

B

普通高等教育机电类规划教材

电机、拖动与控制

沈阳工业大学 曹承志 主编

 机械工业出版社
China Machine Press

普通高等教育机电类规划教材

电机、拖动与控制

主 编 曹承志

主 审 王成元



机械工业出版社

本教材符合普通高等教育“九五”机械工业部规划教材“电机、拖动与控制课程”（64学时）的教学基本要求，是在总结近年来教学改革经验和科研实践，学习相关较新教材及文献资料的基础上编写而成的。

全书共十一章，内容包括：变压器，特殊用途的变压器，三相异步电动机，其它类型的交流电动机，直流电机，控制电机，电力拖动基础，常用低压电器，电动机的电气控制，电动机的PC（可编程序控制器）控制，电动机的单片机控制。书中通过各种电机、拖动及其控制线路，阐述了电机、拖动与控制的基本概念、原理和分析与设计方法。

本教材可作为高等学校电工及自动化类专业、强弱电结合的电子信息工程专业及相近其它专业的“电机、拖动与控制”课程的教材或教学参考书，也可供从事电机、拖动与控制技术的工程技术人员自学时使用或参考。

图书在版编目（CIP）数据

电机、拖动与控制/曹承志主编. —北京：机械工业出版社，
2000. 3

普通高等教育机电类规划教材
ISBN 7-111-07834-9

I. 电… II. 曹… III. ①电机-电力传动-高等学校-教材
②电力传动-自动控制系统-高等学校-教材 IV. TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2000）第 01759 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
责任编辑：王小东 版式设计：张世琴 责任校对：张 佳
封面设计：方 芬 责任印制：何全君

三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 4 月第 1 版·第 1 次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·18.75 印张·459 千字
0 001 - 3000 册
定价：27.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话（010）68993821、68326677 - 2527

前 言

本教材系按原机械工业部的 1996~2000 年全国高等学校电工及自动化类专业教材编审出版规划, 由应用电子技术专业教学指导委员会征稿并推荐出版的。本教材由沈阳工业大学曹承志主编, 王成元教授主审。

本教材参考学时数为 64 学时, 可作为高等院校电工及自动化类专业和强弱电结合的电子信息工程专业的教科书, 也可作为其它相近专业的教学参考书。本教材介绍了变压器、特殊用途的变压器、三相异步电动机、其它类型的交流电动机、直流电机、控制电机的构造、工作原理、技术性能和使用; 讲述了电力拖动的基础理论, 电力拖动的机械特性、过渡过程和系统中电动机的选择; 叙述了各类常用的低压电器及其典型控制线路的基本工作原理和设计方法, 同时为了反映和推广可编程序控制器和单片机在电机控制领域中应用的新技术、新成果, 还介绍了可编程序控制器和单片机的基本原理及其在电机控制中的设计与应用, 以适应学科相互渗透, 电子技术发展日新月异的重要趋势, 从而使本教材内容具有先进性、科学性, 运用具有可靠性、方便性, 同时又具有电机、拖动与控制结合以及强电与弱电融合的专业特色。

参加本教材编写工作的有曹承志、林成武、魏永广、林蔚等, 杨晓波、曲红梅为全书编写了习题, 最后由曹承志统编全稿。

本教材在规划编审过程中, 浙江大学林渭勋教授、董伯藩副教授、西安理工大学钟彦儒教授、华中理工大学陈坚教授、合肥工业大学张佑生教授、武汉水利电力大学刘涤尘教授、上海大学张齐副教授提出了许多建设性的宝贵意见, 对此敬致谢意。

本教材在编写过程中, 得到李荣德教授、王维教授、王向东教授、林应文教授、张捷贤教授、刘焕生副教授、吴东宝高级工程师的帮助, 谨此表示由衷的感谢。

本教材在编写过程中, 参考了清华大学、华中理工大学、西安交通大学、合肥工业大学、北京航空航天大学、北京理工大学等兄弟院校的自编教材和教学资料, 在此表示深切的谢意。

因为时间仓促, 编写经验不足, 书中难免存在缺点和错误, 诚恳希望读者, 特别是使用本书的教师和同学积极提出批评和改进意见, 以便在构架、内容和细节等方面做得更加完善。

作 者
1999 年 10 月

目 录

前言		第十节 三相异步电动机的工作特 性	66
第一章 变压器	1	第十一节 三相异步电动机参数的测 定	67
第一节 概述	1	第十二节 三相异步电动机的 起动	69
第二节 变压器的空载运行	4	第十三节 三相异步电动机的 调速	73
第三节 变压器的负载运行	10	习题	76
第四节 变压器的等效电路及相量 图	12	第四章 其它类型的交流电动机	78
第五节 变压器参数的试验测定	16	第一节 单相异步电动机	78
第六节 变压器的运行特性	19	第二节 微型同步电动机	82
第七节 三相变压器	23	第三节 感应调压器	87
习题	27	第四节 电磁调速异步电动机	88
第二章 特殊用途的变压器	29	习题	90
第一节 自耦变压器	29	第五章 直流电机	91
第二节 仪用互感器	31	第一节 直流电机的工作原理和基本 结构	91
第三节 整流变压器	32	第二节 直流电机的磁场	94
第四节 脉冲变压器	40	第三节 直流电机的电枢电动势和电 磁转矩	96
习题	44	第四节 直流电机的基本方程式	98
第三章 异步电动机	45	第五节 直流发电机的运行特性	102
第一节 概述	45	第六节 直流电动机的运行特性	105
第二节 三相异步电动机的结构	46	第七节 直流电动机的起动	107
第三节 三相异步电动机的工作 原理	49	第八节 直流电动机的调速	111
第四节 三相异步电动机的磁动 势	51	第九节 直流电动机的制动	113
第五节 三相异步电动机绕组的 电动势	54	习题	115
第六节 三相异步电动机的空载 运行	55	第六章 控制电机	117
第七节 三相异步电动机的负载 运行	56	第一节 伺服电动机	117
第八节 三相异步电动机的等效电路 及相量图	58	第二节 测速发电机	123
第九节 三相异步电动机的功率及转 矩	62	第三节 旋转变压器	127
		第四节 自整角机	132
		第五节 步进电动机	135

习题	150	第八节 常用电器元件的选择	217
第七章 电力拖动基础	152	习题	220
第一节 电力拖动系统的动力学	152	第十章 电动机的 PC (可编程序控制器) 控制	222
第二节 负载的转矩特性及电力拖动系统稳定运行的条件	156	第一节 PC 的特点及主要功能	222
第三节 电力拖动系统的过渡过程	159	第二节 PC 的基本原理	223
第四节 电力拖动系统的电动机选择	169	第三节 ACMY 系列 PC 简介	226
习题	177	第四节 各类继电器的编号及功能	228
第八章 常用低压电器	179	第五节 基本逻辑指令及其编程方法	233
第一节 低压开关	179	第六节 电动机的 PC 控制典型举例	241
第二节 熔断器	189	第七节 电动机 PC 控制系统的设计	248
第三节 接触器	190	习题	255
第四节 继电器	192	第十一章 电动机的单片机控制	256
习题	199	第一节 单片机原理	256
第九章 电动机的电气控制	200	第二节 步进电动机的单片机控制	267
第一节 电气控制线路的绘制原则、图形及文字符号	200	第三节 直流电动机的单片机控制	277
第二节 三相异步电动机的起动控制线路	201	第四节 电动机节能的单片机控制	281
第三节 三相异步电动机的正反转控制线路	203	附录	286
第四节 三相异步电动机的制动控制线路	205	附录 A 电气控制技术中的文字符号	286
第五节 三相异步电动机的变速控制线路	208	附录 B 常用电气控制线路图图形符号	288
第六节 电气控制线路的一般设计方法	209	参考文献	294
第七节 电气控制线路的逻辑设计方法	214		

第一章 变 压 器

第一节 概 述

一、变压器的用途

变压器是一个静止的电器，它是由绕在同一个铁心上的两个或两个以上的线圈组成的，线圈之间通过交变的磁通相互联系着。它的功能是把一种等级的电压与电流变成为同频率的另一种等级的电压与电流。

发电机发出的电压不可能太高，一般有 10.5 ~ 20kV，要想把发出的大功率的电能直接送到很远的用电区去，需要用升压变压器把发电机的端电压升高到较高的输电电压，这样就能比较经济地把电能送出去。一般说来，当输电距离越远，输送的功率越大时，要求的输电电压也越高。

当电能送到用电地区后，还要用降压变压器把输电电压降低为配电电压，然后再送到各用电分区，最后再经配电变压器把电压降到用户所需要的电压等级，供用户使用。

为了把两个不同电压等级的电力系统彼此联系起来，常常用到三绕组变压器。此外，还有各种专门用途的变压器，如整流变压器、电炉变压器等。

由此可见，变压器的用途十分广泛，其品种、规格也很多。通常，变压器的安装容量约为发电机安装容量的 6 ~ 8 倍。所以变压器的生产和使用具有重要意义。

二、变压器的分类

变压器在国民经济各个部门中应用非常广泛，根据变压器的用途可分为电力变压器（又分为升压变压器、降压变压器、配电变压器等）、特种变压器（如电炉变压器、整流变压器等）、仪用互感器（电压互感器和电流互感器）、试验用的高压变压器和调压器等。

根据线圈数目多少，变压器可分为两线圈、三线圈、以及自耦变压器。

根据变压器的铁心结构，可分为心式变压器和壳式变压器。

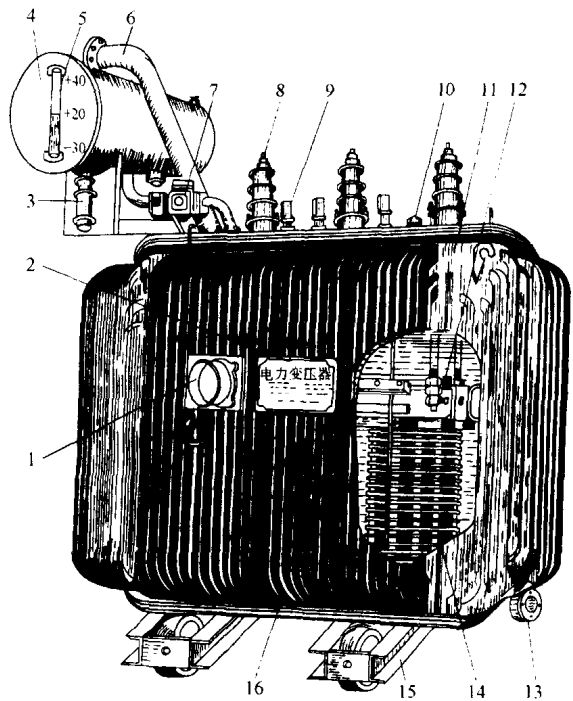


图 1-1 油浸式电力变压器

- 1—信号式温度计 2—铭牌 3—吸湿器 4—储油柜
- 5—油表 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—铁心
- 13—放油阀门 14—线圈及绝缘 15—小车 16—接地板

根据变压器相数的多少，可分为单相变压器和三相变压器。

根据变压器的冷却方式和冷却介质不同，可分为用空气冷却的干式变压器和用油冷却的油浸式变压器等。

三、变压器的主要结构部件

变压器主要由铁心和线圈两个基本部分组成。图 1-1 为油浸式电力变压器的外形图。现将其主要结构部件简介如下：

(1) 铁心 铁心是变压器的磁路部分，其中通过的是交变磁通。因此。为了提高磁路的导磁性能和降低铁心内的涡流损耗，铁心通常用厚度为 0.35mm 且表面涂有绝缘漆的硅钢片制成。铁心分为铁柱和铁轭两部分，铁柱上套装线圈，铁轭则是将铁柱连接起来使之形成闭合磁路。

按线圈与铁心配置的方式不同，铁心结构的基本形式有心式和壳式两种，以及渐开线式铁心。图 1-2 和图 1-3 分别为单相心式和三相心式变压器的铁心和线圈。这种心式结构的特点是铁轭靠着线圈的顶面和底面，而不包围线圈的侧面、散热条件较好。它的结构较为简单，线圈的装配及绝缘也较容易，国产变压器绝大部分采用心式结构。

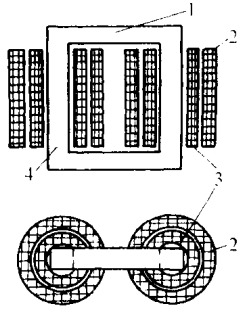


图 1-2 单相心式变压器

1—铁轭 2—高压线圈 3—低压线圈 4—铁柱

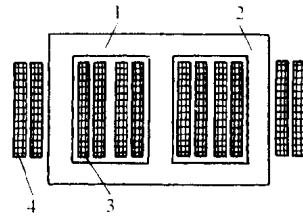


图 1-3 三相心式变压器

1—铁轭 2—铁柱 3—低压线圈 4—高压线圈

图 1-4 为单相壳式变压器的铁心及线圈，这种铁心结构的特点是铁轭不仅包围线圈的顶面和底面，而且还包围线圈的侧面，散热条件较差。其制造工艺比较复杂，使用材料较多，所以只是一些特殊变压器（如电炉变压器、小容量电源变压器），才采用这种结构型式。

根据铁柱与铁轭在装配方面的不同，铁心可分为对接式和叠接式两种。对接式铁心的叠装次序为先用铁柱和铁轭分别叠装夹紧，然后再把它们拼在一起，用特殊的夹件结构夹紧。叠装式铁心的装配是把铁柱和铁轭的钢片一层一层地交错重叠，如图 1-5 所示。为了减少装配工作量，通常用二至三片作为一层。

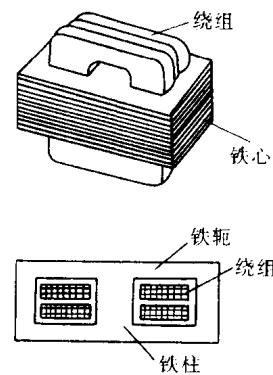


图 1-4 单相壳式变压器

由于叠接式铁心使叠片接缝错开，减小了接缝处的气隙，从而减小了励磁电流。同时，这种结构的夹紧装置简单、经济，而且可靠性高，所以国产变压器普遍采用叠接式的铁心结构。

大型变压器大都采用冷轧硅钢片作为铁心材料。这种冷轧硅钢片，沿碾轧方向有较小的

铁耗和较高的磁导率。如图 1-5 所示下料和叠装，在磁路转角处，由于磁通方向和碾轧方向成 90°，将引起铁耗增加，因此为了使磁通方向和碾轧方向基本一致，通常采用图 1-6 所示的斜切硅钢片的叠装方法。

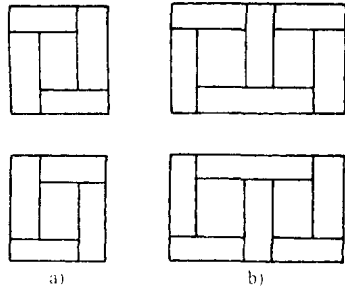


图 1-5 铁心各层硅钢片叠装法
a) 单相 b) 三相

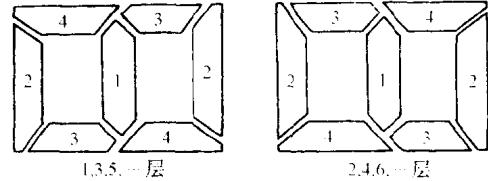


图 1-6 冷轧硅钢片铁心的叠装法示意图

在小型变压器中，铁心柱截面的形状一般采用正方形或矩形。而在大容量变压器中，为了充分利用线圈内圆的空间，一般采用阶梯形截面，如图 1-7 所示。铁心的级数随变压器的容量的增加而增多。另外，在大容量变压器中，为了改善铁心的冷却条件，常在铁心柱中开设油道，以利散热。

变压器铁轭的截面有矩形的，也有阶梯形的，如图 1-8 所示，为了减小变压器的空载电流和铁耗，在心式铁心中，铁轭截面一般比铁心柱截面大 5% ~ 10%，在大容量变压器中也有做成相等的。

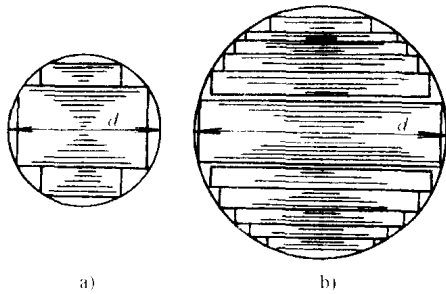


图 1-7 铁柱截面的形状
a) 小型 b) 大型

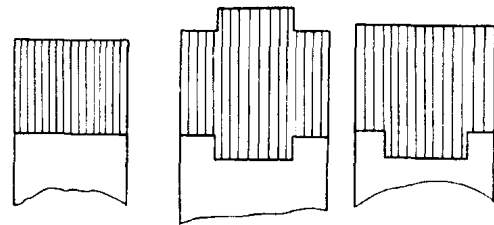


图 1-8 铁轭截面的形状

(2) 线圈 线圈是变压器的电路部分，一般用铜或铝的绝缘导线绕成。为了节省铜材，目前我国大多采用铝线。

在变压器中，接于高压电网的线圈称为高压线圈，接至低压电网的线圈称为低压线圈。高、低压线圈在铁心柱上的布置有两种。同心式的排列如图 1-2 和图 1-3 所示，高低压线圈在同一铁心柱上同心排列。为了便于线圈和铁心绝缘，通常将低压线圈靠近铁心放置。交叠式线圈的排列如图 1-9 所示。高、低压线圈沿铁心柱高度方向交叠地排列。为了减小绝缘层的厚度，通常是低压线圈靠近铁轭。这种结构主要用在壳式变压器中。

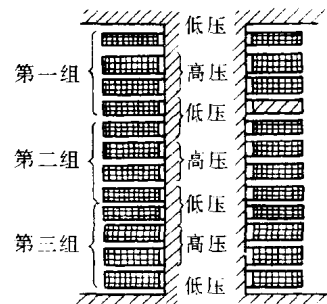


图 1-9 交叠式线圈的排列

四、变压器的额定值

按照国家标准 GB1094—96 规定，变压器在规定的运行环境和运行条件下的主要技术数据称为额定值，通常都标注在变压器的铭牌上。现分别说明如下：

(1) 额定容量 额定工作状态下变压器的视在功率，用 $V \cdot A$ 、 $kV \cdot A$ 或 $mV \cdot A$ 表示。由于变压器的效率高，故可以认为一次绕组（原称原边）、二次绕组（原称副边）的容量相等。

(2) 额定电压 变压器各绕组在空载时，额定分接下端子间电压的保证值。三相变压器的额定电压指线电压，用伏 (V) 或千伏 (kV) 表示。一次绕组额定电压 u_{1e} 是指正常运行情况下，一次绕组接线端点间应该接入的电压。而二次绕组额定电压 u_{2e} 是指一次绕组接额定电压时，二次绕组端点间的空载电压。

(3) 额定电流 变压器的额定容量除以各绕组的额定电压所计算出来的线电流值，以 A 表示。

(4) 短路电压 短路电压表示二次绕组在额定运行情况下的电压降落，用 Δu_k 表示。

(5) 额定功率 我国标准工业频率为 50Hz（有些国家则规定为 60Hz），故电力变压器的额定频率都是 50Hz。

此外，变压器的铭牌上还标注有：联结组标号；相数 m ；运行方式；冷却方式。其它还有运输安装数据，以使用户运输和使用时参考。

第二节 变压器的空载运行

变压器的一次绕组接在额定电压和额定频率的电网上，当二次绕组开路时的运行状态就叫做变压器的空载运行。空载运行是变压器的一种极限运行状态。在研究变压器的运行原理时，一般从分析空载运行着手。

一、变压器空载时的物理状况

图 1-10 所示为单相变压器空载运行时的示意图。二次绕组 ax 开路，当一次绕组的 AX 接到电压为 u_1 的变流电网上时，一次绕组中便有电流 i_0 流过，这电流称为变压器的空载电流。空载电流产生空载磁动势 $F_0 = N_1 i_0$ ，建立空载时的磁场。为了便于研究，把这个磁场等效为两部分磁通。一部分磁通 Φ 沿铁心闭合，同时与一次、二次绕组相交链，称为主磁通或互感磁通。另一部分磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 主要沿非铁磁材料（变压器油或空气）而闭合，它仅与一次绕组相交链，称为一次绕组的漏磁通，约为总磁通的 0.1% ~ 0.2%。

虽然主磁通 Φ 和漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 都是由空载电流 i_0 产生的，但两者性质却不同。由于铁磁材料存在饱和现象，主磁通 Φ 与建立它的电流 i_0 之间的关系是非线性的。漏磁通沿非铁磁材料构成的路径而闭合，它与电流 i_0 是线性关系。主磁通在一次、二次绕组内感应电动势，如果二次绕组接上负载，则在二次绕组电动势的作用下向负载输出电功率。所以主磁通起着传递能量的媒介作用，而漏磁通仅在一次绕组内感应电动势，只起电压降的作用，不能传递能量。

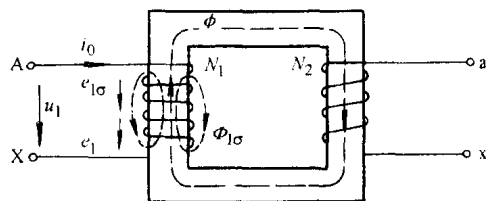


图 1-10 单相变压器空载运行时的示意图

二、变压器中各电磁量假定正方向的惯例

变压器中各电压、电流、磁通和感应电动势的大小和方向都是随时间而变化的。为了对电路进行严格的分析或作定量计算，必须规定出各个电磁量的假定正方向。

从原理上讲，假定正方向是可以任意选取的，但电磁现象的规律是一定的。因此描述电磁规律的方程式必须与选定的正方向相配合，否则不能正确地表示出真实的规律。这就是说，假定的正方向不同，描述变压器电磁关系的方程式和相量图也就不同。为了用同一方程式表示各种电磁机构中同一电磁现象，一般采用习惯上通用的假定正方向的方法，就是惯例。变压器中各电磁量的正方向习惯上按下面的原则规定（如图 1-10 所示）。

电网电压 u_1 的正方向为一次绕组的首端（A 端）指向尾端（X 端）。一次侧电流 i_1 选取自 u_1 的假定正极性端（即一次绕组的首端 A）流入变压器为正方向，这个惯例叫作“电动机惯例”。因为当 u_1 和 i_1 同时为正或同时为负时，功率将自电网流入变压器。

主磁通 Φ 和一次绕组漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 的假定正方向，应与产生它的电流 i_1 符合右手螺旋定则。因此，在假定磁通的正方向时必须注意绕组的绕法。

一次绕组中由于主磁通 Φ 的交变而产生的感应电动势 e_1 和一次绕组漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 产生的漏磁电动势 $e_{1\sigma}$ 正方向假定，与 i_1 的正方向相同。

二次绕组中电流 i_2 的正方向同样按右手螺旋法则确定，由它产生的磁通方向与主磁通 Φ 的正方向一致。二次绕组感应电动势 e_2 的正方向与 i_2 的正方向相同。从二次绕组输出端的外电路来看，当 u_2 与 i_2 同时为正或同时为负时，功率是自变压器输出。所以说对二次绕组中电磁量正方向的规定则是采用了“发电机惯例”。因此， u_2 的正方向应该从 x 点指向 a 点。

当然，惯例不同于规律，如果惯例改变，那么方程式和相量图也应相应地改变。

三、变压器空载时的电动势和电压平衡方程式

根据电磁感应定律，当磁通 Φ 和 $\Phi_{1\sigma}$ 交变时，会分别在它们所交链的线圈内感应出电动势。在上面假定正方向下，有

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ e_2 &= -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \\ e_{1\sigma} &= -N_1 \frac{d\Phi_{1\sigma}}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中 e_1 ——主磁通 Φ 在一次绕组内感应的一次侧电动势（或主电动势）的瞬时值；

e_2 ——主磁通 Φ 在二次绕组内感应的互感电动势的瞬时值；

$e_{1\sigma}$ ——漏磁通在一次绕组内感应的漏感电动势的瞬时值；

N_1 ——一次绕组的匝数；

N_2 ——二次绕组的匝数。

如果主磁通按正弦规律变化，即

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (1-2)$$

其中 Φ_m 为磁通的最大值。于是有

$$\begin{aligned}
 e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 \frac{d}{dt} (\Phi_m \sin \omega t) = -N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t \\
 &= N_1 \omega \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = E_{1m} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)
 \end{aligned} \quad (1-3)$$

式中 $E_{1m} = N_1 \omega \Phi_m$ ——一次绕组电动势 e_1 的最大值。

由式 (1-3) 可以看出, 当主磁通按正弦规律变化时, 一次绕组中的感应电动势也按正弦规律变化, 但感应电动势在相位上滞后于主磁通 90° 。

根据 E_{1m} 的表达式可以推导出, 一次绕组感应电动势的有效值 E_1 为

$$E_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} E_{1m} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 2\pi f_1 N_1 \Phi_m = 4.44 f_1 N_1 \Phi_m \quad (1-4)$$

如果用相量表示, 则为

$$\dot{E}_1 = -j4.44 f_1 N_1 \dot{\Phi}_m \quad (1-5)$$

其中 f_1 为电网电压的频率。

下面来推导一次绕组中的漏感电动势。因为漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 的路径主要是由非磁性介质所组成 (变压器油、空气、铜或铝以及绝缘材料等), 其导磁系数是恒定的, 所以漏磁链与产生此漏磁链的电流成正比 (比例系数 $L_{1\sigma}$ 称为绕组的漏感系数, 简称漏感)。即

$$\psi_L = L_{1\sigma} i_0 \quad (1-6)$$

于是, 绕组的漏感电动势为

$$e_{1\sigma} = -\frac{d\psi_L}{dt} = -L_{1\sigma} \frac{di_0}{dt} \quad (1-7)$$

如果电流 i_0 呈正弦变化, 即

$$i_0 = I_{0m} \sin \omega t$$

则

$$\begin{aligned}
 e_{1\sigma} &= -L_{1\sigma} \frac{d}{dt} (I_{0m} \sin \omega t) = -L_{1\sigma} \omega I_{0m} \cos \omega t \\
 &= \omega L_{1\sigma} I_{0m} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = E_{1\sigma m} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)
 \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中 $E_{1\sigma m} = \omega L_{1\sigma} I_{0m}$ 为漏感电动势的最大值。由此可见, 漏感电动势与 i_0 同频率, 但相位滞后 90° , 其有效值为

$$E_{1\sigma} = \frac{E_{1\sigma m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega L_{1\sigma} \sqrt{2} I_0}{\sqrt{2}} = \omega L_{1\sigma} I_0 = x_{1\sigma} I_0 \quad (1-9)$$

如果用相量表示, 则

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j_0 x_{1\sigma} \dot{I}_0 \quad (1-10)$$

式中 $x_{1\sigma} = \omega L_{1\sigma}$ 是与漏磁通相对应的一次绕组的漏电抗, 它是一个常数, 不随电流的大小而改变。

根据以上分析, 按图 1-10 所规定的一次绕组中各物理量的正方向, 利用电路定律, 沿电流 i_0 方向可列出变压器空载时一次绕组的电动势平衡方程式为

$$u_1 = - (e_1 + e_{1\sigma}) + i_0 r_1 \quad (1-11)$$

式中 r_1 ——一次绕组的电阻。

当上述各物理量均按正弦规律变化时，上式可写成相量形式：

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= - (\dot{E}_1 + \dot{E}_{1\sigma}) + \dot{I}_0 r_1 \\ \dot{U}_1 &= - \dot{E}_1 + \dot{I}_0 r_1 + j \dot{I}_0 x_{1\sigma} = - \dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \end{aligned} \quad (1-12)$$

式中 $Z_1 = r_1 + jx_{1\sigma}$ 为一次绕组的漏阻抗，显然也是常数。

对于变压器来说，空载电流所引起的漏阻抗压降很小，因此在分析变压器空载运行时，可忽略漏阻抗压降，因而有

$$\dot{U}_1 \approx - \dot{E}_1 = j4.44f_1 N_1 \dot{\Phi}_m \quad (1-13)$$

这表明，在忽略漏阻抗压降的情况下，外加电压 u_1 仅由电动势 e_1 来平衡，即任何瞬间外施电压 u_1 和主电动势 e_1 两者大小相等、方向相反。因此，常把一次绕组的电动势 e_1 称为反电动势。

式 (1-13) 还表明，变压器铁心中主磁通的大小主要决定于电网电压 u_1 和频率 f_1 ，当外施电压 u_1 和电网频率 f_1 不变时， Φ_m 基本不变，磁路的饱和状态也基本上不变，产生磁通 Φ_m 的励磁磁动势也大致恒定。这是分析变压器空载运行时所获得的一个极为重要的概念。

同理，可求出二次绕组的感应电动势为

$$e_2 = E_{2m} \sin (\omega t - 90^\circ) \quad (1-14)$$

$$\text{其最大值} \quad E_{2m} = \omega N_2 \Phi_m \quad (1-15)$$

$$\text{有效值} \quad E_2 = 4.44 f_1 N_2 \Phi_m \quad (1-16)$$

$$\text{相量式} \quad \dot{E}_2 = -j4.44 f_1 N_2 \dot{\Phi}_m \quad (1-17)$$

由于空载时二次绕组内没有电流，所以二次绕组的端电压就等于其感应电动势，即

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 \quad (1-18)$$

四、变压器的变比（简称变比）

在变压器中，一次绕组电动势 E_1 与二次绕组电动势 E_2 之比称为变压器的变比，用符号 K 表示，即

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44 f_1 N_1 \Phi_m}{4.44 f_1 N_2 \Phi_m} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-19)$$

此式表明，变压器的变比等于一次、二次绕组的匝数比。当变压器空载运行时，可近似地用一次、二次绕组电压之比来表示变压器的变化，即

$$K = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \quad (1-20)$$

但必须注意，对于三相变压器来说，变比是指相电动势的比值。式 (1-20) 表明，变压器之所以具有改变电压的性能就在于匝数比不同。

五、变压器的空载电流

变压器空载运行时一次绕组中流过的电流 i_0 称为空载电流。空载电流一方面建立空载时的主磁通，另一方面还要补偿空载时的变压器损耗。前者是仅仅起磁化作用的励磁电流，

不消耗功率。而后者则对应于铁心中的磁滞损耗和涡流损耗，消耗有功功率。据此，通常把变压器的空载电流 i_0 分为励磁电流 i_m 和铁耗电流 i_{Fe} 两个分量。在变压器中，由于空载损耗较小， $i_{Fe} \ll i_m$ ，故可近似地用 i_m 来确定空载电流的性质。

在忽略空载损耗时，变压器的空载电流 i_0 纯属建立磁场的无功电流 i_m 。由于导磁材料（硅钢片）磁化曲线的非线性关系，在一定的电压下，励磁电流的大小和波形取决于铁心的饱和程度，即取决于铁心磁通密度 B_m 的大小。当磁路不饱和时，其 i_m 和 Φ 成线性关系，那么磁通按正弦规律变化，励磁电流 i_m 也按正弦规律变化，当磁通饱和时， i_m 和 Φ 的关系即为非线性的了， i_m 的增长比 Φ 的增长来得快。

从式 (1-13) 已经知道，当外加电压 u_1 为正弦波时，和它相平衡的电动势 e_1 以及感应这一电动势的主磁通 Φ 也应是正弦波，可是，由于铁心的饱和关系，使励磁电流的波形发生畸变，不是正弦波而变成尖顶波了。铁心的饱和程度愈高，励磁电流的波形畸变也就愈厉害，这可以从图 1-11 中看得更加清楚，当磁通为正弦波时，由于铁心的饱和现象，励磁电流 $i_m = f(\omega t)$ 不是正弦波，而是一个尖顶波。采用谐波分析的方法可知除基波 i_{m1} 之外，以三次谐波的幅值为最大，如图 1-12 所示。这就是说，在变压器中，为了建立正弦波的主磁通，由于导磁材料磁化曲线的非线性关系，空载电流中必须包含三次谐波分量。从图 1-12 中还可看到，在忽略磁滞的影响下，励磁电流的基波分量 i_{m1} 和主磁通 Φ 同相位，它比外加电压滞后 90° ，是一种无功电流。

实际上，变压器铁心中总存在着磁滞和涡流损耗（铁损），而且磁滞损耗是主要的，它占铁耗的大部分。当考虑磁滞损耗不考虑涡流损耗时，这种情况下的空载电流 i_0 和主磁通 Φ 已不是同相位了，而是 i_0 超前于 Φ 一个 α_m 角， α_m 角称为磁滞角。因此考虑磁滞损耗后，空载电流 i_0 可以分解为与磁通 Φ 同相的励磁分量 i_m 以及比磁通 Φ 超前 90° 的分量 i_c 。 i_c 超前磁通 90° ，即和反电动势 e_1 反相位，而和外加电压 u_1 同相位，因而它是空载电流中的有功分量，这说明一次绕组从电网吸取了有功功率，用以补偿磁滞损耗。

由于变压器铁心中还有涡流损耗，因此空载电流中还有一个相应的有功分量 i_w 。而涡流损耗本质上是电阻性损耗，所以， i_c 和 i_w 应是同相位，可把二者叠加成为空载电流的有功分量 i_{Fe} （即铁耗分量）。这样，空载电流可表示为

$$i_0 = i_m + i_{Fe} \quad (1-21)$$

从上面的分析中可以看出，励磁电流 i_m 或空载电流 i_0 都不是正弦波，但在工程上为了便于测量和计算。常采用等效正弦波电流来代替原来的空载电流 i_0 。等效正弦波电流必须满足以下条件：a. 频率等于 i_0 的频率；b. 有效值 I_0 等于 i_0 的有效值；c. 等效正弦波的相量

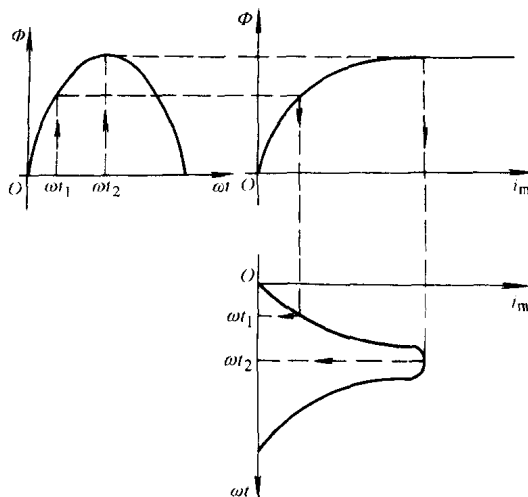


图 1-11 图解法求励磁电流波形

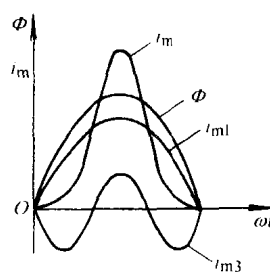


图 1-12 励磁电流波形及其谐波

\dot{i}_0 的相位应这样选取, 使 \dot{i}_0 与 \dot{E}_1 相作用时从电网吸收的功率等于铁耗。这样即可把相量 \dot{i}_0 完全确定下来, 也可将其分解为励磁分量 \dot{i}_m 和有功分量 \dot{i}_{Fe} 。前者与 $\dot{\Phi}_m$ 同相位, 即为励磁电流 i_m 的等效正弦波的有效值。后者超前主磁通 ($\dot{\Phi}_m$) 90° (即与 \dot{E}_1 反相位), 是铁耗分量 i_{Fe} 的有效值。从而可得

$$\dot{i}_0 = \dot{i}_m + \dot{i}_{Fe}$$

和

$$I_0 = \sqrt{I_m^2 + I_{Fe}^2}$$

六、变压器空载时的相量图及等效电路

变压器空载时, 以相量形式表示的电动势平衡方程式为

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + (-\dot{E}_{1\sigma}) + \dot{i}_0 r_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{i}_0 x_{1\sigma} + \dot{i}_0 r_1 \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{i}_0 (r_1 + jx_{1\sigma}) = -\dot{E}_1 + \dot{i}_0 Z_1 \end{aligned} \quad (1-22)$$

据此可画出相应的相量图, 如图 1-13 所示。

对于外施电压 \dot{U}_1 来说, 电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$ 的作用可看作是电流 \dot{i}_0 流过漏电抗 $x_{1\sigma}$ 时所引起的电压降, 即 $\dot{E}_{1\sigma} = -j\dot{i}_0 \omega L_{1\sigma} = -j\dot{i}_0 x_{1\sigma}$ 。同样, 对主磁通感应电动势 \dot{E}_1 的作用, 也可类似地引入一个参数来处理。但考虑到主磁通在铁心中引起铁耗, 故不能单纯的引入一个电抗, 而应引入一个阻抗 Z_m 把 \dot{E}_1 和 \dot{i}_0 联系起来, 这时电动势 \dot{E}_1 的作用可看作是电流 \dot{i}_0 流过 Z_m 产生的阻抗压降, 即

$$-\dot{E}_1 = \dot{i}_0 Z_m \quad (1-23)$$

其中 $Z_m = r_m + jx_m$ 称为变压器励磁阻抗; r_m 是反映铁心中损耗的一个等效电阻, 即 $I_0^2 r_m$ 等于铁耗的大小。根据上式可以获得图 1-14a 所示的等效电路。

根据电压平衡方程式

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{i}_0 Z_1$$

可以求得

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{i}_0 Z_1 = \dot{i}_0 Z_m + \dot{i}_0 Z_1 = \dot{i}_0 (Z_m + Z_1) \quad (1-24)$$

与此相应的等效电路如图 1-14b 所示。从图可见, 空载运行的变压器, 可以看成是由两个阻抗不同的线圈串联而成的电路。

由于铁心存在饱和现象, x_m 和 r_m 都是随着外施电压的增加而减小的。但在工程实践中, 由于外施电压 U_1 均为额定值, 变化不大, 故作定量计算时, 可以认为 Z_m 基本上保持不变。

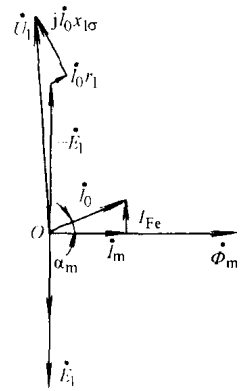


图 1-13 考虑漏磁通时变压器的空载相量图

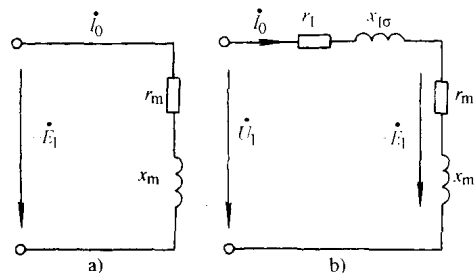


图 1-14 变压器空载时的等效电路

第三节 变压器的负载运行

变压器的一次绕组接至具有额定电压的交流电网，而二次绕组接上负载阻抗 Z_L 时的运行情况，称为变压器的负载运行。

一、变压器负载运行时的物理现象

当变压器的二次绕组上接上负载阻抗 Z_L ，如图 1-15 所示，则二次绕组中有电流 \dot{I}_2 流过，其方向与 \dot{E}_2 相同，产生磁动势 $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 N_2$ 。从电磁关系上来说，变压器就从空载运行过渡到了负载运行。这时，由于一次绕组磁动势和二次绕组磁动势都同时作用在同一磁路上，磁动势 \dot{F}_2 的出现，使主磁通趋于改变，随之电动势 \dot{E}_1 和 \dot{E}_2 也发生变化，从而打破了原来的平衡状态。在一定的电网电压 \dot{U}_1 下， \dot{E}_1 的改变将导致一次绕组中的电流变化，从空载时的 \dot{I}_0 改变为负载时的 \dot{I}_1 。这时一次绕组中的电流 \dot{I}_1 和 \dot{I}_2 所产生的磁动势 $\dot{I}_1 N_1$ 和 $\dot{I}_2 N_2$ 构成变压器铁心中的合成磁动势 $\dot{F}_m = \dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2$ 。 \dot{F}_m 建立负载时的主磁通 Φ （其数值和空载时稍有不同）。由它感应的电动势 \dot{E}_1 能够满足 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$ 这一条件。磁通 Φ 在二次绕组中感应的电动势 \dot{E}_2 能使二次绕组中的电流 \dot{I}_2 保持为某一值，于是变压器中的电磁关系达到一种新的平衡状态。

前已述及，当 u_1 、 f_1 不变时，主磁通 Φ_m 应保持不变。为了保持主磁通 Φ_m 不变，一次绕组中的电流应增加一个分量 \dot{I}_{1L} 以平衡二次绕组中电流 \dot{I}_2 的作用，并需使二次绕组电流增量 \dot{I}_{1L} 所产生的磁动势 $\dot{I}_{1L} N_1$ 恰好与二次绕组的磁动势 $\dot{I}_2 N_2$ 相抵消，即

$$\dot{I}_{1L} N_1 + \dot{I}_2 N_2 = 0$$

或

$$\dot{I}_{1L} = -\dot{I}_2 \frac{N_2}{N_1} \quad (1-25)$$

而且 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ ， $\dot{E}_2 = \dot{E}_1 N_2 / N_1$ ，因而可以得到

$$\dot{U}_1 \dot{I}_{1L}^* \approx (-\dot{E}_1) \left(-\dot{I}_2^* \frac{N_2}{N_1} \right) = \dot{E}_2 \dot{I}_2^* \quad (1-26)$$

此式表明，负载时一次绕组从电网额外输入的一部分复功率传递到二次绕组，变为二次绕组输出的复功率，这就是变压器通过电磁感应进行能量传递的原理。由这里还可看出，变压器负载运行时，通过电磁感应关系，一次、二次绕组的电流是紧密地联系在一起。二次绕组电流的增加或减小，必然同时引起一次绕组中电流的增加或减小，相应地，二次绕组输出的功率增加或减小时，一次绕组从电网吸取的功率必然同时增加或减小。

二、变压器负载运行时的磁动势平衡方程式

在变压器中，由于一次绕组磁动势 F_1 和二次绕组磁动势 F_2 都作用在同一磁路上，如图 1-15 所示，按全电流定律可得变压器负载运行时的磁动势方程式为

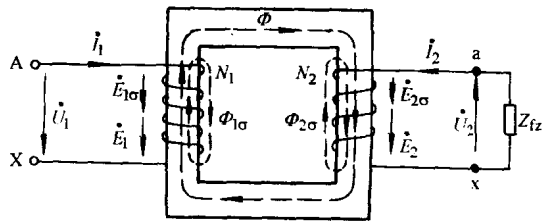


图 1-15 变压器负载运行时的示意图

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_m \quad (1-27)$$

这就是说，变压器负载运行时，合成磁动势 \dot{F}_0 是一次绕组磁动势 \dot{F}_1 和二次绕组磁动势 \dot{F}_2 的相量和，负载时的主磁通是由合成磁动势 F_m 建立的。如果用一次绕组的电流分量 \dot{i}_m 所产生的磁动势来表征合成磁动势，即 $\dot{F}_m = \dot{i}_m N_1$ ，则磁动势方程可写成

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{i}_m N_1 \quad (1-28)$$

式中 \dot{i}_m ——励磁电流。

将上式两边同时除以 N_1 ，则得

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 \frac{N_2}{N_1} = \dot{i}_m$$

$$\text{或} \quad \dot{I}_1 = \dot{i}_m + \left(-\frac{\dot{I}_2}{K} \right) = \dot{i}_m + \dot{I}_{1fz} \quad (1-29)$$

其中 $I_{1fz} = -I_2/K$ 称为一次绕组电流的负载分量。

上式表明，变压器负载运行时，一次绕组电流便由 \dot{I}_0 增加为 \dot{I}_1 ，它由两个分量所组成，一个是励磁分量 \dot{i}_m ，用以建立变压器负载运行时所需要的主磁通；另一个是负载分量 \dot{I}_{1fz} ，它产生磁动势 $\dot{I}_{1fz} N_1$ ，用以补偿二次绕组磁动势 $\dot{I}_2 N_2$ 对主磁通的影响，因此有

$$\dot{I}_{1fz} N_1 + \dot{I}_2 N_2 = 0 \quad (1-30)$$

这就是变压器负载运行时的磁动势平衡方程式，在忽略励磁电流时，式中负载分量 \dot{I}_{1fz} 可用 \dot{I}_1 来代替。另外还需要指出，由于变压器一次绕组的漏抗压降很小，故从空载到额定负载时， E_1 的变化很小，与之相对应的主磁通和产生主磁通的合成磁动势 F_0 变化也很小，所以负载时的励磁电流 I_m 与空载电流 I_0 相差很小，可以近似地认为相等。

三、变压器负载运行时的电动势平衡方程式

变压器负载运行时，除了主磁通在一次、二次绕组中感应的电动势 \dot{E}_1 和 \dot{E}_2 外，还有仅与一次绕组交链的一次漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 所感应的一次漏磁电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$ ，和仅与二次绕组交链的二次漏磁通 $\Phi_{2\sigma}$ 所感应的二次漏磁电动势 $\dot{E}_{2\sigma}$ 。而且，一次、二次绕组漏磁通所走的路径大部分是非铁磁物质，不受铁心饱和的影响，只与产生它的磁动势（或电流）成正比，故漏磁电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$ 可用漏抗压降 $-j\dot{I}_1 x_{1\sigma}$ 来代替，其中 $x_{1\sigma}$ 是一次绕组的漏电抗，是一个常数。同理，二次绕组漏磁电动势 $\dot{E}_{2\sigma}$ 也可用漏抗压降 $-j\dot{I}_2 x_{2\sigma}$ 来代替，其中 $x_{2\sigma}$ 为二次绕组的漏电抗，也是一个常数。另外，一次绕组还有电阻 r_1 ，二次绕组还有电阻 r_2 ，于是按图 1-15 中各物理量的正方向，利用电路定律，便可写出变压器负载运行时一次、二次绕组的电动势平衡方程式如下

$$\dot{U}_1 = -(\dot{E}_1 + \dot{E}_{1\sigma}) + \dot{I}_1 r_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_{1\sigma} = -\dot{E} + \dot{I}_1 Z_1 \quad (1-31)$$

$$\dot{U}_2 = (\dot{E}_2 + \dot{E}_{2\sigma}) - \dot{I}_2 r_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 - j\dot{I}_2 x_{2\sigma} = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \quad (1-32)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_{1z} \quad (1-33)$$