

Safety Assessment of Oil Immersed Transformer Applying Fault Tree Analysis and Functional Block Diagram

Sang Chul Kim⁺

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

Abstract

This study performs safety assessment of oil immersed transformer through the FTA (free tree analysis) method. Top events are detected along with their risks for each safety device, which is classified into the components, using the reliability evaluation software where FTA is applicable. The safety device of oil immersed transformer may cause overheating and fire of insulating oil due to the thermal characteristics shown as electrical energy of coils 1 to 3. In addition, in case of the unusual operation of the coil, the temperature of insulating oil may rise along with an unusual sound, which may cause an explosion or blackout if overheated. Thus, the management of safety devices responsible for temperature and pressure of insulating oil is very important. This study designs a functional block diagram for the safety devices of six dial thermometers, oil level gauge, auto-resetting pressure, pressure gauge, B-H relay and pressure relief vent. An FT diagram was drawn and analyzed through a designed functional blockage diagram.

Key words: oil immersed transformer, FTA, function block diagram, insulating oil, electrical

1. 서론

한국전기안전공사 2016년 ~ 2017년의 전기재해 통계분석에 의하면 단일 품목으로는 계량기(189건)의 재산상 손실은 건당 2,020,000원으로 나타났으며, 변압기(68건)는 건당 6,889,000원으로 나타나 단일 품목으로 재산상의 피해는 변압기가 가장 높게 나타났다(KESCO, 2016 & 2017). 특히 변압기의 경우에는 장비의 손실도 막대하지만 정전으로 인한 2차적인 경제적·사회적 손실은 상상이상의 손실을 초래할 수 있다(정

전으로 인한 2차 경제적 손실은 물론 사회적 혼란까지 야기할 수 있다). 이러한 이유로 변압기에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다(Kim, 2018). 그러나 변압기와 관련한 대부분의 연구는 수명 진단 또는 코일부분의 열적 특성 등이 대부분이며(KERI, 2016; Lee, 2006) 이런 연구가 있었음에도 현재까지 변압기에 대한 사고 발생건수는 줄어들지 않고 있다. 많은 이유가 있지만 그 중에서도 구성부품에 대한 체계적인 관리방법에 대한 사항은 없는 실정이다. 유입변압기의 구체적인 관리를 위해서는 구성부품 및 안전장치에 대한 기

⁺ Corresponding author: Sang Chul Kim, Tel. +82-43-649-1322, Fax. +82-43-649-1777, e-mail. sckim@semyung.ac.kr

능적 관계를 분석하고 이를 분석할 수 있는 블록다이어그램의 설계가 우선시 되어야 한다. 이런 블록다이어그램을 통하여 구성부품 및 안전장치에 대한 부품 개개의 고장우선순위를 분석하여야 한다. 이런 구성부품의 우선순위는 FMEA(Failure Modes and Effects Analysis)를 통하여 가능하다(Park, 2016; Kim, 2018). 그러나 FMEA는 구성부품 개개에 대한 고장우선순위이기 때문에 FMEA로 분석된 우선순위에는 한계가 있다. 특히 유입변압기는 구성부품 및 안전장치 간의 인과관계로 된 하나의 시스템으로 시스템적 관점의 신뢰성 분석기법을 필요로 한다. 따라서 구성부품 및 안전장치 간의 인과관계의 분석이 가능한 FTA(Fault Tree Analysis) 기법이 요구된다(Ku, 2008; Lim, 2012).

본 연구에서는 기능적 블록다이어그램을 통한 FTA를 분석하고자 하였다. 이를 위하여 기능적인 기반으로 유입변압기의 프레임(Frame), 안전장치인 파트(Parts)를 구분하여 블록다이어그램을 설계하였다. 변

압기의 특고압에서 상용전압의 에너지 변환에서 발생할 수 있는 열적인 특성과 이런 열을 방지하기 위한 절연유의 압력과 온도상승의 관계를 확인하였다. 그리고 이에 대한 관리 방안을 제시하고자 하였다. 본 연구는 유입변압기의 화재 및 폭발과 일상생활 속에서 변압기 위험분석의 안전자료로 활용이 가능할 것으로 사료된다(Kim, 2018).

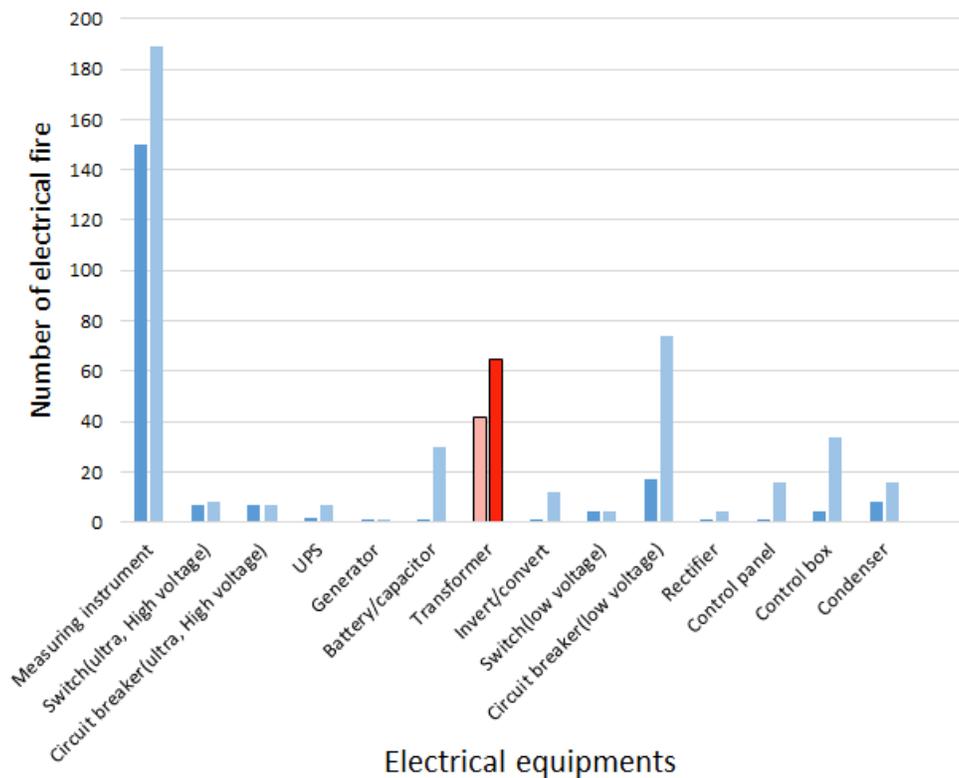
II. 본론

1. 발화기기별 발생현황

전기설비에 대한 발화기기별 발생현황은 전기화재 건수와 재산피해로 구분할 수 있다.

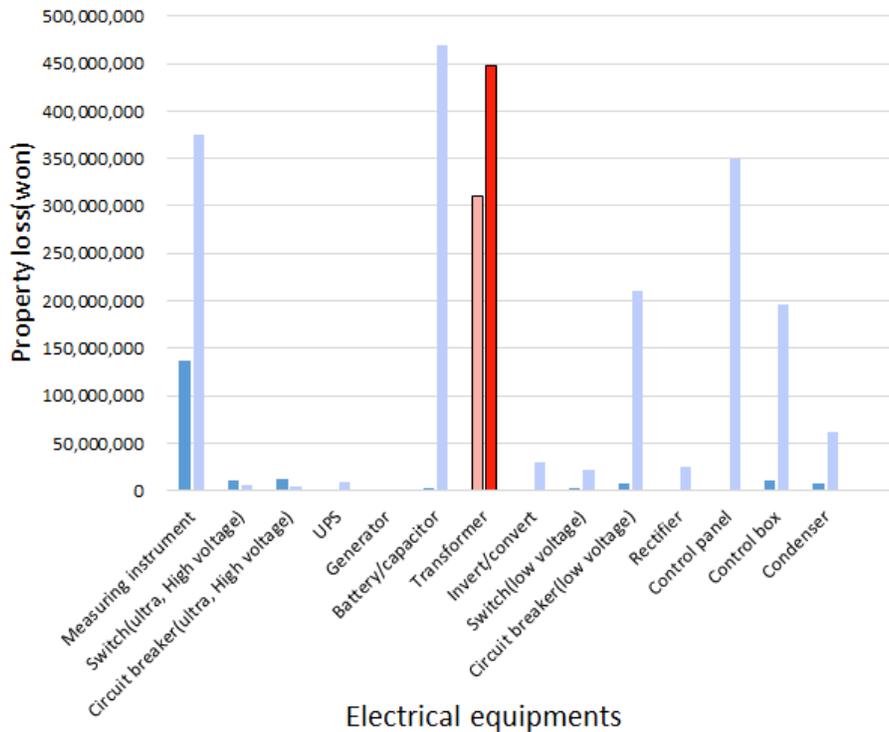
1) 발화기기별 전기화재건수 분석

<Figure 1>은 전기설비에 대한 발화기기별 발생현황으로 태양광 및 ESS와 관련된 배터리, 차단기, 콘트



※ Source: KESCO, 2016 & 2017.

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



※ Source: KESCO, 2016 & 2017.

Figure 2. Property loss for electrical equipments

를 박스에서의 화재가 큰 폭으로 증가하였으며 단일 품목으로는 계량기가 2016년도에 150건에서 2017년도에는 189건, 변압기가 42건에서 65건의 증가를 보였다. <Figure 1>은 한국전기안전공사에서 제시하고 있는 발화기기별 발생현황에 대한 전기화재 건수(건)를 나타내었다(KESCO, 2016, 2017).

2) 발화기기별 재산피해

단일 품목으로는 계량기(189건)의 재산상의 손실은 건당 2,020,000원으로 나타났으며, 변압기(68건)는 건당 6,889,000원으로 나타나 단일 품목으로는 변압기가 재산상의 피해가 가장 높게 나타났다. <Figure 2>은 발화관련기기에 대한 재산피해를 나타내었다(KESCO, 2016 & 2017).

2. 결함수분석(FTA)

1) FTA 분석 절차 및 방법

FTA 기법은 결함수 분석, 결함수목분석, 고장수목

분석 등의 여러 가지 용어로 번역되어 사용되기도 하지만, 어느 경우에도 기계, 설계, 인간-기계 시스템의 고장, 또는 재해 발생 요인을 나무구조를 갖는 도표에 의하여 분석하는 방법을 가리킨다(Lim 2012).

FTA의 분석절차는 기본적으로 분석 목적이나 분석 수준에 따라 다르지만 통상 <Figure 3>과 같은 순서에 따른다. 즉, 1) 정상사상의 선정, 2) 사상별 재해 원인, 요인 규명, 3) FT(Fault tree) 작성 및 분석, 4) MCS 및 중요도를 측정하고 분석 등의 4단계이다(Park, 2016).

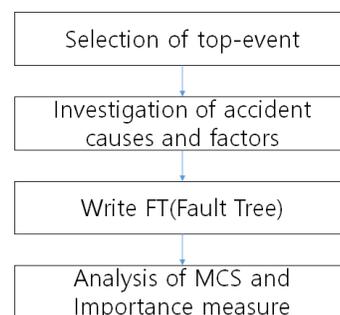


Figure 3. Sequence of FTA

2) 유입변압기의 구조 및 안전장치

유입변압기의 FTA를 실시하기 위해서는 구조의 구성부품과 각각의 안전장치의 기능을 분석하여야 한다. 유입변압기의 구조는 본체(Frame), 외함(Case), 절연유(Insulating oil), 안전장치로 크게 구분할 수 있다. 본체에서는 절연물(Insulator), 권선(Coil), 지지물(Supporting structure), 철심(Core)으로 구성되어 있으며 절연물은 권선을 절연하고 권선은 전기회로를 구성한다. 그리고 지지물은 권선 및 철심의 구조를 지지하고 철심은 자기회로를 형성한다. 절연유는 냉각 매체 및 절연을 위하여 유입변압기에 사용된다. 여기서 안전장치는 온도계(Dial thermometer), 유면계(Oil level gauge), 방압안전장치(Auto resetting pressure relief device), 압력계(Pressure gauge), B-H 릴레이(Buchholz relay)와 외함은 탱크(Tank)와 방열기(Pressure-relief vent)로 구성되어 있다. 탱크는 변압기 내부를 보호하는 용기이며 열을 방산한다. 방열기는 전달된 열을 발산해 준다(Kim, 2018).

유입변압기의 FTA를 실시하기 위해서는 구조의 구성부품과 각각의 안전장치의 기능을 분석하여야 한

다. 유입변압기의 구조는 본체(Frame), 외함(Case), 절연유(Insulating oil), 안전장치로 크게 구분할 수 있다. 본체에서는 권선(Coil), 철심(Core), 절연물(Insulator), 지지물(Supporting structure)로 구성되어 있으며 절연물은 권선을 절연하고 권선은 전기회로를 구성한다. 그리고 철심은 자기회로를 형성하고 지지물은 권선 및 철심의 구조를 지지한다. 절연유는 유입변압기에 사용하며 냉각 매체 및 절연을 위하여 사용된다. 여기서 안전장치는 온도계(Dial thermometer), 유면계(Oil level gauge), 방압안전장치(Auto resetting pressure relief device), 압력계(Pressure gauge), B-H 릴레이(Buchholz relay)와 외함은 탱크(Tank)와 방열기(Pressure-relief vent)로 구성되어 있다. 탱크는 변압기 내부를 보호하는 용기이며 열을 방산한다. 방열기는 전달된 열을 발산해 준다(Kim, 2018).

FTA에서 코일(Coil 1~3)에서 발생하는 전기적 열적 특성에 대하여 절연유는 온도의 상승 억제 및 코일의 안전한 온도상태를 유지하는 목적으로 운영된다. 변압기에서는 안전한 온도상태를 유지하고 보존하기 위

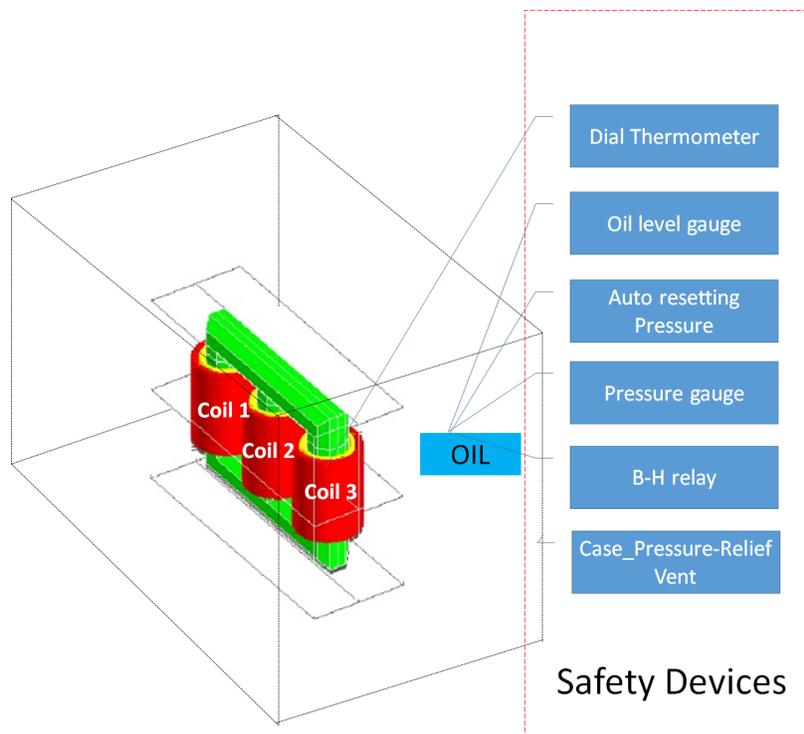


Figure 4. Construction and safety devices of oil immersed transformer

한 안전장치의 역할이 중요한데 이런 안전장치의 개별 고장으로 발생하는 인과관계를 조사할 필요가 있다. 무엇보다 안전장치의 기능적 분석이 우선시 되어야 한다. 먼저 온도계는 변압기 절연유 온도를 감지하고, 유면계는 온도변화에 따른 유량을 감지한다. 방압 안전장치는 내부압력 이상 시에 감지하며 이상 압력 시 외부로 방출한다. 압력계는 내부 압력을 감지하며 이상 압력시 외부로 방출한다. B-H 릴레이는 콘서베이터에 취부되며 내부이상에 따른 가스 발생 및 유속 이상 변환에 동작한다. 또한 방열기의 경우 내부로부

터의 고온 발생시 중단될 열을 발산해 주는 기능이 있다. <Figure 4>은 유입변압기의 구성 구조와 안전장치를 나타내었다.

3) 유입변압기의 기능적 작동원리 및 고장 시나리오
유입변압기의 기능적 작동원리는 프레임과 파트(안전장치)로 구분된다.

<Figure 5> a)는 유입변압기 전체의 기능적 작동원리를 나타내었다. 입력에서는 에너지관점, 절연유의 열적 특성과 압력 관점을 제시하였다. 에너지 관점은

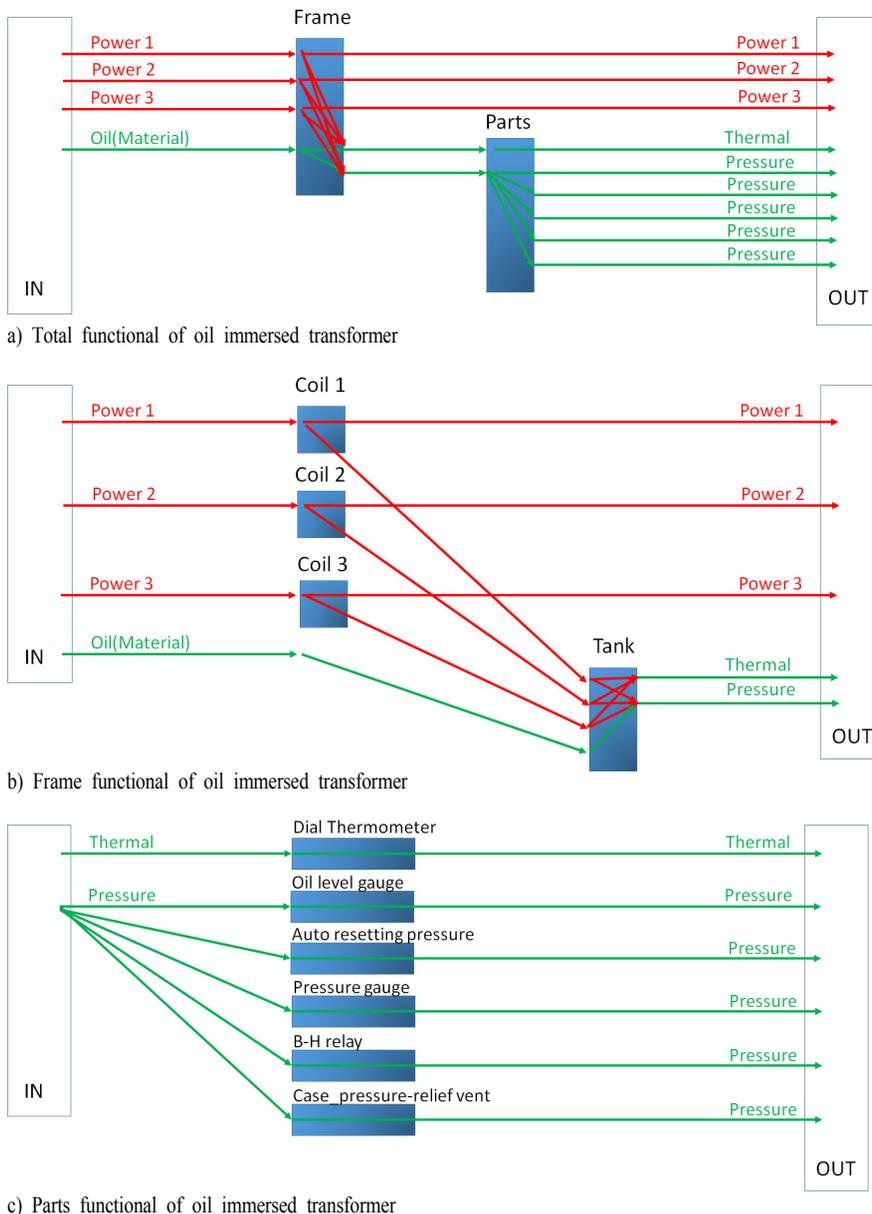


Figure 5. Consist of block diagram modeling for of oil immersed transformer

코일 1~3에서 에너지가 전달이 된다. 에너지가 전달됨에 있어서 코일이나 코어에서 열이 발생하게 되는데 이 열은 다시 절연유에 전달되게 되고 절연유의 상태를 감지하는 파트부분에서 온도 및 압력관계를 분석하여 계량기에 표시하거나 각종 안전장치가 동작하게 된다.

<Figure 5> b)는 유입변압기의 일부인 프레임 부분의 구성부품과 기능적 작동원리를 나타내었다. 코일의 입력은 특고압이 인가되며, 코일에는 전기적인 부분과 열적인 부분이 나타나게 된다. 전기적 부분은 다시 출력쪽으로 전달되어 출력 파트의 입력부와 연결된다. 또한 탱크는 절연유를 포함하고 있으며 절연유는 코일에서 발생하는 열에 의한 온도상승, 압력의 하강 및 상승 등의 변화를 바탕으로 파트에 해당 신호를 출력하게 된다.

<Figure 5> c)는 온도계, 유면계, 방압안전장치, 압력계, B-H 릴레이, 방열기를 나타내었다. 온도계는 열적 신호를 입력받아 온도를 출력하며, 나머지 안전장치의 경우는 압력의 낮음과 높음 여부를 판단하는 구조로 이루어져 있다. 이들 안전장치 개개의 문제와 연계되어 이상시 이를 발견하지 못하면 변압기에서 고장 또는 사고가 발생된다.

III. 결과 및 고찰

<Figure 6> a) ~ e)는 온도계, 유면계, 방압안전장치, 압력계, B-H 릴레이 및 방열기의 FT 도를 나타내었다.

<Figure 6> a)는 온도계의 FT도를 나타내었다. 온도계의 경우는 온도계 자체의 corrupted signal, distorted signal, Tank의 절연유의 온도상승에 기인된다. Tank 절연유의 온도상승은 Tank 자체의 Expanded, Decomposed, stiffness reduced와 Coil 1~3 자체의 Dielectric strength decreased, Fractured에 기인되어 온도가 상승하며, 온도상승 시에는 온도계, 절연유, Coil의 상태를 확인할 필요가 있다.

<Figure 6> b)는 유면계의 FT도를 나타내었다. 유면

계의 경우는 유면계 자체의 Fractured, Tank의 절연유의 온도상승에 기인된다. Tank 절연유의 온도상승은 Tank 자체의 Expanded, Decomposed, stiffness reduced와 Coil 1~3 자체의 Dielectric strength decreased, Fractured에 기인되어 온도가 상승하며, 온도상승 시에는 온도계, 절연유, Coil의 상태를 확인할 필요가 있다.

<Figure 6> c)는 방압안전장치의 FT도를 나타내었다. 방압안전장치의 경우는 유면계 자체의 Fractured, Tank의 절연유의 온도상승에 기인된다. Tank 절연유의 온도상승은 Tank 자체의 Expanded, Decomposed, stiffness reduced와 Coil 1~3 자체의 Dielectric strength decreased, Fractured에 기인되어 온도가 상승된다.

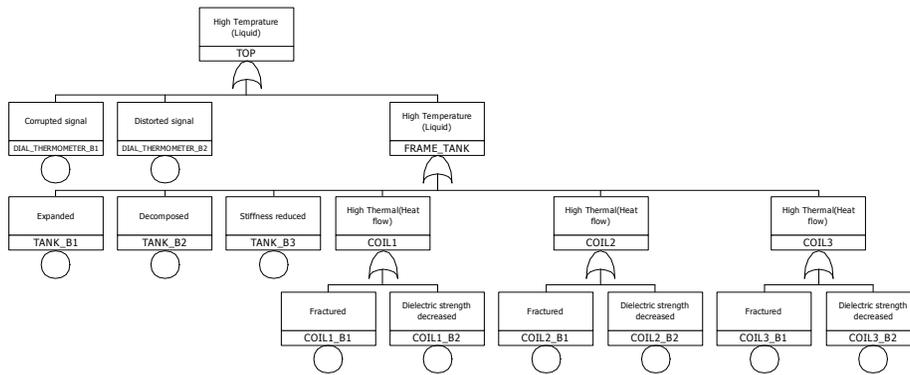
Distorted signal, Tank의 절연유의 온도상승에 기인된다. Tank 절연유의 온도상승은 Tank 자체의 Expanded, Decomposed, stiffness reduced와 Coil 1~3 자체의 Dielectric strength decreased, Fractured에 기인되어 온도가 상승된다.

<Figure 6> d)는 압력계의 FT도를 나타내었다. 압력계의 경우는 압력계 자체의 Corrupted signal, <Figure 6> e)는 B-H 릴레이의 FT도를 나타내었다. B-H 릴레이의 경우는 B-H 릴레이 자체의 Corroded, Open circuit, Short circuit, Pitted 과 Tank의 절연유의 온도상승에 기인된다. Tank 절연유의 온도상승은 Tank 자체의 Expanded, Decomposed, stiffness reduced와 Coil 1~3 자체의 Dielectric strength decreased, Fractured에 기인되어 온도가 상승됨이 확인되었다.

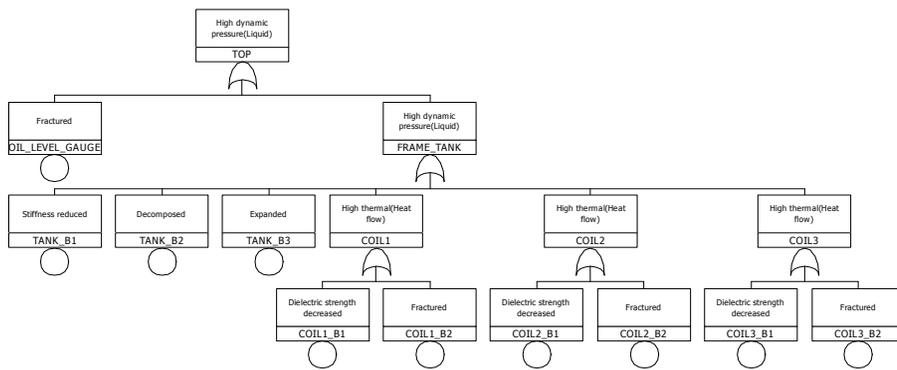
<Figure 6> f)는 방열기의 FT도를 나타내었다. 방열기의 경우는 방열기 자체의 Fractured 와 Tank의 절연유의 온도상승에 기인된다. Tank 절연유의 온도상승은 Tank 자체의 Expanded, Decomposed, stiffness reduced와 Coil 1~3 자체의 Dielectric strength decreased, Fractured에 기인되어 온도가 상승되었다.

IV. 결론

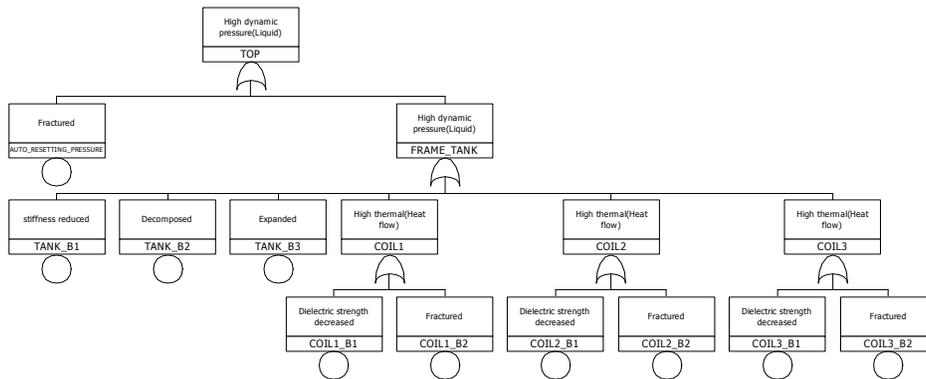
본 연구에서는 유입변압기에 대하여 기능적 작동



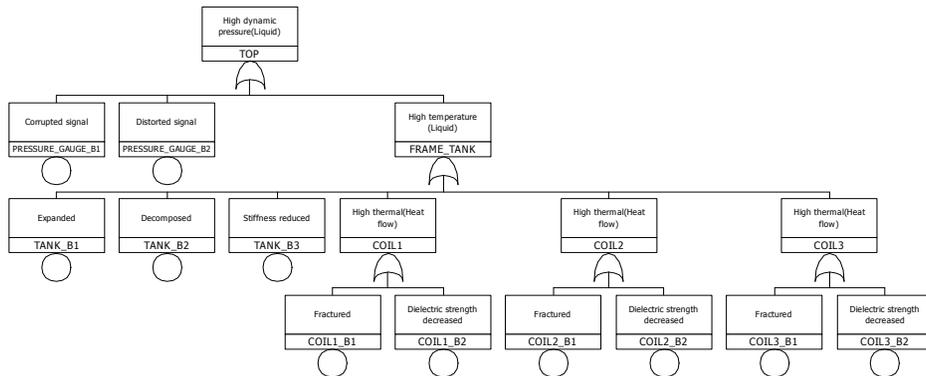
a) High temperature of thermometer



b) High pressure of oil level gauge

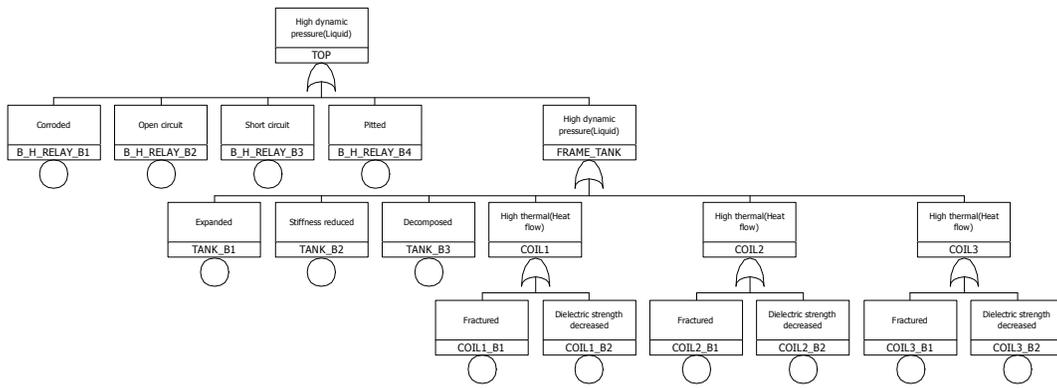


c) High pressure of auto resetting pressure

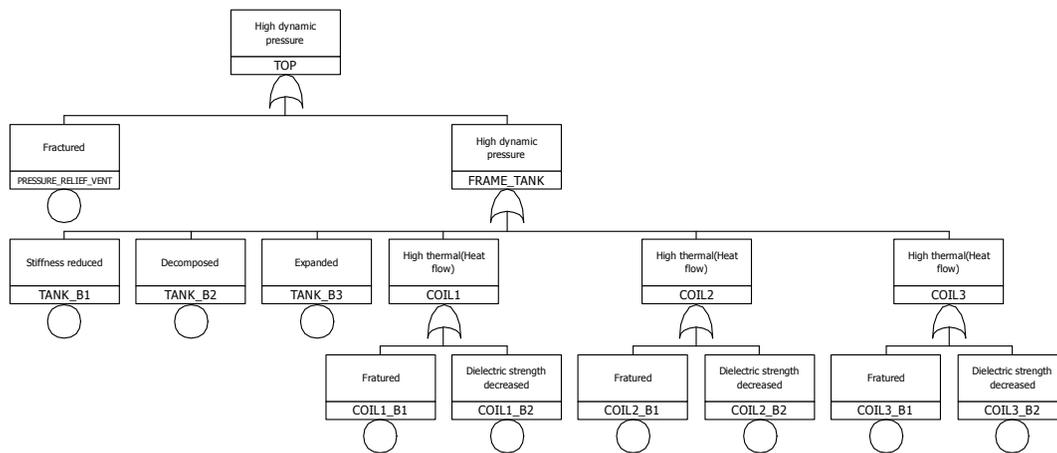


d) High pressure of pressure gauge

Figure 6. FT diagram for oil immersed transformer



e) High pressure of B-H relay



f) High pressure of pressure-relief vent

Figure 6. FT diagram for oil immersed transformer (continued)

흐름을 바탕으로 블록다이어그램을 설계하고 에너지, 열적, 압력인 관계를 바탕으로 각각의 모델을 제시하였다. 이를 통하여 온도계, 압력계, 방압안전장치, B-H 릴레이 및 방열기의 FT 도를 도출하였으며 최종적으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 유입변압기에 대하여 전력변환과 절연유와 연관된 프레임과 각종 안전장치가 포함되어 있는 파트 부분을 구분하고 각각의 기능을 제기하였다. 기능적 제시를 통하여 상호 발생 가능한 고장모드에 대하여 전기, 기계, 환경 및 물질에 대해 결함을 제시하였고 이를 연계하였다.

2) 유입변압기의 온도 상승은 Coil 1~3 자체의 절연 내력 저하(Dielectric strength decreased), 코일자체의 균열 또는 열화(Fractured)에 기인되어, 안전장치의 경우는 구성부품의 확장(Expanded), 부식(Decomposed), 강

도 감소(stiffness reduced)가 주원인으로 나타났다. 이런 원인이 발생할 경우 온도계, 절연유, Coil의 상태를 확인하여야 한다.

3) 전력변환에서 발생 가능한 온도적 변화의 출력 사항인 온도계와 압력에 의해 위험성에 대한 장치인 유면계, 방압안전장치, 압력계, B-H 릴레이 및 방열기 등의 압력저항에 대한 고장원인을 FT도로 도출하였다.

4) 유입변압기는 아파트, 공공시설 및 산업시설의 전원 공급용으로 사용되고 있다. 요즘 아파트에서는 변압기 화재 및 폭발로 인한 정전으로 생활 안전을 위협하고 있으며, 또한 전기관리자들은 화재 및 폭발로 인한 인적재난에도 노출되어 있다. 따라서 최종적으로 도출된 FT도를 통하여 유입변압기의 체계적인 안전관리가 가능하고 이 분석을 통하여 인적재난과 생활안전을 예방할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2018학년도 세명대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 수행된 연구임.

References

- IEEE Gold Book. 2007. Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems. PP: 259-300.
- KERI. 2016. Establishment of Estimation Techniques for the Remaining Life of Electric Power Facilities. 15-12-N0101-86. PP: 11-12.
- Kim, Sang Chul. 2018. An Analysis of the Impact of Failure Modes for Components of Oil Immersed Transformer. *Crisisonomy*. 14(5): 137-148.
- Kim, Sang Chul. 2018. Failure Modes and Effect Analysis of Electrical System at Indoor Wires and Wiring Appliances. *Crisisonomy*. 13(6): 97-14.
- Korea Electrical Safety Corporation. 2019. <http://www.kesco.or.kr>.
- Ku, Bon Hui, Jun Min Cha, and Hung chul Kim. 2008. Reliability Analysis of Distribution Systems by Using FTA. Symposium the Autumn of The Korean Institute of Electrical Engineers(KIEE). PP: 247-249.
- Lee, Jeong Geun. 2006. Temperature Distribution Analysis of Power Transformer According to Short-Circuit between the Coil.

Master's Thesis. Dong-A University.

- Lim, Hyeon Kyo. 2012. *System Safety Engineering*. Hansol Academy. PP: 146-147.
- Park, Young Ho. 2016. Failure Modes and Effect Analysis for Electric power Installations of D University. *Journal of KOSOS*. 31(5): 7-15.

Korean References Translated from the English

- 구분희, 차준민, 김형철. 2008. FTA를 이용한 배전계통 신뢰도 분석. 2008년도 대한전기학회 전력기술부분회 추계학술대회. pp: 247-249.
- 김상철. 2018. 유입변압기 구성부품에 대한 고장영향모드분석. *위기관리학회*. 13(6): 97-14.
- 박영호. 2016. D대학 수변전설비의 고장모드 영향 분석. *한국안전학회지*. 31(5): 7-15.
- 이정근. 2006. 권선간 단락사고에 따른 변압기의 온도분포 해석. *동아대학교 대학원*. PP: 1-3.
- 임현교. 2012. 시스템안전공학. 한솔아카데미. PP: 146-147.
- 한국전기연구원. 2016. 전력설비 잔존수명 예측기술 정립. 15-12-N0101-86. PP: 11-12.
- 한국전기안전공사. 2019. 전기안전포털시스템. 전기화재통계. <http://www.kesco.or.kr>.

Received: May. 8, 2019 / Revised: Jul. 9, 2019 / Accepted: Jul. 15, 2019

기능적 블록다이어그램과 FTA를 적용한 유입변압기 안전성평가

국문초록 본 연구에서는 유입변압기에 대하여, 통계자료 분석을 통하여 그 위험성을 확인하였다. 또한 구성부품과 안전장치를 분류하였고 FTA 기법 적용이 가능한 신뢰성평가 소프트웨어를 이용하여 각각의 안전장치에 대한 정상사상을 발견하고 이를 바탕으로 위험성을 도출하였다. 유입변압기의 안전장치는 코일 1~3의 전기적 에너지로 나타나는 열적 특성에 의해 절연유의 과열, 화재를 야기할 수 있다. 또한 절연유는 코일에서 이상 동작시 절연유의 온도 상승과 이상음이 발생하게 되고 과열시에 폭발 또는 정전 등을 일으킬 수 있으므로 절연유의 온도와 압력을 담당하는 안전장치의 관리는 매우 중요하다. 본 논문에서는 온도계, 유면계, 방압안전장치, 압력계, B-H 릴레이, 방열기 6개의 안전장치에 대한 중요성을 감안하여 기능적 블록 다이어그램을 설계하였다. 설계된 기능적 블록다이어그램을 통하여 FT도를 작성하였고 정상사상을 분석하였다.

주제어 : 유입변압기, 결함수분석, 기능적 블록 다이어그램, 절연유, 전기화재

Profiles **Sang Chul Kim** : He received Ph.D. from Chugbuk Natuonal University and he works semyung university in now. He is electrical safety main subject(sckim@semyung.ac.kr).