

전기화재 징후 감지를 위한 아크전류 파형분석에 관한 연구

A Study on Analysis of Arc Current Waveforms for Detection of Prognostics of Electrical Fires

황진권[†]

Jin Kwon Hwang[†]

우석대학교 소방안전학과
(2008. 4. 10. 접수/2009. 2. 13. 채택)

요 약

전류 돌입형, 비선형 및 전류 단속형 부하들은 정상작동 상태에서 아크 발생의 경우와 유사한 전류파형을 갖는다. 이러한 부하들에서 아크 검출기법을 정확하게 구현하기 위하여서는 아크 유무에 따른 전류파형의 전형적인 특징을 찾을 필요가 있다. 본 논문에서는 UL 1699의 직렬과 병렬 아크 발생장치들로 이러한 부하들에 아크를 발생시키고 시간 및 주파수 영역에서 아크 전류파형을 분석한다. 아크 실험의 분석 결과를 통하여 아크 전류파형의 전형적인 특징은 시간영역에서는 영점전류의 처짐 현상이고 주파수영역에서는 60Hz 고조파 성분을 제외한 전대역의 주파수에 걸쳐서 스펙트럼 크기가 증가되는 것임을 보인다. 비선형 및 전류 단속형 부하들에서 시간영역보다는 주파수영역의 아크 전류의 특징이 보다 명확히 나타남을 보인다. 본 논문에서 제시된 아크 전류파형의 특징들은 아크 차단기 개발을 위한 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

ABSTRACT

Several electrical loads such as inrush current, normal operation arcing and non-sinusoidal loads have normal current waveforms similar to arc waveforms. To detect arcs in such loads, therefore, it is necessary to analyze difference between current waveforms with or without arcs. In this paper, using apparatuses of arc generation in UL 1699, arcs are generated in these loads and, then, arc current waveforms are investigated in both the time and the frequency domains to find arc characteristics. This investigation shows that arc current signals have shoulders at some zero current points in the time domain and increment of spectrum magnitude in all over frequency domain. It also shows that the arc characteristics at normal operation arcing and non-sinusoidal loads are detected more easily in the frequency domain than in the time domain. This investigated arc characteristics are expected to be utilized as the basis of development of arc-fault circuit interrupters.

Keywords : Arc, Electrical fire, UL1699, Current transformer, Arc-Fault Circuit-Interrupter

1. 서 론

전기는 주상변압기, 인입선, 전력망계, 과전류 차단기, 그리고 누전 차단기를 거쳐 각종 전기기구에 공급된다. 누전 차단기는 30mA 이상의 전류가 대지로 누설되면 자동으로 회로를 차단하는 장치이고 과전류 차단기는 정격보다 큰 전류가 흐르면 회로를 자동으로 차단하는 장치이다. 전기화재 예방을 위하여 이러한 회

로 차단기의 설치가 의무사항으로 규정되어 있으나 현재까지 우리나라의 화재에서 전기화재가 가장 큰 발생 빈도를 보이고 있다.

전기화재는 과전류와 누전 이외에 전선이나 전기기구의 접촉불량, 절연손상, 설치과실, 작동오류, 고온에 의한 전선의 열화, 노화 및 손상 등의 전기사고에 의하여 발생될 수 있다. 이러한 전기사고는 아크나 불티(spark)를 야기하여 화재로 연결될 수 있다.^{1), 2)} 아크는 전기가 두 전극 사이에서 기체를 통하여 방전되면서 빛과 열을 발산하는 현상이다. 아크 차단기는 아크 발

[†]E-mail: jkhwang@woosuk.ac.kr

생을 검출하고 회로를 자동적으로 차단하여 전기화재를 예방하는 장치이다. 미국은 UL1699³⁾ 규정에 의거하여 1999년부터 분전반에 아크 차단기의 설치를 의무화하고 있다.⁴⁾ 국내의 경우에 아크 차단기의 규격과 설치에 대한 법적인 규정은 없으나 최근에 이르러 아크 차단기 규정에 대한 논의가 시도되고 있다.

아크 발생은 전류 크기와 파형의 변동을 수반하게 되며^{5,6)} 아크 차단기는 이러한 전류의 변동 특징을 검출하여서 회로를 차단하게 된다.⁷⁾ 전류 돌입형, 비선형 및 전류 단속형 부하 등은 정상동작 시에도 아크가 발생한 경우와 유사한 전류를 생성한다. 이러한 부하들에서 화재징후의 아크만을 정확히 선별하려면, 아크 발생 전류파형과 정상동작 전류파형들을 비교하고 분석하는 연구가 선행될 필요가 있다. 본 논문에서는 UL 1699 규정에 의거한 아크 발생장치로 전류 돌입형, 비선형 및 전류 단속형 부하들에 아크를 발생시키고 시간과 주파수 영역에서 그 아크 전류파형과 정상동작 전류파형을 분석하여서 아크 검출기법에 적용할 수 있는 아크 전류파형의 특징들을 제시한다.

2. 아크에 의한 전기화재

2.1 전기화재 현황

우리나라의 화재통계를 살펴보면 화재는 전기, 방화, 가스, 담배, 유류, 불량난 및 불티 등의 원인 순서로 많이 발생되고 있다. 국내 50년 동안에 전체 화재에서 전기화재 점유율의 변동 추이가 Figure 1에 나타나 있다. 전기화재는 1993년까지 그 점유율이 지속적으로 증가하였다가 2006년도에 29.56%까지 감소하였으나 화재원인 중에서 계속 1위를 차지하여 오고 있다.⁸⁾ 따라서 국내 화재발생 건수를 효과적으로 줄이려면, 전기화재징후의 요인들을 정확히 검출하고 차단하는 것이 필요하다.

국내 전기화재 발생의 주요한 원인들은 합선(short circuit), 과부하(overload), 누전(leakage current) 및 접촉불량(faulty contact)이고 이것들에 대한 통계가 Table

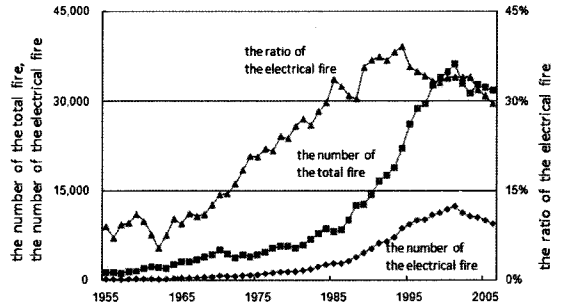


Figure 1. The number of fires and trend of electrical fires for 1955~2005.

1⁸⁾에 나타나 있다. 과전류와 누전 차단기들의 설치 의무화 및 그 기술적인 성능향상에 힘입어서 합선, 과부하와 누전에 의한 화재는 지속적으로 감소하고 있다. 아크 발생의 주요한 원인인 접촉불량에 의한 전기화재는 증가하는 추세이고 이것의 연평균 증가속도는 42%로 계산되며 이는 접촉불량에 의한 전기화재가 앞으로 급속하게 증가할 수 있음을 암시한다.

따라서 국내 전기화재 발생빈도를 보다 줄이도록 분전반에 아크 차단기의 설치를 의무화시킬 필요가 있다. 이를 위하여 UL 1699를 비롯하여 선진국의 아크 차단기 규정들을 검토하여서 법적인 제도를 조속히 마련함과 동시에 아크만을 정확히 검출하는 아크 차단기의 연구개발이 시급히 요청된다.

2.2 아크에 의한 발화

아크는 Figure 2의 a와 같이 단일 전선에서 절단 부위나 접촉불량 부위에서 발생하는 직렬 아크와 Figure 2의 b와 같이 전위 차이가 있는 두 전선 사이에서 발생하는 병렬 아크로 대별될 수 있다. 직렬 아크의 전류는 부하의 임피던스와 아킹 저항 등에 의하여 매우 작을 수 있으나 접촉불량 요인 등에 의한 지속적인 직렬 아크는 화재로 귀결될 수 있다. 병렬 아크는 매우 큰

Table 1. Electrical Fires by Cause for the 5 - Year Period 2002~2006

Causes	2002	2003	2004	2005	2006	Annual Rate of Increase
Short Circuit	8,743	6,994	7,048	6,449	5,819	-8.36%
Overload	869	952	924	858	783	-3.57%
Leakage Current	522	633	455	430	448	-3.54%
Faulty Contact	183	369	432	402	493	42.35%
Others	885	1,722	1,591	1,852	1,849	27.23%
Total	11,202	10,670	10,450	9,991	9,392	-4.03%

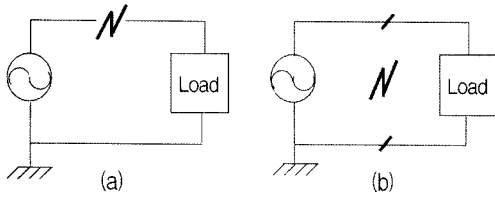


Figure 2. Series arcing and parallel arcing.

전류를 발생시키고 아크 중심부의 온도가 5000°C에서 15000°C 정도로 고온이어서 화재 위험도가 매우 높다.

대부분 옥내 배전선에는 구리선이 사용되고 배전선과 전기설비의 연결은 도체 단자 간의 접촉으로 이루어지고 있다. 접촉불량이 단자의 결선에 있게 되면, 접촉저항이 매우 커지게 되고 직렬 아크와 주울(Joule) 열들이 동반하게 된다. 이 열들은 접촉 단자의 구리를 산화시키고 용해시켜서 이산화동 증식현상을 수반한다.⁹⁾ 구리의 용점은 1085°C 이어서 이산화동 증식과정에 고온의 열에 의해 인근의 가연물을 착화하여서 화재로 연결될 수 있다.

전선 피복재의 손상은 배선 공사의 시공불량, 동물의 교상, 고온 및 노화 등에 의하여 발생된다. 전선의 손상부에 먼지나 전해액 등이 부착되면 절연열화에 의하여 손상부에 탄화경로 아크(carbonized path arc)가 발생하게 된다. 탄화경로 아크는 전선의 손상 형태에 따라 직렬 또는 병렬 아크 형태가 될 수 있다. 탄화경로 아크 전류에 의한 아크 열과 주울 열은 손상부의 피복재를 탄화시켜서 도전경로를 형성한다. 탄화 도전경로의 면적과 주울 열은 서로 상승작용에 의하여 계속적으로 증가하여서 화재로 연결될 수 있다.

UL 1699에 아크 차단기의 시험규정 및 실험장치가 기술되어 있고 아크 검출 시험에는 탄화경로 아크 시험, 점접촉 아크(point contact arc test) 시험, 비정상 트립 시험(unwanted tripping test) 및 아크발생장치 시험 등이 있다. 점접촉 아크 시험은 병렬 아크 발생에 관한 것이고 아크 발생장치 시험은 직렬 아크 발생에 관한 것이다. 비정상 트립 시험은 전류 돌입형, 비선형 또는 전류 단속형 부하들의 정상동작에서 아크 차단기의 트립 발생의 여부에 관한 시험이다. 본 논문에서는 UL 1699의 아크 발생장치와 비정상 트립 시험용 부하들을 사용하여 아크 전류파형들을 실험으로 획득한다.

3. 직병렬 아크 발생 시스템

3.1 아크 전류의 계측

전선의 전류는 변류기(current transformer)나 홀 효과

센서(hall effect sensor)를 통하여 정밀하게 계측될 수 있다. 변류기는 원형 코아에 큰 권선수의 코일을 감은 것으로 코아 가운데에 전선을 통과시켜서 코일에 유기한 전압을 통하여 전선의 전류가 측정된다. 홀 효과 현상은 전류와 이에 직교하는 자기장이 존재할 경우에 양쪽에 직각 방향으로 기전력이 발생하는 현상이고 홀 효과 센서는 이때에 발생하는 기전력을 측정하여서 전류를 계측한다. 변류기는 홀 효과 센서보다 가격이 저렴하고 전선 간에 직접적인 연결 없이 전류를 측정할 수 있어서 사용의 편리성이 있다.

본 연구에서는 아크 전류의 측정에 변류기를 사용하였고 향후 아크 검출기법의 구형 연구에 사용할 DSP (Digital Signaling Processing) 보드를 Figure 3과 같이 제작하였다. 이 DSP 보드에 사용된 변류기가 Figure 3의 우측 상단에 나타나 있다. 아크 전류파형 신호의 대부분의 에너지는 대략 10kHz 이하의 주파수 영역에 분포한다.⁵⁾ 제작된 DSP 보드에서는 변류기의 신호를

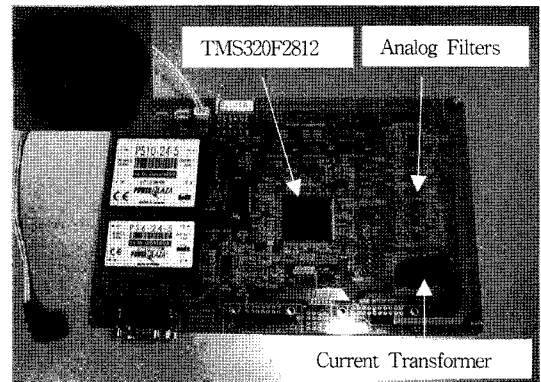


Figure 3. Current transformer and DSP board.

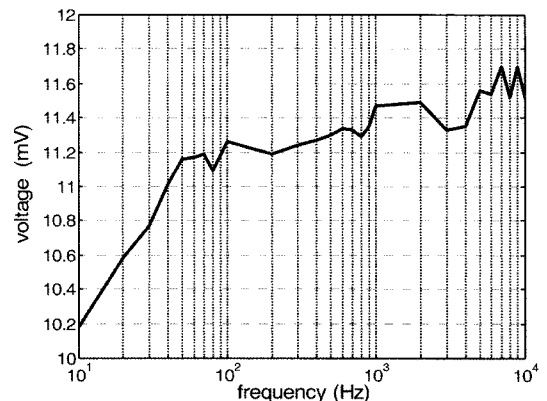


Figure 4. Frequency response of a current transformer.

10kHz의 대역폭의 저대역 통과필터로 필터링하고 12비트 ADC(Analogue Digital Converter)로 표본화하도록 설계되어 있다.

본 연구의 실험에 사용된 전선에 10Hz에서 10kHz 주파수까지의 정현파 전류를 100mA 정도로 흐르게 하고 이 변류기로 측정된 전류 값이 Figure 4에 도시되어 있고 100Hz와 10kHz에서 측정된 변류기의 출력전압은 각기 11.2mV와 11.7mV 정도이다. 이 두 주파수에서 전압 차이는 0.5mV 정도이고 그 차이의 비율은 $0.5/11.2=0.045$ 이어서 변류기의 주파수 응답의 크기 특성은 대체로 균일하다고 볼 수 있다. 이것은 변류기의 측정 전류신호에서 주파수에 따른 왜곡을 무시할 수 있음을 의미한다.

3.2 아크 발생 실험장치

직렬과 병렬 아크를 발생시키는 실험 장치들이 UL 1699 규정에 기술되어 있으며, 그 직렬 아크 발생장치의 구조가 Figure 5에 나타나 있다. 이동전극과 고정전극의 재질은 각기 구리와 탄소봉(carbon graphite)이고 이동전극의 길이 a는 0.7 ± 0.3 inches 정도로 설정되어 있다. 이동전극과 고정전극을 접촉시킨 다음에 수평거리 조정나사로 두 전극을 서서히 떨어뜨리면 접촉불량

에 의한 직렬 아크가 발생된다. 본 연구의 실험을 위하여 제작된 직렬 아크 발생장치가 Figure 6에 나타나 있다. 이동전극과 고정전극 사이의 거리는 스펀들 나사로 0.01mm 단위로 정밀하게 맞출 수 있어서 아크의 세기의 조절이 가능하다.

UL 1699의 점접촉 아크 시험에서 기술된 병렬 아크 발생장치의 구조가 Figure 7에 나타나 있고 이에 의하여 제작된 병렬 아크 발생장치가 Figure 8에 나타나 있다. 철판칼날의 한 면에만 경사가 있어서 이 면과 절단된 전선 사이에 아킹 접촉이 발생하고 그 반대 면과 전선 사이에는 단락이 일어나게 된다. 제작된 병렬 아크 발생장치는 실린더 공압으로 철판칼날을 구동하여서 전선을 절단하고 아크 발생의 지속시간을 조절할 수 있도록 설계되어 있다.

백열전등 부하장치를 포함하여 조광기, 진공청소기 및 컴프레서 등의 부하들이 아크 발생 실험에 사용되었다. 백열전등 부하장치는 병렬로 결선된 12개의 200W 백열전등들로 구성되었다. 직렬 아크 발생장치를 아크 발생 시험용 부하와 직렬로 결선하고 아크를 발생시켜

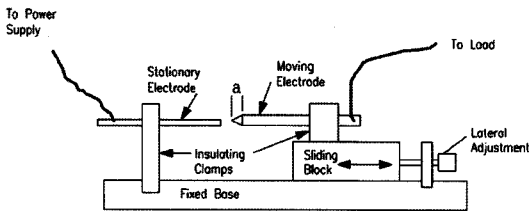


Figure 5. Structure of series arcing apparatus.

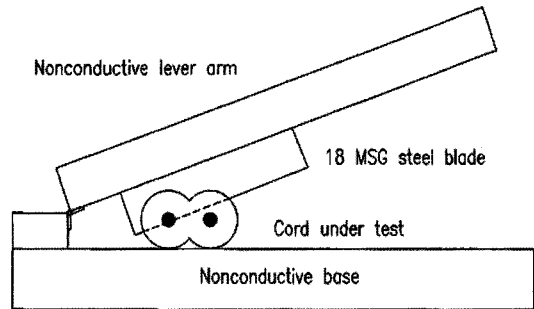


Figure 7. Structure of Parallel arcing apparatus.

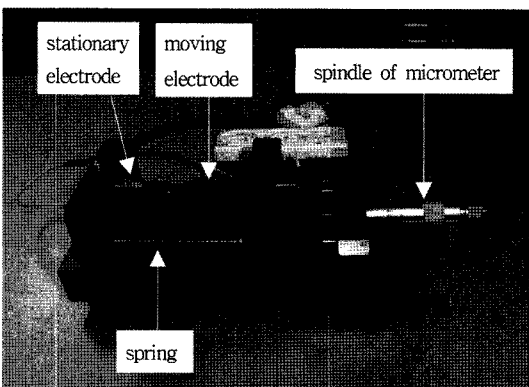


Figure 6. Series arcing apparatus for experiment.

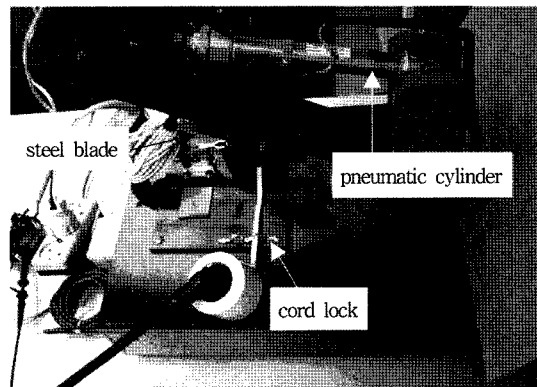


Figure 8. Parallel arcing apparatus for experiment.

서 그 아크 전류파형을 변류기로 측정하였다. 병렬 아크 실험은 무부하 상태의 전선을 병렬 아크 발생장치로 절단하여서 아크 전류파형을 변류기로 측정하였다.

4. 아크 전류파형 분석

4.1 아크 전류파형의 특징

직렬 아크의 발생 유무에 따른 백열전등 부하장치의 전류 파형과 실효치를 측정하였다. 전류 실효치는 아크가 없는 경우와 있는 경우에 각각 10.75A와 10.40A로 측정되었다. 아크 전류 크기가 정상 전류 크기보다 작아지는 것은 아크 발생장치의 고정전극과 이동전극 사이의 아킹 저항에 기인된다. 백열전등 부하장치의 아크 전류파형이 Figure 9의 윗부분에 나타나 있다. 아크 전류파형은 전반적으로 정현파 형태이나 전류의 영점

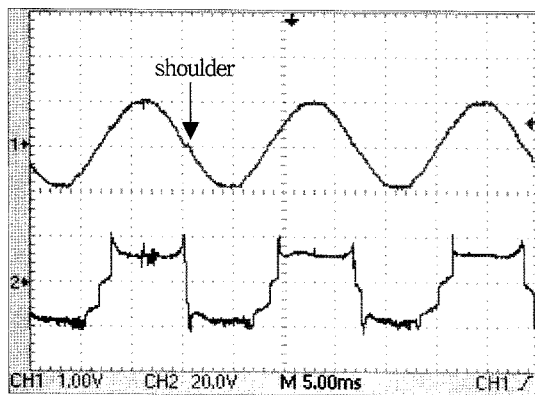


Figure 9. Series arc waveforms of the Incandescent lamp load.

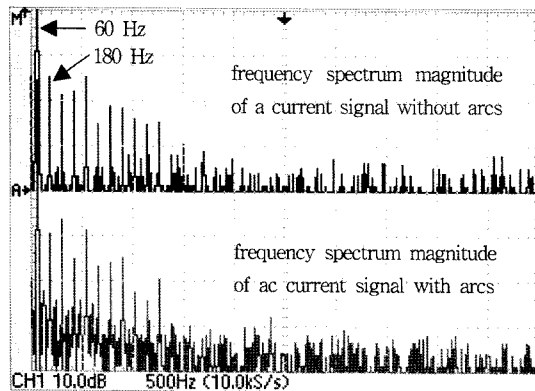


Figure 10. Frequency Spectrum magnitude of current signals of the Incandescent lamp load.

에서 미세한 처짐(shoulder) 현상이 나타남을 확인할 수 있었다. 이동전극과 고정전극 사이의 전압이 Figure 9의 아랫부분에 나타나 있고 아크 발생의 임계전압에 의하여 그 파형의 형태가 구형파와 유사하다.

아크 발생의 유무에 따른 백열전등 부하장치의 전류 신호에 대한 5kHz까지 주파수 스펙트럼 크기가 각기 Figure 10의 위와 아래 부분에 나타나 있다. 주파수 60Hz의 교류 전력이어서 두 전류신호의 주파수 스펙트럼 모두에서 60Hz 홀수 배의 고조파성분(60n Hz, n=3, 5, 7, ..., 21)이 나타나 있다. 아크가 발생된 경우에는 이 고조파 양 측면 대역과 고주파수 대역에서 스펙트럼 크기가 크게 증가됨을 알 수 있다. 이것은 영점 처짐 현상 등에 따른 아크 전류파형의 왜곡에 기인된 결과이다.

한 끝단에 교류 220V가 인가되고 그 반대의 끝단이 개방된 1.25mm² 전선을 병렬 아크 발생장치로 절단하였다. 아크 발생시간을 80msec로 설정한 아크 실험의 전류파형이 Figure 11에 나타나 있고 60Hz 교류의 반주기 단위로 임펄스 형태의 전류가 불규칙적으로 흐름을 알 수 있다. 아크 전류의 최대치는 대략 100A이고 아크 전류의 영점 처짐(shoulder) 현상이 매우 크게 나타남을 알 수 있다. UL 1699에는 0.5초 이내에 8개의 임펄스 형태의 전류파형이 있게 되면 아크 차단기가 회로를 차단하도록 규정하고 있다.

아크 실험을 통하여 직렬 아크 전류에는 크기 감소가 동반되고 병렬 아크에는 임펄스 형태의 대전류가 흐름을 알 수 있다. 아크 전류파형의 특징은 영점 처짐 현상이고 이것에 의하여 60Hz 고조파 사이 및 고주파수 대역에서 스펙트럼 크기의 증가임을 알 수 있다. 아크 발생의 검출에 이 아크 전류의 특징을 적용하기 위하여서는 좀 더 다양한 부하들에 대한 아크 실

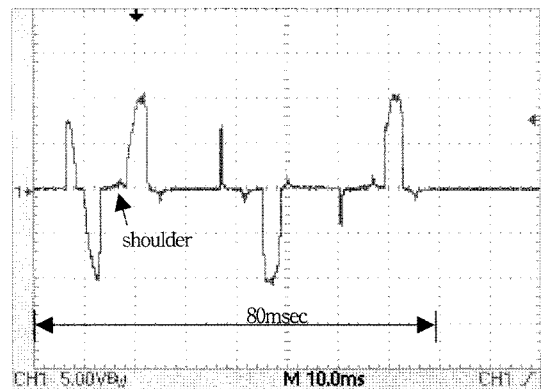


Figure 11. Parallel arc current waveform for 80 msec.

험을 통하여 이 특징을 검증할 필요가 있다.

4.2 특정 부하에 대한 아크 전류파형

정상적인 동작에서 아크 전류와 유사한 파형을 발생시키는 부하들이 있다.⁵⁾ 이것들은 백열전등 또는 커패시터 스타트 모터와 같이 기동 초기에 돌입전류가 큰 부하, 전자조광기 또는 SMPS(switching mode power supply)와 같이 정상운전 상태에서 비정현파 전류를 생성하는 비선형 부하, 그리고 유니버설(universal) 모터 또는 다리미의 바이메탈과 같이 정상운전 상태에서 전류의 단속(switching)이 있는 부하 등으로 분류될 수 있다.

돌입전류가 파형을 고찰하기 위하여 커패시터 스타트 모터가 내장된 750W 컴프레서를 작동하였다. Figure 12의 측정된 전류 파형에서 컴프레서의 구동 초기에 커패시터를 충전하기 때문에 큰 돌입전류가 순간적으로 흐르는 것을 알 수 있다. 돌입 전류의 초기 상승 형태는 Figure 11의 병렬 아크 전류의 형태와 유사하나 돌입전류의 크기는 점진적으로 줄어들고 영점부근에서 처짐 현상도 없음을 확인할 수 있었다.

전자조광기는 전등 부하의 전류를 제어하여서 빛의 세기를 조절하는 비선형 장치이다. 직렬 아크 발생장치와 백열전구 부하장치 사이에 전자조광기를 삽입하고 전류파형을 측정하였다. 아크 발생이 없는 경우에 백열전구 부하장치의 전류파형이 Figure 13에 나타나 있고 전류의 실효치는 4.2A이었다. 부하 전류파형은 영점 전류에서 처짐 현상이 극심한 비정현파 전류 형태임을 알 수 있다.

백열전구 부하장치에 아크를 발생시켰을 때에 아크 전류파형이 Figure 14의 윗부분에 나타나 있으며 이 전류의 실효치는 4.0A이었다. 직렬 아크 실험장치의 이동전극과 고정전극 사이의 전압파형이 Figure 14의 아

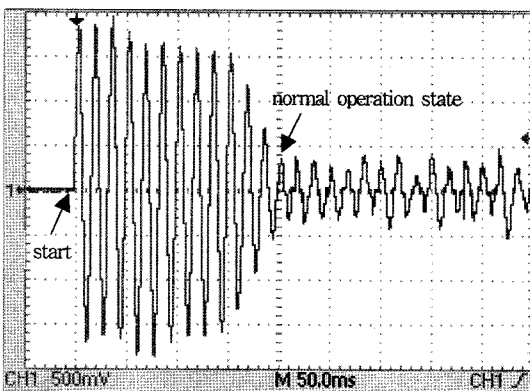


Figure 12. Normal current waveform of the compressor.

랫부분에 나타나 있다. 아크 전류파형은 아크의 발생이 없는 그것과 육안으로 식별하기가 어려울 정도로

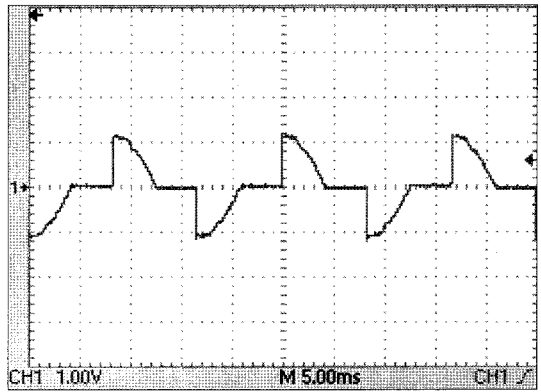


Figure 13. Normal current waveform of the dimmer load.

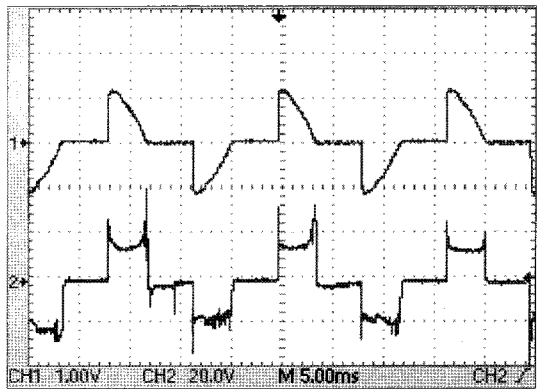


Figure 14. Arcing waveforms of the dimmer load.

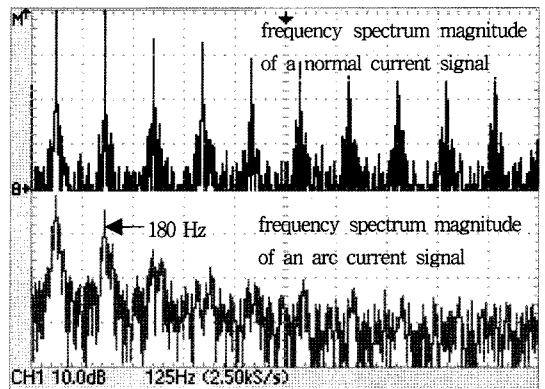


Figure 15. Frequency spectrum magnitude of current signals of the dimmer load.

매우 유사함을 알 수 있다.

Figure 13과 14의 전류파형들에 대한 1.25kHz까지의 주파수 스펙트럼 크기가 각기 Figure 15의 위와 아래 부분에 나타나 있다. 전자조광기의 비정상현과 전류 형태에 의하여 정상동작 전류파형에 60Hz의 고조파 신호성분이 매우 크게 있음을 알 수 있다. 아크가 발생된 경우에 주파수 스펙트럼의 크기는 60Hz 고조파 신호성분들을 제외한 전체 주파수 대역에 걸쳐서 증가함을 알 수 있다.

유니버설 모터는 브러시와 정류자의 접촉에 의하여 전류가 주기적으로 단속되어서 정상동작 상태에서 미약한 아크가 발생한다. 유니버설 모터를 내장한 진공 청소기의 정상동작의 전류파형 및 아크 발생의 전류파형들이 각기 Figure 16의 위와 아래 부분에 나타나 있다. 주기적인 전류 단속에 의하여 두 전류파형들의 영점 모두에서 아주 미세한 처짐 현상이 나타나 있다. 아크가 발생된 전류파형에서는 영점 처짐 현상이 좀 더 뚜렷하고 임펄스 형태의 잡음이 추가됨을 확인할 수 있다.

Figure 16의 전류파형들에 대한 주파수 스펙트럼의 크기가 Figure 17에 나타나 있다. 이 두 주파수 스펙트럼의 크기들을 비교하면 아크 발생한 경우에 주파수 스펙트럼의 크기가 주파수 전대역에 걸쳐서 증가함을 알 수 있다. 따라서 전류의 단속형 부하에서도 60Hz 고조파 성분 크기와 고조파 이외의 주파수 대역에서 스펙트럼 크기의 비율로 아크 발생을 감지할 수 있다.

특정한 부하들에 대한 아크 전류파형에서는 영점 처짐의 특징을 분간하기가 매우 어려울 수 있으나 주파수 스펙트럼의 특징은 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있었다. 아크 발생의 검출에 이 주파수 스펙트럼 크기의 특징을 응용하는 간단한 예는 다음과 같다. 먼저, 전류파형 신호에 FFT(Fast Fourier Transform)를 수행

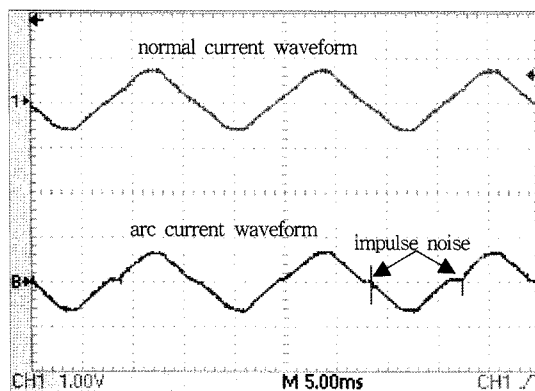


Figure 16. Current waveforms of the universal motor.

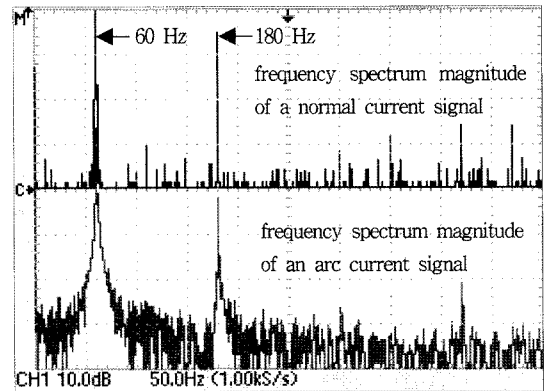


Figure 17. Frequency spectrum magnitude of current signals of the universal motor.

하고 60Hz 고조파 스펙트럼 크기들의 합산 값과 그 이외의 스펙트럼 크기들의 합산 값을 계산한다. 그 다음으로, 이 두 합산 값들의 비를 구하고 아크 발생에 대한 임계비와 이 구해진 비를 비교하여서 아크 발생을 결정할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 UL 1699의 아크 발생장치를 사용하여 돌입전류형, 비선형 및 전류 단속형 등의 다양한 부하에 대하여 아크를 발생시키고 아크 전류파형을 분석하였다. 아크 발생 시에 직렬 아크의 전류 크기는 약간 감소하고 병렬 아크의 발생에는 임펄스 형태의 대전류가 흐름을 확인하였다. 아크 전류의 시간영역 특징은 영점에 처짐 현상이 있는 것이고 주파수영역 특징은 60Hz 고조파 성분을 제외한 전대역의 주파수에 걸쳐서 스펙트럼 크기가 증가되는 것이다. 비선형 및 전류 단속형 부하에서 아크 전류의 시간영역 특징보다 주파수영역 특징을 사용하면 아크 검출이 보다 용이할 수 있다.

주파수영역 특징을 사용하여 아크 발생을 효과적이고 정확하게 검출하기 위하여서는 DSP 프로세서의 사용에 의한 FFT, 디지털 필터 또는 웨이브렛(wavelet) 등과 같은 디지털 신호처리 기법의 응용연구가 필요하다. 본 논문의 아크 전류파형의 고찰 결과는 디지털 신호처리에 의한 아크 검출의 알고리즘 구현에 기본 자료로 활용될 것으로 사료된다.

참고문헌

1. J.J. Shea, "Conditions for Series Arcing Phenomena

- in PVC Wiring”, IEEE Trans. on Components and Packaging Technologies, Vol.30, Issue 3, Sept. pp.532-539(2007).
2. 최충석, 김동우, 김영석, 이기연, “고감도형 누전차단기 접점의 스위칭에 따른 아크 비산 특징”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.19, No.2, pp.75-80(2005).
 3. UL standard for Safety for Arc-Fault Interrupters, UL 1699, First Ed., Feb. 26(1999).
 4. National Electric Code (NEC)(2002).
 5. 김창중, 노용호, “전기 화재 요인으로서의 스파크 신호 특성 분석”, 한국조명전기설비학회, 추계학술대회 논문집, pp.55-59(1997).
 6. W. Wang, S. Liu, and J. E. Jones, “Flux Cored Arc Welding : Arc Processing and Metal Transfer Characterization”, Welding Journal, Vol.74, No.11. pp.369-377(1995).
 7. 광동걸, 신미영, 정도영 (2006), “아크 및 스파크 재해에 대한 누전차기 트립을 위한 보조제어 전기안전장치에 관한 연구”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.20, No.1, pp.71-76(2006).
 8. 소방방재청, 2006년도 화재통계연감, <http://www.nema.go.kr/data/statistic/view.jsp>(2007).
 9. 송길목, 최충석, 김향곤, 김영석, “AC 전류에 의해 응용된 나전선의 발열특성”, 한국조명전기설비학회 논문지, Vol.20, No.1-2, pp.77-84(2006).