

变压器故障原因 和 檢 查

陈叔涛 著
陈蟾安 校訂

水利电力出版社

目 录

第一章 变压器的故障原因、现象及其防止方法	1
第一节 电路故障	2
第二节 磁路故障	31
第三节 绝缘油的故障	36
第四节 结构方面的故障	42
第二章 怎样检查变压器的故障	54
第一节 不吊芯检查	55
第二节 吊芯解体检查	74

第一章 變壓器的故障原因 現象及其防止方法

變壓器是一種靜止的電器，它的結構並不比其他電氣設備複雜，它沒有旋轉部分，所以在運行上可以說是相當可靠的設備。但是在解放前，運行人員缺少變壓器運行和維護的專門知識，企業管理機構也沒有成套的運行和檢修規程，由於沒有很好的維護和不從事檢修工作，所以變壓器的事故經常發生，成為送變電設備中一個薄弱的環節。這種現象在最近數年來，由於各項制度的逐漸建立，事故情況已急劇下降，目前已有許多電業單位在整年中未曾發生變壓器故障，並且因為檢修工作做得徹底，檢修期限已規定給予延長，這證明我們若能對變壓器很好的進行維護和檢修，故障是可以避免的。

變壓器在電力系統中佔據很重要的地位，一旦發生了故障，對用戶供電影響頗大，所以儘管它是可靠的設備，但對檢修和維護工作，絕對不能疏忽大意，以免發生事故。

根據統計資料表明，小容量的變壓器故障機會要比大容量的變壓器多，而變壓器中最常發生故障的要算綫卷部分，它的損壞率約佔整個故障的60~70%。其中因絕緣枯老和層間絕緣的損壞佔據百分比尤大。其次是套管的損壞，雨水的侵入油箱，調壓開關的失靈，絕緣油的劣化等等，至於鐵心和其他零件事故則佔較小的數字。大容量變壓器之事故所以較少，主要還是在製造結構上考慮的比較周全可靠，所有絕緣距離較大，材料質量亦較好。上面已經講過，因為維護檢修工作不良，固然是事故造成的重要因素之一，但是由於以往製造廠在設計中考慮的不周到，在施工工艺上質量不好，以及以前少數私營廠

家追求利潤忽視質量也是事故形成原因之一。

第一节 电路故障

一、綫卷的損壞

(1) 絕緣枯老 在目前运行中的变压器的綫卷都是將銅導綫外面包以絕緣繞制而成的。其絕緣材料不外乎是紗、絲和電纜紙等浸以絕緣漆，這類組成的絕緣大都是屬於A級絕緣，它的最高运行溫度是 105°C （即環境溫度 35°C 加油面溫升 60°C 再加上綫卷平均溫度高出於油溫 10°C ）。若超過這個溫度运行，A級絕緣材料便很快的失去機械強度而變脆。雖然运行溫度未超過 105°C ，但是在高溫运行中的絕緣材料也會逐漸地枯老而焦脆。在正常負荷下运行的變壓器其絕緣材料使用期限約自20~30年，每當运行溫度降低 $8\sim 9^{\circ}\text{C}$ 其絕緣使用期限將增加一倍。這個關係可用公式來表示：

$$\text{使用年限 } t = A \times e^{-\alpha T}$$

式中 A ——是常數，它等於在 0°C 時之使用年限，一般將 A 取用 15×10^2 ；

α ——是系數，A級絕緣材料取用0.088。

T ——為絕緣材料使用時的溫度。

e ——為自然對數，它等於2.718。

在實際运行中，一年四季和晝夜溫度變化範圍很大，因此變壓器的使用溫度常低於上述最高溫度，所以實際使用年限與從前面公式求出的使用年限是有所差別的，總之，使用年限與綫卷溫升有密切關係。在圖1中指出絕緣使用日數與运行溫度的關係。若我們將其溫升限止在 $45^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，則使用期限可長達25~30年。目前世界各國對變壓器油面最高容許溫升的規定

不一，如苏联、德国和中国产品规定为 60°C 温升，英国规定为 50°C ，美国标准为 45°C 。英美国家的标准较为保守，所以按照它们的产品和规定温升来使用时，其绝缘寿命可以较长。但无论如何绝缘终有老化的一天，在到达或者接近这个时期，绝缘便呈枯焦，变黑，失去原有的弹性变成酥脆，此时若用手指稍加些压力擦一下，便有裂纹产生，甚至用手指用力擦时，绝缘会成炭片似的碎落下来。在这种情况下应用，只要线卷稍受震动或线卷间略有相对的摩擦，已枯焦的绝缘便容易损坏，形成匝间或层间短路。枯老的绝缘其绝缘性能亦已

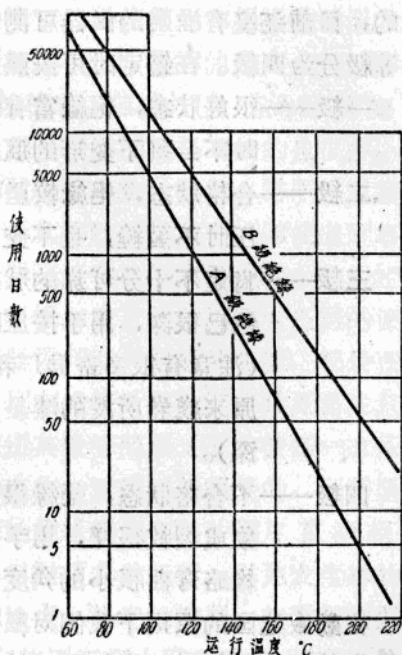


图1 绝缘使用日数与运行温度的关系

A 级绝缘：浸过油或漆的棉线，棉布丝，纸纤维材料；

B 级绝缘：云母，玻璃丝等的无机物质与纸，丝纤维等有机物质合成材料。

降低，在过电压时易形成绝缘击穿，对安全运行威胁很大。在解放前我们没有制订定期检修制度，运行时对变压器负荷与温升掌握得也不够，所以对线卷的绝缘等级无法估计。经常有将新变压器投入运行后，一直未吊芯检修，直至线卷绝缘枯老，发生事故后才调换。由于线卷枯老而造成的直接或间接的事故是很多的。

变压器线卷的绝缘老化等级多是根据检修人员的经验来判

別的，目前還沒有準確的儀器可測量。蘇聯和中國一般多將絕緣等級分為四級。在鑑定時可按照這樣的區別：

一級——很好狀態，絕緣富有彈性，軟而且韌，用手按壓時不會剩下變形的痕跡。

二級——合格狀態，絕緣較堅硬些，顏色已較深，用手按壓時不裂縫，也不變形。

三級——肯定不十分可靠的狀態，絕緣已堅硬并脆弱，顏色已很深，用手按壓時產生細小的裂紋或變形（注意有很多奇異廠和益中廠製造的變壓器，其原來綫卷所浸的漆是黑色的，不要誤會是顏色已深）。

四級——不合格狀態，絕緣很堅硬，用手按壓時有脫落現象或裂紋很深，用手擦時絕緣呈碳片下落或將絕緣略彎曲很小的角度便斷裂。

在勤儉建國的原則下我們對三級絕緣的變壓器進行試驗，若一切試驗結果都很正常，那麼這部變壓器可以繼續投入運行一個檢修間隔，如果絕緣情況較差，則可縮短檢修間隔并加強監視如對四級絕緣者，則應掉換綫卷徹底進行大修了。根據運行經驗，三級絕緣的變壓器，其事故率并不太大。

在判斷絕緣時，應該將主絕緣和綫卷外面所包的絕緣作為主要的判斷對象。將所包扎的紗帶引綫外包的絕緣作為次要對象。若紗帶等已呈四級（未浸漆的紗帶比紙類容易枯老），而主要絕緣還很好，則可將部分絕緣重新包扎，以主要絕緣的等級作為鑑定變壓器綫卷絕緣老化的依據。

當我們在運行時，對負荷掌握得不好，便變壓器長期在過負荷下參加運行，這時綫卷的電流密度較額定容量時大。因為綫卷的銅損是與電流密度的平方成正比，所以在過負荷下銅損

是大量的增加。由于銅損的增加，以使綫卷和絕緣油的溫升也都增加，絕緣的運行溫度便超過了上面所講的最高運行溫度 105°C ，这样就使得絕緣加速枯老。連續過負荷運行的變壓器，因絕緣迅速的枯老而引起匝間層間短路事故的也很多。

為了防止因絕緣枯老而引起的事，我們必需嚴格認真地掌握變壓器的負荷與溫升，不允許隨便過負荷（即使遇到事故過負荷時也要按照電力變壓器運行和檢修典型規程中的規定時間，不可任意延長），以免絕緣加速老化和縮短變壓器的使用年限。對定期檢修中的變壓器需判別其絕緣的等級，紀錄在檢修資料中。若絕緣已呈三級，則在檢修後投入運行時更需注意其負荷情況，並且可以酌量縮短其檢修間隔（五年檢修一次甚至再短一些），監視其絕緣的變化。對第四級絕緣的，則需堅持恢復性大修（即掉換全部新的絕緣綫卷和將矽鋼片重塗絕緣漆，絕緣油的處理等），不得繼續參加運行，以免發生事故。

（2）製造工藝上存在的缺點 綫卷的繞制，初看起來似乎很單純沒有多大技巧，但是在施工工藝上稍有疏忽，或者不熟練的工人擔任繞綫工作時，往往因綫卷導綫截面積較大，繞制時不太緊密，將木錘拍擊過重，易使綫卷絕緣敲壞。當數根導綫併繞筒式綫卷時，由於綫盤與繞綫車距離放得較近，在綫盤與繞綫車間的導綫與繞綫車中心綫不垂直，其角度小於 90° 時，在繞綫時使待繞的導綫邊緣與已繞好的綫卷邊緣相互擦傷，絕緣便會磨損。也有在較大容量的配電變壓器次級綫卷的二端彎頭引出處，因彎頭時彎頭處與鉄軛間或者匝間絕緣受傷。這種絕緣的損傷，在出廠試驗時可能試驗合格，但有的在參加運行後不久便發生故障，有的在運行很久後事態才擴大出來。我們曾見到一台華通製造的500千伏安6,600/380伏變壓器，因在低壓側綫卷彎頭處絕緣有損傷，在運行十餘年後才發生事故。另

有一台 250 千伏安的配电变压器，在繞綫时由于匝間邊緣的軋伤，剛通入电源时，便冒烟燒毀。

当綫卷繞好后因絕緣未曾烘乾，常使紗包綫或紙絕緣中含有潮气，待浸漬的絕緣漆烘乾后，紗和紙中的水份將長期的含在里面不易再蒸发出来，日子一久便使銅綫产生銅綠，这样便削弱了絕緣性能，易形成短路。也有在浸漬絕緣漆时，漆的粘度太厚，或者在烘乾时立即放置在高温中，这样經常使外层的絕緣漆很快的結膜而內部的絕緣漆还不能乾透，以致使得絕緣漆象蠟淚似的悬挂在導綫上，其后果將减低綫卷的机械强度，削弱絕緣性能，并阻塞油道，有碍散热，都能間接的形成綫卷事故。

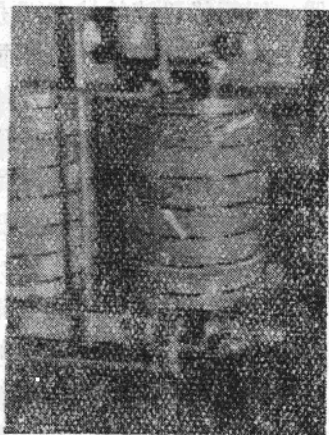


图 2 絕緣漆浸漬得不好有蠟淚狀悬挂在導綫上 75K.VA

(3) 綫卷层間短路 这类事故大多是发生在小型变压器(325 千伏安及以下)的初級綫卷中，因为小型变压器的高压綫卷大多是用多层圓筒式和段型綫卷(見图 3 和 4)。在正常运行中綫卷二层間的电压并不太低，其电压之高低与其容量之大小成正比，同时还和綫卷結構的形状有关系。一般段型綫卷的层間电压自数十伏至二、三百伏。多层圓筒式綫卷則自数百伏至千余伏。

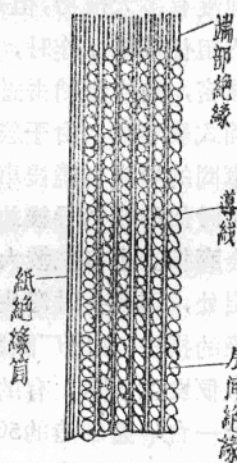


图 3 多层圓筒式綫卷

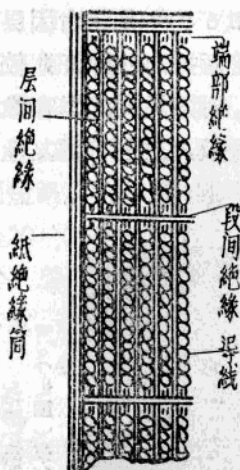


图4 段型綫卷



图5 225千伏安(华通#172)层間絕緣无加强的綫卷故障后的情况
第一段綫卷已向上抬起第五六段綫卷已损坏

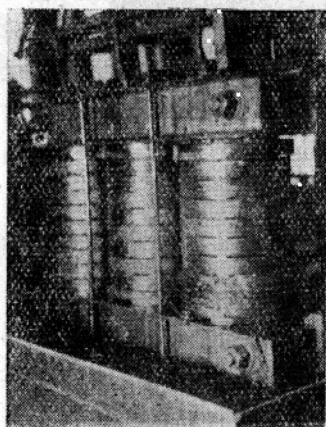
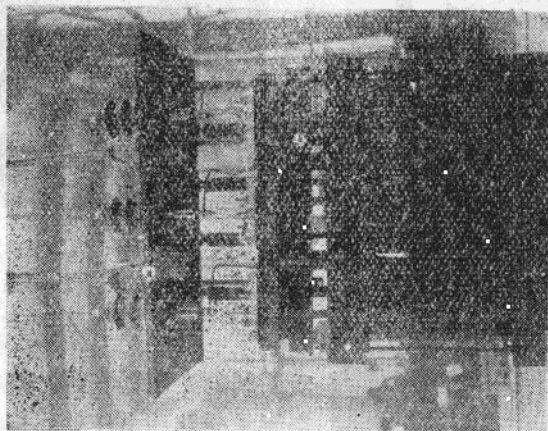


图6 100千伏安(华通#451)层間絕緣无加强的綫卷故障后的情况

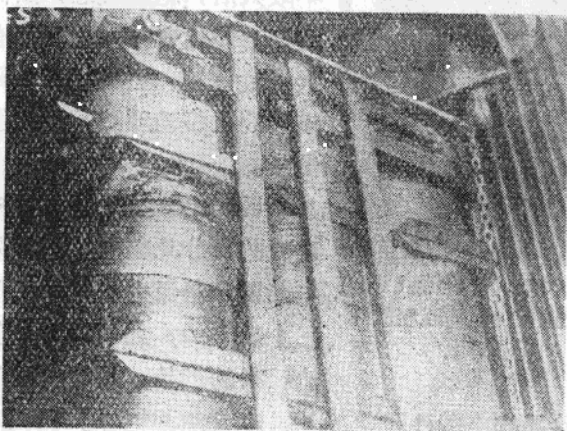
对新制的变压器来讲，綫卷的絕緣是能承受这些电压的，但是待使用年限久后，絕緣衰老，层間絕緣的耐压性能便变坏，一旦遇有操作或大气过电压，系統短路故障，或者綫卷間之振动摩擦，多能引起层間短路。

层間絕緣短路事故占变压器总事故的百分比很大。尤其是在1938年前国产华通电机厂(出厂编号为三个数字的，如172,451等)和其他厂家的产品，該类变压器的綫卷其层間除导綫上的外包絕緣外，沒有加强絕緣。在运行年久

后，由于絕緣干脆便易产生事故，图 5 和 6、7 是三台因层間絕緣短路而损坏的变压器。故障后导綫熔断并向外彈开，較严重的將使导綫熔化甚烈，銅珠四向濺出。对該类变压器在檢修过程中需加强注意，若其絕緣已列入第三級，应进行恢复性的大修。



乙、225千伏安（国产）



甲、325千伏安（英国佛蘭第厂造）

图 7 由于过负荷使綫卷层間絕緣枯老损坏而引起事故

目前國內生产的容量在 560 仟伏安以下的配电变压器，其高压側綫卷多采用多层圓筒式綫卷，从二层或三层 0.12 公厘之電纜紙加强层間絕緣。但也有因繞綫时导綫較粗，而使電纜紙軋伤，亦有因变压器沒有防雷保护或者保护配合不好，而形成层間短路。抗日战争期間日本制造的大阪和日立的产品，其容量为 20~30 仟伏安者，虽然也有用電纜紙加强层間絕緣，但运行日久后，絕緣枯老，若遇有綫卷受潮或其他因素亦常发生类似事故。

(4) 銅的質量不好 变压器繞組用的导綫，大多是用韌銅，虽然目前国外已有使用鋁綫，但國內尚在試制未广泛采用。韌銅的抗拉强度要比硬拉銅低得多，約減低 1.5~2 倍。但韌煉銅能够被拉得很長，而且在繞制綫卷时因其富有延性，所以易伏貼地繞在綫模上，可以任意的弯曲到所需要的形狀而不会彈回来。

將銅韌煉时需加热到 350~400°C 左右，再將它冷却下来，若在加热时温度較高，則銅綫便很容易氧化，并且氧气易于窜入銅的組織內，图 8 是指銅的氧化速度与温度的关系。由于氧气存在于銅內，这样便大大地增加了它的脆性。尤其对細而薄的导綫，若韌煉不当，很容易发生断裂。即使是較厚的扁綫（厚至 3 公厘）亦有断裂的可能。所以將銅綫进行韌煉时，最好能

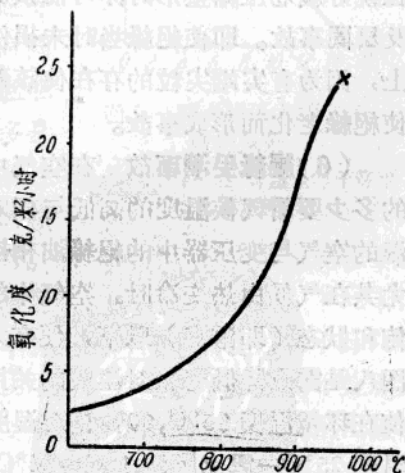


图 8 銅在空气中的氧化速度与温度的关系

將炉的內外隔絕使空气不流通，或者將炉內充以惰性气体如二氧化碳、乙醇，以减少銅与氧接触的机会。

在恢复性大修的变压器中，若要繼續应用旧导綫时必须对旧导綫进行加热韌煉，因为导綫經過重复的纏繞之后往往会形成硬化。修理單位对导綫的韌煉是缺少經驗的，常因韌煉不好，造成在繞制綫卷尤其是在弯头、抽分接头、引綫弯曲时导綫外表面有裂紋或裂断現象，在运行时其裂紋处出現局部发热，形成絕緣损坏事故。或者因綫卷受震动而断裂形成开路。所以对导綫的韌煉需特別注意。

(5) 銅导綫表面不平滑有尖粒等物 銅綫制造厂，在拉綫时偶有因工作不周使导綫有雀縫，夾筋形成了尖端，或者在繞綫时导綫在碰接中碰接得不平滑产生了尖粒，如果未曾將尖粒和尖端消除，那么在包扎絕緣时有可能使絕緣破裂和损伤，又在繞好綫卷压缩整形时亦可能損及鄰近的絕緣，容易造成匝間及层間事故。即使絕緣当时未损伤，但在高电压等級的綫卷上，因为有尖端尖粒的存在使該部位容易发生电暈，久而久之使絕緣老化而形成事故。

(6) 絕緣受潮事故 在空气中含有大量的水分，其含水分的多少要看气候温度的高低与相对湿度的变化而决定。如果潮湿的空气与变压器中的絕緣油相接触，絕緣油便吸收了水份。尤其在气候由热变冷时，空气中的相对湿度相应上升甚至到达飽和状态（即露点）以下，便有大量的水分凝結附着在各处。图八是露点降低与相对湿度的关系。从該图中我們可以看到假使在环境温度 25°C ，90%相对湿度下，露点等于 24°C （即环境温度 25°C —露点降低 $1^{\circ}\text{C}=24^{\circ}\text{C}$ ）。再举一个例子來說明这种情况，在夏天白晝热且潮湿，夜間較涼，即使以不投入运行的变压器来講，它在白晝与周圍空气温度相同假定为 35°C ，

85%相对湿度，但到了夜間环境温度下降假定是 28°C ，这时变压器油箱内的温度亦相应下降，于是箱内潮湿空气温度低于露点 5°C 〔(即 $35^{\circ}-2^{\circ}$) $-28^{\circ}=5^{\circ}\text{C}$ 〕，水分便大量的凝結于油箱盖頂下和箱壁上，沿着箱壁滴入油中。当变压器油中有了水分之后，不但使絕緣油降低了絕緣强度，而且由于油的不断循环將水份帶至干燥的絕緣处，这样絕緣便受了潮，使絕緣材料的电气性能迅速的降低，形成絕緣閃絡或击穿的危險。变压器事故中常有因絕緣受潮后使絕緣击穿或絕緣表面对地閃絡而形成事故扩大。

在檢修过程中，如果將变压器的器身（它包括变压器的磁导体，綫卷等部分）吊出油箱時間过長，由于絕緣材料的吸潮性能很好，吸收了四周空气中的多量水分之后便迅速地降低了絕緣性能，在运行中使絕緣击穿或閃絡

的机会增加，威胁了安全运行。所以运行和檢修典型規程中會有这样的規定：在正常空气温度和湿度（50~60%）下35千伏及以下的变压器器身在空气中停放的时间不得超过24小时，110千伏及以上的器身不可超过16小时，否則必需經過烘干处理，为了不使潮气侵入或凝結在变压器吊出的器身上，在吊出器身之后，最好能使变压器綫卷的温度高于周圍空气温度。对运行中的变压器亦希望能在呼吸管出口处裝上吸潮器，內中放置吸潮矽膠或氯化鈣粒子，防止潮气的侵入。对于油浸式較高电压

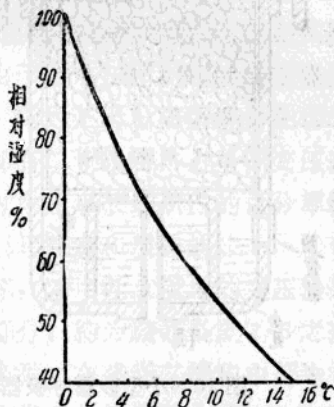


图9 露点降低与相对湿度的关系

温度范围 $10\sim 45^{\circ}\text{C}$ 露点等于环境温度
 $^{\circ}\text{C}$ 减去露点降低温度 $^{\circ}\text{C}$

等級的電流互感器和電壓互感器（35和110千伏級等），也有因受潮而發生事故，嚴重的有將外面瓷套管炸毀，欲防止該類事故發生建議在互感器的頂部裝上吸潮呼吸器，如圖10。

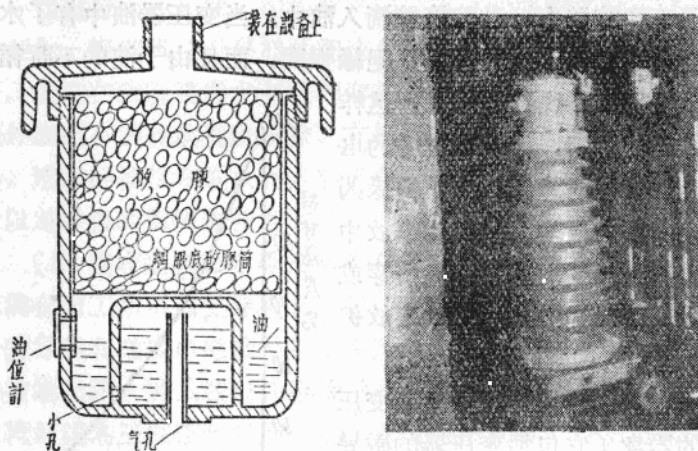


圖 10 小型矽膠呼吸器裝置在 110 千伏電流互感器上

(7) 雨水浸入 上面一節已經講到絕緣材料吸收了空氣中的水分之後，影響其絕緣性能而引起事故。但是更嚴重的如沒有油枕的變壓器，其油箱的箱蓋合縫不密封，套管的法蘭和銅梗處的漏水等，使水點漏入箱內，有的直接滴在綫卷上，有的滴在鐵心上，有的沿着箱壁漏入箱底，隨着油的循環帶到各處，如果在大雨後或者久晴初雨時變壓器發生了損壞事故，我們便應思索到是否有使雨水漏入箱內的可能。對於各部件漏水的原因當分述在有關各節中。

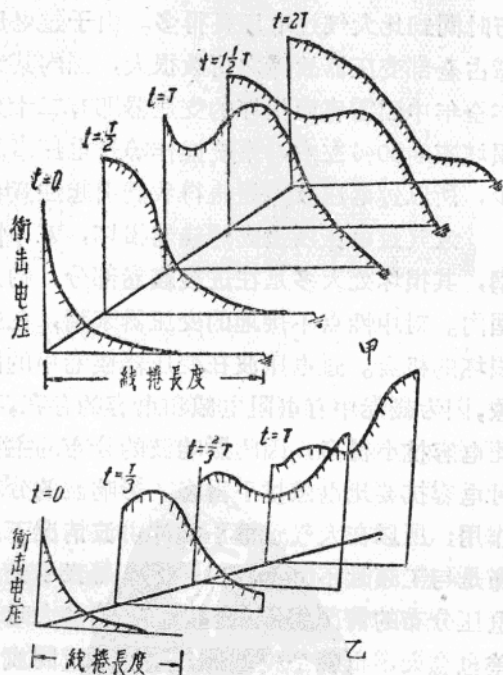
(8) 過電壓引起的故障 過電壓一般分為二類，就是雷擊過電壓（大氣過電壓）和系統操作過電壓（內過電壓）。這二類過電壓所引起的變壓器損壞事故大多是綫卷的主絕緣，匝間、

層間和相間絕緣的击穿。前者的过电压可高至数十万甚至数百万伏特，后者亦能高至系統电压的三、四倍不等。这样高的电压波及到变压器套管及綫卷各部，假使沒有避雷器很好的配合，它們的絕緣强度大大的低于外来电压的强度，并且当雷击波进入綫卷后由于綫卷中电感和电容存在的关系，波便在綫卷中产生了振蕩于是綫卷的匝間和层間电压比原来的电压升起很大的倍数。操作和系統突变的过电压虽然倍数并不太大，但是其經歷時間却比大气过电压長得多。由于过电压所引起的变压器故障占全部变压器故障之百数很大，国内某大電網系統中在1956年全年中因雷害而损坏的变压器即有二十余台，占全年变压器损坏率的80%左右，系統操作等过电压事故則所占的百分率較少，所以过电压故障是值得我們引起注意和預防的。

大气过电压所造成的綫卷损坏，对中性点接地的变压器來講，其损坏处大多是在进綫綫卷部分，約为綫卷長度 $1/5$ 之範圍內。对中性点不接地的变压器來講，在綫卷二端和中部均有损坏的机会。过电压波在变压器綫卷中的傳播是个复杂的現象，因为綫卷中有电阻电感和电容的存在，在工頻的时候电感抗比电容抗小得多，因此影响波的分布的主要是电感。而在高頻时电容抗要比电感抗小得多，影响波的分布电容抗將要起主要作用；所以在大气过电压的冲击波情况下，各綫匝間电压的分布是与工頻时不同。图11甲和乙是表示变压器整个綫卷長度內电压分布的情况。当电压曲綫陡度愈大时，則相鄰匝間的电压差也愈大，也就是說这部分綫卷的匝間或层間的絕緣所承受的电压愈大，当然絕緣损坏的机会也愈多。为了保护綫卷的絕緣，我們应选择适当的避雷器來作保护，要使变压器的冲击水平大于避雷器的剩余电压，一般取变压器冲出水平为剩余电压的1.1倍。对35千伏級及其以上电压等級的变压器，在制造上应

考慮在綫卷部分加置电容补偿如电容环或电容屏蔽的裝置，使綫卷中电压起始分布接近于直綫，并可减少綫卷中波的振蕩。如果我們能按照过电压保护导則来进行防雷保护，那末雷击事故可以大为减少。上面所講的这个电力系統中，由于1956年雷害事故較多，所以采取了很多措施，在1957年中雷击事故便显著地降低，上半年仅发生了三起，其中有的是由于保护裝置失灵而造成的

系統 作等过电压所引起之变压器事故較少，事故之形成要看系統的情况和其电感与电容量来决定。但是一般的來說，对結構优良的变压器很少在操作时造成絕緣损坏事故。但对絕緣枯老質量不好的变压器在系統操作，弧光接地，綫路断綫，負荷剧变等情形下，也常有发生损坏的。



(9)系統短路 图 11 在不同時間下綫卷中冲击电压的分布情况
甲、中性点接地綫卷 乙、中性点不接地綫卷
 T 是綫卷震蕩周期。

回路上发生短路时，各級綫卷中將要有比額定电流大10~20余倍的电流流过。

由于綫卷中大电流的經過与綫卷的漏磁場相互作用的結果，便产生了很大的机械应力。这个机械应力可以分解成二个不同方向的分力，一个是与綫卷的軸平行(亦即是軸向力)，一个是与綫卷的軸垂直(亦即是幅向力)。如图12。

軸向力是作用在綫卷各导綫上的軸向分力的总和。这些分力的方向在每相綫卷的上半部与下半部是相反的，其具体方向要看綫卷分布的高度，高压綫卷上的分接头抽出綫的高度等来决定，計算亦較为复杂。图13表示高压綫卷为多层圓筒式綫卷其軸向力分布情况，其高压綫卷共分二段，上下二段之間有較大的油道，軸向压力一般是由綫卷上下的絕緣紙板墊块来承受，若制造时未能將綫卷很好的压紧，則在短路故障发生后常遇到綫卷上下二端向上下軛鉄伸漲，使綫卷严重变形而损坏。图14是一台日本大阪制造的30千伏安变压器，在系統短路后高压綫卷 A、C 二相頂上面一只綫卷向上伸漲的情况。該图仅能表示一般的损坏情形，严重的則較此为甚。

幅向力的大小可以用公式來說明：

$$F_r = 10.2BIWL \times 10^{-8} \text{ (公斤)}。$$

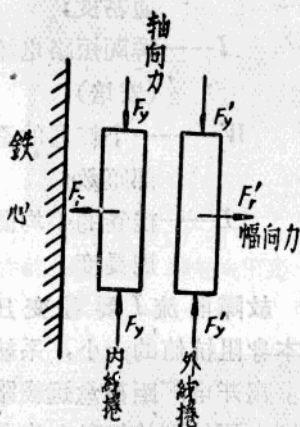


图12 高低压綫卷高度对称配置时力的方向

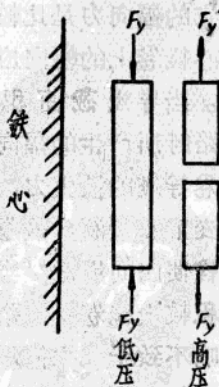


图13 高压綫卷分二段后的軸向力分布情况