

## An Analysis of the Impact of Failure Modes for Components of Oil Immersed Transformer

Sang Chul Kim<sup>+</sup>

Department of Occupational Health and Safety Engineering, Semyung University, 65, Semyung-ro, Jecheon, Korea

### Abstract

This paper confirmed the risk of oil immersed transformer through analyzing statistical data and other information. It classified the components by using the reliability evaluation software where FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) technique can be applied, and used these to determine the failure mode and its percentages and derive the RPN (risk priority number) and criticality. The criticality of the components was found in insulation, insulating oil, tank and bushing for "H grade." Insulation may be thermally decomposed and damaged due to mechanical stress, causing overheating or fire. In addition, when the abnormal operation of the coil occurs, the temperature of insulating oil rises and an abnormal sound is generated, which may cause an explosion or a power failure if overheated. Unlike the criticality analysis, the RPN of insulating oil is low due to the easy detection of abnormal sound and high temperature.

**Key words:** oil immersed transformer, FMEA, RPN, criticality, insulating oil, electrical fir

### 1. 서론

한국전기안전공사의 자료에 의하면 전기설비에 대한 발화기기별 발생현황에서 변압기의 사고는 연간 42건으로 나타났지만 재산상의 손실은 두 번째로 높게 나타났다. 따라서 1건당 재산상의 손실을 보면 분전반은 1,865,750원으로 나타났으며, 변압기는 1건당 7,377,762원으로 가장 높게 나타났다(KESCO, 2016). 특히 변압기의 경우 설비의 손실도 크지만 정전으로 인한 2차 경제적 손실이 금전적으로 계산하기가 불가능할 정도로 큰 손실을 초래한다(정전으로 인한 2차 경제적 손실은

물론 사회적 혼란까지 야기할 수 있다). 이런 변압기에 대해서 다양한 연구가 진행되어 왔다. 그중에서 권선간 단락사고에 따른 변압기의 온도분포를 분석한 연구(Lee, 2006), 변압기 절연지의 수명을 추정하는 방안을 제시하고, 최종적으로 변압기의 수명 진단 알고리즘을 제시한 연구(Park, 2013), 아울러 고체절연물의 부분 방전 파형분석을 통하여 전력설비별 수명예측 기술을 정립한 연구(KERI, 2016) 등의 기술적인 연구와 지상 변압기를 대상으로 방열해석을 통한 수명 연장 연구(Kim & Lee, 2004), 건식몰드변압기 코일의 수명을 예측한 연구(Kim, *et. al.*, 2005)등의 수명예측연구도 이

<sup>+</sup> Corresponding author: Sang Chul Kim, Tel. +82-43-649-1322, e-mail. [sckim@semyung.ac.kr](mailto:sckim@semyung.ac.kr)

행되었다. 마지막으로 규정과 관련해서는 국내의 사용 연한을 비교한 연구도 포함하여 분석하였다. 이런 많은 연구에도 불구하고 아직까지 변압기에 대한 전기재해의 발생건수는 줄어들지 않고 있다. 많은 이유가 있지만 그중에서도 체계적인 부품 교체, 내구연한, 또는 어떤 고장원인을 발견하고 개선해야 되는지에 대한 구체적인 관리방안이 없는 실정이다(Kim, 2017). 이에 대해 구체적인 관리방안을 강구하기 위해서는 변압기 부품 전체에 대하여 그 고장 모드가 시스템에 미치는 영향을 분석하여 중요도를 찾고, 그 중요도를 바탕으로 위험우선순위를 찾아내어 구성품의 어느 부분이 개선되어야 하며 점검 및 수리를 요하는 지를 파악하면 된다(IEC-60812, 2001; Kim, 2017).

구체적인 관리방안의 하나로 본 연구에서는 가장 널리 사용되고 있는 유입변압기를 선정하였고, 통계자료, 내구연한 등의 분석을 통하여 그 위험성을 분석하였다(Kim, 2017). 또한 구성부품을 분류하였고 FMEA 기법 적용이 가능한 신뢰성평가 소프트웨어(PTC Inc, 2016)를 이용하여 고장모드, 고장모드 퍼센트 등을 결정하고 이를 바탕으로 위험우선순위지수와 중요도를 도출하였

다(Kim, 2017). 도출된 중요도와 위험우선순위지수를 통하여 중점 관리 부품을 선정하였고, 이에 대한 관리방안을 제시하였다. 본 연구는 인적재난 위기에서 화재 및 폭발(변압기 화재 및 폭발)과 생활 안전위기의 산업재해와 관련한 주요 기술자료 및 정책자료로 활용가능하다(Kim, 2017).

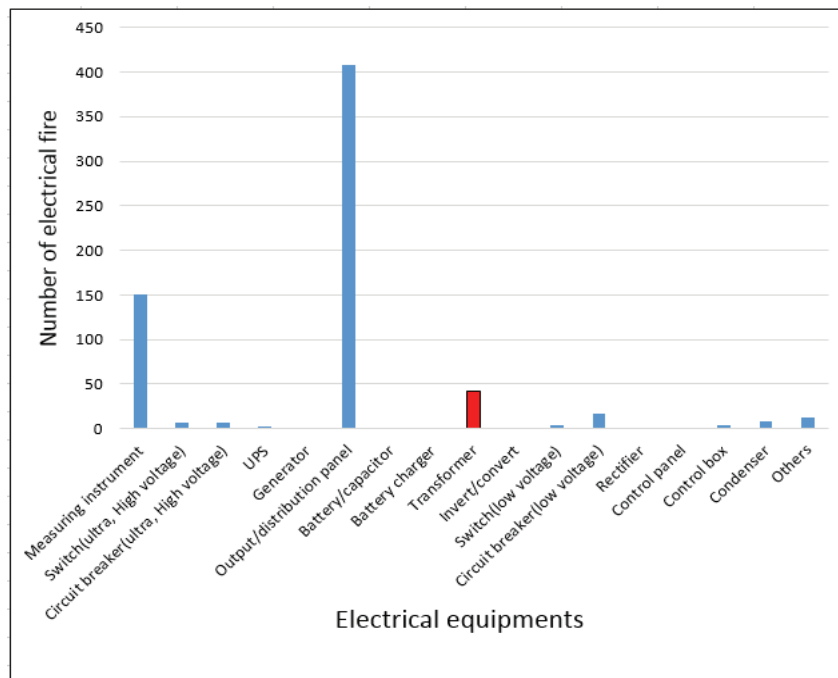
## II. 본론

### 1. 발화기기별 발생현황

전기설비에 대한 발화기기별 발생현황은 전기화재건수와 재산피해로 구분할 수 있다.

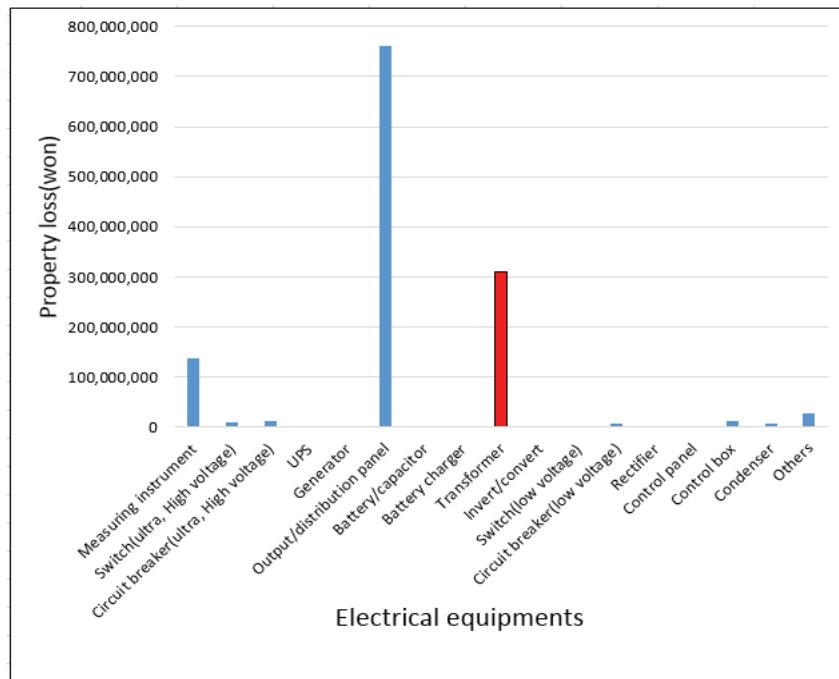
#### 1) 발화기기별 전기화재건수 분석

전기설비에 대한 발화기기별 발생현황에 있어서 전기화재 668건 중에서는 배전반/ 분전반이 가장 높은 408건이, 다음으로 계량기 150건, 변압기가 42건, 저압 차단기에서 17건으로 나타났고 나머지 설비에서는 낮은 고장률을 나타내었다. <Figure 1>은 한국전기안전공사에서 제시하고 있는 발화기기별 발생현황에 대



\* Source: KESCO, 2015.

Figure 1. Number of electrical fire for electric equipments of KESCO



※ Source: KESCO, 2015.

Figure 2. Property loss for electrical equipments

한 전기화재 건수(건)를 나타내었다(KESCO, 2015).

## 2) 발화기기별 재산피해

전기화재로 인한 재산상의 손실은 분전반/배전반에서 가장 높았고 다음으로 변압기로 나타났다. 분전반/배전반(408건)의 재산상의 손실은 건당 1,865,750원으로 나타났으며, 변압기(42건)는 건당 7,377,762원으로 나타나 건당으로는 변압기가 재산상의 피해가 가장 높게 나타났다. <Figure 2>는 발화관련기기에 대한 재산피해를 나타내었다(KESCO, 2016).

## 2. 변압기(변성기)류의 권장 사용연한

특고압 기기류의 기대수명은 기기를 구성하는 많은 부품에 의해 결정되지만, 때로는 절연재료의 수명이 기기의 수명에 결정적으로 작용을 한다. 일반적으로 구동부를 지닌 기기의 일부 구동부는 기계적인 마모로 인하여 파손될 수 있어 해당 부분에 대해서만 유지보수를 실시하면 다시 사용할 수 있다. 그러나 전기적인 부품에 해당하는 절연재는 전반적으로 기기전체와 동일시

되어 있어 절연재료가 에이징 되면 절연재료를 전부 교체하던지 또는 새로운 기기로 대체해야 하므로, 일반적으로 절연재의 수명을 기기의 수명으로 간주하는 경향도 나타나고 있다. 그리고 절연재의 절연파괴전압이 초기치보다 일정값(기준 또는 기기류별로 상이) 이하로 되는 시점에서 교체하는 것이 타당하다고 보고되고 있다(Kim & Shong, 2009).

일본(JEMA)의 경우, 변성기의 노후시점을 15년을 기준으로 하고 있고 보통 및 정밀점검을 통하여 권장 사용연한이 경과하더라도 5년을 추가하여 권장교체시기를 20년까지로 보고 있다. 특히 변압기의 경우 노후시점을 20년을 기준으로하고 있다. 또한 미국의 경우에도 해상을 기준으로 노후 시점을 20년부터 간주하고 있다. 이런 사용연한이 정해져 있음에도 불구하고 거의 모든 설치기관들은 이 기간 후에 교체가 이루어지지 않고 계속적으로 사용하고 있는 실정이다. <Table 1>은 변성기류의 국내외 기관별 사용연한 및 제시기준을 나타내었다.

Table 1. Terms of use for transformer

Corporate name		Terms of use	Environments/conditions	Criteria
Domestic	KEPCO	15	-	Accounting
	KESCO	15	Comparison of domestic and external standards	Terms of use
Foreign country	JECA	15-20	Aging and installed environment	Recommended replacement time
	NPRD	20-35	Aging and installed environment	Life forecast

\* Source: Kim & Shong, 2009.

### 3. 고장모드영향분석(FMEA)

FMEA는 정성적 분석 중에서 기능적인 면을 중심으로 시스템 구성품의 기능 및 성능에 대한 영향을 평가할 수 있으며, 고장은 기기나 부품의 고유특성의 변화나 기기에 가해지는 스트레스 등의 원인에 의해 발생한다. 그리고 고장 발생 원인은 각각의 고장 메커니즘이 있으며 이 메커니즘을 검토함으로써 고장의 발생을 방지할 수 있다. 일반적으로 많이 이용하고 있는 고장모드로서 국제전기표준규격인 “IEC 60812 ; FMEA”에 제시된 것을 이용하였다(Kim, 2017).

본 연구에서는 분석과정에서 정량적인 평가가 곤란한 FMEA의 한계성을 보완하고 시스템의 점검 및 보수에 대한 중요성과 우선순위를 부여하기 위하여 중요도 분석과 위험우선순위(Risk Priority Number ; RPN)를 이용하였다. 이를 위해서 각각의 고장모드에 대한 발생빈도(occurrence), 영향도(severity)에 의한 중요도(criticality)를 평가하고, 이것에 검출도(detectability) 발생빈도(occurrence), 영향도(severity)에 의한 중요도(criticality)를 평가하고, 이것으로 검출도(detectability)를 계산하였다. 이는 많은 고장모드에 대해 상대적으로 위험한 부품을 선택적으로 우선순위를 결정하는데 많은 기여를 할 수 있다(Kim, 2017).

RPN값을 계산하기 위해서 고장모드의 발생빈도, 시스템의 영향도, 및 고장 발생시의 검출도 등 모두 세 범주로 분류하여 평가하였으며, 각 범주를 다섯 단계로 나누고 각각의 단계에 수준을 1~5 까지 부여하였다. <Table 2>, <Table 3>, <Table 4>는 발생빈도, 영향도 그리고 검출도에 대한 등급을 보여주고 있다(Kim, 2017).

Table 2. Classification and grades of occurrence

Class	Occurrence	Level	Criteria
I	almost never	1	Failure unlikely.
II	remote	2	Rare number of failures likely.
III	medium	3	moderate number of failures likely.
IV	moderately high	4	Frequent high number of failures likely.
V	very high	5	Very high number of failures likely.

\* Source: Park, 2016.

Table 3. Classification and grades of severity

Class	Severity	Level	Criteria : severity of effect
I	negligible	1	No effect.
II	minor	2	Failure inducing unplanned maintenance but has no severe effect on system.
III	major	3	Inducing failure such as functional incapability on corresponding subsystem.
IV	serious	4	Failure inducing consequence such as operable incapability of system.
V	hazardous	5	Failure has possibility of very severe consequence.

\* Source: Park, 2016.

Table 4. Classification and grades of detectability

Class	Detectability	Level	Criteria
I	very high	1	has very high effectiveness.
II	moderately high	2	has moderately high effectiveness.
III	low	3	has low effectiveness.
IV	remote	4	is unproven, or unreliable, or effectiveness is unknown.
V	very remote	5	is very unproven, or unreliable, or effectiveness is unknown.

\* Source: Park, 2016.

### 1) 중요도 분석

중요도 분석은 일명 리스크 행렬(Risk Matrix)이라고 불려지는 것으로, 고장이 발생하는 경우 그로 인하여 부품이나 시스템 또는 운영자가 받는 영향의 정도를 평가하며, 영향도를 기준으로 설정하여 분석하는 것이다. 특히, 발생빈도가 높으며, 높은 영향도 등급을 갖는 고장모드에 주의를 기울이기 위하여 사용되는 수단이다(Park & Kim, 2016). 중요도는 고장모드의 발생빈도와 영향도에 의해 평가하는 것으로 다음 식으로 구할 수 있다. 이것은 리스크의 개념과 같다. 즉, 바람직하지 않은 사건의 발생 확률(발생빈도)과 그로 인해 야기될 수 있는 피해결과(강도, severity)로부터 추정되며, 식 (1)과 같다(Kim, 2017).

$$\text{중요도(Criticality)} = \text{발생빈도(Occurrence)} \times \text{영향도(Severity)} \quad (1)$$

### 2) 위험우선순위 지수

시스템의 고장영향을 평가하는 방법으로 위험우선순위를 이용하여 평가하는 것도 좋은 방법 중의 하나이다. 이 위험우선순위는 중요도를 평가하는 고장모드의 발생빈도와 영향도에 추가하여 고장의 검출도를 평가하는 것으로 다음 식으로 평가한다. 식 (2)과 같다(Kim, 2017).

$$\text{위험우선순위(RPN)} = \text{고장모드의 발생빈도} \times \text{영향도} \times \text{검출도} \quad (2)$$

위험우선순위의 값이 크다는 것은 해당 고장모드로 인해 시스템이나 기기가 큰 영향을 받을 수 있고, 혹은 그와 같은 고장이 자주 발생할 수 있으며, 고장이 발생하더라도 감지가 어렵다는 것을 의미한다(Park, 2016). 그리고 우선적으로 시정조치를 시행하여 영향도나 발생도, 검출도 중의 한, 두 개 또는 전부를 감소 시킴으로써 그 값을 감소시켜야 하는 고장모드라는 것을 의미한다(Park & Kim, 2016).

## III. 결과 및 고찰

### 1. 유입변압기 구조 및 구성 부품

유입변압기의 FMEA를 실시하기 위해서는 구조의 구성부품과 각각의 기능을 분석하여야 한다. 유입변압기의 구조는 본체(Frame), 절연유(Insulating oil), 외함(Case), 부속품(Parts)으로 크게 구분할 수 있다. 본체에서는 권선(Coil), 절연물(Insulator), 철심(Core), 지지물(Supporting structure)로 구성되어 있으며 권선은 전기회로를 구성하고 있고 절연물은 권선을 절연한다. 철심은 자기회로를 형성하고 지지물은 권선 및 철심의 구조를 지지한다. 절연유는 유입변압기에 사용하며 냉각 매체 및 절연을 위하여 사용된다. 외함은 탱크(Tank)와 방열기(Pressure-relief vent)로 구성되어 있다. 탱크는 변압기 내부를 보호하는 용기이며 열을 방산한다. 방열기는 전단된 열을 발산해 준다. 부속품은 부싱(Bushing), 보호계기(Protective device), 탭 절환기(Tap changer handle)로 구성되어 있다. 부싱은 외함 내부로부터 외부로 전기를 인출한다. 보호계기는 온도계(Dial thermometer), 유면계(Oil level gauge), 방압안전장치(Auto resetting pressure relief device), 압력계(Pressure gauge), B-H 릴레이(Buchholz relay)로 구성되어 있다. 온도계는 변압기 절연유 온도를 감지하고, 유면계는 온도변화에 따른 유량을 감지한다. 방압안전장치는 내부압력 이상 시에 감지하며 이상 압력시 외부로 방출한다. 압력계는 내부 압력을 감지하며 이상 압력시 외부로 방출한다. B-H 릴레이는 콘서베이션에 취부되며 내부이상에 따른 가스 발생 및 유속 이상 변환에 동작한다. 탭 절환기는 부하 탭 절환기와 무부하시 탭 절환기로 구분되며, 부하 탭 절환기는 전압 인가 상태에 무부하시 탭 절환기는 전원 차단 후에 탭을 절환시킬 수 있다. <Figure 3>은 유입변압기의 구성 부품과 구조를 나타내었다.

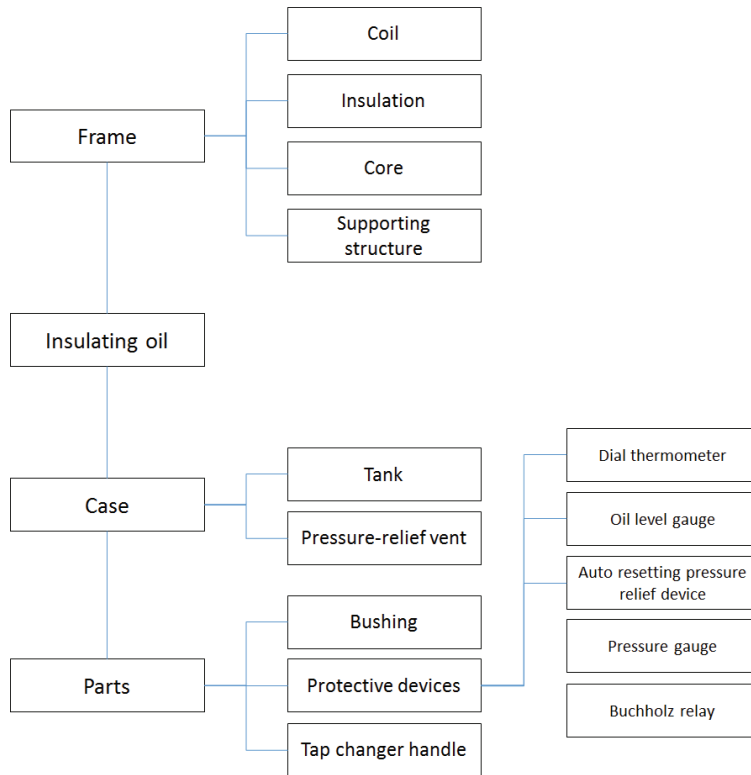


Figure 3. Construction of oil immersed transformer

2. 유입변압기의 고장 모드 및 고장모드 퍼센트

부품마다의 중요도 및 위험우선순위를 찾기 위해서는 각각 부품에 대한 고장모드, 고장모드가 차지하는 비율을 알아야 한다. 그러나 현재 국내에서는 유입변압기의 구성부품에 대한 고장 모드와 고장모드 퍼센트를 제시한 논문과 실제 현장에 대한 기술적 자료는 없는 실정이다. 본 논문에서는 유입변압기와 관련하여 FMEA 분석과 영향도, 발생도, 검출도를 고려하여 위험우선순위인 RPN과 중요도 분석을 함께 수행하고 있다. 그리고 고장모드 및 고장모드 퍼센트는 미국방성 소속인 “Reliability Analysis Center(RAC)”에서 2016년 개정하여 발간한 “FMD(Failure Mode/Mechanism Distribution) 1997과 FMD 2016”를 근간으로 유입변압기에 사용된 부품들의 특성에 가장 적합한 값을 선택하여 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 보다 객관성을 확보하기 위하여 구성부품 개개와 유입변압기 단독부품의 FMD를 각각 구분하여 제시하였다. 이를 통하여 유입변압기에서 발생 가능한 고장모드를 모두 도출하고자 하였으며, 두 데이터를 분석한 결과 구성부품 개

개에 대한 내용이 보다 체계적으로 구성되어 있음을 알 수 있었고 이를 FMEA에 적용하였다. <Table 5>는 구성부품 개개에 대한 고장모드와 고장모드 퍼센트에 대한 내용이며, <Table 6>은 단일품목에 대한 고장모드와 고장 퍼센트 내용이다.

Table 5. Failure modes for component and sub-components of oil immersed transformer

Components	Sub-component	Failure modes	%
Frame	Coil	Mechanical Failure	92,3
		Induced failure	5,3
		Opened	1,9
		Drift	0,2
		Shorted	0,2
	Insulation	Deteriorated	100
	Core	Broken	54,50
		Binding/Sticking	18,20
		Improper Output	18,20
Out of Specification		9,10	
Insulating oil		Deteriorated	100

Case	Tank	Seal failure	64,10
		Unknown	20,50
		Mechanical failure	12,80
		Degraded operation	2,60
	Pressure-relief vent	Leakage	100
Parts	Bushing	Cracked	50
		Leakage	50
	Dial thermometer	Failed to operate	50
		Improper output	50
	Oil level gauge	Mechanical Failure	40,4
		Unknown	30,5
		Seal Failure	18,9
		Out of Specification	5,8
		Binding/Sticking	2,9
		Intermittent Operation	1,5
	Auto resetting pressure relief device	No Operation	46,5
		False Operation	33,3
		Seal Failure	16,7
		Unknown	2,6
		Leaking	0,9
Buchholz relay	Failed to operate	66,70	
	Corrosion	25,00	
	Damaged	8,30	

※ Source: FRONTIS & FMD, 2016.

### 3. 중요도 분석 및 위험우선순위지수

유입변압기의 부품별 잠재적 고장모드 분석을 기초로 잠재적인 원인 및 영향을 분석하였으며, 하위 구성요소에 대한 RPN과 중요도를 <Table 7>에 나타내었다 (Park, 2016). 고장의 잠재적 원인은 전문가들의 의견과 미국의 FMD 보고서에서 제시된 데이터를 바탕으로 하였다(Park & Kim, 2016). 잠재적 영향은 첫째 정전, 둘째는 전기화재 및 과열, 셋째는 열화 및 손상을 기본으로 하였다. 파레토 커브(Pareto's curve)의 특성으로서 분류항목의 합계에 대한 비율(상대도수, 누적상대도수)을 구하거나, 분류항목을 몇 개로 합하여 그 전체에서 점유하고 있는 비중을 확인 하게 되는 등 개선을 위해 노력을 투입하여야 할 방향을 정하는 데 도움을 줄 수 있다. 일반적으로 FMEA에 의한 분석은 상위 10%의 대책에 의해 대상 시스템의 신뢰성을 80% 이상 개선 가능한 것으로 많이 알려져 있기 때문에 상위 10%에 대한 고장모드를

Table 6. Failure modes of oil immersed transformer

Component	Failure modes	%
Oil immersed transformer	Mechanical failure	27,40
	Induced failure	26,50
	Improper output	8,50
	Degraded operation	6,00
	Unknown	6,00
	Loose	5,10
	Opened	5,10
	Worn	3,40
	Binding/Sticking	2,60
	Shorted	2,60
	Alignment improper	0,90
	Burned out	0,90
	Deteriorated	0,90
	Electrical failure	0,90
	Improper response to electrical input	0,90
	Intermittent operation	0,90
	Leakage	0,90
	Video faulty	0,50

※ Source: FRONTIS & FMD, 2016.

검토하는 것으로 하였다. 중요도 및 위험우선순위지수 모두 상위 10%를 기준으로 작성되었다(Kim, 2017).

<Figure 4> 중요도의 H등급 부분에서도 절연체(1 모드), 절연유(1 모드), 탱크(1 모드), 부상(1 모드), 에서 중요도가 높게 나타났다. 특히 절연부분과 관련한 부분과 이를 제어하는 안장치부분에서 높게 나타났다. 이 부분에 대한 주요 관리 부품으로 확인되었으며, 각각의 부품에 대하여 육안 및 상시 점검을 통하여 체계적인 안전관리를 필요로 한다.

RPN를 가지고 총 3개의 그룹으로 나누어 평가를 하였다(Kim, 2017). RPN값이 60 이상의 상당한 위험으로 평가된 고장모드를 “Group A”, RPN값이 24~45 사이의 경미한 위험으로 평가된 고장모드의 경우를 “Group B”, 그리고 3~18 사이의 무시할 수 있는 위험으로 평가된 고장모드를 “Group C”로 분류하였다(Kim, 2017). 위험우선순위는 3개의 등급으로 분류를 하였다.

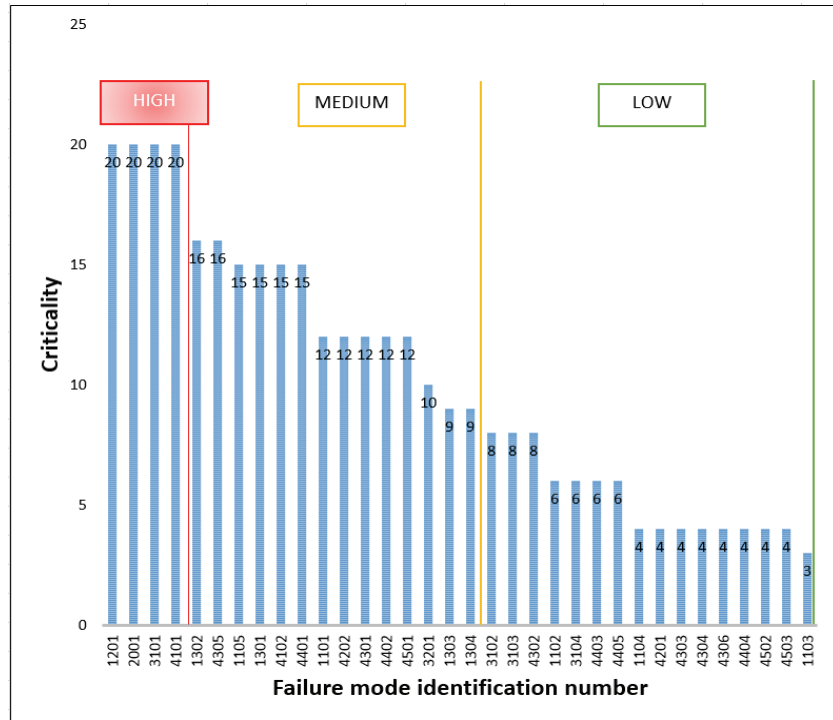


Figure 4. Risk classification rating through criticality

〈Figure 5〉에서 RPN에서 Group A에 해당되는 고장모드는 총 4개로(Kim, 2017), 구성 부품은 코일(1 모드), 절연체(1 모드), 탱크(1 모드), 부상(1 모드)를 차지

했다. 중요도와 다르게 나타난 부분은 코일 부분만 다르고 절연체, 탱크, 부상부분에서 중요도와 같은 공통 사항으로 나타났다.

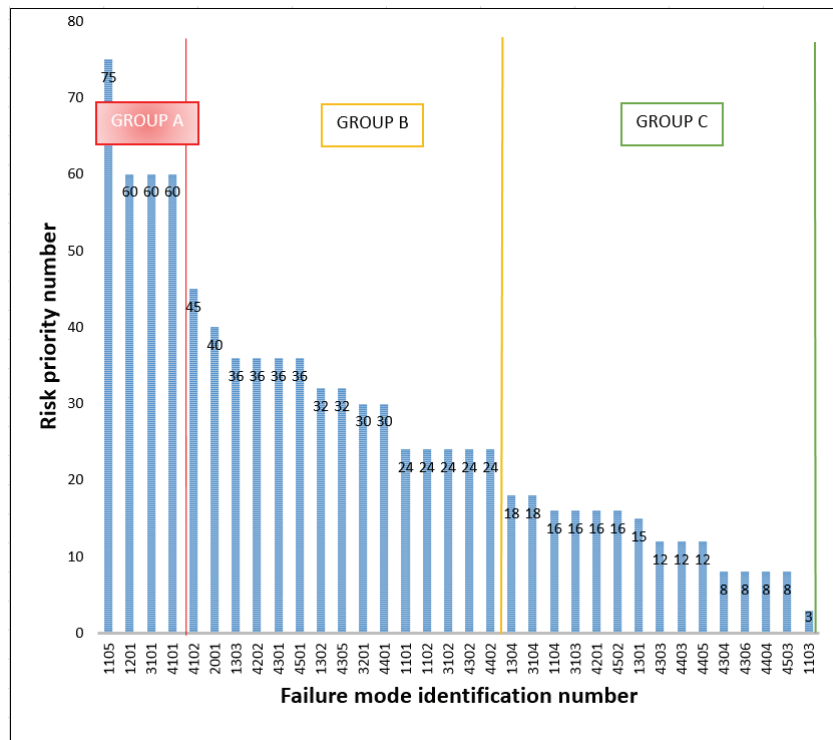


Figure 5. Risk classification rating through risk priority number

Table 7. RPN and Criticality at FMEA sheet

Item No.	Potential failure mode	Potential causes	Potential effects	SEV	OCC	DET	RPN	CRI
<b>1000</b>	<b>Frame</b>							
<b>1100</b>	<b>Coil</b>							
1101	Mechanical Failure	Overload, abnormal current, loose body parts, poor contact surfaces,	Heat discoloration Dust, dirt, parts damaged	3	4	2	24	12
1102	Induced failure	Overload, abnormal current, loose body parts, poor contact surfaces,	Heat discoloration Dust, dirt, parts damaged	2	3	4	24	6
1103	Opened	Coil failure	Breakout	1	3	1	3	3
1104	Drift	Coil failure	Overheat	2	2	4	16	4
1105	Shorted	Coil failure, Short circuit to secondary insulation deterioration	Overheat, electrical fire	5	3	5	75	15
<b>1200</b>	<b>Insulation</b>							
1201	Deteriorated	Local heating, aging	Discolouration and cracking of insulation	5	4	3	60	20
<b>1300</b>	<b>Core</b>							
1301	Broken	Overload, abnormal current, loose body parts, poor contact surfaces,	Heat discoloration Dust, dirt, parts damaged	5	3	1	15	15
1302	Binding/Sticking	Overload, abnormal current, loose body parts, poor contact surfaces,	Heat discoloration Dust, dirt, parts damaged	4	4	2	32	16
1303	Improper Output	Overload, abnormal current, loose body parts, poor contact surfaces,	Heat discoloration Dust, dirt, parts damaged	3	3	4	36	9
1304	Out of Specification	Overload, abnormal current, loose body parts, poor contact surfaces,	Heat discoloration Dust, dirt, parts damaged	3	3	2	18	9
<b>2000</b>	<b>Insulating oil</b>							
2001	Deteriorated	Local heating, aging	Overheat, electrical fire	5	4	2	40	20
<b>3000</b>	<b>Case</b>							
<b>3100</b>	<b>Tank</b>							
3101	Seal failure	Rusted, defective packing	Overheat	5	4	3	60	20
3102	Unknown	Overload, abnormal current, loose body parts	Heat discoloration Dust, dirt, parts damaged	2	4	3	24	8
3103	Mechanical failure	Loose connection	Damage	4	2	2	16	8
3104	Degraded operation	Rusted, defective packing	Overheat	3	2	3	18	6
<b>3200</b>	<b>Pressure-relief vent</b>							
3201	Leakage	Rusted, defective packing	Overheat	5	2	3	30	10
<b>4000</b>	<b>Parts</b>							
<b>4100</b>	<b>Bushing</b>							
4101	Cracked	Overload, abnormal current, loose body parts, poor contact surfaces,	Overheat, electrical fire	5	4	3	60	20
4102	Leakage	Damage, disconnection	Reduced energy output	5	3	3	45	15
<b>4200</b>	<b>Dial thermometer</b>							
4201	Failed to operate	Instrument fault, overload	Fragmentary, degraded performance	2	2	4	16	4
4202	Improper output	Instrument failure, voltage drop Overload, harmonic inflow, and overreceiver. Internal fault of windings, ambient temperature over	Life lost, damaged	4	3	3	36	12

<b>4300 Oil level gauge</b>								
4301	Mechanical Failure	Loose connection	Damage	3	4	3	36	12
4302	Unknown	Overload, abnormal current, loose body parts	Heat discoloration Dust, dirt, parts damaged	2	4	3	24	8
4303	Seal Failure	Rusted, defective packing	Overheat	2	2	3	12	4
4304	Out of Specification	Overload, abnormal current, loose body parts, poor contact surfaces,	Heat discoloration Dust, dirt, parts damaged	2	2	2	8	4
4305	Binding/Sticking	Overload, abnormal current, loose body parts, poor contact surfaces,	Heat discoloration Dust, dirt, parts damaged	4	4	2	32	16
4306	Intermittent Operation	Loose connection	Damage	2	2	2	8	4
<b>4400 Auto resetting pressure relief device</b>								
4401	No Operation	Overload, transformer internal failure, cooling fan failure, thermometer failure, air filter contamination and blockage	Heat discoloration Dust, dirt, parts damaged, Fire.	5	3	2	30	15
4402	False Operation	Overload, transformer internal failure, cooling fan failure, thermometer failure, air filter contamination and blockage	Overheating, breakage, and electrical fire	4	3	2	24	12
4403	Seal Failure	Rusted, defective packing	Overheat	3	2	2	12	6
4404	Unknown	Overload, abnormal pressure, loose body parts	Heat discoloration Dust, dirt, parts damaged	2	2	2	8	4
4405	Leaking	Loose connection	Damage	3	2	2	12	6
<b>4500 Buchholz relay</b>								
4501	Failed to operate	Overload or abnormal current, Loose jaws, Contact surface defect	Overheating, breakage, and electrical fire	4	3	3	36	12
4502	Corrosion	Deterioration of coating	Electrical failure	2	2	4	16	4
4503	Damaged	Frequent contact. Partial failure	Electrical failure, fire	2	2	2	8	4

※ Source: FRONTIS & FMD, 2016.

#### IV. 결론

본 연구에서는 유입변압기에 대하여 전기화재 통계 분석과 국내외 사용연한을 분석하였다. 또한 유입변압기의 구조 및 구성부품을 분류하였으며, FMD(2016)을 바탕으로 고장모드 및 고장모드 퍼센트를 도출하였다. FRONTIS의 소프트웨어를 통하여 도출된 중요도와 위험우선순위를 바탕으로 최종적으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 유입변압기를 분석한 결과 중요도에서는 H 등급에 대하여 절연체(1 모드), 절연유(1 모드), 탱크(1 모드), 부상(1 모드)의 중요도가 높게 나타났다. 또한 이중 절연체는 열이나 기계적인 응력에 의해 열분해(탄성

저하)되어 파손되며 과열, 화재를 야기할 수 있으며, 절연유 또한 코일에서 이상 동작이 되면 절연유의 온도가 상승함과 아울러 이상음이 발생하게 되고, 과열 시 폭발 또는 정전 등을 일으킬 수 있다. 변압기의 이상 징후는 절연유에서 끓는 소리가 나고, 열화상 감지에서 높은 온도가 확인되는 경우가 있으므로 상시 점검을 통해 안전을 확보해야 한다.

2) 절연체, 절연유, 탱크의 누수, 부상의 파괴에서 중요도 순위와 위험우선순위가 다르게 나타났다. 절연유의 경우 끓는 소리 및 높은 온도 등의 확인이 쉽다는 점에서 검출도 부분이 낮게 나타난 경우이다. 또한 중요도 분석에서는 낮게 나타났고 RPN에서 높게 나타난 코일의 단락 부분은 검출도 부분에서 감지하기가 매우 어려움으로 높은 점수가 나타났다.

3) 유입변압기의 경우 코일의 단락부분, 절연체 및 절연유의 열화부분, 탱크의 누수여부, 부상의 접점 부분은 상시 점검과 계측기기를 이용하여 관리를 철저히 할 필요가 있다.

## 감사의 글

이 논문은 2017학년도 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행된 연구임.

## References

- FRONTIS. 2016. Introduction of PTC Windchill Quality Solutions.
- IEC-60812. 2001. Analysis Techniques for System Reliability- Procedure for Failure Mode and Effects Analysis(FMEA). Korean Electrotechnology Research Institute(KERI). 2016. Establishment of Estimation Techniques for the Remaining Life of Electric Power Facilities. 15-12-N0101-86.
- Kim, Doo Hyun and Jong Ho Lee. 2004. Qualitative Assessment for Hazard on the Electric Power Installations of a Construction Field Using FMEA. *Journal of the Korean Society of Safety*. 19(4): 36-41.
- Kim, Doo Hyun, Sung Chul Kim, Jeon Su Park, Eun Jin Kim, and Eui Sik Kim. 2016. Analysis of Risk Priority Number for Grid-connected Energy Storage System. *Journal of the Korean Society of Safety*. 31(2): 10-17.
- Kim, Min Kyu, Jeong Gi Lee, Ju Young Jeong, and Ik Soo Kim. 2005. A Study on the Lifetime Expectation of Dry Type Transformer. *The Korean Institute of Electrical Engineers (KIEE)*. 2005(7): 2106-2108.
- Kim, Sang Chul. 2017. Failure Modes and Effect Analysis of Electrical System at Indoor Wires and Wiring Appliances. *Crisisonomy*. 13(6): 97-109.
- Kim, Young Seok and Kil Mok Shong. 2009. Investigation of Facility Accident and Suggestion of Guide Line for Accident Process on 22.9kV Class Electrical Installation. *The Korean Institute of Electrical Engineers(KIEE)*. 2009(10): 137-138.
- Korea Electrical Safety Corporation Homepage. <http://www.kesco.or.kr>. 2018.
- Occupational Safety and Health Research Institute. 2003. A Study on Development of Evaluation Model for Reliability and Safety of Temporary Electric Power Installations.
- Park, Chul Bae. 2008. A Study on the Life Prolongation of Pad Mounted Transformer through the Improvement of Heat Radiation. Master's Thesis. Chungnam National University.
- Park, Kyu Joon. 2013. A Study on Transformer Aging Diagnosis. Master's Thesis. Yonsei University.
- Park, Young Ho and Doo Hyun Kim. 2016. Failure Modes and Effect Analysis for Electric power Installations of D University. *Journal of the Korean Society of Safety*. 31(5): 7-15.
- Korean References Translated from the English*
- 김두현, 김성철, 박전수, 김은진, 김의식. 2016. 계통연계형 에너지저장시스템의 위험우선순위 분석. *한국안전학회지*. 31(2): 10-17.
- 김두현, 이종호. 2004. FMEA를 이용한 건설현장 전력설비의 위험성에 대한 정성적 평가. *한국안전학회지*. 19(4): 36-41.
- 김민규, 이정기, 정주영, 김익수. 2005. 건식변압기 수명예측에 관한 연구. *대한전기학회 학술대회 논문집*. 2005(7): 2106-2108.
- 김상철. 2017. 옥내 배선 및 배선기구의 고장모드영향분석. *Crisisonomy*. 13(6): 97-109.
- 김영석, 송길목. 2009. 22.9kV 수변전설비 사고처리 가이드라인 제시 및 기기별 사고발생 조사. *대한전기학회 학술대회 논문집*. 2009(10): 137-138.
- 박규준. 2013. 변압기 수명 진단에 관한 연구. 연세대학교 석사학위논문.
- 박영호, 김두현. 2016. D대학 수변전설비의 고장모드 영향 분석. *한국안전학회지*. 31(5): 7-15.
- 박철배. 2008. 지상변압기 방열 개선을 통한 수명연장에 관한 연구. 충남대학교 석사학위논문.
- 한국전기안전공사 홈페이지. <http://www.kesco.or.kr>. 2018.
- 한국전기연구원. 2016. 전원장치의 잔여수명에 관한 예측기법 설정. 15-12-N0101-86.

## 유입변압기 구성부품에 대한 고장모드영향분석

국문초록 본 연구에서는 유입변압기에 대하여 통계자료, 사용연한 등의 분석을 통하여 그 위험성을 확인하였다(Kim, 2017). FMEA 기법 적용이 가능한 신뢰성평가 소프트웨어를 이용하여(Kim, 2017) 유입변압기의 구성부품을 분류하였으며 이를 기반으로 고장모드 및 고장모드 퍼센트 등을 결정하고 위험우선순위지수와 중요도를 도출하였다. 유입변압기의 구성부품별 중요도는 “H 등급”에 대하여 절연체(1 모드), 절연유(1 모드), 탱크(1 모드), 부싱(1 모드)에서 나타났으며, 변압기에서 사용된 절연체는 열이나 기계적인 응력에 의해 열분해(탄성저하)되어 파손되며 과열, 화재를 야기할 수 있다. 또한 절연유는 코일에서 이상 동작 시 온도상승과 이상음이 발생하게 되고 과열되면 폭발 또는 정전 등을 일으킬 수 있다. 중요도 분석과 다르게 위험우선순위에서 절연유의 순위가 낮은 이유는 이상음 발생 및 높은 온도 등의 확인이 용이하다는 점에서 검출도 값이 낮게 나타났기 때문이다. 또한 중요도 분석에서는 순위가 낮게 나타났고 위험 우선순위에서 높게 나타난 코일의 단락 부분은 일상관리에서 검출이 용이하지 않아 검출도 값이 높아 위험우선순위가 높게 나타났다.

주제어 : 유입변압기, 고장모드영향분석, 위험우선순위, 중요도, 절연유, 전기화재

---

Profiles **Sang Chul Kim** : He obtained a doctorate in safety engineering from Chungbuk National University and is currently a professor of Health & Safety Engineering, Semyung University(sckim@semyung.ac.kr).