

典型

# 变压器故障 案例分析与检测

河南省电力公司郑州供电公司 组编

郭清海 主编

管晓峰 副主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

**典型**

# **变压器故障 案例分析与检测**



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)



## 前 言

电力变压器作为电力系统中重要的电气设备之一，对电网的安全可靠运行至关重要。随着电网建设的飞速发展，其重要性日益突出，为提高对变压器故障的处理及检测能力，我们编写了本书。

本书从变压器的基本原理和相关高压、继电保护知识入手，阐述了变压器故障分析的理论基础，在此基础上，分析变压器绝缘、过热等不同类型故障起因及其预防措施。之后，从大量故障案例出发，详细介绍不同故障的分析、处理方法，并介绍了故障检测技术，以期在实际工作中能够充分利用现有检测手段，更好地为生产运行、故障处理服务。

本书在编写过程中，搜集了大量的资料，参考了多位专家及专业工作者提供的案例及公开发表的文章、正式出版的书籍，引用了一些研究成果和试验数据，谨在此向原作者表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促和编写水平所限，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者批评、指正。

编 者

2009年10月

# 目 录

## 前言

<b>第一章 变压器的工作原理与结构</b> .....	1
第一节 变压器的工作原理.....	1
第二节 变压器的分类和结构.....	4
第三节 变压器的运行要求.....	5
<b>第二章 变压器故障及分析基础</b> .....	10
第一节 故障分类概述 .....	10
第二节 高压与绝缘基本知识 .....	10
第三节 变压器保护的类型与基本工作原理 .....	14
<b>第三章 变压器故障起因及对策</b> .....	20
第一节 故障特征及综合判断 .....	20
第二节 绝缘故障起因及对策 .....	23
第三节 过热故障起因及对策 .....	37
第四节 漏磁故障起因及对策 .....	50
第五节 铁心故障起因及对策 .....	56
第六节 变压器组件故障起因及对策 .....	70
第七节 变压器油务分析及处理对策 .....	75
<b>第四章 典型故障案例分析</b> .....	86
第一节 放电故障检修案例 .....	86
第二节 绝缘故障检修案例 .....	98
第三节 短路故障检修案例.....	109
第四节 铁心接地故障检修案例.....	116
第五节 分接开关故障检修案例.....	125
第六节 套管故障检修案例.....	136
第七节 变压器渗漏油故障检修案例.....	144

<b>第五章 变压器故障检测技术</b> .....	154
第一节 概述.....	154
第二节 绝缘电阻检测.....	155
第三节 绕组直流电阻检测.....	160
第四节 介质损耗测量.....	166
第五节 油质检测.....	175
第六节 变压器油中溶解气体分析与诊断.....	179
第七节 变压器固体绝缘的老化诊断.....	188
第八节 局部放电故障检测.....	196
第九节 变压器有载分接开关的检测.....	202
第十节 绕组变形检测.....	203
第十一节 变压器故障检测前沿技术.....	209
<b>参考文献</b> .....	219

# 第一章

## 变压器的工作原理与结构

### 第一节 变压器的工作原理

#### 一、变压器在电力系统中的作用

##### 1. 变压器的概念

变压器是借助于电磁感应原理，以相同的频率在两个或两个以上绕组之间变换交流电压和电流而传输电能的一种静止电气设备。

##### 2. 变压器的作用

在电力系统中，向远方传输电能时，为了减少线路上电能损耗，需要升高电压，为了满足用电的要求，又需要降低电压，这就需要能实现变换电压、电流的变压器。同时，在整个电能生产、输送、分配、使用过程中，变压器占有极其重要的地位。

##### 3. 电力系统中性点运行方式

电力系统中性点运行方式分为直接接地、经消弧线圈接地和不接地三种。中性点直接接地的方式一般用在 110kV 及以上的系统，中性点不接地或经消弧线圈接地的方式一般用在 63kV 及以下的系统。

#### 二、变压器的工作原理

变压器的基本原理是电磁感应原理，是“电生磁、磁生电”现象的一个具体应用。无论是单相还是三相电力变压器，在其磁路构成的铁心柱上，都装有一、二次绕组。现以单相双绕组（或三相中一相）变压器为例来说明，它由两个绕组和一个铁心组成，其工作原理如图 1-1 所示。

当匝数为  $N_1$  的一次绕组（可以是高压侧，也可以是低压侧）接到频率为  $f$ 、电压为  $U_1$  的交流电源时，很小的励磁电流  $I_0$  就在铁心中产生主磁通  $\Phi$ ，以及经铁心外回路的漏磁通  $\Phi_\sigma$ 。交变的磁通  $\Phi$  在一、二次绕组中感应出电动势  $E_1$  和  $E_2$ ，则二次绕组  $ax$  有电压  $U_2$ 。

当二次绕组接有负载  $Z_L$  时，有二次电流  $I_2$  流过，而此时的一次电流由空载时的  $I_0$  变为  $I_1$ 。当忽略绕组电阻和漏磁电抗时，由法拉第电磁感应定律可得

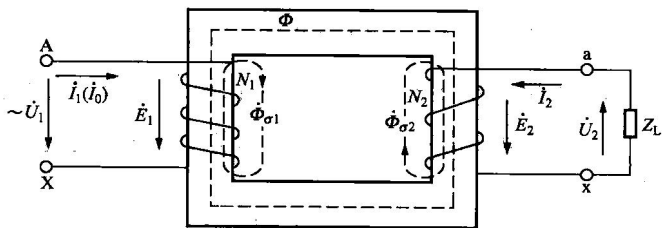


图 1-1 变压器工作原理图

$$U_1 = E_1 = 4.44fN_1\Phi_m = 4.44fN_1B_mS \quad (1-1)$$

$$U_2 = E_2 = 4.44fN_2\Phi_m = 4.44fN_2B_mS \quad (1-2)$$

式中  $f$ ——频率, Hz, 工频频率为 50Hz;

$N_1$ 、 $N_2$ ——一、二次绕组的匝数;

$\Phi_m$ ——主磁通的最大值, Wb;

$B_m$ ——主磁感应强度的最大值, T;

$S$ ——铁心截面积,  $m^2$ 。

如令变压器的变比为

$$k = \frac{U_1}{U_2} \quad (1-3)$$

即

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

可见, 一、二次绕组的电压比等于匝数比。因此, 只要改变两个绕组中任一绕组的匝数, 就可改变一、二次绕组的电压比, 从而实现改变电压的目的。

变压器通过电磁耦合关系, 将一次侧的电能量传输到二次侧去, 如果忽略漏磁因素, 即变压器本身损耗不计, 则向变压器输入的功率等于变压器向外输出的功率, 即

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (1-4)$$

或

$$I_1/I_2 = U_2/U_1 \quad (1-5)$$

所以

$$I_1/I_2 = N_2/N_1 = 1/k \quad (1-6)$$

说明变压器一、二次电流与一、二次绕组匝数成反比。

实际上变压器在运行中有铁损、铜损等损耗产生, 也就是这个原因变压器在运行过程中才会发热。

### 三、变压器的相量图

#### 1. 变压器各相量的正方向规定原则

变压器一次侧对电源来说相当于负载, 所有一次侧相量的正方向按负载原则规定; 二次侧对负载来说相当于电源, 二次侧各相量的正方向按电源原则规定。各相量的标注原则 (以图 1-1 为例) 为:

(1) 一次电压  $\dot{U}_1$  正方向为由 A 指向 X。

(2) 一次电流  $\dot{I}_1$  ( $\dot{I}_0$ ) 正方向与  $\dot{U}_1$  正方向产生的电流一致时为正。

(3) 主磁通  $\dot{\Phi}$  的正方向与一次电流  $\dot{I}_1$  符合“右螺旋”定则时为正。

(4) 一次电动势  $\dot{E}_1$ , 二次电动势  $\dot{E}_2$  及其他电动势与主磁通符合“右螺旋”定则时为正。

(5) 二次电流  $\dot{I}_2$  的正方向与  $\dot{E}_2$  正方向一致时为正。

(6) 二次电压  $\dot{U}_2$  的正方向与  $\dot{I}_2$  正方向一致时为正。

当变压器各相量按上述原则标注正方向以后, 根据基尔霍夫第二定律, 对图 1-1 电压方程式为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{U}_2 &= +\dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 - j\dot{I}_2 x_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \\ Z_1 &= r_1 + jx_1 \\ Z_2 &= r_2 + jx_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

式中  $Z_1, Z_2$ ——、二次侧的阻抗；  
 $r_1, r_2$ ——、二次绕组的电阻；  
 $x_1, x_2$ ——、二次侧漏磁感抗。

## 2. 变压器相量图的绘制

为了直观地分析变压器电与磁之间的关系，常用相量图进行分析。应当注意的是，在作相量图时一般将一、二次绕组匝数比假定为 1（或认为折算到同一侧），以下物理量右上角带撇号“'”的为二次侧折算到一次侧的折算值。这样就将变压器的一、二次绕组匝数看成是相等的，于是可将一、二次侧各量画在同一图中，如图 1-2 所示。作相量图的方法和步骤如下：

- (1) 根据已知条件确定参考相量，一般取  $\dot{U}_2'$  为参考相量。
- (2) 根据负载性质  $\cos\varphi_L$  作出相量  $\dot{I}_2'$ 。
- (3) 根据  $\dot{E}_2' = \dot{U}_2' + \dot{I}_2' r_2' + j\dot{I}_2' x_2'$ ，作出相量  $\dot{E}_2'$  ( $\dot{E}_2' = \dot{E}_1$ )。
- (4) 根据  $\Phi = j \frac{E}{4.44 f N_1}$  作出相量  $\Phi$ 。
- (5) 根据  $\dot{I}_0 = \frac{-\dot{E}_1}{Z_m}$  作出相量  $\dot{I}_0$ 。
- (6) 根据  $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2'$  作出相量  $\dot{I}_1$ 。
- (7) 根据  $\dot{U}_1' = -\dot{E}_2' + \dot{I}_1' r_1' + j\dot{I}_1' x_1'$  作出相量  $\dot{U}_1'$ 。

## 四、变压器的等效电路

为了定量地分析问题，可以利用比较简单、易于进行计算的等效电路来计算变压器的运行情况。变压器的等效电路，就是用一个电路来代替变压器，计算出实际变压器的运行结果情况，如功率分布、电压变动等。

等效电路的表示方法就是将二次侧各量通过折算，将本来变比不为 1 的变压器看成变比为 1 的变压器，使一、二次绕组的电动势相等。二次绕组向一次绕组的折算方法为电压、电动势乘以变比  $k$ ，电流除以变比  $k$ ，阻抗类乘以变比的二次方  $k^2$ ，折算后的各量加上一撇表示。

折算后的二次电压方程式为

$$\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' r_2' - j\dot{I}_2' x_2'$$

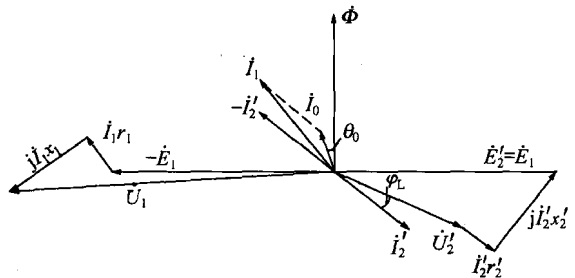


图 1-2 变压器感性负载时的相量图



磁通势平衡方程式为

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_0$$

变压器以等效电路表示,常用的为T形等效电路,若将励磁阻抗 $r_m + jx_m$ 移于网络的输入端,并用 $r=r_1+r_2'$ , $x=x_1+x_2'$ 来表示,就成为Γ形等效电路,若忽略空载电流 $I_0$ ,就成为简化等效电路,如图1-3所示。

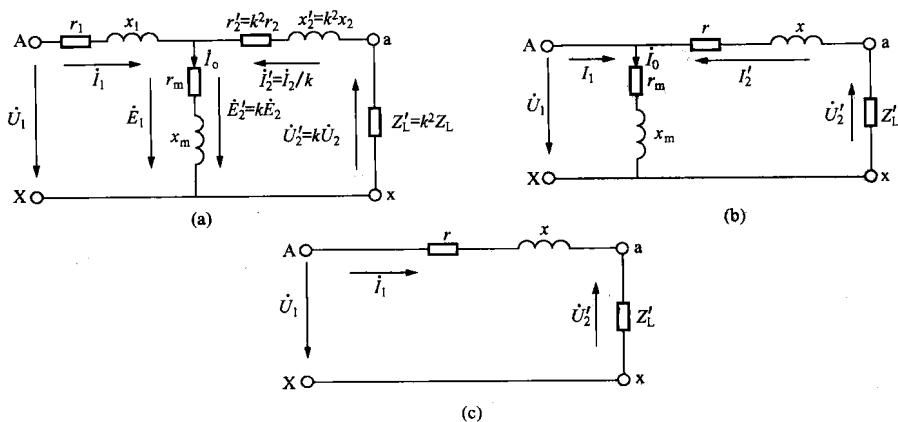


图1-3 变压器等效电路图

(a) T形等效电路; (b) Γ形等效电路; (c) 简化等效电路

## 第二节 变压器的分类和结构

### 一、变压器的分类

变压器根据其用途、结构、相数、冷却方式、调压方式、中性点绝缘水平的不同情况,分类如下:

(1) 按用途分有电力变压器(升压、降压、配电等)、试验变压器、测量变压器(电压、电流互感器)、调压器、特种变压器(电炉变压器、电焊变压器、整流变压器、控制变压器、冲击变压器等)。

(2) 按绕组结构分为双绕组变压器、三绕组变压器、多绕组变压器和自耦变压器等。

(3) 按铁心结构分为心式变压器、壳式变压器和C形、T形及环形铁心变压器。

(4) 按电源输出相数分为单相变压器、三相变压器、多相变压器。

(5) 按冷却方式分为油浸式变压器(油浸风冷、油浸水冷、强油风冷、强油水冷、自冷)、干式变压器和充气式变压器。

(6) 按调压方式分为无励磁(无载)调压变压器和有载调压变压器。

(7) 按中性点绝缘水平分为全绝缘变压器和半绝缘变压器。

(8) 按防潮方式分为开启式变压器、密封式变压器和全密封式变压器。

### 二、变压器的结构及各部分作用

变压器最基本的结构由铁心、绕组及绝缘部分组成,为了使变压器安全可靠运行,还需要有油箱、调压装置、冷却装置、保护装置等。变压器的结构组成及各部分作用如下:

(1) 器身。

1) 铁心：起磁路作用。

2) 绕组：起电路作用。

3) 绝缘部分。

4) 引线。

(2) 调压装置。用来改变绕组匝数、调整电压的装置。

(3) 油箱及冷却装置。油箱用来存放油和支撑器身。冷却装置的作用是使油循环冷却，达到变压器降温目的。

(4) 保护装置。

1) 储油柜：用于减少油与空气接触面，调节油量和注油。

2) 安全气道：内部发生故障时，防止内部压力过高。

3) 吸湿器：吸收空气中的杂质和水分，过滤空气。

4) 气体继电器：当内部发生匝间短路、绝缘击穿、铁心故障等产生气体时，或油箱漏油等使油面降低时起保护作用。

5) 温度计：监视变压器运行温度。

(5) 出线套管。为了将绕组的端头从油箱内引出至油箱外面而设置，并要有足够的对地绝缘距离。

(6) 变压器油。起绝缘、冷却作用。

### 第三节 变压器的运行要求

#### 一、电力变压器的试运行及投入运行

##### 1. 变压器的空载试运行

(1) 试运行时，先将分接开关放在中间挡上，空载试运行，然后再切换到各挡，观察其接触是否良好、工作是否正常。

(2) 若变压器与发电机作单元连接，在第一次投入运行时，应从零逐渐升压；新装或大修后的变压器，均要以全电压冲击合闸试验 3~5 次，以考验变压器绕组的绝缘性能、机械强度、继电保护、熔断器等装置是否合格，会不会发生误动作。

(3) 变压器第一次带电后，运行时间不应少于 10min，以便仔细监听变压器内部有无不正常杂声（可用干燥细木棒或绝缘杆一端触在变压器外壳上，一端放耳边细听变压器送电后的声响是否轻微和均匀）。若有断续的爆炸或突发的剧烈声响，应立即停止试运行（切断变压器电源）。

(4) 对于强风或强油循环冷却的变压器，要检测空载下的温升。具体做法是：在不开启冷却装置的情况下，使变压器空载运行 12~24h，记录环境温度与变压器上部油温；当油温升至 75℃时，启动 1~2 组冷却器进行散热，继续测量并记录油温，直到油温稳定为止。

##### 2. 变压器的负载试运行

若变压器空载运行 24h 无异常，即可转入负载试运行。具体做法如下：

(1) 负载的加入要逐步增加，一般从 25% 负载开始投运，接着增加到 50%、75%，最后满负载试运行，这时各密封面及焊缝不应有渗漏油现象。

- (2) 在带负载试运行中,随着变压器温度的升高,应陆续启动一定数量的冷却器。
- (3) 带负载试运行的时间为从达到满负载时起运行 2h 即可。
- (4) 在带负载试运行中,尤其是满负载试运行中,当检查变压器本体及各组、附件均正常时,即可结束带负载试运行工作。
- (5) 新带负载的变压器,应增加检查次数,同时注意油面温升,超过 45K 时应发出信号。

### 3. 变压器投入运行时的操作

(1) 强油循环的变压器在投运前应先启用其冷却装置,对强油循环水冷变压器,应先投入油系统,再启用水系统。水冷却器冬季停用后应将水全部放净。

(2) 如有断路器,必须使用断路器进行投运;如无断路器,在规定容量范围内可用隔离开关进行投运。

(3) 变压器的通电,应当由装有保护装置的电源侧进行。

(4) 在 110kV 及以上中性点直接接地的系统中,投运变压器时,必须事先将中性点接地。

(5) 满足以上条件要求后,才开始做投入操作,首先合好保护压板及操作电源开关,然后合一、二次隔离开关,合一次断路器,检查变压器一切正常后,再合二次断路器。

(6) 合闸后,仔细观察变压器运行情况,并检查各仪表指示是否正常。所有开关位置指示牌及指示灯应反应正常。

(7) 及时收取气体继电器的气体,因为变压器初投运 24h 内,气体继电器动作是正常的,对收集的气体化验,看其是否可燃。要求挡板式气体继电器的重瓦斯触点应用于断路器分闸,无故障冲击电流时,不应动作。

(8) 并列的变压器在并列后,要注意各变压器的负载分配情况,如果两台变压器负载分配的不平衡度超过 20%,应解列运行。

## 二、变压器的并联运行

### 1. 变压器并联运行的概念

变压器的并联运行就是将两台或两台以上的变压器一次绕组接到一次共同母线上,二次绕组也连接到二次共同母线上,以这种方式运行的变压器称为并联运行,其接线示意图如图

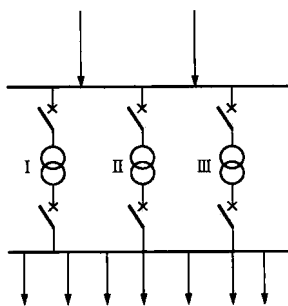


图 1-4 变压器并联运行接线示意图

1-4 所示。

### 2. 变压器并联运行的优点

(1) 满足了大电网中用单台变压器在容量上很难满足的要求。

(2) 能够提高供电的可靠性。如某台变压器发生故障切除后,另一台可继续供电。

(3) 可根据负荷的大小调整投入运行的台数,降低了变压器运行中的损耗,提高了电网的经济运行水平。

(4) 有利于变压器的定期检修。

(5) 减少了发电厂、变电站的一次投资。

### 3. 变压器并联运行的条件和允许偏差范围

(1) 联结组别相同。联结组别不同时,各变压器二次电压相位不同,最少有  $30^\circ$  的相位

差，此相位差将在并联的变压器间产生循环电流，这是不允许的，所以并联变压器的接线组别必须相同。

(2) 额定电压比相同、额定电压相同。如果并联运行的各变压器额定电压比不同，二次电压相量间必有电位差而引起循环电流。有时虽额定电压相同，但实际电压比也略有差异，为了减少误差引起的循环电流，所以要求并联运行的变压器变比间的差值一般不应超过 0.5%，最多不得超过 1%。

(3) 额定阻抗电压相同。阻抗电压允许偏差为  $\pm 10\%$ ，因为实际上也不可能保持相同，所以即使额定阻抗电压不相同，而实际值相近（小容量者阻抗电压正偏差，大容量者阻抗电压负偏差）的变压器也可并联运行。并联运行变压器的负载分配与阻抗电压成反比，阻抗电压小的先满载，所以使容量大的变压器阻抗电压偏小为好。

### 三、电力变压器允许运行方式

#### 1. 额定运行方式

(1) 变压器应在额定使用条件（额定容量、额定电压等）下运行。

(2) 当变压器上层油温升高不超过  $50^{\circ}\text{C}$ 、周围温度不超过  $20^{\circ}\text{C}$  时，允许变压器在  $60\% \sim 100\%$  额定负载下暂停冷却装置（强迫油循环除外）。当负载达到或超过额定值时，必须启用冷却装置。

(3) 装有风冷及强迫油循环的变压器，视负载及温升情况，按厂家规定的冷却装置投入运行。

(4) 油浸式变压器最高上层油温度，可按表 1-1 的规定运行（用温度计测量）。变压器的最高允许上层油温度需按制造厂家给出的数据确定，但不准超过  $95^{\circ}\text{C}$ ，一般情况下，为避免变压器油及绝缘材料的快速老化，上层油温应限制在  $85^{\circ}\text{C}$  以下，其温升不超过  $50^{\circ}\text{C}$ 。

表 1-1 油浸式变压器最高上层油温度

冷却方式	冷却介质最高温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	最高上层油温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
自然循环、自冷、风冷	40	95
强迫油循环风冷	40	85
强迫油循环水冷	30	70

(5) 对其他一些变压器（如热带型油浸式变压器、整流变压器、试验变压器、干式变压器等）的各部分温升极限，可参阅有关手册。

(6) 额定负载时上层油温度低于表 1-1 规定值不代表该变压器可以过载运行。如果已改造过变压器冷却方式和结构，应通过温升试验结果确定变压器负载大小。

(7) 对于三绕组和自耦变压器的每一绕组，其负载不得超过其额定值。

(8) 变压器二次电压需要变动时，可切换一次侧的分接开关位置，但切换后的二次实际电压不能超过铭牌上分接头额定电压的 5%。

(9) 无载调压变压器在额定电压  $\pm 5\%$  范围内改变分接头位置时，其额定容量不变，如接在 7.5% 和 10% 分接头时，则额定容量相应降低 2.5% 和 5%。

#### 2. 变压器过负载运行

正常运行时，变压器负载一般不应超过其额定容量，但变压器运行中的负载是经常变化的，负载曲线有高峰和低谷，因此在特殊情况下（如高峰期），变压器应当可以在规定的范

围内过负载运行。

变压器在运行中冷却介质的温度也是经常变化的，夏季油温高，绝缘寿命缩短；冬季油温低，绝缘寿命延长。因此，如按年等效环境温度考虑时，冬夏相互补偿，不降低变压器的正常使用寿命。由此可知变压器正常过负载能力是根据全天负载曲线、冷却介质温度以及过负载前变压器所带的负载大小来确定的。

过负载运行包括正常过负载和事故过负载两种情况。

(1) 正常过负载可根据过负载前的上层油温升，参照表 1-2 规定的数值，确定允许过负载倍数及允许的过负载持续时间。

表 1-2 自然冷却或风冷却油浸式变压器的过负载倍数及允许的过负载持续时间 min

过负载倍数	过负载前上层油的温升 (°C)					
	18	24	30	36	42	48
1.05	350	325	290	240	180	90
1.10	230	205	170	130	85	10
1.15	170	145	110	80	35	
1.20	125	100	75	45		
1.25	95	75	50	25		
1.30	70	50	30			
1.35	55	35	15			
1.40	40	25				
1.45	25	10				
1.50	15					

(2) 事故过负载，并非指变压器发生事故情况下的过负载运行，而只指当两台变压器并列运行时，其中有一台变压器发生故障而又不能停电时，由未发生故障的一台变压器来承担两台变压器所供的负载，这种过负载称为事故过负载。

变压器的允许事故过负载倍数和时间应按制造厂的规定执行。若制造厂无规定，对于油浸式变压器可参照表 1-3 和表 1-4 的规定。

干式变压器可参照制造厂的规定，如无制造厂的规定，过负载运行时间不得超过表 1-5 的规定。

对于油浸风冷变压器，在风扇停止工作时，当上层油温不超过 55°C 时，可在不开风扇情况下，在额定负载下运行，其运行时间参照表 1-6。强油循环风冷及强油循环水冷的变压器，当切除全部冷却器时，在额定负载下当容量为 120MVA 及以下时，允许运行 20min；当容量为 120MVA 以上时，允许运行 10min。运行后，如果油面温度尚未达到 75°C，则允许上升到 75°C，但切除冷却器后的最长运行时间不得超过 1h。

表 1-3 油浸自然循环冷却变压器事故过负载允许运行时间 h: min

过负载倍数	环境温度 (°C)				
	0	10	20	30	40
1.1	24: 00	24: 00	24: 00	19: 00	7: 00

续表

过负载倍数	环境温度 (°C)				
	0	10	20	30	40
1.2	24: 00	24: 00	13: 00	5: 50	2: 45
1.3	23: 00	10: 00	5: 30	3: 00	1: 30
1.4	8: 30	5: 10	3: 10	1: 45	0: 55
1.5	4: 45	3: 10	2: 00	1: 10	0: 35
1.6	3: 00	2: 05	1: 20	0: 45	0: 18
1.7	2: 05	1: 25	0: 55	0: 25	0: 09
1.8	1: 30	1: 00	0: 30	0: 13	0: 06
1.9	1: 00	0: 35	0: 18	0: 09	0: 05

表 1-4 油浸强迫油循环冷却的变压器事故过负载允许运行时间 h: min

过负载倍数	环境温度 (°C)				
	0	10	20	30	40
1.1	24: 00	24: 00	24: 00	14: 30	5: 10
1.2	24: 00	24: 00	8: 00	3: 30	1: 35
1.3	11: 00	5: 10	2: 45	1: 30	0: 45
1.4	3: 40	2: 10	1: 20	0: 45	0: 15
1.5	1: 50	1: 10	0: 40	0: 16	0: 07
1.6	1: 00	0: 35	0: 16	0: 08	0: 05
1.7	0: 30	0: 15	0: 09	0: 05	—

表 1-5 干式变压器过负载允许运行时间

过负载倍数	允许运行时间 (min)	过负载倍数	允许运行时间 (min)
1.20	120	1.30	80
1.40	45	1.50	20
1.60	10		

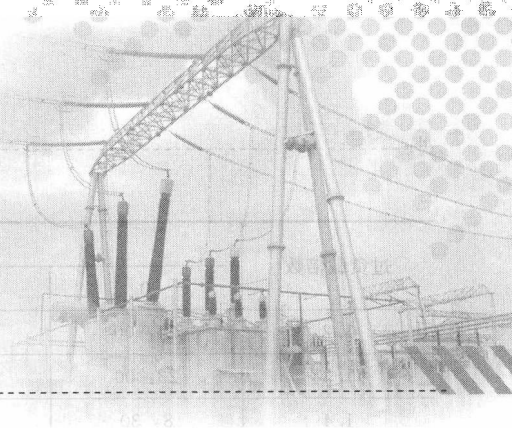
表 1-6 切除风扇时允许变压器的运行时间

空气温度 (°C)	-15	-10	0	10	20	30	40
额定负载下允许运行时间 (h)	60	40	16	10	5	3	0.2

注 表中规定是在无制造厂家规定时参考, 如果有厂家规定, 应按厂家规定进行。

04	08	05	01
24.2	21.00	13.41	24.00
1.30	21.00	2.30	10.01
0.82	1.42	1.10	2.10

## 第二章



上述电介质的四种极化形式，从施加电场开始，到极化完成为止，都需要一定的时间，这个时间有长有短。属于弹性极化的，极化建立所需的时间都很短，不超过  $10^{-12}$  s。属于松弛极化的，极化时间都较长，如热离子位移极化在  $10^{-3} \sim 10^{-2}$  s 以上。夹层极化则时间更长，在  $10^{-1}$  s 以上，甚至以小时计。弹性极化在极化过程中不消耗能量，因此不产生损耗。松弛极化则要消耗能量，并产生损耗。

## 2. 电介质的电导与性能

(1) 电介质的电导。电介质中的电导，可分为离子电导和电子电导。离子电导以离子为载流体，电子电导以自由电子为载流体。理想的电介质是不含带电质点的，更没有自由电子。但实际工程上所用的电介质或多或少总含有一些带电质点（主要是杂质离子），这些离子与电介质分子联系非常弱，甚至成自由状态。有些电介质在电场或外界因素影响下（如紫外线辐射），本身会离解成正负离子，它们在电场作用下沿电场方向移动，形成电导电流，这就是离子电导。电介质中的自由电子，则是在高电场作用下，离子与电介质分子碰撞、游离激发出来的，这些电子在电场作用下移动，形成电子电导电流。当电介质中出现电子电导电流时，表明电介质已经被击穿，因而不能再作绝缘体使用。因此，一般说电介质的电导都是指离子电导。

(2) 电介质的电导与温度的关系。电介质的电导与温度有关，它和松弛极化中的热粒子极化类似，都是由附着在电介质分子上的带电质点，在电场作用下沿电场方向位移形成的。不同的是热离子极化中带电质点与电介质分子联系较强，当受电场作用时，它们只在有限范围内有规则地移动一点，仍然是束缚电荷的性质；而离子电导中的带电质点与电介质分子联系较弱，在电场作用下，则顺电场方向移动成为电流。上述两种情况，在没有外加电场时，带电质点在电介质分子周围某平衡位置附近并随分子作不规则的混乱的热运动，温度越高，带电质点热运动的动能越大，就更易跳越原来的平衡位置，在电场作用下就更易顺电场方向移动。因此，温度越高，不论是热离子极化随时间衰减的吸收电流，还是离子电导的恒定电导电流，都要相应地增加，或电介质的绝缘电阻相应地减小。

## 3. 电介质的损耗及等效电路

如果电介质中没有损耗（即没有电导，没有游离，也没有松弛极化），则在交变电场作用下，完全是由弹性极化所引起的纯电容电流  $\dot{I}_C$ ，且  $\dot{I}_C$  超前电压  $90^\circ$ 。在有损耗的电介质中流过的电流，由于含有有功分量，所以它超前电压一个角度  $\varphi$ ， $\varphi$  小于  $90^\circ$ 。 $\delta$  是  $\varphi$  的余角，称为介质损耗角（见图 2-1）。 $\delta$  的大小决定于电介质中有功电流与无功电流之比，如将电介质看成由一个电阻  $R$  与一个理想的无损耗电容  $C$  并联而成的等效电路，则由图 2-1 (b) 可得

$$\tan\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U/R}{U\omega C} = \frac{1}{\omega CR} \quad (2-1)$$

$$P = U \times \frac{U}{R} = U^2 \omega C \tan\delta \quad (2-2)$$

$$I = U\omega C \times \frac{1}{\cos\delta} \approx U\omega C \quad (2-3)$$

式中  $P$ ——电介质损耗的功率；

$I$ ——电介质中的总电流；



$\omega$ ——角频率。

由上面等效电路的分析计算可知，电介质损耗功率  $P$  与外加电压的二次方和电源频率成正比。如外加电压和频率不变，则电介质损耗与  $\tan\delta$  也成正比。对于固定形状和结构的被试品，如果其电容  $C$  与介电常数  $\epsilon$  成正比，则电介质损耗  $P \propto \epsilon \tan\delta$ 。但对同类型电介质构造的被试品，其  $\epsilon$  是定值，故对同类被试品绝缘的优劣，可直接以  $\tan\delta$  的大小来判断。

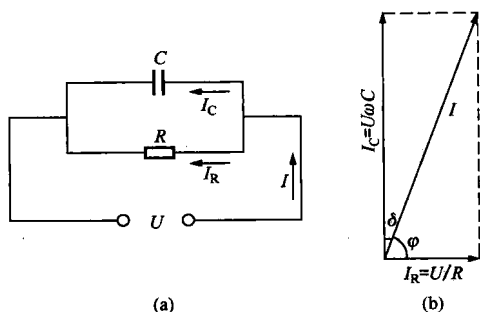


图 2-1 电介质损耗的并联等效电路

(a) 等效电路；(b) 相量图

#### 4. 电介质的击穿

当施加于电介质上的电压超过某临界值时，则使通过电介质的电流剧增，电介质发生破裂或分解，直至电介质丧失固有的绝缘性能，这种现象叫做电介质击穿。电介质发生击穿时的临界电压值称为击穿电压  $U$ ，击穿时的电场强度称为击穿场强  $E$ 。在均匀电场中  $E$  和  $U$  的关系为

$$E = \frac{U}{\delta} \quad (2-4)$$

式中  $\delta$ ——击穿处电介质的厚度。

## 二、过电压基本概念

电力系统的各种电气设备在运行中除了要承受正常的系统电压外，还会受到各种过电压的作用。像自然界中的雷电，落雷时，往往会击中架空电力输电线，造成输电线上出现过电压（直击雷），或落在其附近，促使未被直接击中的导线上也会有过电压形成（感应雷）；在电力系统中由于断路器操作、系统故障或其他原因使系统参数发生变化，引起电网内部电磁能量的转化或传递也会造成电压升高。根据过电压产生的途径，将过电压分为外部过电压和内部过电压两大类。

(1) 外部过电压一般指雷电过电压。

(2) 内部过电压是指电力系统中由于断路器操作，系统故障或其他原因，使系统参数发生变化，引起电网内部电磁能量的转化或传递所造成的电压升高。

内部过电压又分因倒闸操作或系统故障引起的暂态电压升高，称操作过电压；因系统中的电感电容参数配合不当，出现各种持续时间很长的谐振现象及其电压升高，称谐振过电压；因电力系统中在正常或故障时可能出现幅值超过最大工作相电压，频率为工频或接近工频的电压升高，称工频电压升高，或称工频过电压。

## 三、电力系统绝缘配合基本概念

### 1. 绝缘配合的目的

随着电网电压等级的提高，输变电设备的绝缘部分在费用总投资中的比重越来越大，超高压系统更为显著。绝缘配合的目的是根据电网中出现的各种电压（工作电压和过电压）和保护装置的特性来确定设备的绝缘水平，还要全面考虑设备造价、维护费用和事故损失三方面，力求达到安全、经济和高质量供电的目的。

### 2. 绝缘配合的原则

对 220kV 及以下系统，一般以雷电过电压决定系统的绝缘水平，就是以避雷器的残压为基础确定设备的绝缘水平，并保证输电线路有一定的耐雷水平。由于这样决定的绝缘水平在正常情况下具有能耐操作过电压的作用，因此 220kV 及以下系统不采用专门限制内部过