

## 저압배선계통에서 직렬아크의 검출에 관한 연구

### A Study on the Series Arc Detection in Low-voltage Wiring Systems

김일권<sup>1</sup>, 박대원<sup>1</sup>, 최수연<sup>1</sup>, 박찬용<sup>1</sup>, 김황국<sup>1</sup>, 길경석<sup>1,a</sup>

(Il-Kwon Kim<sup>1</sup>, Dae-Won Park<sup>1</sup>, Su-Yeon Choi<sup>1</sup>, Chan-Yong Park<sup>1</sup>, Hwang-Kuk Kim<sup>1</sup>, and Gyung-Suk Kil<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

This paper dealt with the detection algorithm of series arcing, which is a cause of electric fires in low-voltage wiring systems. To find the distinguished electrical features of series arc, we simulated series arcing by the arc generator specified in UL1699. An electric heater, an inverter-controlled vacuum cleaner, and a phase-controlled incandescent lamp were used as loads to generate series arcing. A high-pass filter (HPF) with the low cut-off frequency of 3 kHz at -3 dB was fabricated and applied to separate the series arc signal from the AC voltage source. The experiment showed that the high frequency signal generates randomly during series arcing, and the phase-controlled incandescent lamp produces high frequency pulses even in normal state. In this case, the magnitude, the width, and the randomness of high frequency signal should be analyzed to estimate series arcing precisely.

**Key Words** : Series arc, Detection technique, Indoor wiring system, Electric fires, UL1699, Arc discharge signal

#### 1. 서 론

전기화재를 예방하기 위한 다각적인 노력에도 불구하고 매년 전기기기의 사용으로 인한 화재가 빈번히 발생하고 있으며, 특히 주거 밀집지역의 화재가 높은 비율을 차지하고 있다. 아크는 저압 배선계통에서 발생하는 전기화재의 주된 원인으로 2005년도 전기화재 통계분석에 따르면, 국내에서 발생한 8,554건의 전기화재 중 68% 이상이 아크를 동반한 단락과 누전으로 조사되었다[1,2].

전기화재는 재산상의 손실뿐만 아니라 인명피해를 동반하는 중대한 재해이기 때문에, 전기화재의 징후를 조기에 발견하고 방지할 수 있는 대책이 시급히 요구되고 있다. 일반적으로 퓨즈나 차단기는 옥내 배선과 부하기기를 보호하기 위해 전기설비기술기준에 따라 적합하게 설계되어, 과부하 전류와 단락전류를 차단함으로써 배선 및 부하

기의 과열로 인한 화재 발생을 감소시키고 있다 [3]. 그러나 직렬아크는 이들 보호장치가 동작하지 않는 영역에서 발생하므로, 배선 및 기기가 보호되지 못하고 장기간에 걸쳐 지속적인 아크방전을 일으키게 된다[4]. 직렬아크에 의한 국부적인 과열은 절연물을 탄화 또는 손상시키면서 직접적인 발화 원 또는 단락사고로 진전되어 화재를 발생시키게 된다[5,6]. 이에 대한 대책으로 지난 10 여년 전부터 직·병렬아크의 검출과 고속도 차단기술 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[7,8].

본 논문에서는 저압 배선계통에서 전기화재의 원인인 직렬아크의 발생을 검출하기 위한 방법에 대해 제안하였다. 직렬아크의 발생은 UL1699에 규정된 방법에 의해 수행되었으며[9], 부하로는 저압용 전기기기를 대상으로 하였다. 전열기 및 백열전구와 같은 저항부하와 진공청소기 및 조광제어 백열전구와 같이 고조파를 발생하는 비선형 기기에 대해 직렬아크신호를 측정하고, 전기적 특성을 분석하였다. 특히 직렬아크의 검출은 상용주파수 전원전압에 포함된 직렬아크 신호만을 검출할 수 있도록 선행조사를 통해 고역통과필터(HPF)를 제작하여 적용하였다.

1. 한국해양대학교 전기전자공학부  
(부산시 영도구 동삼동 1)

a. Corresponding Author : kilgs@hhu.ac.kr

접수일자 : 2007. 10. 31

1차 심사 : 2008. 1. 7

심사완료 : 2008. 1. 23

## 2. 직렬아크의 발생 매커니즘

직렬아크는 전기회로에서 부하와 직렬 연결된 단일 도체에서 발생하는 아크를 말한다. 이는 상도체 또는 중성선에서도 발생할 수 있지만 대체로 전기회로의 접속부에서 나타난다. 일반적으로 직렬아크는 소켓 연결부의 부식이나 불완전한 접속에 의해 시작된다. 발생원의 예로는 도체가 느슨하게 고정된 콘센트, 손상된 플러그 또는 소선의 일부가 절단된 전선 내부 등이 있다.

그림 1은 불완전한 접속부에서 직렬아크가 발생하는 과정을 나타낸 것이다. 헐거운 접속부의 양단에는 수 mV의 전압강하가 발생하며, 서서히 가열되어 주변의 절연물을 산화 또는 열분해시킨다. 전압강하는 연결부가 적열되는 수 V까지 증가하며 탄화된 선로를 통하여 단락 또는 병렬아크를 발생시키거나 화재로 발전하게 된다. 직렬아크의 전류는 항상 회로에 연결된 부하의 임피던스에 의해 제한되기 때문에 병렬아크에 비해 전력량이 상당히 작다. 그러나 이는 일반적인 차단기의 동작영역 이하에서 발생하기 때문에 단순한 보호장치로 제거할 수 없으며, 화재로 진전될 때까지 지속적으로 발생한다.

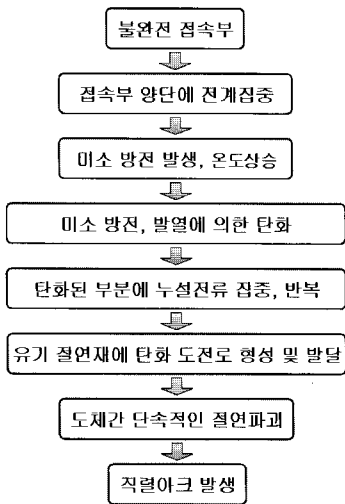
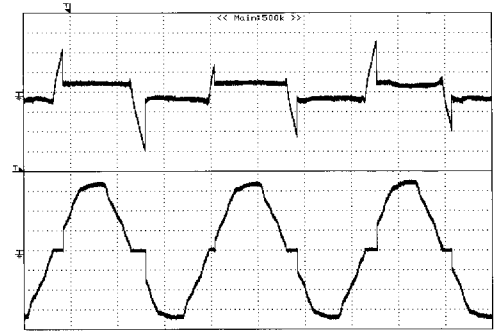


그림 1. 직렬아크의 발생매커니즘.  
Fig. 1. Mechanism of series arc generation.

그림 2는 직렬아크 발생 시 아크 양단에서 측정 한 전압, 전류의 파형이다. 아크전압은 영점부근에서 빠르게 상승, 감소하는 구형파 형태를 나타내며, 아크전류의 경우, 아크방전의 개시 및 소멸전압에 의한 영점 지연(Shoulder)이 발생한다.

직렬아크는 부하의 전압, 전류를 비선형적으로 변화시키며, 이로 인하여 검출된 전압, 전류는 많은 고조파 성분을 포함하게 된다.



상 : 아크전압 [50 V/div, 5 ms/div]  
하 : 아크전류 [1 A/div, 5 ms/div]

그림 2. 직렬아크 전압 및 전류 파형.  
Fig. 2. Waveforms of series arc voltage and current.

## 3. 실험장치 및 방법

저압 배선의 접속부와 열화된 콘센트의 접속불량에 의해 발생하는 직렬아크를 모의하기 위하여 UL1699에 규정된 그림 3과 같은 아크발생장치를 제작하였다[9]. 전극은 아크를 지속시키기 위해 탄소봉과 황동재질로 제작하였다.

아크발생기는 전원과 부하사이에 직렬로 접속되며, 마이크로미터로 이동전극을 조정하여 고정전극과 이동전극 사이에서 직렬아크를 발생시킬 수 있다. 직렬아크 발생시 전압신호 중 전원주파수 성분을 제거하고 고주파 아크신호만을 검출하기 위하여

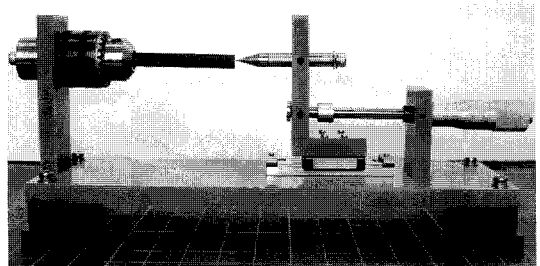


그림 3. 아크발생기의 사진.  
Fig. 3. Photograph of the arc generator.

그림 4와 같은 4차 고역통과필터를 설계하였다. 직렬아크의 주요 주파수 스펙트럼 3~10 kHz를 고려하여, 정현파 입력에 대한 -3 dB의 저역측 차단 주파수는 3 kHz로 설정하였으며, 2단의 결합 콘덴서와 검출 임피던스로 구성된다.

본 필터의 사용으로 60 Hz 전원성분은 80 dB 이상 감쇄되고 3 kHz 이상의 고주파 성분 즉, 직렬아크성분은 감쇄없이 검출할 수 있다.

실험계는 그림 5와 같이 AC 220 V 전원에 부하를 연결하고 전원과 부하사이에서 아크발생기를 직렬로 연결하였다. 본 실험은 옥내배선에서 직렬아크의 발생을 검출하는 것이므로, 부하로는 전열기, 진공청소기 및 조광제어 백열전구를 대상으로 하였다.

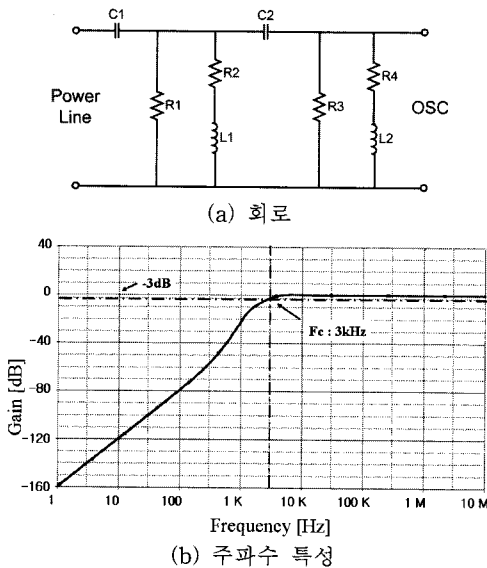


그림 4. 고역통과필터의 회로 및 주파수 응답.  
Fig. 4. Circuit and frequency response of the HPF.

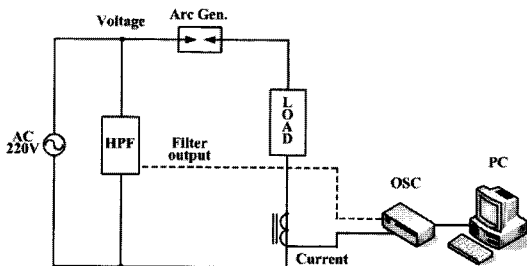
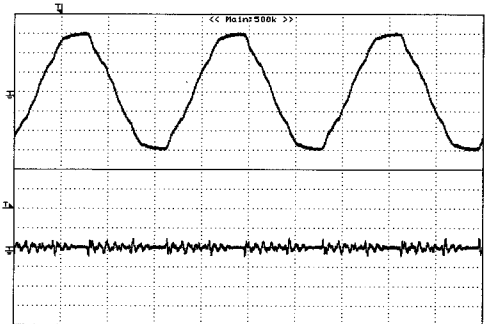


그림 5. 실험계의 구성.  
Fig. 5. Configuration of the experimental system.

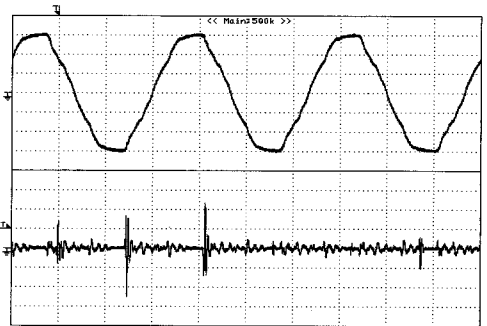
#### 4. 측정 및 분석

본 실험은 각종 부하에서 정상상태와 직렬아크가 발생했을 때, 전기적 특성의 차이를 분석하여 그 결과로부터 직렬아크의 검출방법을 찾아내기 위하여 수행하였다.

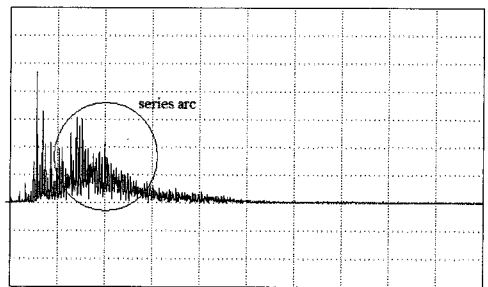
그림 6은 저항성 부하인 1kW 전열기의 정상상태와 직렬아크 발생시 전원전압과 고역통과필터의 출력 파형 및 주파수 스펙트럼을 나타낸 것이다.



상 : 전원 전압 [100 V/div, 5 ms/div]  
하 : HPF 출력 [10 V/div, 5 ms/div]  
(a) 정상상태



상 : 전원 전압 [100 V/div, 5 ms/div]  
하 : HPF 출력 [10 V/div, 5 ms/div]  
(b) 직렬아크상태



[0.2 V/div, 2 kHz/div]  
(c) 직렬아크전압의 FFT

그림 6. 전열기에서 직렬아크방전.  
Fig. 6. Series arc discharge in an electric heater.

정상상태에서는 그림 6(a)와 같이 전원전압은 정현파 그대로이며, 필터 출력에는 인지할만한 신호가 검출되지 않는다.

임의적으로 직렬아크를 발생시켰을 때는 그림 6(b)와 같이 전원전압에는 차이가 없으나, 필터 출력에는 직렬아크시 급변하는 전류에 의해 아크방전 펄스가 검출되며, 신호의 크기와 발생 위상은 일정한 규칙이 없이 무작위로 나타남을 알 수 있다.

전열기의 직렬아크상태에서 필터출력신호의 주파수분석결과, 그림 6(c)와 같이 3 kHz 이상에서 현저한 증가가 나타났으며, 1 kHz 대역은 잡음에 해당한다.

그림 7은 인버터에 의해 제어되는 소비전력 1kW 진공청소기를 부하로 하여 직렬아크를 모의하였을 때, 전원전압과 필터의 출력 그리고 이의 주파수 스펙트럼을 나타낸 것이다. 진공청소기가 인버터에 의해 제어되어도 정상상태에서는 진공청소기 내부의 전원필터로 고주파 성분이 검출되지 않았다. 그러나 직렬아크 상태에서는 그림 6의 저항성 부하에서와는 달리 전원전압에 더 많은 고주파 성분이 포함되어 있었으며, 필터 출력전압의 크기도 100 V 이상 나타났다. 이는 인버터 제어와 직렬아크에 의한 전류변화가 중첩되어 나타나는 현상으로 해석된다. 필터 출력전압의 주파수 스펙트럼은 그림 7(b)와 같이 3 kHz, 8 kHz 및 18~20 kHz에 주로 분포하고 있다. 전열부하는 필터의 출력전압만을 측정하여도 직렬아크의 발생을 감지하는데 문제가

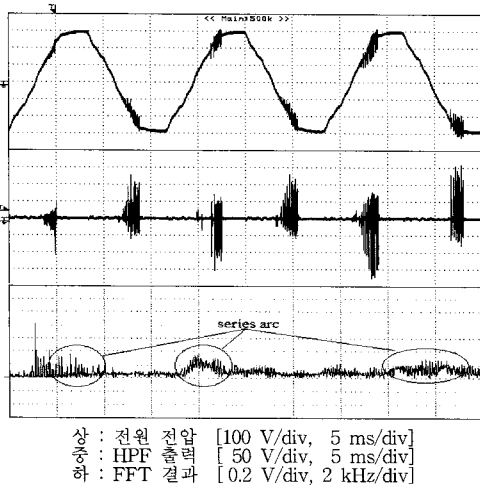


그림 7. 진공청소기에서 직렬아크방전.  
 Fig. 7. Series arc discharge in a vacuum cleaner.

없다. 그러나 직렬아크 검출시 오동작 또는 정상상태에서도 고주파 성분을 발생시키는 부하가 있으며, 대표적인 것이 위상제어 조광부하이다.

따라서 본 연구에서는 위상제어방식의 조광기(Dimmer)로 직렬 제어되는 백열전구를 대상으로 정상 및 아크상태를 실험하여 특징을 분석하고, 전열기 및 진공청소기의 결과와 비교하여 직렬아크의 검출기법을 제시하고자 한다.

그림 8은 정상 및 직렬아크상태에서 조광기에 의해 위상제어되는 백열전구의 파형이다. 조광기의

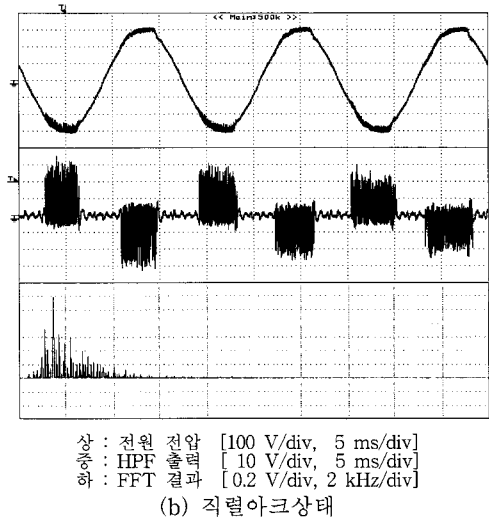
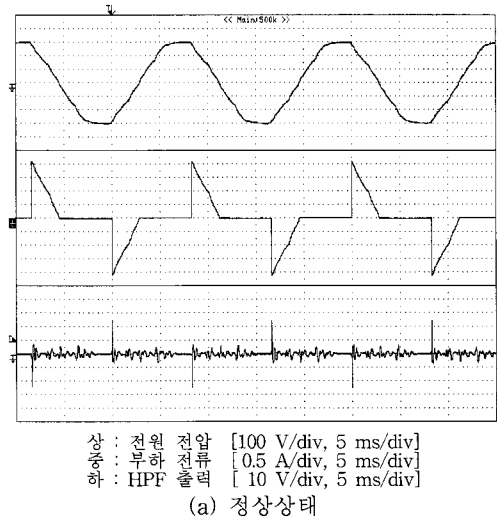


그림 8. 조광부하에서 직렬아크방전.  
 Fig. 8. Series arc discharge in a dimming load.

위상각은 전류의 변화율이 가장 큰 위상 즉, HPF의 출력전압이 가장 크게 나타나는 위상으로 고정하였으며, 이때의 전압, 전류, 필터의 출력 및 주파수 스펙트럼을 분석하였다.

부하전류의 급격한 변화로 동 위상에서 필터 출력이 나타나고 있음에도 전원전압에는 어떠한 영향이 보이지 않으며, 필터의 출력전압은 일정한 주기로 나타나고 있다. 이와 같이 백열전구가 정상상태에서 전류변화가 큰 위상각에서 제어될 때, 필터의 출력전압이 그림 6의 전압기의 직렬아크상태에서 나타나는 전압과 유사함을 알 수 있다. 즉, 전등부하가 위상제어로 조광되고 있는 경우, 필터의 출력 전압의 크기로 직렬아크의 발생을 판단하면 정상상태임에도 불구하고 부하에서 직렬아크가 발생하고 있다고 오판할 수 있다.

동일한 위상제어 조건에서 조광부하의 직렬아크 모의시에는 그림 8(b)와 같이 정상상태와 비교하여 필터의 출력전압에 고주파 성분이 현저히 증가하였을 뿐만 아니라, 전원전압에서도 많은 고주파 성분이 관측된다. 또한 주파수 스펙트럼 분석결과에서는 정상상태와 비교하여 구분되는 특징은 없었다.

이상의 실험결과로부터, 직렬아크의 검출은 전원전압의 주파수 분석이나 전원선에 병렬로 고역통과필터를 설치함으로써 고주파 성분만을 검출하여 정상상태와 직렬아크상태를 구분할 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 위상제어부하가 동작중일 경우에는 정상상태에서도 직렬아크가 발생하고 있다고 오판할 수 있다. 이러한 경우는 고역통과필터로 전원전압에 포함된 고주파 성분만을 검출하고, 주파수 분석과 펄스의 주기성을 비교하면 비선형 부하에서도 신뢰성 있는 판단이 가능하다. 아크 검출 회로를 저압용 차단기에 내장할 경우에는 차단기 내부공간을 고려하여 고역통과필터와 비교회로를 조합하여 아크발생에 따른 출력전압의 유무와 펄스수로 판단할 수 있다.

### 5. 결 론

저압배선계통에서 전기화재의 원인이 되는 직렬아크상태를 검출할 목적으로, UL1699에 규정된 아크발생기와 -3 dB의 저역차단주파수가 3 kHz인 고역통과필터를 제작하고, 여러 가지 부하에서 아크특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

직렬아크의 발생점에서 배선을 따라 전달되어 전원측에서 검출되는 방진신호는 3 kHz이상이 정상상태와 구분되므로, 직렬아크의 검출에는 전원전압에 포함된 3 kHz이상의 고주파성분을 측정하는 것이 유효하다.

모든 부하에서 직렬아크 발생시는 고역통과필터의 출력이 크게 나타나기 때문에, 필터의 출력전압으로 직렬아크 상태를 관측할 수 있다.

부하가 위상 제어될 경우는 필터의 출력전압이 정상상태에서도 전압기의 직렬아크시와 유사하여, 정상상태임에도 불구하고 직렬아크가 발생하고 있다고 오판할 수 있다. 이러한 경우에는 아크신호의 무작위성(randomness)을 이용하며, 고역통과필터의 출력전압의 크기와 주기성을 분석하여야 한다..

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

### 참고 문헌

- [1] KESCO, "A Statistical Analysis on the Electric Accident", KESCO Report, Vol. 15, p. 7, 2006.
- [2] KOSHA, "Prevention Countermeasure Research of the Accident which is caused by in Electric Arc", KOSHA 2006 Report, p. 24, 2006.
- [3] 이상호, 오홍석, "전기화재 예방을 위한 EFPCD 동작 특성에 관한 연구", 한국화재·소방학회, 16권, 3호, p. 8, 2002.
- [4] G. D. Gregory and G. W. Scott, "The arc-fault circuit interrupter : an emerging", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 34, No. 5, p. 928, 1998.
- [5] G. D. Gregory, K. Wong, and R. F. Dvorak, "More about arc-fault circuit interrupters", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 40, No. 4, p. 1006, 2004.
- [6] C. Li, F. Dawson, H. Kojori, C. Meyers, and E. Yue, "Arc Fault Detection and Protection- Opportunities and Challenges", SAE Technical Papers, 2003-01-3037, p. 591, 2003.
- [7] 김향곤, 김형준, 김동욱, 김동우, 최충석, "전기기기

용 비닐절연전선에서의 직렬 아크에 의한 열화 특성 분석”, 한국전기전자재료학회 2006하계학술대회논문집, p. 234, 2006.

[8] 오홍석, 이상호, 김풍래, “전기화재 예방에 관한 연

구”, 한국화재·소방학회 춘계학술논문발표회, p. 134, 2002.

[9] Underwriters Laboratories, “UL1699-Standard for Arc-Fault Circuit-Interrupters”, p. 49, 2006.