

電氣設備의 絕緣劣化 診斷技法에 關한 研究

The Diagnostic Techniques for a Insulating
Deterioration of Electrical Equipment

(1)

田 永 國

韓國電氣研究所 電力機器研究委員

1. 序 言

産業의 原動力에서 電氣가 차지하는 比重은 막중하며 또한 産業의 發展에 따라 더욱 심화되고 있다.

最近의 電氣設備은 大容量化, 高性能化, 輕量化함은 물론 運轉條件 또한 多變化 추세에 있어 電氣設備의 一部 또는 전체 事故가 産業에 미치는 파급효과도 날로 증대되고 있는 실정이다. 따라서 안정된 전력수급을 위해서는 먼저 국내에서 발생한 事故를 調查, 分析하여 設備別 故障상태 및 원인을 파악하고 各設備의 취약점에 관한 보다 철저한 관리 및 점검을 실시함으로써 운전중인 電力設備의 신뢰성이 보장되도록 해야 하겠다.

電力設備의 製造技術이 發達함에 따라 事故 또한 종래의 製作不良에서 設備의 노후 (絕緣劣化) 및 유지관리 미비로 바뀌어 가고 있으며 이러한 劣化要因은 現在까지 실시되고 있는 點檢만으로는 감지할 수 없게 되었다. 따라서 사고로 인한 피해를 최소화하고 設備의 운전 신뢰성을 높이기 위해서는 정기 點檢을 보다 철

저히 수행함은 물론 故障診斷 項目을 추가하여 운전중인 設備의 상태를 더욱 정확하게 파악하며 點檢때마다 얻은 Data를 누적, 분석하여 향후의 事故를 추정 가능하게 하여야 하겠다.

본 조사연구에서는 國內의 電力設備의 事故를 분석하고 受電設備중 重要機器에 대한 지금까지 研究開發된 故障診斷技法을 소개하며 各機器別 점검종류, 점검방법, 점검기준 및 점검주기를 유지 보수 지침으로 제시하고자 한다.

2. 事故分析

가. 波及事故 發生實績

自家用 設備의 事故統計를 보면 1986년 總自家用 需用家は 20,394戶이나 事故의 기록유지가 없고 統計의 신빙성이 없으므로 本調査에서는 '需用家の 事故가 韓國電力公社에 波及된 事故統計를 調查分析하였으며 그 내용은 표 1과 같다.

事故 發生率은 1981년 5.1%에서 1986년 1.2%로 많은 감소를 보이고 있다.

〈표 1〉 波及事故 發生實績

구 분 \ 연도별	81	82	83	84	85	86
수 용 가 수(호)	12,769	14,222	15,629	16,993	18,958	20,394
전 체 사 고(건)	4,575	4,377	3,669	3,215	2,819	2,326
파 급 사 고(건) (순간사고포함)	655	607	520	374	299	247
점 유 율(%)	14.3	13.9	14.1	11.6	10.6	10.6
파급사고발생률(%)	5.1	4.3	3.3	2.2	1.6	1.2

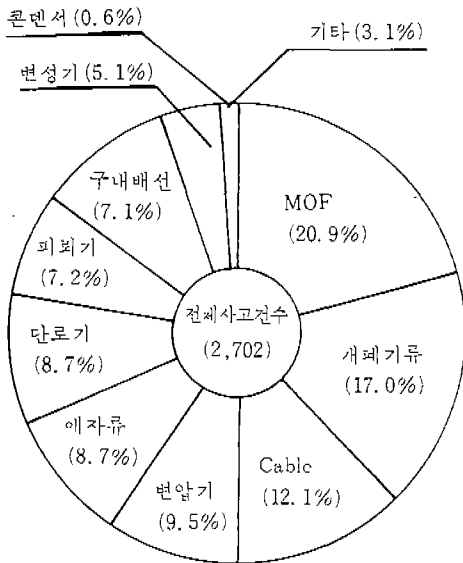
1) 設備別 事故分析

1981년부터 1986년까지 6년간의 총파급사고 2,702건을 設備別로 分析하여 보면 표 2와 같으며 MOF 20.9%, 변압기 9.5%, 변성기 5.1%로 油絶緣 捲線形 機器가 35.5%를 차지하고 있으며 다음으로는 단로기등의 개폐기류가 25.7%를 차지하고 있다.

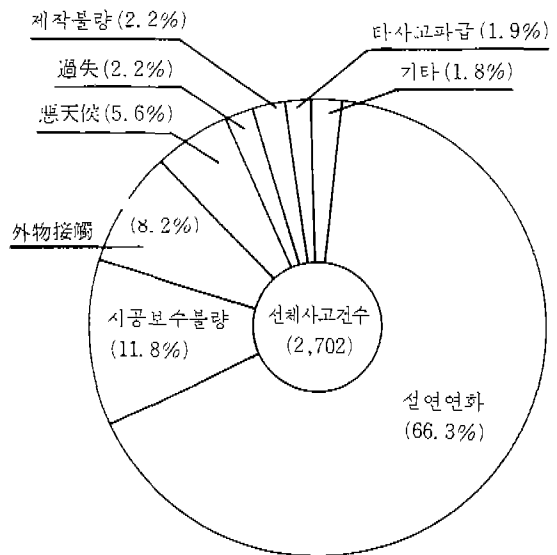
2) 原因別 事故分析

原因別 事故分析을 보면 표 3과 같으며 絶緣劣化가 全事故의 66.3%를 차지하고 시공 보수불량이 11.8%로 유지 보수를 철저히 하고 劣化診斷技法이 開發되어 實用化된다면 全事故의 78.1%를 감소시킬 수 있어 事故의 감소는 물론 정전에 의한 파급을 줄일 수 있겠다.

〈표 2〉 設備別 事故分析



〈표 3〉 原因別 事故分析



故의 78.1%를 감소시킬 수 있어 事故의 감소는 물론 정전에 의한 파급을 줄일 수 있겠다.

나. 密集地域 自家用設備 調査結果

1985년 動資部, 韓國電力公社가 總括하여 實施한 工團地域 및 重要需用 密集地域의 自家用 電氣工作物 運用實態 調査結果를 分析하여 보면 표 4와 같으며 表에서 보면 老朽 및 性能不良이 64.1%로 나타나고 있다.

1) 調査 對象

全國 26개 工團 및 重要需用家 15,480戶중

〈표 4〉 點檢 分析 結果

2) 點檢 事項

- 受電, 配電, 負荷設備 點檢
- 施設物 施工 實態
- 其他 법령, 규정 관련사항

다. 電氣工作物 定期調査 結果

1985년 韓國電氣安全公社에서 電氣事業法 제45조 및 46조에 의거 實施한 一般需用家 電氣工作物 定期調査 結果를 보면 총 3,479,100 호중 354,472호의 부적격 판정으로 10.2%에 달하였으며 不良原因을 分析하여 보면 표 5와 같다.

구분 설비명	지역 전수	노후, 성능불량		부적정운전	
		건수	%	건수	%
인입전선 계이불	33	18	54.5	15	45.5
인입개폐기	71	46	64.8	25	35.2
차 단 기	41	23	56.1	18	43.9
전력퓨즈	92	79	85.9	13	14.1
변 압 기	148	91	61.5	57	38.5
피뢰기	94	50	53.2	44	46.8
계	479	307	64.1	172	35.9

〈표 5〉 不良原因 分析

구 분	절연불량	인 입 구 배 선	개 폐 기 차 단 기	육내배선	비닐코드 배 선	기계기구 구 절 연	접지상태	합
호 수	136,340	248	76,444	35,316	73,805	427	31,892	354,472
점 유 율 (%)	38.5	0.07	21.6	10.0	20.8	0.1	9.0	100

3. 設備別 故障診斷 技法

電力機器는 長期間에 걸쳐서 갖가지의 環境條件下에서 사용되므로 電壓 이외의 여러가지 要因에 의하여 絶緣劣化가 발생된다. 이러한 劣化에 의하여 電力機器의 絶緣耐力이 점점 저하되어 最惡의 경우 運轉中에 絶緣破壞를 일으켜 事故를 發生하게 된다. 그러므로 絶緣劣化의 進行狀態를 어떠한 方法으로 精確하게 檢知할 수 있다면 運轉中의 絶緣破壞事故를 未然에 防止하는 것이 가능하게 된다. 그렇지만 現在 電力機器絶緣의 殘存壽命을 精確하게 알 수 있는 方法이 없으므로 機器의 使用條件, 環境條件 및 各種의 絶緣特性試驗結果를 總合적으로 판단하여 絶緣劣化의 進行狀態를 推定하고 그에 따라 적절한 대책을 세워야만 하겠다.

본 調査研究에서는 自家用 需用家에서 使用

하는 重要 電力機器에 대하여 先進外國에서 研究開發된 絶緣劣化 要因, 特性 및 診斷技法을 機器別로 소개하려 한다.

가. 變 壓 器

1) 絶緣劣化 要因

油入變壓器의 絶緣物은 기본적으로 絶緣紙, Pressboard 및 絶緣油로 구성된 복합 유전체이다. 이러한 絶緣物은 運轉中 電氣的, 機械的 Stress를 항상 받고 있고 여기에 熱的 Stress가 가해지면 熱劣化로 인하여 機械的強度가 저하하며 異常 온도상승으로 高温이 된 경우에는 기포가 發生하게 된다.

이러한 變壓器絶緣物의 劣化要因은

- 熱的 劣化要因
- 電氣的 劣化要因

• 機械的 劣化要因

• 外的 劣化要因으로 分類할 수 있다.

이들 劣化要因은 모두 단독으로 發生하는 경우는 적고 두가지 이상이 서로 중첩되어 絶緣物을 劣化시킨다. 一般的으로 變壓器 絶緣에 가장 큰 영향을 미치는 要因은 熱的劣化要因이며 酸化劣化는 熱的要因이 가해지지 않으면 油浸絶緣에서는 거의 發生하지 않는다. 또한 이 외에도 絶緣紙, 絶緣物 속의 불순물 같은 내적 열화요인도 생각할 수 있고 運轉中 뇌 Surge의 침입등으로 交流電壓과 Impulse 電壓이 중첩되어 發生하는 同種복합요인의 경우도 있다.

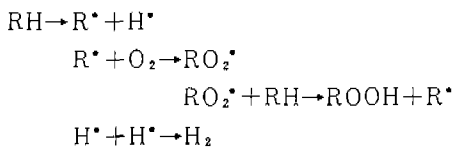
2) 絶緣劣化 特性

가) 電氣的 劣化

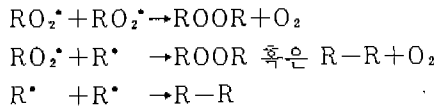
電氣的劣化는 보통 V-t 特性으로 표시하고 뇌, 개폐 Impulse 電壓이 반복인가된 경우에는 V-N 特性으로 나타내며 이러한 劣化는 運轉中の 變壓器에 외뢰, 개폐 Surge가 침입해 交流電壓과 중첩되어 變壓器 絶緣物 손상 및 部分放電 發生을 일으켜 최종적으로는 絶緣破壞를 일으키며 그 특성은 시간(t)이 증가함에 따라 기울기가 平坦化하는 경향이 있다.

나) 酸化劣化(絶緣油)

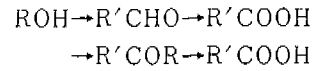
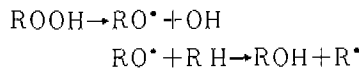
變壓器 絶緣油와 같은 鑛油는 炭化水素의 酸化反應이 그 組成에 따라 劣化과정의 약간 다르지만 보통 다음과 같은 과정으로 劣化한다. 油의 分子를 RH로 표시하면,



로 되고 RO_2^{\bullet} , R^{\bullet} 는 다음과 같이 반응하기도 한다.



과산화물 ROOH는 다음과 같은 반응을 거쳐 알콜, 알데히드, 케톤, 유기산등으로 분해된다.



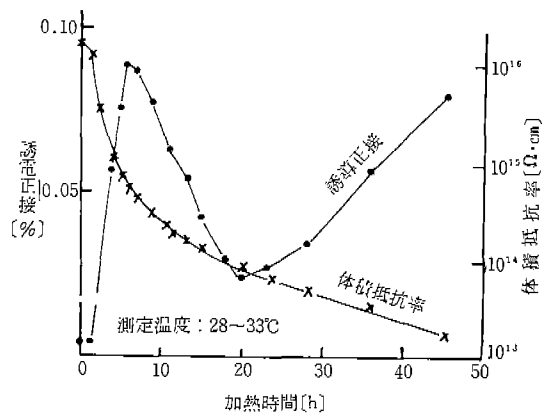
이와같이 絶緣油가 劣化하면 다양한 생성물이 발생하는데 그중에서 Gas 형태로는 $H_2, CH_4, C_2H_6, C_2H_4, C_2H_2, C_3H_8, C_3H_6, i-C_4H_{10}, n-C_4H_{10}$ 등이며 만약 산소나 絶緣紙가 존재하면 CO, CO_2 등도 생성하게 된다. 이와같이 絶緣油가 酸化劣化하면 絶緣油 特性중

- 체적 저항률(ρ)
- 誘電正接($\tan \delta$)
- 界面張力
- 全酸價

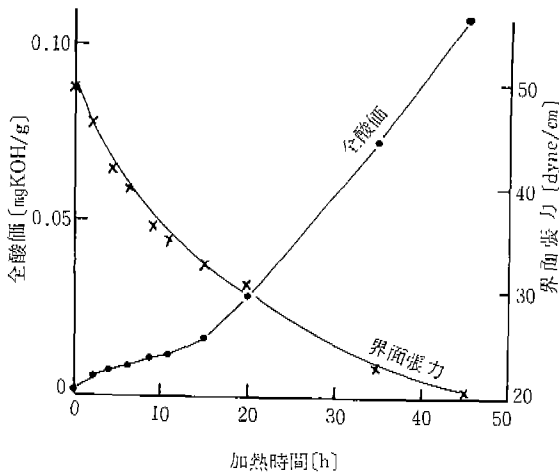
등이 나빠지고 더욱 劣化되면 黑色 泥狀物質(Sludge)이 생성되는데 이러한 Sludge는 아스팔트性, 炭素性등으로 분류되고 絶緣油의 電氣的 特性을 저하시킨다.

絶緣油에 산소를 공급하면서 $95^{\circ}C$ 로 加熱劣化시켰을 경우 加熱時間-tan δ 및 체적저항률과의 관계를 그림 1에서 나타내고 있다. 그림 2에서는 같은 條件에서 加熱時間 - 界面張力 및 全酸價와의 관계를 나타내고 있다.

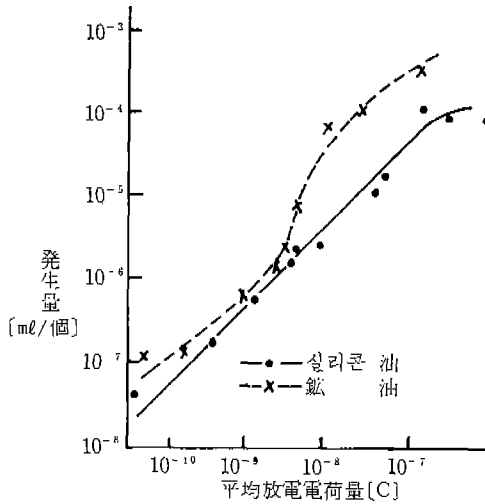
加熱時間이 길어짐에 따라 체적저항률과 界面張力은 저하하지만 tan δ 와 全酸價는 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 1에서 劣化 초기단계에는 tan δ 가 異常上昇하는 현상을 볼 수 있는데 이러한 現象이 일어나는 영역에서는 油中靜電氣現象이 발생하기 쉬워 絶緣油 品



〈그림 1〉 絶緣油 熱劣化特性 (유전질점 체적저항률)



〈그림 2〉 絶緣油 熱劣化特性
(전산가 계면장력)



〈그림 3〉 부분방전에 의한 평균방전 전하량 - Gas 발생량 관계

質管理面에서도 문제가 되고 있다.

鑛油 및 Silicon油의 部分放電 Pulse當 平均放電電荷量 - Gas發生量 관계는 그림 3 과 같다. Silicon油는 放電電荷量이 커짐에 따라 Gas發生量이 직선적으로 비례하며 鑛油에서는 部分放電電荷量이 작은 범위는 Silicon油와 거의 유사하나 어떤 값 이상에서는 Gas發生量이 Sili-

con油에 비하여 많아짐을 알 수 있다.

다) 熱劣化(絶緣紙)

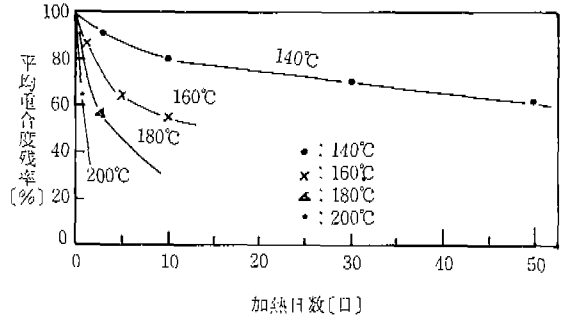
油浸紙의 酸化劣化는 그 材料 特性상 絶緣油에 비해 발생하기 어려워 거의 무시할 수 있으며 주로 熱的要因에 의해 劣化된다. 따라서 油浸狀態에서 熱劣化가 발생하면 다음과 같은 現象이 일어난다.

- 熱分解 Gas 발생 (CO, CO₂, H₂O)
- 高温에서 tan δ 증가
- 機械的 強度저하 (抗張力 및 平均重合度)

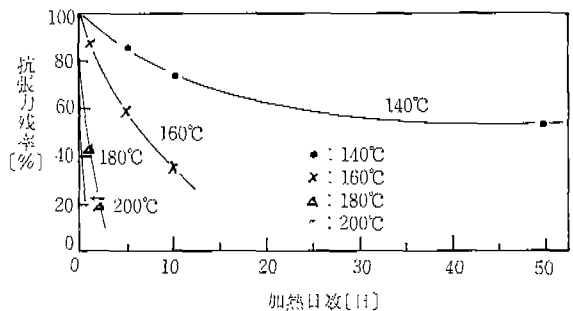
질소 Gas 밀봉형 變壓器를 140~200°C 溫度로 加熱劣化시켜 그 特性을 測定한 것을 그림 4, 5, 6에 表示하였다. 加熱時間이 길어짐에 따라 絶緣紙 抗張力 및 平均重合度는 감소하고 [CO+CO₂]발생량은 증가하는 것을 알 수 있다.

라) 熱, 電氣 複合要因劣化

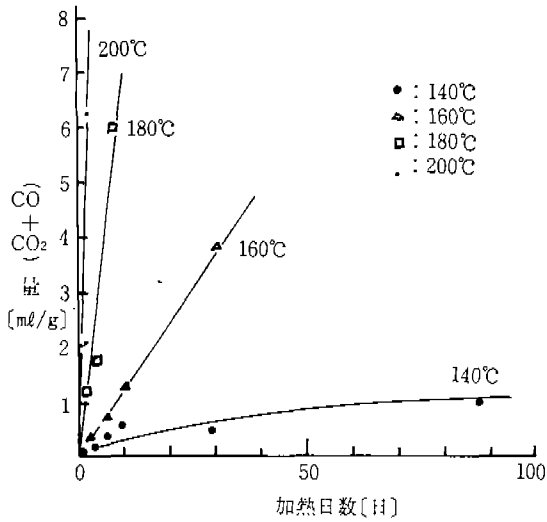
變壓器 捲線의 絶緣強度는 수분함량에 따라 많은 영향을 받으며 특히 高温일 경우에는 絶緣破壞電壓이 현저하게 저하한다. 이것은捲



〈그림 4〉 절연지의 抗張力殘率 - 加熱日數 관계

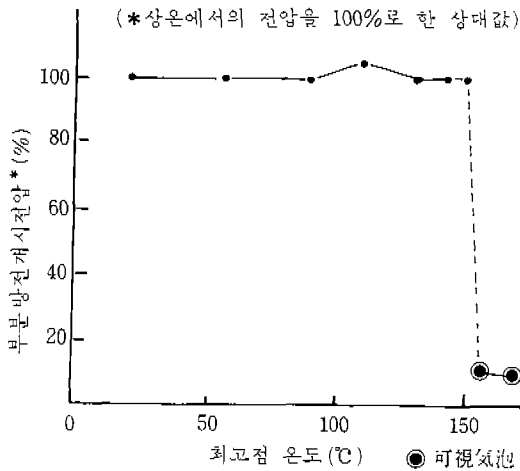


〈그림 5〉 절연지의 平均重合度殘率 - 加熱日數 관계



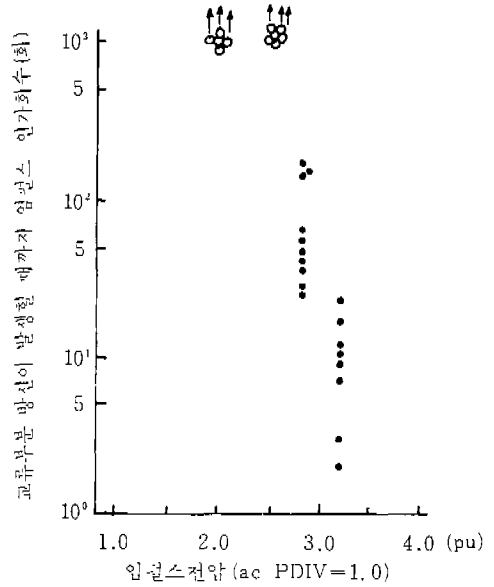
〈그림 6〉 크라프트紙의 (CO+CO₂) 發生量

線 피복 및 絶緣油중에 포함된 수분이 기포로 되기 때문이다. 이때 발생한 기포에 의해 부분 방전 개시전압도 큰 영향을 받는데 이것을 그림 7에 나타내고 있다. 絶緣物이 수분을 많이 포함하는 경우(2.4%)에는 150°C를 초과하면 絶緣物 내부에서 기포가 생겨 部分放電 開始電壓이 급격히 저하하여 초기 값의 약 1/10로

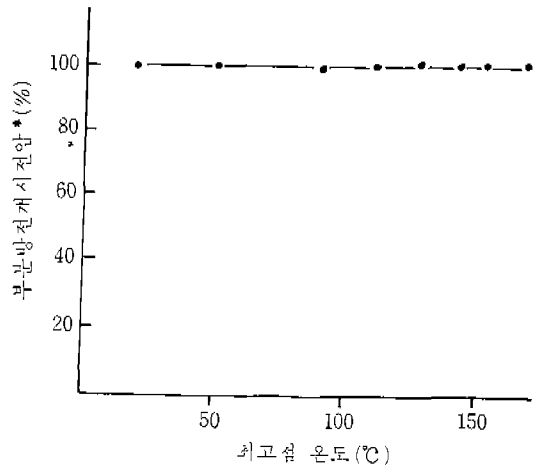


(a) 절연물 수분 2.4%일 경우

되지만 수분함유량이 1.5% 이하의 경우 170°C가 되어도 부분방전 개시전압이 저하되지 않는 것을 알 수 있다.



〈그림 8〉 (교류전압-임펄스전압) 중첩에 의한 부분방전 특성



(b) 절연물 수분 1.5%이하일 경우

〈그림 7〉 部分放電 開始電壓의 溫度特性

마) 電氣 - 電氣 複合要因劣化

運轉中の 變壓器에 Impulse 電壓이 침입하면 捲線에 印加되는 電壓이 交流電壓 + Impulse 電壓으로 重첩되어 絶緣劣化를 가속화시킨다. 油入變壓器의 Turn間 絶緣을 모의한 Model에 交流電壓과 Impulse 電壓을 重첩하여 반복인가한후 部分放電과 破壞特性을 측정하여 그림 8에 표시하였다. 그림에서와 같이 Impulse 部分放電 開始電壓 Level의 Impulse 電壓은 1,000회를 인가하여도 交流部分放電은 發生하지 않지만 Impulse 電壓을 어느 Level 以上の 電壓으로 인가하면 交流部分放電이 發生하는 것을 알 수 있다. 그 원인은 Impulse 電壓의 部分放電에 의해 發生한 기포로 인한 것으로 추정된다.

그러나 變壓器가 실제 운전중에 뇌 Surge가 침입할 경우는 침입주기가 길고 Turn間 電壓이 交流部分放電 開始電壓의 3 ~ 8% 정도로 거의 문제되지 않는다.

3) 内部 故障檢出

變壓器의 内部故障時 事故의 확산을 防止하기 위하여 각종 保護계전기들이 사용되고 있으며 이들 계전기중 중요한 계전기의 檢出方法 및 動作要因을 알아보면 다음과 같다.

가) 機械的 檢出

(1) Buchhertz Relay

Conservator가 부착된 變壓器에 널리 사용되고 있는 계전기로 제 1 단 接點은 輕故障用으로 變壓器 内部絶緣物 유기질 구조재료가 燒損되거나 絶緣油 熱分解에 의한 Gas가 發生하여 Gas室에 일정량 이상이 체류되면 動作한다. 2 단接點은 重故障用으로 變壓器 内部의 絶緣破壞, 단선등에 의한 油中 Arc 및 熱에 의해 絶緣物이나 油分解Gas가 變壓器 Tank 壓力을 갑자기 상승시켜 Conservator로 급격히 흐를 때 동작한다. 이 계전기의 특징은 捲線事故 등의 重故障를 검출하는 것 외에 접촉불량, 철심 적층강판간의 절연불량, 油面 저하 등의 초기의 경미한 국부사고가 조기 검출된다는 점이다.

또한 Gas室에 체류된 Gas量 및 성분

〈표 6〉 發生가스의 色別에 의한 故障推定

發生가스의 色別		推定 故障場所
회	색	油의 分解(油中아크)
황	색	支持木 등 木材의 손상
백	색	絶緣紙의 손상

따라 故障狀況이나 정도를 짐작할 수 있으며 발생 Gas色에 의한 故障推定이 가능하며 Gas의 種類에 따라 故障內容을 추정할 수도 있다. 표 6, 7은 Gas의 色別 및 種類別 故障推定을 나타냈다.

(2) 충격압력계전기(Sudden Pressure Relay)

變壓器 内部事故가 發生하면 分解Gas가 생겨 갑자기 異常壓力 상승을 초래하며 이 壓力上昇을 순간에 檢出하여 동작하는 계전기를 충격압력계전기라 하고 變壓器 内部壓力上昇으로 Conservator로 흐르는 油의 속도가 일정한 값 이상이 되었을 때 동작하는 계전기를 油流계전기라 한다. 이들 계전기들의 동작과 變壓器 故障과의 관계는 Buchhertz 계전기의 2 단동작 때와 같다.

(3) 放壓장치

放壓장치는 變壓器 内部壓力이 일정치 이상 상승했을 경우 内部壓力을 외부로 방출함으로써 變壓器 외함 및 방열기를 보호하기 위한 것으로 동작 및 사고와의 관계는 Buchhertz 계전기 제 2 단 동작의 경우와 같다.

나) 電氣的 檢出

(1) 差動계전기(Differential Relay)

變壓器의 1, 2次 電流의 差에 의해 동작하는 계전기로 變壓器 捲線의 층간단락등에 의해 1, 2次 捲線비가 변화하여 나타나는 電流差를 檢出하며 운전중 差動계전기가 동작하였을 경우는 捲線의 層간단락이 예상된다.

(2) 過電流계전기

機器 또는 回路의 短絡事故 및 過負荷에 대한 保護계전기로써 외부회로에 短絡과 過負荷가 없을 경우 變壓器内部 短絡으로 예상된다.

(3) 地絡과전류계전기

〈표 7〉 Buchhertz 계전기의 동작과 사고의 추정

구 분	사 고 의 추 정	동작이유	동 작 종 류
가스없음	다량의 금속이 260~400℃로 가열되었을 경우, 즉 短絡事故로 절연물의 손상이 없는 경우	260~400℃에서의 油의 氣化	제 2 단동작
空氣 또는 不活性化 가스 뿐인 경우	변압기 외함, 배관, Buchhertz 계전기 용기 등의 파손, 送油 펌프의 고장	기계적고장으로 인한 누설 故障大	제 1 단 동작으로 가스를 제거해도 즉시 반복 동작한다. (A)
		上 同 故障中	가스를 제거해도 數分~數時間内に 다시 반복 동작한다. (B)
		上 同 故障小	제 1 단 동작으로 가스를 제거한 경우 정상을 장시간 유지한다. (C)
	上記의 미약한 경우 및 不完全한 油의 充填, Buchhertz 계전기 용기의 유리 파손	上 同 故障僅小	제 1 단동작 또는 Buchhertz 계전기에 다소 가스가 있다.
水素 뿐이고 일산화탄소가 없는 경우	국부적인 고전류에 의한 端子間 및 단자와 접지間的 내부단락, 즉 固体 절연물을 포함하지 않는다.	기름만의 熱分解 400℃ 以上	제 1 단 동작 제 2 단 동작
	上記에서 低電流인 경우, 즉 초기의 接觸不良, 鐵心貫通孔部分의 소손, 리액터의 空隙의 가열, 철심의 접촉불량 등		제 1 단 동작 (A) 또는 (B)
	上記와 같이 경미한 경우 및 高電界에 의한 油의 氣化		제 1 단 동작(C)
水素 및 一酸化炭素	국부적인 과전류에 의하여 고체절연물을 포함한 절연도체와 접지間 短絡, 권선間 短絡	油 및 固体 절연물의 熱分解	제 1 단 동작 (A) 또는 (B)
	上記에서 低電流의 경우, 즉 絶緣導體와 접지間的 低電流, 아크에 의한 절연사고, 권선간의 高抵抗 短絡 및 鐵心の 소손, 접속부의 고장 등의 사고의 초기		
	上記의 극히 경미한 경우 및 絶緣物의 酸化		제 1 단 동작(C)

變壓器 外部의 地絡이나 捲線과 鐵心과의 絶緣破壞로 인해 흐르는 地絡電流에 의해 동작한다.

다) 其 他

以上 설명한 보호계전기에 의한 檢出方法 의

에도 다음과 같은 方法이 있다.

- 油中 溶存 Gas 分析
- 溫度計의 異常指示
- 内部 異常音

〈다음호에 계속〉