



옥외용 몰드 주상 변압기의 적용기술

■ 조 한 구 / 한국전기연구원 책임연구원

서 론

배전 계통에 설치된 주상변압기는 수용가의 전력공급에 직접적인 역할을 하고 있고, 장기간 운전되어야 할 전력기기이다. 한전의 사고통계에 따르면 변압기의 고장원인이 자연열화가 34%, 제작불량이 22%, 낙뢰 10%, 과부하 10%, 풍우 5%, 기타 19%로 나타나고 있다.

주상변압기에서 사용되는 여러 가지 재료 중 문제가 되는 것은 절연지, 절연유, 프레스보드 등의 절연재료이다. 이들 절연재료의 열열화, 외부단락에 의한 열적·기계적 손상 및 부분방전 등이 고장의 원인이 되는데 이에 따라 기계적 강도가 저하되고 진동의 증가, 가연성 가스 등이 발생되어 절연파괴에 까지 이르게 된다[1].

그러나, 몰드변압기의 경우, 유입 변압기에 비해 내열성, 난연성 등이 우수하고 절연유에 대한 보수작업 등이 필요가 없기 때문에 주상변압기로의 적용이 가능하다[2].

몰드변압기란 철심 및 권선이 절

연유 중에 잠겨있지 않고 권선을 에폭시 등의 수지를 사용하여 고체 절연화시킨 변압기로, 일반적인 구조는 고압권선과 저압권선을 분리하여 에폭시수지로 몰딩하고 철심을 중심으로 동심배치된다. 고압권선과 저압권선 사이의 갭이 절연 및 냉각덕트 역할을 하게된다. 그러나, 전체적인 크기가 커지게 되어 소형화 및 저손실화를 목적으로 일체형 주형방식의 몰드변압기도 개발되고 있다.

몰드변압기의 우수한 특성을 옥외에 적용하기 위해서는 적합한 몰드 수지의 선택과 배합, 성형기술, 열방산 기술, 열응력 완화기술 등이 중요하며, 또한 제품의 내구성을 확보할 수 있는 장기 신뢰성 평가기술 개발이 이루어져야 한다.

본 고에서는 최근 연구 개발되고 환경친화개념의 옥외용 몰드변압기의 특성, 설계 및 제조기술, 개발동향 등에 대해서 서술하며, 주상 변압기로의 몰드변압기 적용 및 시험평가기술 등에 대해서 설명하고자 한다.

몰드 변압기의 특성

에폭시 수지

현재 몰드 절연에 이용되는 재료는 불포화 폴리에스테르 수지, 에폭시 수지, 폴리우레탄 수지 등이 있다. 초기에는 불포화 폴리에스테르 수지를 많이 사용하였으나 최근에는 특성이 우수한 에폭시 수지가 주로 사용되고 있다.

에폭시 수지는 분자중의 에폭시기를 2개 이상 가진 화합물로 고전압 기기의 몰드에는 분자량이 300~1000 정도의 것이 사용된다. 에폭시 수지 단독으로는 가열하여도 경화하지 않지만 경화제 등의 첨가물을 원재료와 혼합하면 중합반응이 진행되어 3차원의 가교구조가 구성되면서 고체 절연물이 된다. 특히 첨가물의 일종인 무기물 충전제는 원재료와 혼합되면서 열전도율, 기계적 강도, 내열성, 내약품성 등을 향상시킨다.

변압기의 특성

몰드변압기가 보급된 가장 큰 이

유는 난연성, 자기소화성에 있다. 또한, 절연유의 점검, 교환 등의 필요가 없으며 소형·경량화가 가능하다. 표 1에 몰드변압기, 유입변압기 및 건식변압기의 특성을 비교하여 나타내었다[3].

제조방법

몰드변압기의 종류는 권선의 제작 방법에 따라 크게 두가지로 분류되는데 금형을 사용하여 에폭시수지를 주입시키는 주형몰드와 금형을 사용하지 않고 도체에 수지를 함침시키면서 제작하는 함침형 몰드 등이 있다[3].

주형 몰드변압기는 종래의 건식변압기가 갖는 흡습성을 완전히 배제할 수 있도록 고진공 상태에서 수지를 주입시켜 만들기 때문에 외관이 미려하고 절연내력이 우수하며 제작과정에서 기포나 습기가 완전히 제거되는 장점이 있다. 이러한 주형 몰드 변압기는 각각의 규격별로 금형이 필요하고 주형설비 등 많은 초기설비 투자비가 소요되며 고도의 설계 및 생산기술을 필요로 하고 있다.

함침형 몰드변압기는 금형을 사용하지 않고 도체가 수지에 함침되며 권선감기가 수행되고 난후 1차 경화를 거쳐 권선감기가 끝난 권선에 2차로 수지를 함침 및 경화 건조시키는 몰드변압기로서 진공주형 몰드변압기에 비해 섬세하며 전기적, 기계적 강도와 절연내력의 신뢰성이 떨어지지만 설계나 제작이 용이하고 설비투자비도 주형법에 비해 저렴한 장점을 가지고 있으며 그림 1은 몰드 변압기의 제조 공정을 나타낸 것이다.

표 1. 각종 변압기의 특성 비교

구 분	유입변압기		건식변압기		몰드변압기	
	A종	H종	B종	F종	B종	F종
절연계급	A종	H종	B종	F종	B종	F종
권선온도상승	55°C	125°C	80°C	100°C	80°C	100°C
허용최고온도	105°C	180°C	130°C	155°C	130°C	155°C
설치면적	1.0	0.84	0.67	0.67	0.67	0.67
부피	1.0	0.67	0.47	0.44	0.47	0.44
중량	1.0	0.96	0.87	0.87	0.87	0.87
전압범위	사용전압	23kV	33kV	33kV	33kV	33kV
용량범위	사용용량	10MVA	15MVA	15MVA	15MVA	15MVA
연소성	가연성	난연성	난연성	난연성	난연성	난연성
폭발성	가능	불가	불가	불가	불가	불가
내진성	보통	보통	강함	강함	강함	강함
내화화성	보통	강함	매우 강함	매우 강함	매우 강함	매우 강함

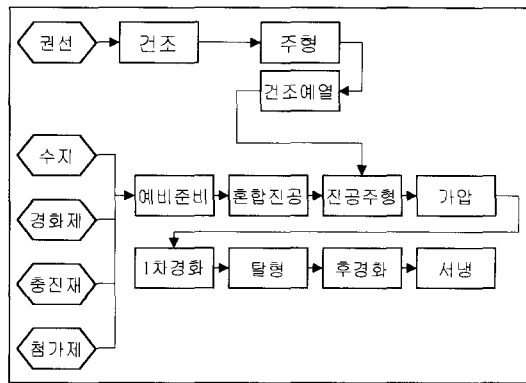


그림 1. 몰드 변압기 제조 공정

일체 주형방식과 덕트방식

일반적인 몰드변압기는 고압권선과 저압권선 사이의 갭이 절연 및 냉각덕트 역할을 하게된다. 그러나, 전체적인 크기가 커지게 되어 소형화 및 저손실화를 목적으로 일체주형방식의 몰드변압기도 개발되고 있다.

그림 2에 덕트방식(기존방

식)과 일체주형방식의 권선구조를 나타낸다. 일체주형방식으로 제조할 경우, 1차권선과 2차권선 사이에서의 방열이 어려워지기 때문에 권선의 온도상승을 어떻게 억제하는 것이 중요하다. 즉 냉각면적의 감소를 보충하기 위해 발생손

실의 저감과 효율적인 냉각구조를 연구할 필요가 있다[4]. 일체형과 덕트형의 치수와 손실을 비교해 보면 표 2와 같다.

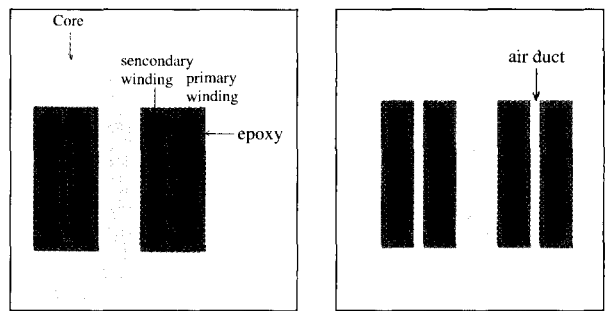


그림 2. 몰드변압기의 권선구조

표 2. 권선구조에 따른 치수와 손실의 비교

		단면적[%]	체적[%]	전손실[%]
단 상 50kVA	덕트방식	100	100	100
	일체방식	78	76	79
삼 상 50kVA	덕트방식	100	100	100
	일체방식	91	86	72

몰드 변압기 시험 평가

몰드 기기에 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	인장강도	열변형	내후성
내전압	압축강도	열열화	내유성
부분방전	내크리프(변형)	열응력	내수성
내트래킹	열충격강도		
내아크	내크랙성		

표 4. 몰드 변압기 요구 성능

일반특성	내전압	부분방전	내환경성	열적특성	기계적
효율	상용주파	개시전압	내 습	절연종류	단락
전압변동	유도	감쇄전압	내크랙	온도상승	내진
무부하전류	뇌임펄스	방전전하	내오손	과부하내량	
부하손실					

몰드 변압기는 내부 도체와 권선을 전부 에폭시수지로 피복되어 있기 때문에 절연부 내부 상태를 확인하기 위해서는 분해 확인하는 방법이 곤란하다. 따라서 제조상 품질관리, 결함 요인 및 열화 요인 점검을 위해서는 비파괴 방법으로 평가하는 것이 필요하다. 진단 가능한 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 부하 전류에 의한 발열 스트레스에 대한 내구성도 요구된다. 따라서 이러한 문제에 대한 옥외용 몰드 변압기의 장기 신뢰성을 검증하기 위해서는 옥외 조건 하에서 정격 전압으로 연속 과전하면서 1.2~1.5배의 정격 전류로 시험한다. 이때 저압단 및 고압단 코일의 온도 상승을 동시에 감시한다.

몰드 변압기의 옥외 적용에 위해서는 내후성과 표면 절연 성능을 검증하는 것이 필요하다. 여기서 몰드 변압기의 과통

전 시험을 옥외 조건 하에서 실시하면서 시편에 대한 과전 폭로시험을 병행하여 시험한다.

옥외 주상 변압기로의 적용

옥외로의 적용

몰드변압기는 유입변압기와는 달리, 난연성이 우수하고 소형화가 가능하며, 또한 최근 에폭시 수지의 발달로 인해 옥외용 몰드변압기로의 적용도 가능해졌다. 우리나라에서는 현재 일반적으로 사용되고 있는 몰드변압기는 공장, 빌딩 등 지상설치형 뿐이지만, 국외에서는 몰드변압기를 주상변압기로 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 일반적인 몰드변압기의 구조는 고압코일과 저압코일 사이에 냉각덕트를 만들어 각각 분리되어 있는 구조를 가지고 있지만, 변압기 전체의 소형화 및 저손실화를 목적으로 일체주형방식의 몰드변압기도 개발되고 있다. 하지만, 일체주형방식의 몰드변압기는 1차 권선과 2차권선 사이에서의 방열이 어렵기 때문에 방열면적을 확대하기 위한 효과적인 냉각 구조가 필요하다[5, 6].

최근 변압기 최적 설계를 위해 수치해석을 이용하여 많은 연구가 되고 있는데, 해석사례로는 전계 및 자계해석, 전위진동해석, 온도분포 해석, 응력해석 등이 있다. 특히 변압기 운전 시 발생하는 열은 절

표 5. 열화 요인과 비파괴 진단법

열화요인	발생증상	진단법
함침 불량	절연 저하 기계적 강도 저하	X선 투과법 외전류막 측정법 초음파 탐상법
내부 크랙 불순물 침투	부분 방전 이상	X선 투과법 초음파 탐상법 부분방전 측정법
금속 이물질	부분 방전 이상	외전류 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

연물의 열화를 초래하여 변압기의 성능저하 및 수명을 단축시키기 때문에, 권선의 온도상승은 허용온도를 넘지 않도록 설계하는 것이 중요하다. 따라서 설계 변압기의 권선 온도상승이 얼마나 되는지, 미리 수치 해석으로 온도분포 해석을 함에 따라 설계비용 및 설계시간을 감소시킬 수 있다[7, 8].

몰드 변압기의 열전달

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

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

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

$$q = h_o(T - T_o) : \text{외부표면} \quad (3)$$

여기서, T : 온도 (°C)

T_a : 외부 분위기 온도(°C)

T_c(z) : 공기덕트의 온도(°C)

q : 열속 (W/m²)

k_r, k_z : r방향과 z방향으로의 열전도율 (W/m °C)

Q : 손실 (W/m³)

h_c, h_o : 내부 벽과 외부 표면에서의 대류 열전달

계수(W/m² °C)

대부분의 경우, 권선이나 철심에서 발생하는 열을 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.

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

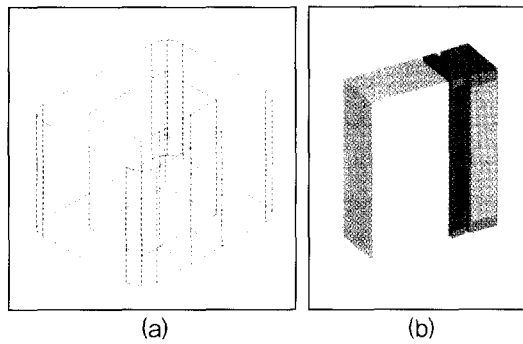


그림 3 변압기 모델링

여기서 n, K₁, K₂는 정수이며 F는 풍량에 따른 계수, W는 발열량(kW), S : 방열면적(m²)이다.

몰드 변압기의 온도분포 해석

그림 3은 열해석을 위한 변압기 3차원 모델링을 나타낸다(전체의 10%).

온도분포 해석은 FEM 프로그램(MSC사의 Nastran)을 통해 각 구성 재료인 에폭시수지, 저·고압코일, 유리섬유 등에 대해 열전도율, 열팽창계수, 비열 등의 열적 파라미터들을 선정하여 실시하였다. 부하조건으로 저·고압코일에 흐르는 전류에 따른 발열량을 지정하고 변압기 주

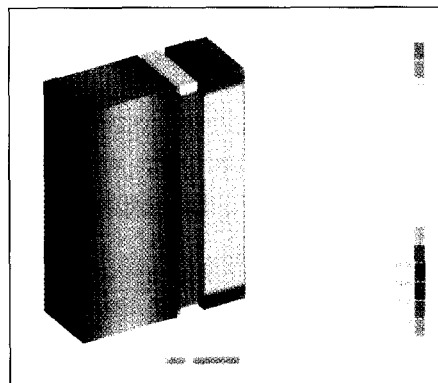


그림 4 열해석 프로그램에 의한 온도분포 해석 예

위를 자연대류 조건으로 설정하여 시물레이션을 하였다.

그림 4는 해석 결과 나타난 온도분포이다. Hot spot온도는 저압권선에서 나타났으며, 그 값은 119.5°C로 나타났다. 또한 고압권선의 중심온도는 약 80°C로, 철심은 60~70°C 정도로 나타났다.

시험평가기술

변압기의 성능평가 시험은 여러 가지로 나누어지는데, 먼저 Routine 시험, Type 성능평가에는 충격내전압시험과 온도상승시험(실부하법, 등가부하법, 반환부하법 등) 등이 있다. 또한 Special 성능평가에는 소음 측정시험, 단락시험, 냉열시험, 난연성 시험, 부분방전시험 등이 있다. 그리고, 제품의 장기 신뢰성을 평가하기 위해 고주파 가속열화시험, 과전압 가속열화시험, 옥외폭로 시험 등이 시행된다. 표 6에 검증항목에 대한 시험 및 시물레이션 해석 등을 나타내었다.

또한, 표 7에는 과전폭로시험 후 검증시험 항목에 대한 시험조건 등을 설명하였으며, 본 연구원에서는 그림 5와 같이, 변압기의 기본 특성시험과 위에서 설명한 온도상승시험 및 과전폭로시험을 실시하고 있다[8].

표 6. 신뢰성 평가기술 검증 항목

검증항목	기술 해석	시험 항목
절연강도	전계 해석	부분방전 시험 뇌임펄스 시험
온도상승	열전도 해석	온도시험
내크랙성	열응력 해석	heat cycle 시험
단락강도	단락시 응력 해석	heat shock 시험
내환경성		내습성 시험
장기신뢰성		고조파 가속열화 시험 과전압 가속열화 시험 장기과전 시험 필드시험

표 7. 과전폭로시험 후 검증시험 조건

시험 항목	시험 조건
순시단락시험	정격×15의 전류를 2초간 통전
교류내전압시험	15kV의 전류를 1분간 인가함
임펄스 내전압시험	(1.2×50)µs, 40kV의 전압을 인가
특성 시험	철손, 동손, 여자전류, 임피던스전압 소음 등을 측정
표면상태 측정	표면거칠기 측정, 트래킹 관찰

결론

이상에서 몰드 변압기의 소개 및 옥외로의 변압기 적용시 기본적인 사항을 간략하게 기술하였다. 앞으로 이에 대한 각종 성능평가 시험과 장기 신뢰성 시험이 요구되므로 이

를 위한 관련 연구 기관과 현장, 그리고 사용자 및 제조자간의 부단한 연구 개발이 요구된다

참고문헌

[1] 한국전력공사, “배전 기자재 (저손실형 주상변압기) 성능확인 특성시험 조사연구”, 연구보고서, 2000.

[2] 한세원 외, “옥외 주상용 몰드 변압기의 적용기술”, 한국전기전자재료학회 춘계학술대회 논문집, pp. 23-28, 2000.

[3] 한국전기안전공사, “부분방전 검출에 의한 몰드변압기 무정전 진단기법 연구”, 연구보고서, 1999.

[4] A. 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 Delv., 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 Delv., Vol. 9, No. 2, pp. 1160-1169, 1994.

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



(a) 시험장



(b) 계측기와 제어반



(c) 과전폭로시험

그림 5. 주상 몰드변압기의 시험장황