

# 대용량 전력용변압기의 사고분석 및 진단시험법

한국전기연구소  
절연진단연구팀 류희석

## ☐ 목 차 ☐

- 1. 서론
- 2. 사고분석
- 3. 변압기의 진단시험법
- 4. 맺은말

### 1. 서론

매우 효율이 높고 전력계통 전체에 걸쳐 중요한 역할을 담당하고 있는 대용량 전력용변압기에서도 일반적인 전력기기와 같이 열화과정이 진행되며 어떤 경우에는 외부 사고의 영향으로 인하여 고장현상이 발생한다. 전력용변압기의 경우 전기적인 절연구조에 고체 및 액체를 복합적으로 사용하고 있고 액체부분은 어느 정도의 특성재생이 가능하기 때문에 한가지 종류만을 사용하는 다른 전력기기와는 열화과정 및 특성에 있어서 많은 차이를 보인다. 현재로서 전력용변압기의 수명을 평가하는 기술은 현장적용이 어려운 상태이며, 현장적

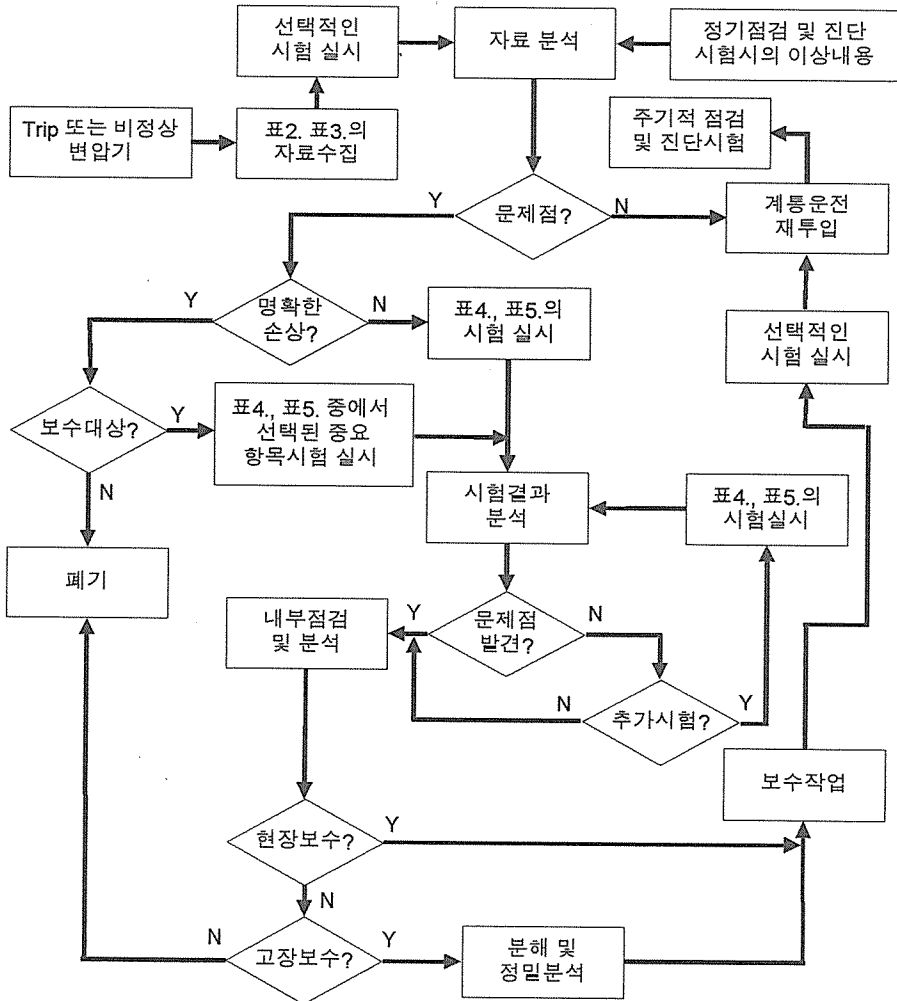
용이 가능한 기술로서는 사고가 발생 하였을 경우 또는 현재의 전기적특성을 파악하기 위하여 정밀 진단을 필요로 하는 경우에 일부 진단시험기술이 적용되고 있다. 여기서는 현장기술자의 이해를 돕기 위하여 변압기의 상태를 파악하기 위한 기본적인 사항들과 현재 적용이 가능한 진단시험기술을 종합한다. 본고의 내용은 기본적으로 전력회사에서 사용되는 전력용 변압기에 초점을 맞추었으나 모든 교류 변압기의 경우에도 적용 될 수 있다. 본고는 ANSI/IEEE C57.125-1991 “전력용변압기와 Shunt reactor 사고의 조사, 기록 및 분석을 위한 IEEE지침서”를 기본으로 필요한 자료들을 종합하였음을 밝혀둔다. 또한 용어 및 근거 규격들은 약간씩 달라질 수 있으나 IEEE 규격류를 기준으로 하고 모호한 것은 원문을 부기한다.

### 2. 사고분석

변압기의 사고분석 과정을 본 고에서 종합하는 목적은 실제 사고가 일어난 경우 그 원인을 파악하기 위한 과정을 종합적으로 파악하여 봄으로서 정상적인 운전 및 유지보수 과정에서 필요한 자료

들을 누락하지 않고 수집 관리 할 수 있도록 하기 위한 것이다. 근본적으로 사고분석 과정은 별도의 기술이 아니라 생산에서부터 현장에서의 운전과 유지 보수에 걸친 전체 과정상의 필요 정보를 수집하여 정리하고 사고시 발생한 상황 정보와 같이

분석하는 과정이다. 따라서 사고분석 과정을 파악하고 그 정보 및 진단시험들의 의미를 알고 있다면 정상시의 운전과정에도 많은 도움이 될 수 있을 것으로 생각한다.



(그림 1) 사고변압기의 처리과정

## 2.1 사고변압기의 판정 및 후속조치

변압기의 사고라 함은 변압기가 보호계전기의

동작으로 정지되었거나, 운전에 적합치 않다고 판단되는 상황이 발생하는 경우를 뜻한다. 실제로 현장에서 변압기가 포함된 계통이 trip되었을 경

우 각 구성요소의 상황을 정확히 판단하지 않고 제투입됨으로서 사고를 확대 또는 전파시키는 경우가 있다. 어떠한 경우라도 운전중인 변압기 회로가 trip되었을 경우 (그림 1)과 같은 기본적인 점검과정이 수행되어야 한다. (그림 1)과 같은 후속조치의 결정과정에는 사고변압기의 용도,중요도,가격 및 최악의 상황에서의 파급효과 등과 같은 주위 요인이 고려되어야 한다. 또한 사고변압기의 처리과정에서는 제작업체 또는 계통관리자가 제시하는 변압기 사고처리 지침서에 지적되어 있지 않더라도 제투입 여부와 관계없이 사고발생 전과 후의 모든 자료 즉 기록 가능한 모든 사실이 기록되어야 한다는 것을 주의 할 필요가 있다.

(그림 1)에 있어서 두 개의 출발점은 “1) 변압기가 정지상태 또는 비정상인가”와 “2) 기본적인 시험결과가 이전의 기록들과 차이가 나는가”이다. 기본적인 시험항목에는 <표 4>와 <표 5>에 열거한 시험항목들이 포함되어야 한다.

(그림 1)에 있어서 마지막은 폐기 또는 재운전으로 귀결된다. 재운전에 앞서서는 운전에 적합한가를 입증하기 위하여 일부 선택된 시험을 실시할 필요가 있다. 재운전 후에는 전기적 시험들과 유중Gas분석을 포함하는 점검을 주기적으로 실시함으로써 변압기를 감시하는 것이 바람직하다.

## 2.2 자료수집

사고분석 과정은 외관검사(표 2참조) 또는 명백한 손상 상황을 근거로 선택적인 시험을 실시하고, 그 시험 결과로부터 사고상황의 가설을 추정한 후, 내부점검과 분해과정에서 확인하는 것이다. 따라서 기본적으로 현장상황을 정확히 파악하고 가능한 한 많은 자료를 수집해야만이 각 단계에서

효과적인 결정을 내릴 수 있다. 자료수집 과정은 가장 기본적이고 최초에 이루어져야 하는 과정이다.

### 2.2.1 일반사항

자료수집 과정 뿐아니라 전체 사고분석 과정에서 제작자를 비롯한 사용자의 모든 조직의 협조가 이루어지면 현장조사 작업도 빠르게 진행 될 수 있고 진단의 정확도도 높일 수 있다. 사고발생 상황을 제작자에게 신속하고도 정확히 전달하는 것이 중요하며, 보증기간중일 경우라면 더욱 강조되는 사항이다. 모든 사고분석 과정에 필요한 자료로서 공장시험 성적서, 검사기록 및 비밀이 아닌 내부구조 도면 등 필요한 정보를 제작자에게 요구해야 한다. 통상적으로 대용량 전력용변압기는 사용기간이 매우 길기 때문에 국내에서는 기록자료의 유지가 안정적이지 못하므로 변압기 설치시 사용자가 확보하여 현장부근에서 유지하는 것이 바람직하다.

사고분석 과정 또는 진단과정에는 제작업체, 사용업체와 수리/진단업체가 모두 참여하는 팀 개념의 도입이 필요하다. 현장점검뿐 아니라 최종 자료분석 과정에 참여하는 사용자, 제작자와 진단/수리업체의 인력으로 구성된 공동체를 만드는 것이 바람직하다. 이러한 공동체가 구성되면 진행속도를 향상시킬 수 있을 뿐아니라, 편견에 치우치지 않는 최종 진단을 내릴 수 있기 때문에 후일 발생 할 가능성이 있는 분쟁의 소지를 최소화 할 수 있다

### 2.2.2 사전준비

사고변압기가 있는 현장으로 출발하기 전에 사전준비가 있다면 매우 큰 도움이 된다. 현장에서

의 사고조사는 탐정업무와 유사하므로 호기심과 객관성이 필수적이며 기본적인 자료가 확보되었다면 많은 부분에 대한 오해의 소지를 줄일 수 있다. <표 1>은 사전준비를 위한 기본항목들을 종합한 것이다.

### 2.2.3 현장조사

사고변압기 현장조사에는 시간적 적절성이 대단히 중요하다. 변압기가 움직이거나 계통상 결선이 변화하여도 자료가 파괴되어 버릴 수 있다. 따라서 자료수집과 시험은 가능한 한 빨리 진행되어야만 한다.

거의 모든 경우, 현장에는 작업자가 조사자보다 먼저 도착해 있기 마련이다. 또한 조사자가 현장에 도착하기 까지 복구작업을 중지한다는 것은 실제로 매우 어려운 일이다. 따라서 사고 조사작업에 대한 부정적인 영향을 최소화할 수 있도록 운전 복구작업에 대한 지침을 전체 작업인원에게 주어야 한다. 가능하다면, 차후의 분석 작업에 도움이 될 수 있도록 조사자가 변압기를 살펴보고 사진등을 확보함과 동시에 필요한 진단시험을 실시하고 기록 할 수 있도록 사고변압기에 대한 모든 작업은 중지되어야만 한다.

현장에서 작업하는 인력은 변압기 및 일반적 분야에 대한 숙지도는 매우 중요하다. 조사의 한 부분으로서 전체 작업 인원의 변압기의 운전 보수에 대한 전문성을 확인하여야만 한다.

현장조사는 처음부터 최소한 두명 이상이 수행하여야 한다. 둘 이상의 인원이 참여하면 상호보완이 가능하며 여러가지 발견된 사항들을 토의 할 수 있고, 현장에서 즉시 시행되어야 할 “다음 과정”을 결정 할 수 있다.

현장조사 자료중에는 사고시의 상황, 사고 이후

의 변압기에 대한 물리적인 점검사항 및 전기적 사항들이 중요한 항목으로 포함된다. <표 2>와 <표 3>은 필요한 육안 점검항목들을 종합한 것이다.

<표 1> 사전준비항목

- Manual : 외형도, 개요도, 부속품설명서 및 공장사진 등이 포함된 것.
- 시험성적서 : 공장시험 및 현장시험 성적서
- 일상점검 보고서 또는 일지
- 변전소의 단선 계통도
- 차단동작 계획서
- 보수기록 : 과거 문제점에 대한 보고서 포함
- 계기 설정치 : 변압기, 개폐기 및 측정기기
- 사진기 : Video녹화기, 즉석사진기, 35mm
- 측정용 줄자
- 방호복
- 보안경
- 확대경
- 녹음기
- 천공 검사경 (Borescope)
- 조명등 (Flashlight)
- 자석 (입자의 자성체 여부 검사용)
- 절연유 채취용기 및 채취용 주사기
- 산소계

#### 2.2.3.1 전기적 시험항목

전력용변압기에 어떤 시험을 실시하기 전에는 모든 전원과 보조원들이 변압기로부터 분리 되어 있고 시험대상이 적절하게 접지되어 있는가를 반드시 확인하여야 한다. 특히 시험대상 변압기의 가연성 Gas에 대한 시험이 완료되어 안전하다는

것이 확인 되기전에는 전기적 시험을 실시해서는 안된다. 필요하다면 Gas의 배출이 필요한 경우도 있다. <표 4>는 현장시험으로서 실시할 수 있는 전기적 시험항목의 추천목록이다. 시험진행자는 제작자가 제공한 참고문헌을 참조하여야 한다. 각 시험법에 대해서는 다음 장에서 요약한다.

<표 4>에서 각 시험항목의 뒷부분에 표시한 번호들은 각 시험항목이 어떤 평가과정에 적합한 특성치를 산출하는가를 표시하기 위한 것이다. 각

<표 2> 일반적인 육안점검 추천항목

<p><b>외부 상황 유무</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 발광현상에 대한 관측</li> <li>• 지역내의 폭풍 또는 뇌격현상</li> <li>• 비정상적인 소음 또는 냄새</li> <li>• 변압기나 부속품으로부터 배출된 파편</li> <li>• 변압기 상부 또는 인근의 동물 사망</li> <li>• (사망하지 않았더라도) 동물 접촉의 흔적</li> <li>• 근처의 이상 물체</li> <li>• 육안으로 볼 수 있는 성장부분</li> <li>• 적외선</li> <li>• 변압기 배수설비</li> <li>• 파괴행위의 흔적</li> <li>• 차단 또는 사고시의 근무자, 목격자와의 면담</li> <li>• 변압기 부하</li> <li>• 계통 우란현상</li> <li>• 고장시의 계통 개폐순서</li> </ul> <p><b>냉각기의 상황</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 운전중인 송풍기 또는 펌프</li> <li>• 완전 개방된 방열기 밸브</li> <li>• 파편 또는 부식으로 손상된 공냉식 방열기 또는 열교환기</li> </ul>
--

<p><b>피뢰기의 상태</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 피뢰기 동작(공장검사가 바람직하다.)</li> <li>• 피뢰기 횡수기록 표시</li> <li>• 물리적 상태</li> <li>• 전기적 상태</li> <li>• 피뢰기 접지 연결 상태</li> <li>• (변압기 외함에 고정된) 피뢰기 받침대의 상태</li> </ul> <p><b>외함의 상태</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 부풀어오른 부분</li> <li>• 갈라진 부분</li> <li>• 절연유 누설부분</li> <li>• 과열의 흔적</li> <li>• Conservator내의 油位</li> <li>• gasket 또는 밀봉부의 이상 또는 누설 등</li> <li>• 밀봉형 변압기의 가스압력</li> <li>• 제어반의 문제사항</li> </ul> <p><b>붓싱의 상태</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 누설현상</li> <li>• 애자부의 파손현상</li> <li>• 뚜껑의 구멍</li> <li>• 트래킹현상</li> <li>• 油位</li> </ul> <p><b>Tap Changer의 상태</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• OLTC의 위치(있는 경우)</li> <li>• 최대위치</li> <li>• 최소위치</li> <li>• NLTC의 위치</li> <li>• OLTC함내의 油位</li> <li>• OLTC 동작횟수 기록계 지시치</li> </ul>
--

〈표 3〉      경보 또는 trip현상의 조사

<p><u>보호계전기 동작목표치</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 차동(87)</li> <li>• 과전류(50, 51, 6)</li> <li>• 상전류(50, 51, 67, 21, 32)</li> <li>• 지락사고(50N, 51N, 64)</li> <li>• 극성(36, 32)</li> <li>• 과여자(81)</li> <li>• (과부하, 불평형, 상개방)계기 지시치</li> <li>• 고장압력계전기의 동작(63, 63FP, 63SP)</li> <li>• 방압변의 동작(63PR, 63P)</li> </ul> <p><u>온도 (지시치 및 최고온도)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 油溫(또는 油溫)(49, 26)</li> <li>• 권선온도(또는 Hot spot)(49, 26)</li> </ul> <p><u>油位</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 외함(71)</li> <li>• OLTC(71)</li> <li>• Conservator(71)</li> </ul> <p><u>동작 여부</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 가스검출 계전기(63GR)</li> <li>• 가스 누적 계전기</li> <li>• 유량계(80, 74)</li> <li>• 경보반의 표시(30, 74)</li> <li>• 소손휴즈</li> <li>• 동작 자료기록순서</li> <li>• 동작의 oscillograph 기록</li> </ul>
--

(5) 철심-접지간의 전기적인 경로를 표시

〈표 4〉      일반적인 전기적 현장시험

<p><u>절연저항</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 권선-권선간 (1)(4)</li> <li>• 권선-대지간 (1)(4)</li> <li>• 전체 권선-대지간 (1)(4)</li> <li>• 철심-대지간 (5)</li> <li>• 유전흡습(성극비) (1)</li> </ul> <p><u>기타 일반 현장시험</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 권선비 (2)(4)</li> <li>• 절연 역율 (1)</li> <li>• 권선 직류저항 (2)(4)</li> <li>• 절연유 절연파괴(현장, 실험실) (4)</li> <li>• 여자(저전압 60Hz) (2)(3)(4)</li> </ul> <p><u>기타 진단시험(가능한 경우)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 저전압 충격 (3)(4)(2)</li> <li>• 유도전압 (2)</li> <li>• 임피던스(단상) (3)(4)(2)</li> </ul>
---

2.2.3.2 Gas 및 절연유의 채취 및 시험

대용량 전력용변압기는 절연유의 산화와 흡습을 최소화하기 위하여 대부분 대기와 접촉되지 않는 밀폐식 절연유 순환기구를 가지고 있으므로 사고에 따른 어느정도의 흔적이 밀폐시스템 내에 남게 된다. 따라서 밀폐시스템내의 Gas성분과 절연유의 Gas 및 특성시험은 매우 중요한 자료가 된다. 이러한 기본자료의 확보를 위하여 현장 및 실험실 시험과 추후의 추가 시험을 위하여 현장조사시에는 Gas 및 절연유 시료를 채취하여야 한다. 시료채취는 조사를 위해 변압기 외함을 열기 전, 즉 대기와 접촉하기 전에 채취하여야 하며, 채

번호는 다음과 같은 특성들을 나타내고 있다.

- (1) (상권선간) 주절연의 전기적특성
- (2) (turn간 단락 등) 보조절연의 전기적특성
- (3) (단락사고 등) 기계적 손상부의 기계적특성
- (4) 손상위치의 표시

〈표 5〉 Gas 및 절연유의 시험항목

<p><b>현장시험</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gas공간 또는 Gas검침계전기내의 총가연성Gas(TCG)량 측정</li> <li>• Gas공간의 이슬점 측정</li> </ul> <p><b>실험실시험</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gas공간 또는 Gas검침계전기내의 개별 성분 분석</li> <li>• 油中 溶存Gas의 개별 성분 분석</li> <li>• IEEE C57, 106-1991에 규정된 절연유 분석시험</li> <li>• 절연유내의 입자형 고형물과 금속성분 추적을 위한 여러 가지 실험실 분석</li> <li>• 절연유내의 PCB측정</li> </ul>
---

취과정은 Buchholz 또는 Gas누적계전기의 구조 또는 밀폐시스템내의 Gas공간 존재여부에 따라 달라지므로 각 기기의 설명서와 일반적인 규격을 같이 참고한다. 〈표 5〉는 채취된 Gas 및 절연유에 대한 시험항목들을 요약한 것이다.

2.2.3.3 중점 시험항목

사고변압기에서 채취한 Gas와 절연유 溶存Gas에 대한 시험에서 변압기의 문제점을 분류 할 수 있는 정보를 얻을 수 있다. 또한 사고前 최근의 측정자료가 있다면 사고後의 자료와 비교하여 많은 정보를 얻을 수 있다. 가스성분에 따른 문제점의 분류는 IEEE C57, 104-1991를 참조하면 된다. 〈표 6〉은 Gas분석에서 검출된 문제점들을 확인하기 위한 전기적시험과 절연유 시험항목들이다. 순서는 사고위치 검출을 위한 중요성과 시험기기의 수배 및 수행상의 난이도를 고려한 것이다.

〈표 7〉은 측정된 시험결과에 따른 일반적인 추정 문제점의 범위를 열거한 것이다. 〈표 7〉의 우선순위는 범위별로 하나 이상의 시험을 참조하여 추정되는 문제범위를 확인하거나 제외시킬 수 있도록 선정한 것이다. 〈표 7〉은 몇가지 범위만 열거한 것이기 때문에 각 분석자들은 문제 범위와 두가지 이상의 시험결과 사이에 중요 상관관계가 나타나는 사고기구내의 유형별 기록에 따라 표를 확장 개발하여 사용하는 것이 바람직하다.

〈표 6〉 Gas분석 결과에 따른 시험항목

고장형태	시 험 의 중 요 도						
	절연유시험	절연저항/권선비	역율	저압여자	임피던스	권선저항	유도/RIV
전기적 Arc발생	절연유시험	절연저항/권선비	역율	저압여자	임피던스	권선저항	유도/RIV
전기적 Corona	절연유시험	절연저항/권선비	역율	유도/RIV	저압여자	임피던스	권선저항
절연지 열적	절연유시험	절연저항/권선비	권선저항	역율	저압여자	임피던스	유도/RIV
절연유 열적	절연유시험	절연저항/권선비	권선저항	저압여자	역율	임피던스	유도/RIV

모든 경우에 있어서 油中溶存Gas시험은 표에 분류된 모든 범위를 확인 또는 검출 할 수 있다.

또한, 油中溶存Gas분석 이외의 다른 방법으로 문제범위를 결정하기 어려운 경우에도 油中溶存Gas

분석은 1순위의 중요도를 갖는다. <표 7>에 참조 표시는 IEEE C57, 104-1991에 의한 Gas분석 결

과가 다음사항을 나타내야 한다는 것을 표시한다.

<표 7> 현장시험 결과 해석

추정 문제범위	시험결과의 중요도		
	1 순 위	2 순 위	3 순 위
권선turn간 단락(보조절연)	권선비 초과 <sup>†</sup>	권선저항 감소	여자전류 증가
권선회로 개방	권선비 초과 <sup>**</sup>	저항증가	RIV 증가
습기	절연체 역율 증가	절연유내압 저하, 수분증가	절연저항 저하
주절연손상	절연체 역율 증가	절연저항 저하	RIV 증가
고장침입, 기계적손상	여자전류변화, 임피던스증가	RIV 증가	저전압충격파형 변화
철심과열	Gas분석 비정상 <sup>§</sup>	철심접지저항 저하	여자전류 증가

† 절연지(cellulose)의 열적문제를 나타낸다.

※ Arc발생문제를 나타낸다.

§ 절연유내의 열적문제를 나타낸다.

#### 2.2.3.4 외함 및 OLTC의 내부점검

사고현장에서의 변압기 내부점검은 보통 사고위치를 확인하고 피해 범위를 판단하기 위하여 실시된다. 외함내에 들어가기 전에는 항상 작업인원을 위한 적절한 환기, 건조공기의 공급, 최소 19.5%의 산소농도 확인 등 모든 안전점검이 실시되어야 한다. Gas봉입형 변압기의 경우 뚜껑을 만지기 전에 모든 압력을 제거하여야 한다. 제작자가 작성한 점검지침서를 참조 할 필요가 있다.

뚜껑을 연 다음 맨 처음에는 변압기내로 들어가지 않고 변압기 외부로부터 내부장치들을 육안점검 한다. 절연유를 변압기 전체적으로 완전히 빼내지 않았다면 뚜껑을 열기 전에 절연유의 위치가 열리는 부위보다 낮아졌는가를 반드시 확인 하여야 한다.

사고시 발생하였거나 또는 이전부터 존재하는

오염물질이나 부유물들이 절연유 표면에 떠 있다면 절연유의 유면을 낮춤으로서 오염물이 철심과 권선 구조물 전체로 퍼지게 된다. 따라서 절연유의 유면을 권선과 철심 구조물 근처로 낮추기 전에, 감시창을 통하여 육안으로 점검하여야 한다. 변압기가 현장보수만으로 다시 사용 될 수 있다는 것을 고려하여 조사과정 중에 추가적인 피해가 발생하지 않도록 충분한 주의를 기울여야 한다.

통상적으로 내부점검을 위하여 외함 내부로 들어가기 전에 변압기로부터 절연유를 어느정도 빼낼 필요가 있다. 절연유 펌프와 필터에 파편이나 찌꺼기가 막히는 것을 방지하고 사고 또는 열화의 흔적을 확보하기 위해서도 여과기를 반드시 사용하여야 한다. 절연유 배출 과정은 건조공기를 안전한 압력으로 공급하면서 실시하여야 한다.

절연유가 제거된 경우 외함내로의 수분침투를 감소시키기 위하여 노출시간을 최소로 유지하여야



한다. 이를 위해서는 변압기내로 들어가기 전에 내부 도면이나 사진 또는 이전의 내부점검 보고서 등을 상세히 검토하여 기기내에서의 이동과 점검에 대한 계획을 세워야 한다. 대용량 변압기라 하여도 점검 인원이 변압기 외함내에서 자유롭게 움직일 수 있는 경우는 매우 드물다. 따라서 사전시험 또는 자료에 의해 상세한 점검이 필요하다고 추정되는 부분에 실제로 접근이 가능한가 하는 것을 주의 깊게 검토할 필요가 있다. 내부점검 과정은 그 준비에 많은 노력과 경비가 필요하고 운전 가능한 부분을 손상시킬 수 있다는 위험성도 존재하기 때문에 가능한 한 최대의 주의를 기울여야 한다. 대상변압기에 대해 이전에 내부점검을 해본 경험자가 있다면 반드시 계획 전체에 걸쳐 자문을 받아야 한다. 현장에서의 내부점검이 끝나면 통로 뚜껑을 다시 덮고 건조공기로 채워 놓아야 하며, 외함내로 가지고 들어간 것들이 완전히 반출되었는가를 확인하기 위하여 반입물을 상세히 기록하고 점검이 끝났을 때 다시 가지고 나온 것을 확인한다. 또한 앞서 2.2.3절에서 설명한 바와 같이 두 명 이상의 전문가가 점검하는 과정에서 서로에 대한 주의와 반복 점검이 이루어진다면 조사자료 뿐 아니라 기타 사항에 대해서도 좀더 확실한 결과 및 확신을 얻을 수 있다.

변압기에 추가적인 피해를 발생시키지 않기 위해서는 청결의 유지가 중요하다. 변압기 내로의 수분의 침입과 이상 물질의 유입을 막기 위하여 사다리 보다는 계단을 사용하는 것이 좋다. 추가적인 피해가 발생하는 것을 막기 위해서 가장 요구되는 것은 점검자와 지원인력의 상호이해 및 협력과 함께 매우 세심한 주의와 점검이라는 것을 명심하여야 한다. 점검시 가능한 한 상세하고 확실한 조사가 이루어져야 한다는 점을 강조하기 위하여 <표 8>에

외함 및 OLTC에 대한 점검항목을 종합하였다.

<표 8> 변압기 내부점검 항목

<p><u>절연유</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 비정상적인 절연유의 냄새</li> <li>• 절연유의 색깔</li> <li>• 수분의 흔적 및 그 위치</li> <li>• 외함내의 부유 수분 및 그 양</li> </ul> <p><u>파편(형태별)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 양</li> <li>• 위치</li> <li>• 분석을 위한 시료채취</li> </ul> <p><u>소손, 변색 또는 침전부분</u></p> <p>(다음 부분에서 누설자속에 의한 파열 또는 아크의 결과로 나타난 흔적)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 외함 벽</li> <li>• 붓싱 연결단자</li> </ul> <p><u>소손, 변색 또는 침전부분(계속)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 코로나 쉴드</li> <li>• 동 연결단자</li> <li>• 부스바</li> <li>• 기타 (열거)</li> </ul> <p><u>연결단자 또는 연결부의 이완현상</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 탭 연결선</li> <li>• 붓싱</li> <li>• 단자판</li> <li>• Collars</li> <li>• spacers</li> <li>• 철심 접지 연결부</li> <li>• 철심 고정용 앵글(보강대)</li> </ul> <p><u>무부하 탭절환기의 상태</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 접점</li> <li>• 기계적 동작부</li> <li>• 연결 축</li> </ul>
---

- 차폐부(shielding)

### Carbon Tracking

- 위치 및 양
- 애자 손상부
- 동/알루미늄이 튀었거나 증착된 부분(splatter)
- 다공성 절연부거나 리드선

### 권선과 리드선의 상태

- 리드선 묶음
- 권선 지지구조물
- 권선 clamping
- 권선의 찌그러짐
- 권선 이동
- 절연체 변색
- 리드선 외형
- 리드선 이동
- 직렬 변압기의 상태
- 보호용 단권변압기의 상태
- 부분적인 hot spot의 흔적
- 연결부 과열
- (접근 가능한 모든 연결부를 조여 줄 것)

### 변류기들의 상태

- 변류기
- hot spot 측정기구
- 배선
- 지지용 꺾쇠
- 외함벽 침입방지용 받침(penetration block)

### 철심 상태

- 전기적 배선
- 과열
- 철심-대지간 비정상적인 절연저항 측정치
- 외함내의 油位 흔적
- 손상된 외벽 누설자속용 분류기(tank wall stray flux shunt packs)

- 철심부의 철심접지 연결
- 철심의 녹,부식(위치 및 양)
- 계철 고정용 볼트의 상태
- 철심 강판의 이완상태
- 철심 손상흔적
- 철심맞춤구조의 상태(용접,찌그러짐)

### OLTC 상태

- 접점의 비정상적인 소손
- 접점사이의 arcing
- 접점에서 접지로의 arcing
- 기계적 고장부분
- 부품 배열이 어긋난 부분
- 진공병의 고장
- 전동 구동장치의 상태
- 절연유면의 흔적
- 탭 고정판의 상태
- 전기적 기계적 이동경로의 한계까지의 정확한 동작
- 부품의 깨진흔적
- 부품의 구부러진 흔적
- 위치변환용 저항기(transition resistor)의 상태
- 직렬 변압기의 상태
- 함 밀봉구조의 상태
- silica gel 호흡기의 상태
- 탄소 침적물의 존재
- 없어진 부품
- 이완된 부품의 발견
- 보호용 단권변압기(reactor)의 상태
- (있는 경우) 진공 스위치의 상태
- 모든 접점의 위치
- 수분침입 흔적의 표시
- 고정접점의 상태
- 가동접점의 상태
- 권선 역절환 스위치의 상태

## 2.2.4 현장 이외에서의 조사사항

### 2.2.4.1 제작기록

내부도면 등과 같은 설계정보는 소유권이 인정되는 경우도 있으나 객관적인 사고분석을 위하여는 기기구조에 대한 자료가 필수적으로 요구된다. 이러한 정보를 제작자와 사용자가 합동으로 분석 과정에 사용한다면 가장 합리적인 방안일 것이다. 조사대상에는 설계도면뿐 아니라 질의응답 보고서, 시험결과, 사양 승인서 및 설계사양 등이 포함되어야 한다.

### 2.2.4.2 선적 및 설치기록

검토해야 할 기록에는 주로 운송중에 발생하는 기계적 충격의 기록자료, 설치전의 보관조건, 현장 조립 및 절연유 충전과정 및 기록, 계통투입 일자, 설치시의 일기, 준공시험 기록 및 변압기에 대한 검수과정 등이 포함되어야 한다.

### 2.2.4.3 운전기록

설계에 따른 기기의 부하 제한조건은 공개적으로 명판과 제작자가 제공하는 추가 설계자료 등에 포함되어 있어야 한다. 비정상적인 부하조건을 포함하는(가능한 최대조건에 대한) 부하정보는 필수적인 정보이다. 보호계통의 설정치, 운전상황 및 기능적인 시험상황 등에 대한 상세사항은 매우 유용한 정보가 된다. 비정상적인 돌발상황의 기록, 계통 사고의 기록 등이 (상호 비교 가능한) 다르거나 비슷한 계통들에 대한 지식은 전체 분석과정에 적용될 수 있는 매우 중요한 기록이다. 계통에

서 발생하거나 외부의 뇌충격 전압에 의한 계통전압 변화에 대한 기록도 중요한 분석요소이다.

검토해야 할 기록에는 부하량, 운전시간, 단락회로, (주파수와 전압에 대한) 계통 과도상태 또는 개폐기 조작, 사고시의 기후 및 보호계통의 기록 등이 포함되어야 한다.

### 2.2.4.4 보수기록

보수과정, 일자 및 보수의 형태 등은 검토되어야 할 중요한 자료이다. 변형작업 및 수리작업의 기록들도 검토되어야 한다.

### 2.2.4.5 수요자 사고기록

수요자 사고기록은 동일하거나 유사한 기기 및 동일 장소에 설치된 기기의 사고기록과 연관시켜 검토하여야 한다. 사전조사 등에 의해 발견된 흔적과 피해범위에 대해서는 특히 주의를 기울여야 한다.

## 2.2.5 외함 분리 및 분해조사

사고원인의 규명을 위해 변압기를 반드시 분해해야 되는 경우에는 계획적이고 체계적으로 접근해야 하며, 사용자와 제작/수리업체 간에 왜 분해 공장으로 보낼 것인지에 대한 합의가 필요하다. 분해의 각 단계에서 모든 관련사가 입회 할 수 있도록 미리 일정을 정해 계획을 세워야 하며, 영구적인 기록을 유지 할 수 있도록 각 중요단계에서는 사진을 찍을 필요가 있다. 분해과정에서는 사고의 흔적이거나 사고 원인이 파괴되지 않도록 주의를 기울여야 한다. <표 9>는 변압기의 분해시에

조사 또는 기록해야 할 점검목록이다.

(표 9) 변압기 분해시의 점검항목

<p><u>철심 손상, 철심절연파괴의 원인</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 철심을 통과 하는 접지전류</li> <li>• 과도한 자속으로 인한 과열</li> <li>• 철심 적층판의 용접현상</li> </ul> <p><u>tracking의 흔적을 남긴 절연파괴의 원인</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 습기</li> <li>• 오염</li> <li>• 이격거리 문제</li> <li>• Gas발생</li> <li>• 정전유도</li> <li>• 부분방전(corona)</li> <li>• track의 길이와 경로</li> <li>• 소손, 탄화 또는 변색된 절연</li> <li>• 구멍이난 절연</li> <li>• 소손된 도체</li> <li>• 용융된 도체</li> <li>• 반경방향spacer 사이의 주름진 도체</li> </ul> <p><u>반경방향 사고의 흔적</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 도체 뺨힘현상</li> <li>• 안쪽으로의 반경방향 함몰</li> <li>• 주름진 도체</li> </ul> <p><u>축방향 사고의 흔적</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 도체 기울어짐</li> <li>• beam 사고</li> <li>• 권선 말단 지지대의 붕괴</li> </ul> <p><u>기계적 사고의 흔적</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• (끝부분 또는 반경 spacer에서 점검하여) 도체절연의 기계적 침식의 흔적</li> <li>• 도체의 원주방향 변위</li> <li>• 외부 물체의 흔적, 위치</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 철심을 통과하는 볼트절연의 파괴</li> <li>• 과도한 자속에 의한 과열</li> <li>• 클램핑 구조의 움직임 또는 외형</li> <li>• 권선이완의 표시인 내철형 권선spacer 호트러짐</li> <li>• 내철형 판상권선도체 지지용 washer board spacer 및 collar의 형태변화 또는 위치이동</li> <li>• 이완 또는 손상된 철심접지연결부</li> </ul> <p><u>열적사고의 흔적</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 사고가 나지 않은 상의 절연체 변색</li> </ul>
--	---

### 2.3 분석

#### 2.3.1 일반

현장조사와 기타의 방법으로 충분한 자료가 수집되었다면 과학적 방법을 사용하여 몇가지 가설을 세워야 한다. 성급한 분석은 틀린 진단결과를 도출할 가능성이 있으므로, 사고경위를 추정하기 전에 전체적인 자료를 주의깊게 검토해야 한다. 운전중 사고의 결과는 보통 기계적인 피해와 전기적인 사고로 구분된다. 전력계통에서 전달되는 에너지는 두가지를 다 발생시킬 수도 있으므로 보고서를 작성함에 있어서 주의와 노력을 기울여야 한다.

이 가설들은 자료와 다른 계통요소들의 성능을 고려하여 검토한다. 이러한 검토과정은 동료들과의 단체 토론과 자료의 증명으로도 가능하다. 틀린 정보가 발견된 경우 가능하다면 정확한 정보로 대체하여야 한다. 연구과정, 적절한 연구실 실험 및 공장에서의 모사과정을 통하여 각 가설의 정확도를 시험 할 수도 있다.

종합된 자료가 가설을 입증하지 못하는 경우, 수정하여 다시 작성하고 다시 시험한다. 입증되지 못하는 가설은 제외되어야 한다.

### 2.3.2 권선의 기계적 사고의 분석

#### 2.3.2.1 일 반

전력용변압기의 사고를 종합적으로 분석하기 위해서는 기계적 변형의 원인이 되는 전자력에 대한 이해가 필요하다. 내철형변압기에서 발생하는 힘의 방향과 사고의 형태는 외철형변압기와 다르게 나타나며, layer, disc 및 pancake형과 같이 권선 형태가 달라도 단락용력하에서 도체 움직임에 저항하는 고유 강도가 달라진다. 절연기구의 경도(stiffness), 권선 고정기구의 강도(rigidity), 도체의 강도 및 권선의 총체적인 탄성 등이 전자력에 대한 권선의 응답형태를 결정하는 요소이다.

실제의 사고 분석시에는 권선단락시에 발생하는 힘의 방향 및 특징들에 대한 깊이 있는 이해와 지식이 요구되지만 본 고에서는 최종 사고 상황에서 권선에 나타나는 흔적을 위주로 요약한다. 권선의 기계적인 사고결과를 분석하는 인원은 가능한 한 많은 경험이 있는 전문가가 참여하는 것이 바람직하다.

#### 2.3.2.2 내철형변압기에서 권선사고형태

##### 2.3.2.2.1 Radial tension(Hoop tension)사고

권선에 반경방향 바깥쪽으로 당겨지는 힘이 작용하면 도체가 뻗치게 된다. 심하지 않은 외형이 발생하여도 권선의 축방향 불안정성을 유발하며

권선 붕괴의 원인이 될 수 있고, 도체절연을 찢거나 분리시킬 수도 있다. 심한 경우 잡아당겨진 도체가 재료적인 탄성한계를 초과하였을 경우 끊어지는 경우도 있다.

##### 2.3.2.2.2 Radial Compression사고

힘이 반경방향 안쪽으로 작용하면 권선 절연통의 기계적인 고장이나 도체 비틀림이 발생 할 수 있다.

##### 2.3.2.2.3 Axial Compression사고

축방향을 따라 권선 중심쪽으로 서로 반대 방향으로 힘이 작용하면 권선 붕괴현상이 발생 할 수 있다. 도체가 기울어지거나 흔들리면 권선전체 형상이 불안정해짐으로서 전체적인 붕괴로 이어지기도 한다.

##### 2.3.2.2.4 Axial Expansion사고

축방향을 따라 권선고정판쪽으로 향하는 서로 반대방향의 힘은 고정판 또는 고정금구류를 휘거나 부러트릴 수 있으며, jack볼트를 구부러트리거나 부러트릴 수도 있다. 도체에는 전류가 반대방향으로 흐르고 있기 때문에 권선의 정위치에서부터 바깥쪽으로 벗어나려는 힘이 항상 발생한다. 이 힘들이 도체를 넘어트려, 축방향의 권선을 불안정하게 하는 원인이 된다. 따라서 제작시 권선의 단락설계와 같은 기계적 설계과정에서 충분한 강도의 조임구조를 확보하게 된다. 그러나 조임구조물의 조임강도나 힘의 분산배치 등이 적절치 않으면 운전중의 정상적 또는 비정상적인 진동 등의

작용으로 권선도체가 축방향으로 변형되기도 한다.

탭권선 배치나 다전압권선 배치로 발생하는 Ampere turn 불평형이 이러한 힘의 발생원인이 되며, 불평형의 크기에 따른 단서로서 여러 가지 연결방법에 따른 임피던스의 변화를 측정하여 파악 할 수도 있다.

#### 2.3.2.2.5 Axial telescoping(킴현상)사고

이러한 사고 형태에는 다음과 같은 두가지가 있다.

- (1) 각 권선이 서로 상대적으로 움직이는 형태 : 바깥쪽 권선이 서로 상대적인 안쪽 권선에 대해 위쪽 또는 아래쪽으로 움직이는 현상.
- (2) 한 권선도체가 축방향으로 불안정한 형태 : 바깥쪽 turn이 상대적인 안쪽turn에 대해 위나 아래로 움직이는 현상.

조임기구에 어떤 기계적 고장이 발생하면 권선이 서로 상대적으로 반대인 수직방향으로 움직여 킴(telescoping)현상이 발생한다.

개별권선의 축방향 불안정현상은 Axial Tension사고, Compression사고 또는 함몰사고로 인해 발생할 수 있다. 결과적으로 도체가 상대적인 다른 도체의 위나 아래로 미끌어져 들어가 안쪽으로 함몰함으로서 킴(telescoping)현상이 발생한다.

#### 2.3.2.2.6 End turn고장

End turn은 반경방향과 축방향의 힘을 함께 받는다. 결과적으로는 바깥쪽 turn을 넘어트리고 끝부분을 철심다리 방향인 안쪽으로 꼬이는 현상을

발생 시킨다.

#### 2.3.2.2.7 나선형 조임현상(Spiral Tightening)

반경방향 힘과 축방향 힘이 복합되면 전체 내부 권선을 나선형으로 꼬임으로서 조임현상이 발생하여 결과적으로는 도체와 radial spacer의 원주방향 위치이동이 나타나게 된다.

#### 2.3.2.3 외철형변압기에서의 권선 고장형태

##### 2.3.2.3.1 반경방향 사고

작은 반경방향 힘 요소가 권선의 모서리에서 발생한다. 감쇠절연구조 때문에 권선의 높이가 경사져 있다면 반경방향의 힘은 통상보다 커진다. 또한 반경방향 힘 요소는 권선의 탭위치에 따라 달라진다. 반경방향 바깥쪽으로 향하는 힘은 도체 뻗힘(stretch)현상의 원인이 된다.

##### 2.3.2.3.2 축방향 고장

(고압군 저압군과 같이) 일정한 권선군에서 발생하는 축방향의 힘은 흡인력으로 발생하며, 따라서 도체, 절연 및 spacer block 등은 압축력을 받는다. 이 힘은 도체에 휨(beam)응력을 발생시켜 spacer block사이의 도체를 구부리려는 방향으로 작용한다. 서로다른 권선군간의 축방향 힘은 반발력으로 작용하여 적층된 철심창호의 끝부분에 권선을 밀어붙인다. 이 힘은 권선과 철심사이의 주절연에 가해지게 되며 철심을 통하여 변압기 외함까지 전달된다. 따라서 최종적으로 권선군사이의

반발력인 축방향 힘은 외함 및 철심의 tensile stress member들과 철심지지용 T-beam에 가해진다.

### 2.3.3 전기적 사고의 분석

#### 2.3.3.1 일 반

변압기 사고는 과도충격전압에 의해서 발생할 수도 있으며, 이 경우 변압기 절연내력은 절연협조에 따라 결정된 파괴기 방전전압을 기준으로 검토되어야 한다. 뇌충격, 과여자, 개폐충격, 권선공진, turn간 단락, 층간단락, 권선간 단락, 부분방전, 절연체 tracking, 절연유의 정전유도 및 방전현상등이 모든 전기적 사고의 형태이다. 내부적으로 전기적 고장이 한번 발생하면 모든 전계 및 전위경도가 비정상적이 되며, 용력이 예상치 못한 형태로 재료에 가해지게 된다. 이러한 상태에서의 사고분석은 매우 복잡해지기 때문에 어떤 경우 내부 피해에 대한 내부점검을 실시하여도 사건들의 발생순서, 최초의 원인 및 원래의 취약부분등에 대한 판단이 어려워진다. 대표적으로 개폐목표치, oscillogram, fault recorder chart 및 변압기 부속품 등과 같은 외부적인 증거들이 고장순서를 분석하기 위해 준비되어야 한다.

##### 2.3.3.1.1 변압기 권선 및 관련부분에서의 전압

분석과정에서 고려해야 하는 권선과 연관부분에 존재하는 전압의 형태는 여러 가지가 있다.

- (1) 정상적인 저주파 계통운전전압 : 변압기 단자에 가해지는 발전된 교류계통전압. 이 전압은 실효치 또는 파고치와 상간전압, 대지선전압

등 ( $\Delta$  또는 Y와 같은) 변압기 연결방법에 따라 표현된다.

- (2) 정상적인 저주파 유도전압 : 변압기내의 인접 권선 및 도전부에 흐르는 전류 또는 직류성분에 의해 권선에 유도되는 전압.
- (3) 비정상 저주파 계통운전전압 : 보호계전기 동작에 의해 계통에서 제거되어야 하는 대표적인 과여자, 불평형 부하 또는 고장상태에 의해 발생하는 단시간 교류전압.
- (4) 비정상 고주파 계통전압 : 뇌격, 부분적인 권선의 공진, 계통 개폐동작 및 파괴기 동작 등에 의해 발생하는 대표적인 과도전압. 고주파전압은 일반적으로 변압기 단자연결부분 근처의 권선turn들에 저주파 전압보다 큰 절연stress를 발생시킨다.
- (5) 기타 요인으로 인한 비정상 고주파 및 저주파 전압 : 태양광, 직류 잡음과 같은 외부요인 및 절연표면의 전하분리 가능성과 같은 유체현상, 방전현상을 시작시키는 입자에 의한 전계분포 변화, turn간 고장의 발생과 같은 진행성 권선 고장 등과 같은 내부현상들로부터 발생 할 수 있는 전압.

변압기의 절연계통에 대한 품질을 입증하기 위하여 상기와 같은 여러 가지 과전압에 대한 전기적 시험이 공장에서 실시되고 있다. 상세한 사항은 IEEE C57, 12, 90-1987을 참조하면 된다.

##### 2.3.3.1.2 절연계통의 기능

변압기에 설치하는 절연계통의 목적은 서로 다른 전압이 인가되고 있는 권선과 관련된 활선부들을 상호간 또는 접지에 대해서 격리함으로써 활

선부분들 사이에 흐르는 전류를 변압기 수명에 걸쳐 최소한의 허용 값으로 유지하는 것이다. 활선 부분 사이의 절연공간을 통과하여 흐르는 파괴적인 전류를 막기 위한 절연계통의 고장현상을 “절연파괴” (dielectric breakdown)이라 부른다. 절연파괴에 저항하기 위하여 재료들로 구성된 절연계통의 능력 측정치를 “절연강도”(dielectric strength)라 부른다. 하나의 절연재료 또는 서로 다른 절연재료들로 구성된 절연계통의 절연강도 (kV/cm)는 규정된 조건하에서 절연재료의 일정한 두께(cm)가 절연파괴되기 위하여 필요한 전압(kV)을 측정하여 결정한다.

각 절연재료의 절연강도를 측정하는 시험에는 단순 또는 균등한 전계를 이용한다. 절연강도는 간단하게 두께(cm)에 따른 얼마만큼의 전압의 함수로 표현되며, 시험대상 재료의 품질을 나타낸다. 절연재료와 활선부로 이루어진 구조의 절연강도를 결정하기 위한 시험을 계획하기 위해서는 절연구조에 가해지는 전계(kV/cm)의 평등성 또는 불평등성, 절연공간 내에서 발생하는 상대적인 전계(kV/cm)의 평등성 또는 불평등성 및 재료 자체의 순도 또는 품질에 대한 지식이 필요하다. 시험용 전극에 의해 발생하는 전계는 전극 곡률반경의 역함수이다.(전극곡률반경이 적은 전극 표면에는 더 높은 전계가 발생한다.)

평등전계하의 두가지 다른 재료가 직렬로 구성된 절연구조에서 각 재료에 인가되는 전압응력의 비는 각각의 유전상수의 비에 역으로 비례한다.(절연유와 고체로 이루어진 절연구조의 경우, 절연유에 인가되는 전압응력은 고체부분에 인가되는 전압응력에 비해 두배 정도가 된다.)

불평등전계하에 있어서는 높은 유전상수를 갖는 고체가 저전계 가까이 위치할 경우보다 고전계에

가까이 위치하여 있는 경우 많은 전계강도를 감소시켜 더 많은 전계응력을 부담한다.

불평등전계하에서 절연유의 절연강도(kV/cm)는 이격거리(cm)와 전계요소(n)를 곱한 복합함수로 나타난다. 이 전계요소는 전계가 평등전계에 가까워지면 단위수에 가까워지는 단위가 없는 양이다. 따라서 날카로운 모서리를 가진 전극을 짧게 이격시킨 경우와 평등전계용 전극을 매우 길게 이격시킨 경우는 비슷한 절연강도를 나타낸다.

사고분석에 있어서 변압기가 2.3.3.1.1절에서 설명한 전압들을 견딜 수 있으려면 절연요소의 품질은 매우 좋아야 하며 적절한 상태로 유지되어 있어야 한다는 것을 확인하여야 한다. 적합한 재료들이 사용되어야 하며, 일반적이지 않은 새로운 재료들이 사용되었다면 그 효용가치를 입증할 수 있는 적절한 시험자료가 확보되어 있어야 한다. 활선 금속부의 형태는 사용되는 절연체의 절연강도에 적합하도록 가공되어 있어야 하며, 특히 고전계가 인가되는 나도체는 둥글게 가공되어야 한다. 나도체에 깊은 긁힘 자국이나 부주의로 인하여 날카로운 모서리가 존재한다면 부분방전 및 절연파괴의 시작점이 된다. 고체부분은 장시간 파괴를 유발할 수 있는 전계의 집중점이 없도록 적절하게 분포되어 있어야 한다.

사고분석에 있어서 재료 배치상태, 재료선택 및 재료 형태 등에 대한 상세사항은 다음과 같은 사항에 중점을 두고 평가 되어야 한다.

- (1) 절연상수가 전계응력에 대해 충분히 적용되어야 한다.
- (2) 절연재료는 용도에 적합하여야 한다.
- (3) 전극 형상은 평활하여야 하고 높은 전계 집중을 감소시키기 위하여 둥글게 처리하여야 한다. 긁힘부분이나 날카로운 모서리는 부분방전



및 연속적인 절연파괴의 시작점이 된다.

### 2.3.3.1.4 절연열화의 원인

#### 2.3.3.1.3 절연파괴 기구

절연체는 순간적으로 파괴되지 않는다. 전압이 어떤 경계치에 도달하면 파괴과정이 시작 된다. 절연 액체에 있어서 두가지 기본적인 파괴기구는 streamer생성과 절연파괴이다. streamer가 생성되면 도체 또는 전극으로부터 액체절연 내로 전하를 이동시키게 되고 따라서 전계가 변화한다. streamer는 전극의 연장부분처럼 동작한다. streamer가 연속되지 못한다면 다른 streamer쪽으로 소멸될 수도 있다. streamer가 반대 극성으로 충전된 전극에 충분히 가까워지면 절연파괴가 일어난다.

고체절연재료에 있어서 두가지 기본적인 파괴기구는 부분방전(corona)과 전자사태 파괴이다. 파괴현상은 절연재료를 관통하거나 절연재료의 표면 위에 흔적(track, creep)을 남긴다. 부분방전현상이 충분한 에너지 또는 충분한 온도를 갖게되면 절연재료의 화학적 분해가 발생한다. 결과적으로 국부적인 탄화현상이 발생하며 진행성의 절연열화로 이어진다.

도전성 입자 또는 함유물 같은 절연계의 불순물은 전계를 집중시킴으로서 부분방전을 발생시키고 遲延性 파괴를 일으킨다. 이러한 문제점에 대처하기 위해서 절연재료를 여러 겹으로 사용하기도 한다. 보통 불순물의 수는 매우 적으며 통계적인 크기도 파괴의 원인이 되기는 어려운 정도로 충분히 적은 경우가 많다. 주의해야 할 점은 사고시 발생한 불순물과 이전부터 존재하는 불순물을 잘 구분해야 한다는 점이다. 원칙적으로 절연계에 사용된 절연재료는 모든 통상적인 전압과 예상 가능한 과도전압을 견디기에 적합한 절연강도를 가져야 한다.

절연재료는 습기, 도전성 입자 또는 화학적 용제에 의한 오염, 열적 열화, 부분방전(corona) 및 진동에 의한 기계적인 손상 또는 약화현상 등에 의해 열화된다. 실제로 절연사고는 기계적, 열적 또는 화학적 원인의 결과이거나 이러한 요인들의 복합적인 결과로서 나타나는 경우가 많다.

절연계의 결함은 부적절한 조립기술 또는 재료 고유의 결함 때문에 나타난다. 이러한 결함들은 도체의 돌기, 황동 연결부위의 거칠은 모서리 또는 도체절연을 무심결에 손상시키는 경우까지 포함되며, 운송시나 정상적인 운전시에 발생하는 권선진동에 의해 심화된다. 오래된 변압기일 경우 도체절연에 손상을 줄 수 있는 날카로운 모서리를 가진 radial spacer를 사용하여 조립된 경우가 간혹 있다.

### 2.3.3.2 내철형변압기의 권선 고장형태

2.3.3.2.1 내철형변압기의 전기적 고장은 권선 요소들간의 다음과 같은 절연파괴형태 가운데 하나 이상을 포함한다.

- (1) 연선간(strand-strand)
- (2) 도체간(conductor-conductor)
- (3) turn간
- (4) 권선과 대지간(winding-to-ground)
- (5) sectional권선에서 section간
- (6) 층간(layer-layer)
- (7) disc간
- (8) tap section 간
- (9) 권선간(winding-winding)
- (10) (경우에 따른) 상기 요소들의 복합형태

2.3.3.2.2 어떤 절연파괴를 발생시키는 구동전압은 수V로부터 수십kV의 넓은 범위에 분포되어 있다. 15kV이상의 변압기에 대하여 분석한 여러 가지 내철형 권선형태의 상대적인 안정상태 구동전압의 크기를 <표 10>에 정리하였다. 초기 과도 구동전압은 권선에 분포되어 있는 정전용량 값에 따라 여러 권선요소에 걸쳐 분배된다. 대지간에 존재하는 큰 정전용량과 turn간에 존재하는 작은 정전용량 값은 권선 line end에 가까운 turn 사이에 큰 전압응력이 인가되는 원인이 된다. line end에 정전차폐판을 가지고 있는 권선은 큰 정전용량을 가지며 시작부분 몇 개의 turn간에 낮은 전압응력을 발생시킨다. 같은 형태를 얻기 위해 부분적인 층간 권선법(partially inter-leaved winding), 전체적인 층간권선법(fully interleaved winding), 연선환(strand ring)법 및 내부 차폐 disc권선법 등을 사용하는 경우도 있다.

### 2.3.3.3 외철형 변압기의 권선 고장형태

2.3.3.3.1 외철형 변압기의 전기적 고장은 권선요소들간의 다음과 같은 절연파괴형태 가운데 하나 이상을 포함한다.

- (1) 연선간(strand-strand)
- (2) 도체간(conductor-conductor)
- (3) turn간
- (4) Pancake간
- (5) tap section간
- (6) 권선군(winding group)간
- (7) 권선-대지간
- (8) (경우에 따라) 상기 요소들의 복합 현상

<표 10> 내철형 변압기의 상대적 전압응력

권선구조형태	응력인가 권선요소	상대적 전압[V]
1) 단층권선 (원형, barrel)		
① 단도체	도체(or turn)	수십~수백
② 2이상 연선도체	연선간	수V이하
③ 2이상 연선도체	turn간	수십~수백
2) 다층권선 (Multilayer)		
① 단도체	층간	수백~수k
3) 나선형권선 (spiral, helical)		
① 연합연선	연선간	수십V이하
② 연합연선	turn간	수십~수백
4) 연속disc권선		
① 단도체	도체(or turn)	수십~수백
② 단도체	상·하 교차부	수십~수백
③ 단도체	disc분단간	수백~수k
5) 층간 disc권선 (Interleaved)		
① 단도체	도체(or turn)	수백~수k
② 단도체	상·하 교차부	수k(5①의 약 2배)
③ 단도체	disc분단간	수k(5①의 약 3배)

2.3.3.3.2 여러 가지 외철형 권선요소의 상대적인 안정상태 구동전압크기를 <표 11>에 보였다. pancake권선의 interleaving은 좀더 일정한 초기 전압응력의 분포를 얻기 위하여 대지간 정전용량에 비해 상대적으로 높은 직렬 정전용량을 갖는다.

〈표 11〉에서의 각 도체는 다수의 개별 연선으로 구성된 것으로 간주하였다. 도체는 하나의 사각형 pancake 권선형태로 감긴다.

2.3.3.3 권선고장을 조사하기 위해서는 제작자가 제공할 수 있는 권선 전개도면이 필요하다. 이 도면에서는 여러 가지 직렬, 공통권선 및 3차 권선군(또는 고압 및 저압권선군)내에서 pancake 권선의 위치를 볼 수 있다. 여러 가지 권선군 내의 turn수도 제작자로부터 구해야 한다.

〈표 11〉 외철형 변압기의 상대적 전압응력

응력이 인가되는 권선요소	상대적 전압[V]
연선간	수V이하
도체간(turn간)	수백V
연결점에서의 pancake권선간	거의 0V
end점 모서리에서의 pancake권선간	수kV

이러한 도식적인 정보와 수치자료를 가지고 권선군의 end와 리드선 또는 교차연결선의 end사이에 나타나는 공칭 안정상태 전압을 결정할 수 있다.

### 2.3.4 기타 전기적인 고장의 분석

변압기 사고의 기타 원인들로서 철심의 다중접지, 철심 고정bolt의 단락, 권선 접속부의 고점속 저항점 발생 및 탭 절환기, 붓싱, 리드구조 및 내부 피뢰기 등과 같은 부속품의 고장 등이 발생하는 경우가 있다. 또한 사고는 보조변압기, 펌프 및 냉각 팬 등 외부 부속기기에 의해서도 발생 할 수 있다. 비록 권선사고까지 발전하지는 않는다 하여도 이러한 원인들 가운데 어떤 한가지만으로도 변압기 운전정지의 원인이 될 수 있다.

