화재예방을 위한 실시간 모니터링 시스템의 알고리즘 개발

김병조 · 김재호^{*}

대전대학교 소방방재학과

(2014. 7. 29. 접수 / 2014. 9. 1. 수정 / 2014. 10. 15. 채택)

Development of a Novel Real-Time Monitoring System Algorithm for Fire Prevention

Byeong-Jo Kim · Jae-Ho Kim^{*}

Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University

(Received July 29, 2014 / Revised September 1, 2014 / Accepted October 15, 2014)

Abstract : Despite the automatic fire alarm system, according to the national fire data system of national emergency management agency, the fires account for 40,932 incidents, 2,184 injuries and about 430 billion won in property losses in 2013. Since the conventional automatic fire alarm system has several weaknesses related to electrical signal such as noise, surge, lighting, etc. Most fires are mainly caused by electrical faults, mechanical problem, chemical, carelessness and natural. The electrical faults such as line to ground fault, line to line fault, electrical leakage and arc are one of the major problems in fire. This paper describes the development of a novel real-time fire monitoring system algorithm including fault detection function which puts the existing optic smoke and heat detectors for fire detection with current and voltage sensors in order to utility fault monitoring using high accuracy DAQ measurement system with LabVIEW program. The fire detection and electrical fault monitoring with a proposed a new detection algorithm are implemented under several test. The fire detection and monitoring system operates according to the proposed algorithm well.

Key Words : electrical fire, fire alarm system, fire protection, vector analysis

1. 서론

국민생활수준 향상에 따른 전기에너지의 사용량은 지속적으로 증가 하고 있으며, 제 6차 전력수급기본계획에 의하면 2013년 ~ 2027년 기간 중 최대전력은 연평균 하계 3.4%, 동계 3.0% 증가 할 것으로 예측하고 있다¹⁾. 전력수요가 증가함에 따라 발전소, 변전소, 송·배전선뿐만 아니라 수전설비의 용량 또한 증가 하고 있다. 이러한 이유에서 전력기기는 점차 대형화 되고 있으며, 폭발 및 화재와 같은 사고발생시 그 파급효과가 커지는 문제점이 발생하게 된다. 그림 1은 지난 10년간 설비사고·화재사고·감전사고의 중대사고 조사결과 전수를 나타내고 있으며, 전체 사고건수가 증가하고 있는 것으로 조사되어 있다^{2,3)}.

전기기기의 사용이 늘어남에 따라 전기적인 요인에 의한 화재발생은 부주의에 의한 화재발생 다음으로 높은 비율을 차지하고 있다. 소방방재청 국가 화재정보

센터의 자료에 의하면 2013년 한 해 동안 40,932건의 화재가 발생하였고 전기적인 요인에 의한 화재발생은 24.68%로 조사·분석 되어 있으며, 지난 10년간 20% 이상을 유지하고 있다. 발화요인에 대한 발화 열원별 화재는 작동중인 기기에서 전기적 요인 64.05%, 기계적인 요인 18.31%로 주로 동작하고 있는 기기에서 발생하는 것으로 나타나 있으며, 작동기기에 대한 화재 비율 중 전기적 아크에 의해 59.7%, 기기 전도·복사 열 18.4%, 불꽃·스파크·정전기 12.1%, 기타의 순으로 조사되어있다. 전기적인 요인에 의한 화재발생 형태로는 절연열화에 의한 단락, 층간단락, 과부하 및 과전류, 접촉불량에 의한 단락, 트래킹에 의한 단락, 아크, 누전 등이 있다⁴⁾. 전기적인 요인에 의한 화재 발생 유형을 인지하고 있음에도 불구하고 높은 비율을 차지하고 있는 이유는 자동화재탐지설비가 전기적인 요인에 의해 화재가 발생한 이후 연소시 생성되는 열·연기·불꽃 등의 물리·화학적 변화량을 감지 후 수신기

^{*} Corresponding Author : Jae-Ho Kim, Tel : +82-42-280-2593, E-mail : jkim@dju.ac.kr

Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University, 62, Daehak-ro, Dong-gu, Daejeon 300-716, Korea

Fig. 1. Major accidents for the last 10 years.

로 신호를 전달하기 때문으로 사료된다. 열 및 연기감지기는 특정값 이상이 되면 수신기로 전기적 신호(on/off)를 전달하는 형태로 동작하고 감지기는 단순히 설정되어 있는 특정값을 기준으로 화재보를 전달하기 때문에 내·외부적인 요인에 의해 오작동이 발생할 가능성이 높다. 이를 보완하기 위해 온도, 열, 불꽃 감지기 등을 복합적으로 설치하여 특정 구획을 감시하는 경우도 있으나 비화재보를 감소시키는 근본적인 해결책은 될 수 없다. 수신기는 감지기 및 발신기로부터 신호를 전달받아 경보장치 및 주변 기기를 동작 시키고 화재 위치를 표시한다. 이와 같이 수신기는 화재인지 아닌지를 판단하는 것이 아니라 단순히 전기적 신호를 외부 회로에 전달하고 표시하는 기능을 한다.

본 연구에서는 화재 발생시 변화되는 열 및 연기 감지기의 전기적인 신호와 보호구간 내의 계통 전압 및 전류를 실시간 분석함으로써 전기적인 요인에 의한 비화재보 뿐만 아니라 지락 및 단락과 같은 고장을 검출하여 화재초기에 적극 대응할 수 있는 화재예방을 위한 실시간 모니터링 시스템의 알고리즘을 개발 하였다.

2. 실시간 모니터링 시스템의 알고리즘

제안된 실시간 화재예방을 위한 모니터링 시스템은 크게 두 개의 알고리즘으로 구분할 수 있다. 첫 번째로 열, 연기, 불꽃 감지기로부터 전기적인 신호를 전달받아 화재인지 아닌지 판단하기 위한 알고리즘과 두 번째로 보호구간 내의 전압 및 전류센서로 부터 신호를 전달 받아 불평형 3상 계통의 고장계산에 사용되고 있는 대칭좌표법(symmetrical coordinate methods)을 적용하여 3상 벡터의 연산결과를 실시간 확인하고 고장인지 아닌지 판단하는 알고리즘으로 구성되어 있다. 고장판단 기준은 적용하는 장소의 계통구성에 따라 달라져야 할 것으로 사료된다.

Fig. 2. Conceptual diagram of a novel real-time monitoring system for fire prevention.

그림 2은 화재예방을 위해 제안된 고장검출 기능을 갖는 실시간 모니터링시스템의 개념도이다. 알고리즘의 구현은 수정 및 보완, 모니터링, 컨트롤 등을 고려하여 그래픽 기반의 LabVIEW 프로그램을 사용하였다. 제안된 알고리즘은 현재 감지기와 함께 사용되고 있는 P형 또는 R형 수신기 대신에 고속의 정밀한 신호처리가 가능한 데이터측정 및 컨트롤 시스템에 실시간 모니터링 알고리즘을 적용함으로써 자동소화설비와의 연동 및 화재정보를 관리자에게 실시간 제공함으로써 화재 초기에 보다 빠른 대응이 가능할 것으로 판단된다. 또한 고비용의 투자가 요구되는 새로운 열 및 연기 감지센서를 개발하는 것이 아니라 기존에 사용하고 있는 감지센서와 전압·전류센서, 온도센서를 이용하여 보호구역내의 상태변화를 모니터링 및 검출할 수 있으므로 경제적인 측면에서의 이점이 있다.

2.1 소프트웨어 구성

그림 3(a), (b)는 LabVIEW 프로그램을 이용하여 개발된 고장검출 기능을 갖는 화재예방을 위한 실시간 모니터링 시스템의 내부 및 모니터링 화면을 나타내고 있다. 프로그램의 내부는 감지기, 온도센서, 전압 및 전류센서 등의 신호를 전달받아 연산을 수행하는 아날로그 입력부와 화재정보장치 및 자동소화설비, 제연설비 등을 동작시키기 위한 아날로그 출력부로 구성되어 있다.

아날로그 입력부를 통해 전달받은 열 및 연기감지기의 전기적 신호는 특정 전압값을 기준으로 화재를 판단하기 때문에 외부 모니터링 화면에 기준값을 설정할 수 있도록 하였고 정상, 주의, 화재의 3단계로 관리자에게 정보를 제공할 수 있도록 하였다. 보호구간내의 계통 전압 및 전류를 실시간 모니터링 함으로써 지락 및 단

(a) Program of real-time fire protection system.

(b) Monitoring display of real-time fire protection system.

Fig. 3. Real-time fire protection algorithm made by LabVIEW program.

락과 같은 고장상태감시 뿐만 아니라 전압 불평형과 설비 불평형 또한 실시간 감시 할 수 있다.

2.2 하드웨어 구성

그림 4은 실시간 화재보호 시스템의 알고리즘 구현 실험을 위해 구성된 하드웨어 구성도 이다. 열 및 광전식 연기 감지기는 시중에 판매되고 있는 A사의 제품을 사용 하였으며, 3상 전압 및 전류센서는 LV-25P와LA55-P를 이용하였다. 전기적 신호의 측정 및 컨트롤은 National Instrument사의 Signal Conditioning eXtensions for instrumentation(SCXI) 시스템과 LabVIEW 프로그램을 이용하였으며, 외부 장치와의 전기적 절연을 위해 Solid State Relay(SSR)를 사용하였다. SCXI 측정 시스템은 아날로그 입력과 아날로그 출력카드로 구성되어 있으며, 정밀도는 16 bit, 채널별 차동 입력, 데이터는 채널당 10 k sampling/sec로 획득할 수 있도록 설정 하였다. 온도 측정을 위해서는 K-type 열전대를 사용하였다. 그리고 화재 발생시 제연설비 및 경보설비의 동작은 삼상유도 전동기

Fig. 4. Hardware composition.

와 경종, 경광등을 사용하여 모의 하였고 제연설비 및 배연설비의 동작 구현을 위해 삼상유도 전동기의 정·역 회전 회로를 전자접촉기를 이용하여 구현하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연기 및 열 감지기의 전기적 특성 실험

기존에 사용하고 있는 자동화재탐지설비의 경우 설치되는 장소에 따라 사용하는 감지센서의 종류는 다르지만 설정된 기준을 초과하면 동작하도록 구성되어 있다. 비화재보를 감소시키기 위해서는 설치 장소에 따라 감지기의 종류뿐만 아니라 감지센서의 민감도 또한 관리자에 의해 수정할 수 있어야 될 것으로 판단된다.

제안된 화재예방을 위한 실시간 모니터링 시스템의 알고리즘 구현을 위해 사용되어진 광전식 연기 및 열 감지기의 전기적 신호를 측정하고 이에 대한 분석을 통해 화재 여부를 판단할 수 있는 기준값을 설정할 수 있도록 프로그램을 제작 하였다. 화재판단기준은 비화재시 감지기로부터 입력되는 전압을 기준으로 적용되는 장소에 따라 민감도를 3단계 (정상, 주의, 화재)로 나누어 설정할 수 있도록 구성하였으며, 오류를 감소시키기 위해 축적기능을 사용할 경우 기준전압보다 입력전압이 크고 30초 이상 2회 반복 지속될 경우 화재로 판단하도록 하였다. 이는 기존 자동화재탐지설비의 축적기능 사용시의 방법이며, 시간은 사용자가 임의로 조정할 수 있도록 구성 하였다.

그림 5는 광전식 연기감지기의 내부 사진이다. 광전식 연기감지기는 암실형태의 챔버에 적외선 LED를 이용한 발광부와 포토다이오드센서를 이용한 수광부로 구성되어 있으며, 화재 발생시 연기 입자에 의하여 산란되는 광을 감지하는 원리로 동작한다. 챔버에 유입되는 연기농도에 따라 수광부 포토다이오드센서의 출력전압 신호는 변화하게 되며, 특정값 이상이 되면 화재신호를 수신기로 전달한다. 이에 광전식 연기 감지

Fig. 5. Picture of optical smoke detector.

기의 수신부에 위치해 있는 포토다이오드센서의 신호를 측정하기 위해 PCB 기판에 신호선을 연결하였으며, 감지기를 동작시키기 위해 감지기테스터에 적용되는 연기스프레이를 사용하였다.

그림 6(a)는 연기감지기에 유입되는 연기량을 최소화 하여 포토셀의 증폭된 전압이 몇 V부터 화재발생 신호를 전달하는지 확인하기 위한 실험 결과이며, 본 실험을 위해 P형 수신기를 사용하였다. 감지기의 형식 승인 및 검정기술기준 제19조에 의하면 2종 광전식 연기감지기의 경우 공칭작동농도로서 감광율 10 %/m인 농도의 연기를 포함하는 풍속 20 ~ 40 cm/sec의 기류에 투입하는 경우 비축적형의 경우 30초 이내에 작동해야 하며, 축적형의 경우 공칭축적시간 ± 5 초 범위에서 화재신호를 발신하여야 한다⁵⁾. 본 실험실에서는 연기 유입에 따른 수신기와 광전식 연기감지기의 전기적 신호 전달 체계에 대한 해석을 목적으로 하기 때문에 연기농도에 따른 풍속과 감광율은 고려하지 않았다. 광전식 연기감지기의 수광부에 위치한 포토셀의 전압은 감광율에 따라 선형적으로 변화하는 특성을 가지고 있다^{6,7)}. 그림 6(a)의 실험결과에서 포토셀의 증폭된 전압이 연기 유입 시점으로부터 수신기의 공칭축적시간인 30초의 시간을 가지며, 이때의 전압이 2 V 이상 일때만 화재발생 신호를 수신기로 전달하는 것을 알 수 있다. 수신기의 축적 기능에 의해 2회 반복해서 화재신호를 발한 후 75초 이후에는 암실내부의 연기 확산에 의해 감광율이 감소되어 포토셀 및 증폭신호의 전압이 감소하는 것을 알 수 있으며, 수신기의 공칭축적 시간 30초 이후인 105초에서의 전압이 2 V 이하 이므로 화재발생 신호를 발생 시키지 않는 것을 알 수 있다. 150초에서 광전식 연기감지기의 동작 유·무를 확인하기 위해 연기의 유입량을 최대로 하여 응답 특성을 재확인 하였다.

(a) Minimum operating voltage at photoelectric smoke detector.

(b) Calibration result of Heat detector by increasing voltage.

Fig. 6. Preliminary test results of smoke and heat detector.

그림 6(b)는 70°C에서 동작하는 정온식 감지기의 내부와 외부에 부착되어 있는 Negative Temperature Coefficient (NTC) 써미스터와 K-type 열전대의 캘리브레이션 결과이다. 외부에 부착되어 있는 써미스터와 동일한 위치에 K-type의 열전대를 부착하여 써미스터의 전압변화에 따른 열전대의 온도변화를 측정 하였으며, 그 결과를 커브 피팅을 통해 수식화 하여 프로그램 내부에 적용하였다. 이를 통해 기존의 감지기를 활용하여 써미스터 전압을 실시간 측정함으로써 추가적인 온도센서를 사용하지 않더라도 온도를 실시간 모니터링 할 수 있는 것을 확인 하였다.

3.2 고장검출 알고리즘 구현

화재보호 구간내의 계통 전압과 전류 변화를 실시간 측정 및 분석을 통해 누전·지락·단락과 같은 전기화재 요인을 검출할 수 있을 뿐만 아니라 전압 불평형 및 부하 불평형 또한 실시간 모니터링이 가능하다. 고장 검출구간의 계통 구성에 따라 지락 및 단락 전류의 크

기가 상이하며, 고장검출 조건은 이에 따라 정정할 수 있도록 하였다. 고장판단을 위해 연산은 대칭좌표법을 적용한 3상 벡터연산을 통해 고장 발생시 16 ms 이내 검출할 수 있도록 하였고 누전 및 지락 검출은 최소 20 mA 이하부터 최대 1 A까지 감도를 설정할 수 있도록 되어있는 “누전정보기의 형식승인 및 제품검사의 기술 기준(고시 제2012-29호)”에 부합되도록 하였으며, 보호 목적 및 적용 계통에 따라 기준값을 사용자가 변경할 수 있도록 하였다. 대칭좌표법은 3상 회로의 불평형 문제를 해석하기 위해 1918년 Fortescue에 의해 개발되었다⁸⁾. 불평형인 전류나 전압을 3개의 대칭성분으로 분리 후 각 성분의 계산 결과를 중첩시켜 계산하는 방법이며, 정상상태 뿐만 아니라 과도상태에서의 적용이 가능하다. 분리된 3개의 대칭성분은 정상 (positive sequence), 역상 (negative sequence), 영상 (zero sequence)으로 정의한다. 이에 대한 대칭 성분 변환은 식(1) 및 식(2)로 나타낼 수 있다. I_0 : 영상성분, I_1 : 정상 성분, I_2 : 역상성분, I_a : A상 전류, I_b : B상 전류, I_c : C상 전류, a : phasor operator $1 \angle 120^\circ$ 이다. 전압은 식(1), (2)와 동일한 방법으로 3개의 대칭성분으로 변환 후 역변환을 통해 고장계산을 수행한다.

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ a & a^2 & a \end{bmatrix} \quad \text{or} \quad \begin{aligned} I_0 &= I_a + I_b + I_c \\ I_1 &= I_a + aI_b + a^2I_c \\ I_2 &= I_a + a^2I_b + aI_c \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad \text{or} \quad \begin{aligned} I_a &= I_0 + I_1 + I_2 \\ I_b &= I_0 + a^2I_1 + aI_2 \\ I_c &= I_0 + aI_1 + a^2I_2 \end{aligned} \quad (2)$$

보호구간 내에 평형고장이 발생할 경우를 고려하여 그림 7(a)에서와 같이 3상 벡터가 120도의 위상차를 가지고 동일한 크기일 경우 3상 벡터의 합은($\vec{R} + \vec{S} + \vec{T} = 0$) 0이 된다. 하지만 7(b)에서와 같이 3상 벡터의 위상차는 120도를 유지하지만 R상의 크기가 T상·S상에 비해 37.5%일 경우와 같이 감소하게 되면 3상 벡터의 합은($\vec{R} + \vec{S} + \vec{T} \neq 0$) 0이 되지 않고 반대 방향으로 $\vec{I}_g$ 와 같이 62.5% 감소한 크기에 비례하여 증가하게 된다. 이와 같은 원리를 이용한 것이 누전화재정보기이다. 보호구간 내에 불평형 고장이 발생할 경우를 고려하여 그림 7(c)는 3상 벡터의 크기는 동일하고 R상의 위상이 30도 이동한 경우 3상 벡터의 합은($\vec{R} + \vec{S} + \vec{T} \neq 0$) 0이 되지 않고 R, S, T상의 51.76%의 크기에 해당하는 $\vec{I}_g$ 를 발생시킨다. 이와 같이 3상 대칭좌표법을 적용하여 계통 전압과 전류를 실시간 계산함으로써 불평형·

(a) Case 1: balanced three phase, same amplitude.

(b) Case 2: balanced three phase, different amplitude.

(c) Case 3: unbalanced three phase, same amplitude.

Fig. 7. Vector analysis of three phase signal for fault detection.

(a) Fire detected by thermal sensor at balanced condition.

(b) Fire detected by thermal sensor at unbalanced condition.

Fig. 8. Test results of real time fire protection system.

평형 고장 검출이 가능하고 이에 대한 알고리즘을 구현 하였다.

그림 8은 개발된 화재예방을 위한 실시간 모니터링 시스템의 실험 결과이다. 시스템에 적용될 열 및 연기 감지기의 종류에 따라 동작 전압이 다르며, 화재 위험이 높은 장소에서는 동작의 민감도를 관리자가 설정할 수 있어야 한다. 센서 감도 설정 부분에서는 감지기의 캘리브레이션 결과를 반영하여 정상, 주의, 위험의 3단계로 나누어 화재를 검출할 수 있도록 하였다. 보호구간 내의 전압과 전류를 측정하여 모니터링 화면에 파형 및 벡터형태로 표시하고 3상 벡터의 연산결과를 실시간 확인할 수 있도록 구성하였다. 그림 8(a)는 계통 전압 및 전류가 평형인 상태에서 열감지기가 온도변화를 실시간 측정하여 설정된 기준값인 70도 이상에서 화재라고 판단한 상태의 실험결과이다. 그림 8(b)는 R상의 크기가 S상·T상에 크기에 비해 17% 일 경우이며, 3상 벡터의 합은($\vec{R} + \vec{S} + \vec{T} \neq 0$) 0이 되지 않고 반대 방향으로 83% 만큼 증가한 것을 확인하였다. 본 실험을 통해 화재예방을 위해 제안된 고장검출 기능을 갖는 실시간 모니터링 시스템의 알고리즘 구현 및 동작을 확인하였다. 그림 9는 R상과 S상에 단락고장 발생시의 전압 및 전류 파형이며, 고장 검출 후 16 ms 이내 차단동작 하는 것을 확인 하였다.

Fig. 9. Test results of R and S phases short circuit fault condition.

4. 결론

전기에너지의 사용이 증가함에 따라 전기적인 요인에 의한 화재사고는 지속적으로 증가하고 있으며, 점차 대형화 되고 있는 추세이다.

본 연구에서는 화재로부터 인명과 재산을 보호하기 위해 화재 발생시 생성되는 물리·화학적 변화량 뿐만 아니라 보호구간 내의 전압·전류를 실시간 모니터링하고 분석할 수 있는 고장검출 기능을 갖는 실시간 화재예방을 위한 시스템의 알고리즘을 개발하였다. 향후 제안된 알고리즘 확장의 용이성 및 모니터링의 편의성, 하드웨어와의 연결성 등을 고려하여 LabVIEW 프로그램을 사용하였다. 현재 사용되고 있는 감지센서의 전압신호 분석을 통해 제안된 시스템에 적용 가능하였으며, 실시간 신호를 관측함으로써 내·외부적인 요인에 의한 비화재보를 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다. 그리고 보호구간 내의 계통 전압·전류를 대칭좌표법에 적용하여 3상 벡터 연산을 통해 지락 및 단락과 같은 고장을 검출할 수 있으며, 전압 불평형·설비 불평형·과부하·누전 등 다양한 전기화재의 요인들을 감시할 수 있을 것으로 판단되며, 진행 중인 후속 연구를 통해 고장검출 뿐만 아니라 차단기능을 갖는 시스템을 개발할 예정이다.

본 연구를 통해 개발된 실시간 화재보호 시스템은 화재 예방과 전기적 고장검출을 통한 안전성을 확보할

수 있으며, 건축물뿐만 아니라 선박, 군함 등 특수목적 용도로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

- 1) Ministry of Knowledge & Economy, "The 6th Basic Plan for Long-Term Electricity Supply and Demand", 2013.
- 2) H. S. Shin, H. Y. Kim, J. S. Choi, J. M. Lim, M. S. Kim and H. S. Kim, "A Statistical Analysis on the Korea Electrical Fire Accidents in 2012", KIEE Autumn Annual Conference, pp. 31~33, 2013.
- 3) J. M. Lim and H. S. Kim, "Accident Investigation Business", The Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 26, No. 8, pp. 17~22, 2013.
- 4) National Emergency Management Agency, "National Fire Data System", 2013.
- 5) National Emergency Management Agency, "Type Approval of Detector and Code & Standard of Inspection Method", 2013.
- 6) H. G. Kim, S. P. Kwon, H. J. Yoon and S. H. Sakong, "A Study on the Development of Smoke Detector Sensitivity Test Equipment", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 125~132, 2009.
- 7) J. C. Edwards and G. S. Morrow, "Evaluation of Smoke Detectors for Mining Use", United States Department of the Interior Report, 1995.
- 8) L. C. Fortescue, "Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks", Trans. AIEE, Vol. 37, pp. 1027-1140, 1918.