

# 变压器

## 实用技术问答

河南省电力公司郑州供电公司 组 编  
郭清海 主 编  
彭 磊 副主编



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 变压器 实用技术问答

河南省电力公司郑州供电公司 组 编  
郭清海 主 编  
彭 磊 副主编  
管晓峰 李 璐 邝 石 参 编



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书对变压器的原理及运行、附件和结构、检修、安装试验、互感器等方面以知识问答的形式做了完整的介绍。全书共分6章600个问题，立题新颖，解答细致，注重对实际工作中的经验总结，是一本实用性很强的技术读物。

本书对从事变压器类产品制造和运行、维护、检修的人员最为适用，对与变压器相关专业的工程技术人员和大中专院校师生也有一定的参考价值。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

变压器实用技术问答/郭青海主编，河南省电力公司郑州供电公司组编. —北京：中国电力出版社，2010.9

ISBN 978-7-5123-0577-9

I. ①变… II. ①郭… III. ①变压器-问答 IV. ①TM4-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 117431 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2011年1月第一版 2011年1月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 12印张 294千字

印数 0001—3000册 定价 25.00元

## 敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有      翻 印 必 究

# 前 言

随着科技的进步,电力事业不断发展,电力系统的容量不断增加、高压及超高压供电用户不断增多、新型技术和设备不断涌现及供电系统人员迅猛增长对供电职工、工矿企事业单位的运行值班、检修工的规范化管理以及整体素质都提出更高要求。

变压器是电力系统的重要设备,正确、迅速地对变压器的运行状况进行判断分析,主要取决于他们对变压器的熟悉及掌握情况。为了适应电力生产安全、经济、稳定运行的需要,提高电力职工的技术素质和业务水平,从电力生产的实际水平出发,作者编写了本书。

《变压器实用技术问答》对变压器的原理及运行、附件和结构、检修、安装、试验、互感器 6 个方面以知识问答的形式做了完整的介绍。本书立题新颖,有针对性;解答细致,通俗易懂。各题之间层次分明,条理清楚,承上启下,互为贯通。本书引用的一些数据图表和所采用的术语尽量符合国家标准和 IEC 国际电工委员会标准。

为了保证本书的编写质量,各编写单位挑选了有丰富实践经验的一线工作人员直接参加编写,编写单位给予了大力度的支持,编写提纲和初稿均由编写单位组织审定,又经多位专家审稿会审,并组成了本书的编写人员。

本书主要注重对实际工作中的经验总结,对没有经过系统专业培训的广大电业值班工、检修工及现场工程技术人员有较高的参考价值,也可供电力系统及社会电工中电气运行、检修人员选用,还可作为中等专业学校及技工学校教学参考用书。

本书在编写过程中,参阅了大量的有关资料,并得到了许多专家的指导,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏之处,望广大读者批评指正。

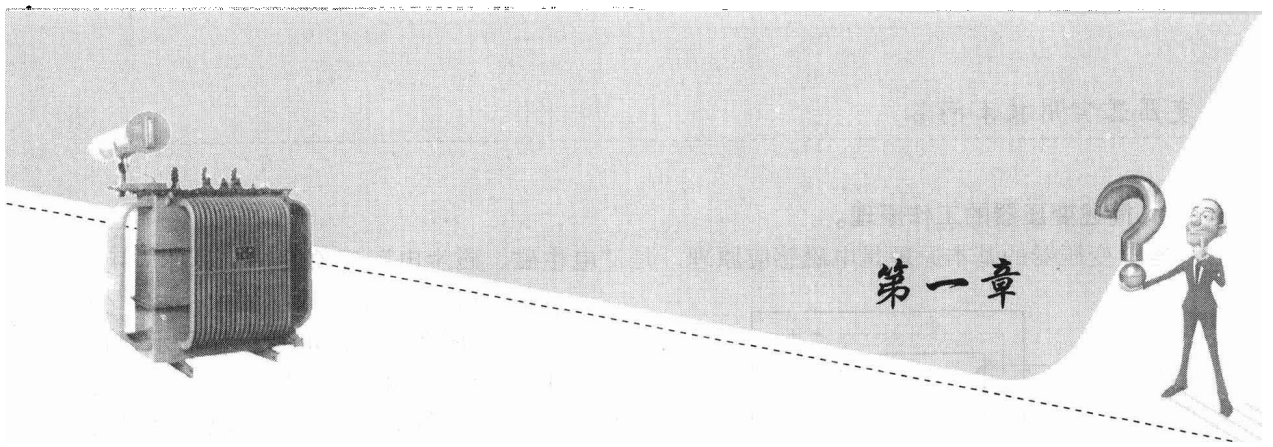
编 者

2010 年 8 月

# 目 录

前言

|                  |     |
|------------------|-----|
| 第一章 变压器原理及运行     | 1   |
| 第一节 变压器的原理       | 1   |
| 第二节 变压器的运行       | 7   |
| 第二章 变压器附件和结构     | 23  |
| 第一节 变压器铁芯        | 23  |
| 第二节 变压器绕组        | 29  |
| 第三节 有载调压装置       | 35  |
| 第四节 变压器套管        | 41  |
| 第五节 变压器油箱和冷却装置   | 45  |
| 第六节 变压器保护装置      | 49  |
| 第七节 绝缘和变压器油      | 57  |
| 第三章 变压器的检修       | 66  |
| 第一节 变压器本体检修      | 66  |
| 第二节 变压器套管检修      | 82  |
| 第三节 变压器调压装置检修    | 84  |
| 第四节 变压器油箱和冷却装置检修 | 90  |
| 第五节 变压器保护装置检修    | 93  |
| 第六节 变压器油处理       | 97  |
| 第七节 变压器的检修周期和工艺  | 99  |
| 第四章 变压器的安装       | 112 |
| 第一节 变压器安装前的准备    | 112 |
| 第二节 变压器安装作业      | 115 |
| 第三节 变压器的验收       | 124 |
| 第五章 变压器的试验       | 127 |
| 第一节 试验分类         | 127 |
| 第二节 变压器绝缘试验      | 131 |
| 第三节 变压器特性试验      | 148 |
| 第四节 变压器油试验       | 159 |
| 第六章 互感器          | 172 |
| 第一节 电压互感器的原理和检修  | 172 |
| 第二节 电流互感器的原理和检修  | 179 |
| 参考文献             | 186 |



## 第一章

# 变压器原理及运行

## 第一节 变压器的原理

### 1. 什么是变压器？

答：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器。

### 2. 常用的变压器有哪些种类？

答：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、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、整流变压器、电焊变压器、控制变压器、冲击变压器）。

(2) 按绕组结构分有双绕组变压器、三绕组变压器、自耦变压器。

(3) 按铁芯结构分有芯式变压器和壳式变压器。

(4) 按相数分有单相变压器、三相变压器、多相变压器。

(5) 按冷却方式分有油浸变压器（油浸自冷、油浸风冷、油浸水冷、强迫油循环风冷、强迫油循环水冷），干式变压器和充气式变压器。

(6) 按调压方式分有无励磁（无载）调压变压器、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。

### 3. 变压器在电力系统中的主要作用是什么？其基本原理是什么？

答：变压器在电力系统中的主要作用是变换电压，以利于功率的传输。电压经升压变压器升压后，可以减少线路损耗，提高送电的经济性，达到远距离送电的目的；降压变压器能把高电压变为用户所需要的各级使用电压，满足用户需要。

变压器是一种按电磁感应原理工作的电气设备，当一次绕组加上电压、流过交流电流时，在铁芯中就产生交变磁通。磁通中的大部分交链着二次绕组，称它为主磁通。在主磁通的作用下，两侧的线圈分别产生感应电动势，电动势的大小与匝数成正比。变压器的一、二次绕组匝数不同，这样就起到了变压作用。

变压器一次侧为额定电压时，其二次侧电压随着负载电流的大小和功率因数的高低而变化。

#### 4. 简述变压器的工作原理。

答：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。

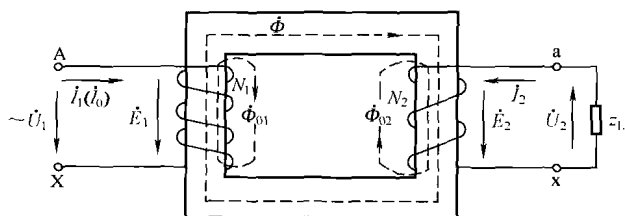


图 1-1 变压器工作原理图

现以单相双绕组（或三相中一相）变压器为例来说明，如图 1-1 所示，它由两个绕组和一个铁芯组成。

当匝数  $N_1$  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  $I_0$  就在铁芯中产生主磁通  $\dot{\Phi}$ ，以及经铁芯外回路中漏磁通  $\dot{\Phi}_0$  交

变的  $\dot{\Phi}$  在一、二次绕组中感应出电动势  $E_1$  和  $E_2$ ，二次绕组  $ax$  就有电压  $U_2$ 。当二次绕组接有负载  $z_L$  时，就有二次电流  $I_2$  流过，而此时的一次电流就由空载时的  $I_0$  增加到  $I_1$ 。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

$$U_1 = E_1 = 4.44fN_1\Phi_m = 4.44fN_1B_mS$$

$$U_2 = E_2 = 4.44fN_2\Phi_m = 4.44fN_2B_mS$$

式中  $f$ ——频率；

$N_1$ 、 $N_2$ ——分别为一、二次绕组的匝数；

$\Phi_m$ ——主磁通的最大值；

$B_m$ ——主磁感应强度的最大值；

$S$ ——铁芯截面积。

如令变比

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

即

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

可见，一、二次绕组的电压比就等于匝数比。因此，只要改变两个绕组中任一个的匝数，就可改变一、二次绕组的电压比，从而实现改变电压的目的。

当二次绕组接有负载  $z_L$  时，二次绕组就有电流  $I_2$  流过，一次绕组电流由  $I_0$  变为  $I_1$ ，根据磁势平衡方程式

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0$$

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

由于外加电压  $U_1$  不变， $\Phi$  不变（空载时和负载时主磁通稍有不同）， $I_0 N_1$  不变，所以当二次电流  $I_2$  改变时，一次电流  $I_1$  就要随着改变。当忽略  $\dot{F}_0$  ( $I_0 N_1$ ) 时，磁势平衡方程式就成为  $\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = 0$ ，即

$$\left| \frac{I_1}{I_2} \right| = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k} = \frac{U_2}{U_1}$$

可见，电流的变换关系与电压的变换关系正好相反。

一、二次绕组的容量关系  $S_1 = I_1 U_1 \approx S_2 = I_2 U_2$ 。

#### 5. 如何用电压方程式分析变压器，各相量正方向通常是如何规定的？

答：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。图 1-1 各相量的标注是按上述原则标注的，即：

- (1) 一次电压  $U_1$  正方向由 A 指向 X 为正。
- (2) 一次电流  $I_1$  ( $I_0$ ) 正方向与  $U_1$  正方向产生的电流一致时为正。
- (3) 主磁通  $\Phi$  的正方向与一次电流  $I_1$  符合“右螺旋”定则时为正。
- (4) 一次电动势  $E_1$ ，二次电动势  $E_2$  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  $I_2$  的正方向与  $E_2$  正方向一致时为正。
- (6) 二次电压  $U_2$  的正方向与  $I_2$  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，图 1-1 的电压方程式为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1 \\ \dot{U}_2 &= -\dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 - j\dot{I}_2 x_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 z_2 \end{aligned} \right\}$$

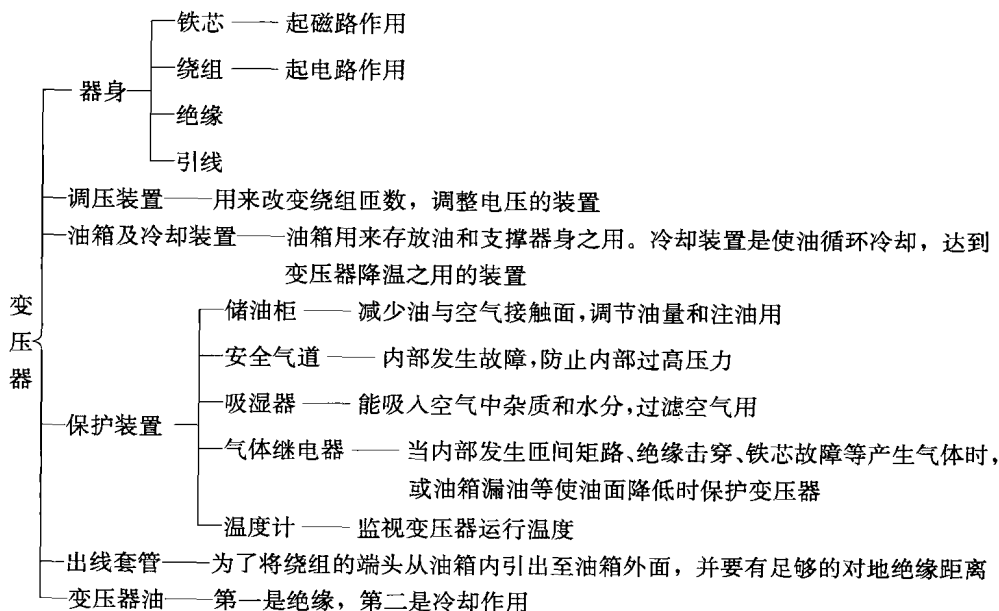
$$z_1 = r_1 + jx_1$$

$$z_2 = r_2 + jx_2$$

式中  $z_1$ 、 $z_2$  —— 二次侧的阻抗；  
 $r_1$ 、 $r_2$  —— 二次侧绕组电阻；  
 $x_1$ 、 $x_2$  —— 二次侧漏磁感抗。

## 6. 变压器的基本结构由哪些部分组成？扼要说明各部件的主要作用。

答：变压器的基本结构和各部件的作用如下。



## 7. 变压器主要技术参数的含义是什么？

答：(1) 额定容量：指变压器在额定电压、额定电流时连续运行所输送的容量。

(2) 额定电压：指变压器长时间运行所能承受的工作电压。



(3) 额定电流：指变压器在额定容量下，允许长期通过的电流。

(4) 容量比：指变压器各侧额定容量之比。

(5) 电压比：指变压器各侧额定电压之比。

(6) 短路损耗（铜损）：指变压器一、二次电流流过一、二次绕组，在绕组电阻上所消耗的能量之和。铜损与一、二次电流的平方成正比。

(7) 空载损耗（铁损）：指变压器在额定电压时，变压器铁芯所产生的损耗。铁损包括励磁损耗和涡流损耗。

(8) 空载电流：指变压器在额定电压下空载运行时，一次侧通过的电流（不是指刚合闸瞬间的励磁涌流峰值，而是指合闸后的稳态电流）。

(9) 百分比阻抗（短路电压）：指变压器二次绕组短路，使一次侧电压逐渐升高，当二次绕组的短路电流达到额定值时，此时一次侧电压与额定电压比值百分数。

变压器的容量与短路电压的关系是：变压器容量越大，其短路电压越大。

### 8. 试述 ONAN/ONAF/OFAF 的含义。

答：ONAN/ONAF/OFAF 表示变压器带有油泵和风扇的冷却设备，规定了在自然冷却、不启动油泵吹风冷却、启动油泵并吹风冷却 3 种冷却方式下的容量限制。

### 9. 什么叫变压器的联结组别？常用的有哪几种？

答：为了表明变压器各侧线电压的相位关系，将三相变压器的接线分为若干组，称为接线组别。

常用的有 Yyn12、Yd11、0-YNd12d11 接线，500kV 主变压器常采用 0-YNd12d11。

### 10. 变压器绝缘电阻是什么？

答：变压器的绝缘电阻是指变压器绕组对油箱及各绕组之间的绝缘电阻值，可用绝缘电阻表测量，摇测时自绝缘电阻表转速正常开始，至 60s 时读取的指示值  $R_{60}$  (MΩ) 即为其绝缘电阻。

### 11. 什么是变压器的吸收比？

答：GB/T 6451—2008《油浸式电力变压器技术参数和要求》规定了制造厂要向使用部门提供 60s 的绝缘电阻  $R_{60}$  和 15s 的绝缘电阻  $R_{15}$  的比值，我们把这两个绝缘电阻的比值称之为吸收比。

### 12. 变压器的绝缘是怎样划分的？

答：变压器的绝缘可分为内绝缘和外绝缘，内绝缘是指油箱内的各部分绝缘，外绝缘是指套管上部对地和彼此之间的绝缘。内绝缘又可分为主绝缘和纵绝缘两部分。主绝缘是绕组与接地部分之间以及绕组之间的绝缘。在油浸式变压器中，主绝缘以油纸屏障绝缘结构最为常用。纵绝缘是同一绕组各部分之间的绝缘，如不同线段间、层间和匝间的绝缘等。通常以冲击电压在绕组上的分布作为绕组纵绝缘设计的依据，但匝间绝缘还应考虑长期工频工作电压的影响。

### 13. 什么叫变压器的分级绝缘？什么叫变压器的全绝缘？

答：分级绝缘就是指变压器的绕组靠近中性点的主绝缘水平比绕组端部的绝缘水平低。



相反,若变压器首端与尾端绝缘水平一样就称为全绝缘。

**14. 变压器内部主要绝缘材料有哪些?**

答:变压器内部主要绝缘材料有变压器油、绝缘纸板、电缆纸、皱纹纸。

**15. 变压器温度与使用寿命关系如何?**

答:变压器的使用寿命与温度有密切关系。绝缘温度经常保持在  $95^{\circ}\text{C}$  时,使用年限为 20 年;温度为  $105^{\circ}\text{C}$ ,约为 7 年;温度为  $120^{\circ}\text{C}$ ,约为两年;温度为  $170^{\circ}\text{C}$ ,仅为 10~12 天。

**16. 什么叫绝缘老化?什么是绝缘寿命六度法则?**

答:变压器中所使用的绝缘材料,长期在温度的作用下,会逐渐降低原有的绝缘性能,这种绝缘在温度作用下逐渐降低的变化,叫做绝缘的老化。

所谓绝缘寿命六度法则是指变压器用的电缆纸,在  $80\sim 140^{\circ}\text{C}$  的范围内,温度每升高  $6^{\circ}\text{C}$ ,绝缘寿命将要减少一半。

**17. 三绕组变压器绝缘电阻测量部位有哪些?**

答:三绕组变压器测量绝缘电阻的部位是:①高压绕组对中、低压绕组和油箱及铁芯;②中压绕组对高、低压绕组和油箱及铁芯;③低压绕组对高、中压绕组和油箱及铁芯;④高、中压绕组对低压绕组和油箱及铁芯;⑤高、低压绕组对中压绕组和油箱及铁芯;⑥中、低压绕组对高压绕组和油箱及铁芯;⑦高、中、低压绕组对油箱及铁芯。

**18. 为什么降压变压器的低压绕组在里边,而高压绕组在外边?**

答:这主要是从绝缘方面考虑的。因为变压器的铁芯是接地的,低压绕组靠近铁芯,容易满足绝缘要求。若将高压绕组靠近铁芯,由于高压绕组的电压很高,要达到绝缘要求就需要很多绝缘材料和较大的绝缘距离,既增加了绕组的体积,也浪费了绝缘材料。另外,把高压绕组安置在外面也便于引出到分接开关。

**19. 什么是变压器的外绝缘、内绝缘?**

答:外绝缘是指变压器外部套管之间及套管对地部分之间的绝缘,主要是空气间隔、瓷套管。内绝缘是指变压器油箱内部引线、引出线、组件和绕组各部分的绝缘。

**20. 什么是变压器的主绝缘、纵绝缘?**

答:主绝缘是指绕组对其他部分的绝缘,包括对油箱的绝缘,对铁芯、夹件和连接片的绝缘,同一相的不同电压各绕组之间的绝缘以及不同相绕组之间的绝缘。

纵绝缘是指每个绕组本身的内部绝缘,它包括匝间绝缘、层间绝缘、段间绝缘以及线段与静电板间的绝缘。

**21. 绝缘材料的耐热等级分为哪几级?使用的极限温度各是多少度?**

答:绝缘材料有 Y、A、E、B、F、H、C 7 个耐热等级。它们的极限温度依次分别是 90、105、120、130、155、180、 $180^{\circ}\text{C}$ 。

**22. 电力变压器绕组常用的绝缘件有哪些?**

答:主要有胶木筒(或纸板筒)、端绝缘、层绝缘、油道撑条、静电屏和静电板、垫块、

角环、绝缘端圈等。

### 23. 简述变压器的额定容量、额定电压、额定电流的定义及它们之间的关系。

答：额定容量  $S_N$ ，变压器额定工况下输出的功率，因变压器本身功率损耗很小，可认为  $S_{N1} = S_{N2}$ ，单位是 kVA；

额定电压  $U_{1N}/U_{2N}$  对于三相变压器指线电压，单位是 kV；

额定电流  $I_{1N}/I_{2N}$  对于三相变压器指线电流，单位是 A；

对于单相变压器  $S_N = U_{1N}/I_{1N} = U_{2N}/I_{2N}$ ；对于三相变压器  $S_N = \sqrt{3}U_{N1}/I_{N1} = \sqrt{3}U_{N2}/I_{N2}$ 。

### 24. 怎样绘制变压器相量图？

答：为了直观的分析变压器电与磁之间的关系，常用相量图对变压器进行分析。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），这样就将变压器看成一、二次绕组匝数是相等的，于是可将一、二次各量画在同一图中。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。

(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  $\dot{E}'_2 (\dot{E}'_2 + \dot{E}'_1)$ 。

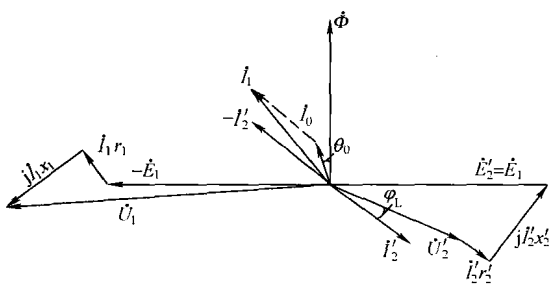


图 1-2 变压器感性负载时的相量图

(4) 根据  $\dot{\Phi} = j \frac{\dot{E}}{4.44 f N_1}$  作出相量  $\dot{\Phi}$ 。

(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  $\dot{U}'_2 = -\dot{E}'_2 + \dot{I}'_2 r'_2 + j \dot{I}'_2 x'_2$  作出相量  $\dot{U}'_1$ 。

图 1-2 所示为变压器感性负载时的相量图。

### 25. 怎样用等效电路来表示变压器？

答：为了定量的分析问题，可以利用比较简单易于进行计算的等值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  $k_2$ ，折算后的各量加上一撇表示。

折算后的二次电压方程式为

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 z'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 z'_2 - j \dot{I}'_2 x'_2$$

磁动势平衡方程式为

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

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  $\Gamma$  形等效电路，若忽略空载电流  $I_0$ 。不计  
时，就成为简化等效电路。图 1-3 所示为变压器 T 形、 $\Gamma$  形、简化等效电路。

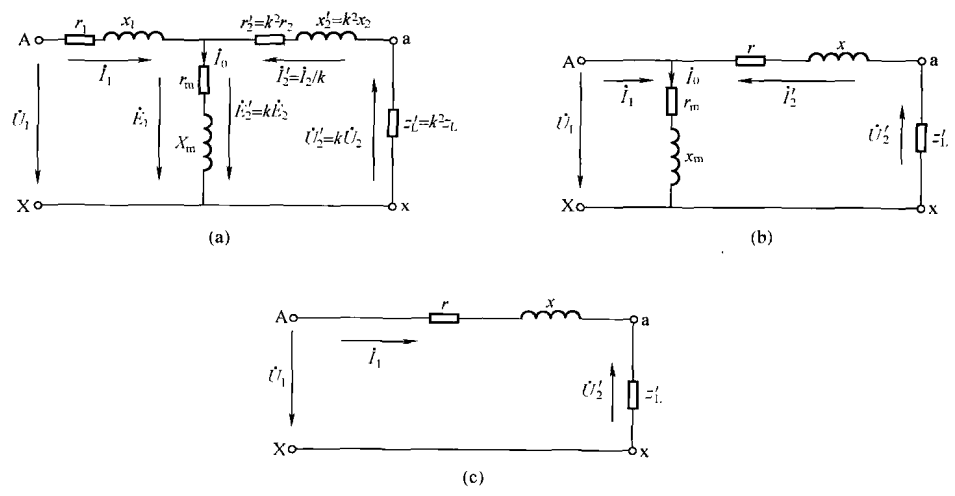


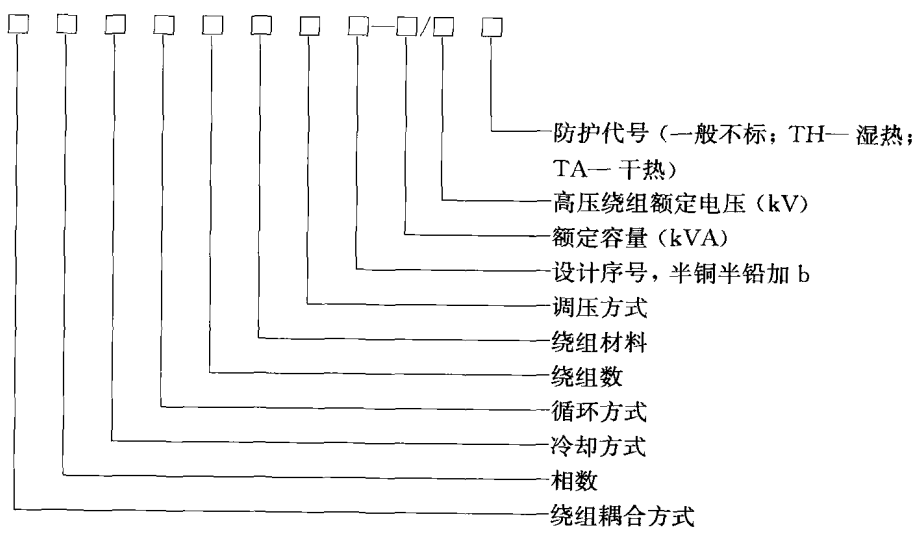
图 1-3 变压器等效电路图  
(a) T 形等效；(b)  $\Gamma$  形等效；(c) 简化等效

## 第二节 变压器的运行

### 1. 解释变压器型号标注的含义，并举例说明。

答：变压器的特征按分类是不能全面反映的，所以通常以型号来表示，变压器的型号除全面反映变压器的特征外，还标出额定容量、高压绕组额定电压等。

变压器型号的表示方法为：



如 SFPSZ - 63000/110 则表示三相强油循环风冷三绕组有载调压 110kV 容量为 630 000kVA 的变压器。变压器型号含义见表 1-1。



表 1-1 变 压 器 型 号 含 义

| 分类     | 类别     | 代表符号 |     |
|--------|--------|------|-----|
|        |        | 新型号  | 旧型号 |
| 绕组耦合方式 | 自耦     | O    | O*  |
| 相数     | 单相     | D    | D   |
|        | 三相     | S    | S   |
| 冷却方式   | 空气自冷式  | 不表示  | 不表示 |
|        | 风冷式    | F    | F   |
|        | 水冷式    | W    | S   |
|        | 强迫油循环  | P    | P   |
|        | 油浸风冷   | F    | F   |
|        | 油浸水冷   | W    | S   |
|        | 强油循环风冷 | FP   | FP  |
|        | 强油循环水冷 | WP   | SP  |
|        | 干式空气自冷 | G    | K   |
|        | 干式绕组绝缘 | C    | C   |
| 绕组数    | 双绕组    | 不表示  | 不表示 |
|        | 三绕组    | S    | S   |
|        | 分 裂    | F    | F   |
| 绕组导线材质 | 铜      | 不表示  | 不表  |
|        | 铝      | 不表示  | L   |
| 调压方式   | 无激磁调压  | 不表示  | 不表示 |
|        | 有载调压   | Z    | Z   |

\* O在前面表示降压变压器，O在后面表示升压变压器。

2. 电力变压器的主要技术参数有哪些？

答：电力变压器的主要技术参数有相数和频率、额定电压、额定电流、额定容量、绕组联结组别、分接范围、空载电流、空载损耗、短路电压（阻抗电压）、效率和调整率、温升和冷却方式，重量和尺寸、性能数据的允许偏差等。

3. 解释额定电压、额定容量、额定电流、温升等参数的含义，并说明对这些参数的要求及规定。

答：（1）额定电压。变压器的额定电压是变压器的重要数据之一，额定电压均以线电压的有效值表示，其大小与所连接的系统电压应相符合。具体来说，35kV 以下升压变压器高压侧高出相应电压的 5%，35kV 及其以上高出相应电压的 10%；降压变压器高压侧与相应电压相等。电网额定电压与变压器高压侧额定电压的关系见表 1-2。

（2）额定电压比（变比）。高压绕组与低压或中压绕组的额定电压之比。额定电压比 $\geq 1$ 。

表 1-2 电网额定电压与变压器高压侧额定电压的关系 单位：kV

| 电网额定电压等级         | 0.38 | 3    | 6   | 10   | 35   | 63 | 110 | 220 | 330 | 500 |
|------------------|------|------|-----|------|------|----|-----|-----|-----|-----|
| 降压变压器<br>高压侧额定电压 | 0.38 | 3    | 6   | 10   | 35   | 63 | 110 | 220 | 330 | 500 |
| 升压变压器<br>高压侧额定电压 | 0.4  | 3.15 | 3.3 | 10.5 | 38.5 | 69 | 121 | 242 | 363 | 550 |

(3) 额定容量。制造厂规定的额定工作状态下，变压器输出能力的保证值，以 kVA 表示。变压器的额定容量与绕组额定容量有所区别，双绕组变压器的额定容量即为绕组的额定容量；多绕组变压器应对每个绕组的额定容量加以规定，其额定容量为最大的绕组额定容量；当变压器容量因冷却方式而变更时，则额定容量是指最大的容量。

我国 1967 年以后的变压器额定容量等级是按 $\sqrt[10]{10}$ 倍数的 R10 系列，只有 30kVA 和 63 000kVA 以上的容量的等级有所不同，具体容量等级见表 1-3。

| 表 1-3 |     | 现行的变压器容量等级 |          |           | 单位：kVA |
|-------|-----|------------|----------|-----------|--------|
| 10    | 100 | 1000       | 10 000   | (120 000) |        |
|       | 125 | 1250       | 12 500   | (150 000) |        |
|       | 160 | 1600       | 16 000   | (180 000) |        |
| 20    | 200 | 2000       | 20 000   | (240 000) |        |
|       | 250 | 2500       | 25 000   | (360 000) |        |
| (30)  | 315 | 3150       | 31 500   |           |        |
|       | 400 | 4000       | 40 000   |           |        |
| 50    | 500 | 5000       | 50 000   |           |        |
| 63    | 630 | 6300       | 63 000   |           |        |
| 80    | 800 | 8000       | (90 000) |           |        |

注 组成三相变压器的单相变压器容量为表中数值的 1/3，其余用途的单相变压器与表中数值相同。

1967 年以前的变压器的额定容量等级是按 $\sqrt[8]{10}$ 倍数增加的 R8 系列，具体容量等级见表 1-4。

| 表 1-4 |     | 1967 年以前的变压器容量等级 |        | 单位：kVA |
|-------|-----|------------------|--------|--------|
| 10    | 100 | 1000             | 10 000 |        |
| 20    | 180 | 1800             | 20 000 |        |
|       | 320 | 3200             | 31 500 |        |
| 50    | 560 | 5600             | 40 500 |        |
|       | 750 | 7500             | 60 000 |        |

按传统习惯，变压器可按额定容量大致分为：小型变压器 ( $\leq 1600\text{kVA}$ )、中型变压器 ( $630\sim 6300\text{kVA}$ )、大型变压器 ( $8000\sim 63\,000\text{kVA}$ ) 和特大型变压器 ( $> 63\,000\text{kVA}$ )。

(4) 额定电流。变压器的额定电流是其线电流的有效值，由绕组的额定容量除以该绕组的额定电压及相应系数（单相为 1，三相为 $\sqrt{3}$ ）计算出来的。

(5) 温升。对空气冷却的变压器测量部分的温度与冷却空气温度之差为变压器的温升；对于水冷却变压器测量部分的温度与冷却器入口处水温之差为变压器的温升。对运行在海拔 1000m 以下的油浸式变压器的温升限值见表 1-5。

| 表 1-5       |                     | 油浸式变压器的温升值 |
|-------------|---------------------|------------|
| 部 位         | 温 值 (°C)            |            |
| 绕组、绝缘耐热等级 A | 65 (电阻法测量的平均温升)     |            |
| 顶层油         | 55 (温度计测量的温升)       |            |
| 铁芯本体        | 80 (使相邻绝缘材料不致损伤的温升) |            |
| 油箱及结构件表面    |                     |            |



**4. 变压器的损耗由哪几部分构成？为什么通常可将空载损耗视为铁损，短路损耗视为铜损？**

**答：**构成变压器的损耗是由铁芯损耗（不变损耗简称铁损），铜损（可变损耗）和附加损耗三部分组成。铁芯损耗又由磁滞损耗和涡流损耗两部分组成，铁损主要取决于电压的大小。铜损是由于绕组电阻通过电流产生的，取决于电流的大小。附加损耗很小，主要是铁芯接缝处的磁通密度分布不均或处于磁场中的各金属部分感应的涡流引起的，它随容量的增大而增大。

变压器空载损耗可以视为铁损是因为空载时虽绕组施加额定电压，但空载电流  $I_0$  很小，绕组电阻  $r_1$  的铜损很小，可忽略不计，所以可将空载损耗近似视为铁损。

变压器的短路损耗可以视为铜损是因为短路试验时绕组虽通过额定电流，但试验时施加的电压很低，变压器的铁损很小，可忽略不计，所以可将短路损耗近似视为铜损。

**5. 变压器的负载损耗都包括哪些方面？**

**答：**变压器带有负载时，负载电流在绕组电阻上产生的损耗  $I^2 R$ ，负载电流产生的漏磁通在绕组内部、引线、铁芯结构件、磁屏蔽及油箱箱壁等处所造成的杂散损耗，并绕导线和并联线段中的环流所产生的损耗之总和为变压器的负载损耗。

**6. 变压器的阻抗电压、短路阻抗是如何规定的？**

**答：**负载电流除了产生负载损耗之外，还在绕组中产生电压降落，使变压器在带有负载时的输出电压低于空载电压。以定电压的百分数（%）表示的这一电压的降落值称为该绕组的阻抗电压。阻抗电压中包括与负载损耗相对应的等效电阻上的压降分量和与绕组耦合的漏磁通相对应的漏抗上的压降分量。这两个分量的值无法分别直接测量出，而是在测出负载损耗和阻抗电压之后，用计算的方法分别求出。

阻抗电压、短路阻抗和负载损耗试验是在主分接位置、额定频率下，对变压器的一个绕组（通常是被试验一对绕组中电压较高的一个绕组）施加近似正弦波形的电流，另一绕组用足够大截面的导体短路，逐渐提高电源电压，使绕组中流过额定电流，这时输入变压器的功率就是该对绕组的负载损耗，而施加在励磁绕组出线端上的电压（三相变压器为线电压）便是该对绕组的阻抗电压，以每相欧姆数表示时，则名为短路阻抗。

**7. 什么是变压器的联结组别？**

**答：**由于变压器的高低压绕组间存在有极性关系，而三相变压器两侧都有 3 个绕组，因此它们之间就有一个怎样连接的问题，如连成星形 Y（y）或三角形 D（d）。对于三相变压器来说，除了三相间可有不同的连接方法之外，每相的一、二次绕组相别也可以互换，如原来的 A 相，可人为地把它改标为 B 相，B 相可标为 c 相等，这样就使三相变压器的一、二次绕组有不同的组合，从而使一、二次侧电压、电流各量的相位和大小的关系有好多种情况。为此在使用一台变压器时，首先要了解这台变压器的一、二次侧各量的相位关系，而这种关系的通用术语，就是所谓的变压器接线组别。也就是说，三相变压器的一次绕组和二次绕组间电压或电流的相位关系，叫做变压器的接线组别。

**8. 变压器的联结组别如何表示？**

**答：**由于相位关系就是角度关系，而变压器一、二次侧各量的相位差都是  $30^\circ$  的倍数，



因此可用同样有  $30^\circ$  倍数关系的时钟指针关系来形象地说明变压器的接线组别，这就是常说的变压器的 0 点接线或 11 点接线，这种用时钟表示组别的方法就叫做“时钟表示法”。用“时钟表示法”时，时钟的轴心为各电动势向量的起点  $X$  和  $x$ ，时钟的分针代表高压绕组线电动势的向量  $\bar{A}$ ，时针代表低压绕组线电动势向量  $\bar{a}$ ，分针固定指向 0 点，此时时针所指的小时数就是连接组别。如时针指向 11 点接线的变压器组别，就表示变压器低压绕组电动势向量滞后高压绕组电动势向量  $30^\circ \times 11 = 330^\circ$ 。

### 9. 变压器的接线组别受哪些因素影响？常用（标准）接线组别有哪些？

答：一般变压器接线组别的变化受以下因素影响：

- (1) 首、尾标号改变（如 A 改成 X，X 改成 A 等）会改变组别；
- (2) 相别的改变（如原来的 A 相改为 C 相，C 相改成 A 相等）会改变组别；
- (3) 接线方式的改变（如原来的 Y 改成 D，D 改成 Y）会改变组别。

因此，在实际工作中必须注意变压器的接线组别，否则接线组别搞错了，就破坏了变压器原有的并列条件。

一般国产变压器有 3 种常用的标准接线组别，它们是：YNd11、Yd11、Yyn0。其中前面是高压绕组的连接图，中间是低压绕组的连接图，后面的数字表示高低压绕组电势的相位差，即变压器的接线组别。

### 10. 我国电力变压器标准联结组别各适用于哪些场合？

答：我国电力变压器标准联结的联结组别常采用下列 3 种，分别适用于下列场合：

Yyn0 ( $Y/Y_0-12$ ) 用于配电变压器，其电压一般低压为 400/230V，即三相线电压 400V 向动力供电，相电压 230V 供应照明等单相设备，星形连接的低压绕组中性点必须引出。

Yd11 ( $Y/\Delta-11$ ) 用于中、小容量高压为 10~35kV，低压为 3~10kV 电压等级的变压器及较大容量的发电厂厂用变压器。

YNd11 ( $Y_0/\Delta-11$ ) 用于大容量的 35kV 及电压为 110kV 及以上电压等级的变压器，当变压器高压绕组中性点经消弧电抗器（35kV 侧）接地或直接接地（110kV 及以上）时，必须将中性点引出。

### 11. 变压器绕组电抗由什么决定？它的大小起什么作用？

答：从变压器结构来说，变压器绕组电抗与绕组匝数的平方、绕组的等效直径以及等效厚度  $[h + (h_1 + h_2)/3]$ ，其中  $h$  为绕组间间隙； $h_1$ 、 $h_2$  为相邻两绕组的厚度] 成正比，与绕组的等效高度成反比。其  $X_T$  用公式表示为

$$X_T = 2\pi^2 f \mu_0 W D \frac{h + \frac{h_1 + h_2}{3}}{H} \times 10^{-8} (\Omega)$$

式中  $\mu_0$ ——空气导磁率；

$f$ ——电网频率；

$W$ ——变压器绕组匝数；

$D$ ——绕组等效直径（与所绕铁芯大小有关）；

$H$ ——绕组计算高度。

在设计变压器时，参数占有很重要的位置，其数值在技术标准里有规定。当数值超过规定值时，会使变压器的电压调整率增大，性能下降；而当数值低于规定值时，又会使短路电流增大，容易造成绕组承受过大的机械力而损坏。

## 12. 为什么变压器的铁芯要接地，且只能一点接地？

答：因为运行中变压器的铁芯和其他附件都处于绕组周围很强的电磁场内，如果不接地，必然由于电磁场的作用使铁芯和其他附件产生一定的悬浮电位，由于变压器铁芯和其他金属附件各自所处的位置不同，因而电位也不同，在外加电压的作用下，当两点间或某点对地电位差大于两者间的绝缘耐压强度，即超过放电电压时，就会出现火花放电，使绝缘油分解或固体绝缘介质损坏，发生事故。因此为了避免变压器的放电，变压器铁芯一定要接地。

如变压器铁芯多点接地，则会通过接地点形成涡流通路，造成铁芯局部发热，这是不允许的，因此只许一点接地。事实上，硅钢片之间虽然涂有绝缘漆，但其绝缘电阻较小，只能隔断涡流而不能阻止高压感应电流，因而只要将一片硅钢片接地，就相当于整个铁芯都接地了。

## 13. 三绕组变压器具有哪些特点？

答：三绕组变压器是每相有 3 个独立的电气绕组的变压器，工作原理与双绕组变压器基本相同，其作用相当于 3 对双绕组的变压器。由于具有 3 个不同电压，特别适于用来连接 3 个不同电压的电网。3 个电压比  $k_{12} = N_1/N_2$ ， $k_{13} = N_1/N_3$ ， $k_{23} = N_2/N_3$ ，3 个阻抗为  $z_{12}$ ， $z_{13}$ ， $z_{23}$ 。

三绕组变压器 3 个同心绕组的排列位置可以不同，由外向里有高压、中压和低压的排列方式，也有高压、低压、中压的排列方式。三绕组变压器一般可有 2 个输出绕组，一次绕组的容量大于或等于二（或三）次绕组的容量。三绕组的容量按高压、中压、低压顺序的百分比有 100/100/100、100/100/50 和 100/50/100 3 种。

三绕组变压器的容量是按每相绕组分别计算的，每个绕组的额定电压乘以它的额定电流就是该绕组的容量，因此，三个绕组的容量可以不同，如此安排，是考虑电力系统的不同需要，用户可根据不同负荷分配情况而选用不同容量配合的三绕组变压器。

三绕组变压器的阻抗电压的大小与绕组的排列有关，绕组间距离远一些的，阻抗电压就大，这是因为两绕组间有较大的间隙，漏磁较多的缘故。对降压变压器绕组排列多为从外向里高、中、低，升压变压器绕组排列多为从外向里高、低、中，这样排列主要是考虑电能的传输和阻抗电压都能较为合理的缘故。

阻抗电压的大小，影响着变压器的并联运行。如果电源侧（一次侧）绕组在铁芯上位于其他两绕组之间时，三绕组变压器的并联运行和双绕组变压器没有什么区别。而降压变压器（高压侧为电源侧）的并联运行比较复杂，因为这种排列方式当中压侧负荷变动时，对低压侧的负荷分配影响很大，还有可能引起低压绕组过载。

## 14. 变压器运行电压过高或过低对变压器有何影响？

答：变压器最理想的运行电压是在额定电压下运行，但由于系统电压在运行中随负荷变化波动相当大，故往往造成加入变压器的电压不等于额定电压的现象。若加于变压器的电压