

직류전류에 의한 몰드변압기의 철심 자속밀도 변화 분석

김동현*, 김지홍*, 최명준*, 김형두*
현대중공업 기계전기연구소*

Analysis of Flux Density by DC Current at Core of Mold Transformer

Dong-Hyun Kim*, Ji-Hong, Kim*, Myung-Jun Choi*, Hyung-Doo Kim*
Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.*

Abstract - 최근 다양한 부하들로 인해, 배전용변압기로 사용되고 있는 몰드변압기의 운전조건이 가혹해 지고 있다. 특히, 전력변환장치와 연계된 몰드변압기의 경우, 부하의 운전특성에 따라 편자(偏磁)현상이 발생하며 이로 인해 직류성분의 전류가 몰드변압기로 유입된다. 이는 철심의 포화현상 및 변압기의 손실 증가를 유발하여 국부과열 문제로 인한 사고로 이어질 우려가 있다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해, EMTP 과도해석 프로그램을 활용하여 직류성분 전류에 의해 증가되는 몰드변압기의 여자전류를 계산하고, 이를 토대로 철심의 자속밀도 변화를 계산하였다. 직류성분 전류의 크기에 따라 철심의 적정 운전자속밀도를 고려하여 몰드변압기를 설계함으로써 직류전류 유입시에도 안정적인 운전이 가능할 것으로 사료된다.

1. 서 론

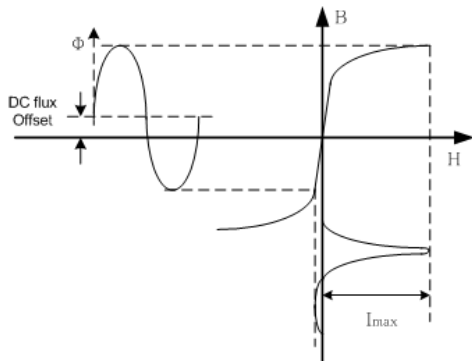
최근 다양한 부하들로 인해 배전용변압기로 사용되고 있는 몰드변압기의 운전조건이 가혹해 지고 있다. 특히 전력변환장치와 연계된 몰드변압기의 경우, 부하의 특성상 직류성분의 전류나 고조파로 인해 손실이 증가하고 열적인 문제로 확대되며, 결국 사고로 이어질 우려가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 직류성분의 전류가 유입되었을 때 변압기 철심에 미치는 영향을 분석하고 손실 증가나 과열현상과 같은 부정적인 영향을 저감 또는 방지하기 위한 설계방안에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 22.9/0.38[kV] 3상 몰드변압기를 대상으로 직류성분의 전류에 의한 철심의 영향을 분석하고 철심의 자속밀도 변화를 계산하고 이러한 연구결과를 몰드변압기 설계에 적용하기 위한 방안을 제시하고자 하였다.

본 논문에서는, 1장에 연구과제의 배경 및 필요성에 대해 언급하였고, 2장에서는 직류전류 유입에 따른 철심의 영향 및 대책을 다루었다. 직류성분 전류의 유입량에 따른 철심의 자속밀도 계산에 대해 3장에 기술하였으며, 마지막으로 4장에 결론을 기술하였다.

2. 직류전류 유입에 따른 철심의 영향 분석 및 대책



〈그림 1〉 직류전류를 고려한 자화전류 곡선

변압기 운전조건이 정상상태라면 철심의 B-H 커브 특성에 따라 거의 대칭인 (+), (-) 방향의 자화전류가 발생한다. 하지만, 직류성분의 전류

가 유입되면, <그림 1>과 같이 DC flux offset에 의해 한쪽방향으로 치우친 형태의 자화전류가 발생하며, 그 크기 또한 급격히 증가한다. 이러한 half-saturation 현상이 발생하면 전력품질이 떨어질 뿐만 아니라, 철심이 포화되어 진동/소음이 증가하고 누설자속의 급격한 증가로 인해 손실 증가 및 과열현상을 초래한다.

직류성분 전류가 유입되지 않는 정상상태에서 자화전류가 낮도록 설계함으로써 직류성분 전류가 유입되더라도 half saturation 현상을 저감 또는 방지할 수 있다. 이를 위해서는 여러 가지 방법이 있지만, 철심의 단면적을 증가시켜 운전자속밀도를 낮게 설계하는 것이 가장 합당한 방법이라 사료된다.

3. 직류전류 유입을 고려한 철심의 자속밀도 계산

3.1 간이계산 방법

직류전류 유입시 발생하는 전체자속은 식(1)과 같이 교류전류에 의한 자속과 직류전류에 의한 자속의 합으로 나타낼 수 있으며 특히, 직류자속에 의한 자속은 식(2)로 표현된다.

$$\phi_{TOTAL} = \phi_{AC} + \phi_{DC} \quad \text{식(1)}$$

$$\phi_{DC} = \frac{N \cdot I_{DC}}{R} \quad \text{식(2)}$$

(N : 권선수, I_{DC} : 직류전류, R : 철심의 자기저항)

상기 식(2)로부터 직류전류에 의해 추가로 증가되는 철심의 자속밀도를 유추할 수 있으며, 이는 식(3)과 같은 상관관계를 가진다.

$$\Delta B \propto N, I_{DC}, \mu_r \quad \text{식(3)}$$

(ΔB : 직류전류에 의한 자속밀도 변화분, μ_r : 철심의 비투자율)

상기 식들로부터 직류전류 유입시 철심의 자속밀도를 간이적으로 계산할 수는 있으나, 이는 철심의 비선형적인 투자율을 고려하기에는 한계가 있다. 즉, 계산하고자 하는 자속밀도의 영역에 따라 오차가 발생하게 된다.

3.2 EMTP를 활용한 여자전류 계산

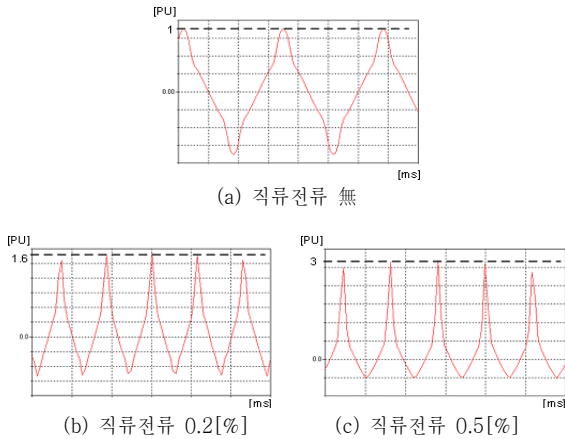
상기 간이계산 방법의 단점을 보완하기 위해서 EMTP를 활용하여 여자전류를 계산하였다. EMTP 모델링에서 변압기 모델은 포화특성을 갖는 saturable transformer를 이용하였으며, 직류전압원과 저항을 구성하여 직류성분의 전류를 모의하였다. 직류전류의 크기는 정격전류 대비 최대 0.5%까지 고려하였다.

〈표 1〉 전압변화에 따른 여자전류 특성(측정값)

인가전압[%]	여자전류[p.u]
80	0.43
90	0.61
100	1.00
105	1.36
110	2.20
115	4.34
120	10.68

EMTP 계산에 앞서 몰드변압기 철심의 포화특성을 분석하기 위해서 open-circuit test를 통한 여자전류를 측정하였으며, 정격전압일 때의 여자전류를 기준으로 환산한 결과를 <표 1>에 나타내었다.

상기 언급한 EMTP 모델링과 계산조건을 토대로 계산된 자화전류의 파형을 <그림 2>에 나타내었고, 직류전류 유입량에 따른 자화전류 크기 변화를 <표 2>에 정리하였다.



<그림 2> 직류전류의 유입량별 여자전류 파형

<그림 2>를 보면, 직류전류가 유입되지 않았을 때는 여자전류의 DC-offset성분이 없기 때문에 영점을 기준으로 상하 대칭인 파형이 나타나고, 직류전류가 0.2[%] 유입되었을 때부터 half-saturation 현상이 발생한다.

<표 2> 직류전류의 유입량별 여자전류 계산 결과(정격전압의 100%)

직류전류 유입량 [%]	여자전류[p.u]
0	1.00
0.1	1.25
0.2	1.61
0.3	2.01
0.4	2.50
0.5	3.03

<표 2>에서 알 수 있듯이, 여자전류는 직류전류 유입량에 비례하여 점점 더 급격히 증가함을 알 수 있다. 이는 철심 포화에 따른 누설리액턴스 값이 감소하기 때문이며, 철심이 포화되는 정도에 따라 돌입전류와 같이 정격전류 이상의 여자전류가 발생하기도 한다. 계산된 여자전류와 권선턴수, 철심의 단면적 및 평균자로를 추가로 고려하여 철심의 자속밀도를 계산할 수 있다.

상기에 언급한 방법으로 직류전류 유입량에 따른 철심의 자속밀도 변화를 계산하였으며, 이를 <표 3>에 나타내었다. 참고로, 직류전류의 유입이 없는 정상상태에서 철심의 운전자속밀도는 일반적으로 1.5[T] ~ 1.75[T]를 기준으로 설계한다.

<표 3> 직류전류의 유입량별 자속밀도 변화(정격전압의 100%)

직류전류 유입량 [%]	ΔB [T]
0	0
0.1	+ 0.057
0.2	+ 0.108
0.3	+ 0.148
0.4	+ 0.178
0.5	+ 0.199

<표 3>에서 직류전류 유입량에 따라 철심의 자속밀도는 정상상태일 때보다 최대 0.2[T]까지 증가함을 알 수 있으며, 이는 철심이 포화영역에 있음을 유추할 수 있다. 따라서, 몰드변압기의 안정적인 운전을 위해 제품을 설계할 때 직류전류 유입량에 따른 철심의 자속밀도 증가분을 고려하여 정상상태에서의 운전자속밀도를 낮게 설계하여야 한다. 2장에서 언급한 바와 같이, 철심의 단면적을 증가시켜서 운전자속밀도를 낮게 설계하는 것이 바람직한 방법이라 판단된다.

3. 결 론

최근 다양한 부하들로 인해 배전용변압기로 사용되고 있는 몰드변압기의 운전조건이 가혹해 지고 있다. 특히 전력변환장치와 연계된 몰드변압기의 경우, 부하의 특성상 직류성분의 전류나 고조파로 인해 손실이 증가하고 열적인 문제로 확대되며, 결국 사고로 이어질 우려가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 직류성분의 전류가 유입되었을 때 변압기 철심에 미치는 영향을 분석하고 손실 증가나 과열현상과 같은 부정적인 영향을 저감 또는 방지하기 위한 설계방안에 대한 연구가 필요하였다.

본 연구에서는 직류성분의 전류에 의한 변압기 철심의 영향을 분석하였고 직류성분 전류의 유입량에 따른 철심의 자속밀도를 간이계산하는 방법을 언급하였다. 하지만, 이 방법은 철심의 비선형적인 특성을 고려하지 못하기 때문에 오차가 발생한다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 EMTP를 활용하여 여자전류를 계산하는 방법을 제안하였다. 이 계산을 위해서는 설계식 또는 시험을 통한 변압기 여자전류값이 필요하며 본 연구에서는 22.9/0.38[kV] 3상 몰드변압기를 대상으로 open-circuit test를 통해 여자전류를 측정하였고 이를 토대로 EMTP를 활용하여 직류전류가 유입되었을 경우의 여자전류를 계산하였다. 직류전류의 유입량은 정격전류 대비 최대 0.5[%]까지 고려하였으며, 여자전류를 계산한 결과 최대 3[p.u]까지 증가하였다. 또한 계산된 여자전류를 이용하여 몰드변압기 철심의 자속밀도 증가분을 계산하였으며 직류전류 0.5[%] 유입시 철심의 자속밀도는 약 0.2[T] 증가함을 확인하였다. 이러한 자속밀도 증가분을 고려하여 몰드변압기를 설계하기 위해서는 철심의 단면적을 증가시켜 정상상태에서 철심의 자속밀도를 낮게 설계하는 것이 바람직한 방안을 제시하였다. 이와 같은 설계를 통해 직류전류 유입시에도 몰드변압기의 안정적인 운전이 가능할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Shu Lu 외 1명, "Study of power transformer excitation under GIC", IEEE, pp.879 - 882, Jan. 1993
- [2] Nobuo Takasu 외 4명, "An experimental analysis DC excitation of transformers by geomagnetically induced current", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.9, No.2, pp.1173 - 1182, Apr. 1994
- [3] P.Picher 외 3명, "Study of the acceptable DC current limit in core-form power transformers", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.12, No.1, pp.257 - 265, Jan. 1997