

변압기 sheet권선 손실 및 온도 상승 해석

김지현, 김영만, 노경철
(주)효성 중공업연구소

Analysis of transformer sheet winding losses and temperature rise

Kim Ji-hyun, Kim Young-man, Ro Kyoung-chui
Power & Industrial Systems R&D Center, Hyosung Corporation

Abstract - This paper describes analysis of transformer sheet winding losses and temperature rise. Sheet windings are used if transformer rating currents are so high that one meets current density limit on windings. Unlike stranded windings, sheet windings may be locally heated due to R direction flux. Winding losses with eddy current effect are calculated by finite element electromagnetic analysis and temperature rise is also calculated by Computational Fluid Dynamics (CFD) with loss result.

1. 서 론

변압기에 사용되는 권선의 종류는 형태별로 각각 환선, 평각선 및 sheet(판)으로 구분된다. Sheet권선은 비교적 타 권선에 비해 절연이 용이하고 가공성이 좋고, 단면적이 커져 저전압-고전류 사양이 요구되는 배전용 변압기에서 종종 사용된다. 하지만 반경 방향의 누설 자속성분의 영향으로 인해 권선에서 와전류에 의한 손실이 평각도체에 비해서 크게 발생될 수 있으며, 이로 인해 권선의 국부과열을 초래 할 수 있으므로, 온도상승 검토를 위해 정확한 손실계산이 요구된다.

본 연구에서는 손실계산에 유용한 전자기 해석법을 이용하여 변압기 sheet 권선의 손실 분포를 계산하고 분포 영역을 나누고 손실값을 전산유체해석(Computational Fluid Dynamics: CFD)을 이용해 자연대류를 고려한 권선 온도 상승 및 Hot spot 온도를 계산하여 설계에 적용하였다. 모델링에는 R-Z 축대칭 좌표계를 사용하였으며, 해석을 위한 상용프로그램으로 전자기해석에는 상용 프로그램인 Maxwell2D V10을, CFD해석에는 Fluent V6.1을 사용하였다.

2. 본 론

2.1 해석모델

해석 대상이 되는 모델은 그림 1과 같이 저압측 권선은 sheet 권선으로 구성되어 있고 고압측 권선은 평각선으로 구성되어 있다. 회전축을 중심으로 철심이 위치하며 철심과 권선간은 냉각 및 절연을 위한 절연유로 채워져 있다. sheet 권선 간에는 절연을 위한 절연지가 끼워져 있고 권선간 및 철심간 절연을 고려해 상간 배리어를 사용하였고 본 연구의 해석 범위를 sheet 권선으로 한정시키기 위해 고압 권선으로 구성되는 평각도선을 소선(stranded)으로 간주하여 와전류 손실을 고려하지 않았으며, 저압측 sheet권선의 와전류 손실을 고려하였다. 변압기 권선의 부하손실을 계산하기 위해서는 2차원 R-Z 축대칭 모델링이 비교적 널리 사용되고 있으며[1], 손실결과를 이용 자연대류를 고려한 CFD해석을 위해 용이한 방법이다

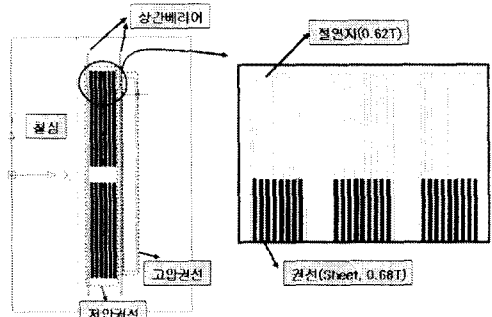


그림 1. 해석모델의 외형도

해석모델의 일반적인 사양은 표 1과 같다.

표 1. 해석모델 변압기 사양

사	양	비	고
전압	22.9kV/6.166kV		
용량	10MVA		
권선타입	Sheet 권선	0.68T	
평균권선 온도상승	55t	Hotspot 65t	

2.2 지배방정식

2.2.1 시변자장(time varying magnetic field)문제

맥스웰 방정식에서 교류자장의 와전류 문제를 풀기위해 식 (1) 및 식(2)를 이용한다.[2]

$$\nabla \times H = J \tag{1}$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{2}$$

여기서,

- H: 자계
- J: 전류밀도, $J = \sigma E$ 에 의한
- σ : 전기전도도
- E: 전기계
- B: 자속밀도, $B = \mu_0 \mu_r H$ 에서 계산됨
- μ_0, μ_r : 공기중의 투자율, 비투자율

와전류가 발생하는 도체 영역에서는 H는 입력 전류 및 인가자계로부터 식(3)에 의해 구해지고, 그 외의 영역에서는 자기 스칼라 포텐셜 Φ 로부터 식(4)에 의해 계산된다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\sigma + j\omega\epsilon} \nabla \times H \right) = j\omega\mu H \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\mu \nabla \phi) = 0 \quad (4)$$

도체의 와전류에 의한 손실은 식(5)와 같다.

$$P = RI^2 = \frac{1}{2\sigma} \int_V J \cdot J^* dV \quad (5)$$

2.2.2 부력을 고려한 온도 해석 문제

자냉식 변압기 온도상승 계산을 위해 부력을 고려하여야 하며 식 (6)-(9)의 지배방정식을 따른다.

질량 보존 방정식 (Continuity Eq.)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

운동량 보존 방정식 (Momentum Conservation Eq.)

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g\beta(T - T_\infty) + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (7)$$

체적팽창 계수 (Volumetric Expansion Coefficient.)

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \approx -\frac{1}{\rho} \frac{\rho_\infty - \rho}{T_\infty - T} \quad (8)$$

에너지 보존 방정식 (Energy Conservation Eq.)

$$\frac{\partial u_i \rho C_p T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} K \frac{\partial T}{\partial x_j} + q \quad (9)$$

여기서,

- u, v : 속도 [m/s]
- g : 중력가속도 [m/s^2]
- β : 체적팽창율
- c_p : 비열 [$J/kg \cdot K$]
- ρ : 밀도 [kg/m^3]
- k : 열전도계수 [$W/m \cdot K$]

2.3 해석조건 및 방법

2.3.1 손실계산 해석 조건

와전류를 고려한 sheet 권선 손실계산을 위해 다음과 같은 사항을 가정한다.

- 가. 해석 대상은 축방향에 대해 대칭이다.
- 나. 철심의 철손 및 고압권선의 와전류 손실은 해석 대상에서 제외한다.
- 다. 록플레이트, 단철 및 기타 철구조물은 해석대상에서 제외한다.
- 라. 해석대상은 해석 영역 외부로부터 자계의 영향을 받지 않는다.

권선 손실을 계산하기 위해 부하해석을 실시한다. 부하 해석을 위해서 고압 및 저압 권선에 서로 부호가 다른 정격 암페어턴(AT)을 인가하여 와전류 해석을 실시한다. 손실 해석을 위한 sheet 권선의 물성치는 표 2와 같다.

표 2. sheet 권선의 전기적 물성치

Sheet 권선	
재질명	구리(copper)
전기전도도	4.76×10^7 [S/m]
비투자율	0.999991

2.3.2 권선온도상승 해석 조건

자냉식 변압기 권선 온도상승 계산을 위해 다음과 같은 가정을 한다.

- 가. 해석대상은 축방향에 대해 대칭이다.
- 나. 자연 냉각식 변압기 오일의 자연대류를 해석하기 위해 오일의 밀도는 Boussinesq 방식으로 처리하였다.
- 다. 해석 경계조건은 그림 2와 같으며 권선 상, 하부는 압력 경계조건을 사용하였다.
- 라. 권선 유입 오일 온도는 기존의 변압기 시험 결과로 토대로 $60^\circ C(30^\circ C \text{ rise})$ 로 가정하였다.

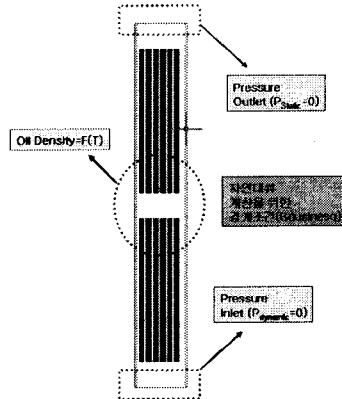


그림 2. 권선온도 계산 경계조건

2.4 해석결과

2.4.1 sheet 권선 손실 분포

sheet 권선 주위 공기중의 등자속분포는 그림 3과 같다.

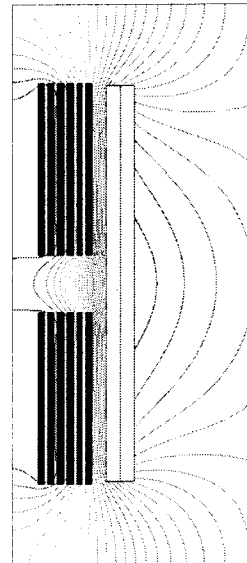


그림 3. 공기중 sheet 권선 주위 등자속분포

그림 3에서 sheet 권선의 양 끝단부에서 R방향 자속이 Z방향에 비해 다소 높아서 손실 밀도가 높을 것임을 추정할 수 있다. 식 (5)에 의해 얻어진 sheet 권선 손실 및 위치는 그림 4 및 표 3에 나타내었다.

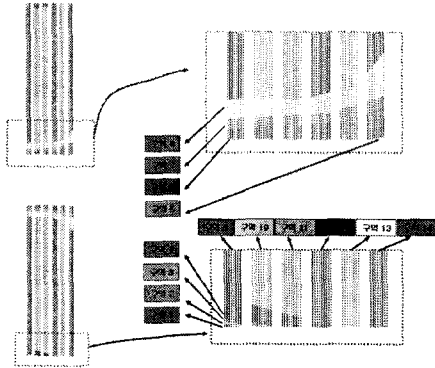


그림 4. sheet권선 손실 밀도 분포(구역)

표 3. sheet권선 손실 밀도 값 및 체적

구역	손실(W/m ³)	권선체적(m ³)	비고
구역1	3.00E+6	1.644E-5	Total 손실 9412W
구역2	2.40E+6	2.467E-5	
구역3	2.10E+6	6.789E-5	
-	-	-	
구역12	1.00E+5	7.239E-3	
구역13	1.20E+5	6.699E-3	
구역14	1.60E+5	6.618E-3	

2.4.2 sheet 권선 온도 상승 분포

그림 4 및 표 3에서 sheet 권선 특성상 위치에 따른 와전류 손실 차이로 인해 손실 분포가 매우 크며, 권선 평균 손실값을 이용해서는 정확한 온도 분포를 구할수 없기 때문에 구역을 1에서 14등분으로 나누어 손실밀력 값으로 대입하였다.

그림 5는 저압 권선 하부 온도 상승 분포를 나타낸 그림으로, 권선별 온도차는 크지 않으며, 평균 40℃ 온도상승을 나타내고 있다. 국부적으로 손실 밀도가 높은 곳이 있으나, 평균 손실이 권선 하부 쪽은 낮은 편이어서, 국부 손실 증가에 대한 추가 온도상승은 없는 것으로 판단된다.

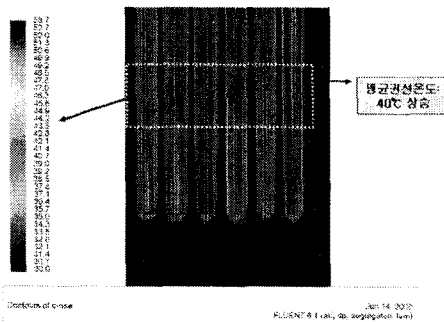


그림 5. 저압 권선 하부 온도 분포 (rise)

그림 6은 저압 권선 중단부의 온도 분포를 나타낸 그림으로, 자속이 집중하는 고압측 권선에서 Hot spot이 발생하며, 이는 일반적인 평각도체를 사용하는 초고압 변압기의 온도분포와는 발열 부위가 많은 차이를 보인다. 이는 앞서 설명한 sheet권선 사용으로 인한 와전류손실의 영향이 큰 것으로 보인다.

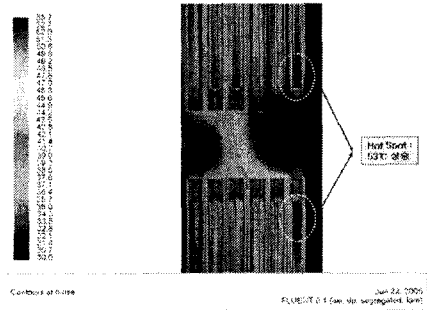


그림 6. 저압 권선 중단부 온도 분포 (rise)

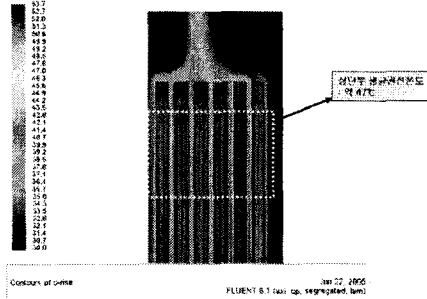


그림 6. 저압권선 중단부 온도 분포 (rise)

그림 6은 저압권선 중단부 온도 분포이며, 유속이 느린 권선간의 발열이 다소 보이나 평균 권선온도는 47℃ 정도로 양호한 편이며, 중단에서는 Hot spot 부위는 없는 것으로 판단된다.

3. 결 론

변압기 sheet권선 손실 해석 및 온도상승 해석을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

가. sheet 권선을 해석한 결과 다음과 같은 온도 해석 결과를 얻었다.

표 4. 변압기 온도 해석 결과

	온도	비고
평균권선 온도상승 (t)	43.67	보증치 : 55℃
평균오일 온도상승 (t)	32.74	
상부유온 온도상승 (t)	38.20	보증치 : 50℃
Hotspot 온도상승 (t)	53.70	보증치 : 65℃

나. 해석 대상을 저압권선 및 절연지만을 모델링 하였으므로, 실제 시험 시에는 절연물 배치 등에 의해 유효 흐름이 방해 될 수 있으므로, 해석 결과보다는 다소 온도가 높게 나타날 것으로 판단된다.

다. 추후 제작된 변압기 시험을 통해 온도상승 해석치와 시험치를 비교 검증할 계획이며 전자계-열계 연성 해석을 통해 해석의 신뢰도를 높일 수 있으리라 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Robert M. Del Vecchio et al, "Transformer Design Principles", p380, 2001
- [2] 김지현 외, "유한요소법을 이용한 컨버터 변압기 북플레이트 설계", 대한전기학회 하계학술대회, B권, p954, 2005