

FTA를 이용한 수변전설비의 최소절단집합 도출

박영호 · 김두현* · 김성철**

동양대학교 · *충북대학교 안전공학과

(2016. 8. 1. 접수 / 2017. 1. 2. 수정 / 2017. 2. 2. 채택)

Minimal Cut Set of Electric Power Installations using Fault Tree Analysis

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

Dongyang University

*Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

(Received August 1, 2016 / Revised January 2, 2017 / Accepted February 2, 2017)

Abstract : In this paper, from making an electrical fire which is thought to be the most damaging among potential dangers as a top event, minimal cut sets (MCS) about it were analyzed. For this, components of a power substation were classified into 15 items. Failure rates and modes were extracted based on Korea Electrical Safety Corporation, IEEE Gold Book, and RAC. To analyze the top event (an electrical fire), main events were assorted into “safety devices for overcurrent” and “ampere meter of detector”. Failure of components was divided into failure of VCB, COS, and MCCB. A fault tree was composed of 3 AND gate, 5 OR gates and 17 basic events. Overlapped events among the basic events are things which occur from relevant components. They were attached to the tree by distinguishing identifiers. In case of FT, two minimal cut sets of “IO_METER”, “MF_METER”, “DO_MCCB” and “IO_METER”, “MF_METER”, “DO_VCB” take 46% of electrical fires. Therefore, about basic events which are included in the top two minimum cut sets, strict control is necessary.

Key Words : FTA(fault tree analysis), MCS, power installations, overcurrent, failure rate

1. 서론

수변전설비는 공장, 아파트, 학교 및 기타 중소형 빌딩 등에 공급전압에 맞게 운영하고 있다. 수변전설비는 24시간 상시 운영되며, 사고시에는 긴급 수리를 요구하는 장치이기도 하다. 이런 수변전설비는 한전에서 수전하는 고압과 변압기를 거쳐 저압으로 전기를 변환하여 사용한다. 한국전기안전공사에 의하면 고장전류에 의한 변압기 하단부의 저압에서는 분배전반의 사고가 가장 많았고 고압/특고압 개폐기에서 다수 발생되고 있다¹⁾. 수변전설비의 이상이나 고장을 미연에 방지하기 위해서는 일상의 보수관리가 중요한데 현재 수변전설비와 관련된 연구는 부품에 대한 성능개선이 주를 이루고 있고, 근래에서는 이렇게 큰 위험성을 포함한 수변전설비에 대하여 안전과 관련한 다양한 연구가 진행 중에 있다. 그중에서 특고압 기기류에 대한 사용연한과 관련하여 국내외적으로 제시한 사용연한의 비교, 실험과 각종

자료를 분석을 통한 데이터를 제시하였다²⁻⁴⁾.

사용연한의 제시도 중요하지만 가장 먼저 이행되어야 할 것은 부품별로의 고장률과 고장모드, 사고유형이다. 또한 고장률과 고장모드 및 사고유형을 바탕으로 한 위험요소를 찾고 관리하면 체계적인 안전관리가 가능하다. 이런 체계적인 안전관리를 위해서는 수변전설비의 위험요소를 찾아 사고 전에 이를 방지, 유지 및 보수가 필요하다. 사고발생 이전의 예측기법으로는 FTA(Fault Tree Analysis)가 있다. FTA는 시스템안전공학의 대표적인 방법으로 1962년 미국 벨연구소에서 처음으로 고안된 후 항공우주분야, 원자력 분야, 산업시스템 안전성평가기법으로 널리 활용하고 있다⁵⁾. 수변전설비는 방대한 부품과 다양한 설비들의 조합으로 이루어져 수변전설비에서 발생하는 재해는 그 원인이 여러 경로에 걸쳐 잠재되어있어 설비에서의 복잡한 인과관계를 FTA를 적용함으로써 분석이 용이하다. FTA의 나무는 정상사상(Top event)이라고 부르는 바람직하지

* 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, Chungju-si, 28644, Korea

않는 사상을 시작으로 그 발생원인이나 거기에 기여하는 조건들이나 요인들을 찾아 시간적 흐름을 거슬러 분석해 가는 연역적 구조이다⁵⁾.

따라서 본 연구에서는 D대학에서 수변전설비를 바탕으로 구성부품에 대하여 15개 항목으로 분류하였고, 한국전기안전공사⁴⁾와 IEEE gold book⁶⁾ 및 RAC⁷⁾을 바탕으로 고장률과 고장모드를 도출하였다. 또한 수변전설비에서의 잠재위험 중 가장 피해가 클 것으로 생각되는 과전류로 인한 전기화재를 정상사상으로 하고 이에 대한 최소절단집합(Minimal Cut Set ; MCS)을 분석하였다.

2. 본론

2.1 수변전설비의 구성부품에 대한 사고건수

22.9 kV 수변전실에서 사고예방을 위한 각 설비별 위험우선순위 선정을 위한 전기설비 사고발생 실태조사를 실시하였다¹⁾. 그 결과, COS/PF에서는 휴즈링크 및 휴즈홀더부, 계기용변성기는 본체폭발 및 부상부, 케이블은 케이블 종단접속재부, 변압기는 층간 몰드부에서 가장 많이 발생하였다¹⁾. 이는 회로에서 기인된 발열과 자체결함 2개로 크게 구분된다. 본 연구의 FT에서는 2개의 큰 사상을 토대로 작성되었다.

2.2 FTA 분석목적 및 방법⁵⁾

FTA의 분석절차는 분석 목적이나 분석 수준에 따라 다르지만 통상 Fig. 1과 같은 순서에 따라 작성한다. 즉, 1) 정상사상의 선정, 2) 사상별 재해 원인, 요인 규명, 3) FT 작성 및 분석, 4) 정상사상의 수명예측 등의 4단계로 나누기도 한다. Fig. 1은 FTA의 분석순서를 나타내었다. 정상사상의 수명을 예측하기 위해서는 완성된 FT도의 기본사상의 고장률을 정의해야 한다. 수변전설비에 사용된 부품들의 특성을 고려하여 NRPD 2016과 FMD2016에서 고장률을 결정하였다. 기본사상의 고장률이 정의가 되면 And Gate, Or Gate를 따라 중간사상의 발생확률을 다음과 같이 계산하고, 게이트에 대하여는 And gate의 계산은 식 (1)에, Or gate의 계산은 식 (2)에 나타내었다.

$$And\ Gate = X_1 \times X_2 \times X_n = \prod_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

$$Or\ Gate = 1 - (1 - X_1)(1 - X_2)(1 - X_n) \\ = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - X_i) \quad (2)$$

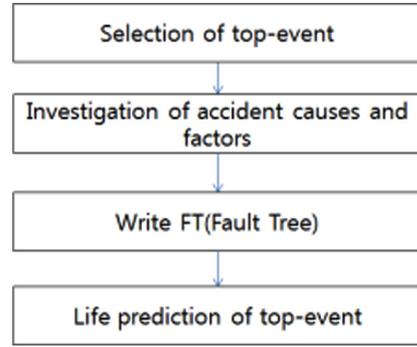


Fig. 1. Sequence of FTA.

중간사상의 발생확률 역시 And Gate, Or Gate를 따라 정상사상(재해)의 발생확률(λ)을 계산할 수 있다. 정상사상의 발생확률의 해석은 평균고장시간 MTTF (Mean Time to Failure) = $1/\lambda$ 을 이용하여 정상사상(재해)의 평균고장시간을 계산한다, 계산된 평균고장시간을 통하여 정상사상(재해)의 수명을 예측할 수 있다.

3. 수변전설비의 작동흐름도 및 구성부품분류

수변전설비는 수용가로 공급된 특고압을 사용전압으로 변환하려는 목적으로 전력회사의 배전선로를 통하여 전기를 공급받아 구내 배전설비로 전기를 공급하는 시스템으로 구성되어 있다. 수변전설비는 변압 기능, 개폐 기능, 과전류 보호·지락 보호 기능, 계측기능, 과전압 억제 기능, 역률 개선 기능으로 나눈다.

변압 기능은 고압에 대하여 변압기(TR ; Transformer)로써 저압 380 V, 220 V로 강압하여 동력 간선, 전등 간선에 공급한다. 계기용 변압기(VT ; Voltage transformer)는 고압을 저압으로 강압하여 전압계(V)에 인가하고, 계기용 변압 변류기(VCT : Voltage and current transformer)는 고압을 저압으로 하여 적산전력계(Wh)에 인가한다⁸⁾. 개폐 기능은 단로기(DS ; Disconnecter switch), 차단기(CB ; Circuit breaker), 배선용 차단기(MCCB ; Mold case current breaker)로 구분된다. 단로기는 수리 및 점검시에 개방하여 감전을 방지하며 차단기는 고압 주회로의 부하전류를 개폐한다⁸⁾. 현재 차단기는 VCB(Vacuum circuit breaker)를 주로 사용한다. 배선용 차단기는 동력 간선 및 전등 간선의 부하전류를 개폐한다⁸⁾. 과전류 보호·지락 보호 기능은 과전류 계전기(OCR ; Over current relay)가 동작하여 차단기(VCB)를 개방하여 과전류를 보호한다⁸⁾. 지락에 대해서는 지락계전기(GR ; Ground fault relay)가 동작하여 차단기(VCB)를 개방한다. 계측기능은 적산전력계(Wh)가 전력량을 전압계(V)는 수전전압, 전류계(A)는 고압 주회로의 부하전류를 계측한다⁸⁾. 과전압

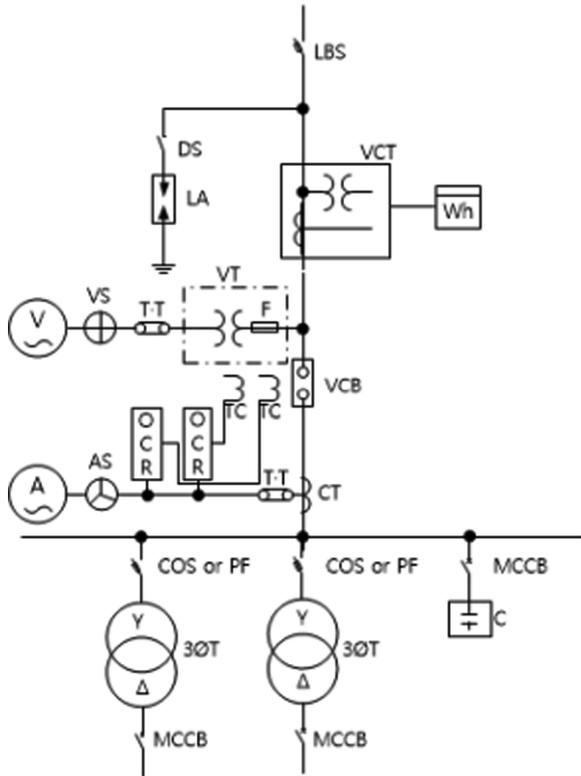


Fig. 2. The simplified power installation diagram⁸⁾.

억제기능은 우뢰에 의한 과전압(서지)을 피뢰기(LA ; Light arrester)로 억제하여 사고를 미연에 방지한다⁸⁾. 마지막 역률 개선 기능은 고압 주회로의 지상 무효전류를 고압 진상 콘덴서(C)로 저감하여 역률을 개선하고 전기 요금을 삭감한다. Fig. 2는 일반적인 수변전설비의 회로도를 나타내었다.

4. 수배전설비의 구성부품, 고장률 및 고장모드

수배전설비의 주요 구성부품은 총 14개로 구성하였고, 고장률 및 고장모드는 한국전기안전공사⁴⁾와 IEEE gold book⁶⁾, RAC⁷⁾, 참고문헌 [5]를 바탕으로 하였다. Table 1은 수변전설비의 구성부품에 대한 고장모드와 고장률을 나타내었다.

Table 1. Component, sub-components and failure rates of the power installation

Components	Failure modes	Failure rate
DS/LBS		3.41
	Opened	1.29
	Broken	0.78
	Binding/Sticking	0.51
	Intermittent operation	0.31
	Noisy/Unstable/Chatter	0.27

LA	Shorted	0.24
	Broken	18.88
	Cut/Scarred/Punctured	12.27
	Worn	5.48
		1.13
VCT		8.6
	Contamination	4.30
	Shorted	3.26
	Inductor damage	1.04
CT		2.40
	Malfunction	0.96
	Loss by combustion or destroyed	0.72
	OCR operation	0.48
VT	Flashover	0.24
		1.85
	Creak	0.56
	Explosion	0.37
A/V Meter	Murmur	0.37
	Indicator failure	0.37
	Breakage	0.18
		1.65
	Intermittent Operation	1.05
VCB/MCCB	Malfunction	0.60
		9.48
	Degraded operation	5.22
	Does not open	1.15
	Fails to close	1.04
	Opens without command	0.95
	Stuck open	0.75
	Opened	0.37
		5.03
	Slow open	2.01
Fails to close	1.51	
OCR	Electrical overstress	1.01
	Opened	0.25
	Loss of power	0.15
	Premature open	0.10
		4.13
COS	Fused fusible disconnecting	2.67
	Flashover	1.19
	Malfunction	0.27
PF		5.39
	Fails to open	1.73
	Electrical overstress	1.62
	Opened	1.34
	Loss of power	0.48
	Premature open	0.22
		2.59
Transformer	Contamination	1.29
	Shorted	0.99
	Inductor failure	0.31
Condenser(C)		2.14
	Shorted	0.90
	Opened	0.58

Grounding	High leakage current	0.39
	Drift	0.27
	Arcing/Sparking	5.32
	Shorted	1.06
	Worn	1.06
	Broken	0.90
Cable(CV)	Opened	0.75
	Arcing/Sparking	10.86
	Shorted	4.34
	Worn	3.26
	Broken	1.09
	Opened	1.09
Connector	Opened	0.54
	Connector pin pushed	0.54
	Arc	12.59
	Shorted	5.05
	Opened	3.02
	Connector damaged	1.52
	Insertion loss	0.75
	Intermittent	0.75
	Mechanical damage	0.75

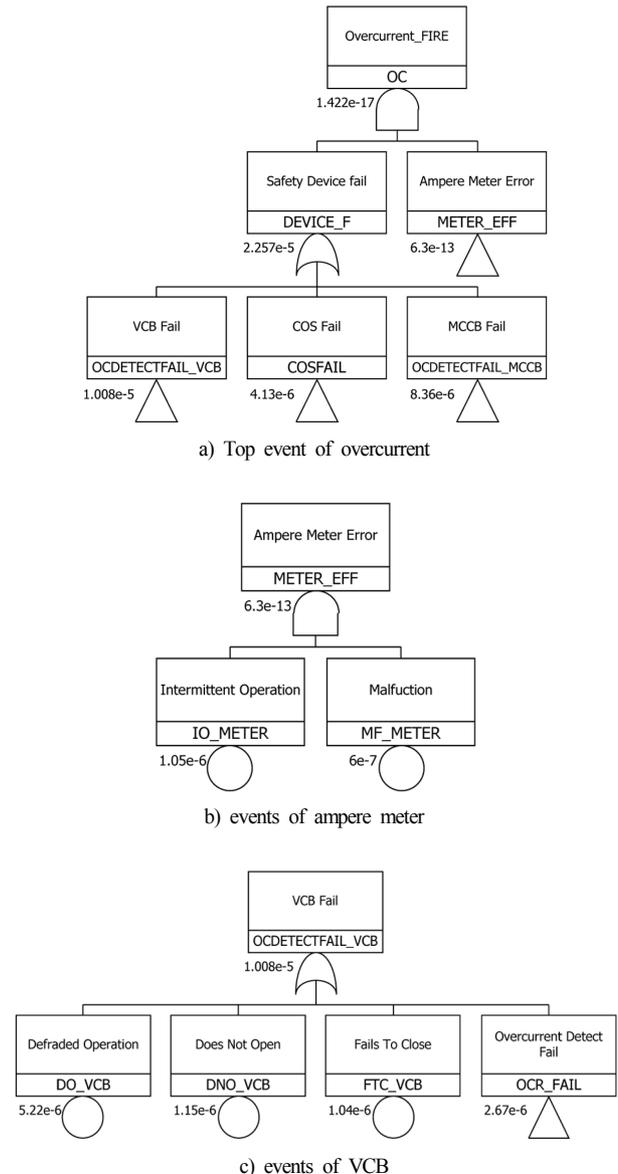
5. 정상사상의 분석 및 FT 작성

수변전설비에서의 잠재위험은 전기화재, 감전, 폭발 및 화상 등으로 생각할 수 있다. 이 중에서 과전류로 인한 전기화재에 대하여 FTA 기법을 사용하였다. 정상사상을 과전류 화재로 하면 과전류를 발생시 이를 차단 및 개방해 주는 안전장치와 사용자가 해당 값을 판단할 수 있는 전류계로 크게 구분된다. 과전류 및 지락을 방지하는 목적으로 설치하는 VCB, COS 및 MCCB가 계기는 전류계(Ampere meter)가 해당된다.

5.1 정상사상 분석

Fig. 3 a)는 과전류에 대한 정상사상으로 안전장치의 고장과 전류계의 에러로 구분하였다. Fig. 3 b)는 전류계의 고장 및 간헐적 작동으로 2개의 고장이 동시에 발생했을 때 과전류에 미치는 영향을 제시하였다. 안전장치의 고장에 있어서는 과전류 및 지락을 방지하기 위한 VCB, COS 및 MCCB의 고장으로 구분된다. Fig. 3 c)의 VCB는 과전류 및 지락 계전기의 고장으로 인하여 VCB가 제기능을 못할 경우와 VCB 자체의 결함으로 수변전설비 전반에 문제를 일으킨다. 과전류 및 지락 계전기는 개방에러, 전기적 스트레스, 코일의 자기력 감소, 점점 불량으로 고장을 일으키며, VCB 자체는 열화된 작동과 VCB의 접점부분의 불량으로 인한 개방

및 닫힘 고장이 나타난다. Fig. 3 d)의 COS는 퓨즈부의 노열화가 주 고장인데 이는 전기적 스트레스와 열화에 의해서 발생된다. Fig. 3 e)의 MCCB의 고장은 전자장치의 고장과 점점 불량으로 크게 구분된다. 전기장치의 고장은 명령 없이 개방 및 닫힘이 이루어지고, 노후로 인한 개방 및 닫힘이 제기능을 못할 경우로 이 모든 사항 중에 하나라도 발생되면 해당 구성부품뿐 만 아니라 전 시스템에 열원으로 작용한다. 위에서 설명한 내용을 Fault Tree로 도식하면 Fig. 3과 같다. Fig. 3은 and gate 3개, or gate 5개 전입 기호와 기초 사상으로 구성된다. 기초사상 중 중복되는 사상의 경우는 해당 구성부품에서 발생하는 기초사상으로 이는 식별자를 구분하여 첨부하였다.



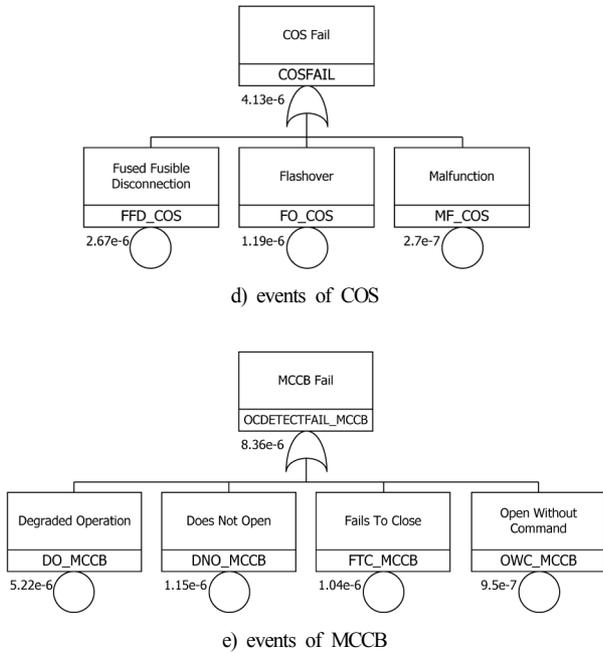


Fig. 3. FT diagram for overcurrent of electrical power installations.

5.2 FT의 분석

FT도가 완성되면 다음 단계로서 최소절단집합들을 산출한다. 하나의 최소 절단 집합에 포함되는 기초사상들이 동시에 발생한다면 정상사상인 과전류로 인한 전기화재가 발생하게 된다.

17개의 기초사상에 대한 고장률을 주게 되면 정량적 평가, 즉 전기화재가 발생하는 빈도와 최소절단집합의

Table 2. Basic events and failure rate

Basic event	Identification code	Failure rate
Degraded operation	DO_VCB	5.22e-6
Does not open	DNO_VCB	1.15e-6
Fails to close	FTC_VCB	1.04e-6
Fails to close	FTC_OCR	1.04e-6
Electrical overstress	EO_OCR	1.01e-6
Loss of power	LP_OCR	0.15e-6
Slow open	SO_OCR	2.01e-6
Premature open	PO_OCR	0.10e-6
Fused fusible disconnecting	FFD_COS	2.67e-6
Flashover	FO_COS	1.19e-6
Malfunction	MF_COS	0.27e-6
Degraded operation	DO_MCCB	5.22e-6
Does not open	DNO_MCCB	1.15e-6
Fails to close	FTC_MCCB	1.04e-6
Opens without command	OWC_MCCB	0.95e-6
Malfunction_a meter	MF_METER	0.60e-6
Intermittent operation_a meter	IO_METER	1.05e-6

Table 3. Minimal cut sets of the power installation

NO	Value	F-V	ACC	Minimal cut sets
1	3.29E-18	0.23128	0.23128	IO_METER MF_METER DO_MCCB
2	3.29E-18	0.23128	0.46256	IO_METER MF_METER DO_VCB
3	1.68E-18	0.118299	0.58086	IO_METER MF_METER FFD_COS
4	9.51E-19	0.066903	0.64776	IO_METER MF_METER FTC_OCR
5	7.50E-19	0.052725	0.70049	IO_METER MF_METER FO_COS
6	7.25E-19	0.050953	0.75144	IO_METER MF_METER DNO_MCCB
7	7.25E-19	0.050953	0.80239	IO_METER MF_METER DNO_VCB
8	6.55E-19	0.046079	0.84847	IO_METER MF_METER FTC_MCCB
9	6.55E-19	0.046079	0.89455	IO_METER MF_METER FTC_VCB
10	6.36E-19	0.04475	0.93930	IO_METER MF_METER EO_OCR
11	5.99E-19	0.042091	0.98139	IO_METER MF_METER OWC_MCCB
12	1.70E-19	0.011963	0.99335	IO_METER MF_METER MF_COS
13	9.45E-20	0.006646	1.00000	IO_METER MF_METER LP_OCR
14	1.27E-25	0	1.00000	IO_METER MF_METER SO_OCR PO_OCR

발생빈도 등을 계산할 수 있다. 기초사상에 대한 인식 코드와 고장률은 Table 2와 같다.

최소절단집합은 정상사상을 발생시키는 기본사상의 최소집합을 말하며 AND와 OR로 구성되는 논리조합의 영향만을 받기 때문에 즉각적인 위험성 분석이 가능하다.

Table 3의 결과값은 PTC Windchill Quality Solutions⁹⁾와 AIMS-PSA에 의하여 분석된 결과를 보여준다. 산출된 최소절단집합들은 Table 3과 같이 14개가 산출되며 이들 최소절단집합들을 살펴보면 전기화재가 발생할 수 있는 모든 사상의 조합을 확인할 수가 있다.

Table 3의 1번(NO 1)과 2번(NO 2)의 값이 계통고장 확률의 46%를 차지하는 것을 의미한다. 또한 1번의 최소절단집합(전류계의 고장, MCCB의 성능저하)의 F-V 값이 0.23128이라는 것은 1번의 최소절단집합의 비중을 의미한다. 이는 최소절단집합만으로 계통고장에서 중요한 것이 무엇인지 추측할 수 있으며 만일 계통의 개선이 필요하다면 어느 부분을 개선하는 것이 효과적인지 파악할 수 있다.

6. 결론

정상사상을 과전류 화재로 하여 과전류 발생시 이를 차단 및 개방해 주는 안전장치의 고장과 전류계의 고장(인지오류)을 바탕으로 최소절단집합을 도출하였다.

1번과 2번에서 수배전설비 고장 확률의 46%를 차지하였다. 또한 1번의 최소절단집합(전류계의 고장, MCCB의 성능저하)의 F-V값이 0.23128, 2번의 최소절단집합(전류계의 고장, VCB의 성능저하)의 F-V 값이 1번과 같은 값으로 나타났다. 화재발생 중 “전류계의 고장(사용자 미인식)”과 MCCB와 VCB의 성능저하가 원인이 되어 일어나는 것이 전체화재의 46%라는 의미이다. F-V누적 값을 바탕으로 최소절단집합들에 포함되는 기초사상들에 대하여 철저한 관리를 통하여 수배전설비를 안전하게 운영할 것으로 판단된다.

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. Ku, J. -M. Cha and H. 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 22.9 kV Electrical Installation, pp.128-150, 2009.
- 5) H. -K. Lim, System Safety Engineering, Hansol Academy, pp.146-147, 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) Ohmsha., Introduction to Electrical Work of an Electrical Engineer, pp.44-49, 1993.
- 9) FRONTIS, Introduction of PTC Windchill Quality Solutions, 2016.