

高等职业教育

机械行业“十二五”规划教材

电机与 电气控制技术

The Motor and Electrical
Control Technology

理论实际相结合突出实践性

内容组织精炼体系结构新颖

采用最新标准配套资源完整



◎ 姜新桥 蔡建国 主编

◎ 彭宽平 邹建华 副主编

高等职业教育

机械行业“十二五”规划教材

电机与 电气控制技术

The Motor and Electrical
Control Technology



◎ 姜新桥 蔡建国 主编

◎ 彭宽平 邹建华 副主编

人民邮电出版社

北 京



精品系列

图书在版编目 (C I P) 数据

电机与电气控制技术 / 姜新桥, 蔡建国主编. — 北京: 人民邮电出版社, 2014. 1
高等职业教育机械行业“十二五”规划教材
ISBN 978-7-115-32062-9

I. ①电… II. ①姜… ②蔡… III. ①电机学—高等职业教育—教材②电气控制—高等职业教育—教材 IV. ①TM3②TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第199658号

内 容 提 要

本书分4个单元,共包含18个任务,包括电机控制基础、直流电动机的控制、交流电动机的控制、控制电动机的控制。

本书采用任务驱动式的编写方法,重点介绍电动机及其控制方式。在内容选择上以电动机应用能力要求为出发点,介绍变压器、低压电器、电动机、变频器、驱动器以及PLC等元件和装置,交、直流电动机的起停、正反转、调速等控制电路,直流电动机、交流电动机及控制电机的PLC控制等。读者通过单元与任务驱动式的学习,将较系统地掌握电机和电气控制的基础知识和基本技能。

本书适用于高职类机电一体化专业,也可供电气自动化、生产过程自动化、机电维修、应用电子及数控技术等专业参考,还可作为相关工程技术人员的培训教材。

-
- ◆ 主 编 姜新桥 蔡建国
副 主 编 彭宽平 邹建华
责任编辑 韩旭光
责任印制 焦志炜
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
邮编 100164 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: 20 2014年1月第1版
字数: 504千字 2014年1月河北第1次印刷
-

定价: 36.00 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316
反盗版热线: (010)81055315

前言

本书的编写从职业需求入手,以培养中、高级电动机及电气控制技术应用型人才为目标,集中体现高职教育“以就业为导向,以职业技能为核心”的特点,突出职业教育的特色。通过对本书4个单元(18个任务)的学习,将掌握电动机与电气控制的基础知识和基本技能,建立电动机选用、电气控制系统安装、调试、控制所必需的知识与技能。

本书内容分为4个单元,单元一是电动机控制基础,单元二是直流电动机的控制,单元三是交流电动机的控制,单元四是控制电动机的控制。整个内容安排简单、紧凑,实用性强。本书将电动机、电气控制与PLC控制有机地结合在一起,并且对变频器、伺服驱动器、PLC等项内容进行了详细介绍,使本书的教学内容十分丰富。本书采用任务驱动式的教学方法,重点培养学生实际分析和解决常用电机及控制问题的能力。在内容选择上,以电动机应用能力要求为出发点,首先要求学生掌握变压器、低压电器、PLC的使用及电路图等基础知识,其次要求学生对于直流电动机、交流电动机、控制电机的原理、结构、铭牌、特性有深入全面的认识,再次要求学生掌握交直流电动机的起停、正反转、调速等电气控制电路基本知识与基本技能,最后要求学生掌握直流、交流及控制电动机的PLC控制原理及编程。

本书以单元和任务形式组织教学内容,以电动机为重点,以电气控制为主线,以PLC控制为核心,强调了知识的应用性、系统性、拓展性的有机结合,强化了职业素质教育和实践技能培养。

本书是高职机电类专业的教材,同时也可供电气自动化、生产过程自动化、机电设备维修、应用电子以及数控技术等专业参考。

本书由武汉职业技术学院姜新桥、蔡建国任主编,邹建华、彭宽平任副主编。其中单元一的任务一、任务二、任务四由彭宽平教授编写,单元二的任务一、任务二、任务三由邹建华副教授编写,单元三的任务一、任务二、任务五、任务六为蔡建国副教授编写,其余部分由姜新桥副教授编写。全书由姜新桥负责统稿。

在编写过程中,参考了相关著作和资料,在此,向这些参考文献的原作者表示谢意。

限于编者理论水平和实践经验,书中不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2013年5月

目 录

单元一 电动机控制基础 1	
任务一 磁路与变压器..... 1	
1.1.1 磁路..... 1	
1.1.2 变压器..... 5	
任务二 常用低压电器元件..... 13	
1.2.1 执行电器..... 13	
1.2.2 检测电器..... 17	
1.2.3 控制电器..... 28	
1.2.4 保护电器..... 32	
1.2.5 其他电器..... 39	
任务三 PLC 基础..... 48	
1.3.1 PLC 工作原理、硬件接线及软 元件..... 48	
1.3.2 三菱 FX2N PLC 的编程软件..... 60	
任务四 识读电路图..... 74	
1.4.1 电路图的种类..... 74	
1.4.2 电路图中常用的电气符号..... 77	
1.4.3 电工识图..... 79	
单元二 直流电动机的控制 82	
任务一 直流电动机..... 82	
2.1.1 直流电动机的工作原理..... 82	
2.1.2 直流电动机的结构与分类..... 83	
2.1.3 直流电动机的铭牌数据..... 85	
2.1.4 直流电动机的机械特性..... 86	
任务二 直流电动机的启停控制..... 88	
2.2.1 直流电动机起动和反转控制及 实现..... 89	
2.2.2 直流电动机的制动控制及 实现..... 91	
任务三 直流电动机的调速控制..... 96	
2.3.1 调速及其指标..... 96	
2.3.2 调速方法..... 97	
2.3.3 直流电动机调速的实现..... 98	
任务四 直流电动机的 PLC 控制..... 101	
2.4.1 FX2N PLC 的基本指令及 应用..... 101	
2.4.2 FX2N PLC 的步进指令及 应用..... 111	
2.4.3 FX2N PLC 的功能指令 简介..... 120	
2.4.4 直流电动机的 PLC 控制..... 125	
单元三 交流电动机的控制 128	
任务一 交流异步电动机..... 128	
3.1.1 三相异步电动机的结构与工作 原理..... 128	
3.1.2 三相异步电动机的特性..... 130	
3.1.3 三相异步电动机的使用..... 134	
3.1.4 单相异步电动机..... 141	
任务二 三相异步电动机的基本 控制..... 145	
3.2.1 起动控制..... 145	
3.2.2 正反向运行控制和顺序 控制..... 149	
3.2.3 制动控制..... 152	
3.2.4 电气保护电路..... 154	
任务三 三相异步电动机的调速 控制..... 156	
3.3.1 变极调速控制..... 156	
3.3.2 电磁滑差离合器调速控制..... 157	
3.3.3 变频调速控制..... 162	
任务四 三相异步电动机的 PLC 控制..... 172	

3.4.1 继电接触器控制电路的 PLC 改造.....	172	4.2.3 伺服驱动器的结构与原理.....	218
3.4.2 多段速变频器调速的 PLC 控制.....	176	任务三 三菱通用伺服驱动器.....	224
任务五 单相异步电动机的控制	179	4.3.1 三菱通用伺服驱动器的面板与 型号说明	225
3.5.1 单相异步电动机起动控制	179	4.3.2 伺服驱动器与辅助设备的 接线	227
3.5.2 单相异步电动机正反转 控制.....	181	4.3.3 伺服驱动器的显示操作.....	233
3.5.3 单相异步电动机的调速 控制.....	182	4.3.4 伺服驱动器的参数设置.....	237
任务六 机电设备电路分析	183	任务四 交流伺服系统应用实例.....	249
3.6.1 通用机械设备电路分析	183	4.4.1 速度控制模式和应用实例及标 准接线	249
3.6.2 专用机械设备电路分析	189	4.4.2 转矩控制模式的应用及标准 接线	260
单元四 控制电动机的控制	194	4.4.3 位置控制模式的应用实例标准 接线	265
任务一 步进电动机及其控制	194	附录	271
4.1.1 步进电动机	194	A 三菱 FX2N 系列 PLC 指令一览表	271
4.1.2 步进驱动器	197	B 三菱变频器常用参数一览表.....	274
4.1.3 步进电动机的 PLC 控制.....	204	C 三菱 MR-J2S-A 系列通用伺服驱动 器接头的引脚功能详解	296
任务二 交流伺服系统的组成与 原理.....	212	D 三菱通用伺服驱动器扩展参数功能 详解.....	304
4.2.1 交流伺服系统的组成方框图及 说明.....	212	参考文献	314
4.2.2 伺服电动机与编码器	214		

单元一

电动机控制基础

本单元在电工相关知识的基础上,介绍磁路和变压器、常用低压电器、PLC 基础知识以及识读电路图等基础知识和基本技能,为后面的直流电动机、交流异步电动机、步进电动机和伺服电动机的学习奠定基础。

任务一

磁路与变压器

任务要求

1. 了解铁磁材料的性能。
2. 熟悉简单磁路的分析方法。
3. 掌握变压器的工作原理。
4. 熟悉变压器的结构、特性及应用。

1.1.1 磁 路

变压器和电动机是两种最常用的动力设备,就其原理而言,它们都是以电磁感应作为工作基础的。本节首先介绍磁路的基本知识,然后介绍变压器的工作原理和基本特性。

常用的电工设备,例如变压器、电动机以及许多电器和电工仪表等,都是以电磁感应为工作基础的,因此,在工作时都会产生磁场。为了把磁场聚集在一定的空间范围内,以便加以控制和利用,就必须用高磁导率的铁磁材料做成一定形状的铁心,使之形成一个磁通的路径,使磁通的绝大部分通过这一路径而闭合。把磁通经过的闭合路径称为磁路。下面先介绍铁磁材料的磁性能,再说明简单磁路的分析方法。

1. 铁磁材料的磁性能

铁磁材料是指钢、铁、镍、钴及其合金等材料,它有广泛的用途,是制造变压器、电动机和电器铁心的主要材料。

(1) 磁化曲线与磁滞回线。

铁磁材料被放入磁场强度为 H 的磁场内, 会受到强烈的磁化。当磁场强度 H 由零逐渐增加时, 磁感应强度 B 随之变化的曲线称为磁化曲线, 如图 1.1 所示。由图可见, 开始时, 随着 H 的增加 B 增加较快, 后来随着 H 的增加 B 增加缓慢, 逐渐出现饱和现象, 即具有磁饱和性。在磁化曲线上任一点的 B 和 H 之比就是磁导率 μ , 它是表征物质导磁性能的一个物理量。显然, 在该磁化曲线上各点的 μ 不是一个常数, 它随 H 而变, 并在接近饱和时逐渐减小 (如图 1.1 所示)。也就是说, 铁磁材料的磁导率是非线性的。

虽然每一种铁磁材料都有自己的磁化曲线, 但它们的 μ 值都远大于真空磁导率 μ_0 , 具有高导磁性。非铁磁材料的磁导率接近真空的磁导率 μ_0 , $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$, 而铁磁材料的磁导率远大于非铁磁材料, 两者之比可达 $10^3 \sim 10^4$ 倍。因此, 各种变压器、电机和其他电器的电磁系统几乎都用铁磁材料构成铁心, 在相同的励磁绕组匝数和励磁电流的条件下, 采用铁心后可使磁感应强度增强几百倍甚至几千倍。

铁磁物质在交变磁化过程中 H 和 B 的变化规律如图 1.2 所示。当磁场强度 H 由零增加到某个值 ($H=+H_m$) 后, 如减少 H , 此时 B 并不沿着原来的曲线返回而是沿着位于其上部的另一条轨迹减弱。当 $H=0$ 时 $B=B_r$, B_r 称为剩磁感应强度, 简称剩磁。只有当 H 反方向变化到 $-H_c$ 时, B 才下降到零, H_c 称为矫顽力。由此可见, 磁感应强度 B 的变化滞后于磁场强度 H 的变化, 这种现象称为磁滞现象。也就是说, 铁磁材料具有磁滞性。

如果继续增大反向磁场强度, 到达 $H=-H_m$ 时, 把反向磁场强度逐渐减小, 到达 $H=0$ 时, 再把正向磁场强度逐渐增加到 $+H_m$, 如此在 $+H_m$ 和 $-H_m$ 之间进行反复磁化, 得到的是一条如图 1.2 所示的闭合曲线, 这条曲线称为磁滞回线。

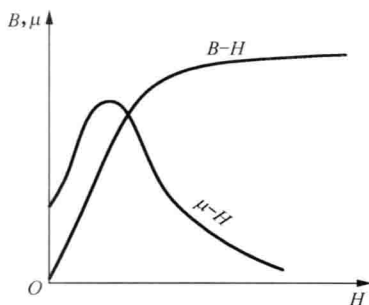


图 1.1 磁化曲线和 μ - H 曲线

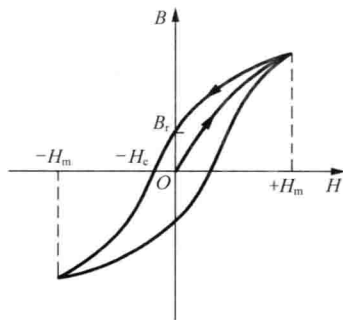


图 1.2 磁滞回线

不同种类的铁磁材料, 磁滞回线的形状不同。纯铁、硅钢、坡莫合金和软磁铁氧体等材料的磁滞回线较狭窄, 剩磁感应强度 B_r 较低, 矫顽力 H_c 较小。这一类铁磁材料称为软磁材料, 通常用来制造变压器、电机和电器 (电磁系统) 的铁心。而碳钢、铝镍钴、稀土和硬磁铁氧体等材料的磁滞回线较宽, 具有较高的剩磁感应强度 B_r 和较大的矫顽力 H_c 。这类材料称为硬磁材料或永磁材料, 通常用来制造永久磁铁。

(2) 磁滞损耗与涡流损耗。

磁滞现象使铁磁材料在交变磁化的过程中产生磁滞损耗, 它是铁磁物质内分子反复取向所产生的功率损耗。铁磁材料交变磁化一个循环在单位体积内的磁滞损耗与磁滞回线的面积成正比, 因此软磁材料的磁滞损耗较小, 常用在交变磁化的场合。

铁磁材料在交变磁化的过程中还有另一种损耗——涡流损耗。当整块铁心中的磁通发生交

变时,铁心中会产生感应电动势,因而在垂直于磁感线的平面上会产生感应电流,它围绕着磁感线成漩涡状流动,故称涡流,如图 1.3 (a) 所示。涡流在铁心的电阻上引起的功率损耗称为涡流损耗。涡流损耗和铁心厚度的平方成正比。如果像图 1.3 (b) 所示那样,沿着垂直于涡流面的方向把整块铁心分成许多薄片并彼此绝缘,这样就可以减少涡流损耗。因此交流电机和变压器的铁心都用硅钢片叠成。此外,硅钢中因含有少量的硅,能使铁心中的电阻增大而涡流减小。

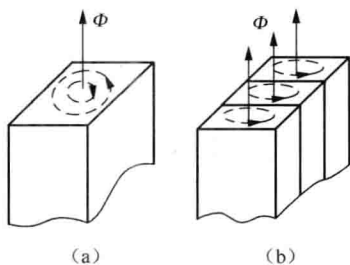


图 1.3 涡流

磁滞损耗和涡流损耗合称为铁损耗。铁损耗使铁心发热,使交流电机、变压器及其他交流电器的功率损耗增加,温升增加,效率降低。但在某些场合,则可以利用涡流效应来加热或冶炼金属。

2. 简单磁路分析

(1) 直流磁路。

如图 1.4 所示磁路,在匝数为 N 的励磁线圈中通入直流电流 I ,磁路中就会产生一个恒定磁通 Φ ,这种具有恒定磁通的磁路称为直流磁路。显然, Φ 的大小与 NI 乘积的大小有关。根据物理学中的全电流定律(安培环路定律)可知

$$\oint H \cdot dl = \sum I \quad (1.1)$$

即,在闭合曲线上磁场强度矢量 H 沿整个回路 l 的线积分等于穿过该闭合曲线所围曲面内电流的代数和。电流方向与设定的积分绕行方向符合右手螺旋定则的电流为正,反之为负。

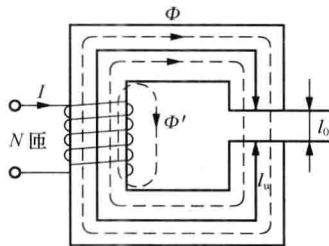


图 1.4 直流磁路

对于如图 1.4 所示具有铁心和空气隙的直流磁路,励磁线圈中通入电流后,磁路中所产生的磁通,大部分集中在由铁磁材料所限定的空间范围内,称为主磁通。此外,还有很少一部分磁通通过铁心以外的空间闭合(图 1.4 中的 Φ'),称为漏磁通。为分析方便,将漏磁通忽略,只考虑主磁通。根据磁通连续性原理,通过铁心中的磁通必定等于通过空气隙中的磁通。一般认为空气隙和铁心具有相同的截面积 A ,所以铁心和空气隙中的磁感应强度 $B = \Phi/A$ 也必然相同。但因为空气的 μ_0 远小于铁心的 μ ,故空气隙中的磁场强度 $H_0 = B/\mu_0$ 将远大于铁心中的磁场强度 $H_\mu = B/\mu$ 。

根据式 (1.1),取一条磁场线作为闭合路径并作为环循方向,则

$$\oint H \cdot dl = H_\mu l_\mu + H_0 l_0 = NI \quad (1.2)$$

故

$$\begin{aligned} \frac{B}{\mu} l_\mu + \frac{B}{\mu_0} l_0 &= NI \\ \frac{\Phi}{\mu A} l_\mu + \frac{\Phi}{\mu_0 A} l_0 &= NI \\ \Phi &= \frac{NI}{\frac{l_\mu}{\mu A} + \frac{l_0}{\mu_0 A}} = \frac{NI}{R_{m\mu} + R_{m0}} \end{aligned} \quad (1.3)$$

式中, l_μ 是铁心的平均长度; l_0 为空气隙长度; A 为铁心和空气隙的截面积; μ 和 μ_0 为它们

的磁导率。 $R_{m\mu}=l_{\mu}/\mu A$ 称为铁心的磁阻, $R_{m,0}=l_0/\mu_0 A$ 称为空气隙的磁阻, NI 是产生磁通的磁化力, 称为磁通势。如果磁路由几段串接而成, 则

$$\Phi = \frac{NI}{\sum R_m} \quad (1.4)$$

式中, $\sum R_m$ 为各段磁路磁阻之和。式 (1.4) 在形式上与电路的欧姆定律相似, 称为磁路的欧姆定律。但应注意, 由于铁心的磁导率 μ 不是常数, 所以它的磁阻 $R_{m\mu}$ 也不是常数, 要随 B 的变化而改变, 故磁阻是非线性的。还应注意, 虽然空气隙长度通常很小, 但 $\mu_0 \ll \mu$, $R_{m,0}$ 仍较大, 故空气隙的磁阻压降 $R_{m,0}\Phi$ 也比较大。

(2) 交流磁路。

如在图 1.5 所示的铁心线圈上外加正弦交流电压 u , 绕组中将流过交流电流 i , 从而产生交变磁通, 交变磁通包括集中在铁心中的主磁通 Φ 和很少的一部分漏磁通 Φ' 。主磁通 Φ 在线圈中产生感应电动势 e , 漏磁通 Φ' 在线圈中产生感应电动势 e' (图中未画出, 其参考方向与 e 的方向相同), 另外再考虑到电流 i 在线圈电阻 R 上会产生压降 Ri , 由基尔霍夫电压定律, 可写出电压方程式

$$u = -e - e' + Ri \quad (1.5)$$

设主磁通为正弦交变磁通

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (1.6)$$

根据电磁感应定律, 主磁通在励磁线圈中产生感应电动势 e , 如果规定 e 和 Φ 的参考方向符合右手螺旋定则, 则

$$\begin{aligned} e &= -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d\Phi_m \sin \omega t}{dt} \\ &= N\Phi_m \omega \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = E_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (1.7)$$

式 (1.7) 中, N 是励磁线圈的匝数, E_m 是 e 的最大值。 e 的有效值

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega N \Phi_m = \frac{1}{\sqrt{2}} 2\pi f N \Phi_m = 4.44 f N \Phi_m \quad (1.8)$$

式 (1.8) 中, f 和 $\Phi_{\max}$ 分别为交变磁通的频率和最大值。 E 的单位为伏[特] (V), f 的单位为赫[兹] (Hz), $\Phi_{\max}$ 的单位为韦[伯] (Wb)。

由于 Ri 和 e' 均很小, 因此式 (1.5) 可近似表达为

$$u \approx -e \quad (1.9)$$

即近似认为外加电压 u 仍和主磁通产生的感应电动势 e 相平衡, 且其有效值

$$U \approx E = 4.44 f N \Phi_{\max} \quad (1.10)$$

式 (1.10) 表明, 当电源频率 f 和线圈匝数 N 不变时, 主磁通 Φ 基本上与外加电压 U 成正比关系, U 不变则 $\Phi_{\max}$ 基本不变。当 U 一定时, 若磁路磁阻发生变化, 例如磁路中出现空气隙而使磁阻增大时, 为了保持 $\Phi_{\max}$ 基本不变, 根据磁路欧姆定律 $\Phi = NI / \sum R_m$, 磁通势 NI 和线圈中的电流必然增大。因此在交流磁路中, 当 U 、 f 、 N 不变时, 磁路中空气隙的大小发生变化会引起线圈中电流的变化。

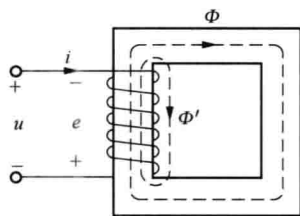


图 1.5 交流磁路

1.1.2 变 压 器

1. 变压器的用途和基本结构

变压器具有变换电压、变换电流和变换阻抗的作用,在各个领域有着广泛的应用。

电力变压器是电力系统中不可缺少的重要设备。在发电站,用变压器将电压升高后通过输电线路送到各处,再用变压器将电压降低后送给各用电单位。这种输电方式可以大大降低线路损耗,提高输送效率。目前我国有几条主干线路已采用 500kV 的高压进行输电。

在其他领域中,也时常用到各种各样的变压器,例如电子电路中用的整流变压器、振荡变压器、输入变压器、输出变压器、脉冲变压器、控制线路用的控制变压器,调节电压用的自耦变压器,测量用的互感器,另外还有电焊变压器、电炉变压器等。

各种用途的变压器的工作原理都是基于电磁感应现象。因此尽管变压器种类繁多,外形和体积有很大的差别,但它们的基本结构都相同,主要由铁心和绕组两部分组成。

根据铁心与绕组的结构,变压器可分为心式变压器和壳式变压器。图 1.6 (a)、(b)、(c) 为心式变压器,其特点是绕组包围铁心。图 1.6 (a)、(b) 为大型单相和三相电力变压器采用的结构。图 1.6 (c) 为 C 型铁心变压器,一般用于小型的单相变压器和特殊的变压器。图 1.6 (d) 为壳式变压器,这种变压器的部分绕组被铁心所包围,可以不要专门的变压器外壳,适用于容量较小的变压器。

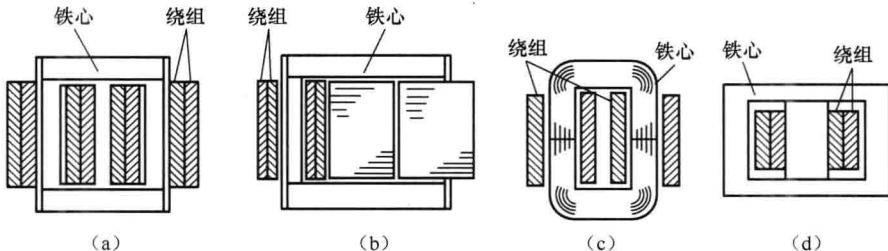


图 1.6 变压器结构示意图

变压器的铁心通常采用表面涂有绝缘漆膜、厚度为 0.35mm 的硅钢片经冲剪、叠制而成。

变压器的绕组有一次绕组和二次绕组,一次绕组和电源连接,二次绕组和负载连接。一次绕组和二次绕组均可以由一个或几个线圈组成,使用时可根据需要把它们连接成不同的组态。

2. 变压器的工作原理

(1) 变压器的电压变换作用。

下面通过对变压器空载运行情况的分析,来说明电压变换作用。

变压器的一次绕组加上额定电压,二次绕组开路,这种情况称为空载运行。图 1.7 所示为变压器空载运行的示意图。

图 1.7 中,当一次绕组加上正弦交流电压 u_1 时就有

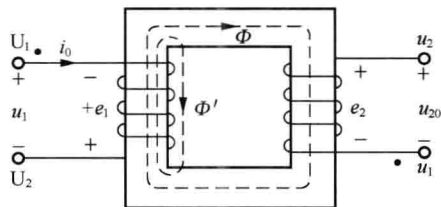


图 1.7 变压器空载运行示意图

电流 i_0 通过, 并由此而产生磁通。 i_0 称为励磁电流, 也称空载电流。

主磁通 Φ 与一次、二次绕组相交链并分别产生感应电动势 e_1 、 e_2 。漏磁通 Φ' 在一次绕组中产生感应电动势 e'_1 (图 1.7 中未画出)。图中规定, Φ 和 Φ' 的参考方向和 i_0 的参考方向符合右手螺旋定则, e_1 、 e_2 的参考方向和 Φ 的参考方向也符合右手螺旋定则。设一次绕组的电阻为 R_1 , 二次绕组空载时的端电压为 u_{20} , 根据基尔霍夫定律, 可写出这两个绕组电路的电压方程式分别为

$$u_1 = -e_1 - e'_1 + R_1 i_0 \quad (1.11)$$

$$u_{20} = e_2 \quad (1.12)$$

为了分析方便, 不考虑由于磁饱和性与磁滞性而产生的电流、电动势波形畸变的影响, 将式 (1.11)、(1.12) 中的电压、电动势均认为是正弦量, 于是可以表达为相量形式

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}'_1 + R_1 \dot{I}_0 \quad (1.13)$$

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2 \quad (1.14)$$

由于 $\dot{E}'_1$ 和 $R_1 \dot{I}_0$ 通常比较小, 因此式 (1.13) 可近似表达为

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 \quad (1.15)$$

设一次、二次绕组的匝数分别为 N_1 、 N_2 , 由式 (1.10) 可知两个绕组的电压有效值为分别为

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_{\max} \quad (1.16)$$

$$U_{20} \approx E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_{\max} \quad (1.17)$$

于是

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \quad (1.18)$$

式中, k 称为变压比, 简称为变比。

式 (1.18) 说明, 一次、二次绕组的变压比等于它们的匝数比, 当 N_1 、 N_2 不同时, 变压器可以把某一数值的交流电压变换成同频率的另一个数值的交流电压, 这就是变压器的电压变换作用。

如 $N_1 > N_2$, 则 $U_1 > U_{20}$, $k > 1$, 变压器起降压作用, 称为降压变压器, 这种变压器的一次绕组为高压绕组; 反之, 若 $N_1 < N_2$, 则 $U_1 < U_{20}$, $k < 1$, 称为升压变压器, 它的二次绕组为高压绕组。

变压器的两个绕组之间, 在电路上没有连接。一次绕组外加交流电压后, 依靠两个绕组之间的磁耦合和电磁感应作用, 使二次绕组产生交流电压, 也就是说, 一次、二次绕组在电路上是相互隔离的。

按照图 1.7 中绕组在铁心柱上的绕向, 若在某一瞬时一次绕组中的感应电动势 e_1 为正值, 则二次绕组中的感应电动势 e_2 也为正值。在此瞬时绕组端点 U_2 与 u_2 的电位分别高于 U_1 与 u_1 的电位, 或者说端点 U_2 与 u_2 、 U_1 与 u_1 的电位瞬时极性相同。把具有相同瞬时极性的端点称为同极性端, 也称为同名端, 通常用 “·” 作标记 (如图 1.7 所示)。

变换三相电压可采用三相变压器 (其结构如图 1.6 (d) 所示), 也可用三台单相变压器连接成三相变压器组来实现。

三相变压器或三相变压器组每一相的工作情况和单相变压器相同, 所以单相变压器的分析同样适用于三相变压器的任何一相。

在三相变压器中, 每根铁心柱上绕着属于同一相的一次、二次绕组。一次绕组的首端和末端分别用 U_1 、 V_1 、 W_1 和 U_2 、 V_2 、 W_2 标明。二次绕组的首、末端则分别用 u_1 、 v_1 、 w_1 和 u_2 、 v_2 、 w_2 标明。且首端 U_1 、 V_1 、 W_1 和 u_1 、 v_1 、 w_1 , 末端 U_2 、 V_2 、 W_2 和 u_2 、 v_2 、 w_2 , 应互为同

极性端。

变换三相电压时,三相变压器或三相变压器组的一次绕组和二次绕组都可以接成星形或三角形。因此三相变压器有 4 种可能的接法:“Y, y”、“Y, d”、“D, d”、“D, y”。Y, y、表示星形联结, D、d 表示三角形联结。每组符号里前面的符号(大写字母)表示高压绕组的接法,后面的符号(小写字母)表示低压绕组的接法。其中星形联结又分三线制和四线制两种。三线制用 Y 表示,四线制用 Y_N 表示。我国生产的三相电力变压器以“Y, y_n ”、“Y, d”和“ Y_N , d”3 种接法最多。

三相变压器与三相变压器组相比较,同容量的三相变压器体积小、成本低、效率高。但容量较大时,一般采用三相变压器组以便于分散搬运和安装。

(2) 变压器的电流变换作用。

在变压器的一次绕组上施加额定电压,二次绕组接上负载后,电路中就会产生电流。下面讨论一次绕组电流和二次绕组电流之间的关系。

图 1.8 所示为变压器负载运行原理图。 i_2 为二次电流,它是在二次绕组感应电动势 e_2 的作用下流过负载 Z_L 的电流。

二次绕组接上负载后,铁心中的主磁通由磁通势 $N_1 \dot{I}_1$ 和 $N_2 \dot{I}_2$ 产生。根据图示参考方向,由于 $\dot{I}_1$ 和 $\dot{I}_2$ 在铁心中产生的磁通方向相同,故合成后的总磁通势为 $N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2$ 。在负载运行时一次绕组的电阻电压降 $R_1 \dot{I}_1$ 和漏磁通产生的感应电动势 E'_1 比 E_1 仍然小得很多,因此可近似认为

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_{\max}$$

上述关系说明,从空载到负载,若外加电压 U_1 及其频率 f 保持不变,主磁通的最大值 Φ_m 也基本不变,所以空载时的磁通势 $N_1 \dot{I}_0$ 和负载时的合成磁通势 $N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2$ 应相等,即

$$N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2 = N_1 \dot{I}_0 \quad (1.19)$$

故一次绕组电流

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 \quad (1.20)$$

因空载电流 $\dot{I}_0$ 很小,仅占额定电流的百分之几,故在额定负载时可近似认为

$$\dot{I}_1 \approx -\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 \quad (1.21)$$

其有效值

$$I_1 \approx \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{1}{k} I_2 \quad (1.22)$$

式(1.22)说明,在额定情况下,一次、二次绕组的电流有效值近似地与它们的匝数成反比。也就是说变压器具有电流变换作用。式(1.21)中的负号表示对于图 1.8 所示的电流参考方向而言,电流 $\dot{I}_1$ 和 $\dot{I}_2$ 在相位上几乎相差 180° ,因此,磁通势 $N_1 \dot{I}_1$ 和 $N_2 \dot{I}_2$ 的实际方向几乎是相反的。

(3) 变压器的阻抗变换作用。

如图 1.9(a)所示,当变压器负载阻抗 Z_L 变化时, $\dot{I}_2$ 发生变化, $\dot{I}_1$ 也随之而变。 Z_L 对 $\dot{I}_1$ 的

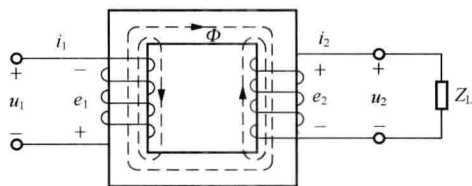


图 1.8 变压器负载运行

影响, 可以用接于 $\dot{U}_1$ 的阻抗 Z'_L 来等效。如图 1.9 (b) 所示, 等效的条件是 $\dot{U}_1$ 、 i_1 保持不变。下面分析等效阻抗 Z'_L 和负载阻抗 Z_L 的关系。为了分析方便, 不考虑一、二次绕组漏磁通感应电动势和空载电流的影响, 并忽略各种损耗, 这样的变压器称为理想变压器。

在图 1.9 中, 根据所标电压参考方向和变压器的同极性端, $\dot{U}_2$ 和 $\dot{U}_1$ 相位相反。对于理想变压器, $\dot{U}_2 = -k\dot{U}_1$, 于是可得

$$Z'_L = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{-k\dot{U}_2}{-\frac{1}{k}\dot{I}_1} = \frac{k\dot{U}_2}{\frac{1}{k}\dot{I}_2} = k^2 Z_L = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_L \quad (1.23)$$

式 (1.23) 说明, 接在二次绕组的负载阻抗 Z_L 对一次侧的影响, 可以用一个接于一次绕组的等效阻抗 Z'_L 来代替, 等效阻抗 Z'_L 等于 Z_L 的 k^2 倍。

由此可见, 变压器具有阻抗变换作用。在电子技术中有时利用变压器的阻抗变换作用来达到阻抗匹配的目的。

〔例题 1〕图 1.10 中信号源 $U_s=1.0\text{V}$, 内阻 $R_s=20\Omega$, 负载电阻 $R_L=8\Omega$, 现欲使负载从信号源获得最大功率, 试求变压器的变比。

〔解〕从电路原理可知, 负载要获得最大功率, 应使其等效负载等于电源内阻, 即

$$Z'_L = k^2 R_L = R_s$$

故变压器变比

$$k = \sqrt{\frac{R_s}{R_L}} = \sqrt{\frac{20}{8}} = 5$$

这种情况在电子技术中称为阻抗匹配。

3. 变压器的特性与额定值

(1) 变压器的外特性。

变压器一次电压 U_1 为额定值时, $U_2=f(I_2)$ 的关系曲线称为变压器的外特性, 如图 1.11 所示。图中 U_{20} 是空载时的二次电压, 称为空载电压, 其大小等于主磁通在二次绕组中产生的感应电动势 E_2 ; φ_2 为 $\dot{U}_2$ 和 $\dot{I}_2$ 的相位差。分析表明, 当负载为电阻或电感性时, 二次电压 U_2 将随电流 I_2 的增加而降低, 这是因为随着 I_2 的增大, 二次绕组的电阻电压降和漏磁通感应电动势增大而造成的。

由于二次绕组电阻压降和漏磁通感应电动势较小, U_2 的变化一般不大。电力变压器的电压变化率

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\% \quad (1.24)$$

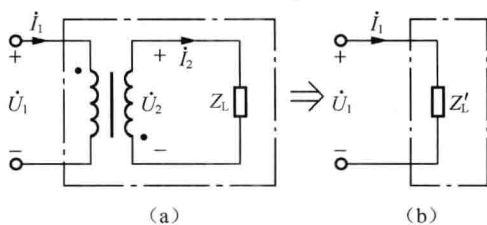


图 1.9 变压器的阻抗变换

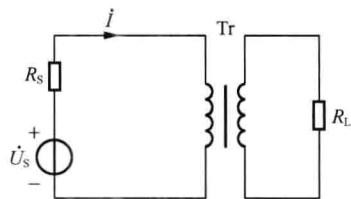


图 1.10 例题 1 电路图

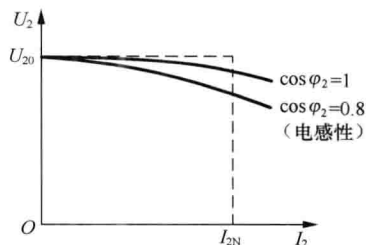


图 1.11 变压器的外特性曲线

$\Delta U\%$ 大约为 $3\% \sim 6\%$ 。式中 U_{20} 和 U_2 分别为空载和额定负载时的二次电压。

(2) 变压器的损耗和效率。

变压器的输入功率除了大部分输出给负载外, 还有很小一部分损耗在变压器内部。变压器的损耗包括铁损耗 P_{Fe} 和铜损耗 P_{Cu} 。铁损耗是由交变磁通在铁心中产生的, 包括磁滞损耗和涡流损耗; 当外加电压 U_1 和频率 f 一定时, 主磁通 Φ_{max} 基本不变, 铁损耗也基本不变, 故铁损耗又称为固定损耗。铜损耗是由电流 I_1 、 I_2 流过一次、二次绕组的电阻所产生的损耗, 它随电流的变化而变化, 故称为可变损耗。由于变压器空载运行时铜损耗 $R_1 I_0^2$ 很小, 此时从电源输入的功率 (称为空载损耗) 基本上损耗在铁心上, 故可认为空载损耗等于铁损耗。

变压器的输出功率 P_2 和输入功率 P_1 之比称为变压器的效率, 通常用百分数表示

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} \times 100\% \quad (1.25)$$

图 1.12 所示为变压器的效率曲线 $\eta = f(P_2)$ 。由图可见, 效率随输出功率而变, 并有一个最大值。变压器效率一般较高, 大型电力变压器的效率可达 99% 以上。这类变压器往往不是一直处于满载运行, 因此在设计时通常使最大效率出现在 $50\% \sim 60\%$ 额定负载左右。

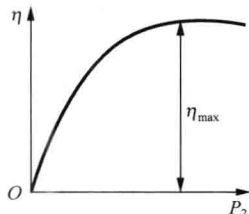


图 1.12 变压器的效率曲线

(3) 变压器的额定值。

为了正确使用变压器, 必须了解和掌握变压器的额定值。额定值常标在变压器的铭牌上, 故也称为铭牌数据。

① 额定电压 U_{1N}/U_{2N} 。额定电压是根据变压器的绝缘强度和容许温升而规定的电压值, 以伏 (V) 或千伏 (kV) 为单位。额定电压 U_{1N} 是指变压器一次侧 (输入端) 应加的电压, U_{2N} 是指输入端加上额定电压时的二次空载电压。在三相变压器中额定电压都是指线电压。在供电系统中, 变压器二次空载电压要略高于负载的额定电压。例如对于额定电压为 $380V$ 的负载, 变压器的二次电压为 $400V$ 左右。

② 额定电流 I_{1N}/I_{2N} 。额定电流是根据变压器容许温升而规定的电流值, 以安 (A) 或千安 (kA) 为单位。在三相变压器中都是指线电流。

③ 额定容量 S_N 。额定容量即额定视在功率, 表示变压器输出电功率的能力。以伏安 (V·A) 或千伏安 (kV·A) 为单位。对于单相变压器

$$S_N = U_{2N} I_{2N} \quad (1.26)$$

对于三相变压器

$$S_N = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} \quad (1.27)$$

式 (1.27) 中的 U_{2N} 、 I_{2N} 为线电压和线电流。

④ 额定频率 f_N 。运行时变压器使用交流电源电压的频率。我国的标准工业频率为 $50Hz$, 有些国家的工业频率为 $60Hz$ 。

⑤ 相数。

⑥ 温升。变压器在额定值下运行时, 变压器内部温度容许超出规定的环境温度 ($+40^\circ C$) 的数值, 与绝缘材料的性能有关。

对于三相变压器, 铭牌上还给出高、低压侧绕组的连接方式。

【例题 2】有一单相变压器, 一次额定电压 $U_{1N}=220V$, 二次额定电压 $U_{2N}=20V$, 额定容量 $S_N=75V \cdot A$ 。求变压器的变比 k 、二次侧和一次侧的额定电流 I_{2N} 和 I_{1N} 。设空载电流忽略不计。

[解] 变比

$$k = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{220}{20} = 11$$

二次电流

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} = \frac{75}{20} = 3.75 \text{ A}$$

一次电流

$$I_{1N} \approx \frac{1}{k} I_{2N} = \frac{3.75}{11} = 0.34 \text{ A}$$

4. 变压器应用实例

(1) 自耦变压器。

变压器的一次绕组和二次绕组常常是相互绝缘而绕在同一个铁心上的, 这种变压器称为双绕组变压器。如果把两个绕组合二为一, 使二次绕组成为一次绕组的一部分, 这种只有一个绕组的变压器称为自耦变压器, 如图 1.13 所示。

自耦变压器常常用在变比不太大的场合, 由于是单绕组变压器, 一次、二次绕组之间既有磁的联系, 也有电的联系。

在有些场合, 希望自耦变压器的二次电压可以平滑地调节, 为此, 可以用滑动触点来连续改变二次绕组的匝数, 从而使输出电压平滑可调。这种可以平滑地调节输出电压的自耦变压器称为调压器。图 1.14 所示为调压器的外形和原理图。

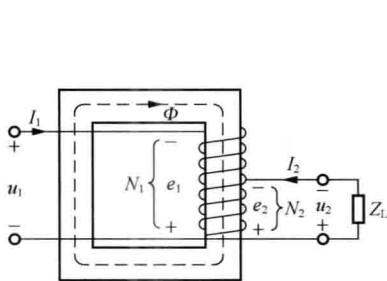


图 1.13 自耦变压器

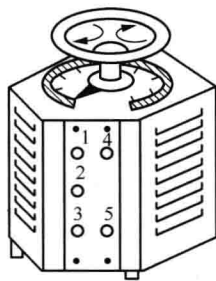
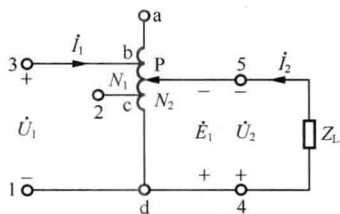


图 1.14 调压器的外形和原理图



图中 $\dot{U}_1$ 为输入电压, $\dot{U}_2$ 为输出电压。转动手柄使滑动触点 P 处于不同位置, 就可以改变输出电压。当触点 P 位于 b 点上方时, 输出电压大于输入电压。调压器在使用时, 一次、二次绕组不可以对调, 以防因使用不当而导致电源短路, 并烧坏调压器。

(2) 电焊变压器。

交流弧焊机应用很广。电焊变压器是交流弧焊机的主要组成部分, 它是一种双绕组变压器, 在二次绕组电路中串联一个可变电抗器, 图 1.15 所示为其原理图。

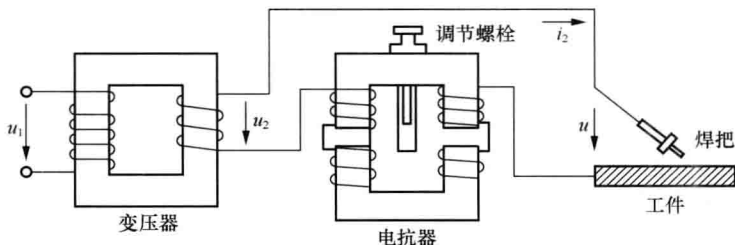


图 1.15 电焊变压器原理图

对电焊变压器的要求是：空载时应有足够的引弧电压（约 60V~75V），以保证电极间产生电弧；有载时，二次绕组电压应迅速下降，当焊条与工件间产生电弧并稳定燃烧时，约有 30V 的电压降；短路时（焊条与工件相碰瞬间），短路电流不能过大，以免损坏焊机；另外，为了适应不同的焊件和不同规格的焊条，焊接电流的大小要能够调节。

二次绕组电路中串联有铁心电抗器，调节其电抗就可调节焊接电流的大小。改变电抗器空气隙的长度就可改变它的电抗，空气隙增大，电抗器的感抗随之减小，电流就随之增大。

如图 1.15 所示，一次、二次绕组分别绕在两个铁心柱上，使绕组有较大的漏磁通。漏磁通只与各绕组自身交链，它在绕组中产生的自感电动势起着减弱电流的作用，因此可用一个电抗来反映这种作用，称为漏电抗。漏电抗与绕组本身的电阻合称为漏阻抗。漏磁通越大，该绕组本身的漏电抗就越大，漏阻抗也就越大。对负载来说，二次绕组相当于电源，那么二次绕组本身的漏阻抗就相当于电源的内部阻抗，漏阻抗大就是电源的内阻抗大，会使变压器的外特性曲线变陡，即二次侧的端电压 U_2 将随电流 I_2 的增大而迅速下降，这样就满足了有载时副边电压迅速下降以及短路瞬间短路电流不致过大的要求。

（3）仪用互感器。

专供测量仪表、控制和保护设备用的变压器称为仪用互感器。仪用互感器有两种：电压互感器和电流互感器。利用互感器将待测的电压或电流按一定比率减小以便于测量，且将高压电路与测量仪表电路隔离，以保证安全。互感器实质上就是损耗低、变比精确的小型变压器。

电压互感器的原理图如图 1.16 所示。由图可知，高压电路与测量仪表电路只有磁的耦合而无电的直接连通。为防止互感器一次、二次绕组之间绝缘损坏时造成危险，铁心以及二次绕组的一端应当接地。

电压互感器的主要原理是变压器的变压作用，即

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

为降低电压，要求 $N_1 > N_2$ ，一般规定二次侧的额定电压为 100V。

电流互感器的原理图如图 1.17 所示。电流互感器的主要原理是变压器的变流作用，即

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

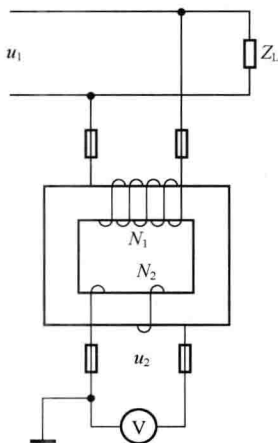


图 1.16 电压互感器原理图

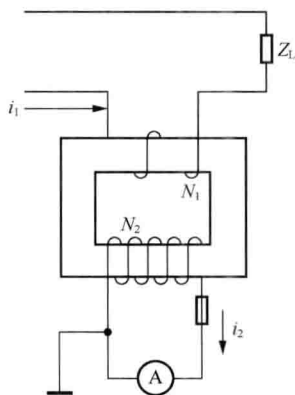


图 1.17 电流互感器原理图