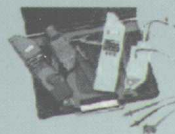
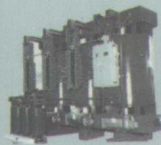
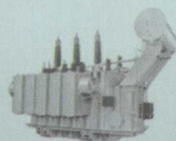


高级技工学校教材

# 工厂电气

## 控制技术



劳动和社会保障部中国就业培训技术指导中心 组织编写  
全国职业培训教学工作指导委员会机电专业委员会

中央广播电视大学出版社

12  
KD00224242

# 工厂电气

控制技术

一、二、三、四、五、六、七、八、九、十、十一、十二、十三、十四、十五、十六、十七、十八、十九、二十、二十一、二十二、二十三、二十四、二十五、二十六、二十七、二十八、二十九、三十、三十一、三十二、三十三、三十四、三十五、三十六、三十七、三十八、三十九、四十、四十一、四十二、四十三、四十四、四十五、四十六、四十七、四十八、四十九、五十、五十一、五十二、五十三、五十四、五十五、五十六、五十七、五十八、五十九、六十、六十一、六十二、六十三、六十四、六十五、六十六、六十七、六十八、六十九、七十、七十一、七十二、七十三、七十四、七十五、七十六、七十七、七十八、七十九、八十、八十一、八十二、八十三、八十四、八十五、八十六、八十七、八十八、八十九、九十、九十一、九十二、九十三、九十四、九十五、九十六、九十七、九十八、九十九、一百



高级技工学校教材

# 工厂电气控制技术

劳动和社会保障部中国就业培训技术指导中心  
全国职业培训教学工作指导委员会机电专业委员会  
组织编写

中央广播电视大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

工厂电气控制技术/劳动和社会保障部中国就业培训技术指导中心,全国职业培训教学工作指导委员会机电专业委员会组织编写. —北京:中央广播电视大学出版社,2005.1

高级技工学校教材

ISBN 7-304-02946-3

I. 工… II. ①劳…②全… III. 工厂—电气控制—技工学校—教材 IV. TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第125360号

版权所有,翻印必究。

## 工厂电气控制技术

劳动和社会保障部中国就业培训技术指导中心  
全国职业培训教学工作指导委员会机电专业委员会 组织编写

---

出版·发行:中央广播电视大学出版社

电话:发行部:010-68519502 62529338 总编室:010-68182524

网址:<http://www.crtvup.com.cn>

地址:北京市海淀区西四环中路45号

邮编:100039

经销:新华书店北京发行所

---

策划编辑:苏 醒

封面设计:王 容

责任编辑:尹立宏

版式设计:张 彦

责任印制:赵联生

责任校对:汪宝明

---

印刷:北京云浩印刷有限责任公司

印数:0001—3000册

版本:2005年1月第1版 2005年1月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:12.5

字数:300千字

---

书号:ISBN 7-304-02946-3/TH·65

定价:23.00元

---

(如有缺页或倒装,本社负责退换)

# 高级技工学校教材

## 机电类专业编审工作委员会

主任：陈 宇 郝广发

副主任：孙长庆 张永麟 杨黎明

委员：(按姓氏笔画排序)

于 平 王 军 王兆山 王洪琳 王晓君

付志达 付元胜 冯振君 刘大力 刘亚琴

许炳鑫 孙国庆 李 涛 李长江 李木杰

李鸿仁 李超群 杨耀双 杨君伟 杨柳青

何阳春 张 斌 张仲民 张跃英 陈 蕾

林 青 林爱平 周学奎 单渭水 郝晶卉

赵杰士 贾恒旦 董桂桥 甄国令

# 《工厂电气控制技术》编写人员

主 编：王 军

主 审：董桂桥

编 者：邓弘礼 宋玉海

# 序

为实施人才强国战略，加快高技能人才培养，劳动和社会保障部组织实施了国家高技能人才培养工程。为配合这项工程实施，我部委托中国就业培训技术指导中心、全国职业培训教学工作指导委员会机电专业委员会，组织专家编写了高级技工学校机床切削加工、机械设备维修、模具制造与维修、数控机床加工、电气维修 5 个专业的配套教材。

高级技工学校是我国培养高技能人才的重要基地。这次编写的 5 个专业的配套教材，是高级技工学校多年教学实践经验的积累和总结。教材依据《国家职业标准》和《高级技工学校专业教学计划》，瞄准经济发展对技能人才的要求，以职业技能为核心，注重教学内容的科学性、先进性和规范性，突出实践创新能力的培养。本套教材在编写中，特别注意了中高级技能人才培养的衔接，教材的适用范围为具备中级职业资格水平的读者对象。本套教材同时可作为相关职业（工种）高级工、技师等企业职工培训教材，也可作为相关专业高职院校的课程教材，还可成为相关专业技术人员的参考书。

本套教材的编写得到了学校、企业等有关方面的大力支持，30 多所高级技工学校和企业的专家参加了教材的编审工作，付出了辛勤的劳动，在此向所有参与教材编审工作的同志和给予大力支持的学校、企业表示感谢。

劳动和社会保障部培训就业司

2005 年 1 月

# 前 言

为了适应工厂电气控制技术的需要和发展,我们编写了《工厂电气控制技术》作为高级工培训教材,适用于招收高中毕业生、学制为三年的高级职业技术学院,也可适用于有关工程技术人员参考,或在职高级工培训使用。

本书在编写过程中力求结合生产实际,突出应用,尽可能做到深入浅出,通俗易懂。

全书内容共分七章,以直流电动机、电机扩大机自动调速系统的基本环节为主线,对电力变压器、直流电动机、特种电动机、电磁调速电动机等的工作原理、各种特性、调速原理及电路、故障、检修方法和测试等方面做了较详尽的讲述和说明;对自动化程度较高的A系统列龙门刨床自动控制电路原理、特点进行了全面、系统的分析,并且增加了机床电气故障检修等章节内容。力求培训出的高级技术工人能面向工厂,具有较高的分析能力与动手能力。

本书第一章和第七章由张家口市煤机技工学校宋玉海编写;第二、三、四、五、六章由哈尔滨电机厂技工学校邓弘礼编写。全书由哈尔滨电机厂技工学校王军主编,由邓弘礼统稿,由北京工贸技师学院董桂桥主审,限于编写水平,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2005年1月



# 目 录

<b>第一章 电力变压器性能的测试</b> .....	1
第一节 变压器的运行特性.....	1
第二节 变压器的空载试验与短路试验.....	4
第三节 变压器的损耗及冷却方式.....	7
第四节 变压器的运行要求与检查.....	9
第五节 变压器的检修及一般试验.....	12
<b>第二章 直流电动机绕组维修工艺</b> .....	25
第一节 概 述.....	25
第二节 直流电动机的结构及铭牌.....	27
第三节 直流电动机的拆装.....	30
第四节 直流电动机定子绕组的拆换.....	34
第五节 直流电动机的试验项目与方法.....	41
第六节 直流电动机常见故障与处理.....	44
<b>第三章 直流电动机的调速</b> .....	53
第一节 调速系统的静态指标.....	53
第二节 负载的类型与调速方式的匹配.....	55
第三节 直流电动机的调速方法.....	57
第四节 直流电动机的开环速度控制.....	63
第五节 直流电动机的闭环速度控制.....	66
<b>第四章 特种电机</b> .....	81

第一节	交流伺服电动机.....	81
第二节	直流伺服电动机.....	90
第三节	恒力矩电动机.....	102
<b>第五章</b>	<b>交流电磁调速电动机的调试</b> .....	<b>110</b>
第一节	交流电磁调速电动机.....	110
第二节	转差离合器的结构.....	115
第三节	转差离合器的工作原理.....	116
第四节	转差离合器的特点.....	118
第五节	交流电磁调速电动机的调速电路.....	124
第六节	电磁调速电动机绕组的修理.....	132
<b>第六章</b>	<b>电机扩大机调速系统</b> .....	<b>136</b>
第一节	电机扩大机的工作原理和结构.....	136
第二节	电机扩大机的特性.....	140
第三节	电机扩大机调速的基本环节.....	142
第四节	电压负反馈系统.....	144
第五节	电流正反馈系统.....	146
第六节	电流截止负反馈系统.....	148
第七节	稳定环节.....	150
第八节	龙门刨床电气控制.....	151
第九节	龙门刨床的安装与故障分析.....	172
<b>第七章</b>	<b>机床电气故障的检修</b> .....	<b>177</b>
第一节	机床电气设备通用技术标准.....	177
第二节	机床电气故障检修方法.....	188

# 第一章 电力变压器性能的测试

电力变压器是工厂电气控制设备中不可缺少的重要设备之一。在工厂中通常用降压变压器把 35kV 或 10kV 的输电电压变为 6kV 或 3kV 供给高压电动机；变为 380/220V 供给动力和照明用电。这种变换交流电压和电流，传输电能的静止设备在使用、维护和修理过程中需要了解变压器的性能及性能测试情况。本章将重点介绍电力变压器（以下简称变压器）的性能测试及使用维修的有关内容。

## 第一节 变压器的运行特性

从变压器的副边看，变压器相当于一台发电机，向负载输出电功率，它的运行特性主要有外特性和效率特性两项。变压器的外特性反映变压器的电压变化率，变压器效率特性反映变压器运行的经济性。电压变化率和效率是变压器的两项主要性能指标。

### 一、变压器的外特性

变压器的外特性是指变压器原边电压  $U_1$  和负载的功率因数  $\cos \phi_2$  一定时，副边电压  $U_2$  与负载电流  $I_2$  的变化关系，即  $U_2 = f(I_2)$ 。

变压器空载运行时，若原边电压  $U_1$  不变，则副边电压  $U_{20}$  也是不变的。变压器加上负载之后，随着负载电流  $I_2$  的增加， $I_2$  在副边绕组内部的阻抗压降也会增加，使副边输出的电压  $U_2$  随之变化，另一方面，由于原边电流  $I_1$  随  $I_2$  增加，因此  $I_2$  增加时，使原绕组漏阻抗上的压降也增加，原边电势  $E_1$  和副边电势  $E_2$  也会有所下降，将会影响副边的输出电压  $U_2$ 。

每台变压器的外特性均可以通过实验获得，功率因数不同时的几条外特性如图 1-1 所示。从外特性曲线可以看出，当  $\cos \phi_2 = 1$  为电阻性负载时， $U_2$  随  $I_2$  的增加而下降的并不多；当负载为感性  $\cos \phi_2$  降低时， $U_2$  随  $I_2$  增加而下降的程度加大，这是因为滞后的无功电流对变压器磁路中的主磁通的去磁作用更为显著，而使  $E_1$  和  $E_2$  有所下降的缘故；但当  $\cos \phi_2$  为负值，在容性负载时，超前的无功电流有助磁作用，主磁通会有所增加， $E_1$  和  $E_2$  亦相应加大，使得  $U_2$  会随  $I_2$  的增加而提高。以上表明，负载的功率因数或者说负载性质的变化对变压器外特性的影响是很大的。

综上所述，电阻性负载曲线的下降比电感性负载小得多，在相同的负载电流下，其端电压下降的程度取决于负载功率因数的大小，负载功率因数越低，端电压下降越多。如果是容性负载，变压器的外特性曲线反而上升，即随着电容性负载的增大，端电压将逐渐升高。

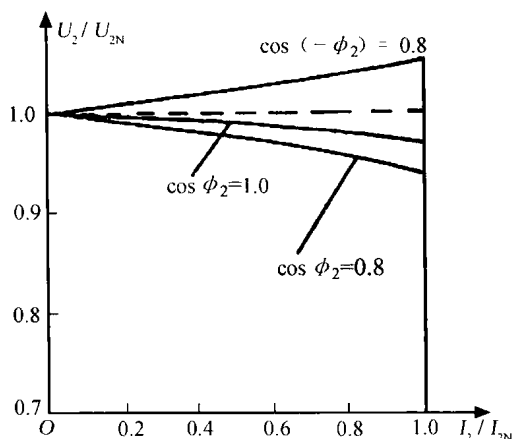


图1-1 变压器的外特性

变压器外特性变化的程度，可以用电压变化率  $\Delta u\%$  来表示，电压变化率是对变压器负载时副边端电压变化程度的一种度量。假定变压器原边接电源电压，副边开路时的端电压为额定值，当副边接入负载后，即使原边电压保持不变，副边端电压将不再是额定值，变压器由空载到负载，则副绕组端电压  $U_2$  的变化程度为：

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

式中， $U_{20}$ ——副边空载电压；

$U_2$ ——某一负载时的副边端电压。

电压变化率反映变压器运行时供电电压的稳定性，是变压器的主要性能指标之一。电力变压器的变化率一般是 5% 左右。

为了提高供电电压的稳定性，保证供电质量，应该设法提高变压器负载的功率因数。一般在电力变压器上装有调压分接开关，在停电无载时，旋转分接开关，可改变原绕组的有效匝数，即改变变压器的变比，以调整输出电压  $U_2$ 。电力变压器的无载调压范围是  $\pm 5\%$ 。有些变压器还装有有载调压分接开关，可在变压器运行中调节输出电压。

在一般的电力变压器中，当  $\cos \phi_2$  接近于 1 时，电压变化率大约为 2%~3%。电压变化率不大是由于变压器绕组的电阻和漏抗均很小，由此引起的电压降也很小。但当负载的功率因数下降到 0.8 时， $\Delta u\%$  约为 5%~8%，电压变化率增大。另外，提高企业用电设备的功率因数也起到了减小电压变化率的作用。

实际运行中，特别是当变压器在超载运行时，电压往往会下降很多，严重地影响负载的正常工作。用户要求电压稳定，即变压器二次侧电压变动应尽可能的小。因此，电压变化率  $\Delta u\%$  的大小就成为衡量变压器运行性能的一项重要指标，它反映变压器供电电压的质量。

## 二、变压器的效率特性

变压器输出功率  $P_2$  与输入有功功率  $P_1$  的百分比称为变压器效率，用  $\eta$  表示，即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad (1-2)$$

由于  $P_1 = P_2 + \Sigma P = P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}$

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_2}{(P_2 + P_{Fe} + P_{Cu})} \times 100\% \\ &= \frac{I_2 U_2 \cos \phi_2}{(I_2 U_2 \cos \phi_2 + P_0 + \beta^2 P_K)} \times 100\% \end{aligned} \quad (1-3)$$

对单相变压器来说： $U_2 = U_{2N}$   $S_N = U_{2N} I_{2N}$

由此可得变压器效率的实用计算公式：

$$\eta = \frac{\beta S_N \cos \phi_2}{(\beta S_N \cos \phi_2 + P_0 + \beta^2 P_K)} \times 100\% \quad (1-4)$$

由上式可知，变压器的效率与负载的大小及功率因数有关。

当负载功率因数为某一定值时，变压器效率  $\eta$  与负载系数的关系称为变压器的效率特性。即  $\eta = f(\beta)$ ，变压器的效率特性曲线如图 1-2 所示。由效率特性曲线可见：变压器接上负载后随着负载的增加，效率  $\eta$  由零很快升至最大值，然后又略有降低，这是由于铁耗为固定损耗，在负载较小时，铁耗对效率的影响很大，效率随负载增加而很快提高。由于铜耗和电流的平方成正比，负载增加后铜耗增加很快，从而使效率随负载增加而降低。

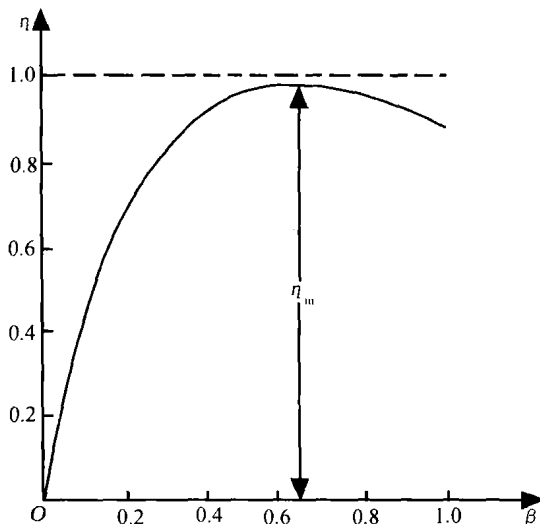


图1-2 变压器的效率曲线

通过分析可以证明：在某一负载下，铜耗与铁耗相等时，变压器的效率达最大值  $\eta_{max}$ 。该条件是： $P_0 = \beta^2 P_K = P_{Cu}$ 。

变压器的最高效率  $\eta_{\max}$  运行时的负载系数为:  $\beta_m = \frac{P_0}{P_K}$ , 通常,  $\beta_m = 0.5 \sim 0.6$ 。

由上述分析可知, 为了降低损耗, 提高效率, 负载系数大时控制负载损耗较为有效, 而负载系数小时控制空载损耗较为有效, 因此, 要根据负载情况确定最佳运行方式, 如控制变压器运行台数, 投入适当容量的变压器带负载, 进行负载调整等, 使变压器在高效率下运行。还可以通过改进变压器的设计与制造工艺降低空载损耗、负载损耗和其他损耗。

变压器运行中效率是经常变化的, 所以通常把一年内输出的总能量  $A_2$  与同期输入的总能量  $A_1$  之比称为年平均效率, 即  $\eta = \frac{A_2}{A_1} \times 100\%$ 。

## 第二节 变压器的空载试验与短路试验

### 一、空载试验

#### 1. 空载试验的目的

变压器的空载试验又称无载试验或开路试验, 就是从变压器任意一侧绕组 (一般为低压侧) 施以额定电压, 在其他绕组开路的情况下进行的测量过程。这是变压器的基本试验之一。

变压器的空载试验, 在安装后、正式运行前和大修后都需进行。通过空载试验可检测变压器的变化、空载损耗、空载电流、励磁阻抗等数据。

#### 2. 空载试验的步骤

进行变压器的空载试验时, 以单相变压器为例, 单相变压器可视为三相变压器中的一相, 故在进行三相变压器的空载试验时, 可先按图 1-3 接线。为使试验取得较为准确的数据, 所用的仪表不应低于 0.5 级, 且应把低压侧电压表接在功率表之前, 并选用低功率因数表测空载损耗  $P_0$ ; 然后将变压器的高压侧开路, 并接入可调电压的交流电源, 原绕组加上额定电压  $U_{1N}$ , 然后在变压器的低压侧加不含高次谐波的正弦交变电压  $U_2$ , 将低压侧电压  $U_2$  调节到额定电压  $V_{2N}$  (即  $U_2 = U_{2N}$ ) 时, 读取空载电压  $U_{20}$ 、空载电流  $I_{20}$ 、空载损耗  $P_{20}$  及高压侧电压  $U_{10}$ , 记录以上 4 个读数后, 将低压侧电压  $U_2$  调整到最低值, 然后切断电源。

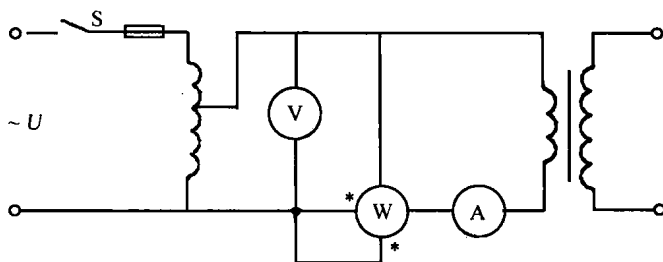


图1-3 变压器的空载试验电路

### 3. 利用空载试验数据计算变压器参数

(1) 变压比  $K$ 。可根据试验数据依下面的公式求得：

$$K = \frac{U_w}{U_{20}} \quad (1-5)$$

(2) 空载损耗  $P_0$ 。变压器空载时，绕组产生的铜损耗非常小，约占空载损耗的 2%，因此，空载损耗主要是由涡流损耗和磁滞损耗两部分构成的铁芯损耗。也就是说，空载损耗近似为铁芯损耗。即

$$P_0 \approx P_{Fe} \quad (1-6)$$

(3) 空载时的功率因数。空载时功率因数很低，约为 0.2 左右，此时功率因数越低，说明铁芯和绕组的质量越好。可根据试验数据由下式求得：

$$\cos \phi = \frac{P_0}{U_{1N} I_0} \quad (1-7)$$

(4) 低压侧励磁阻抗  $Z_{2m}$ 。可根据试验数据由下式求得：

$$Z_{2m} = \frac{U_{20}}{I_0} \quad (1-8)$$

(5) 低压侧励磁电阻  $r_{2m}$  (或铁耗电阻)。可根据试验数据由下式求得：

$$r_{2m} = \frac{P_0}{I_0^2} \quad (1-9)$$

(6) 低压侧励磁电抗  $X_{2m}$ 。低压侧励磁电抗可根据下式求得：

$$X_{2m} = \sqrt{Z_{2m}^2 - r_{2m}^2} \quad (1-10)$$

(7) 高压侧参数折算。由于空载试验是在低压侧进行的，所以有关参数折算到高压侧，应为：

$$I_{10} = \frac{I_{20}}{K} \quad (1-11)$$

$$r_{1m} = K^2 r_{2m} \quad (1-12)$$

$$X_{1m} = K^2 X_{2m} \quad (1-13)$$

### 4. 结果分析与处理

变压器进行空载试验后，所测量和计算出的数据应与制造厂资料加以比较，在允许运行范围内，空载电流约为额定电流的 5%~8%，如空载电流大于额定电流 10%时，损耗较大，应加以监视，当空载电流超过额定电流的 20%时，它的温升将超过允许值，不能使用。

## 二、短路试验

变压器的短路试验，是运用变压器短路运行原理，为达到一定的测试目的进行的一种试验，它也是变压器的基本试验之一，新的变压器安装后与经过大修的变压器安装后均需进行短路试验。

### 1. 短路试验的目的和方法

变压器短路试验的目的是测定短路电压  $U_K$  (阻抗电压)、铜损耗  $P_{Cu}$  等数据，可计算出

短路参数，如短路阻抗  $Z_K$ 、短路电阻  $r_K$  和短路电抗  $X_K$ 。

短路试验的接线如图 1-4 所示，为保证测量准确，一般采用低压侧短路的方式，且使低压侧短接的导线长度尽可能短，导线的截面不小于出线端子的截面，使得接头的接触电阻尽可能小。变压器绕组经调压器接入电源。试验中用的电压表与功率表的电压线圈要直接接在变压器原绕组的两端，不要将电流表和功率表的电流线圈的压降包括进测量数据。若对大型变压器做短路试验，由于其  $\cos \phi \leq 0.05$ ，应选用低功率因数功率表测量，并且尽可能缩短试验时间，以防止绕组发热，影响试验的准确性。

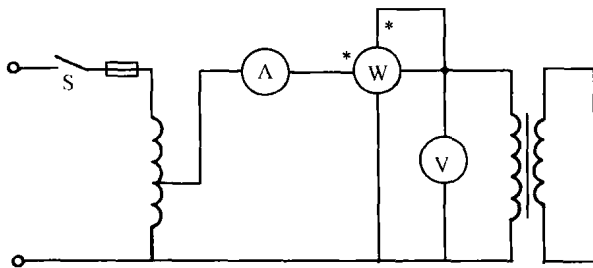


图1-4 变压器的短路试验

进行变压器的短路试验时，先按图 1-4 接线，然后调节调压器，使外加电压由零逐步增大，注意观察电流表读数，当高压侧绕组中的电流从零开始达到额定值  $I_{1N}$  时，立即停止升压，然后记录下电压表  $U$  测出的原绕组电压  $U_K$ ，功率表  $W$  测出的输入功率  $P_K$  并记录周围介质温度  $t$ ，再将电压降到最低，切断电源。

## 2. 利用短路试验参数分析与计算变压器的参数

(1) 短路电压。短路试验时，原边所加电压  $U_K$  的大小标志着额定电流时变压器阻抗压降的大小，通常用它与额定电压之比的百分数  $U_K^*$  来表示，即

$$U_K^* = \frac{U_K}{U_{1N}} \times 100\% \quad (1-14)$$

从变压器运行的稳定性来分析，希望  $U_K$  小些，输出电压稳定些；从发生短路故障的角度考虑，希望  $U_K$  大些，即变压器阻抗大些，以限制短路电流。因此，变压器的短路电压应适应正常运行和短路故障运行两方面的不同要求，一般短路电压  $U_K^*$  为 5%~10%，随着变压器容量的增大， $U_K$  的值也越大。

(2) 铜损耗  $P_{Cu}$ 。短路试验时，由于低压侧短路、负载阻抗为零，输出功率为零。电源输入的功率全部是变压器本身的消耗，这时  $U_K$  约为 4%~10% $U_{1N}$ ，铁芯中的主磁通仅为工作磁通的百分之几，励磁电流和铁耗  $P_{Fe}$  都非常小，可忽略，因此，短路试验时输入功率便是绕组的铜耗，即

$$P_K \approx P_{Cu} \quad (1-15)$$

由于短路试验中的原绕阻电流达到了额定电流，故此时的铜耗相当于额定负载时的铜耗。

(3) 短路阻抗  $Z_K$ 、短路电阻  $r_K$  和短路电抗  $X_K$ 。根据电压表和电流表的读数可求得短路阻抗  $Z_K$ ：



$$Z_K = \frac{U_K}{I_K} = \frac{U_K}{I_{1N}} \quad (1-16)$$

由于  $P_K \approx P_{Cu}$ ,  $P_K \approx I_{1N}^2 r_1 + I_{2N}^2 r_2$

$$\begin{aligned} I_{1N} &= \frac{I_{2N}}{K} \\ P_K &= I_{1N}^2 r_1 + K^2 I_{1N}^2 r_2 \\ &= (r_1 + K^2 r_2) I_{1N}^2 \\ &= r_K I_{1N}^2 \end{aligned} \quad (1-17)$$

则变压器的短路电阻  $r_K = r_1 + K^2 r_2$ 。

在室温下测得的  $r_K$  值还应折合到  $75^\circ\text{C}$  的数值, 折合的公式为:

$$r_{K(75^\circ\text{C})} = \frac{(K_T + 75)}{(K_T + t)} \times r_K \quad (1-18)$$

式中, 铜线  $K_T = 235$ , 铅线  $K_T = 228$ ,  $t$  为实验时的温度。

做完短路试验后, 要将所测量的  $P_K$ 、 $U_K$  等值与变压器的制造厂家的资料相比较, 以判断是否在正常允许运行的范围内, 如  $P_K$  增加可能出现线圈的某一支路断线、换位错误等。

### 第三节 变压器的损耗及冷却方式

#### 一、变压器的损耗

变压器在传输功率的过程中, 自身要产生能量消耗, 其输入功率与输出功率之差就是变压器内部的功率消耗, 主要有铜耗和铁耗两部分, 这两部分损耗在变压器内部都转化为热量。一部分使变压器的温度升高, 另一部分散发到周围的介质中。

##### 1. 铜耗

变压器的铜耗包括基本损耗和附加损耗两部分。

基本铜耗指变压器绕组的直流电阻损耗, 它是由变压器原副绕组中流过电流而产生的热效应, 其大小与绕组的直流电阻成正比, 与绕组中流过电流的平方成正比。

变压器在短路试验中测得的短路损耗  $P_K$  即为额定电流时的铜损耗。变压器的铜耗与绕组中的电流大小有关, 随负载的大小变化而变化, 是可变损耗, 当副边电流为  $I_2$  时, 变压器的铜耗为:

$$P_{Cu} = \left(\frac{I_2}{I_{2N}}\right)^2 P_K = \beta^2 P_K \quad (1-19)$$

变压器的铜耗与负载系数的关系如图 1-5 所示的虚线部分。