

사건수목분석을 통한 수배전설비의 전기화재위험성 분석

박영호 · 김두현* · 김성철**

동양대학교 · *충북대학교 안전공학과

(2016. 5. 22. 접수 / 2016. 8. 15. 수정 / 2016. 9. 19. 채택)

Risk Analysis of Electrical Fire for Electric Power Installations by Event Tree Analysis

Young Ho Park · Doo-Hyun Kim* · Sung-Chul Kim**

Dongyang University

*Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received May 22, 2016 / Revised August 15, 2016 / Accepted September 19, 2016)

Abstract : The purpose of this paper is to conduct ETA on 15 components of power installations: the DS/LBS, LA, MOF, CT, PT, A/V meter, VCB, OCR, COS, PF, Transformer, Condenser(C), Grounding, Cable and Connector. To achieve that, power installations work flow and its components are categorized. Based on performance, human, environmental, management, and safety, this paper drew Initiation events (IE) and End states (ES). ETA is applied to the main functions of each component, and the end states that may occur in one initiation event are suggested. In addition, detailed classification was performed to induce various end states on the basis of the suggested initiation events. If the suggested IEs and ESs are applied on the basis of power installations event cases, it is expected to prevent the same kinds of accident and operate power installations safely.

Key Words : ETA(Event tree analysis), power installations, initiating events, end states

1. 서론

2014년 한국전기안전공사의 전기화재 발화기별 발생현황을 보면 총 803건 중에 배전반/분전반이 363건으로 가장 많이 나타났고, 고압 및 특고압에서는 개폐기와 차단기에서 주로 나타났다¹⁾. 또한 충북의 한 대학에서는 수배전설비의 화재로 인하여 공과대학교 동물병동에 있는 실험용 세포들이 즉사했고, 경북의 D대학에서는 변압기의 부상부의 접촉불량으로 장기간의 정전을 초래하였다. 이렇듯 연구시설 및 대학에서의 수배전설비의 고장은 연구 중 또는 연구해야 하는 중요한 시점을 놓치는 계기로 작용한다. 현재 수배전설비와 관련된 연구는 부품에 대한 성능개선이 주로 이루고 있고, 근래에서는 이렇게 큰 위험성을 포함한 수배전설비에 대하여 안전과 관련한 다양한 연구가 진행 중에 있다. 그중에서 특고압 기기류에 대한 사용연한과 관련하여 국내외적으로 제시한 사용연한의 비교, 실험과 각종 자

료를 분석을 통한 데이터를 제시하였다^{2,4)}. 사용연한의 제시도 중요하지만 가장 먼저 이행되어야 할 것은 부품별로의 고장률과 사고유형이다. 또한 고장률과 사고유형을 바탕으로 한 위험요소를 찾고 관리하면 체계적인 안전관리가 가능하다. 이런 체계적인 안전관리를 위해서는 수배전설비의 위험요소를 찾아 사고 전에 이를 방지, 유지 및 보수가 필요하다. 사전의 위험요소를 찾고 위험요소들을 평가하는 다양한 기법들이 있는데, 이중 가장 쉽게 접근 가능한 기법이 바로 사건수목분석(ETA, Event Tree Analysis)이다. 고장수목분석은 재해사고의 발생과정을 재해요인들의 연쇄로 파악하여, 재해발생의 초기사상 혹은 촉발사상(initiating event)으로부터 재해사고까지의 연쇄적 전개를 표현할 수 있는 위험성 평가 기법이다. 초기사상을 바탕으로 결과상황들을 유도할 수 있어 체계적인 안전관리가 가능하다⁵⁾.

따라서 본 연구에서는 D대학에서 수배전설비를 바탕으로 구성부품에 대하여 15개 항목으로 분류하였고

* Corresponding Author : Sung-Chul Kim, Tel : +82-43-267-2463, E-mail : ksc3650@naver.com
Department of Safety Engineering, Chungbuk National University, 1, Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju 28644, Korea

성능적, 인적, 환경적, 관리적 및 안전을 바탕으로 한 초기사상(IE, Initiation events)과 결과상황들(ES, End states)을 도출하였다. ETA에서는 과전류를 초기사상으로 이와 관련된 안전장치인 OCR과 VCB, 그리고 시각장치인 전류계(Ampere Meter)의 성공과 실패에 따른 수배전설비에서 발생할 수 있는 결과상황들을 정량적으로 제시하였다.

2. 이론적 배경

2.1 전기설비의 사고 통계

2014년 한국전기안전공사에서 제시한 사고건수를 보면 단일부품으로 가장 높은 것이 수배전용 개폐기(17.9%)가 가장 높았고 다음으로 COS, 변압기 순으로 나타났다. 공통적인 사고원인은 접속부의 접속불량의 원인이 많았다. Table 1은 2014년 전기설비에 대한 한국전기안전공사의 전기화재건수를 나타내었다¹⁾.

2.2 ETA 분석목적 및 방법⁵⁾

ETA(사상수목분석, Event Tree Analysis) 기법은 재해사고의 발생과정을 재해요인들의 연쇄로 파악하여,

Table 1. Number of electrical fire for electrical equipments (2014)

Equipments \ Classify	Number of accidents	Percentage(%)
Insulator	22	1.7
Input wiring	110	8.6
DS	229	17.9
Bus bar	24	1.9
LA	72	5.6
MOF	124	9.7
COS	173	13.5
PF	105	8.2
Transformer	155	12.1
Input/Out Panel	27	2.1
CB	77	6
OCR	9	0.7
CT/VT	39	3
Generator equip.	-	-
Load equip.	3	0.2
CV	6	0.5
Grounding	1	0.1
Condenser	-	-
Other	103	8.1
Total	1,279	100

재해발생의 초기사상 혹은 촉발사상(initiating event)으로부터 재해사고까지의 연쇄적 전개를 나뉘어 나타내는 귀납적인 시스템 분석기법이다. 이렇게 하면 어떤 과정을 거쳐 사고가 발생하는지 눈으로 확인할 수 있다. 여기에다 각 재해발생요인들의 발생확률까지 알 수 있다면, 정성적인 분석기법인 동시에 정량적인 분석기법의 장점도 활용할 수 있는 것이다. 원래 이 기법의 원리는 의사결정수목(Decision Tree)에서 차용한 것으로, 상호 배반적인 상황의 전개와 그 발생확률을 가지적으로 확인할 수 있다는 장점이 있어, 종래에는 재해의 확대 요인에 대한 분석 등에 이용되어 많은 성과를 올리고 있다.

어떤 사고에든 여러 가지 재해발생요인들이 연관되어 있다. 이 요인들을 도표 상단에 왼쪽에서부터 오른쪽으로 차례대로 나열한다. 이 때 가장 왼쪽의 요인은 시스템에 고장이나 사고가 발생하게 되는 부정적인 사상, 다시 말해 사고의 초기사상을 기입하는 것이 보통이고, 오른쪽 끝은 시스템 구성요소의 상태조합에 의한 결과상황들(End States)이 나열되는 것이니까, 그 중간의 재해요인들은 가급적 시간경과에 따라 재해사고가 전파되거나 혹은 확산되는 데 관계되는 요인들을 나열하도록 한다. 재해 초기사상이 결정되었으면 그 점에서 다음 요소의 발생사상에 따라 가치를 나눈다. 이 때 성공사상, 다시 말해 시스템 구성요소가 정상적으로 작동하는 경우를 맨 윗가지에, 정상적으로 작동하지 못하는 고장상태를 맨 아래 가지에 할당한다. 필요하다면 다양한 고장 모드에 따라 그 중간에 여러 개의 가치를 더 만들 수 있다. 그 다음 단계에서는 뺀어진 가지의 끝 점에서, 또 다시 다음 재해발생 요소의 성공, 실패에 따라 가치를 나누어 간다. 이렇게 하여 결과상황까지 뺀어나가면, 시스템에 발생할 수 있는 모든 상황들이 오른쪽 가지 끝에 나열되게 되는 것이다.

3. 수배전설비의 작동흐름도 및 구성부품분류

공과대학의 수배전설비는 전기의 심장과 같다. 또한 모든 연구실이 다양한 소비전력을 가지고 있으며 계측기는 물론이고 전기설비들이 실험에 사용된다. 또한 계측기를 통하여 실험데이터와 직결되기 때문에 정전이나 화재는 연구기간이나 또는 업무에 많은 지장을 초래한다. 수배전설비에 있어서 가장 먼저 알아야 할 부분은 수배전설비의 작동흐름도이다. 수배전설비는 수용가로 공급된 특고압을 사용전압으로 변환하려는 목적으로 전력회사의 배전선로를 통하여 전기를 공급받아 구내 배전설비로 전기를 공급하는 시스템으로 구

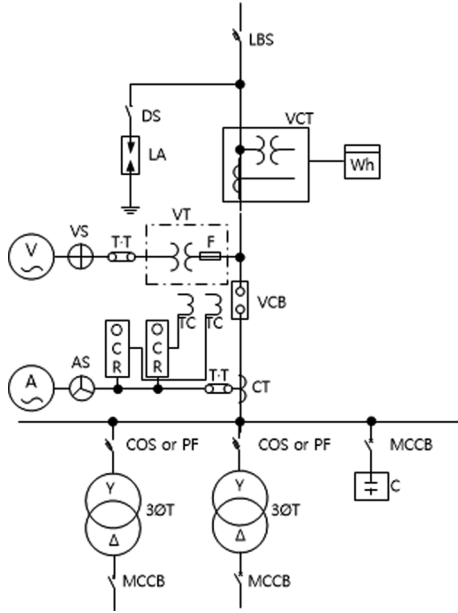


Fig. 1. The simplified electric power installation diagram showing the components considered in the analysis.

성되어 있다. 수배전설비는 여러 가지의 단위 전력설비와 그 전력설비가 모여진 형태의 계층별로 구성되어 있다. 수배전설비는 개폐기류, 변압기류, 피뢰기, 차단기, 고압진상 콘덴서로 크게 구분된다.

개폐기류(DS, Disconnecting Switch), LBS(Load Break Switches), COS(Cut Out Switch)는 정격 전압하에 있어서 단순히 충전된 전로를 개폐하기 위해 사용한다.

변압기류는 MOF(Metering Out Fit), PT(Potential Transformer), CT(Current Transformer) 및 TR(Transformer)로 구성되어 있으며, MOF는 전력량 측정을 위해 PT와 CT의 전압 및 전류 값을 계측하기 위하여 해당 센서에 적합한 전압 및 전류를 다운시키는 기기이다. PT는 고전압을 저압으로 변성하여 전압계로 전압을 측정하는 기기이고, CT는 대전류를 이에 비례하는 전류값으로 변성하여 전류계에 공급하는 역할을 한다. TR은 전자기 유도현상을 이용하여 교류전압을 변화시키는 장치이다.

LA(Lighting Arrester)는 낙뢰로 인한 과전압을 제한하여 전기설비의 절연을 보호하고 속류를 차단하는 목적으로 사용되고 있다.

차단기반은 VCB(Vacuum Circuit Breaker)와 SA(Surge absorber)로 구성되어 있으며 차단기(CB; Circuit breaker)는 진공도가 높은 상태에서 절연내력이 높아지고 아크가 분산되는 원리를 이용하여 소호하는 차단기이며 통상의 상태에서 부하전류를 개폐하고 이상시 고장전류를 차단한다.

고압진상콘덴서(C, Condenser)는 자가용 고압 수배전설비의 고압 모선에 접속하여 지상 무효전력을 보호

하고 역률을 개선할 목적으로 설치한다. Fig. 1의 D대학의 수배전설비와 회로도를 나타내었다.

4. 수배전설비의 초기사상 및 결과상황들

수배전설비에 대한 고장률, 초기사상과 결과상황들은 한국전기안전공사⁴⁾와 IEEE gold book⁶⁾, RAC⁷⁾, 참고문헌 [5] 및 전문가활용에서 제시한 기준을 바탕으로 하였다. 초기사상은 수배전설비의 구성부품 및 회로에서 나타날 수 있는 내·외부에서 발생가능한 사상을 제시하였고 초기사상으로 인하여 수배전설비 전체에 나타날 수 있는 결과상황들(전원관련 ES와 안전관련 ES)을 도출하였다. 초기사상은 내부 초기사상 39개, 외부 11개로 총 50개 구성되어 있으며, 환경적 요소 및 휴먼에러도 첨부하였다. 결과상황들은 전력 생산부분 5개, 안전부분 12개로 총 17개로 구성하였다. Table 2는 D-대학 수배전설비에 대한 주요 구성품, 고장률 및

Table 2. Components, failure rates and percent of the electric power installation

Components	Failure rates/10 ⁶ hr	% ¹⁾
DS/LBS	3.41	17.9
LA	18.88	5.6
MOF(VCT),	8.6	9.7
CT	2.40	3
PT(VT)	1.85	3
A/V Meter	0.97	1
VCB/MCCB	9.48	6.7
OCR	5.03	0.7
COS	4.13	13.5
PF	5.39	8.2
Transformer	2.59	12.1
Condenser(C)	2.14	-
Grounding	5.32	0.1
Cable(CV)	10.86	0.5
Connector	12.59	1.9

Table 3. List of initiating events(IE) for components and overall circuit of the electric power installation

IE	
Internal IE	
Broken	IE_INT_BRO
Binding/Sticking	IE_INT_BS
Intermittent operation	IE_INT_IO
Noisy/Unstable/Chatter	IE_INT_NUC
Short	IE_INT_SHORT

IE	
Fused fusible disconnecting	IE_INT_FFD
Flashover	IE_INT_FO
Malfunction	IE_INT_MAL
Cut/Scarred/Punctured	IE_INT_CSP
Worn	IE_INT_WORM
Fails To Open	IE_INT_FTO
Electrical Overstress	IE_INT_EO
Loss Of Power	IE_INT_LOP
Premature Open	IE_INT_PO
Degraded output	IE_INT_DO
Does not open	IE_INT_DNO
Fails To Close	IE_INT_FTC
Opens Without Command	IE_INT_OWC
Stuck Open	IE_INT_SO
Contamination	IE_INT_CNTA
Inductor damage	IE_INT_ID
Creak	IE_INT_CREAK
Murmur	IE_INT_MURMUR
Connector Pin Pushed	IE_INT_CPP
Mechanical damage	IE_INT_MEDAM
Overvoltage	IE_INT_OVERVLT
Overcurrent	IE_INT_OC
Leakage	IE_INT_LEAK
Internal fire	IE_INT_FIRE
No output	IE_INT_NO
Drift	IE_INT_DRIFT
Excessive wear	IE_INT_EW
Improper output	IE_INT_IO
Loose	IE_INT_LOO
Normal operation	P_INT_NOROPR
Function Failure	IE_INT_FF
Microcrack	IE_INT_MICRO
Parameter change Breaker	IE_INT_PCB
Open without stimuli	IE_INT_OWS
External IE	
Flood	IE_EXT_FLOOD
Earthquake	IE_EXT_ERTQUAKE
Animals(mainly cables, module junction box, ventilation holes)	IE_EXT_ANIMAL
Lightning	IE_EXT_LIGHTN
Sabotage(terrorism)	IE_EXT_SABOTG
Adversary action(vandalism)	IE_EXT_ADVACT
Explosion (considered for battery, inverter)	IE_EXT_EXPLSN
External fire	IE_EXT_FIRE
Mechanical shock(including module cleaning actions, ground-works affecting cables, structural damages to all electric components)	IE_EXT_MECHSHCK
High humidity	IE_EXT_HUMID
Human error	IE_EXT_HUMAN

Table 4. List of End States(ES) for components and overall circuit of the electric power installation

ES		
Power-oriented ES		
Normal operation	P_NO	Complete success
No power	P_NP_F	Failure
Reduced power	P_RP	Partial failure
Loss of performance/efficiency	P_LPE	Failure
Improper power(for voltage, current, frequency level)	P_IP	Failure
Safety-oriented ES		
No power	S_NP_S	System safely shut-down, success
Overheating	S_OH	Failure
Open	S_OPEN	Failure
Fire	S_FIR	Failure
Part Fire	S_P_FIR	Failure
Arcs(Overvoltage)	S_ARC	Failure
Explosion	S_EXP	Failure
Structural damages	S_SD	Failure
Reverse current flow	S_RCF	Failure
Corrosion	S_COR	Failure
Electric safety issues	S_ESI	Failure
Loss by combustion or destroyed	S_LCD	Failure

시스템에서 고장률이 차지하는 비율을 제시하였다. 본 고장률과 비율은 D-대학 수배전설비뿐만(Fig. 1) 아니라 일반 수배전설비의 신뢰성을 분석하는데 중요한 자료로 활용할 수 있다. Table 3은 초기사상, Table 4는 결과상황들을 나타내었다.

5. ETA 기법 적용

수배전설비에서는 전반적인 것과 주요부품 고장으로 크게 구분할 수 있다. 전반적인 고장은 체결불량, 이물의 침입, 절연물의 파손 및 손상, 누수 및 누유, 과전류 및 기타 원인으로 인한 온도상승, 소음 및 진동, 전압변동, 녹 및 부식으로 구분된다⁹⁾.

본 연구에서는 과전류를 초기사상으로 하여 과전류를 방지하기 위한 안전장치와 그와 관련된 장치들, 그리고 시각적인 부분인 전류계를 고장영향(FE; Failure effect)으로 하였고 결과상황들은 과열과 화재로 하였다.

결과상황들에 대한 *MTBF*(Mean Time Between Fire)는 식 (1)과 *MTBO*(Mean Time Between Overheating)는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다¹⁰⁾.

$$MTBF = \frac{1}{\sum Occurences\ of\ S_FIR} \tag{1}$$

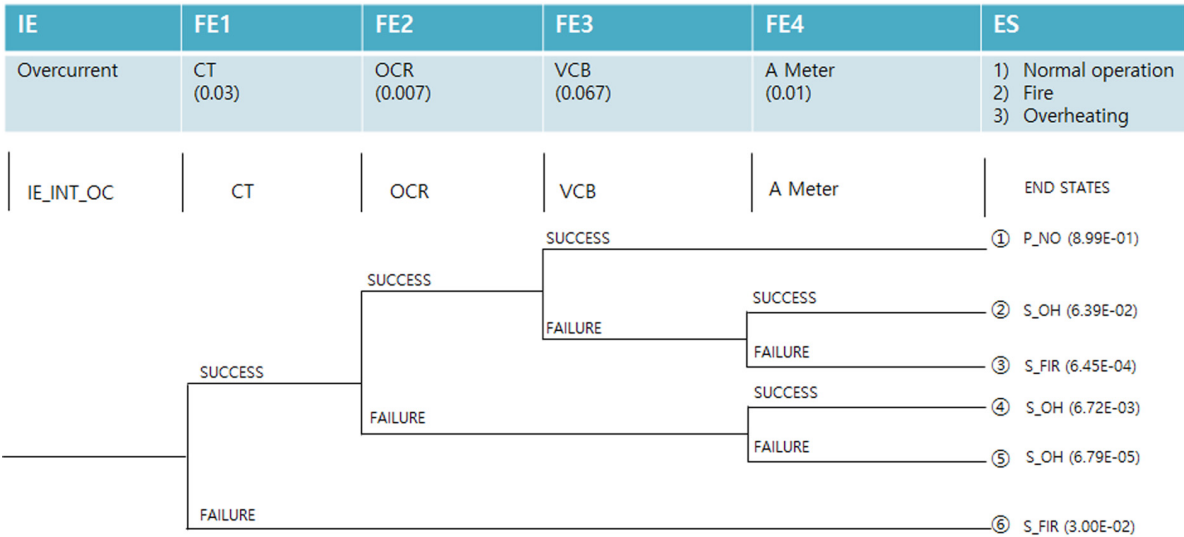


Fig. 2. Analysis of overcurrent(IE_INT_OC) by ETA.

$$MTBO = \frac{1}{\sum \text{Occurrences of } S_{OH}} \quad (2)$$

Fig. 2에서는 초기사상의 과전류에 대하여 전류값을 분석하는 CT와 과전류를 감지하는 안전장치인 OCR과 VCB, 시각적인 부분인 전류계가 고장영향(FE)이다. CT의 고장은 OCR, VCB와 전류계가 직결되기 때문에 모두 고장으로 판정된다. CT가 정상 작동되고 OCR의 고장은 VCB의 고장, 전류계는 정상작동으로 여러 조건에 의하여 결과상황들이 결정됨을 확인할 수 있다. Table 2에서 제시한 부품별 고장률이 차지하는 비율을 바탕으로 가지에 적용하였다. 최종적으로 전기화재는 식 (1)에 의한 MTBF는 32년, MTBO는 식 (2)에 의해 14년으로 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 수배전설비에 대하여 15개 구성부품을 분류하였고, 성능적, 인적, 환경적, 관리적, 안전을 바탕으로 한 초기사상(IE, Initiation events)과 결과상황들(ES, End states)을 도출하였고, 각각의 주기능이 고장으로 발생하는 결과상황들을 제시하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 초기사상은 내부 초기사상 39개, 외부 11개로 총 50개 구성되어 있으며, 결과상황들은 전력 부분 5개, 안전부분 12개로 총 17개로 구성하였다.

2) 과전류에 의한 초기사상을 바탕으로 ETA를 실시하였고, 전기화재는 32년, 과열은 14년으로 나타났다.

3) 수배전설비에서 발생한 사례를 바탕으로 본 연구에서 제시한 초기사상과 결과상황들을 분석하여 동종 재해 방지 및 수배전설비의 안정적 운영이 가능하며 본 연구에서 제시한 고장률을 바탕으로 추가적인 정량적 분석도 가능하다.

References

- 1) Korea Electrical Safety Corporation, <http://www.kesco.or.kr>, Electrical Safety Portal System, Electrical Fire Statics, 2016.
- 2) Y. -S. Kim and K. -M. Shong, "Investigation of Facility Accident and Suggestion of Guide Line for Accident Process on 22.9kV Class Electrical Installation", Symposium the Autumn of The Korean Institute of Electrical Engineers (KIEE), pp.137-138, 2009.
- 3) B. H. Ku, J. -M. Cha and H. c. Kim, "Reliability Analysis of Distribution Systems by using FTA", Symposium the autumn of The Korean Institute of Electrical Engineers (KIEE), pp.247-249, 2008.
- 4) Korea Electrical Safety Corporation, A Technical Guidebook for Preventing Possible Failures/Accidents Based on the Case Studies in a 22.9kV Electrical Installation, pp.128-150, 2009.
- 5) H. -K. Lim, System Safety Engineering, Hansol Academy, pp.133-137, 2012.
- 6) IEEE Gold Book, Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems, pp.259-300, 2007.
- 7) Reliability Analysis Center, Non-electronic Parts Reliability Data, 2011.

- 8) MOASOFT, A Guide Book for Reliability Prediction, pp.12-349, 2002.
- 9) Ohmsha, Introduction to an Electrical Engineer Work Experience, pp.162-207, 1993.
- 10) A. Ketsakorn and W. Meethom, “Event Tree Analysis for Analyzing Probable Fire Scenario in the Plastic Manufacturing Extra Building”, International Journal of Current Research and Academic Review, pp. 1-4, 2014.