

표면 임피던스 경계조건을 이용한 몰드변압기 Tie-plate 손실 최소화에 관한 연구

A Study on the Minimization of Tie-plate Loss of Cast Resin Transformer using Surface Impedance Boundary Condition

황 성 룰* · 신 판 석†
(Sung-Ryul Hwang · Pan Seok Shin)

Abstract - In this paper, a tie-plate shape is optimized by using the numerical technique to reduce the stray load loss of the tie-plate which is a mechanical structure for assembling and supporting of the transformer core. The eddy current loss of the structure is calculated by an electromagnetic field FEM program and the results are compared with 4 different shapes of tie-plates. Since the thickness of the tie-plate is very thin, and the skin depth is very small, the number of FE elements for 3-D transformer model is too big to solve. So, the surface impedance boundary condition (SIBC) is used to reduce the system matrix size and its computing time. To verify the method a 2.5 MVA 22,900/380V distribution transformer is simulated using one objective function and three design variables with some constraints. The final optimized tie-plate has three slots of 6 mm width and 23 mm gap, and the loss is reduced by 75 %. Consequently, the proposed algorithm seems to be considerably applicable to electric machinery as well as power transformer.

Key Words : Surface impedance, Boundary condition, Tie-plate, Stray-load loss, Cast resin transformer

1. 서 론

1.1 변압기의 표유부하 손실

대용량 몰드 변압기의 고효율화를 위해서는 동손과 철손을 최소화하는 것도 중요하지만 이 부분의 연구는 지난 수십년 동안 해왔기 때문에 어느 정도 포화수준에 이르렀으나 표유부하손(Stray load loss)에 대한 연구는 상대적으로 미진하므로 표유부하손 저감에 대한 심도있는 연구가 필요하다. 특히, 몰드변압기는 외부 탭크가 없기 때문에 표유부하손을 감소하는데 구조적인 제약이 따른다. 본 논문에서는 누설손실 중에서 코어를 구조적으로 지지해주는 Tie-plate에 의한 누설손실과 형상에 따른 손실계산 방법에 대하여 고찰하였다. 최근까지 국내외에서 Tie-plate에 대한 여러가지 주제의 논문들이 나오고 있다[1-3]. 변압기의 구조적인 문제에서 발생하는 표유부하손을 최소화하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있으며, 이 손실은 변압기의 용량이 커질수록 증가하기 때문에 누설자속과 표유부하손의 계산, 누설자속 저감을 위한 구조적인 설계, Tie-plate의 최적형상설계 등의 연구가 필요하다.

국내의 연구 중 전력용 변압기 표유부하손 연구는 프레임을 포함한 차폐부분의 누설자속 해석(FEM)으로 와전류손실을 연구한 논문이 있다. 그림 1은 철 구조물의 형상에서 표유부하손의 원인이 되는 누설 자속을 나타내고 있다. 그림 1(a)는 자계세기 H가 구조물 표면에 접선의 방향을 하고 있다. 이러한 예로 클램프(Clamp)나 탱크(Tank)의 경우를 들 수 있으며, 그림 1(b)는 Tie-plate와 인접한 코일에서 발생한 자계세기 H가 구조물 표면에 수직인 방향으로 입사하여 손실을 발생시키는 표유부하손 발생 모델이다. Tie-plate의 경우는 H가 표면에 수직인 방향으로 생각할 수 있다.[1] 이와 같이 표유부하손은 코아와 코일이 아닌 변압기의 주변 철구조물 때문에 발생하는 누설손실로 나타난다. 또한, 철구조물은 코어를 지지해주거나 변압기 자체의 보호를 목적으로 이루어져 있기 때문에 구조물의 형상 변화 보다는 재질변화에 대한 손실 해석이 대부분이므로 손실 저감 효과는 그다지 높지 않다.

1.2 Tie-plate의 손실과 형상에 대한 연구

변압기의 Tie-plate는 단순히 코어를 지지해주는 역할을 하므로 형상의 변화에 따라 변압기의 전체손실에 덜 민감하지만, Tie-plate의 형상은 다양하게 개발되고 연구되어 왔다. 1998년 Li Lin 등은 Tie-plate의 누설자속에 의한 와전류 손실에 대한 연구를 수행하였다.[3] 기존에는 변압기 손실 연구에 대해 2차원 또는 3차원 모델링의 문제나 누설자속으로 인한 와전류손의 문제

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hongik University, Korea.

E-mail: psshin@hongik.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Hongik University, Korea.

Received : March 29, 2017; Accepted : August 9, 2017

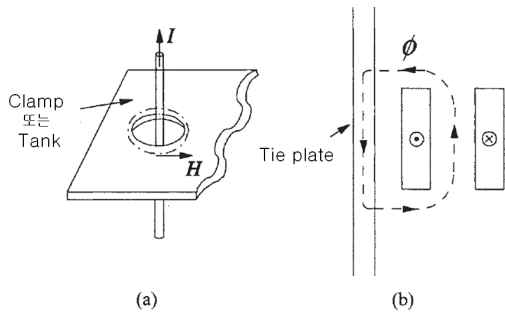


그림 1 변압기의 철 구조물에서의 누설자속 자료[1]

Fig. 1 Leakage flux paths around iron structure of transformer

였다면 표유부하손을 줄이기 위한 형상설계에 의한 손실저감에 대한 연구를 하였다[3].

Tie-plate의 너비나 슬롯수의 변화에 따른 이론적 손실은 너비가 작고 슬롯이 많아지면 누설자속에 의한 와류손실은 당연히 감소하게 된다. 그러나 기계적인 구조적 강도가 필요하므로 너비를 무한정 작게 할 수 없으며 슬롯 수 또한 무한히 많게 할 수 없다. 또한, 2010년 APPEEC(Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference)에서 유사한 내용의 논문이 발표되었으며[4]. 이 논문에서는 Tie-plate를 중점적으로 연구 하였고 3차원 자기해석을 통해 Tie-plate 슬롯 수에 따른 와전류손의 분포와 크기를 계산하고 평가하였다.

이후 Tie-plate는 여러 논문에서 와전류와 온도 분포 등과 같은 연구가 진행 중에 있다. 국내에서는 여러 업체에서 Tie-plate를 코아에 나타나는 누설자속과 함께 연계하여 연구하고 있다. 특히 Tie-plate 손실계산은 코아의 비투자율이 높아 대부분의 자속이 코아에 존재하고 과부하 운전시 코아가 포화영역에서 운전하게 되면 비투자율이 낮아지고 자기저항이 커지게 되면서 Tie-plate쪽으로 코아에 흐르지 못한 자속이 흐르면서 손실이 발생하게 된다. 이와 같은 변압기에서의 손실 문제는 고효율화와 직결되면서 여러 방면의 연구개발이 이루어지고 있다. 본 논문에서는 2.5MVA 배전용 몰드변압기의 Tie-plate 손실을 최소화하기 위하여 다양한 형태의 slot을 설계하고, 표면임피던스 경계조건(Surface Impedance Boundary Condition; SIBC)을 적용하여 해석하고 최적화 프로그램을 이용하여 최종형상을 도출하였다.

Tie-plate의 표유부하손을 줄이는 대표적인 기술은 Tie-plate 내에 슬롯을 파서 와전류 손실을 줄이는 형상설계 기법이다. 그림 2(a)는 Tie-Plate에서 손실을 줄이기 위해 슬롯을 파놓은 여러 가지 예를 보여주고 있다. 이와 같이 여러 가지 방법으로 슬롯을 설계하여 제작 할 수 있으며, 그 위치, 크기, 개수 및 모양 등을 가장 적절하게 설계자가 결정해야 하므로, 기계적인 강도와 손실최소화를 위하여 최적화 기법의 적용이 필요하다. 전력용 변압기 중에 몰드 변압기는 외부 탱크가 없기 때문에 Tie-plate, 저압측의 공통 부스바, 프레임 등에서 표유부하손이 주로 발생한다. 특히 Tie-plate는 그 위치가 다른 철 구조물에 비해 코일과 근접하여 설치되어 있으므로 누설자속이 높은 밀도로 Tie-plate에 입사하기 때문에 Tie-plate의 재료나 형태가 잘못 선정되면

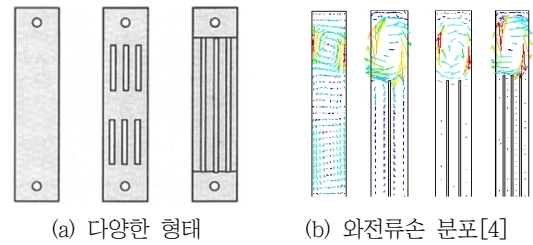


그림 2 Tie-Plate의 다양한 슬롯 형상

Fig. 2 Various shapes of tie-plates

변압기의 국부적인 온도상승을 유발하고, Hot-spot 주변의 절연물은 열화 될 수 있다.

본 논문에서는 몰드(cast resin)변압기의 표유부하손을 저감하기 위한 방법을 연구한 것으로 Tie-plate의 형상 변화에 따른 누설자속과 손실을 계산하고, 설계조건 내에서 최소손실을 내는 tie-plate의 형상을 제시하는 것이다. 또한, 3차원 해석의 요소분할 문제를 해결하고 해석시간 단축 및 정확한 해석을 위하여 계산방식은 표면임피던스방법(Surface Impedance Method)를 적용하는 방법을 택하였다. 설계된 각 형상의 손실을 비교하기 위하여 Tie-Plate 모델의 형상변화를 제외한 모든 조건은 동일하게 하였으며, 해석시간의 단축을 위하여 Tie-Plate의 형상을 제외한 코어 및 권선에 대하여는 요소수를 줄이기 위하여 간략화 하여 모델링 하고 해석을 수행하였다.

몰드변압기의 코아손실은 여러 가지 방법으로 계산이 가능하며, 본 논문에서는 정상상태의 자계를 분석하고 그 결과를 이용하여 철손을 계산하며 Steinmetz 식을 수정한 Bertotti 공식을 적용하여 다음 식에 의해서 계산한다.[5]

$$P = [k_h B_m^2 f + \frac{\pi^2 \sigma d^2}{6} (B_m f)^2 + k_e (B_m f)^{3/2} \times 8.67] k_f \quad (1)$$

위 식의 첫째 항은 히스테리시스손을 나타내고, 둘째 항은 와전류손을, 마지막 항은 기타손실(excess)을 나타낸다. 위식에서 k_h : 히스테리시스 손실 계수 [$W s T^{-2} m^{-3}$], B_m : 자속밀도의 피크 값 [T], k_e : 과잉 손실 계수 [$W (T s^{-1})^{-3/2} m^{-3}$], σ : 도전율 [$S m^{-1}$], d : 강판의 두께 [m], f : 주파수 [Hz], k_f : 점적율 계수 ($0 < k_f \leq 1$)를 각각 나타낸다[8].

2. 본 론

2.1 손실 해석과 표면임피던스 경계조건

Tie-Plate의 표유부하손을 계산하기 위해서 본 논문에서는 표면임피던스 경계조건(SIBC; Surface Impedance Boundary Condition)을 이용 한다. 표면임피던스 Z_s 는 도전영역 표면의 전계 E 와 자계 H 의 관계식으로 주어진다. 도체내부에서 전계 E 는 없으며(0) 표면전류밀도 J_s 는 존재한다고 가정하며, 표면임피

던스 Z_s 의 계산식은 식 (2)로 부터 정의되어진다.[5]

$$\vec{E}_s = Z_s (\vec{n} \times \vec{H}_s), \text{ with } Z_s = (1+j)/\sigma\delta \quad (2)$$

여기서 E_s 는 표면전계[V/m], H_s 는 자계의세기[A/m]를 각 각 나타낸다. 또한, 전류밀도 $J = \sigma E$ 관계로부터

$$J_x = \sigma E_x = \sigma E_{x0} e^{-z\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (3)$$

식 (3)과 같이 전류밀도는 지수함수적으로 감소하며, $z=0$ 일 때 지수함수 인자는 1이 되어 $e^{-1} = 0.368$ 이며 이때 거리 z 는 다음과 같다.

$$z = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (4)$$

이 거리를 침투깊이(또는 skin depth)라고 하며 구리는 60 hz 에서 8.53 mm이며, 철은 도전율이 구리보다 작지만 투자율이 구리보다 훨씬 크므로 침투깊이가 아주 작게 된다. 유한요소 해석에서는 와전류를 계산하기 위해서는 와전류의 침투깊이를 고려해서 유한요소분할을 해야 하므로 해당되는 영역의 요소가 아주 많아지게 되어 전체모델을 3차원으로 해석하는 것은 아주 어려운 문제가 된다.

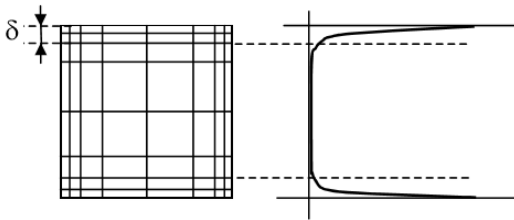


그림 3 침투깊이(skin depth)와 FE mesh와의 관계 [2]
Fig. 3 Relationship between skin depth and FE meshes

변압기의 외함, Tie-plate 등 구조물에서 누설자속에 의한 와전류와 표피효과 때문에 많은 열손실이 발생하며, 보다 정확한 해석을 위해서는 변압기의 구조물의 와전류 발생부분에 많은 수의 요소를 생성하여 FEM 해석을 수행해야 한다. 침투깊이보다 큰 요소를 설정하여 해석할 경우 계산결과의 오차가 크기 때문에 해석영역의 재질특성에 따라 침투깊이를 계산하고 그에 맞는 유한요소 크기를 결정하여 해석을 수행해야만 한다. 일반적인 유한요소 프로그램에서는 침투깊이 내에 최소 2개 층 이상의 요소를 나눌 것을 권장하고 있으며, FLUX 프로그램에서는 2개 이상의 2차원 요소를 사용하고 있다. 그림 3은 와전류의 침투깊이를 고려한 영역의 유한요소이며 우측 그림은 와전류의 침투깊이를 보여주고 있다.

식 (4)를 이용하여 Tie-plate영역의 침투깊이를 계산하면, 약 1.5mm이다. 와전류 해석을 위한 요소의 적절한 크기는 침투깊이보다 최대 1/2 이하가 되어야 하므로 FEM 요소수가 대폭 증

가하여 해석시간이 매우 길어지며, 높은 사양의 컴퓨터 하드웨어를 필요로 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 연구에서는 Tie-plate영역에 표면 임피던스 경계조건(SIBC, Surface Impedance Boundary Condition)을 적용하여 해석함으로써 해석에 필요한 시스템방정식을 크게 줄이고 계산시간을 많이 줄일 수 있는 방법을 선택하였다. Tie-plate의 침투깊이는 비투자율이 400 일 경우 1.453 mm로서 이때 유한요소길이 0.7mm 이하로 설정해야 하며 이 경우에 요소수가 약 1800만개로 증가하여 solid 모델로는 해석이 거의 불가능하며, SIBC의 경우에는 요소수가 대폭(정확한 숫자가 필요함) 감소하여 해석의 시간을 많이 줄일 수 있으므로 산업현장에서 용이하게 해석과 설계를 할 수 있게 된다.

본 연구에서 설계할 Tie-plate의 기본 모델 크기는 그림 5에 표시한 바와 같이 폭 110 mm, 길이 1880 mm, 두께는 6 mm이다. 침투깊이 0.7 mm를 고려하여 요소분할 경우 nodes수가 약 2,689만개가 되어 해석이 거의 불가능한 상태가 되므로 SIBC 조건을 사용하면, Tie-plate는 요소분할이 없이 FEM모델링이 가능하게 되고, slot이 없는 경우 전체 기본모델 해석을 위한 유한요소의 node 수는 약 58만개 정도로서 계산이 가능해진다. 그림 5는 SIBC를 사용한 몰드변압기의 3차원 유한요소 모델을 보여주고 있다.

2.2 다양한 형태의 Tie-plate 손실 해석

본 논문의 해석 모델은 산업계에서 제시된 실제 변압기의 모델 3상 60 Hz, 22.9[kV]/380-220[V], 2.5[MVA] 용량의 몰드변압기를 이용하여, 다양한 형태의 Tie-plate의 손실을 계산하였다. 몰드변압기 해석모델의 사양 및 형상은 표 1 및 그림 5를 참고한다. 변압기의 코어는 일반적인 전기구조강판의 비선형 재질로 설정하였으며, Tie-plate는 SS400재질이다. 기본모델은 Tie-plate에 Slot이 없는 형태이다. FEM해석 결과 6개의 Tie-Plate에서 표유부하손은 총 47[W]이고 전류밀도는 최대 2.233[A/mm²]이며, tie-plate의 와전류 분포는 그림 6에서 보여준 바와 같이 코어의 끝부분에서 많은 와전류가 유도됨을 알 수 있다.

표 1 변압기 모델 사양

Table 1 Specifications of the transformer model

Phase	3	Primary coil	copper
Voltage[V]	22,900/380	Secondary coil	Al sheet
Frequency[Hz]	60	Core material	PN
Capacity [kVA]	2,500	Tie-plate material	SUS

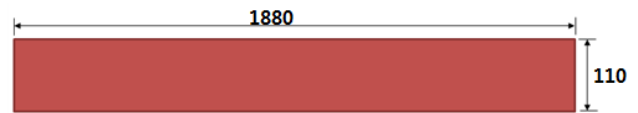


그림 4 Tie-plate의 기본모델 (길이 1880 mm, 폭: 110 mm)
Fig. 4 The initial model of tie-plate (Length : 1880 mm, Width: 110 mm)

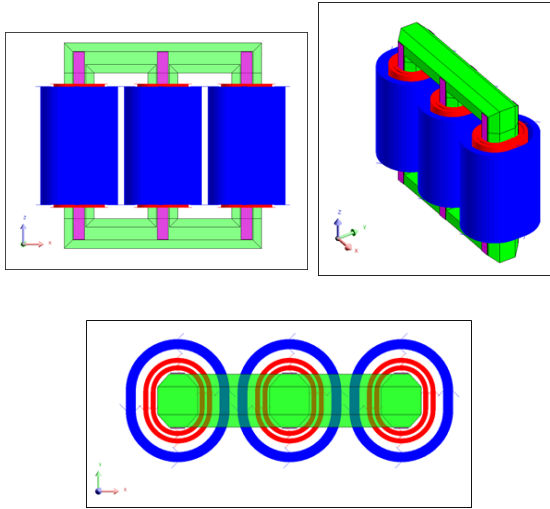
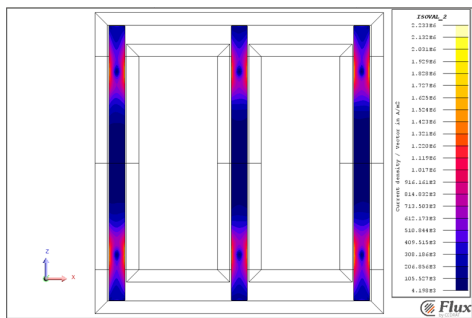
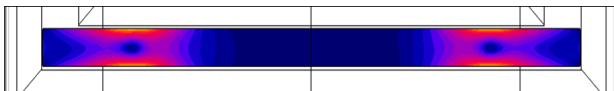


그림 5 몰드변압기의 유한요소 해석 모델(2.5 MVA, 22,900/380 V)
 Fig. 5 FEM model of cast resin transformer (2.5 MVA, 22,900/380V)



(a) Analysis result of the Tie-plate model



(b) Eddy current density of non-slot Tie-plate

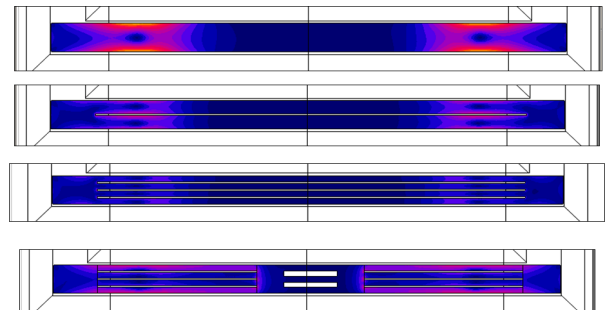
그림 6 Tie-plate의 와전류 밀도 분포 [A/m²]
 Fig. 6 Eddy current distribution of Tie-plate

Tie-plate의 손실을 저감시키기 위하여 그림 7(a)와 같이 다양한 형태의 slot을 Tie-plate내에 설계하여 와전류 손실을 계산하였다. Slot이 없는 기본모델을 해석한 결과 와전류 분포는 그림 7(b)와 같으며, Tie-plate의 손실은 전체 48 W로 계산되었다. 그림 7(a)는 Tie-plate에 5 mm 폭을 가진 1개의 Slot을 설치한 경우, 3개의 Slot을 설치한 경우와 길이가 작은 7개의 slot을 설계한 경우의 도면을 보여주고 있으며, slot을 제외한 Tie-plate의 두께, 전체길이, 재질 등 다른 모든 조건은 동일하게 유지하고 해석한 것이다. Tie-plate의 기본 모델 형상에 Slot을 설치함으로써 와전류밀도의 크기가 감소하고 이에 따라 결과적으로 Tie-plate의 부피와 손실이 감소되고, 변압기 코일과 코아의 온도가 감소

하는 효과를 나타내게 된다. 그림 7(b)는 Tie-plate의 각 모델에 대한 와전류밀도를 계산한 것이다. 와전류밀도 최대값의 차이를 slot이 없는 기본모델과의 최적모델에서 비교할 수 있도록 전류 밀도의 색깔별 범위를 0~1.283[A/mm²]로 동일하게 설정했으므로, 3개 모델의 전류밀도 크기의 차이를 쉽게 구분할 수 있다.



(a) Design model of Tie-plate : from upper initial model (None-Slot), 1-Slot, 3-Slots, 7-slots



(b) Analysis result of Tie-plate(eddy current density distribution, from upper, initial model(None-Slot), 1-Slot, 3-Slots, 7-slots)

그림 7 Tie-plate slot 수에 따른 형상과 와전류 밀도 분포
 Fig. 7 Tie-plate shapes and eddy current distribution

Tie-plate의 형상변화에 따라 각각의 모델을 해석한 결과 표 2에서와 같이 Tie-plate의 와전류 손실은 slot이 없는 경우 47W, 1-slot의 경우 25[W], 3-slot의 경우 14[W]로 감소했다. 또한 소형 slot 7개를 설치한 경우는 손실이 오히려 증가하여 34W로 계산되었다. 이 결과를 바탕으로 볼 때 slot수를 증가시키면 와전류 손실은 줄어들지만 tie-plate의 기계적 강도를 고려하여 일반적으로 산업계에서는 주로 3-slot 형태로 설계하여 변압기를 제조하고 있다.

표 2 다양한 형태의 Tie-plate의 해석 결과 손실 비교
 Table 2 Comparison of tie-plate loss for various types

Type of Tie-plate	eddy current loss (W)	remarks
non-Slot Tie-plate	47	
1-Slot Tie-plate	24	
3-Slot Tie-plate	14	
small 7-slot Tie-plate	34	

2.3 최적화 프로그램을 이용한 Tie-plate 손실 최소화 모델

Tie-plate의 손실을 최소화하기 위하여 1차적으로 2.2절의 해석결과를 근거로 하여 Tie-plate에 3개의 slot을 설계한 초기모델을 가지고 최적화 프로그램을 적용하여 손실을 최소화하는 Tie-plate의 설계안을 도출하게 된다. 최소화 모델은 2.5 MVA 변압기의 Tie-plate에 3개 slot를 적용한 것으로 설계변수는 그림 8에 표기한 것과 같이 slot의 길이(Slot Length), 슬롯폭(Slot Width), 슬롯간격(Slot Gap)을 지정하였으며, tie-plate의 두께는 6 mm로 정하여 최적화 하였다. 각 설계 변수들은 변압기 설계자에 의해서 기계적 강도를 고려하여 설계변수의 범위를 주어서 최적화를 수행하였으며, 주어진 설계변수 범위는 표 3과 같다. Tie-plate 끝부분의 길이 L-end는 몰드변압기 모델의 코아길이와 폭을 고려하여 150 - 210 mm로, Slot-Width(슬롯폭)은 전체 길이가 300 mm 중에 기계적 강도를 고려해서 중심부에 2-10 mm로, Slot-Gap은 전체 슬롯폭과 Slot-width를 고려해서 15-25 mm로 선정한다. Tie-plate폭은 110 mm로 고정하여 최적화 과정에 들어간다. 설계변수 L-end의 최소길이 130 mm는 최외측의 변압기 코아의 폭보다 커서는 안되므로 130 mm로 결정하였고, 슬롯폭의 최대치 10 mm인 경우에 Tie-plate의 폭이 110mm로 고정되어 있으므로, 슬롯간격이 20 mm 밖에 되지 않아서 고정용 볼트(직경: 16mm)체결 홀(직경 18 mm)이 가공되면, 구조적으로 기계적 강도가 나오지 않는 경계점이므로 최대값으로 결정하였다.

표 3 최적설계를 위한 Tie-plate 주요 부분의 설계변수의 범위
Table 3 Design variables ranges of tie-plate for optimal design

Design variable of Tie-plate	Range of design variables(mm)	remarks
End length of Tie-plate (L-end)	150~210	
Slot Width	2~10	
Slot Gap	15~25	
Width of Tie-plate	110	fixed

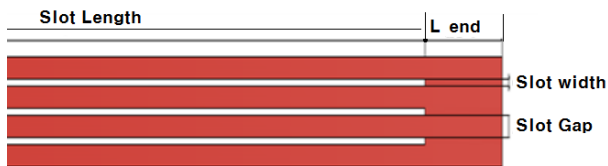


그림 8 최적화 알고리즘 적용을 위한 3-slot Tie-plate 모델과 설계변수(L_end, Slot_Width, Slot_Gap)

Fig. 8 3-slot Tie-plate Model and design variables applying for optimization algorithm

최적화 이론의 적용은 본 실험실에서 개발하여 활용하고 있는 차분진화알고리즘을 적용하였다[9]. 이 알고리즘은 비결정론적 최적화 기법 중 하나이고 아주 널리 사용되고 있는 방법으로, 3

가지의 기본 과정이 있다. 첫 번째 각 section의 개체집합을 설정. 두 번째 자신과는 다른 개체를 골라 탐색의 범위를 확대하고, 세 번째는 다양한 해를 확보하는 작업이다. 차분 진화 알고리즘의 중요한 작업 중 하나가 다른 돌연변이의 확률과 교차변이에서 생성되는 시험 벡터의 생성이다. 일부 변이 연산자가 기본 벡터에서 생겨나기 때문이다. 이 중 최적점과 랜덤변수에 의해서 생성되는 두 가지 벡터가 있는데, 최적점에서는 지역 최적해(Local Optimum)에 수렴 가능성이 높은 수렴 속도를 가지게 되는 반면 랜덤에서는 느린 수렴과 다양한 해에 접근할 수 있는 장점이 있다. 차분 진화 알고리즘을 이용한 전체 Tie-plate 최적설계에 대한 프로그램 흐름도는 그림 9와 같다.

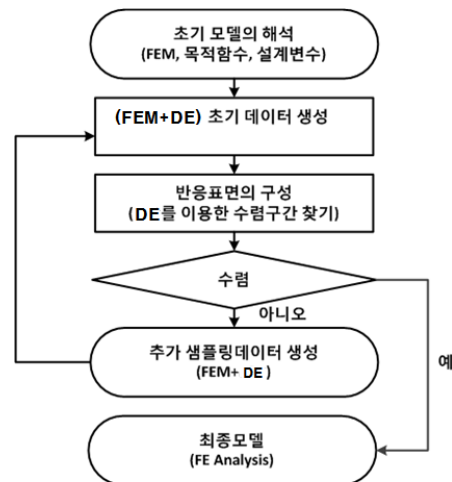


그림 9 최적화 알고리즘을 이용한 프로그램의 흐름도

Fig. 9 Flow chart of optimization algorithm using FEM program

2.4 Tie-plate 최적화 결과

3차원 유한요소 프로그램을 활용하여 초기모델의 해석 단계에서 slot_gap(2, 5, 8 mm)과 L_end(150, 170, 190, 210 mm)에 대한 12 지점에 대한 손실을 해석하여 최적화 범위를 축소시킨 후에, 2단계에서 제안한 알고리즘을 적용하여 최적화 과정을 수행하게 된다. 여러 가지 구조물이 복잡하게 형성되어 있는 몰드변압기의 3차원 모델은 요소수가 약 101만 3천개로서 한 가지 모델의 해석시간이 6시간 정도 걸리게 된다. 최적화 시간을 단축하기 위하여 1단계의 계산결과를 분석해서 설계변수 중 slot_gap은 2 mm부터 8 mm까지, L_end는 160 mm에서 174 mm까지 축소하여 최적화 과정을 수행하였다. 설계변수 조정단계에서 몰드화된 코일과 부스바의 연결위치, 코아와 tie-plate와의 기계적인 상관관계, 조임볼트의 위치 등을 업체의 변압기 설계자와 협의하여 결정하였다.

차분진화 알고리즘 적용결과 Tie-plate의 구조와 와전류손실의 특성상 최소한의 구조적인 조건을 만족하면서 슬롯의 단면이 넓을수록 손실이 적어지는 경향이 나타난다는 것은 예측할 수 있

나, 변압기의 조립공정과 기계적인 구조를 고려하여 최종 설계변수를 결정하였다. 최적화 결과 각 설계변수에 대한 Tie-plate의 손실값을 그림 10에 표시한 것이다. L-end가 길수록 손실이 많아지는 것은 예상했던 결과이며, slot 폭은 L-end에 비해서 Tie-plate손실은 덜 민감하다는 것을 알 수 있다. 그림 10은 손실값을 정확하게 읽기가 어려우므로 표 4에 설계변수의 범위 중에 대표적인 16개 지점의 계산된 손실값을 추출하여 기술하였다. 표 4에 의하면 slot 폭 8 mm와 L-end 164 mm일 때 손실이 최소로 나타났다.

표 4 설계변수에 따른 Tie-plate의 손실 [단위: W]

Table 4 Tie-plate loss as function of design variable

Slot_width [mm]	L-end[mm]			
	162	166	170	174
2	14.0	13.7	13.9	14.9
4	13.8	13.7	14.1	14.7
6	13.1	12.9	13.1	13.3
8	12.5	12.4	12.5	12.9

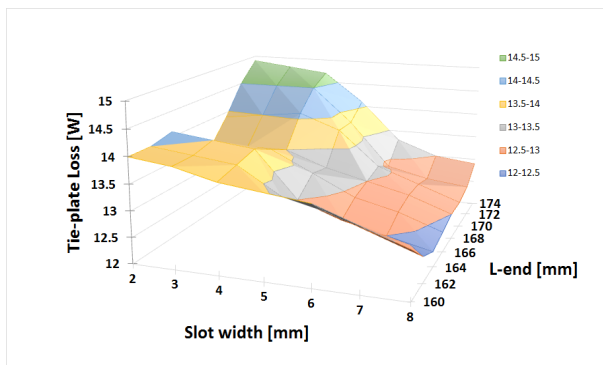


그림 10 설계변수 Slot-width와 L-end에 따른 Tie-plate 손실
Fig. 10 Tie-plate loss as functions of design variable Slot-width and L-end

그러나, 슬롯폭이 8 mm일 때 slot gap은 21.5 mm가 되어 직경 18 mm의 볼트체결 홀을 제작하게 되면 기계구조적인 강도가 나올 수 없는 구조가 되므로, 최종적인 설계값은 그림 11과 같이 끝부분길이(L_end)는 164 mm, 슬롯폭은 6 mm, 슬롯간격 (Slot_gap)은 23 mm로 결정하였다.(그림 11 참조) 도출된 Tie-Plate의 최종모델을 해석한 결과, 표4에서와 같이 Tie-plate의 표유부하손은 1-slot이 있는 경우 와류손이 20[W], 3-slot의 경우 12[W]로 감소했다(표 5 및 그림 12 참조). 전류밀도는 최대 1.283[A/mm²]이며, 그림 7(b)와 유사한 와전류 분포를 가지고 있다. 최적화된 Tie-plate의 와류손은 slot이 없는 기본모델에 비하여 약 75% 정도까지 감소되었으며, 이것은 전체손실의 0.1%에 지나지 않지만 대용량변압기의 경우 효율이 99%를 모두 상회함에도 불구하고 고효율화하는 기술경쟁이 심화되고 있는 변압기 산업계에서는 의미있는 최적설계가 될 수 있다고 판단된다.

표 5 최적화 slot을 적용한 각 Tie-Plate의 와전류 손실

Table 5 Tie-plate eddy current loss with optimized slot

Type	None-Slot	1-Slot	3-Slot
Loss [Watt]	48	20	12



그림 11 최종설계된 2.5 MVA 몰드변압기의 Tie-plate (slot폭: 6 mm, slot간격: 23 mm)

Fig. 11 Final Designed tie-plate of 2.5 MVA cast-resin transformer (slot_width : 6 mm, slot gap: 23 mm)

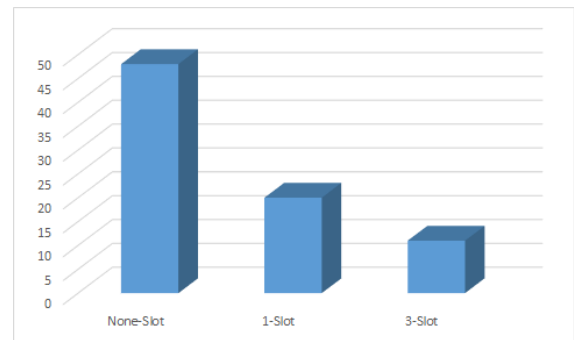


그림 12 Tie-Plate의 형상에 따른 손실

Fig. 12 Losses as shape of tie-plate

3. 결 론

본 논문은 몰드변압기의 표유부하손을 3차원 유한요소 해석을 통하여 계산하고 저감하는 방안을 강구하기 위하여 Tie-Plate의 형상변경에 따른 손실저감에 대한 연구를 수행하였다. 표유부하손 계산의 특성상 표피효과를 고려해야하기 때문에 FEM 프로그램에서 발생할 수 있는 요소분할 문제를 해결하고자 표면임피던스 경계조건(SIBC)을 설정하였다. Tie-plate의 와전류 해석은 요소분할의 오류 없이 용이하게 진행하여 계산시간이 단축되었으며, 그 해석 결과도 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있었다. 초기모델에서의 Tie-Plate의 표유부하손은 48[W]이며, 차분진화 알고리즘을 이용한 최적화 과정에서 Tie-plate 형상과 재질 등 모든 조건이 동일하고 Tie-Plate에 slot을 1개 설계한 경우는 20[W], 3개 설계한 경우는 12[W]이다. 즉 3개의 slot을 설치함으로써 tie-plate의 와류손실이 75%까지 감소시키는 효과를 볼 수 있다. 이는 변압기 총 손실의 약 0.1%에 해당하는 적은 양이지만 대용량 변압기를 고효율화 하는 기술개발에 크게 기여할 것으로 사료된다. 또한, 본 연구는 향후 Tie-Plate의 구조적인 강도계산 결과를 반영하여 Slot의 개수 및 형상, 크기에 대한 와전류손실과 구

조적인 누설전류손실을 저감시키는 최적설계안을 도출하는 연구에도 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2017년도 미래창조과학부의 재원으로 과학벨트기능지구지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (2017K000451).

References

- [1] S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde, "Transformer Engineering", Marcel Dekker, INC, 2004
- [2] D. Pavlik, D. C. Johnson, R. S. Girgis, "Calculation and Reduction of Stry and Eddy Losses in Core-Form Transformers using A Highly Accurate Finite Element Modelling Technique.", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, no. 1, pp. 239-245, January 1993
- [3] Li Lin, Cui Xiang, Zhang Yuanlu Cheng Zhiguang Zhang Guoqiang Zhao Yinhan, "Losses Calculation in Transformer Tie Plate Using the Finite Element Method", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 34, No. 5, September. 1998
- [4] Xuejun Ma, Yu Jiang, "Study on Eddy Current Loss of Core Tie-plate in Power Transformers", Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Asia-Pacific, 2010
- [5] CEDRAT, "FLUX User guide Flux ver.12", 2015
- [6] P.S. Shin, and et. al, "A Basic Study on the Compact and High Efficiency Cast Resin Transformer for 30 MVA", Final Report, Ministry of Trade, Industry and Energy 2011. 10.
- [7] Tong-Bae Kim and Pan Seok Shin, 'A Tie-plate Shape Optimization of 24MVA Cast Resin Transformer for Reduction of Stray Loss', Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 28 No. 7, pp. 55-61, 2014. 7.
- [8] Young-Bae Kim, "A Shape Optimization of Tie-Plate of Cast Resin Transformer for Stray Loss Minimization by Multi- Objective Function Technique", Ph.D. Thesis, Hongik University, 2015. 2.
- [9] Pan Seok Shin and Hong Uk Kim, "An Optimal Design of Notch Shape of IPM BLDC Motor using the Differential Evolution Strategy Algorithm", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers(KIEE), Vol. 65. No. 2, pp. 239-245, 2016. 2

저 자 소 개



황 성 루 (Sung-Ryul Hwang)

2007. 2. 홍익대학교 전기공학과 졸업
2013. 2. 홍익대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사)
2016. 2. 홍익대학교 대학원 박사과정 수료
2006. 12~현재 재우기술(주) CAE1팀 팀장



신 판 석 (Pan Seok Shin)

1977. 3. 서울대학교 전기공학과 졸업
1989.12. (미) Rensselaer Polytechnic Institute 졸업(Ph.D)
1981. 1~1993.2. 한국전기연구원 근무
1993. 3~현재 홍익대학교 전자·전기공학과 교수