

154kV 저소음 변압기 개발

박상욱*, 우재희*, 김유현*, 최명준**, 이장우***, 구교선****

- * 현대중공업(주) 전전사업본부 신제품개발실
- ** 현대중공업(주) 기계전기연구소 전력기기연구실
- *** 현대중공업(주) 선박해양연구소 진동소음연구실
- **** 전력연구원 전력계통연구실 변전기술그룹

Development of 154kV low-noise transformer

Sang-Wook Park*, Jae-Hi Woo*, Yoo-Hyun Kim*, Myung-Jun Choi**, Jang-Woo Lee***, Kyo-Sun Koo****

- * Technology Development Center, Electro-Electric system Division, HHI
- ** Electric power machinery research Dep't, Electro-Mechanical Research institute, HHI
- *** Noise & Vibration research Dep't, Maritime Research institute, HHI
- **** Power system research Lab., Substation technology group, KEPRI

Abstract

본 논문은 변압기 소음저감을 위하여 Active part와 외함 형상변경에 따른 연구를 수행하였다. Active part는 변압기 소음의 주 원인인 철심의 적층방법 및 적층 step수에 대해 분석하였으며, 외함의 형상을 원형으로 변경하고 충격시험 및 유한요소 해석을 통해 원형외함의 특성을 파악하였다.

1. 서 론

변압기 소음원으로는 철심의 자기적 변형에 의해 발생하는 변압기 Active Part 소음과 냉각팬, 냉각펌프 등과 같은 냉각시스템에서 발생하는 소음으로 분류될 수 있으며, 변압기 소음의 주 원인은 교번자속에 의한 철심의 자기변형(Magnetostriction)에 의해 발생한 철심의 진동이다. 이는 변압기 내부 절연유를 통해 전달되거나 내부 지지구조물을 통해 외함으로 전달되어 진다. 본 연구에서는 철심에서 발생하는 진동을 저감시키기 위하여 Normal Step Lap과 Multi Step Lap에 대한 정밀자계해석을 통해 자속밀도 변화와 적층수에 따른 자속밀도 변화 패턴을 도출하였다. 또한 외함의 형상을 타원형 형태에서 원형 형태로 변경하였고 그에 따른 외함 강도해석과 충격/진동시험을 실시하여 원형외함의 특성을 연구하였으며, 외함두께 변화에 따른 주파수 응답해석을 통해 외함의 진동수준 변화를 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 Active part 소음원 분석

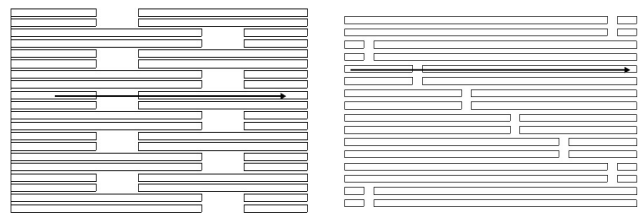
변압기 철심과 같은 강자성체의 경우에는 인가되는 자계에 의해 자화가 발생하는데, 이때 수축과 팽창이 일어남에 따라 자성체의 외형이 변화하는 현상이 발생하며, 이를 자기변형이라고 부른다. 이와 같은 자기변형은 변압기 철심 소음발생의 가장 중요한 원인이 된다. 결국 변압기 철심의 소음저감을 위해서는 철심의 자기변형을 줄여야 한다. 다음은 자속밀도와 자계의 위상에 따른 자기변형량을 나타내는 식이다.

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{\Delta l}{l} \approx B(t)^2 \\ &= B_{\max}^2 \sin^2 \omega t \\ &= \frac{1}{2} B_{\max}^2 (1 - \cos 2\omega t) \end{aligned}$$

여기서, λ 는 철심의 자기변형을 나타내며, B는 철심의 자속밀도이다. 위 식을 보면 자기변형이 자속밀도의 제곱에 비례하며, 진동주파수도 인가전원의 2배라는 것을 알 수 있다. 따라서 변압기 자속밀도를 낮추면 자기변형이 작게 일어나며, 이로 인해 변압기 Active Part 소음이 감소될 것이다.

2.1.1 철심 적층방법에 따른 자속분포

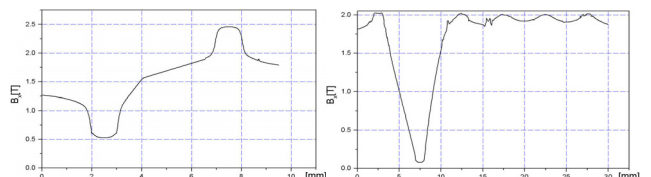
부부하 소음에 가장 영향을 미치는 철심 접합부 형상에 대한 자계해석을 수행하였다. 현재 철심 접합부 제작방법으로 주로 사용되고 있는 Normal Step-Lap(NSL)과 Multi Step-Lap(MSL) 방법에 따른 자계해석을 수행한 후, 적층면의 수평방향의 자속밀도 변화를 계산하였다. 수치해석을 위한 모델링은 그림 1과 같다.



(a) Normal step-lap (b) Multi step-lap

<그림 1. 수치해석 모델링>

그림 2는 sheet 내부를 통과하는 적층면에 수평하는 성분에 대한 자속밀도를 나타낸 것이다. NSL의 경우 공기 갭을 비껴 돌아가는 철심 sheet의 자속이 약 2.46T까지 상승하는 반면에 MSL의 경우 자속밀도의 최대치가 약 2T로써 NSL에 비해 19%정도 감소하였다. MSL의 경우, 접합 gap 사이에서의 포화현상이 발생할 빈도가 작으며, 적층된 철판에서의 자속밀도가 고르게 분포하게 됨을 알 수 있었다. 이런 현상들은 철심 전체의 자기적 특성을 향상시킬 수 있으며, 또한 철심에서 발생하는 소음을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다.



(a) Normal step-lap (b) Multi step-lap

<그림 2. 적층면에 수평하는 자속밀도 분포>

2.1.2 철심 적층 Step수에 따른 자속분포

Multi Step-Lap의 적층 Step수에 따른 자속밀도 분포를 알아보기 위하여 Step수를 3, 4, 5개까지 증가시켜 해석을 수행하였으며 그 결과 step수가 증가함에 따라 최대 자속밀도값은 0.15승에 비례하여 감소함을 알 수 있었다.. 6 step-lap의 경우에는 3 step-lap에 비하여 최대 자속밀도값은 대략 12%정도 감소하게 되며 이는 철심제작 시 적층수를 증가시키므로써, 철심의 최대자속밀도가 감소되어 변압기 Active Part 소음이 저감됨을 알 수 있다.

2.2 원형외함 구조

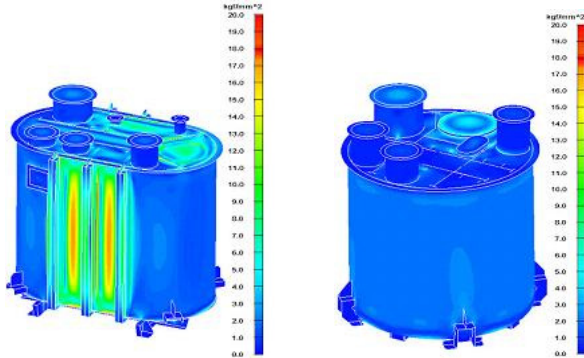
구조물에서 방사되는 소음은 아래의 식과 같이 구조물의 진동수준(V), 방사면적(S) 그리고 모드형상(p,q)에 관계된다.

$$P(r) \sim \frac{(S \times V)}{(p, q)}$$

그러므로 변압기 외함의 진동수준과 방사면적을 줄임으로써 변압기 소음레벨을 저감시킬 수 있다.

2.2.1 강도해석

변압기 외함의 강도를 해석하기 위한 유한요소 해석을 실시하였다. 그림 3에서 보는바와 같이 동일한 압력하에서 외함의 응력은 타원형 외함일 경우는 19.5kgf/mm², 원형외함일 경우는 8.3kgf/mm²로 원형외함일 경우 응력이 약 58%가 감소하며, 변위량의 경우 72%가 감소한다.



(a) 타원형 외함 (b) 원형외함
 <그림 3. 동일한 압력하에서의 외함 응력분포>

변압기 외함의 형상을 기존 타원형에서 원형으로 변경함으로써 방사면적은 16%가 감소하였으며, 원형외함의 특성상 외함강성의 증가로 진동수준이 상당히 감소하여 변압기 소음레벨 저감에 효과가 있음을 알 수 있다.

2.2.2 충격 및 진동계측

외함의 고유진동수와 기진 주파수인 120Hz의 조화성분과의 공진여부를 확인하기 위하여 원형외함에 대한 충격시험을 실시하였다. 계측결과 기진 주파수인 120, 240, 360Hz부근에서 고유진동수가 발견되었다. 원형외함의 경우 모드밀도가 매우 높으므로 공진회피에 의한 소음저감은 어려울 것으로 판단된다. 충격시험과 병행하여 원형외함의 진동양상을 파악하기 위하여 무부하 조건에서 원형외함에 대한 진동계측을 수행하였다. ODS(Operating Deflection Shape) 분석결과, 기존 타원형 외함의 경우 120Hz에서 비교적 뚜렷한 진동모드가 나타나지만, 원형외함의 경우에는 해당 주파수에서 특정한 진동모드가 발견되지 않는다. 따라서 원형외함의 경우에는 기존 타원형 외함에 비하여 주요 기진원 성분인 120 Hz와 240 Hz 부근에서 뚜렷한 진동모드에 지배받는 것이 아니라, 외함 전체에 걸친 국부적인 진동모드의 영향을 받으므로, 해당 주파수 영역에서의 방사소음 역시 진동모드의 영향보다는 외함의 전체적인 진동수준에 영향을 받는다고 할 수 있다

2.2.3 외함두께 변화에 따른 주파수 응답 해석

외함두께에 따른 원형외함의 진동수준을 파악하기 위하여 외함두께를 t1에서 t4까지 점차 증가시키며 기진원 주파수 성분인 120 Hz±10%, 240 Hz±10%, 360 Hz±10%의 범위에서 주파수응답해석을 수행하였다.

표 1. 외함두께 변화에 따른 진동수준 변화

외함두께 주파수	t1	t2	t3	t4
120 Hz ± 10%	3.01	2.24	2.96	1.86
240 Hz ± 10%	3.92	2.93	3.05	2.64
360 Hz ± 10%	3.98	4.10	3.62	3.55

표 1로부터 외함두께가 증가할수록 주요 기진원 주파수 성분에서의 외함 측면 overall rms value는 진동모드의 영향으로 일부 높아지는 경우도 있지만, 전체적으로는 감소하는 경향을 갖는다는 것을 확인 할 수 있다.

변압기의 경우에 모드밀도(modal density)가 높은 관계로 주요 기진원 성분에서는 외함 공진모드의 영향을 완전히 벗어나는 것이 사실상 어려울 것으로 예상되지만, 비록 공진이 발생한다고 할지라도 외함 두께가 증가된 경우의 overall rms value가 그렇지 않은 경우보다 더 낮을 것으로 예상된다. 하지만 외함두께의 증가는 변압기 중량의 증가를 야기시키므로 변압기 중량을 고려해 적절한 수준에서 선택되어야 한다.

2.3 154kV 1상 시제품 소음계측

상기에서 연구한 결과를 바탕으로 1상 15/20MVA 154/23/6.6kV 저소음 변압기를 제작하여 소음시험을 실시하였다. 한전 구매규격인 ES 147(변압기 소음레벨 기준치, '06.09.26)에 근거하여 시험을 실시하였으며 시험결과는 표 2와 같다.

표 2. 1상 시제품 소음시험 결과

위치	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	계
	소음	#8	#9	#10	#11	#12	#13	
OA	52.1	52.5	51.4	50.1	51.1	51.2	55.8	52.1
	53.4	51.8	50.3	51.9	53.7	52.5	-	
FA	51.4	52.7	51.7	50.8	53.3	52.4	53.3	52.8
	54.0	52.8	53.5	52.5	53.1	54.6	-	

소음측정시 주위소음은 44dB이었으며, 규격에 따라 주위소음을 보정할 경우 1상 시제품 변압기의 소음레벨은 51.5dB수준이다.

3. 결 론

154kV 저소음 변압기 개발을 위하여 Active part 소음원 분석을 위해 철심의 적층방법 및 적층 Step수에 따른 자속밀도 분포를 해석하였다. 또한 외함의 방사소음을 저감하기 위해 외함의 형태를 타원형에서 원형으로 변경하여 원형외함의 강도, 충격/진동계측, 두께에 따른 진동수준 해석을 실시하여 원형외함의 소음저감 효과를 검증하였다. 그리고 본 연구결과를 바탕으로 154kV 1상 시제품 변압기를 제작하여 소음시험을 실시한 결과 51.5dB의 소음레벨을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[1] Gunther F. Mechler and Ramsis S. Girgis, "Magnetic Flux Distributions in Transformer Core Joints", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, pp. 198-203, 2000.
 [2] Gunther F. Mechler and Ramsis S. Girgis, "Magnetic Flux Distributions in Transformer Core Joints", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 1, pp. 198-203, 2000.
 [3] Frank Fahy, "Sound and Structure Vibration", ACADEMIC PRESS, 1985