

高等院校电气工程系列教材

# 电机学导学导教

戴文进 杨 莉 编著

清华大学出版社

高等院校电气工程系列教材

# 电机学导学导教

戴文进 杨 莉 编著

清华大学出版社  
北 京

## 内 容 简 介

本书是与前期出版的《电机学》一书配套的教学指导书,主要论述电机学的教学和学习方法。全书共分17章,第0章为绪论,随后的第1~15章分别为电机学相应章节的内容提要、疑难剖析、拾遗补缺、习题解答和习题补充等,第16章为电机学统一理论。

本书可作为前期出版的《电机学》一书的配套教材,也可作为其他相近专业的参考书,还可供有关技术人员选用。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

电机学导学导教/戴文进,杨莉编著. --北京:清华大学出版社,2010.9

高等院校电气工程系列教材

ISBN 978-7-302-23471-5

I. ①电… II. ①戴… ②杨… III. ①电机学—高等学校—教学参考资料 IV. ①TM3

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第155052号

责任编辑:邹开颜

责任校对:王淑云

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 刷 者:北京四季青印刷厂

装 订 者:三河市兴旺装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260

印 张:18.5

字 数:467千字

版 次:2010年9月第1版

印 次:2010年9月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:31.00元

---

产品编号:035473-01

此前笔者出版了《电机学》一书,深得读者喜爱,该书现已被广泛采用。但电机学这门课程毕竟理论深奥、概念性强,学习中会遇到不少困难,因而编写一本与之配套的教学指导书是必要的。

本书主要论述电机学的教学和学习方法,书中对电机学各部分的内容,都归纳出了内容提要、疑难剖析、拾遗补缺、习题解答和习题补充等内容,相信能对学生的学习和教师的教学有很好的指导作用。此外,本书还第一次提出了电机学统一理论,精辟地论述了四大电机的共性问题,这在电机学的有关书籍中尚属首创。

本书编排独特、构思新颖、理论创新、指导得法,既具很好的实际价值,又有深厚的理论意义。

本书由南昌大学戴文进教授和杨莉老师共同编著,戴文进教授撰写了绪论及第1、2、3、8、9、11、12、16章,杨莉撰写了第4、5、6、7、10、13、14、15章。此外,戴文进教授的在校研究生王凯、陈向杰、赵杰、林卿生、杨华、王宝福和谢友慧等同学在本书的资料收集、文字录入、图表和曲线的绘制及扫描等方面做了大量工作,在此一并致谢。

本书作者虽都长期从事电机学的教学且对电机学在理论上有一定的研究,但毕竟水平有限,加之本书对电机学统一理论是初次探讨,故书中谬误之处在所难免,敬请读者不吝指正。

编著者

2010年9月于南昌大学



<b>第 0 章 绪论</b> .....	1
0.1 电机史话 .....	1
0.2 电机学学习方法总览 .....	4
<b>第 1 章 变压器概览</b> .....	5
1.1 内容提要 .....	5
1.1.1 基本要求 .....	5
1.1.2 掌握要点 .....	5
1.2 疑难剖析 .....	6
1.3 习题解答 .....	6
1.4 习题补充 .....	8
<b>第 2 章 变压器的运行分析</b> .....	11
2.1 内容提要 .....	11
2.1.1 基本要求 .....	11
2.1.2 掌握要点 .....	11
2.2 疑难剖析 .....	15
2.3 拾遗补缺 .....	17
2.4 习题解答 .....	18
2.5 习题补充 .....	24
<b>第 3 章 三相变压器</b> .....	34
3.1 内容提要 .....	34
3.1.1 基本要求 .....	34
3.1.2 掌握要点 .....	34
3.2 疑难剖析 .....	36
3.2.1 Yy 连接的 6 种组别的接线图和相量图 .....	36
3.2.2 Yy 连接的 6 种组别的内在规律 .....	36
3.2.3 Yy 连接的 6 种组别的判定和组构的简便方法 .....	38

3.2.4	6种 Yd 连接组别的接线图和相量图 .....	39
3.2.5	Yd 连接的 6 种组别的便捷的识别和组构方法 .....	40
3.3	拾遗补缺 .....	40
3.3.1	Dy 和 Dd 的连接组别 .....	40
3.3.2	Dy 和 Dd 连接组别的接线与相量图 .....	40
3.4	习题解答 .....	42
3.5	习题补充 .....	46
<b>第 4 章</b>	<b>直流电机概览 .....</b>	<b>57</b>
4.1	基本要求 .....	57
4.2	习题解答 .....	57
4.3	习题补充 .....	58
<b>第 5 章</b>	<b>直流电机的运行分析 .....</b>	<b>60</b>
5.1	内容提要 .....	60
5.1.1	基本要求 .....	60
5.1.2	掌握要点 .....	60
5.2	习题解答 .....	63
5.3	习题补充 .....	67
<b>第 6 章</b>	<b>直流电机的运行特性 .....</b>	<b>75</b>
6.1	内容提要 .....	75
6.1.1	基本要求 .....	75
6.1.2	掌握要点 .....	75
6.2	习题解答 .....	79
6.3	习题补充 .....	84
<b>第 7 章</b>	<b>异步电机概览 .....</b>	<b>97</b>
7.1	内容提要 .....	97
7.1.1	基本要求 .....	97
7.1.2	掌握要点 .....	97
7.2	习题解答 .....	97
7.3	习题补充 .....	98
<b>第 8 章</b>	<b>三相异步电动机的运行原理 .....</b>	<b>100</b>
8.1	内容提要 .....	100
8.1.1	基本要求 .....	100
8.1.2	掌握要点 .....	100
8.2	疑难剖析 .....	109

8.3	拾遗补缺 .....	109
8.3.1	磁动势的分布和短距系数 .....	109
8.3.2	异步机的时空相(向)量图 .....	112
8.4	习题解答 .....	114
8.5	习题补充 .....	120
<b>第9章</b>	<b>三相异步电动机的运行特性</b> .....	<b>133</b>
9.1	内容提要 .....	133
9.1.1	基本要求 .....	133
9.1.2	掌握要点 .....	133
9.2	习题解答 .....	141
9.3	习题补充 .....	146
<b>第10章</b>	<b>同步电机概览</b> .....	<b>159</b>
10.1	内容提要 .....	159
10.1.1	基本要求 .....	159
10.1.2	掌握要点 .....	159
10.2	习题解答 .....	159
10.3	习题补充 .....	161
<b>第11章</b>	<b>同步发电机的运行分析</b> .....	<b>162</b>
11.1	内容提要 .....	162
11.1.1	基本要求 .....	162
11.1.2	掌握要点 .....	162
11.2	拾遗补缺 .....	174
11.3	习题解答 .....	175
11.4	习题补充 .....	185
<b>第12章</b>	<b>同步发电机的并网运行</b> .....	<b>198</b>
12.1	内容提要 .....	198
12.1.1	基本要求 .....	198
12.1.2	掌握要点 .....	198
12.2	习题解答 .....	205
12.3	习题补充 .....	220
<b>第13章</b>	<b>中小型特种电机</b> .....	<b>232</b>
13.1	内容提要 .....	232
13.1.1	基本要求 .....	232
13.1.2	掌握要点 .....	232

13.2	习题解答	235
13.3	习题补充	238
<b>第 14 章</b>	<b>驱动微电机</b>	<b>239</b>
14.1	内容提要	239
14.1.1	基本要求	239
14.1.2	掌握要点	239
14.2	习题解答	242
14.3	习题补充	242
<b>第 15 章</b>	<b>控制电机</b>	<b>244</b>
15.1	内容提要	244
15.1.1	基本要求	244
15.1.2	掌握要点	244
15.2	习题解答	250
15.3	习题补充	254
<b>第 16 章</b>	<b>电机统一理论(电机学通论)初探</b>	<b>260</b>
16.1	基本电磁规律的对立统一	260
16.2	励磁系统方式的分类统一	265
16.2.1	单边励磁磁路的特点	266
16.2.2	双边励磁磁路的特点	268
16.3	功角平面分布的完美统一	270
16.3.1	同步电机稳定运行时的功率角区间	270
16.3.2	异步电机稳定运行时的功率角区间	272
16.3.3	直流电机稳定运行时的功率角	273
16.3.4	同步调相机稳定运行时的功率角	273
16.3.5	变压器运行时的功率角	274
16.4	静态稳定判据的集中统一	276
16.4.1	电磁功率随转速而变化的一类电机的判据	276
16.4.2	电磁功率随功率角而变化的一类电机的判据	280
16.5	理论分析工具的高度统一	281
16.5.1	四大电机平衡方程	282
16.5.2	四大电机的等效电路	282
16.5.3	四大电机的相量图	283
	<b>参考文献</b>	<b>285</b>

## 0.1 电机史话

远古时代,人类以自身的力量为动力来源,人们肩背手提,挥臂而作。由于当时人类的体力有限,所能捕捉猎杀的动物和搬运的物品不多,因而生产力水平极为原始。后来,人类慢慢地学会了饲养动物,利用兽力来节省人力。这样,生产力水平便有所提高。随着人类的进一步进化和发展,人类又学会了利用大自然的动力来帮助人们干活。例如运用风力带动风车,运用水力带动水车等。这样,生产力水平便又上了一个台阶。直至十八世纪以前,社会生产的源动力还仍然停留在人力、畜力、风力和水力等原始动力的水平上。

然而,原始的人力、畜力、风力或水力是无法使生产力水平得到更大释放的。因而,人类一直在寻求更加强劲的生产动力。直至瓦特的蒸汽机面市后,才真正开创了蒸汽机时代。

其实,瓦特并不是蒸汽机的原始发明者。古人在公元前 2 世纪就已经开始了对蒸汽机的探索。在瓦特之前,蒸汽机早已面世,这就是所谓的纽科门蒸汽机。但这种早期的蒸汽机耗煤量极大,效率也相当低。瓦特经过多年研究,逐渐发现了这种蒸汽机的弊病所在。从 1765 年到 1790 年,他进行了一系列技术创新和结构上的改进,使蒸汽机的效率提高了两倍多。这样,第一台现代意义上的蒸汽机终于诞生了。蒸汽机是第一次工业革命的开创性的发明,它的发明为世界带来了一种更加有效和更加强劲的动力。

由于蒸汽机的出现,冶金、煤矿和纺织业等得到了空前的发展。世界(当时主要是英国)的纺织业实现了机械化;冶金炼铁技术和煤矿业加快了工业化的步伐;1804 年和 1807 年先后出现了蒸汽机火车和蒸汽机轮船,从而大大改善了交通运输条件,促进了工业革命的发展。从此,人类生产和生活中的动力水平便迈上了一个新的台阶,人类的工业、现代和文明史也便大大地向前迈进了一步。

然而,蒸汽机的锅炉需承受重压,因而必须用结实的材料制造,故而蒸汽机相当笨重;蒸汽机的操纵十分复杂,因而锅炉的燃烧需有经验的人员专门看管;蒸汽机的启动相当缓慢,又不能随意停机,因而其操作十分不便;蒸汽机锅炉极易发生爆炸,因而作业面上的危险性较大。此外,由于蒸汽机的锅炉和汽缸是分离的,锅炉在工房外面燃烧,需将其燃料的热能传递给蒸汽机后再转化为机械能做功。这种外部燃烧方式的热损失相当大,因而蒸汽机的效率很低,一般只有 5%~8%,最好的也不超过 10%~13%,这是蒸汽机最大的缺点。因而,几乎在蒸汽机不断发展的同时,便有人开始研究将热机外燃烧方式改为内燃烧方式。也就是不用蒸汽做工作介质,而利用燃烧后的烟气直接推动活塞运动,将锅炉和汽缸合为一体,这就是后来的内燃机。

1794年,英国工程师斯垂特在研究瓦特蒸汽机的基础上,制造了第一台内燃机。但是这台内燃机十分笨拙,其需要用人力将空气压入汽缸,然后喷入液体燃料(如松节油或板油等),再点火启动。1799年,法国工程师蓝蓬提出了以煤气作为燃料,用电火花来点火的内燃机设计方案。其后,英国工程师赖特设计爆发式内燃机,意大利工程师巴尔桑第研制出了自由活塞式的内燃机,等等。直至1860年,法国工程师雷诺终于制成了第一台实用的爆发式内燃机。这是一台单缸双动发动机,以煤气为燃料,活塞在它的前半冲程吸入煤气和空气的混合气,接着用电火花点燃,于是膨胀气体推动活塞完成后半冲程。汽缸的另半部进行同样的过程,将活塞推回。这台内燃机的热效率只有4%,电火花点火也不可靠,但它第一次成为能带动生产机构的原动力机,这对内燃机的发展起到了巨大的促进作用。雷诺内燃机的运用,使人们开始探索内燃机理论。卡诺在研究热力学的同时开创了内燃机的基本原理的探讨,提出了压缩点火的可能性。1862年,法国工程师德罗夏发表了内燃机理论,阐述了取得最高效率和最佳经济性所需要的条件。他明确指出,要制造性能好的内燃机,必须使气体尽快膨胀到最大,并尽量提高膨胀的初始压力。如不能很好地满足这些要求,就会浪费大量气体,进而取不到最高效率和最佳的经济性。德罗夏提出了实现这些要求的具体步骤,就是把活塞运动分为四个冲程。按这种原理设计发动机就是四冲程内燃机,这在当时是能最有效地利用气体的内燃机,从此往后的内燃机大都运用这个原理。1876年,德国的奥古斯特·奥托运用四冲程原理,成功地制造了第一台四冲程内燃机,并取得了专利权,因此通常人们都将内燃机的发明归功于他。越来越多的工厂都开始采用这种发动机来替代蒸汽机。从此,内燃机的时代便开始了。

但是奥托煤气内燃机也有许多不便之处,其不能作为船舶和车辆等运输机械的动力。1859年,美国的宾夕法尼亚州打出了世界上第一口油井。此后,石油产量不断提高,汽油、煤油和柴油逐渐成为广泛应用的新燃料。

1883年,德国工程师完成了汽油内燃机的研制。1885年,英国的普雷斯特曼研制出了煤油内燃机。1892年,德国人狄塞尔制造了第一台自动点火式的柴油内燃机。1903年,美国人莱特兄弟制造的飞机试飞成功,实现了人类翱翔天空的梦想,预告了人类历史上交通运输业的新纪元的来临。内燃机的发明,产生了动力机械史上的一次新革命。内燃机不仅效率高,而且种类众多,用途广泛,其可运用于船舶、车辆和飞机等运输机械领域,因而大大地推动了交通运输业的革命,使汽车、轮船和飞机制造业得以迅速发展。此外,它还引起了农业生产的机械化变革等。

几乎就在人类开始对内燃机的研究后不久,人们便注意到了电现象的存在,并开始对其进行研究。19世纪初叶,科学家们研究的重要课题,便是廉价并方便地获取电能的方法。1820年,奥斯特成功地完成了通电导线能使磁针偏转的实验。其后,不少科学家又对其进行了进一步的研究。指出磁针的偏转是因为受到力的作用,这种力便是机械力,其来自于电荷流动的电力。那么,能否通过磁场的作用使机械力与电力相互转换呢?

著名科学家安培是这项研究者的第一人,可惜他的实验并没有成功。1831年,英国科学家法拉第发现了电磁感应现象,提出了电磁感应定律,这便为随后的电机和无线电发明提供了理论依据。1834年,德国人亚哥比制成了第一台可供实用的直流电动机。1834年,人们将亚哥比的直流电动机用于拖动电动轮船试验。小船在涅瓦河上载运11人以4 km/h的速度顺流而下,又逆流而上,大获成功。值得一提的是,当时还没有可供实用的直流发电机,

为其供电的是化学电池。电动机的发明,实现了电能和机械能的转换,其为由电能向工业供给动力提供了条件。其后,人们在法拉第电磁感应定律的指导下,研制出了直流发电机,以此替代了价格昂贵的化学电池,为直流电动机的扩大应用提供了电源上的保证。

由此可见,在电机和电力拖动的发展史上,首先得到应用的是直流电动机,直至19世纪70年代,直流电及其电机在应用上还一直占据着主要地位。后来,随着电动机应用的不断扩大,用电量不断增加而当时的直流电压又无法提高,因而在远距离输电方面遇到了困难,人们开始了对交流电的研究。

1871年,凡·麦尔准发明了交流发电机。1878年,亚布洛契可夫运用交流发电机和变压器发明了简单的照明供电装置。1885年,意大利物理学家费拉利斯发现了两相电流可产生旋转磁场。一年后,他与远在美国的垣斯拉几乎同时制成了两相感应电动机的模型。1888年,多里沃·多勃罗沃尔斯基提出了三相电制。当年,南斯拉夫裔美国人特斯拉便发明了三相感应电动机,这便奠定了现代三相电路和三相电机的基础。随后,三相交流电便迅速发展起来。这时,电灯、电车、电钻、电焊等电气产品如雨后春笋般地涌现。

1902年瑞典工程师丹尼尔森首先提出同步电动机的构想。同步电动机工作原理同感应电动机一样,其由定子产生旋转磁场,转子绕组由直流供电。其转速固定不变,不受负载影响,因此同步电动机特别适用于钟表、电唱机和磁带录音机。

到20世纪初,各种主要的现代电机均已设计制造成功。但是,要将电力应用于生产,还是必须解决远距离输送的问题。1882年,法国人德普勒发明了远距离送电的方法。美国科学家爱迪生随后便建立了美国第一个火力发电站,并将输电线联接成网络,这便是现代电力网的雏形。

电力是一种优质而价廉的新能源,且特别便于远距离输送,便于控制和调节。它的广泛应用,推动了电力工业和电器制造业等一系列新兴工业的迅速发展,也为其他行业的发展提供了强大的动力。

在拖动方面,尽管上述在人类历史上曾经采用过的人力、畜力、蒸汽、内燃动力和液压等拖动方式至今还仍然或多或少地在沿用,但运用得最为广泛的还是由电动机组成的电力拖动系统。这是因为:

(1) 电能的生产、输送和分配十分方便;

(2) 电动机的种类和规格众多,且具各式各样的工作特性,能最大限度地满足大多数生产机械的不同要求;

(3) 电力拖动系统的操作和控制最为简便,便于实现生产机械的自动化和远动操作。

在随后的一百多年内,又相继出现了许多现代发电方式,比如风力发电、水力发电、火力发电、原子能发电、磁流体发电、地热发电和潮汐发电等。电力网络的建设也日新月异,电网规模不断扩大,输电距离越来越长,输电电压越来越高,配电网络技术越来越先进。在电机的生产、研究和开发等方面,也取得了令世人瞩目的成就:发电机的构造日臻完善,效率越来越高,单机容量越来越大,电压等级越来越高;电动机的规格越来越多,品种越来越齐全,新型特种高性能的电动机层出不穷。

今天,人类已经置身于高度现代化的电气时代。当今世界如若离开了电机和现代电力,那简直是无法想象!电机对国民经济的重大意义以及学习电机学的重要性便是不言而喻的了。

## 0.2 电机学学习方法总览

电机学的学习对象以四大电机,即变压器、直流电机、异步电机和同步电机为主,其总的学习方法和步骤是一致的,其可概括如下:

- (1) 了解或熟悉各类电机的基本结构及其他总体性的概貌情况;
- (2) 深入分析内部电磁关系,熟练掌握各类电机的运行原理及其分析方法;
- (3) 在以上分析的基础上,掌握各种电机的工作特性、外特性、机械特性、调速特性和启动特性等;
- (4) 根据以上所掌握的各种运行特性,分析并熟知其运用场合。



## 1.1 内容提要

### 1.1.1 基本要求

1. 了解变压器的基本结构和分类；
2. 熟知变压器的额定值及其含义，并运用其计算变压器的额定电流；
3. 熟知标幺值的概念及其在电机学中的运用。

### 1.1.2 掌握要点

#### 1. 标幺值的概念与运用

标幺值的概念见与运用在本章 1.2 节介绍。

#### 2. 变压器的铭牌数据

变压器的铭牌数据主要包括额定容量  $S_N$ 、额定电压  $U_N$ 、额定电流  $I_N$  和额定频率  $f_N$  等。此外，在变压器的铭牌上还标注有相数、接线图、额定运行效率、阻抗压降和温升。对于特大型变压器还标注有变压器的总质量、铁芯和绕组的质量以及储油量，供安装和检修时参考。

#### 3. 根据变压器的铭牌数据计算其额定电流

根据变压器铭牌上的额定数据，可运用以下公式计算变压器的额定电流：

(1) 对于单相变压器

原边额定电流

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}}$$

副边额定电流

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}}$$

(2) 对于三相变压器

原边额定线电流

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}$$

副边额定线电流

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}}$$

应该指出的是,对于三相变压器而言,铭牌上所标注的额定电压为线电压,以上计算得出的电流亦为线电流,容量为三相之值。

## 1.2 疑难剖析

本章的疑难问题是标幺(念 YAO)值。

按理说标幺值不应该成为疑难问题,可不少教科书却开辟单独章节连篇累牍地讲述这个问题,反倒将此问题复杂化了,以至于不少学生学了半天,因不了解其含义,竟将其念着“标幺(ME)值”。其实,标幺值并不是电机学中的一个什么新鲜的物理概念,而只是初等数学中的一个数学概念。标幺值与百分值一样,就是人们所熟知的相对值。

相对值运用的方便之处为人尽知。比如,有人说某台电机此时的工作电流是 5 安,由于人们并不知道它的容量是多大,因此没人能知晓这台电机工作的状况:如若是一台微型电机,也许它早就烧坏了;如若是一台大型电机,也许只是处于空载。但如若告诉你其工作电流是 5%,你就一定知道它的工作状况了。

只是由于百分值的后面总跟着一个讨厌的百分号“%”,这在电机学的大量运算中着实不方便。而百分值后之所以总跟着那个百分号,就是因为其概念是以“一百”作为基数,看实际值占其中的多少;如若以“一”作为基数,再来看实际值占其中的多少,就不会出现那个百分号了,而这就是所谓的标幺值。这么一说就很清楚了,标幺值就是将实际值标在基数“一”上的值,其结果是一个十进制的小数(只是有时并不为纯小数而已)。

与之类似,百分值就是标在基数“一百”上的值,从这个意义上讲,百分值可称之为“标百值”。

那么为什么要叫“标幺值”呢?其实,人们在电信领域中早就用到了这个“幺”字。由于辨音上的方便,人们将电报电话中的“0”、“1”、“2”和“7”,分别读着“洞”、“幺”、“两”和“拐”。而“1”又为什么要读着“幺”呢?这是因为在人的认知中,“1”是早期定义的自然数中最小的数(后来扩展到了 0),而“幺”字在我国民间就是“小”的意思。至今在湖南、江西和四川等地的农村,还有将“小妹”称着“幺妹”的习惯。

本书讲到此,读者应该对标幺值有一个正确的认识了。

在此采用标幺值的优点综述如下:

- (1) 标幺值与百分值一样属一种相对值,因而其具有相对值运用的一切优点;
- (2) 不论电机的容量的大小,若用标幺值表示其参数及性能数据,其值一般均处于一个很狭窄的范围之内,便于对其的正确性进行判断;
- (3) 当采用标幺值后,电机的匝比便为 1,这样便可免除原副边各参数和物理量的折算过程,此时各参数和物理量的标幺值是一样的,可大大简化运算过程。

## 1.3 习题解答

1-1 为什么在电力系统中广泛应用变压器?试举几个在工业企业及其他行业中运用变压器的例子。

**答** 发电机发出的电压不可能太高,一般只有  $10.5\sim 20\text{ kV}$ ,要想将发出的大功率电能直接送到很远的用电区去,几乎是不可能的。这是因为,低电压大电流输电,除了在输电线路路上产生很大损耗外,线路上产生的压降也足以使电能送不出去。为此,需要用升压变压器将发电机端电压升高到较高的输电电压(当输电的功率一定时,电压升高,电流就减小),输送过程产生的损耗将降低,能比较经济地将电能送出去。一般地,当输电距离越远,输送的功率越大,要求的输电电压也越高。例如,输电距离为  $200\sim 400\text{ km}$ ,输送容量为  $200\sim 300\text{ GW}$  的输电线,输电电压一般需要  $220\text{ kV}$ ,输电距离在  $1000\text{ km}$  以上,则要求有更高的输电电压。

当电能送到用电地区,要用降压变压器将电压降低为配电电压,然后送到用电分区,最后再经配电变压器将电压降到用户所需要的电压等级,供用户使用。大型动力设备,采用  $6\text{ kV}$  或  $10\text{ kV}$ ;小型动力设备和照明用电则为  $380\text{ V}/220\text{ V}$ 。为了将两个不同电压等级的电力系统彼此联系起来,常常用到三绕组变压器。此外,还有各种专门用途的变压器,如整流变压器、电炉变压器等。由此可见,变压器的用途十分广泛,其品种、规格也很多。简单的输配电系统如图 1-1 所示。

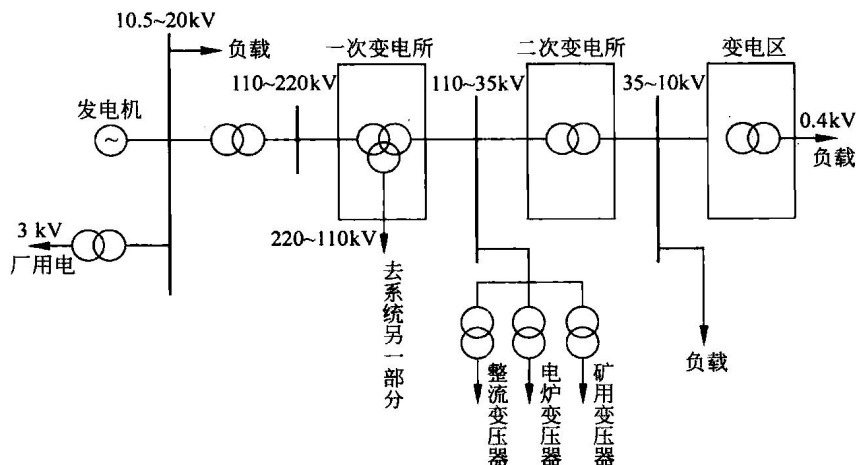


图 1-1 简单的输配电系统图

### 1-2 变压器有哪些主要部件?各部件起什么作用?

**答** 变压器的主要部件是高磁导率的闭合铁芯和套在铁芯上的一、二次绕组。铁芯构成了变压器磁路部分,绕组构成了变压器的电路部分。一、二次绕组通过铁芯磁路相耦合,从而可以利用电磁感应作用来实现对交流电能的变换。

### 1-3 简述变压器铁芯结构和绕组结构的形式。

**答** 变压器的铁芯用双面涂绝缘漆的硅钢片叠压而成,铁芯结构可以分为铁芯柱和铁轭,单相变压器有两个铁芯柱,三相变压器有三个铁芯柱。变压器的铁芯材料有芯式结构和壳式结构两种基本形式。

变压器绕组的基本形式有同心式和交叠式两种,芯式变压器常用同心式绕组,壳式变压器常用交叠式绕组。

### 1-4 铁芯的作用是什么?为什么要用厚 $0.35\text{ mm}$ 、双面涂漆的硅钢片制造而成?

答 铁芯是变压器的主磁路,又是它的机械骨架。为了提高磁路的导磁性能,减少铁芯中的磁滞、涡流损耗,铁芯一般用高磁导率的厚 0.35 mm、双面涂漆的硅钢片叠压而成。

1-5 有一台单相变压器,额定容量  $S_N = 50 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ,额定电压  $U_{1N}/U_{2N} = 220/36 \text{ V}$ ,求一、二次侧的额定电流。

解 一、二次侧额定电流分别为

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{50\,000}{220} = 227.27(\text{A})$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{50\,000}{36} = 1388.89(\text{A})$$

1-6 有一台三相电力变压器,容量为  $S_N = 5000 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ,一、二次绕组分别采用星形和三角形接法, $U_{1N}/U_{2N} = 10/6.3 \text{ kV}$ ,求:(1)变压器一、二次侧的额定电压和额定电流;(2)变压器一、二次绕组的额定相电压和额定相电流。

解 (1) 由已知条件,一、二次侧额定线电压分别为

$$U_{1N} = 10 \text{ kV}, \quad U_{2N} = 6.3 \text{ kV}$$

一次绕组额定线电流为

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{5000}{\sqrt{3} \times 10} = 288.7(\text{A})$$

二次绕组额定线电流为

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{5000}{\sqrt{3} \times 6.3} = 458.2(\text{A})$$

(2) 一次绕组为星形连接,一次侧额定相电压为(下标  $\phi$  表示相值,下同)

$$U_{1N\phi} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5.774(\text{kV})$$

一次绕组额定相电流

$$I_{1N\phi} = I_{1N} = 288.7 \text{ A}$$

二次绕组为三角形连接,二次侧额定相电压

$$U_{2N\phi} = U_{2N} = 6.3 \text{ kV}$$

二次绕组额定相电流

$$I_{2N\phi} = \frac{I_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{458.2}{\sqrt{3}} = 264.5(\text{A})$$

## 1.4 习题补充

1-1 电力变压器的主要用途有哪些?为什么电力系统中变压器的安装容量比发电机的安装容量大?

答 电力变压器按它的用途分主要有:(1)升压变压器;(2)降压变压器;(3)配电变压器;(4)联络变压器;(5)厂用电变压器。因为发电机发出的电能要经过变压器升压、降压和配电后才传送到用户,所以变压器安装容量是发电机安装容量的几倍。

1-2 变压器原、副方和额定电压的含义是什么?

答 变压器一次额定电压  $U_{1N}$  是指规定加到一次侧的电压,二次额定电压  $U_{2N}$  是指变压器一次侧加额定电压、二次侧空载时的端电压。

1-3 一台三相变压器,额定电压  $U_{1N}/U_{2N}=10/3.15$  kV,额定电流  $I_{1N}/I_{2N}=57.74/183.3$  A,求该变压器的额定容量。

解 额定容量

$$S_N = \sqrt{3}U_{1N}I_{1N} = \sqrt{3} \times 10 \times 57.74 = 1000(\text{kV} \cdot \text{A})$$

或

$$S_N = \sqrt{3}U_{2N}I_{2N} = \sqrt{3} \times 3.15 \times 183.3 = 1000(\text{kV} \cdot \text{A})$$

提示:变压器的一、二次额定容量相等。三相变压器的额定容量  $S_N$  是指三相总容量。三相变压器的额定电压、额定电流均是指线值。

1-4 有一台 D-50/10 单相变压器,  $S_N=50$  kV·A,  $U_{1N}/U_{2N}=10\,500/230$  V,试求变压器原、副线圈的额定电流?

解 一次绕组的额定电流

$$I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}} = \frac{50 \times 10^3}{10\,500} = 4.76(\text{A})$$

二次绕组的额定电流

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{50 \times 10^3}{230} = 217.39(\text{A})$$

1-5 一台三相降压变压器的额定容量  $S_N=3200$  kV·A,额定电压  $U_{1N}/U_{2N}=35/10.5$  kV,一、二次绕组分别为星形、三角形连接,求:(1)该变压器一、二次侧的额定线电压、额定相电压以及额定线电流、额定相电流;(2)若负载的功率因数为 0.85(滞后),则该变压器额定运行时能带多少有功负载,发出的无功功率又是多少(忽略负载运行时的二次电压的变化)?

解 (1) 一次侧的额定线电压就是一次额定电压,即  $U_{1N}=35$  kV。

由于一次绕组为星形连接,因此一次侧的额定相电压为

$$U_{1N\phi} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}} = \frac{35}{\sqrt{3}} = 20.21(\text{kV})$$

一次侧的额定线电流和相电流为

$$I_{1N} = I_{1N\phi} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{3200}{\sqrt{3} \times 35} = 52.79(\text{A})$$

二次侧的额定线电压就是二次额定电压,即  $U_{2N}=10.5$  kV。

由于二次绕组为三角形连接,因此二次侧额定相电压  $U_{2N\phi}=U_{2N}=10.5$  kV。二次侧的额定线电流为

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{3200}{\sqrt{3} \times 10.5} = 176(\text{A})$$

二次侧额定相电流为

$$I_{2N\phi} = \frac{I_{2N}}{\sqrt{3}} = \frac{176}{\sqrt{3}} = 101.6(\text{A})$$

(2) 若负载的功率因数为  $\cos \varphi=0.85$ ,不计负载运行时二次电压的变化,则额定运行时变压器发出的有功功率为