

铁路职业教育铁道部规划教材

电机与电气控制技术

DIANJIYUDIANQIKONGZHISHU

TIELU ZHIYE JIAOYU TIEDAOBU GUIHUA JIAOCAI

赵莉 主编

中专

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



铁路职业教育铁道部规划教材

· (中专)

电机与电气控制技术

赵 莉 主 编
周 立 主 审

中国铁道出版社

2008年·北京

内 容 简 介

本书为铁路职业教育铁道部规划教材,是根据铁路职业教育电气化铁道供电专业教学大纲“电机与电气控制技术”课程教学计划,并结合学校实际教学情况以及现场工作的需要编写的。本书内容包括变压器、直流电机、三相异步电动机、常用低压电器、三相异步电动机的继电器-接触器控制线路、常用机械的电气控制线路、可编程控制器(PLC)基础知识等内容,文后附有15个实验内容。

本书可作为电气化铁道供电专业中专教材,也可供现场工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机与电气控制技术/赵莉主编. —北京:中国铁道出版社,2008.1

铁路职业教育铁道部规划教材. 中专

ISBN 978-7-113-08579-7

I. 电… II. 赵… III. ①电机学—专业学—教材②电气控制—专业学校—教材 IV. TM3 TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第005954号

书 名:电机与电气控制技术

作 者:赵 莉 主编

责任编辑:阙济存 武亚雯

电话:010-51873133

电子信箱:td51873133@163.com

封面设计:陈东山

责任校对:孙 玫

责任印制:金洪泽

出版发行:中国铁道出版社(北京市宣武区右安门西街8号,100054)

印 刷:河北新华印刷二厂

版 次:2008年1月第1版 2008年1月第1次印刷

开 本:787mm×1092mm 1/16 印张:13.75 字数:343千

书 号:ISBN 978-7-113-08579-7/TP·2692

定 价:28.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话:市电(010)51873170 路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)63549504 路电(021)73187

前 言

本书为铁路职业教育铁道部规划教材，是根据铁路中专教育电气化铁道供电专业教学计划“电机与电气控制技术”课程教学大纲要求。由全国铁路高职和中专教学指导委员会2007年组织编写的中专教材。这套教材在编写时尽量简化理论分析，注重实践环节，文字叙述力求简明扼要、深入浅出，既可作为中等职业技术教育电气类、机电一体化（电气类）专业的教材，供三年制和二年制中等职业学校的学生使用，也可作为职业高中、电气技术工人培训的教材使用。

本书由内江铁路机械学校赵莉主编，内江铁路机械学校谢刚、陈风铃、付永华，武汉铁路司机学校陈敏，南京铁道职业技术学院苏州校区宋瑾参编。其中，谢刚编写第一章；陈风铃编写第二章；陈敏编写第三章；宋瑾编写第四章；赵莉编写第五章和第七章；第六章由赵莉、谢刚共同编写，实验部分由付永华、赵莉共同编写。本书由北京铁路电气化学校周立主审。

本书在编写过程中得到了内江铁路机械学校、武汉铁路司机学校、南京铁道职业技术学院、北京铁路电气化技术学校等单位的大力支持，还得到了南京铁道职业技术学院苏州校区蒋毅、内江铁路机械学校曾玲、杨光等同志的帮助，在此一并表示真挚的谢意。

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者
2007年11月

目 录

第一章 变 压 器	1
第一节 变压器的结构、铭牌及分类	1
第二节 变压器的工作原理.....	4
第三节 变压器的运行特性.....	5
第四节 变压器的参数测定	10
第五节 三相变压器	12
第六节 变压器的安全检查及常见故障处理	18
复习思考题	20
第二章 直流电机	22
第一节 直流电机的结构、铭牌.....	22
第二节 直流电机的工作原理	27
第三节 直流电动机的转矩及功率	28
第四节 直流电动机的特性	31
第五节 直流电动机的启动、调速、反转及制动	33
第六节 直流电机的维护保养与故障查排	38
复习思考题	40
第三章 三相异步电动机	42
第一节 三相异步电动机的分类、结构和铭牌.....	42
第二节 三相异步电动机的工作原理与运行特性	46
第三节 三相异步电动机的启动、调速、反转及制动	51
第四节 三相异步电动机的选用	56
第五节 三相异步电动机的维护保养与故障查排	59
第六节 单相异步电动机(选学)	62
复习思考题	65
第四章 常用低压电器	67
第一节 低压开关	67
第二节 熔断器	72
第三节 主令电器	74
第四节 接触器	79
第五节 继电器	83
第六节 低压电器的常见故障与维修	91

· 复习思考题	97
第五章 三相异步电动机的继电器-接触器控制线路	98
第一节 电气控制线路图	99
第二节 三相异步电动机的直接启动控制线路	104
第三节 电气控制线路的保护环节	111
第四节 三相异步电动机降压启动控制线路	112
第五节 三相异步电动机的制动控制线路	122
第六节 三相异步电动机的调速控制线路	131
第七节 几种典型控制线路	133
复习思考题	137
第六章 几种常用机械的电气控制线路	140
第一节 皮带运输机电气控制线路	140
第二节 普通车床电气控制线路	142
第三节 M7120 平面磨床电气控制线路	146
第四节 XA6240A 型万能铣床电气控制线路	149
第五节 Z3080 型摇臂钻床电气控制线路	152
复习思考题	155
第七章 可编程控制器(PLC)基础知识	156
第一节 概 述	156
第二节 PLC 的编程语言简介	160
第三节 梯 形 图	161
第四节 交流电梯的 PLC 控制电路	170
复习思考题	178
附录 电机与电气控制技术实验	179
实验一 单相变压器的空载试验和短路试验	179
实验二 变压器的极性实验	181
实验三 变压器的连接组别	183
实验四 直流并励电动机的启动、调速、反转实验	185
实验五 三相异步电动机的空载与短路实验	187
实验六 三相异步电动机的负载实验	190
实验七 三相异步电动机的启动、反转、调速与制动	191
实验八 常用低压电器认识实验	193
实验九 三相异步电动机点动与自锁控制电路	199
实验十 三相异步电动机正反转控制线路	203
实验十一 位置控制及自动往返控制线路	206
实验十二 三相异步电动机 Y- Δ 降压启动控制线路	207
实验十三 三相异步电动机反接制动控制线路	210
实验十四 顺序控制线路	211
实验十五 两地控制线路	212
参考文献	214

第一章

变 压 器

变压器是一种交流电能的变换装置，通过电磁感应原理，把一种电压等级的交流电能变换为另一种电压等级的交流电能，以满足电能的传输、分配和使用。

变压器有许多种类，在国民经济各部门中得到广泛应用，本章主要讲述在电力系统中普遍使用的电力变压器，其基本原理也适用于其他变压器。

第一节 变压器的结构、铭牌及分类

【学习要求】

1. 掌握变压器的结构及各部分的作用。
2. 掌握变压器型号、额定值的意义。
3. 了解变压器的分类。

一、变压器结构

变压器结构随科学技术不断发展而不断演变，图 1-1 是目前最普遍使用的电力变压器外形图。它的本体是铁芯及套在铁芯上的绕组（或称线圈），一般称这个本体为器身，同时将器身放在盛满变压器油的油箱内。所以，变压器的主要结构是铁芯、绕组、油箱及其他零部件（见图 1-1），分别介绍如下。

1. 铁芯

铁芯是变压器磁路的本体，为了减少铁芯内的涡流及磁滞损耗，通常采用含硅量为 5%、厚度为 0.35 mm 或 0.5 mm、两平面涂绝缘漆或氧化处理的硅钢片叠装而成。其牌号一般有 D31-0.35、D42-0.35、D320-0.35 等，其中字母 D 表示电工钢，D 后面的第一位数字表示含硅量，数字愈大，表示含硅量愈高；第二位数字表示比耗的高低，数字

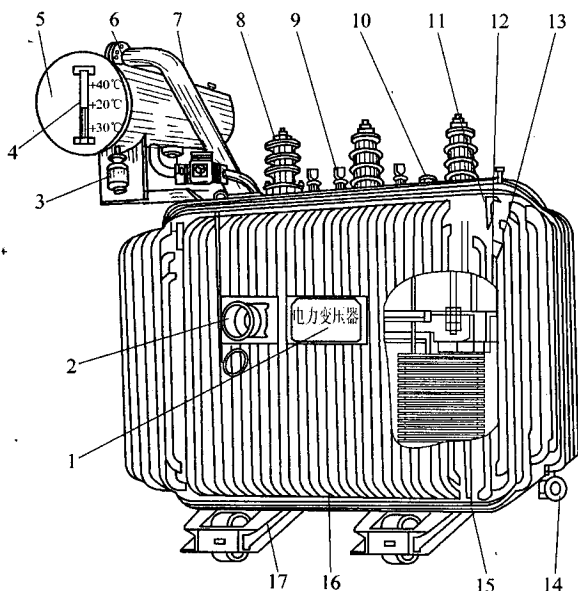


图 1-1 油浸式电力变压器

- 1—铭牌；2—信号式温度计；3—吸湿器；4—油表；
5—储油柜；6—安全气道；7—气体继电器；8—高压套管；
9—低压套管；10—分接开关；11—油箱；12—变压器油；
13—铁芯；14—放油阀门；15—绕组；16—接地板；17—小车

愈大，比耗愈低；第三位数字表示冷轧硅钢片（如果没有第三位数字，表示热轧硅钢片），它们具有较优导磁性能和较低比耗；对有特殊要求变压器，可采用坡莫合金（如 1J79）、铁氧体等。

铁芯的叠装方式有叠装式和对装式两种，图 1-2 为单相变压器铁芯对装形式，图 1-3、1-4 为单相变压器铁芯叠装形式，图 1-5 为三相变压器铁芯叠装形式。

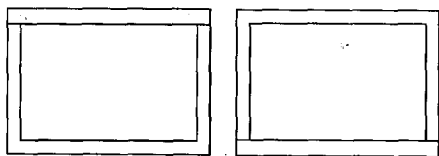


图 1-2 单相对装式

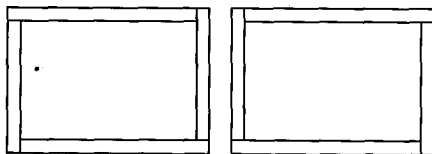


图 1-3 单相叠装式

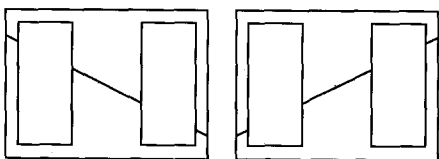


图 1-4 单相斜接缝叠装式

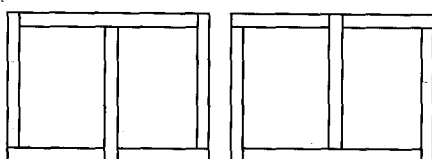


图 1-5 三相直接缝叠装式

2. 绕组

绕组是变压器传递交流电能的电路部分，常用包有绝缘材料的铜线或铝线绕制而成。

为了使绕组具有良好的机械性能，其外形一般为圆筒形状，高压绕组的匝数多、导线细，低压绕组的匝数少、导线粗。

高、低压绕组同心地套装在铁芯上，称为同心式绕组，电力变压器大多采用这种结构。套装时低压绕组靠近铁芯柱，高压绕组再套在低压绕组外面，高、低压绕组之间及降压绕组与铁芯柱之间要可靠地绝缘。

为了适应不同容量与电压等级的要求，变压器绕组有多种形式，如圆筒式、螺旋式、连续式、纠结式等。

3. 油箱及变压器油

油浸式变压器的器身，放在充满变压器油的油箱中。油箱用钢板焊成，为了增强冷却效果，油箱壁上焊有散热管或装设散热器。

小容量变压器，采用揭开箱盖起吊器身的普通油箱；大容量变压器器身的重量大，起吊困难，多采用“钟罩”式油箱，即把上节油箱吊起，器身及下节油箱固定不动。

变压器油为矿物油，由石油分馏而得。其作用为：一是盛油及装器身之用；二是作为散热用，即通过变压器油将绕组和铁芯中的热量传递到油箱壁而散到周围介质中去。

4. 其他零部件

(1) 储油柜（油枕）。储油柜装在油箱上部，用连通管与油箱接通，储油柜中储油量一般为油箱总油量的 8%~10%。

储油柜能容纳油箱中因温度升高而膨胀的变压器油，并限制变压器油与空气的接触面积，减少油受潮和氧化的程度。此外，通过储油柜注入变压器油，还可防止气泡进入变压器内。

储油柜内装有吸湿器，使储油柜上部的空气通过吸湿器与外界空气相通。吸湿器中装有硅胶等吸附剂，用以吸附通入储油柜内空气中的杂质和水分。

(2) 安全气道 (防爆管)。它是一根钢质圆管, 顶端出口装有一块玻璃或酚醛薄膜片, 下部与油箱连通。当变压器内部发生故障时, 油箱内压力升高, 油和气体冲破玻璃或酚醛薄膜片向外喷出, 从而避免油箱受高压破裂。

(3) 气体继电器。它安装在储油柜与油箱之间的连接管道中, 是变压器内部故障的保护装置。

(4) 套管。套管由瓷质的绝缘套筒和导电杆组成。穿过油箱盖后, 其导电杆下端与绕组引线相连接, 上端与线路连接。

(5) 调压装置。为调节变压器的输出电压, 可以改变高压绕组匝数在小范围内进行调压。一般在高压绕组某个部位 (如中性点、中部或端部) 引出若干个抽头, 并把这些抽头连接在可切换的分接开关上。在停电状态下方可切换的分接开关称无励磁调压开关, 在不断开负载的情况下可切换的分接开关称有载调压开关。

二、变压器的分类

为了适应国民经济各部门的不同使用目的和工作要求, 变压器有多种类型, 而各种类型变压器在结构和性能上差异也很大。一般按照变压器的用途进行分类, 也有按照结构特点、相数、冷却方式等进行分类。

按用途不同, 变压器分为电力变压器、特种变压器、仪用互感器等。

电力变压器, 又分为降压变压器、升压变压器和配电变压器等, 它是电力系统的重要组成部分。如果变压器每相有两个绕组, 称之为双绕组变压器, 它有两个电压等级, 是目前应用最广的一种型式; 如果每相有三个或多个绕组, 称之为三绕组或多绕组电力变压器, 它有三个或多个电压等级, 用来连接三个或多个电压等级的电网。

特种变压器包括电炉变压器、整流变压器、电焊变压器等, 它们是专供特殊电源用的。此外, 还有测量用变压器——仪用互感器 (电压互感器和电流互感器)、试验用高压变压器、自动控制系统中的控制变压器、用来传递信号或阻抗匹配的电子仪器用变压器等。

按变压器的冷却方式和冷却介质不同, 可分为油浸式变压器 (又分为油浸自冷式、油浸风冷式和油浸水冷式等)、干式变压器 (又分为干式空气自冷式、干式浇注绝缘式)、充气式变压器等。

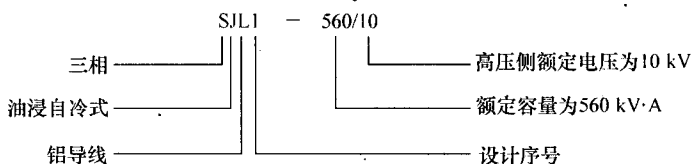
当然, 变压器类型也可按相数分, 有单相、三相、多相变压器; 按绕组与铁芯间相对位置分, 有壳式、心式和卷铁芯变压器; 按容量大小分, 有小型变压器、中型变压器、大型变压器及特大型变压器。

三、铭 牌

每台变压器在醒目位置上都装有一个铭牌, 上面标明了变压器的型号和额定值。所谓额定值, 是指制造厂按照国家标准, 对变压器正常使用时的有关参数所作的限额规定。在额定值下运行, 可保证变压器长期可靠地工作, 并具有优良的性能。

1. 型号

变压器型号由字母和数字两部分组成, 字母代表变压器的基本结构特点, 数字分别代表额定容量和高压侧的额定电压, 例如:



2. 额定值

(1) 额定容量 S_N 。指变压器额定运行状态下输出的视在功率，单位为 $\text{kV} \cdot \text{A}$ 或 $\text{MV} \cdot \text{A}$ 。对于双绕组变压器，原、副边绕组的容量相等，即是变压器的额定容量。

(2) 额定电压 U_{1N} ， U_{2N} 。 U_{1N} 为原边额定电压。 U_{2N} 为副边额定电压，是指当原边接入额定电压而副边空载（开路）时的电压，单位为 kV 。三相变压器额定电压指线电压。

(3) 额定电流 I_{1N} ， I_{2N} 。 I_{1N} 和 I_{2N} 是分别根据额定容量、额定电压计算出来的原、副边电流，单位为 A 。对于三相变压器，额定电流指线电流。

原、副边电流可用下式计算。

单相变压器：

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

三相变压器：

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

(4) 额定频率。我国规定电力系统的额定频率为 50 Hz 。

除上述额定值外，铭牌上还标明了温升、连接组、阻抗电压等。

例 1-1 一台 SJL1-180/10 型电力变压器， $U_{1N}/U_{2N} = 10 \text{ kV}/0.4 \text{ kV}$ 。求一、二次额定电流。

解：根据题意， $S_N = 180 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ，则

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

$$I_{2N} = S_N / \sqrt{3}U_{2N} = 180 \times 10^3 / (\sqrt{3} \times 0.4 \times 10^3) \text{ A} = 259.8 \text{ A}$$

小 结

变压器的主要结构是铁芯、绕组、油箱及其他零部件。铁芯是变压器磁路的本体，是磁路部分；绕组是变压器传递交流电能的电路部分。

变压器按用途不同分为电力变压器、特种变压器、仪用互感器等。按变压器的冷却方式和冷却介质不同，可分为油浸式变压器、干式变压器、充气式变压器等。

变压器的额定值，包括额定功率、额定电压、额定电流及额定频率等。其电流、电压均指的是线值。应尽量保证变压器在额定状态下运行。

第二节 变压器的工作原理

【学习要求】

掌握变压器的工作原理。

从变压器结构可知，它的主体是铁芯及套在铁芯上的绕组。如果把接交流电源的绕组称为一次绕组（或原边绕组），用字母 N_1 表示其匝数，则把接负载（如灯泡）的绕组称为二次绕组（或副边绕组），用字母 N_2 表示其匝数

（见图 1-6）。当一次绕组接通交流电源时，接二次绕组的灯泡便发光，是什么原因呢？二次绕组并没有直接接在电源上，灯泡发光所消耗的电能从哪里来呢？这要用电磁感应的原理来解释：处在变化磁场中的导体，产生感应电动势，当外电路通过负载（灯泡）闭合时，便有电流通过，使灯泡发光。具体来说，是当一次绕组接上交流电源时，在一次绕组中就有交流电流通过，该电流将在铁芯中产生交变磁通 Φ ，由于一、二次绕组套在同一铁芯上（实际上两绕组套在同一铁芯柱上，以增大耦合作用，为简明起见，常把两绕组分别画在铁芯两边），铁芯中的磁通同时交链一、二次绕组。于是，在这两绕组中都产生感应电动势（ e_1 、 e_2 ）。对负载来说，二次绕组的电动势相当于电势源，在与二次绕组连接的回路中，便有电流通过灯泡，使灯泡发光。

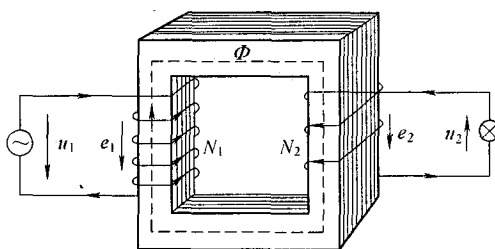


图 1-6 变压器原理图

由此可见，当变压器一次绕组通以交流电时，在其铁芯中产生交变磁通，根据电磁感应原理，一次绕组将从交流电源处吸收电能，传递到二次绕组，供给负载。这就是变压器的基本工作原理。

显然，铁芯中的磁通是传递能量的桥梁，也就是说，变压器只传递交流电能，而不能产生电能，它只能改变交流电压或电流，而几乎不改变它们的乘积。

为了分析方便，把变压器一次绕组称为一次侧，把接负载的一侧称为二次侧。它们的物理量及其参数，分别附有下列下标“1”和“2”以示区别。下节将对空载运行和负载运行进行详细分析。

小 结

变压器的工作原理是基于电磁感应定律，交变磁场是工作的媒介。为了减少铁耗和提高磁路的磁导率，采用高导磁的硅钢片叠成闭合铁芯；为了增加一、二次侧电磁耦合，将一、二次绕组套在同一铁芯柱上。

第三节 变压器的运行特性

【学习要求】

1. 掌握变压器变比的计算。
2. 掌握变压器空载、负载时的功率关系。
3. 掌握变压器电压变化率、效率的意义。
4. 掌握变压器外特性的意义。
5. 了解变压器空载、负载时的特点及等效电路。

一、变压器的空载运行

变压器一次绕组接在额定电压和额定频率的电网上，而二次侧开路时的运行状态，称为空载运行，如图 1-7 所示。

1. 空载运行时的磁场

单相变压器在空载运行时，在一次绕组中通过的电流，称为空载电流，用 \dot{I}_0 表示。空载电流在一次绕组中建立空载磁动势 $\dot{F}_0 = N_1 \times \dot{I}_0$ 及相应的磁通。其方向按右手螺旋定则确定。由于绝大部分磁通 $\dot{\Phi}_m$ 沿铁芯闭合，同时与一、二次绕组交链，称为主磁通；另一小部分磁通 $\dot{\Phi}_{1\sigma}$ 主要沿非铁磁性材料（变压器油或空气等）闭合，而且仅与一次绕组交链，称为一次绕组漏磁通。变压器空载时主磁通占总磁通的绝大部分，而漏磁通约为 0.2%。主磁通起传递能量的媒介作用，漏磁通仅在一次绕组内产生感应电动势，只起电压降的作用，不能传递能量。

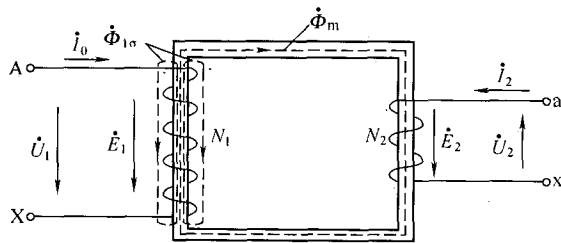


图 1-7 单相变压器空载运行示意图

2. 空载运行时的电动势和变比

(1) 电动势。根据电磁感应定律，可推出变压器一、二次侧的感应电动势

$$\dot{E}_1 = -j4.44fN_1\dot{\Phi}_m \quad E_1 = 4.44fN_1\Phi_m \quad (1-3)$$

$$\dot{E}_2 = -j4.44fN_2\dot{\Phi}_m \quad E_2 = 4.44fN_2\Phi_m \quad (1-4)$$

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j4.44fN_1\dot{\Phi}_{1\sigma} \quad E_{1\sigma} = 4.44fN_1\Phi_{1\sigma} \quad (1-5)$$

一、二次绕组感应电动势有效值 E_1 和 E_2 正比于主磁通最大值 Φ_m ，电网频率 f 及匝数 N_1 （或 N_2 ），其相位滞后于 $\dot{\Phi}_m 90^\circ$ 。

如果不计漏电动势的影响，从图 1-7 可知， $\dot{U}_1 \approx \dot{E}_1$ ，也就是说， E_1 与 U_1 几乎大小相等，而方向相反，故把 E_1 称为反电势。

(2) 变比。一、二次绕组感应电动势之比值，称为变压器的变比（用字母 k 表示），它等于两绕组匝数之比，即

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-6)$$

当变压器空载运行时，由于一次侧 $\dot{U}_1 \approx \dot{E}_1$ ，二次侧 $\dot{U}_{20} \approx \dot{E}_2$ ，故可近似地认为 $k = U_1/U_2$ 。

3. 电动势平衡方程式及等效电路

根据图 1-7 各量所规定的方向，按基尔霍夫回路定律，可列出单相变压器空载时的电动势平衡方程式：

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 r_1 \quad \dot{U}_{20} = \dot{E}_2 \quad (1-7)$$

经过换算得

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 = \dot{I}_0 Z_m + \dot{I}_0 Z_1 \quad (1-8)$$

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2 \quad (1-9)$$

式中 $Z_1 = r_1 + jX_1$ ——一次绕组漏阻抗；

r_1 ——一次绕组自身电阻；

X_1 ——一次绕组漏电抗，是个常数，表征漏磁通对电路的电磁效应；

$Z_m = r_m + jX_m$ ——励磁阻抗，不是常数，受主磁路饱和变化的影响；

r_m ——励磁电阻，对应于铁耗电阻；

X_m ——励磁电抗，表征铁芯磁化性能的一个重要参数。

根据空载电动势平衡方程式，便可画出对应的等效电路（见图 1-8）。

4. 空载时的功率

单相变压器空载时，从电源输入的功率仅与变压器的内部损耗相平衡。空载时输入变压器的功率用 p_0 表示，绕组电阻 r_1 上铜耗用 p_{Cu10} 表示，铁耗用 p_{Fe} 表示，则

$$P_0 = p_{Cu10} + p_{Fe} = I_0^2 r_1 + I_0^2 r_m \quad (1-10)$$

而

$$P_0 = U_1 I_0 \cos\varphi \quad (1-11)$$

其中， φ 为 U_1 与 I_0 的夹角，称为空载时的功率因数角。变压器空载时 φ 几乎为 90° ，因而功率因数很低。

例 1-2 一台 $S_N = 600 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 的单相变压器，接在 $U_1 = 10 \text{ kV}$ 的电源上，空载时二次电压 $U_2 = 400 \text{ V}$ 。已知 $N_2 = 32$ 匝，若不计漏阻抗影响，则该变压器变比 k 及 N_1 各为多少？

解：如不计漏阻抗影响，则 $U_1 = E_1$ ， $U_2 = E_2$ ，可得

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{10 \times 10^3}{400} = 25$$

则一次绕组匝数 N_1 为

$$N_1 = k N_2 = 25 \times 32 = 800 \text{ (匝)}$$

二、变压器的负载运行

变压器一次绕组接在额定电压和额定频率的电网上，而二次侧接上负载时的运行状态，称为负载运行，如图 1-9 所示。

1. 负载运行时的物理情况

变压器负载运行时，一次电流从空载时的 I_0 改变为负载时的 I_1 ，但一次侧漏阻抗的电压降 $I_1 Z_1$ 与 E_1 比较仍然很小，仍有 $U_1 \approx -E_1$ 的关系，故从空载到额定负载时， E_1 变化很小，与之相对应的主磁通和产生主磁通的合成磁动势变化也很小，故负载时的磁化电流与空载电流 I_0 相差很小，仍近似认为相等，所对应主磁通仍用 Φ_m 表示。二次侧有电流 I_2 流过，由于变压器是一种静止的电气设备，在传递电功率的过程中损耗很小。在理想情况下可认为原边功率等于副边功率，即

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (1-12)$$

故有

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k} \quad (1-13)$$

2. 负载时的等效电路

变压器负载时的等效电路，如图 1-10 所示。

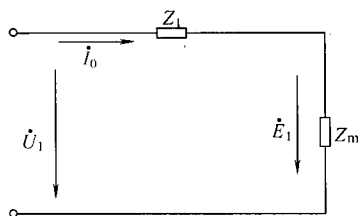


图 1-8 单相变压器空载等效电路图

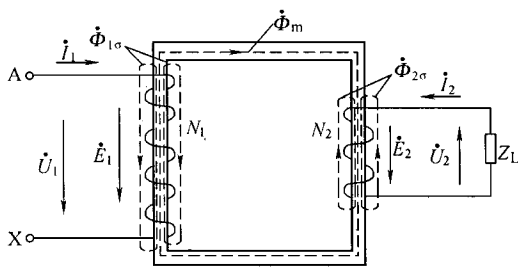


图 1-9 单相变压器负载运行原理图

由 T 形等效电路, 可得变压器负载运行时的基本方程式

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{E}'_2 &= \dot{U}'_2 + \dot{I}'_2 Z'_2 \\ \dot{U}'_2 &= \dot{I}'_2 Z'_L \\ \dot{E}_1 &= \dot{E}'_2 \\ \dot{E}'_1 &= -\dot{I}_0 Z_m \\ \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 &= \dot{I}_0 \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

T 形等效电路虽然能正确反映变压器内部电磁关系, 但进行计算还是比较复杂, 由于 $I_0 \ll I_{1N}$, 可把 I_0 忽略不计, 于是得到变压器负载时的等效电路, 如图 1-11 所示。

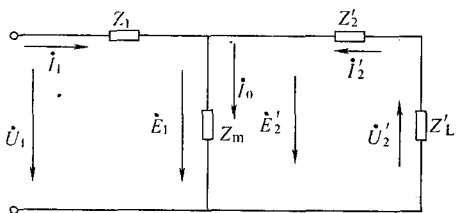


图 1-10 变压器 T 形等效电路

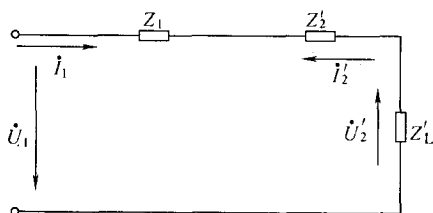


图 1-11 变压器简化等效电路

当 $Z_L=0$ (即负载短路时) 则变压器的等效输入阻抗为 $Z_1 + Z'_2$, 称之为短路阻抗, 用字母 Z_K 表示。即

$$Z_K = Z_1 + Z'_2 = r_K + jX_K$$

式中 $r_K = r_1 + r'_2$ —— 短路电阻;

$X_K = X_1 + X'_2$ —— 短路电抗;

r'_2 —— 二次绕组自身电阻等效到一次侧的值;

X'_2 —— 二次绕组漏电抗等效到一次侧的值, 是个常数, 表征漏磁通对电路的电磁效应。

3. 变压器负载运行时的功率关系

变压器是将一种电压等级的电能转变为另一种电压等级的电能的电气设备, 负载需要什么性质功率, 需要多少功率, 变压器就输给相应的功率。当然, 在能量的传输过程中, 变压器本身也要消耗一小部分功率, 使输出功率小于输入功率。则输入功率与输出功率的关系式为

$$P_1 = p_{Cu1} + p_{Fe} + p_{Cu2} + P_2 = P_2 + \sum p \quad (1-15)$$

式中 P_1 —— 变压器的输入功率;

p_{Cu1} —— 一次绕组电阻上的铜耗;

p_{Cu2} —— 二次绕组电阻上的铜耗;

p_{Fe} —— 变压器的铁耗;

P_2 —— 变压器的输出功率。

$\sum p = p_{Cu1} + p_{Cu2} + p_{Fe}$ 称为总损耗, 它由两部分组成: 一部分是可变损耗 ($p_{Cu1} + p_{Cu2}$); 另一部分为不变损耗 p_{Fe} , 它与负载大小无关。

例 1-3 有一台单相变压器, $U_{1N}/U_{2N} = 3\,000\text{ V}/220\text{ V}$, 供给一台 $P_L = 25\text{ kW}$ 电阻炉。求该变压器一、二次侧的电流。

解：变压器二次侧电流即为这台电阻炉的电流，所以

$$I_2 = P_L / U_{2N} = (25 \times 10^3) / 220 = 114 (\text{A})$$

一次电流为

$$I_1 \approx \frac{I_2}{k} = \frac{U_2}{U_1} I_2 = \frac{220}{3000} \times 114 = 8.33 (\text{A})$$

三、变压器的外特性

在原绕组电压为额定电压，负载功率因数 $\cos\varphi_2$ 为一常数时，变压器副绕组端电压 U_2 随负载电流 I_2 变化的规律 $U_2 = f(I_2)$ 称为变压器的外特性，如图 1-12 所示。由图可见，空载时 $I_2 = 0$ ，则 $U_2 = U_{20}$ 。

当负载为电阻性或电感性负载时，随着 I_2 的增大， U_2 逐渐降低，即变压器具有下降的外特性。在负载大小相同时，其电压下降的程度取决于负载的功率因数，负载功率因数越低， U_2 下降越大。当负载为电容性负载时，随着 I_2 的增大， U_2 有可能上升，即变压器有可能上升的外特性。

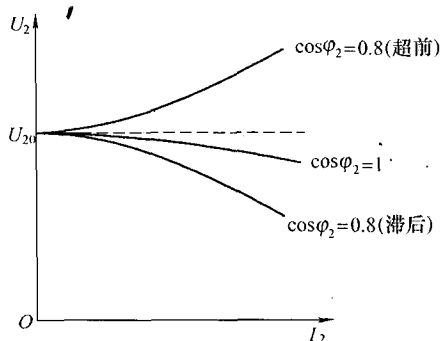


图 1-12 变压器外特性

四、变压器的电压变化率

变压器的负载并不是固定不变的，负载的变化会影响到变压器副绕组端电压的变化。随着负载的变化，电源电压变化越小，则说明供电电压的质量越高。一般用电压变化率来反映供电电压的稳定性，它是变压器运行的主要性能指标之一。

变压器一次绕组接在额定频率、额定电压的电网上，二次侧空载电压 U_{20} 与在给定负载功率因数下二次侧有电流时的二次电压 U_2 的算术差 $(U_{20} - U_2)$ ，与二次额定电压之比，即为电压变化率，用 $\Delta U\%$ 来表示，则

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\% = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \times 100\% \quad (1-16)$$

五、变压器的效率

变压器在能量转换过程中总伴随着铜耗和铁耗，致使输出功率小于输入功率。将输出功率与输入功率的比值称为效率，用字母 η 表示。即

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{P_1 - \sum p}{P_1} \times 100\% = \left(1 - \frac{\sum p}{P_2 + \sum p}\right) \times 100\% \\ &= \left(1 - \frac{p_{Cu1} + p_{Cu2} + p_{Fe}}{P_2 + p_{Cu1} + p_{Cu2} + p_{Fe}}\right) \times 100\% \end{aligned} \quad (1-17)$$

变压器效率的高低，反映了变压器运行的经济性，是运行性能的重要指标。由于变压器是静止电气设备，在能量转换过程中没有机械损耗，故其效率较高，一般中小型变压器效率可达 95%~98%，大型变压器可达 99% 以上。

变压器的效率 η 随输出功率 P_2 变化的规律称为变压器的效率特性 $\eta = f(P_2)$ ，如图 1-13 所示。由图可见，变压器的效率有一个最大值。当变压器的不变损耗等于可变损耗时，变压

器的效率达到最大。要提高变压器的效率，不应使变压器在较小负载下运行；也不宜使变压器在很大负载下运行，如果负载过大，铜耗会急剧增大，不仅使效率下降，而且温度升高，会使变压器过热而受到损害，严重时将烧毁变压器。

小 结

从变压器空载运行可知，根据变压器内部磁通的实际分布情况和所起作用不同，把磁通分为主磁通和漏磁通两部分，主磁通沿铁芯闭合，在一、二次绕组中产生感应电动势，起传递电磁功率的媒介作用；漏磁通是经过非磁性物质闭合，只起电抗压降作用而不直接参与能量传递。

电压变化率 $\Delta U\%$ 和效率 η 是变压器重要性能指标， $\Delta U\%$ 的大小表明变压器运行时二次电压的稳定性， η 表明运行时的经济性。

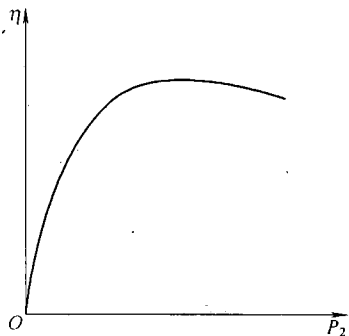


图 1-13 变压器效率特性

第四节 变压器的参数测定

【学习要求】

1. 掌握变压器空载、负载试验的目的及注意事项。
2. 了解短路电压标么值、短路阻抗标么值的意义。

变压器等值电路中的各阻抗参数，直接影响变压器的运行性能，对已经制造出来的变压器，可用空载试验和负载（短路）试验测定这些参数。

一、空载试验

空载试验可测定励磁阻抗 Z_m 、铁芯损耗 p_0 、空载电流 I_0 及变比 k 。图 1-14 为单相变压器空载实验原理接线图。

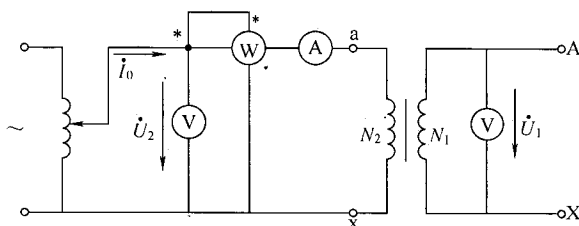


图 1-14 变压器空载试验接线图

为了试验安全和仪表选择方便，一般在低压侧施加电压而高压侧空载。由于励磁阻抗的数值与铁芯的饱和程度有关，即与外施电压有关，因此试验电压应为额定电压，这样测定的励磁阻抗值才有意义。

仪表中的读数分别为 U_2 、 U_1 、 I_0 、 p_0 ，结合空载等值电路，并忽略很小的 r_1 、 X_1 ，可计算出励磁阻抗和变比 k ，得

$$\left. \begin{aligned} Z_m &= \frac{U_{1N}}{I_0} \\ r_m &= \frac{p_0}{I_0^2} \\ X_m &= \sqrt{Z_m^2 - r_m^2} \\ k &= \frac{U_1}{U_2} \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

由于空载试验是在低压侧施加电源电压，所以测得的励磁参数是折算到低压侧的数值，如果需要得到高压侧的数值，还必须乘以 k^2 。这里的 k 是高压侧对低压侧的变比。

空载电流和空载损耗（铁损耗）随电压的大小而变化，即与铁芯的饱和程度有关。所以，测定空载电流和空载损耗时，也应在额定电压下才有意义。

二、负载（短路）试验

通过负载试验可测定短路阻抗 Z_K 及短路损耗 p_K 。图 1-15 为单相变压器负载试验原理接线图。

为了便于测量，负载试验一般将变压器高压侧经调压装置接入试验电源，而低压侧短路。高压侧绝对不允许加额定电压，否则，一、二次绕组电流过大将被烧毁。所以，作短路试验时，通常取短路绕组的电流达额定值为计算依据。此时高压侧所加电压约为额定电压的 5%~10%，称为短路电压，用字母 U_K 表示。

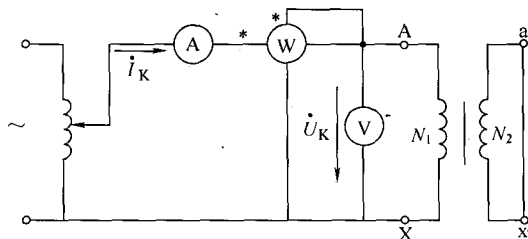


图 1-15 单相变压器负载试验接线图

仪表中的读数分别为 U_K 、 I_K 和 p_K ，结合副边短路时的等值电路（其中 $Z'_L = 0$ ），可计算出短路阻抗为

$$\left. \begin{aligned} Z_K &= \frac{U_K}{I_K} \\ r_K &= \frac{p_K}{I_K^2} \\ X_K &= \sqrt{Z_K^2 - r_K^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-19)$$

在 T 形等值电路中，可以认为 $r_1 = r_2' = \frac{r_K}{2}$ ， $X_1 = X_2' = \frac{X_K}{2}$ 。由于电阻与温度有关，按国家标准，应将试验温度下测定的 r_K 和 Z_K 折算到 75℃ 时的值。

对于铜线变压器按下式换算：

$$\left. \begin{aligned} r_{K75^\circ\text{C}} &= \frac{235 + 75}{235 + \theta} r_K \\ Z_{K75^\circ\text{C}} &= \sqrt{r_{K75^\circ\text{C}}^2 + X_K^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-20)$$

式中 θ 为试验时的环境温度。对铝线变压器，式中的常数 235 应改为 225。

短路试验时，当 $I_K = I_{1N}$ 时电源所加电压——短路电压 $U_K = I_K Z_K$ ，如果用 $I_{1N} Z_{K75^\circ\text{C}}$ 表示，则称额定短路电压，用字母 U_{KN} 表示。它与高压侧额定电压 U_{1N} 的比值，称为短路电压标么值（或相对值），用字母 u_K 表示（习惯上有时也叫 u_K 为短路电压），即