

## 고조파가 누전차단기에 미치는 영향

(Effect of Harmonics on Residual Current Protective Devices)

전정채\* · 이상익 · 유재근

(Jeong-Chay Jeon · Sang-Ick Lee · Jae-Geun Yoo)

### 요 약

고조파에 의한 누전차단기 동작이 계속적으로 보고되어 왔으나 누전차단기 동작을 설명할 수 있는 자료가 없는 실정이다. 본 논문에서는 누전차단기에 대한 고조파 영향을 규명하기 위해 누전차단기 오동작 현황에 대한 조사 및 누전차단기 원인불명 동작이 자주 발생하는 건물에서 고조파를 측정 및 분석하였다. 또한 왜곡된 파형을 발생시킬 수 있는 고조파 합성장치를 이용하여 누전차단기 동작 특성을 시험하였다. 시험결과 3차 고조파가 기본파에 합성되었을 때 가장 작은 값의 누설전류에 누전 차단기가 동작되었고 기본파에 더해진 고조파 차수가 증가할 수 록 누전 차단기 동작전류는 증가하였다.

### Abstract

Tripping of residual current protective devices(RCPDs) caused by harmonics has been continuously reported, but no literature is available on the behavior of RCPDs caused by harmonics. This paper, in order to find out the effects of harmonics on RCPDs, investigated the present condition on malfunction of RCPDs and measured harmonics at buildings where nuisance tripping of RCPDs was often occurred. Also, the operational characteristics of RCPDs were tested by the harmonics synthesizer that can generate distorted waveform. Results of experiment detected that there was minimum tripping current of RCPDs when third harmonic added to the fundamental frequency. And it was found that the leakage current to cause tripping of RCPDs increased with more higher order harmonics added to the fundamental frequency.

Key Words : Malfunction, Residual current circuit breakers, Harmonic, Nuisance tripping

### 1. 서 론

누전차단기는(한국산업규격 KSC 4613에 의한 표

기-Residual Current Protective Devices Breaker : RCPDs-)는 저압전로에서 감전사고와 지락사고 등을 방지하기 위하여 누전차단기 설치규정에 따라 규정된 장소에 설치되어야 한다[1-2].

누전차단기는 감전 및 지락사고 예방이라는 중요한 역할을 담당하고 있지만 원인을 알 수 없는 오동작이 빈번히 발생하고 있다. 누전차단기의 오동작 또는 불필요 동작은 업무중단 등의 피해로 이어지고

\* 주저자 : 한국전기안전공사 전기안전연구원 연구원  
Tel : 031-580-3054, Fax : 031-580-3111

E-mail : cameleon@kesco.or.kr

접수일자 : 2006년 1월 27일

1차심사 : 2006년 2월 1일

심사완료 : 2006년 2월 13일

병원, 은행 및 방송·통신시설과 같이 전원의 신뢰성이 중요시 되는 장소에서의 누전차단기 오동작은 심각한 문제를 야기하게 된다. 이러한 이유로 누전차단기 오동작이 자주 발생하는 곳에서는 설치규정을 위반하여 배선용차단기로 교체하거나 직결하여 사용하는 사례가 나타나 전기화재 및 감전사고 등의 안전사고 발생의 위험성이 존재하게 된다.

그러나 누전차단기 오동작은 회로의 절연저항이 양호하게 나타나고(메가나 테스터기는 절연저항을 측정하게 되면 직류로 동작하므로 캐패시터가 충전된 후에는 양호한 저항 값을 보이게 된다), 오동작 재현이 어려워 원인조사 및 대책수립에 어려움을 겪게 된다. 특히 스위칭 전원장치를 사용한 부하기기의 내부 노이즈 필터에 의한 대지정전용량의 증가와 고조파로 인해 누설전류가 증가하게 되어 누전차단기가 불필요하게 동작된다고 알려져 있다.

고조파에 의한 누전차단기 불필요 동작은 그림 1의 회로에서와 같이 부하에 흐르는 전류  $I_L$ 는 차수별 고조파( $I_1$ : 기본파,  $I_3$ : 3차,  $I_n$ : n차)에 의해 식 (1)과 같이 계산되고 고조파와 대지정전용량에 의한 누설전류  $I_g$ 는 식 (2)와 같이 정전용량(C)과 주파수( $f_i$ )에 비례하여 증가됨으로써 누전차단기가 동작하게 된다.

$$I_L = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2} \quad (1)$$

$$I_g = \sqrt{\sum_{i=0}^n (2\pi f_i C V_i)^2} \quad (2)$$

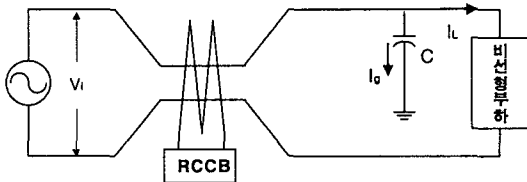


그림 1. 고조파에 의한 누설전류와 누전차단기 동작  
Fig. 1. Leakage current and RCBO trip by harmonics

본 논문에서는 고조파와 정전용량에 의해 실제로 누전차단기가 동작되기 위한 누설전류의 크기를 시험을 통해 규명함으로써 고조파가 누전차단기 동작

에 미치는 영향을 평가하고자 한다. 이를 위해 수용가의 누전차단기 오동작 현황을 설문조사하였고 누전차단기 오동작이 자주 발생하는 수용가에서 고조파를 측정 및 분석하였으며 고조파 차수 및 함유율에 누전차단기 동작특성을 시험하여 분석하였다.

## 2. 오동작 현황 및 전원품질 측정

누전차단기의 오동작 현황에 대해 자가용 수용가의 안전관리자 200명을 대상으로 조사한 결과 응답자중 78[%]가 오동작을 경험하고 있으며 이 중 25[%]는 노후화가 주요원인이라고 응답하였으며, 그 다음으로 원인불명 25[%], 고조파 등의 전원문제 22[%], 제품불량 21[%], 기타 9[%] 순으로 인식하고 있었다. 그리고 전원문제로 인해 누전차단기 오동작 발생빈도는 약 60[%]정도가 연 3회 이상 경험하는 것으로 조사되었다.

누전차단기 오동작이 자주 발생하는 수용가 15곳을 선정하여 RPM사의 전력품질분석기(Model : 1650)를 이용하여 1시간 동안 전원품질을 측정하고 고조파 발생 정도 및 파형왜곡 정도를 분석하였다. 고조파 측정결과 대부분의 장소에서 3고조파를 위주로 5고조파가 주로 발생하였으며 전압고조파 THD(Total Harmonic Distortion)는 대부분 5[%] 내·외 정도로 발생하였고 전류 THD는 대부분 20[%]이상 발생하는 것으로 나타났으며 표 1에 대표적인 전압 및 전류 고조파 측정결과를 나타내었다.

표 1. 전압 및 전류 고조파  
Table 1. Voltage and current harmonics

고조파 상	○○병원			○○빌딩			○○은행			○○학교		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
전류 THD	20	17	16	64	50	28	21	24	45	31	32	32
3차	7.9	5.6	1.6	52	41	22	14	13	35	24	25	25
5차	15	15	13	32	24	14	13	17	24	16	15	15
7차	9.4	5.2	7.8	13	9.7	8	5.8	9	12	9.4	9.9	9.9
9차	2.0	1.5	0.9	7	7.9	3.7	1.7	2.9	4.0	2.6	4.2	4.2
11차	0.6	0.2	0.7	8	4.7	2.2	4.1	1.3	5.0	4.6	6.3	6.2
13차	1.1	0.2	1.0	8	4.7	1.5	4.7	1.9	4.7	3.0	5.2	5.2
전압 THD	1.5	1.4	1.5	8.7	8.7	6.4	3.9	3.1	4.1	2.8	2.8	2.8
3차	0.5	0.9	0.8	7.1	7.7	5.6	1.6	1.2	1.6	1.1	1.0	1.0
5차	1.0	0.6	0.6	3.6	2.6	2.1	1.9	1.5	2.0	2.2	2.0	1.9
7차	0.4	0.4	0.9	1.4	1.7	1.4	2.0	1.8	2.0	0.7	0.9	0.9
9차	0.2	0.2	0.1	1.9	2.1	1.3	0.5	0.5	0.6	0.3	0.6	0.6
11차	0.2	0.2	0.2	1.5	0.9	0.7	0.5	0.4	0.7	0.7	0.9	0.9

## 고조파가 누전차단기에 미치는 영향

다음으로 전압 및 전류파형의 왜곡 정도를 나타내는 요소인 crest factor를 조사하였다. Crest factor는 피크 값과 RMS 값의 비로 전류의 경우 식 (3)으로 표현되며 이상적인 값은 1.414이다.

$$\text{crest factor} = \frac{I_{Peak}}{I_S} \quad (3)$$

이러한 crest factor 값이 1.414보다 작을 경우는 전압 및 전류파형의 최대치가 함몰되는 플랫 탑핑(Flat-topping) 현상이 발생하고 1.414 이상이 되었을 경우는 파형의 최대치가 뾰족해지는 현상이 발생하게 되어 릴레이가 오동작 하거나 의료장비 및 정밀 실험장비의 경우 실험시마다 데이터가 틀려지는 문제점이 발생할 수 있다.

Crest factor 측정결과 3곳의 수용가의 전류 crest factor가 2 이상을 나타냈고 전체 수용가 평균은 1.8 정도로 조사되었으며 최소값과 최대값은 각각 1.44와 2.19로 나타났다. 전압 crest factor는 대부분 1.3~1.47사이로 조사되었으며 최소값과 최대값은 각각 1.28과 1.47로 분석되어 이상적인 값 1.414에 근사한 값을 보여주었지만 crest factor가 낮은 사무용 빌딩들에서는 그림 2에서 같이 전압 파형의 끝이 납작해지는 플랫 탑핑 현상들이 발생하였다.

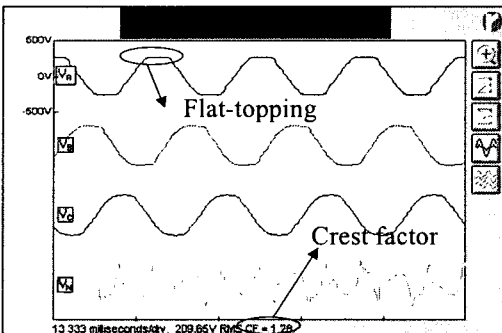


그림 2. 플랫탑핑  
Fig. 2. Flat topping

## 3. 누전차단기 시험 규격 조사

우리나라의 누전차단기 표준규격은 KSC 4613이며 누전차단기에 요구되는 성능 및 시험규정 등을

정의하고 있다. KSC 4613에 의하면 정격 부동작 전류는 정격 감도 전류의 50[%]이상(다만, 정격 감도 전류가 10mA 이하인 것은 60[%]이상)으로 규정되어 있다[1].

또한 우리나라에서는 누전차단기 관련 국제 규격 IEC 61009-1에 대해 기술적 규격 및 서식을 변경하지 않고 KS 규격으로 제정하여 사용하고 있으며 이와 더불어 누전차단기 관련 국제규격으로는 IEC 61008-1 및 IEC 61543이 있다[3-5].

IEC 61008-1은 누전차단기에 관한 일반 요구사항으로 부속서 H(규정)에 누전차단기의 전자기 적합성(Electromagnetic Compatibility : EMC) 요구 사항의 적합성 확인을 위한 시험항목 및 추가 시험절차 등에 대해 규정되어 있으며 IEC 61543에 EMC 성능 및 시험 조건이 규정되어 있다. 이중 누전차단기의 고조파 시험규격은 IEC 61543에 현재 검토중인 것으로 조사되었다.

## 4. 시험방법

누전차단기의 고조파 영향을 평가하기 위해 IEC 61008-1의 누전차단기 동작특성을 검증하기 위한 회로를 참고로 하여 그림 3과 같이 실험회로를 구성하였다. 기본파에 고조파를 합성시키고 전원의 크기를 달리하기 위해 PACIFIC사의 5[kVA]급 Programmable AC power source(모델 : 345[AMX])를 사용하였다. 이 장비는 임의적으로 파형을 합성시킬 수 있고 고조파 차수별 함유량을 조절할 수 있다. 그림 3의 회로에서 가변콘덴서는 0.5~10[μF]까지 0.5 [μF] 단위로 크기를 조절할 수 있도록 하였다. 그리고 누전차단기가 동작되는 누설 전류를 측정하기 위해 클램프형 누설 전류계(모델 : Hioki 3263)를 사용하였으며 정전용량은 콘덴서를 이용하여 조절하였다.

고조파 발생장치에 의해 누전차단기에 공급되는 전원은 기본파에 단일 고조파가 더해진 합성 파형(3차, 5차, 7차 및 9차 고조파 성분의 50[%]까지)과 두 개 이상의 고조파가 합성된 파형을 사용하였다.

고조파의 영향을 평가하기 위한 시험에 사용된 시료는 표 2에서와 같이 동일한 동작 특성을 갖는 10종의 2극형 누전차단기가 사용되었다.

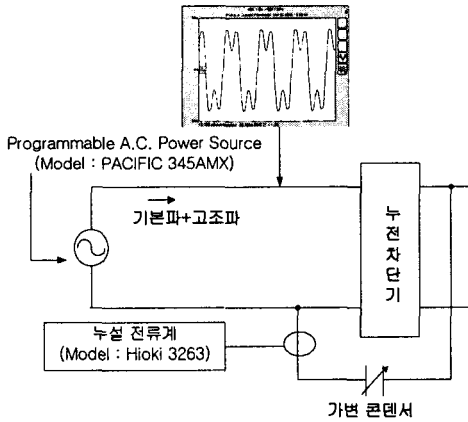


그림 3. 누전차단기 시험회로  
Fig. 3. Test circuits for RCCBs

표 2. 누전차단기의 사양  
Table 2. Specifications of the RCCBs

시 료	A, B, C, D, E, F, G, H, I, J(10종)
정격 전압/전류	AC 110[V] / 220[V], 30[A]
정격 감도전류	30[mA]
정격 부동작 전류	15[mA]
동작 시간	0.03초
동작 형태	전류 동작형
기 타	과부하 및 단락보호 겸용, 충격과 부동작형

## 5. 시험 결과 및 분석

### 5.1 기본파에 대한 동작 특성

기본 주파수(60[Hz])에서 정전 용량에 의해 동작하는 누전차단기 동작 전류를 시험한 결과 30[mA] 누전차단기 시료 전체가 표 3에서와 같이 22.5~24.7[mA] 정도로 우리나라의 누전차단기 표준규격 KSC 4613에 만족하는 것으로 분석되었다.

표 3. 기본파에 의한 누전차단기의 트립 전류  
Table 3. Tripping currents of the RCCBs by fundamental frequency

단위 : [mA]

시료명	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
주파수										
기본파(60Hz)	24.2	24.7	24.2	22.7	22.7	22.9	23.2	22.8	23.9	22.5

### 5.2 단일 고조파에 대한 동작 특성

기본파 전압에 단일 고조파가 더해진 합성파형을 이용해 고조파 차수와 함유량에 따른 누전차단기 동작 전류를 시험하였다. 먼저 3차 고조파가 기본파에 더해졌을 때 전형적인 특성이 그림 4에 나타났다. 그림 4에서 알 수 있듯이 3차 고조파가 15~25[%] 정도일 때 가장 작은 값의 누설전류에서 누전차단기가 동작하였다. 즉 3차 고조파가 15~25[%] 정도 존재할 때 기본파만 존재할 경우(그림 3에서 3차 고조파 함유율이 "0"일 경우)보다 약간 빨리 동작 된다는 것을 알 수 있다. 하지만 3차 고조파가 존재할 경우의 동작전류는 누전차단기 규격인 KSC 4613에서 명시한 부동작 전류 50[%]를 만족하는 것으로 나타났다.

다음으로 기본파에 5차 또는 7차 또는 9차 고조파까지 최대 50[%]까지 더해진 합성파형을 이용하여 누전차단기 동작전류를 조사하였고 그림 5와 6에 대표적인 결과를 나타내었다. 그림 5는 5차 고조파 함유량에 따른 누전차단기 동작하기 위한 누설전류로써 고조파 함유량이 높아질수록 누설전류가 점차 증가하고 있는 것으로 분석되었다. 그림 6은 7차 고조파 함유량에 따른 누전차단기 동작하기 위한 누설전류로써 5차 고조파보다 더 높은 동작전류 값을 보여주고 있었고 9차 고조파가 존재할 경우에는 누전차단기 동작전류값은 더욱 커졌다. 즉 고조파 차수가 높아지고 함유량이 많아질 수록 누전차단기가 동작되는 누설전류값은 증가하였다.

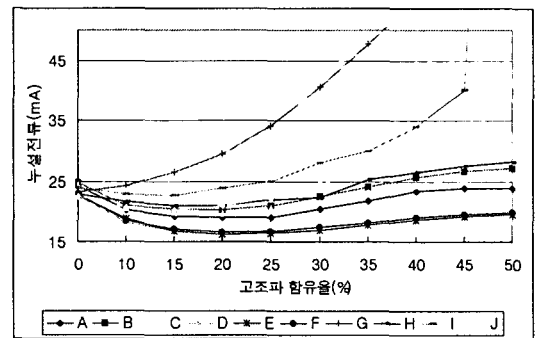


그림 4. 3차 고조파에서 누전차단기 동작 전류  
Fig. 4. Tripping current of RCCBs at 3rd harmonics

고조파가 누전차단기에 미치는 영향

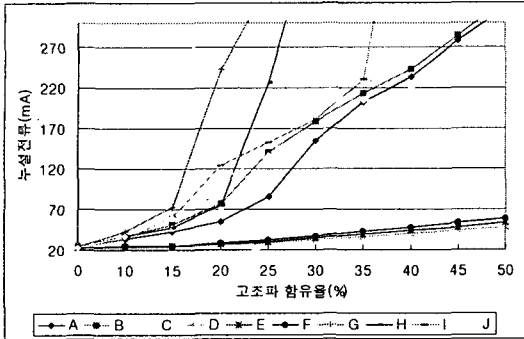


그림 5. 5차 고조파에서 누전차단기 동작 전류  
Fig. 5. Tripping current of RCCBs at 5th harmonics

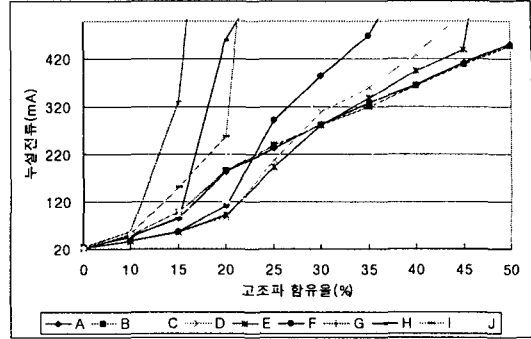


그림 6. 7차 고조파에서 누전차단기 동작전류  
Fig. 6. Tripping current of RCCBs at 7th harmonics

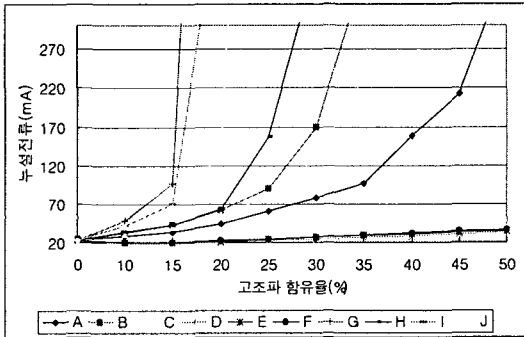


그림 7. 3 및 5차 고조파에서 누전차단기 동작전류  
Fig. 7. Tripping current of RCCBs at 3rd and 5th harmonics

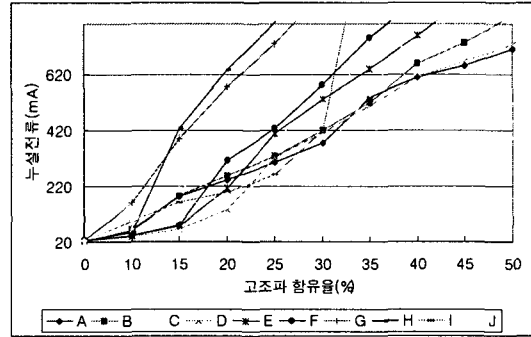


그림 8. 5 및 7차 고조파에서 누전차단기 동작전류  
Fig. 8. Tripping current of RCCBs at 5th and 7th harmonics

5.3 복수 고조파에 대한 동작 특성

기본파에 두 개 이상의 고조파가 합성되었을 때 누전차단기의 동작 특성을 시험하였다. 고조파의 크기는 각 차수별로 10~50[%]까지 고조파 발생장치를 이용하여 합성하였다. 그림 7과 8에는 대 표적으로 3차 및 5차 그리고 5차 및 7차 고조파의 함유율에 따른 누전차단기가 동작 되는 누설전류를 보여주고 있다. 그림 7과 8에서 알 수 있듯이 복수 고조파가 합성되었을 때는 누전차단기가 동작 하기 위한 누설전류(동작전류)는 고조파 함유율에 따라 증가하였다.

표 4. 고조파에 의한 누전차단기의 최소 동작 전류

Table 4. Minimum tripping currents of the RCCBs by harmonics

단위 : {mA}

고조파	시료	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
기본파(60Hz)		24.2	24.7	24.2	22.7	22.7	22.9	23.2	22.8	23.9	22.5
3차		19	20.2	19.7	16.3	16.2	16.6	24.3	20.9	22.6	20.5
5차		33.2	36.5	35.6	23.4	24	24.7	42.8	37.2	33.5	37
7차		43.9	48.2	46.2	35.4	36.2	37.2	56.2	46.5	50	52.5
9차		59	65	65.5	45.3	46	47.5	132	58	112	90
3 및 5차		27.6	32.7	31.4	18.8	19.4	19.4	48.2	32.9	41	40.3
5 및 7차		60.4	64	63	39.6	42.2	42.8	160	55.1	95	97.3
7 및 9차		114	131	144	66	67.2	69.6	×	160	×	390
3, 5 및 7차		60.5	158	64.5	46	46	46	180	63.4	145	92
5, 7 및 9차		89.5	89.4	99	67	65.5	68	278	88	123	100
3, 5, 7 및 9차		130	160	160	×	×	×	×	195	875	513

\* "×"표시는 1000mA 이상에서 누전차단기가 동작되는 경우

## 5.4 고조파에 따른 최소 동작전류

고조파 차수별 누전차단기가 최소 동작전류(누설전류)는 3차 고조파를 제외하고는 고조파 차수별 함유율이 10[%]인 경우에 나타났고 고조파의 차수가 높아질수록 누전차단기의 최소 동작전류는 표 4에서 보는 바와 같이 점차 높아졌다. 그리고 5차 고조파가 10[%]만 합성되었을 때 보다는 3차, 5차 고조파가 각각 10[%]씩 합성되었을 때 누전차단기가 더 작은 누설전류에 동작하는 것으로 조사되었다. 또한 표 4에서와 같이 일부 누전차단기의 경우(표 4에서 X 표시)에는 기본파에 복수 고조파가 합성되었을 경우 상당한 크기의 누설전류가 흘러야 누전차단기가 동작되는 것으로 나타났다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 고조파에 의한 누전차단기 동작특성을 평가하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

① 3차 고조파가 15~25[%]정도 기본파에 포함되었을 때 누전차단기는 기본파만 존재할 때보다 더 작은 누설전류에서 동작하였다.

② 고조파가 증가할수록 누전차단기 동작 누설전류는 점차 증가하였다.

③ 두 개 이상의 고조파가 존재할 경우 고조파 차수가 높거나 고조파 함유량이 많아질수록 누전차단기가 동작하기 위한 누설전류값은 증가하였다.

이러한 결과에서 알 수 있듯이 기본파에 3차 고조파가 선로에 존재할 때는 기본파만 존재할 때보다 더 작은 누설전류(대지정전용량에 의한 누설전류)에서 누전차단기가 동작되어 오동작 또는 원인불명 동작이 발생할 수 있다. 고차 고조파의 경우에는 누전차단기 내부의 필터회로(노이즈제거회로)로 인하여 대부분의 경우 누전차단기가 동작되기 위해서는 대지정전용량에 의한 누설전류가 상당한 크기로 흘러야 되므로 고조파 차수가 높고 함유량이 높을수록 고조파에 의한 누전차단기 동작은 거의 발생할 가능성이 없는 것으로 나타났다. 따라서 단상부하를 주로 사용하는 빌딩과 같이 3차 고조파가 주로 발생하

는 장소에서는 하므로 누전차단기 불필요 동작을 겪을 수 있으므로 고조파 발생에 대한 주의가 필요하며 누전차단기에는 3차 고조파에 대응할 수 있는 내부 필터회로를 삽입하여야 할 것이다.

본 연구는 전력산업기반기금 전력산업연구개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## References

- (1) KSC 4613 : 누전차단기, pp. 1~22, 2002.
- (2) 대한전기협회, "내선규정", pp. 134~138, 2003.
- (3) KSC/IEC 61009-1 : 가정용 및 이와 유사한 설비의 과전류 보호용 누전 차단기-제1부 : 일반요구사항, pp. 1~100, 2002.
- (4) IEC 61008-1 : Residual current operated circuit-breakers without integral overcurrent protection for household and similar uses(RCCBs)-Part 1 : General, pp. 1~255, 2002.
- (5) IEC 61543 : Residual current operated protective devices(RCDs) for household and similar uses-Electromagnetic compatibility, 1~19, 1995.

## ◇ 저자소개 ◇

### 전정채 (金正采)

1971년 6월 8일생. 1997년 원광대학교 전기공학과 졸업. 1999년 원광대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 연구원.

### 이상익 (李尙益)

1968년 12월 9일생. 1994년 호서대학교 전기공학과 졸업. 1996년 호서대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 건국대학교 대학원 박사과정 수료. 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원.

### 유재근 (俞在根)

1965년 12월 5일생. 1990년 건국대학교 전기공학과 졸업. 1992년 건국대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992~1996년 대우전자 연구소 근무. 현재 건국대학교 대학원 박사과정 수료. 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 책임연구원.