

# 变电运行一次设备

## 现场培训教材

张全元 主编



中国电力出版社

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

# 变电运行一次设备 现场培训教材

张全元 主编



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

## 内 容 提 要

本书站在运行的角度介绍了变电站一次设备原理、性能、结构、运行维护、检修、试验、巡视、验收、操作、异常及故障处理等。全书共分为七章：第一章为变压器，第二章为高压并联电抗器，第三章为互感器，第四章为无功补偿装置，第五章为断路器，第六章为母线，第七章为过电压及限制措施。本书最大的特点是理论联系实际，实用性强，通俗易懂。

本书不仅可作为变电运行人员和技术管理人员的现场培训教材，也可作为各类电力培训中心电力专业类培训教材，同时还可作为电力工作者及电力工程类大、中专学生的技术参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

变电运行一次设备现场培训教材/张全元主编. —北京：中国电力出版社，2009

ISBN 978 - 7 - 5083 - 9368 - 1

I. 变… II. 张… III. 变电所-电力系统运行-一次系统-电气设备-技术培训-教材 IV. TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 153928 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2010 年 1 月第一版 2010 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 25.75 印张 632 千字

印数 0001—3000 册 定价 48.00 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

变电运行一次设备现场培训教材

随着我国电力建设的发展以及综合自动化技术的不断提高，变电站值班人员的配置越来越少，因此，对变电站值班员的要求也就越来越高。编者在从事多年的变电运行和变电运行培训工作中深刻体会到，提高运行值班员的综合能力及应对各种突发故障的处理能力，对电网的安全、稳定运行起着至关重要的作用；而变电运行岗位又是一个涉及多个专业的岗位，运行值班员在现场需要学习的知识非常多。长期以来，编者就在实践中探索以单个设备为主线，从设备原理、结构、性能、运行规定及现场的运行维护等方面进行学习和教学的方法，受到了学员的好评，本书也是在这个基础上编写而成的。

本书站在运行的角度介绍了变电站一次设备原理、性能、结构、运行维护、检修、试验、巡视、验收、操作、异常及故障处理等。全书共分为七章：第一章为变压器，第二章为高压并联电抗器，第三章为互感器，第四章为无功补偿装置，第五章为断路器，第六章为母线，第七章为过电压及限制措施。

本书最大的特点是理论联系实际，实用性强，通俗易懂，简明扼要，由浅入深，容易被现场人员接受，并将一些好的学习方法传授给读者，使读者既能学到知识，又掌握了学习方法。

本书涉及的知识面较广，实用性较强，不仅可作为变电运行值班人员以及变电运行技术管理人员的现场培训教材，也可作为各类电力培训中心电力专业类培训教材，还可作为电力工程类的大、中专院校现场技能学习的参考书。

本书由湖北超高压输变电公司张全元女士编写，由范杰、陈小璐、方爱英、杨琼、陈文、周煜等同志审核，其中范杰审核第一章，陈文审核第二章，方爱英审核第三章，杨琼审核第四章，陈小璐审核第五章、第六章，周煜审核第七章。

本书在编写过程中，得到了部分设备制造厂家、兄弟单位和兄弟变电站的大力支持，武汉大学电气工程学院的谈顺涛先生审阅了全书并提出重要的修改意见，在此一并表示衷心的感谢！

在编写本书时，参考了大量的相关书籍，在此对原作者表示深深的谢意！

由于经验和理论水平所限，书中难免出现错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2009.5



# 目 录

变电运行一次设备现场培训教材

## 前言

<b>第一章 变压器</b> .....	1
第一节 变压器基本知识 .....	1
第二节 变压器基本结构 .....	12
第三节 三相变压器 .....	47
第四节 自耦变压器 .....	51
第五节 变压器运行方式 .....	56
第六节 变压器检修 .....	72
第七节 变压器试验 .....	76
第八节 变压器巡视 .....	82
第九节 变压器验收 .....	89
第十节 变压器操作 .....	97
第十一节 变压器异常及事故处理 .....	103
<b>第二章 高压并联电抗器</b> .....	125
第一节 工频过电压的基本概念 .....	125
第二节 超高压空载长线路电容效应分析 .....	125
第三节 并联电抗器及中性点电抗器的作用 .....	129
第四节 并联电抗器的安装原则和接入方式 .....	134
第五节 并联电抗器的分类及技术参数 .....	135
第六节 并联电抗器的工作原理 .....	137
第七节 并联电抗器的结构 .....	138
第八节 并联电抗器的运行及维护 .....	144
第九节 并联电抗器的异常、故障分析及事故处理 .....	151
<b>第三章 互感器</b> .....	160
第一节 概述 .....	160
第二节 电压互感器 .....	161
第三节 电流互感器 .....	173
第四节 互感器运行规定 .....	188
第五节 互感器巡视 .....	194
第六节 互感器验收 .....	196
第七节 互感器检修 .....	199
第八节 互感器试验 .....	202
第九节 互感器异常运行及故障处理 .....	204
<b>第四章 无功补偿装置</b> .....	213

第一节	无功补偿的基本概念 .....	213
第二节	电容器 .....	215
第三节	电抗器 .....	222
第四节	电容器串联补偿 .....	223
第五节	无功补偿装置的运行与维护 .....	229
<b>第五章</b>	<b>断路器 .....</b>	<b>239</b>
第一节	断路器基本知识 .....	239
第二节	高压 SF <sub>6</sub> 断路器 .....	247
第三节	典型敞开式 SF <sub>6</sub> 断路器结构与运行维护 .....	257
第四节	罐式 SF <sub>6</sub> 断路器 .....	277
第五节	GIS 和 HGIS .....	297
第六节	操动机构 .....	322
第七节	断路器检修 .....	333
第八节	断路器试验 .....	339
第九节	断路器巡视 .....	347
第十节	断路器操作 .....	351
第十一节	断路器验收 .....	353
第十二节	断路器异常及故障处理 .....	355
<b>第六章</b>	<b>母线 .....</b>	<b>365</b>
<b>第七章</b>	<b>过电压及限制措施 .....</b>	<b>373</b>
第一节	雷电的基本概念 .....	373
第二节	过电压 .....	374
第三节	变电站防雷措施 .....	383
第四节	变电站接地装置 .....	389
第五节	电力系统的绝缘配合 .....	394
第六节	防雷设备的运行维护 .....	398
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>403</b>

# 第一章

## 变 压 器

### 第一节 变压器基本知识

#### 一、变压器在电力系统中的作用

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。而降压变压器则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。

#### 二、变压器的分类

##### (1) 按变压器的用途分类：

- 1) 电力变压器；
- 2) 调压器；
- 3) 仪用互感器（TA、TV）；
- 4) 特殊变压器（试验变压器、控制变压器）。

##### (2) 按变压器的绕组分类：

- 1) 双绕组变压器；
- 2) 三绕组变压器；
- 3) 多绕组变压器；
- 4) 自耦变压器。

##### (3) 按电源输出的相数分类：

- 1) 单相变压器；
- 2) 三相变压器；
- 3) 多相变压器（如直流输电工程中的换流变压器，整流用六相变压器）。

##### (4) 按变压器的铁芯结构分类：

- 1) 芯式变压器；
- 2) 壳式变压器。

##### (5) 按变压器冷却介质分类：

- 1) 油浸式变压器；
- 2) 空气冷却式变压器（干式变压器）；
- 3) 充气式变压器（变压器身放在一密封的铁箱内，箱内充以特种气体）。

##### (6) 按冷却方式分类：

- 1) 油浸自冷式变压器；
- 2) 油浸风冷变压器；
- 3) 油浸强迫油循环风冷变压器；
- 4) 油浸强迫油循环水冷却变压器及干式变压器。

(7) 按调压方式分类：

- 1) 无励磁调压变压器；
- 2) 有载调压变压器。

(8) 按中性点绝缘水平分类：

- 1) 全绝缘变压器；
- 2) 分级绝缘变压器。

(9) 按导线材料分类：

- 1) 铜导线变压器；
- 2) 铝导线变压器。

### 三、变压器的工作原理

(1) 变压器的工作原理。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。这些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，两侧的绕组分别产生感应电势，电势的大小与匝数成正比，通过电磁感应，在两个电路之间实现能量的传递。变压器的一、二次绕组匝数不同，这样就起到了变压作用。

共同的磁路部分一般用硅钢片做成，称为铁芯。被连的线圈称为绕组。

(2) 双绕组变压器。双绕组变压器工作原理如图 1-1 所示。一般把接到交流电源的绕组称为一次绕组，而把接到负荷（也称负载）的绕组称为二次绕组，有时把一次绕组称为原边或初级，把二次绕组称为副边或次级。

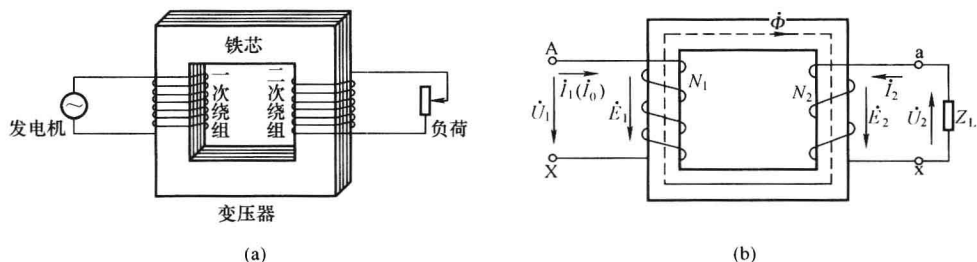


图 1-1 双绕组变压器工作原理

(a) 双绕组变压器；(b) 工作原理图

变压器二次绕组的电压不等于一次绕组的电压，若二次绕组电压大于一次绕组电压，则该变压器称为升压变压器，若二次绕组电压小于一次绕组电压，则该变压器称为降压变压器。

在工程上也常把电压高的绕组称为高压绕组，电压低的绕组称为低压绕组。

### 四、变压器主要技术参数的含义

(1) 额定容量  $S_N$ ：指变压器在铭牌规定条件下，以额定电压、额定电流连续运行时所输送的单相或三相总视在功率。



(2) 容量比：指变压器各侧额定容量之间的比值。

(3) 额定电压  $U_N$ ：指变压器长时间运行，设计条件所规定的电压值（线电压）。

(4) 电压比（变比）：指变压器各侧额定电压之间的比值。

(5) 额定电流  $I_N$ ：指变压器在额定容量、额定电压下运行时通过的线电流。

(6) 相数：单相或三相。

(7) 连接组别：表明变压器两侧线电压的相位关系。

(8) 空载损耗（铁损） $P_0$ ：指变压器一个绕组加上额定电压，其余绕组开路时，变压器所消耗的功率。变压器的空载电流很小，它所产生的铜损可忽略不计，所以空载损耗可认为是变压器的铁损。铁损包括励磁损耗和涡流损耗。空载损耗一般与温度无关，而与运行电压的高低有关，当变压器接有负荷后，变压器的实际铁芯损耗小于此值。

(9) 空载电流  $I_0\%$ ：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。空载电流常用其与额定电流比值的百分数表示，即

$$I_0\% = \frac{I_0}{I_N} \times 100\%$$

(10) 负荷损耗  $P_k$ （短路损耗或铜损）：指变压器当一侧加电压而另一侧短接，使电流为额定电流时（对三绕组变压器，第三个绕组应开路），变压器从电源吸取的有功功率。按规定，负荷损耗是折算到参考温度（75℃）下的数值。因测量时实为短路状态，所以又称为短路损耗。短路状态下，使短路电流达额定值的电压很低，表明铁芯中的磁通量很少，铁损很小，可忽略不计，故可认为短路损耗就是变压组（绕组）中的损耗。

对三绕组变压器，有三个负荷损耗，其中最大一个值作为该变压器的额定负荷损耗。负荷损耗是考核变压器性能的主要参数之一。实际运行时的变压器负荷损耗并不是上述规定的负荷损耗值，因为负荷损耗不仅取决于负荷电流的大小，而且还与周围环境温度有关。

负荷损耗与一、二次电流的平方成正比。

(11) 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的比值（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。

(12) 额定频率：变压器设计所依据的运行频率，单位为赫兹（Hz），我国规定为 50Hz。

(13) 额定温升  $\tau_N$ ：指变压器的绕组或上层油面的温度与变压器外围空气的温度之差，称为绕组或上层油面的温升。

根据国家标准的规定，当变压器安装地点的海拔高度不超过 1000m 时，绕组温升的限值为 65℃。上层油面温升的限值为 55℃。

(14) 铭牌参数：

1) 变压器名称、型号、产品代号；

2) 标准代号；

3) 制造厂名（包括国名）；

4) 出厂序号；

5) 制造年月；

6) 相数；

7) 额定容量；



表 1-1

变压器新、旧型号的含义对照

含义符号	代表符号		含义符号	代表符号	
	新型号	旧型号		新型号	旧型号
单相变压器	D	D	双绕组变压器	不表示	不表示
三相变压器	S	S	三绕组变压器	S	S
油浸式	不表示	J	无励磁调节	不表示	不表示
空气自冷式	不表示	不表示	有载调压	Z	Z
风冷式	F	F	铝线变压器	不表示	L
水冷式	W	S	干式	G	K
油自然循环	不表示	不表示	自耦变压器	O	O*
强迫油循环	P	P	分裂变压器	F	F
强迫油导向循环	D	不表示	干式浇注绝缘	C	C

\* O在前面表示降压变压器；O在后面表示升压变压器。

(3) 变压器型号文字符号后面的数字所代表的意义是：斜线的左面表示容量，单位为千伏安 (kVA)；斜线的右面表示高压侧的额定电压，单位为千伏 (kV)。

(4) 变压器型号举例说明。

1) 三相油浸自冷式双绕组铝线 500kVA、10kV 电力变压器。

新型号表示为：S-500/10。

旧型号表示为：SJL-500/10。

2) 三相油浸风冷式三绕组铝线 8000kVA、35kV 电力变压器。

新型号表示为：SFSL-8000/35。

旧型号表示为：SJFSL-8000/35。

3) 三相油浸双绕组有载调压强迫油水冷却 31500kVA、110kV 电力变压器。

新型号表示为：SPWZ-31500/110。

旧型号表示为：SSPZ-31500/110。

4) 三相油浸三绕组自耦强迫油循环导向风冷却 180000kVA、220kV 电力变压器。

新型号表示为：OSSFPD-180000/220。

旧型号表示为：OSFPS-180000/220。

5) 单相油浸三绕组自耦强迫油循环导向风冷却 250000kVA、500kV 电力变压器。

新型号表示为：ODFPSZ-250000/500。

旧型号表示为：ODFPSZ-250000/500。

## 六、变压器的连接组别

(1) 连接组别的分析。为了表明两侧线电压的相位关系，将三相变压器的接线分为若干组，称为连接组别。电力变压器连接组别标号如表 1-2 所示。

表 1-2

电力变压器连接组别标号

连接方式	高压绕组	中压绕组	低压绕组
星形连接 (星形连接有中性点引出时)	Y (YN)	y (yn)	y (yn)
三角形连接	D	d	d
自耦变压器	YN	a	y 或 d

电力变压器常见标准的连接组别如下。

1) 双绕组: Yyn0; Yd11; YNd11。

2) 三绕组: YNyn0d11; YNd11d11。

3) 自耦变压器: YNa0d11; O-YNd12d11。500kV 主变压器常采用 O-YNd12d11。

为了区别不同的连接组别,首先需要弄清楚三相变压器中每一相的两个绕组的极性关系。现将单相变压器的极性说明如下:

本来交流电路里是没有正负极性的,但是在一个极短的时间中,变压器一次绕组的

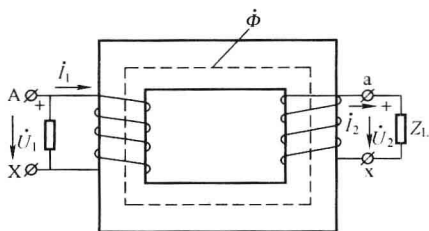


图 1-2 变压器瞬间电流方向图

两个接头必定有一个接头的电流是流入,而另一个接头的电流是流出;二次绕组的两个接头也是一个流入电流,一个流出电流。变压器瞬间电流方向如图 1-2 所示。一次电流流入的接头和二次电流流出的接头为同极性,而另外两个接头亦为同极性。

一般在单相变压器一、二次引线端上标有+、-符号,相同的符号为同极性。

常见的变压器相同符号的套管排列在同一侧的为减极性;反之,不同符号的套管排列在同一侧的为加极性。

如果将三台单相变压器连接成变压器组,用到三相电源上去,就必须注意先测量单相变压器的极性,然后接成不同的连接组别。

三相变压器的连接组别共分为 12 种,其中 6 种是单数组,6 种是双数组。凡是一次绕组和二次绕组连接相同(如 Dd、Yy)的,都属于双数组,包括 2、4、6、8、10、12 这 6 个组。凡是一次绕组和二次绕组的接线不一致的(如 Dy、Yd),都属于单数组,包括 1、3、5、7、9、11 这 6 个组。

表示变压器的不同的连接组别,一般采用时钟表示法。因为一、二次侧对应的线电压之间的相位差总是  $30^\circ$  的整倍数,这正好和钟面上小时数之间的角度一样。方法就是把一次侧线电压相量作为时钟的长针,将长针固定在 12 点上,二次侧对应线电压相量作为时钟的短针,看短针指在几点钟的位置上,就以这一钟点作为该接线组的组号。例如:若二次侧线电压与一次侧线电压同相位,则短针也应指在 12 点的位置,其连接组别就规定为 12;若二次侧线电压越前于一次侧线电压  $30^\circ$ ,则短针应指在 11 点的位置,其连接组别规定为 11。

例如连接组别为 Yyn0 的变压器,其接线图如图 1-3 (a) 所示,一次绕组接成星形,二次绕组接成有中性线的星形。由于一次绕组和二次绕组的绕向相同,线端标号一致,所以一、二次侧对应的相电动势是同相的,其相量图如图 1-3 (b) 所示。若将相量图中 A 和 a 重合绘在一起来看,则二次侧线电压相量  $\dot{U}_{ab}$  与一次侧线电压相量  $\dot{U}_{AB}$  也是同相位。按照规定,相量  $\dot{U}_{AB}$  指在钟表 12 点,则相量  $\dot{U}_{ab}$  也是 12 点。所以这种连接组别为 12,记作 Yyn0。

又如连接组别为 Yd11 的变压器,其接线图如图 1-4 (a) 所示,一次绕组接成星形,二次绕组接成三角形,其连接顺序为 ay-cx-bz。根据减极性的特点,两侧相电动势为同相,又由于二次三相绕组接成三角形,其线电压与相电动势相等。从相量图 1-4 (b) 可以看出,二次侧线电压  $\dot{U}_{ab}$  等于相电动势  $\dot{E}_b$ 。若将相量图中 A 和 a 重合绘在一起来看,则二次侧线电压相量  $\dot{U}_{ab}$  越前于一次侧线电压相量  $\dot{U}_{AB} 30^\circ$ 。当相量  $\dot{U}_{AB}$  指在钟表 12 点,则相

量  $\dot{U}_{ab}$  应指在 11 点，故这种连接组别记作 Yd11。

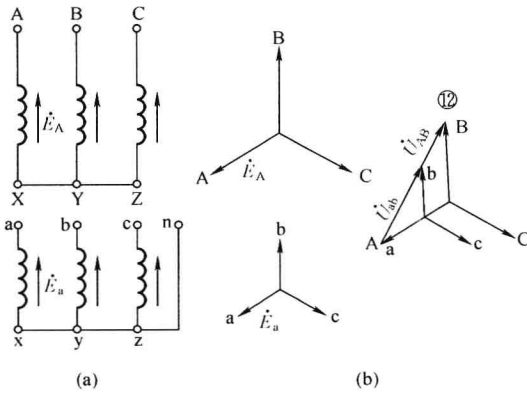


图 1-3 连接组别为 Yyn0 变压器的接线  
(a) 接线图；(b) 相量图

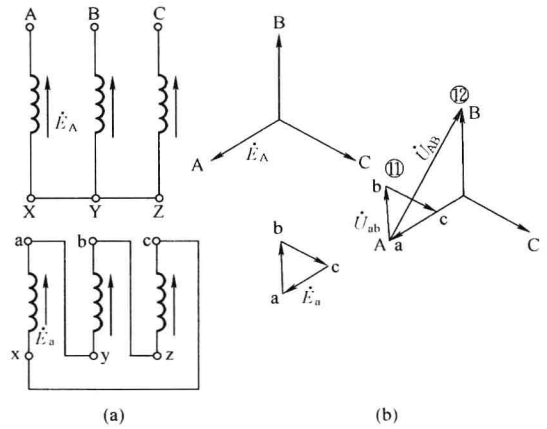


图 1-4 连接组别为 Yd11 变压器的接线  
(a) 接线图；(b) 相量图

(2) 典型连接组别变压器的接线图和相量图 (见图 1-5)。

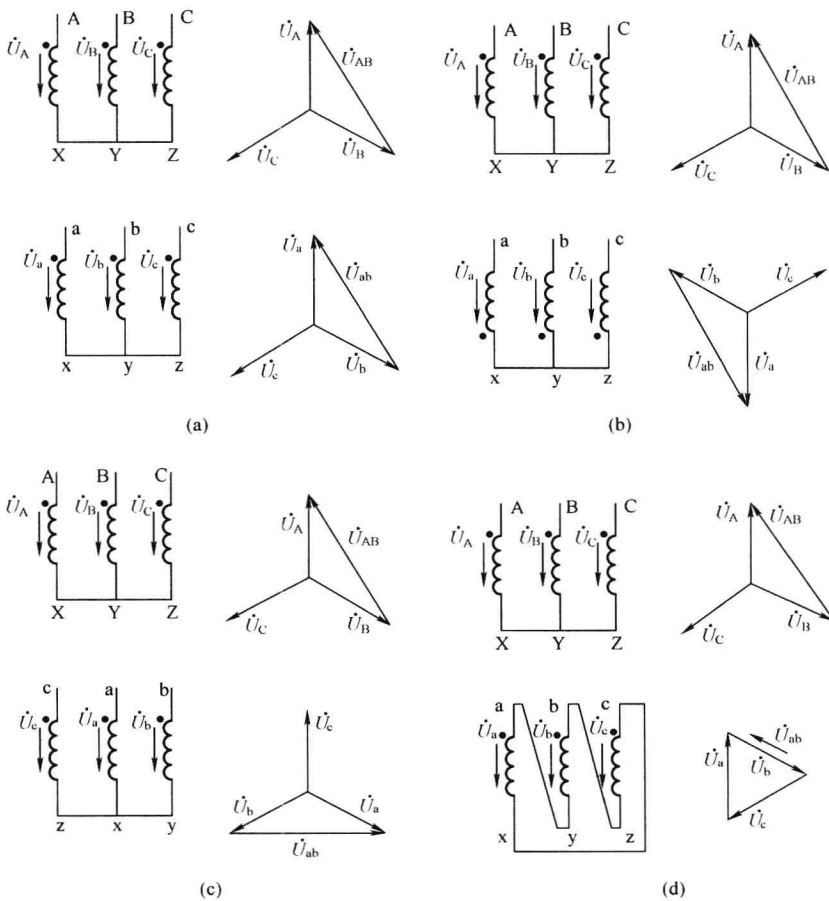
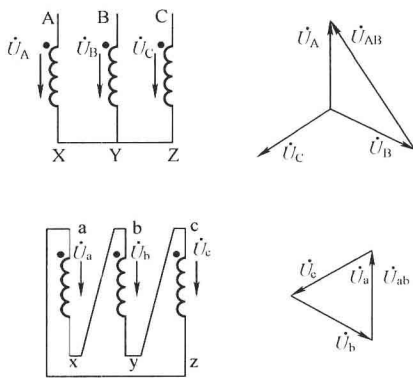


图 1-5 典型连接组别变压器的接线图和相量图 (一)  
(a) Yyn0 接线；(b) Yyn6 接线；(c) Yy4 接线；(d) Yd11 接线



(c)

图 1-5 典型连接组别变压器的接线图和相量图(二)

(c) Yd1 接线

总体来看, Yy 连接可以得到时钟表面上各偶数的连接组别, Yd 连接则得到各奇数的连接组别, Yy 与 Yd 的三相变压器的二次侧电压相互间是不可能同相的。此外, Dd 连接可以得到与 Yy 连接同样的相位移的关系, Dy 则得到与 Yd 连接相同的相位移。

画变压器的接线组别和相量图的基本步骤如下: ①根据实际接线判别是哪一组。②根据实际连接方式画出连接情况。③标出电压正方向。④画高压侧相量图。⑤画低压侧相量图。⑥高、低压侧一个同名线电压相量进行比较。

### 七、变压器空载合闸的励磁涌流分析

(1) 变压器空载合闸的现象。把一台空载变压器接到电源上时, 可以发现合闸瞬间变压器电流表指针有时一下子撞到止档(也可从录波图中看到), 不过很快又回到正常的空载电流值, 这个冲击电流称为励磁涌流。

(2) 产生励磁涌流的原因。产生励磁涌流的原因是变压器空载投入或外部故障切除后的电压恢复过程中, 特别是在电压为零时刻合闸时, 由于变压器内部的绕组和铁芯是储存磁场能量的元件, 因此变压器在空载合闸的瞬间, 电流从零开始到建立起正常空载电流, 即变压器磁能从零开始到具有正常的磁能, 使能量发生了变化。由于电路的能量不能突变, 因此就需要经历一个过渡过程, 然后才能到稳定空载运行状态。空载合闸过程主要表现为变压器磁通变化的过渡过程, 在过渡中的电流就称为励磁涌流。

(3) 励磁涌流值可达正常空载电流 50~80 倍, 可达额定电流的 5~8 倍。

(4) 决定励磁涌流大小的因素: ①变压器的合闸时的相位(合闸角)。②铁芯的剩磁。

(5) 励磁涌流的分析。变压器励磁涌流的产生及变化曲线如图 1-6 所示。因为在稳态工作情况下, 铁芯中的磁通滞后于外加电压  $90^\circ$ , 如图 1-6 (a) 所示。如果空载合闸时, 正好在电压瞬时值  $U=0$  时接通电路, 则铁芯中应该具有磁通  $-\phi_m$ , 但是由于铁芯中磁通不能突变, 因此将出现一个非周期分量的磁通, 其幅值为  $+\phi_m$ 。这样在经过半个周波以后, 铁芯中的磁通就达到  $2\phi_m + \phi_s$ , 如图 1-6 (b) 所示。此时变压器的铁芯严重饱和, 励磁涌流将急剧增大, 如图 1-6 (c) 所示。励磁涌流中包含大量的非周期分量和高次谐波分量, 如图 1-6 (d) 所示。



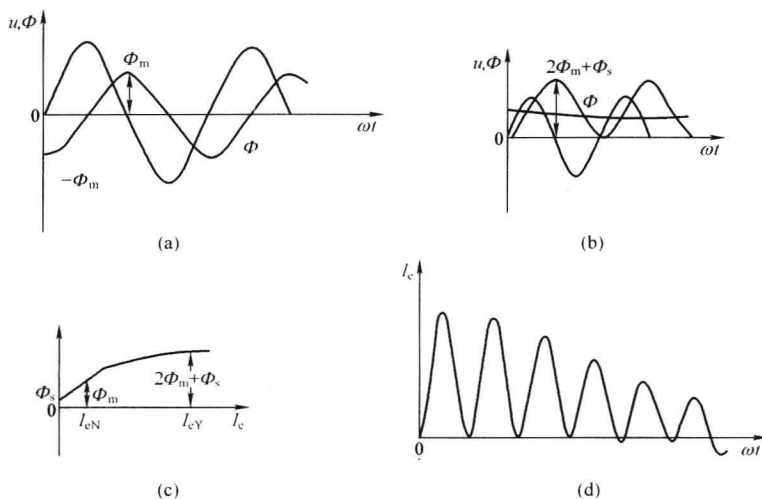


图 1-6 变压器励磁涌流的产生及变化曲线

(a) 稳态下，磁通与电压的关系；(b) 在  $u=0$  瞬间空载合闸时，磁通与电压的关系；

(c) 变压器铁芯的磁化曲线；(d) 励磁涌流波形

(6) 励磁涌流的衰减。由于绕组电阻  $r_1$  的存在，合闸电流将逐渐衰减，衰减的快慢有时间常数  $T=L_1/r_1$  所决定 ( $L_1$  为一次绕组的全自感，实际上，因有铁芯磁路， $L_1$  并不是一个常数； $r_1$  为一次绕组的电阻)。时间常数大，衰减慢。一般是小容量变压器衰减快，对于一般的中小型变压器，励磁涌流经过  $0.5\sim 1\text{s}$  后其值不超过额定电流的  $0.25\sim 0.5$  倍；大型电力变压器励磁涌流的衰减速度较慢，衰减到上述值时需  $2\sim 3\text{s}$ 。这就是说，变压器容量越大衰减越慢，完全衰减经过几十秒的时间。

(7) 励磁涌流的危害。一般来说励磁涌流对变压器虽没有直接的危害，但若继电保护装置整定不当时，会使继电保护误动作，故应正确选择和整定保护装置，避免励磁涌流引起的误动作。

在实际运行中，由于励磁涌流造成大型变压器故障的案例是存在的。

(8) 励磁涌流的特点：① 包含有很大的非周期分量，往往使涌流偏于时间轴一侧。② 包含大量的高次谐波分量，而以二次谐波为主。③ 波形之间出现间断，在一个周期中间断角为  $\alpha$ 。

(9) 限制励磁涌流衰减的方法：① 在巨型变压器中，在变压器一次侧加阻尼电阻，一是减少冲击量，二是减小时间常数  $T$ ，加速励磁涌流的衰减速度，这个电阻在合闸完毕后去掉。② 在变压器断路器控制回路中加装励磁涌流抑制器，目前在部分电厂、换流站及大型变电站变压器的断路器控制回路中装有励磁涌流抑制器，并有效地限制了励磁涌流。

(10) 三相变压器合闸时的励磁涌流。在三相变压器中，由于三相电压彼此互差  $120^\circ$ ，因此合闸时总有一相电压的初相角接近于零，所以总有一相的合闸电流较大。

(11) 分析励磁涌流特点的目的。主要是利用励磁涌流的特征波构成变压器差动保护的制动特性。

1) 利用二次谐波制动，制动比为  $15\%\sim 20\%$ 。

2) 利用波形对称原理的差动继电器。

3) 鉴别短路电流和励磁涌流波形的区别, 要求间断角为  $60^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 。

实测变压器励磁涌流波形图如图 1-7 所示。

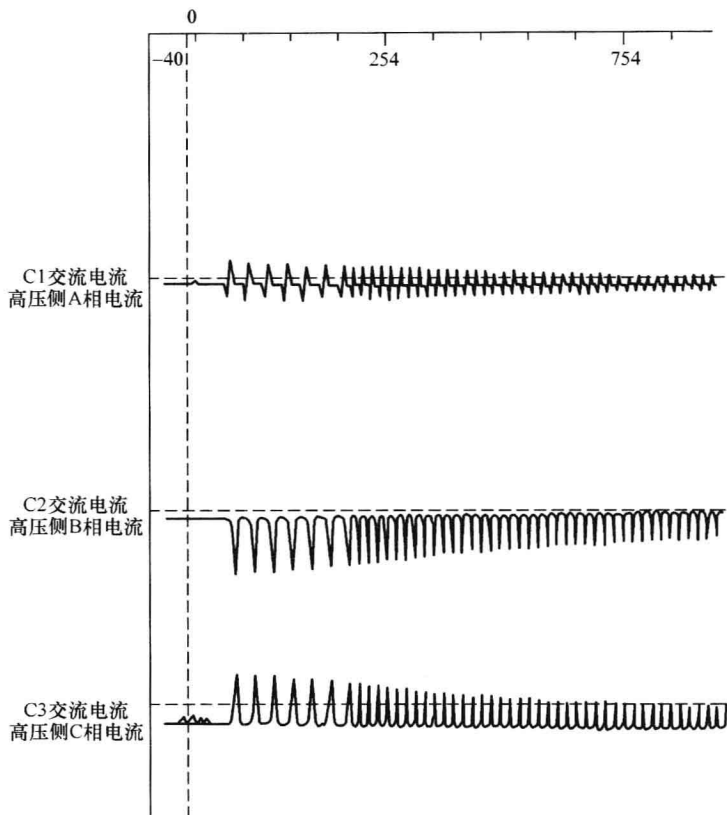


图 1-7 实测变压器励磁涌流波形图

### 八、大型变压器过励磁

(1) 过励磁的概念。当变压器在电压升高或频率下降时都将造成工作磁通密度增加, 导致变压器的铁芯饱和, 这种现象称为变压器过励磁。

$$\begin{cases} U = 4.44fW\Phi_m \\ \Phi_m = \frac{I_L W}{R_m} \\ I_e = \frac{U}{4.44fW^2 R_m} = K \frac{U}{f} \end{cases} \quad (1-1)$$

式中:  $f$  为系统频率;  $U$  为变压器高压侧电压;  $W$  为变压器绕组匝数;  $R_m$  为自感磁通所经过磁路的磁阻;  $I_e$  为励磁电流;  $K$  为比例常数。

(2) 产生过励磁的原因。电力系统事故解列后, 部分系统的甩负荷过电压、铁磁谐振过电压、变压器分接头连接调整不当、长线路末端带空载变压器或其他误操作、发电机频

率未到额定值过早增加励磁电流、发电机自励等情况，都可能产生较高的电压引起变压器过励磁。

(3) 过励磁的危害。过励磁对变压器的危害：当变压器过励磁时，漏磁通的增加使得磁滞损耗，以及铁芯不分层部分的涡流损耗严重上升，如果由于这些损耗引起温度过度地升高，绝缘可能损坏，同时可能引起闪络。

(4) 防止措施。因为现代变压器在满负荷额定运行时磁通密度是很高的，它只能经受相当小的过励磁，所以当过励磁时要保护变压器，防止变压器过热，因而必须把过励磁控制在一定水平之下。

(5) 分析过励磁的作用目的。构成过励磁保护，过励磁保护作为延时动作的主保护，其低定值延时段动作于信号，高定值延时段动作于跳闸。

### 九、超高压长线路末端空载变压器的操作应注意调整系统电压

由于电容效应，超高压空载长线线路末端电压升高。在这种情况下投入空载变压器，由于铁芯的严重饱和，将感应出高幅值的高次谐波电压，严重威胁变压器绝缘，故在操作前要降低线路首端电压，并投入末端变电站的电抗器，使得操作电压短时间（如 500kV 级不得超过 30min）不超过变压器相应分接头电压的 10%。

### 十、变压器损耗

变压器的损耗有两种：空载损耗（铁损）和负荷损耗（短路损耗或铜损）。

#### 1. 空载损耗（铁损） $P_0$

空载损耗又称为铁损，是指变压器一个绕组加上额定电压，其余绕组开路时，在变压器中消耗的功率。

变压器空载时，输出功率为零，但要从电源中吸取一小部分有功功率，用来补偿变压器内部的功率损耗，这部分功率变为热能散发出去，称为空载损耗，用  $P_0$  表示。

变压器的空载损耗包括三部分：铁损、铜损和附加损耗。

(1) 铁损  $F_{Fe}$ ：是由交变磁通在铁芯中造成的磁滞损耗和涡流损耗。

1) 磁滞损耗：由于铁芯在磁化过程中有磁滞现象，并有了损耗，这部分损耗称为磁滞损耗，磁滞损耗占空载损耗的 60%~70%。磁滞损耗的大小取决于硅钢片的质量、铁芯的磁通密度  $B_M$  的大小、电源的频率  $f$ 。

2) 涡流损耗：当铁芯中有交变磁通存在时，绕组将产生感应电压，而铁芯本身又是导体，因此就产生了电流和损耗，涡流损耗为有功损耗。涡流损耗的大小与磁通密度  $B_m^2$  成正比，与电源频率的平方  $f^2$  成正比。

减少涡流损耗的方法：采用具有绝缘膜的硅钢片。

(2) 一次绕组的铜损  $P_{Cu}$ ：是由空载电流  $I_0$  流过一次绕组的铜电阻  $r_1$  而产生的。

(3) 附加损耗  $P_{ad}$ ：是由铁芯中磁通密度分布不均匀和漏磁通经过某些金属部件而产生。

变压器的空载损耗中，空载铜损所占比例很小，可以忽略不计，而正常的变压器空载时铁损也远大于附加损耗，因此变压器的空载损耗可近似等于铁损。

变压器的空载损耗很小，不超过额定容量的 1%。

空载损耗一般与温度无关，而与运行电压的高低有关，当变压器接有负荷后，变压器的实际铁芯损耗比空载时还要小。