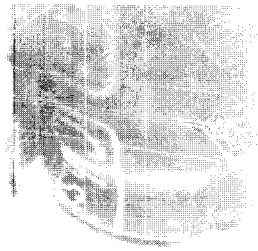


특집 신전력기기 응용기술 개발

환경 친화형 주상용 몰드 변압기의 적용기술

조 한 구<한국전기연구원 책임연구원>

1 서 론

변압기의 개발은 효율 향상으로 인한 수요자의 직접적인 경제효과 이외에 신뢰성 확보 측면에서 매우 중요하다. 현대 도시의 밀집으로 인한 전력수요의 급격한 증가는 도시 주변의 대용량 전력시설을 요구하고 있다. 즉, 도시 공간의 효율적 이용이 대두되기 때문에 전력설비의 고압화 및 설비의 소형, 경량화가 요구되고 있다.

이러한 요구를 수용하기 위해서 전력공급의 말단에 설치되는 주상용 변압기는 전력 품질을 결정하는 매우 중요한 역할을 하게 된다. 현재 사용되고 있는 주상용 변압기는 절연유를 절연재 및 냉각매체로 사용하고 있다. 이러한 주상용 변압기는 경년변화에 따른 오일 열화로 사고 위험도는 시간이 지남에 따라 증가하게 된다. 만약, 1차 사고가 발생한다면 2차 재해로 인한 화재 및 폭발의 위험이 내재하고 있으며, 또한 유입변압기는 사람들이 빈번히 왕래하는 인도에 접해 있기 때문에 사고발생 시 그 파급효과가 크다.

이러한 문제점을 해결하고 대체하기 위한 방안으로 제시되는 것이 몰드 변압기로 유입변압기에 비해 내열성, 난연성 등이 우수하고 오일에 대한 보수작업 등이 필요가 없기 때문에 주상변압기로의 적용이 가능하다. 몰드 변압기의 우수한 특성을 옥외에 적용하기 위해서는 적합한 몰드수지의 선택과 배합, 성형기술, 열방산 기술, 열응력 완화기술 등이 중요하며, 또한 제품의 내구성을 확보할 수 있는 장기 신뢰성 평가기술 개발이 이루어져야 한다.

따라서, 본 고에서는 최근 연구 개발되고 환경친화적인 개념의 옥외용 몰드 변압기의 특성, 설계 및 제조기술 등에 대해서 서술하며, 주상용으로의 몰드 변압기 적용 및 평가기술 등에 대해서 설명하고자 한다.

2. 몰드 변압기의 특성과 제조방법

2.1 변압기의 특성

몰드 변압기란 철심 및 권선이 절연유 중에 잠겨있지 않고 권선을 에폭시수지를 사용하여 고체 절연화시킨 변압기이다. 일반적인 구조는 고압권선과 저압권선을 분리하여 에폭시수지로 몰딩하고 철심을 중심으로 동심배치되며, 고압권선과 저압권선 사이의 갭이 절연 및 냉각덕트 역할을 하게된다. 그러나, 전체적인 크기가 커지게 되어 소형화 및 저손실화를 목적으로 일체형 주형방식의 몰드 변압기도 개발되고 있다. 몰드 변압기는 난연성, 자기소화성에 있으며, 절연유의 점검, 교환 등의 필요가 없고 소형·경량화가 가능하다. 표 1에 몰드 변압기, 유입변압기 및 건식

변압기의 특성을 비교하여 나타내었다[1].

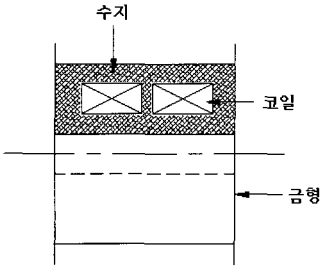
2.2 제조방법

몰드 변압기 권선의 몰딩 제조방법에는 금형에 의한 주형방식과 금형 없이 함침하는 무금형 방식이 있다. 금형에 의한 주형방식은 권선 표면이 평활하게 되므로 먼지의 부착이나 흡습이 어려우며, 몰딩수지가 구석구석까지 침투하여 보이드가 존재하지 않아 절연성능이 우수하다. 그러나 설계에 있어서 금형의 제약을 받는다는 단점도 있다. 금형없이 함침하는 방식은 금형에 제약을 받지않아 비교적 자유로운 설계가 가능하지만, 절연층의 두께를 확보하는 면이나 권선 표면을 평활하게 하는 것이 비교적 곤란하다[2].

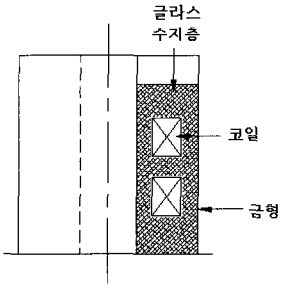
표 1. 각종 변압기의 특성 비교

구 분	유입변압기	건식변압기	몰드 변압기	
절연계급	A종	H종	B종	F종
권선온도상승	55℃	125℃	80℃	100℃
허용최고온도	105℃	180℃	130℃	155℃
설치면적	1.0	0.84	0.67	0.67
부 피	1.0	0.67	0.47	0.44
중 량	1.0	0.96	0.87	0.87
전압범위	사용전압	23kV	33kV	33kV
용량범위	사용용량	10MVA	15MVA	15MVA
연 소 성	가연성	난연성	난연성	난연성
폭 발 성	가능	불가	불가	불가
나 진 성	보통	보통	강함	강함
내화학성	보통	강함	매우 강함	매우 강함

금형에 의한 주형방식에는 권선을 금형 내에 지지한 상태에서 충진제를 배합한 에폭시수지를 주입하여 가열 경화하는 주형법과 권선과 금형사이에 유리섬유 등을 충진한 상태에서 에폭시수지를 주입하고 가열경화하는 방식의 금형 함침법이 있다. 그림 1에 금형에 의한 주형방식인 주형법과 금형 함침법을 나타낸다.



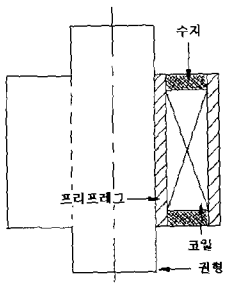
(a) 주형법



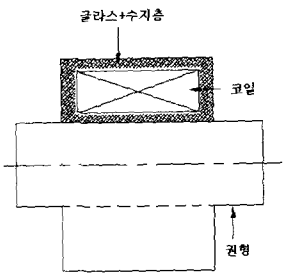
(b) 금형 함침법

그림 1. 금형에 의한 주형방식

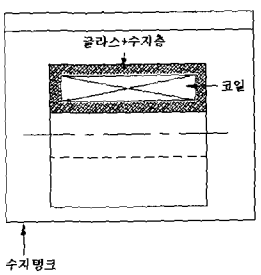
금형없이 함침하는 방식에는 프리프레그법, 필라멘트 와인딩법, Dipping법 등이 있다. 프리프레그법은 글라스 테이프 등에 수지를 함침하여 반경화시킨 것을 권선에 감고, 상하 단부에 수지를 주입하여 가열경화하는 방법이다. 필라멘트 와인딩법은 유리섬유 등에 수지를 함침시키면서 권선을 감아 가열경화하는 방법이다. Dipping법은 권선에 글라스 테이프 등을 감아 수지탱크에 담그고 빼내면서 가열경화하는 방법이다. 그림 2에 이들 방법을 나타낸다[3].



(a) 프리프레그법



(b) 필라멘트 와인딩법



(c) Dipping 법

그림 2. 무금형으로 함침하는 방식

몰드층을 Voidless화 하기 위해서는 권선 작업 시 에나멜선의 인장 강약 및 외측 금형과 권선사이의 두께 관리를 한다. 에폭시수지를 혼합하는 Mixer와 Casting Tank의 진공도가 Voidless화를 좌우하며, 두께 관리가 된 권선(외측 금형을 채결한 권선)에 에폭시수지를 주입할 때 그 중력과 진공도 차이, Mixer와 Casting Tank 간의 낙차에 의하여 주형속도가 좌우된다. 또한 주형할 권선에 에폭시 수지를 약 2시간 정도로 관리하는 것이 최적 조건이며, 권선에 사용되는 절연재는 실란(silane) 처리된 것을 사용하여 에폭시 수지와 결합이 잘 되도록 하여야 하며 그림 3은 몰드 변압기의 제조 공정을 나타낸 것이다.

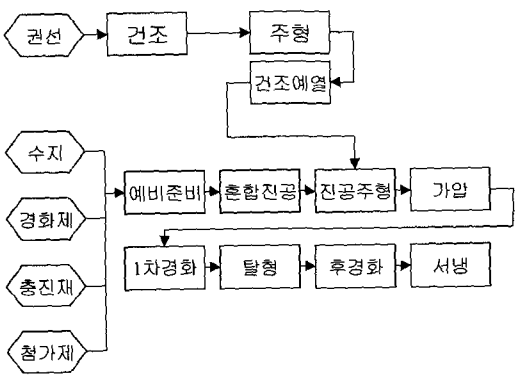
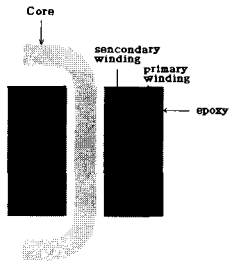


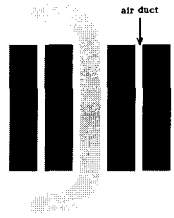
그림 3. 몰드 변압기 제조 공정

2.3 일체 주형방식과 덕트방식

몰드 변압기란 철심 및 권선이 절연유 중에 잠겨있지 않고 권선을 에폭시수지 등의 몰드 수지를 사용하여 고체 절연화 시킨 변압기로, 일반적인 구조는 저압권선과 고압권선을 분리하여 에폭시수지로 몰딩하고 철심을 중심으로 동심배치된 구조로 고압권선과 저압권선 사이의 갭이 절연 및 냉각덕트 역할을 하게된다. 그러나, 전체적인 크기가 커지게 되어 소형화 및 저손실화를 목적으로 일체형 주형방식의 몰드 변압기도 개발되고 있다.



(a) 일체형



(b) 덕트형

그림 4. 몰드 변압기의 권선구조

그림 4에 기존 방식인 덕트방식과 일체형 주형방식의 권선구조를 나타내었다. 일체형 주형방식으로 제조할 경우, 고압권선과 저압권선 사이에서의 방열이 어렵기 때문에 권선의 온도상승을 어떻게 억제하는 것이 중요하다. 즉 냉각면적의 감소를 보충하기 위해 발생손실의 저감과 효율적인 냉각구조를 연구할 필요가 있다[4]. 일체형과 덕트형의 치수와 손실을 비교해 보면 표 2와 같다.

표 2. 권선구조에 따른 치수와 손실의 비교

		단면적[%]	체적[%]	전손실[%]
단상 5CkVA	덕트방식	100	100	100
	일체방식	78	76	79
삼상 50kVA	덕트방식	100	100	100
	일체방식	91	86	72

3. 몰드 변압기 설계 해석

3.1 몰드 변압기의 수치해석

몰드 변압기는 유입변압기와는 달리, 난연성이 우수하고 소형화가 가능하며, 또한 최근 에폭시수지의 발달로 인해 옥외용 몰드 변압기로의 적용도 가능해졌다. 우리나라에서는 현재 일반적으로 사용되고 있는 몰드 변압기는 공장, 빌딩 등 지상설치형 뿐이지만, 국외에서는 몰드 변압기를 주상변압기로 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 일반적인 몰드 변압기의 구조는 고압코일과 저압코일 사이에 냉각덕트를 만들어 각각 분리되어 있는 구조를 가지고 있지만, 변압기 전체의 소형화 및 저손실화를 목적으로 일체형 주형방식의 몰드 변압기도 개발되고 있다. 그러나, 일체형 주형방식의 몰드 변압기는 고압권선과 저압권선 사이에서의 방열이 어렵기 때문에 방열면적을 확대하기 위한 효과적인 냉각구조의 연구가 필요하다[5, 6].

최근 변압기 최적설계를 위해 수치해석을 이용하여 많은 연구가 되고 있는데, 해석사례로는 전계 및 자계, 전위진동, 온도분포, 응력해석 등이 있다. 특히 변압기 운전시 발생하는 열은 절연물의 열화를 초래하여 변압기의 성능저하 및 수명을 단축시키기 때문에, 권선의 온도상승은 허용온도를 넘지 않도록 설계하는 것이 중요하다.

따라서 설계된 변압기의 권선온도상승이 얼마나 되는지, 수치해석을 통하여 온도분포 해석을 함에 따라 설계비용 및 시간을 감소시킬 수 있다[7].

3.2 몰드 변압기의 열전달

변압기의 설계 및 개발시에 냉각성능을 고려하는 경우에는 열유체 해석을 시행한다. 변압기를 해석할 경우에 우선 문제로 되는 것은 모델을 3차원으로 구성할 것인가, 또는 축대칭 모델로 구성하는가 이다.

이들에 대해서 해석으로 알려는 부위가 권선부인 경우는 축대칭 모델로 해서 문제로 되는 부분을 세분화하는 것이 많다. 에폭시수지를 사용한 몰드 변압기에서는 설계 단계에서 상정하는 열 문제에 대해서 고려할 필요가 있다. 그렇기 때문에 해석에 의해서 각 부분의 온도분포를 구해서 검토해야 한다.

몰드 변압기의 축대칭 모델에서 열전도 방정식은 식 (1)과 같으며, 외부 경계조건은 식 (2), (3)과 같다[5].

$$k_r\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial T}{\partial x}\right)+k_z\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}=-Q \quad (1)$$

$$q=h_{ic}(T-T_c(z)) \text{ : 내부벽} \quad (2)$$

$$q=h_{ec}(T-T_a) \text{ : 외부표면} \quad (3)$$

여기서, T : 온도 (℃)
Ta : 외부 분위기 온도 (℃)
Tc(z) : 공기덕트의 온도 (℃)
q : 열속 (W/m^2)
kr, kz : r방향과 z방향으로의 열전도율 (W/m ℃)
Q : 손실 (W/m3)
hic, hec : 내부 벽과 외부 표면에서의 대류열 전달 계수(W/m^2 ℃)

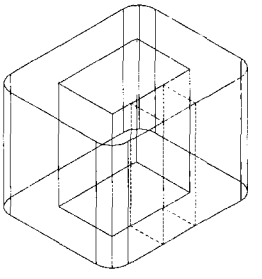
대부분의 경우, 권선이나 철심에서 발생하는 열은 권선간이나 철심 사이에 있는 공기덕트 내에서의 자연대류 열전달에 따라서 냉각된다. 일반적으로 평균 온도상승 θ는 다음 식으로 계산되지만, 제정수는 많은 실험 및 실측 데이터에 따라 설정된다.

$$\theta=K_1\cdot\left(\frac{K_2}{F}\cdot\frac{W}{S}\right)^n \quad (4)$$

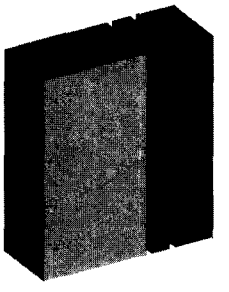
여기서 n, K_1, K_2는 정수이며 F는 풍량에 따른 계수, W는 발열량(kW), S는 방열면적(m^2)이다.

3.3 몰드 변압기의 온도분포 해석

그림 5는 열해석을 위한 변압기 3차원 모델링을 나타내며, 해석부분은 점선부분으로 전체의 10% 해당 부위이다. 온도분포 해석은 FEM 프로그램(MSC사의 Nastran)을 통해 각 구성재료인 에폭시수지, 저·고압코일, 유리섬유 등에 대해 열전도율, 열팽창계수, 비열 등의 열적 파라미터들을 선정하여 실시하였다. 부하조건으로 저·고압코일에 흐르는 전류에 따른 발열량을 지정하고 변압기 주위를 자연대류 조건으로 설정하여 시뮬레이션을 하였다.



(a)



(b)

그림 5. 변압기 모델링

그림 6은 열해석 프로그램에 의한 온도분포 해석 결과를 나타낸 온도분포이다. Hot spot온도는 저압

권선에서 나타났으며, 그 값은 119.5℃로 나타났다. 또한 고압권선의 중심온도는 약 80℃, 철심은 60~70℃ 정도로 나타났다[8].

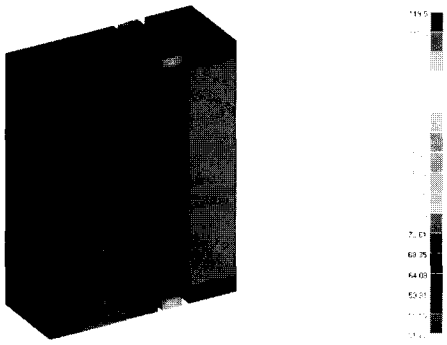


그림 6. 열해석 프로그램에 의한 온도분포 해석 예

3.4 몰드 변압기의 열응력 해석

물체의 온도변화에 대하여 발생하는 자유팽창 또는 수축이 탄성벽에 의해 저지당하므로 자유팽창량 및 수축량에 해당하는 압축 및 인장으로 인한 실제의 길이로 변형시키는데 필요한 내부응력과 같은 크기의 응력이 발생하는데 이것을 열응력(thermal stress) 이라고 한다. 온도가 상승할 경우에는 압축 열응력이 발생하고 온도가 하강할 때는 인장 열응력이 발생한다.

몰드 변압기의 경우 열팽창계수가 서로 다른 물질들로 이루어지는데 특히 수지와 도체, 또는 절연물과의 열팽창계수의 차이에 의해 열응력이 커지게 된다. 모델 1의 경우, 고압권선과 저압권선이 일체로 몰드됨에 따라 수지에 발생하는 열응력은 증대될 것으로 예상된다. 실온에서의 열응력분포를 앞의 온도분포 데이터 결과를 바탕으로 해석한 결과, 그림 7과 같이 Von Mises Stress가 집중되는 곳은 유리섬유와 에폭시의 계면에서 발생하였으며[8], 이로인해 이 부분에서 내부크랙이 가장 먼저 발생할 것으로 생각된다.

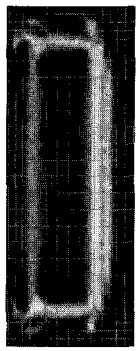


그림 7. 열응력 분포(Von Mises Stress)

4. 몰드 변압기 특성 평가

몰드기기에 대해 요구되는 성능을 표 3에 요약하여 나타내었으며, 몰드 변압기에 요구되는 기본 성능은 표 4와 같다.

표 3. 몰드 절연 기기의 요구 성능

절연특성	기계적특성	열적특성	화학적특성
절연내력 내 전 압 부분방전 내트래킹 내 아 크	인장강도 압축강도 내크리프(변형) 열충격강도 내크랙성	난연성 열변형 열열화 열응력	내후성 내유성 내수성

표 4. 몰드 변압기 요구 성능

일반특성	내전압	부분방전	내환경성	열적특성	기계적
효 율 전압변동 무부하전류 부하손실	상용주파 유 도 뇌임펄스	개시전압 감쇄전압 방전전하	내 습 내크랙 내오손	절연종류 온도상승 과부하내량	단락 내진

몰드 변압기는 내부 도체와 권선을 전부 에폭시수지로 피복되어 있으므로 절연부 내부 상태를 확인하기 위해서는 분해 확인하는 것이 곤란하다. 따라서 제

조상 품질관리, 결함 요인 및 열화 요인을 점검하기 위해서는 비파괴 방법으로 평가하는 것이 타당하며 비파괴 검증 방법을 표 5에 나타내었다.

옥외용 기기는 옥내용과 비교하여 자외선, 비, 바람, 오손과 같은 가혹한 자연 환경에 노출되기 때문에 이러한 자연 조건에서 고전압 스트레스에 잘 견디도록 제조되어야 한다. 더욱이 몰드 변압기는 부하전류에 의한 발열 스트레스에 대한 내구성도 요구된다. 따라서 이러한 문제에 대한 옥외용 몰드 변압기의 장기 신뢰성을 검증하기 위해서는 옥외 조건 에서 정격전압으로 연속 과전하면서 1.2~1.5배의 정격 전류로 시험한다. 이때 저압단 및 고압단 코일의 온도 상승을 동시에 감시한다. 또한, 몰드 변압기의 옥외 적용에 위해서는 내후성과 표면 절연성능을 검증하는 것이 필요하다.

표 5. 열화 요인과 비파괴 진단법

열화요인	발생증상	진단법
함침 불량	절연 저하 기계적 강도 저하	X선 투과법 와전류막 측정법 초음파 탐상법
내부 크랙 불순물 침투	부분 방전 이상	X선 투과법 부분방전 측정법
금속 이물질	부분 방전 이상	와전류 탐상법
용접 불량 권선 불량	온도 상승 열열화 수지 강도 저하	열전대 온도 측정 광파이버 온도 측정 적외선 건 측정
크랙 조립 불량	기밀 누설	He 누설 시험법

5. 옥외 주상 변압기로의 적용

5.1 과전 가속열화시험

변압기의 성능을 평가하기 위해서는 여러 가지 시험이 있으나 본 절에서는 온도상승시험에 대하여 논하며, 온도상승시험법은 실부하법, 반환부하법, 등가부하법 등 3종류가 있다. 2대의 동일변압기와 IVR, 보조변압기 등으로 구성된 반환부하법을 그림 8에 나타낸다. 같은 정격의 변압기 2대를 병렬로 접속하여 한쪽을 부하로 하고 다른 한쪽을 전원으로 하면 변압기 자체가 부하가 되어 소비전류가 순환되므로 정격부하 상태가 된다. 이 상태로 통전하면 정격용량에 상당하는 전류를 얻을 수 있다. 또한 저압측 전압을 가변할 수 있어 변압기 수명 단축 실험이 가능하다. 2대의 변압기 저압측, 고압측 모두 병렬로 접속하여 저압측에 정격전압을 인가하면 무부하손인 철손이 공급되고, 고압측에 임피던스전압을 인가하게 되면 2차측에는 정격전류에 의한 부하손인 동손이 공급하게 된다. 철손과 동손에 의해 변압기 손실이 발생하며 부하손에 의해 권선온도가 상승되므로 주변온도를 측정함으로써 권선온도상승을 구할 수 있다.

5.2 변압기의 부하패턴 특성

과전 가속열화시험에서의 부하 패턴을 결정하기 위하여 하계 및 동계시의 주상 변압기의 부하패턴 특성을 분석하여 그림 9와 같은 부하패턴을 선정하고 반환부하법에 따른 과전 가속열화시험을 진행하였다[9, 10].

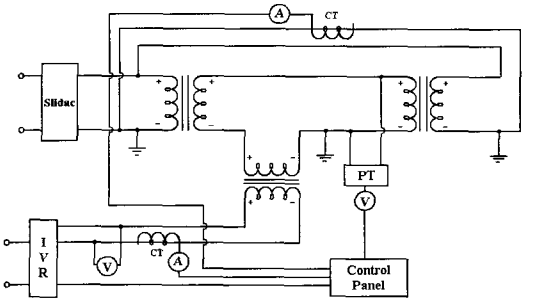


그림 8. 반환부하법 회로

표 6. 가속열화시험 후 진단방법

진단 방법	진단 대상	특 성 값
절연저항 측정	오손, 흡습	성극지수
유전정접 측정	열열화 오손, 흡습	tanδ값 정전용량
부분방전 측정	보이드, 크랙	개시전압, 소멸전압 방전전하, 발생빈도
내전압 시험	절연내력	절연파괴의 유무
육안점검	표면이상	크랙의 유무 변색

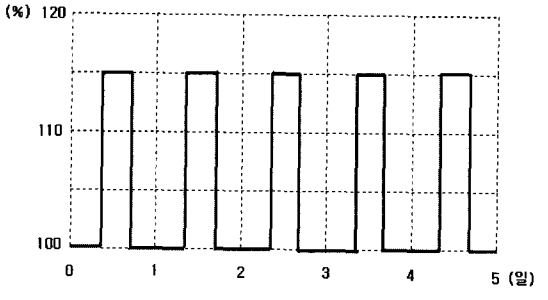


그림 9. 가속열화시험에서 선택된 부하패턴

즉, 변압기에 하루 10시간은 115%, 그 밖의 14시간에는 100%를 인가하는 것으로 낮에는 115%, 밤에는 100% 부하를 인가하였다. 115% 부하를 5일 동안 하루 10시간씩 인가하면 총 2개월 시험에서 600시간동안 115%를 인가하게 된다. 4.7개월(3384시간)동안 115%를 가할 경우 수명에 이르므로 600시간을 시험하는 경우는 수명시간의 약 18%에 해당된다.

그림 10과 같이 반환부하법으로 주상용 몰드 변압기를 구성하여 가속열화시험을 진행하였다. 반환부하법 회로 특성상, 온도센서는 한 대의 변압기에만 부착시켜 온도를 계측하였다. 그림 11은 변압기 열화분석 시스템으로 변압기의 온도, 전류, 전압, 전력, 소음 등의 결과를 분석할 수 있다.

그리고, 가속열화시험 후 정전상태에서의 진단방법으로 유전정접, 직류내전압, 부분방전, 절연저항 등을 측정하여 각각의 변화량을 비교 분석해야 한다. 표 6에는 가속열화시험 후 진단방법에 대한 대상 등을 나타내었다.

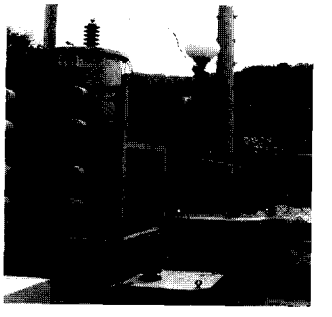


그림 10. 과전 가속열화의 시험상황

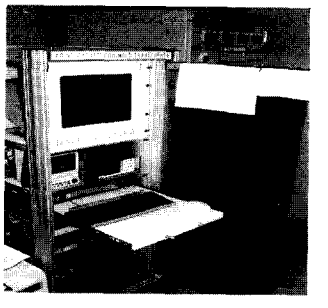


그림 11. 과전 가속열화 분석 시스템

6. 결 론

환경 친화형으로의 주상용 몰드 변압기는 기존의 배전용 주상 유입변압기에 비해 유지보수가 간편하고, 난연성이 우수할 뿐 아니라 Oilless화에 따른 환경보전과 저손실화에 따른 에너지 절약효과를 가져올 수 있는 변압기이다. 또한, 몰드 변압기의 개발은 주상용 옥외용 변압기로서 계통의 신뢰성과 안정성을 크게 향상시킬 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

[1] Takeshi Takahashi, "Evaluation of the Long-termReliability of the Outdoor Mold Transformers Using Epoxy Resin", Takaoka Review, Vol. 39, No. 2, 1992.

[2] 조한구 외, "주상용 몰드 변압기의 온도 분포와 열응력 해석", 전기전자재료학회논문지, Vol. 14, No. 4, pp. 297-301, 2001.

[3] 津野降司, "新形 モールド 變壓器", 電氣評論, pp. 11~14, 1996.

[4] Fernandes-Costa, "Prevision of The Thermal Behavior of Dry Type Cast Resin Transformers", Electric Machines and Power Systems, Vol. 20, pp.261-272, 1992.

[5] Takashi Hasegawa, "Application Technology of Molded Products in the Field", Takaoka Review, Vol. 43, No. 4, pp. 66-72, 1996.

[6] Linden W. Pierce, "An Investigation of The Temperature Distribution in Cast Resin Transformer Windings", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 7, No. 2, pp. 920-926, 1992.

[7] Linden W. Pierce, "Predicting Hottest Spot Temperatures in Ventilated Dry Type Transformer Windings", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 9, No. 2, pp. 1160-1169, 1994.

[8] H. G. Cho, The Temperature Distribution and Thermal Stress Analysis of Pole Mold Transformer, Journal of KIEEME, Vol. 14, No. 4, pp. 297-301, 2001.

[9] H. G. Cho, The Performance Test of 50kVA Pole-Mount Mold Transformer, PowerCon, Vol. 4, pp.2208-2211, 2002.

[10] IEEE Guide for Loading Dry-Type Distribution and Power Transformers, IEEE Std C57.96, pp. 5-13, 1999.

◇ 저 자 소 개 ◇

조 한 구(趙漢九)

1959년 4월 14일생. 1984년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 전기기기 기술사. 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1999년-2000년 동서대학교 전자기계공학부 겸임교수. 현재 한국전기연구원 책임연구원.

관심분야 : 폴리머 애자, 피뢰기 설계, 열화평가기술, 몰드 절연물 절연 및 열해석 설계기술