

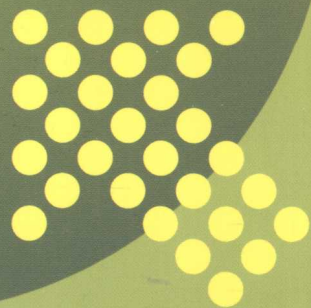
21世纪高等学校规划教材



DIANJI YUANLI JI SHIXUN

电机原理及实训

王爱霞 王 蕾 主 编
王金亮 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

21世纪高等学校规划教材



DIANJI YUANLI JI SHIXUN

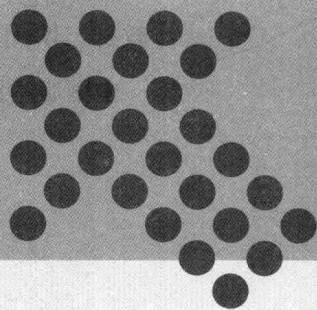
电机原理及实训

主 编 王爱霞 王 蕾

副主编 王金亮

编 写 孙善华

主 审 李光友



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是 21 世纪高等学校规划教材。全书共分八个学习情境，主要包括变压器，感应电动机，同步电机，直流电机结构原理、运行及实训。以学习情境展开，将相关联的知识点、技能点串接在一起。全书着重讲清物理概念，根据电力生产实践的需要，突出电机的原理及实训。

本书主要作为高职高专院校电气工程类、继电保护类、自动化类、机电设备类专业教材，也可供电力生产的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机原理及实训/王爱霞，王蕾主编. —北京：中国电力出版社，2011.12

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 2454 - 1

I. ①电… II. ①王… ②王… III. ①电机学—高等学校—教材 IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 257558 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 12 月第一版 2011 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.25 印张 290 千字

定价 21.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

电机原理及实训课程是电气类专业的一门核心课程,是理论和实践并重的课程。根据电机课程教学改革的要求,以服务为宗旨,以必需和够用为原则,以培养学生能力为目标,结合电机原理及实训课程的课程标准,进行了知识与技能一体化的教学设计,编写了《电机原理及实训》一书,该书具有以下特点:

(1) 创新。本书以教学情境为章节展开,以专业实训为切入点,将相关联的知识点、技能点串接在一起,包含了变压器原理及运行特性、同步发电机运行原理及特性等八个学习情境,每个学习情境有情境摘要、必备知识、实验训练、思考题与习题。将电机专业知识和操作技能融入各个学习情境中,保证了讲授、示范、训练、指导同步进行,为该课程教、学、做一体化教学模式的开展进行了大胆的尝试。

(2) 简练。本书本着必需和够用为度,以讲清概念、强化应用为重点,加强针对性和实用性。根据电力生产实践需要,降低电机理论分析的深度,简化分析过程,突出电机的原理及实训。

(3) 灵活。本书是电机原理及实训课程体系的一部分,它与传统的课程教材有很大区别。每一个学习情境具有一定的独立性和完整性,可集中教学,也可根据教学情况选取某些学习情境分散教学,以适应不同的教学对象。

本书由山东电力高等专科学校的王爱霞老师和王蕾老师担任主编,负责编写组织、统稿和定稿。其中学习情境1~4由王蕾老师编写;学习情境5~6、内容提要及前言由王爱霞老师编写;学习情境7~8由王金亮老师编写。各学习情境中的思考题与习题由孙善华老师编写。

本书由山东大学电气工程学院李光友教授担任主审,李教授在百忙中对书稿进行了认真的审查,提出了许多宝贵的意见,在此我们表示衷心地感谢。

由于编者的水平有限,并且还是在教学改革过程中编写,难免会有不足之处,恳请读者批评、指正,并提出宝贵意见,以便修订时改进。

编 者

2011年10月

目 录

前言

学习情境 1 变压器的基本知识、基本原理及运行特性	1
1.1 变压器的基本结构和分类	1
1.2 变压器的基本工作原理及铭牌数据	4
1.3 变压器的空载运行	5
1.4 变压器的负载运行	10
1.5 变压器的参数测定及运行性能	14
1.6 三相变压器的磁路、联结组、电动势波形	23
1.7 特殊变压器的运行与使用	29
1.8 变压器的参数测定	37
1.9 三相变压器的联结组别判定	39
思考题与习题	43
学习情境 2 变压器的并联运行、不对称运行	45
2.1 变压器的并联运行	45
2.2 对称分量法	49
2.3 各相序阻抗和等值电路	50
2.4 三相变压器 Yyn 连接时的单相运行	52
2.5 三相变压器的并联运行	55
思考题与习题	57
学习情境 3 感应电动机的基本知识、基本原理及运行特性	59
3.1 感应电动机的基本结构	59
3.2 感应电动机的基本工作原理及铭牌数据	61
3.3 转子静止时的感应电动机	64
3.4 转子旋转时的感应电动机	68
3.5 感应电动机的功率、转矩及工作特性	75
3.6 感应电动机的工作特性的测定	83
思考题与习题	86
学习情境 4 感应电动机的起动和调速	89
4.1 感应电动机的起动性能及特点	89
4.2 感应电动机的起动方法	90
4.3 感应电动机的调速方法	92
4.4 三相感应电动机的起动和调速	95

思考题与习题	98
学习情境 5 同步电机的基本知识、同步发电机运行原理及特性	99
5.1 同步电机的基本结构	99
5.2 同步电机的励磁方式、铭牌数据	101
5.3 同步发电机的空载运行	103
5.4 对称负载时的电枢反应	105
5.5 漏抗和同步电抗	108
5.6 同步发电机的电动势方程式和相量图	109
5.7 同步发电机短路特性	113
5.8 同步发电机零功率因数负载特性	114
5.9 同步发电机的外特性和电压变化率	117
5.10 三相同步发电机的运行特性	119
思考题与习题	124
学习情境 6 同步发电机并联运行、不对称运行	126
6.1 并联运行的条件和方法	126
6.2 同步发电机的功率和转矩方程式、稳态功角特性	129
6.3 同步发电机与大电网并联运行时有功功率调节和静态稳定	132
6.4 无功功率的调节和 V 形曲线	134
6.5 同步发电机不对称运行时的参数和等值电路	137
6.6 同步发电机的不对称稳态短路	139
6.7 负序和零序参数的实验测定及不对称运行的影响	140
6.8 同步发电机与大电网并联运行时有功、无功调节	142
6.9 同步发电机参数测定	147
思考题与习题	150
学习情境 7 直流电机的基础知识与固有机机械特性	153
7.1 直流电机的工作原理	153
7.2 直流电机的基本结构	155
7.3 直流电机的磁场	158
7.4 直流电机的电枢反应	159
7.5 直流电机的电动势、电磁转矩与电磁功率	160
7.6 直流电动机的励磁方式与转向	162
7.7 直流电动机的固有机机械特性	163
7.8 直流电动机的固有机机械特性实验	165
思考题与习题	167
学习情境 8 直流电动机的调速	169
8.1 直流电动机的人为机械特性	169
8.2 直流电动机的起动	171

8.3 他励直流电动机的调速 174

8.4 直流电动机的调速与负载类型配合 177

8.5 直流电动机的调速实验 180

思考题与习题..... 183

参考文献..... 185

学习情境 1 变压器的基本知识、基本原理及运行特性

情境摘要

变压器是一种静止的电气设备，它利用电磁感应原理，把一种电压等级的交流电能转换成频率相同的另一种电压等级的交流电能。变压器是电力系统中重要的电气设备，它的用途非常广泛。

本学习情境研究一般用途的电力变压器，包括变压器的结构、变压器运行原理和特性、三相变压器的联结组别、三绕组变压器、自耦变压器和仪用互感器。



必备知识

1.1 变压器的基本结构和分类

1.1.1 基本结构

变压器中最主要的部件是铁心和绕组，铁心和绕组装配在一起称为器身。油浸式电力变压器的器身放在油箱里，油箱中注满了变压器油。油箱外装有散热器，油箱上部还装有储油柜、安全气道、绝缘套管等，图 1-1 是油浸式电力变压器结构图。

一、铁心

铁心是变压器中耦合磁通的主磁路，为提高磁路的导磁性能、减小铁心损耗，铁心一般用含硅量约 4%、厚度为 0.35mm、两面涂有绝缘漆的硅钢片叠装而成。

按照铁心结构的不同，变压器铁心分壳式和心式两种。图 1-2 为壳式变压器，壳式结构机械强度好，但制造复杂，铁心用材较多。心式变压器如图 1-3 所示，结构简单，绕组的装配及绝缘比较容易，国产电力变压器一般采用心式结构。

为了减小接缝间隙以减小励磁电流，变压器的铁心叠片一般采用交错式叠法，使相邻层的接缝错开。热轧硅钢片铁心叠片次序如图 1-4 所示。目前，大容量变压器多采用高磁导率、低损耗的冷轧硅钢片。冷轧硅钢片顺碾压方向导磁性能好，为此采用斜接缝，以进一步减少励磁电流及转

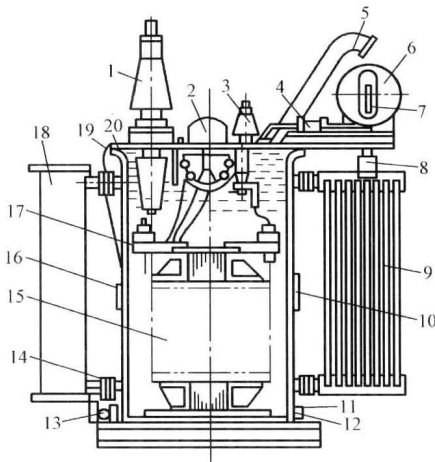


图 1-1 油浸式电力变压器结构

- 1—高压套管；2—分接开关；3—低压套管；4—气体继电器；
5—安全气道（防爆管）；6—油枕（储油柜）；7—油位计；
8—呼吸器（吸湿器）；9—散热器；10—铭牌；11—接栓；
12—油样活门；13—放油阀门；14—阀门；15—绕组（线圈）；16—信号温度计；17—铁心；18—净油器；
19—油箱；20—变压器油

角处的附加损耗。铁心的交叠装配如图 1-5 所示。

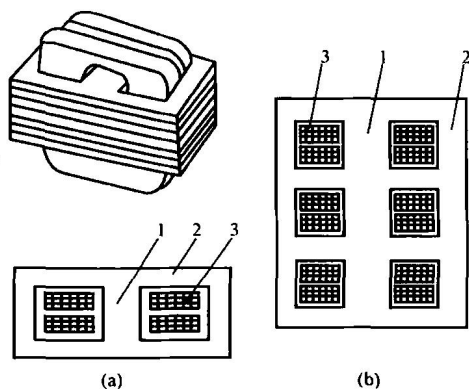


图 1-2 壳式变压器铁心和绕组

(a) 单相; (b) 三相

1—铁心柱; 2—铁轭; 3—绕组

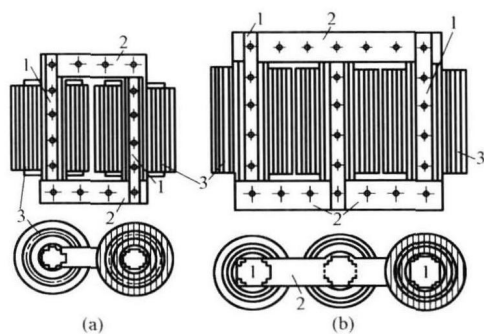


图 1-3 心式变压器铁心和绕组

(a) 单相; (b) 三相

1—铁心柱; 2—铁轭; 3—绕组

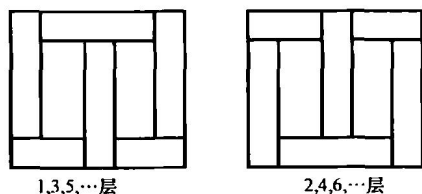


图 1-4 铁心交叠装配图

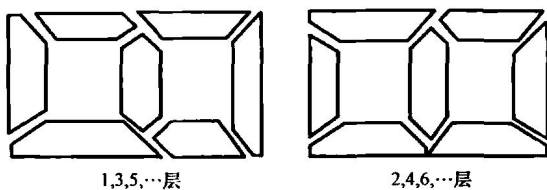


图 1-5 冷轧硅钢片的叠装法

二、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或铝导线绕制而成, 为了便于制造并使其具有良好的机械性能, 绕组一般做成圆筒形。

根据高、低压绕组的相对位置, 绕组可分为同心式和交叠式两种。同心式绕组是高、低压绕组同心套在铁心柱上, 如图 1-6 所示。为了绝缘方便和高压侧易与分接开关连接, 低压绕组装在内侧, 高压绕组装在外侧。这种绕组结构简单, 制造方便, 使用最为普遍。同心式绕组有几种不同绕制方法, 分为圆筒式、螺旋式、连续式、纠结式等。同心式绕组结构简单, 制造方便, 电力变压器大部分采用这种结构。交叠式绕组是高、低压绕组沿铁心柱高度方向交叠地排列, 为减小绝缘距离, 通常低压绕组靠近铁轭, 如图 1-7 所示。这种结构机械强度好, 引出线布置方便, 且漏抗小, 易于构成多路并联电路, 多用于低电压大电流的电焊、电炉变压器及壳式变压器中。

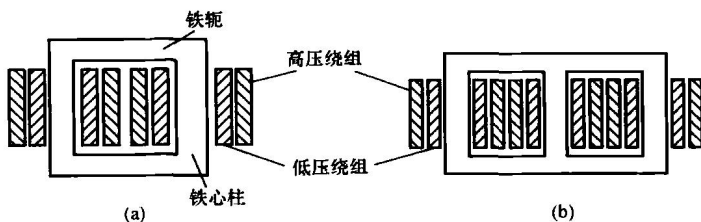


图 1-6 同心式绕组

(a) 单相变压器; (b) 三相变压器

三、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，横断面一般为椭圆形，这样可使油箱有较高的机械强度，且需油量较少。为了增强冷却效果箱壁上焊有散热管或装设散热器。油箱分平顶油箱和拱顶油箱两种，前者多用于 6300kVA 及以下的变压器，后者用于 8000kVA 及以上的变压器。

变压器油有两个作用：一是起加强绝缘作用；二是通过对流作用加强散热。变压器油为矿物油，由石油分馏得来。在选用变压器油时，应注意它的一般性能，要求介电强度高、着火点高、黏度小、水分和杂质含量低，其性能指标应符合国家标准。

四、其他附件

(一) 储油柜

储油柜水平地安装在油箱的上部，用连通管与油箱接通。它使油面升降限制在储油柜中，可减少油受潮和氧化的程度。此外，储油柜注入变压器油，还可防止气泡进入变压器内，如图 1-8 所示。

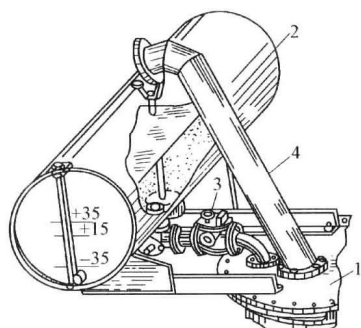


图 1-8 储油柜和安全气道

1—油箱；2—储油柜；
3—气体继电器；4—安全气道

(二) 安全气道

安全气道又称防爆管，是一根钢质圆管，如图 1-8 所示。其下部与油箱连通，顶端出口处封有一块玻璃或酚醛薄膜片。当变压器内部发生严重故障时，产生大量气体，油箱内压力迅速升高，导致油和气体冲破玻璃或酚醛薄膜片向外喷出，释放压力，以免油箱受到强大压力而爆裂。近年来生产的变压器已采用压力释放阀代替安全气道。当变压器内部发生故障，压力升高时，压力释放阀动作并接通触点报警。

(三) 气体继电器

气体继电器安装在储油柜与油箱之间的连接管道中（见图 1-8 中 3）。当变压器内部发生故障产生气体或油箱漏油使油面下降时，根据油面下降至不同的位置发出报警信号或发出保护装置动作信号，自动切断变压器电源。

(四) 绝缘套管

变压器的引出线从油箱内穿过油箱盖时，必须经过绝缘套管，以使带电的引线和接地的油箱绝缘。绝缘套管一般为瓷质，其结构主要取决于电压等级。1kV 以下采用实心瓷套管；10~35kV 采用空心充气或充油式套管，充油式套管如图 1-9 所示。电压 110kV 及以上，采用电容式套管。为了增加表面放电距离，套管外形做成多级伞形，并且电压越高，级数越多。

1.1.2 变压器的分类

为了适应不同的使用目的和工作条件，变压器有许多类型，且

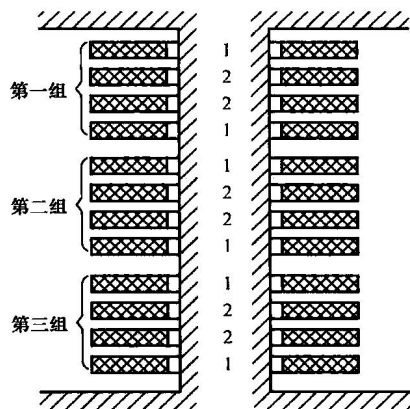


图 1-7 交叠式绕组

1—低压绕组；2—高压绕组

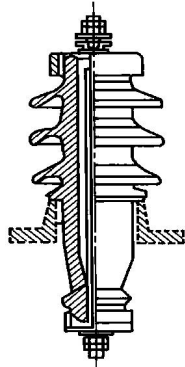


图 1-9 35kV 充油式套管

各种类型的变压器在结构上、性能上有很大差异。

变压器有多种分类方法。

按用途分为电力变压器、调压变压器、仪用互感器、试验变压器、整流变压器、脉冲变压器等。

按绕组数目分为双绕组变压器、三绕组变压器、自耦变压器。

按铁心结构分为心式变压器和壳式变压器。

按相数分为单相变压器、三相变压器、多相变压器。

按冷却介质和冷却方式分为油浸式变压器、干式变压器和充气式变压器。

按容量大小分 10~630kVA 的变压器为小型变压器, 800~6300kVA 的变压器为中型变压器, 8000~63 000kVA 的变压器为大型变压器, 90 000kVA 及以上的变压器为特大型变压器。

变压器种类虽多, 但各种变压器运行时的基本电磁关系以及分析变压器性能的基本方程, 大体上是一样的。因此本章主要以单相和三相电力变压器为对象来研究、分析变压器。

1.2 变压器的基本工作原理及铭牌数据

1.2.1 变压器的基本工作原理

变压器工作原理的基础是电磁感应定律。两个互相绝缘的绕组套在同一个铁心上, 绕组之间只有磁的耦合没有电的联系, 如图 1-10 所示。其中一个绕组接交流电源, 称为一次绕组, 匝数为 N_1 ; 另一个绕组接负载, 称为二次绕组, 匝数为 N_2 。

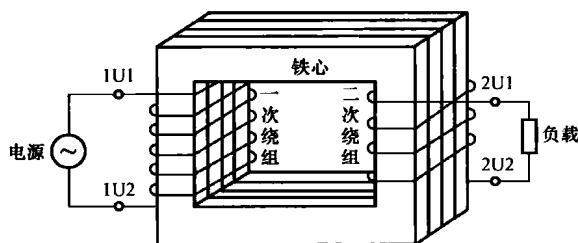


图 1-10 变压器原理结构示意图

当一次绕组接到交流电源时, 一次绕组中流过交流电流, 并在铁心中产生交变磁通, 其频率与电源电压频率相同。这个交变磁通同时交链着一、二次绕组, 根据电磁感应定律, 一、二次绕组中分别感应出相同频率的电动势, 二次绕组有了电动势, 便向负载输出电能, 实现了能量的传递。由于感应电动势的大小与绕组的匝数

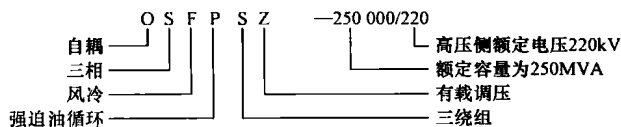
成正比, 因此, 改变一、二次绕组的匝数即可改变变压器电压, 这就是变压器的变压原理。

1.2.2 变压器的铭牌数据

每一台变压器都有一个铭牌, 铭牌上标注着变压器的型号、额定数据及其他数据。

一、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和冷却方式, 数字代表额定容量 (kVA) 和高压侧额定电压 (kV)。如三相强迫油循环风冷三绕组有载调压自耦变压器, 额定容量 250 000kVA, 高压侧额定电压 220kV, 其型号可表示如下:



二、额定值

额定值是指制造厂按照国家标准,对变压器正常工作时的有关参数所规定的数值。变压器运行在额定值状态下,称为额定运行。在额定运行时,变压器有优良的特性,并可保证长期可靠工作。

(1) 额定容量 S_N 。额定容量是指变压器额定运行状态下输出的视在功率,单位为 kVA 或 MVA。对于双绕组变压器,一、二次绕组的额定容量设计为相等;对三相变压器指三相总容量。

(2) 额定电压 U_{1N}/U_{2N} 。一次侧额定电压 U_{1N} 为正常工作时加在一次侧的电压值,二次侧额定电压 U_{2N} 是指变压器一次侧加额定电压时二次侧的空载电压。单位为 V 或 kV。三相变压器额定电压指线电压。

(3) 额定电流 I_{1N}/I_{2N} 。一、二次侧额定电流 I_{1N} 、 I_{2N} 是根据变压器额定运行时额定容量、额定电压计算出来的,单位为 A。三相变压器的额定电流指线电流。

$$\text{单相变压器} \quad I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}}, \quad I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}}$$

$$\text{三相变压器} \quad I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}, \quad I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}}$$

(4) 额定频率 f_N 。我国规定的标准工业频率为 50Hz,故 $f_N = 50\text{Hz}$ 。

此外,铭牌上还标有变压器的相数、联结组、阻抗电压和温升等。

1.3 变压器的空载运行

空载运行是指变压器一次绕组接到额定电压、额定频率的电源上,二次绕组开路的运行状态,如图 1-11 所示。一、二次侧电路各物理量和参数分别用下标“1”和“2”标注,图 1-1 中还画出了各物理量的正方向。

1.3.1 电磁物理现象

变压器空载运行时,一次侧接入交流额定电压 $\dot{U}_1$,则在一次绕组中有空载电流 $\dot{I}_0$ 流过。 $\dot{I}_0$ 建立空载磁动势 $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 N_1$,产生空载时的总磁通。

根据性质和作用的不同,可把总磁通分为两部分:一部分是主磁通 $\dot{\Phi}$,沿铁心闭合,同时交链

一、二次绕组,是变压器进行能量传递的媒介,它占总磁通的绝大部分;另一部分是一次侧漏磁通 $\dot{\Phi}_{1\sigma}$,它只与一次绕组相交链,沿其周围的变压器油或空气闭合,不传递能量,只起电压降作用,占总磁通的很少部分(约 0.1%~0.2%)。当电源电压 $\dot{U}_1$ 随时间周期性变化时,空载电流 $\dot{I}_0$ 及磁通 $\dot{\Phi}$ 、 $\dot{\Phi}_{1\sigma}$ 均同频率地交变。根据电磁感应定律,磁通的交变将分别在一、二次绕组上产生主电动势 $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$ 和漏电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$ 。此外空载电流还在一次绕组电阻 R_1 上产生一很小的电阻压降 $\dot{I}_0 R_1$ 。则变压器空载时,各物理量之间关系可表示如下:

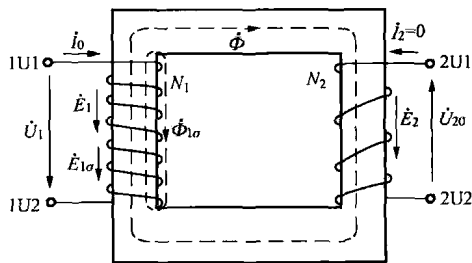
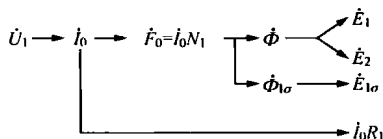


图 1-11 变压器空载运行



为了正确表达变压器中各物理量之间数量及相位关系,需规定各物理量的正方向。具体包括:①电流与它产生的磁通二者正方向符合右手螺旋定则;②磁通与其感应产生的电动势二者正方向也符合右手螺旋定则;③电压降与电流正方向相同。图 1-11 中箭头方向为各物理量的正方向。

1.3.2 感应电动势及电动势平衡方程式

一、主电动势 E_1 、 E_2

假定主磁通按正弦规律变化,即

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

根据电磁感应定律,一、二次绕组感应电动势瞬时值为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt} = -N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = N_1 \omega \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1-2)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt} = -N_2 \omega \Phi_m \cos \omega t = N_2 \omega \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1-3)$$

则感应电动势有效值为

$$E_1 = \frac{N_1 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_1 \Phi_m = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad (1-4)$$

$$E_2 = \frac{N_2 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N_2 \Phi_m = 4.44 f N_2 \Phi_m \quad (1-5)$$

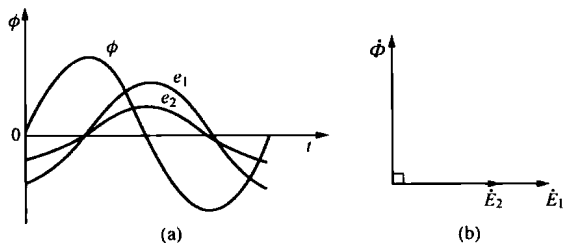


图 1-12 磁通及其感应电动势

(a) 波形图; (b) 相量图

式中:主磁通幅值 Φ_m 单位为 Wb,频率 f 单位为 Hz,则电动势单位为 V。

式(1-4)~式(1-5)表明感应电动势大小与频率 f 、匝数 N 、主磁通幅值 Φ_m 三者乘积成正比。从瞬时值表达式中不难看出,电动势滞后于磁通 90° ,磁通及感应电动势波形图见图 1-12 (a)。由于它们都是正弦量,均可用相量表示。图 1-12 (b) 表示它们之间的相位关系。

二、一次侧漏电动势 $E_{1\sigma}$

设一次侧漏磁通也按正弦规律变化,即

$$\phi_{1\sigma} = \Phi_{1\sigma m} \sin \omega t$$

则有

$$e_{1\sigma} = -N_1 \frac{d\phi_{1\sigma}}{dt} = N_1 \omega \Phi_{1\sigma m} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

有效值为

$$E_{1\sigma} = \frac{E_{1\sigma m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega N_1 \Phi_{1\sigma m}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega(\sqrt{2} L_{1\sigma} I_0)}{\sqrt{2}} = X_{1\sigma} I_0$$

式中: $N_1 \Phi_{10m} = L_{10} I_{0m}$ 为由空载电流 I_0 产生的漏磁链幅值。

用相量表示为

$$\dot{E}_{10} = -jX_{10} \dot{I}_0 \quad (1-6)$$

式(1-6)说明空载电流 I_0 流过一次绕组, 产生很小的漏磁通 ϕ_{10} (其路径为非铁磁物质), 在一次绕组中产生漏电动势 E_{10} 。 I_0 和 E_{10} 之间存在线性关系, 可用一个比例系数 X_{10} 来表示, 把 X_{10} 称作一次绕组的漏抗。

X_{10} 反映一次侧漏磁场对一次侧电路的作用, 它是一个常数。式(1-6)说明漏电动势可以表示为一个漏抗压降。

三、电动势平衡方程式

按图1-11各物理量规定的正方向, 应用电路定律, 可写出一、二次电动势平衡方程式。

一次侧为

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 - \dot{E}_{10} + \dot{I}_0 R_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_0 X_{10} + \dot{I}_0 R_1 \\ &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \end{aligned} \quad (1-7)$$

式中: $Z_1 = R_1 + jX_{10}$ 为一次绕组漏阻抗。

二次侧为

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2 \quad (1-8)$$

对于电力变压器, 空载时一次侧外加电压 $\dot{U}_1$, 主要降落在 $-\dot{E}_1$ 上, 漏阻抗压降 $\dot{I}_0 Z_1$ 很小, 其数值一般不超过 U_1 的 0.2%。将 $\dot{I}_0 Z_1$ 忽略, 则式(1-7)变为

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 \text{ 或 } U_1 \approx E_1 \quad (1-9)$$

由式(1-4)得 $U_1 \approx E_1 = 4.44fN_1\Phi_m$, 因此变压器空载运行时, 主磁通 Φ_m 是由电源电压 U_1 决定的。

四、变比

变压器变比的定义是一、二次侧相电动势之比, 用 k 表示, 即

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}} \quad (1-10)$$

式(1-10)表明, 变压器变比等于一、二次绕组匝数比。它可通过变压器的空载试验测得。

1.3.3 空载电流

一、空载电流组成

空载电流有两个作用: 一是建立空载时的磁场; 二是从电网吸收有功功率提供空载时变压器内部有功功率损耗 (主要是铁心的磁滞和涡流损耗, 合称铁损耗)。因此, 可以认为空载电流由两部分组成, 即

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_\mu + \dot{I}_{Fe} \quad (1-11)$$

式中: $\dot{I}_\mu$ 称为磁化电流 (用来建立空载时磁场), 为无功电流分量, $\dot{I}_{Fe}$ 称为铁耗电流 (对应铁心损耗), 为有功电流分量。由于变压器铁心采用导磁性能较好的铁磁物质, 铁耗电流 I_{Fe} 远远小于磁化电流 I_μ , 因此空载电流基本上为磁化电流。

空载电流的大小是变压器的性能指标之一, 空载电流小表明变压器建立磁场所需电流小, 变压器铁心磁阻小。空载电流一般占额定电流 I_{1N} 的 2%~10%。变压器容量越大, 空

载电流百分数越小。

二、空载电流波形

若忽略铁耗电流 $\dot{I}_{Fe}$ ，空载电流 $\dot{I}_0$ 即为磁化电流 $\dot{I}_\mu$ ，当变压器一次绕组接额定电压时，铁心通常工作在饱和区，由于磁化特性曲线 $\phi = f(i)$ 为非线性，若要获得工程上需要的正弦形主磁通 $\phi = f(i)$ 波形，根据图解法可求得建立磁通所需的空载电流波形 $i_0 = f(t)$ 应为尖顶波，如图 1-13 所示。

根据谐波分析，横轴对称的尖顶波可分解为基波和 3、5、7…次谐波。除基波外，3 次谐波分量最大。这就是说，由于铁磁材料磁化曲线的非线性关系，若在变压器中建立正弦波主磁通，空载电流还需包含 3 次谐波分量。工程上为了便于分析和计算，常用等效的正弦波空载电流 $\dot{I}_0$ 表示实际尖顶波的空载电流。

若考虑铁耗电流 $\dot{I}_{Fe}$ ，空载电流 $\dot{I}_0$ 不只为磁化电流 $\dot{I}_\mu$ (无功电流)，还包括铁耗电流 $\dot{I}_{Fe}$ (有功电流)，图 1-14 所示为空载电流相量关系图。由图可知，考虑铁耗后， $\dot{I}_0$ 超前于 $\dot{\Phi}_m$ 一个很小的角度 α_{Fe} ，这个角度称为铁耗角。

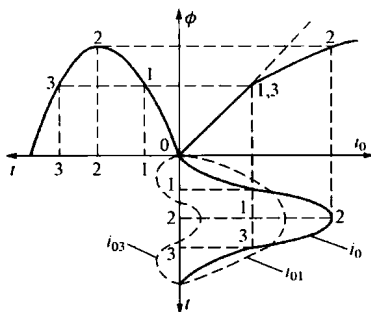


图 1-13 空载电流波形

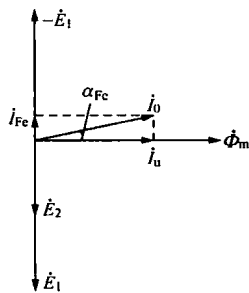


图 1-14 空载电流相量图

1.3.4 空载时的等值电路和相量图

一、等值电路

变压器空载时，从一次侧看进去的等值阻抗 Z_0 为

$$Z_0 = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_0} = \frac{-\dot{E}_1}{\dot{I}_0} + Z_1 = Z_m + Z_1 \quad (1-12)$$

式中： $Z_m = \frac{-\dot{E}_1}{\dot{I}_0} = R_m + X_m$ 称为变压器的励磁阻抗。

引入励磁阻抗 Z_m 后，变压器一次侧电动势方程可写成

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 = \dot{I}_0 (Z_m + Z_1) \quad (1-13)$$

由此可得到变压器空载时的等值电路如图 1-15 所示。

等值电路中出现两个阻抗 Z_m 和 Z_1 ，其物理意义是不一样的，分析比较它们的区别，可加深对变压器电磁现象的理解。

(1) 励磁阻抗 Z_m 。励磁阻抗 Z_m 反映变压器铁心磁路对一次侧电路的影响，其中励磁电阻 $R_m = \frac{P_{Fe}}{I_0^2}$ 是反映铁心损耗的等效电阻，励磁电抗 X_m 是反映主磁通 $\dot{\Phi}$ 的作用对应的电抗

$X_m = \omega L_m = \omega N_1^2 \Delta_m = \frac{\omega N_1^2}{R_m}$, $\Delta_m = \frac{1}{R_m}$ 。铁心越饱和, R_m 、 X_m (Z_m) 越小, 是变量。但通常一次侧外加电压是一定的, 在正常运行范围内 (从空载到满载) 主磁通基本不变, 磁路的饱和程度不变, 因而在一般情况下可将 R_m 、 X_m (Z_m) 看作常数。

(2) 一次绕组漏阻抗 Z_1 。 Z_1 是变压器一次绕组漏阻抗, 其中 $R_1 = \frac{p_{Cu}}{I_0^2}$ 是反映一次绕组铜损耗的电阻, $X_{1\sigma}$ 反映漏磁通 $\dot{\Phi}_{1\sigma}$ 。

作用的漏电抗; R_1 、 $X_{1\sigma}$ (Z_1) 都为常量。

由上分析得知 $X_{1\sigma} \ll X_m$ 、 $R_1 \ll R_m$, 即 $Z_1 \ll Z_m$ 。从变压器运行情况看, 希望空载电流 I_0 小些, 因此需要采用高导磁特性的铁心材料, 以增大励磁阻抗 Z_m 实现减小 I_0 的目的, 从而提高变压器效率、改善电网功率因数。

二、相量图

相量图可直观地反映变压器各物理量之间的相位关系, 常在分析问题采用。变压器空

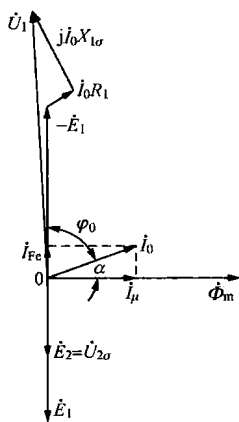


图 1-16 变压器的
空载相量图

载运行时相量图如图 1-16 所示。从相量图中不难看出, $-\dot{E}_1$ 和 $\dot{I}_0$ 之间的相位差角 φ_0 为变压器空载时的功率因数角, $\varphi_0 \approx 90^\circ$, 即空载时变压器功率因数 $\cos \varphi_0$ 很低。

画相量图一般按照如下步骤进行:

- (1) 在横坐标上画出主磁通 $\dot{\Phi}_m$, 并选其为参考相量;
- (2) 作出电动势 $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$, 它们滞后于 $\dot{\Phi}_m 90^\circ$;
- (3) 作出空载电流 $\dot{I}_0$, $\dot{I}_0$ 的无功分量 $\dot{I}_\mu$ 与 $\dot{\Phi}_m$ 同相位, $\dot{I}_0$ 的有功分量 $\dot{I}_{Fe}$ 超前 $\dot{\Phi}_m 90^\circ$ (与 $-\dot{E}_2$ 同相位), 合成得 $\dot{I}_0$;
- (4) 由 $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1$, 依次作出 $-\dot{E}_2$ 、 $\dot{I}_0 R_1$ 、 $j\dot{I}_0 X_{1\sigma}$, 叠加后得 $\dot{U}_1$ 。

【例 1-1】 一台三相变压器 $S_N = 31\,500 \text{ kVA}$, $\frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{110}{10.5} \text{ kV}$,

Yd 接法, $R_1 = 1.21 \Omega$, $R_m = 1439.3 \Omega$, $X_{1\sigma} = 14.45 \Omega$, $X_m = 14161.3 \Omega$ 。试求: (1) 一、二次侧额定电流; (2) 变比; (3) 空载电流及其对一次侧额定电流的百分比; (4) 三相铜损耗、铁损耗; (5) 空载时的功率因数; (6) 空载运行时输入功率。

解 (1) 一、二次侧额定电流分别为

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{31\,500 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 110 \times 10^3} = 165.3 (\text{A})$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{31\,500 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10.5 \times 10^3} = 1732 (\text{A})$$

(2) 变比, 即额定相电压之比为

$$k = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{110 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10.5 \times 10^3} = 6.05$$

(3) 由空载等值电路得

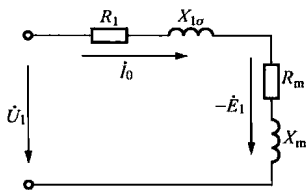


图 1-15 变压器空载时的
等值电路

$$I_0 = \frac{U_{1N}/\sqrt{3}}{\sqrt{(R_1 + R_m)^2 + (X_{1\sigma} + X_m)^2}}$$

$$= \frac{110 \times 10^3/\sqrt{3}}{\sqrt{(1.21 + 1439.3)^2 + (14.45 + 14161.3)^2}} = 4.46(\text{A})$$

则 $\frac{I_0}{I_{1N}} = \frac{4.46}{165.3} \times 100\% = 2.7\%$

(4) 三相铜损耗、铁损耗分别为

$$p_{\text{Cu}} = 3I_0^2 R_1 = 3 \times 4.46^2 \times 1.21 = 72.21(\text{W})$$

$$p_{\text{Fe}} = 3I_0^2 R_m = 3 \times 4.46^2 \times 1439.3 = 85889.7(\text{W})$$

(5) 功率因数

$$\varphi_0 = \arctan \frac{X_m + X_{1\sigma}}{R_m + R_1} = \arctan \frac{14161.3 + 14.5}{1439.3 + 1.21} = 84.2^\circ$$

$$\cos \varphi_0 = \cos 84.2^\circ = 0.1011$$

(6) 空载运行时输入有功功率为

$$P_0 = \sqrt{3}U_{1N}I_0 \cos \varphi_0 = \sqrt{3} \times 110 \times 4.46 \times \cos 84.2^\circ = 85.91(\text{kW})$$

输入无功功率为

$$Q_0 = \sqrt{3}U_{1N}I_0 \sin \varphi_0 = \sqrt{3} \times 110 \times 4.46 \times \sin 84.2^\circ = 845.4(\text{kvar})$$

可见变压器空载运行时功率因数很低, 输入的有功功率很小, 而无功功率相对较大。

1.4 变压器的负载运行

变压器一次侧接额定频率、额定电压的交流电源, 二次侧接负载有电流流过的运行状态, 称为变压器负载运行。

1.4.1 负载运行时的物理状况

图 1-17 所示是单相变压器负载运行原理图, 一次绕组接额定电压的交流电源, 二次绕组接负载阻抗 Z_L , 各物理量正方向如图所示。

变压器空载运行时, 二次侧电流为零, 一次侧流过空载电流 $\dot{I}_0$, 产生空载磁动势 $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 N_1$, 该磁动势建立主磁通 $\dot{\Phi}_m$, 在一、二次绕组感应电动势 $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2$, 一、二次绕组各物理量维持空载时的平衡关系。

变压器负载运行时, 二次侧流过电流 $\dot{I}_2$, $\dot{I}_2 \neq 0$, 产生二次磁动势 $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 N_2$ 。这个磁动势也作用在铁心主磁路上, 根据楞次定律, $\dot{F}_2$ 对主磁场的作用是企图改变主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 。由于电源电压 $\dot{U}_1$ 不变, 则主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 可看作基本不变, 则当 $\dot{F}_2$ 存在时, 一次侧电流必将由空载时的 $\dot{I}_0$ 变为 $\dot{I}_1$, 磁动势由空载时的 $\dot{F}_0$ 变为 $\dot{F}_1$ 。一次侧所增加的那部分磁动势, 用来抵消二次侧磁动势 $\dot{F}_2$, 便可维持 $\dot{\Phi}_m$ 不变, 此时变压器各物理量建立了新的平衡关系。与变压器空载运行类似, 负

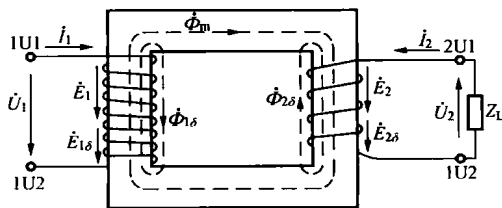


图 1-17 变压器负载运行原理图