

KJ 도로터널시설물의 고조파 실측 및 평가

(Harmonics Measurement of Evaluation of KJ Road Tunnel Installations)

왕용필* · 김세동 · 유상봉

(Yong-Peel Wang · Se-Dong Kim · Sang-Bong Yoo)

Abstract

Nonlinear loads including lighting fixtures generate harmonic currents and create distortions on the sinusoidal voltage of the power system. Harmonic field measurements have shown that the harmonic contents of a waveform varies with time. A cumulative probabilistic approach is the most commonly used method to solve time varying harmonics. In this paper the time varying harmonics of lighting loads are evaluated by international harmonic standards(IEC 61000-3-6).

Key Words : Nonlinear Loads, Harmonic, Cumulative Probabilistic Approach, IEC 61000-3-6

1. 서 론

고조파에 관한 문제는 전력품질을 저하시킬 뿐만 아니라 전력 손실을 초래하는 등 많은 문제를 초래하고 있어 현장에서 일하고 있는 전기 기술자의 애로 사항이 커져가고 있다. 전기 사용 장소는 물론이고 전력 계통 설비에까지 고조파 문제가 확대되고 있는 반면 이에 관한 사고사례 조사 분석에 관한 보고자료가 미흡한 실정이다[1-2].

특히 도로 터널시설물에서도 안전 확보를 위해 각종 첨단 장비가 부가되어 인텔리전트화 되고 있다. 이러한 장비는 고도의 신뢰도를 유지하여야 하지만, 도로 시설물은 기본적으로 옥외의 매우 가혹한 환경과 각

종 장애요인의 물리적 스트레스 등으로 인하여 첨단 장비들이 그 성능을 제대로 유지하기 어렵다.

더욱이 고조파(harmonic), 순간 전압상승(voltage swell) 및 전압강하(voltage sag), 낙뢰 등으로 인한 오동작 및 기능 상실로 첨단 장비가 성능을 유지하기 어렵다. 고조파로 인한 왜곡된 전류파형은 에너지 손실 증가는 물론, 기기 오동작의 주요 원인이 되며 전체 시스템의 악영향을 주어 시스템의 마비를 초래할 수도 있다[3-4].

본 연구에서는 KJ 도로터널시설물에서 발생하는 고조파를 국제기준에 준하여 측정하고 국제기준에 의해 분석 평가하고자 하며, 이를 토대로 향후 설계단계에서 체계적으로 반영할 수 있는 방안을 검토하고자 한다.

2. 고조파 측정 분석

2.1 사례연구

KJ 터널의 주요 부하는 입구부, 기본부와 출구부의

* 주저자 : 한국전기산업연구원 선임연구원
Tel : 02-3219-0692, Fax : 02-3219-0559
E-mail : ypwang@erik.re.kr
접수일자 : 2011년 8월 16일
1차심사 : 2011년 8월 18일, 2차심사 : 2011년 9월 8일
심사완료 : 2011년 9월 19일

조명설비(형광램프와 고압방전등으로 구성)와 제트팬(37[kW]용량이며, 소프트스타터로 기동) 등의 설비로 구성되어 있다. 그림 1은 KJ 고속도로 터널시설물의 단선도를 나타낸 것이며, 고조파 측정점을 보여주고 있다.

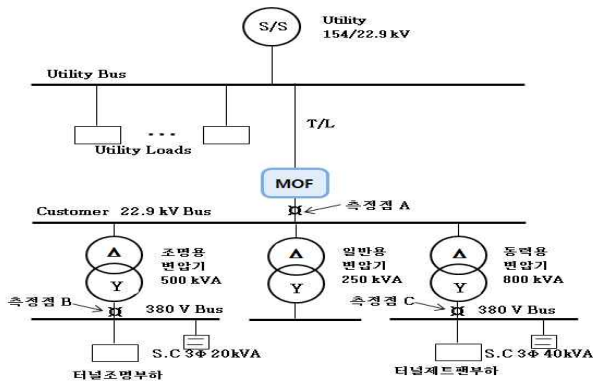


그림 1. 시스템 단선도
Fig. 1. One line diagram of system

고조파원에 대한 정확하고 신뢰성 있는 측정과 평가는 전력시스템의 고장과 오동작 등을 예방할 수 있게 할 뿐 아니라 수용가와 전력회사의 역할과 책임을 분담하게 한다. 수용가는 할당된 범위 내에서 고조파 전류를 방출하여 전력시스템의 전력품질이 일정 수준 이상 유지되어야 하고, 전력회사는 고조파 전압이 일정 수준 이하가 되도록 유지시켜야 한다.

2.2 평가기준과 측정 시간

고조파는 시간에 따라 변하므로 IEC 61000-3-6에서는 다음과 같은 기준을 정하고 있다[5].

- ① 하루 동안 측정된 3초 측정값의 누적확률 95 %가 계획 레벨을 넘지 않아야 한다.
- ② 일주일 동안 10분 측정값 중에 가장 큰 값이 계획 레벨을 넘지 않아야 한다.
- ③ 일주일 동안의 3초 최대 측정값이 계획 레벨의 1.5배를 넘지 않아야 한다.

그리고 고조파 수준을 평가하기 위해서 필요한 사항들이 KS C IEC 61000-4-7과 IEC 61000-4-30에서 정하고 있으며, 측정 시간을 다음의 형태로 구분하고 있

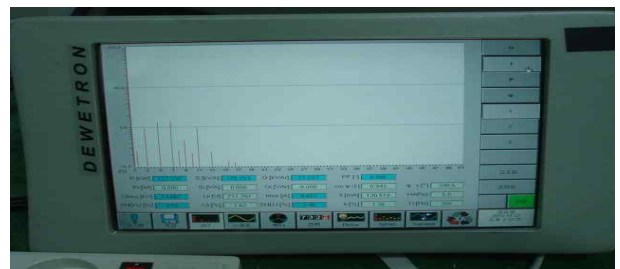
대[6-7].

- ① 아주 짧은 시간(very short interval) : 3초
- ② 짧은 시간(short interval) : 10분
- ③ 긴 시간(long interval) : 1시간
- ④ 하루(one day interval) : 24시간
- ⑤ 한 주(one week interval) : 7일

위의 구분은 IEC 61000-3-6의 기준을 평가하는데 필요한 데이터를 측정하고 저장하기 위해 사용되고 있다. IEC 61000-4-7에서 측정 시간을 “effective measuring time”과 “observation time”으로 구분하고 있는데, 전자는 측정해서 FFT하는 유효시간이고, 후자는 측정 사이의 간격까지 포함한 시간이다.

2.3 고조파 측정장비와 측정 방법

고조파 측정은 그림 1에서 보는 바와 같이 A, B, C 점에서 측정하였다. 고조파 측정장비는 PNA 560 및 C.A. 8352 2대를 사용하였다. 그림 2는 고조파 측정장비(PNA 560 및 C.A. 8352)을 보여주고 있다.



(a) PNA 560



(b) C.A. 8352

그림 2. 측정 장비
Fig. 2. Measuring equipments

Very short interval인 경우는 윈도우 크기를 12[cycle]로 측정하고, short interval인 경우는 매 6[s]마다 6[cycle]로 측정하여 10 분에 100개의 데이터 중에서 최소값, 평균값 및 최대값 등을 대표값을 저장하였다. 측정은 10월 23일과 24일 2일간 측정하였으며, 하루 중 터널조명 부하가 가장 많이 사용되는 오후 2시에서 5시 사이 및 아침 시간대에 측정하였다.

2.4 측정 및 분석

고조파가 시간에 따라 매우 빠르게 변하는 경우 측정은 전기설비의 순간 영향이나 보호기기의 오동작을 일으키는 원인을 추정하는데 사용된다. 고조파가 시간에 따라 다소 느리게 변하는 경우의 측정은 전기설비의 장기간 영향이나 기기의 소손 및 수명 감소의 원인을 추정하는데 사용된다. 고조파 수준을 파악하기 위하여 고조파 측정 장비를 설치하여 10분간 측정된 데이터를 정리하였다.

2.4.1 주변압기 1차측 측정

고조파 수준을 파악하기 위하여 실효값을 측정된 데이터는 표 1과 같고, 측정된 전압·전류 파형의 시간 경향은 그림 3과 같다. 10분간 전압 왜형률의 시간 경향 및 전류 왜형률의 시간 경향은 그림 4와 같다.

표 1. 주변압기 1차측 측정 데이터
Table 1. Measured data at main transformer primary

항 목	A상	B상	C상
전압[kV]	13.02	13.09	13.13
전류[A]	12.2	12.7	12.3
피상전력[kVA]	160	166	162
역률[%]	0.997	0.996	0.996
전압 왜형률[%]	4.207	4.235	3.987
전류 왜형률[%]	5.753	4.981	6.497

2.4.2 조명용 변압기 2차측 측정

고조파 수준을 파악하기 위하여 실효값을 측정된 데이터는 표 2와 같고, 측정된 전압·전류 파형의 시간

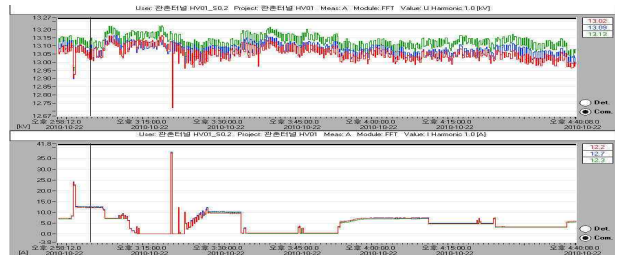


그림 3. 측정된 전압/전류 파형(A, B, C 상)
Fig. 3. Measured voltage and current (A, B, C phase)

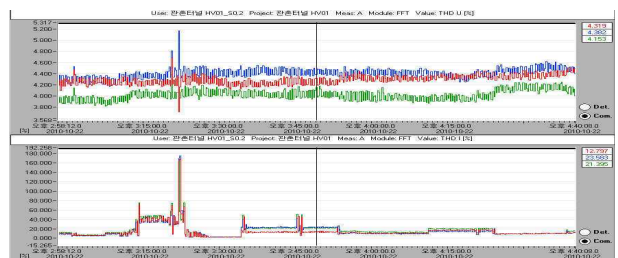


그림 4. 측정된 전압/전류 왜형률 시간 경향(A, B, C 상)
Fig. 4. Measured voltage and current THD (A, B, C phase)

표 2. 조명용 변압기 2차측 측정 데이터
Table 2. Measured data at lighting transformer secondary

항 목	A상	B상	C상
전압[V]	217.2	217.9	218.5
전류[kA]	0.4397	0.4597	0.4255
피상전력[kVA]	95.593	100.171	92.976
역률[%]	0.984	0.982	0.980
전압 왜형률[%]	2.555	2.221	2.360
전류 왜형률[%]	16.684	16.535	17.781

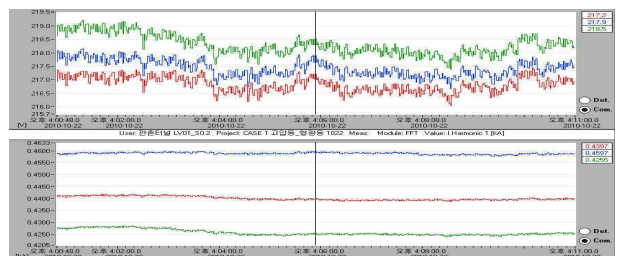


그림 5. 측정된 전압/전류 파형(A, B, C 상)
Fig. 5. Measured voltage and current (A, B, C phase)

KJ 도로터널시설물의 고조파 실측 및 평가

경향은 그림 5와 같다. 10분간 전압 왜형률의 시간 경향 및 전류 왜형률의 시간 경향은 그림 6과 같다.

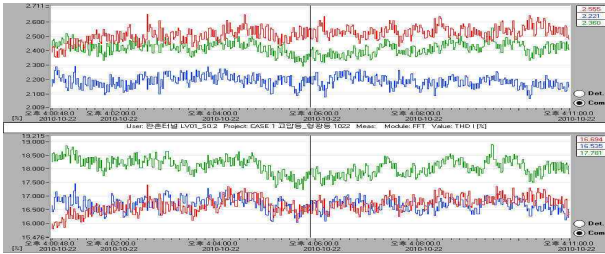


그림 6. 측정된 전압/전류 왜형률 시간 경향(A, B, C 상)
Fig. 6. Measured voltage and current THD (A, B, C phase)

2.4.3 동력용 변압기 2차측 측정

고조파 수준을 파악하기 위하여 실효값을 측정한 데이터는 표 3과 같고, 측정된 전압·전류 파형의 시간 경향은 그림 7과 같다. 10분간 전압 왜형률의 시간 경향 및 전류 왜형률의 시간 경향은 그림 8과 같다.

표 3. 동력용 변압기 2차측 측정 데이터
Table 3. Measured data at power transformer secondary

항 목	A상	B상	C상
전압[V]	216.3	216.6	217.1
전류[kA]	0.322	0.347	0.320
피상전력[kVA]	69.283	75.152	69.422
역률[%]	0.977	0.977	9.967
전압 왜형률[%]	1.451	1.482	1.422
전류 왜형률[%]	2.708	2.759	1.854

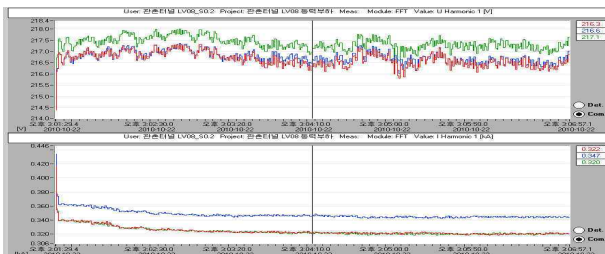


그림 7. 측정된 전압/전류 파형(A, B, C 상)
Fig. 7. Measured voltage and current (A, B, C phase)

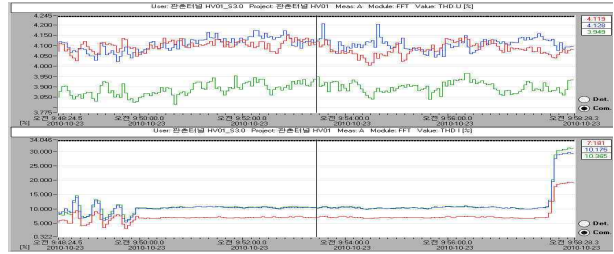


그림 8. 측정된 전압/전류 왜형률 시간 경향(A, B, C 상)
Fig. 8. Measured voltage and current THD (A, B, C phase)

3. 고조파 평가

고조파 전압 표 4의 IEC 61000-3-6의 적합성 레벨과 계획레벨을 바탕으로 하였고, 고조파전류 평가는 표 5를 사용하였다[5].

표 4. IEC 61000-3-6의 양립성과 계획 레벨
Table 4. Compatibility levels and Planning level of IEC 61000-3-6

홀수 고조파 (비 3배수)			홀수 고조파 (3배수)			짝수 고조파		
차 수	양립성 레벨	계획 레벨	차 수	양립성 레벨	계획 레벨	차 수	양립성 레벨	계획 레벨
5	6.0	5.0	3	5.0	4.0	2	2.0	1.6
7	5.0	4.0	9	1.5	1.2	4	1.0	1.0
11	3.5	3.0	15	0.3	0.3	6	0.5	0.5
13	3.0	2.5	21	0.2	0.2	8	0.5	0.4
17	2.0	1.6				10	0.5	0.4
19	1.5	1.2				12	0.2	0.2
23	1.5	1.2						
25	1.5	1.5						
THD(양립성, 계획) : (8.0, 6.5[%])								

표 5. IEC 61000-3-6에 의한 고조파 전류 평가
Table 5. Harmonic current evaluation by the IEC 61000-3-6

차수	5	7	11	13	$\sqrt{\sum I_h^2}$
limits I_h	5-8	3-4	1.5-3	1-2.5	6-8

3.1 주변압기 1차측

22.9[kV] 측에서 10분간 측정한 전압 왜형률의 누적 확률 값, 전류 왜형률 누적 확률값은 표 6 및 7과 같다.

측정한 고조파전압 평가 결과 순시치 측정값과 종합 THD가 IEC 계획레벨의 6.5[%] 보다 적게 발생되고 있음을 분석하였고, 종합 THD의 가장 큰 값은 B상으로 4.49[%]로 나타났다. 반면에 전기공급약관[8]에서는 공통결합점(Point of Common Coupling : PCC)점에서 전압왜형률이 3[%] 이내를 기준으로 정하고 있으므로 이를 초과한 것으로 나타났다[8].

표 6. IEC에 의한 고조파 전압 평가
Table 6. Harmonic voltage evaluation by the IEC

Order	A상	B상	C상
	95[%] CP	95[%] CP	95[%] CP
3	3.800	3.491	3.604
5	1.747	1.652	1.553
7	0.284	0.408	0.376
9	1.536	1.528	1.520
11	0.188	0.280	0.177
13	0.067	0.117	0.094
15	0.252	0.267	0.244
17	0.080	0.061	0.089
19	0.070	0.038	0.015
THD[%]	4.39	4.49	4.16

표 7. IEC에 의한 고조파 전류 평가
Table 7. Harmonic current evaluation by the IEC

Order	A상	B상	C상
	95[%] CP	95[%] CP	95[%] CP
3	9.993	19.502	16.675
5	30.392	25.774	32.368
7	13.055	9.521	15.320
9	5.036	2.977	4.357
11	3.269	3.533	2.520
13	2.615	2.730	2.253
15	1.279	1.731	2.117
17	2.189	1.785	2.262
19	1.327	1.208	1.922
THD[%]	35.82	34.05	41.65

실측한 고조파 전류를 표 5를 이용하여 평가한 결과 종합 THD가 6~8[%] 보다 전체적으로 매우 높게 나타났다, C상의 경우 종합 THD가 41.65[%]로 분석되었다. 그리고 고조파 중에서 제5차 고조파의 경우가 5~6[%] 보다 6배 이상 높게 나타났다, C상의 경우 32.368[%]로 나타났다. 전체적으로 차수별로 매우 높게 나타났다.

3.2 조명용 변압기 2차측

조명용변압기 2차측에서 10분간 측정한 전압 왜형률의 누적 확률값, 전류 왜형률 누적 확률값은 표 8 및 9와 같다. 부하 조건은 고압방전등과 형광램프를 전체 점등한 상태이다.

고조파전압 평가 결과 순시치 측정값과 종합 THD가 IEC 적합성레벨의 8.0[%] 보다 매우 적게 나타남을 분석하였고, 종합 THD의 가장 큰 값은 A상으로 2.58[%]로 나타났다.

표 5를 이용하여 고조파전류 평가 결과 종합 THD가 6~8[%] 보다 전체적으로 높게 나타났다, C상의 경우 18.48 [%]로 분석되었고, 종합 THD보다 높게 나타났다. 그리고 고조파 중에서 제5차 고조파의 경우가 5~6 [%] 보다 높게 나타났고, C상의 경우 11.398[%]로 분석되었고, 2배 이상 높게 나타났다.

표 8. IEC에 의한 고조파 전압 평가
Table 8. Harmonic voltage evaluation by the IEC

Order	A상	B상	C상
	95[%] CP	95[%] CP	95[%] CP
3	2.410	1.902	1.957
5	0.937	1.214	1.557
7	0.209	0.164	0.245
9	0.084	0.077	0.057
11	0.022	0.022	0.040
13	0.030	0.021	0.040
15	0.023	0.024	0.017
17	0.030	0.021	0.026
19	0.023	0.016	0.026
THD[%]	2.58	2.24	2.47

표 9. IEC에 의한 고조파 전류 평가
Table 9. Harmonic current evaluation by the IEC

Order	A상	B상	C상
	95[%] CP	95[%] CP	95[%] CP
3	15.008	13.776	14.877
5	8.375	10.280	11.398
7	0.591	0.584	0.0651
9	0.146	0.209	0.335
11	0.505	0.477	0.408
13	0.145	0.161	0.180
15	0.061	0.057	0.037
17	0.062	0.075	0.108
19	0.084	0.050	0.071
THD[%]	17.07	17.00	18.48

3.3 동력용 변압기 2차측

동력용변압기 2차측에서 10분간 측정된 전압 왜형률의 누적 확률값, 전류 왜형률 누적 확률값은 표 10 및 11과 같다. 부하조건은 제트팬 7대를 기동하고 맑은 날 기준 조명부하 전체 점등한 상태이다.

표 10. IEC에 의한 고조파 전압 평가
Table 10. Harmonic voltage evaluation by the IEC

Order	A상	B상	C상
	95[%] CP	95[%] CP	95[%] CP
3	3.439	3.526	3.303
5	1.749	1.563	1.434
7	0.429	0.478	0.512
9	1.648	1.732	1.749
11	0.250	0.315	0.172
13	0.148	0.185	0.185
15	0.292	0.284	0.299
17	0.072	0.103	0.106
19	0.075	0.053	0.029
THD[%]	4.17	4.20	3.98

고조파전압 평가 결과 순시치 측정값과 종합 THD가 IEC 적합성레벨의 8.0[%] 보다 적게 나타남을 분석

하였고, 종합 THD의 가장 큰 값은 A상이 4.17[%]로 나타났다.

표 5를 이용하여 고조파전류 평가 결과 종합 THD가 6~8[%] 보다 전체적으로 높게 나타났고, C상의 경우 15.94[%]로 분석되었다. 그리고 고조파 중에서 제5차 고조파의 경우가 5~6[%] 보다 높게 나타났고, C상의 경우 15.431[%]로 분석되었다. 또한 제13차 고조파의 경우에도 다소 높게 분석되었다.

표 11. IEC에 의한 고조파 전류 평가
Table 11. Harmonic current evaluation by the IEC

Order	A상	B상	C상
	95[%] CP	95[%] CP	95[%] CP
3	3.644	2.287	2.245
5	9.903	15.371	15.431
7	2.579	2.760	2.691
9	0.733	0.324	0.723
11	2.692	3.033	1.974
13	3.516	2.195	3.734
15	0.988	0.837	1.123
17	1.830	2.084	2.087
19	0.577	0.705	0.875
THD[%]	10.86	15.69	15.94

4. 결 론

KJ 터널의 전체적인 경향을 알아보기 위하여 1차측 (22.9[kV])에서 측정하였으며, 부하 조건별 경향을 알아보기 위하여 조명용변압기와 동력용변압기 2차측에서 측정하여 분석하였다. 측정 결과를 요약하면 다음과 같다.

측정 당시의 부하 조건이 가장 부하가 많이 걸리는 시간대를 기준으로 측정하였기 때문에 상시에 IEC 기준값에 초과한다고 볼 수가 없으며, 지속적인 관리가 필요한 것으로 사료되고, 정기적으로 실측하여 평가하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

상기의 측정 결과에 의하면, 고조파전압의 경우는 IEC 61000-3-6 및 전기공급약관[8]의 기준 범위 내에서 운전되고 있음을 확인하였다. 고조파전류의 경우

5가지의 부하조건 모두에서 기준 범위를 초과하는 것으로 측정 분석되었으며, 지속적인 관리가 필요한 것으로 사료되고, 정기적으로 실측하여 평가하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

도로터널의 부하 조건을 고려하여 불 때, 점검시에도 고조파의 왜형 정도는 확인할 수 있도록 계기용변성함(Metering Out-Fit) 2차측에 고조파의 상태를 감시할 수 있는 PQM(power quality meter)을 설치하는 것이 필요하다고 사료된다.

조명기기와 같은 고조파 발생원으로부터 고조파를 저감시키기 위해서는 KS C IEC 61000-3-2(전기자기 적합성(EMC)- 제3부 : 한계값 - 제2절 : 고조파전류 방출의 한계값(기기의 입력전류 상당 16[A] 이하), 2005[9]에서 정하고 있는 기준 이내로 제작될 수 있도록 하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

References

- [1] 한국전력공사 전력연구원, “배전계통 고조파 관리기준 연구”, 전력산업연구개발사업 최종보고서, 2005.
- [2] 한국전력공사 전력연구원, “송전계통 고조파 관리기준 및 해석기법 연구”, 전력산업연구개발사업 최종보고서, 2007.
- [3] 한국전력공사, 에너지관리공단, “고조파 사용실태 조사 및 개선 방안 연구”, 2002.
- [4] 김경철, 김유준, “실측에 의한 특고압 수용가의 고조파 평가에 관한 연구”, 조명·전기설비학회논문지, 제 21권 제3호, 2007년 3월.
- [5] IEC 61000-3-6, “Electromagnetic compatibility(EMC) - Part 3-6 : Limits - Assessment of Emission Limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems”, Edition 1.0 1996. 10.
- [6] IEC 61000-4-7, “Electromagnetic compatibility(EMC)- Part 4-7 : Testing and measurement techniques - General guide on harmonic and Interharmonic measurement and instrumentation for power supply systems and equipment connected”, Edition 2.0 2008. 06.
- [7] IEC 61000-4-30, “Electromagnetic compatibility(EMC)- Part 4-30 : Testing and measurement techniques - Power quality measurement method”, Edition 2.0 2008. 10.
- [8] 한국전력공사, “전기공급약관”, 2010. 11. 1.
- [9] IEC 61000-3-2, “Electromagnetic compatibility(EMC) - Part 3-2 : Limits - Limits for harmonic current emission(equipment with rated current ≤ 16 [A] per phase”, Edition 1.0 1995.

◇ 저자소개 ◇



왕용필 (王龍泌)

1966년 8월 25일생. 1992년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(박사) 1999~2001년 뉴질랜드 캔터베리대학 전기공학과 Post-Doc., 2002~2008년 동아대학교 전기공학과 초빙교수. 현재 한국전기산업연구원 선임연구원.
관심분야 : 스마트그리드 전기설비, 전력계통 전력품질, 전자기 과도현상



김세동 (金世東)

1956년 3월 3일생. 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1986년 동대학원 졸업(석사). 2000년 서울시립대 전기전자공학부 대학원 졸업(박사). 1979~1984년 한국전력공사 근무. 1984~1997년 2월 한국건설기술연구원 수석연구원 역임. 현재 두원공과대학 전기과 교수. 본 학회 부회장. 스마트그리드전기설비연구회 위원장.
관심분야 : 전기설비 설계·진단 및 DSP



유상봉 (庾相鳳)

1954년 10월 26일생. 1980년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1999년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1979~1997년 쌍용양회공업(주) 및 쌍용엔지니어링(주) 근무. 1993~1996년 기술사(건축전기설비, 발송배전, 전기응용, 전기안전, 소방). 1998년~현재 용인송담대학 조명인테리어과 교수(조명·전기설비 전공), 본 학회 부회장.
관심분야 : 조명·전기설비 설계, 전력설비 진단