

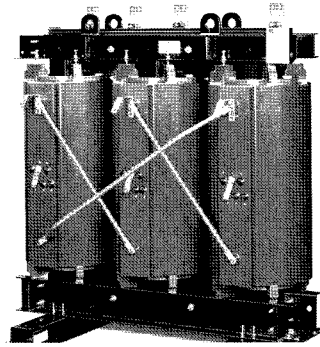
몰드변압기의 효율적인 안전관리 및 사고 예방



최 중 석
전주대학교 소방안전공학과 교수

1. 서론

전기설비에 사용되는 변압기는 전기기기 중에서 전기의 전자기적 성질을 응용한 것으로 전력변환 또는 통신 등에 활용된다. 전기를 생산하는 직류기나 교류발전기는 1830년대에 개발되었으나 변압기는 그보다 늦은 1856년 발레이(Cromwell Fleetwood Varley)가 철선으로 둥근 다발을 만들어 그 둘레에 동선을 감아서 오늘날 변압기의 기초적 모양을 처음 제시하였고, 1882년 가라이드(Lucien Gaulard) 및 기브스(Josiah Willard Gibbs)가 철심의 둘레에 권선을 하여 실용적인 변압기가 탄생되었다.



발전기나 전동기는 기계에너지와 전기에너지의 상호작용을 하는 회전기인데 변압기는 하나의 회로에서 교류전력을 받아 전자유도작용(electromagnetic induction)에 의해서 이것을 같은 주파수의 교류전력으로 변형해서 다른 회로에 공급하는 정기기이다. 변압기는 자기 회로의 통로인 철심과 전기 회로의 권선이 쇠교한 것이 본체이지만 외함의 냉각 방식에 따라 분류된다. 특별고압용 변압기는 외함을 통해서 도체를 인출하는 부분에 부싱(bushing)이라는 절연체가 사용되고, 각종 보호 장치가 부착된다. 변압기는 철심과 권선의 관계에서 내철형(core type)과 외철형(shell type)으로 구별된다. 내철형은 권선이 철심을 둘러싼 모양으로 되어 있고, 외철형은 철심이 권선을 둘러싼 모양이다. 또한 철심을 분할한 분포 철심형(distributed core type)은 소형 배전 변압기에 사용된다. 그리고 냉간압연의 규소 강대를 감아서 사용한 권철심형(wound-core type) 등이

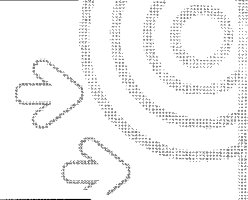
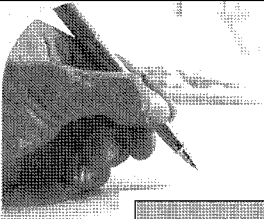
있다. 변압기의 철심은 규소를 약 4% 포함한 규소 강판을 겹쳐 쌓은 성층 철심이 보통이지만 특히 철손이 적은 것을 필요로 하는 배전용 변압기의 철심에는 권철심도 사용된다. 철심의 두께는 보통 0.3-0.6mm, 표준 치수는 915 1,830mm이다. 변압기 권선은 철심 위에 피복 권선을 감는 직권(direct-wound)과 절연통 위에 권선한 코일을 절연 처리한 후에 조립된 형권(former-wound)이 있다. 형권 코일(former-wound coil)에는 원통 코일(cylindrical coil), 원판형 코일(circular disc coil), 직사각형 코일 등이 있다.

변압기는 정지기이므로 회전부분이 없으므로 용량이 크게 되면 시스템 내부에서 발생하는 열의 처리가 중요한 문제가 된다. 건식 변압기(dry type transformer)는 자냉식과 풍냉식이 있으며, 유입 변압기(oil-immersed type transformer)는 자냉식, 풍냉식 이외에 수냉식이 있다. 그리고 유입 변압기 중에서 기름을 외함의 내외로 순환시키는 방식을 송유식 이라고 한다. 유입 변압기는 변압기의 냉각 효율은 우수하나 설치 공간이 넓고 지속적인 오일의 관리 및 유지가 필요하다. 반면에 건식 변압기는 설치 공간이 유입 변압기보다 작지만 발생된 열이 쉽게 방사되지 못한다는 단점이 있어서 대용량에는 적합하지 않다. 그런데 최근에 상가, 빌딩, 아파트 등에 설치되는 변압기는 유입식보다 건식이 대부분 설치되고 있다. 건식 변압기 중에서 분말 충전제(실리카) 또는 섬유충전제(glass mat) 등으로 절연을 강화시켜 제작된 몰드변압기의 설치가 급증하고 있다. 몰드 변압기(mold transformer)는 기존의 유입식 변압기에 비해 설치 공간이 작을 뿐만 아니라 기름을 사용하지 않으므로 청결하게 관리할 수 있다. 그러나 변압기 운용 중에 발생하는 열을 적절히 방출하는데 제한이 있고 이상 징후를 조기에 진단 또는 점검으로 알아내기가 어렵다는 한계점이 있다. 또한 사고가 발생하면 수리 및 보수가 현실적으로 불가능하므로 교체하는 시간과 비용이 많이 필요하다. 즉 변압기가 설치되는 전기설비는 다른 어떤 전기설비보다 에너지 변환에 따른 위험요소가 많기 때문에 단락, 과부하, 접촉(축) 불량, 누전, 반단선, 트래킹 등이 발생할 가능성을 배제할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 변압기의 냉각 방식에 따른 특성을 비교하고, 몰드변압기의 사고 원인을 분석함으로써 유사 사고 발생을 예방하기 위한 자료를 제공하는데 있다.

2. 변압기의 특징

전기기기에 적절한 전압의 공급과 운용을 위해 사용되는 변압기는 정지기이지만 시스템이 운용될 때 철심에서 철손이 발생한다. 철손을 줄이기 위해서는 규소 강판을 겹쳐 쌓은 성층 철심이 사용된다. 일반적으로 성층된 철심은 절연바니시(vamish) 또는 액체 유기 혼합물을 강판의 표면에 태워 붙이기도 한다. 또한 변압기의 권선이나 그밖의 도전 부분을 적절하게 절연하지 않으면 대형 사고가 발생하므로 변압기의 용량 및 사용 환경에 따라 절연의 종류 및 허용최고온도가 규정되어 있다. 철심은 생긴 모양에 따라 I형 철심, E형 철심 및 권형 철심 등으로 분류된다. 그리고 철심의 연결은 겹치기 접합법(lap joint)과 맞대기 접합법(butt joint)이 있으며, 겹치기 접합법을 사용하면 자속의 흐름을 비교적 원활하게 유지할 수 있다. <표 1>은 한국산업규격(KSC 2516)에서 요구하고 있는 방향성 규소 강대의 자기적 성질을 나타낸 것이다.



〈 표 1 〉 변압기 철심에 사용되는 방향성 규소 강대의 자기적 성질

종 류		밀도 ⁽¹⁾ [g/cm ³]	철손 ⁽²⁾ [W/kg]	자속 밀도 ⁽³⁾ [T]
기호	두께 [mm]		$W_{17/60}$	B_{10}
G 09	0.03	7.65	1.76 이하	1.79 이상
G 10	0.30		1.94 이하	1.77 이상
	0.35		1.99 이하	
G 11	0.30		2.14 이하	1.74 이상
	0.35		2.19 이하	
G 12	0.30		3.36 이하	1.71 이상
	0.35		2.41 이하	
G 13	0.35		2.64 이하	1.68 이상

주 (1) 밀도는 시험편의 단면적을 계산하는데 사용한다.
 (2) 철손의 $W_{17/60}$ 는 주파수 60[Hz], 최대 자속 밀도 1.7[T] 인 경우의 철손을 표시한다.
 (3) 자속 밀도의 B_{10} 은 자화력 1,000[A/m]에 있어서의 자속 밀도를 나타낸다.

〈표2〉는산업 현장에 보편적으로 사용되고 있는 유입변압기, 건식변압기 및 몰드변압기의 특성을 비교하여 나타낸 것이다. 어떠한 변압기도 모든 항목에서 우수한 성능을 발휘하는 것은 없다. 따라서 전기설비의 정격 용량, 사용 환경, 부하의 특성 등을 종합적으로 분석하여 변압기를 선정하게 된다. 최근에 설치 공간에 좁고 부하변동 및 부하율이 낮은 상가, 아파트, 빌딩 등에서 몰드 변압기의 사용이 증가되고 있다.

〈 표 2 〉 특별고압에 사용되는 변압기의 특성 비교

구 분	몰드변압기	건식변압기	유입변압기
기본 절연	고체	기체	액체
절연체	에폭시수지 + 무기물 충전제	공기, MICA	크라프트지 광유물
내열계급	- B종 120 ℃ - F종 150 ℃	H종 180 ℃	A종 105 ℃
권선허용온도 상승온도	- 급형 75 ℃ - 무급형 150 ℃	102 ℃	- 절연유 55 ℃ - 권선 50 ℃
단시간 과부하 내량	200 % / 15분	150 % / 15분	
전력 손실	작다.	작다.	크다.
소 음	중	대	소
연소성	난연성	난연성	가연성
흡습성	낮음	보통	높음
방열 특성	낮음	보통	좋음
시스템 진단	보통	우수	우수

〈 표 2 〉 특별고압에 사용되는 변압기의 특성 비교(계속)

구 분	몰드변압기	건식변압기	유입변압기
내습성, 내진성	흡습 가능	흡습 가능	강함
단락 강도	강함	강함	매우 강함
외형 치수	소	대	대
중 량	적음	보통	무거움
충격과 내전압(22kV)	95 kV	95 kV	150 kV
설치 면적	좁음	보통	넓음
운전 경비	없음	없음	필요

전기설비에 설치되는 몰드변압기는 큐비클 내에 수납이 가능한 22.9kV 수전설비에 많이 채용되고 있다. 몰드변압기의 가장 큰 단점은 시스템 운용 중에 발생하는 열을 적절하게 방사시키기가 어렵다는 것이고, 변압기에서 발생하는 이상 현상 또는 징후를 적절하게 진단하는데 한계가 있다는 것이다. 일반적으로 몰드 변압기의 절연은 주형 몰드를 이용한 금형 방식과 합침 몰드를 이용한 무금형 방식이 있다. 〈표 3〉은 몰드변압기의 절연방식의 특징에 대해서 나타낸 것이다.

〈 표 3 〉 특별고압용 몰드변압기의 절연 방식 및 특징

구 분	금형 방식(주형 몰드)	무금형 방식(합침 몰드)
종 류	- 주형법, 합침법, 합침주형법, FRP 주형법	- 금형 방식의 단점을 보완하기 위한 방식
장 점	- 외관이 좋고, 단락강도(BIL)가 우수 - 신뢰성이 높고, 양산성 우수	- 개별 사양의 제작이 가능 - 대형의 경우 금형보다 경제적
단 점	- 특수 제작 관관하고 가격이 비쌈 - 고도의 주형 기술이 필요함	- 보수 및 점검이 어려움 - 단락강도(BIL)가 낮음
용 도	- 가장 일반적으로 사용된다.	- 대용량, 네트워크 변압기에 적합하다.

수변전실에 몰드변압기를 설치할 때 변압기가 특정 방향으로 기울어지면 내부의 절연튜브(절연제)가 이탈할 수 있고, 1차 권선 및 2차 권선의 간격이 불균일하게 되면 전자계 불평형으로 소음 및 사고가 발생할 수 있다. 또한 1차 권선과 2차 권선 사이에 이물질(금속 조각, 설치류, 물기, 먼지 등)이 들어가면 극간방전이 발생하여 대형 사고를 유발시킬 수 있다. 따라서 온도차가 심하거나 이물질의 유입 및 퇴적이 발생하지 않도록 적절하게 차폐되는 구조에 수납되어 관리되어야 하며 주요 내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) 반입

- 몰드변압기를 수변전실에 설치하기 위해 크레인을 이용하여 반입할 때는 상부 인양 고리를 이용하고, 인양줄의 내부각은 60도 이하로 한다. 그리고 지게차를 이용할 때는 목재 팔레트(pallet)를 이용해야 물리적 충격이 없도록 주의가 요구된다.



② 점검사항

-몰드변압기를 설치하기 위해 장시간 차량으로 이동시켜 변압기가 도착하면 즉시 손상 여부를 확인한다. 또한 변압기의 권선부는 다음 사항을 주의 깊게 점검한다.

- ① 권선 표면에 찌히거나 파손된 부분이 없는가?
- ② 권선의 탭 단자 부분이 파손되지 않았는가?
- ③ 고압 및 저압측의 단자 부분이 파손되지 않았는가?
- ④ 고압 및 저압측의 상결선용 부스바(bus bar)가 휘어지지 않았는가?
- ⑤ 권선 상하부의 지지블록이 이탈되거나 파손되지 않았는가?

(3) 배치

-몰드변압기를 수변전실에 배치할 때의 외함과 내장 변압기와의 적정 이격거리는 특별고압의 경우 30cm 이상이어야 하며, 그밖의 주요 거리는 <표 4>와 같다.

< 표 4 > 변압기의 절연 이격거리 및 전압(IEC 71)

전압 kV	중격전압 [kV]	중전부-대지간 [mm]	몰드표면-대지간 [mm]
3.3	40	60	40
6.6	40	90	50
22.9	95	160	110
	125	220	120

1) 중전부 : 절연되지 않은 나도체를 말한다.
 2) 대 지 : 외함, 케이블지지대, 케이블, 온도계리드선, 기타배선 등 변압기 본체 이외의 모든 것을 말한다.
 3) 전압이 달라도 적용되는 중격전압이 같은 경우에는 상기의 이격거리를 적용할 수 있다.

(4) 외함

-몰드변압기에 전원을 공급하기 위한 2차 간선의 부스덕트(Bus-Duct)는 플렉시블 부스바(동대)를 이용하여 몰드변압기의 권선부에 무리가 가지 않도록 한다. 또한 권선부의 하부는 충격을 흡수할 수 있는 방진 고무를 이용하고, 상부 역시 물리적 변형이 없도록 고정시킨다. 이때 전자기의 평형이 되도록 배치하며, 상하부의 환기가 적절하도록 배치해야 한다.

(5) 온도계

-몰드변압기의 온도 변화를 측정하기 위해 설치되는 온도계는 코일 상부의 가열된 공기 온도를 감지하여 표시하는 것으로 실제 권선 내부의 온도보다 낮게 표시한다. 온도계 접점의 용량은 AC 220V에서 0.2A(저항부하) 정도로 매우 낮으므로 접점 용량을 참고하여 사용한다. 그리고 변압기에 설치되는 온도계의 일반적인 접점 설정 온도는 <표 5>와 같다.

(6) 결선

-몰드변압기의 결선 작업을 할 때 가능한 한 비닐포장을 해체하지 않은 상태로 단자부위만 노출시켜 결선 작업을 실시한다. 결선 작업시 변압기 고압 또는 저압 권선측의 상 결선용 부스바나 돌출물을 밟지 않도록

록한다. 그밖의 큐비클 내의 작업 중 이물질(볼트, 너트)이 변압기 권선에 들어가지 않도록 각별한 주의가 요구된다. 고압측 결선시 단자부분에 케이블 등에 의한 인장력이 가해지지 않도록 한다. 냉각팬 등 특별한 부품을 설치시에는 제어선 등도 반드시 코일 표면과 충분한 절연 이격거리를 확보해야 한다. 전압 탭 절환 단자의 위치는 3상 모두 동일한 위치로 해야하며, 1차 및 2차 결선이 정확하게 시공되도록 한다. 변압기를 병렬 운전할 경우 변압비, 각변위 및 임피던스 전압이 정확한지 확인하고, 접지는 기술기준에 준하여 시설해야 한다.

〈 표5 〉 온도계의 일반적인 접점 설정 온도

변압기의 온도 상승	1점점 설정치	2점점 설정치	접점이 1개인 온도계일 경우에는 1점점 설정치로 선택한다.
B종 80 ℃ F종 100 ℃	80 ℃ 100 ℃	100 ℃ 200 ℃	

(7) 보호장치

- 몰드변압기의 보호 장치의 주차단기로 진공차단기(VCB; Vacuum Circuit Breaker)를 사용하는 경우 차단기 2차측에서 지 흡수기(S·A; Surge Absorber)를 설치한다.

(8) 설치

- 몰드변압기는 물리적 충격에 취약하므로 진동 전달 요소가 없도록 주의가 요구되며, 진동이 심한 곳 또는 내진을 고려하는 경우에는 앵커로 바닥에 고정해야 한다. 설치된 위치는 설치 전에 정리정돈 완료 후에 반입해야 하며, 설치 완료 후에도 이물질 제거를 정확히 해야 한다. 또한 적절한 이격거리가 확보되었는지 규정을 참고하여 재차 점검한다.

(9) 운전

- 몰드변압기의 운전은 단기 보관 후 전원 투입시에 상기 사항을 재점검하고, 절연저항을 측정하여 선로 상태를 확인한다. 이 때 중성점 접지는 해제된 상태로 측정하여야 한다. 장기 보관 후 전원 투입시에는 습기 또는 결로 현상이 있는지 확인한 후 적절한 조치를 하여야 하며, 단기 보관 후 전원 투입 순서에 의한다.

3. 결론

몰드 변압기(mold transformer)는 기존의 유입식 변압기에 비해 설치 공간이 작을 뿐만 아니라 기름을 사용하지 않으므로 청결하게 관리할 수 있다. 그러나 변압기 운용 중에 발생하는 열을 적절히 방출하는데 제한이 있고 이상 징후를 조기에 진단 또는 점검으로 알아내기가 어렵다는 한계점이 있다. 또한 사고가 발생하면 수리 및 보수가 현실적으로 불가능하므로 교체하는 시간과 비용이 많이 필요하다. 즉 변압기가 설치되는 전기 설비는 다른 어떤 전기설비보다 에너지 변환에 따른 위험요소가 많아서 단락, 과부하, 접촉(숙) 불량, 누전, 반단선, 트래킹 등이 발생할 수 있으므로 정기적인 점검 및 관리가 요구된다.