

유입변압기 중신부 온도상승 예측 및 모니터링

이준엽, 이창용, 김용한, 박성원, 윤자홍\*, 남극재\*  
 현대중공업 기계전기연구소, \*신제품개발실

Temperature-Rising Prediction and Monitoring for an Oil-immersed Power Transformer

J. Y. Lee, C. R. Lee, S. W. Park, Y. H. Kim, J. H. Yoon and G. C. Nam  
 Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

**Abstract** - In order to observe the thermal behavior of oil immersed power transformers the temperature rise prediction algorithm and monitoring system were developed. The algorithm is formulated into a computer program based on the TNM (Thermal Network Method) which was divided into several elements, and the temperature of each element was calculated according to each time lapse. A monitoring system can show the real time active part temperatures of the transformer under various electric loads and for any types of thermal environment.

1. 서 론

현재의 사회는 고도화 된 정보사회라 할 수 있으며, 이러한 정보화는 문명의 발전과 더불어 생활환경·사회전반 기능의 전력 의존도를 증대시키고 있으며, 전력계통의 주변 환경은 고품질의 전력, 전력공급의 신뢰도 및 서비스의 질적 개선을 한층 더 강하게 요청하고 있다. 이와 더불어 실 사이트의 자사 작업자 업무환경 개선과 사고의 방지를 통한 공공의 안전이 요구되고 있다. 이러한 환경에 대한 책임의 증가 또한 현재의 전력시장의 변화 추세라 할 수 있다. 이러한 변화에 대응하기 위한 접근방법으로서 운전중인 변전설비를 감시·진단하여 정밀 진단 또는 점검의 필요여부를 판단하고 수명예측 등을 통해 전력기기의 운영을 자동적으로 수행할 수 있는 온라인 시스템에 대한 기대가 일층 더 높아지고 있다. 따라서, 변전기기의 온라인 진단시스템의 역할은 변전설비의 이상 징후를 운전상태에서 상시 감시하여 사고를 방지하고 감시하여 축적된 데이터를 통해 최적의 유지보수 계획을 수립하고 고장 시에 누적된 데이터로 이상원인 및 이상위치를 판정하여 사고를 복구 및 대책수립에 필요한 정보 제공을 하는데 있다.

당사에서는 이러한 분야의 연구의 일환으로 변압기 및 GIS를 대상으로 하는 온라인 진단시스템을 개발하였으며, 그 중 전력용 변압기 예방진단 시스템(HIPDS)를 당사 154kV 변전소에 설치 및 적용하여 운전 중에 있으며, 남동발전 산하 여수화력 주변압기에 적용하였다. 본 연구는 변압기 진단시스템에 적용된 알고리즘중 하나로, 변압기 내부의 온도상승을 계산해 내는 기법 개발을 목표로 하였다.

전력용 변압기는 코어, 권선, 그리고 탱크 부위에서 자기손실이 발생하며, 운전 부하에 따라 국부적인 온도상승이 위험한 수준까지 도달할 수 있다. 과도한 온도상승은 절연재의 열화를 유발하며, 극단적인 경우 기계적인 파괴를 야기할 수 있으므로 중신의 각 부분에 대한 실시간 온도 감시가 중요하다고 판단된다. 본 연구에서는 온도센서를 사용하지 않고 기본 사양으로 설치되어 있는

상부 절연유의 온도값을 이용하여 권선 및 코어의 온도를 예측하기 위해, 집중정수법인 열회로망법 (TNM, Thermal Network Method)을 이용하여 개발된 온도상승 해석 알고리즘 및 모니터링 기법을 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 온도해석 알고리즘

변압기와 같은 복잡한 형상을 가진 대상에 대해서 열의 확산과 전하의 확산사이에 존재하는 유사성을 이용하여 열저항의 개념을 도입한 열회로망법을 많이 이용한다. 전도에 대한 열저항과 대류에 의한 열저항의 개념을 나타내면 다음과 같다.

$$q = kA_{1,2} \frac{\Delta T_{1,2}}{l_{1,2}} \rightarrow R_{cond} = \frac{l_{1,2}}{kA_{1,2}} \quad (1)$$

$$q = hA_{1,2} \Delta T_{1,2} \rightarrow R_{conv} = \frac{1}{hA_{1,2}} \quad (2)$$

여기서,  $A_{1,2}$ 는 1영역과 2영역간의 열교환 면적이고,  $l_{1,2}$ 는 1영역과 2영역간의 거리,  $\Delta T_{1,2}$ 는 1영역과 2영역간의 온도차를 나타낸다.

해석대상인 변압기 중신부를 유한한 제한체적 요소로 분할하고, 하나의 제한체적내의 온도분포는 그 영역내부와 주위 요소에서의 온도값으로 표현된다. 체적내 공간적인 온도분포는 실제와 차이가 날 것이나 체적평균온도는 거의 같다고 보며, 비정상상태의 1차원 열확산 방정식은

$$\frac{\delta}{\delta x} (k_x \frac{\delta T}{\delta x}) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\delta T}{\delta t} \quad (3)$$

와 같이 표현되므로, 이 항들을 포함하는 열회로망을 구성하여 보면 그림 1과 같다. 열원은 전류원으로 열용량은 커패시턴스로 나타내며, 각 영역의 중심에 열용량이 집중되어 있고 열원도 영역의 중심에만 존재한다고 가정한다.

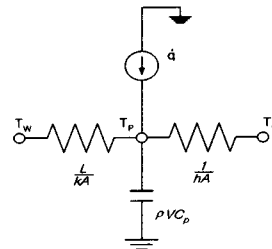


Figure 1. Example of the Thermal Network in Including Heat Generation and Thermal Capacitance

그림으로부터 열동기회로의 모든 절점에 대해 식 (5)와 같은 식들을 만들면 식 (6)과 같은 행렬식이 만들어진다.

$$C_i \frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{R_{ji}} (T_j - T_i) + Q_i \quad (4)$$

$$[C] \frac{d[T_i]}{dt} = [G][T_i] + [Q] \quad (5)$$

여기서, [C]는 열용량행렬, [T]는 열 행렬, [G]는 열 컨덕턴스 행렬, [Q]는 열손실 행렬이다. 위에서 만들어진 행렬식을 Runge-Kutta 방법으로 계산하여 나온  $T_i$  값들이 인입되는 오일에 대한 변압기 중신부 각부의 상대적인 온도 상승치가 되는 것이다.

## 2.2. 변압기의 열저항 회로

대용량 변압기의 중신부의 열회로망을 구성하기 위해서는 먼저 변압기의 각 부분에 적당한 제한체적을 설정하여야 한다. 제한체적을 잡는 방법은 먼저 제한체적을 잡은후 그 중심에 절점을 할당하는 것으로 이 방법은 복합물질을 다루거나 경계조건을 처리할 때 유리하다.

그림 2는 실제 유압 변압기에서 제한체적으로 구분된 절점과 절점사이에서의 열저항 상관관계를 나타낸 것이다. 그림에서 코어, 권선 및 Tie-Plate부에서 열이 발생하며, 발생된 열은 오일 channel 및 그 밖의 오일을 통하여 냉각된다. 각 절점에서 상관방정식이 형성되며, 행렬 방정식을 계산함으로써 중신부 각부의 온도상승을 계산할 수 있다.

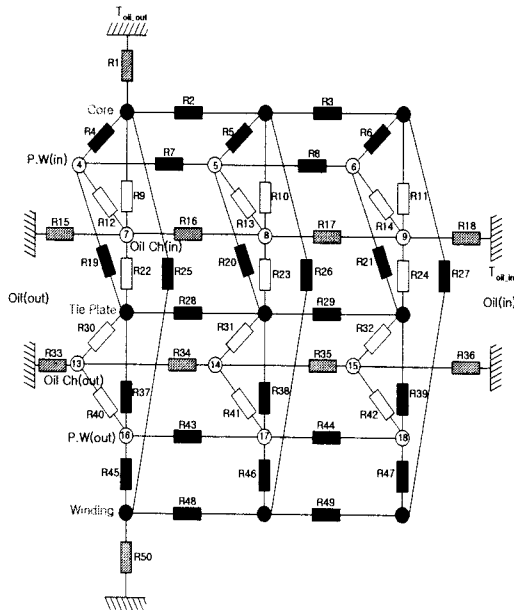


Figure 2. Thermal Network for Tie-Plate Assembly

## 2.3. 온도상승예측 프로그램

본 프로그램은 대용량 변압기의 변압기 중신부의 구조, 경계조건을 설정하고 변압기 오일입구의 유온 측정센서로부터 측정된 유온으로부터 각 권선부, 코어부 등의 절점에서의 온도상승값 추정을 위한 계산을 수행한다.

프로그램은 크게 입력모듈, 계산모듈 및 출력모듈 3개 부분으로 구성되어 있으며, 계산처리 수행과정은 그림 3

과 같다. 입력모듈에서는 변압기 내부 Outline, 중신부의 기하학적 치수를 입력하며, 각 부품의 물성치 및 해석을 위한 경계조건을 입력한다.

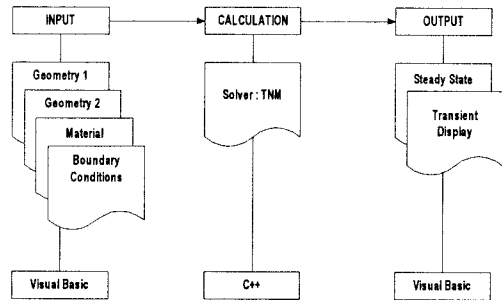


Figure 3. Computing Process for Thermal Analysis

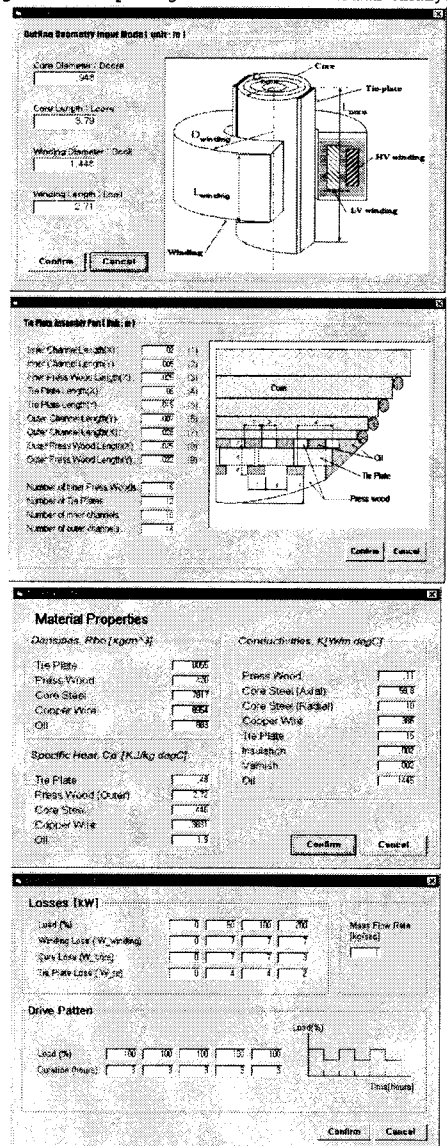


Figure 4. Input Mode

계산모듈은 입력값을 변수로 열회로망의 각 Node에서 구성된 행렬 방정식을 푸는 수치해석 과정이며, 계산의 정확성 및 신속성을 위하여 C++언어로 코딩하였다.

출력모듈은 계산된 결과값을 Display하며, 실시간으로 시간변화에 따른 온도상승 값 및 경향을 그래프 형식을 통하여 볼 수 있도록 하였다.

그림 4는 변압기 중신부의 기하학적 입력 및 운전조건 등을 입력하는 화면이다. 먼저 대상 변압기의 마그네틱 코어, 권선 및 냉각 channel 등의 기하학적 치수를 입력하고, 각각의 기계적, 전기적 물성치를 입력한다. 또한 변압기의 운전 부하변화에 따른 온도감시를 위하여 부하 변동에 따른 발열량을 산정하여 입력한다.

그림 5에는 운전중인 변압기의 권선부, 코어부 및 오일부 등의 열적관심부분의 온도를 실시간으로 보여주는 화면을 나타내었다.

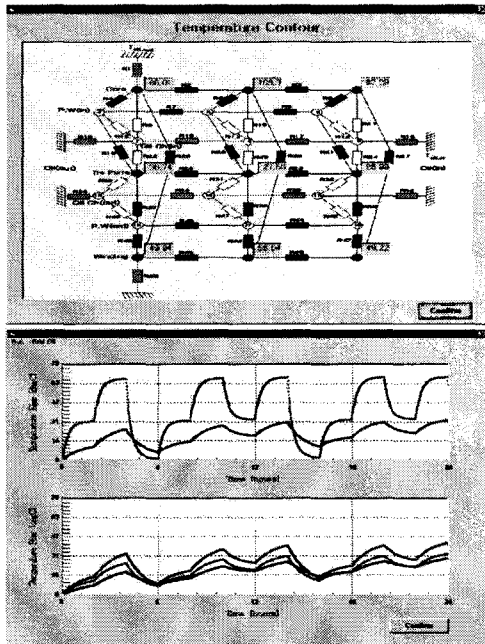


Figure 5. Output Mode

## 2.4. 모니터링 시스템

변압기는 권선부가 과열 등과 같은 열적으로 불안정한 상태에 도달하면 절연지나 프레스보드 등의 절연재의 열화에 의해 인장강도가 급속히 저하하여 기계적인 파괴로 다다르게 되는 등 변압기의 수명 단축의 원인이 되는 것으로 알려져 있다. 따라서 안전한 운전과 불시에 발생할 수 있는 사고를 미연에 방지하기 위하여 실시간적인 온라인 감시를 실시하며, 이때 변압기 중신부의 온도감시가 중요시 되고 있다. 따라서 변압기의 기본 사양으로 상부 절연유의 온도를 측정할 수 있는 온도계와 권선온도를 측정하는 권선온도계가 장착되고 있다. 본 연구에서는 앞절에서 언급한 바와 같이 상부 절연유 온도계로 측정된 값을 이용하여 내부 구조와 냉각 등을 고려한 온도계산 알고리즘을 개발하여 당사 진단시스템에 탑재하여 여수화력 주변압기 진단시스템에 적용하였다.

그림 6과 7은 개발된 온라인 변압기 예방 및 진단시스템에 온도상승 예측 알고리즘을 적용시킨 공정도 화면의 일레이다. 그림 6에서는 절연유 온도, 권선 온도 감시 화면으로 변압기 주위에 설치한 각종 온도계의 값을 감시하는 정보를 제공한다. 절연유 온도, 권선 온도, 외기 온

도 및 권선최고점 온도를 실시간으로 나타낸다.

그리고, 그림 7에 나타낸 바와 같이 변압기 내부의 중신부의 온도 분포 감시를 할 수 있는 공정도 화면을 제공한다. 변압기 내부온도는 광섬유 센서 등을 변압기 제조시에 내부에 삽입하지 않으면 직접 감시할 수 없기 때문에 변압기 온도 예측 알고리즘을 적용하여 계산한 결과값을 표시하였다. 예측된 온도 분포의 세부 내용으로는 철심상부, 철심중앙, 철심하부, 권선상부, 권선중앙, 권선하부 및 주위 오일부 이다.

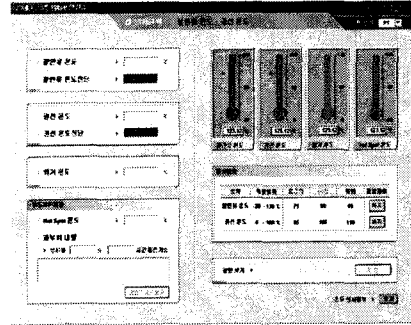


Figure 6. Monitoring Screen 1

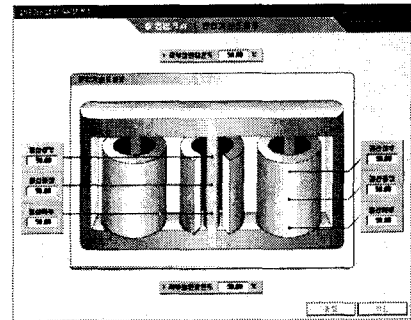


Figure 7. Monitoring Screen 2

## 3. 결 론

본 연구에서는 변압기 진단기술중 주요 항목인 중신부의 온도예측 및 실시간 감시를 위한 온도상승 예측 알고리즘을 열저항법을 활용하여 개발하였다. 온도예측 알고리즘을 이용하여 변압기 내부의 코어, 권선 및 주위 부품의 온도를 실시간으로 나타내는 것이 가능하였으며, 이를 통해 국부적인 과열을 보다 빠르게 검출해 내는 것이 가능하리라 여겨진다.

## [참 고 문 헌]

- [1] A. Garcia *et al.*, "A Thermal Study of an Encapsulated Electrical Transformer," *Computer and Electrical Engineering*, Vol. 28, pp. 417-445, 2002
- [2] H. C *et al.*, "The Actual field Test of HiPDS," HHI Report, 2003.
- [3] J. Y. Lee and S. W. Park, "A Study on The Reliable Temperature Rise Calculation Method for Tie-Plate of an Oil-Immersed Transformer," HHI Report, 2002.