



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家级精品课程配套教材

DIANQI
高职高专电气系列教材

电机学

(第2版)



Dianjixue



主 编 张小兰



副主编 李 霜 蒋 燕



重庆大学出版社
<http://www.cqup.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家级精品课程配套教材

电 机 学

(第2版)

主 编 张小兰

副主编 李 霜 蒋 燕

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书为高职高专电气专业系列教材之一。全书内容包括:变压器同步发电机、三相异步电动机的基本结构、运行原理,交流绕组,同步发电机的运行监视及异常运行分析和处理,直流电机等。

图书在版编目(CIP)数据

电机学/张小兰主编. —2版. —重庆:重庆大学出版社,2007.7

(高职高专电气系列教材)

ISBN 978-7-5624-3511-2

I. 电… II. 张… III. 电机学—高等学校:技术学校—教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 092979 号

电 机 学

(第2版)

主 编 张小兰

副主编 李 霜 蒋 燕

责任编辑:曾令维 王维朗 版式设计:曾令维 王维朗

责任校对:任卓惠 责任印制:张 策

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鹤盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(市场营销部)

全国新华书店经销

重庆市川渝彩色印务有限责任公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:10.25 字数:256千

2005年12月第1版 2007年7月第2版 2007年7月第2次印刷

印数:3 001—6 000

ISBN 978-7-5624-3511-2 定价:15.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换
版权所有,请勿擅自翻印和用本书
制作各类出版物及配套用书,违者必究

再版前言

本书是在 2005 年出版的高职高专电气系列教材《电机学》的基础上修订的。

我校《电机学》课程是 2006 年国家精品课程,本书被列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,配套的多媒体网络课件网址:<http://www.cqepc.com.cn/djx>。

通过第 1 版在两届学生中的使用和精品课程建设,本书与配套的多媒体网络课件不断优化,本书的修订情况如下:

1)增加了绪论,便于在学习之初了解各类电机在电力系统中的地位 and 作用。

2)对章节作了适当的调整。由于第 1 版中第 3 章(三相变压器)、第 4 章(其他变压器)和第 5 章(变压器的运行)内容较少,且主题的联系较紧密,所以将第 4 章和第 5 章合并并在第 3 章(三相变压器)中,使章节结构和内容更加紧凑,层次更加分明;10.1 节(同步发电机的主要技术参数)、10.2 节(运行中的监视及检查)、10.3 节(同步发电机在非额定工况时的运行)内容比较繁琐,且有重复,所以精简为 1 节。

3)在讲述方式上更加详细,有利于学生自学。

4)增加了大量的例题和习题,更加注重对知识的应用。

本书由张小兰、李霜、蒋燕共同修订,张小兰修订 1~3 章、9~11 章,并编写绪论;李霜修订 5~8 章,蒋燕修订第 4、12 章。

编 者

2007 年 6 月

前言

《电机学》是为高职高专电气类专业编写的一本教材。是根据高职高专人才培养所需知识、能力和素质结构的要求,以培养高级应用型人才为目标,本着理论上以“够用为度、注重应用”的原则而编写。内容上不追求电机电磁理论的系统性和完整性,而突出“新技术、大容量”的特点,紧密结合生产一线的需要。加强了大型电力变压器和大型同步发电机的结构、异常运行及处理等内容。改变了传统《电机学》中大量的定量分析为定性分析,更加注重基本概念和结论的应用。

本教材是我校(重庆电力高等专科学校)《电机学》国家精品课程配套教材,并有配套的多媒体课件,网址:<http://www.cqepc.com.cn>(重庆电力高等专科学校网站)和《电机实验》教材。

本教材在编写过程中得到了我校“电机学精品课程组”所有成员的大力支持和帮助,尤其是黄永铭教授提供了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢!

本教材由重庆电力高等专科学校张小兰担任主编,李霜、蒋燕担任副主编,张小兰编写绪论、1~5章、11~13章,李霜编写7~10章,蒋燕编写6、14章。由重庆电力高等专科学校郭强副教授主审。

由于水平有限,书中不足和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2005年9月

目 录

绪 论	1
第 1 章 变压器的基本知识及结构	3
1.1 变压器的基本工作原理	3
1.2 大型电力变压器的结构	4
1.3 变压器的型号和额定值	8
习题 1	9
第 2 章 变压器的运行原理	11
2.1 变压器的空载运行	11
2.2 变压器的负载运行	14
2.3 变压器的参数测定	20
2.4 变压器的运行特性	24
习题 2	26
第 3 章 三相变压器	28
3.1 三相变压器的连接组别	28
3.2 磁路和电路连接形式对空载电势波形的影响	32
3.3 变压器并联运行	34
3.4 三相变压器不对称运行时的等效电路	37
3.5 三绕组变压器	39
3.6 自耦变压器	41
3.7 变压器常见故障类型及处理	43
习题 3	45
第 4 章 交流绕组	48
4.1 交流绕组的基本知识	48
4.2 交流绕组的电动势	54
4.3 交流绕组的磁势	55
习题 4	59

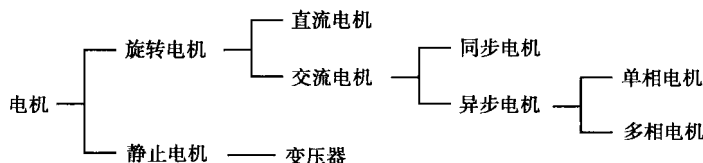
第 5 章 同步发电机的基本知识及结构	60
5.1 同步发电机的基本工作原理	60
5.2 大型同步发电机的结构	61
5.3 大型同步发电机的基本系统	66
习题 5	69
第 6 章 同步发电机的运行原理	70
6.1 同步发电机的主磁通	70
6.2 同步发电机的电动势方程式和相量图	73
6.3 同步发电机的运行特性	77
习题 6	81
第 7 章 同步发电机的并列运行	82
7.1 同步发电机并列运行的条件和方法	82
7.2 同步发电机的稳态功角特性	84
7.3 并列运行时有功功率的调节和静态稳定	87
7.4 并列运行时无功功率的调节和 V 形曲线	90
习题 7	92
第 8 章 同步发电机运行监视及异常运行分析和处理	94
8.1 同步发电机的运行监视	94
8.2 同步发电机不对称运行	96
8.3 同步发电机突然短路	98
8.4 同步发电机失磁运行.....	100
8.5 同步发电机的常见故障类型.....	102
习题 8	104
第 9 章 三相异步电动机的基本知识及结构	106
9.1 三相异步电动机的基本工作原理.....	106
9.2 三相异步电动机的结构.....	107
9.3 三相异步电动机的铭牌数据.....	110
习题 9	112
第 10 章 三相异步电动机的运行原理	113
10.1 三相异步电动机运行时的电磁关系	113
10.2 三相异步电动机的功率与转矩	117
10.3 三相异步电动机的机械特性	119
10.4 三相异步电动机的工作特性	122
习题 10	123
第 11 章 三相异步电动机的运行	124
11.1 三相异步电动机的起动	124

11.2	三相异步电动机的调速	129
11.3	三相异步电动机的异常运行及常见故障类型	132
11.4	单相异步电动机	136
	习题 11	138
第 12 章	直流电机	139
12.1	直流电机的基本工作原理	139
12.2	直流电机的基本结构	141
12.3	直流发电机的运行	144
12.4	直流电动机的运行	147
	习题 12	150

绪 论

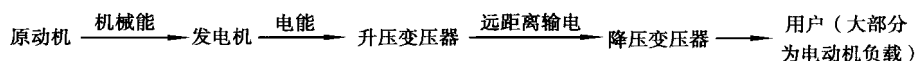
(1) 电机的分类

电机是能量转换装置。把机械能转换成电能的装置称为发电机,与此相反,把电能转换成机械能的装置称为电动机。此外,在交流电能之间的转换装置中还有变压器。上述装置中作旋转运动的装置称为旋转电机,静止的装置称为静止电机。电机还有直流电机与交流电机之分,交流电机中有单相电机和多相电机之分。目前,实际应用的电机分类为:



(2) 电机在电力系统中的作用

在发电厂中,发电机由汽轮机、水轮机、柴油机或其他动力机械带动,这些原动机将燃料燃烧的热能、水的位能、原子核裂变的原子能等转化为机械能传给发电机,由发电机将机械能转换为电能。由于绝缘水平的限制,发电机发出的电压一般为 10.5 ~ 22 kV,为了减少远距离输电中的能量损失,经济地传输电能,应采用高压输电,一般输电电压为 110 kV,220 kV,330 kV,500 kV 或更高,因此采用升压变压器将发电机发出的电压升高后再进行电能的传输。到各用电区,为了安全使用电能,各用电设备又需要不同的低电压,因此还需要各种电压等级的降压变压器将电压降低,然后供给各用户。在电力系统中,发电机和变压器是发电厂和变电站的主要设备。另外,在工农业、交通运输及日常生活中还广泛使用各种电动机作原动机,拖动生产机械和装备。电力系统简图如下:



(3) 电机中所用的材料

电机一般是以磁场为耦合场,利用电磁感应和电磁力的作用来实现能量转换或能量传递的。因此,电机中所用的材料分为以下 4 类:

1) 导电材料 作为电机中的电路系统。为减小铜耗(I^2R),要求材料的电阻率小。常用紫铜或铝。

2)导磁材料 作为电机中的磁路系统。为在一定励磁磁动势下产生较强的磁场和降低铁耗,要求材料有较高的磁导率。常用硅钢片、钢板和铸钢。

3)绝缘材料 作为带电体之间及带电体与铁芯之间的电气隔离。要求材料的介电强度高且耐热强度好。按耐热能力可分为 A, E, B, F, H, C 六级,其最高允许工作温度分别为 105 ℃,120 ℃,130 ℃,155 ℃,180 ℃,高于 180 ℃。

4)结构材料 使各部分构成整体、支撑和连接其他机械。要求材料的机械强度好,加工方便,重量轻。常用铸铁、铸钢、钢板、铝合金及工程塑料。

(4)本课程的特点

本课程为强电类专业的专业基础课,是在学习数学、物理和电路原理的基础上研究电机的工作原理、主要结构、基础理论、运行特性及试验方法的一门课程。由于有具体的电机作为研究对象,而电机中各种电、磁、力、热等方面的定律同时起作用,互相影响又互相制约,故分析时既有理论又有实际,且具有一定的复杂性和综合性。

第 1 章

变压器的基本知识及结构

1.1 变压器的基本工作原理

1.1.1 变压器的基本工作原理

变压器是利用电磁感应定律,把一种电压等级的交流电能转换成同频率的另一种电压等级的交流电能。其基本结构如图 1.1 所示,在铁芯柱上绕制两个与铁芯绝缘的线圈。电源侧的线圈称为一次绕组,匝数用 N_1 表示,负载侧的线圈称为二次绕组,匝数用 N_2 表示。一次、二次侧电路的各物理量分别用下标“1”和“2”标注,以示区别。

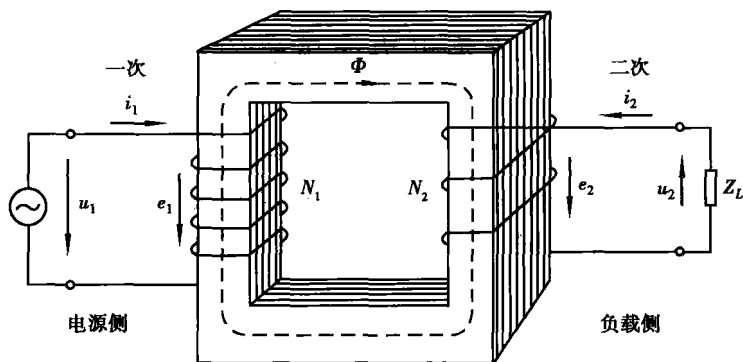


图 1.1 变压器的基本工作原理

当一次绕组接入电压为 u_1 的交流电源时,绕组中便有交流电流 i_1 流过,并在铁芯中产生与外加电压频率相同的交变磁通 Φ 。这个交变磁通 Φ 同时交链着一次绕组和二次绕组。根据电磁感应定律可知,一次、二次绕组的感应电势 e_1 和 e_2 分别为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

则

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

其中, k 为变压器的变比, 它等于一次绕组匝数 N_1 与二次绕组的匝数 N_2 之比。

又因 $e_1 \approx u_1$; $e_2 \approx u_2$

所以

$$\frac{u_1}{u_2} \approx \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

由此可见, 变压器一次电压 u_1 与二次电压 u_2 之比约等于一次绕组匝数 N_1 与二次绕组匝数 N_2 之比, 即约等于变比 k , 若 $N_1 > N_2$, 则 $u_1 > u_2$, 变压器起降压作用; 若 $N_1 < N_2$, 则 $u_1 < u_2$, 变压器起升压作用。改变变压器的变比 k , 就能达到改变二次电压 u_2 的目的。

1.1.2 变压器的分类

变压器的种类很多, 可按其用途、相数、结构、调压方式、冷却方式等不同来进行分类。

按用途分类: 升压变压器、降压变压器;

按相数分类: 单相变压器和三相变压器;

按绕组数分类: 双绕组变压器、三绕组变压器和自耦变压器;

按铁芯结构分类: 心式变压器和壳式变压器;

按调压方式分类: 无励磁调压变压器、有载调压变压器;

按冷却介质和冷却方式分类: 油浸式变压器和干式变压器;

按容量大小分类: 小型变压器、中型变压器、大型变压器和特大型变压器。

变压器种类虽多, 但各种变压器运行时的基本物理过程以及分析变压器性能的基本方法大体上都是一样的。因此将以单相和三相电力变压器为主要对象, 来研究变压器中的一些基本问题。

1.2 大型电力变压器的结构

油浸式变压器在电力系统使用最为广泛, 其基本结构可分成以下几个部分: 铁芯、绕组、绝缘套管、油箱及其他附件等。三相油浸式电力变压器的外形如图 1.2 所示, 其中铁芯和绕组是变压器的主要部件, 称为器身, 如图 1.3 所示, 器身放在油箱内部。

1.2.1 铁芯

铁芯是变压器的主磁路, 为了提高磁路的导磁性能, 减小铁芯中的磁滞损耗和涡流损耗, 铁芯一般采用高磁导率的铁磁材料, 即用 0.35 mm 或 0.5 mm 厚的硅钢片叠成。变压器用的硅钢片含硅量比较高, 以减小磁滞损耗。硅钢片的两面均涂有绝缘漆, 这样可使叠装在一起的硅钢片相互之间绝缘, 以减小涡流损耗。电力变压器的铁芯主要采用心式结构, 如图 1.4 所示。三相变压器铁芯是由 3 个铁芯柱和上、下铁轭构成的闭合磁路。在铁芯柱上套有绕组。另外, 铁芯对油箱应绝缘, 铁芯一点接地是通过接地引线经箱体顶部铁芯接地套管引出, 在箱体外接地来实现。

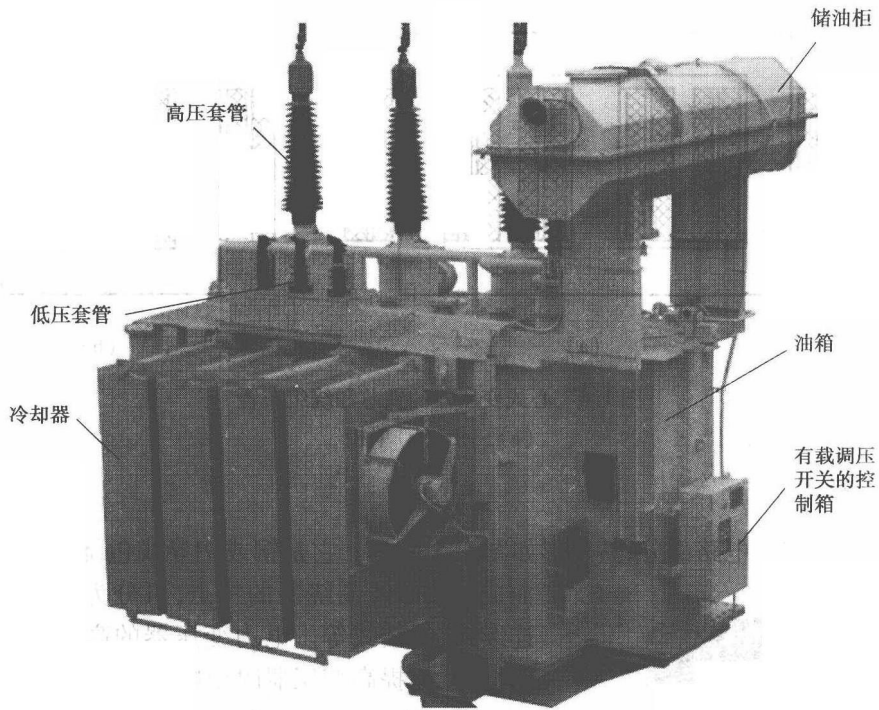


图 1.2 三相油浸式电力变压器外形图 1



图 1.3 三相油浸式电力变压器的器身

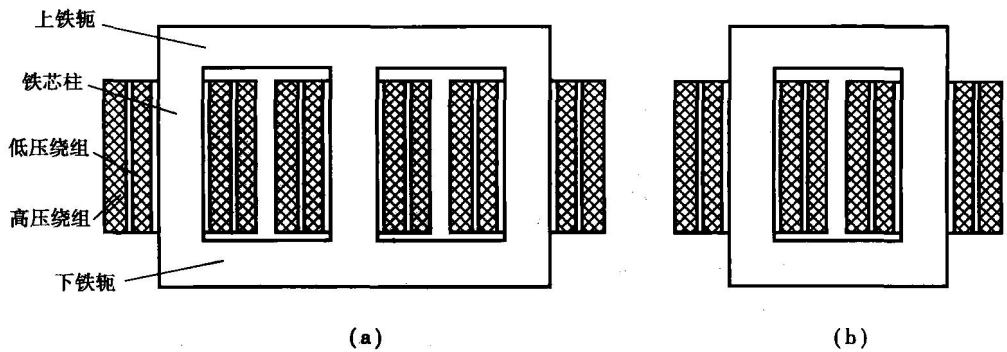


图 1.4 心式变压器的铁芯和绕组布置
(a) 三相; (b) 单相

1.2.2 绕组

绕组是变压器的电路部分,其外形如图 1.5 所示。它是铜或铝导线包绕绝缘纸以后绕制而成。按照线圈绕制的特点,可分为圆筒式、螺旋式、连续式、纠结式等。电力变压器的高压绕组通常采用纠结式,以提高变压器耐受冲击过电压的能力,低压绕组常采用连续式。为了便于绝缘,低压绕组靠近铁芯柱,高压绕组套在低压绕组外面,两个绕组之间留有油道,如图 1.4 所示。

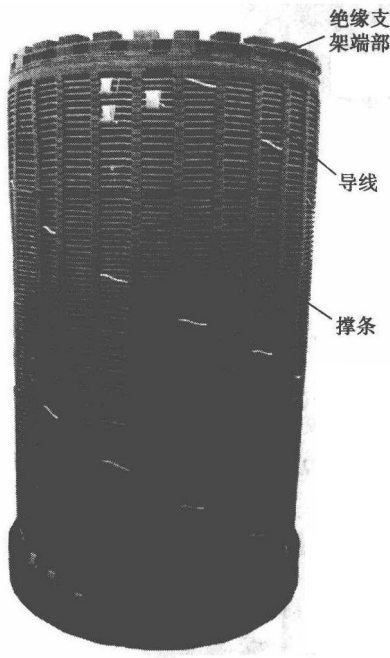


图 1.5 绕组

1.2.3 变压器油

高低压绕组和铁芯构成的器身应放在充满变压器油的油箱中。变压器油的作用;一方面,油的绝缘性能比空气好,因此可以提高绕组的绝缘强度;另一方面,通过油受热后的对流作用,可以将绕组及铁芯的热量带到冷却器,再由冷却器散发到空气中去。变压器油为矿物油,从石油分馏得来。对变压器油的要求是介电强度和着火点要高,粘度要小,水分和杂质含量尽可能小。对运行中的变压器油应定期作全面的色谱分析和油质化验。

1.2.4 油箱及其他附件

(1) 油箱

变压器油箱要用质量好的钢板焊接而成,能承受一定压力,某些部位必须具有防磁化性能。为检修变压器方便,大型变压器油箱均采用钟罩式结构,钟罩式就是将油箱盖和油箱壁制成一体,罩在器身上,变压器检修时不用吊起沉重的器身,只要将油放掉,将上节油箱吊起就可以检修。

(2) 储油柜

变压器在运行中,随着油温的变化,油的体积会膨胀或收缩,为了减少油与外界空气的接触面积,减小变压器油受潮和氧化的概率,通常在变压器上部安装一个储油柜(俗称油枕)。在大型电力变压器的储油柜内还安放一个特殊的空气胶囊,它通过呼吸器与外界相通,空气胶囊阻止了储油柜中变压器油与外界空气接触。空气胶囊形状可以随油的膨胀或收缩而变化,储油柜通过油管、瓦斯继电器与主油箱连通,这样保持了主油箱始终充满了油,并且不与外界空气接触。

(3) 呼吸器

变压器随着负荷和气温变化,变压器油温也不断变化,这样油枕内的油位随着整个变压器油的膨胀或收缩而发生变化,为了使潮气不能进入油枕使油劣化,将油枕用一个管子从上部连通到一个内装硅胶的干燥器(俗称呼吸器),硅胶对空气中水分具有很强的吸附作用,干燥状态为蓝色,吸潮饱和后变为粉红色。吸潮的硅胶可以再生。

(4) 冷却器

装配在变压器油箱壁上,对于强迫油循环风冷变压器,电动泵从油箱顶部抽出热油送入散热器管簇中,这些管簇的外表受到来自风扇的冷空气吹拂,使热量散失到空气中去,经过冷却后的油从变压器油箱底部重新回到变压器油箱内。无论电动泵装在冷却器上部还是下部,其作用是一样的。

(5) 绝缘套管

变压器绕组的引出线从油箱内部引到箱外时必须经过绝缘套管,使引线与油箱绝缘。绝缘套管一般是陶瓷的,其结构取决于电压等级。1 kV 以下的采用实心磁套管,10 ~ 35 kV 的采用空心充气或充油式套管,110 kV 及以上的采用电容式套管。为了增大外表面放电距离,套管外形做成多级伞形裙边。电压等级越高,级数越多。

(6) 分接开关

变压器常用改变绕组匝数的方法来调压。一般从变压器的高压绕组引出若干抽头,称为分接头,用以切换分接头的装置称为分接开关。分接开关分无励磁调压和有载调压两种,前者必须在变压器停电的情况下切换,后者可以在变压器带负载情况下进行切换。分接开关安装在油箱内,其控制箱在油箱外,有载调压分接开关内的变压器油是完全独立的,它也有配套的油箱、瓦斯继电器、呼吸器。

(7) 压力释放阀

当变压器内部发生严重故障而产生大量气体时,油箱内压力迅速增加,为防止变压器发生爆炸,油箱上安装压力释放阀。

(8) 气体继电器

气体继电器又称为瓦斯继电器,是变压器的一种保护装置,安装在油箱与储油柜的连接管道上,当变压器内部发生故障时(如绝缘击穿、匝间短路、铁芯事故、油箱漏油使油面下降较多等)产生的气体和油流,迫使气体继电器动作。轻者发出信号,以便运行人员及时处理。重者使断路器跳闸,以保护变压器。

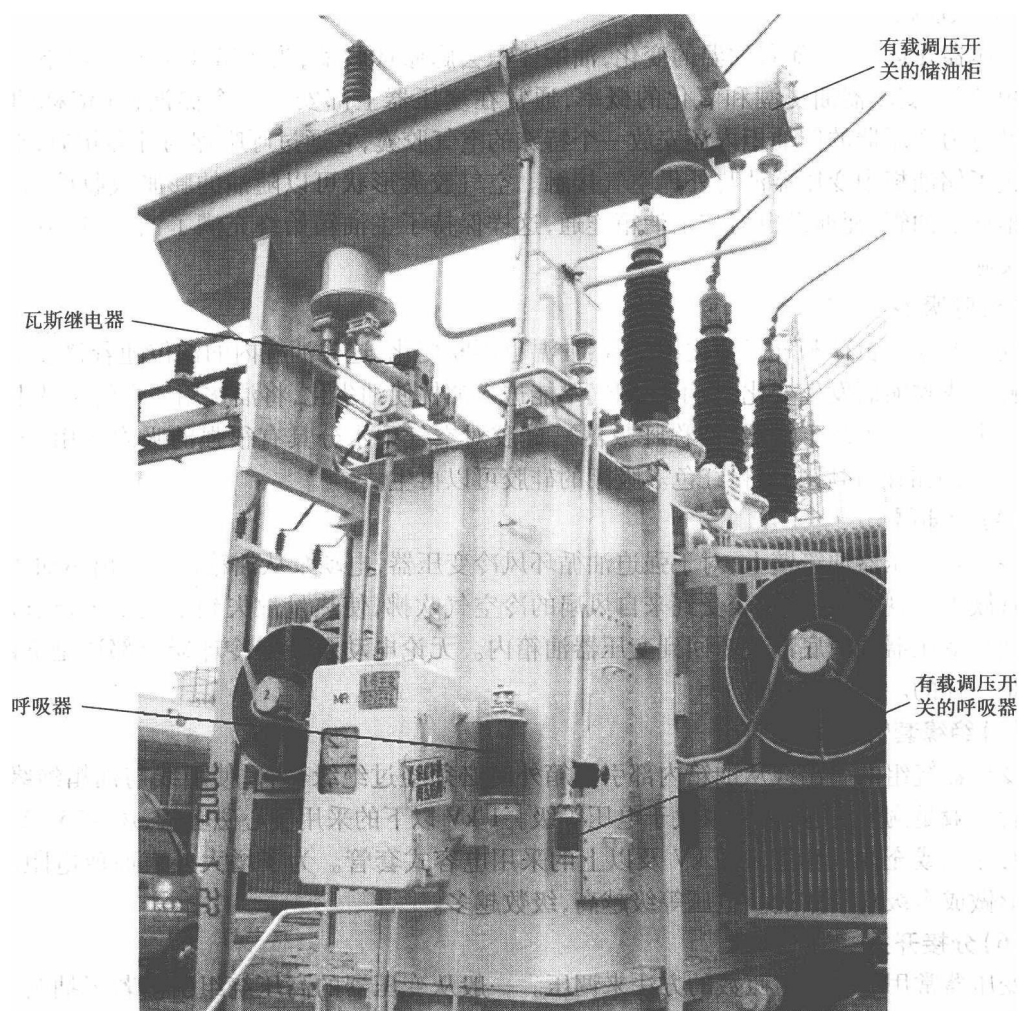


图 1.6 三相油浸式电力变压器外形图 2

1.3 变压器的型号和额定值

1.3.1 额定值

制造厂根据国家标准及设计和试验数据规定变压器的正常运行状态,称为额定运行情况。表示额定运行情况下各物理量的数值称为额定值。额定值通常标注在变压器的铭牌上。变压器的额定值主要有:

①额定容量 S_N 铭牌规定在额定使用条件下所输出的视在功率单位用 VA 或 kVA 表示。对于三相变压器是指三相总容量。

②一次额定电压 U_{1N} 正常运行时规定加在一次侧的端电压,对于三相变压器,额定电压为线电压。

③二次额定电压 U_{2N} 一次侧加额定电压,二次侧空载时的端电压。

④一次额定电流 I_{1N} 变压器额定容量下,一次绕组允许长期通过的电流,对于三相变压器, I_{1N} 为一次额定线电流。

⑤二次额定电流 I_{2N} 变压器额定容量下,二次绕组允许长期通过的电流,对于三相变压器, I_{2N} 为二次额定线电流。

单相变压器额定值的关系式: $S_N = U_{1N}I_{1N} = U_{2N}I_{2N}$ 。

三相变压器额定值的关系式: $S_N = \sqrt{3}U_{1N}I_{1N} = \sqrt{3}U_{2N}I_{2N}$ 。(无论三相变压器绕组是星形还是三角形连接,额定值的关系式形式不变)

额定频率 f_N :我国工频为 50 Hz。

另外还有额定效率、温升等额定值。

1.3.2 型号

型号表示一台变压器的结构、额定容量、电压等级、冷却方式等内容。电力变压器产品型号的代表符号如表 1.1 所示。例如:SFPL-6 300/110表示三相强迫油循环风冷双绕组铝线电力变压器,额定容量为 6 300 kVA,高压侧额定电压为 110 kV。

表 1.1 变压器型号的代表符号

分类	类别	代表符号
绕组耦合方式	自耦	O
相数	单相	D
	三相	S
冷却方式	油浸自冷	—(表示缺省)
	油浸风冷	F
	油浸水冷	S
	强迫油循环风冷	FP
	强迫油循环水冷	SP
绕组数	双绕组	—
	三绕组	S
绕组导线材质	铜	—
	铝	L
调压方式	无励磁调压	—
	有载调压	Z

习 题 1

1.1 简述变压器的基本工作原理。