

154kV 방재형 난연 변압기 냉각특성에 관한 연구

박정호, 오원근*, 하영식
(주)효성 중공업연구소

A Study on the Cooling Characteristic of a 154kV Less-Flammable Power Transformer

J. H. Park, W. K. Oh*, Y. S. Ha
Hyosung Corporation Ltd.

Abstract

Demand for development of 154kV Less-Flammable Power transformer is now increasing greatly instead of a oil-immersed transformer for preventing disasters and Less-flammability of substations.

The most important point in developing Less-flammable transformer is cooling system.

This paper describes the study on cooling characteristic of Less-flammable transformer.

한 오일펌프등 최적의 냉각시스템을 구성하여야 한다.

2.1.1 난연변압기 냉각시스템 및 냉각구조

당사가 개발한 난연변압기는 옥내지하변전소의 방재형변전기기로 사용되며, 대용량인 이유로 강제냉각 방식(송유수냉식(FOW), 송유풍냉식(FOA))을 적용한다. 특히, 전체의형축소 및 고효율의 냉각 성능을 확보하기 위하여 송유수냉식(FOW) 냉각시스템을 구성하였고, 개략적인 구조는 그림 1과 같다. 권선 및 철심에서 발생한 열에 의해 온도가 상승한 절연유를 유펌프를 이용하여 강제순환시켜서 수냉식 냉각기를 통과하면서 열을 방출하게 하도록 구성한다. 이때 수냉식 냉각기에는 냉각수가 공급 되어진다. 또한 냉각 장치는 변압기 용량 및 소비전력을 감안하여, 고효율 냉각장치로 선정하며, 변압기 상당 2세트(1세트:운전용, 1세트:예비용)으로 구성되며, 절연유 순환펌프에는 유류를 검출하는 계전기가 있으며, 냉각수 및 절연유 정지밸브를 설치한다. 수냉식냉각기 내의 절연유와 냉각수는 혼합될 경우 절연유의 수분함침으로 인한 변압기 절연사고가 발생하므로 혼합되지 않도록 제작되며, 이에대한 방지책으로 수냉식냉각기내에서의 누수또는 누유시 이를 감지할 수 있는 누설감지기를 부착한다.

(방재형난연변압기 사양)

1. 서 론

방재형 난연변압기에 절연 및 냉각매질로 사용되는 난연성 절연유(R-Temp)는 발화점은 광유에 비해 약 2배 가량 높은 잇점은 있으나, 점도가 일반 광유보다 약 10배(40℃ 기준) 가량 높으므로, 변압기의 안정된 냉각특성을 유지하기 위해서는 권선의 최적 냉각 구조설계, 적정 냉각시스템이 중요시된다.

따라서 본 논문에서는 당사에서 개발 완료한 방재형 난연 변압기(1∅ 154/23kV 20MVA FOW)의 냉각특성에 대한 연구내용을 서술하고자 한다

2. 본 론

2.1 변압기의 일반적인 냉각특성 검토

변압기의 부하손실(Load Loss), 무부하손실(Noload Loss)로 발생하는 열은 권선과 철심에서 냉매로 전달되며, 특히 대용량변압기의 경우는 철심부분에서는 직접 냉매에 전달되지만, 권선부분에서는 도체절연지를 통과하여 냉매에 전달된다 .

이와같이 권선부분에서 발생한 열을 절연물 손상없이 변압기가 장기간 안정적인 운전이 될 수 있도록 규정온도이하로 제한하기 위해서는, 변압기 권선내부의 냉각구조와 더불어냉각기 및 절연유순환을 위

항 목	사 양
상수 및 주파수	1∅ 60Hz
정격전압	1차:2차:3차 154/√3 : 23/√3 : 6.6kV
냉각방식	송유수냉식(FOW)
절연 및 냉각매질	난연액체(R-Temp)
탭전압(1차)	(154±12.5%)/√3 kV
정격용량 (1차,2차)	20 MVA
백분율	(20±2.0)%
임피던스(1차-2차)	

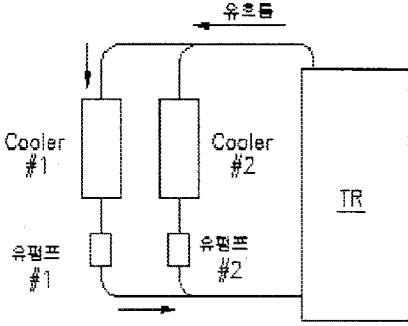


그림 1 송유수냉식 냉각구조 개념도

방재형 변압기의 주요발열부위인 권선내부에는 그림2와 같이 zig-zag 오일유탄사를 삽입하여, 권선내부의 국부과열(hotspot)을 방지하고, 권선냉각을 극대화시킬수 있는 구조로 설계, 제작되었다

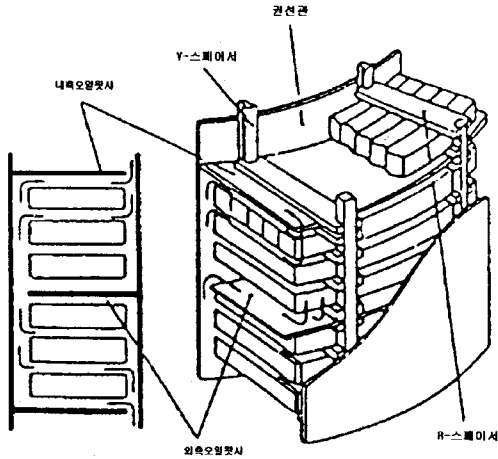


그림 2. zig-zag 오일유탄사 권선 냉각구조

2.1.2 난연변압기 냉각특성 연구

난연변압기의 냉각성능과 온도상승은 냉각매질인 R-Temp유의 열적특성, 절연유 순환량에 따른 권선내 절연유속 그리고 냉각기특성에 따라 좌우된다.

난연성 절연유(R-Temp)의 물리적특성치는 표1과 같으며, 기존 일반 유입식변압기에 사용되는 광유와 유사한 특성을 가지고 있으나, 동점도가 매우 높으므로, 냉각설계시 이런 특성을 우선적으로 고려하여야 한다.

표 1 난연성절연유(R-Temp) vs 광유 물리적특성치 (@ 75℃)

특성 \ 종류	광유	R-Temp
발화점(℃)	144	312
밀도 ρ (kg/m ³)	849	844
비열 C(W · sec/m ² ℃)	2080	2036
열전도도 λ (W/m · ℃)	0.1272	0.1223
열팽창계수 β (1/℃)	7.95	7.50
동점도 ν (m ² /sec)	4.7	16.6

상기 표1과 같이 광유대비 난연성절연유(R-Temp)의 동점도는 75℃에서 3.5배이며, 온도가 낮아질수록 매우 커진다.

방재형 변압기의 전체 Winding-to-Oil Difference θ는 도체 절연에 의한 온도강하(θ_i)와 도체표면과 Oil에서의 온도강하(θ_s)의 합으로 계산된다.

■ Insulation Drop(θ_i)

(절연지의 열전도에 의한 온도강하)

$$\theta_i = \frac{W_s}{k} \times t_i$$

여기서 W_s : 권선의 열전달 밀도 [Watt/in²]

A_s : Phase당 표면적 [in²]

k : 절연지의 열전도도 [W/in²℃]

t_i : 테이핑 중수를 고려한 절연지 두께 [in]

· 절연지의 열전도에 의한 온도강하(θ_i) 계산

- 고압권선(HV) : 3.1℃

- 중압권선(XV) : 1.4℃

■ Surface Drop(θ_s)

(도체 절연지 표면과 흐르는 Oil에 의한 온도강하)

이 Surface Drop(θ_s)는 유속의 함수이다. 유속은 Pumping되는 전체 유량, 유로단면적 그리고 모든 권선을 통과하여 흐르는 압력강하의 균형에 의존한다.

· 절연지의 열전도에 의한 온도강하(θ_i) 계산

- 권선유로단면적 (Flow Path area)

$$A = [M.T. - W_R \times N_R] \times D \times N_D \text{ [in}^2\text{]}$$

- D : Duct 두께 [in]
- N_D : No. of Parallel Duct
(Zig-Zag당 병렬 Duct의 평균갯수)
- W_R : R-Spacer 폭 [in]
- N_R : R-Spacer 등배수 [개]

고압권선(HV) : 219.56 in²
 중압권선(XV) : 153.22 in²

- Velocity Ratio : K_L
 $V_{XV} = K_L V_{HV}$
 $K_L = 1.095$

- 각 권선의 유속계산

$$V_{HV} = \frac{Q}{A_{HV} + K_L A_{XV}} \quad [\text{in}/\text{sec}]$$

$$V_{XV} = K_X \times V_H \quad [\text{in}/\text{sec}]$$

고압권선(V_{HV}) : 3.85 in/sec
 중압권선(V_{LX}) : 4.22 in/sec

Surface Drop (θ_s)

$$\theta_s = W_s \cdot \theta_{s1} = \frac{a W_s}{V^b} \quad (a, b: \text{상수})$$

고압권선(HV) : 17.0 °C
 중압권선(XV) : 14.9 °C

- Winding-to-Oil Difference θ (Gradient ; α)
 = (θ_i) + (θ_s)
 고압권선(HV) : 20.1 °C
 중압권선(XV) : 16.3 °C

- 최고유온도상승 : 41 °C

$$\frac{\text{Core \& Coil Heat Run Loss}}{\text{Cooler 용량} \times \text{대수}} \times (\text{냉각기 입출구 유온의 차})$$

- 평균유온도상승 : 36.8 °C

$$\frac{\text{Core \& Coil Heat Run Loss}}{\text{Cooler 용량} \times \text{대수}} \times (\text{냉각기 최고 유온상승치} - \frac{\text{냉각기 입출구 유온의 차}}{2})$$

- 평균권선온도상승

: 평균유온상승 + Gradient α 값 [°C]
 고압권선(HV) : 56.9 °C
 중압권선(XV) : 53.1 °C

2.1.3 온도상승시험

난연변압기에 전전류의 부하가 걸렸을 때 유온도상승치 및 권선온도상승치를 측정하기 위한 성능검증 시험은 변압기 2차권선은 단락하고 1차권선에 전원을 인가하는 단락법에 의해 실시하였으며, 그 결과는 표2와 같다.

표 2 온도상승시험 결과

		온도상승한도	시험결과
절연유 (R-TEMP)		55 °C	42.5 °C
권선	고압권선	65 °C	58.2 °C
	중압권선		54.0 °C

• 온도상승한도와 시험결과 차이 : 실제 변압기의 과부하운전등을 고려하여, 난연변압기 설계시 10°C 낮게 설계하였다.

• 고압·중압권선의 온도차이: 4.2°C 차이 발생 요인은 변압기 기본특성치(%임피던스등)를 만족하는 최적설계를 및 제작에 따른 고·중압 코일의 단위면적당 근소한 손실차이로 인한 차이이며, 운전시 온도상승한도 이하이므로 문제가 없다.

2.1.4 난연성절연유 온도에 따른 냉각특성연구

냉각시스템을 구성하는 절연유 순환펌프 및 수냉식 냉각기는 R-temp 난연성 절연유의 온도에 따른 동점도의 영향으로 표3과 같이 유량 및 냉각용량이 변화한다.

상기 온도상승계산 및 온도상승성능검증시험은 난연변압기에 전부하 전류일 때를 고려한 계산 및 시험한 결과이며, 실제 부하가 80%로 사용될 경우 부하손실의 대부분을 차지하는 권선 저항손실이 64%로 감소한다. 또한 R-Temp 유온 변화로 인해 권선내 절연유량 및 유속이 감소하며, 수냉식 냉각기 냉각용량도 140kW로 낮아짐을 알 수 있다. 결론적으로 저부하로 인한 손실감소로 인해 유온도상승이 낮아짐으로써 절연유 순환펌프의 유량도 감소하지만 실제적인 변압기는 손실의 감소로 인해서 전부하시보다 낮은 온도에서 운전된다.

표 3 R-Temp 유온에 따른 절연유순환펌프 특성

동점도	554.4cSt	256.4cSt	14.1cSt
유온	10 °C	20 °C	80 °C
유량	90 m ³ /h	100 m ³ /h	120 m ³ /h
냉각용량	120 kW	130 kW	150 kW

3. 결 론

154kV방재형 난연 변압기는 절연 및 냉각매질로 사용되는 R-Temp는 광유에 비해 발화점은 높은 반면, 그의 동점도가 매우 높기 때문에 온도상승 등 냉각특성 연구가 핵심 기술이다.

당사에서는 1상 154kV 20MVA 방재형난연변압기 피시품 설계, 제작 및 개발시험을 성공적으로 완료함으로써 난연변압기 냉각특성 기술을 확립하였다.

본 개발성과를 바탕으로 "한국전력의 방재형 난연 변압기"의 신규시장에 적극 대처할 수 있게 되었으며, 수입대체효과와 아울러 초고압변압기의 난연화 기술을 확립, 기술력향상 및 국제경쟁력을 갖추는데 교두보를 확보했다.

향후에는 수주품 납품 및 장시간 Site운전 자료를 수집, 검토하여 기술을 정립시키고, 유체해석 프로그램을 이용한 냉각특성 해석을 통해서 냉각특성연구 기술을 한단계 향상시킬 계획이다. 또한 154kV급 대용량변압기의 다양한 사양의 상용품을 연구하여, 해외물량 수주 및 수출을 적극 추진할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] "IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Less Flammable Hydrocarbon Fluid in Transformers", IEEE Std C57.121-1998
- [2] "Temperature Rise" IEEE std C57.12.90-1993 SUB. CLAUSE 11
- [3] "Transformer for Electric Power Industry", Richard L. Bean, Westinghouse Electric Corporation, 1959
- [4] "Eddy Current in Linear Conducting Media", J.A. TEGOPOULOS, ELSEVIER, 1985