



工业和信息化高职高专
“十二五”规划教材立项项目

高等职业院校

机电类“十二五”规划教材

电机与机床 电气控制

(第2版)

Motor and Machine
Electrical Control (2nd Edition)

采用项目化形式编写

结合中高级电工职业标准

将电机与机床电控有机融合



◎ 吴灏 冯宁 主编

◎ 周荃 李传军 副主编



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



精品系列



工业和信息化高职高专
“十二五”规划教材立项项目

高等职业院校

“十二五”规划教材

电机与机床 电气控制

(第2版)

Motor and Machine
Electrical Control (2nd Edition)

◎ 吴灏 冯宁 主编

◎ 周荃 李传军 副主编

人民邮电出版社
北京



图书在版编目 (C I P) 数据

电机与机床电气控制 / 吴灏, 冯宁主编. — 2版

— 北京: 人民邮电出版社, 2012.4

高等职业院校机电类“十二五”规划教材

ISBN 978-7-115-27632-2

I. ①电… II. ①吴… ②冯… III. ①电机学—高等职业教育—教材②机床—电气控制—高等职业教育—教材
IV. ①TM3②TG502.35

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第035657号

内 容 提 要

本书共分6个项目,包括检查、修复、测试小型变压器;拆卸、装配、维护异步电动机;控制、调试三相异步电动机的运行;常用机床电气控制线路的装调及故障排除;直流电机的使用、维护及故障处理;控制、驱动控制电机。

本书可作为高职高专、成人教育、职工大学的电气类专业、机电类专业以及相关专业的教材,也可供从事相关专业的工程技术人员参考。

工业和信息化部高职高专“十二五”规划教材立项项目

高等职业院校机电类“十二五”规划教材

电机与机床电气控制 (第2版)

◆ 主 编 吴 灏 冯 宁

副 主 编 周 荃 李传军

责任编辑 潘新文

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号

邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

三河市海波印务有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 12.25

2012年4月第2版

字数: 283千字

2012年4月河北第1次印刷

ISBN 978-7-115-27632-2

定价: 29.80元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

前言

本书是在原教材第一版的基础上,根据高职院校应用型人才侧重技术应用和面向生产现场工作的特点,改变了原有的体系,按照“项目导入,任务驱动”的形式编写,体现了高等职业教育教学的特点。本书在每个项目中都有任务实施所涉及的相关理论知识内容的介绍和链接,同时使学生从最基本的应知、应会开始,贴近现场实际,有很强的实用性和可操作性。

“电机与机床电气控制”是一门实用性很强的机电类专业必修课程。本着贯彻高职高专教材“基本理论够用为度,不强调完整性、系统性;基本知识广而不深,点到为止;基本技能贯穿教材始终”的精神,将传统的《电机原理》、《电力拖动基础》、《工厂电气控制设备》3门课程以及国家职业技能鉴定中的中、高级电工技术等级标准、鉴定规范、考核要求的相关内容进行了有机的整合。全书以培养高级应用型人才为目标,以技能培养和工程应用能力的培养为出发点,突出实际应用。

本教材是编者在总结多年机电类专业职业技术教学、职业技能鉴定培训和工程实践经验的基础上编写的,有以下几个特点。

1. 采用基于工作过程导向的项目教学方法,将传统的电机拖动与机床电气控制线路有机地融为一体,力求简明扼要、层次分明、重点突出,按照各个工作任务进行分类编写。
2. 根据电机学科的发展趋势,适当压缩直流电机内容。讲清直流电机的结构和原理,对直流电机的绕组、电枢反应、换向等问题只做简介,以他励直流电动机为例介绍直流电机的电力拖动,使学生既能全面了解直流电机的特点,又不需花费太多的学时。
3. 贯彻中、高级电工职业技能标准和鉴定规范的要求,将相关内容有机整合,使其融为一体,为学生获取相关职业技术等级证书奠定基础。

全书分为6个项目,各项目均按照“任务引入→相关知识→任务实施→知识拓展”的步骤进行编写,包括检查、修复、测试小型变压器;拆卸、装配、维护异步电动机;控制、调试三

相异步电动机的运行；常用机床电气控制线路的装调及故障排除；直流电机的使用、维护及故障处理；控制、驱动控制电机。本书的总学时范围为60~72学时，各个学校可以根据自身具体情况进行内容取舍，并安排一定时间的考证培训。

本书由广东机电职业技术学院的吴灏、冯宁任主编，承德石油高等专科学校的李传军和潍坊职业学院周荃任副主编，皇将包装机械有限公司的李剑峰高级工程师担任主审。本书项目1由冯宁编写，项目2由吴灏、周荃编写，项目3由李传军编写，项目4与项目5由冯仙群编写。本书在编写过程中参考了一些国内外有关的著作和文献，在此对这些文献的作者一并表示衷心感谢。

由于作者水平有限，加上编写时间仓促，书中难免存在错误和疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2011 年 12 月



项目一 检查、修复、测试小型变压器

任务一 变压器的认识	1
任务引入	1
相关知识	1
一、变压器的工作原理及结构	1
(一) 变压器的分类	2
(二) 变压器的铭牌	3
(三) 基本工作原理	4
(四) 基本结构	4
二、单相变压器运行特性	6
(一) 单相变压器空载运行	6
(二) 单相变压器负载运行	8
(三) 变压器的运行特性	9
三、三相变压器的并联运行	10
(一) 连接组别	11
(二) 变压器的并联运行	12
任务实施	13
一、同名端的判断	13
二、同名端的测定	13
任务二 变压器的修复、测试	14
任务引入	14
相关知识	14
任务实施	17
知识拓展	17
(一) 仪用互感器	17

(二) 自耦变压器	19
(三) 电焊变压器	20
小结	21
习题	21

项目二 拆卸、装配、维护异步电动机

任务一 三相异步电动机的认识	24
任务引入	24
相关知识	24
一、三相异步电动机的用途及结构	24
(一) 三相异步电动机的分类	25
(二) 三相异步电动机的结构	25
二、三相异步电动机基本工作原理	26
三、三相异步电动机的定子绕组	29
(一) 交流绕组的基本知识	29
(二) 三相单层绕组	30
(三) 三相双层绕组	32
任务实施	33
知识拓展	34
任务二 三相异步电动机运行维护、 常见故障及处理	34
任务引入	34
相关知识	35
一、三相异步电动机的运行分析	35
(一) 三相异步电动机空载运行	35
(二) 三相异步电动机负载运行	35

(三) 三相异步电动机的功率和电磁转矩	37	二、三相笼形异步电动机的双向运行	
二、三相异步电动机的机械特性	39	控制线路的装接、调试	65
(一) 电磁转矩 T	39	知识拓展	65
(二) 三个特殊转矩	40	一、控制开关	65
(三) 机械特性	42	二、降压启动	67
三、三相异步电动机的运行维护、常见故障及		三、特殊笼形异步电动机启动	74
处理方法	43	四、星形-三角形降压启动控制线路	75
(一) 运行维护	43	五、自耦降压启动控制线路	76
(二) 三相异步电动机的常见故障及		六、三相绕线式异步电动机启动控制	77
处理方法	44	任务二 三相异步电动机的调速控制	78
任务实施	45	任务引入	78
知识拓展	46	相关知识	78
任务三 单相异步电动机的拆装及检修	47	一、相关低压电器的认识和安装	79
任务引入	47	二、三相异步电动机调速控制	80
相关知识	47	(一) 变极调速	80
一、单相异步电动机的工作原理	47	(二) 变频调速	82
二、单相异步电动机的启动及调速方法	48	(三) 变转差率调速	83
(一) 单相异步电动机的启动方法	48	任务实施	85
(二) 单相异步电动机的反转及调速		知识拓展	85
方法	50	任务三 三相异步电动机的制动控制	86
任务实施	51	任务引入	86
知识拓展	51	相关知识	86
一、单相异步电动机的常见故障及处理方法	51	一、相关低压电器的认识和安装	86
二、单相异步电动机的拆装及检修	52	二、三相异步电动机制动控制	87
小结	53	(一) 反接制动	87
习题	54	(二) 能耗制动	89
项目三 控制、调试三相异步电动机的运行		(三) 回馈制动(再生发电制动)	89
任务一 三相异步电动机的启动控制	56	任务实施	90
任务引入	56	一、三相异步电动机速度控制的反接制动	
相关知识	57	控制线路的装接、调试	90
一、低压电器概述	57	二、三相异步电动机时间控制的能耗制动	
二、三相笼形异步电动机启动控制	58	控制线路的装接、调试	91
任务实施	65	知识拓展	92
一、三相笼形异步电动机的单向运行		三相异步电动机速度控制的能耗制动控制	
控制线路的装接、调试	65	线路的装接、调试	92

小结	92	任务四 X62W 型万能铣床电气控制线路的	
习题	93	装调及故障排除	116
项目四 常用机床电气控制线路的装调及故障排除		任务引入	116
任务一 C650 型普通车床电气控制线路的		相关知识	116
装调及故障排除	96	一、X62W 型万能铣床的工作情况	116
任务引入	96	二、电气控制线路分析	117
相关知识	97	(一) 主电路分析	119
一、C650 型普通车床的工作情况	97	(二) 控制电路分析	119
二、电气控制线路分析	97	任务实施	122
(一) 主电路分析	99	知识拓展	123
(二) 控制电路分析	99	一、主轴控制部分的故障	125
任务实施	100	二、进给控制部分的故障	125
知识拓展	102	任务五 T68 型卧式镗床电气控制线路的	
任务二 M7120 型平面磨床电气控制线路的		装调及故障排除	127
装调及故障排除	103	任务引入	127
任务引入	103	相关知识	127
相关知识	103	一、T68 型卧式镗床的工作情况	127
一、M7120 型平面磨床的工作情况	103	二、电气控制线路分析	128
二、电气控制线路分析	104	(一) 主电路分析	128
(一) 控制特点	104	(二) 控制电路分析	129
(二) 相关低压电器——电磁式继电器	106	任务实施	132
(三) 电磁工作台整流电源控制线路	107	知识拓展	133
任务实施	108	小结	134
知识拓展	110	习题	135
任务三 Z3040 型摇臂钻床电气控制线路的		项目五 直流电机的使用、维护及故障处理	
装调及故障排除	111	任务一 直流电机的认识	136
任务引入	111	任务引入	136
相关知识	111	相关知识	137
一、Z3040 型摇臂钻床的工作情况	111	一、直流电机的基本工作原理及结构	137
二、电气控制线路分析	112	(一) 直流电机的基本工作原理	137
(一) 主电路分析	113	(二) 直流电机的基本结构	138
(二) 控制电路分析	113	(三) 直流电机的铭牌参数	139
任务实施	114	二、直流电机电枢绕组的感应电动势与	
知识拓展	115	电磁转矩	140

任务二 直流电机的拖动控制 141**任务引入** 141**相关知识** 141

一、直流电动机的机械特性 142

(一) 直流电动机的基本方程式 142

(二) 机械特性方程式 142

(三) 固有机械特性 144

二、直流电动机的启动 144

三、直流电动机的调速 146

四、直流电动机的制动与反转 148

(一) 他励直流电动机的制动 148

(二) 他励直流电动机的反转 151

任务三 直流电动机的使用、维护及 151**常见故障处理** 151**任务引入** 151**相关知识** 152

一、直流电动机的正确使用 152

二、直流电动机的定期维护 153

任务实施 153**知识拓展** 155

一、对一台 10kW 以下直流电机进行拆卸、

清洗和组装 155

二、直流电机的负载试验 155

小结 156

习题 157

项目六 控制、驱动控制电机 159**任务一 测速发电机的使用** 159**任务引入** 159**相关知识** 159

一、直流测速发电机 160

(一) 直流测速发电机的结构和

工作原理 160

(二) 产生误差的原因和改进的方法 160

二、交流测速发电机 161

任务二 控制、驱动伺服电动机 163**任务引入** 163**相关知识** 163

一、直流伺服电动机的控制、驱动 163

二、交流伺服电动机的控制、驱动 165

(一) 交流伺服电动机的结构和

基本工作原理 165

(二) 交流伺服电动机的控制 167

(三) 交流伺服电动机的驱动 169

任务三 控制、驱动步进电动机 170**任务引入** 170**相关知识** 170

一、步进电动机的工作原理 170

(一) 三相反应式步进电动机的结构 170

(二) 工作原理 171

二、步进电动机的驱动与控制 172

小结 175

习题 175

附录 A 低压电器产品型号编制方法**附录 B 电气图常用图形及文字符号一览表****参考文献**

项目一

| 检查、修复、测试小型变压器 |

变压器是根据电磁感应原理，将某一种等级的交流电能转变为同频率的另一等级交流电能的静止电气设备。变压器具有变换电压、变换电流和变换阻抗的作用。

任务一

变压器的认识

任务引入

本任务的要求是学会变压器的工作原理和运行特性，为变压器的检查工作打下基础。

相关知识

| 一、变压器的工作原理及结构 |

电力系统中变压器是电能的传输、分配和使用的主要电气设备。远距离传输大功率电能时，可通过变压器升高电压，减小电流，以降低线路压降和线路损耗，节省输电线材。我国高压输电线路等级主要有 35kV、110kV、220kV、330kV、500kV 及 750kV，但发电厂的交流发电机受绝缘结构条件的限制，一般额定电压为 15~20kV，故发电机发出的电压需经变压器升高后再输送；同时受电

端又必须经变压器降压,以满足用户电气设备的用电要求与安全使用的目的。由于电能从发电厂到用户的传输和分配,需经多次变换电压,因此电力系统中变压器设备总容量大约为发电设备总容量的6~8倍。无论在电力系统、自控系统,还是在电子线路中变压器都具有广泛的应用。同时还广泛应用于通信、广播、遥测、金属冶炼、焊接、电子设备及其他方面。

(一) 变压器的分类

变压器种类繁多,品种庞杂,为适应不同的工作条件和目的,分类见表1-1。其中最主要品种是电力变压器,除此之外的其他用途变压器均可统称为特种变压器,包括电炉变压器、电焊变压器、整流变压器、试验变压器、仪用互感器、控制用变压器等。

表 1-1 变压器的分类

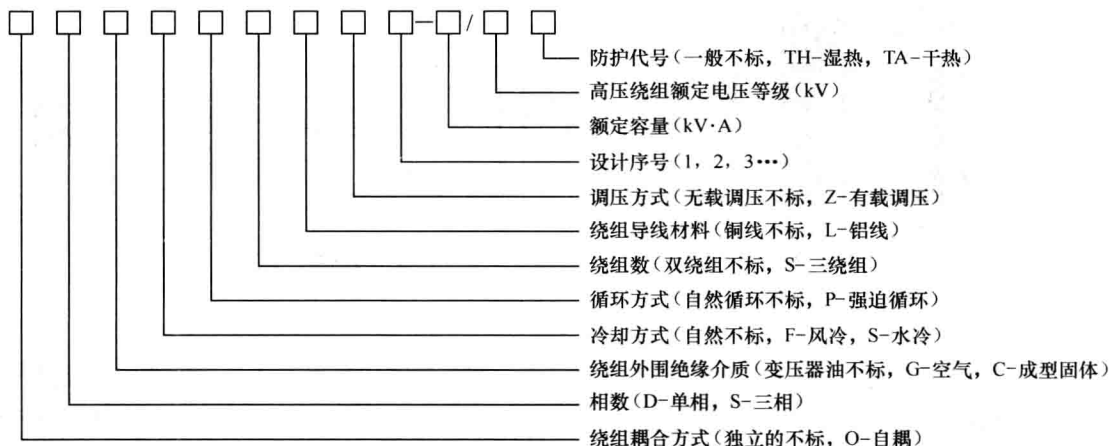
分 类 方 法	类 别	细 分 类 别
安装地点分类	户内 户外	干式 油浸式、柱上式、平台式、一般户外
相数分类	单相、三相	
调压方式分类	无激磁调压、有载调压	
绕组数量分类	双绕组、三绕组、单绕组 自耦变压器	特殊整流变压器分离的绕组有多于三绕组的
导磁体材质分类	冷轧硅钢片、热轧硅钢片	
材质分类	铜导线、铝导线、半铜半铝	
冷却方式分类	油浸自冷 油浸风冷 油浸水冷 强油循环 干式自冷 干式风冷	扁管散热、片式散热、瓦楞油箱 附冷却风扇 附油水冷却器 有潜油泵 附风冷却器
使用要求分类	电力用 电炉用 整流用 矿用 船用 中频淬火 试验用 电信用 电焊用	输配电用 炼钢、炼电石、炼合金 牵引、传动、电解或高压整流 一般型和防爆型 防滴型和防护型 可作中频加热 高压耐压实验变压器 调幅变压器 电焊变压器

(二) 变压器的铭牌

为了便于用户正确使用和维护变压器,生产厂家按照国家标准,在铭牌上标明变压器型号及各种额定数据。

1. 型号

表明变压器的基本类别和特点。各项内容规定如下。



2. 额定值

(1) 额定容量 S_N (V·A 或 kV·A)。

指额定状态下运行时变压器输出的视在功率,三相变压器指三相容量之和。

$$\text{单相变压器} \quad S_N = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N} \quad (1-1)$$

$$\text{三相变压器} \quad S_N = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} \quad (1-2)$$

(2) 额定电压 U_{1N} 、 U_{2N} (V 或 kV)。

U_{1N} : 变压器一次侧的额定电压。

U_{2N} : 变压器一次侧加额定电压时,二次侧的空载电压值。

对于三相变压器,两者均指线电压。

(3) 额定电流 I_{1N} 、 I_{2N} (A 或 kA)。

根据额定容量和额定电压算出的一、二次侧电流。对于三相变压器,两者均指线电流。

(4) 额定频率 f_N (Hz)。

中国规定的标准工业用电频率为 50 Hz。

除此之外铭牌上还有效率、温升、连接组别、短路阻抗电压值等。

例 有一台三相油浸自冷式铝线变压器, $S_N = 180 \text{ kV} \cdot \text{A}$, Y, yn 接法, $U_{1N}/U_{2N} = 10 \text{ kV}/0.4 \text{ kV}$ 。试求一、二次侧的额定电流。

解:

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{1N}} = \frac{180}{\sqrt{3} \times 10} = 10.4 \text{ (A)}$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3} U_{2N}} = \frac{180}{\sqrt{3} \times 0.4} = 259.8 \text{ (A)}$$

(三) 基本原理

变压器基本部件是铁芯和绕组,称为器身。图 1-1 所示为单相双绕组变压器结构示意图。

图 1-2 所示为变压器在不同电路图中的符号。其中与电源相连的绕组称为一次绕组(又称为原边、初级),与负载相连的绕组称为二次绕组(又称为副边、次级)。

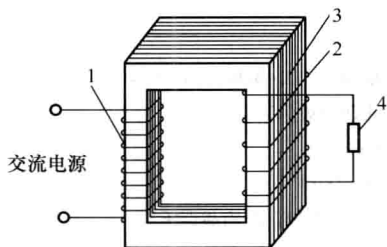


图1-1 变压器的结构示意图

1——一次绕组; 2——二次绕组; 3——铁芯; 4——负载

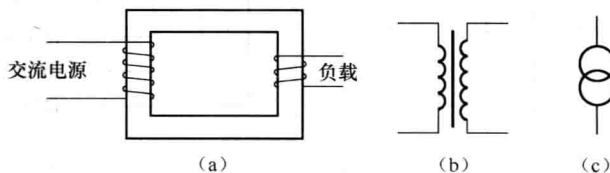


图1-2 变压器示意图

当在一次绕组中加上交流电压时,产生交流电流,并在铁芯中产生磁通。该磁通同时交链一、二次绕组。根据电磁感应定律,必然在两绕组上均产生感应电动势,二次绕组在感应电动势的作用下向负载供电,实现电能传递。

可见一、二次绕组电路只有磁的耦合,通常没有电的联系,变压器本身不产生电能,仅起传递电能、变换电压的作用。

(四) 基本结构

变压器的种类不同,其结构也有较大差别,但是主要结构是基本相同的,除器身外,还包括油箱及其他附件。下面以图 1-3 所示的油浸式电力变压器为例介绍主要结构部件。

1. 铁芯

铁芯是变压器的磁路部分,是磁通闭合的路径,又是绕组的支撑骨架。为提高铁芯的导磁性能,减小磁滞、涡流损耗,铁芯通常采用表面经绝缘处理的 0.35mm 厚度的热轧硅钢片或冷轧硅钢片叠装而成。冷轧硅钢片比热轧硅钢片具有更好的导磁性能、较低的损耗,所以被广泛采用。

铁芯由铁芯柱和铁轭(磁轭)两部分组成。铁芯柱上套装绕组,铁轭作为连接磁路之用,不套绕组。铁芯的结构型式分为心式和壳式两种,如图 1-4 所示。

(1) 心式结构:绕组包围铁芯,磁轭靠着绕组的顶面和底面。绕组的装配及绝缘比较容易,国产电力变压器的铁芯主要采用心式结构。

(2) 壳式结构:铁芯不仅包围绕组顶面、底面,而且还包围绕组的侧面。壳式变压器机械强度高但制造复杂、费料,一般只用于小型电源变压器。

2. 绕组

绕组是变压器的电路部分,通过电磁感应实现交流电能的传递,应具有较高的耐热性能、机械强度及良好的散热条件,以保证变压器的可靠运行和寿命。一般小容量配电变压器绕组常采用漆包

扁铜线或铝线；大中型变压器绕组多采用纱包或纸包铜线绕制而成。

按高、低压绕组在铁芯柱上放置方式的不同，绕组结构形式分为同心式和交叠式两种，如图 1-5 所示。

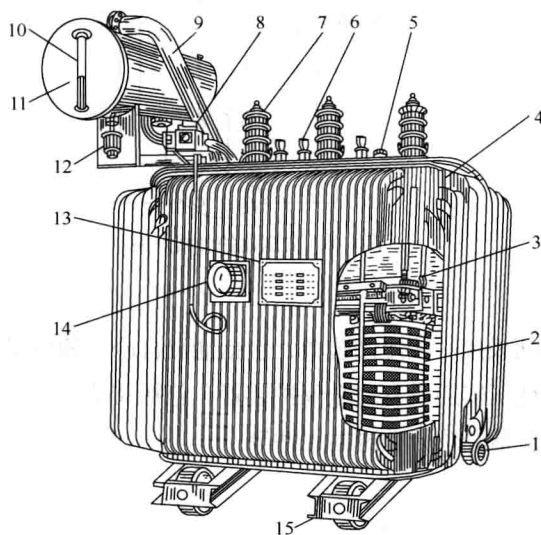


图1-3 油浸式电力变压器结构示意图

- 1—油阀；2—绕组；3—铁芯；4—油箱；5—分接开关；
6—低压套管；7—高压套管；8—瓦斯继电器；
9—防爆筒；10—油位器；11—油枕；
12—吸湿器；13—铭牌；
14—温度计；15—小车

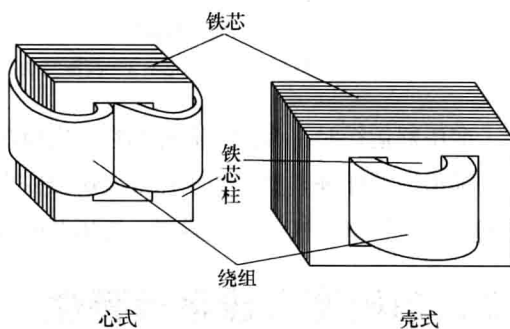


图1-4 心式和壳式变压器

（1）同心式结构：高、低压绕组同心地套装在同一个铁芯柱上。为了便于绝缘，通常低压绕组装在里面，高压绕组装在外面，在高、低压绕组之间以及绕组与铁芯之间都加有绝缘。国产电力变压器的绕组主要采用同心式结构。

（2）交叠式结构：高、低压绕组都做成饼状，沿铁芯柱高度方向交替排列。为了便于绝缘，通常最上层和最下层均为低压绕组。主要用于大型的电炉变压器。

3. 附件

油浸式电力变压器的附件主要包括油箱、分接开关、绝缘套管、冷却装置、安全保护装置及检测装置等。

（1）油箱：用于盛装变压器油及安装器身。变压器油是器身的绝缘和散热介质。油箱由钢板焊成，中小型变压器多采用桶式油箱，而大型变压器为了便于检修多采用钟罩式油箱。

（2）分接开关：装在箱盖上，可以在空载情况下改变高压绕组的匝数（ $\pm 5\%$ ），如图 1-6 所示。用于调节变压器的输出电压使其控制在允许范围之内。一般不可频繁使用。

（3）绝缘套管：是变压器绕组的引出装置，将其装在变压器油箱上，实现带电的引线与接地的油箱之间的绝缘。主要由瓷套和导电杆等组成。

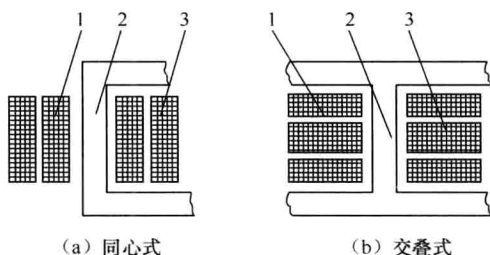


图1-5 绕组的排列

1—低压绕组; 2—铁芯; 3—高压绕组

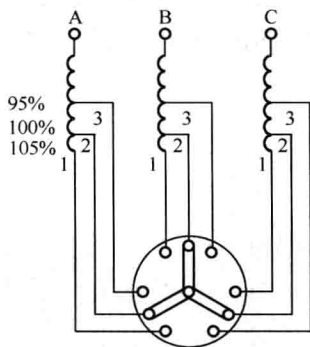


图1-6 变压器的分接开关

变压器运行时, 为把温升控制在一定范围内, 必须采用一些冷却装置, 包括油浸自冷、油浸风冷和强迫油循环等类型。为了保证变压器安全运行, 变压器还设有安全保护装置, 包括储油柜、吸湿器、安全气道、气体继电器等。变压器的检测装置包括油位计和测温元件等。

二、单相变压器运行特性

(一) 单相变压器空载运行

变压器空载运行是指一次绕组接入额定电压的交流电源, 而二次绕组开路的运行状态。

1. 空载运行时的物理过程

如图 1-7 所示, 变压器中各物理量的正方向一般按照电工惯例来规定。同一条支路中, 电压 U 与电流 I 正方向一致; 磁通 Φ 与电流正方向符合右手螺旋法则; 由磁通 Φ 产生的感应电动势 E , 其正方向与产生该磁通的电流正方向一致。

空载时一次绕组流过的电流称为空载电流 $\dot{I}_0$, $\dot{I}_0$ 产生空载磁通势 $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 \cdot N_1$, 并建立空载磁通。空载磁通绝大部分沿铁芯闭合且与一、二次绕组同时交链, 这部分磁通称为主磁通 $\dot{\Phi}$; 另有一小部分磁通经非磁性材料闭合, 只与一次绕组交链, 称为一次绕组的漏磁通 $\dot{\Phi}_{1\sigma}$ 。根据电磁感应定律, 主磁通 $\dot{\Phi}$ 在一、二次绕组中分别产生感应电动势 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$; 漏磁通 $\dot{\Phi}_{1\sigma}$ 只在一次绕组中产生漏磁感应电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$ 。二次绕组电动势 $\dot{E}_2$ 对负载而言即为电源电动势, 其空载电压为 $\dot{U}_{20}$ 。

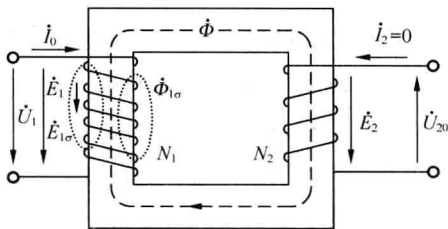


图1-7 单相变压器的空载运行

2. 空载运行时的各物理量

(1) 空载电动势。

设主磁通 $\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t$, 漏磁通 $\Phi_{1\sigma} = \Phi_{1\sigma m} \cdot \sin \omega t$ 。

则

$$e_1 = -N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -\omega \cdot N_1 \cdot \Phi_m \cdot \cos \omega t = E_{1m} \cdot \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$e_2 = -N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = -\omega \cdot N_2 \cdot \Phi_m \cdot \cos \omega t = E_{2m} \cdot \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$e_{1\sigma} = -N_1 \cdot \frac{d\Phi_\sigma}{dt} = -\omega \cdot N_1 \cdot \Phi_{1\sigma m} \cdot \cos \omega t = E_{1\sigma m} \cdot \sin(\omega t - 90^\circ)$$

各电动势有效值分别为

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega \cdot N_1 \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f \cdot N_1 \cdot \Phi_m \quad (1-3)$$

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega \cdot N_2 \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f \cdot N_2 \cdot \Phi_m \quad (1-4)$$

$$E_{1\sigma} = \frac{E_{1\sigma m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega \cdot N_1 \cdot \Phi_{1\sigma m}}{\sqrt{2}} = 4.44 f \cdot N_1 \cdot \Phi_{1\sigma m} \quad (1-5)$$

式中, ω ——角频率, $\omega = 2\pi f$, N_1 , N_2 为一、二次绕组匝数; Φ_m 为磁道最大值。

相量表示为

$$\dot{E}_1 = -j \cdot 4.44 f \cdot N_1 \cdot \dot{\Phi}_m \quad (1-6)$$

$$\dot{E}_2 = -j \cdot 4.44 f \cdot N_2 \cdot \dot{\Phi}_m \quad (1-7)$$

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j \cdot 4.44 f \cdot N_1 \cdot \dot{\Phi}_{1\sigma m} \quad (1-8)$$

由以上分析可见: 感应电动势有效值的大小与频率、绕组匝数及磁通最大值成正比, 相位滞后于主磁通 90° 。

当变压器空载运行时, 一次侧忽略绕组阻抗, 有

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f \cdot N_1 \cdot \Phi_m \quad (1-9)$$

上式表明: 对于某台变压器, 当频率不变且外加电压不变时, 主磁通幅值基本不变, 称为恒磁通。

而二次侧 $U_{20} = E_2$,

$$\text{故} \quad k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}} \quad (1-10)$$

式中, k ——变压器的变比。对于三相变压器, 则均指相电压之比。

(2) 空载电流。

空载电流 $\dot{I}_0$ 有两个作用: 一是建立空载时的磁场, 二是提供空载时的损耗。因此 $\dot{I}_0$ 包括起励磁作用的无功分量 $\dot{I}_{0Q}$, 与主磁通同相位; 提供空载铁芯损耗的有功分量 $\dot{I}_{0P}$, 相位超前主磁通 90° 。即

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{0P} + \dot{I}_{0Q} \quad (1-11)$$

在一般电力变压器中 $I_0 = (0.02 \sim 0.1) I_{1N}$, 容量越大, I_0 相对越小。

(3) 空载损耗。

变压器空载时没有输出功率, 从电源吸取的全部功率 (指很小的有功功率) 都消耗于内部, 称为空载损耗, 用 P_0 表示。空载损耗包括绝大部分的铁芯损耗 P_{Fe} (即磁滞、涡流损耗) 和极少部分的一次绕组电阻上的铜损耗 $P_{cu} = I_0^2 \cdot r_1$ 。故铜损耗可以忽略不计, 因此认为空载损耗近似等

于铁损耗。

3. 空载运行相量图

相量图可直观地反映变压器各物理量之间的相位关系,分析问题时常被采用。图 1-8 所示为变压器空载运行相量图。从图中可见:

- (1) 一、二次绕组感应电动势 $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$ 均滞后主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 90° , 空载电流 $\dot{I}_0$ 超前 $\dot{\Phi}_m$ 铁损角 α_{Fe} ;
- (2) 外加电压 $\dot{U}_1$ 与 $\dot{I}_0$ 之间的夹角为空载功率因数角 φ_0 , 近似为 90° , 故空载功率因数很低, 约为 $0.1 \sim 0.2$ 。

(二) 单相变压器负载运行

变压器负载运行指一次绕组接入额定电压的交流电源, 二次绕组接上负载的运行状态。

1. 负载运行时的物理过程

如图 1-9 所示, 负载运行时在电动势 $\dot{E}_2$ 的作用下, 二次绕组中将流过电流 $\dot{I}_2$, 建立磁动势用于铁芯, 产生主磁通 $\dot{\Phi}$ 。由于电源电压 $\dot{U}_1$ 不变, 主磁通幅值 $\dot{\Phi}_m$ 应保持不变。因此一次电流将由 $\dot{I}_0$ 增加为 $\dot{I}_1$, 其增加的磁动势用以抵消二次绕组磁动势对空载主磁通的去磁影响, 这样才可以维持主磁通基本不变。

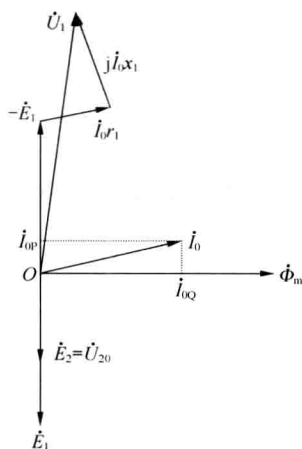


图1-8 变压器空载运行相量图

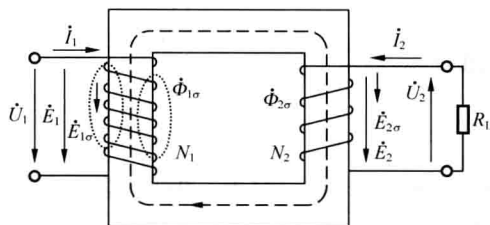


图1-9 单相变压器的负载运行

变压器负载运行时, 一、二次磁动势除共同建立主磁通 $\dot{\Phi}$ 外, 还分别产生交链各自绕组的漏磁通 $\dot{\Phi}_{1\sigma}$ 和 $\dot{\Phi}_{2\sigma}$, 这两个漏磁通又分别在一、二次绕组中感应漏磁电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$ 和 $\dot{E}_{2\sigma}$ 。

2. 负载运行基本方程式

(1) 磁势平衡方程式。

由上面分析可知, 只要电源电压 $\dot{U}_1$ 不变, 无论是空载状态还是负载状态, 变压器铁芯中的主磁通幅值 $\dot{\Phi}_m$ 基本不变, 因此

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0 \quad (1-12)$$

即