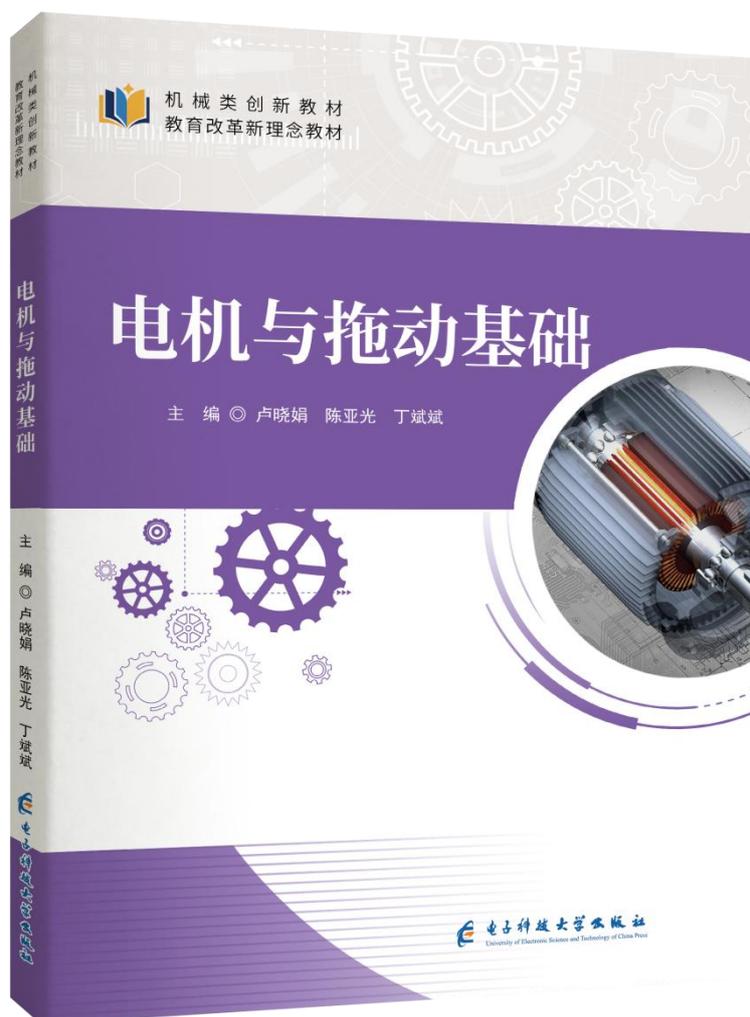


电机与拖动基础



类目：机械类

书名：电机与拖动基础

主编：卢晓娟 陈亚光 丁斌斌

出版社：电子科技大学出版社

开本：大 16 开

书号：978-7-5770-1896-6

使用层次：通用

出版时间：2025 年 9 月

定价：49.80 元

印刷方式：双色

是否有资源：有

机械类创新教材
教育改革新理念教材



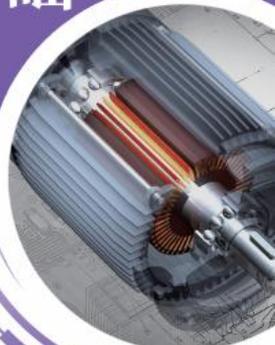
机械类创新教材
教育改革新理念教材

电机与拖动基础

电机与拖动基础

电机与拖动基础

主 编 © 卢晓娟 陈亚光 丁斌斌



主 编 © 卢晓娟 陈亚光 丁斌斌

电子科技大学出版社

策划编辑：万晓桐
责任编辑：万晓桐
封面设计：旗语书装



定价：49.80元

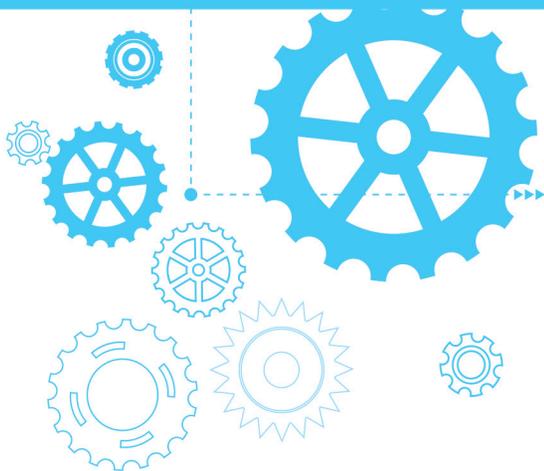
电子科技大学出版社
University of Electronic Science and Technology of China Press



机械类创新教材
教育改革创新理念教材

电机与拖动基础

主 编 ◎ 卢晓娟 陈亚光 丁斌斌
副主编 ◎ 周子为 唐志英 王文文
吴振远 欧阳俊 徐 海
张云英 杨洪磊



电子科技大学出版社
University of Electronic Science and Technology of China Press

· 成都 ·

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动基础 / 卢晓娟, 陈亚光, 丁斌斌主编
成都: 成都电子科大出版社, 2025. 9. --ISBN 978-7-5770-1896-6

I. TM3; TM921

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2025YK7086 号

电机与拖动基础

DIANJI YU TUODONG JICHU

卢晓娟 陈亚光 丁斌斌 主编

策划编辑 万晓桐

责任编辑 万晓桐

责任校对 李燕琴

责任印制 梁 硕

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 www.uestcp.com.cn

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 三河市祥达印刷包装有限公司

成品尺寸 210 mm×285 mm

印 张 14

字 数 408 千字

版 次 2025 年 9 月第 1 版

印 次 2025 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5770-1896-6

定 价 49.80 元

版权所有，侵权必究

前 言

本书涵盖电机学、电力拖动基础两门课程的主要内容，合并后统称为电机与拖动基础。本书共分为七个项目，主要内容包括变压器的基本原理、三相异步电动机的基本原理、三相异步电动机的电力拖动运行、同步电机的基本原理、直流电机的基本原理、直流电动机的电力拖动运行、控制电机的基本原理。

本书的编写思路如下：

(1) 采用任务驱动式的教材组织方法，将每个知识点分解为典型的任务，以任务为主线，贯穿于整个知识讲解的全过程；

(2) 注重理论与实践相结合，重在应用，各项目列举了大量实例和实践活动，以加深学生对电机与拖动技术的理解；

(3) 各项目均设置知识拓展等内容，是对课堂内容的加深或对知识的拓展，教师在教学过程中适当引入课堂教学中。

因此，本书在编写时，既注重让学生获得必要的基本理论知识，又充分考虑到实际情况，认真贯彻“理论以够用为度，加强应用，提升分析和解决实际问题的能力”的原则。本书适合普通高校机电类专业学生作为教材使用。

在本书在编写过程中，编者参阅了一些同行的相关论著，在此向原作者致以衷心的感谢，如有版权问题，请及时联系我们协商解决。由于编者经验、水平有限，书中难免存在疏漏之处，真诚希望各位读者对本书中不足提出批评和建议。

编 者

2025年6月

目 录

项目一 变压器的基本原理 1

任务一 变压器的基本工作原理和结构	2
任务二 单相变压器的空载运行	9
任务三 单相变压器的负载运行	15
任务四 变压器参数的测定	21
任务五 变压器的运行特性	26
任务六 认识三相变压器	31
任务七 变压器的并联运行	36
任务八 其他用途的变压器	40
技能训练一 校核变压器连接组号的方法	45
项目小结	46
项目习题	47

项目二 三相异步电动机的基本原理 48

任务一 三相异步电动机的工作原理与结构	49
任务二 三相异步电动机的运行原理	55
任务三 三相异步电动机的基本方程式	66
任务四 三相异步电动机的工作特性	70
技能训练二 异步电动机空载与堵转实验	72
项目小结	74
项目习题	74

项目三 三相异步电动机的电力拖动运行 76

任务一 三相异步电动机的机械特性	77
任务二 三相异步电动机的启动	86
任务三 三相异步电动机的制动	93

任务四 三相异步电动机的调速	97
技能训练三 三相绕线式异步电动机启动及调速实验	108
项目小结	111
项目习题	112

项目四 同步电机的基本原理

任务一 同步电机的工作原理和结构	114
任务二 同步发电机	118
任务三 同步电动机	125
任务四 同步电动机的调相运行及同步调相机	131
技能训练四 三相同步电动机的异步启动	134
项目小结	135
项目习题	136

项目五 直流电机的基本原理

任务一 直流电机的工作原理	138
任务二 直流电机的基本结构	140
任务三 直流电机的铭牌数据和主要系列	143
任务四 直流电机的磁场与基本公式	145
任务五 直流电动机的工作特性	152
任务六 直流发电机的运行特性	157
技能训练五 直流电动机机械特性测试	160
项目小结	162
项目习题	163

项目六 直流电动机的电力拖动运行

任务一 电力拖动系统的运动方程式	166
任务二 生产机械的负载特性	168
任务三 他励直流电动机的机械特性	170
任务四 直流电动机的启动和反转	172
任务五 他励直流电动机的调速	175
任务六 他励直流电动机的制动	180
技能训练六 他励直流电动机在各种运转状态下的机械特性	184
项目小结	187
项目习题	187

项目七 控制电机的基本原理 189

任务一 伺服电机 190

任务二 测速发电机 195

任务三 步进电动机 200

任务四 旋转变压器 206

技能训练七 交流伺服电动机实验 212

项目小结 215

项目习题 215

参考文献 216

项目一

变压器的基本原理

- 任务一 变压器的基本工作原理和结构
- 任务二 单相变压器的空载运行
- 任务三 单相变压器的负载运行
- 任务四 变压器参数的测定
- 任务五 变压器的运行特性
- 任务六 认识三相变压器
- 任务七 变压器的并联运行
- 任务八 其他用途的变压器

变压器是一种静止的电磁装置，它是利用电磁感应原理，将一种电压等级的交流电能转换成相同频率的另一种电压等级的交流电能的电磁装置。变压器具有变压、变流和变阻抗的功能，在电力系统和电子电路中得到了广泛的应用。本项目主要分析一般用途的电力变压器，首先简要介绍变压器的工作原理和结构，然后着重分析变压器的运行与特性、三相变压器的特点及变压器的并联运行，最后介绍其他用途的变压器。

任务一 变压器的基本工作原理和结构

任务描述

掌握变压器的基本工作原理和结构；
了解变压器的分类和用途；
认识变压器的铭牌。

任务分析

变压器的工作原理即电磁感应定律，可以将一种电压等级的交流电能转换成相同频率的另一种电压等级的交流电。它广泛应用于各种交流电路中，与人们的生产、生活密切相关。小型变压器应用于机床的安全照明和控制电路、各种电子产品的电源适配器以及电子线路中。大型电力变压器是电力系统中的重要设备，起着高压输电、低压供电的重要作用。本任务主要介绍变压器的工作原理和基本结构。

一、变压器的基本工作原理

变压器是利用电磁感应定律工作的。如图 1-1 所示为变压器的工作原理图。

变压器的结构是将两个(或两个以上)互相绝缘的绕组套在一个共同的铁芯回路上，绕组之间具有磁耦合关系。其中，一个绕组接电源，称为一次绕组或原绕组，简称“一次侧”；另一个绕组接负载，称为二次绕组或副绕组，简称“二次侧”。当一次

侧接通交流电源时，在外加电压作用下，一次侧中有交流电流流过，并在铁芯中产生交变磁通，其交变频率与外加电压频率相同。该交变磁通同时交链一、二次侧，根据电磁感应定律，分别在一、二次侧内产生感应电动势。二次侧产生电动势，当接上负载后形成闭合回路，便向负载供电，从而实现交流电能的传递。

假设一、二次侧的匝数分别为 N_1 和 N_2 ，根据电磁感应定律，在电动势与磁通规定正方向符合右手螺旋定则的前提下，一次侧电动势为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-1)$$

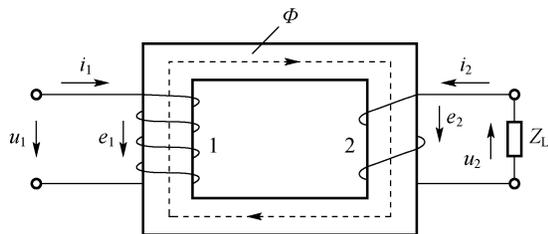


图 1-1 变压器的工作原理图

二次侧电动势为

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-2)$$

提醒

变压器只要满足两个条件就能达到改变电压的目的，即磁通有变化量，且一、二次绕组的匝数不同。

思考与分析

变压器能否变换直流电压？

分析：不能，因为这时的主磁通为恒定磁通，不会在变压器一、二次绕组中产生感应电动势，二次绕组的输出电压为零。

二、变压器的应用与分类

1. 变压器的应用

由于变压器具有变压、变流、变阻抗的功能，所以在电力系统和电子线路中变压器得到极为广泛的应用，它是电能传输、分配和使用的重要电气设备。在实际工作中，常常需要各种不同的电源电压。例如，发电厂发出的电压一般为 6~10 kV，在电能输送过程中，为了减少线路损耗，通常要将电压升高到 110~500 kV；而我们日常使用的交流电的电压为 220 V，三相电动机的线电压则为 380 V，这需要变压器将电网的高压交流电降低到 380/220 V，所以，在输电和用电的过程中都需要经变压器升高或降低电压。因此，变压器在电力系统中的容量远大于发电机的容量。电力系统的流程示意如图 1-2 所示，其中，G 为发电机， T_1 为升压变压器， $T_2 \sim T_4$ 为降压变压器。

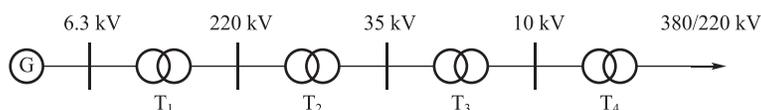


图 1-2 电力系统的流程示意图

2. 变压器的分类

为达到不同的使用目的，并满足不同的工作条件，变压器的分类方法多种多样，常见的分类方法如下。

(1)按用途不同，变压器可分为电力变压器(包括升压变压器、降压变压器、配电变压器等)、仪用互感器(电压互感器和电流互感器)和特种变压器(调压变压器、电炉变压器、电焊变压器、整流变压器等)。

(2)按相数不同，变压器可分为单相变压器和三相变压器。

(3)按绕组的个数不同，变压器可分为自耦变压器(只有一个绕组)、双绕组变压器、三绕组变压器、多绕组变压器。

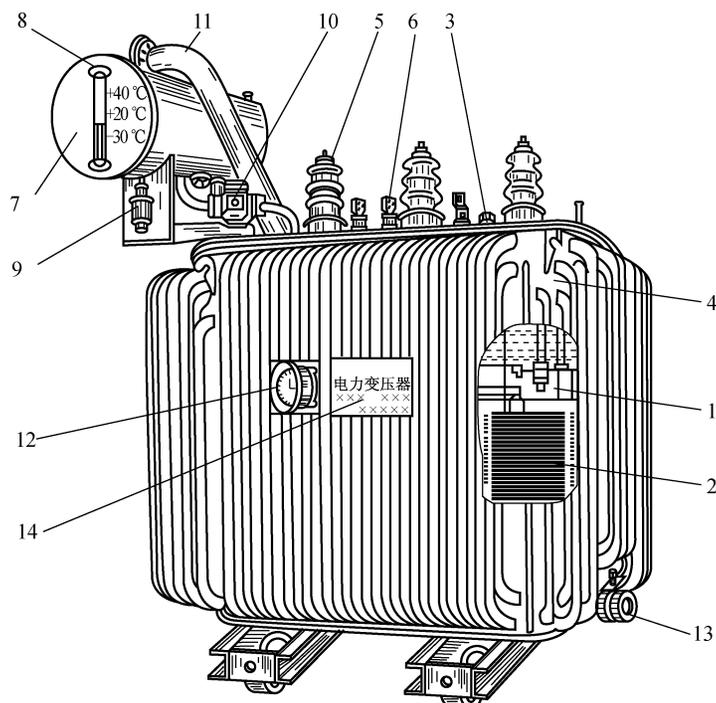
(4)按铁芯结构不同，变压器可分为心式变压器和壳式变压器。

(5)按冷却介质和冷却方式不同,变压器可分为干式(空气冷却)变压器、油浸式变压器(油浸自冷式、油浸风冷式、油浸强迫油循环式等)和充气式冷却变压器。

(6)按容量不同,变压器可分为中小型变压器($<6\,300\text{ kV}\cdot\text{A}$)、大型变压器($8\,000\sim 63\,000\text{ kV}\cdot\text{A}$)、特大型变压器($>63\,000\text{ kV}\cdot\text{A}$)。

三、变压器的基本结构

变压器中最主要的部件是铁芯和绕组,铁芯和绕组共同构成器身。油浸式变压器的器身浸在油箱里,油箱中注满变压器油。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。如图 1-3 所示为油浸式变压器的结构图。



1—铁芯; 2—绕组及绝缘; 3—分接开关; 4—油箱; 5—高压套管; 6—低压套管; 7—储油柜;
8—油位计; 9—吸湿器; 10—气体继电器; 11—安全气道; 12—信号式温度计; 13—放油阀门; 14—铭牌。

图 1-3 油浸式变压器的结构图

1. 铁芯

在变压器中,铁芯既是耦合磁通的主要通路,又是机械骨架。铁芯由铁芯柱和铁轭两部分构成,铁轭与铁芯柱连接起来形成闭合磁路。

为了提高磁路的导磁性能,减少铁芯中的磁滞、涡流损耗,铁芯一般由高磁导率的铁磁性材料制成。目前,变压器铁芯大部分采用厚度为 $0.35\sim 0.5\text{ mm}$ 、表面涂有绝缘漆的硅钢片叠装而成。为了减小接缝间隙以减小励磁电流,一般采用交错式叠装,使相邻的接缝错开,如图 1-4 所示。铁芯柱的截面一般做成阶梯形,以充分利用绕组的内圆空间。

容量较大的变压器,铁芯中常设有油道,以改善铁芯内部的散热条件。

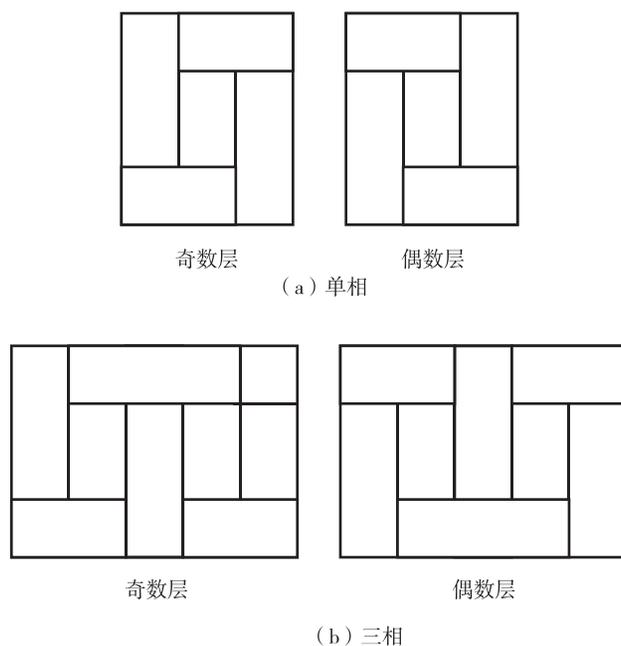
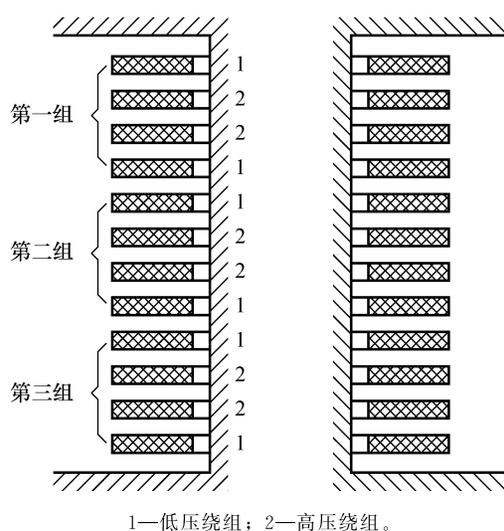


图 1-4 叠片式铁芯交错的叠装方式

2. 绕组

绕组是变压器的电路部分，一般由绝缘铜线或铝线绕制而成。

根据高、低压绕组排列方式的不同，变压器的绕组可分为同心式和交叠式两类。同心式绕组的高、低压绕组都做成圆筒状，同心地套装在铁芯柱上。为便于绝缘，一般低压绕组靠近铁芯，高压绕组套装在低压绕组外面；交叠式绕组都做成饼式，高、低压绕组互相交叠放置，如图 1-5 所示，为了减少绝缘距离，通常靠近铁轭处放低压绕组。同心式绕组结构简单、制造方便，我国生产的电力变压器均采用这种结构。交叠式绕组的漏抗较小，易构成多条并联支路，主要用于低压、大电流的电焊、电炉变压器和壳式变压器中。



1—低压绕组；2—高压绕组。

图 1-5 交叠式绕组

3. 绝缘套管

变压器的引出线从油箱内部引到箱外时必须经过绝缘套管，使带电的引线与接地的油箱绝缘。为了增大外表面放电距离，套管外形采用多级伞形裙边。电压越高，级数越多。绝缘套管一般是瓷质的，其结构取决于电压等级。1 kV 以下采用实心瓷套管；10~35 kV 采用空心充气或充油式套管，110 kV 及以上采用电容式套管。

4. 油箱

变压器的器身放置在灌有高绝缘强度、高燃点变压器油的油箱内。

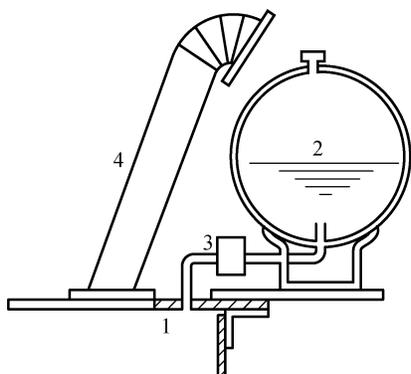
变压器运行时，铁芯和绕组都要发出热量，使变压器油发热。发热的变压器油在油箱内发生对流，将热量传送至油箱壁及其上的散热器，再向周围空气或冷却水辐射，达到散热的目的，从而使变压器内的温度保持在合理的水平上。

5. 保护装置

(1) 储油柜。储油柜，又称为“油枕”，装在油箱顶部，储油柜的体积一般为油箱体积的 8%~10%。在油箱和储油柜之间有管道相通。设置储油柜不仅可以减少油面与空气的接触面积，减缓变压器油因受潮而变质速度，同时可使油箱中的油在热胀冷缩时得到缓冲。

如图 1-6 所示为储油柜的结构简图。储油柜的侧面装有油位计，在油位计上标出最高、最低温度时的油面线位置。在储油柜上还装有吸湿器，储油柜经过吸湿器与大气相通，以便在变压器油热胀冷缩时储油柜上部的空气可以通过吸湿器出入，防止油箱损坏。

(2) 吸湿器。吸湿器，又称为“呼吸器”，将进入油枕空气中的水分吸掉，保证变压器油不受潮。吸湿器为一圆筒形容器，其中盛有变色硅胶作为吸潮的物质，以减少油的氧化和水分的浸入，如图 1-7 所示。变色硅胶在干燥状态下呈蓝色，吸潮后变成粉红色表明硅胶已失去吸湿作用，必须更换。受潮后的硅胶经过烘焙，仍可再次使用。



1—主油箱；2—储油箱；3—气体继电器；4—安全气道。

图 1-6 储油柜的结构简图

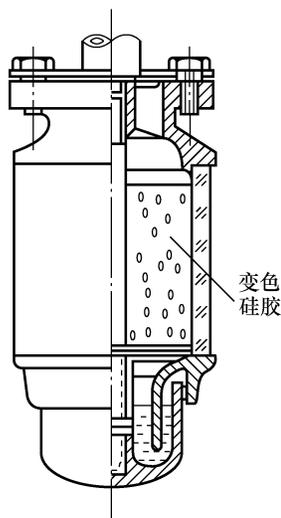
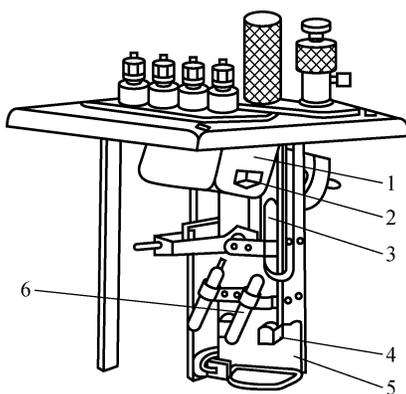


图 1-7 吸湿器

(3) 气体继电器和安全气道。当变压器内部发生故障时，故障点局部产生高温，使油温升高，油内含有的空气被排出，或由于故障点产生电弧而使绝缘物和油分解产生大量气体，为了保护油箱不致爆裂，在变压器上装置气体继电器和安全气道。气体继电器安装在主油箱和储油柜的连接管道上，作为变压器内部故障的保护。气体继电器的内部结构如图 1-8 所示。当气体进入气体继电器并使开口杯降到某一限定位置时，磁铁使干簧触点闭合，接通信号回路，发出信号。若故障严重，连接管中

的油流将冲动挡板，当挡板运动到某一限定位置时，磁铁使干簧触点闭合，接通跳闸回路，切断变压器的电源，从而起到保护变压器的作用。

安全气道是一根长的钢管，如图 1-6 所示，其下部与油箱相连，上部出口处盖一层玻璃或酚醛纸板。当变压器内部发生故障、油箱内部产生大量气体、压力增大到一定数值时，气体和油流将冲破封口向外喷出，减轻油箱内的压力，从而保护油箱。



1—开口杯；2—磁铁；3—干簧触点(信号用)；4—磁铁；5—干簧触点(跳闸用)；6—平衡锤。

图 1-8 气体继电器的内部结构图

(4)散热器。由于变压器运行时内部有铁损耗与铜损耗，并且各种损耗都以热的形式散发出来，变压器的温升很高。为了使变压器内部温度不会很高，变压器上都装有可拆卸的散热器。

四、变压器的铭牌

变压器的油箱表面一般都设有铭牌，铭牌上标注了变压器的型号、额定容量、额定电压及额定电流等数据，这些数据是选择和使用变压器的依据。

1. 变压器的型号

按照国家标准规定，变压器的型号由汉语拼音字母和几位数字组成以说明变压器的系列和规格，其表示方法如图 1-9 所示。

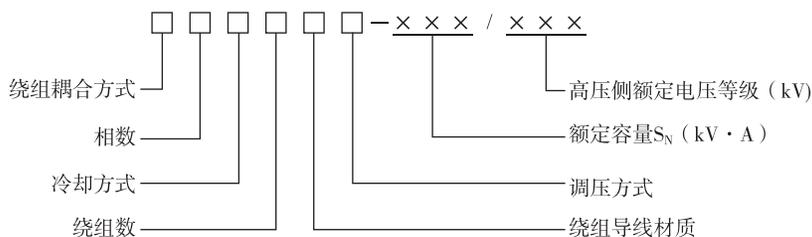


图 1-9 变压器型号的表示方法

例如，OSFPSZ-250000/220 为三相自耦强迫油循环风冷三绕组铜线有载调压、额定容量为 250 000 kV·A、高压侧额定电压为 220 kV 的电力变压器；S11-500/10 为额定容量为 500 kV·A、高压侧额定电压为 10 kV 级的低损耗三相油浸式自冷电力变压器。

 **提醒**

油浸自冷式双绕组无载调压的电力变压器不需要用汉语拼音字母专门标示。

2. 变压器的额定值(铭牌数据)

变压器运行在额定值下称为额定运行。变压器的额定值主要有以下几部分内容。

(1) 额定容量 S_N 。额定容量指变压器的额定视在功率, 单位为 $V \cdot A$ 或 $kV \cdot A$ 。

(2) 额定电压 U_{1N}/U_{2N} 。额定电压 U_{1N} 是指保证变压器原绕组安全的外加电压最大值, 额定电压 U_{2N} 是指原绕组加上额定电压且绕组不接负载时的副绕组端电压, 其单位均为 V 或 kV 。对三相变压器, 额定电压指线电压值。

(3) 额定电流 I_{1N}/I_{2N} 。额定电流 I_{1N} 、 I_{2N} 分别指变压器原、副绕组允许长期通过的最大电流值, 单位为 A 。对于三相变压器, 额定电流指线电流值。额定电流可以根据额定容量和额定电压计算得出。

对于单相变压器

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

$$I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} \quad (1-4)$$

对于三相变压器

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} \quad (1-5)$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} \quad (1-6)$$

(4) 额定频率 f 。我国工业的供用电频率标准规定为 50 Hz , 有些国家采用 60 Hz 。

变压器的铭牌上还标明效率、温升等额定值, 短路电压或短路阻抗百分值、连接组别使用条件、冷却方式、重量、尺寸等。

 **提醒**

变压器的额定值取决于变压器的构造和所用材料, 使用时一般不能超过其额定值。

【例 1-1】 有一台三相油浸自冷式铝线变压器, $S_N = 100 \text{ kV} \cdot \text{A}$, $U_{1N}/U_{2N} = 10 \text{ kV}/0.4 \text{ kV}$, Y/Y_0-12 接法, 试求一次、二次绕组的额定(线)电流。

解

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 10 \times 10^3} \text{ A} = 5.77 \text{ A}$$

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 0.4 \times 10^3} \text{ A} = 144.34 \text{ A}$$

任务二 单相变压器的空载运行

任务描述

了解变压器空载运行时的电磁关系；
了解变压器的空载电流和空载损耗；
掌握变压器的电动势平衡方程、相量图和等效电路。

任务分析

在电力系统中，三相电压是对称的，即各相电压大小相等，相位互差 120° 。三相电力变压器各相的参数大小也是一样的，其正常运行状态基本上是对称的。分析对称运行的三相变压器时，只需分析其中一相便得出另外两相的情况，或者说，对于单相变压器运行的分析结果，也适用于三相变压器对称运行情况。本任务主要分析变压器空载运行时的电磁关系及其表达形式，均针对单相变压器，所涉及的电压、电流、磁势、磁通、电动势、功率以及变压器本身的各参数都是指单相的值。对于三相变压器，不论其电路接线方式和磁路系统各是什么形式，只需要把各个物理值及变压器参数取为每相值，就完全可按单相变压器进行分析。

一、空载运行时的电磁关系

空载运行是指变压器的一次绕组接到额定电压、额定频率的电源上，二次绕组开路时的运行状态。

如图 1-10 所示为单相变压器空载运行的示意图，下标“1”和“2”用于区别一、二次电路的各物理量和参数。

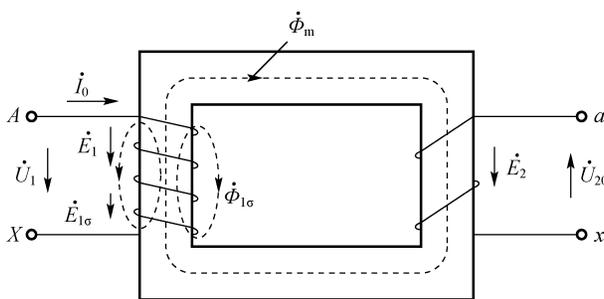


图 1-10 变压器空载运行示意图

1. 电磁过程

当一次绕组接交流电源后，绕组中有电流 i_0 流过，称为空载电流。 i_0 流过一次绕组建立交变磁动势 $\dot{F}_0 = i_0 N_1$ ，在 \dot{F}_0 作用下产生交变磁通。根据所经过的路径不同，磁通可分为主磁通和漏磁通。

主磁通同时交链一次绕组、二次绕组并沿铁芯闭合，在一次绕组、二次绕组中分别感应主电动

势 \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 。当二次侧接负载时，电功率即可向负载输出，因此主磁通起着传递能量的作用。由于铁磁性材料存在饱和现象，因此主磁路的磁阻不是常数，主磁通与建立它的电流之间呈非线性关系。

漏磁通通过一次绕组附近的空气或变压器油等非铁磁性介质构成磁通回路，仅在一次绕组中感应漏电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$ ，不能传递能量，仅起电抗压降作用。由于漏磁通的磁路大部分由非铁磁性材料组成，因此漏磁路的磁阻基本上是常数，漏磁通与产生它的电流呈线性关系。

由于铁芯的磁导率远比铁芯外非铁磁性材料的磁导率大，因此磁通中的绝大部分是主磁通，漏磁通只占总磁通的一小部分，同时一次侧电流在一次绕组中产生电阻压降。以上就是变压器空载运行时的电磁关系，如图 1-11 所示。

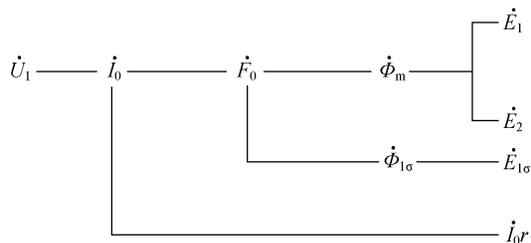


图 1-11 变压器空载运行时的电磁关系

2. 正方向规定

变压器中各电磁量都是交流量，要建立它们之间的相互关系，必须先规定各物理量的正方向。从原理上讲，正方向可以任意选择，但正方向规定不同，列出的电磁方程和绘制的相量图也不同，通常按惯例规定正方向，具体规定如下。

(1) 在一次侧，采用电动机惯例，即电流的正方向与电压的正方向一致；在二次侧，采用发电机惯例，即电流的正方向与电动势的正方向一致。

(2) 电流的正方向与它产生磁通的正方向符合右手螺旋关系。

(3) 磁通的正方向与它感应电动势的正方向符合右手螺旋关系。

根据这些规定，变压器各物理量的正方向规定如图 1-10 所示。图中电压 \dot{U}_1 、 \dot{U}_2 的正方向表示电位降低，电动势 \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 的正方向表示电位升高。在一次侧， \dot{U}_1 由首端指向末端， \dot{I}_0 (\dot{I}_1)从首端流入，当 \dot{U}_1 和 \dot{I}_0 (\dot{I}_1)同时为正或同时为负时，表示电功率从一次侧输入，称为电动机惯例；在二次侧， \dot{I}_2 和 \dot{U}_2 的正方向是由 \dot{E}_2 的正方向决定的，当 \dot{U}_2 和 \dot{I}_2 同时为正或同时为负时，表示电功率从二次侧输出，称为发电机惯例。

3. 电动势与磁通的关系

在变压器中，绕组的电阻压降和漏电动势相对很小，电源电压基本上由主电动势来平衡，即 $U_1 \approx E_1$ ，由于 u_1 是正弦量，因此 e_1 也是正弦量，根据 $e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$ 可知，主磁通 Φ 按正弦规律变化。

设

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (1-7)$$

式中， Φ_m ——主磁通的最大值。

根据电磁感应定律和图 1-10 中规定的正方向，一、二次绕组中感应电动势的瞬时值为

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = \sqrt{2} E_1 \sin (\omega t - 90^\circ) \quad (1-8)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \omega \Phi_m \cos \omega t = \sqrt{2} E_2 \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1-9)$$

可知, 当主磁通按正弦规律变化时, 感应电动势也按正弦规律变化, 且频率不变、相位滞后磁通 90° , 其有效值为

$$E_1 = \frac{N_1 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad (1-10)$$

$$E_2 = \frac{N_2 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_2 \Phi_m \quad (1-11)$$

用相量表示为

$$\dot{E}_1 = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m \quad (1-12)$$

$$\dot{E}_2 = -j4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m \quad (1-13)$$

同理, 对漏电动势有

$$e_{1\sigma} = \sqrt{2} E_{1\sigma} \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1-14)$$

$$E_{1\sigma} = 4.44 f N_1 \Phi_{1\sigma m} \quad (1-15)$$

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_{1\sigma m} \quad (1-16)$$

式中, $e_{1\sigma}$, $E_{1\sigma}$ ——一次绕组漏电动势的瞬时值和有效值;

$\Phi_{1\sigma m}$ ——一次绕组漏磁通的最大值。

二、空载电流和空载损耗

1. 空载电流

(1)空载电流的作用与组成。变压器空载运行时, 空载电流 \dot{I}_0 包含两个分量: 一个是励磁分量, 作用是产生主磁通 Φ_0 , 其相位与主磁通 Φ_0 相同, 这部分电流属无功性质, 用 \dot{I}_μ 表示; 另一个是铁损耗分量, 作用是供给主磁通在铁芯中交变时而产生的磁滞损耗和涡流损耗(统称为铁损), 这部分电流属有功性质, 用 \dot{I}_{Fe} 表示。故空载电流 \dot{I}_0 可表示为

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_\mu + \dot{I}_{Fe} \quad (1-17)$$

或

$$I_0 = \sqrt{I_\mu^2 + I_{Fe}^2} \quad (1-18)$$

(2)空载电流的性质和大小。由于 $I_\mu \gg I_{Fe}$, 所以 $I_0 \approx I_\mu$, 故常常称空载电流 I_0 为励磁电流。可见空载电流主要是感性无功性质的, 它使电网的功率因数降低, 输送有功功率减少, 因此, 变压器运行规程规定, 不允许变压器长期在电网中空载运行。

空载电流的大小用空载电流百分数 $I_0(\%)$ 来表示, 即

$$I_0(\%) = \frac{I_0}{I_N} \times 100\% \quad (1-19)$$

电力变压器的 $I_0(\%)$ 很小, 一般在 $1\% \sim 10\%$, 容量越大, $I_0(\%)$ 相对越小。例如, SFP7-370000/220 三相电力变压器的 $I_0(\%)$ 仅为 0.22% 。

(3)空载电流的波形。空载电流波形与铁芯磁化曲线有关, 由于磁路有饱和特性, 所以空载电流 I_0 与由它产生的磁通 Φ 之间呈非线性关系。当磁通按正弦规律变化时, 且 Φ 达到一定值后, 磁路开始饱和, 空载电流增长的速度比主磁通快得多, 形成尖顶波, 如图 1-12 所示; 反之, 若空载电流按正弦规律变化, 当 Φ 达到一定值后, 磁路开始饱和, 主磁通增长的速度比空载电流慢, 波形呈平顶波。

尖顶波可分解为基波和 3、5、7 次谐波(由于对称性,所以无偶次谐波分量)等。除基波外,3 次谐波分量最大。也就是说,由于铁磁性材料的饱和特性,要在变压器中建立正弦波磁通,励磁电流必须包含 3 次谐波分量。

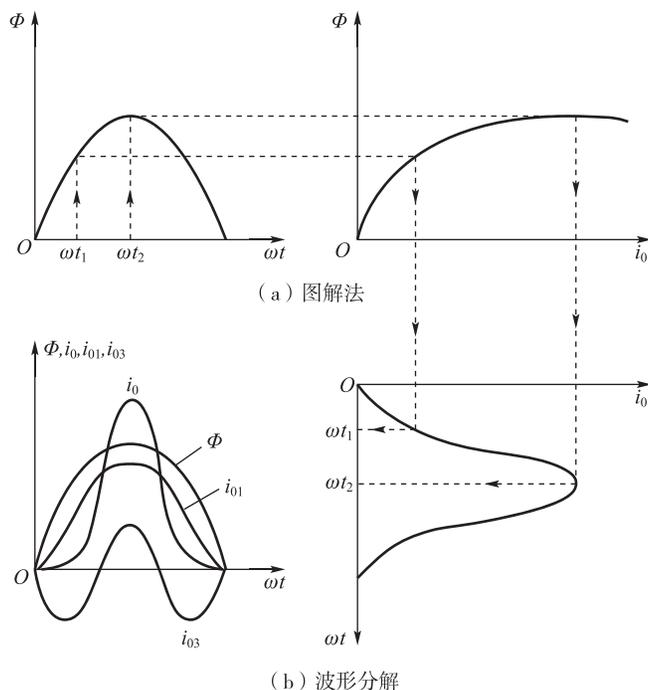


图 1-12 空载电流波形图



提醒

实际的空载电流并不是正弦波形,但为了分析、测量和计算的方便,在相量图和计算式中,均用等效正弦电流来代替实际的空载电流。

2. 空载损耗

变压器在空载运行时,二次侧虽然没有功率输出,但其一次侧仍会从电网吸收少量的有功功率 P_0 转化为热能散发到周围介质中,这部分功率称为空载损耗。

空载损耗包括铁损耗 P_{Fe} 和铜损耗 P_{Cu} 两部分,由于 I_0 和 r_1 都很小,所以空载运行时铜损耗可忽略不计,这样空载损耗近似等于铁损耗,即

$$P_0 \approx P_{Fe} \quad (1-20)$$

对于已制成的变压器,铁损耗与磁通密度幅值的平方成正比,与电源频率的 1.3 次方成正比,即

$$P_{Fe} \propto B_m^2 f^{1.3} \quad (1-21)$$

空载损耗占额定容量的 0.2%~1%,该百分值随着容量的增大而减小。空载损耗虽然不大,但由于变压器在电网中的使用量很大,铁损耗无时不在,所以减少铁损耗对电力系统的经济运行具有十分重要的意义。

三、空载时的电动势方程式、等效电路和相量图

1. 电动势平衡方程和变比

(1) 电动势平衡方程。按照图 1-10 规定的正方向,空载时一次侧的电动势平衡方程为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1\sigma} + \dot{I}_0 r_1 \quad (1-22)$$

将 $L_{1\sigma} = \frac{N_1 \Phi_{1\sigma}}{I_0} = \frac{N_1 \Phi_{1\sigma m}}{\sqrt{2} I_0}$ 代入式(1-16), 可以推导出 $\dot{E}_{1\sigma}$ 的电抗压降的表示形式为

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j\omega L_{1\sigma} \dot{I}_0 = -jx \dot{I}_0 \quad (1-23)$$

$$L_{1\sigma} = \frac{N_1 \Phi_{1\sigma}}{I_0}$$

$$x_1 = \omega L_{1\sigma}$$

式中, $L_{1\sigma}$ ——一次绕组的漏电感;

x_1 ——一次绕组的漏电抗。

将式(1-23)代入式(1-22)可得

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 r_1 + j\dot{I}_0 x_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \quad (1-24)$$

式中, Z_1 ——一次绕组的漏阻抗, $Z_1 = r_1 + jx_1$ 。

由于一次绕组的漏阻抗压降 $\dot{I}_0 Z_1$ 很小, 其数值不超过 U_1 的 0.2%, 如将 $\dot{I}_0 Z_1$ 忽略, 则式(1-24)可简化为 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ 。

在数值上有

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad (1-25)$$

于是, 可得

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4.44 f N_1} \approx \frac{U_1}{4.44 f N_1} \quad (1-26)$$

由式(1-26)可知, 决定变压器主磁通大小的参数有两种, 即电源参数(即电压和频率)和结构参数(即一次绕组的匝数)。



提醒

需要注意: 主磁通的大小与变压器的铁芯材质及几何尺寸无关。

当 f 、 N_1 一定时, 由式(1-26)得 $\Phi_m \propto U_1$, 说明变压器的主磁通虽然由空载磁动势 \dot{F}_0 产生, 但它的大小却基本由电源电压 U_1 决定。

在二次侧, 由于 $\dot{I}_0 = 0$, 因此二次侧的空载电压 \dot{U}_{20} 等于二次侧的感应电动势 \dot{E}_2 , 即

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2 \quad (1-27)$$

(2) 变压器的变比。在变压器中, 一、二次绕组的感应电动势 E_1 和 E_2 之比称为变压器的变比, 用 k 表示, 即

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4.44 f N_1 \Phi_m}{4.44 f N_2 \Phi_m} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-28)$$

式(1-28)表明, 变压器的变比等于一、二次绕组的匝数比。当变压器空载运行时, 由于 $U_1 \approx E_1$, $U_{20} = E_2$, 所以可近似地用空载运行时一、二次绕组的电压比作为变压器的变比, 即

$$k = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} \quad (1-29)$$

对于三相变压器, 变比是指一、二次侧相电动势(即线圈电动势)之比, 也就是额定相电压之比。

2. 空载时的等效电路

变压器的工作原理建立在电磁感应定律的基础上。在变压器运行时，既有电路、磁路问题，又有电和磁之间的相互耦合问题，尤其当磁路存在饱和现象时，将给分析和计算变压器性能带来不便和困难。若能将变压器运行中的电和磁之间的相互关系用一个模拟电路的形式来等效，这将极大简化分析和计算。等效电路就是基于这一概念建立而成的。

所谓等效电路就是用一个电路有条件地等效一台实际变压器，这样可以将变压器用一个纯电路来分析。

式(1-24)中，漏磁通感应的漏电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$ 可写成电抗压降形式。同样，主磁通感应的主电动势 \dot{E}_1 也可仿照上述关系，用电压降来表示，但考虑到交变主磁通在铁芯中还会产生铁损耗，它就不能单独用电抗参数表示，应引入一个阻抗参数 $Z_m = r_m + jx_m$ ，把 $-\dot{E}_1$ 看成 \dot{I}_0 在 $Z_m = r_m + jx_m$ 上的电压降， r_m 是反映铁损耗的电阻参数， $I_0^2 r_m$ 等于铁损耗，于是有

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_m = \dot{I}_0 (r_m + jx_m) \quad (1-30)$$

式中， Z_m ——变压器的励磁阻抗， $Z_m = \frac{-\dot{E}_1}{\dot{I}_0} = r_m + jx_m$ ；

r_m ——励磁电阻，反映铁损耗的等效电阻；

x_m ——励磁电抗，对应主磁路磁导的电抗。

于是变压器一次侧的电动势平衡方程可写成

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 = \dot{I}_0 (Z_m + Z_1) = \dot{I}_0 (r_m + jx_m + r_1 + jx_1) \quad (1-31)$$



提醒

r_m 既不是绕组电阻，也不是铁芯电阻，它仅仅是一个用来模拟铁芯损耗的等效电阻， $I_0^2 r_m$ 恰好等于铁损耗。

由式(1-31)可知，空载运行的变压器可以看成两个阻抗 Z_m 与 Z_1 串联到电源上。其空载时的等效电路如图1-13所示。

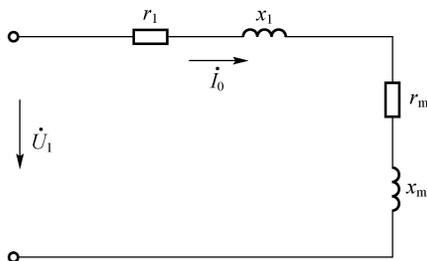


图 1-13 变压器空载时的等效电路

在等效电路中， r_1 是一次绕组的电阻， x_1 是一次绕组漏磁路磁导的电抗，它们的数值很小且为常数。但 r_m 、 x_m 却受铁芯饱和的影响，不是常数。当频率一定时，若外加电压升高，则主磁通 Φ_m 增大，铁芯饱和程度增加，磁导 A_m 下降， $x_m = \omega L_m = \omega N_1^2 A_m$ 减小；同时铁损 P_{Fe} 增大，但 P_{Fe} 增大的程度比 I_0^2 增大的程度小，由 $P_{Fe} = I_0^2 r_m$ 可知， r_m 也减小。反之，若外加电压降低，则 r_m 和 x_m

增大。通常外加电压是一定的,在正常运行范围内(由空载到满载)主磁通基本不变,磁路的饱和程度也近似不变,所以 r_m 、 x_m 可看作常数。

在数值上,因为 $r_m \gg r_1$ 、 $x_m \gg x_1$,所以有时把 r_1 、 x_1 忽略不计,这样变压器空载时的等效电路变成只有 Z_m 的电路。所以在一定的外加电压下,空载电流的大小主要取决于励磁阻抗的大小。从变压器运行角度看,希望空载电流越小越好,因而变压器采用高导磁性钢片,以增大 Z_m ,减少 I_0 ,提高其运行效率和功率因数。

3. 空载时的相量图

根据式(1-24)可作出变压器空载运行时的相量图,如图 1-14 所示。作图时以主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 作为参考相量, \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 滞后 $\dot{\Phi}_m$ 90° 。 \dot{I}_μ 与 $\dot{\Phi}_m$ 同相位, \dot{I}_{Fe} 与 $-\dot{E}_1$ 同相位, \dot{I}_μ 与 \dot{I}_{Fe} 二者的相量和为 \dot{I}_0 。 $-\dot{E}_1$ 加上与 \dot{I}_0 平行的 $\dot{I}_0 r_1$ 和与 \dot{I}_0 垂直的 $j\dot{I}_0 x_{1\sigma}$ 得到 \dot{U}_1 。 \dot{U}_1 与 \dot{I}_0 之间的相位差角 φ_0 称为空载运行时的功率因数角。由于 $\Phi_0 \approx 90^\circ$,所以变压器空载运行时的功率因数 $\cos \varphi_0$ 很低,一般为 $0.1 \sim 0.2$ 。

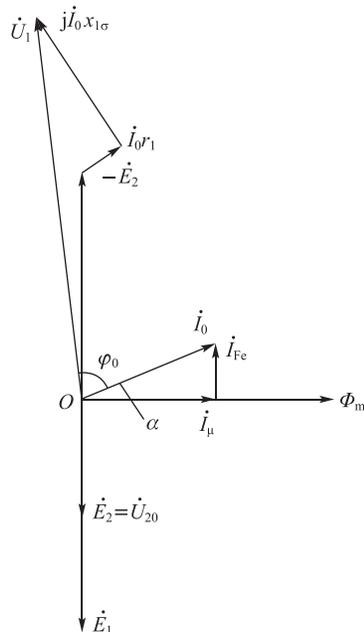


图 1-14 变压器空载运行时的相量图



提醒

相量图反映相量之间的相位关系,而且各量指的是每相值。

任务三 单相变压器的负载运行

任务描述

理解变压器负载运行时的电磁关系;
掌握变压器的基本方程式、相量图和等效电路。

任务分析

本任务主要分析变压器负载运行时的电磁关系及其表达形式,均针对单相变压器进行,所涉及的电压、电流、磁势、磁通、电动势、功率以及变压器本身的各参数都指单相的值。对于三相变压器,不论其电路接线方式和磁路系统是何种形式,只需要把各个物理量及变压器参数取为每相值,就完全可按单相变压器进行分析。

一、负载运行时的电磁关系

变压器的负载运行,是指变压器的一次侧接在额定频率、额定电压的交流电源上,二次侧接负

载时的运行状态。如图 1-15 所示为单相变压器负载运行时的示意图。

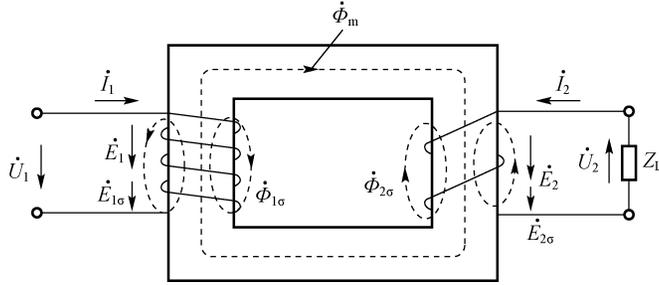


图 1-15 单相变压器负载运行时的示意图

当变压器空载运行时，二次侧电流及其产生的磁动势为零，二次绕组的存在对一次电路没有影响。一次侧空载电流 \dot{I}_0 产生的磁动势 $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 N_1$ 就是励磁磁动势，该磁动势产生主磁通 $\dot{\Phi}_m$ ，并在一、二次绕组中产生感应电动势 \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 。电源电压 \dot{U}_1 与反电动势 $-\dot{E}_1$ 、漏阻抗压降 $\dot{I}_0 Z_1$ 相平衡，维持空载电流在一次绕组中流过，此时变压器中的电磁关系处于平衡状态。当二次侧接上负载后，二次绕组中有电流 \dot{I}_2 流过并产生磁动势 $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 N_2$ 。 \dot{F}_2 也作用在变压器的主磁路上，使主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 和一、二次绕组中的感应电动势 \dot{E}_1 和 \dot{E}_2 趋于改变，于是原有的电动势平衡关系将发生变化，从而导致一次侧电流发生变化，即从空载电流 \dot{I}_0 变为负载时的电流 \dot{I}_1 。一次绕组的磁动势也从空载磁动势 $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 N_1$ 变为 $\dot{F}_1 = \dot{I}_1 N_1$ 。负载时的主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 是由一、二次绕组的合成磁动势 $\dot{F}_1 + \dot{F}_2$ 产生的。此时，变压器负载运行时的电磁关系如图 1-16 所示。

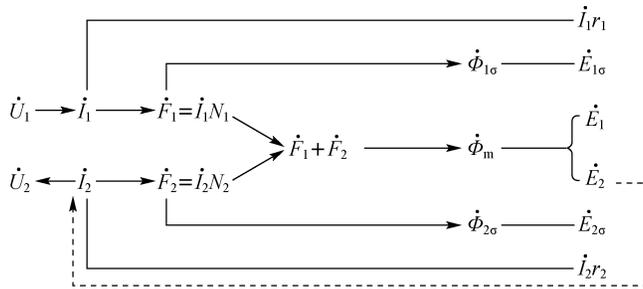


图 1-16 变压器负载运行时的电磁关系

二、负载运行时的基本方程式

1. 磁动势平衡方程式

当变压器负载运行时，铁芯中的磁动势由原边磁动势 $\dot{I}_1 N_1$ 和副边磁动势 $\dot{I}_2 N_2$ 合成，合成磁动势为 $\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2$ 。根据 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 = -j4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m$ ，只要外加的电源电压不变，铁芯中的主磁通近似不变，即变压器负载运行时，铁芯中产生的磁动势仍为 $\dot{I}_0 N_1$ ，即

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1 \quad (1-32)$$

由式(1-32)变换得

$$\dot{I}_1 N_1 = \dot{I}_0 N_1 + (-\dot{I}_2 N_2) \quad (1-33)$$

由式(1-33)看出，原边磁动势 $\dot{I}_1 N_1$ 有两方面作用：一方面产生铁芯中的励磁磁动势 $\dot{I}_0 N_1$ ，与空

载运行时有相同的主磁通 $\dot{\Phi}_m$ ；另一方面产生一个与副边磁动势 $\dot{I}_2 N_2$ 大小相等、方向相反的磁动势 $(-\dot{I}_2 N_2)$ ，抵消副边磁动势 $\dot{I}_2 N_2$ 的作用，以维持铁芯中的主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 不变。式(1-32)和式(1-33)称为磁动势平衡方程式。

将磁动势平衡方程式表示为电流的形式，得

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2\right) \quad (1-34)$$

由式(1-34)看出，变压器负载运行时的原边电流 \dot{I}_1 是大于变压器空载时的原边电流 \dot{I}_0 的，它由反映主磁通 $\dot{\Phi}_m$ 大小的励磁电流分量 \dot{I}_0 和反映负载大小的负载电流分量 $\left(-\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2\right)$ 组成。当负载增加时， \dot{I}_2 增加，副边磁动势 $\dot{I}_2 N_2$ 增加，原边电流的负载电流分量 $\left(-\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2\right)$ 也相应增加，使其产生的磁动势 $\left(-\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2\right) N_1$ 得以抵消增加了的副边磁动势 $\dot{I}_2 N_2$ ，以维持励磁电流分量 \dot{I}_0 不变。可见，虽然变压器的原、副边没有直接的电路联系，但负载电流的变化也会使原边电流相应地发生改变。

2. 电动势平衡方程式

当变压器负载运行时，副边电路流过电流 \dot{I}_2 ，产生副边磁动势 $\dot{I}_2 N_2$ 。副边磁动势 $\dot{I}_2 N_2$ 一方面与原边磁动势 $\dot{I}_1 N_1$ 共同作用产生铁芯中的主磁通，另一方面还产生仅与二次绕组交链的漏磁通 $\dot{\Phi}_{2\sigma}$ 。 $\dot{\Phi}_{2\sigma}$ 在二次绕组中感应出漏感电动势 $\dot{E}_{2\sigma}$ ， $\dot{E}_{2\sigma}$ 也可以以副边漏电抗 x_2 上的压降形式来表示，即

$$\dot{E}_{2\sigma} = -j x_2 \dot{I}_2 \quad (1-35)$$

根据原、副边电路，可列出变压器负载运行时的电动势平衡方程式，即

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + j x_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \quad (1-36)$$

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 (r_m + j x_m) = \dot{I}_0 Z_m \quad (1-37)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (r_2 + j x_2) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \quad (1-38)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 (r_L + j x_L) = \dot{I}_2 Z_L \quad (1-39)$$

式中， r_L ——负载电阻；

x_L ——负载电抗；

Z_L ——负载阻抗；

\dot{U}_2 ——副边电压有效值相量。

综上所述，可列出变压器负载运行时的基本方程组为

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ -\dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_m \\ \dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \\ \dot{E}_1 = k \dot{E}_2 \\ \dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\frac{1}{k} \dot{I}_2\right) \end{cases} \quad (1-40)$$

三、变压器的等效电路

变压器负载时的基本方程式综合了变压器内部的电磁关系。可利用这些方程式来研究、分析和计算变压器的各种运行性能。由于一次、二次侧匝数不相等，而且在一般电力变压器中，变比 k 的数值较大，其一次侧、二次侧电压与一次侧、二次侧电流等数值相差较大，因此在实际计算时，不仅十分烦琐，而且也不精确，画负载运行时的相量图将更困难，因此希望有一个既能正确反映变压器内部电磁关系，又便于工程计算的简单电路来代替具有电路联系和磁路耦合的实际变压器，这种电路称为等效电路。采用归算的办法可解决上述问题。

1. 变压器的归算

变压器的归算通常是指将一个与一次绕组具有相等匝数的等效绕组去代替原来具有 N_2 匝数的二次绕组。变压器的变比由归算前的 $k = \frac{N_1}{N_2}$ 变成归算后的 $k = \frac{N_1}{N_2} = 1$ 。归算仅仅是为了简化变压器的研究方法，因此归算前后变压器内部的电磁关系、功率关系不能有任何改变，使具有 N_2 匝数的二次绕组与具有 N_1 匝数的真实二次绕组完全等效。

二次绕组的归算量都将变化，用原来的符号加“'”以示与非归算量的区别，各量应按下列步骤进行归算。

(1) 二次侧电动势的归算。在归算前后，电磁关系不变，主磁通不应改变，而感应电动势与匝数成正比，于是经归算后的二次侧感应电动势为

$$E_2' = E_1 = kE_2 \quad (1-41)$$

式(1-41)说明，要把二次侧电动势归算到一次侧，将 E_2 乘以变比 k 即可，且归算后其数值等于 E_1 。

(2) 二次侧电流的归算。归算前后要使主磁通不变，二次绕组所产生的磁势也不应改变，即 $I_2' N_1 = I_2 N_2$ ，所以

$$I_2' = \frac{N_2}{N_1} I_2 = \frac{I_2}{k} \quad (1-42)$$

归算后的二次侧电流 I_2' ，由 I_2 除以变比 k 即可得。

归算后二次侧的视在功率为

$$I_2' E_2' = \left(\frac{1}{k}\right) (kE_2) = E_2 I_2 \quad (1-43)$$

它与归算前的二次侧视在功率相等，故用式(1-41)和式(1-42)将二次侧的电动势与电流进行归算，并不改变二次侧的视在功率。

(3) 二次阻抗的归算。归算前后，一次侧与二次侧的功率传递关系不应改变，故二次绕组的铜损及负载上所吸收的有功功率均不应改变，即

$$I_2'^2 R_2' = I_2^2 R_2 \quad I_2'^2 R_L' = I_2^2 R_L \quad (1-44)$$

式中， R_L ——负载电阻。

从式(1-44)可得到归算后的二次侧电阻，它们分别为

$$R_2' = \left(\frac{I_2}{I_2'}\right)^2 R_2 = k^2 R_2 \quad (1-45)$$

$$R_L' = \left(\frac{I_2}{I_2'}\right)^2 R_L = k^2 R_L \quad (1-46)$$

同理，二次侧绕组及负载的无功功率也均不应改变，因此

$$I_2'^2 X_2' = I_2^2 X_2, \quad I_2'^2 X_L' = I_2^2 X_L \quad (1-47)$$

式中， X_L ——负载电抗。

从式(1-47)可得到归算后的二次侧电抗，它们分别为

$$X_2' = \left(\frac{I_2}{I_2'}\right)^2 X_2 = k^2 X_2 \quad (1-48)$$

$$X_L' = \left(\frac{I_2}{I_2'}\right)^2 X_L = k^2 X_L \quad (1-49)$$

(4)二次侧端电压的归算。由以上可知，经归算后，二次侧电流为归算前的 $\frac{1}{k}$ ，但负载阻抗却增为 k^2 倍，因此二次侧的端电压(即负载阻抗上压降)应增为 k 倍，故

$$U_2' = I_2' Z_2' = \left(\frac{1}{k} I_2\right) (k^2 Z_L) = k I_2 Z_L \quad (1-50)$$

即

$$U_2' = k U_2 \quad (1-51)$$

按照上述步骤进行归算，二次侧的视在功率、有功功率及无功功率均未改变，因此变压器内部的能量传递过程并未受到任何影响，从一次侧来看，完全具有等值的效果。以后就用经过归算以后的变压器来进行研究，分析了归算后的变压器得到所要求的结果后，又可应用式(1-41)、式(1-42)等很方便地归算回去，获得实际的二次侧数值。

归算后变压器负载运行时的基本方程式将变为以下形式：

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_0 \\ \dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2' \\ \dot{E}_1 = \dot{E}_2' = -\dot{I}_0 Z_m \end{cases} \quad (1-52)$$

采用归算后的基本方程式分析、计算变压器各物理量更简便、准确，且画其相量图也更容易。

2. 等值电路

利用归算过的变压器的基本方程式可找出负载运行时的等值电路。

首先，按式(1-52)分别画出一一次侧、二次侧的电路，如图 1-17 所示，图中二次侧绕组各量均已归算到一次绕组，即 $N_2' = N_1$ 。这是变比 $k = 1$ 的变压器，其 $\dot{E}_2' = \dot{E}_1$ 。既然归算之后一次侧、二次侧感应电动势相等，故可把它们之间的等电位点连接起来，而不会改变变压器内部的电磁关系。这样便可将两个绕组合并成一个绕组，在这个绕组中有电流 $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2'$ 通过，则一次侧、二次侧的磁势平衡关系变成了电流平衡关系，使得一次侧、二次侧有了电路的直接联系。当我们再把感应电动势 \dot{E}_1 用励磁电流 \dot{I}_0 在励磁阻抗 $Z_m = R_m + jX_m$ 上的电压降来代替，这样就得到了变压器负载运行时的等值电路，如图 1-18 所示。若只看变压器本身的 3 个阻抗，其形状像字母 T，故称为 T 形等值电路。

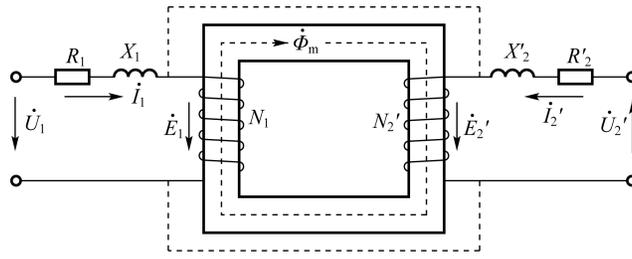


图 1-17 变压器负载运行示意图

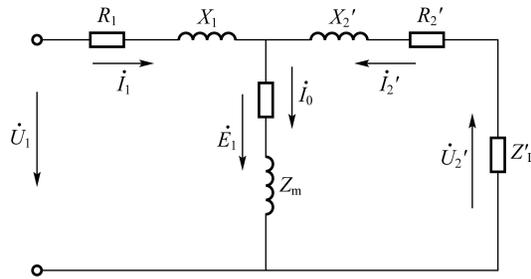


图 1-18 变压器负载运行时的 T 形等值电路

其次，通过基本方程式(1-52)及 $\dot{U}_2' = \dot{I}_2' Z_L'$ 的联立，可得到

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z_2' + Z_L'}}} = \frac{\dot{U}_1}{Z_d} \quad (1-53)$$

式中， Z_d 计算式为

$$Z_d = Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_m} + \frac{1}{Z_2' + Z_L'}}$$

由 Z_d 组成的三个支路即如图 1-18 所示的 T 形等值电路。

当我们导出了变压器的 T 形等值电路，使变压器稳态运行情况下的分析、计算变为对等值电路的求解，使问题大为简化。

四、变压器负载时的相量图

相量图不仅表明变压器中的电磁关系，而且还可较直观地看出变压器中各物理量的大小和相位关系。根据如图 1-18 所示变压器的 T 形等值电路及式(1-53)，可画出相应的相量图，图 1-19 即感性负载时的相量图。

当变压器的给定量和求解量不同时，相量图的绘制步骤可以不同，但绘制过程中每一步都应依据相应的基本方程式，故相量图是基本方程式的体现或图示表示法。它很直观地把基本方程式的关系清楚地表示出来。

式(1-53)是对应于 T 形等值电路的基本方程式，图 1-19 是对应于它们的相量图，三者是同一内容的三种不同表示方式，是相辅相成的。

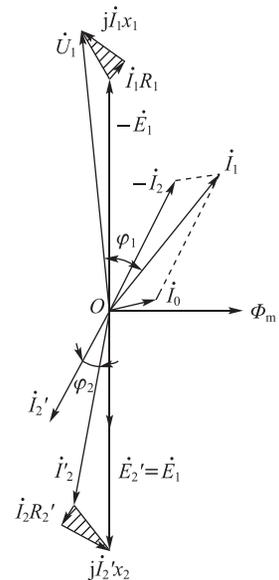


图 1-19 感性负载时的变压器相量图

任务四 变压器参数的测定

任务描述

掌握变压器空载实验和短路实验的测定方法；
了解变压器的标幺值。

任务分析

对于变压器稳态对称运行时的等值电路，只有知道了等值电路的参数才能分析计算变压器的运行性能。而且变压器等值电路参数的大小直接影响到变压器的性能。变压器的参数是由变压器使用的材料、结构形状及几何尺寸决定的。确定这些参数，一种方法是在设计时根据材料及结构尺寸计算出来，另一种方法则是对现有的变压器通过实验的办法测定出来。本任务主要介绍通过实验测定变压器参数的方法。

一、空载实验

由变压器的空载实验可以求出铁损耗 P_{Fe} 、励磁阻抗 Z_m 和变比 k 等。

空载实验的线路图如图 1-20 所示，其中，图 1-20(a)为单相变压器，图 1-20(b)为三相变压器。当它们的变压器副边开路时，原边接额定电压 U_{1N} ，测量电压 U_1 、电流 I_0 、输入功率 P_0 和副边开路电压 U_{20} 。

变压器空载实验时，因变压器没有输出功率，故输入的功率消耗在变压器内部。其中，铁损耗 P_{Fe} 是主要的，由于外加电压 U_1 为额定电压 U_{1N} ，铁芯中的主磁通与额定运行时相同，其涡流和磁滞损耗为正常运行时的数值；还有空载电流 I_0 在原绕组中的铜损耗 P_{Cu1} ，但由于 I_0 很小，故这个损耗很小，可以忽略。因此，可近似认为空载实验输入功率 $P_0 \approx P_{Fe}$ 。

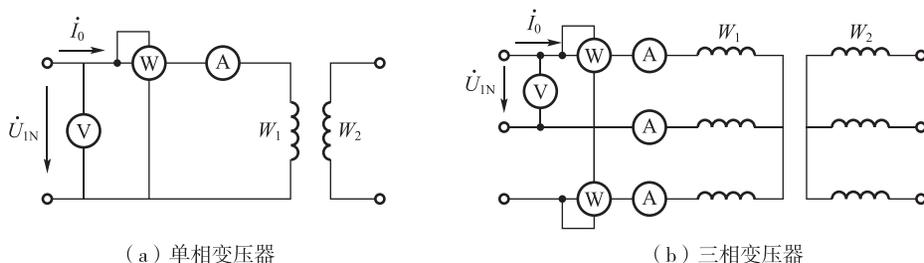


图 1-20 变压器空载实验的线路图

根据图 1-20 空载实验的测量结果，可以计算出变压器以下各参数。

空载阻抗为

$$Z_0 = \frac{U_1}{I_0} \text{ (单相)} \quad Z_0 = \frac{U_1}{\sqrt{3} I_0} \text{ (三相)} \quad (1-54)$$

$$r_0 = \frac{P_0}{m I_0^2} \quad (1-55)$$

式中, $Z_0 = Z_1 + Z_m$, $r_0 = r_1 + r_m$ 。

由于 $r_1 \ll r_m$ 和 $Z_1 \ll Z_m$, 所以可以认为
励磁电阻为

$$r_m \approx r_0 \quad (1-56)$$

励磁阻抗为

$$Z_m \approx Z_0 \quad (1-57)$$

励磁电抗为

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2} \quad (1-58)$$

变压器变比为

$$k = \frac{U_1}{U_{20}} \quad (1-59)$$

变压器空载实验可以在原边进行, 也可以在副边进行。在副边进行时, 副边加额定电压, 原边开路。对于电力变压器, 为了方便, 一般都选择低压边进行空载实验。



提醒

涡流是一种电磁感应现象。当变化的磁通穿过整块导体时, 产生了感应电动势, 形成旋涡形电流, 称为涡流, 如图 1-21 所示。

在交流电气设备中, 交变电流的交变磁通在铁芯中产生涡流, 会使铁芯发热而消耗电功率, 称为涡流损耗。它与磁滞损耗合称为铁损。

置于随时间变化的磁场中的导体内也会产生涡流, 如变压器的铁芯, 其中有随时间变化的磁通, 它在副边产生感应电动势, 同时也在铁芯中产生感应电动势, 从而产生涡流。这些涡流会使铁芯发热, 消耗电能。涡流并不总是不利的, 如高频感应电炉利用涡流来加热或冶炼金属, 电度表中的转动铝盘利用涡流的电磁阻尼作用运行。

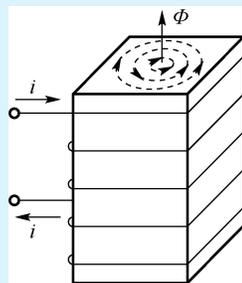


图 1-21 涡流的产生



思考与分析

如何减小铁芯中的涡流呢?

分析: 为了减小涡流, 铁芯通常用厚度为 0.35~0.5 mm 的软磁材料硅钢片叠成, 如图 1-22 所示。硅钢片间有绝缘层, 目的是减小涡流的损耗。

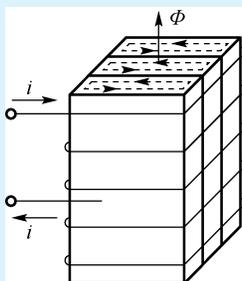


图 1-22 涡流的削弱

二、短路实验

由变压器的短路实验可以求出铜损耗 P_{Cu} 、短路阻抗 Z_k 等。

短路实验的线路图如图 1-23 所示。在短路实验时，把副边短路，原边电压从 0 逐渐增大，到原边电流 I_1 接近或等于额定值为止，测量原边电压 U_k 、电流 I_1 和输入功率 P_k 。

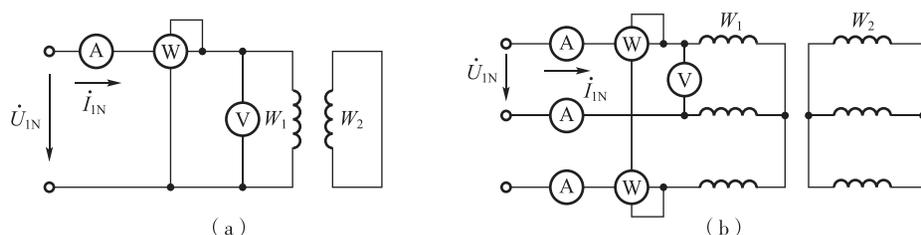


图 1-23 变压器短路实验

短路实验时，变压器也没有输出功率，输入的功率也消耗在变压器内部。其中主要是铜损耗，若原边电流为额定值，副边电流也为额定值，这时，原、副边铜损耗都是额定负载时的铜损耗。而此时的铁损耗，由于副边短路，从原边看过去的总阻抗就是短路阻抗 Z_k ，其值很小，当绕组流过额定电流时，原边所加的端电压比额定电压 U_{1N} 低很多。这样，铁芯中的主磁通也比正常运行时小很多，故铁芯中的涡流和磁滞损耗比在正常运行时就小到了可以忽略的程度。因此，可近似地认为在短路实验时的输入功率等于铜损耗，即

$$P_k = P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2} \quad (1-60)$$

式中， P_{Cu} ——变压器总的铜损耗；

P_{Cu1} ——原边铜损耗；

P_{Cu2} ——副边铜损耗。

根据短路实验测量的结果，可以计算出变压器的以下参数。

短路阻抗为

$$Z_k = \frac{U_k}{I_1} \text{ (单相)} \quad Z_k = \frac{U_k}{\sqrt{3} I_1} \text{ (三相)} \quad (1-61)$$

短路电阻为

$$r_k = \frac{P_k}{m I_1^2} \quad (1-62)$$

短路电抗为

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} \quad (1-63)$$

根据国家规定，在计算变压器的性能时，绕组的电阻要换算到 75 °C 时的数值。换算公式为

$$r_{k75} = r_k \frac{234.5 + 75}{234.5 + \theta} \quad (1-64)$$

式中， θ ——实验时的室温，单位为 °C。

在 75 °C 时的短路阻抗为

$$Z_k = \sqrt{r_{k75}^2 + X_k^2} \quad (1-65)$$

提醒

计算短路时变压器的参数，应注意以下几点。

(1) 对于三相变压器， P_k 、 U_k 、 I_k 均为一相的数值。

(2) 当短路电流为额定值时，短路损耗称为额定短路损耗，用 P_{kN} 表示，换算到 75°C 时的值为 $P_{kN} = I_{1N}^2 r_{k75}$ 。

(3) 短路实验在高压侧进行，得到的参数是对应高压侧的参数，要想得到对应低压侧的参数，必须进行归算。

如果需要将 Z_1 和 Z_2' 分开，可近似地认为 $Z_1 \approx Z_2'$ ， $r_1 \approx r_k'$ ， $X_1 \approx X_2'$ 。

在短路实验中，当一次绕组的电流为额定电流时，一次绕组所加的电压称为短路电压，换算到 75°C 时的值为 $U_{kN} = I_{1N} Z_{k75}$ ，通常用它与额定电压之比的百分值来表示，即

$$u_k = \frac{U_{kN}}{U_{1N}} \times 100\% = \frac{I_{1N} Z_{k75}}{U_{1N}} \times 100\% \quad (1-66)$$

u_k 是额定电流在短路阻抗上的压降，所以也称为“阻抗电压”。

短路电压的有功分量(也称“电阻压降”)和无功分量(也称“电抗压降”)分别为

$$\begin{cases} u_{kr} = \frac{I_{1N} r_{k75}}{U_{1N}} \times 100\% \\ u_{kx} = \frac{I_{1N} X_{k75}}{U_{1N}} \times 100\% \end{cases} \quad (1-67)$$

短路电压与其有功分量和无功分量之间的关系为

$$u_k = \sqrt{u_{kr}^2 + u_{kx}^2} \quad (1-68)$$

短路电压的大小反映了短路阻抗的大小，而短路阻抗又直接影响变压器的运行性能。从正常运行的角度看，短路电压应小些，这样，当负载变化时，二次电压波动小；但从短路故障的角度看，短路电压则应大一些，相应的短路电流就可以小些。一般中、小型电力变压器 u_k 为 $4\% \sim 10.5\%$ ，大型电力变压器 u_k 为 $12.5\% \sim 17.5\%$ 。

三、标么值

在工程计算中，许多物理量往往不用实际值表示，而是用实际值与某一选定的该物理量的基准值(与实际值同单位)之比来表示，称为该物理量的标么值(或相对值)，即

$$\text{标么值} = \frac{\text{实际值}}{\text{基准值}}$$

在变压器和电机中，通常取该物理量的额定值作为基准值。例如，取一次侧、二次侧额定相电压 U_{1N} 、 U_{2N} 作为一次侧、二次侧电压的基准值；取一次侧、二次侧额定相电流 I_{1N} 、 I_{2N} 作为一次侧、二次侧电流的基准值；取额定容量 S_N 作为变压器功率的基准值；一次侧、二次侧阻抗的基准值

$$\text{分别为 } Z_{1N} = \frac{U_{1N}}{I_{1N}}, Z_{2N} = \frac{U_{2N}}{I_{2N}}。$$

为了区别标么值和实际值，在各量原来的符号右上方标“*”来表示该量的标么值，如 $U_1^* = \frac{U_{1N}}{U_{1N}}$ ， $I_1^* = \frac{I_1}{I_{1N}}$ ， $Z_1^* = \frac{Z_1}{Z_{1N}} = \frac{I_{1N} Z_1}{U_{1N}}$ 等。

采用标幺值表示时, 有

$$\begin{cases} Z_m^* = \frac{Z_m}{Z_{1N}} = \frac{U_{1N}/I_0}{U_{1N}/I_{1N}} = \frac{U_{1N}^*}{I_0^*} = \frac{I}{I_0^*} \\ r_m^* = \frac{r_m}{Z_{1N}} = \frac{P_0/I_0^2}{U_{1N}/I_{1N}} = \frac{P_0/S_N}{I_0^{*2}} \\ X_m^* = \sqrt{Z_m^{*2} - r_m^{*2}} \end{cases} \quad (1-69)$$

式(1-69)说明, 无论用标幺值表示, 还是用实际值表示, 基本方程的形式不变。标幺值与百分值相似, 均属于无量纲的相对单位制, 它们之间的关系为

$$\text{百分值} = \text{标幺值} \times 100\%。$$

采用标幺值具有以下几方面优点。

(1) 标幺值可以简化各量的数值, 并能直观地看出变压器的运行情况。例如, 某量为额定值时, 其标幺值为 1; 若 $I_2^* = 0.9$, 表明该变压器带 90% 的负载。

(2) 用标幺值表示时, 电力变压器的参数和性能指标总在一定的范围之内, 便于分析比较。例如, 短路阻抗为 $Z_k^* = 0.04 \sim 0.175$, 空载电流为 $I_0^* = 0.02 \sim 0.10$ 。

(3) 采用标幺值计算时, 一、二次侧各量均不需要归算。例如

$$U_2^{*'} = \frac{U_2'}{U_{1N}} = \frac{kU_2}{kU_{2N}} = \frac{U_2}{U_{2N}} = U_2^*$$

(4) 采用标幺值时, 某些不同的物理量具有相同的数值。例如

$$\begin{cases} Z_k^* = \frac{Z_k}{Z_{1N}} = \frac{I_{1N}Z_k}{U_{1N}} = \frac{U_{kN}}{U_{1N}} = U_{kN}^* \\ r_k^* = \frac{r_k}{Z_{1N}} = \frac{I_{1N}r_k}{U_{1N}} = \frac{U_{kr}}{U_{1N}} = U_{kr}^* = P_{kN}^* \\ X_k^* = \frac{X_k}{Z_{1N}} = \frac{I_{1N}X_k}{U_{1N}} = \frac{U_{kx}}{U_{1N}} = U_{kx}^* \end{cases} \quad (1-70)$$

额定运行时, 有

$$\begin{cases} S_N^* = U_N^* I_N^* = 1 \\ P_N^* = U_N^* I_N^* \cos \varphi_N = \cos \varphi_N \\ Q_N^* = U_N^* I_N^* \sin \varphi_N = \sin \varphi_N \end{cases} \quad (1-71)$$

(5) 采用标幺值时, 三相电路的计算公式与单相电路完全相同(证明从略)。线电压、线电流的标幺值与相电压、相电流的标幺值相等, 三相功率的标幺值与单相功率的标幺值相等。需要说明的是, 它们的基准值不同, 前者的基准值是额定线电压、线电流和三相功率, 后者的基准值是额定的相电压、相电流和一相功率。

提醒

标幺值无量纲, 因而不能用量纲检验公式是否正确。

任务五 变压器的运行特性

任务描述

掌握变压器的电压变化率的计算方法；
理解变压器的外特性与效率特性；
掌握变压器损耗的概念。

任务分析

变压器的运行特性是表征变压器运行时的性能曲线。变压器的运行特性主要有两个，即外特性和效率特性。变压器运行性能的主要指标为电压变化率和效率，它们体现了上述的两个特性。本任务重点介绍变压器的外特性和效率特性。

一、变压器的电压变化率与外特性

电压变化率是指一次侧加额定电压，从空载到满载二次侧端电压之差($U_{2N} - U_2$)与额定电压之比，用公式表示为

$$\Delta u = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \times 100\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\% \quad (1-72)$$

Δu 也可用一次侧的数值计算，即

$$\Delta u = \frac{k(U_{2N} - U_2)}{kU_{2N}} \times 100\% = \frac{U_{1N} - U_2}{U_{1N}} \times 100\% \quad (1-73)$$

提醒

变压器的电压变化率表征了电网电压的稳定性，反映了负载时的供电质量，所以它是变压器的一项重要性能。

变压器负载时的电压变化率可以用简化等值电路及其相量图来分析。如图 1-24 所示是采用标幺值画出的变压器负载时的简化等值电路图，由于采用了标幺值，因为其归算前后标幺值数值相等，所以副边电流及阻抗都不必写成归算值形式。

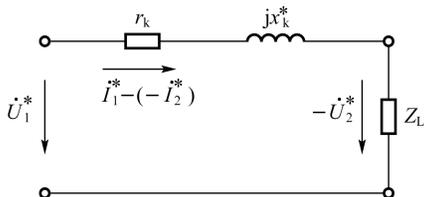


图 1-24 采用标幺值，变压器负载时的简化等值电路图

从如图 1-24 所示的等值电路可以看出

$$\dot{U}_1^* = \dot{I}_1^* Z_k^* + (-\dot{U}_2^*) \quad (1-74)$$

图 1-25 是采用标幺值画出的变压器简化相量图，原边电压为额定值时， $\dot{U}_1^* = 1.0$ ，其中，图 1-25(a)是感性负载时的相量图，图 1-25(b)是容性负载时的相量图。从式(1-74)和相量图都可看出，副边电压变化的原因是 $\dot{I}_1^* Z_k^* \neq 0$ ，也就是变压器负载运行时，其漏阻抗上有电压降。因此，当电流的标幺值 I_1^* 相等、负载阻抗角 φ_2 相等时，变压器短路阻抗标幺值 Z_k^* 越大，它的电压变化率 Δu 就越大；当同一台变压器在 φ_2 相等的条件下，负载越大， Δu 就越大；如果负载电流相同而 φ_2 不同时， Δu 不相等，如带感性负载或纯电阻负载时， $U_2 < 1.0$ ，副边电压低于额定值， $\Delta u > 0$ ；带容性负载时，副边电压却有可能升高，使 $\Delta u < 0$ 。

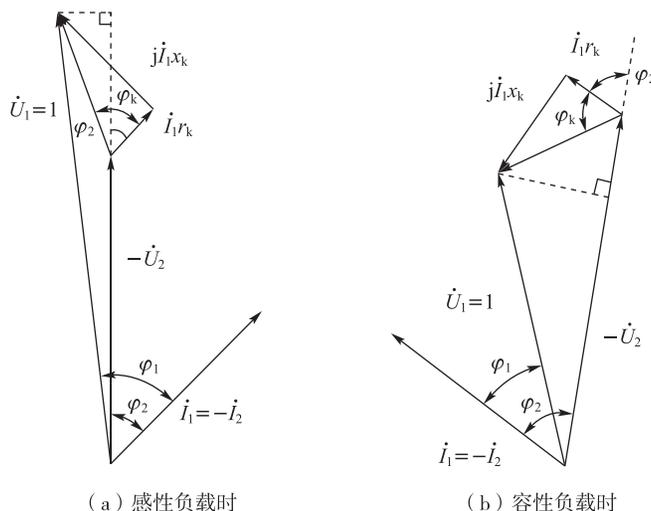


图 1-25 采用标幺值的变压器简化相量图

对于电力变压器，特别是当它的容量或电压较高时，其电压变化率要通过实验测定是很困难的或不可能实现的，因此可采用以下方法来计算。从如图 1-25 所示的相量图中代表各电压值的几何线段长度之间的关系，可以推导出电压变化率 Δu 与短路阻抗 Z_k 、负载电流大小和负载性质之间关系的表达式为

$$\Delta u = \beta(r_k^* \cos \varphi_2 + X_k^* \sin \varphi_2) \quad (1-75)$$

式中， β ——负载系数，即原、副边电流标幺值， $\beta = I_1^* = I_2^*$ 。

当变压器带额定负载时，即 $\beta = 1$ 时，计算出来的 Δu 称为变压器的额定电压变化率，它是变压器的一个重要的运行指标。

【例 1-2】 一台容量为 800 kV·A 的三相电力变压器，已知 $r_k^* = 0.0124$ ， $X_k^* = 0.0433$ ，分别计算额定负载下功率因数为 $\cos \varphi_2 = 0.8$ 落后及功率因数为 $\cos \varphi_2 = 0.8$ 领先时，变压器的额定电压变化率。

解 (1) 当功率因数为 $\cos \varphi_2 = 0.8$ 落后时

$$\sin \varphi_2 = 0.6$$

$$\Delta u = (r_k^* \cos \varphi_2 + X_k^* \sin \varphi_2) = 1.0 \times (0.0124 \times 0.8 + 0.0433 \times 0.6) = 0.0359 = 3.59\%$$

可见，副边端电压相对于额定值降低了 3.59%。

(2) 当功率因数为 $\cos \varphi_2 = 0.8$ 领先时

$$\sin \varphi_2 = -0.6$$

$$\begin{aligned} \Delta u &= (r_k^* \cos \varphi_2 + X_k^* \sin \varphi_2) = 1.0 \times (0.0124 \times 0.8 - 0.0433 \times 0.6) = -0.01606 \\ &= -1.606\% \end{aligned}$$

可见，副边端电压相对于额定值升高了 1.606%。



提醒

在实际运行中，电力变压器带的负载通常是电感性负载，所以端电压通常为下降的。

变压器副边端电压与负载电流的关系称为变压器的外特性，画成曲线如图 1-26 所示，图中电压与电流均采用标幺值，也可采用实际值。

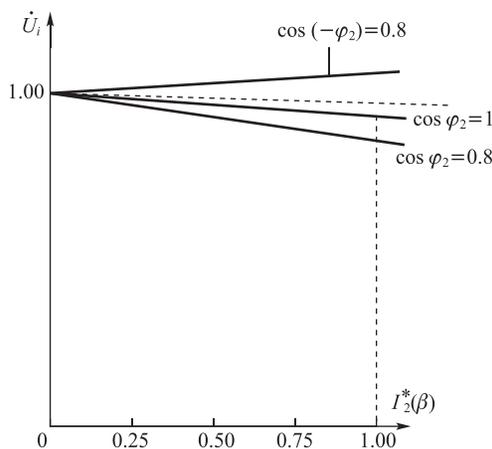


图 1-26 变压器的外特性

当 $\varphi_2 = 0^\circ$ 时，外特性为一条稍微向下倾斜的曲线，表示变压器带电阻性负载时，二次端电压随负载增加而稍有下降；当 $\varphi_2 > 0^\circ$ 时，外特性也为一条下倾的曲线，表明变压器带电感性负载时，二次端电压随负载增加而下降；当 $\varphi_2 < 0^\circ$ 时，外特性可能为一条上升的曲线，表明变压器带电容性负载时，在一般情况下，二次端电压随负载增加而上升。

当变压器的电压变化率超出允许范围，就需要进行调压。通常是通过改变变压器的变比（匝数比）进行有级调压。变压器在高压绕组设置分接头，通过分接开关变换分接头，切除或增加部分线圈匝数，以改变变压器的匝数比，达到调压的目的。分接开关有无励磁调压分接开关和有励磁调压分接开关两种类型。前者是在变压器一、二次侧均与电网断开（无励磁）的情况下，改变分接头进行调压；后者是在带负载的情况下，改变分接头进行调压。

二、变压器的损耗、效率和效率特性

1. 变压器的损耗

(1) 铁损耗。

① 基本铁损。变压器的基本损耗主要是磁滞损耗与涡流损耗。磁滞损耗占铁损的 60%~70%，为基本铁损的主要成分，它与磁通密度的最大值 B_m 、频率 f 以及硅钢片材料性质有关。涡流损耗除与 B_m 、 f 有关外，还与硅钢片的厚度、电阻率有关。由于变压器铁芯都采用较薄的硅钢片，所以铁

芯中此种损耗所占比例较小。

②附加铁损。产生此种损耗的原因较多，主要是铁芯接缝处由于磁通密度分布不均匀所引起的损耗，及在油箱、铁轭夹件、拉紧螺杆等结构零部件中所产生的涡流损耗。附加损耗很难精确计算，对中、小容量变压器，其数值较小，可不予考虑。而对大型变压器，附加损耗显著增加，常采取铁芯的紧固件用非磁性材料和油箱内壁用铝板或硅钢片制成电磁屏蔽等措施，以减少附加损耗，并防止这些结构部件的局部过热。

实验结果表明，当频率不变时，变压器的铁损近似地与 B_m^2 成正比，即与 Φ_m^2 、 E_1^2 成正比。当负载电流变化时，感应电动势 E_1 与铁芯中主磁通 Φ_m 的变化均很小，可认为是定值，所以铁损为一常数，被称为不变损耗。

(2)铜损耗。

①基本铜损。基本铜损是指变压器一次、二次绕组中通过负载电流所引起的直流电阻损耗。

②附加铜损。附加铜损主要是指由漏磁通所引起的集肤效应，使电流在导线截面中分布不均匀而产生的额外损耗以及绕组由多根导线并绕(如螺旋式绕组)时内部环流产生的损耗等。一般 630 kV·A 以下的小容量变压器，其附加铜损占基本铜损的 3%~5%；而大于 8 000 kV·A 的变压器，附加损耗可达基本铜损的 10%~20%；巨型变压器的附加铜损则更大。因此大容量变压器广泛采用导线换位等措施，以减少附加铜损。



提醒

集肤效应是指当导体通以交流电流时，导体断面上出现的电流分布不均匀，电流密度由导体中心向表面逐渐增加，大部分电流仅沿导体表层流动的一种物理现象。导体的电阻率越低、磁导率越大、电流的频率越高，其集肤效应越显著。

2. 变压器的效率

变压器的效率定义式为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (1-76)$$

式中， P_1 ——一次绕组输入的有功功率；

P_2 ——二次侧绕组输出的有功功率。

变压器无转动部分效率较高，多数在 95% 以上，大型电力变压器可达 99% 以上。确定变压器的效率通常不采用直接测量 P_1 和 P_2 的方法，这是因为测量仪表本身的误差可能超出 P_1 、 P_2 的差值；大容量变压器很难找到较为合适的负载用于效率实验；而容量大的变压器做实验耗能过多。所以工程上常采用间接方法，即测出各种损耗的方法来确定效率。

因为
$$P_2 = P_1 - \sum P$$

式中， $\sum P$ ——变压器的总损耗。

所以式(1-76)可改写为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P} \quad (1-77)$$

在用式(1-77)计算效率时，做以下假定。

(1)以额定电压下的空载损耗 P_0 作为铁损 P_{Fe} ，并认为铁损为不变损耗，不随负载而变。

(2)以额定电流时短路损耗 P_{kN} 作为额定负载电流时的铜损, 不考虑 I_0 分量对铜损的影响, 铜损为可变损耗, 与负载系数的平方 β^2 成正比, 即 $P_{Cu} = \beta^2 P_{kN}$ 。

(3)计算 P_2 时, 忽略负载运行时二次侧端电压的变化, 即

$$P_2 = m I_{2N} I_2 \cos \varphi_2 = \beta m I_{2N} I_{2N} \cos \varphi_2 = m I_{2N} I_2 \cos \varphi_2 = \beta S_N \cos \varphi_2$$

式中, m ——变压器相数;

S_N ——变压器的额定容量。

采用这些假定后, 可使计算大为简化, 同时会带来一些误差。因负载改变时, 铁芯中磁通将有一些变化, 铁损并非恒值; I_0 对一次绕组的铜损有一些影响, U_2 也是随负载变化而变化的。但这些假定造成的误差并不大, 在工程上是允许的, 所以一般都用此法计算效率。

应用上述假定, 式(1-77)可写成

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_{kN}}{\beta S_N \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_{kN}} \quad (1-78)$$

3. 变压器的效率特性

效率随负载电流变化而变化的规律, 即 $\eta = f(I_2)$ 或 $\eta = f(\beta)$, 称为变压器的效率特性。对于给定的变压器, 其 P_0 与 P_{kN} 为一常量, 可由实验测出, 在一定的 $\cos \varphi_2$ 下, 将不同的负载系数 β 代入式(1-78), 即可画出效率特性曲线, 如图 1-27 所示。把式(1-78)对 β 微分并令其等于零, 可得到

$$P_{Fe} = \beta^2 P_{kN}$$

即可变损耗等于不变损耗时, 变压器的效率出现最大值 η_{max} 。效率曲线的形状可由式(1-78)解释。当变压器没有输出时, $\beta=0$, 效率等于零。负载增大时, 开始铜损 $\beta^2 P_{kN}$ 较小, 效率增加很快, 但由于铁损 P_{Fe} 的存在, 使轻负载时效率较低, 而后 $\beta^2 P_{kN}$ 增大, 效率增加缓慢, 达到 η_{max} 后再增加负载, 铜损大于铁损, 且铜损与负载的平方成正比, 增加很快, 使效率曲线反而下降。变压器效率特性的这种变化趋势与其他各种电机都是相同的。

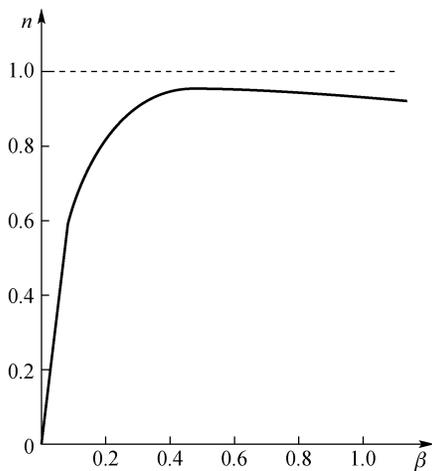


图 1-27 变压器的效率特性曲线

电力变压器常年与电网相接, 不变铁损一直存在, 而铜损却随负载不断地变化, 变压器不可能总在满载下运行, 因而铁损设计的小一些, 对全年的总能量效率的提高更为有利。根据铁损等于铜损时发生最大效率的原理, 可得到

$$\beta_m = \sqrt{\frac{P_0}{P_{kN}}} \quad (1-79)$$

式中, β_m ——最大效率时的负载系数。

通常选取 $\frac{P_0}{P_{kN}} = \frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}$, 因此 β_m 的变化范围为 0.5~0.6。



知识拓展

电力变压器的防火防爆措施

电力变压器是电力系统中输配电力的主要设备。在运行中, 如变压器内部发生过载或短路, 绝缘材料或绝缘油就会因高温或电火花作用而分解, 膨胀直至气化, 使变压器内部压力急剧增加, 可能引起变压器外壳爆炸, 大量绝缘油喷出燃烧, 又会进一步扩大火灾危险范围。因此运行中要注意以下几点。

- (1) 不能过载运行。电力变压器长期过载运行, 会引起线圈发热, 使绝缘逐渐老化, 造成短路。
- (2) 经常检验绝缘油质。油质应定期化验, 不合格的油应及时更换, 或采取其他措施。
- (3) 防止变压器铁芯绝缘老化损坏。
- (4) 防止因检修不慎破坏绝缘, 如果发现擦破损伤, 应及时处理。
- (5) 保证导线接触良好, 避免接触不良产生局部过热。
- (6) 防止雷击。变压器会因击穿绝缘而烧毁。
- (7) 短路保护。变压器线圈或负载发生短路, 如果保护系统失灵或保护定值过大, 就可能烧毁变压器, 因此要安装可靠的短路保护。
- (8) 保护良好的接地。
- (9) 通风和冷却。如果变压器线圈导线是 A 级绝缘, 其绝缘体以纸和棉纱为主。温度每升高 8°C , 其绝缘寿命要减少一半左右; 变压器在正常温度 90°C 以下运行, 寿命约为 20 年; 若温度升至 105°C , 则寿命为 7 年。因此, 变压器的运行要保持良好的通风和冷却。

任务六 认识三相变压器



任务描述

了解三相变压器的电路和磁路系统;
掌握校核变压器连接组号的方法。



任务分析

现在, 一般电力系统都采用三相制, 三相变压器的应用最为广泛。三相变压器在对称负载下运行时, 任何一相的电磁关系均与单相变压器相同, 前面对单相变压器的分析方法及其结论完全适用于三相变压器。本任务主要介绍三相变压器的磁路和电路系统。

一、三相变压器的磁路系统

三相变压器的磁路系统是指主磁通的磁路系统，按铁芯结构不同可分为组式磁路和心式磁路。

1. 三相变压器组的磁路系统

三相变压器组是由 3 台完全相同的单相变压器组成的，相应的磁路称为组式磁路，如图 1-28 所示。由于每相的主磁通各沿自己的磁路闭合，彼此独立，当一次侧施加三相对称电压时，各相的主磁通必然对称，即磁路三相对称。

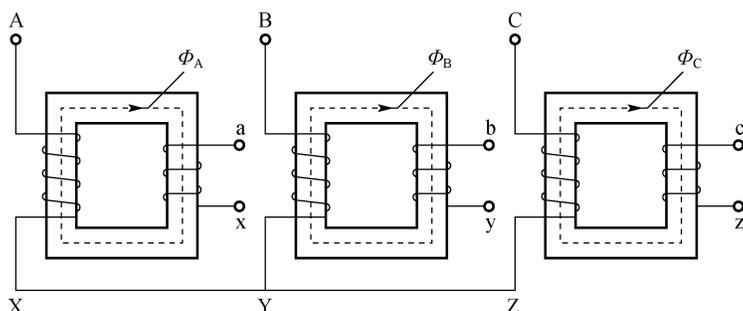


图 1-28 三相变压器组的磁路系统

2. 三相心式变压器的磁路系统

三相心式变压器各相磁路彼此相关。这种铁芯结构可以视为从三台单相变压器演变而成的。如果把三台单相变压器的铁芯按如图 1-29 所示的演变过程靠在一起，当变压器的三相绕组外施三相对称电压时，由于三相主磁通是对称的，所以中间铁芯柱内的磁通为 $\dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C = 0$ 。这样作为公共磁路的中间铁芯往往可以省掉，从而形成了三相心式铁芯形式。

在这种磁路系统中，每相的主磁通都要通过另外两相的铁芯形成闭合的回路，三相的磁路是彼此相关的，三相的磁路长度比两相的磁路长度短，即三相磁路的磁阻不同，当外施三相对称电压时，三相空载电流不等。

由于三相心式变压器具有价格便宜、消耗材料少、占地面积小、维护方便等优点，所以使用广泛。只在超高压大容量的巨型变压器和运输条件受到限制的地方，为了运输方便和减少备用容量，才采用三相变压器组。

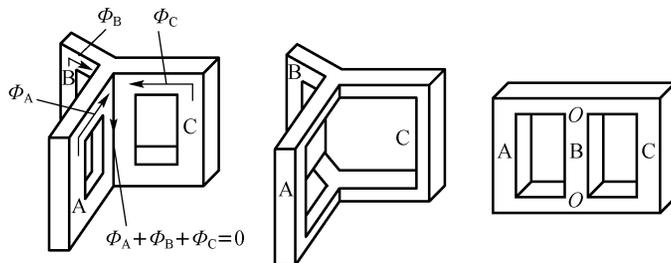


图 1-29 三相心式变压器的磁路系统