

강제송유 냉각방식 변압기 펌프선정 기준 정립에 관한 연구

김성언
LS산전㈜

A Study on Pump Selecting for Oil Direct Cooling Type Power Transformer

Kim Seong Eon
LSIS

ABSTRACT

전력용 변압기에서 강제송유 냉각방식을 채택할 경우 절연유 강제 순환을 위한 펌프가 필요한데, 매 설계 시마다 유동해석 혹은 설계 프로그램을 통해 펌프를 선정하게 되면 상당한 시간이 소요된다. 이러한 시간적 손실을 줄이고자 유동해석 및 유체 이론에 근거하여 간단하게 엑셀 시트로 프로그램화 하였다.

1. 서론

변압기 냉각방식 중 강제 송유식은 절연유를 강제순환 시키기 위하여 펌프를 사용하며 권선, 철심 표면을 흐르는 유량을 증가시켜 절연유로의 열전달을 향상시킨다. 그러나 유속의 관점에서 보면 최대 1m/s에서 유동대전이 발생한다^[1]. 하지만 이에 대한 기준이 회사마다 달라 본 논문에서는 보수적으로 0.5m/s를 유동대전 발생점으로 설정하여 검토하였다.

2. 유동해석 및 이론식 적용

2.1 유동대전

유동대전의 기본적 원인은 흐르는 액체와 관로벽과의 계면에 있어서 이온의 선택흡착으로 고려된다. 만약 유동대전이 일어나게 되면 절연과파괴로 이어져 변압기 전체적으로 파괴가 일어날 수 있다. 따라서 강제송유 냉각방식을 채택했을 시 펌프의 유량이 적으면 냉각 성능이 저하되고, 너무 과하면 유동대전이 발생하게 된다.

2.2 유량 선정 및 권선부 수두손실

강제송유 냉각 방식은 펌프를 사용하여 권선과 철심 주변의 유량을 높여줌으로써 냉각 효과를 극대화 하는 방식이다. 냉각을 고려하여 용량이 큰 펌프를 사용하면 좋겠지만 앞에서 설명한 것과 같이 유동대전을 방지하기 위하여 권선과 Barrier 사이를 흐르는 유속이 0.5m/s를 넘지 않아야 한다. 하지만 강제송유식 변압기는 펌프에서 권선까지 절연유를 직접 연결하기 때문에 권선 하부 구조가 복잡하여 수식으로 유속을 계산하기 어렵고, 압력손실이 얼마나 발생하는지도 알기 어렵다. 따라서 유동대전을 만족하는 유속을 얻기 위하여, 또 권선부 압력손실(수두손실)이 얼마나 발생하는지 알기 위하여 유동해석으로 알아보았다.

1) 형상 모델링 및 경계조건

단상 변압기를 대상으로 한 상에 들어가는 최대 유량을

알아보았으며, 3상 변압기의 경우 이 단상 변압기 최대 유량의 3배가 될 것이다. 또한 펌프 개수에 따라 최대 유량을 균등하게 분배 할 것이다. 일반적인 수두손실의 경우 베르누이 방정식을 이용하여 구할 수 있다. 베르누이 방정식은 입구측 에너지의 합은 출구측 에너지의 합과 항상 같다는 에너지 보존 법칙을 기본으로 한다.

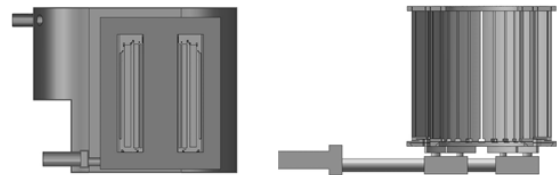


Fig. 1 해석을 위한 모델링 : 고체영역(좌), 유체영역(우)

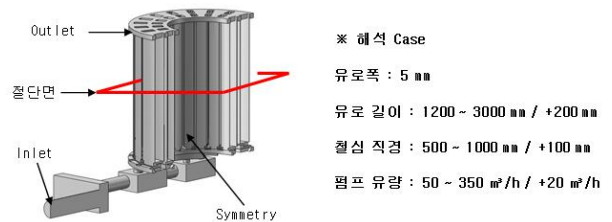


Fig. 2 경계조건

※ 해석 Case
유로폭 : 5 mm
유로 길이 : 1200 ~ 3000 mm / +200 mm
철심 직경 : 500 ~ 1000 mm / +100 mm
펌프 유량 : 50 ~ 350 m³/h / +20 m³/h

2) 해석 결과

각각의 유로 면적에서 최대 유속이 0.5m/s를 넘지 않는 유량을 구하고, 그 유량에 대한 수두손실을 구하였다. 그 결과 유로면적에 비례하여 유량이 증가하는 것을 알 수 있었으며, 권선 수두손실 또한 점점 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 아래 그래프는 식 $y=3.4864x+0.2389$ 로 표현된다. 권선 단면의 유로 면적은 등배 수, Spacer 크기, Cooler 등 유로에 영향을 미치는 모든 절연물 구조를 고려하여 구한다.

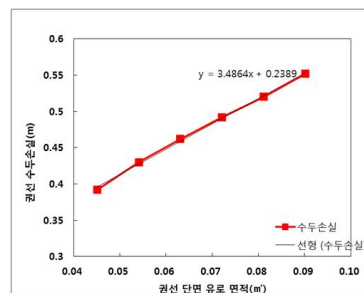


Fig. 3 권선 단면 유로 면적에 따른 수두손실

아래 Fig. 4는 권선의 수직 단면을 보여주고 있다. 권선 하부에서 최대 유속이 발생하는 것을 알 수 있다.

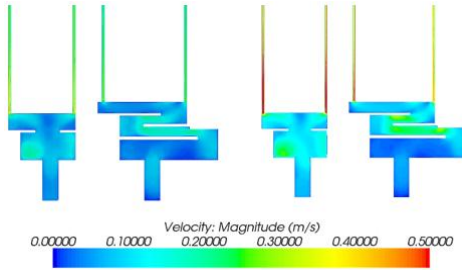


Fig. 4 권선 하부의 유속 분포
 (- 좌: 권선 단면적 19.02m², 유량 120m³/h)
 (- 우: 권선 단면적 22.38m², 유량 240m³/h)

2.3 방열기의 수두손실

방열기는 Fin 수십 개가 병렬로 연결되어 있다. 따라서 병렬연결 특성상 Fin으로 들어가는 유량이 균등하게 분배된다면 모든 Fin의 수두손실은 동일하다. 결국 방열기 전체 수두손실을 고려할 필요 없이 Fin 하나의 수두손실만 고려해보면 된다. Fin 입출구 면적이 같아 유속(V)이 같고 독립적이라고 가정한다면 대기압으로 입출구 압력(P)도 동일하다. 또한 Close path인 상황에서 높이에 대한 영향이 없다. 이 모든 것을 베르누이 방정식에 적용하면 아래와 같다.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 - h_f + h_p$$

- . h_p : 펌프에 의한 수두 증가량
- . h_f : 압력 손실에 의한 수두 감소량

P₁=P₂, V₁=V₂, Z₁=Z₂이며, 이 때 펌프에 의한 수두 증가량은 압력 손실에 의한 수두 감소량과 같다고 볼 수 있다

H_f는 Darcy-Weisbach 식에 의해 아래와 같이 표현된다.

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

- (f : 손실계수, L : 방열기 길이, D : 수력직경,)
- (V : 유속, g : 중력)

손실계수 f는 층류와 난류에 따라 크게 달라지며, Reynolds Number (Re), 관직경(d), 관벽의 조도(ε)로 표현되는 무차원수이다. Fin의 경우 유속이 느리고 관로가 좁아 층류의 흐름을 보인다. 층류의 손실계수 f를 구하는 공식은 다음과 같다.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (\text{Reynolds Number: } Re = \frac{\rho V D}{\mu})$$

(μ : 점성계수, ρ : 밀도, D : 수력직경, V : 유속)

2.4 배관 시스템의 수두손실

일반적인 직관의 경우 수두손실은 관로벽과의 마찰손실로 발생한다. 앞서 언급한 Darcy-Weisbach 식을 적용하면 쉽게 구할 수 있다. 모든 직관에 대하여 그 길이(L)와 직경(D), 유속(V) 정보를 확보한 후 계산하여 합하면 된다. 하지만 방열기와 다르게 Pipe에서는 유속이 빠르고 직경이

커 난류가 발생할 수 있다. 따라서 손실계수 f는 층류와 난류를 구분하여 적용해야 한다. 구분 기준은 Re가 2,000 이상이면 난류로 보며, 이 때 손실계수 f는 다음과 같다.

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (\text{Reynolds Number: } Re = \frac{\rho V D}{\mu} > 2000)$$

층류의 경우 앞에서 언급한 식을 참조하면 된다.

2.5 부차적 손실

변압기의 경우 방열기와 Pipe에서 급격한 확대/축소와 이음 부분에 의한 부가적 손실이 발생한다. 식은 아래와 같다.

$$\sum h_m = \frac{V^2}{2g} \sum K \quad (K : \text{손실계수, } g : \text{중력, } V : \text{유속})$$

급확대(K_{SE})/급축소(K_{SC})의 경우 손실계수는 아래의 식을 따른다.

$$K_{SE} = (1 - \frac{d}{D})^2, \quad K_{SC} \approx 0.42 \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)$$

나머지 Elbow 및 Tee 관에 대한 손실계수는 아래 표를 참조한다.

Table 1 Elbow, Tee 관에 대한 손실계수, K

	Nominal Diameter, in (Flanged)				
	1	2	4	8	20
Elbows:					
45° Long radius	0.21	0.20	0.19	0.16	0.14
90° Regular	0.50	0.39	0.30	0.26	0.21
90° Long radius	0.40	0.30	0.19	0.15	0.10
180° Regular	0.41	0.35	0.30	0.25	0.20
180° Long radius	0.40	0.30	0.21	0.15	0.10
Tees:					
Line Flow	0.24	0.19	0.14	0.10	0.07
Branch Flow	1.00	0.80	0.64	0.58	0.41

3. 결론

전력용 변압기의 냉각을 위해 펌프를 적용할 때 유량이 많아지면 냉각에 유리하지만, 일정 수준을 초과하면 유동대전이 발생한다. 이러한 이유로 유동대전이 발생하지 않는 범위에서 가장 유량이 많이 흐르게끔 펌프를 선정하는 것이 냉각설계에서 중요하다. 이 때 가장 중요한 인자가 수두손실인데, 권선의 경우 변압기의 복잡한 하부 구조로 인해 수식으로 풀어내는 것이 어려우므로 대표 모델을 선정하여 유동해석을 통해 유로 면적에 따른 수두손실의 관계식을 도출하였다. 방열기 수두손실은 일종의 파이프로 모사하여 구하였다. 앞서 검토한 공식들을 엑셀로 정리해 놓으면 시간 절감 측면에서 훌륭한 도구로 사용할 수 있다. 이로 인해 기존의 해석 프로그램이나 설계 프로그램을 통해 검토하였던 펌프 선정을 엑셀 시트에 인자를 입력하는 것으로 간단히 구할 수 있게 되었다.

참고 문헌

- [1] 최순호, 방정주, 허창수(2012). 식물성 절연유의 유속과 BTA에 따른 유동대전 현상 연구. **한국전기전자재료학회논문지**, 제25권 제10호, 791-797.
- [2] 김찬중, 공학도를 위한 길잡이 유체공학입문: 문운당. pp.81-83, 2002.