

노후화된 누전차단기의 과전류 동작 특성에 관한 연구

박예진¹ · 강신동² · 김재호^{3*}

A Study on the Operating Characteristics of the Aged ELCB according to the Overcurrent

Ye Jin Park¹ · Sin Dong Kang² · Jae-Ho Kim^{3*}

¹Corresponding Author

Jae-Ho Kim

Tel : +82-42-280-2593

E-mail : jkim@dju.kr

Received : September 4, 2023

Revised : October 12, 2023

Accepted : October 16, 2023

Abstract : This study analyzes the operational characteristics of 311 aged and non-aged residual current circuit breakers (RCCBs) in low-voltage consumer contexts. It investigates the influence of external temperature and harmonics based on the rated current multiples. To simulate temperature variations, a convectional oven was used around the circuit breakers. Additionally, the generation of harmonic reference signals and data measurement for overcurrent experiments were conducted using NI SCXI, myDAQ, and LabVIEW. An observation revealed that as the ambient temperature increased, the operating time of RCCBs decreased in the time delay region. This was attributed to the faster response or bending of the bimetal, which is the tripping element. However, aged RCCBs encountered challenges with tripping outside the protective curve. The operating time of the circuit breakers exhibited an acceleration influenced by the order and content of harmonic currents, potentially leading to malfunctions. Aged RCCBs demonstrated faster operating times than their non-aged counterparts. However, the difference in operating time varied based on the manufacturer's and operating environment of the RCCBs. Frequent malfunctions of RCCBs can result in power outages. In cases where these circuit breakers fail to operate, they can lead to secondary damages, including electrical fires and shocks. Consequently, it is imperative to consider the operating environment of RCCBs and provide appropriate replacement cycles to mitigate these risks.

Key Words : ELCB, low-voltage circuit breaker, aged, operating characteristic, current Harmonics, frequency

Copyright©2023 by The Korean Society of Safety All right reserved.

1. 서론

전기에너지의 사용이 증가됨에 따라 이로 인한 화재 및 감전 등의 전기재해뿐만 아니라 최근에는 산불 등의 원인으로 작용하여 사회적 재난으로까지 확대되는 문제점이 발생 되고 있다. 이와 같은 전기적인 재해를 예방하기 위해 발전에서 송전 및 배전의 과정을 거쳐 수용가에 전달되기까지 고도화된 보호시스템이 서로 협조하고 있다. 전기에너지를 소비하는 저압 부

하측의 경우 일반적으로 분전반에는 과전류 및 누전을 차단하기 위한 목적으로 배선용 및 누전차단기를 설치하고 있다. 누전차단기는 전기설비에서 발생될 수 있는 인체의 감전사고와 누전 및 과전류로 인한 화재로부터 전기재해를 예방하기 위해 한국전기설비규정 211.2.4(누전차단기의 시설) 및 산업안전보건기준에 관한 규칙 제 304조(누전차단기에 의한 감전방지)에서 설치하도록 규정하고 있다. 누전차단기의 적용 범위, 정격 및 구조 등에 관한 내용은 한국 산업 표준 KS C

¹대전대학교 소방방재학과 석사과정 (Department of Fire & Disaster Prevention Engineering, Daejeon University)

²대전대학교 소방방재학과 박사과정 (Department of Fire & Disaster Prevention Engineering, Daejeon University)

³대전대학교 소방방재학과 교수 (Department of Fire & Disaster Prevention Engineering, Daejeon University)

4613, KS C 4621에 기술되어 있다. 산업용 누전차단기의 국제 표준은 KS C IEC 60947-2을 기초로 하고 있고, 주택용 누전차단기의 국제 표준은 KS C IEC 61008-1, 61009-1을 기반으로 하고 있다¹⁾. 우리나라의 경우 산업화가 시작된 1980년대부터 설치되기 시작했으며, 지금 현재의 경우 저압 수용가에 누전차단기를 시설하도록 규정하고 있다. 고압의 전압이 인가되어 있는 수·배전반의 경우에는 전기사업법에 따른 자체적인 검사를 통해서 검사 결과 보고가 진행되고 있으나 자가용전기설비, 공동주택 및 저압 수용가의 경우는 전기안전관리법에 따른 정기적으로 점검이 이루어지지 못하는 문제점이 발생 되고 있다. 또한, 차단기의 교체주기에 대한 규정이 명확히 제시되어 있지 않아 노후화되어 있음에도 불구하고 교체하지 못하고 있는 것이 현재의 상태이다. 이는 온도 및 습도 등의 외부 환경에 노출되어 외함의 파손 및 부식으로 인한 점점의 고착, 탄성의 소실 등과 같은 손상을 유발할 수 있다. 특히 도전성 먼지 및 수분 등의 오염은 기계적 성질의 저하뿐만 아니라 절연체가 도체화 되는 트래킹 현상과 같은 전기적인 열화를 가속화 시켜 화재, 감전 및 정전 등의 전기재해가 발생될 수 있다^{2,3)}. 이에 누전차단기의 노후화에 따른 화재위험성과 연관된 선행 연구들을 검토해본 결과, 노후화로 인하여 차단기의 고장률은 증가하며 사용되는 환경의 조건(온도, 습도, 진동 등)에 따라 설비의 성능 및 차단기 고장률에 영향을 미치는 것을 확인하였다^{4,5)}. 또한 수용가의 설비 및 계통이 복잡해지면서 차단기 회로에 고조파의 발생으로 일어날 수 있는 오동작 및 그에 따른 방지를 위한 연구들이 진행되었다⁶⁾. 이에 따라 외부 환경 및 고조파는 차단기의 노후화 및 고장 등의 직접적인 원인으로 작용될 수 있을 것으로 사료된다. 전기안전공사에서 제시한 최근 5년간 아파트 정전사고 현황에 따르면 20년 이상이 경과된 아파트에서 저압용 차단기 고장으로 인한 정전 발생이 높은 것을 알 수 있다. 배선용 차단기의 과전류 및 고조파에 의한 동작 특성에 관한 연구는 최근까지도 이루어지고 있으나^{7,8)}, 누전차단기의 노후화 및 고조파에 따른 동작특성에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 환경조건에 따른 누전차단기의 동작특성을 분석하기 위해 대류건조기를 이용하여 누전차단기의 주변온도를 상승시켰다. 이와 같은 환경 조건에서 정격전류 배수의 증가율 및 고조파 차수와 함유율에 따른 동작 특성을 분석하였을 뿐만 아니라 현장에서 수거된 노후화된 차단기의 동작특성과 비교 분석 하였다.

2. 본론

2.1 차단기의 동작원리

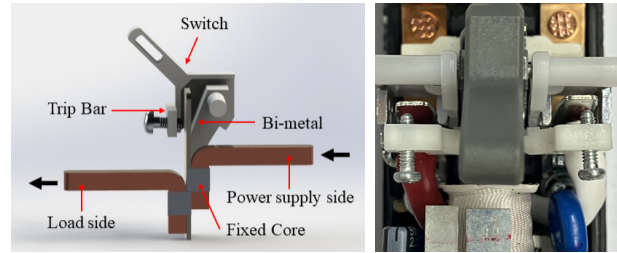


Fig. 1. Overcurrent protection structure of thermal Magnetic type circuit breaker.

누전차단기는 누전 및 과전류를 차단할 수 있는 기능을 가지고 있다. 누전 차단 방식은 누설전류가 발생하면 영상변류기(zero current transformer)를 통해 검출하여 검출된 신호를 증폭하여 트립 코일을 통해 차단기가 동작한다. Fig. 1은 누전차단기의 과전류 차단(열동 전자식)을 위한 내부 구조를 나타내고 있다. 과전류 차단방식에는 열동식, 열동 전자식, 완전 전자식 등이 있으며⁹⁾, 열동 전자식은 정격전류이상의 과전류가 통전될 경우 열팽창률이 서로 다른 두 개의 금속을 결합한 바이메탈의 활곡으로 점점에 도달하게 되어 Trip Cross Bar를 움직이면서 차단기가 동작한다. 누전차단기는 제조사와 모델에 따라 동작 특성의 차이가 있다.

국내의 경우 누설전류에 의한 차단 동작은 KS C 4621 및 KS C 4613에 제시되어 있으며, 감전 보호용 누전차단기의 경우 정격감도 전류에서 동작시간이 0.03초 이내에 동작하도록 규정하고 있다. 과전류에 의한 차단 동작은 단락 및 지락 등의 고장이 발생할 경우 고장전류의 크기에 따라 차단 시간의 차이가 발생하는 한시요소와 단시간 내에 차단 동작이 발생하는 순시요소를 가지고 있다. 과전류 차단 동작은 IEC 60255 보호 곡선을 기반으로 하고 있으며, 정격전류 배수에 따라 한시요소와 순시요소를 나타낸다. 차단기의 정격전류 배수(측정 전류값)에 따라 차단기의 보호곡선에 적합한 매개변수를 식 (1)에 적용하여 차단동작 시간을 도출한다.

$$t(s) = \left(\frac{A}{\frac{I}{I_s} - 1} + B \right) \cdot k \quad (1)$$

여기서 I는 측정 전류값, I_s는 설정 전류값, k는 TMS(Time Multiplier Setting)이다. 그리고 A와 B는 곡선 유형 상수로 표의 값을 나타낸다. Table 1은 차단기 보호

Table 1. Parameters of circuit breaker protection curve

Curve name	A	B	k
IEC Standard Inverse	0.14	0.0	0.02
IEC Very Inverse	13.5	0.0	1.0
IEC Extremely Inverse	80.0	0.0	2.0
IEC Long Time Inverse	120	0.0	1.0

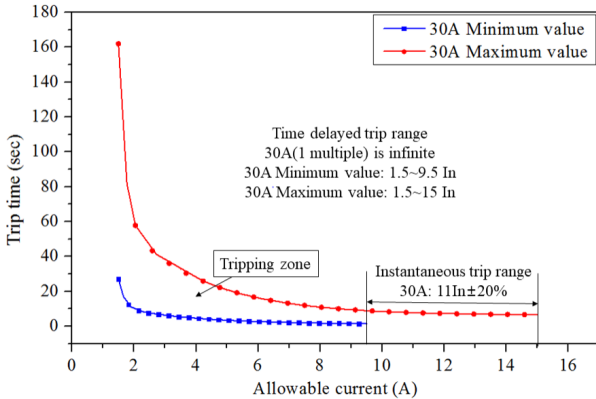


Fig. 2. Protection curve of circuit breaker.

곡선의 매개변수를 나타내고 있다. 정격전류의 배수와 차단 동작 시간은 반비례하며 기울기에 따라서 표준 반한시(Standard Inverse), 강반한시(Very Inverse), 초반한시(Extremely Inverse), 장반한시(Long time Inverse)가 있다.

Fig. 2는 IEC 60255 보호곡선을 통해서 과전류 통전에 따른 산업용 누전차단기의 동작시간에 대한 적절성을 분석하기 위해 정격전류 30 A(2p)를 기준으로 정격전류 배수에 따른 최댓값과 최솟값을 식(1)에 적용하여 도출된 차단 동작 그래프이다. 정격전류 30 A일 때 무한대의 차단 시간을 나타내고 있다. 보호곡선의 최댓값은 정격전류의 1.5배(45 A)에서 15배(450 A)이며, 최솟값은 1.5배(45 A)에서 9.5배(285 A)를 나타내고 있다. 순시트립 특성은 산업용 누전차단기의 경우 강제시험 규정이 아니며¹⁰⁾, 주택용 누전차단기의 경우 강제시험 규정으로 시험전류의 상한값에 대해 시험 하도록 2018년도에 개정되었다. 형태에 따른 순시트립 범위는 한국 전기설비규정 212.3.4 보호 장치의 특성에 제시되어 있으며, 형태에 따라 정격전류 3배 ~ 20배 사이에서 동작해야 한다. 보호곡선의 최소·최댓값 범위 내에서 차단기가 동작할 경우 과부하, 단락 등으로부터 회로를 보호 할 수 있다.

2.2 온도상승에 따른 누전차단기의 동작특성

Fig. 3은 온도에 따른 누전차단기의 동작 특성을 분석하기 위한 실험 구성도이다. 실제 차단기 회로에 통전되는 전류는 교류이지만 선행 연구⁸⁾를 통해 직류와

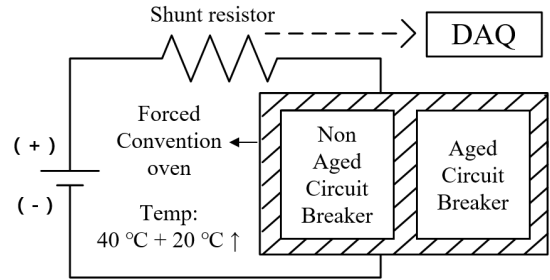


Fig. 3. Experimental setup according to temperature.

교류의 동작 시간의 차이는 미미하였기 때문에 직류전원공급 장치(580 A, 8 V)를 사용하여 차단기에 직류 전류를 통전시켜 실험을 진행하였으며, LabVIEW 프로그램과 데이터 수집 장치를 사용하여 동작시간을 정량적으로 측정하였다. 또한 KS C 4613에 따르면 누전차단기의 기준온도는 40°C이며, 그 이상의 온도가 되었을 때 차단기의 성능저하 및 고장의 원인이 될 수 있기 때문에 대류조기기를 사용하여 40°C부터 20°C씩 상승시켜 40°C, 60°C, 80°C, 100°C, 120°C, 140°C에서 누전차단기의 동작특성을 분석하였다. 실험의 타당성을 확보하기 위해서 3번 반복 실험을 진행하였다.

Fig. 4는 온도 변화에 따른 노후화 되지 않은 누전차단기의 동작 시간 그래프이다. 정격전류의 2배인 60 A에서 상온에서의 차단시간이 46 s로 가장 늦게 차단 동작 하였으며, 온도가 증가할수록 누전차단기의 차단시간이 빨라진 것을 확인할 수 있다. 온도 상승은 도체의 부식을 촉진하며, 도체의 탄성이 저하된다¹¹⁾. 따라서 온도가 상승함에 따라 과전류 차단요소인 바이메탈이 과전류가 흐르지 않음에도 불구하고 활곡되어 차단시간이 빨라지는 것으로 사료된다. 정격전류의 배수가 상승할수록 온도에 따른 차단 동작 시간의 차이가 짧아졌다. 또한 정격전류의 5배(150 A)일 때 140°C에서의 차단 동작 시간이 약 1초로 가장 빠르게 차단되었다.

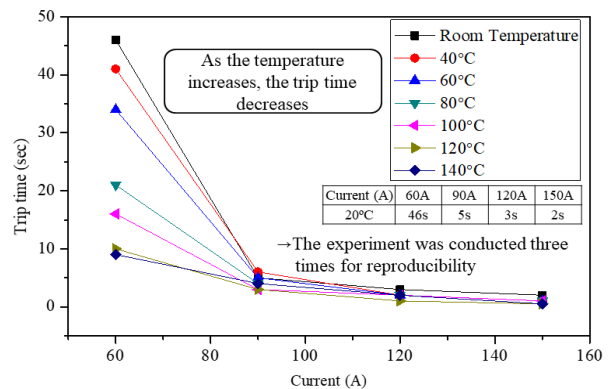


Fig. 4. Trip time of non-aged circuit breaker according to the temperature.



Fig. 5. Aged circuit breakers collected from all parts of Korea.

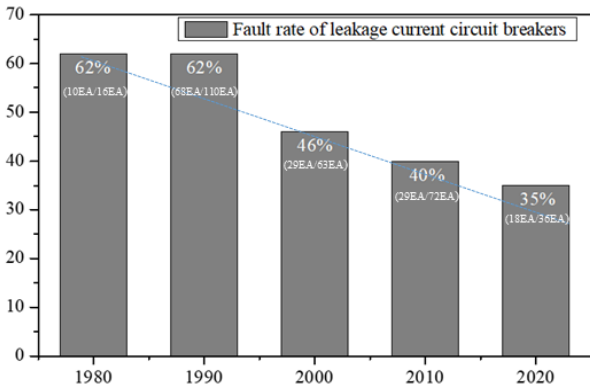


Fig. 6. Failure rate of circuit breakers.

정격전류의 2배(60 A)일 때의 차단 동작 시간은 보호곡선의 최소·최댓값 범위 내에서 동작하였으며, 정격전류의 3배(90 A) 이상부터는 차단기 보호곡선의 최소·최댓값 외에서 동작한 것을 확인하였다.

Fig. 5는 전국에서 저압 수용가에서 사용된 311개의 차단기이며 그 중 울산 17개, 인천 7개, 경기 33개를 나타내고 있다.

Fig. 6은 전국에서 저압 수용가에 사용된 311개의 누전차단기를 동작 시험했으며, 제작년도에 따른 고장률을 보여준다. 제작년도가 30년 이상 된 차단기의 누전 차단기는 110개 중 68개로 고장률은 62%로 가장 높게 나타났으며, 2000년에는 63개 중 29개로 고장률이 46%로 감소하였다. 등가수명이 증가함에 따라서 고장률도 비례하는 것을 확인할 수 있다. 이는 한국전기안전공사에서 제시하고 있는 교체주기인 10~15년¹²⁾, IEEE에서 제시하는 15~20년의 교체주기와 비슷한 결과이다¹³⁾.

노후화된 차단기의 기본적인 누전에 의한 차단 동작이 가능한 차단기의 시료를 선택하여 온도에 따른 동작특성 실험을 진행하였다. Fig. 7은 온도 변화에 따른 1990년대, 2000년대, 2010년대의 노후화된 차단기의 동작시간을 비교한 그래프이다. 연도별로 차단기 시료를 3개씩 선택하여 실험을 진행하였다. 정격전류 2배(60

A)를 통전시켰을 경우에 차단기의 동작시간이 약 20초로 동일한 시료를 선택하여 실험결과의 타당성을 확인하였다. 보호곡선에서 정격전류의 2배일 때 차단기의 차단 동작시간은 10초 이상에서 동작하여야 한다. 하지만 노후화된 차단기는 노후화되지 않은 차단기와 비교하면 한시영역에서 10초미만으로 동작시간이 빨라지는 것을 확인할 수 있다. 또한 1990년대와 2010년대의 누전차단기는 외부 온도가 100°C 이상부터는 보호곡선의 최소·최댓값 외에서 차단되었고 2000년대 누전

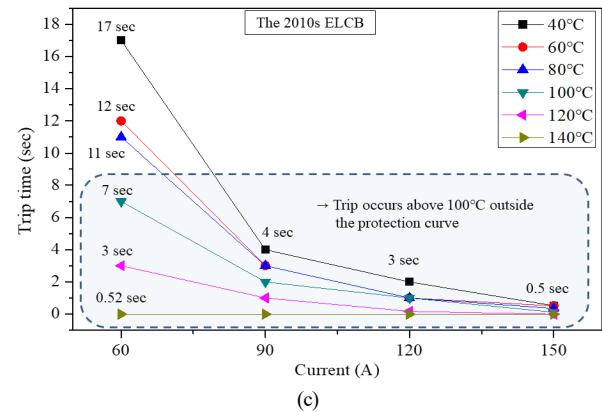
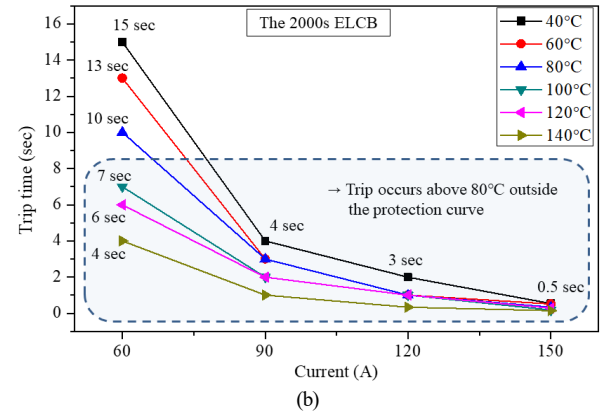
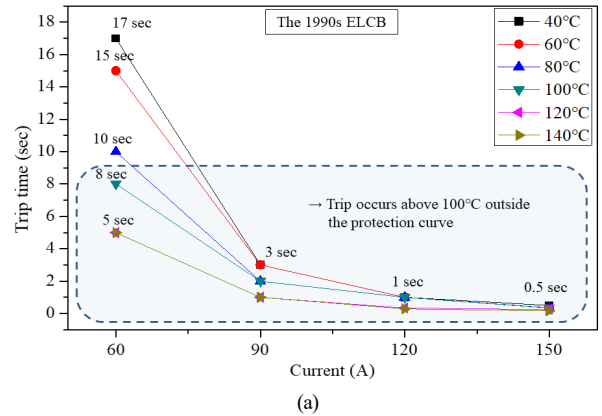


Fig. 7. Trip time of aged circuit breaker according to the temperature. (a) 1990s (b) 2000s (c) 2010s.

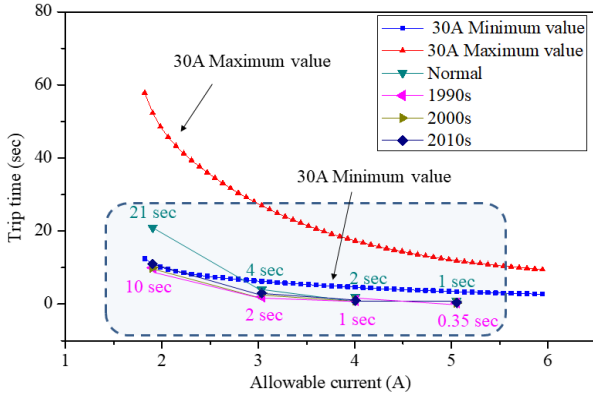


Fig. 8. Comparison of trip time by years on the protective curve of a circuit breaker.

차단기는 80°C 이상부터 보호 곡선 최소·최댓값 외에서 차단되었다. 노후화된 차단기가 사용된 환경과 손상 및 부식 정도의 차이로 인하여 차단기의 일부는 손상되어 동작하지 않았다. 이를 통해서 차단기가 노후화됨에 따라 차단기의 내부 바이메탈의 부식 등이 원인으로 작용하여 차단기의 오동작을 유발한 것으로 사료된다.

Fig. 8은 차단기의 보호 곡선을 기반으로 노후화된 차단기와 노후화되지 않은 차단기의 차단 동작 시간을 온도 80°C에서 비교한 그래프이다. 노후화되지 않은 차단기는 보호 곡선의 최솟값 이상에서 동작하는 것을 알 수 있으며, 노후화된 차단기는 보호 곡선의 최솟값보다 짧은 시간에 동작한 것을 알 수 있다. 이를 통하여 노후화된 차단기는 주변 온도의 영향으로 인하여 차단 동작 시간이 빨라지면서 잦은 정전이 발생할 우려가 있으며, 차단기의 오동작으로 인하여 화재 위험성이 증가할 수 있을 것으로 사료된다.

2.3 고조파 전류에 따른 누전차단기의 동작특성

고조파는 기본 주파수인 60 Hz에 대해 정수배의 주파수 성분이며, 고조파가 포함된 파형은 비정현파로 나타난다. Fig. 9는 고조파 전류에 따른 누전차단기의 동작특성을 분석하기 위한 실험 구성도이다. 저압 수용가에서 가장 빈도가 높은 차수로 3, 5 홀수 고조파가 나타났다⁵⁾. 따라서 LabVIEW 및 NI myDAQ를 이용하여 60 Hz 기본파의 진폭을 생성하고 기본파의 정수배 주파수 3(180 Hz), 5(300 Hz), 7(420 Hz), 9(540 Hz) 고조파 차수와 10%, 20%, 30% 함유율을 합성하였다. 생성된 입력신호를 전류증폭기(Current amplifier, 20 V/700 A)를 통해 고조파 전류의 파형을 출력 및 증폭시켰으며, 누전차단기에 정격전류 배수의 과전류를 통전시켰다. 정격전류 이내와 정격전류의 2배(60 A)부터 5배

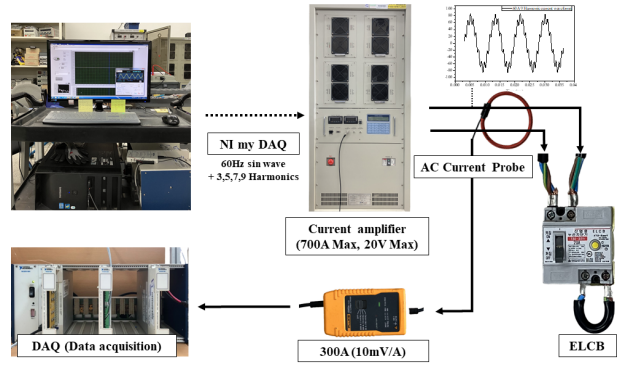


Fig. 9. Experimental setup according to harmonics.

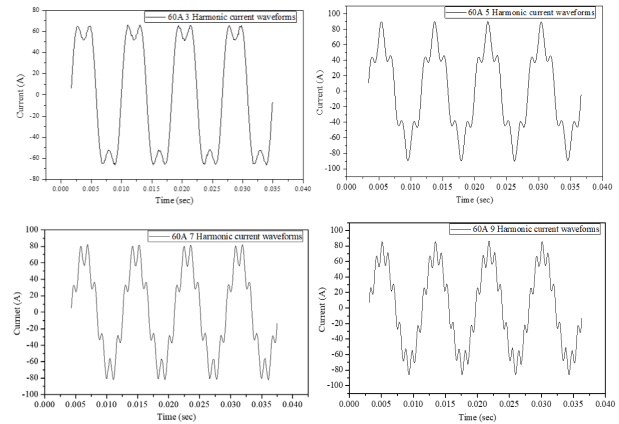


Fig. 10. Harmonic waveforms of 3rd, 5th, 7th, and 9th order with a distortion factor of 30%.

(150 A)까지 전류의 진폭을 설정하였다. 교류전류프로브(AC Current Probe, i2000 Flex)를 사용하여 고조파 전류를 측정하였으며, 데이터 수집 장치(NI SCXI-1001)를 통해서 누전차단기의 차단 동작시간을 분석하였다.

Fig. 10은 기본파에 30% 함유율을 가진 3, 5, 7, 9 고조파를 합성한 파형을 나타낸 그래프이다. 전기설비기술기준 38조에 의하면 배선용차단기의 정격전류가 30 A 이하인 경우에 2배의 전류를 통전하면 2분 내에 자동적으로 동작해야 한다¹⁴⁾. 따라서 NI myDAQ를 이용하여 고조파를 합성하고 노후화되지 않은 누전차단기에 정격전류의 2배인 60 A의 전류를 통전시켰다. 고조파의 차수 및 함유율이 높아질수록 파형의 왜곡이 심해지는 것을 확인할 수 있다.

30 A인 정격전류 배수 이내에서 고조파 차수와 함유율에 따른 실험을 진행한 경우에 60분 이내에서 차단기가 동작하지 않았다. Fig. 11은 정격전류 배수에 따른 60 Hz 기본파와 3고조파의 10%, 20%, 30% 함유율이 포함되었을 때의 노후화되지 않은 누전차단기의 차단 동작시간을 비교한 그래프이다. 정격전류의 1.5배(45 A)일 때 차단시간은 228초, 3고조파의 10%일 때

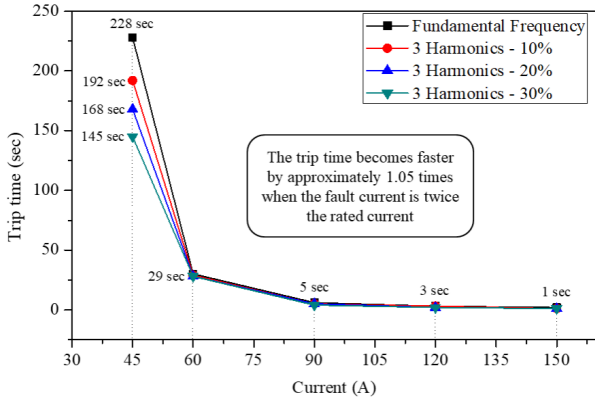


Fig. 11. Trip time of the non-aged circuit breaker according to the 3 harmonic.

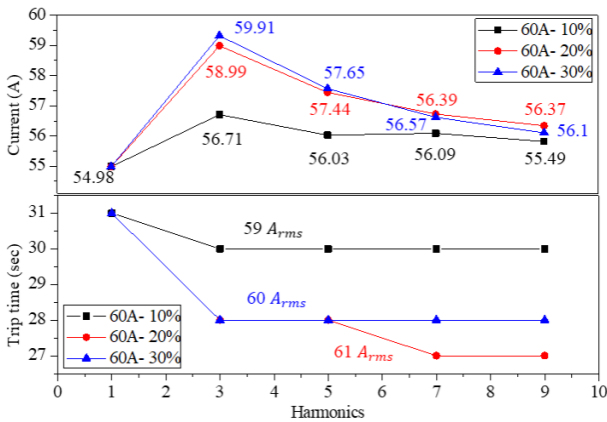


Fig. 12. Integration value of one cycle of the 3rd order harmonic waveform.

192초, 20%일 때 168초, 30%일 때 145초로 기본파 대비 약 1.05배 차단시간이 빨라졌다. 특히 정격전류의 2배인 60 A부터는 기본파와 고조파 간의 차단 동작시간 차이가 크지 않았다. 이는 고조파의 영향 보다는 과전류의 영향으로 차단 동작이 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 정격전류의 2배인 60 A에서 고조파 함유율에 따른 각 고조파 파형의 1주기 크기를 비교한 그래프이다. 고조파의 함유량이 차단 동작시간에 미치는 영향을 분석하기 위하여 파형의 1주기의 적분값을 계산하여 비교하였다. 10%일 때 59 Arms, 20%일 때 60 Arms, 30%일 때 61 Arms로 함유율이 높을수록 전류값이 커졌으며, 차단시간이 짧아졌다. 또한 10%일 때 30초, 20%일 때 27초, 30%일 때 28초로 함유율이 가장 작은 10%일 때 차단 동작 시간이 가장 길었다. 5, 7, 9 고조파일 때 함유율이 20%와 30%의 차단 동작시간의 차이는 약 1초 차이로 미미한 것을 알 수 있다. 5고조파 파형의 1주기 적분값을 비교하면 20%일 때 57.44,

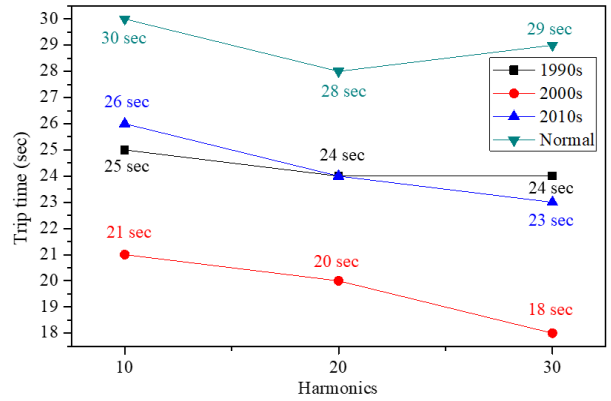


Fig. 13. Comparison of the trip time of aged circuit breaker by years.

30%일 때 57.65로 적분값의 차이가 매우 작은 것을 확인하였다. 차단 동작시간이 빨라질수록 파형의 1주기 적분값이 증가된 것을 알 수 있다. 특히 3 고조파의 함유율이 30%일 때 파형의 적분값이 59.91로 가장 높은 것을 확인하였다. 이는 차단기에 투입되는 에너지의 크기가 클수록 차단기의 동작시간에 가장 많은 영향을 미치는 것을 의미한다.

Fig. 13은 정격전류 배수의 2배(60 A)를 통전시켰을 때 1990년대, 2000년대, 2010년대의 노후화된 차단기와 노후화되지 않은 차단기의 3고조파 차수에 따른 함유율 10%, 20%, 30%를 비교한 그래프이다. 노후화된 차단기는 노후화되지 않은 차단기와 비교하여 차단 동작 시간이 빨라진 것을 확인할 수 있다. 또한 고조파 함유율이 높아질수록 차단 동작 시간이 빨라진 것을 확인하였다. 2000년대 제작된 누전차단기의 동작시간이 1990년도에 제작된 차단기 동작시간 보다 짧은 것을 확인할 수 있다. 이는 차단기가 사용되는 환경 및 제조사에 따라 동작시간에 영향을 미칠 수 있음을 나타내고 있다.

5. 결론

본 연구는 저압 수용가에서 실제로 사용된 노후화된 차단기와 노후화되지 않은 차단기를 외부 온도와 고조파의 영향에 따른 동작특성을 정격전류의 배수에 따라 비교·분석 하였다. 누전차단기에 정격전류의 배수가 통전될 때 주변 온도가 상승함에 따라 차단 동작 시간이 바이메탈의 활곡으로 빨라지는 것을 확인하였다. 노후화된 차단기는 과전류를 차단할 때 사용하는 바이메탈의 금속 부식으로 노후화되지 않은 차단기보다 차단 동작시간이 빨라지는 것으로 사료된다. 노후화된 차단기의 외부 온도가 100°C 이상부터는 차단기의 보

호곡선 외에서 차단되었으며, 일부 차단기는 스위치가 소손되어 동작하지 않았다. 차단기의 외부 온도 상승으로 차단기의 오동작 발생이 증가함에 따라 화재 위험성도 증가할 것으로 사료된다. 차단기의 오동작을 유발시키는 고조파 전류의 차수와 함유율에 따른 영향으로 차단기의 차단 동작시간이 빨라지는 것을 확인하였다. 3 고조파에 함유율이 30%일 때 차단시간이 28초로 가장 짧았으며, 이와 같은 현상이 발생한 이유는 차단기에 투입되는 에너지의 크기가 가장 크기 때문이다. 노후화된 차단기는 제조사 및 사용된 환경에 따라 차단 동작시간은 차이가 있었으며 함유율이 높아짐에 따라 차단 동작시간이 짧아진 것을 확인할 수 있었다. 따라서 정전 및 화재 등의 전기재해를 예방하기 위해서는 노후화된 차단기의 교체 주기를 적절히 제시해야 될 것으로 사료된다.

Acknowledgement: This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (Mist) (NRF-2022R1A2C1004599).

References

- 1) “KS C 4613”, “KS C 4621”, “IEC 60947-2: Low Voltage Switchgear and Control Gear -Part2: Circuit Breakers”, “IEC 61008-1: Residual Current Operated Circuit-breakers without Integral Overcurrent Protection for Household and Similar Uses (RCCBs) Part 1: General Rules”, “IEC 61009-1: Residual Current Operated Circuit-breakers with Integral Overcurrent Protection for Household and Similar Uses (RCBOs) - Part 1: General Rules”, 2022.
- 2) S. M. Park, “A Study on the Composite Electrical Fire Hazard by Partial Disconnection and Tracking”, Master’s Thesis, Graduate School Hoseo University, pp. 11-13, 2015.
- 3) W. S. Ko, “A Study on the Evaluation of the Characteristics of a Resistive Leakage Current System Installed in a Distribution Panel”, Master’s Thesis, Graduate School Jeonju University, pp. 1-59, 2017.
- 4) C. C. Thompson and C. I. Barriga, “Relationship Between Historical Trends, Equipment Age, Maintenance, and Circuit Breaker Failure Rates,” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 55, No. 6, pp. 5699-5707, 2019.
- 5) S. D. Kang and J. H. Kim, “A Study on the Physical Characteristics of the Low-voltage Circuit Breaker Based on the Accelerated Degradation Test”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 37, No. 6, pp. 1-8, 2022.
- 6) M. G. Choi, B. H. Jeong, J. C. Park, H. G. Kim, H. S. Mok and G. H. Choe, “Analysis of Active Characteristic the Low-voltage Circuit Breaker for Harmonics”, Proceedings of the KIEE Conference. The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 1474-1476, 2005.
- 7) J. G. Yoo, S. I. Lee and J. C. Jeon, “Survey on the Malfunction of MCCB and ELB in Private Electrical Facilities”, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 19, No. 2, pp. 87-93, 2005.
- 8) D. W. Jung and J. H. Kim, “A Study on the Operating Characteristics of Molded Case Circuit Breakers according to Temperature Rise”, J. Korean Soc. Saf., Vol. 30, No. 5, pp. 8-13, 2015.
- 9) J. C. Jeon, J. G. Yoo and S. I. Lee, “Operating Characteristics of Molded Case Circuit Breakers by Harmonic Currents”, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 20, No. 2, pp. 68-74, 2006.
- 10) K. M. Park, J. H. Kim, J. Y. Park, S. J. Hong and S. B. Bang, “Analysis of the Operating Characteristics of the ELB for House by Short Circuit Test”, Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers’s Autumn Conference of the Electrical Equipment Division, pp. 111-112, 2019.
- 11) K. C. Kim, D. H. Kim, S. C. Kim and J. H. Kim, “Analysis of Thermal Characteristics and Insulation Resistance Based on the Installation Year and Accelerated Test by Electrical Socket Outlets”, Safety and Health at work, Vol. 11, Issue 4, pp. 405-417, 2020.
- 12) Korea Electrical Safety Corporation, “The Development of Low Voltage Circuit Breaker about life Improvement & The Selection of Optimum Replace Cycle”, 2008.
- 13) “IEEE Approved Draft Recommended Practice for the Selection, Field Testing, and Life Expectancy of Molded Case Circuit Breakers for Industrial Applications”, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017.
- 14) Korea Electric Equipment Technical Standard, <https://kec.kea.kr>, 2021.