

전원 전류 고조파 해석에 의한 직렬 아크 고장 검출 방안

(Series Arcing Fault Detection Method Using Harmonics Analysis of Supply Current)

안정운* · 오용택**

(Jeongwoon Ahn · Yong-Taek Oh)

Abstract

Recently, Concerns of imbalance for power supply has been raised by the increase of electric power consumption, but the interest of electric safety is still lacking due to the incompleteness of regulations. Particularly, Arcing fault, direct cause of electric fire accidents, is difficult to detect, interrupt due to unformal signal behaviour in previous research and apply to real system.

In this paper, Arcing fault simulator device was fabricated to investigate the characteristics of series arcing fault and simulated the faults in various real load. Also, this study are analysed arcing fault signal by using the harmonic analysis of the acquired data from the current of the power supply and proposed the methods to prevent the series arcing fault accidents in advance.

Key Words : Series Arcing Fault, FFT, Harmonic Analysis, Electric Fire

1. 서 론

2011년 9월 공급을 초과한 전력수요로 인해 전국적인 순환 정전이 실시된 이후 대 정전에 대한 우려로 전력수급 및 품질에 대한 관심이 고조되고 있다. 급증하고 있는 전력수요에 비해 전기안전과 관련한 관심

과 연구는 미비한 실정이다. 전기화재의 직접적인 발화 원인이 되는 아크 고장은 고장 전류의 크기가 작아 기존의 누전차단기로는 감지 및 차단이 불가능하며, 고장의 형태가 정형적이지 않은 특성으로 인해 관련한 연구에도 많은 어려움이 따른다.

아크 고장은 배선의 노화나 단선 혹은 반단선에 의한 접촉 불량, 멀티탭을 이용한 무분별한 전기사용 등과 같은 원인으로 인해 발생한다. 접촉 불량이 발생하면서 국부적인 스파크(Spark)가 발생하고, 온도가 순간적으로 1만~1만5천°C까지 급상승하여 주변의 목재나 플라스틱과 같은 물질과 반응하면서 화재로 진전 된다. 미국이나 유럽과 같은 주요 선진국에서는 아크 고장에 관한 연구가 지속적으로 진행되어 UL1699와 IEC62606 같은 기준이 마련되어 있고, 미국과 캐나다 등 북미지역에서는 전기화재를 예방하고자 2002년부터 일반 주

* 주저자 : 한국기술교육대학교 전기·전자·통신공학부 전기공학전공

** 교신저자 : 한국기술교육대학교 전기·전자·통신공학부 전기전공 교수

* Main author : Korea University of Technology and Education

** Corresponding author : Korea University of Technology and Education

Tel : 041-640-8510, Fax : 041-640-8513

E-mail : jwahn@koreatech.ac.kr

접수일자 : 2014년 7월 31일

1차심사 : 2014년 8월 6일, 2차심사 : 2014년 9월 24일

심사완료 : 2014년 10월 9일

택에 아크 차단기(AFCI) 설치를 의무화했다. 2008년부터는 욕실과 부엌 등 감전사고 위험이 높은 회로를 제외한 모든 회로에 아크 차단기를 사용하여 전기 화재 점유율이 20%에서 10% 이하로 감소했다[1].

본 연구에서는 전기화재사고 예방을 위해 UL1699에서 제시하는 방법으로 모의 직렬 아크 발생장치를 설계 및 제작하고 다양한 부하에 연결하여 사고를 모의하여 데이터를 취득, 전원 공급단 전류 측에서의 직렬아크 신호 특성을 고조파 해석방법으로 분석한다. 또한 분석한 신호의 특징고조파를 검출하여 차단할 수 있는 방법을 제시하고, 검증함으로써 유용성을 검토하고자 한다.

2. 아크 고장

2.1 아크 고장의 종류

아크는 “전극의 부분적인 증발로 인해 수반되는 절연 개체를 통한 전기의 지속적인 빛의 방출”로 정의된다[2].

아크고장은 그림 1과 같이 직렬아크, 병렬아크, 접지아크로 나눌 수 있다.

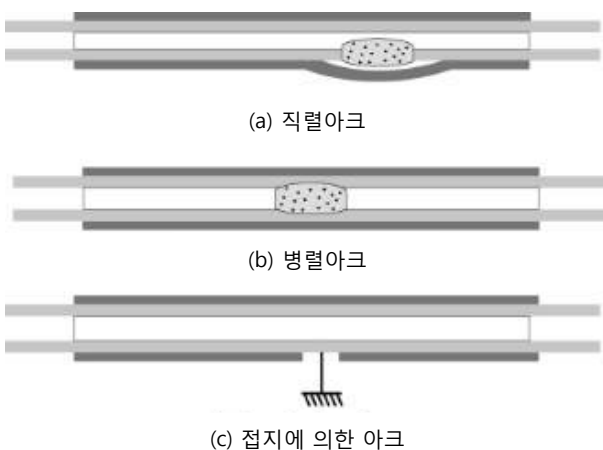


그림 1. 아크 고장의 종류[3]
Fig. 1. Type of Arc Fault[3]

그림 1의 (a)는 직렬아크 고장을 나타낸 것으로 부하와 전기적으로 직렬로 연결되어 있는 부분에서 발

생한다. 이때의 고장전류는 아크 고장 발생 시의 임피던스와 부하의 임피던스에 의해 제한되어 에너지 레벨이 낮아 기존 차단기의 보호레벨 범위에 속하지 않는다[4-6]. 그림 1의 (b)는 병렬아크, 그림 1의 (c)는 병렬 아크 고장의 일종인 접지 아크고장을 나타낸 것으로 상 도체와 중성선 또는 상 도체와 접지 간에 의도치 않은 도전경로가 형성되었을 경우 발생한다.

2.2 직렬 아크 고장 신호 특징

UL1699에서는 직렬 아크 고장의 전압, 전류 형태를 제시하고 있다(그림 2 참조). 간헐적이고 비정형적인 형태로 발생하는 아크 고장의 특성으로 인해 아크 고장 전류는 다음과 같은 특징을 갖는다. ① Shoulder 영역이 존재한다.(전류가 '0'인 구간) ② Peak 진폭의 변화가 있다. ③ 전류 상승 속도의 변화. 또한 아크 고장 전압은 파형의 형태가 사각의 찌그러진 형태로 나타나는 특징을 가지고 있다[7].

하지만 부하의 종류와 특성, 아크 고장의 크기에 따라 상기에 열거한 특징이 비정형적으로 나타나는 특성을 가지고 있다.

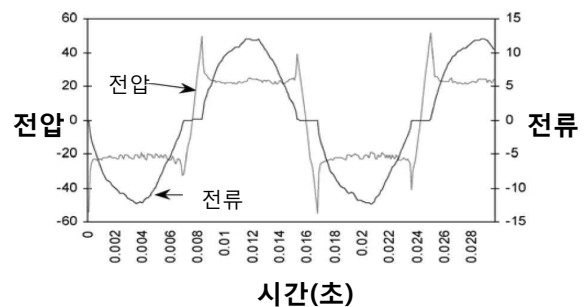
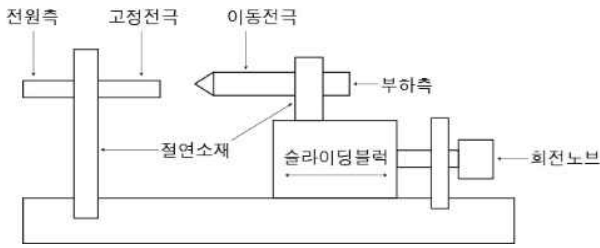


그림 2. 전형적인 아크 고장 전압·전류의 특징
Fig. 2. Typical Arcing fault voltage and current Characteristics

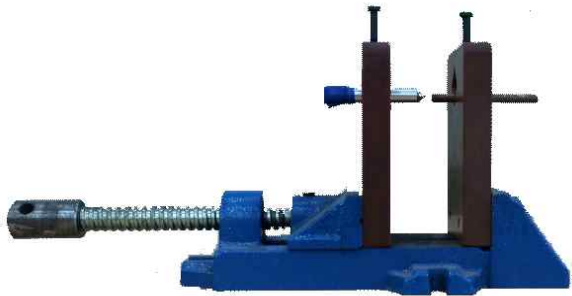
3. 모의 직렬 아크 고장 실험

직렬 아크 고장의 특징을 관측하기 위해 모의 직렬 아크 고장 발생장치를 제작했다. UL1699에서 제시하는 기준에 따라 제작하였으며, 세부 구성내용은 그림 3과 같다.

전원 전류 고조파 해석에 의한 직렬 아크 고장 검출 방안

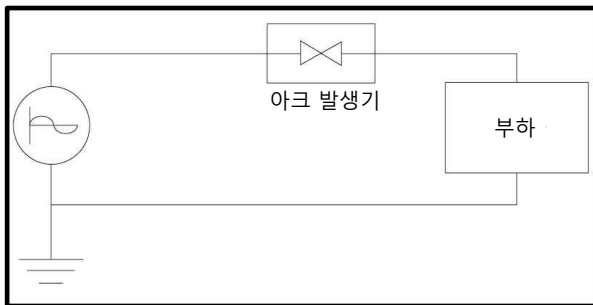


(a) UL1699에서 제시한 직렬 아크 고장 발생 장치

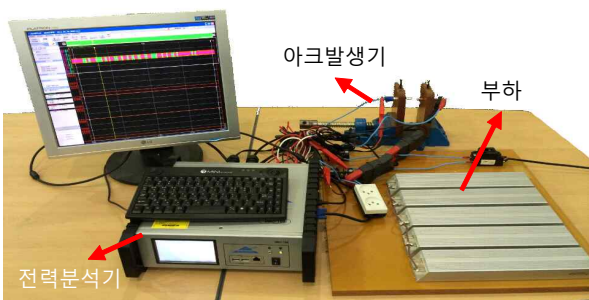


(b) 제작한 직렬 아크 고장 발생 장치

그림 3. 모의 직렬 아크 발생 장치
Fig. 3. Simulation Device of Series Arcing Faults



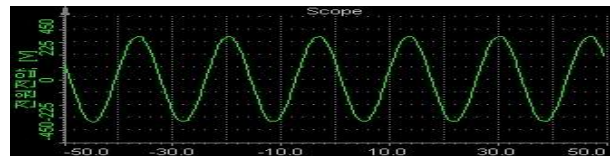
(a) UL1699에서 제시한 직렬 아크 실험 회로



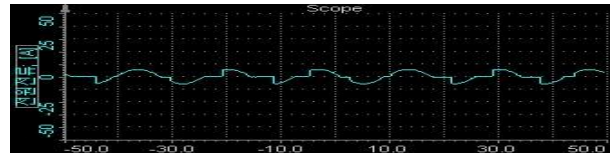
(b) 실제 실험에 사용한 회로

그림 4. 직렬 아크 고장 실험도
Fig. 4. Experimental Schematic of Series Arcing Fault Simulation

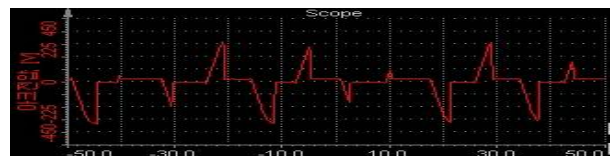
그림 3 (a)는 UL1699에서 제시한 직렬 아크 실험 장치 구성도이며, 두 전극을 고정전극(전원측)과 이동전극(부하측)으로 구성하고, 이동전극의 조절은 슬라이딩 방식을 이용하여 회전노브를 조작하면 좌우로 이동하는 형태이다. 실제 제작한 모의 직렬 아크 고장 발생장치는 그림 3 (b)와 같으며, 각 전극의 고정 및 절연을 위해 폐놀계 합성수지인 베이클라이트



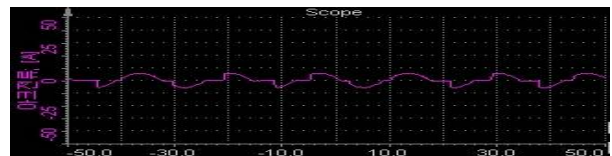
(a) 전원 전압



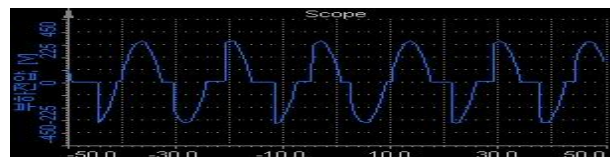
(b) 전원 전류



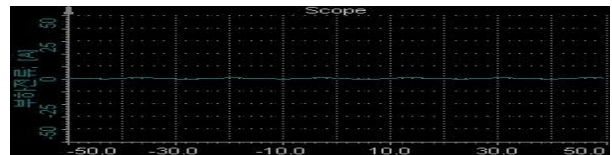
(c) 아크 고장 전압



(d) 아크 고장 전류



(e) 부하 전압



(f) 부하 전류

그림 5. 모의 직렬 아크 고장 실험 결과
Fig. 5. Result of Series Arcing Fault Simulation

(Bakelite)를 이용하였다.

제작한 아크 발생기를 UL1699에서 제시하는 시험 방법으로 그림 4와 같이 회로를 구성하였으며, 전원은 단상 220V, 부하는 무유도 저항(50Ω)을 연결하였고, 전력분석기(Dewetron - DMU700)를 이용하여 측정하였다.

실험의 결과는 그림 5와 같다. 2.2절에서 설명한 아

크 전류의 특성 '0'전류 구간, Peak진폭의 변화, 전류 상승속도 변화 등의 특징이 나타났다. 그림 5의 (a)와 (b)는 직렬 아크 고장이 발생 했을시 전원 측에서 측정한 전압과 전류의 파형이고, (c)와 (d)는 아크 발생기의 전압, 전류, (e)와 (f)는 부하측에서 측정한 전압과 전류의 파형이다.

크기와 형태가 비정상적인 아크 고장의 특성으로 인해 UL1699에서 제시한 아크 고장의 전압과 전류파형의 형태와는 차이가 있으나 전원측 전압을 제외한 나머지 전압, 전류 파형은 원래의 sine파와는 다른 형태를 띠고 있다.

그림 6은 위의 실험결과를 주파수영역(Frequency Domain)에서 FFT(Fast Fourier Transform)방법으로 제10차 고조파(600Hz)까지 분석을 한 결과이다.

전원전압을 제외한 나머지 측정값에서 기본파 성분을 포함하여 전체 주파수 영역에서 고조파 성분이 함유되어 있으며, 특히 제3차 고조파 성분의 함유율이 다른 차수보다 큰 것을 알 수 있다.

각 차수별 고조파 함유율은 표 1과 같고, 전원전압의 변화는 미미하나 전원 전류의 형태는 아크 고장 전류와 유사한 형태로 변화함을 볼 수 있다.

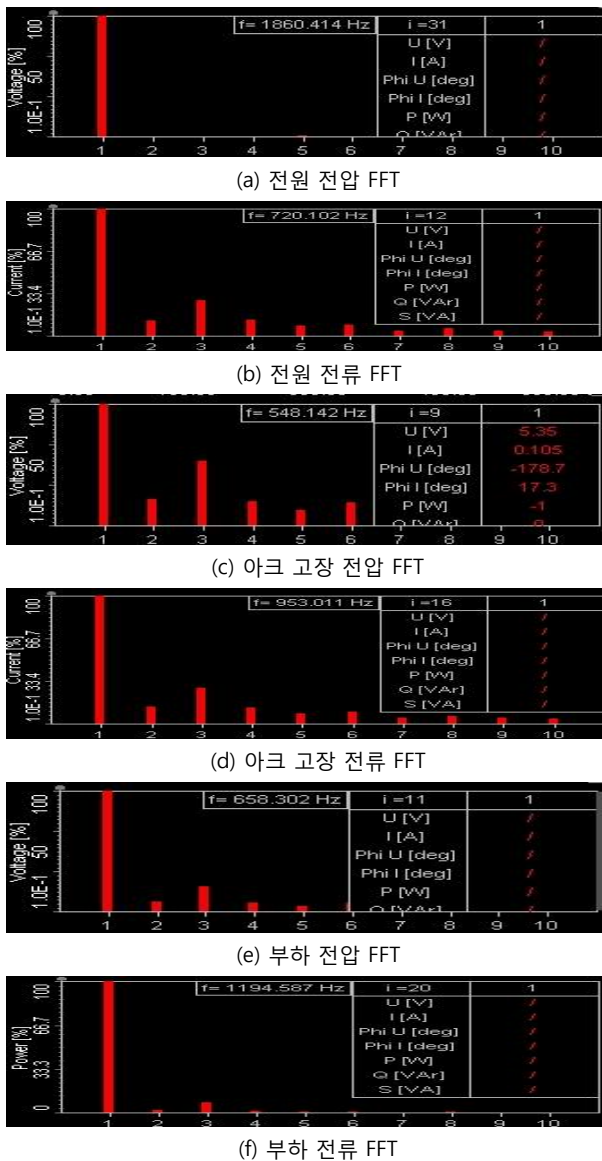


그림 6. 직렬 아크 고장 신호 FFT분석 결과
Fig. 6. FFT Analysis Result of Series Arcing Fault Signals

표 1. 직렬 아크 고장 신호 FFT분석 결과
Table 1. FFT Analysis Result of Arcing Fault Signals

단위 : %

	전원 전압	전원 전류	고장 전압	고장 전류	부하 전압	부하 전류
기본파	100	100	100	100	100	100
제2차	0.13	8.56	22.15	8.56	8.56	8.69
제3차	0.23	20.89	53.10	20.89	20.85	20.80
제4차	0.13	7.58	19.87	7.63	7.58	7.45
제5차	0.89	4.84	12.53	5.13	4.86	4.96
제6차	0.07	7.37	19.17	7.48	7.37	7.45
제7차	1.22	5.12	11.37	5.31	5.12	4.97
제8차	0.11	5.45	14.67	5.62	5.45	5.59
제9차	0.39	3.23	8.08	3.24	3.06	3.11
제10차	0.07	2.89	7.69	2.99	2.92	2.79

아크 고장 전압과 전류의 변화가 가장 크지만 임의 지점에서 발생하는 아크 고장의 특성상 아크 고장 지점의 고장 전압과 전류를 이용한 검출 방법은 실효성이 없고, 부하 측의 전압과 전류를 이용한 검출은 선로에서 고장이 발생할 경우 검출하지 못하는 단점이 있다. 따라서 본 연구는 아크 고장시의 전원 전류의 변화에 초점을 맞추어 직렬 아크 고장 특성을 파악하고자 하였다.

4. 직렬 아크 고장 신호 분석

정상상태일 때의 전류 파형은 정현 대칭이라 매우 작은 크기의 고조파 성분만이 함유되어 있다. 하지만 아크 고장이 발생하면 전류의 파형은 매 주기마다 다른 형태를 보임으로 인해 짝수와 홀수 차수의 고조파 성분이 증가한다. 이러한 특징을 활용하여 주파수 영역에서 아크 고장을 검출하면, 시간의 영역에서 아크 고장을 검출하는 것보다 수월한 방법으로 아크를 검출할 수 있다[8].

4.1 저항 소자 부하의 전원전류 분석

실제 전원회로에서 아크 고장을 모의하여 일반적인 저항 소자 부하인 다리미와 전기포트르 이용해 아크 고장 실험을 수행하였다. 정상 상태일 때와 아크 고장 일 때의 전원전류 고조파 함유율을 비교하였고, 결과는 그림 7과 같다.

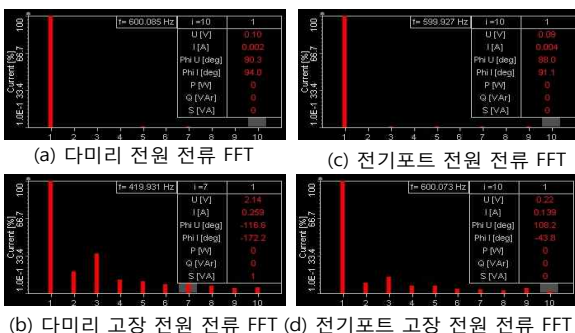


그림 7. 부하의 형태별 고장전류 FFT 분석
Fig. 7. FFT Analysis of Fault currents for Load types

다리미와 전기포트 모두 정상상태일 때는 대칭적인 정현파형태의 전류파형으로 FFT분석 결과 기본파 성분을 제외한 나머지 고조파 성분은 거의 나타나지 않았다. 하지만 아크 고장일 때의 FFT분석 결과 모든 차수에서 고조파 성분이 나타났으며, 특히 제3차 고조파의 함유율이 다른 차수의 고조파보다 크게 나타났다. 기본파성분을 기준(100%)으로 각 차수별 고조파의 함유율은 표 2와 같다.

표 2. 각 차수별 전류의 고조파 크기
Table 2. Harmonics size of Order

단위 : %

	다리미 (정상)	다리미 (아크)	전기포트 (정상)	전기포트 (아크)
기본파	100	100	100	100
제2차	0.02	21.98	0.05	9.21
제3차	0.42	28.26	0.66	20.67
제4차	0.02	4.98	0.05	7.23
제5차	0.59	13.74	0.65	6.11
제6차	0.06	5.01	0.05	3.75
제7차	0.93	5.81	0.81	8.39
제8차	0.04	4.89	0.03	3.83
제9차	0.39	5.17	0.63	3.71
제10차	0.04	4.64	0.04	3.57

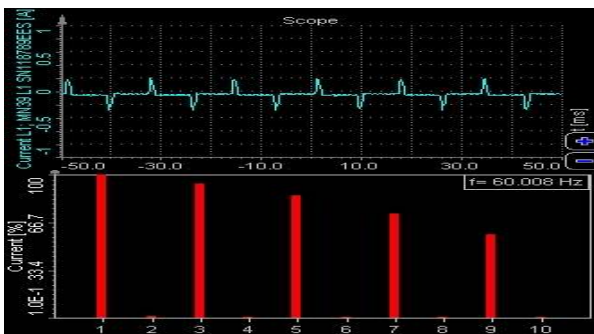
고조파 함유율이 가장 큰 제3차 고조파의 크기는 다리미의 경우 28.26%, 전기포트는 20.67%의 함유율을 보였다. 위의 실험 결과를 통해 주파수영역에서 전원 전류를 분석하여 제 3차 고조파의 함유율이 다른 차수의 고조파 함유율보다 크게 나타나면 직렬 아크 고장으로 판단할 수 있을 것으로 사료된다.

4.2 전력전자 소자 부하의 전원전류 분석

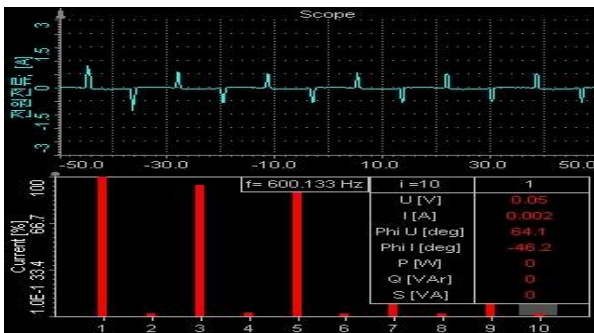
정상상태일 때 부하전류의 형태가 아크 고장 전류처럼 비대칭을 띠고, '0'전류 구간이 나타나는 전력전자 소자를 이용한 부하 실험을 통해 저항 소자 부하와의

비교를 해보았다.

그림 8은 전력전자 소자를 사용한 부하인 휴대폰 충전기와 노트북의 정상상태 전원 전류 파형과 FFT분석 파형이다. 정상상태임에도 불구하고 전류의 형태는 아크 고장시의 전류형태와 유사하고, FFT를 통한 고조파 분석에도 제3차 고조파와 제5차 고조파 등 홀수 차수의 고조파 성분이 함유되어 있음을 볼 수 있다.



(a) 충전기 정상상태 전원 전류와 FFT분석



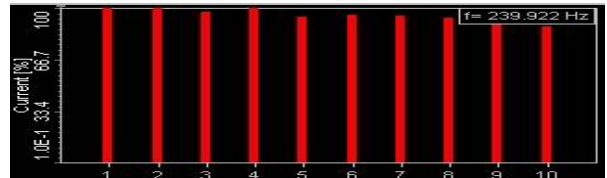
(b) 노트북의 정상상태 전원 전류와 FFT분석

그림 8. 전력전자소자 이용 부하 정상 전류 파형
Fig. 8. Regular Current waveform for the power electronic devices

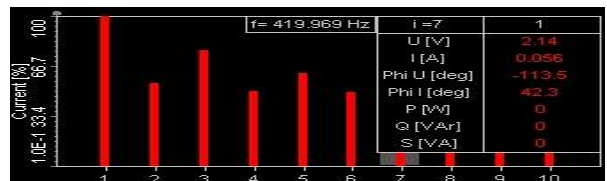
그림 9는 휴대폰 충전기와 노트북의 아크 고장시의 전원전류를 FFT분석한 파형이다. 정상상태와는 달리 모든 차수에서 고조파가 함유되어 있고, 이는 앞서 설명한 정상상태의 전원 전류의 FFT분석과 구분되는 특징이다.

위의 실험의 결과를 정리하면 표 3과 같다. 정상상태의 충전기는 짝수 차수에서는 고조파 성분이 함유되지 않았으나 노트북의 경우 짝수 차수에서 기본파 대비 약 3%의 고조파가 함유되어 있음을 볼 수 있다.

아크 고장시에는 저항 소자 부하와 동일하게 모든 차수에서 고조파 성분이 함유되었으며, 특히 제3차 고조파의 함유율이 가장 큰 것을 확인하였다.



(a) 충전기의 아크 고장 전원 전류 FFT분석



(b) 노트북의 아크 고장 전원 전류 FFT분석

그림 9. 전력전자소자 이용 부하 아크 고장 전류 파형 FFT
Fig. 9. FFT Analysis of Arcing Fault Current waveform for the power electronic devices

표 3. 충전기와 노트북의 고조파 크기 비교
Table 3. Comparison of harmonics(Charger and laptop)

단위 : %

	충전기 (정상)	충전기 (아크)	노트북 (정상)	노트북 (아크)
기본파	100	100	100	100
제2차	0	97.84	2.94	54.63
제3차	93.75	101.08	94.11	77.748
제4차	0	100.00	2.94	50.00
제5차	84.37	94.63	88.23	62.04
제6차	0	95.69	2.94	49.07
제7차	74.87	94.62	85.29	51.85
제8차	0	93.54	2.94	43.52
제9차	56.25	93.54	77.94	38.89
제10차	0	88.17	2.94	43.52

전력전자 소자를 이용한 부하의 경우에는 제3차 고조파의 함유율이 다른 차수의 고조파 함유율보다 클

경우 아크 고장으로 판단할 수 있으나, 정상상태에서도 큰 제3차 고조파 성분이 함유되어 있어 아크 고장 판단이 부정확할 수 있다.

본 연구에서는 아크 고장시 고조파 함유량을 표 4와 같이 종합함으로써, 제2차와 제4차 고조파 함유율을 비교하여 각각의 고조파 함유율이 기본과 대비 4% 이상이고, 전체 고조파 분포 중에 제3차 고조파의 함유율이 가장 클 경우 아크 고장으로 판단할 수 있음을 제안한다. 정상상태의 노트북의 짝수차수 고조파는 약 3% 함유되어있고, 다리미의 아크 고장 실험 결과 제2차와 제4차 고조파는 약 4% 이상이므로 4%의 문턱값을 제안하는 바이다.

표 4. 아크 고장시 고조파 크기(부하별)
Table 4. Harmonics size of Order(each load)

단위 : %

	다리미	전기포트	충전기	노트북
기본과	100	100	100	100
제2차	4.98	9.21	97.84	54.63
제3차	28.26	20.67	101.08	77.748
제4차	4.98	7.23	100.00	50.00
제5차	13.74	6.11	94.63	62.04
제6차	5.01	3.75	95.69	49.07
제7차	5.81	8.39	94.62	51.85
제8차	4.89	3.83	93.54	43.52
제9차	5.17	3.71	93.54	38.89
제10차	4.64	3.57	88.17	43.52

5. 결 론

본 연구는 전기화재 사고의 원인이 되는 직렬 아크 고장의 실험을 통한 직렬아크 신호의 특성을 분석하고 이를 이용한 직렬 아크 고장 신호 검출방안 및 유용성을 아래와 같이 제안한다.

- ① 무유도 저항을 이용한 직렬 아크 고장 실험을 통해 직렬 아크 고장 검출에 전원단 전류의 고조파 분석이 필요하다.

- ② 저항소자 부하 실험(다리미, 전기포트)을 통해 전원 전류 고조파 중 제3차 고조파의 함유율이 가장 클 경우 직렬 아크 고장으로 판단이 가능하고,
- ③ 전력전자 소자를 이용한 부하 실험(노트북, 충전기)을 통해 전원 전류 고조파 중 제2차와 제4차 고조파의 함유율이 4% 이상임을 확인하고(표 4 참조), 전체 고조파 분포 중에 제3차 고조파가 다른 차수의 고조파 보다 크기가 크면 아크 고장으로 판단할 수 있다.

본 연구에서 전력전자소자를 이용한 부하에서 아크 고장 판단을 위해 표 4를 참조하여 제2차와 제4차 고조파 함유율에 4%의 문턱값을 제안하였으나 향후에는 다양한 부하의 용량 변화에 대한 신뢰성 있는 분석과 복합적인 부하 실험 및 프로세서를 이용하여 정확하고 신속한 직렬 아크 고장 검출에 관한 연구를 추진하고자 한다.

이 논문은 한국조명·전기설비학회 2013년도 추계학술대회에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

감사의 글

이 논문은 2013년도 한국기술교육대학교 대학원 지원을 받아 수행된 연구로 이에 감사드립니다.

References

- [1] Sun-bae Bang, "Utilized AFCI(Arcing Fault Circuit Interrupter) for the Prevention of Electrical Fire", Monthly of Electrical Technology and Information, vol. 206, Nov 2011.
- [2] Underwrites Laboratories Inc. UL1699, "Arc-Fault Circuit -Interrupters", May, 2003.
- [3] Wan-Sung Kwon, Su-Kyung Choi, Jung-Muk Choi, Bayasgalan, Gyu-Ha Choe, "A study on Arc Pattern of Arc Generator Based on UL1699", Proceeding of the KJPE, pp. 10-12, July 2009.
- [4] Wen-Jun Li, Yuan-Chun Li, "Arc fault detection based on wavelet packet", Proc. 2005 Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, vol. 3, pp. 1783-1788, 2005.
- [5] Carlos E. Restrepo, "Arc fault detection and discrimination methods", IEEE Conf. on Electrical Contacts, pp.115-122, 2007.

- [6] Robert F. Coughlin, and Frederick F. Driscoll, Operational Amplifiers Linear Integrated Circuits, 3rd Edition, Prentice-Hall, INC., 1987.
- [7] George D. Gregory, Kon Wong, Robert F. Dvorak, "More About Arc Fault Circuit Interrupters", IEEE Transactions on industry applications, Vol. 40, pp. 1006-1011, July/August 2004.
- [8] Alexandre B. Nassif, Thavatchai Tayjasanant, "Flicker Representation via STFT and Wavelets", Power Engineering Society General Meeting, 2006, IEEE, pp.1-7.



오용택 (吳龍澤)

1958년 6월 17일생. 1980년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1982년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1979~1991년 한국전력공사 근무. 1987년 한국전력공사 정보처리처 과장 역임. 1991년~현재 한국기술교육대학교 전기·전자·통신공학부 전기전공 교수. 2007년 퀸스랜드 대학교 방문 연구원.

◇ 저자소개 ◇



안정운 (安正雲)

1984년 12월 9일생. 2013년 한국기술교육대학교 전기·전자·통신공학부 전기공학 전공 졸업. 2013년~현재 한국기술교육대학교 전기·전자·통신 공학부 전기공학전공 재학(석사).