 측정값의 누적확률 95[%]가 기준치를 초과하는지 평가한다.

표 2. IEC에 의한 고조파 전류 평가
Table 2. Harmonic current evaluation by the IEC

차 수	IEC limits I_h/I_1([%])	A 상 95[%] CP	B 상 95[%] CP	C 상 95[%] CP
5	5 ~ 6	9.8*	3.47	6.78*
7	3 ~ 4	2.35	2.21	2.4
11	1.5 ~ 3	5.46*	1.54	3.45*
13	1 ~ 2.5	6.97*	1.16	4.14*
$\sqrt{\sum I_h^2}$	6 ~ 8	20.9*	14.1*	15.7*

주) *는 기준치를 초과하는 값을 나타낸다.

IEC에 의한 고조파 전류 평가 결과는 IEC 기준치 6~8[%]를 3상 모두 초과(A상 20.9[%], B상 14.1[%], C상 15.7[%])하므로 수용가에 고조파 필터 설치가 요구된다고 할 수 있다.

5. 플리커 측정 및 평가

5.1 플리커 지수

플리커는 발광 빛의 자극에 의해 야기되는 시각적인 감각의 불안정한 느낌을 나타낸다.

플리커 측정에 대해 IEC 61000-4-15에서는 전압 변동 파형에 대해 정확한 플리커 지각 레벨을 표시하기 위한 기능을 설명하고 있다.

플리커 측정기의 기능은 입력 전압으로부터 램프, 눈 및 두뇌를 통과하는 인간의 플리커 지각을 시뮬레이션 하여, 플리커 레벨의 통계적 분석을 수행한다.

플리커 측정기의 출력은 단기 플리커 평가 지수인 P_{st}와 장기 플리커 평가 지수인 P_{lt}로 표현된다.

단기 플리커 평가는 관찰 주기 " T_{short}= 10분" 에 의한 간소한 측정이 P_{st}에 의해 구해지고, 이는 플리커 측정기의 출력에서 얻게 되는 통계 값이다.

$$P_{st}=(0.0314P_{0.1}+0.0525P_{1s}+0.0657P_{3s}+0.28P_{10s}+0.08P_{50s})^{1/2} \quad (1)$$

여기서 백분위수인 $P_{0.1}$, P_{1s}, P_{3s}, P_{10s}과 P_{50s}은 관찰 기간동안의 시간에 0.1[%], 1[%] 3[%], 10[%] 및 50[%]를 초과하는 플리커 레벨이다. 접미사 "s"는 "smoothed value"를 나타낸다.

참고로 P_{st}=1.0은 50[%]의 사람들이 플리커를 감지하는 값이고, 단위는 pu(Perceptibility Units)이다.

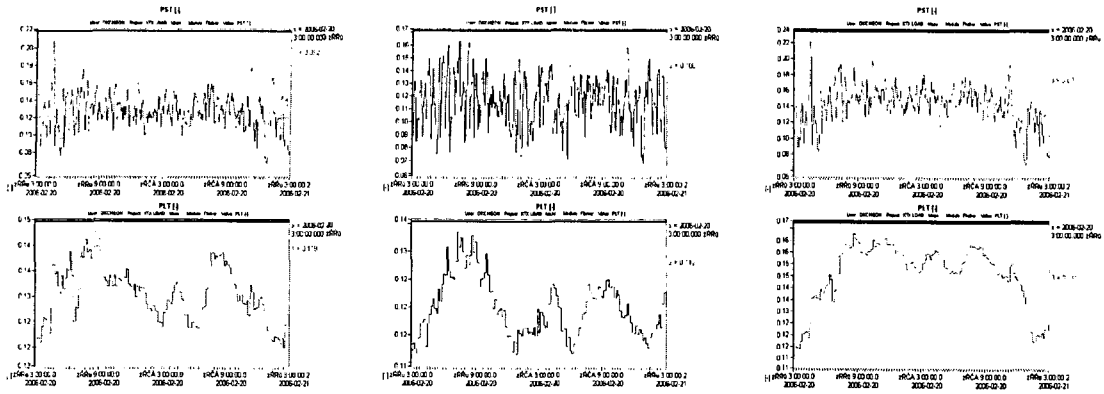
장기 플리커는 관찰주기 동안 1008개 이상의 단기 플리커 데이터에서 P_{lt}를 구하여 평가되고, 전기로와 같은 부하의 장기 평가에 적합하다. T_{short}이 10분일 때 T_{long}은 1주일에 대응한다.

$$P_{lt}=(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}P_{sti}^3)^{1/3} \quad (2)$$

여기서 P_{sti}(i=1, 2, …, N)는 단기 가혹성 P_{st}의 연속적인 측정값이다.

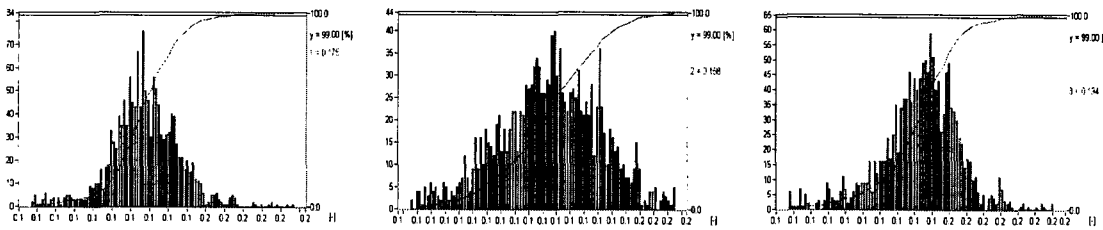
5.2 플리커 측정

24시간 동안 PNA-2010 장비로 측정한 플리커 데이터를 요약하면 그림 12~14와 같다.



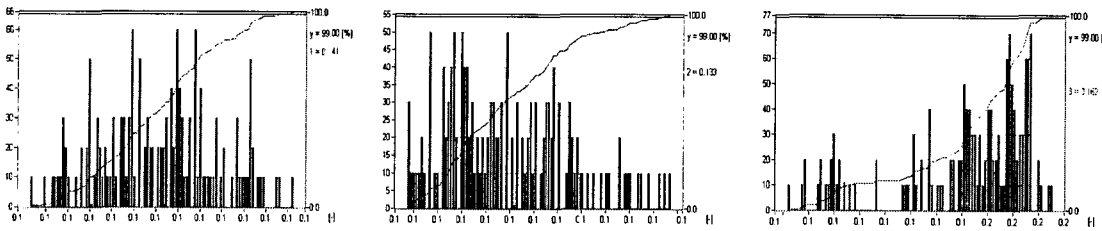
(a) A 상 (b) B 상 (c) C 상

그림 12. 측정된 Pst와 Plt의 시간 경향
Fig. 12. Measured Pst and Plt time trend



(a) A 상 (b) B 상 (c) C 상

그림 13. 측정된 Pst 누적확률분포도
Fig. 13. Measured Pst cumulative probability distribution



(a) A상 (b) B상 (c) C상

그림 14. 측정된 Plt의 누적확률분포도
Fig. 14. Measured Plt cumulative probability distribution

5.3 플리커 평가

그림 12에서 알 수 있듯이 플리커는 시간에 따라 변하는 특성을 가지고 있다. 이와 같이 시간에 따라 변하는 플리커를 평가하기 위해서는 누적확률을 사용한다. 95[%] 누적확률은 중압(1[kV] < [MV] ≤ 35[kV])에서의 적합성 레벨(Compatibility level)에서 쓰이고, 99[%] 누적확률은 고압(35[kV] < [HV] ≤ 350[kV])에 대한 Pst 및 Plt 한계값을 규정하는데 사용된다[7].

표 3은 플리커 평가를 IEC 기준에 따라 한 것이다.

표 3. 플리커 평가
Table 3. Flicker evaluation

Flicker index	IEC 61000-3-7 Planning levels	A상	B상	C상
Pst	0.8	0.175	0.158	0.194
Plt	0.6	0.141	0.133	0.162

평가 시 측정은 최소 1주일 이상을 IEC에서는 권장하고 있으나, 본 논문에서는 24시간 동안만 측정하였다. 플리커 평가 결과는 모두 IEC 기준값 이하였다.

참고로 한전에서는 플리커 지수 $\triangle V_{10}$으로 표시하여 1시간 평균치가 0.45[%] 이하로 규정하고 있다. $\triangle V_{10}$은 전압 변동이 10[Hz] 일 때의 등가 플리커이다. $\triangle V_{10}$ 기준은 주로 일본에서 사용했던 플리커 지수이고, 최근에는 IEC 기준으로 변환하는 추세이다.

6. 결 론

고속열차 부하는 견인 전동기를 구동하기 위한 컨버터와 인버터를 사용하고, 정지 및 가감속을 수시로 하는 변동 부하와 스코트 변압기, 단권변압기 등의 비선형 부하가 많아 고조파 발생이 심하고, 고조파가 시간에 따라 변하는 특성을 가지고 있다.

고조파 및 플리커 평가 기준의 원칙은 공통결합점에서 전력회사는 일정 수준 이하가 되도록 해야 하고, 수용가는 할당된 범위 내에서 고조파 및 플리커를 방출하여 전기 품질을 일정 수준 이상 유지해야 하는데 있다.

시간에 따라 변하는 고조파를 국제 기준에 따라 3초 측정 법칙을 적용하여 측정하였고, 고조파 평가는 95[%] 누적확률 값으로 하여 평가의 신뢰성을 높였다.

시간에 따라 변하는 플리커는 국제기준에 따라 10분 간격으로 24시간 동안 측정하였고, 플리커 평가는 99[%] 누적확률 값으로 하여 평가의 신뢰성을 높였다.

향후 시간에 따라 변하는 고조파 및 플리커를 측정하고, 평가하는 방법에 대한 연구를 지속적으로 하고, 고조파 및 플리커 저감 대책에 대한 연구도 수행할 계획이다.

본 연구는 전력산업 연구개발사업으로 수행되었음.

References

[1] 이장무, 창상훈, 외 6명, "경부고속철도 서울-내구 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] IEC 61000-4-15, "Flickermeter-Functional and Design Specification", 2003.
[4] PNA 2010, "Power Network Analyzer", Chauvin Arnoux Co., 2004.
[5] IEC 61000-3-6, "Assessment of Emissions Limits for Distorting Loads in MV or HV Power Systems", 1996.
[6] IEEE P519A "Overview of the guide for applying harmonic limits on power systems".
[7] IEC 61000-3-7, "Assessment of Emission Limits for Fluctuating Loads in MV and HV Power Systems", 2003.

◇ 저자소개 ◇

김경철 (金慶哲)
1954년 1월 20일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1977~1982년 국방과학연구소 연구원. 1982~1984년 NMSU 전기공학과 졸업(석사). 1984~1988년 UTA 전기공학과 졸업(박사). 1988~1991년 한국전기연구소 선임연구원. 1991년~현재 홍익대학교 전기공학과 교수.

김유준 (金有寯)
1982년생 7월 1일생. 2005년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2005년~현재 홍익대학교 대학원 전력계통 연구실 석사과정.