

## 대전류 통전시 배전반내의 열적 현상에 관한 연구

이방욱\* 강종성 손종만 최원준 서정민  
LG산전(주) 전력연구소 전력기기 연구팀

### Investigations on the Thermal Phenomena in High Current Electric Switchboard

B.W.LEE J.S. KANG J.M. SOHN W.J. CHOI J.M. SEO  
Electric Equipment Team, Electrotechnology R&D center, LG Industrial Systems

**Abstract** - In this work, thermal phenomena and temperature rise due to thermal source in electric switchboard were investigated using analytical measures.

Electric switchboards are assemblies of panels on which are mounted switches, circuit breakers, high current busbars, meter, fuses and terminals essential to the operation of electric equipment. It is very difficult to predict the temperature rise in switchboard due to the existence of several heat sources. To overcome this situations, we focused on the eddy current distribution on the panel of switchboard caused by high current busbars as a fundamental basis. And thermal sources including busbar and switchgear have been considered. Furthermore, thermal transfer phenomena in switchboard was considered theoretically. Finally, three-dimensional thermal model for eddy current analysis has been adopted and FEM analysis was conducted. As a result, three-dimensional numerical analysis found to be applicable to the analysis of thermal phenomena in switchboard.

모의하고 그에 따른 기기의 온도상승을 예측할 수 있는 방법을 개발하기 위해서는 필수적이기 때문이다.

전력기기 중 특히 배전반에서는 대전류 통전시 와류에 의한 영향 및 온도상승을 고려하는 것이 필수적이다. 배전반은 수용가에서 대전력을 수전받기 위한 필수 기기로서 고전압, 대전류의 통전 및 차단능력을 보유하고 있어야 한다. 대전류가 busbar를 통해 통전되던 배전반 내부 및 측면판넬에서는 busbar에 의한 주울손 및 주변금속에 흐르는 와전류에 의한 발열현상이 일어나 온도상승이 일어나게 된다.

배전반은 일반적으로 다음 4가지 요소, 즉 외함, 개폐기, 통전 busbar, 계기부 및 제어부분으로 구성된다. 이 중 배전반내의 개폐기 및 통전 busbar에 의한 발열 원인을 규명하고 그에 따른 대책을 수립하는 것이 최적 배전반 설계를 위해서는 필수적인 요인이 되고 있다.

따라서 본 연구에서는 배전반 내의 과도한 온도상승의 원인을 파악하기 위해 첫째로 배전반내의 열원 및 열원에 의한 열전달 현상을 파악하고 둘째로 배전반을 이용한 온도상승시험을 통해 얻은 결과를 바탕으로 3차원 전차계해석 프로그램을 이용한 와류에 의한 온도 상승 해석을 실시하였다.

## 2. 배전반내의 발열 및 열전달 특성

### 2.1 발열의 원인 및 영향

배전반에서 열적 문제의 해결이 중요한 이유는 첫째, 폐쇄된 외함 내에 전기적 설비를 배치하는데 따른 온도상승의 문제 둘째, 개폐기의 전반적인 사이즈 및 구성부품의 compact화, 고차단용량화에 따른 열적 문제 셋째, 배전반의 수전 및 급전용량의 증대 및 고효율화를 지향함에 따른 과도한 발열문제 등이 있다.

대전류 통전 전력기기에서의 온도상승은 크게 주울손 및 와류손, 주변온도의 상승으로 인한 요인이 대부분이다. 배전반의 경우 구성조건이나 작동조건이 광범위하기 때문에 과도한 온도상승의 원인은 여러가지가 있으며 대표적인 것을 간추리면 ①과도한 외부온도 상승 ② 적정설치 용량 초과 ③ 단락또는 과부하 ④ 연결부위 느슨함 ⑤ 협소한 통전부 횡단면 ⑥ 부적절한 부품 및 배전반내 위치배분 등이다. 이러한 요인으로 말미암아 배전반 내부온도가 과도 상승하게 되어 내부 부품의 절연노화 및 손상을 일으키고 전체 배전반 수명 및 안전성에 영향을 미치게 된다. 위에 언급한 외적 요인외에 근본적인 열원은 배전반내의 부스바 및 개폐기류에서 발생하는 열로서 이에 대한 발열평가 및 대책을 모색하는 것이 시급하다 할 수 있다.

결과적으로, 배전반이 열적으로 취약한 조건에서도 불구하고 높은 정밀도 및 효율성을 가지고 동작할 수 있게 하려면 배전반 패널제작자의 숙련도 및 반복적인 배전반 설계 테스트, 열원에 따른 전류세기/온도 관계, 열원

## 1. 서 론

전력기기에 대전류가 흐르게 되면 도체에 흐르는 전류에 의해 주울손이 발생하여 발열 현상이 일어난다. 특히 도체에 흐르는 전류가 시간적으로 변화한다면 발생한 자계에 의해 도체에 인접한 주위 금속에 와전류가 흐르고, 주울손이 추가로 발생하게 된다. 금속이 자성재료인 경우에는 자화에 의한 히스테리시스 현상이 일어나며 히스테리시스 손실이 발생한다. 이러한 손실이 전력기기에 발생하면 기기의 수명 및 효율이 심각하게 저하되게 된다.

위에 언급한 손실중 주울손 및 와전류에 의한 손실은 열의 형태로 기기내에 존재하게 되며 이에 따라 전력기기가 과열되어 통전 및 주변 절연물에 영향을 주며 기기를 동작하는 사람에게 영향을 줄 수 있다. 따라서 전력기기는 개발시에 온도시험을 실시하여 규정된 온도이하로 운전시 유지될 수 있어야 할 것을 요구받고 있다. 특히 최근에 이르러 전력기기가 소형화 고차단용량 및 통전용량을 요구함에 따라 온도상승의 원인 및 현상파악, 과도한 온도상승을 억제할 수 있는 방안 마련이 시급한 과제로 대두되고 있다.

따라서 전력기기 설계시에 대전류 통전에 따른 온도상승원인, 즉 주울손 및 와류손에 의한 영향을 파악하는 것이 기초 설계 파라미터가 되어야 한다. 왜냐하면 주울손 및 와류손에 의한 에너지 손실이 전체 손실에 있어서 상당히 큰 비중을 차지하고, 이러한 현상을 해석적으로

의 위치 및 주변온도 변화등에 적절하게 대처할 수 있는 해석기술의 개발등이 뒤따라야 한다.

## 2.2 배전반내의 열전달 특성

전기 배전반은 매질로 볼 때 크게 유체(공기)와 고체로 구성된 시스템이며 그 내에서 전류가 흐르게 됨에 따라 에너지 손실이 일어나고 이 에너지손실로 인해 온도가 상승하게 된다. 열에너지의 특성상 열평형 상태로 진전하려는 과정에서 환전부분(부품, 도체 등)에서 발생한 열이 외함에 전달되게 되고 이곳에서 결국은 맞닿아있는 주변공기로 열 방사가 일어나게 된다.

열전달은 온도차에 의해 일어나는 에너지의 이동이다. 하나의 물질에서나 두 물질 사이에서 온도차가 존재하면 반드시 열전달이 일어난다. 열전달은 복사, 전도, 대류의 형태로 나타난다. 복사 열전도는 물체로부터 공간으로 전자파 형태로 에너지를 방출하는 것이고, 전도 열전달은 물체내부에 온도 구배가 존재할 때 그 물체를 통하여 에너지가 이동하는 것이고, 대류 열전달은 물체 표면으로부터 액체나 기체로 에너지의 전달을 의미하는 것이다. 배전반을 포함한 어떠한 전력기기의 열현상도 위의 세가지중의 하나로 나타나며 대부분의 기기에서는 위 세가지 현상이 복합되어 열전달 현상이 일어난다.

### 전도

전력기기 내부의 손실에 의해서 발생한 열량은 온도를 상승시키고 열에너지가 물체 내부에서 표면으로 열전도에 의하여 이동한다. 즉 전도는 고체 내부에서 열의 이동이다. 열전도 현상은 크게 두가지로 나눌 수 있다.

첫째, 단순전도현상으로서 공간내에 존재하는 해당 고체가 열원이 아닐 경우가 이에 해당한다. 둘째, 환전도로써 해당 고체 내부에서 열이 발생되어 전달되는 경우이다. 열전도 현상에 관련된 계산식은 Fourier방정식을 기초로 구성되며 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\Phi_{ij} = -\frac{\lambda S}{d} (T_i - T_j)$$

이때,  $\Phi_{ij}$ 는 두점 i와 j 사이의 열속 [W],  $\lambda$ 는 열전도율 [W/m°C], S는 열교환표면 면적 [m<sup>2</sup>],  $T_i, T_j$ 는 측정 두점의 온도 [°C], d는 두 점간의 거리 [m]이다.

### 복사

열복사는 유한한 온도의 물질에 의하여 방사되는 에너지이다. 액체와 기체로부터 방사가 일어날수도 있지만 실제 전력기기에서는 고체에 의한 복사만 고려한다. 이 경우에도 발열에 의한 복사에너지가 미약하기 때문에 실제 해석에 있어서는 고려하지 않는 경우가 많다. 복사장의 에너지는 전자기파에 의하여 전달되며 가장 큰 특징은 전도나 대류와는 달리 전달매질이 불필요하다는 것이다.

### 대류

실제 전력기기의 내부 손실에 의해 발생하는 열에너지는 대부분 대류 열전달에 의해 방출된다. 따라서 대류현상은 배전반 열해석에 있어서도 가장 중요한 열전달 현상이다. 대류현상은 고체 본체와 움직이는 유체사이의 열교환에 상응하는 실제 대류현상으로서, 유체유동의 시작점에 따라 자연대류 또는 강제대류로 나누어진다. 고체와 유체 사이의 열교환은 교환 계수  $h_i$ 를 사용하여 표현할 수 있다.

$$\Phi_i = h_i S_i (T_f - T_i)$$

이때,  $\Phi_i$ 는 표면  $S_i$ 에서의 열속 [W],  $h_i$ 는 열교환계수 [W/m<sup>2</sup>°C],  $T_f, T_i$ 는 유체와 고체물체의 표면 온도 [°C]이다.

물리적 관점에서 볼 때, 대류에 의한 열교환현상은 유동

메카니즘 문제와 밀접한 연관을 가지고 있으므로 실제 현상 해석을 위해서는 유동해석이 필수적이라 할 수 있다. 그러나 실제적인 관점에서 볼 때 다음과 같은 표현식을 포함하는 열교환 계수를 사용하여 기술할 수 있다.

- 유체유동을 나타내는 매개변수(속도, 온도, 압력 등)

- 유체의 물리적 특성(열전도도, 점성, 열용량, 밀도)

열전달계수 h는 고체표면에서 주위의 냉매인 기체나 액체로 열에너지 교환을 결정하는 변수로서 위에 언급한 무차원 파라미터인 Nusselt수 Nu, Prandtl수 Pr, Reynold 수 Re 등으로부터 구할 수 있다.

위에 언급한 고체와 유체사이의 대류 이외에 실제 유체 운동에 의해 유체간에 열전달되는 대류흐름이 존재한다. 예를 들어 열에 의해 대위된 밀폐된 공간내 유체의 위 아래사이에서 온도차가 발생하는 것, 두 체적 사이 공기의 이동은 흐름 단면적과 흐름속도의 함수로 되는 질량흐름비로 결정된다.

이때의 대류열전달은 다음식으로 표현된다.

$$\Phi_{ij} = \tilde{m} c_p (T_i - T_j)$$

이때,  $\Phi_{ij}$ 는 i와 j사이에서 교환된 열속 [W],  $\tilde{m}$ 은 질량 흐름비 [kg/s],  $c_p$ 는 유체 열용량 [J/kg°C]이다.

배전반에서 열교환 문제를 해석하기 위하여 고려해야 할 요소는 주변공기, 외함, 내부공기 그리고 여러가지 열원들이다. 배전반내에서의 열적문제를 해석하기 위해서는 위의 요소들을 총체적으로 고려해야하며 요소 서로 간에는 서로 밀접하게 연관되어 있다. 그 관계를 도식화한 것이 아래 그림 1에 정리되어 있으며 무엇보다도 가장 고려해야 할 사항은 열원에 의한 대류현상이다.

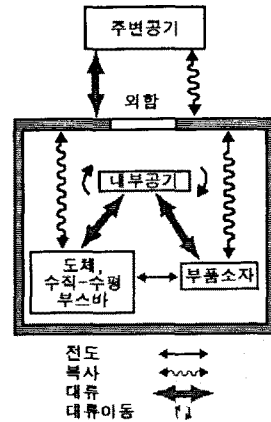


그림 1. 배전반 내부 열원간의 열전달 현상

## 3. 배전반 열해석 모델링

### 3.1 등가 열저항법

배전반의 열해석을 위하여 등가열저항을 이용하는 절점해석법(nodal analysis)을 사용할 수 있다. 이 해석법은 유한차분법으로부터 발전된 것으로 최신 기법은 아니지만, 복잡한 기기내의 열전달과정을 유연하게 표현할 수 있다는 점에서 장점이 있다.

이론상으로 이 기법은 대상 해석 시스템을 여러 개의 절점으로 구성된 등온 체적(isothermal volumes)들로 세분화하는 방법이다. 각각의 절점은 여러 개의 파라미터들로 구성되어 있으며 파라미터는 온도, 열교환과는 무관한 입력 열등에 대한 것이다. 절점을 구성했으면 절점간에 커플링이 존재하는지를 조사하고, 절점간에 balance equation을 작성한다. 이러한 접근법은 실제

로 시스템의 공간 이산화를 의미하며 결국에는 열 네트워크를 구성할 수 있게 한다. 열네트워크에는 각각의 절점, 용량, 열원, 절점간의 도전을 등에 대한 정보가 포함되어 있다.

열에 관한 파라미터	전기 파라미터
온도	포텐셜
열 저항	전기 저항
열속	전류
열 용량	정전용량

이러한 정보들을 종합하여 열 네트워크가 구성되면 선형, 비선형 방정식을 구성할 수가 있고, 이것을 이용하여 행렬을 정의할 수 있다. 이 행렬을 thermal admittance 행렬이라 한다.

Thermal admittance 행렬을 구성한 다음에는 이 행렬 요소들의 수치를 입력하여야 하며 이것은 열도전율에 상응하는 값이다. 열교환 방법에 따른 도전을 표현식은 다음과 같다.

$$\text{전도} : G_{ij} = \lambda_i S_{ij} / D_{ij}$$

$$\text{복사} : G_{ij} = \alpha \sigma \epsilon S F_{ij} (T_i + T_j) (T_i^2 + T_j^2)$$

$$\text{대류} : G_{ij} = h_i S_{ij}$$

$$\text{대류 운동} : G_{ij} = \dot{M} c_p$$

위 열도전율을 바탕으로 전기회로에 상응하는 열속방정식은 다음과 같이 구성된다.

$$\Phi_{ij} = G_{ij} (T_i - T_j)$$

### 3.2 FEM을 이용한 배전반 열해석

실제적으로 열 현상의 파악, 온도상승 시험, 그리고 수치적으로 모의하는 것은 대단히 어렵고 시간 및 비용이 많이 소모되는 작업이다. 더구나 배전반의 온도상승을 예측하는 것은 쉬운 작업이 아니다. 왜냐하면 배전반 내에는 여러 개의 열원이 존재할 뿐만 아니라 전도, 대류, 복사에 의한 다양한 열전달 현상이 혼합되어 나타나기 때문이다. 이에 대한 대안의 하나로서 우선적으로 배전반 패널에 분포하는 와류에 의한 열 현상에 초점을 맞추어 FEM을 이용한 해석을 실시하였다. 해석에 필요한 자유대류계수 등은 실제 배전반 온도상승 시험을 통해 얻어진 데이터를 기초로 하였으며 EMAS를 이용한 Transient 해석을 실시하여 배전반의 온도상승을 수치적으로 예측해 보았다.

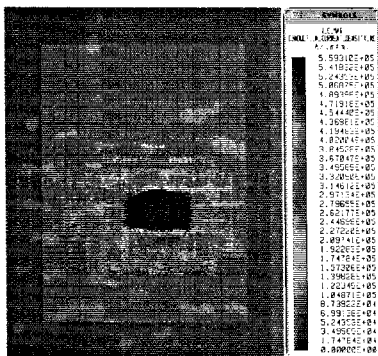


그림 2. 3상 4000A 인가시 패널 와류분포

그림 2는 3상 4000A 평형전류가 부스바를 통해 흐를 때 패널 절단면의 와류분포를 보여주고 있다. 와류에 의한 손실을 가장 많이 받는 부분은 패널의 하단부 우측면이었다. 그 원인은 상대적으로 부스바가 좌측면에 비해 오른쪽면에 대한 간격이 짧고 하단부에 자속이 집중하기 때문이다.

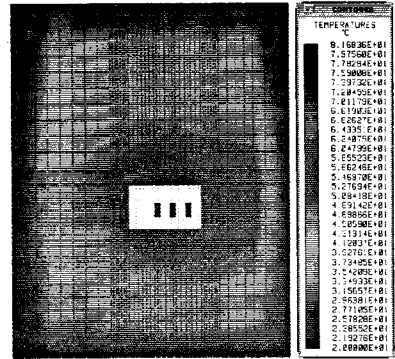


그림 3. 3상 4000A 인가시 온도 분포

그림 3은 3상 4000A를 인가하였을 때 도체 및 중간판의 온도분포를 나타낸다. 중간판 상부는 도체 발생열에 의한 와류의 영향으로 온도가 매우 높게 올라갔음을 알 수 있고, 또한 와류의 크기가 상대적으로 큰 절단면 우측하단의 온도상승이 다른 부위보다 높았음을 알 수 있다. 그러나 실제 실험을 행한 결과를 살펴보면 실제 배전반내의 대류유인에 의해 절단면 하부보다는 상부에서의 온도상승이 더 두드러짐을 알 수 있다. 그 이유는 하부에서 발생한 열이 배전반의 폐쇄구조로 인하여 외부로 빠져나가지 못하고 그대로 상층으로 전달되기 때문인 것으로 사료된다.

### 5. 결 론

배전반 내에서의 열현상은 여러 가지의 열원과 복잡한 열전달현상, 내부구조 등으로 인해 고려해야 할 요소가 많으므로 정량적으로 해석하는 것은 매우 어려운 문제이다. 배전반을 비롯한 전력기기 열해석을 위해서는 전자계해석을 통한 에너지 손실의 파악, 이를 바탕으로 유체유동 해석을 통한 열전달 해석이 동시에 이루어질 때 어느정도 해석이 가능하리라 생각된다.

본 연구를 통하여서는 배전반내의 열적인 현상에 대한 파악, 열원 및 열전달 특성, 그리고 열해석 시뮬레이션을 위한 예로써 등가열저항법을 소개하였고, 마지막으로 FEM을 이용한 열해석법을 실시한 결과를 보고하였다. FEM을 통한 해석은 전자계와 열계가 결합된 복합계를 해석했다는 데 의의가 있지만 향후에는 이 결과를 바탕으로 유체해석 시스템이 결합된 해석이 이루어질 때 좀 더 정확한 접근이 가능하리라 사료된다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Wolfgang Andree, "3D Eddy Current Computation in the Transverse Flux Induction Heating Equipment", IEEE Trans. on MAGNETICS, Vol. 30, NO.5, September 1994
- [2] Johh, R. Brauer, "3D Coupled Electromagnetic and Structural Finite Element Analysis of Motional Eddy Current Problems", IEEE Trans. on MAGNETICS, Vol. 30, NO.5, September 1994
- [3] O. Biro, K. Preis, "On the use of the magnetic vector potential in the finite element analysis of three-dimensional eddy currents.", IEEE Trans. on MAGNETICS, Vol. 25, NO.4, July 1989
- [4] B.W. Lee, J.M. Sohn, J.M. Seo, "Analysis of co-relation between temperature rise and eddy current distribution in electric switchboard", ICEE 99