



高职高专创新教材
电子信息系列

电机与控制

高职高专创新教材编审委员会编



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社



高职高专创新教材

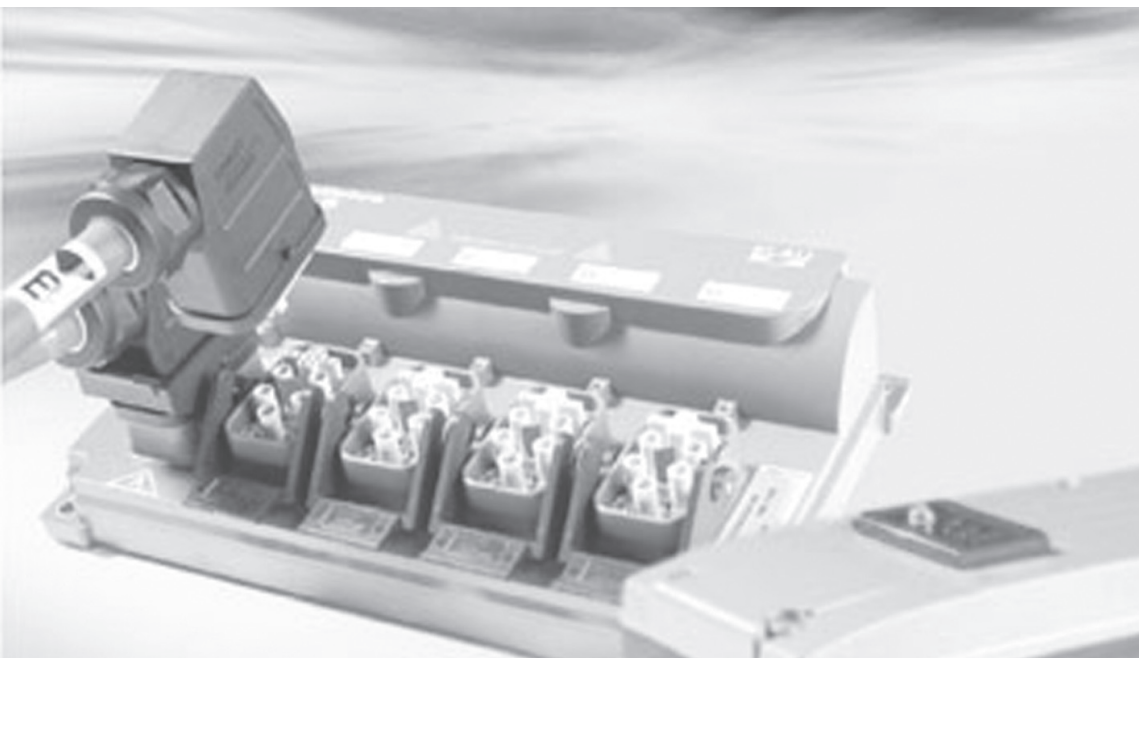
电子信息系列

电机与控制

高职高专创新教材编审委员会编

王晓平 石朝晖 主 编

吴 方 李凤强 刘文娟 副主编



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电机与控制/高职高专创新教材编审委员会编. —武汉: 武汉大学出版社, 2011. 3

高职高专创新教材

ISBN 978-7-307-08598-5

I. ①电… II. ①高… III. ①电机—控制系统—高等职业教育—教材
IV. ①TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 043776 号

责任编辑:周颖异

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:北京泽宇印刷有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:13.5 字数:295千字

印次:2011年4月第1版 2014年11月第3次印刷

ISBN 978-7-307-08598-5/TM·23 定价:29.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

高职高专创新教材·电子信息系列

编审委员会

主 任 刘文娟

副 主 任 施红英 刘炳国

委 员 (按姓氏笔画为序)

于 春	王怀宇	王 艳
王晓平	白秉旭	石朝晖
孙会双	孙淑荣	刘 莉
刘临江	刘立国	刘 刚
闫东清	张大林	李凤强
李新竹	吴 方	宋 阳
赵慧欣	邱仁凤	陈秋霞
远红娟	胡登纯	徐伟伟
梁大鹏	郭志宏	

内 容 简 介

本书是依据《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》的指导思想,参考教育部“关于普通高等教育教材建设与改革的意见”的精神,结合高职高专“以提高学生就业竞争力为导向,突出技能训练,培养实用型人才”的人才培养目标编写而成的。

本书内容全面、体例新颖,实用性强。全书共分为7章,主要包括变压器、直流电机、三相异步电动机、同步电动机、其他电机、三相异步电动机的拖动设计与实现、常用机床电气控制线路等。

本书可作为高职高专院校电子信息类、电气控制类专业教材使用,也可供工程技术人员参考阅读。

前 言

本书是依据《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》的指导思想,参考教育部“关于普通高等教育教材建设与改革的意见”的精神,结合高职高专“以提高学生就业竞争力为导向,突出技能训练,培养实用型人才”的人才培养目标,根据劳动和社会保障部制定的“维修电工”高级职业标准中的电机及控制相关要求和电子信息类、电气控制类专业“电机与控制”课程基本要求编写的。本书可作为高等职业院校“电机与控制”课程的教材,也可供工程技术人员参考阅读。

“电机与控制”是高等职业学校电子信息类、电气控制类专业教材,是非强电类相关专业学习强电知识与培养电技术应用能力的一门专业课,它综合了“电机学”、“电力拖动基础”和“工厂电气控制设备”等课程的基本内容,主要研究电机与拖动系统的基本理论问题,是一门实践性较强的综合性课程。本书内容针对电子信息类、电气控制类专业高级技术应用型人才岗位所需的知识、能力来编写,使学生掌握分析电机启动、制动和调速的方法,理解电机拖动系统的静态和动态特性。学好本课程,不仅可为专业课学习打好基础,而且可直接为培养职业能力服务。

本书的编写特点主要体现在以下几个方面。

(1)采用任务驱动式编写,实用性强。在本书的编写过程中,注重理论联系实际,淡化理论推导,力求使学生学会电机控制理论在实际中的应用。

(2)内容全面,体例新颖。为适应当前工业发展的需要,增加了电机与系统结合以及新型电机的内容。

(3)相关概念、原理、图表采用最新的国家标准进行说明。

(4)在内容上留有适当的裕量,教师可根据教学时数和教学条件进行取舍。

本书共分为7章,主要包括变压器、直流电机、三相异步电动机、同步电动机、其他电机、三相异步电动机的拖动设计与实现、常用机床电气控制线路等。

由于编者水平有限,书中不足和疏漏之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 变压器	1	第 5 章 其他电机	124
任务 1 初步认识变压器	1	任务 1 单相异步电动机	124
任务 2 变压器的运行及等效电路	11	任务 2 伺服电动机	133
任务 3 变压器参数测试	17	任务 3 步进电机	139
本章小结	21	任务 4 力矩电动机	142
本章习题	22	任务 5 测速发电机	144
第 2 章 直流电机及其控制	23	任务 6 自整角机	147
任务 1 直流电机及其控制	23	任务 7 直线电动机	150
任务 2 直流电机的绕组及磁场	30	本章小结	154
任务 3 直流电机的换向及改善换向的方法	42	本章习题	155
任务 4 他励直流电动机的运行特性	44	第 6 章 三相异步电动机的拖动设计与实现	156
任务 5 他励直流电动机的控制	49	任务 1 电气控制的基本知识	156
本章小结	58	任务 2 三相异步电动机的典型控制任务及实现	167
本章习题	59	任务 3 笼型异步电动机的星—角降压启动控制	173
第 3 章 三相异步电动机	61	任务 4 三相异步电动机的制动控制	175
任务 1 初步认识三相异步电动机	61	任务 5 三相异步电动机的保护	179
任务 2 三相异步电动机的运行	72	本章小结	181
任务 3 三相异步电动机的功率和转矩	77	本章习题	181
任务 4 三相异步电动机的特性	82	第 7 章 常用机床电气控制线路	183
任务 5 三相异步电动机的控制	85	任务 1 C650 卧式车床的电气控制	183
本章小结	95	任务 2 Z3040 型摇臂钻床的电气控制	187
本章习题	96	任务 3 X62W 型万能铣床的电气控制	191
第 4 章 同步电动机	97	任务 4 T68 型卧式镗床的电气控制	196
任务 1 初步认识同步电机	97	任务 5 M7120 型平面磨床的电气控制	200
任务 2 同步发电机的电磁关系	101	本章小结	204
任务 3 同步发电机的运行	108	本章习题	205
任务 4 同步电动机和同步调相机	118	参考文献	206
本章小结	121		
本章习题	122		

第 1 章

变 压 器

任务 1 初步认识变压器

任务描述：熟悉变压器的基本结构；
了解变压器的铭牌数据；
掌握变压器的工作原理；
了解变压器的基本特性；
了解变压器的分类。

任务分析：变压器是电磁转换的基本元器件之一，被称为“静止的电机”，在日常生活、生产中应用极其广泛。本任务主要对变压器的基本知识进行简单的介绍，对变压器工作原理进行重点讲述。

阶段 1 变压器的基本结构

变压器是一种常用的静止电气设备，它利用电磁感应原理，将某一电压等级的交流电变换为同频率的另一电压等级的交流电。

变压器的类型很多，有不同的分类方法。如按照用途分类有电力变压器、仪用互感器等；按照变换电能的相数分类有单相变压器、三相变压器和多相变压器。尽管变压器类型很多，但是它们的结构是基本相同的。本阶段通过重点介绍单相小型变压器，来学习变压器的基本结构。

单相变压器是指接在单相交流电源上，用来改变单相交流电压的变压器，通常容量都很小，主要用于局部照明和控制。一般电工测量和电子线路中使用的也多为单相变压器。

变压器主要由铁芯和绕在铁芯上的线圈两部分组成，如图 1-1 所示。

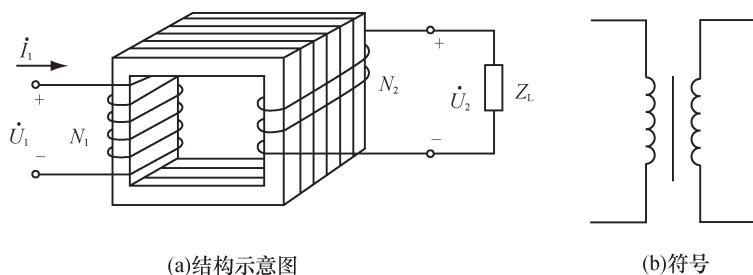


图 1-1 变压器

1. 铁芯

常用的变压器铁芯一般都是用硅钢片制成的。硅钢是一种含硅的钢,其含硅量在 $0.8\% \sim 4.8\%$ 。由硅钢做变压器的铁芯,是因为硅钢本身是一种导磁能力很强的磁性物质,在通电线圈中,它可以产生较大的磁感应强度,从而可以使变压器的体积减小。铁芯组成变压器的磁路部分。

实际的变压器总是在交流状态下工作,功率损耗不仅发生在线圈的电阻上,也发生在交变电流磁化下的铁芯中。通常把铁芯中的功率损耗称为“铁损”,铁损由两个原因造成,一个是“磁滞损耗”,一个是“涡流损耗”。磁滞损耗是指铁芯在磁化过程中,由于存在磁滞现象而产生的铁损,这种损耗的大小与材料的磁滞回线所包围的面积大小成正比。硅钢的磁滞回线狭小,用它做变压器的铁芯磁滞损耗较小,可使其发热程度大大减小。用做变压器的铁芯,一般选用 0.35mm 厚的冷轧硅钢片,硅钢片的表面都涂有绝缘漆,形成绝缘层。

按所需铁芯的尺寸,将硅钢片裁成长形片,然后交叠成“日”字形或“口”字形,如图 1-2 所示。从道理上讲,为减小涡流,硅钢片厚度越薄,拼接的片条越狭窄,效果越好。这不但减小了涡流损耗,降低了温升,还能节省硅钢片的用料。但实际上制作硅钢片铁芯时,并不单从上述的一方面有利因素出发,因为那样制作铁芯,要大大增加工时,还减小了铁芯的有效截面。所以,用硅钢片做变压器铁芯时,要从具体情况出发,权衡利弊,选择最佳尺寸。

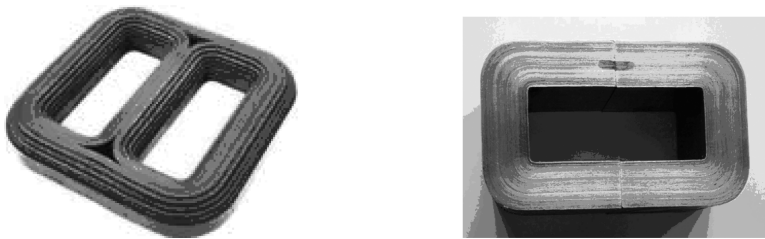


图 1-2 “日”字形铁芯和“口”字形铁芯



思考与分析

既然硅钢有上述优点,为什么不用整块的硅钢做铁芯,而要把它加工成片状呢?

这是因为片状铁芯可以减小另外一种铁损——“涡流损耗”。变压器工作时,线圈中有交变电流,它产生的磁通当然是交变的。这个变化的磁通在铁芯中产生感应电流。铁芯中产生的感应电流,在垂直于磁通方向的平面内环流,所以称为涡流。涡流损耗同样使铁芯发热。为了减小涡流损耗,变压器的铁芯用彼此绝缘的硅钢片叠成,使涡流在狭长形的回路中,通过较小的截面,以增大涡流通路上的电阻;同时,硅钢中的硅使材料的电阻率增大,也起到减小涡流的作用。

2. 线圈

线圈是指有两个或两个以上的绕组,其中与电源连接的绕组称为原绕组,又称为初级绕组或一次绕组。凡表示原绕组各有关电量的字母均采用下标“1”来表示,如原绕组电压 U_1 、原绕组匝数 N_1 等。与负载连接的绕组称为副绕组,又称为次级绕组或二次绕组。凡表示副绕组各有关电量的字母均采用下标“2”来表示,如副绕组电压 U_2 、副绕组匝数 N_2 等。线圈组成变压器的电路部分。

变压器按铁芯和绕组的组合方式,可分为壳式和心式两种,分别如图 1-3、图 1-4 所示。壳式变压器的绕组被铁芯所包围,而心式变压器的绕组则包围铁芯。壳式变压器用铁量比较多,不需要专门的变压器外壳,常用于小容量的变压器,如各种电子设备和仪器中的变压器多采用壳式结构;心式变压器用铁量比较少,多用于大容量的变压器,如电力变压器多采用心式结构。

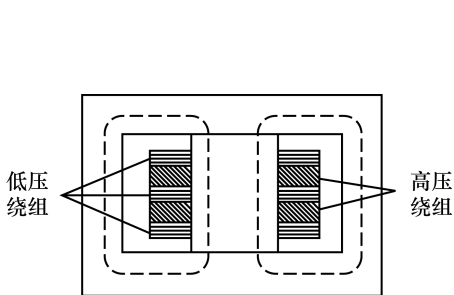


图 1-3 壳式变压器

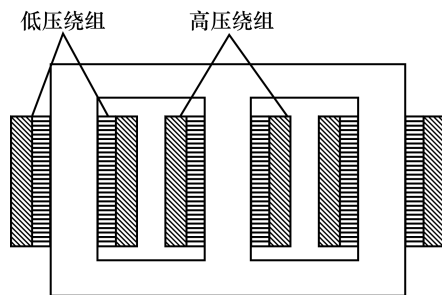


图 1-4 心式变压器

3. 辅助器件

铁芯和线圈是变压器必不可少的组成部分。对于不同的变压器,其他辅助元件也不尽相同,如小型变压器的线架、电气胶带、绝缘纸和套管等。这里主要讨论为改善变压器的散热性能而采用的辅助器件。

变压器在工作时,因有损耗而发热,使绕组及铁芯温度升高,这种损耗称为“铜损”。为减少铜损,大中型变压器制成油浸式,铁芯和绕组都浸在变压器油中,依靠油的对流,将热量传到油箱壁及油管上,散到空气中去,如图 1-5 所示。大容量变压器外面装有风扇,进行强

迫风冷。变压器油箱是封闭的,防止水分和湿气浸入。由于变压器油的热胀冷缩,还需配有储油枕,用油管与油箱连通,油枕内的空气与外面空气之间要经氯化钙装置吸潮。

小容量变压器主要靠周围空气散热,一般做成干式或空气自冷式变压器。

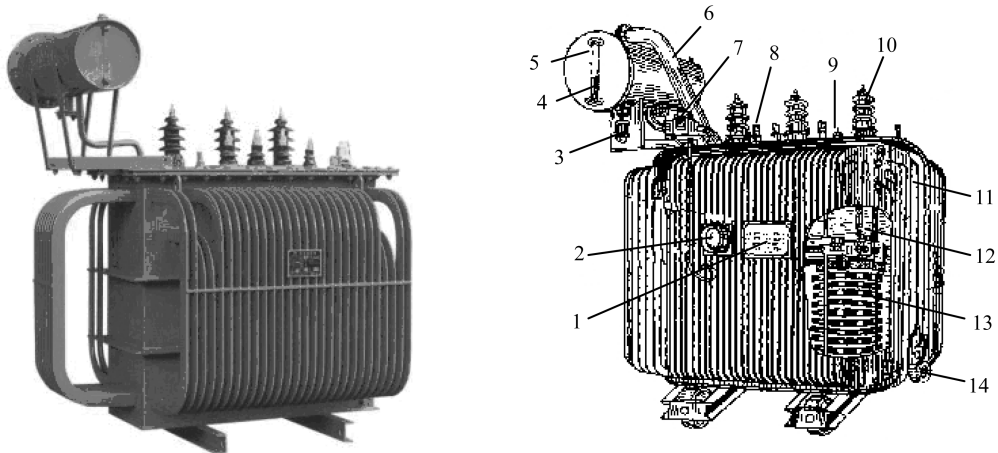


图 1-5 油浸式变压器的外形图及内部结构图

- 1—铭牌;2—讯号式温度计;3—吸湿器;4—油表;5—储油枕;6—安全气道;
7—气体继电器;8—低压套管;9—分接开关;10—高压套管;
11—油箱;12—铁芯;13—线圈;14—放油阀

阶段 2 变压器的工作原理

1. 变压器的工作原理

变压器是利用电磁感应原理传输电能或电信号的器件,它具有变压、变流和变阻抗的作用。变压器的种类很多,应用十分广泛。例如,在电力系统中用电力变压器把发电机发出的电压升高后进行远距离输电,到达目的地后再用变压器把电压降低以使用户使用,以此减少传输过程中电能的损耗;在电子设备和仪器中常用小功率电源变压器改变市电电压,再通过整流和滤波,得到电路所需要的直流电压;在放大电路中用耦合变压器传递信号或进行阻抗的匹配等。变压器虽然大小悬殊,用途各异,但其工作原理却是相同的。

2. 变压器的铭牌数据

每台变压器都有一铭牌,上面标注着型号、额定值及其他数据,便于用户了解变压器的运行性能。如图 1-6 为某电力变压器的铭牌。

(1)额定容量 S_N 指变压器额定工作条件下输出能力的保证值,是额定视在功率,单位为伏安($V \cdot A$)、千伏安($kV \cdot A$)或兆伏安($MV \cdot A$)。

电力变压器			
产品型号	SL7—315/10	产品编号	
额定容量	315kV·A	使用条件	户外式
额定电压	10 000/400V	冷却条件	ONAN
额定电流	18.2/454.7A	短路电压	4%
额定频率	50 Hz	器身吊重	765kg
相 数	三相	油 重	380kg
连接组别	Yyno	总 重	1 525kg
制造厂		生产日期	

图 1-6 某电力变压器的铭牌

(2) 额定电压 U_N 指变压器长时间运行所能承受的工作电压,以 V 或 kV 表示。

(3) 额定电流 I_N 指变压器在额定容量下,允许长期通过的电流,以 A 表示。

(4) 额定频率 f_N 指工业用电频率,我国规定为 50Hz。

(5) 温升指变压器绕组或上层油面的温度与变压器周围环境的温度之差。在每一台变压器的铭牌上都标有温升的限值。国家标准规定,当变压器安装地点的海拔不超过 1 000m 时,绕组温升的限值为 65°C ,上层油面温升的限值为 55°C 。

(6) 额定工作状态指变压器在额定电压、额定频率、额定负载及规定使用条件下的工作状态,在铭牌上都有标示。变压器在额定工作状态下运行,经济效果好、寿命长;反之,经济效果差、寿命短,甚至会出事故。

小型电源及控制变压器一般只标出输入电压、输出电压和频率等参数。

提醒

变压器的额定容量、额定电压、额定电流之间的关系为:

单相变压器

$$S_N = U_{1N} I_{1N} = U_{2N} I_{2N} \quad (1-1)$$

三相变压器

$$S_N = \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} \quad (1-2)$$

实践活动

在你日常接触到的电气设备中,都有哪些用到了变压器,简单说明一下它的作用,记录它的铭牌参数并解释其含义。

阶段 3 变压器的基本特性

1. 电压变换

当原绕组外加电压 \dot{U}_1 时,原边就有电流 \dot{I}_1 流过,并在铁芯中产生与 \dot{U}_1 同频率的交变主磁通 $\dot{\Phi}_m$,主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 既穿过原绕组,也穿过副绕组,于是在原、副绕组中分别感应出电动势 \dot{E}_1 和 \dot{E}_2 ,向负载输出电能。且感应电动势 \dot{E}_1 和 \dot{E}_2 与 $\dot{\Phi}_m$ 的参考方向之间符合右手螺旋定则,由法拉第电磁感应定律可得感应电动势的瞬时值为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (1-3)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (1-4)$$

感应电动势的有效值为

$$E_1 \approx 4.44fN_1\Phi_m \quad (1-5)$$

$$E_2 \approx 4.44fN_2\Phi_m$$

所以

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \text{ (式中 } K \text{ 为变比)} \quad (1-6)$$

若忽略绕组内阻和漏磁通,原、副绕组端电压大小近似为

$$\left. \begin{aligned} U_1 &\approx E_1 \\ U_2 &\approx E_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad (1-8)$$

可见,变压器原、副绕组上电压的比值近似等于两者的匝数之比, K 称为变压器的变比。改变变压器原、副绕组的匝数,就能够把某一数值的交流电压变为同频率的另一数值的交流电压,即

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1}U_1 = \frac{1}{K}U_1 \quad (1-9)$$

当原绕组的匝数 N_1 比副绕组的匝数 N_2 多时, $K > 1$,这种变压器称为降压变压器;反之,当 N_1 的匝数少于 N_2 的匝数时, $K < 1$,这种变压器称为升压变压器; $K = 1$ 时为隔离变压器。

【例 1-1】 已知某变压器铁芯的截面积为 20cm^2 ,铁芯中磁感应强度的最大值不能超过 0.2T ,若要用它把 220V 工频交流电变换成为 20V 的同频率交流电,原、副绕组的匝数应为多少?

解 铁芯中磁通的最大值

$$\Phi_m = B_m S = 0.2 \times 20 \times 10^{-4} = 0.0004 \text{ Wb}$$

原绕组的匝数应为

$$N_1 = \frac{U_1}{4.44f\Phi_m} = \frac{220}{4.44 \times 50 \times 0.0004} \approx 2477$$

副绕组的匝数应为

$$N_2 = \frac{U_2}{4.44f\Phi_m} = \frac{20}{4.44 \times 50 \times 0.0004} \approx 225$$

2. 电流变换

如图 1-7 所示,变压器的原绕组接交流电压 U_1 ,副绕组接上负载 Z_L ,这种运行状态称为负载运行。这时副边的电流为 I_2 ,原边电流由 I_{10} 增大为 I_1 ,且 U_2 略有下降,这是因为有了负载后, I_1 、 I_2 会增大,原、副绕组本身的内部压降也会比空载时增大,使副绕组电压 U_2 比 E_2 低一些。因为变压器内部压降一般小于额定电压的 10% ,所以变压器有无负载对电压比的影响不大,可以认为负载运行时变压器原、副绕组的电压比仍然基本上等于原、副绕组匝数之比。

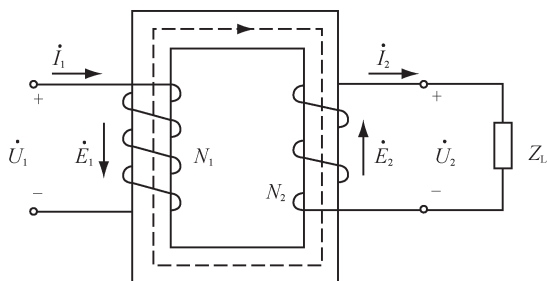


图 1-7 变压器的负载运行

变压器负载运行时,由 \dot{I}_2 形成的磁动势 $\dot{I}_2 N_2$ 对磁路也会产生影响,即铁芯中的主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 是由 $\dot{I}_1 N_1$ 和 $\dot{I}_2 N_2$ 共同产生的。由式 $U \approx E \approx 4.44 f N \Phi_m$ 可知,当电源电压和频率不变时,铁芯中的磁通最大值应保持基本不变,那么磁动势也应保持不变,即 $I_1 N_1 + I_2 N_2 = I_{10} N_1$ 。

由于变压器空载电流很小,一般只有额定电流的百分之几,因此当变压器额定运行时,可忽略不计,则有 $I_1 N_1 \approx -I_2 N_2$ 。

可见变压器负载运行时,原、副绕组产生的磁动势方向相反,即副边电流 \dot{I}_2 对原边电流 \dot{I}_1 产生的磁通有去磁作用。因此,当负载阻抗减小,副边电流 I_2 增大时,铁芯中的磁通 Φ_m 将减小,原边电流 I_1 必然增加,以保持磁通 Φ_m 基本不变,所以副边电流变化时,原边电流也会相应地变化。原、副边电流有效值的关系为

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K} \quad (1-10)$$

可见,当变压器额定运行时,原、副边的电流之比近似等于其匝数之比的倒数。改变原、副绕组的匝数,就能够改变原、副绕组电流的比值,这就是变压器的电流变换特性。

不难看出,变压器的电压比与电流比互为倒数,因此匝数多的绕组电压高,电流小;匝数少的绕组电压低,电流大。

【例 1-2】 已知某一变压器 $N_1 = 1\,000$, $N_2 = 100$, $U_1 = 220\text{V}$, $I_2 = 2\text{A}$, 负载为纯电阻,忽略变压器的漏磁和损耗,求变压器的副边电压 U_2 , 原边电流 I_1 和输入、输出功率。

解 变压比
$$K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1\,000}{100} = 10$$

副边电压
$$U_2 = \frac{U_1}{K} = \frac{220}{10} = 22\text{V}$$

原边电流
$$I_1 = \frac{I_2}{K} = \frac{2}{10} = 0.2\text{A}$$

输入功率
$$P_1 = U_1 I_1 = 220 \times 0.2 = 44\text{W}$$

输出功率
$$P_2 = U_2 I_2 = 22 \times 2 = 44\text{W}$$

可见,当变压器的功率损耗忽略不计时,它的输入功率与输出功率相等,符合能量守恒

定律。

在远距离输电线路中,线路损耗 P_1 与电流 I_1 的平方乘以线路电阻 R_1 的积成正比,因此在输送同样功率的情况下,所用电压越高,电流就会越小,输电线上的损耗越小,可以减小输电导线的截面积,从而大大降低成本。所以电厂在输送电能之前,必须先用升压变压器将电压升高,但传输到用户后,电压不能太高,通常为 380V 或 220V,因此要用降压变压器再进行降压。

3. 阻抗变换

变压器除了具有变压和变流的特性外,还有变换阻抗的特性。如图 1-8 所示,变压器原边接电源 U_1 ,副边接的阻抗值为 $|Z_L|$,对于电源来说,图中虚线框内的电路可用另一个阻抗 $|Z_L'|$ 来等效。所谓等效,就是指它们从电源吸取的电流和功率相等。当忽略变压器的漏磁和损耗时,等效阻抗由下式求得,即

$$|Z_L'| = \frac{U_1}{I_1} = \frac{\left(\frac{N_1}{N_2}\right)U_2}{\left(\frac{N_2}{N_1}\right)I_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 |Z_L| = K^2 |Z_L| \quad (1-11)$$

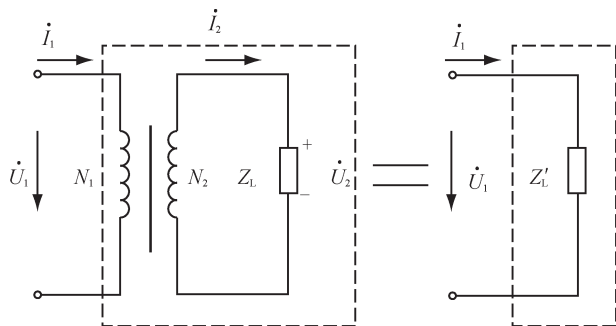


图 1-8 变压器阻抗变换的等效

$|Z_L| = \frac{U_2}{I_2}$ 为变压器副边的负载阻抗。可见,对于变比为 K 且变压器副边阻抗为 $|Z_L|$ 的负载,相当于在电源上直接一个阻抗为 $|Z_L'| = K^2 |Z_L|$ 的负载,也可以说变压器把负载阻抗 $|Z_L|$ 变换为 $|Z_L'|$ 。因此,通过选择合适的变比 K ,可把实际负载阻抗变换为所需的数值,这就是变压器的阻抗变换特性。

在电子电路中,为了提高信号的传输功率,常用变压器将负载阻抗变换为适当的数值,使其与放大电路的输出阻抗相匹配,这种做法称为阻抗匹配。

【例 1-3】 某交流信号源的电动势 $E=120\text{V}$,内阻 $R_0=800\Omega$,负载电阻 $R_L=8\Omega$ 。

(1)若将负载与信号源直接相连,如图 1-9(a)所示,信号源输出的功率有多大?

(2)若要信号源输给负载的功率达到最大,负载电阻应等于信号源内阻。今用变压器进行阻抗变换,则变压器的匝数比应选多少? 阻抗变换后信号源的输出功率有多大?

解 (1)由图 1-9(a)可知,若将负载直接与信号源连接,信号源的输出功率为

$$P = I^2 R_L = \left(\frac{E}{R_0 + R_L}\right)^2 R_L = \left(\frac{120}{800 + 8}\right)^2 \times 8 = 0.176\text{W}$$

(2) 如图 1-9(b)所示,用变压器把负载 R_L 变换为等效电阻,使其阻值与电源内阻相等。则变比

$$K = \sqrt{\frac{R_L'}{R_L}} = \sqrt{\frac{800}{8}} = 10$$

信号源的输出功率为

$$P_2 = I^2 R_L' = \left(\frac{E}{R_0 + R_L'} \right)^2 R_L' = \left(\frac{120}{800 + 800} \right)^2 \times 800 = 4.5 \text{ W}$$

可见,阻抗匹配后输出功率为最大。

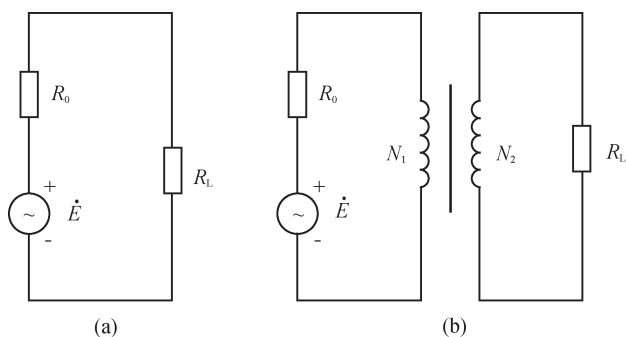


图 1-9 例 1-3 图



知识拓展

变压器的类型与自耦变压器

1. 变压器的分类

(1) 按冷却方式不同,变压器可分为干式(自冷)变压器、油浸(自冷)变压器和氟化物(蒸发冷却)变压器等。

(2) 按防潮方式不同,变压器可分为开放式变压器、灌封式变压器和密封式变压器等。

(3) 按铁芯或线圈结构不同,变压器可分为心式变压器(插片铁芯、C形铁芯、铁氧体铁芯)、壳式变压器(插片铁芯、C形铁芯、铁氧体铁芯)、环型变压器和金属箔变压器等。

(4) 按电源相数不同,变压器可分为单相变压器、三相变压器和多相变压器。

(5) 按用途不同,变压器可分为电源变压器、调压变压器、音频变压器、中频变压器、高频变压器和脉冲变压器。

2. 自耦变压器

原边与副边共用一个绕组的变压器称为自耦变压器,如图 1-10 所示。根据结构不同,可分为可调压式和固定式两种类型。自耦的“耦”是电磁耦合的意思,普通的变压器是通过原副边线圈电磁耦合来传递能量,原副边没有直接的电的联系,而自耦变压器原副边有直接

的电的联系,它的低压线圈就是高压线圈的一部分。

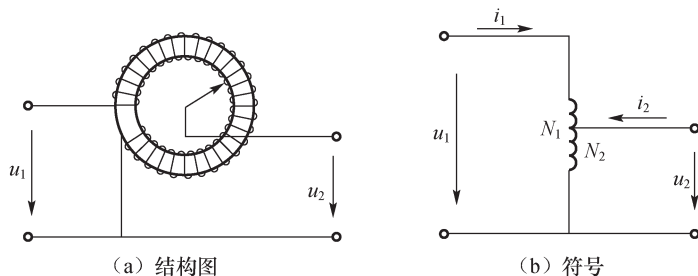


图 1-10 自耦变压器

(1) 自耦变压器有以下几方面特点。

① 由于自耦变压器的计算容量小于额定容量,所以在同样的额定容量下,自耦变压器的主要尺寸较小,有效材料(硅钢片和导线)和结构材料(钢材)都相应减少,从而降低了成本。有效材料的减少使得铜损和铁损也相应减少,故自耦变压器的效率较高。同时由于主要尺寸的缩小和质量的减小,可以在容许的运输条件下制造单台容量更大的变压器。但通常在自耦变压器中,只有 $K \leq 2$ 时,上述优点才明显。

② 由于自耦变压器的短路阻抗标么值比双绕组变压器小,故电压变化率较小,但短路电流较大。

③ 由于自耦变压器原副边有电的直接联系,当高压侧过电压时会引起低压侧严重过电压。为了避免这种危险,原副边都必须装设避雷器,不要认为原副边是串联的,原边已装、副边就可省略。

④ 在一般变压器中,有载调压装置往往连接在接地的中性点上,这样调压装置的电压等级可以比在线端调压时低。而自耦变压器中性点调压侧会带来所谓的相关调压问题。因此,要求自耦变压器有载调压时,只能采用线端调压方式。

(2) 自耦变压器的应用如下。

自耦变压器在不需要原副边隔离的场合都有应用,具有体积小、耗材少、效率高的优点。常见的交流(手动旋转)调压器、家用小型交流稳压器内的变压器、三相电机自耦减压启动箱内的变压器等,都是自耦变压器的应用范例。

随着我国电气化铁路事业的高速发展,自耦变压器(AT)供电方式得到了长足的发展。由于自耦变压器供电方式非常适用于大容量负荷的供电,对通信线路的干扰又较小,因而被客运专线以及重载货运铁路广泛采用。早期我国铁路专用自耦变压器主要依靠进口,成本较高且维护不便。近年来,由中铁电气化局集团保定铁道变压器有限公司设计并生产的 OD8-M 系列铁路专用自耦变压器先后在神朔铁路、京津城际高速铁路、武广客运专线等多条重要铁路投入使用,受到相关部门的高度好评,填补了国内相关产品的空白。

任务2 变压器的运行及等效电路

任务描述: 熟悉变压器的电压变化率和外特性;

了解变压器的效率特性;

了解变压器的空载运行和负载运行;

熟悉变压器空载运行和负载运行的相关计算及等效电路分析。

任务分析: 变压器在实际的运行过程中,并不是理想状态,应当考虑各种损耗,那么在其运行过程中,都有哪些特性?在含变压器的线路中又该如何分析、计算?本任务将重点对这两个问题展开讨论。

阶段1 变压器的运行特性

变压器的运行特性,主要有外特性和效率特性。外特性反映变压器副边端电压随负载电流而变动的规律。效率特性表示变压器效率随负载而变化的关系。

1. 变压器的电压变化率和外特性

电压变化率指原绕组加额定电压,副绕组由空载到满载时电压变化的大小与副绕组空载电压的比值,即

$$\Delta U(\%) = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\% \quad (1-12)$$

式中 U_{20} ——副绕组空载电压;

U_2 ——变压器输出额定电流时的端电压。

电压变化率是表征变压器运行性能的重要指标之一,它的大小反应了供电电压的稳定性。

当变压器的电源电压和负载功率因数一定时,副绕组端电压随负载电流变化的关系称为变压器的外特性。如图 1-11 所示为变压器的外特性曲线。

由该曲线可得到以下结论。

(1) $I_2 = 0$ 时, $U_2 = U_{20}$ 。

(2) 当负载为电阻性和电感性时,随着 I_2 的增大, U_2 逐渐下降。在相同的负载电流情况下, U_2 的下降程度与功率因数 $\cos\varphi$ 有关。

(3) 当负载为电容性负载时,随着功率因数 $\cos\varphi$ 的降低,曲线上升。所以,在供电系统中,常常在电感性负载两端并联一定容量的电容器,以提高负载的功率因数 $\cos\varphi$ 。

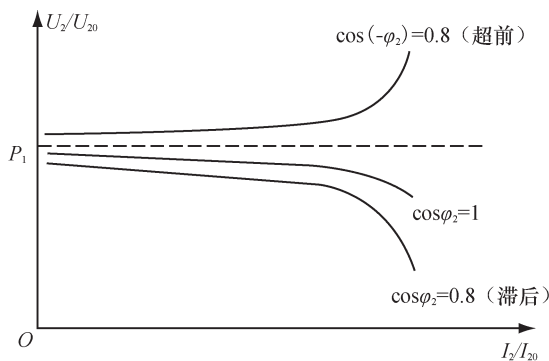


图 1-11 变压器外特性曲线

提醒

在交流电路中,电压与电流之间相位差 φ 的余弦称为功率因数,用符号 $\cos\varphi$ 表示,在数值上,功率因数是有功功率和视在功率的比值,即 $\cos\varphi = \frac{P}{S}$ 。

电网中的电力负荷如电动机、变压器、日光灯及电弧炉等,大多属于电感性负荷,这些电感性的设备在运行过程中不仅需要向电力系统吸收有功功率,还同时吸收无功功率。因此在电网中安装并联电容器等无功补偿设备后,可以提供补偿感性负荷所消耗的无功功率,减少了电网电源侧向感性负荷提供的以及由线路输送的无功功率,减少了无功功率在电网中的流动,可以降低输配电线路中变压器及母线因输送无功功率造成的电能损耗,这种措施称为功率因数补偿。

由于功率因数提高的根本原因在于无功功率的减少,因此功率因数补偿通常称之为无功补偿。

2. 变压器的损耗及效率特性

(1) 变压器的损耗:变压器在能量传递过程中,将产生铜损和铁损,它们又各自包含有基本损耗和附加损耗。

铁损耗包括基本铁损耗和附加铁损耗。基本铁损耗包括磁滞损耗和涡流损耗。附加铁损耗包括由铁芯叠片间绝缘损伤引起的局部涡流损耗和主磁通在结构件中引起的涡流损耗等。

铁损耗与外加电压大小有关,而与负载大小基本无关,所以也称为不变损耗,用 P_{Fe} 表示。

铜损耗分为基本铜损耗和附加铜损耗。基本铜损耗是指电流在原绕组和副绕组直流电阻上的损耗,用 P_{Cu1} 表示;附加损耗包括因集肤效应引起的损耗以及漏磁场在结构部件上引起的涡流损耗,用 P_{Cu2} 表示。

铜损耗的大小与负载电流平方成正比,所以也称为可变损耗。

变压器的能量传递过程如图 1-12 所示。

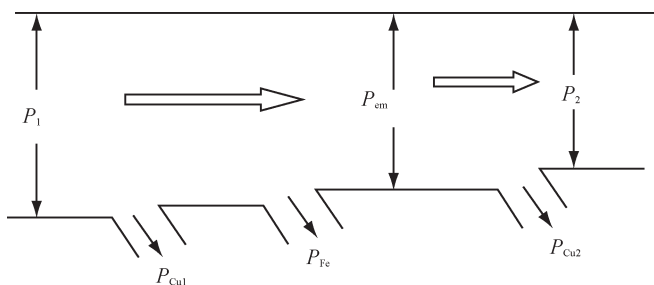


图 1-12 变压器的能量传递过程

(2)效率:指变压器的输出功率与输入功率的比值,用 η 表示,计算式为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad (1-13)$$

式中 P_1 ——变压器输入功率;

P_2 ——变压器输出功率, $P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2$ 。

效率大小反应变压器运行的经济性能的好坏,是表征变压器运行性能的重要指标之一。变压器的效率比较高,一般在 95%~98%之间,大型变压器效率可达 99%以上。

式(1-13)可推导为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} \times 100\% = \left(1 - \frac{P_{Fe} + P_{Cu}}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}}\right) \times 100\% \quad (1-14)$$

其中总损耗为

$$\sum P = P_{Fe} + P_{Cu} \quad (1-15)$$

这里引入负载系数 β 这一参数,在非额定负载时,负载系数是某一负载下的视在功率或电流对额定负载时的视在功率或电流之比,即

$$\beta = \frac{S}{S_N} = \frac{I}{I_N} \quad (1-16)$$

对式(1-13)推导得

$$\eta = \left(1 - \frac{P_{Fe} + \beta^2 P_{kN}}{\beta S_N \cos\varphi_2 + P_{Fe} + \beta^2 P_{kN}}\right) \times 100\% \quad (1-17)$$

式中 P_{kN} ——额定电流时的额定短路损耗。

在功率因数一定时,变压器的效率与负载电流之间的关系 $\eta = f(i)$ 或 $\eta = f(\beta)$ 为变压器的效率特性,其特性曲线如图 1-13 所示。

分析式(1-15)及图 1-13 可得到以下结论。

(1)空载时, $\beta = 0$, $\eta = \left(1 - \frac{P_0}{P_1}\right) \times 100\% = 0$ 。

(2)轻载时, β 数值较小, P_{Fe} 占主要地位,所以 η 较小。随着 β 的变大, η 变大。

(3)当 $P_{Fe} = \beta P_{kN}$,即变压器的铜损耗与铁损耗相等

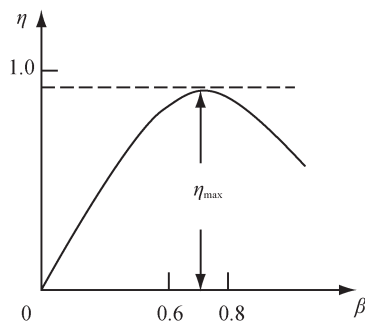


图 1-13 变压器的效率特性曲线

时, η 有最大值。

(4) 重载时, β 数值较小, P_{Cu} 占主要地位, 所以 η 较大。随着 β 的变大, η 减少。

阶段 2 变压器的空载运行及等效电路

变压器原绕组接入交流电源, 副绕组开路的运行状态, 称为变压器的空载运行。空载时, 只有原边电流, 副边电流为零。

1. 变压器的电磁量及方向

变压器空载运行时通过原绕组的电流称为空载电流。空载时的变压器磁通是由空载电流产生的磁动势所激励的, 所以空载电流又称为励磁电流。

如图 1-14 所示, 空载电流 \dot{I}_0 由原边电压 \dot{U}_1 确定, 即由高电位指向低电位。空载电流 \dot{I}_0 与主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 的方向满足右手螺旋定则, 即右手握线圈, 四指绕向为电流方向, 拇指方向为磁通方向。绕圈感应电势 \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 与主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 方向由右手螺旋定则确定, 即右手握绕组线圈, 拇指方向为主磁场方向, 四指绕向为感应电势方向。

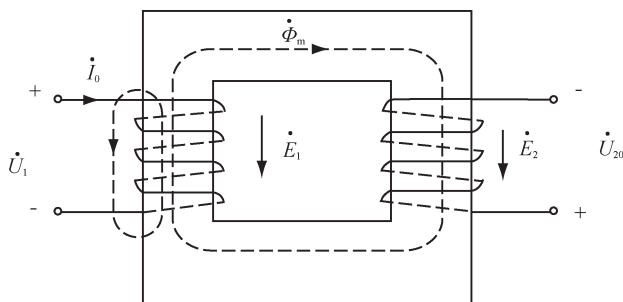


图 1-14 变压器的空载运行

2. 电磁关系与平衡方程

(1) 电磁关系主要体现在电磁感应定律上, 即原、副边绕组感应电动势与主磁通的变化率成正比。主磁通为正弦变化, 即

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (1-18)$$

则瞬时值为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega N_1 \Phi_m \cos \omega t = \sqrt{2} E_1 \cos \omega t \quad (1-19)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega N_2 \Phi_m \cos \omega t = \sqrt{2} E_2 \cos \omega t \quad (1-20)$$

其原、副边感应电动势有效值 E_1 、 E_2 为

$$E_1 = \frac{\omega N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad (1-21)$$

$$E_2 = \frac{\omega N_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_2 \Phi_m \quad (1-22)$$

变压器原、副边的电势比等于对应的匝数比, 称为变比, 也近似等于两端的电压比, 即

$$K = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}} \quad (1-23)$$

(2)空载平衡方程式:指原边回路方程和副边回路方程。考虑原边回路中的漏抗电压 $jI_0 X_1$ 和一次绕组内阻压降 $I_0 r_1$, 则原边回路方程为

$$U_1 = -E_1 + I_0(r_1 + jX_1) = -E_1 + I_0 Z_1 \quad (1-24)$$

式中 Z_1 ——一次绕组漏阻抗, $Z_1 = r_1 + jX_1$ 。

在一般变压器中,原边漏阻抗很小,约占输入电压的1%,可忽略,因此可得

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 = j4.44fN_1\dot{\Phi}_m \quad (1-25)$$

可以看出,变压器的主磁通的大小主要取决于电源电压、频率和绕组的匝数。

空载运行的变压器副边开路,所以副边输出电压等于其感应电势,即

$$\dot{U}_{20} \approx \dot{E}_2 = -j4.44fN_2\dot{\Phi}_m \quad (1-26)$$

(3)等效电路是指用简单的交流电路来表示变压器中的复杂的电磁关系。如图1-15所示为空载运行的等效电路图,可得到

$$Z = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_0} = \frac{\dot{I}_0 Z_1 - \dot{E}_1}{\dot{I}_0} = Z_1 + \frac{-\dot{E}_1}{\dot{I}_0} = Z_1 + Z_m \quad (1-27)$$

式中 Z ——等效阻抗;

Z_m ——励磁阻抗, $Z_m = r_m + jX_m$, 其中 r_m 为励磁电阻, X_m 为励磁电抗。

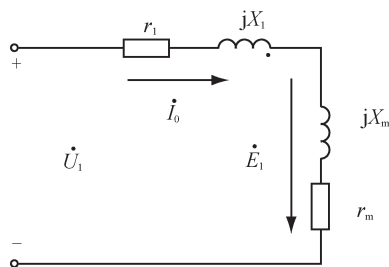


图 1-15 空载运行的等效电路图

阶段 3 变压器的负载运行及等效电路

变压器负载运行是指原绕组加额定电压,副绕组接入负载时的工作状态。此时,副边电流不为零。本阶段通过平衡方程的推导和等效电路的绘制,得出负载运行的特点。

1. 负载运行的平衡方程

(1)磁动势平衡方程:负载运行时,各物理量的参考方向如图1-16所示。负载运行时的合成磁动势总是等于空载运行时的磁动势 $\dot{I}_0 N_1$, 即 $\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1 = \text{常量}$, 称为变压器的磁势平衡公式,说明原边电流是随副边电流变化而变化的,即

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{N_2}{N_1}\dot{I}_2\right) \quad (1-28)$$

式中 $-\frac{N_2}{N_1}\dot{I}_2$ ——副边电流折算到原边的相量值。

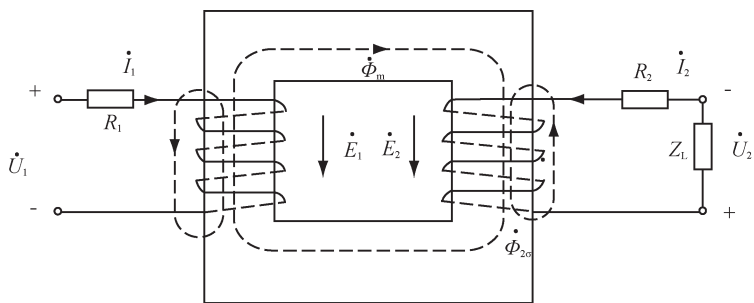


图 1-16 变压器负载运行

(2)电压平衡方程:由于原、副边回路都有电流存在,原、副边绕组都有感应电动势 \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 ,内阻 r_1 、 r_2 和漏电抗 X_1 、 X_2 ,由此列写变压器原、副边回路方程,即

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jX_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \quad (1-29)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2(r_2 + jX_2) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \quad (1-30)$$

2. 负载运行等效折算

负载运行等效折算应遵守能量守恒原则,即保持折算前后的功率关系不变,磁势不变,电路损耗不变。折算方法如下。

(1)电流折算:保持折算前后磁势不变,即

$$\dot{I}_2' = \frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 = \frac{1}{K} \dot{I}_2 \quad (1-31)$$

(2)电压、电势折算:保持折算前后的功率不变,即

$$\dot{U}_2' = \frac{N_1}{N_2} \dot{U}_2 = \frac{1}{K} \dot{U}_2 \quad (1-32)$$

$$\dot{E}_2' = 4.44fN_1 \dot{\Phi}_m = 4.44fN_1 \frac{N_2}{N_1} \dot{\Phi}_m = K \dot{E}_2 \quad (1-33)$$

(3)阻抗折算:保持折算前后的损耗不变。即

$$I_2'^2 r_2' = I_2^2 r_2 \quad I_2'^2 X_2' = I_2^2 X_2 \quad (1-34)$$

综上所述,可以得到折算后变压器的 6 个基本方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{U}_2' &= \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2' \\ \dot{E}_1 &= \dot{E}_2 \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2 &= \dot{I}_0 \\ -\dot{E}_1 &= \dot{I}_0 Z_m \\ \dot{U}_2' &= \dot{I}_2' Z_2' \end{aligned} \right\} \quad (1-35)$$

3. 负载运行等效电路图

根据折算后的基本方程式,可得到变压器 T 形等效电路与简化等效电路,如图 1-17 所示。

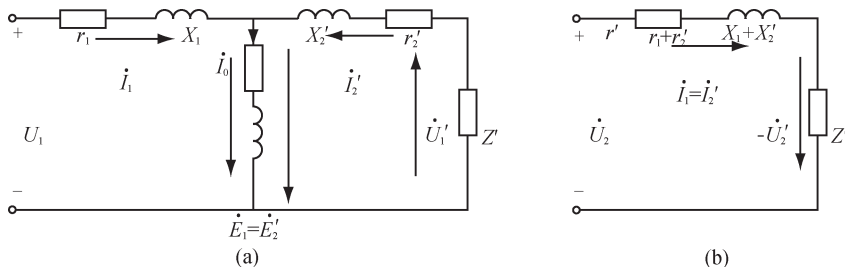


图 1-17 T 形等效电路及简化等效图

任务 3 变压器参数测试

任务描述: 掌握变压器的空载试验;

掌握变压器的短路试验;

了解变压器同极性端的判别方法。

任务分析: 在用变压器等效电路对其运行性能进行分析时,必须要知道变压器的结构参数。可以用试验方法测定变压器的参数,以便进行定量分析。

阶段 1 变压器的空载试验

变压器空载试验的目的是确定变压器的变比 K 、铁损 P_{Fe} 和励磁阻抗 Z_m 。

空载试验的电路图如图 1-18 所示。一般地,为便于测量仪表的选用并确保试验安全,空载试验在低压边进行。将高压边开路,在低压边加电压为额定值 U_{20} 、频率为额定值的正弦交变电源,测出开路电压 U_{10} 、空载电流 I_{20} 、空载损耗 P_0 。

对单相变压器,有

$$K = \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad (1-36)$$

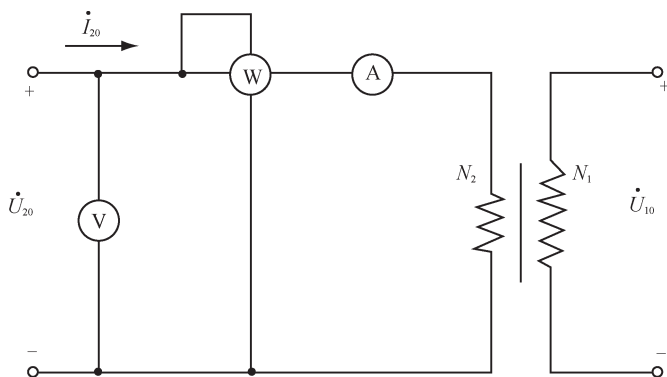


图 1-18 单相变压器的空载试验电路图

根据变压器空载运行时的等效电路,以及 $Z_m' \gg Z_2, r_m' \gg r_2$, 有

$$Z_m' = \frac{U_{20}}{I_{20}} - Z_2 \approx \frac{U_{20}}{I_{20}} \quad (1-37)$$

$$r_m' = \frac{P_0}{I_{20}^2} - r_2 \approx \frac{P_0}{I_{20}^2} \quad (1-38)$$

励磁感抗 X_m' 可由 Z_m', r_m' 计算得到, 即

$$X_m' = k^2 X_m \quad (1-39)$$

如果用向高压边折算的等效电路进行计算, 则相应的励磁参数为

$$Z = K^2 Z_m'$$

$$r_m = K^2 r_m'$$

$$X_m' = \sqrt{Z_m'^2 - r_m'^2}$$

根据变压器空载运行时的功率关系, 考虑到 I_{20} 很小, 有

$$P_{Fe} = P_0 - P_{Cu} \approx P_0 - I_{20}^2 r_2 \approx P_0 \quad (1-40)$$

提醒

对于三相变压器的空载试验, 测出的电压、电流均为线值, 测出的功率为三相功率值, 计算时应进行相应的换算, 即将电压、电流换算为相值, 将功率换算为单相值。

阶段 2 变压器的短路试验

变压器短路试验的目的是确定变压器的铜损 P_{Cu} 、短路阻抗 Z_s 。短路试验的电路图如图 1-19 所示。短路试验通常在高压边进行, 将低压边的出线端短接, 高压边通过自耦变压器接正弦交流电源, 缓慢升压的同时观察电流表的指示值, 至 $I_1 = I_{1N}$ 时停止加压, 测出短路电压 U_{1s} 、短路电流 I_{1s} 、短路损耗 P_s 。

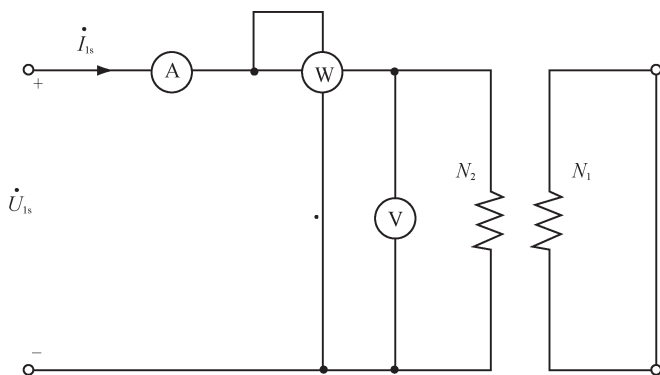


图 1-19 单相变压器的短路实验电路图

从试验看出,短路电压 U_{1s} 相对于额定电压 U_{1N} 来说是很小的,因而铁芯中的磁通 Φ_m 也很小,即此时的铁损耗 P_{Fe} 很小。根据功率关系,有 $P_{CuN} = P_s - P_{Fe} \approx P_s$, 式中 $P_{CuN} = P_{Cu1} + P_{Cu2}$ 为变压器原、副绕组铜损之和;由于此时的铜损是在原边电流等于额定值时测出的,所以 P_{CuN} 就是变压器额定运行时的铜损。

由于短路试验时, $Z_L' = 0$, 又有 $Z_m \gg Z_2'$, 因此可以用简化等效电路来进行计算,有

$$\begin{aligned} Z_s &= \frac{U_{1s}}{I_{1s}} \\ r_s &= \frac{P_s}{I_{1s}^2} = \frac{P_s}{I_{1N}^2} \\ X_s &= \sqrt{Z_s^2 - r_s^2} \end{aligned}$$

电阻值是随温度变化而变化的,应对短路试验时测出的短路电阻 r_s 及与 r_s 值有关的短路损耗 P_s 进行换算,换算成国家标准规定温度(75℃)下的值。对铜绕组变压器,有

$$\begin{aligned} r_{s75^\circ\text{C}} &= r_s \frac{235 + 75}{235 + t} \\ Z_{s75^\circ\text{C}} &= \sqrt{r_{s75^\circ\text{C}}^2 + x_s^2} \\ P_{s75^\circ\text{C}} &= I_{1N}^2 \cdot r_{s75^\circ\text{C}} \end{aligned} \quad (1-41)$$

式中 t ——变压器短路试验时的室温。

短路试验中加在高压边的电压 U_{1s} 称为短路电压, $U_{1s} = I_{1N} Z_{s75^\circ\text{C}}$, 常用对 U_{1N} 的百分值 $u_s(\%)$ 来表示, $u_s(\%)$ 称为短路电压百分值,其计算式为

$$\begin{aligned} u_s(\%) &= \frac{U_{1s}}{U_{1N}} \times 100\% = \frac{I_{1s} Z_s}{U_{1N}} \times 100\% \\ z_s(\%) &= \frac{Z_s}{\frac{U_{1N}}{I_{1N}}} \times 100\% = \frac{I_{1N} Z_s}{U_{1N}} \times 100\% = \frac{I_{1s} Z_s}{U_{1N}} \times 100\% \end{aligned} \quad (1-42)$$

式中 $z_s(\%)$ ——短路阻抗百分值。

可见, $u_s(\%) = z_s(\%)$, 短路电压百分值实际上反映了变压器漏阻抗的大小。变压器是负载的电源,其漏阻抗就是电源的内阻抗。 $u_s(\%)$ 或 $z_s(\%)$ 越小,变压器的输出电压随负载变化而变化的程度就越小。 $u_s(\%)$ 是变压器的一个很重要的参数。

阶段 3 变压器同极性端的判别

1. 变压器同极性端的定义及意义

定义:当电流分别流入两个绕组时,产生的磁通方向相同,或者说,当磁通发生变化时,两个绕组中产生的感应电动势方向相同,则将两绕组的流入电流端称为同极性端或同名端,用符号“·”标出。

意义:在多个变压器串、并联过程中,要注意同极性的判断。当变压器的两个原绕组并联时,只能将同极性端连在一起,否则将会有烧毁绕组的危险,如图 1-20 所示;当副绕组进

行串、并联时也必须根据同极性端正确相连,否则串联时输出电压为零,并联时绕组有可能烧坏。

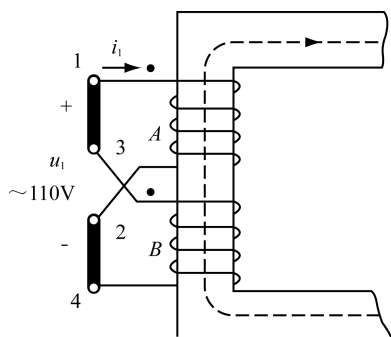


图 1-20 两个一次绕组并联图

2. 变压器同极性端的判断方法

根据变压器的绕组缠制过程主要有两种方法能简单地判断出变压器的同极性。

(1) 观察法。即根据绕组的绕向判断同极性端,取绕组上端为首端,下端为尾端。

① 绕向相同时:首端和首端为同极性端,尾端和尾端为同极性端,如图 1-21(a)所示。

② 绕向相反时:首端和尾端为同极性端,尾端和首端为同极性端,如图 1-21(b)所示。

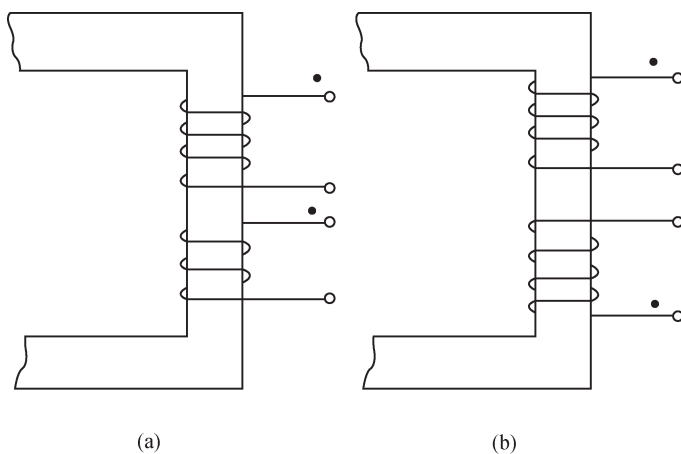


图 1-21 观察法判断变压器同极性端

(2) 实验法。对于看不出绕线方向的变压器,可使用实验法判断同极性端。

① 直流法:按图 1-22 电路连接, A 和 B 为两待测绕组。开关 S 闭合瞬间,绕组 A 的将产生感生电动势,从而引起绕组 B 也产生感生电动势,根据电流表指针方向可判断其方向,再根据定义判断同极性端。

在图示电路中,开关闭合瞬间若电流表正向偏转,1 和 3 为同极性端;反向偏转,1 和 4 为同极性端。

②交流法:按图 1-23 电路连接, A 和 B 为两待测绕组。根据楞次定律可判断绕组中产生的感生电动势的方向,对于交流信号来说,若瞬时方向相同,叠加为求和,若瞬时极性相反,叠加为求差。

如果 $U_{13} = U_{12} + U_{34}$, 则 1、4 为同极性端; 如果 $U_{13} = U_{12} - U_{34}$, 则 1、3 为同极性端。

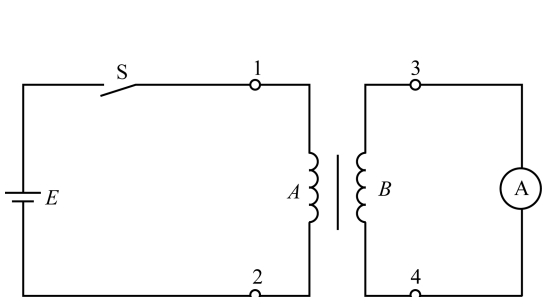


图 1-22 直流法测同极性端电路图

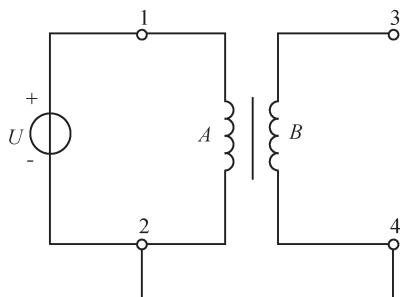


图 1-23 交流法测同极性端电路图

实践活动

根据上述几种方法判断两个变压器绕组的同极性端,说明判断过程,并比较这几种方法的优缺点及适用场合。

本章小结

1. 变压器的结构

变压器主要由铁芯和绕在铁芯上的线圈两部分组成,有的变压器还包括线架、电气胶带等各种辅助元件。

2. 变压器的工作原理及基本特性

变压器利用电磁感应原理传输电能或电信号,具有变压、变流和变阻抗等基本特性。

3. 变压器的运行特性

(1)外特性:指变压器的电源电压和负载功率系数一定时,副绕组电压随负载电流变化的关系。

(2)效率特性:指变压器的功率因数一定时,变压器效率与负载电流之间的关系。

4. 变压器的空载运行

变压器原绕组接入交流电源,副绕组开路的运行状态,称为变压器的空载运行。应掌握空载运行时的电磁关系、平衡方程式与等效电路图。

5. 变压器的负载运行

变压器原绕组加额定电压,副绕组接入负载时的工作状态,称为变压器的负载运行。应掌握负载运行时的平衡方程与等效折算。

6. 变压器参数的测定

通过空载试验与短路试验,可确定变压器的变比 K 、铁损 P_{Fe} 、励磁阻抗 Z_m 、铜损 P_{Cu} 与短路阻抗 Z_s 等参数。

7. 变压器同极性端的判定

变压器同极性端的判定方法主要有观察法和实验法两种。

本章习题

1-1 如果变压器原绕组接在直流电源上,副绕组会有稳定直流电压吗?为什么?

1-2 简述变压器铁芯的作用和结构,并说明采用这种结构的原因。

1-3 变压器有哪些主要部件?它们的主要作用是什么?

1-4 变压器空载运行时,是否要从电网取得功率?这些功率属于什么性质?起什么作用?为什么小负荷用户使用大容量变压器无论对电网和用户均不利?

1-5 变压器的空载电流的性质和作用如何?它与哪些因素有关?

1-6 有一台 D-50/10 单相变压器, $S_N = 50 \text{ kV} \cdot \text{A}$, $\frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{10\ 500 \text{ V}}{230 \text{ V}}$, 求变压器原、副线圈的额定电流。

1-7 有一台单相变压器,额定容量为 $5 \text{ kV} \cdot \text{A}$,高、低压侧均有两个线圈组成,原绕组每个线圈额定电压均为 $U_{1N} = 1\ 100 \text{ V}$,副绕组的线圈额定电压均为 $U_{2N} = 110 \text{ V}$,用这台变压器进行不同的连接,可得到几种不同的变化?每种连接原、副边的额定电流为多少?

1-8 一台单相变压器, $S_N = 20\ 000 \text{ kV} \cdot \text{A}$, $\frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{220/\sqrt{3} \text{ kV}}{11 \text{ kV}}$, $f_N = 50 \text{ Hz}$,线圈为铜线。空载试验(低压侧)测得: $U_0 = 11 \text{ kV}$, $I_0 = 45.5 \text{ A}$, $P_0 = 47 \text{ W}$;短路试验(高压侧)测得: $U_s = 9.24 \text{ kV}$, $I_s = 157.5 \text{ A}$, $P_s = 129 \text{ W}$,求(试验时温度为 150°C):

(1)折算到高压侧的 T 形等效电路时各参数的欧姆值(假定 $r_1 = r_2 = \frac{r_K}{2}$, $X_1 = X_2 = \frac{X_k}{2}$);

(2)当 $\cos\varphi_2 = 0.8$ ($\varphi_2 > 0$) 时的最大效率。