

B-03

전기화재를 유발하는 직렬 아크 파형의 고찰

Study of Series Arc Waveform Causing Electrical Fire

황진권*

Hwang, Jin Kwon

Abstract

An apparatus for serial arc in UL 1699 is implemented Current waveforms of arc and a nonleak load are investigated and a method of arc detection can be considered. Introduction of digital signal processing technologies is suggested to correctly detect arcs of electrical fire prognostics. This study is expected to be utilized as the basis of such arc detection researches.

key words : Series Arc, UL1699, Current transformer, Arc-Fault Circuit-Interrupter

UL 1699에서 규정된 직렬 아크 실험기구를 제작하고 아크 전류파형들과 비선형 부하의 전류파형을 고찰하여 화재의 징후가 되는 아크 검출 방법을 살펴본다. 아크의 정확한 검출에 디지털신호처리 기법의 도입이 필요함을 보이고 이러한 아크 검출연구에 본 연구 결과가 초석으로 활용될 것으로 기대된다.

1. 서 론

국내에서 전기화재 예방의 일환으로 옥내 배전반에 누전차단기 및 과전류 차단기의 설치를 의무화하고 있다. 누전차단기는 30mA 이상의 전류가 지면으로 흐르면 자동으로 회로를 차단하는 장치이고 과전류 차단기는 정격전류의 1.25 배 이상의 과전류가 흐르면 자동으로 회로를 차단하는 장치이다. 이러한 회로 차단기들의 설치에도 불구하고 현재 국내의 전기화재는 전체 화재에서 대략 30% 정도의 비중을 차지하고 있어서 전기화재 방지는 전기설비와 소방 분야에서 해결할 중요한 과제로 남아 있다.

합선 및 과부하에 의한 과전류와 누전은 전기화재를 유발시키는 가장 큰 원인이며, 이외에 주요한 원인으로 아크가 있다. 아크는 전기 배선이나 설비 등에서 두 전극 사이의 기체를 통하여 전기가 방전되면서 빛과 열을 발산하는 현상이며 화재가 이 빛과 열에 의하여 발생할 수 있다. 아크의 발생은 전선이나 전기기구의 접촉 불량, 연결 결함, 절연 파괴, 부적절한 설치, 노화 및 손상 등에 기인한다.

선진국에서는 전기화재를 예방하도록 아크 징후를 검출하여 회로를 차단하는 아크 차단기(Arc-Fault Circuit-Interrupters)의 설치를 의무화하고 있다. 미국의 경우에는 1999년부터 UL 1699 (UL 1699, 1999)규정의 아크 차단기를 분전반에 설치하게 되어 있다(NEC, 2003). 국내의 경우에는 아크 검출 및 아크 차단기에 대한 연구는 진행되어 왔으나(김창중, 1995)(곽종걸, 2006), 아크 차단기의 규격과 설치에 대한 제반 규정은 아직 없는 실정이다. 최근에 이르러 국내의 기업체 및 연구소에서 아크 차단기의 제품의 개발을 진행하고 있다. 본 논문에서는 UL 1699 규정의 직렬 아크 실험기구를 사용하여 직렬 아크를 발생시키고 그 전류파형과 비선형 부하의 정상동작 전류파형을 비교하여 본다.

2. 아크에 의한 전기화재

화재의 원인은 크게 전기, 방화, 가스, 담배, 유류, 불량난, 불티 및 기타로 분류된다. 전기화재는 전기설비의 누전, 합선, 과부하, 또는 아크에 의한 열과 불꽃에 의하여 발생하는 화재를 총칭한다.

* 정회원·황진권 우석대학교 소방안전학과·조교수·email: jkhwang@woosuk.ac.kr

표 1. 5 년간 전기화재의 원인별 발생건수

구 분	2002	2002	2002	2002	2002	증감율
합 선	8,743	6,994	7,048	6,449	5,819	-9.38%
과 부 하	869	952	924	858	783	-2.32%
누 전	522	633	455	430	448	-2.04%
접촉불량	183	369	432	402	493	33.60%
기 타	885	1,722	1,591	1,852	1,849	25.80%
계	11,202	10,670	10,450	9,991	9,392	-4.30%

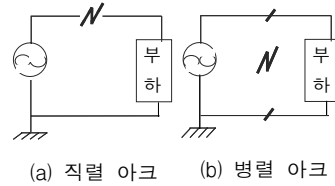


그림 1. 직렬 아크와 병렬 아크

소방 방재청의 통계자료(소방방재청, 2006)에 의하면 전체 화재에 대한 전기화재의 점유율은 1994년도에 39.1%까지 증가하였다가 2006년도에 그 점유율이 29.56%로 감소 추세에 있다. 그러나 현재까지 화재의 여러 원인들 중에서 전기는 여전히 1위의 점유율을 차지하고 있다.

표 1의 소방 방재청의 전기화재 통계자료(소방방재청, 2006)를 살펴보면, 전기화재의 주된 원인인 합선, 과부하 및 누전에 의한 화재는 계속 감소 추세에 있음을 보이고 있다. 이러한 경향의 주요한 요인으로 과전류와 누전 차단기의 설치의 범적인 의무화와 이 차단기들의 성능향상에서 비롯되었다고 볼 수 있다. 반면에 접촉 불량에 의한 전기화재의 증가비율은 33.60%로 매우 크다는 것을 알 수 있다. 이 접촉 불량은 아크의 발생에 직접적으로 연결되고 전기화재로 발전하게 한다.

아크의 종류를 그림 1과 같이 두 전선 사이에 발생하는 병렬 아크와 단일 전선의 연결부위에서 발생하는 직렬 아크로 나눌 수 있다. 병렬 아크가 발생하는 중심에서 온도는 5000℃에서 15000℃ 정도로 상승되고 합선으로 귀결되면서 매우 큰 과전류가 순간적으로 흐르기 때문에 화재가 곧바로 발생할 가능성이 있다. 직렬 아크의 전류는 부하의 임피던스에 의해 제한되기 때문에 병렬 아크의 전류에 비해 매우 작게 된다. 접촉 불량은 직렬 아크를 지속적으로 발생시키고 아크 불꽃에 의한 점화과 아크열의 축적에 의한 발화로 연결되어서 화재를 유발시킨다. 아크의 전류파형을 통하여 이 지속적인 아크 발생을 검출할 수 있다면 전기화재를 미연에 방지할 수 있게 된다.

3. 아크 신호의 계측

직렬 아크에 의한 대표적인 전류파형의 특징은 영점부근에 일그러짐(shoulder) 현상이 발생하는 것이다(정용기 외 3인, 2002). 이 shoulder 현상에 의하여 아크가 없는 경우에 비하여 1kHz에서 10kHz 사이의 주파수 성분 신호가 수 배 이상으로 커지게 된다(김창종 외 2인, 1995). 또한, 아크 발생 때의 전류 실효치는 아크가 없는 때의 실효치보다 작아지는 경향이 있다. 따라서 아크의 발생여부는 전선에 흐르는 전류파형의 계측에 의하여 판별될 수가 있다. 아크 전류는 변류기(current transformer)나 홀 효과 센서(hall effect sensor)를 통하여 측정될 수 있다.

변류기는 변압기와 같이 성층철심에 권선수가 적은 1차 코일과 권선수가 많은 2차 코일을 감은 것이며 측정용 전선을 1차 코일로 사용하여 2차 코일에 유도된 전압에서 전선의 전류를 계산할 수 있다. 홀 효과는 전류와 이에 직교하는 자기장이 존재할 경우에 양쪽에 직각방향으로 기전력이 발생하는 현상이고 홀 효과 센서는 이 기전력을 이용하여서 전류를 측정한다. 변류기는 홀 효과 센서보다 저렴하고 전선을 가운데 구멍에 통과시켜서 전류를 측정하므로 그 사용성도 편리하다. 본 연구에 사용된 변류기가 그림 3에 나타나 있고 실험을 통하여 10kHz까지 균일한 주파수응답을 가짐을 확인하였다.

전기화재의 징후가 되는 아크 검출의 알고리즘을 효과적으로 개발하려면 다양한 부하에 대한 직렬 아크의 전류파형을 수집하는 것이 필요하다. 미국의 UL 1699 규정에 아크를 인위적으로 생성하는 방법이 기술되어 있고 직렬 아크 발생에 관한 기구는 그림 3과 같이 제시되어 있다. 그림 3에서 직렬 아크를 발생시키려면, 구리의 이동전극과 탄소봉(carbon graphite)의 고정전극을 접촉시킨 다음에 수평거리 조정나사로 두 전극을 적절히 떨어뜨리면 된다. 이 때에 그림 2의 변류기를 사용하여서 고정전극에 흐르는 아크 전류파형을 수집한다.

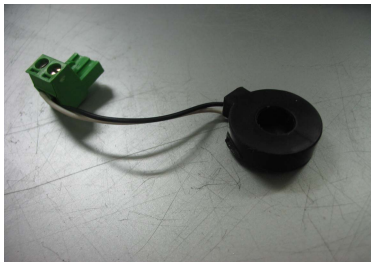


그림 2. 변류기

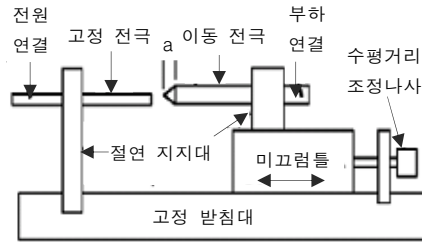


그림 3. 직렬 아크 발생 장치의 구조

4. 아크 신호의 파형 분석

직렬 아크의 발생 실험환경 구축을 위하여 그림 4의 직렬 아크 실험기구와 그림 5의 1000W 백열전등 부하장치를 제작하였다. 아크 실험기구와 백열전등 부하장치를 직렬로 연결하여 아크를 발생시켰다. 아크 발생하는 동안에 이동전극과 고정전극 사이의 접촉 불량에 의한 저항 증가로 인하여 아크가 없는 경우에 비하여 전류 실효치가 작아짐을 관찰할 수 있었다. 아크 발생 실험에서 측정된 전류파형 및 이동전극과 고정전극 사이의 전압파형이 각기 그림 6의 윗부분과 아랫부분에 도시되어 있다. 그림 6에서 전류파형은 60Hz 정현파 신호 형태와 유사하나 아크 발생에 의하여 영점 전류부근에서 미약한 shoulder 현상이 나타남을 알 수 있다. 따라서 전류파형에서 shoulder 현상 발생과 전류 실효치 감소를 조사하고 이것들을 수치화하여 조합한다면 직렬 아크의 검출이 가능할 수가 있다. 그림 6에서 아크 발생에 의하여 왜곡된 전압파형은 이동전극과 고정전극의 접촉저항에 대한 전압강하를 보여준다.

부하의 정상적인 운용과정에 부하의 전류파형에서 아크 전류파형의 특징인 shoulder 현상이 나타날 수 있다(김창중 외 2인, 1995). 따라서 UL 1699 규정에 나열된 직렬 아크를 발생시키는 부하들을 살펴보면, 백열전등이나 컴프레서(compressor)의 커패시터 스타트 모터와 같이 스위칭시에 돌입전류가 큰 부하, 진공청소기의 유니버설(universal) 모터나 다리미의 바이메탈과 같이 정상적인 동작에서 아크가 수반되는 부하, 그리고 전자조광기나 SMPS (switching power supply)와 같이 정상운전 상태에서 전류파형의 왜곡이 심한 비선형부하 등이 있다. 특히, 비선형 부하의 전류파형은 직류 아크 전류파형과 유사한 형태를 갖는다. 따라서 아크 차단기는 부하의 정상작동에서 발생하는 아크 특성의 전류신호에 의하여 트립(trip)되지 않도록 설계되어야 한다.

비선형 부하의 정상적인 전류파형과 아크 발생의 전류파형을 수집하기 위하여 직렬 아크 실험기구와 백열전구 실험장치 사이에 그림 7과 같은 전자조광기를 삽입하였다. 전자조광기는 램프나 백열전등에서 빛의 세기를 조절하는 장치이다. 전자조광기에서 측정된 전류 및 전압 파형들이 그림 8과 그림 9에서 각기 윗부분 및 아랫부분에 나타나 있다. 그림 8에서 전류와 전압이 동일한 파형 형태를 가져서 아크가 발생되지 않았음을 알 수 있으나 전류파형에는 아크 발생의 경우와 같은 심한 shoulder 현상이 나타남을 확인할 수 있다. 그림 9는 아크의 발생에 의하여 전류파형에 shoulder 현상이 더 심화되고 그 파형형태도 좀 더 왜곡된 비정현파가 됨을 보여준다.

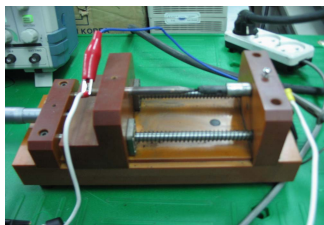


그림 4. 직렬 아크 실험기구

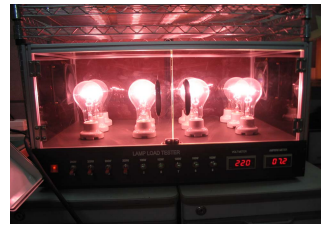


그림 5. 백열전구 실험장치

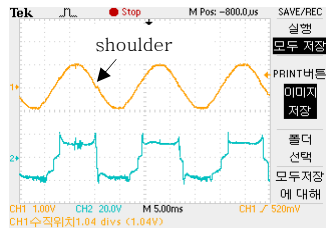


그림 6. 백열전구의 아크 파형



그림 7. 전자조광기

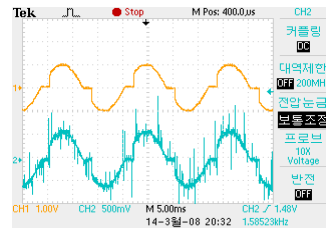


그림 8. 조광기의 정상 파형

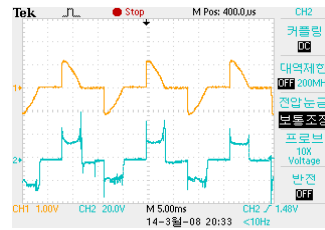


그림 9. 조광기의 아크 파형

정상적으로 동작하는 전자조광기로 빛의 세기를 낮추게 되면 전류의 실효치가 감소되면서 shoulder 현상을 수반하게 된다. 따라서 전류의 실효치 감소와 shoulder 현상의 단순한 조합만으로는 직렬 아크 발생을 판별하기가 어렵다는 것을 알 수 있다. 화재의 징후가 되는 아크만을 정확하게 검출할 수 있는 아크 차단기를 구현하려면 FFT(Fast Fourier Transform)와 웨이브렛(wavelet) 등의 디지털 신호처리 기술 사용이 요구된다. 아크 검출 성능이 우수한 아크 차단기를 개발하기 위하여서는 UL 1699 규격에서 제시된 부하 이외에도 다양한 부하에 대한 아크 전류파형들을 획득하고 파형을 고찰하는 것이 우선적으로 필요하다.

5. 결 론

본 논문에서는 UL 1699 규격에서 제시된 직렬 아크 실험 기구를 제작하여 변류기를 통하여 직렬 아크의 전류파형을 측정할 수 있는 실험환경을 구축하였다. 직렬 아크의 발생시에 전류파형에 shoulder 발생과 전류 실효치 감소 현상들이 동반됨을 실험으로 확인하였다. 또한, 비선형 부하의 정상 전류파형에도 shoulder 현상이 있음을 확인하였다. 전류파형의 shoulder 현상과 전류 실효치 감소 현상의 조합만으로는 화재 징후가 되는 아크를 정밀하게 검출하기가 어렵다는 것을 고찰하였다. 이 문제 해결에 디지털 신호처리 기술의 도입을 제시하고 이러한 기술연구에 본 논문의 실험 기법과 전류파형의 고찰결과가 초석으로 활용될 것으로 본다. 국내의 전기화재 발생을 근본적으로 줄이려면 배전반에 아크 차단기의 도입이 필연적이고 이의 뒷받침을 위한 법제도 정비와 기술개발이 요청된다.

참고문헌

1. UL standard for Arc-Faulty Interrupters (1999), UL 1699, First Ed.
2. National Electric Code (NEC) (2002).
3. 김창종, 구재승, 강경훈 (1995), “전기재해의 징후검출 및 정상부하 특성과의 구분,” ‘95한국조명전기설비학회 학술대회 논문집.
4. 광동걸, 신미영, 정도영 (2006), “아크 및 및 스파크 재해에 대한 누전차기 트립을 위한 보조제어 전기관전장치에 관한 연구,” 한국화재소방학회 논문지, 제 20 권, 제 1 호.
5. 소방방재청 (2007). 2006년도 화재통계연감, <http://www.nema.go.kr/data/statistic/view.jsp>.