2008년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2008. 7. 16 - 18

FEM을 이용한 컨버터용 변압기 여자전류 및 와전류 손실해석

이정근*, 이곤*, 조익춘*
(주) 효성 중공업연구소*

Analysis of Converter Transformer Exiting Current and Eddy Loss by FEM

Jeong-Geun Lee*, Gon Lee*, Ik-Choon Cho*
Power & Industrial System R&D Center, Hyosung Corporation*

Abstract - 본 논문은 컨버터용 변압기의 여자전류 해석을 통해 DC 성분 유입시 자속밀도-여자전류 곡선 그래프를 도출하여 철심포화 여부를 확인하며, 철심 공극에 의해 발생되는 누설자속(Leakage Flux)으로 인한 철구조물(Lock Plate)의 와전류 손실을 계산하였다.
변압기 해석을 위해 상용 해석 소프트웨어인 Maxwell 3D를 이용하였고, 철심의 비선형성을 고려하여 해석하였다.

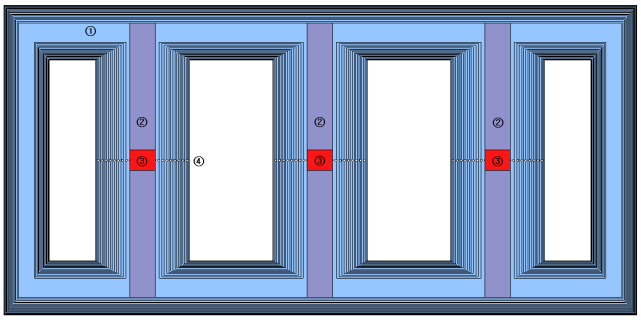
1. 서 론

컨버터용 변압기는 직류성분이 변압기 2차측으로 유입되어 철심의 포화를 일으킬 수 있으며, 이로 인해 변압기 철심, 권선 및 기타 철 구조물의 온도상승을 유발할 수 있다. 그러므로 보통 컨버터용 변압기는 DC 성분이 유입되어도 철심이 포화되지 않도록 철심에 공극을 두어 설계한다.
본 논문은 컨버터용 변압기의 여자전류 해석을 통해, 자속밀도-여자전류 곡선 그래프를 도출하였으며, 이를 통해 DC성분 유입시 철심이 포화되는지를 확인하였다. 또한 컨버터 변압기의 철심 공극에 의해 발생되는 누설자속(Leakage Flux)으로, 철구조물(Lock Plate)의 와전류 손실이 높을 것으로 예상되어 STS(Stainless)와 SS400을 혼용하여 철구조물을 설계하였으며, 와전류 손실해석을 통해 각각 다른 두 재질의 손실을 비교하였다.
변압기 해석을 위해 상용 해석 소프트웨어인 Maxwell 3D를 사용하였고, 철심의 비선형성을 고려하여 해석하였다.

2. 본 론

2.1 해석모델

본 연구에 사용된 컨버터용 변압기의 외형 및 사양은 각각 그림 1 및 표 1과 같다.



<그림 1> 변압기 외형
(①:철심, ②:Lock Plate(SS400), ③:Lock Plate(STS), ④:공극)

<표 1> 변압기 사양

상 수	3상	전압(1차/2차)	345/30.92kV
각 수	5각	용 량	100MVA
주파수	60Hz	자속밀도	1.4T
결 선	Y-Δ	턴수(1차/2차)	850/132

2.2 지배방정식 및 해석방법

2.2.1 여자전류 해석

맥스웰 방정식으로부터 식 1과 같이 지배방정식을 유도하였으며, 다음과 같은 해석조건을 통하여 자속밀도(B)-여자전류(I_{ex}) 곡선을 도출하였다.

- 지배방정식

$$\nabla\times\left(\frac{1}{\mu}\nabla\times\vec{A}\right)=\vec{J} \quad (\mu:\text{투자율},\ \vec{J}:\text{전류밀도[A/m}^2\text{]}) \quad (1)$$

- 해석조건
  1) 해석평면은 Z축에 대해 대칭
  2) 권선 및 철심의 와전류손을 무시
  3) 변위전류에 의한 영향은 고려 안함
  4) 자기 비선형성을 고려하여 비선형 해석 실시
  5) 철심의 over lap 효과 무시

- 해석방법

해석을 통해 도출된 자속밀도(B)-여자전류(I_{ex}) 곡선을 이용하여 DC 성분 유입시 자속밀도 상승분($\triangle B$)을 계산하여 공극이 있을 때와 없을 때를 비교한다. 또한 DC 성분 유입에 의한 철심 포화 여부를 확인한다.

2.2.2 와전류 손실 해석

맥스웰 방정식에서, 교류자장의 와전류 문제를 풀기위해 식 2 및 식 3을 이용하여, 식 4와 같이 지배방정식을 유도하였다.

- 지배방정식

$$\nabla\times\vec{H}=\vec{J} \quad (2)$$

$$\nabla\times\vec{E}=-\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$P=RI^2=\frac{1}{\sigma}\int_V\vec{J}\cdot\vec{J}^*dV \quad (4)$$

$$\delta=\sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu_0\mu_r}} \quad (5)$$

($\vec{H}$: 자계의 세기, σ : 전기전도도, $\vec{E}$: 전계의 세기, P : 손실
$\vec{B}$: 자속밀도, δ : 침투깊이, μ_0 : 공기의 투자율, μ_r : 비투자율)

Lock Plate 와전류 손실을 구하기 위해 식 5와 같이 표피효과를 고려해야하며 아래와 같은 조건으로 해석을 실시하였다.

- 해석조건

1) 철심의 포화특성 및 와전류 계산을 위해 3차원 해석을 실시한다.
2) 철심의 철손 및 권선의 와전류 손실은 고려하지 않는다.
3) 해석대상은 해석영역 외부로부터 자계의 영향을 받지 않는다. (Neumann경계조건)
4) 부하전류는 고조파 성분이 없는 완전한 정현파이다.

- 해석방법

1) 철심공극이 포화되므로 누설자속이 많이 발생하게 되는데, 이 때 Lock Plate의 쇄교누설자속에 의한 와전류를 줄이기 위해, 그림 1과 같이 SS400과 스테인레스(STS)를 혼용하여 Lock Plate를 설계하였다. 두 다른 재질의 특성은 표 2와 같다.
2) Lock Plate를 침투깊이에 맞게 모델링하여 각각 다른 두 재질의 부피에 따른 와전류를 해석 및 계산하여 Lock Plate의 손실을 구한다.

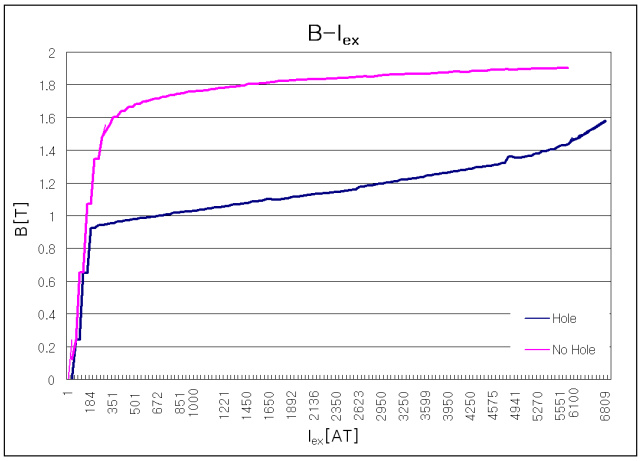
〈표 2〉 Lock Plate 재질 특성(at 75℃)

재질명	전도도[S/m]	비투자율	침투깊이[mm]
SS400(Mild Steel)	$7E^6$	300	1.418
STS(Stainless)	1.1E6	1	65.951

2.3 해석 결과

2.3.1 여자전류 해석결과

Maxwell 3D 소프트웨어의 Magneto-Static, Nonlinear Analysis를 이용하여 도출한 B-I_{ex} Curve 결과는 그림 2와 같다.



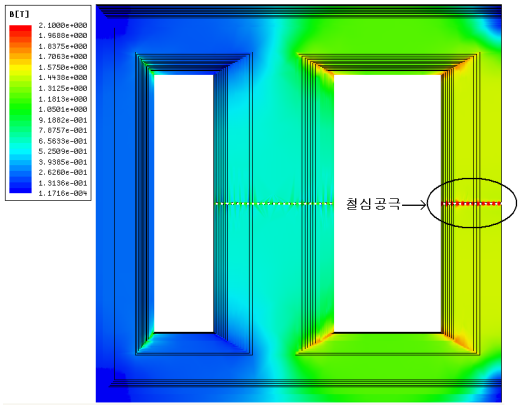
〈그림 2〉 자속밀도[T]-여자전류[AT] 곡선

표 3과 같이 철심공극이 없을 때 DC 7.5A가 유입되면 자속밀도가 1.78T까지 증가한다. 보통 변압기 철심이 1.8T부터 포화된다고 가정하는데 변압기가 과전압 상태가 될 경우(110% Over-Voltage 인가) 철심이 포화될 것이라 예상할 수 있다. 그러나 철심공극이 있을 때 DC 7.5A 유입시, 자속밀도가 1.53T로 변압기가 과전압 상태가 되더라도 포화되지 않는다.

〈표 3〉 여자전류 해석결과

구분	철심공극 無	철심공극 有
AC 여자전류(I_{AC})	226[AT]	5368[AT]
DC 여자전류(I_{DC})	990[AT] / 7.5[A]	
B_{AC}	1.4[T]	
DC 유입후 자속밀도 증가분 ($\triangle B$)	0.38[T]	0.13[T]
DC 유입후 자속밀도 증가분 ($B_{AC}+\triangle B$)	**1.78[T]**	**1.53[T]**

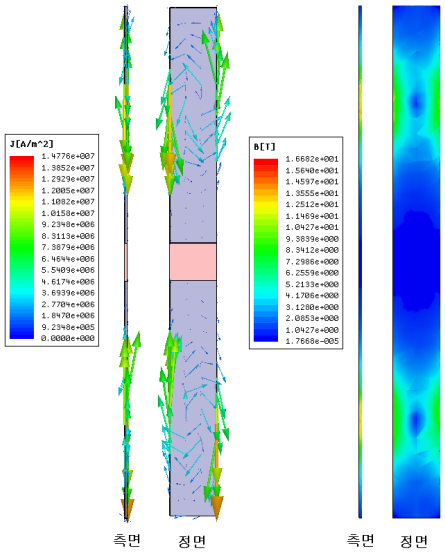
그림 3은 철심의 자속밀도 분포를 보여주며, 철심공극에서 포화가 일어남을 알 수 있다.



〈그림 3〉 철심 자속밀도 분포

2.3.2 와전류 손실 해석결과

Maxwell 3D 소프트웨어의 Eddy Current를 이용하여 Lock Plate에 쇄교되는 누설자속과, 누설자속에 의해 발생되는 와전류의 크기 및 분포를 해석하였으며, 결과는 그림 4와 같다.



(a) 와전류 분포 (b) 자속밀도 분포

〈그림 4〉 Lock Plate의 와전류 및 자속밀도 분포

그림 4(b)와 같이, 누설자속이 Lock Plate의 STS(철심공극)가 아닌 SS400에 집중이 됨을 알 수 있으며, 그림 4(a)에서 누설자속에 의한 와전류도 SS400에서 집중적으로 발생함을 알 수 있다.

Maxwell 3D 소프트웨어의 Fields Calculator를 이용하여 식 4, $P = RI^2 = \frac{1}{\sigma}\int_V \vec{J}\cdot\vec{J^*}dV$를 이용하여 손실을 구하면 아래와 같다.

〈표 4〉 Lock Plate 손실 해석결과

재질명	손 실(단상)	총손실(3상)
SS400(Mild Steel)	838.22[W]	2,514.66[W]
STS(Stainless)	0.83[W]	2.49[W]

표 4는 재질별 Lock Plate의 손실을 보여주며, STS의 손실이 SS400 손실의 1%에 해당됨을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 FEM을 이용하여 컨버터용 변압기의 여자전류 및 Lock Plate 와전류 손실을 해석하였다. 여자전류 해석을 통해 자속밀도-여자전류 곡선 그래프를 도출하였으며, 이를 통해 DC성분 유입시 철심이 포화되지 않는 것을 알 수 있었다. 또한 와전류 손실해석을 통해 STS와 SS400으로 혼용된 Lock Plate의 손실을 계산, 비교하였으며, 공극의 누설자속에 의해 Lock Plate의 공극부위 손실이 SS400에 비해 아주 작은 수준임을 알 수 있었다.

추후 컨버터용 변압기의 여자전류 시험데이터와 여자전류 해석결과 비교를 통해, 해석방법 검증에 관한 연구 및 Lock Plate의 와전류 손실을 최소화 할 수 있는 Lock Plate 재질 혼용구조에 관한 연구를 진행할 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] D. Pavlik, "Calculation and reduction of stray and eddy losses in core-form transformers using a highly accurate finite element modeling technique" IEEE Transactions, Vol. 8 NO.1, January 1993, PP. 239~244.

[2] 허우행, "FEM을 이용한 대용량변압기의 표류부하손 계산법 연구", 창원대학교 공학석사 학위논문, 2002년 12월

[3] D.A.Koppikar et al., "Evaluation of flitch plate losses in power transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 3, July 1999