

풍력발전기용 밀폐형 변압기의 식물성 절연유에 대한 열적특성 연구[§]

이성원^{*†} · 이준엽^{*} · 김준수^{**} · 우재희^{**} · 김동해^{*}

* 현대중공업 기계전기연구소, ** 현대중공업 전기전자시스템 사업본부

Thermal Analysis of Vegetable Insulation Oil for Hermetically Sealed Wind Turbine Transformer

Sungwon Lee^{*†}, Joon-Yeob Lee^{*}, Jun-Su Kim^{**}, Jae-Hi Woo^{**} and Dong-Hae Kim^{*}

* Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries. Co., Ltd.,

** Electro Electric Systems, Hyundai Heavy Industries. Co., Ltd.

(Received December 24, 2010; Revised October 11, 2011; Accepted October 21, 2011)

Key Words : Hermetically Sealed Type(완전 밀폐형), Mineral Oil(광유), Silicone Oil(식물성유), Vegetable Oil(식물성유), Wind Turbine(풍력발전)

초록: 변압기 외부에 방열핀을 설치한 밀폐형 오일변압기는 절연유의 온도상승으로 인해 부피가 팽창할 경우 방열핀의 내부 부피가 확장되어 압력상승을 방지한다. 본 연구에서는 생분해도가 높아 환경친화적이고, 인화점 및 발화점이 높아 화재의 위험도가 낮은 식물성 절연유를 이용하여 당사 풍력발전기에 적용할 밀폐형 오일변압기를 개발하였다. 열·유동 전산수치해석 기법을 이용하여 식물성 절연유 냉각성능을 광유 및 실리콘유와 비교·분석 하였으며, 밀폐형 오일변압기의 개발을 위하여 변압기 중신부의 열적 안전성을 확보하고 절연유의 온도변화에 따른 내부 압력변화에 대응이 가능한 팽창형 방열핀을 개발하였다. 추가로 온도상승시험을 통하여 수치해석 결과와 시험 결과를 비교 분석 하였으며, 식물성 절연유를 사용한 밀폐형 오일 변압기의 설계 고려사항을 도출하였다.

Abstract: A hermetically sealed oil transformer is designed by applying expanding function of the tank due to the volume changes of the insulation oil according to the temperature rises. When the insulation oil expands, an increase in the volume of the corrugated fin prevents a pressure rise of the transformer. For a wind turbine transformer, a vegetable-oil-immersed transformer has the advantages of excellent biodegradation and fire-resistant properties like an exceptionally high fire point. When vegetable oil is substituted for mineral oil, however, the maximum winding temperature rises because of the decrease in the internal circulation flow rate resulting from the variations of the oil's physical characteristics, such as density and viscosity. The purpose of this study is to develop a hermetically sealed vegetable oil transformer that can be applied in a wind turbine and to analyze the thermal stability of the active part of the transformer to deal with pressure variations due to the temperature changes. In addition, thermal tests for the vegetable oil transformer have been performed, and the measured values are compared with the analysis results.

- 기호설명 -

E : 내부에너지

k : 열전도도

p : 압력

T : 온도

u, v, w : x, y, z 방향의 속도 성분

α : 열확산율

μ : 점성 계수

ρ : 밀도

τ : 스트레스 텐서

1. 서론

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회(2010. 11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임

† Corresponding Author, sungwon@hhi.co.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

밀폐형 오일변압기(Hermetically Sealed Oil Transformer)는 절연유 팽창에 따른 변압기의 확장 기능을 방열기에 적용시킨 것으로 내부 절연유가

팽창시 방열핀(Corrugated-fin)의 내부 부피가 확장되어 압력상승이 방지된다.⁽¹⁾ 이러한 팽창형 방열기 구조의 오일변압기는 절연유의 부피팽창을 제어하기 위한 컨서베이터(Conservator)가 제거되어 전체적인 변압기의 높이가 낮아지고 경량화, 간소화되어 최근 풍력발전기에 사용되는 사례가 많아지고 있다.⁽²⁾ 변압기의 절연유로 사용되고 있는 광유(Mineral Oil) 및 실리콘 절연유(Silicone Oil)는 수분에 민감하고 화재위험성과 환경오염의 단점이 있음에도 불구하고, 전기적 절연 안전성과 가격 경쟁력이 높기 때문에 많이 사용되고 있다. 반면 풍력용 변압기는 설치 공간의 제약으로 인하여 변압기의 소형·경량화를 위한 고전류 밀도의 권선설계가 필수적이다. 따라서 고온 절연시스템이 요구되며, 특히 해상풍력발전기의 경우 친환경 조건 및 과부하 운전에 따른 폭발방지를 위하여 발화점이 높은 난연성 친환경의 식물성 절연유 사용이 요구되고 있다.⁽³⁾

최근 전세계적으로 환경규제법이 강화되어 친환경 전력기기의 개발 필요성이 대두됨으로써 선진사에서는 2001년부터 식물성 절연유 변압기 개발을 위한 연구를 진행하고 있으며, 국내에서도 시장 선점을 위하여 당사를 포함한 다수의 회사에서 연구를 진행하고 있다.⁽⁴⁾ 식물성 절연유(Vegetable Oil)는 광유 및 실리콘 절연유에 비해 재생이 용이하고, 높은 발화점으로 난연성이 뛰어나며, 오일의 외부 노출 시 분해성이 좋은 친환경 절연유이다.⁽⁵⁾ 그러나 가격이 비싸고 산화 안전성이 낮으며, 수분에 대한 친화력이 커서 변압기에 사용하는데 어려움이 있다. 특히 식물성 절연유는 광유에 비해 점성이 크고 열전달 성능이 현저하게 떨어져서 절연유 특성에 맞는 냉각 및 절연설계가 필수적으로 요구되고 있다. 비록 식물성 절연유는 초기의 전기적 특성이 광유와 유사하지만 아직 열화특성이 완전히 규명되지 않고 있다.⁽⁶⁾ 특히 식물성 절연유의 높은 점도는 권선부의 냉각 작용에 나쁜 영향을 줄 수 있고, 높은 수분 함유량이 장기간 사용하는 변압기 권선의 층간 절연 및 냉각에 나쁜 영향을 미칠 수 있기 때문에 식물유 변압기의 절연 및 냉각효과에 맞는 적절한 냉각설계 개념의 정립으로 친환경 변압기의 열적 안전성이 확보되어야 한다.^(7,8) 난연성 식물성 절연유중 DC 561 (Pauwels/Slim Transformer) 및 Midel 7131 (Pauwels/Bio-slim Transformer)이 풍력발전기용 변압기의 절연유로 사용된 적이 있다. ABB, France Transfo 는 FR3 및 BIOTEMP 등의 식물성 절연유

를 해상 구조물용으로 사용하였다. 모두 컨서베이터가 제거된 완전 밀폐형으로 공기 흡수층(Air Cushion)이 없는 형식이다.

따라서 본 연구에서는 당사 풍력발전용 완전 밀폐형 오일변압기의 개발을 위하여 식물성 절연유의 열적 특성을 일반 광유 및 실리콘유와 비교하였으며, 변압기 중신부의 열적 안정성 확보를 위한 설계 고려사항을 도출하고자 한다.

2. 전산해석

2.1 지배방정식과 수치해석

본 연구의 전산해석에는 상용 S/W인 Fluent 6.3을 사용하였다. 지배방정식은 3차원 비정상상태 및 비압축성 유동에 대한 질량, 운동량 및 에너지 보존의 원리로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + (\rho_\infty - \rho) \vec{g}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \vec{v} \cdot \nabla p = \vec{v} \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (\vec{v} + \vec{\tau})$$

위의 지배방정식을 각 해석요소(Grid Cell)에 대하여 체적 적분하여 얻어진 유한체적 대수방정식을 풀기 위하여 SIMPLE 알고리즘을 채용한 반복해법을 사용하였다.

2.2 입출구조건 및 경계조건

풍력발전용 유입식 변압기의 본체 구조는 Fig. 1과 같이 변압기의 외함, 방열핀 및 중신부로 이루어져 있다. 중신부는 철심과 권선으로 이루어져 있으며, 발열부에 해당된다. 풍력용 변압기의 경우 공간축소를 위해 컨서베이터를 제거하였기 때문에 방열핀이 팽창과 수축이 가능하도록 설계하여 그 기능을 대신하도록 했다.

Fig. 1은 해석 모델인 당사 풍력발전용 변압기를 모델링한 것으로, 전체 크기는 높이 1.7 m, 너비 1.9 m, 폭 0.8 m이다. 변압기 중심에 철심과 권선이 위치하고 냉각을 위하여 외함에 주름형 방열핀이 부착되어 있다. 주름형 방열핀의 길이는 1.4 m이고 폭은 0.19 m이다. 방열핀 간격은 45 mm이며, 총 방열핀의 개수는 108 매이다. 전산해석 결과의 정확성을 높이기 위해 방열핀 내부의 8 mm의 유로에 조밀한 계산격자를 생성하였으며, 자연 대류 열전달을 효과적으로 해석하기 위하여 권선부 주위에는 경계층 계산요소를 사용하였다. 본

연구에서는 전산해석 결과의 정확성을 높이기 위해 실제 모델에 근접한 모델링 작업을 수행하였다. 특히 두께가 1.4 mm 인 플레이트 핀을 쉘 전도 (Shell Conduction) 모델로 모델링하고, 경계층 계산 격자 (Boundary Layer Mesh)를 생성하여 오일 및 냉각공기 사이에서 일어나는 대류 및 전도에 의한 열전달 해석결과의 정확성을 높였다.⁽⁹⁾

Table 1 은 풍력발전용 변압기 온도상승 해석에 적용된 물성치이다. 탱크의 외함 및 방열핀은 일반강재인 SA-36 이고, 권선부분은 구리를 사용하였다. Table 2 는 풍력발전용 유입식 변압기에 사용하는 절연유의 특성을 온도에 따라 정리한 것이다. 식물성 절연유는 광유에 비해 10%정도 큰 밀도와 3 배 정도 높은 점도를 가진다. 하지만 발화점이 높아 화재발생에 대해 저항력이 크며 외부 노출시 분해성이 좋아 친환경 절연유로 분류된다. 절연유의 동점성 계수는 온도별로 크게 변화하므로 온도에 따른 점도변화를 고려하여 해석을 수행하였다. 변압기 내부는 절연유로 가득 차 있으며, 절

Table 1 Material properties of the wind turbine transformer types

Items	Density [kg/m ³]	Specific Heat [J/kg-K]	Thermal Conductivity [W/m-K]
Tank : Steel (SS400)	7,850	502.48	16.27
Winding : Copper	8,978	381	387.6
Air	1.22	1006.43	0.024

Table 2 Material properties of the wind turbine transformer oil

Material Properties	Mineral Oil	Vegetable Oil		Silicone Oil (DC 561)
		Midel 7131	FR3	
Density [kg/m ³]	850	970	920	960
Kinematic Viscosity [cSt]	100 °C	2.87	5.25	8
	40 °C	11.2	28	34
	0 °C	63.5	240	184
Thermal Conductivity [W/m-K]	0.120	0.144	0.168	0.151
Specific Heat [cal/gm-K]	0.46	0.45	0.45	0.36
Thermal Expansion Coefficient [1/K]	7.3E-04	7.5E-04	7.4E-04	1.04E-04

연유의 입구와 출구가 없는 완전 밀폐형이다. 온도상승에 의한 절연유 부피팽창은 팽창형 방열핀의 내부 부피가 확장되어 압력상승이 방지된다. Table 3은 풍력발전용 변압기 손실을 정리한 것이다. 각각의 작동조건별로 다른 부하를 가지며 권선내 발열량도 달라지게 된다. 여기서 권선의 손실은 한상(1φ)당 손실을 나타낸다.

3. 전산해석 결과 및 검토

3.1 자연대류 열유동 해석결과

Fig. 2 는 풍력용 유입식 변압기 온도분포를 나타낸 결과이다. 열유동 해석 결과의 왼편에서 최대 상승 온도값을 나타낸다. 절연유는 광유

Table 3 Heat generation of the wind turbine Transformer according to operating conditions

	HV-LV mode		HV-TV mode		HV-LV mode	
	Rate		Max.		Min.	
	Loss [kW]	Power Density [W/m ³]	Loss [kW]	Power Density [W/m ³]	Loss [kW]	Power Density [W/m ³]
TV	-	-	1.2	385109	-	-
LV	2.9	134259	-	-	2.9	134259
HV	3.8	125123	0.4	13171	4.2	138294
TAP	0.2	51020	0.03	7653	-	-
Core	3.1	4158	3.1	4158	3.1	4158

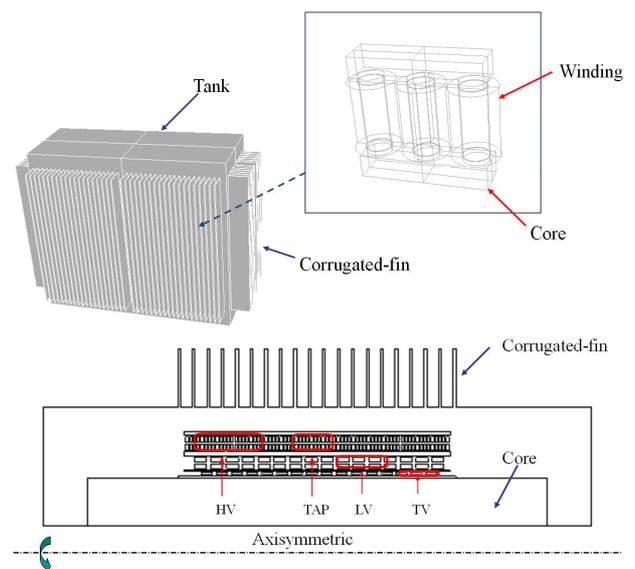


Fig. 1 Schematic diagram of the wind turbine transformer with corrugated-fin

(Mineral Oil)를 사용하였을 경우의 해석 결과이며, 변압기의 운전 조건별로 결과를 정리하였다. Fig. 2(a)는 정격 운전조건에서의 온도분포 조건이다. 정격 운전 조건에서는 Table 4 에서 보듯이 LV 권선에서의 손실값은 2.9 kW 로 HV 권선에서 손실값 3.8 kW 보다 작다. 하지만 LV 권선의 체적이 HV 권선보다 적으므로 발열 밀도로 보면 LV 권선에서의 발열밀도가 가장 높게 된다. Fig. 2(b)는 최대 운전조건에서의 온도분포 조건이다. 최대 운전조건에서는 TV 권선에서의 손실값이 1.2 kW 로 크지는 않지만 TV 권선의 체적이 작으므로 매우 높은 발열밀도를 가지게 된다. 이는 HV-LV Mode 가 아닌 HV-TV Mode 로 작동을 할 경우이기 때문이다. 따라서 발열밀도의 값은 상당히 높게 되지만 손실값 자체가 크지 않기 때문에 Fig. 2(b)에서 보듯이 온도상승은 작게 나타난다. Fig. 2(c)는 최소 운전조건에서의 온도분포이다. Table 4 는 각각의 운전조건별로 광유를 사용하였을 경우에 풍력발전용 유입식 변압기의 평균온도와 최대온도를 정리한 것이

Table 4 Temperature results of the wind turbine transformer using mineral oil

	HV-LV Mode		HV-TV Mode		HV-LV Mode	
	Rate		Max.		Min.	
	Max. Temp.	Avg. Temp.	Max. Temp.	Avg. Temp.	Max. Temp.	Avg. Temp.
TV	25.75	19.64	17.25	7.30	27.43	20.80
LV	35.37	21.12	9.67	6.00	37.24	22.25
HV	31.35	22.00	9.97	6.30	33.52	26.29
TAP	23.75	23.43	6.96	6.50	24.65	22.72
Core	22.52	10.40	12.22	9.23	24.83	11.77
Fin	-	6.80	-	1.25	-	7.57
Oil	-	16.02	-	5.50	-	17.18

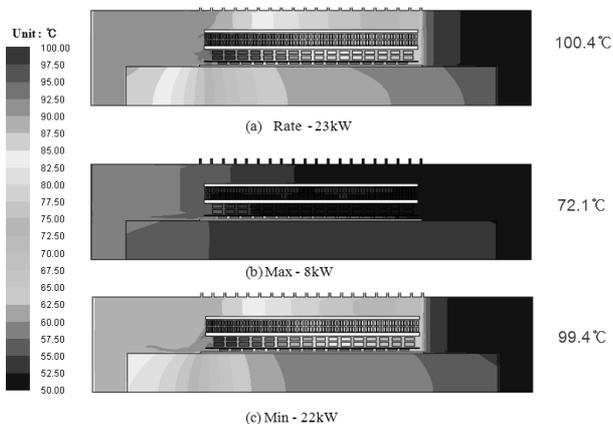


Fig. 2 Temperature distribution of the wind turbine transformer using mineral oil

다. 평균온도는 도체 주변의 절연유의 온도이며

Fig. 3은 정격운전 조건에서 절연유의 종류별로 속도분포를 나타낸 것이다. 완전 밀폐형 변압기이므로 냉각방식은 권선부에서의 온도 상승에 따른 절연유의 밀도변화에 의한 자연대류 냉각방식이다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 변압기 상부에서 오일이 순환하는 것을 볼 수 있다. 절연유의 동점성 계수가 높아질수록 유동의 순환이 원활하지 못하여 온도상승 값이 큰 것을 확인할 수 있다. 최고 유속을 비교해 보면 광유는 0.236 m/s, 식물성 절연유는 0.157 m/s, 실리콘유는 0.14 m/s이다.

Fig. 4는 운전조건은 정격조건으로 하였을 경우에 절연유의 종류를 변경하였을 때의 온도 분포 결과이다. 절연유는 광유, 식물성 절연유 및 실리콘유를 사용하였으며 온도변화에 따른 절연유의 물성치 변화를 고려한 해석을 수행하였다. 광유에 비하여 식물성 절연유 및 실리콘유는 비중 및 점도가 높기 때문에 온도적인 측면에서 보았을 경우에 광유보다 열적으로 불리하다. 그러나 세계에너지 환경 변화에 따른 국제적인 환경규제로 인하여 난연성 식물성 절연유를 사용한 풍력발전용 변압기가 요구되는 실정이다.

Table 5는 정격운전 조건에서 절연유의 종류별로 평균온도와 최대온도를 정리한 것이다. 표에서 보듯이 광유보다는 식물성 절연유 및 실리콘유에서 온도상승이 큰 것을 볼 수 있으며, 각각의 권선 및 오일의 온도를 확인할 수 있다.

본 연구에서는 추가적으로 친환경 변압기 제작을 위하여 풍력발전기의 나셀 내에 설치된 실적이 있는 식물성 절연유(Midel 7131, FR3) 중에 발화점 성능이 우수한 FR3 를 이용하여 3 차원 자연대류 해석을 수행하였다.

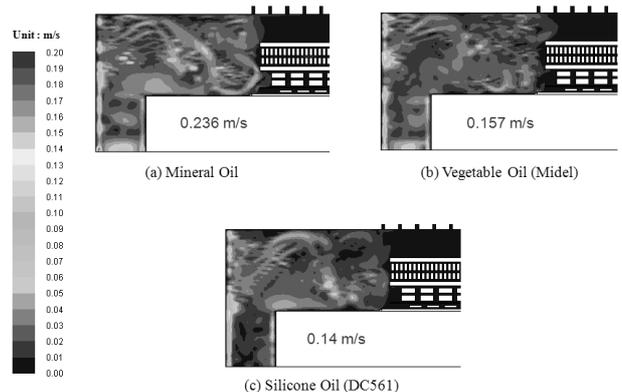


Fig. 3 Velocity distribution of the rated operating condition

Table 5 Temperature results of the rated operating condition

	Rate					
	Mineral Oil		Vegetable Oil (Midel)		Silicone Oil (DC 561)	
	Max. Temp.	Avg. Temp.	Max. Temp.	Avg. Temp.	Max. Temp.	Avg. Temp.
TV	35.06	25.35	40.89	28.73	44.46	30.04
LV	45.06	27.47	50.40	31.61	55.01	33.87
HV	41.72	29.03	48.40	34.02	54.61	36.94
TAP	31.60	30.96	37.16	36.16	40.21	38.85
Core	29.61	12.19	37.99	16.02	41.02	16.56
Fin	-	7.75	-	6.82	-	6.07
Oil	-	19.76	-	22.70	-	24.32

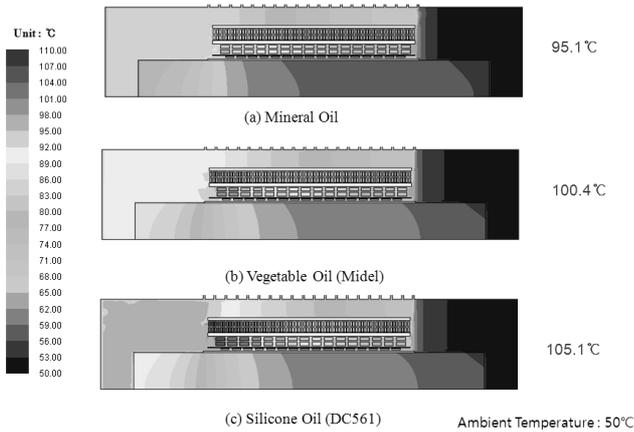


Fig. 4 Temperature distribution of the rated operating condition

4. 실험 및 검증

4.1 온도상승 시험

온도상승 시험에는 밀폐형 풍력용 변압기의 시험용 모델을 제작하여 두 종류의 절연유(일반 광유, MIDEL 7131)를 사용하였으며, 변압기에 부하를 인가하여 온도상승을 측정하였다. Fig. 5는 당사 밀폐형 변압기와 온도상승 시험장치를 나타낸다. 제작초부터 온도상승 실험을 위하여 변압기의 권선 내부에 Fiber Optic Sensor를 취부하여 제작하였으며, Thermocouple과 화상카메라로 변압기 각 부위의 온도를 측정하였다. Fig. 6은 정격 운전조건에서의 3차원 자연대류 해석 결과와 온도상승 시험 결과를 비교한 것이다. 온도상승 시험결과 절연유의 최고온도는 121.5 °C로 기준 설계온도인 135 °C 이하를 만족하였으며, 실제 해석결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.



Fig. 5 Experiment apparatus for a HHI's wind turbine transformer

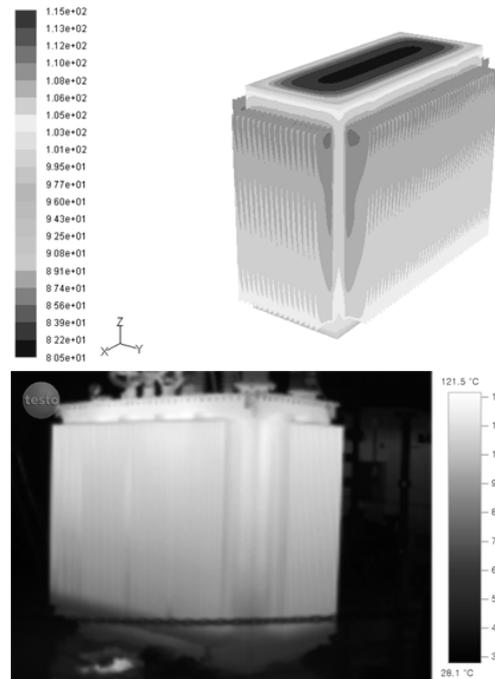


Fig. 6 Temperature distribution of the wind turbine transformer using vegetable oil

5. 결론

본 연구에서는 당사 풍력발전용 밀폐형 오일변

압기의 설계에 필요한 식물성 절연유의 열적 안전성 평가를 위하여 절연유 종류에 따른 온도상승 해석을 수행하였고, 실험을 통해 결과를 검증하였다. 관련 연구를 정리하면 다음과 같다.

(1) 식물성 절연유는 광유에 비해 10% 정도 큰 밀도와 3 배 정도 높은 점도를 가지며, 이로 인해 변압기 내부의 좁은 유로에서 유동 손실이 발생하기 때문에 냉각 성능이 떨어지게 된다. 그러나 실리콘 절연유에 비해서는 비열이 크고 밀도 및 점도가 5% 이상 낮기 때문에 절연유로서의 열적특성은 유리하다.

(2) 변압기의 열적 안전성을 확보하기 위하여 절연유의 종류변화에 따른 중신부의 온도상승을 예측하였다. 정격운전 조건에서 광유, 식물성 절연유 및 실리콘 절연유를 사용하는 경우의 권선온도를 예측하였으며, 이때 실리콘 절연유 > 식물성 절연유 > 광유 순으로 온도상승이 크게 나타남을 확인하였다.

(3) 자연순환 냉각방식에서 식물성 절연유는 광유에 비하여 순환유량이 30% 정도 줄어들고 이로 인해 각 권선부에서 최대 20%의 온도상승이 발생한다. 특히 풍력용에 사용될 식물성 절연유의 경우 일반 광유보다 약 15%의 냉각효율이 저하되는 것으로 계산되었다. 따라서 식물성 절연유를 사용한 변압기의 권선 설계시 기존 광유를 이용한 오일변압기보다 권선 내 덕트의 단면적을 크게 설계하고 권선의 전류밀도를 낮추어 설계하여야 한다.

참고문헌

- (1) Altmann, G., 1997, "Hermetically Sealed Distribution Transformers," Trafo-Union, Inc.
- (2) Declercq, J. and Schevensteen, R. V., 2004, "Performance and Fire Behavior of Step-Up Transformers in Wind Turbines."
- (3) Bertrand, Y. and Hoang, L. C., 2004, "Vegetable Oils as Substitute for Mineral Insulating Oils in Medium-Voltage Equipments," *CIGRE*.
- (4) Tenbohlen, S., Koch, M., Vukovic, D., Weinlader, A., Baum, J., Harthun, J., Schafer, M., Barker, S., Frotscher, R., Dohnal, D. and Dyer, P., 2008, "Application of Vegetable Oil-Based Insulating Fluids to Hermetically Sealed Power Transformers," *CIGRE*.
- (5) Voukelatos, J. and Stenborg, P., 2005, "Natural Ester(Vegetable Oil) Dielectric Fluid Application In Transformers," Cooper.
- (6) Cooper Power Systems, 2001, "Environtemp FR3 Fluid - Bulletin 00092 Product Information."
- (7) M&I Materials Ltd, 2007, "Comparative Data Sheet Midel 7131 and Midel eN," Technical data sheet Nr. 3.
- (8) McShane, C. P., 2001, "Relative Properties of the New Combustion Resist Vegetable Oil Based Dielectric Coolant for Distribution and Power Transformers," *IEEE T&A* Vol. 37, No. 4, pp. 1132~1139.
- (9) Goldstein, L. J. and Sparrow, E. M., 1977, "Heat/Mass Transfer Characteristics for Flow in a Corrugated Wall Channel," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 99, pp. 187~195.