

铁路职业教育铁道部规划教材

电机与电气控制技术

DIANJIYUDIANQIKONGZHIJISHU

TIELU ZHIYE JIAOYU TIEDAOBU GUIHUA JIAOCAI

崔晶 主编

高职

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



铁路职业教育铁道部规划教材

(高 职)

电机与电气控制技术

崔 晶 主 编

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,全书分为电机与电气控制技术两篇,第一篇电机具体包括变压器、直流电机、交流电动机、同步电机、控制电机五部分内容;第二篇电气控制具体包括常用低压电器、电动机继电器—接触器控制电路的基本线路、常用机床的电气控制、可编程控制器及应用等内容。

本书可以作为高职电类专业通用教材,也可作为现场工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电机与电气控制技术/崔晶主编. —北京:中国铁道出版社,2008.1

铁路职业教育铁道部规划教材:高职

ISBN 978-7-113-08581-0

I. 电… II. 崔… III. ①电机学-高等学校:技术学校-教材②电气控制-高等学校:技术学校-教材
IV. TM3 TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 005956 号

书 名:电机与电气控制技术

作 者:崔 晶 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:张玉华

责任印制:金洪泽

出版发行:中国铁道出版社 (地址:北京市宣武区右安门西街8号,100054)

印 刷:河北省遵化市胶印厂

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:18 字数:445千

书 号:ISBN 978-7-113-08581-0/TP·2693

定 价:35.00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,是根据铁路高职教育电气化铁道供电专业教学计划“电机与电气控制”课程教学大纲的要求编写的。本书是根据编者多年从事高职高专教学的实践及教学改革的成果和课程基本要求,将《电机学》、《电力拖动技术》和《工厂电气控制》三门课程有机地结合并依据高等职业教育“淡化理论,够用为度,培养技能,重在应用”的原则编写而成。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校、成人高校等供用电技术、电气自动化技术、机电一体化专业及相关专业的教学用书,也适用于五年制高职相关专业,并可作为社会从业人员的业务参考书及培训用书。全书分两篇共九章,主要内容有变压器、直流电机、异步电动机、特种电机、常用低压电器、继电器—接触器控制电路及基本环节、常用机床的电气控制、桥式起重机的电气控制及 PLC 等。本书理论联系实际,实用性很强。在内容上兼顾了当前科学技术的发展和我国的实际情况,在问题的阐述方面则力求做到叙述简明、概念清晰、突出重点,侧重于基本原则和基本概念的阐述,并强调基本理论的实际应用。

本书由西安铁路职业技术学院崔晶编写绪论和第一篇第三、五章及第二篇第六章、第九章第五节,武汉铁路司机学校徐亚辉编写第一篇第一、四章,南京铁道职业技术学院苏州校区林健荣编写第一篇第二章、第二篇第九章(1~4节),西安铁路职业技术学院赵飞燕编写第二篇第七、八章及附录。全书由崔晶担任主编并统稿。

由于编写水平有限,书中缺点和错误之处在所难免,希望广大读者批评指正。

编 者
2008年1月

目 录

绪 论	1
-----	---

第一篇 电 机

第一章 变 压 器	4
第一节 变压器的原理和结构	5
第二节 单相变压器的运行分析	7
第三节 三相变压器	9
第四节 自耦变压器	13
第五节 电力变压器运行维护和常见故障分析	16
小 结	18
习 题	19
第二章 直 流 电 机	21
第一节 直流电机的基本原理与结构	21
第二节 直流电动机的电磁转矩和感应电动势	25
第三节 直流电动机的运行分析与机械特性	28
第四节 电力拖动的基础知识	30
第五节 他励直流电动机的启动、反转和制动	31
第六节 直流电动机的使用、维护和检修	41
小 结	44
习 题	44
第三章 交 流 电 动 机	46
第一节 异步电动机的基本结构、分类及铭牌	46
第二节 三相异步电动机的工作原理及运行分析	50
第三节 三相异步电动机的机械特性	59
第四节 三相异步电动机的启动、调速、制动	61
第五节 三相异步电动机安全检查与故障处理	69
第六节 单相异步电动机的结构和工作原理	73
第七节 单相异步电动机的分类和启动方法	76
第八节 单相异步电动机的常见故障及处理	79

小 结	80
习 题	81
第四章 同步电机	83
第一节 同步电机的基本结构和原理	83
第二节 同步发电机的运行特性	88
第三节 同步发电机的应用	90
小 结	93
习 题	93
第五章 控制电机	95
第一节 伺服电动机	95
第二节 测速发电机	100
第三节 步进电动机	104
第四节 自整角机和旋转变压器	106
第五节 直线电动机、伺服电动机	110
小 结	113
习 题	114

第二篇 电气控制

第六章 常用低压电器	115
第一节 电器的基本知识	115
第二节 熔断器	119
第三节 开关电器	123
第四节 主令电器	129
第五节 接触器	132
第六节 继电器	134
小 结	143
习 题	144
第七章 电动机继电器—接触器控制电路的基本线路	146
第一节 电气控制系统图的类型及其绘制规则	146
第二节 三相笼型异步电动机全压启动控制线路	151
第三节 三相笼型异步电动机降压启动控制线路	163
第四节 三相绕线转子异步电动机启动控制线路	174
第五节 三相异步电动机的调速控制线路	177
第六节 三相异步电动机的制动控制线路	180
第七节 电气控制的保护环节	185

小 结	187
习 题	188
第八章 常用机床的电气控制	191
第一节 卧式车床电气控制	191
第二节 磨床电气控制电路	196
第三节 摇臂钻床电气控制电路	202
第四节 卧式万能铣床电气控制电路	208
第五节 卧式镗床电气控制电路	216
第六节 桥式起重机的电气控制线路	222
第七节 电动葫芦和梁式起重机的电气设备	226
第八节 常用机床控制线路的分析和维修	227
小 结	232
习 题	233
第九章 可编程序控制器(PLC)及应用	235
第一节 小型可编程序控制器简介	235
第二节 可编程序控制器的系统	240
第三节 可编程序控制器的指令系统	242
第四节 可编程序控制器的应用	257
第五节 三菱公司 FX2N 系列可编程序控制器的简介	260
小 结	267
习 题	268
附 录	270
参考文献	278

绪 论

在工农业生产中,使用着大量的生产机械,如车床、钻床、铣床、磨床、镗床、水泵、空气压缩机、轧钢机等,这些设备的运转都需要原动力来拖动。由于电力在生产、传输、分配、使用和控制等方面的优越性,所以用电动机拖动已被广泛地应用。用电动机来拖动生产机械就称为电力拖动。

为了让电动机能按生产需要进行工作状态的变换,需要对电动机进行控制,如电动机的启动、制动、反转及速度的调节等。完成这些功能的设备称为控制设备。将控制设备如低压电器、主令电器等按一定规律连接起来的线路称为电气控制线路。电气控制线路主要是完成对电动机的电气控制。

一、电机的定义、作用

1. 电机的定义

电机是一种利用电磁感应原理进行能量转换或传递的电磁机械设备,主要是指发电机、电动机和变压器,通过电机能够进行电能的生产、传输和使用。

2. 电机的作用

众所周知,自然界中存在着各种能量。根据能量守恒定律,能量既不能创生也不能消灭,它只能从一个物体传给另一个物体或从一种形式转换为另一种形式。电能作为一种能量,由于它的转换、远距离传输、控制和使用等都比较方便,因而在现代社会中获得了广泛的应用。世界各国都利用电能作为能量转换的中间环节,也就是先将其他形式的能量(燃料燃烧、水流动力或原子核裂变的能量)转换成电能,再将电能转换成人们需要的某种形式的能量。

目前,我们所使用的电网中的电能主要来自火力发电厂和水力发电站。在火力发电厂,将煤的燃烧或其他方法产生的热能用来产生蒸汽,蒸汽驱动汽轮机而产生了机械能来拖动电机旋转,通过电机的作用而发出电能后输出到电网;在水力发电站,利用水的位能驱动水轮机而产生了机械能来拖动电机旋转,通过电机的作用而发出电能后输出到电网。可见,在火力发电厂是将热能转换成机械能,再通过电机的作用将机械能转换成了电能;在水力发电站是将水的位能转换成机械能,再通过电机的作用将机械能转换成了电能。为了经济地传输和分配电能,采用变压器升高电压,再把电能送到用户地区,然后又经过变压器降低电压,供用户使用。

在机械、冶金、石油、煤炭和化学工业及其他各种工业企业中,广泛地应用各种电动机将电能转换成机械能,从而拖动各种机器设备工作。例如,各种机床都用电动机拖动,高炉运料装置、吊车、抽水车、鼓风机、搅拌机等都大量采用电动机拖动。一个现代化工厂需要几百台至几万台电机。随着各行各业生产自动化程度的不断提高,还需要采用各种各样的控制电机作为自动化系统中的元件。

在交通运输业中,随着城市交通运输和电气化铁道的发展,需要大量具有优良启动和调速性能的牵引电动机。如,电力机车上,牵引电动机将电能转换成机械能而驱使机车运动;在航运和航空事业中,需要很多具有特殊要求的船用电机和航空电机。

随着农业机械化的发展,电机在农业上的应用也日趋广泛,如电力排灌、脱粒、榨油、粉碎等农业机械,都采用电动机拖动。

日常生活中的电梯、电扇、洗衣机等许许多多机器设备的运动,也是靠电机将电能转换成机械能来拖动的。

二、电力拖动

(一) 电力拖动系统的组成

电力拖动系统的组成,如图 0-0-1 所示。

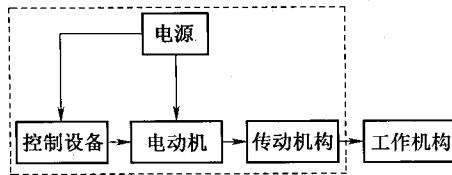


图 0-0-1 电力拖动系统组成

1. 电源 电源是电动机和控制设备的能源,分为交流电源和直流电源。
2. 电动机 电动机是生产机械的原动机,其作用是将电能转换成机械能。电动机可分为交流电动机和直流电动机。
3. 控制设备 控制设备用来控制电动机的运转,由各种控制电动机、电器、自动化元件及工业控制计算机等组成。
4. 传动机构 传动机构是在电动机与生产机械的工作机构之间传递动力的装置,如减速箱、传动带、联轴器等。

(二) 电力拖动的特点

1. 方便经济
电能的生产、变换、传输都比较经济,分配、检测和使用比较方便。
2. 效率高
电力拖动比蒸汽、压缩空气的拖动效率要高,且传动机构简单。
3. 调节性能好
电动机的类型很多,具有各种运行特性,可适应不同生产机械的需要,且电力拖动系统的启动、制动、调速、反转等控制简便、迅速,能实现较理想的控制目的。
4. 易于实现生产过程的自动化
由于电力拖动可以实现远距离控制与自动调节,且各种非电量(如位移、速度、温度等)都可以通过传感器转变为电量作用于拖动系统,因而能实现生产过程的自动化。

(三) 电力拖动的发展概况

按电力拖动系统中电动机的组合数量,电力拖动的发展经历了成组拖动、单电动机拖动和多电动机拖动三个阶段。

1. 成组拖动

成组拖动是由一台电动机拖动传动轴,再由传动轴通过传动带分别拖动多台生产机械。这种拖动方式能量损耗大、效率低,且不能利用电动机的调速性能,不能实现自动控制,当电动机一旦出现故障,则大批生产机械都要停车,因此已被淘汰。

2. 单电动机拖动

由一台电动机拖动一台生产机械,从而简化了中间传动机构,提高了效率,转速也提高了,同时可充分利用电动机的调速性能,易于实现自动控制。

3. 多电动机拖动

随着现代工业生产的迅速发展,生产机械越来越复杂,一台生产机械上往往有许多运动部件,如果仍用一台电动机拖动,传动机构将十分复杂,因此出现了一台生产机械中由多台电动机分别拖动不同的运动部件的拖动方式,称为多电动机拖动。这种拖动简化了生产机械的传动机构,提高了传动效率,且容易实现自动控制,提高劳动生产率。目前常用的生产机械大多数采用这种拖动方式。

三、本课程的性质、内容、任务和要求

本课程是高等职业技术学校供用电技术、电气自动化、机电一体化等电气维修专业的一门集专业理论与技能训练于一体的课程。课程范围是变压器、直流电机、交流电机、同步电机、控制电机及常用低压电器的结构;继电器—接触器的基本控制线路;常用生产机械的电气控制线路及 PLC 等。

通过本课程的学习,掌握与电力拖动有关的专业理论知识和操作技能,培养理论联系实际和分析解决一般技术问题的能力。其基本要求是:掌握变压器、直流电机、交流电机的结构、工作原理及故障诊断;掌握常用低压电器的功能、结构、工作原理、选用原则及其维修方法;掌握电机基本控制线路的构成、工作原理、分析方法及其安装、调试与维修;掌握常用生产机械电气控制线路的分析方法及其安装、调试与维修。

第一篇 电 机

第一章

变 压 器

变压器是一种常见的静止的电气设备。它通过电磁感应把交流电能或信号从一个电路传递到另一个电路。在电力系统中,它将一定等级电压的交流电,利用绕制在同一铁芯上的原边绕组和副边绕组的匝数不同,把原边绕组的电压从某种数量等级转变为副边绕组中频率相同的另外一种等级。在电力系统中,变压器是一个重要的设备。它对电能的经济传输、灵活分配和安全使用具有重要意义。我们知道,要将交流大功率的电能 $P=\sqrt{3}UI\cos\varphi$ 从发电厂输送到需要用电的地方去,通常要用很长的输电线。在输送功率 P 和 $\cos\varphi$ 负载为定值的情况下,采用较低的电压即相应的大电流来传输是不可能的。这是因为:一方面,大电流将在输电线上产生大的功率损耗;另一方面,大电流还将在输电线路引起大的电压降,致使电能根本送不出去。为此,需要变压器来将发电机的端电压升高,使它的输出电流减小。一般来说,当输电距离越远,输出功率越大时,要求的输出电压也越高。例如,当采用 110 kV 的电压时可以将 5×10^4 kW 的功率输送到约 150 km 远的地方;而当采用 500~750 kV 的高压时,就可以将约 200×10^4 kW 的功率输送到约 1000 km 远的地方。因此,随着输电距离、输送容量的增加,对变压器的要求也就越来越高。

在用电方面,各类用电器所需要的电压不一定相同,多数的用电器是 220 V、380 V,少数的电动机也有采用 3 kV 或 6 kV 的;有些用电器的额定电压较低,如机床上的照明灯为 36 V,电子管的灯丝电压只有几 V 等。因此,在供电之前,也要利用变压器把电源的高电压变换成负载所需的低电压。图 1-0-1 所示为变压器在电能传输、分配中地位的示意图。

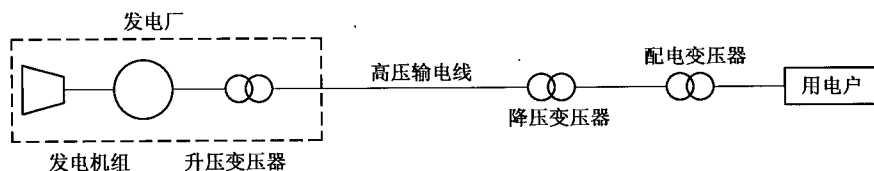


图 1-0-1 变压器在电能传输、分配中的地位示意图

在电信及通讯系统中,变压器除了用作电源变压器外,还可用于传递信息及阻抗变换等。变压器还广泛应用于一些工业、交通运输部门,如整流设备、电焊设备、矿山设备、电力机车等设备中,采用专门的变压器。

第一节 变压器的原理和结构

一、变压器的基本工作原理

变压器按用途可分为:电力变压器、特种变压器、仪用试验用变压器等。其中电力变压器包括升压变压器、降压变压器和配电变压器、联络变压器和厂用变压器等。特种变压器是根据冶金、矿山、化工、交通等部门的具体要求设计制造的专用变压器,包括整流变压器、电炉变压器、矿用变压器、电焊变压器、中频变压器、船用变压器等。仪用试验用变压器包括电子线路中使用的电源、隔离和脉冲变压器、阻抗变压器、互感器、自耦变压器、高压试验变压器等。不管是哪一种变压器,它工作的理论依据都是电磁感应原理。下面以最简单的变压器来介绍它的工作原理。

最简单的变压器是由一个闭合的铁芯和绕在铁芯上的两个匝数不等的绕组组成的,如图 1-1-1 所示。

为了减小涡流及磁滞损耗,铁芯是用涂有绝缘漆、厚度为 0.35~0.5 mm 的硅钢片叠成。两个互相绝缘的绕组套装在铁芯上,其中接受电能即接到交流电源的绕组称为一次侧绕组(也可称为原边绕组或初级绕组),简称一次侧(原边或初级),而输出电能的一侧称为二次侧绕组(也可称为副边绕组或次级绕组),简称二次侧(副边或次级)。为了讨论问题方便,我们规定:凡与一次侧有关下角标各量都在其符号下角标以“1”,而与二次侧有关的各量都在其符号下角标以“2”,如一次侧、二次侧

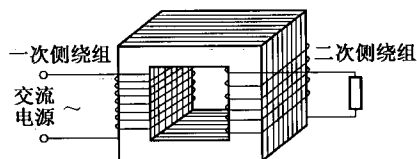


图 1-1-1 变压器原理结构图

的电压、电流、匝数及功率分别用 U_1 、 U_2 、 I_1 、 I_2 、 N_1 、 N_2 及 P_1 、 P_2 等表示。

当一次侧绕组接到交流电源时,一次侧绕组中流过交流电流,并在铁芯中产生交变磁通 Φ_m ,该磁通的频率与电源电压频率相同。铁芯中的磁通同时与一、二次侧线圈相交链,根据电磁感应原理,在一、二次侧绕组中就会分别感应出频率相同而大小不等的电动势。若二次侧与负载相连接,则在二次侧产生的感应电动势的作用下,二次侧中就有电流流过,向负载输出功率,从而实现了电能的传递。

所以,变压器的工作原理就是:一次侧绕组从电源吸取电功率,借助磁场为媒介,根据电磁感应原理,传递到二次侧绕组,然后再将电功率传送到负载。

二、变压器的结构

从变压器的基本原理可知,变压器主要是由铁芯及套装在铁芯上的一、二次侧绕组所组成。根据结构和运行的需要,有的变压器还有油箱及冷却装置、绝缘套管、调压和保护装置等部件。

1. 铁芯

铁芯是变压器的磁路部分,为提高磁路的导磁性能和减少涡流损耗,变压器铁芯通常用含硅量较高、单片厚度为 0.35~0.5 mm、表面涂有绝缘漆的硅钢片叠装而成。随着新材料和新工艺的不断出现,目前已研制出了以非晶态金属为材料的非晶合金铁芯和成型卷片式铁芯。前者具有较高的饱和磁感应强度、低矫顽力、超低损耗、低励磁电流和良好的温度稳定性;后者使铁芯牢固,在短路情况下,铁芯不会松动,从而确保了变压器的噪声极低,涌流冲击很小,空载电流、空载损耗、铁芯发热量大幅度下降,是铁芯发展的趋势,目前在电力变压器 S11-M 系

列得到广泛使用。

铁芯由铁芯柱和铁轭组成,铁芯柱上套有绕组,铁轭将铁芯柱连接起来,使之成为闭合的磁路。根据结构形式和工艺特点,变压器铁芯有单相芯式、单相壳式、渐开线式和成型卷片式等,如图 1-1-2 所示。

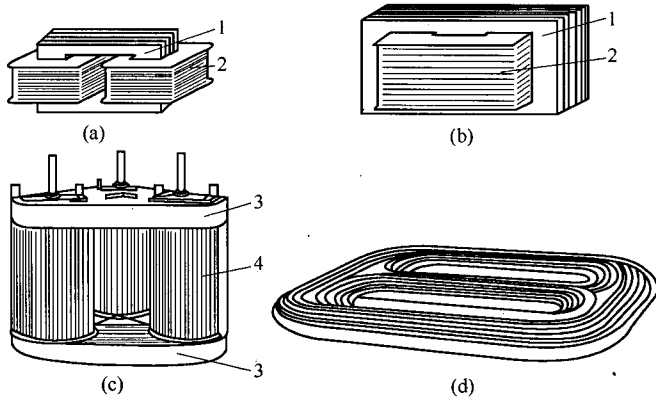


图 1-1-2 铁芯的形式

(a)单相芯式;(b)单相壳式;(c)渐开线式;(d)成型卷片式
1—铁芯;2—绕组;3—铁轭;4—铁芯柱

芯式变压器的特点是绕组套在铁芯柱上,具有用铁量较少,结构简单,散热条件好,绕组的装配方便和绝缘比较容易等优点,电力变压器多采用此结构;壳式变压器的特点是铁芯包围线圈,用铜量较少,多用于小容量变压器以及某些特种变压器(如电炉变压器)。渐开线式铁芯的铁芯柱是由专门的成型机辊压成为渐开线型叠片,然后拼装而成。渐开线式变压器的三相铁芯柱呈等边三角形分布;铁轭是由钢带卷制成环形;该变压器的主要优点是节省材料,结构简单,便于标准化、通用化;主要缺点是空载损耗较大。

2. 绕组

绕组是变压器的电路部分。变压器的绕组大多用包有绝缘材料的铜或铝导线绕制而成。变压器的绕组一般都绕成圆形,因为这种形状的绕组在电磁力的作用下有较好的机械性能,不易变形,同时也便于绕制。高压绕组的匝数多、导线细,低压绕组的匝数少、导线粗。

根据高、低压绕组的相对位置不同,绕组可以分为同心式和交叠式两种,如图 1-1-3 所示。

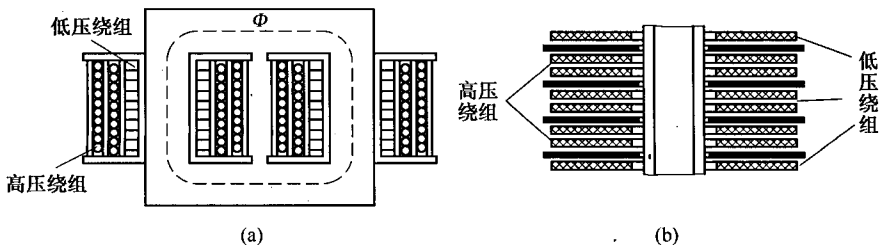


图 1-1-3 高、低压绕组在铁芯上的布置
(a)同心式;(b)交叠式

同心式绕组适用于芯式变压器。大部分同心式绕组都将高、低压绕组同心地套在铁芯柱上,一般低压绕组在里面,高压绕组在外面;这样做的目的是为了减少绕组和铁芯间的绝缘距离。由于这种绕组结构简单,制造方便,使用最为普遍。

交叠式绕组只是在壳式变压器和电压低、电流大的电炉变压器中有所应用。所谓交叠式绕组就是将高、低压绕组各分别做成若干个线饼沿铁芯柱高度依次交错叠放的绕组。由于绕组均为饼形,因此这种绕组也称为“饼式”绕组。为了便于绝缘,通常低压绕组靠近铁轭。

3. 油箱和变压器油

变压器油箱由钢板焊接而成。为了增强冷却效果,油箱壁上焊有散热管或装设散热器。油箱内除放置变压器器身(带绕组的变压器铁芯组件)外,其余空间充满变压器油。变压器油为矿物油。它有两个作用:一是起到加强绝缘的作用;二是通过油在受热后的对流作用或强迫油循环的方法散热。

4. 其他附件

一般的油箱上还有油枕(或称储油柜)、吸湿器、防爆管等装置,以防止空气中的水分、灰尘等进入变压器油内,并对整台变压器起安全保护作用。

变压器高、低压线圈的出线端由油箱顶板上的绝缘套管引出。高压线圈有分接头,分接头与油箱顶板上的分接开关相连接。可根据高压侧供电的实际情况,调节分接开关选择变压器高压线圈的匝数。

冷却装置包括散热器或冷却器。常用的冷却介质有变压器油和空气两种。常见的冷却方式有油浸自冷、油浸风冷、强迫油循环及强迫油导向循环等。

第二节 单相变压器的运行分析

一、变压器的空载运行

变压器的一次侧绕组接在交流电源上而二次侧绕组开路时的运行叫做空载运行。

将变压器一次侧绕组通过 A-X 出线端接通电源,则一次侧绕组中将流过空载电流 i_0 ,在 A-X 两端加有额定频率为 f_1 的正弦交流电压 u_1 。a-x 是二次侧绕组的出线端,由于此时变压器是空载运行,因而 a-x 中没有电流。在电压 u_1 的作用下,一次侧绕组中的空载电流 i_0 会产生。图 1-2-1 所示为变压器空载运行的原理图。主磁通(Φ)和漏磁通($\Phi_{1\sigma}$),其中主磁通是以闭合铁芯为路径,它同时穿过一、二次侧绕组,占全部磁通的 99% 以上;漏磁通仅穿过一次侧绕组,主要通过非磁性介质(变压器油或空气)而形成闭合,它仅占全部磁通的 1% 以下。

设主磁通 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$,则在图 1-2-1 中所选定的参考方向下,一、二次侧绕组的感应电动势 e_1, e_2 是

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

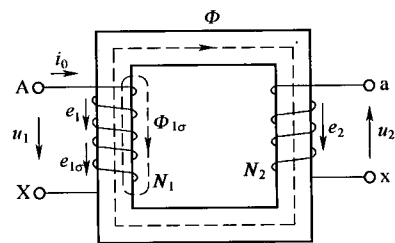


图 1-2-1 变压器空载运行原理图

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

从上式可以看出,当主磁通按正弦规律变化时,它产生的感应电动势也按正弦规律变化,而且感应电动势在相位上滞后于主磁通 90° 。

若电动势用有效值表示,则因最大值 $E_{1m} = N_1 \omega \Phi_m$,而有效值 $E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} N_1 \omega \Phi_m$,且 $\omega = 2\pi f$,所以

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 2\pi f N_1 \Phi_m = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

同理^①

$$E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m$$

由于 e_1 、 e_2 都是按正弦规律变化的,故可以用复数形式表示:

$$\dot{E}_1 = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m$$

$$\dot{E}_2 = -j4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m$$

若忽略一次侧绕组的电阻及漏磁通,则有

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 = j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m \quad (1-2-1)$$

式(1-2-1)表明,变压器铁芯中的主磁通大小主要取决于电源电压 u_1 和频率 f ,而与变压器铁芯所用材料和尺寸无关。而在设计与制造变压器时,如果外加电源电压 \dot{U}_1 和频率 f 已经给定,则变压器主磁通的大小就取决于变压器一次侧绕组的匝数 N_1 。对于式(1-2-1)只写出有效值,则:

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

因为空载时二次侧绕组中没有电流,因此二次侧绕组两端的电压就等于它的感应电动势,即 $\dot{U}_2 = -\dot{E}_2$,只写出有效值,则: $U_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m$

通常,把变压器一、二次侧的感应电动势之比称为变比,用符号 k 来表示,即

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44 f N_1 \Phi_m}{4.44 f N_2 \Phi_m} = \frac{N_1}{N_2}$$

上式表明变比 k 也就等于一、二次侧绕组的匝数比。当单相变压器空载运行时,由于 $U_1 \approx E_1$, $U_2 = E_2$,因此单相变压器的变比还可以近似地认为等于空载运行时的一、二次侧电压,即

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \quad (1-2-2)$$

式(1-2-2)是变压器的基本公式,说明变压器一、二次侧绕组的电压与一、二次侧绕组的匝数比成正比。因此要实现电压变换,只需在设计制造时适当选择一、二次侧绕组的匝数比 k 即可。但是,应当注意的是,一次侧绕组的匝数并不是可以任意选定的,它必须符合式(1-2-1)。

变比 k 是变压器的重要参数,它和变压器的设计、制造和运行检修都有密切关系。我们可以根据变比 k 来判断变压器的类型: $k > 1$ 时, $U_1 > U_2$,则该变压器为降压变压器; $k < 1$ 时, $U_1 < U_2$,则该变压器为升压变压器。

二、变压器的负载运行

变压器一次侧绕组 A-X 接通电源,二次侧绕组 a-x 接负载 Z_L ,变压器向负载供电时的工

作状态称为变压器的负载运行,如图 1-2-2 所示。

当变压器空载时,主磁通由一次侧绕组中的电流 i_0 产生,其磁动势为 $i_0 N_1$;负载运行时,主磁通由 i_1 和 i_2 共同产生,其磁动势为 $(i_1 N_1 + i_2 N_2)$ 。

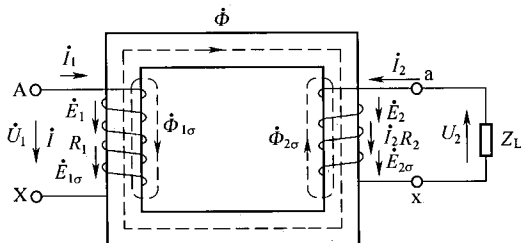


图 1-2-2 单相变压器负载运行原理图

根据 $U_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$, 因为 U_1 、 f 、 N_1 不变, Φ_m 不变, 因而变压器空载与负载运行时磁动势相等, 即: $i_1 N_1 + i_2 N_2 = i_0 N_1$

用相量表示为

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1 \quad (1-2-3)$$

即

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 \right) = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2 \quad (1-2-4)$$

式中, $\dot{I}'_2 = -\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2$ 。由式(1-2-4)可知, \dot{I}_1 由 \dot{I}_0 、 \dot{I}'_2 两个分量组成, 其中 \dot{I}_0 用以产生主磁通, \dot{I}'_2 用以抵消负载电流 \dot{I}_2 对主磁通的影响, 以保持 Φ_m 不变。无论 \dot{I}_2 怎么变化, \dot{I}_1 都能按比例自动变化。

因为在忽略一、二次侧绕组电阻及漏磁通的情况下, 变压器接近满载时, \dot{I}_0 只占 I_{1N} 的百分之几, 即 $\dot{I}_0 N_1$ 远小于 $\dot{I}_1 N_1$ 和 $\dot{I}_2 N_2$, 因此式(1-2-3)可化为

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 \approx 0$$

或

$$\dot{I}_1 N_1 \approx -\dot{I}_2 N_2 \quad (1-2-5)$$

以有效值表示式(1-2-5)则有

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k} \quad (1-2-6)$$

式(1-2-6)说明变压器负载运行时, 一、二次侧绕组中电流的有效值之比近似等于一、二次侧绕组的匝数比的倒数, 而且一次侧的电流随着二次侧电流的变化而变化。

应该注意的是, 式(1-2-2)和式(1-2-6)都是在忽略了变压器的漏磁通和绕组的电阻的情况下得到的, 因此式(1-2-2)在变压器空载或轻载时才准确, 而式(1-2-6)则在接近满载时才准确。

第三节 三相变压器

因为三相制较为经济, 效率又较同容量的单相变压器高, 所以, 几乎世界各国的电力系统均采用三相制。因此, 在电力系统中三相变压器得到了广泛使用。按三相变压器铁芯结构的不同, 三相变压器可以分为三相组式变压器和三相芯式变压器两种。从运行原则和分析方法

来说,因为三相变压器在对称三相负载下运行时,各相的电流、电压、磁通的大小相等,相位互差 120° ,故可以对三相变压器只取三相中的任意一相来研究。这样,前面单相变压器中导出的公式、相量图等均可直接使用于三相中的任一相。

一、三相组式变压器和芯式变压器

1. 三相组式变压器

三相组式变压器由三台容量、变比等完全单相变压器组合而成的。它的特点是:三个铁芯完全独立,每相的磁路互相独立,互不关联;三相电压对称时,三相励磁电流和磁通也对称。三相组式变压器又称三相变压器组。

2. 三相芯式变压器

三相芯式变压器的各相磁路彼此相关,在我国的电力系统中用得最多的是三相三铁芯柱变压器。它是由三台单相变压器的铁芯合在一起演变而成的。其演变过程如图 1-3-1 所示。当把三台单相变压器的一个边(即铁芯柱)贴合在一起,如图 1-3-1(a)所示,由于三相磁通是对称的,所以中间铁芯柱中的磁通为 $\Phi_U + \Phi_V + \Phi_W = 0$ 。这样中间公共铁芯柱就可以省去,变成图 1-3-1(b)所示的形式。在实际制造过程中,为了方便,把三个铁芯柱排在一个平面上,于是就得到了目前广泛采用的如图 1-3-1(c)所示的三相芯式变压器的铁芯。由于每相磁通都要通过另外两相铁芯闭合,因此三相磁路彼此关联,而且它的磁路系统是不对称的,中间一相的磁路比两边要短些。在对称的情况下,中间相的励磁电流比另外两相的励磁电流小,但由于励磁电流很小,因此这种不对称对变压器的负载运行的影响可以忽略不计。

在相同的容量下,三相芯式变压器具有材料消耗少、效率高、价格低、占地面积小和维护方便等优点。但在一些超高压、特大容量的三相变压器中以及运输条件受限制的地方,为了便于运输及减少备用容量,往往采用三相组式变压器。

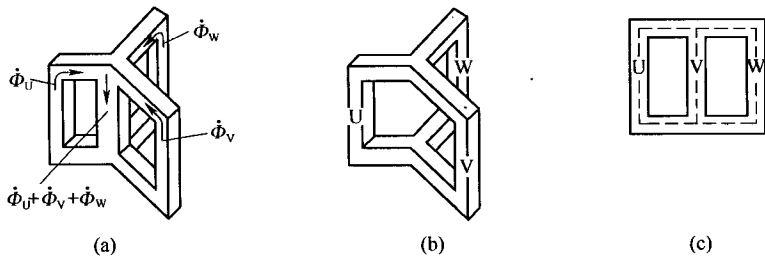


图 1-3-1 三相芯式变压器的铁芯演变过程

(a) 3 个铁芯柱贴合; (b) 中央公共铁芯柱取消; (c) 三相芯式铁芯

二、三相变压器的绕组连接法和连接组

1. 三相变压器的绕组首尾端标记

为了表明绕组的连接,对绕组的各个出线端点标记做如下规定:高压绕组的首端通常用 U_1 、 V_1 、 W_1 表示,末端用 U_2 、 V_2 、 W_2 表示;低压绕组的首端用 u_1 、 v_1 、 w_1 表示,末端用 u_2 、 v_2 、 w_2 表示;高、低压绕组的中性点分别用 O 或 o 表示。

2. 三相绕组的连接法

三相绕组的连接法通常有:星形(Y形)连接,用 Y(或 y)表示;三角形(Δ 形)连接,用 Δ ,