접촉 불량에 의한 불꽃 및 직렬아크의 검출 기법에 관한 연구

김현우 · 백동현^{*†}

경민대학교, *가천대학교

A Study on the Detection Technique of the Flame and Series arc by Poor Contact

Kim Hyun Woo · Baek Dong Hyun^{*†}

Dept. of Fire Protection, Kyungmin College

^{*}Dept. of Fire & Disaster Protection Engineering, Gachon Univ.

(Received June 8, 2012; Revised November 19, 2012; Accepted December 7, 2012)

요 약

본 연구는 저압 선로의 접촉 부분에서 발생할 수 있는 접촉 불량과 그 부분의 진동이 결합될 경우 발생할 수 있는 불꽃 및 직렬 아크를 검출할 수 있는 방법에 대한 것이다. 일반적으로 전기화재의 원인은 과전류, 단락, 접촉불량 등 여러 가지가 있을 수 있다. 이 중 과전류 및 단락 등은 선로에 흐르는 순간 전류량을 검출하여 감지할 수 있으나, 접촉 불량은 전압, 전류값의 초과분 및 파형의 왜곡으로는 검출하기가 어려운 점이 있다. 따라서 본 논문에서는 퍼지논리 및 다차원 기법을 이용하여 최적의 아크 판단 기법을 연구하고, 아크 검출 및 검증을 위한 모의실험과 제어기 실험 및 부하실험을 실시하였다. 그 결과 제어기 및 검출 알고리즘이 여러 가지 부하와 상관없이 정상적인 부하의 파형과 아크 발생시의 파형을 구분하여 성공적으로 직렬아크를 검출하였다.

ABSTRACT

This study is on the method of the detection for flame and series arc which can be happened at poor contact point added a vibration in part of contact point of low voltage line. In general, the causes of electric fire are over current, short circuit, poor contact, ect. The over-current or short circuit among those causes is detected by measuring a instant current value, but poor contact is difficult to detect by measuring a excessive value of the voltage and current and a distortion of wave-forms. And therefore, in this paper, it is studied on the optimal technique of the arc judgement using fuzzy logic and MDET (Multi Dimension Estimation Technique). And it carries out the simulation for arc detection and the experiment for controller and load test. In result, the controller and detection algorithm, is classified with normal wave and abnormal arc wave without relation with each loads and so the controller can detect a series arc successfully.

Keywords : Electric fire detection, Poor contact detection, Arc detection

1. 서 론

현대사회는 전기, 전자기술의 발달로 다양한 전자기기들이 개발되어, 편리한 삶을 위하여 이용되고 있다. 하지만 전기기기의 고장, 불량 및 과다 사용 또는 부주의 등으로 인하여 막대한 재산상의 피해를 주기도 한다. 국내에서 발생하는 전체 화재 건수의 20% 정도는 전기화재에 의한 것으로 보고되고 있다⁽¹⁾. 전기화재는 단락, 과부하, 접촉 불량, 누전, 반단선 등 다양한 원인에 의해 발생하고 있다. 이 중 접촉 불량에 의한 원인은 단락 및 과부하에 의한 원인에 이어 매우 큰 비중을 차지하고 있다^(1,2,7).

전기화재의 주요 원인 중 하나인 불꽃 및 아크의 발생은 접촉 불량 및 반단선, 극간 절연파괴, 지락, 과전류에 의한 용단시에도 발생한다. 또한 전력선과 부하가 연결된 단자 부분 및 전선의 중간 이음새 또는 전선 중간 부분의 반단선 발생 부분 등에서 다소의 진동과 함께 발생할 수 있다^(4,5). 이러한 불꽃 및 아크 발생은 진동이 수반되는 전동부하 부근이나 대전류가 흐르는 전력선 부근에서 발생할 수 있다^(3,6). 이러한 원인에 의해 발생된 불꽃 및 아크 등은 절연물의 용착과 탄화현상을 발생시키고 절연을 약화시키며 주변의 가연성가스와 반응할 때 직접적인 전기화재의 원인이 되기도 한다.

[†]Corresponding Author, E-Mail: dhbaek@gachon.ac.kr
TEL: +82-31-750-5712, FAX: +82-31-750-8748

따라서 본 연구에서는 전기기기의 단자부근 및 전선 부근에서 발생하는 접촉 불량과 그 부분의 진동에 의한 아크 발생 및 불꽃을 전압과 전류의 데이터로 분석하고 검출하여 최적의 검출 방법을 연구·개발하여 실험으로 입증하고자 하였다.

2. 이론 및 검출원리

2.1 아크 검출 원리

Figure 1은 불꽃 및 아크를 검출하기 위한 블록도이다. 전압과 전류를 순시적으로 검출하고, 검출된 데이터를 A/D 변환하여 디지털화 한 후 공급되는 전력의 품질을 순시적으로 분석한다. 전력 품질 요소는 전압, 전류의 실효값, 고조파 함유량(THD: Total Harmonics Distortion & TEHD: Total Even Harmonics Distortion), 역률(PF: Power Factor) 등을 순시적으로 연산하여 데이터화 한다. 그 다음 이들 요소 중 임의의 요소에서 변화가 발생할 경우 이를 검출 제어기의 동작시점으로 적용하게 된다.

상기의 블록다이어그램과 같이 순시적으로 연산된 전력 품질 각 요소 값의 변화량(d/dt)에 대하여 Table 1의 예와 같은 Fuzzy Rule을 적용하여 각 요소의 변화량에 대한 크기가 어느 정도 인지 분석한다.

Table 1 Fuzzy Rule의 예에서 ZO(Zero)는 그 요소에 이 전상태와 비교하여 변화량이 없음을 뜻하며 PS(Positive small)는 변화량이 약간 있음을 뜻하고, PM(Positive medium)으로써 변화량이 중간 정도되는 것이며, PL(Positive large)은 변화량이 매우 큼을 나타낸다.

Figure 1의 블록다이어그램에서 연산된 요소 중 변화량

Figure 1. The process of arc detection.

Table 1. The Example of Fuzzy Rule

A	I ^{TEHD}					B	I ^{RMS}				
		ZO	PS	PM	PL			ZO	PS	PM	PL
V ^{TEHD}	ZO	1	2	4	6	V ^{RMS}	ZO	1	2	4	6
	PS	2	4	8	12		PS	2	4	8	12
	PM	4	8	16	24		PM	4	8	16	24
	PL	6	12	24	36		PL	6	12	24	36
		ZO	PS	PM	PL			Ratio	Harmonics		
		1	2	4	6				RMS		
								4	2		

이 있는 요소는 Table 1과 같은 Fuzzy Rule table에 의해 판단하게 된다.

이때 각 요소별 변화량(d/dt)에 대한 판단이 PM 또는 PL 등으로 나타나면 다시 각 요소별 가중치(Ratio)를 적용하여 결과 값을 각각 조정한다. 이 때 변화량(d/dt)은 크나 아크로 판단하는 기준에 있어서 그 중요도가 낮을 경우가 있고, B라는 요소는 변화량은 작으나 아크 발생 요소를 판단하는데 있어서 그 중요도가 클 수도 있기 때문에 A요소

Figure 2. Flow-chart for detection of arc.

와 B요소에 대한 가중치(Ratio)를 다르게 적용하게 된다.

Figure 2는 아크를 검출하기 위한 흐름도로써 상기에서 언급한 전압, 전류의 순시적 데이터를 이용하여 각 요소의 변화량에 대한 분석 및 가중치 적용과 다차원판단기법(MDET: Multi Dimension Estimation Technique) 그리고 지속성과 반복성 등을 고려한 일련의 불꽃 및 아크 발생의 결정 과정을 나타낸다.

3. 모의실험

모의실험은 본 연구에 적용하는 아크 검출 제어기 하드웨어에 대한 모의실험으로서 Figure 3과 같은 전압, 전류의 데이터를 실시간 연속적으로 제어기에 주입하여 분석 및 연산하게 하였다.

제어기의 하드웨어는 전압, 전류의 정상 동작을 순시적으로 분석해야 하므로 고속으로 알고리즘 연산이 가능한 마이크로프로세서가 필요하다. 따라서 DSP 마이크로프로세서를 사용하여 제어기 하드웨어를 설계한 다음 이에 적용하였다.

이 아크 파형에 대하여 고조파를 분석한 결과 Table 3과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 이 표에서 볼 수 있듯이 아크 발생 전에 비하여 아크 발생 후 고조파가 더욱 많이 포함되어 있는 것을 알 수 있다.

분석결과 일반 부하에서 자주 발생하는 홀수 고조파(Odd Harmonics)의 함유량이 증가하였고, 일반부하에서 비교적 발생비율이 적은 짝수 고조파(Even Harmonics)도 다수 포함되어 발생된다는 것을 알 수 있었다. 이 짝수 고조파의 발생과 기존 홀수 고조파 함유량의 변화 등이 본 연구에서 아크 판단 요소 중 중요한 요소로 작용하였으며, 이 밖에 정상상태를 벗어나는 여러 가지 요소에 대하여 그 변화량을 검출하도록 제어기를 설계하였다. 특히 부하의 종류에 따라 정상적으로 발생하는 고조파는 그 발생 함유량과 상관없이 제어기가 '정상'으로 판단하고 있으며, 부하의 특성상 고조파 발생이 많이 발생하는 부하에서도 아

크가 발생될 경우만 아크로 판단 할 수 있었다.

Table 3은 Figure 3의 아크 파형에 대한 데이터를 제어

Table 2. The Harmonics of Voltage & Current for Events before and after

Normal	Odd		Even		ArC	Odd		Even	
	Times	THD	Times	THD		Times	THD	Times	THD
V^{THD}	3	0	2	0	V^{THD}	3	38.9	2	9.8
	5	0	4	0		5	28.5	4	5.1
	7	0	6	0		7	19.1	6	3.2
	8	0	8	0		8	9.5	8	2.2
	11	0	10	0		11	9.3	10	1.5
	13	0	12	0		13	4.7	12	0.6
	15	0	14	0		15	3.1	14	0.2
rms	220V				rms	73V			
Normal	Odd		Even		ArC	Odd		Even	
	Times	THD	Times	THD		Times	THD	Times	THD
I^{THD}	3	0	2	0	I^{THD}	3	9.7	2	0
	5	0	4	0		5	5.8	4	0
	7	0	6	0		7	3.3	6	0
	8	0	8	0		8	2.5	8	0
	11	0	10	0		11	1.6	10	0
	13	0	12	0		13	0.8	12	0
	15	0	14	0		15	0.6	14	0
rms	10.6A				rms	4.6A			

Table 3. The Application of Fuzzy Rule Table

I	V					II	V				
		ZO	PS	PM	PL			ZO	PS	PM	PL
V^{THD}	ZO	1	2	4	6	V^{TEHD}	ZO	1	2	4	6
	PS	2	4	8	12		PS	2	4	8	12
	PM	4	8	16	24		PM	4	8	16	24
	PL	6	12	24	36		PL	6	12	24	36

III	I					IV	I				
		ZO	PS	PM	PL			ZO	PS	PM	PL
I^{THD}	ZO	1	2	4	6	I^{TEHD}	ZO	1	2	4	6
	PS	2	4	8	12		PS	2	4	8	12
	PM	4	8	16	24		PM	4	8	16	24
	PL	6	12	24	36		PL	6	12	24	36

V	V^{THD}					VI	I^{THD}				
		ZO	PS	PM	PL			ZO	PS	PM	PL
V^{TEHD}	ZO	1	2	4	6	I^{TEHD}	ZO	1	2	4	6
	PS	2	4	8	12		PS	2	4	8	12
	PM	4	8	16	24		PM	4	8	16	24
	PL	6	12	24	36		PL	6	12	24	36

기에 입력시킨 경우 퍼지를 테이블의 판단 결과를 나타낸 것이다.

제어기에서 연산된 요소 중 6가지 요소를 고려하여 전압, 전류의 rms 및 고조파 함유량의 변화 관계 등을 분석하도록 하였으며 그 결과 각 요소별로 그 변화량이 각각 다르게 결정되어진 것을 확인 할 수 있으며 각 요소별 변화량이 어느 정도인지 알 수 있다.

Table 4는 Table 3에 나타난 변화량에 각각의 요소들마다 그 중요성을 고려하여 가중치(Ratio)를 적용한 값을 나타낸 것이다. 예를 들면 “I” 요소는 변화량이 16으로 되었으나 가중치(Ratio)를 적용한 결과 안정권인 결과 값으로 되었다. “VI” 요소의 변화량은 4가 발생하였으나 가중치(Ratio)를 적용한 결과 값이 16으로서 안정권을 벗어났기 때문에 아크를 판단하는데 있어서 중요한 결과 값으로 분

Table 4. The Ratio for Each Elements

	I	II	III	IV	V	VI
d/dt	16	8	36	2	12	4
Ratio	0.5	0.3	0.4	2.5	3	4
Result	8	2.4	14.4	5	36	16

Figure 4. The process of MDET.

석되고 있다. 이러한 가중치의 적용은 불꽃 및 아크를 결정하는데 중요한 요소로 작용하며 이는 본 연구에서 실험 과정을 거쳐 정하였으며 주로 고조파의 급격한 출현 및 변화에 가중치가 높게 적용하였다. 특히 짝수 고조파의 출현에 비중을 많이 두었다.

Figure 4는 Table 4에 따라 각각 가중치를 적용한 다차원판단기법(MDET: Multi-Dimension Estimation Technique)을 통해 아크를 판단하는 과정을 나타낸 흐름도이다.

다차원판단기법은 변화량을 나타낸 요소가 여러 가지가 될 경우 이들 요소의 변화량을 일정 범위로 한정하여 이 범위 안에 들어올 경우를 정상, 벗어날 경우를 비정상으로 판

(a)

(b)

Figure 5. The results of simulation.

단하는 기법이다. 1차로 제어기는 입력된 전압, 전류 데이터를 분석하여 변화량을 분석한 후 fuzzy rule을 적용하여 1차의 다차원 그래프를 그린 후 이에 각 요소별 가중치를 적용한 후 2차의 다차원 그래프를 그리게 된다. 여기에 이상 현상의 지속시간 및 반복현상을 고려하여 최종 아크를 판단하고 경보하며 출력신호를 발생시키게 되는 것이다.

Figure 5는 상기와 같은 과정을 거친 모의실험 결과를 나타낸 것이다. (a)는 아크 발생 순간의 전압 및 전류 파형으로 제어기가 모의실험을 위하여 제공된 데이터에 의해 정상적으로 반응하고 아크를 정상적으로 판단하고 있는 것을 확인 할 수 있다. Figure 5(b)는 아크가 발생함과 동시에 아크 발생을 나타내는 출력 파형이다. 이 신호에 의해 경보 및 다른 기기 및 장치에 신호 전달이 가능하게 된다. 따라서 제어기는 정상적으로 양호하게 동작함을 모의 데이터 입력 실험을 통하여 입증하였다.

4. 실험결과

4.1 시스템 신뢰성 평가

실험 장치는 DSP 프로세서가 장착된 제어기 부분과 진동 및 아크를 발생시킬 수 있는 부하측 하드웨어 부분으로 구분하여 제작하였다.

검출된 전압, 전류의 정보는 제어기로 입력되고 A/D변환기에 의해 디지털 신호로 변환되며 각 요소별로 연산되어 아크를 판단하게 된다.

접촉 불량 발생시 모든 경우에서 아크가 발생하는 것은 아니지만, 본 연구에서는 전기적 접촉불량 및 반단선 상태 및 이러한 환경에 진동이 가해질 때 불꽃 및 아크가 발생하여 전기화재로 이어질 경우를 가정하여 실험하였다.

Figure 6은 본 연구의 실험세트로서 저항부하 및 아크 발생장치 그리고 전압, 전류 검출장치 와 제어기로 구성되어 있다. 이 실험세트를 이용하여 접촉 불량과 진동에 의한 아크를 발생시키고 그 아크를 정확히 판단하는지 여부를

Figure 6. Experiment setup.

Figure 7. The waveforms of voltage & current of arc point.

실험하였다.

Figure 7은 아크 발생지점에서 발생하는 전압강하의 파형과 그 부분의 전류파형을 나타낸다.

이 파형은 제어기의 모의실험을 위하여 제공되었던 Figure 3의 파형과 일치하고 있음을 알 수 있다. 전압 파형은 구형과 모양이며, 전류파형은 숄더(shoulder)현상을 나타내고 있어 전형적인 아크 발생 파형을 보이고 있다. 이 파형은 불꽃 발생과 더불어 오실로스코프에 나타나고 동시에 제어기가 아크로 판단하였다.

Figure 8은 아크가 발생한 부하측에서 측정한 파형이다. 전류파형은 아크 지점에서 발생한 파형과 동일하게 shoulder

Figure 8. The waveforms of voltage & current for load arching.

Figure 9. The waveform of Arc current & alarm signal.

현상이 발생되어 나타나고 있으며 이러한 파형의 전류가 전력라인 전체에 흐르고 있음을 입증하고 있다.

또한 전압파형은 전류파형에서 shoulder 현상이 발생될 때 마다 파형이 일그러지고 잠시 지연되는 현상을 보이고 있다. 이러한 현상에 의해 제어기에는 비정상적인 고조파 및 rms값의 급격한 변화량이 출현하게 되고 아크 발생 이전 상태에 나타나지 않던 여러 가지 요소의 변화가 발생하게 된다. 이러한 변화된 요소를 제어기가 검출하면 이에 가중치를 적용하여 오차 없는 아크를 검출하게 되는 것이다.

Figure 9는 본 연구의 실험 결과를 나타내는 것으로서 아크 발생시 전류파형 및 아크 경보 개시에 대한 출력파형이다.

그림에서 알 수 있듯이 아크가 발생한 시점으로부터 약 200[ms]에서 아크를 판단하고 경보를 울리고 있으며 단속적인 것을 알 수 있다.

또한 전류파형을 분석해 볼 때 연속적인 정상 전류파형에서 접촉 불량에 발생하면서 그 부분의 저항이 증가하여 전류 rms값이 감소되고 있다. 이러한 전류 rms값의 변화도 본 연구의 제어기에서는 아크 판단의 중요한 요소로서 적용시키고 있으며, 모든 변화 요소에 대하여 집중적으로 제어기가 감시하고 있다.

4.2 일부하 특성분석

부하 실험은 본 연구에 의해 연구·개발된 제어기가 비정상적인 전압, 전류 파형을 유발하는 부하에 대하여 동작 및 부동작 실험에서 잘 적응하는지를 확인하기 위하여 실시하였으며, 저항부하는 물론 SMPS, 유도성 및 용량성 부하가 적용될 경우 등에 대하여 동작 및 부동작 실험을 하였다. 부하로는 진공청소기, DC전원공급기, 캐패시터 기동 모터, 조광기, 형광등(40 W) 부하를 적용하였다.

Figure 10은 부하 적응도 확인 실험을 하기 위한 실험등가 회로도로서 표준부하와 일반 저항부하가 병렬로 연

Figure 10. Equivalent circuit of load test and current probe position.

결된 상태를 유지하며 그 앞단에서 아크를 검출하도록 하였다.

제어기의 적응성을 판단하기 위하여 각 부하의 전류파형을 분석한바 부하에 따라 다양한 전류파형이 나타나는 것을 알 수 있었다.

Figure 11은 Figure 10의 P1과 P2에서 측정한 전류파형이다. 다양한 부하에서 서로 상이한 전류파형이 나타나고 있으며 이는 부하에 따라 포함되는 고조파 성분이 다르게 나타남을 의미하고 있고 이에 대하여 제어기는 부작동 시험에 적합하게 적응하고 있음을 알 수 있다. 부하로 사용된 것은 4가지로서 다음과 같다. (a) 조광기(0-180°-전구 300[W]), (b)는 캐패시터 기동 모터(5HP), (c)는 DC전원 공급기(DC0-30V/5A×2), (d)는 형광등(40W×2) 부하를 적용하였다.

아크 발생시의 파형은 각 부하에서의 여러 형태로 서로 다르게 나타나고 있으나 제어기는 정상적으로 아크를 판단하고 있었다. 또한, 실험 부하에 따라 달라지는 전압, 전류파형에 대하여도 제어기는 아크 발생에 대해서만 동작하고 있음을 알 수 있어 고조파 및 파형의 왜곡에 대해서도 제어기가 영향을 받지 않고 있음을 입증하고 있다.

5. 결 론

본 논문은 접촉불량 및 반단선 등이 발생되고 진동이 결합될 경우 발생할 수 있는 불꽃 또는 아크를 검출할 수 있는 아크 검출 제어기에 관한 연구이다. 아크 검출 제어기에 대한 신뢰성 실험과 부하 특성 실험을 실시하여 제어기의 타당성을 입증하고자 하였다.

본 연구에서 제시한 검출 제어기는 아크 발생시 약 200[ms] 이내에서 신속히 상태를 분석하고 경보하였고, 제어기 내부의 검출 알고리즘이 양호하게 동작함을 알 수 있었으며, 여러 가지 표준 부하로 부하 동작 실험 및 부동작 실험을 한 결과 각 부하에 따른 파형의 상태와 상관없이 정상적인 부하의 파형과 아크 발생시의 파형을 구분하였다. 향후 보다 다양한 부하 실험을 통하여 본 논문에서 적용한 가중치에 대한 정밀한 적용 방식 및 퍼지 로직 적용에 대한 연구를 지속하여 보다 다양한 부하의 특성을 고려한 아크 검출기가 될 수 있도록 연구를 지속할 것이다.

Figure 11. The test waveforms of various loads.

참고문헌

1. KESCO, "Electric Disaster Statistics Analysis" (2011.12).
2. George D. Gregory and Gary W. Scott, "The Arc-Fault Circuit Interrupter: An Emerging Product", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 34, No. 5, pp. 928-933 september/october (1998).
3. T. Funabashi, H. Otoguro, Y. Mizuma, L. Dubé, M. Kizilcay and A. Ametani, "Influence of Fault Arc Characteristics on the Accuracy of Digital Fault Locators", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, No. 2, April, pp. 195-199 (2001).
4. Proc.-Gener. Transm. Distrib. A. T. Johns, R. K. Aggarwal and Y. H. Song, "Improved Technique for Modeling Fault arc on Faulted EHV Transmission Systems", Vol. 141, No. 2, March, pp. 148-154 (1994).
5. J. H. Lee, D. H. Kim and S. C Kim, "Improvement and Analysis for an Electrical Fire Cause Classification", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 23, No. 2, pp. 36-40 (2009).
6. S. C. Choi, C. K. Kwak and J. H. Kim, "A Study on Device Development for Electrical Fire Protection on Open Phase of Three-Phase Motor", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 26, No. 1, pp. 61-67 (2012).