

직렬아크고장 전류에 의한 전선 발화 특성 분석을 통한 아크고장 검출 기술의 개발

임용배·전정채·배석명·김태극*
한국전기안전공사 전기안전연구·(주)KEP

Development of Arc-Fault Detecting Technique
through Analysis of Wire Ignition behavior by Series-Arc-Fault Currents

Lim Young-Bae · Jeon Jeong-Chay · Bae Seok Myung · Kim Tae-Kuek*
Electrical Safety Research Institute, KESCO · *KEP, Inc.

Abstract - In 2007, 9,128 fires are attributed to electrical equipments. These fires resulted in 29 deaths and 262 injuries. Arc-faults were one of the major causes of these fires. When an unintended arc-fault occurs, it generates intense heat that can easily ignite surrounding combustibles. Conventional circuit breakers only respond to overloads, short circuits, and leakage currents. Therefore, the breakers do not protect against arcing conditions. This paper presents results obtained in experiments on ignition behavior of wire by series arc fault currents and techniques developed to detect the arc-faults. The developed technique was tested after installation to make sure they are working properly and protecting the circuit. If the developed arc detecting technique is applied, the electrical fires caused by an arc-fault can be reduced.

일반적인 사용 조건에서는 전로부터의 발열량이 매우 적어 출화될만큼 온도가 극도로 상승하지는 않는다.

그러나 전선의 허용전류보다 큰 전류를 흘리거나, 발생한 줄열의 발산이 저하된 경우, 또는 배선 접속부의 접촉저항이 증가된 경우 등에는 줄열에 의한 온도 상승이 현저하여 출화 요인이 될 수 있다. 또한 설계된 전로 이외의 경로로 전류가 흘러 그 경로의 금속접합부 및 유기절연체에 형성된 단락경로에서 발생하는 줄열도 역시 출화의 요인이 된다.

2007년에 발생한 47,882건의 화재 중 전기에 의한 것이 10,560건으로 22.1%를 점유하고 있다. 그중에서 차량, 선박, 항공기에서 발생한 전기화재를 제외하면, 9,128건으로 19.1%를 점유하고 있으며, 29명의 사망자와 262명의 부상자가 발생하였고, 재산피해액은 59,788백만원이 발생하였다. 이런 전기화재의 주요 원인은 그림 1과 같이 57.8%의 단락에 의해서 발생되고 있다.[2]

그러나 이런 단락이나 과부하, 누전에 의한 전기화재를 예방하기 위해 배선용차단기와 누전차단기가 설치되고 있으며, 거의 모든 전기설비의 보호체계에 포함되어 있으나 여전히 발생되고 있는 실정으로 가장 큰 원인은 아크고장에 있다.

1. 서 론

전기설비에서의 전기적인 고장은 과도한 기계적인 스트레스나 열악한 운전 환경, 제조·시공 불량, 경년 열화, 관리 소홀 등에 의해 발생되며, 전기화재나 감전사고와 같은 재해로 진전될 수 있다.

이와 같은 전기재해의 예방을 위해 일반용전기설비는 전기사업법 제66조 및 동법 시행규칙 제35조에 근거하여, 법정주기에 따라 절연저항, 인입구배선, 옥내배선, 누전차단기, 개폐기, 접지저항 등의 항목에 대한 정기점검을 실시하고 있다.[1]

그러나 이런 정기점검에 의해 확인되지 않는 전로의 불완전한 접속에 대한 고장이 존재할 수 있으며, 접속저항 증가에 의한 줄열(Joule's heat)이나 아크를 통해 출화되기도 하고, 절연체를 손상시켜 단락이나 지락과 같은 고장모드로 전이되기도 한다.

결과적으로 법에 규정된 정기점검을 철저히 실시함에도 불구하고 이런 확인되지 않은 잠재된 고장이 존재하기 때문에, 누전차단기와 배선용차단기에 의해 충분히 보호되고 있다고 추정되었던 수용가에서도 전기화재가 발생하게 되었다. 실제로 국내는 전체화재의 20% 이상을 전기화재가 점유하고 있다. 이는 기존의 보호체계의 범위를 벗어나는 전기적 고장이 존재하고 있음을 시사하는 것이다.[2]

따라서 본 논문에서는 직렬아크 고장전류에 따른 전선의 발화특성 실험을 통해 직렬아크고장에 대한 출화의 가능성을 확인하였다. 특히 UL 1699의 5A이상의 직렬아크고장 전류의 동작 규정보다 작은 3A에서도 전선의 출화 가능성을 확인하였고, 이 결과를 토대로 아크고장 검출보드를 개발하였으며, 아크고장 전류에 대한 동작시험을 실시하여 3A의 아크고장 전류에 대한 검출의 신뢰성을 확인하였다. 또한 다양한 아크고장과 유사한 전류 파형을 갖는 실부하에 대하여 오동작 시험을 실시하여 안정된 검출 특성을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 전기화재 통계분석

대부분의 전기화재는 전류와 상관관계를 갖는다. 일반적으로 전로에 쓰이고 있는 도체의 고유 저항은 대단히 작기 때문에

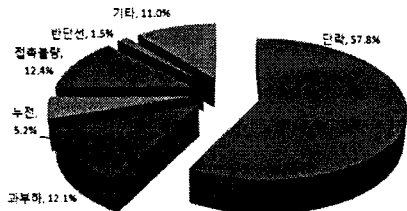


그림 1 전기화재 원인(2007년도)[2]

아크고장은 직렬, 선간, 선과 대지 간 등의 세 종류로 분류할 수 있다. 직렬아크는 단일 전로에서 발생되므로 아크 전류는 도체에 연계된 부하전류보다 클 수 없다. 병렬 아크는 단락회로이며, 계통과 고장 자체의 임피던스에 의해서만 제한될 수 있다. 선과 대지 사이에서 발생하는 아크는 접지 경로가 존재할 때만 발생될 수 있으며, 접지된 도체나 외함을 가질 때는 다른 종류의 아크고장도 접지 고장을 포함하는 경우가 많다.[3]

그러나 접지와 아크는 누전차단기에 의해 보호가 가능하기 때문에, 배선에서의 아크고장은 보통 직렬과 병렬로 크게 구분할 수 있다. 이 분류는 부하에 대한 고장의 상대적인 위치를 기준으로 한 것으로, 직렬고장은 부하에 대하여 직렬이고, 그 고장의 임피던스에 부하 임피던스가 더해져 고장전류가 결정된다. 그 고장 전류는 정상적인 부하전류와 같거나 적다. 반대로 병렬고장은 부하와 병렬관계에 있다.

현재 옥내배선에서 발생하는 단락사고는 배선용차단기에 의해 보호되는 체계를 갖는다. 그러나 단락이 모두 배선용차단기에 의해 보호되는 것은 아니다. 도체를 통해 흐르는 전류에 의한 줄열에 의해 발생하는 절연체의 열적 손상으로부터 배선을 보호하기 위한 것이지, 아크의 영향으로부터 회로를 보호하기 위한 것은 아니기 때문이다.

이는 병렬아크고장에 의해 완전한 단락이 형성되기까지 고

저항 회로가 유지되는 경우가 많기 때문에 동작범위 밖의 영역에서 아크고장이 발생할 수 있다. 아크고장에 의한 전류-시간 동작특성은 고장의 위치로부터 전원측의 배선용차단기에 의해 검출되지 않기 때문에 출화의 위험이 있는 아크가 지속적으로 유지됨으로써 단락에 의한 전기화재가 발생되고 있다. 또한 불완전한 전기적 접속에 의해 직렬아크가 발생될 경우 아크 불꽃이나 열 등에 의해 절연체를 손상시킴으로써 단락으로 진전될 수도 있으며, 이 또한 중요한 전기화재의 메커니즘이다.

그러나 아크의 도전율은 계속 변화되므로 전기적 환경이 불안정하기 때문에, 전기화재의 위험 인자임에도 불구하고 기존의 방법으로는 보호에 한계가 있었다.

2.2 직렬아크고장에 의한 전기화재

직렬아크고장에 의해 화재가 발생할 수 있는 전류의 크기를 확인하기 위해, 현재 옥내배선에서 가장 많이 사용하고 있는 2.0W, 2.5W의 HIV전선(내열비닐절연전선 ; Heat Resistant wire)과 비교를 위해 5.5W의 IV전선에 그림 2(a)의 부하공급기를 이용하여 각각 1-5A의 전류를 1A 간격으로 그림 2(b)의 아크발생장치를 이용하여 직렬아크 고장전류에 대한 전선의 출화 특성을 확인하였다. 모의실험에 사용된 부하는 고조파 왜곡이 없는 저항성 부하인 히터의 조합으로 제작되었다.

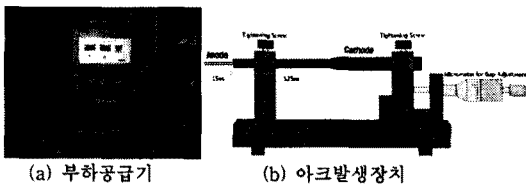


그림 2 적용된 모의 직렬아크고장 발생장치의 구성

그림 3은 각 전선에 대하여 실시된 모의실험 결과 사진으로 1.5A의 직렬아크고장 전류에 대하여 시험 후 소손된 전선의 사진이다.

허용온도가 75℃인 HIV와 60℃인 IV에 대한 직렬아크고장 전류 값에 따른 출화시험에서, 절연재료의 허용온도에 비해 아크 의해 형성되는 온도가 현저히 높기 때문에 출화 전류값은 모두 3A로 차이가 없었다. 그리고 허용전류가 각기 다른 전선을 비교해도 도체의 단면적과 관계 없이 3A의 직렬아크 고장에서 출화되었다.

직렬아크고장의 경우 배선용차단기의 정격전류 범위 내에서 대부분 발생하기 때문에 아크고장에 의한 피해가 크지 않을 것으로 인식되어 왔다. 그러나 모의실험 결과 HIV 2.0W와 HIV 2.5W, IV 5.5W의 전선 모두가 3A에서 발화하였다.

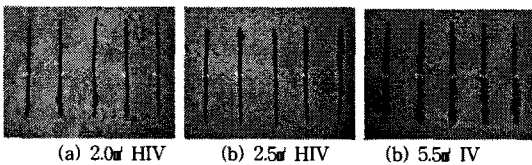


그림 3 직렬아크고장전류에 따른 전선의 손상

그러나 최초 아크발생 시점으로부터 출화되기까지의 시간은 아크고장전류에 따라 다르게 나타났다. 또한 전선 도체의 단면적에 따라 발화에 이르기까지의 시간도 차이가 있었다. 검토된 전선의 경우, 5A 이하의 전류에서는 발화까지 10초 이내에 출화되었고, 3A에서는 출화되기까지 10초 이상의 시간이 요구되었다.

본 실험에서는 아크를 일정하게 지속적으로 유지시키는 것이 용이하지 않아 아크 지속 시간에 따른 출화 특성에 대한 정량적 값은 확정하지 못하였다. 특히 전류가 낮을수록 일정하게 아크발생을 유지시키기 어려우며 아크발생 지속 시간을 정밀하게 측정할 수 없었다. 또한 정량적인 아크발생 시간을 확보하여도 아크발생의 연속성에 대한 문제도 있기 때문에 아크 지속시간에 대한 출화특성을 분석하기 위해서는 아크발생 장치에 대한 좀 더 면밀한 검토가 요구된다.

2.3 개발 결과

2.3.1 검출기술의 개발

아크고장 전류의 전형적인 특징은 그림 4와 같이 전류에 솔더(shoulder)가 나타나고, 전압 및 전류에 고주파 잡음이 발생하며, 아크에 의한 전압 때문에, 전압 차에 대한 보상 기능이 없는 회로에서의 아크전류는 동일 회로일 경우 정상상태의 전류보다 낮게 된다.

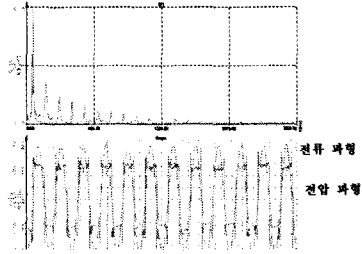


그림 4 아크고장에 의한 전압·전류 파형 및 FFT 분석결과

아크전류의 상승비율은 정상전류에 대한 상승률보다 일반적으로 크고, 각각의 반주기에서 제로크로싱(zero-crossing) 시 대부분 소멸되며, 제로크로싱을 지난 후에는 다시 나타나게 된다. 이렇게 제로크로싱 부분에서 나타나는 특징적 파형이 솔더이다. 일반적으로 전압의 파형은 방형파에 가까우며, 산발적으로 정상전류사이에서 순간적으로 높게 나타나는 경우가 많다.

기존의 아크고장 검출기술은 변류기를 통해 부하전류의 파형을 검출하고, 검출된 부하전류에서 아크 전류 및 전압의 특징적인 파형으로부터 특정 패턴을 검출하여 아크결함의 발생 여부를 판단하였다. 그러나 검출된 파형에는 다양한 부하전류 파형이 함께 검출되기 때문에 이것을 통해 아크결함의 존재 여부를 판단하는 것은 용이하지 않았다.

본 연구에서는 이런 문제를 해결하기 위해 순간적으로 변화되는 짧은 주기의 임펄스파를 부하로 연결된 전로에 흐르는 전류로부터 검출하여 제어부를 통해 아크결함을 판단하는 기술을 개발하였다. 전로에 흐르는 전압으로부터 PT 또는 CT, ZCT 등을 통해 펄스 형태로 그림 5(a)와 같이 아크를 검출함으로써, 짧은 주기의 펄스인 임펄스를 검출하고, 검출된 임펄스를 그림 5(b)와 같이 증폭 및 검파하여 CPU가 인식 및 처리할 수 있도록 하였다.

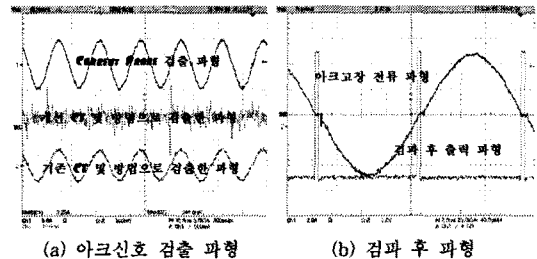


그림 5 아크고장 상태 검출 신호

이 증폭 및 검파된 결과를 일정주기 동안 누적시켜 설정된 기준전압과 비교하며, 기준전압은 아크고장 검출기능의 감도를 조절하는데 활용할 수 있고, 누적 주기는 아크고장 검출의 신뢰도를 조절하는데 활용할 수 있다.

또한 기존의 방법과 달리 부하전류를 샘플링하여 샘플링된 패턴을 부하 자체의 고유한 특징패턴과 비교하여, 아크결함 여부를 판단하는 방법을 채택하고 있으며, 부하전류를 샘플링하여 샘플링된 신호에서 아크에 의한 파형의 전형적 특징인 솔더를 검출하여 아크고장을 판단하였다.

그림 6의 알고리즘은 전로에 흐르는 전류의 파형을 검출하여 제어부를 통해 아크결함을 판단하는 방법에 있어서 표 1과 같은 단계를 갖고, 신뢰성 설정 정도에 따라 저신뢰도는 1-5, 보통의 신뢰도는 -8, 고신뢰도는 -10의 세 부분으로 구분하여 실행할 수 있다.

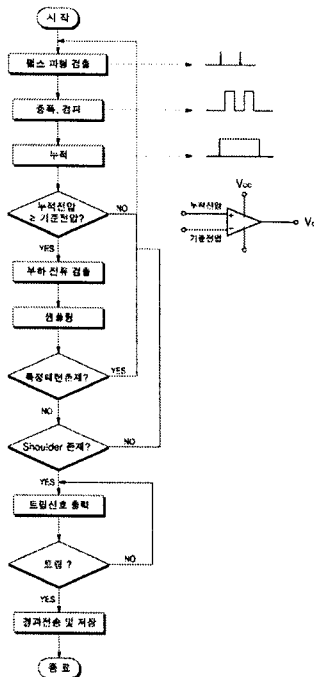


그림 6 개발된 아크고장 검출 알고리즘

표 1 개발된 아크고장 검출 알고리즘의 단계별 내용

단계	내용
1	전로에서 임펄스만을 검출하는 단계
2	검출된 임펄스를 증폭하고 검파하여 제어부가 인식 및 처리할 수 있도록 하는 단계
3	일정주기 동안에 검파된 임펄스를 누적하는 단계
4	누적된 임펄스의 전압의 크기와 기준전압을 비교하는 단계
5	누적된 임펄스의 전압의 크기가 기준전압 이상인 경우에 제어부는 차단기에 트립신호를 출력하여 차단기 내부의 트립장치가 구동되도록 하는 단계
6	전로에 흐르는 부하전류를 검출 및 샘플링하여 전류파형을 분석하는 단계
7	제어부에 부하의 종류별로 특징패턴에 대한 내장된 분석알고리즘을 따라, 샘플링된 전류파형과 패턴을 비교하여, 샘플링된 전류파형 내에 특징패턴의 존재 여부를 판단하는 단계
8	샘플링된 전류파형 내에 특징패턴이 존재하지 않을 경우 제어부는 차단기에 트립신호를 출력하여 차단기 내부의 트립장치가 구동되도록 하는 단계
9	제어부는 샘플링된 전류파형내에서 아크에 의한 특징인 숄더를 검출하는 단계
10	숄더가 검출된 경우에 제어부는 차단기에 트립신호를 출력하여 차단기 내부의 트립장치가 구동되도록 하는 단계

전로에서 분리검출된 임펄스파는 아크결함이 존재하는 경우 뿐만 아니라, 조명기의 경우라면 스위치 on-off의 경우 등에도 발생할 수 있다. 이런 임펄스파는 정상적인 부하 운전시 나타나는 스파크 또는 아크에 의한 것으로 아크결함이 존재했다고 판단할 수는 없다. 따라서 단주기가 아닌 일정주기 이상 동안에 지속적으로 발생되면서, 누적된 펄스의 전압이 일정크기 이상의 경우에만 아크결함에 의한 임펄스 파형으로 판단하는 것이 필요하다.

2.3.2 개발결과 신뢰성 시험

일반적으로 아크고장회로차단기의 동작은 정상적인 아크고장에 의한 동작일 수 있고 오동작일 수도 있다. 이 중에서 오동

작은 여러 가지 영향에 의해 발생할 수 있다. 어떤 한 회로에서 발생된 아크고장이 다른 회로의 아크고장차단기를 동작시켜서는 안 된다. 그리고 과도현상이나 다른 전기계통의 고장이 아크고장회로차단기를 동작시키거나 고장을 일으키지 말아야 한다. 따라서 검출 알고리즘의 성능 평가는 이런 문제들에 대한 검증이 가능하여야 한다.

이에 대하여 개발된 아크고장 검출 기술의 다양한 오동작 특성 실험을 실시하였다. 그중에서 그림 7은 조광기에 의해 전류가 제한되는 백열등 부하군(1W) 및 전자식 형광등 20W 6개와 스타트 전구에 의해 점등되는 자기식 형광등 20W 6개의 동시 부하에 대한 오동작 특성시험의 전류파형이다. 그림 7(a)와 같이 아크가 발생하지 않을 때는 우측의 차단기를 트립시키기 위한 신호가 보드로부터 검출되지 않았지만, 아크 발생 시에는 그림 7(b)와 같이 우측의 신호가 보드로부터 검출되었다.

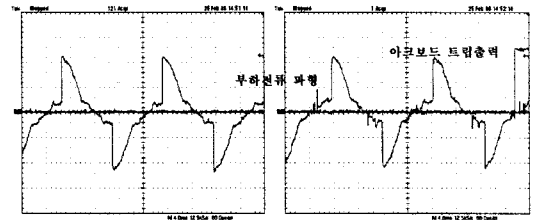


그림 7 조광기-백열등 및 자기식과 전자식 형광등 부하 실험

특히 자기식 형광등 부하의 경우 점등 회로에 적용되는 스타트 전구가 점등시 아크와 유사한 전류패턴을 발생시킨다. 이 때문에 동시에 여러 개의 형광등이 점등될 경우 아크보도 오동작에 치명적일 수 있다. 따라서 자기식 안정기 구동 형광등은 점등 시의 특성을 반드시 확인하여야 한다. 실험결과 이에 대한 오동작이 없었고, 3A의 아크고장전류도 발생되지 않았다.

3. 결 론

본 논문에서는 전기화재에 대한 통계 분석과 직렬아크 고장 전류에 대한 3종류의 전선에 대한 출화특성 시험을 실시하여 3A의 아크고장전류에 대해서도 출화의 위험성이 있음을 확인하였다.

또한 이 결과를 토대로 3A이상의 아크고장 전류도 검출이 가능한 고주파 펄스 검출을 이용한 센싱 기술과 분석 알고리즘 등을 개발하고, 개발된 기술에 대하여 신뢰성 실험을 실시하고 오동작의 원인이 되는 주요 부하에 대하여 안정된 동작 특성을 확인하였다. 이는 UL 1699에서 규정하고 있는 5A보다 적은 값으로 기존의 기술보다 현저히 개선된 것이다.

향후 아크고장에 대한 전류 및 아크지속 시간에 대한 출화 특성을 면밀히 검토하여 아크고장출화특성 곡선을 도출하고 이를 기준으로 아크고장에 대한 좀더 신뢰성 있는 체계적인 보호 장치를 도출하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 전력산업기반기금에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] 임용배, 배석명, 김영석, 박치현, 김기현, 조성원. "영상전류 측정용을 이용한 부재수용가의 전기설비에 대한 안전확보 방안". 전기학회논문지, 55P권, 4호. pp. 196-201. 2006.
 [2] 한국전기안전공사, "전기재해통계분석", 지식경제부, p. 11, 2008
 [3] George D. Gregory, Kon Wong, Robert F. Dvorak, "More About Arc-Fault Circuit Interrupters", Transactions on Industry Applications, Vol. 40, No. 4, p. 1006-1011, 2004