
전기화재 방지를 위한 아크고장 판단기법에 대한 연구

고윤석*

The Arc Fault Determination Method for the Electric Fire Prevention

Yun-seok Ko*

요 약

수용가 시스템에서 발생하는 아크고장은 전기화재의 직접적인 원인이 되지만 기존의 고장검출 메커니즘으로는 확인이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 전기화재의 주 원인이 되고 있는 아크고장의 원인을 분석하고 아크고장 기본 검출 메커니즘을 설계하였다. 또한 아크고장 판단의 정확도를 제고시킴으로써 오동작을 최소화할 수 있는 신호처리 기반의 아크고장 판단 방법론을 제안하였다. 끝으로, 하나의 돌입전류에 대해 이산 푸리에 변환(DFT)과 이산 웨이블릿 변환(DWT)을 적용, 그 특성을 분석함으로써 신호처리 기반 고장판단 기법의 적용 방법론을 보였다.

ABSTRACT

The arc-fault occurring in the customer system becomes the direct cause of electric fire. However, it is very difficult to identify the arc-fault using the existing fault detection mechanism because the magnitude of the fault current is very small. Accordingly, this paper analyzes the causes of arc fault and designs the basic detection mechanism of arc fault. And then, it proposes a signal processing-based arc-fault determination methodology which can enhance the accuracy of the arc-fault determination by applying DFT/DWT to the voltage and current waveform. Finally, this paper showed the application methodology of the proposed signal processing based fault determination method by applying and analyzing DFT/DWT to an high voltage in-rush current waveform.

키워드

Arc Fault, Digital Electrical Switchgear, Electric Fire, Customer Electric System

1. 서론

저압 수용가 전기 분전반에 설치되는 배선차단기(MCCB)나 누전차단기(ELCB)는 상전류나 영상전류 크기만을 기반으로 동작하기 때문에 높은 임피던스 회로가 구성되어 고장전류가 동작전류 이하로 흐르기

때문에 직렬이나 병렬아크 발생 시 고장검출이 어려워 고장전류를 차단할 수 없게 된다. 이것은 전기화재로 이어질 수 있다는 측면에서 매우 심각한 문제이다.

우리나라의 경우는 정확한 통계 데이터가 보고되지 않고 있지만, 미국 USFA(United States Fire Administration)의 보고에 의하면 매년 미국 내 주택에서

* 남서울대학교 전자공학과
심사완료일자 : 2008. 12. 10

접수일자 : 2008. 11. 06

67,800건의 전기 아크 화재가 발생하고 있으며 이로 인해 희생자 485명, 부상자 2,300명 그리고 8,680억원 정도의 재산손실이 보고되고 있다. 그러므로 수용가 측면에서는 아크고장을 정확하게 인식, 차단함으로써 전기사용의 안전성을 획기적으로 제고할 수 있는 아크고장 판단기술 개발이 시급히 요구되고 있다 [1-7]. 이러한 추세에 적극적으로 대응하기 위해 미국 UL은 1999년 2월에 아크가 발생했을 때, 아크의 특이한 특성을 인식하고 그 회로를 차단하는 것을 목적으로 하는 AFCI를 규정, 2002년 주택 침실에 설치되는 125V, 단상 15 및 20A 콘센트(outlet)들에 전기를 공급하는 모든 분기 선로들에 분기/피더 타입 AFCI를 설치할 것을 법제화하였다. 그리고 2008년 2월부터는 적용영역을 더욱 확장하여 침실, 거실, 주방, 서재, 일광욕실, 벽장, 현관 또는 이와 유사한 룸이나 지역에 설치되는 15-20A 분기회로에 직병렬 아크를 인식, 차단할 수 있는 콤비네이션 타입 AFCI를 설치할 것을 규정하고 있다[8]. 그러나 아크고장은 고장전류가 작고 특성을 예측하기 어려우며, 일부에서는 부하파형과 유사한 특성을 보이기 때문에 정확한 고장검출이 쉽지 않다.

따라서 본 연구에서는 먼저 주택 전기회로의 구성 및 전기화재의 원인이 되고 있는 아크고장의 원인을 분석하고 병렬 아크 및 직렬 아크를 검출할 수 있는 아크고장 검출 메커니즘을 설계한다. 또한 아크고장 판단의 정확도를 제고시킴으로써 오동작을 최소화할 수 있는 신호처리 기반의 아크고장 판단 방법론을 제안한다. 끝으로, 하나의 돌입전류에 대해 이산 프리에 변환(DFT)과 이산 웨이블릿 변환(DWT)을 적용, 그 결과를 분석함으로써 적용 방법론을 보인다.

II. 주택배선 및 아크고장 분석

전압 수용가 시스템의 인입구에 설치되는 분전반은 한편의 배선 변압기로부터 공급되는 220V 전력선으로부터 전압을 수전하게 된다. 그리고 수전된 전기를 주택의 구조와 부하특성에 맞게 배치되는 각 분기선로에 나누어 공급하게 된다. 그리고 전기사용의 안전성을 확보하기 위해 MCCB와 ELCB가 설치된다. 그림 1은 일반적인 저압 수용가 시스템의 침실에 대한 분

기선로들에 대한 전기 배선 구성을 보인다[8].

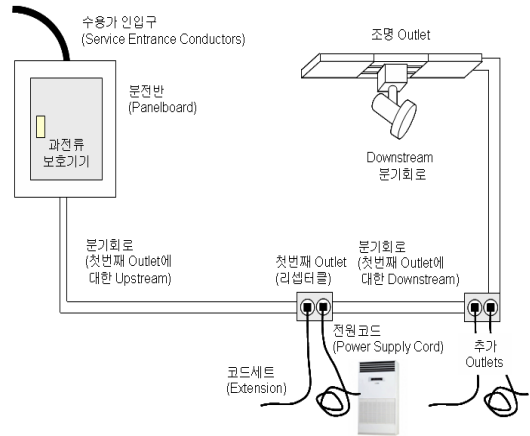


그림 1. 주택 전기 배선 구성
Fig. 1 Home electric branch circuit

분기회로는 전압선, 중성선 그리고 접지선으로 구성되는데, 전압선과 중성선 사이의 아크고장을 병렬아크, 전압선이나 중성선간에 발생하는 아크고장을 직렬아크 그리고 전압선이나 중성선과 전지선간에 발생하는 고장을 접지고장이라 한다. 그림 2는 각 고장 타입을 보인다[9].

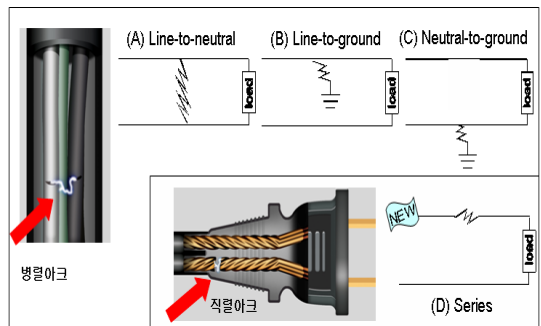
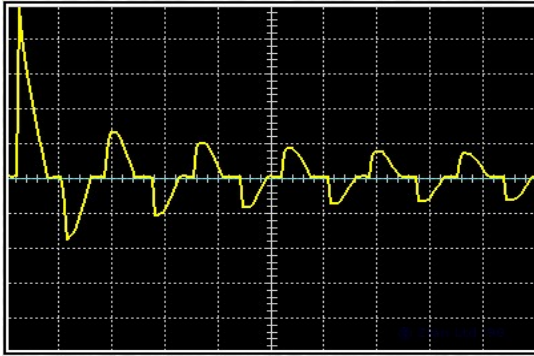


그림 2. 아크고장타입 분류
Fig. 2 Arc fault type classification

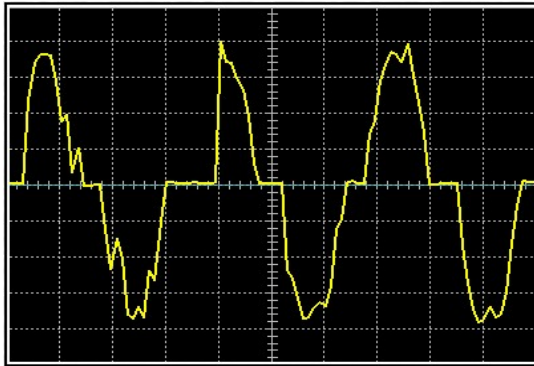
III. 전류파형 사례분석

본 연구에서는 아크고장 판단 방법론을 연구하기 위해서 먼저 다양한 전류파형에 대한 사례를 조사하

였다. 그림 3은 전류파형 사례를 보인다. (a)는 dimmer로 제어되는 백열전구를 점등시 전류파형 그리고 (b)는 아크 전류파형의 예를 보인다[10]. 그림 3에서 아크고장과 dimmer 제어출력파형이 동일하게 shoulder 특성을 가지기 때문에 구별이 어려울 수 있음을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

그림 3. 전류파형 사례들
Fig. 3 Current waveform examples

IV. 아크고장 판단 메커니즘 설계

아크고장을 확인하기 위해서는 전압과 전류 파형이 연속적으로 감시되어야 한다. AFCI는 전압센서와 전류 센서를 가진다. 또한 누설전류를 검출하기 위한 영상 변류기 ZCT를 포함한다.

4.1 기존 AFCI 고장검출 메커니즘

기존 고장검출 메커니즘은 이상전류보다 감소된 전류크기, 고주파 채터링, 영전류 레벨 shoulder 유무 그리고 가파른 상승률을 기반으로 고장을 판별한다. 그림 4는 기존 AFCI의 고장 검출 메커니즘을 보인다.

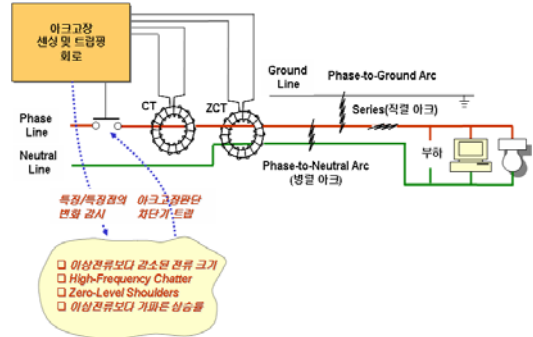


그림 4. 기존 아크고장 검출 메커니즘
Fig. 4 The Existing arc fault detection mechanism

4.2 제안되는 AFCI 고장검출 메커니즘

본 연구에서 제안하는 고장검출 메커니즘은 기존의 특징점 검출 외에 DFT/DWT 변환을 기반으로 하여 얻어지는 특징패턴에 근거하여 아크고장을 검출한다. 그림 5는 제안되는 DFT/DWT기반의 AFCI 고장 검출 메커니즘을 보인다. ANN은 다층 퍼셉트론을 기반으로 설계된다.

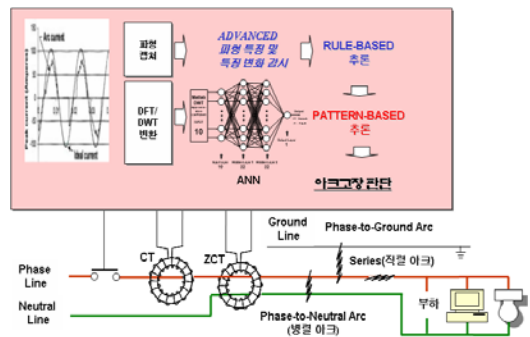


그림 5. 제안되는 아크고장 검출 메커니즘
Fig. 5 The proposed arc fault detection mechanism

1) 이산 푸리에 변환(DFT)

이산 푸리에 변환은 유한 비주기 디지털 신호에 적용이 가능한 푸리에 접근법으로써 디지털 신호처리에서 매우 중요한 역할을 차지한다.

구간 $0 \leq n \leq (N-1)$ 에 정의된 신호 $x[n]$ 에 대한 이산 푸리에 변환은 식 (1)로 정의된다.

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \exp(-j \frac{2\pi kn}{N}) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{kn} \quad (1)$$

여기서 $W_N = \exp(-j2\pi/N)$ 이다.

2) 이산 웨이브렛 변환(DWT)

웨이블릿 변환은 신호 $f(t)$ 를 웨이블릿 함수를 이용하여 식 (2)와 같이 시간-크기 공간으로 나타내는 것을 말한다[11].

$$W^f(b,a) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2)$$

식 (2)에서 $\Psi_{b,a(t)}$ 는 웨이블릿 패밀리로써 마더 웨이블릿 함수 Ψ 로부터 시간축에 따라 웨이블릿의 크기 즉, 주파수를 변화시키는 압축계수(contraction coefficient) a 와 웨이블릿을 이동시켜 위치를 변화시키는 전이계수(transition coefficient) b 의 합성으로 이루어지며 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\Psi_{b,a}(t) = \frac{1}{a} \Psi \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad (3)$$

$$C_g = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \text{ (허용가능조건)}$$

이산 웨이브렛 변환(DWT)은 먼저 제시된 정규 직교 마더 웨이브렛 들 중 적용영역에 최적한 마더 웨이브렛을 결정한 후, 입력신호를 그림 5와 같이 이들로부터 얻어지는 저주파 필터와 고주파 필터에 적용하여 저주파 신호성분(Approximation)과 고주파 신호성분(Detail)로 분해하는 과정으로 이루어진다.

V. 시험방법 및 기준

본 연구에서는 아크고장의 판단 방법론을 효율적으로 확인하기 위해 AFCI 시험방법 및 판단기준을 분석하였다. 표 1은 AFCI 시험방법 및 판단기준에 대해서 설명한다.

표 1. AFCI 시험방법 및 기준
Table. 1 AFCI test method and standard

시험 항목	시험방법	시험아크전류	시험기준	
비접촉 아크 시험	단화경로 아크발화 시험	NM-B 케이블을 가지고 직렬 절연체 베기(cut)로 수행되는 비접촉 아크 시험	5A, 10A, 정격전류 그리고 정격전류의 150%	무명 화재 표시기의 발화에 앞서 부하에 대한 회로 차단 여부
	단화경로 아크 차단 시험	NM-B 케이블과 SPT-2 연성코드를 가지고 병렬 절연체 베기로 수행되는 비접촉 아크 시험	75A와 100A	0.5초주기내에 8개의 반 사이클 아크가 발생할 때 아크고장소거여부
	단화경로 아크소거 시험	SPT-2 연성 케이블을 가지고 직렬 절연체 베기(cut)로 수행되는 비접촉 아크 시험	5A, 10A, 정격전류 그리고 150%	5A 1초로부터 정격전류의 150% 0.2초내에 이르는 규정시간 내에 아크고장 소거여부
접촉 아크 시험	NM-B 케이블과 APT2 연성 코드를 가지고 수행	75A에서 100A	0.5초 주기내에 8개의 반 사이클 아크가 발생할 때 아크고장소거여부	
부하 트립 시험	부하조건I (돌입전류)	터스텐 램프와 모터 기동과 같은 돌입전류		부동작여부
	부하조건II (정상조작아크)	스위치나 자동온도조절장치(Thermostat), 난방 전동기의 브러시 접촉 시와 같은 정상 아크		부동작여부
	부하조건III (비정현파형)	전자조광기(dimmer)와 컴퓨터 전원공급기와 관련된 것과 같은 비정현 파형들		부동작여부
	부하조건IV (흔선)			부동작여부
	부하조건V (다중부하)			부동작여부
	부하조건IV (램프 Burnout)	전구 끊어짐		부동작여부
	동작 금지	Masking		

시험	EMI 필터	고주파 아크고장 현상들을 약화시킬 수 있는 전자계 간섭(EMI) 필터의 사용여부		
	라인 임피던스	오래된 또는 신 주택에 이용되는 다른 타입의배선 시스템에 내재해 있는 회로 임피던스 특성		

VI. 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 DFT/DWT기반의 아크고장 판단 방법론을 확립하기 위해 돌입전류 파형에 DFT/DWT를 적용하여 분석하고자 하였다. 그러나 현재 아크파형 발생기 설계단계 있어 돌입전류 파형을 기반으로 제안된 방법론을 검토한다.

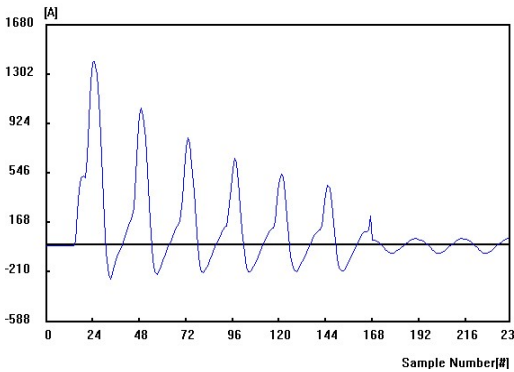


그림 6. 돌입전류 파형
Fig. 6 In-rush current waveform

그림 6은 제안된 방법론을 설명하기 위해 적용된 고압선로의 돌입전류 파형을 보인다. 그림 7은 그림 6의 돌입전류 파형에 대한 이산 푸리에 변환의 결과를 보인다. DC분에서 32조파까지의 크기를 확인할 수 있음을 보인다. 반면에 그림 8은 이산 웨이블릿 변환의 결과를 보인다. 특히 Detail 성분을 표시한다.

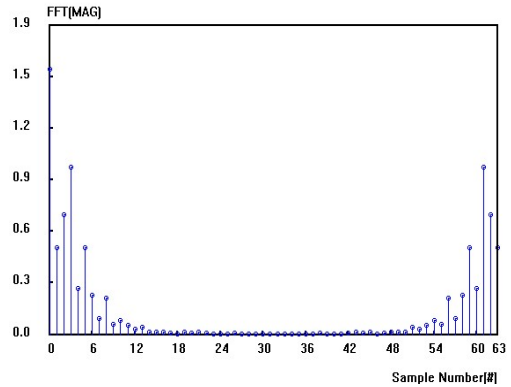


그림 7. 이산 푸리에 변환 결과
Fig. 7 The discrete fourier transform result

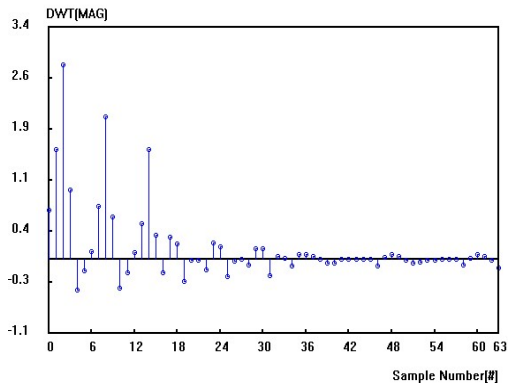


그림 8. 이산 웨이블릿 변환 결과
Fig. 8 The discrete wavelet transform result

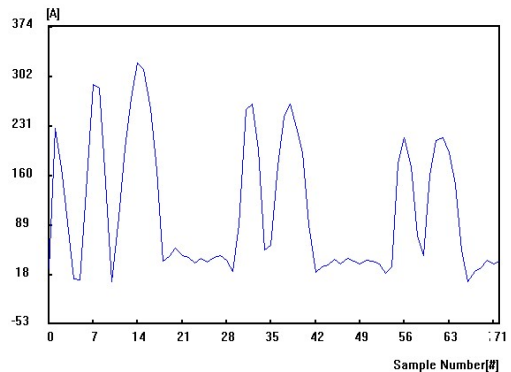


그림 9. 전류파형 샘플 간 크기 차
Fig. 9 Difference between current samples

그림 9는 전류 샘플간 difference를 보인다. 반면에

그림 10은 전압 샘플간 difference를 보인다.

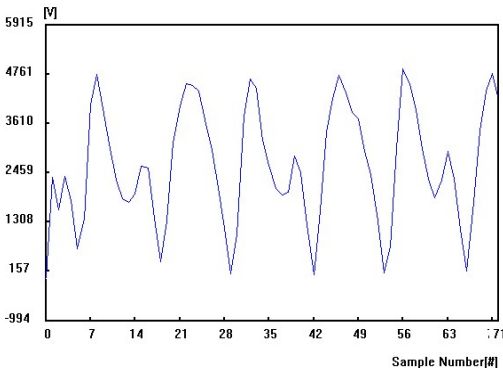


그림 10. 전압파형 샘플 간 크기 차
Fig. 10 Difference between voltage samples

그림들을 통해서 DFT, DWT 그리고 전압, 전류 샘플 간 difference를 분석하는 방법론을 연구하였다. 따라서 아크 파형을 포함한 다양한 부하파형들에 대해서 제안된 방법론을 적용하는 경우 상이한 특징들을 보이기 때문에 특징점을 분석함으로써 아크고장의 판단 능력을 제고할 수 있는 기반기술을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

VII. 결론

본 연구에서는 먼저 주택 전기회로의 구성 및 전기화재의 원인이 되고 있는 아크고장의 원인을 분석하고 병렬 아크 및 직렬 아크를 검출할 수 있는 아크고장 기본 검출 메커니즘을 설계하였다. 그리고 아크고장 판단을 위한 방법론으로서 DFT, DWT 적용 방법론을 제시하였다. 끝으로, 하나의 고압 돌입전류에 대한 DFT와 DWT 적용결과를 검토함으로써 아크고장 판단을 위한 기반기술을 확립하였다. 그러나 아직 아크 파형 제너레이터는 설계단계에 있기 때문에 아크파형을 기반으로 하는 파형분석은 이루어지지 않았다. 따라서 차후, 아크파형 제너레이터로부터 아크파형을 수집함은 물론, 백열전구, 컴퓨터 전원장치 등 다양한 부하전류 파형을 수집하여 제안된 DFT 및 DWT 방법론을 적용, 특징점을 분석함으로써 고도의 아크고장 판단 기술을 개발하는데 노력해야 할 것으

로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청에 의해서 지원되는 2008년도 산학협력실 사업의 연구결과임

참고 문헌

- [1] Arc Fault Circuit Interrupters Using Advanced Technology to Reduce Electrical Fires, NEMA.
- [2] IEC Fact Sheet #28, Illinois Electric Council.
- [3] Determining the Cause of AFCI Tripping, Data Bulletin, Schneider Electric, USA.
- [4] NEC 2002^①, Artical 440.65.
- [5] Jone Brooks and Gray Scott, "Arc Fault Current Interrupter for Aerospace Applications", Society of Automobile Engineers, Inc., 1999.
- [6] 고윤석, 김호용, 윤석열, "유비쿼터스 기반의 주택 자동화용 디지털 분전반 개발", 전기학회 논문지, Vol. 57, No. 5, May 2008.
- [7] 고윤석, 이서한, "수용가 시스템의 삼상 전력관리 모듈 설계에 대한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.2297-2298, July 2008.
- [8] UL 1699 Entitled: "Arc-Fault Circuit Interrupters"
- [9] "Combination AFCI transition Facts and FAQ's", Schneider Electric.
- [10] <http://www.zlan.com/waveforms.htm>
- [11] 이승훈, 윤동한, "웨이브렛 변환 이론 및 적용", 보성각

저자 소개



고윤석(Yun-seok Ko)

1984년 2월 광운대 공대 전기공학과 졸업

1986년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사)

1996년 2월 광운대 대학원 전기공학과 졸업(박사)

1986년 3월~1996년 3월 한국전기연구소 선임연구원

1996년 4월~1997년 2월 포스코 경영연구소 연구위원

1997년 3월~현재 남서울대학교 전자공학과 부교수