

# 수용가 전기설비 사고처리 시스템 및 케이블 사고사례 연구

(The Study of Cable Fault Case and the Fault Management System of Electrical Facilities for private use )

김영석\* · 송길목 · 김선구  
(Young-Seok Kim · Kil-Mok Shong · Sun-Gu Kim)

한국전기안전공사 전기안전연구원  
(Electrical Safety Research Institute, Korea Electrical Safety Corporation)

## Abstract

When happen the electrical facilities accident, the one's diagnosis system of fault cause was constructed by FMEA method. Cable accident cause is given by accident cause that can happen in each one's diagnosis and accident probability value. From the verification of system, the one's diagnosis system agreed well with result that analyzed actual state. Thus, the system is judged to be used effectively examine for accident cause of electrical facilities.

## 1. 서론

2007년 통계자료에 의하면, 전기설비사고 중 고압설비에서의 사고가 1,481건이 발생하여 21.3%를 점유하였으며, 이중 케이블 사고는 107건이 발생하였다[1]. 수용가 전기설비에서 사고가 발생하면, 우선 전기공급에 의해 전기사고를 복구하게 되고 담당자는 사고사항을 기록하여 보관하게 된다. 하지만, 사고 시, 정확한 원인규명 및 처리 결과에 대한 데이터베이스 시스템은 구축되어 있지 않다. 특히, 전기설비 사고는 정전, 주변기기의 화재 등으로 경제적·재산적 피해의 증가와 인명피해를 야기하므로 사고예방과 사고에 대한 정확한 원인 규명이 필수적이다. 또한, PL법에 따라 제조물에 대한 소비자 피해배상책임이 확대·강화되므로 사고처리 및 원인 규명에 대한 객관적인 자료제공이 필요하다[2].

현재 전기설비 분야는 설비이상을 초기에 감지하여 사고를 예방하는 진단시스템 기술이 많이 축적되어 있고, 전기설비 사고 발생시의 사고처리 과정에 대한 기술은 일부 기관에서 수행하고 있지만, 오프라인을 통해서 이루어지고 있다. 하지만, 해당 당사자 외에는 사고처리에 대한 객관적 자료를 제공받을 수 없으며, 전기설비사고에 대한 사례와 사고원인결과에 대한 객관적 자료제공이 되지 않는 문제점을 해결할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 전기설비 사고 발생 시, 전기설비 사고원인을 자가 진단 할 수 있는 시스템의 구축과 사고사례를 검증하여 시스템의 신뢰성 향상 등에 관하여 연구하였다.

## 2. 신뢰성기반 전기설비 사고처리시스템 구축

그림 1은 전기설비 사고처리 시스템에 대한 개략적인 흐름도를 나타낸다. 먼저, 사용자가 인터넷을 통하여 전기설비 사고 처리 시스템 홈페이지(www.kesco-pl.com)에 로그인하여 접속한다.

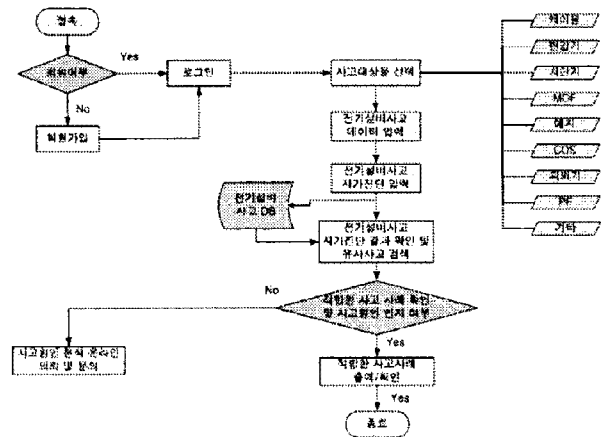


그림 1. 전기설비 사고처리 시스템 흐름도

다음으로 시스템에서 사고대상물 즉, 케이블, 변압기, 차단기 등을 선택하고 전기설비의 사양 및 사고 데이터들을 입력한다. 또한 전기설비사고에 대한 자가 원인 분석 화면이 펼쳐지며, 사고원인에 대하여 3단계의 피토크그램의 사고 원인 리스트가 보여 사용자가 선택 입력하도록 되어 있다. 입력된 데이터는 전기설비 사고 DB에 저장되며, 전기설비 사고 자료와 자가 원인 진단 결과를 확인할 수 있다. 이때 시스템은 사고 원인에 대한 진단 결과와 함께 유사한 사고사례 데이터를 전기설비 사고DB에서 검색하여 자료를 제공한다. 여기서, 사용자는 검색된 유사한 사고사례 데이터와 전기사고 원인 분

석 결과에 의해 적합한 사고 사례를 확인하고 원인파악이 이루어지 경우 종료하거나, 사고 사례를 출력하게 된다. 하지만, 적합한 사고 사례에 해당하지 않거나 사고 원인 분석이 충분하지 않을 경우에는 추가적인 사고 원인 정밀 분석을 온라인으로 요청하게 된다.

그림 2는 사고원인에 대한 자가 진단 결과의 확률 연산 개략도를 나타낸다.

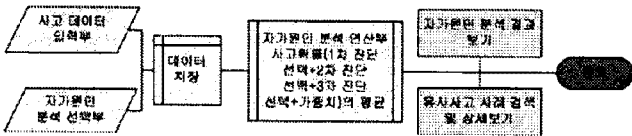


그림 2. 케이블사고의 자가 진단 결과 확률 연산

전기설비 중 케이블 사고에 대하여 사고확률을 계산하기 위한 것으로 케이블 사고원인의 자가진단을 크게 1차 진단, 2차 진단, 3차 진단으로 구분하였다. 1차 진단은 케이블 사고부위를 나타낸 것으로 케이블 종단접속부, 케이블 본체, 케이블 중간접속부, 기타로 나누었으며, 각각의 부위에 대한 사고확률을 가진다. 2차 진단은 케이블 절연부위의 사고확률을 나타낸 것으로 케이블 사고가 발생했을 경우, 절연체의 파손 형태에 따라 표면 크랙, 구멍, 패임, 부풀음, 기타로 나누었으며 각각의 사고확률을 가진다. 3차 진단은 케이블 도체의 소손 형태를 보고 판단하는 것으로 용융망울의 비산, 망울의 패임, 용융흔적, 기타로 나누며, 역시 각각의 사고확률을 가진다.

케이블 사고원인은 표1에 나타난 것과 같이 15개로 나누었으며, 케이블 사고원인은 자가진단의 각 진단에서 발생할 수 있는 사고원인과 그때의 사고확률값으로 주어진다. 여기서, 사고확률은 한국전기안전공사 사고통계 자료, 사고원인 분석 경험치 그리고신뢰성 기반인 FMEA 방식을 적용한 사고확률로 계산하였다. 신뢰성 기반의 FMEA 분석 방법은 MIL-STD-1629A,

표 1. 케이블 사고원인 리스트

케이블 사고원인	1. 과전류에 의한 가능성
	2. 보이드(Void)에 의한 절연파괴 가능성
	3. 케이블 밀립으로 전계집중 가능성
	4. 케이블과의 틈(gap) 발생으로 전계집중 가능성
	5. 케이블 내부 이물질 존재 가능성
	6. 시공시 칼집에 의한 전계집중 가능성
	7. 빗물 및 수분 침투, 수트리 가능성
	8. 외부 화염에 의한 소손 가능성
	9. 케이블 절연두께 불량으로 인한 절연파괴 가능성
	10. 외부공사에 의한 손상(눌림, 찢김) 가능성
	11. 설치류에 의한 손상 가능성
	12. 접속재 열처리 불량으로 인한 절연파괴 가능성
	13. 반도체에서 외부충전부와 지락 가능성
	14. 도전층과 접지 측과의 지락 가능성
	15. 단락 가능성

QS-9000 등의 품질관리시스템에 고장요소를 찾아내어 고객의 만족도를 높이기 위해 만들어진 것이며, QS-9000은 미국의 자동차 Big3에서 권장하는 양식으로 기계, 전기, 전자, 반도체 및 일반산업 분야에 활용되고 있다. QS-9000의 FMEA평가방법은 심각도×발생도×검출도로 표시하고 있으며, 전기설비사고에서의 FMEA는 사고 대상물의 원인 규명을 위해 사고 대상물에서 사고로 일어날 수 있는 잠재적 요소를 찾아내어 사고가능성을 추측하는 방법으로 사용되고 있다.

FMEA의 평가방법에서 심각도, 발생도, 검출도의 평가기준은 TS 16949를 근거로 하여 표 2에 정리하였다.

표 2. 심각도, 발생도, 검출도의 평가기준

심각도	등급(%)	발생도	등급(%)	검출도	등급(%)
매우높음	100~90	매우높음	100~90	매우희박	100~90
높음	80~70	높음	80~70	매우낮음	80~70
보통	60~40	보통	60~40	보통	60~40
경미	30~20	낮음	30~20	매우높음	30~20
없음	10	희박	10	거의확실	10

TS 16949에서는 심각도, 발생도, 검출도의 평가기준을 세부적으로 10등급으로 구분하고 있지만, 여기서는 사고원인 규명을 위해 크게 5등급으로 나누었으며, 심각도(Severity)는 제품 주요기능의 상실에 따른 시스템 파급 및 사용여부, 발생도(Occurrence)는 제품에서 발생할 수 있는 사고 가능성 여부, 검출도(Detection)는 제품의 고장 및 사고형태를 검출할 수 있는 여부를 나타낸다. 표 2에서 심각도의 주요기능 상실 및 시스템 파급 여부에 따라, 매우 높음, 높음, 보통, 경미, 없음으로 구분하였고, 발생도는 제품에서 발생할 수 있는 사고 가능성에 대해 매우 높음, 높음, 보통, 낮음, 희박으로 구분하였으며, 검출도에서는 제품의 고장 및 사고형태를 검출할 수 있는 것에 따라 매우희박, 매우 낮음, 보통, 매우 높음, 거의 확실로 구분하였다.

따라서 1차 진단, 2차 진단 3차 진단 각 세부사항의 사고확률은 QS-9000, TS 16949를 참고하여 사고통계, 사고분석 경험치, 실험결과 등을 종합하여 다음식에서 확률값으로 정하였다.

$$\text{사고가능성} = \sum((\text{심각도} \times \text{발생도} \times \text{검출도}) + \text{가중치})$$

위 식에서 구한 사고가능성 확률과 외형특성을 표 3에 정리하였다.

예를 들어 그림 3에 각 진단에 따른 케이블 사고원인 내용을 나타낸다. 그림 a)는 1차 진단으로 케이블 사고 부위에 대한 사고확률과 사고가능성의 원인에 대해 나타냈다. 케이블 종단부에서 발생할 수 있는 사고확률은 30%이며, 그 원인으로서는 케이블 밀립현상, 틈 발생, 시공시 칼집의 영향, 접속재의 열처리 불량 등의 원인으로 사고가 발생할 것으로 판단된다. 그림 b)의 2차 진단

표 3. 케이블 사고의 외형 및 사고확률

1차 진단	외형				
	사고확률	30%	20%	30%	0%
2차 진단	외형				
	사고확률	70%	80%	50%	30%
3차 진단	외형				
	사고확률	80%	60%	40%	20%

외형 및 사고확률	사고원인 COMMENTS
 30%	3. 케이블 밀림으로 전계집중 가능성
	4. 케이블과의 틈(gap) 발생으로 전계집중 가능성
	6. 시공시 칼집에 의한 전계집중 가능성
	12. 접속재 열처리 불량으로 인한 절연파괴 가능성
	13. 차폐층에서 외부충전부와 지락 가능성
14. 도전층과 접지 측과의 지락 가능성	
15. 단락 가능성	

a) 1차 진단인 중단부의 사고확률

외형 및 사고확률	사고원인 COMMENTS
 80%	1. 과전류에 의한 가능성
	2. 보이드(Void)에 의한 절연파괴 가능성
	3. 케이블 밀림으로 전계집중 가능성
	4. 케이블과의 틈(gap) 발생으로 전계집중 가능성
	5. 케이블 내부 이물질 존재 가능성
	6. 시공시 칼집에 의한 전계집중 가능성
	7. 빗물 및 수분 침투, 수트리 가능성
	9. 케이블 절연두께 불량으로 인한 절연파괴 가능성
	12. 접속재 열처리 불량으로 인한 절연파괴 가능성
	13. 반도전층에서 외부충전부와 지락 가능성

b) 2차 진단인 절연체 외형의 사고확률

외형 및 사고확률	사고원인 COMMENTS
 80%	2. 보이드(Void)에 의한 절연파괴 가능성
	3. 케이블 밀림으로 전계집중 가능성
	4. 케이블과의 틈(gap) 발생으로 전계집중 가능성
	6. 시공시 칼집에 의한 전계집중 가능성
	9. 케이블 절연두께 불량으로 인한 절연파괴 가능성
	12. 접속재 열처리 불량으로 인한 절연파괴 가능성
	14. 도전층과 접지 측과의 지락 가능성
	15. 단락 가능성

c) 3차 진단인 도체 외형의 사고확률

그림 3. 각 진단에 의한 케이블 사고 확률

에서는 케이블 절연체의 외형패턴을 보고 판단하게 되며, 절연파괴 구멍(pit)를 선택했을 경우의 사고확률은 80%이며, 이때는 그림 b)에 나타난 사고원인에 의해 사고가 발생할 것으로 판단된다. 그림 c)의 3차 진단에서는 케이블 도체의 외형패턴을 보고 판단하게 되며, 용융망울이 비산되었을 경우의 사고확률은 80%이며, 그림

c)에 나타난 것과 같은 원인에 의해 사고로 나타나게 된다. 따라서 사고원인 결과는 다음 식에 의해 확률값으로 계산된다.

사고원인결과 확률=(1차 진단+2차 진단 + 3차 진단+ 사고입력부의 가중치)의 평균값(%)

위 계산식에서 사고입력부의 가중치는 발생장소(옥내, 옥외) 및 사용년수에 따라 각각 부여되는 값이다. 또한 자가원인 분석 결과보기와 동시에 유사사고사례 검색 및 상세보기를 통해 열람할 수 있으며, 각 진단내용의 세부원인별 사고확률은 사고패턴에 따라 각각 다르게 주어지도록 설정하였다.

### 3. 케이블 사고사례 및 시스템 검증

그림 4는 2008년 12월에 발생한 케이블 직선접속부 사고사례를 나타낸다. 사고케이블은 6.6kV급으로 옥외에 설치되어 사용년수가 채 1년도 되지 않은 것이다. 소손된 케이블은 케이블 본체와 중간접속부 사이에서 발생한 것이며, 절연파괴 되어 구멍(hole)이 관측되고 도체가 용융되어 패인 흔적이 관측되었다.

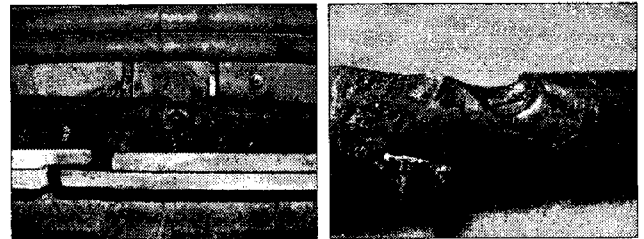


그림 4. 케이블 직선접속부에서 발생한 사고사례

본 사고사례에 대해 전기설비 사고처리시스템에서 자가원인 분석한 결과를 그림 5에 나타낸다. 자가원인 분석에서 1차 진단으로 중간접속부, 2차 진단으로 절연체의 구멍, 3차 진단으로 도체의 용융 패임을 선택한 경우 케이블의 사고가능성은 “빗물, 수분 등의 침투에 따른 수트리에 의한 사고”, “시공시 칼집에 의한 전계집중

자가원인분석		
1차 진단 케이블 사고 부위	2차 진단 절연체 외형	3차 진단 도체 외형
<p>시공시의 내화 은 충전재 사고를 예방으로 작성된 매뉴얼, 정적인 분석에 의해 사고원인은 발견할 수 있으므로 불안전한 시공방법에 의한 사고가 발생한다.</p> <p>빗물 및 수분 침투, 케이블 절연두께 불량(Weather-Tree) 가능성</p>		
진단내용		52%
시공시 칼집에 의한 전계집중 가능성		52%
과전류에 의한 전계집중 가능성		52%

그림 5. 직선접속부 사고사례에 대한 자가진단결과

가능성”, “케이블과 중간접속부 사이의 틈 발생에 의한 사고 가능성”이 52%로 나타났다. 실제 그림 4의 사고사례에 대한 정밀분석 결과 중간 접속부에 케이블 본체에서의 보이드, 이물질, 수트리 현상, 케이블 접속시의 틈 발생은 관측되지 않았지만, 시공 시 발생했을 가능성이 높은 절연체(XLPE) 표면에 칼집이 관측되었다.

따라서 그림 4의 케이블 사고사례는 시공 시 칼집에 의한 전계집중으로 사고가 발생했을 것으로 추측되었으며, 자가진단 결과에서도 동일한 진단 결과를 가졌다.

그림 6은 2008년 5월경에 발생한 케이블 종단접속부에서 사고사례를 나타낸다. ○○공장으로 수전용량 154kV/100MVA(50MVA stand by)로서 사고지점은 주변압기 2차측(22.9kV) 동대와 특고압 케이블(CNCV-W 325mm<sup>2</sup> 1C×3×3) 접속점 케이블헤드 부위에서 발생한 케이블사고이며, 사고 케이블은 2003년 설치되어 사고일까지 약 5년간 운전되었다. 그림에서 동선이 높은 열에 의해 용단된 것을 볼 수 있으며, 절연외피도 상당부분 수열되어 탄화된 것으로 보인다. 또한 접속부 커버부분은 균열되어 찢겨져 있고 내부 절연재(XLPE)부분에서 홀이 형성된 것으로 보인다.

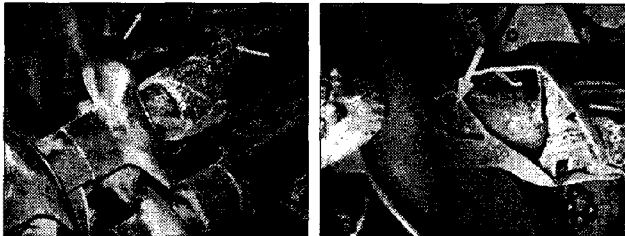


그림 6. 케이블 종단접속부에서 발생한 사고사례

그림 7은 그림 6의 사고에 대한 자가원인 분석한 결과를 나타낸다. 자가원인 분석에서 1차 진단으로 종단 접속부, 2차 진단으로 절연체의 구멍, 3차 진단으로 도체의 용융망울의 비산을 선택한 경우 케이블의 사고가능성은 “시공 시 칼집에 의한 전계집중 가능성”, “케이블과 종단접속부 사이의 틈 발생에 의한 사고 가능성”,

자가원인분석		
1차 진단 케이블 사고 부위	2차 진단 절연체 외형	3차 진단 도체형 외형
Cable Termination	Surface PI	Good Sculler
<p>자가원인 분석은 양방향으로 사고원인 분석으로 작성된 일련성 분석을 통해 사고원인은 파악할 수 있으므로 분석시에는 간혹 관계가 명확하지 않게 됩니다.</p> <p>시공시 1차원인 분석 결과 가능성</p> <p>절연체의 열(PI) 발생으로 전계집중 가능성</p> <p>57%</p> <p>도체의 용융망울의 비산</p> <p>57%</p> <p>케이블과 종단접속부 사이의 틈 발생에 의한 사고 가능성</p> <p>52%</p>		

그림 7. 종단접속부 사고사례에 대한 자가진단결과

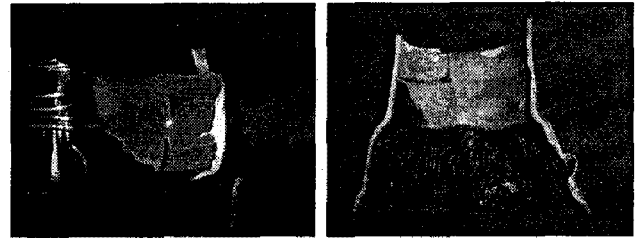


그림 8. 케이블 종단부와 케이블 사이의 틈 발생에 의한 탄화도전로 형성

“접속재 열처리 불량에 의한 절연과괴 가능성”이 57%로 높게 나타났다.

실제 그림 6의 사고사례에 대한 정밀분석 결과 그림 8에 나타난 것과 같이 케이블과 종단접속부의 시공 과정에서 열 처리 불량에 따른 틈 발생으로 부분방전이 발생하여 탄화도전로가 틈이 발생한 것을 확인하였다. 케이블의 종단접속재로는 조립형, 자기수축형, 열 수축형 방식으로 나뉘며, 본 사고는 열 수축형 종단접속재에서 발생한 것으로 열 처리 불량에 의한 미소 틈이 발생하여 사고로 이어지는 경우가 대부분이었다. 따라서 정밀분석결과와 자가원인 분석 결과가 거의 동일한 결과를 가졌다. 사고사례를 통한 검증으로 전기설비 사고 처리시스템을 통해 사고원인을 판별할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

전기설비 사고 발생 시, 사고원인을 자가 진단할 수 있는 처리시스템을 FMEA 방법을 통해 구축하였으며, 자가원인 분석시에는 피드그램을 도입하여 이용자가 쉽게 선택할 수 있도록 유도하고 계산을 통해 사고 가능성을 확률값으로 나타내었다. 또한 케이블 사고사례를 통한 시스템 검증 결과, 정밀분석에 의한 사고원인 분석과 자가진단을 통한 사고원인 분석결과가 대부분 일치하는 결과를 가졌다. 따라서 본 처리시스템을 이용하여 전기설비 사고원인을 규명하는데 효과적으로 사용될 것으로 판단되며, PL 분쟁 시의 객관적인 자료로 활용될 것으로 판단된다.

본 연구는 지식경제부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Korea Electrical Safety Corporation, "A Statistical Analysis on the Electrical Accident", 16th edition, pp. 67-84, 2007.
- (2) 한국피보험회, "제조물책임(PL) 사고 예방을 위한 기술적 지원방안, 보고서, 2006.