

직렬아크신호의 검출방법

Detection Method of Series Arc Signal

길경석[†] · 지홍근* · 박대원** · 김일권** · 류길수*** · 송재용****

Gyung-Suk Kil · Hong-Keun Ji · Dae-Won Park · Il-Kwon Kim · Keel-Soo Rhyu · Jae-Yong Song

Abstract This paper dealt with a detection method of series arc existence which is a symptom of electric fires in low-voltage system. The proposed detection circuit consists of a high-pass filter with a low cut-off frequency of 3kHz to attenuate power frequency voltage by 80 dB and an active band-pass filter with a center frequency of 4kHz to detect only the series arc signals. The performance of the circuit was evaluated in a phase-controlled incandescent lamp as a non-linear load and an inverted-fed induction motor as a high frequency load by using the arc generator specified in UL1699. From the experimental results, it was confirmed that the proposed method solved the detection error, which is being the most problem, by discriminating the series arc signal even in non-linear and high frequency loads.

Keywords : Electric fire, Series arc, Detection circuit, Phase-control, Non-linear load, Arc generator, UL1699

요 지 본 논문은 저압계통에서 전기화재의 징후인 직렬아크의 검출방법에 대해 기술하였다. 제안한 검출회로는 전원주파수 성분을 80dB 이상 감소시킬 수 있는 저역차단주파수가 3kHz인 고역통과필터와 아크신호만을 검출하기 위한 중심주파수가 4kHz인 대역통과필터로 구성된다. UL1699에 규정된 아크발생장치를 이용하여 비선형부하인 위상제어 백열전구와 고주파발생부하인 인버터 구동 유도전동기에서 직렬아크를 모의하여 성능을 평가하였다. 실험 결과로부터 제안한 방식은 비선형부하와 고주파발생부하에 대해서도 직렬아크신호를 정확히 구분함으로써 현재 최대 문제인 검출오류를 해결하였음이 확인되었다.

주요어 : 전기화재, 직렬아크, 검출회로, 위상제어, 비선형부하, 아크발생장치, UL1699

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

산업의 고도화, 생활의 윤택함과 편리함을 위해 전기에너지의 사용량은 폭발적으로 늘어나고 있으며, 전기 사용량의 증가와 함께 전기사고의 발생도 증가하고 있다.

전기사고를 예방하기 위한 다각적인 노력에도 불구하고 가장 대표적인 전기사고인 전기화재의 발생건수는 해마다 10,000여건을 유지하고 있으며, 특히 아크를 동반하는 단락 사고는 매년 전기화재 발생 원인의 60% 이상의 높은 비율

을 차지하고 있다[1]. 이와 같은 전기사고는 전기 기기 및 설비가 밀집되어있는 철도차량과 차량의 제어계통에서도 발생가능하며, 운전정지 또는 차량의 화재로 진전되어 인명과 경제적 손실을 일으킨다.

현재 과부하나 단락에 의한 전기사고를 방지하기 위하여 차단기와 퓨즈 등의 보호기기를 사용하고 있으나, 이들 기기는 절연과파 또는 전기적 사고의 징후를 예측하는 기능은 없다. 일반적으로 전기사고는 접촉불량이나 절연과파가 원인이며, 이러한 상태에서 수반되는 것이 아크 신호이다 [2]. 아크 상태는 장시간 경과되면 국부적인 과열에서 단락으로 발전되어 전기화재나 기기과손과 같은 전기사고로 연결된다[3-4].

본 논문에서는 전기사고 예지를 위해 저압배선계통에서 국부방전, 접촉불량 및 절연열화로 인해 발생하는 직렬아크 현상을 모의하여 전기적 신호의 특성 분석으로부터 최적의 검출방법을 제시하였다.

[†] 책임저자 : 정회원, 한국해양대학교 전기전자공학부, 교수
E-mail : kilgs@hhu.ac.kr

TEL : (051)410-4414 FAX : (051)403-1127

* 정회원, 한국해양대학교 전기전자공학부, 석사과정

** 정회원, 한국해양대학교 전기전자공학부, 박사과정

*** 정회원, 한국해양대학교 IT공학부, 교수

**** 정회원, 국립과학수사연구소, 공업연구사

2. 이론

2.1 아크

아크는 고장전류의 경로에 따라 크게 직렬아크와 병렬아크로 나눌 수 있다. 직렬아크는 노화된 전선을 잡아당기거나 전기적 접속이 느슨해진 경우, 전선의 피복이 손상된 경우 및 잦은 진동에 의해 전선의 소선이 일부 절단된 경우와 같이 단일 도체의 불완전한 연결부위에서 발생한다[5]. Fig. 1(a)와 같이 직렬아크는 부하와 전기적으로 직렬로 연결되어 있는 부분에서 발생하는데, 이때 흐르는 아크전류는 아크발생시의 임피던스와 부하의 임피던스에 의해 제한되어 에너지 레벨이 낮기 때문에 기존 차단기의 보호레벨 범위에 속하지 않는다. 특히 일부 비선형적 특성을 가지는 위상제어부하에서는 아크가 발생하지 않은 정상상태에서도 아크신호와 유사한 고주파 신호가 발생하기 때문에 아크신호의 검출에 어려움이 있다.

Fig. 1(b)는 병렬아크, Fig. 1(c)는 병렬아크의 일종인 접

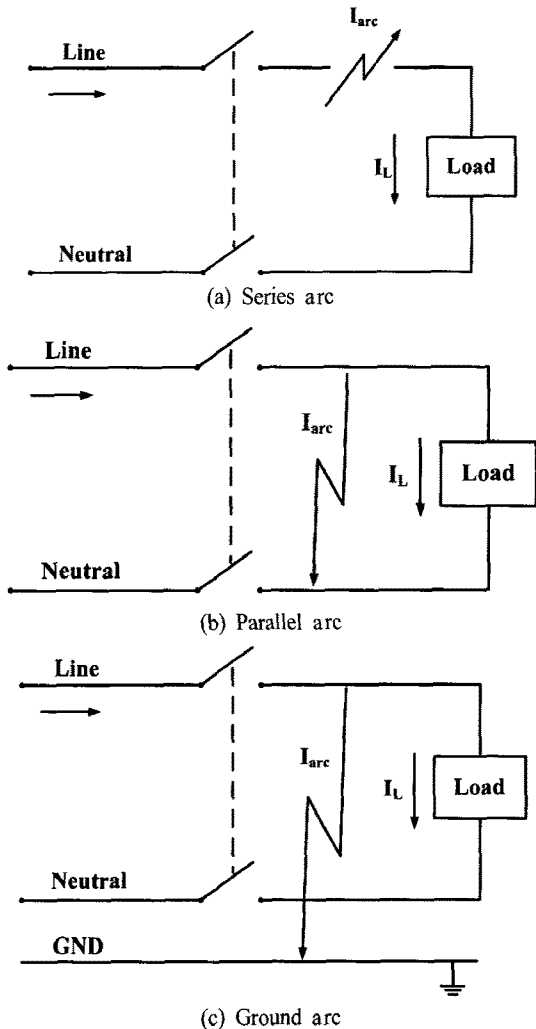


Fig. 1. Types of arc generation

지아크를 나타낸 것으로서 각각 상도체와 중선선 또는 상도체와 접지간에 의도하지 않은 도전경로가 형성되었을 경우 발생한다. 병렬아크나 접지아크가 발생했을 경우 고장 발생점의 임피던스가 낮아지게 되고 최종적으로 단락이나 지락으로 이어져 사고가 발생한다. 이러한 병렬아크나 접지아크는 직렬아크의 발생에 의해 진전이 되므로 직렬아크의 발생을 검출하면 단락이나 지락으로 이어지는 사고를 예방할 수 있다.

3. 실험 및 방법

본 연구에서는 직렬아크신호를 검출하기 위하여 Fig. 2와 같이 실험계를 구성하였다. AC 220V 전원에 설계제작한 아크발생장치를 직렬로 연결하고 부하를 접속하였으며 선로에서 발생하는 직렬아크를 모의하였다[6]. 선행연구로부터 설계된 고역 및 대역통과필터 특성을 가지는 아크검출장치를 제작하여 전원과 병렬로 접속함으로써 직렬아크신호를 검출할 수 있다. 본 방식의 특징은 전원전압에 포함된 아크신호만을 검출하는 것으로 부하용량에 관계없이 적용이 가능하다[7]. 부하로는 대표적인 비선형적 특성을 가지는 부하인 Dimmer에 의해 위상제어되는 백열전구와 철도차량에서 대표적 비선형적 부하인 인버터 구동 유도전동기를 대상으로 실험하였다.

3.1 아크발생장치

저압계통의 불완전한 접속부 또는 열화된 선로에서 발생하는 아크는 Fig. 3과 같은 UL1699의 규정에 의한 아크 발생장치로 모의할 수 있다. 본 연구에서는 직렬아크를 모

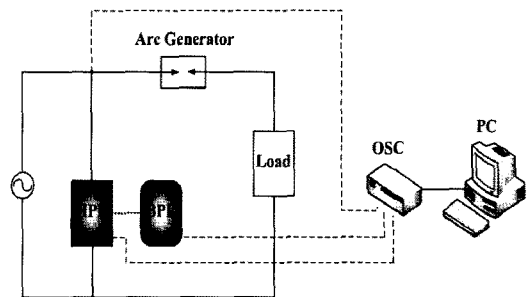


Fig. 2. Configuration of the experimental system

Table 1. Specification of electrical loads

Load	Specification
Dimmer	1Φ, 1,000W
백열등	500W
인버터	3Φ, 5HP, 0.1~400Hz
유도전동기	3Φ, 5HP

의하기 위하여 아크발생장치를 전원과 부하사이에 직렬로 접속하였다. 아크발생장치의 고정전극은 아크 발생시 전선 또는 절연물에 형성된 탄화 도전로를 모의하기 위하여 탄소봉을 적용하고, 이동전극은 전선과 같은 재질의 동봉(cooper rod)을 사용하였다[6]. 이로써 직렬아크는 이동전극에 연결된 마이크로미터를 조절하여 고정전극과 이동전극 사이에 임의적으로 발생시킬 수 있다.

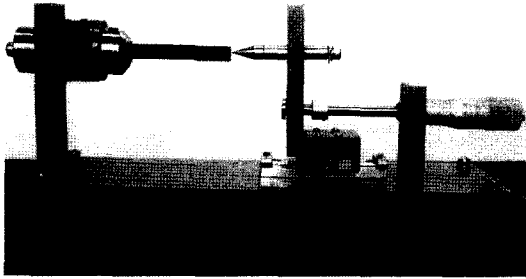


Fig. 3. Photograph of the arc generator

3.2 아크검출

일반적으로 아크의 발생 유무는 아크 발생시 급격한 임피던스의 변화로 인하여 나타나는 고주파 전압 또는 전류를 검출하여 판단한다. 직렬아크방전 신호는 전원주파수 성분에 중첩되고, 상대적으로 그 크기가 미소하기 때문에 전원주파수 성분에 대한 영향을 제거할 필요가 있다.

본 논문에서는 직렬아크 발생시의 전압신호 중 전원주파

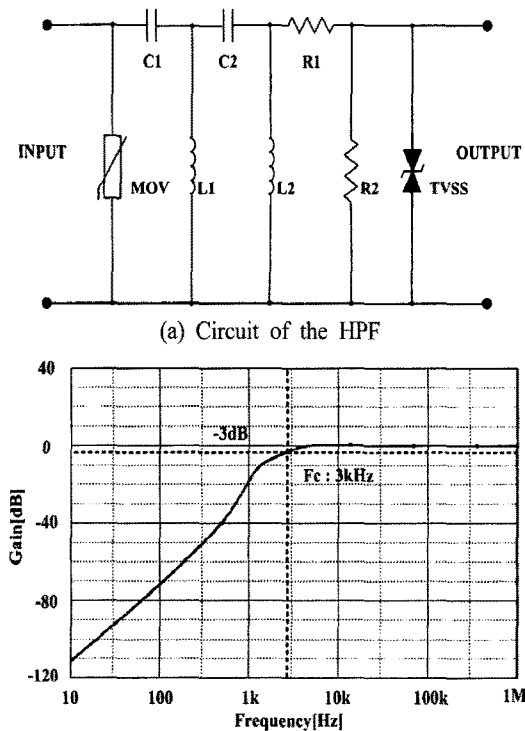


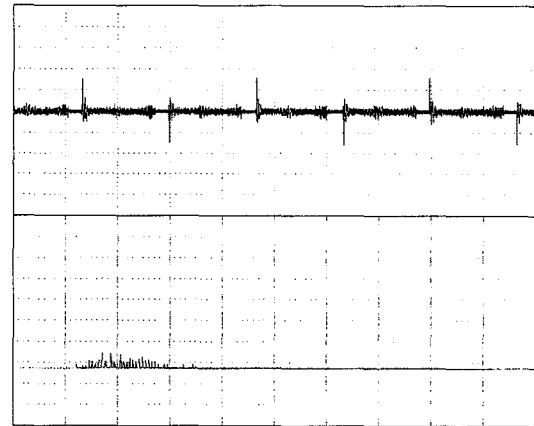
Fig. 4. Circuit and frequency response of the HPF

수 성분을 제거하고 아크 고유의 고주파 신호만을 검출하기 위하여 Fig. 4와 같이 4차 고역통과필터를 설계제작하였다. 선행연구로부터 직렬아크의 주요 주파수성분이 3kHz 이상에서 분포하는 것을 고려하여, 저역 차단주파수를 3kHz로 설정하였다[7].

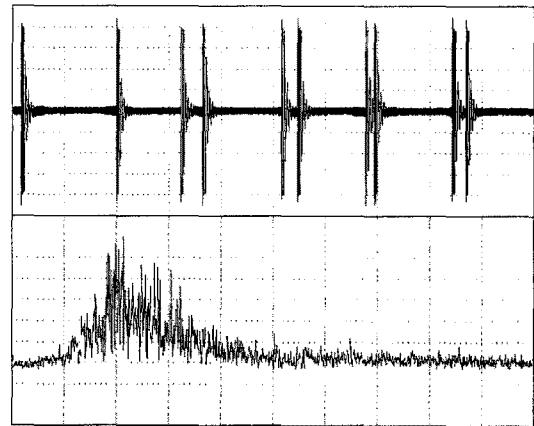
Fig. 4(b)는 설계한 고역통과필터의 주파수특성을 나타낸 것으로, 60Hz 전원성분은 80dB 이상 감쇄시키고, 3kHz 이상의 고주파 성분 즉, 직렬아크성분은 감쇄없이 검출할 수 있다.

시제작한 고역통과필터의 검출 특성을 평가하기 위해 전압구동 백열전구, 위상제어 백열전구 및 인버터 구동 유도전동기에서 직렬아크를 발생시키고 검출된 아크전압파형의 주파수분석을 수행하였다.

Fig. 5는 인버터 구동 유도전동기의 정상상태와 아크발생 상태에서, 제작한 고역통과필터를 이용하여 측정된 전압파형과 FFT의 결과이다. 주파수성분을 분석한 결과, 특징적



Upper : HPF output voltage [0.5 V/div, 5 ms/div]
Lower : FFT [20 mV/div, 2 kHz/div]
(a) Normal state



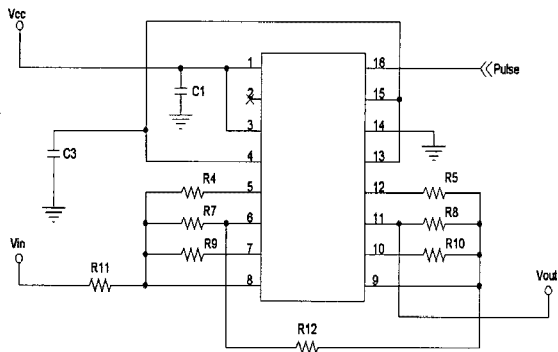
Upper : HPF output voltage [0.5 V/div, 5 ms/div]
Lower : FFT [20 mV/div, 2 kHz/div]
(b) Series arc state

Fig. 5. HPF output signal and its FFT result

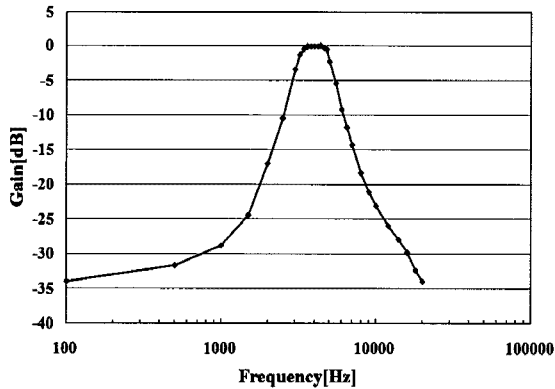
인 신호가 3~7kHz 대역에서 존재함을 알 수 있다. 이와 같이 고역통과필터의 적용으로 직렬아크의 발생유무를 예측할 수 있다. 그러나 위상제어 저항부하 또는 인버터 구동 유도전동기 등과 같이 전류의 불연속제어를 포함하는 부하의 운전시는 정상상태에서도 고주파 성분을 발생시켜 직렬아크로 오인할 수 있다[7-8].

따라서 본 논문에서는 다양한 부하에 대해 직렬아크를 모의하고, 이들의 주파수 분석결과로부터 중심주파수 4kHz의 대역통과필터를 설계·제작하였다.

Fig. 6은 설계제작한 대역통과필터의 회로와 주파수특성을 나타낸 것이다. 공진도(Q)를 높이기 위해 전용의 능동필터 IC를 사용하여 4차필터로 구성하였다[9].



(a) Circuit of the BPF



(b) Frequency response of the BPF

Fig. 6. Circuit and frequency response of the BPF

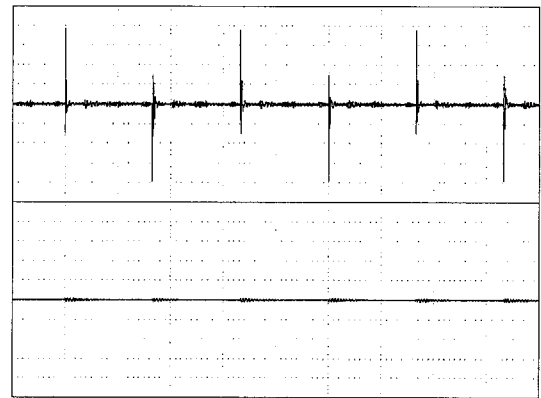
4. 결과 및 고찰

본 논문에서는 정상상태와 직렬아크상태의 구분이 어려워 판단의 오류를 가져올 수 있는 위상제어 및 인버터 구동 부하에 대해 직렬아크를 모의하고, 고역 및 대역통과필터의 출력신호를 분석하였다.

4.1 위상제어 저항부하

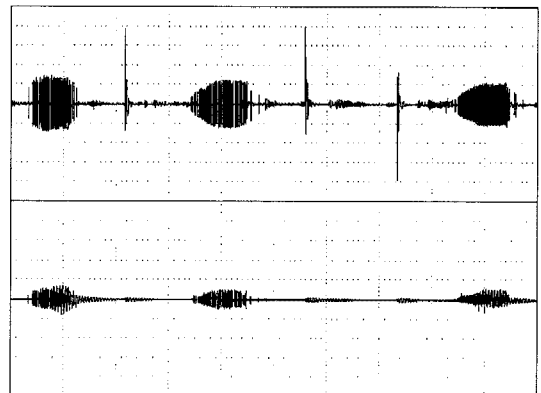
Fig. 7은 위상제어방식의 Dimmer로 제어되는 백열전구

에서 정상상태와 직렬아크상태에 대한 부하 양단의 고역통과필터와 대역통과필터의 출력을 나타낸 것이다. Fig. 7(a)에 나타난 바와 같이, Dimmer에 의해 제어되는 백열전구는 아크가 발생하지 않은 정상상태 임에도 불구하고 위상제어에 의해 고역통과필터의 출력에는 고주파 신호가 발생하고 있으나, 대역통과필터의 출력에는 나타나지 않음을 알 수 있다. 또한 직렬아크 발생시는 Fig. 7(b)와 같이 고역통과필터에는 정상상태에서 발생하는 유사아크신호 및 직렬아크 신호가 모두 나타나고 있으나, 대역통과필터에는 직렬아크 신호만이 출력됨을 알 수 있다. 이와 같이 중심주파수 4kHz의 대역통과필터를 적용함으로써 정상상태에 발생하는 고주파 신호는 제거하고 직렬아크신호만을 검출할 수 있다.



Upper : HPF output voltage [0.5 V/div, 5 ms/div]
 Lower : BPF output voltage [0.5 V/div, 5 ms/div]

(a) Normal state



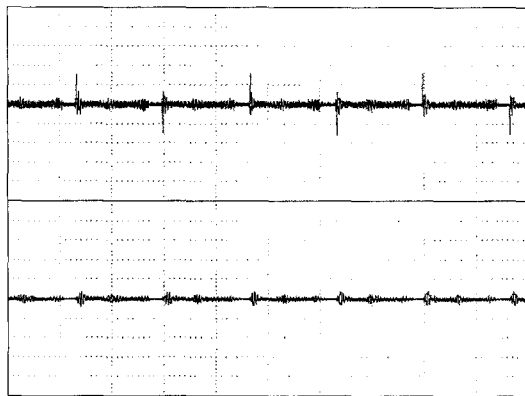
Upper : HPF output voltage [0.5 V/div, 5 ms/div]
 Lower : BPF output voltage [0.5 V/div, 5 ms/div]

(b) Series arc state

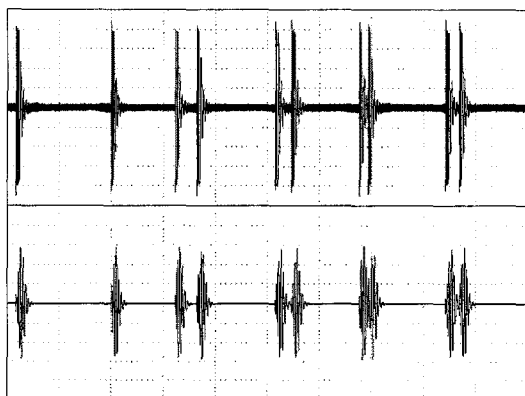
Fig. 7. Incandescent lamp controlled by a dimmer

4.2 인버터 구동 전동기

인버터 구동 유도전동기는 정상상태에서도 많은 고주파신호를 발생시켜, 정상상태와 아크상태를 구분하기 어려운 부하이다.



Upper : HPF output voltage [0.5 V/div, 5 ms/div]
 Lower : BPF output voltage [0.5 V/div, 5 ms/div]
 (a) Normal state



Upper : HPF output voltage [0.5 V/div, 5 ms/div]
 Lower : BPF output voltage [0.5 V/div, 5 ms/div]
 (b) Series arc state

Fig. 8. Inverter-fed induction motor

Fig. 8은 인버터 구동 유도전동기 부하에 대하여 직렬아크를 모의하였을 경우, 정상상태와 직렬아크상태의 필터출력을 나타낸 것이다. 위상제어 부하에서와 같이 아크를 발생시키지 않은 정상상태에서도 인버터의 동작에 의해 고주파 신호가 발생하게 되는데, 이런 고주파신호는 대역통과필터를 통하여 Fig. 8(a)와 같이 제거할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안한 방법과 같이 고역통과필터와 대역통과필터를 적용하면 인버터 동작에 의해 발생하는 고주파신호를 제거한 아크신호만을 Fig. 8(b)와 같이 검출할 수 있다. 이상에서와 같이 본 논문에서 설계·제작한 필터의 적용으로 직렬아크의 검출은 물론 비선형 부하에서 발생하는 고주파 신호를 구분함으로써 직렬아크의 검출 신뢰도를 향상시킬 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 저압계통에서 발생하는 직렬아크의 검출 방법에 대해 연구하였다. 직렬아크시 발생하는 전기적 신호의 주파수 분석으로부터, 60Hz의 전원주파수 성분은 제거하고 아크신호만을 검출할 수 있는 저역차단주파수 3kHz의 고역통과필터를 설계·제작하였다. 또한 위상제어부하와 인버터로 구동되는 부하는 정상운전 상태에서도 직렬아크와 유사한 고주파를 발생시키므로, 이에 대한 대책으로 중심주파수 4kHz의 대역통과필터를 적용하였다. 본 논문에서 제안한 고역통과 및 대역통과 필터의 조합으로 고주파신호가 발생하는 부하의 운전조건에서도 직렬아크신호만을 인식함으로써, 직렬아크 검출의 신뢰도를 향상시킬 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 지식경제부 전력산업 연구개발사업(R-2005-1-402)의 연구비 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

1. 소방방재청(2007), "2006년도 화재통계 연감"
2. George D. Gregory(1998), "The Arc-Fault Circuit Interrupter : An Emerging," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 34, No. 5, pp.928-933.
3. Chunlin Li, Francis Dawson, Hassan Kojori, Chris Meyers, and Edwin Yue (2003), "Arc Fault Detection and Protection - Opportunities and challenges," SAE Technical Papers, pp.590-597.
4. 이상호, 오홍석(2002), "전기화재 예방을 위한 EFPCD 동작 특성에 관한 연구", 한국화재소방학회, Vol. 12, No. 3, pp.8-11.
5. C. S. Maroni, R. Cittadini, Y. Cadoux & M. Serpinet (2001). "Series arc detection in low voltage distribution switchboard using spectral analysis," ISSPA, pp.473-476.
6. Underwriters Laboratories(2006), "UL1699-Standard for Arc-Fault Circuit-Interrupters"
7. 지홍근, 박찬용, 길경석, 김일권, 조영진(2008), "저압계통에서 직렬아크신호의 검출", 한국철도학회춘계학술대회, pp.104.1~104.5
8. Carlos E. Restrepo(2007), "Arc Fault Detection and Discrimination Methods," IEEE Conf. on Electrical Contacts, pp.115-122.
9. Robert F. Couhglin, Frederick F. Driscoll(1987), Operational Amplifiers Linear Integrated Circuits 3rd Edition, Prentice-Hall, INC.

접수일(2008년 3월 17일), 수정일(2008년 7월 15일),
 게재확정일(2008년 8월 9일)