

変圧器保守에 關한 諸問題

金 在 信

緒 言

電氣機器의 完全한 保守야 말로 重大한 意義를 가지고 있다. 外國에서 原因別 事故比率를 볼 때 過去에는 製作及 保守不完全이 10% 自然劣化가 25% 以上을 占하고 있었으나 現在에는 絶緣材料의 進歩 機器의 完全한 保護設備와 測定으로 事故를 未然에 防止함으로 이 事故比率는 漸次減少되어 거이 없는 現狀에 있다. 그러나 우리나라에 있어서는 施設의 老朽로 自然劣化는 漸加되는 反面 保護設備와 保守不完全으로 今後에 있어 重大한 事故가 연 다라 發生되나 않을가 하는 憂慮가 없지 않아 이 問題를 論하는 바이다. 電氣機器中에서도 가장 重大한 役割을 하고 있는 變電所의 主變壓器를 爲始 하여 柱上의 小變壓器에 이르는 變壓器의 完全한 保守야 말로 我國 實情에 비추어 至極히 重大한 바라 生覺되는 바이다. 運營保守에 있어 重要한 것은 第一로 損失이 적은 가장 經濟的인 運營을 하여야 될 것이요 第二로 完全保守로 事故를 未然에 防止하며 機器의 壽命을 長게 하여야 할 것이요, 第三으로 完全한 保護設備로 人力의 未及되는 바를 施設로서 保護하는데 있다고 본다.

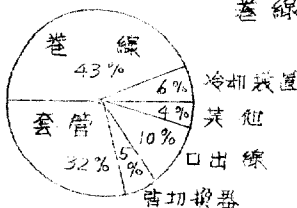
1. 統計上으로 본 變壓器 事故

우리나라에서는 正確한 統計를 求得기 難하고 我國의 施設이 거이 日本 製입에 鑑하여 1946 ~ 1948 間 三年간에 있어서는 日本의 統計를 본다면 1회와 如히 卷線의 事故가 43% 套管이 32% 其他箇所

는 非常이 زیاد. 則 變壓器의 事故를 減少시킬려면

卷線套管의 強化가 問題된다. 먼저 卷線에 있어 一次(H.T) 側이 60%, 二次(L.T) 側이 40% 으로 되어 있고 事故原因別로 볼 때 異常電壓으로 基因되는 炸雷가 18.2%, 送

第 1 圖



電線地絡事故. 開閉사-지等 所謂內雷로因한것이 17.7%. 外部 短絡으로因한것이 12.4%, 及保守不良 絶緣劣化에 基因되 는事故는 半數를넘는 51.7%로 保守의 重大性을 如實히表示하고있다. 事故狀況은 異常電壓과 保守不良, 絶緣劣化에 는 一次側事故가 많고 外部短絡에는 二次側이 많다. 大部分의事故가 層短絡이라하니 層間絶緣의強化가 製作面에있어 要請되는바이다.

第二로 套管에있어 事故狀況面으로는 表面內絡 다음은 内部破壞로 되어있으며 異常電壓에 起因되는것은 比較的적이고 吸濕과 自然劣化로되는것이 半數以上으로볼때 適當한 劣化豫知를 할수있다면 相当數의 事故를 未然에防止할수 있을것이다.

2. 變壓器에 保護裝置

變壓器事故를 防止하기爲하야 現代各國에서 實施하고있는 保護裝置는 第一表와 如하다.

第一表

事 故	特 性	保 護 裝 置
1. 外部短絡	過電流	過電流限時繼電器
2. 層短絡 3. 코아不良	瓦斯의 化成	Buchholz 繼電器
4. 地絡	差過電流	比率差繼電器
5. 套管內絡	過電流 差電流 中性點의 移動	過電流限時繼電器 地絡繼電器
6. 過負荷	銅油過熱	溫度計

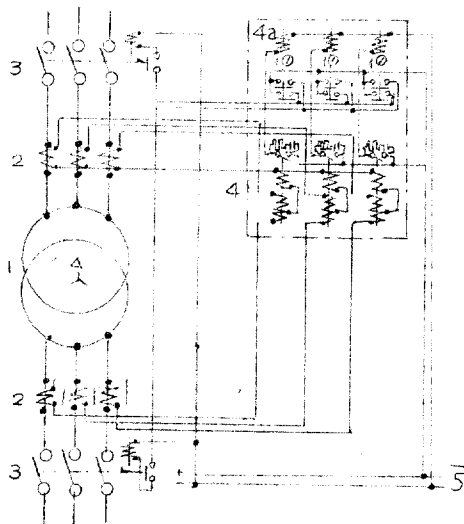
A. 過負荷保護裝置

變壓器의 溫度는 第一 重要한바로 過熱은事故에 主要原因이 되는바요.* 變壓器의 壽命에도 重大한關係를 갖고있다.

銅의 溫度를 正確히 測定 할수있는 方法으로는 抵抗溫度計 (第二
 圖) 를 使用함으로써 卷線의 溫度를 알수있고, 熱電對溫度計
 로 탱크內의 油溫을 測定할수있고 最低最高溫度에 達하였
 을때 警報表置을 가지고있다. 溫度와各種關係에 關하여는 下
 記各節에서 論하기로 한다.

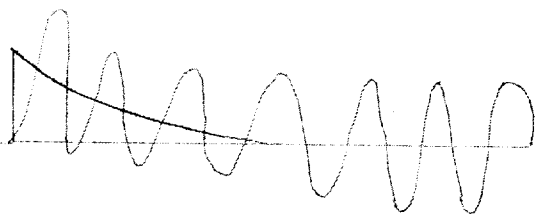
B. 事故의 保護裝置

變壓器 事故의 保護裝置로 歐美에서 使用되고있는것으로 Buchholz
 relay (一名 Trafoscope) 를 들수있으며 어떤곳에서는 比率差繼
 電器代身 使用하고있는 곳도있으나 Buchholz 繼電器는 變
 壓器內部의 油表面以下에서 일어나는 事故를防止 하는바요
 比率差繼電器는 一次、二次側 變壓器間에서 일어나는 一切의
 事故를 保護하는裝置로 그 使命이多少 다르다 Buchholz 繼電
 器 (第三圖) 은 油中에서 일어나는 一切의事故를 初期에 있
 어 工作成으로 이러한 現象을利用하여 早速히 內部事故를
 防止 할수있으나 變壓器의 事故는 變流器相互間에서 套管內路等으로
 의 事故는 比率差繼電器가 아니면안된다.



- 1. 變 壓 器
- 2. 變 流 器
- 3. 開 閉 器
- 4. 比 率 差 繼 電 器
- 4a. 小 接 觸 器
- 5. 補 助 電 源

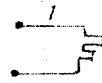
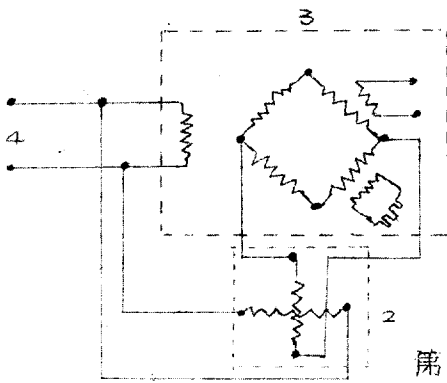
第 四 圖



比率差繼電器로 變壓器의 差電流保護裝置及 差電流比率差繼電器를 變壓器에使用한一例로서 第三圖와 같은것이었다.



第三圖. Buchholz relay



- 1. 差入測定桿
- 2. 指示計器
- 3. Bridge
- 4. 電源

第二圖. Wheatstone Bridge로 銅溫測定器

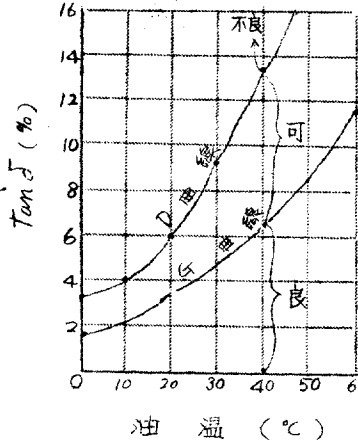
變壓器가 使用不可能하게되는 原因을大別하면 1. 過負荷及短絡, 2. 油의劣化及不足, 電氣放電, 絶緣破壞等이라 볼수있는데 1에 처한것은 Overload relay가 担當할것이고 2.는 이를適當한時期에 이를防止할 手段을쓰지않으면 發火에까지 이르는 重大한 事故를이르킨다. 이는 Buchholz relay를 使用하여 事故原因에따라 警鐘等を 發하게한다. 則變壓器와 oil container 內에 이를設置하여 第三圖 A는 氣泡가發生하여 浮標로 그量을表示하게 되어있고 B는 Oil surge 가 일어났을때 下部浮標로써 relay가 動作하게 되어있다. 變壓器內部事故를 未然에防止하는 方法으로서는 大端히 좋은方法이다.

C. 變壓器의 溫度對tand 特性.

變壓器의 絶緣劣化 判定法으로서는 後述하는 tand를 알고있으

로서 判定하는 方法이 第一 確實하다. 誘電體의 $\tan \delta$ 는 溫度에 따라 變化되며 溫度上昇에 따라 增加되는 特性을 갖고 있다. 且 Gross 氏 明示하였다. 그러나 變壓器의 絶緣이 劣化하게 되면 溫度上昇에 대한 $\tan \delta$ 의 增加가 特別히 많아진다.

則 第 四 圖에 表示되는 $\tan \delta$ 曲線으로서 變壓器의 劣化 狀態를 알 수 있다.



1. G 曲線에서 下部는 絶緣良好
2. D 曲線과 G 曲線中間은 絶緣劣化를 表示하는 것으로 要注意
3. 曲線 D에서 上位는 絶緣不良으로 早速한 対策이 必要

이와 같이 變壓器 保存에 있어 油溫을 常時 알아야 하며 事故防止에는 溫度가 重大한 要素로 되어 있다. $\tan \delta$ 와 溫度關係는 後述한다.

3. 變壓器의 溫度와 壽命

美國의 Montsinger 氏와 Nichols 氏의 文獻에 依하면 絶緣物의 壽命은 溫度上昇으로 決定된다고 하였다. 卽 變壓器의 過熱은 그 壽命을 몹시 短縮시키는 結果로 된다.

變壓器의 損失은 變壓器 溫度에 左右된다 卽 損失은 鐵損과 銅損인데 米 只今油의 溫度上昇 (Δt_{oe})에 있어 銅損만이 銅의 溫度 (Δt_{cu})에 依하여 決定될 때 全負荷時에 油溫이 50°C 銅溫이 60°C 上昇되는 標準을 들을 때 鐵損을 V_{fe} , 銅損을 V_{cu} 라 하면 溫度上昇은 定格負荷의 $\times\%$ 負荷時

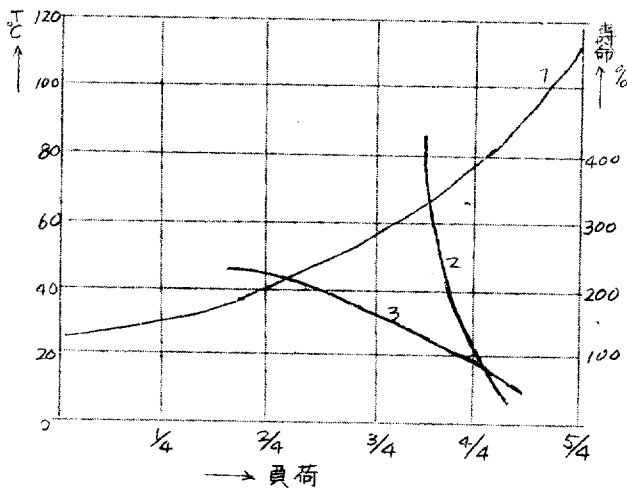
$$\text{油에서는 } \frac{V_{fe} + \left(\frac{\times}{100}\right)^2 V_{cu}}{V_{fe} + V_{cu}} \cdot 50$$

$$\text{銅에서는 } \frac{V_{fe} + \left(\frac{\times}{100}\right)^2 V_{cu}}{V_{fe} + V_{cu}} \cdot 50 + \left(\frac{\times}{100}\right)^2 (60 - 50)$$

* 鐵損은 一定한電壓과 周波數에서는 一定하지만 銅損은負荷電流自乘에 比例한다 *

上記溫度上昇은 勿論 外氣溫度 20°C 라면 20°C 以上の 上昇을 表示하는바다.

只今 一定한 全負荷로 運轉되는 壽命을 100% 이라하면 第6圖에있어 曲線 2 (Nichols) 라 曲線 3 (Montsinger) 는 負荷에 따라 그壽命을 表示하는바다 曲線 1은 全負荷에



對한 溫度曲線이다. 이 曲線에서 볼때 半負荷時는 全負荷時의 二倍에 壽命을 가질수있다 같은 場合 볼때 變壓器의 溫度上昇은 事故防止面을 떠나서라도 壽命延長에 重大한關係가 있는바를 알 수있다.

第 6 圖、負荷、溫度壽命曲線

4. 溫度上昇과 負荷.

變壓器의 溫度上昇은 鐵損 (V_{fe}) 과 銅損 (V_{cu}) 으로 發生되는 熱로 上昇되는바나 變壓器를 最高能率下에 運轉할러면 負荷를 어떤程度 減어 야되는가 하는 問題 卽 經濟的運轉條件을 生覺해볼때 定格出力에 $100\sqrt{\frac{1}{a}}$ % 負荷時가 最經濟的이다.

a 는 $\frac{V_{cu}}{V_{fe}}$ 이다.

여기서 우리는 鐵損과 銅損이 同一할때 最高能率을 表示한다고 보는데 定格負荷에 40 乃至 50% 사이에 負荷가 最能率的運轉이라 볼수있으므로 피-크負荷時에 過負荷가 되지 않도록 負荷를 分担

할수있는 變壓器를 두는것은 大端히 좋은方法이나 施設費의 經濟的立場으로볼때 實踐性 眞否는 論치않기로한다. 그러나 第6 圖의 2, 3 曲線을볼때 過負荷에因한 壽命短縮은 큰關心 事이라 볼수있다. 只今 1 例로

外氣溫度 $t_u = 20^{\circ}C$

油 溫 $t_{oc} = 70^{\circ}C$

銅 溫 $t_{cu} = 80^{\circ}C$

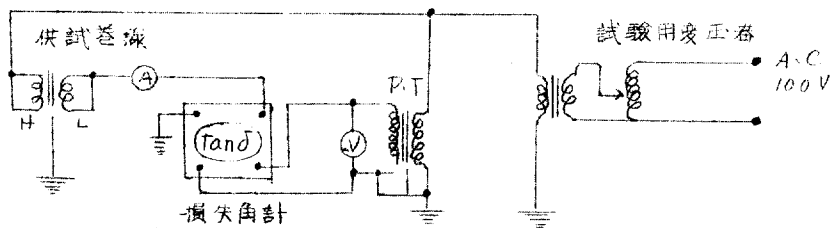
第6 圖 1 曲線에서 $\frac{1}{2}$ 負荷時에 溫度上昇이 $40^{\circ}C$. 이때에 油溫은 $37.5^{\circ}C$ 라 推算된다. 銅과油의 溫度差가 $\frac{1}{4}$ 負荷時에 $10^{\circ}C$ $\frac{3}{4}$ 負荷時는 $2.5^{\circ}C$. 過負荷에 銅溫이 $110^{\circ}C$ 를 넘지안는다는 條件下에 $\frac{1}{4}$ 負荷부터 始動한다면 $10^{\circ}C$ 에서 $40^{\circ}C$ 即 다시 말하면 $\sqrt{\frac{40}{10}} = 2$ 即 二倍에 負荷를 걸수있다. 그러나 $\frac{3}{4}$ 負荷에서 出發할 때는 $110 - 37.5 = 72.5^{\circ}C$ $\sqrt{\frac{72.5}{2.5}} = 5.4$ 即 5.4 倍에 負荷를 一時的이나마 걸을수는 있는것이다. 이것은 瞬間的이고 萬一이따한 時間에는 危險한狀態에 이른다. 그러므로 變壓器에는 適當한 保護施設를 하여야된다. 在來式에 最高溫度에 達하였을때 警報를 내게한다든지 熱繼電器를 使用하여 自動的動作을 하도록한다. 우리나라와같이 柱上變壓器의 燒損事故가 많은데는 電流制限器 또는 最高溫^注를 넘을時 自動的으로 開路되는 施設을 하는것이 時急하다고 注意된다.

5. 絶緣損失角試驗

絶緣体の 損失角 ($\tan \delta$) 即 誘電體力率의 測定을하여 絶緣物의 狀態를 알수있는 方法은 現在로는 가장有効한 方法이며 특히變壓器의 絶緣狀態를 判定하는 方法으로는 最良이라 할수있다. 美國에서는 1936 年以來 F. C. Doble 氏가 開發한 試驗裝置로 多數의 變壓器 現地實測을하여 많은效果를 거두고 今日에이르고 있다. 우리는 過去에 製品納入時 試驗으로 破壞할는지도 모

르는 危險한 過電壓印加를하여 絶緣耐力試驗을하고 運轉에 들어서는 間或 1,000 V 程度의 메가-로서 直流絶緣 抵抗을 測定할 程度였으며 使用後의 絶緣狀態에 있어서는 全然盲目的이였다.

供試變壓器가 高壓及低壓의 2箇의 卷線(三相變壓器時는 三端子)일때 이것을 試驗하는데 있어서는 兩端을 短絡하고 이를 蓄電器의 一電極으로 生覺하고 大地를 合하여 三箇의 電極을 가진것으로 한다.



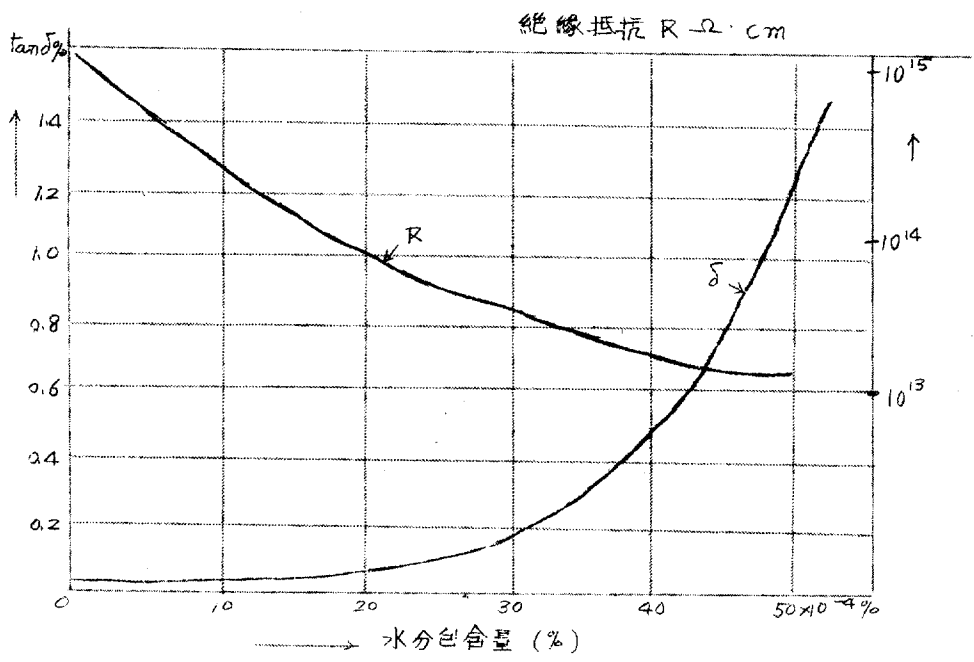
第 7 圖 $\tan \delta$ 測定回路.

第 7 圖 $\tan \delta$ 測定器는 普通우리가 使用하는 攜帶電力計와 같은바로 上部二端子는 電流端子 下方은 電壓端子로 되어있다.

絶緣物의 $\tan \delta$ 가 클수록 不良한것은 알수있으나 그렇다만 使用中의 變壓器의 $\tan \delta$ 가 어느程度 以上이면 使用을 停止하여야 하느냐의 問題는 美國의 例를들면 American Gas & Electric Co. 是는 溫度 20°C 로서 3.5% 以下면 良, 3.5~5.0% 可, 5.0% 以上이 不良으로 되어있고, Philadelphia Electric Co. 是는 40°C 時 5% 以下를 良으로 하고있고, Westinghouse Electric Co. 是는 大電力 變壓器는 25°C 時 2.5% 를 基準으로 하고있다.

第 8 圖를 보면 $\tan \delta$ 와 絶緣物 抵抗 (R)는 變壓器油의 水分包含量에 重大한 關係性이 있는바를 알수있다.

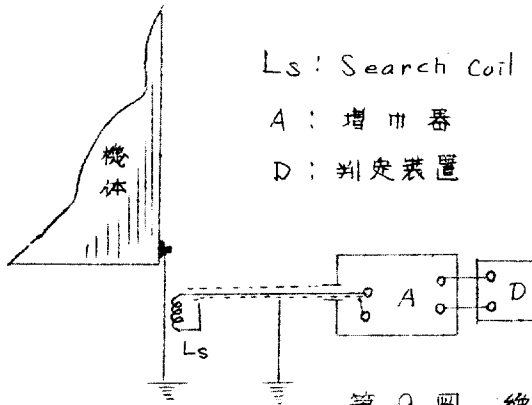
即. 變壓器油中の 水分을 測定하고 이를 除去하는것은 變壓器保守에 第一 重要한바라 生覺한다.



第 8 圖, 損失角 ($\tan \delta$) 와 絶緣抵抗 과 水分含量 과의 關係

6. E.I. - Detector 로 絶緣劣化 檢出法.

高電壓機器의 接地線電流의 性質은 印加電壓 機器의 構造及 絶緣良否에 基因된다. 絶緣이 良好할時는 機器構造上 靜電的 또는 各相電壓의 不平衡으로 微少한 基本的電流 或은 電源電壓에 基因되는 第三高調波를 若干重疊할 程度이나 絶緣劣化 또는 弱點部가 發生할時는 接地線電流가 增大하고 많은 高調波電流를 重疊한다. 이 檢出機는 第 9 圖와 如司 接地線을 切斷하지 않고 檢出코일 (Search Coil) 을 使用하여 檢出된 微少電壓을 增幅하여 「부라운 管 오시로 그라푸」 로 그 波形을 잡아내고 波形分拆器로 含有高調波의 成分을 檢出하게 되어 있다. 또 부라운 管 오시로 그라푸나 波形分拆器를 使用치 않어도 受話器를 使用하여 可聽式으로 高調波의 性質을 判斷 檢출할 수 있으며 이는 簡單하게 使用할 수 있는 方法이다.

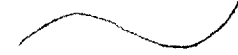


Ls : Search Coil

A : 増圧器

D : 判定装置

絶縁良好한 機體



変圧器 巻線 絶縁物劣化



変圧器 Bushing 不良



第 9 図. 絶縁劣化検出器

1954年5月50箇國の 参席下에 열린 第15回 國際送電網會議에서 變壓器에 關한 國際的報告가 있었다. 우리나라는 不幸히도 参席치 못하였으나 이러한 重要한 國際會議에는 반드시 参席하여 우리나라의 後進性을 再認識케 하고 國際的協約下에 나가야 될 問題로 生覺된다. 그 當時 變壓器에 關한 報告書中 下記와 如한 報告가 提出되었다.

故障檢出의 目的에 對한 波形으로 衝擊電壓 (Impulse voltage) 試驗에 있어 故障檢出과 位置檢出은 印加電壓과 中性點電流를 오시로그라프로 檢出하여 滿足한 結果를 얻었다.

- a. 新方法으로 高低壓 巻線間에 Capacitive 의 移行되는 電流를 記錄하여 容易히 故障位置를 發見한다.
- b. 截斷波로 故障檢出方法도 試驗에 應用하게 되었다.

7. 絶縁油의 劣化

絶縁油는 電氣機體의 絶縁과 冷却을 兼한바 第一重大한 使命을 갖고 있으나 最大의 缺典으로 可燃性이고, 水分等을 吸收하여 自然劣化를 함으로 變壓器의 保存良否는 絶縁油의 狀態를 日常 알아서 이를 善處하는데 있다하여도 過言이 안될 줄 안다.

a. 固有抵抗

固有抵抗의 因子로서 不純物로서 存在하는 水分, 有機酸, 電解

負 溶解瓦斯弄의 影響, 油油自身의 이온化로 그數値는 溫度와 더불어 複雜하다. 어떤때는 變壓器自體의 絶緣은 良好하였으나 絶緣油를 注入함으로써 도리혀 絶緣이 低下되는 實例가 있다. 이는 絶緣油의 固有抵抗이 $10^{13} \Omega \text{ Cm}$ 以上일時は 油를 弄음으로써 絶緣抵抗이 上昇되어 絶緣油本末의 目的을 達할 수있으나 $10^{12} \Omega \text{ Cm}$ 級은 判定안될 程度이고 $10^{11} \Omega \text{ Cm}$ 級은 도리혀 絶緣이 低下된다.

b. 水 分

絶緣油에 水分이 溶解되는 速度는 空氣中の 湿度가 높을수록 生湿度가 높을수록 빨리된다. 水分이 存在함으로써 絶緣油의 絶緣耐력은 顯著히 低下되며 例로 0.0003%의 水分이 있으므로써 絶緣耐력은 約 $\frac{1}{10}$ 低下된다. 絶緣油以外에 絶緣物의 水分除去는 勿論 眞空乾燥器로써 處理되나 絶緣油에 있어서는 水分과 固形의 不純物이 共存할때는 破壞電圧에 처하여 至極히 나쁜影響을 준다. 固形不純物로 濾過紙의 纖維나 清掃用의 掃帚 등이 微量이라도 混入될때 이들은 吸濕纖維로 되어 電極間을 架橋하여 絶緣破壞를 이룬다. 第8 圖를 보면 明確히 알수있다.

C. 絶緣油의 酸化

變壓器油의 劣化의 主原因은 空氣와의 接觸으로 酸化되고 이酸化反應은 變壓器 coil의 溫度上昇으로 더욱促進되어 各種의 中間酸化物を 生成하여 所謂 Sludge 를 生出한다. Sludge 生成의 程度를 簡單히 알려면 絶緣油의 酸價를 測定하여 그酸化程度를 알으므로써 알수있다. 普通絶緣油에서는 그酸化가 0.5 程度인 그析出이 많아진다.

新油의 酸化는 0.02 以下이다. (酸價라함은 油 1g 中에 酸을 中和하는데 要하는 苛性加里 (KOH) 의 mg 數) Beador 는

酸價 1.0 를 限度로 하고 있으며 Heyden, Richter 는 1.4, 1.5 를 限度로 定하고있다.

1954 CIGRE 大會에서 絶緣油에 関한 報告中 「使用実績으로 判断하여 界面 張力과 酸價의 試驗結果로서 油의 特性을 判断할수있다」 하였고, 白土를 使用하여 吸着法으로 再生處理는 満足할수있으며 特히 0.5 mg/KOH 以下の 酸價의 油再生에는 經濟的 实用性이있다. 油의 保存로 oil의 tand의 變化를 測定하여 그 性狀의 劣化를 判断할수있으며 酸價 0.3 以下를 良, 0.3 ~ 0.5 를 可, 0.5 ~ 0.7 注意, 0.7 以上을 不良으로하고있다」라고 報告되어있다. 이와같은 劣化生成物의 除去는 化學處理로서 할수있으며, 먼저 酸處理法으로 硫酸 또는 燐酸 등의 強酸으로 酸化生成物을 分解除去하는 方法인데 微量의 酸이 남는것은 아루카리로 中和하여 水洗, 白土處理를한다. 아루카리處理로는 苛性曹達 등으로 鹼化하여 酸을 中性除去한다.

d. 絶緣油의 濾過

絶緣油의 再生으로 우리가 普通使用하는 濾紙使用의 濾過去, 遠心分離機를 使用하는 方法, 또는 兩者를 併用하는 方法이있다 이때에 注意할것은 濾紙를 充分히 乾燥하여야하며 水分이 많은 絶緣油의 濾過는 眞空處理나 遠心分離機로 脫水함이 좋다. Sludge가 많은 絶緣油 濾過에 있어서는 濾紙가 Sludge로 ぬ워짐으로 壓力이 5 kg/cm^2 에 達할時は 濾紙를 交換하여야한다.

e. 劣化防止

普通 變壓器는 絶緣油가 空氣와 接觸하여 酸化함으로 「Conservator」를 두어 接觸面積을 적게하거나 吸濕을 적게하기 爲하여 塩化칼슘 등의 吸濕劑로 吸濕케하는 方法을 取하여 왔으나 完全히 劣化防止는 不可能함으로 各種의 防止

策으로 窒素封入을 하여 完全に 密封한 変圧器를 美國 Denver 研究室에서 発表한바를보면 油의壽命이 普通開放型이 1.5年 「Conseruator」型이 4~7年 密封型이 50年 窒素封入型이 57年으로 되어있다. 其他防止法으로 活性物質을 넣은 濾過裝置로 使用되는 吸着劑로 活性 아루마나 白土, 시리카 活性炭等이다 劣化防止劑로서는 錳, 마린, 硫黃含有物等이었다. CIGRE 大會는 劣化防止劑로 DBPC가 좋은效果를 내고있다고 報告되어있다. 하여튼 現場에서 變壓器를 保存하고 게신분은 이絶緣油의 重要性을 再認識하여 주시기 바라마지않는다. 大端히 本範圍外의 問題를 擇하여 略論한바를 未安히 生覺하오니 좀더詳細한바를 알고취 하시 는분이 계시면 直接面談해주시면 感謝하겠나이다.