

화재로 인한 전기회로 영향 분석

임현태, 박준현*

(주)케이엠이엔티, 한전전력연구원*

Analysis of Fire Induced Electrical Circuit Fault

Hyuntae Yim, Junhyun Park*

Knowledge Management Engineering and Technology, Inc.(KMENT)

Korea Electric Power Research Institute(KEPRI)*

1. 서론

다른 산업설비와 마찬가지로 원자력발전소는 많은 계통과 기기로 구성되어 있고 대부분의 기기는 정상적인 작동을 위하여 하나 또는 그 이상의 전기회로 및 케이블의 건전성이 요구된다. 전형적인 비등수형 원자로(BWR)에는 전원, 제어 및 계측 케이블을 모두 포함하여 총 연장 약 600km에 달하는 케이블이 설치되며 가압수형 원자로(PWR)의 경우에는 보통 1,600km가 넘는 케이블이 발전소 전 지역에 포설된다.¹ 일반적으로 케이블 절연체 및 외피가 가연성물질로 제작되기 때문에 발전소의 많은 지역에서 전기 케이블의 존재로 인해 화재하중이 커진다.

화재로 인해 전기 케이블이 손상되는 형태는 여러 가지가 있으며 각 손상형태별로 기기 및 계통에 미치는 영향이 다양하다. 본 논문에서는 발전소 지역화재시 케이블이 겪는 손상형태를 정의하고 이에 따른 회로영향을 분석하는 방법을 정리한다. 그리고 이를 원자력발전소의 전형적인 화재위험도분석의 오작동분석의 하나에 적용하여 사례분석을 수행한다.

2. 케이블 종류

발전소에 설치된 전동밸브의 예(그림 1)를 들어 이 밸브의 정상적인 작동을 위하여 필요한 케이블의 종류를 기능별로 기술하면 다음과 같다.

- 전원케이블(Power Cable): 전동밸브의 전원인 전동기제어센터(MCC, Motor Control Center)로부터 구동전력을 공급받는 케이블
- 제어케이블(Control Cable): 주제어실 또는 현장의 제어반으로부터의 원격 제어신호를 전동기제어센터에 전달하는 케이블
- 계측케이블(Instrument Cable): 현장의 기기 또는 계통 상태를 제어반에 지시하기 위한

케이블

- 제어전원케이블(Control Power Cable): 제어기를 작동시키기 위한 전원을 공급하는 케이블

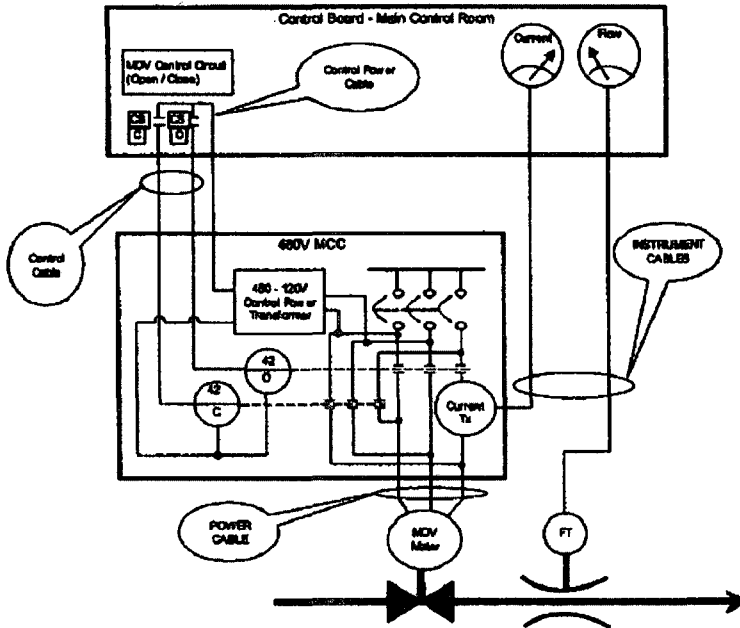


그림 1. 케이블의 종류(전동밸브의 예)

3. 화재 회로영향분석 절차

화재로 인한 전기회로 영향을 분석하기 위하여는 그림 2에 묘사된 바와 같이 다음의 세가지 과정을 거쳐야 한다.

- 케이블손상 분석(Cable Failure Analysis): 화재로 인해 케이블이 받는 손상의 형태를 정의한다. 케이블 손상형태는 단선(Open Circuit), 합선(Short Circuit), 지락(Short To Ground), 통전합선(Hot Short) 등이 있다.
- 회로영향 분석(Circuit Fault Analysis): 케이블의 화재손상 형태에 따라 전기회로에 나타나는 영향을 분석한다. 그 영향에는 회로기능 상실, 오작동, 지시 부정확 등이 있다.
- 기능영향 분석(Functional Impact Analysis): 회로영향으로 계통 또는 발전소에 나타나는 영향을 분석한다. 대표적인 기능영향에는 계통기능 상실, 계통제어 상실, 기능전환 경로 형성, 기능경로 차단, 공정변수 감시불능 등이 있다.

가. 케이블손상 분석

케이블은 하나 또는 그 이상의 전기도체로 구성되고 각 도체는 절연체로서 다른 도체나 접지선과 전기적으로 격리되어 있다. 이러한 절연체나 피복재는 화재에 노출되면 절연체 성능이 현저히 떨어지며 심지어 완전히 녹아버리기도 한다. 여기에 물과 같은 소화약

제가 살포되면 손상의 영향은 더욱 악화되어 케이블의 물리적 및 전기적 건전성이 상실된다. 화재로 인해 전기 케이블이 손상되는 형태는 다음의 4가지로 구분된다.

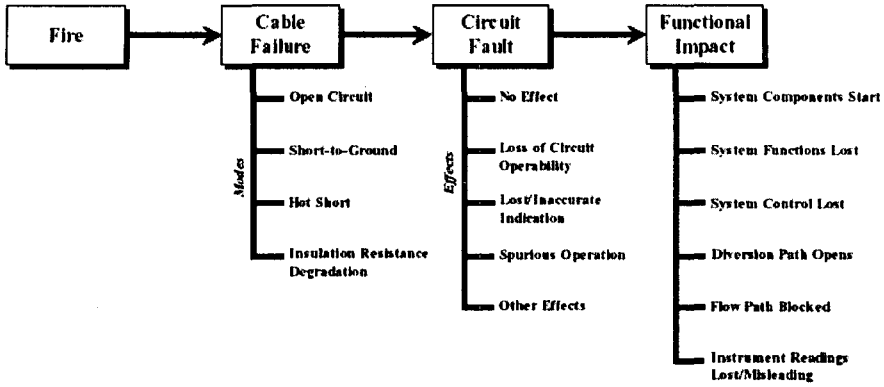


그림 2. 화재로 인한 전기회로 영향분석 과정도

- 단선(Open Circuit): 케이블 또는 케이블내 도체가 끊어져 전원 또는 신호가 전달되지 않는 상태로 전기적 연속성이 상실됨.(그림 3)
- 합선(Short Circuit): 케이블내 도체가 전압차이가 있는 다른 지점 또는 다른 회로와 전기적으로 접촉하는 상태(그림 4)
- 지락(Short To Ground): 한 케이블 또는 케이블내의 도체가 케이블 트레이, 전선관 접지선 등 접지 물체와 전기적으로 접촉하는 상태(그림 5)
- 통전합선(Hot Short): 합선의 특수한 경우로서 한 케이블 내의 통전(energized) 도체가 동일 케이블내 또는 다른 케이블의 비통전(deenergized) 도체와 전기적으로 접촉하는 상태(그림 6)

나. 회로영향 분석

화재로 인한 케이블 손상으로 인해 나타나는 회로 영향은 여러 가지가 있는데 주요 영향은 다음과 같다.

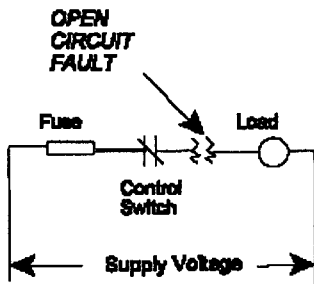


그림 3. 단선(Open Circuit)

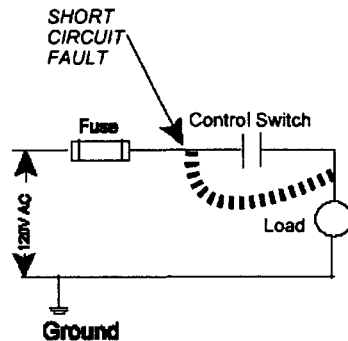


그림 4. 합선(Short Circuit)

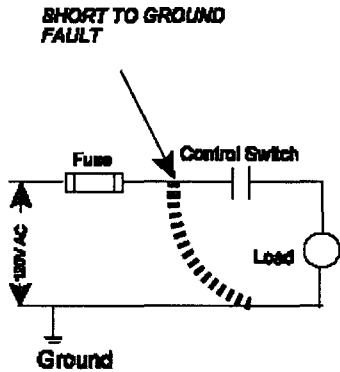


그림 5. 지락(Short To Ground)

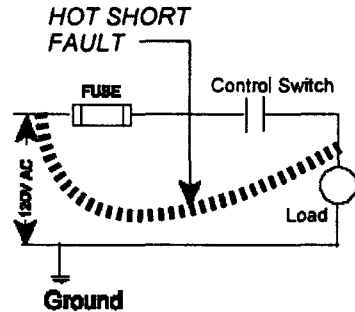


그림 6. 통전합선(Hot Short)

- 회로기능 상실: 회로 고유의 기능을 상실하는 것으로 화재로 인해 해당 케이블의 보호계통이 작동하거나 케이블이 단선되어 전원, 제어 또는 지시 기능이 상실되는 일반적인 회로영향임.
- 지시 부정확: 기기나 공정변수의 정상적 또는 정량적 상태 지시가 부정확하게 되어 운전원의 혼란을 초래하는 경우로서 예를 들어 밸브의 열림(적색)과 닫힘(녹색) 지시등이 동시에 점등되거나 수위지시계가 지시범위 한계를 벗어나 지시하는 경우가 해당됨.
- 오작동: 기기 또는 계통이 원하지 않은 방향으로 작동하는 것으로 예를 들어 정지중인 기기가 잘못 기동한다든지, 닫혀 있어야 할 밸브가 잘못 열리는 경우가 해당됨.

다. 기능영향 분석

화재로 인한 케이블 손상으로 여러 가지 회로영향이 나타나고 이 회로영향의 결과로 발전소 기기, 계통 및 기능에 미치는 영향을 분석하는 것이 기능영향 분석이다. 대표적인 기능영향에는 계통기능 상실, 계통제어 상실, 기능전환 경로 형성, 기능경로 차단, 공정변수 감시불능 등이 있다.

4. 원자력발전소 오작동분석

화재로 인한 전기회로 영향 분석의 예제로서 원자력발전소 오작동 문제의 하나에 적용한다. 원자력발전소에서 화재로 인한 오작동 문제의 가장 중요한 기기의 하나는 잔열제거 계통의 고온관 흡입밸브(BC-HV101/102, 201/202)이다.(그림 7) 이들 밸브는 전동밸브로서 잔열제거 운전모드가 아닌 상태에서 루프1 또는 루프3의 직렬의 고온관 흡입밸브 2개가 화재로 인한 케이블 손상으로 오작동하여 동시에 열리면 1차측 압력경계가 파손되어 냉각재상실사고가 발생된다. 이들 밸브가 오작동으로 열리는 경우는 첫째, 밸브의 전원케이블이 다른 통전 케이블과 동시에 통전합선되어 열리는 경우와 둘째, 밸브 제어회로의 예기치 않은 작동으로 열림신호가 동시에 잘못 전달되어 열리는 경우가 있다. 원자력발전소

화재사건 사례와 전문가의 판단에 의하면 첫 번째 원인은 두 번째 원인보다 그 발생가능성이 상대적으로 낮은 것으로 간주된다.

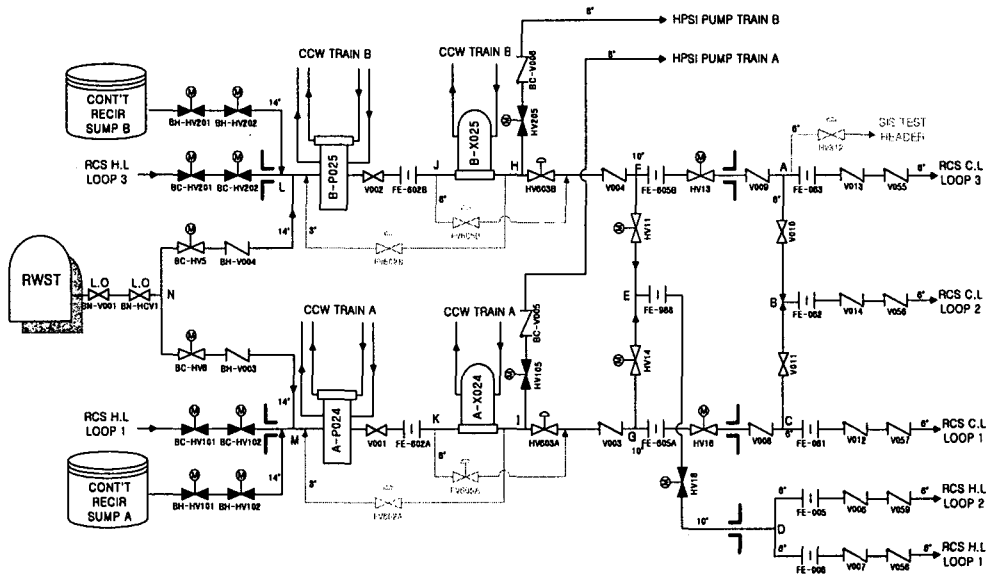


그림 7. 원자력발전소 잔열제거계통 단순도(예)

그 이유는 통전합선이 될 때 전원케이블과 통전합선 케이블의 상(Phase)이 순서대로 일치하면서 통전합선이 이루어져야 하기 때문이다. 원자력발전소에서는 화재발생시 이와 같은 사건이 발생하지 않도록 조치하여야 하는데, 밸브 제어회로의 오작동으로 인한 열림을 방지하는 방안으로 정상운전 중에 이들 밸브의 차단기를 자물쇠열림(LO, Locked Open) 상태로 유지하는 방법이 있고 밸브 전원케이블이 다른 통전 케이블과 통전합선되는 것을 방지하는 방법으로 밸브전원 케이블에 화재방호체 또는 전선관을 포설하는 방법 등이 있다.

5. 결론

원자력발전소와 같은 중요 산업시설에서 화재가 발생하면 전기케이블은 단선, 합선, 지락, 통전합선 등의 손상이 유발되고 그 영향으로 회로기능 상실, 기기 오작동, 지시 부정확 등 여러 가지 형태로 나타난다. 그리고 이 회로영향의 특성에 따라 계통기능 또는 제어 상실, 전환경로 형성, 공정감시 불능 등 계통 수준 또는 발전소 수준의 영향이 초래된다. 특히 화재로 인하여 특정 기기의 오작동이 발생하면 냉각재 상실사고 등 발전소의 공학적 안전설비가 작동하여 대처하여야 하는 상황에 이를 수 있다. 원자력발전소에서는 화재에 의해 냉각재 상실사고가 발생하는 것을 허용하지 않으므로 이를 방지하기 위한 방안이 수립되어야 한다. 따라서 화재위험도분석을 통하여 화재 발생을 방지하는 노력과 함께 화재후 영향을 최소화하는 노력이 필요하다.

참고문헌

1. M. H. Salley, "Knowledge Base for Post-Fire Safe Shutdown Analysis", Draft Report for Comments, NUREG-1778, USNRC, January 2004
2. "Risk-Informed Approach for Post-Fire Safe Shutdown Associated Circuit Inspections", Regulatory Issue Summary 2004-03, USNRC, March 2, 2004
3. "Guidance for Post-Fire Safe Shutdown Analysis", NEI 00-01, Rev. D, NEI Circuit Failure Issues Task Force, October 2002
4. "Guidance for Implementing a Risk-Informed, Performance-Based Fire Protection Program under 10CFR50.48(c)", NEI 04-02, Rev. E, NEI, April 2004
5. "Problems Associated with Post-Fire Safe Shutdown Circuit Analysis", Information Notice 99-17, USNRC, June 1999
6. "Guidance for Post-Fire Safe Shutdown Analysis", Draft NUREG, December 2002
7. N. Iqbal, M. H. Salley, "Fire Dynamics Tools(FDTs): Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the US NRC Fire Protection Inspection Program", NUREG-1805, USNRC, November 2004