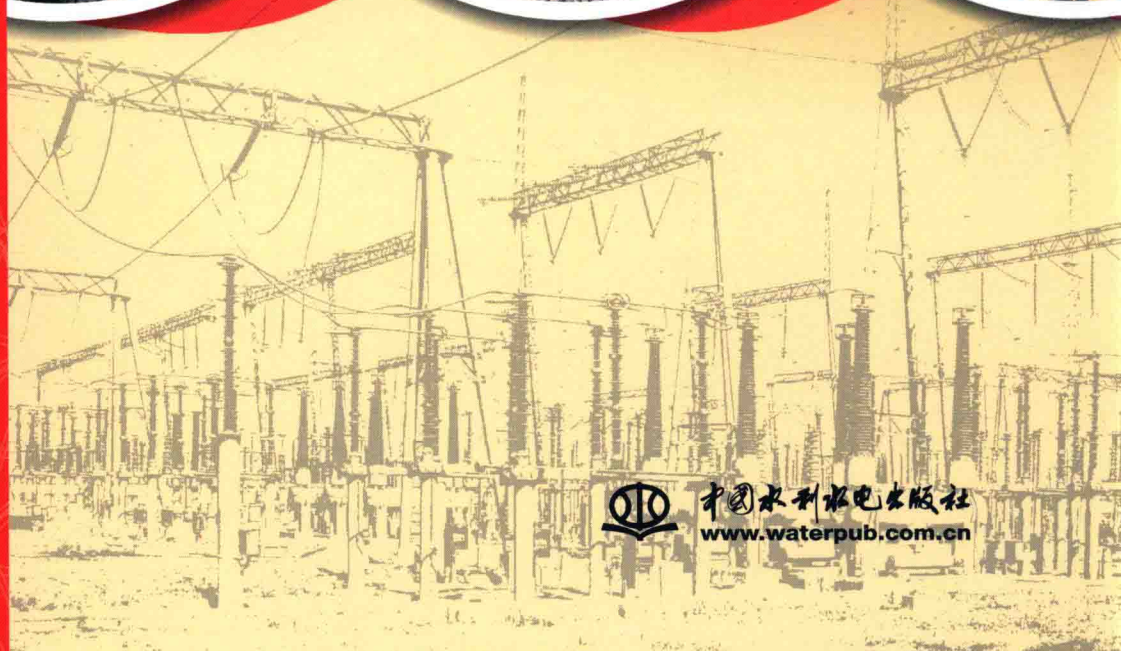


变电站运行与检修技术丛书

110kV 变压器 及有载分接开关 检修技术

丛书主编 杜晓平

本书主编 吕朝晖 朱建增



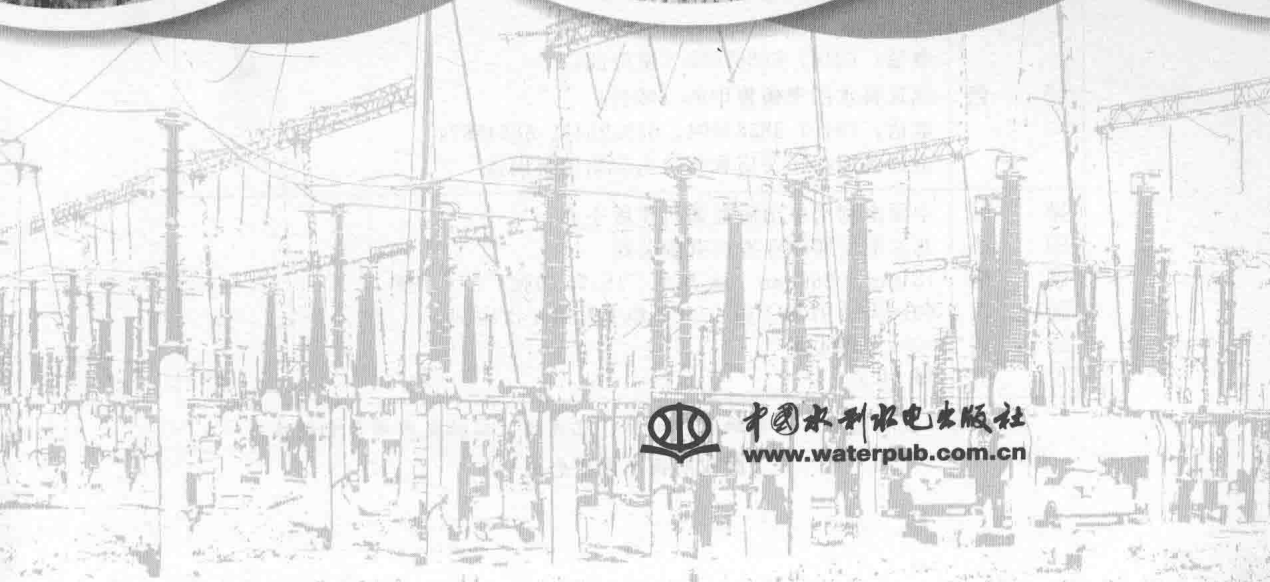
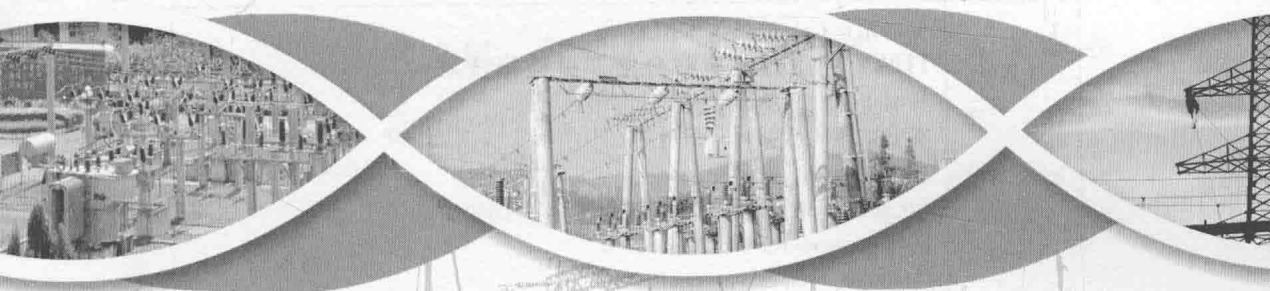
中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

变电站运行与检修技术丛书

110kV 变压器 及有载分接开关 检修技术

丛书主编 杜晓平

本书主编 吕朝晖 朱建增



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是《变电站运行与检修技术丛书》之一。本书结合多年来现场工作的宝贵经验,主要介绍了110kV变压器及有载分接开关检修技术。全书共分2大部分15章,第1部分变压器检修介绍了变压器基础知识、变压器本体及各附件基本结构和作用、变压器安装及验收标准规范、变压器本体及各附件的检修与维护、变压器状态检修、变压器C级检修作业流程及相关要求、反事故技术措施要求、变压器及各附件常见缺陷和故障的分析与处理等内容,第2部分有载分接开关检修介绍了有载分接开关基础知识、有载分接开关结构、有载分接开关电动机构、有载分接开关安装及投运、有载分接开关检修、有载分接开关状态检修导则、有载分接开关常见故障原因分析、判断及处理等内容。

本书既可作为从事变电站运行管理、检修调试、设计施工和教学等相关人员的专业参考书和培训教材,也可作为高等院校相关专业师生的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

110kV变压器及有载分接开关检修技术 / 吕朝晖, 朱建增主编. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2016.1
(变电站运行与检修技术丛书 / 杜晓平主编)
ISBN 978-7-5170-3974-7

I. ①1… II. ①吕… ②朱… III. ①变压器—有载分接开关—检修 IV. ①TM403.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第003742号

书 名	变电站运行与检修技术丛书 110kV 变压器及有载分接开关检修技术
作 者	丛书主编 杜晓平 本书主编 吕朝晖 朱建增
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15.75印张 373千字
版 次	2016年1月第1版 2016年1月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	58.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

《变电站运行与检修技术丛书》

编 委 会

丛书主编 杜晓平

丛书副主编 楼其民 李 靖 郝力军 王韩英

委 员 (按姓氏笔画排序)

王瑞平	方旭光	孔晓峰	吕朝晖	杜文佳
李有春	李向军	吴秀松	应高亮	张一军
张 波	陈文胜	陈文通	陈国平	陈 炜
邵 波	范旭明	周露芳	郑文林	赵寿生
郝力飙	钟新罗	施首健	钱 肖	徐军岳
徐街明	郭伯宙	温信强		

本书编委会

主 编 吕朝晖 朱建增

副主编 赵寿生 王翊之 吴杰清

参编人员 (按姓氏笔画排序)

王瑞平 方旭光 方 凯 李少白 汪卫国
陈文通 陈敢峰 周程昱 周 彪 施首健
徐耀辉

前 言

全球能源互联网战略不仅将加快世界各国能源互联互通的步伐,也势必强有力地促进国内智能电网快速发展,许多电力新设备、新技术应运而生,电网安全稳定运行面临着新形势、新任务、新挑战。这对如何加强专业技术培训,打造一支高素质的电网运行、检修专业队伍提出了新要求。因此我们编写了《变电站运行与检修技术丛书》,以期指导提升变电运行、检修专业人员的理论知识和操作技能水平。

本丛书共有六个分册,分别是《110kV 变电站保护自动化设备检修运维技术》《110kV 变电站电气设备检修技术》《110kV 变电站电气试验技术》《110kV 变电站开关设备检修技术》《110kV 变压器及有载分接开关检修技术》以及《110kV 变电站变电运维技术》。作为从事变电站运维检修工作的员工培训用书,本丛书将基本原理与现场操作相结合、理论讲解与实际案例相结合,立足运维检修,兼顾安装维护,全面阐述了安装、运行维护和检修相关内容,旨在帮助员工快速准确判断、查找、消除故障,提升员工的现场作业、分析问题和解决问题能力,规范现场作业标准化流程。

本丛书编写人员均为从事一线生产技术管理的专家,教材编写力求贴近现场工作实际,具有内容丰富、实用性和针对性强等特点。通过对本丛书的学习,读者可以快速掌握变电站运行与检修技术,提高自己的业务水平和工作能力。

本书是《变电站运行与检修技术丛书》的一本,主要包括:全书共分2大部分15章,第1部分变压器检修介绍了变压器基础知识,变压器本体及各附件基本结构和作用,变压器安装及验

收标准规范, 变压器本体及各附件的检修与维护, 变压器状态检修, 变压器 C 级检修作业流程及相关要求, 反事故技术措施要求, 变压器及各附件常见缺陷和故障的分析与处理等内容; 第 2 部分有载分接开关检修介绍了有载分接开关基础知识, 有载分接开关结构, 有载分接开关电动机构, 有载分接开关安装及投运, 有载分接开关检修, 有载分接开关状态检修导则, 有载分接开关常见故障原因分析、判断及处理等内容。

在本丛书的编写过程中得到过许多领导和同事的支持和帮助, 使内容有了较大改进, 在此向他们表示衷心的感谢。本丛书的编写参阅了大量的参考文献, 在此对其作者一并表示感谢。

由于编者水平有限, 书中疏漏和不足之处在所难免, 敬请广大读者批评指正。

编者

2015 年 11 月

目 录

前言

第1部分 变 压 器 检 修

第1章 变压器基础知识	3
1.1 变压器作用	3
1.2 变压器的基本结构及工作原理	4
1.3 变压器分类	9
1.4 变压器型号及参数	10
第2章 变压器本体及各附件基本结构和作用	12
2.1 铁芯	12
2.2 绕组及引线	18
2.3 绝缘	24
2.4 油箱	28
2.5 冷却装置	30
2.6 套管	32
2.7 储油柜	33
2.8 在线滤油装置	36
2.9 压力释放阀	37
2.10 吸湿器	38
2.11 气体继电器	39
2.12 分接开关(无励磁)	40
2.13 有载分接开关	44
2.14 变压器油	45
第3章 变压器安装及验收标准规范	47
3.1 电力变压器施工及验收执行规范总则	47
3.2 电力变压器施工及验收执行规范细则	48
第4章 变压器本体及各附件的检修与维护	59
4.1 变压器检修的基本知识	59
4.2 变压器本体及各附件检修	66
4.3 变压器大修工艺流程及相关要求	75
第5章 变压器状态检修	81
5.1 状态检修概述	81

5.2 基于状态评价的变压器状态检修..... 83

5.3 变压器巡检项目及要​​求..... 89

第 6 章 变压器 C 级检修作业流程及相关要求 97

6.1 修前准备..... 97

6.2 拆除套管引线..... 99

6.3 储油柜检修..... 99

6.4 压力释放阀检修..... 99

6.5 气体继电器检修..... 99

6.6 吸湿器检修 100

6.7 套管检修 100

6.8 有载开关检修（详见本书有载开关部分） 100

6.9 变压器油色谱在线监测装置检修 100

6.10 无载开关检修..... 100

6.11 测温装置检修..... 100

6.12 油箱检修..... 101

6.13 冷却系统检修..... 101

6.14 阀门检修..... 101

6.15 接地系统检修..... 102

6.16 套管引线搭接..... 102

第 7 章 反事故技术措施要求..... 103

7.1 预防 110~500kV 变压器事故措施 103

7.2 防止大型变压器损坏和爆炸事故 108

7.3 提高主变压器安全运行补充措施 109

第 8 章 变压器及各附件常见缺陷和故障的分析与处理..... 113

8.1 变压器常见故障 113

8.2 变压器各附件常见故障 117

参考文献..... 149

第 2 部分 有载分接开关检修

第 9 章 有载分接开关基础知识..... 153

9.1 有载分接开关基本原理 153

9.2 有载调压绕组结构设计 158

9.3 有载分接开关术语定义与分类 159

9.4 有载分接开关的绝缘保护 163

9.5 有载分接开关的整定工作位置 166

第 10 章 有载分接开关结构 169

10.1 M 型有载分接开关 169

10.2 V 型有载分接开关 172

10.3	CVT 型干式真空有载分接开关	174
10.4	有载分接开关安全保护装置	175
第 11 章	有载分接开关电动机构	177
11.1	电动机构结构	177
11.2	工作原理	179
11.3	控制性能	183
11.4	指示装置	184
第 12 章	有载分接开关安装及投运	185
12.1	有载分接开关在变压器上的安装	185
12.2	有载分接开关在现场的安装检查	192
12.3	有载分接开关投运验收	194
12.4	有载分接日常开关巡视检查项目及要求	196
12.5	有载分接开关运行操作规程	196
12.6	有载分接开关反事故措施要求	198
第 13 章	有载分接开关检修	200
13.1	有载分接开关维修周期	200
13.2	有载分接开关大修项目	200
13.3	M 型有载分接开关大修	201
13.4	V 型有载分接开关大修	205
13.5	有载分接开关小修项目	208
13.6	有载分接开关维修注意事项	208
13.7	有载分接开关检修试验方法	209
第 14 章	有载分接开关状态检修导则	216
14.1	状态检修实施原则	216
14.2	检修分类	217
14.3	有载分接开关的状态检修策略	218
14.4	有载分接开关状态量评价标准	219
第 15 章	有载分接开关常见故障原因分析、判断及处理	221
15.1	有载分接开关渗漏油	221
15.2	有载开关瓦斯故障	223
15.3	有载分接开关电动机构故障	224
15.4	有载开关本体故障	228
15.5	有载开关切换波形问题	233
15.6	有载开关切换动作顺序错误	237
15.7	有载开关绝缘油故障	238
	参考文献	240

第1章 变压器检修知识

1.1 变压器检修

第1部分 变压器检修

第1章 变压器基础知识

1.1 变压器作用

变压器广泛应用于城乡电力系统以及各种电子设备中，通常可分为电力变压器和特殊变压器两大类。

电力变压器是电力系统中的关键设备之一。电网将许多发电厂和用户连在一起，由于发电厂大都集中在煤炭和水力资源丰富的地区，要将电能输送至各地的用户，必须通过输电线路进行远距离输电，在输电过程中的电能损失不可避免。因为电压与电流成反比，而电能损耗正比于电流的平方，在传输的功率恒定情况下，传输电压越高，传输电流越小，所以用较高的输电电压可以大幅降低线路的电能损耗。要制造机端电压很高的发电机，目前技术上还很困难，所以需要升压变压器将发电机机端电压升高后再进行输送。随着输送距离的增加，输电功率的增大，对电力变压器的容量和电压等级的要求也越来越高。而电网内部存在多种电压等级，这就需要用各种规格电压等级和容量的电力变压器来连接；同时，当电能输送到受电端时，又必须用降压变压器将输电线路上的高压电降低到配电系统的电压等级，然后再经过配电变压器将电压降低到符合用户要求的电压。总之，电力变压器在电网中起到电压变换的重要作用，其实物图见图1-1。

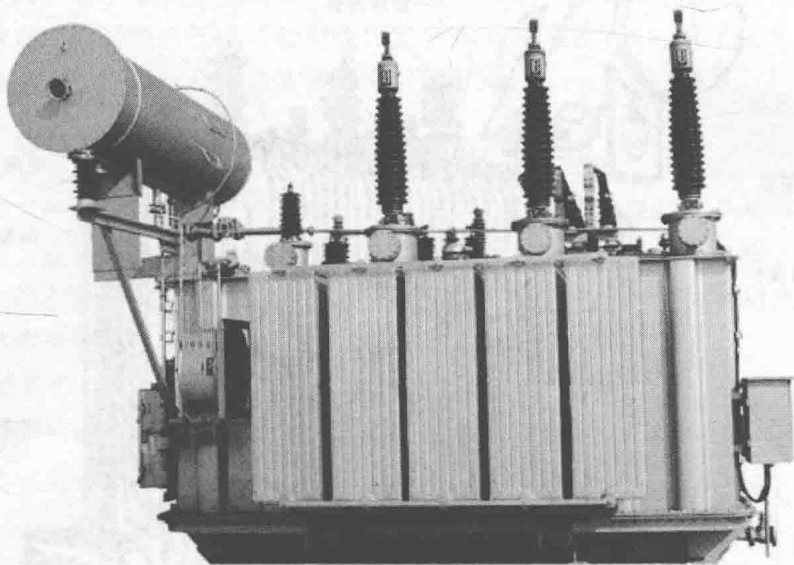


图 1-1 电力变压器实物图

特殊变压器是指除电力系统应用的变压器以外的各种变压器的统称。其品种繁多，如自耦变压器、电压互感器、电流互感器；工程技术中专用的焊接、整流、电炉等变压器；

电子线路中变换阻抗用的输入、输出变压器等。

目前船舶上大多数为 500V 以下的低压电力系统，许多电力负载由发电机直接供电，所以船上一般只有照明变压器和一些小容量电源变压器以及控制用变压器，较大容量的变压器应用的较少。这些船用变压器容量虽小但却很重要，它们为船舶的照明系统、航行信号系统、通信导航系统、控制系统和安全报警系统供电，是保证船舶正常工作、安全航行和船员、旅客生活的重要设备。

变压器的结构和性能虽然各有特点，但是其基本工作原理是相同的，即都是借助于电磁感应，以相同的频率在两个或更多的绕组之间，变换交流电压和电流而传输交流电能的一种静止电器。

由此可见，变压器在电力系统中的作用十分重要，是变电设备中的核心部件。

1.2 变压器的基本结构及工作原理

1.2.1 变压器的基本结构

变压器的基本结构部件是铁芯和绕组，由它们组成变压器的器身。为了改善散热条件，大、中容量变压器的器身浸入盛满变压器油的封闭油箱中，各绕组与外电路的连接则经绝缘套管引出。为了使变压器安全可靠地运行，还设有储油柜、气体继电器和安全气道等附件。变压器外形图见图 1-2。

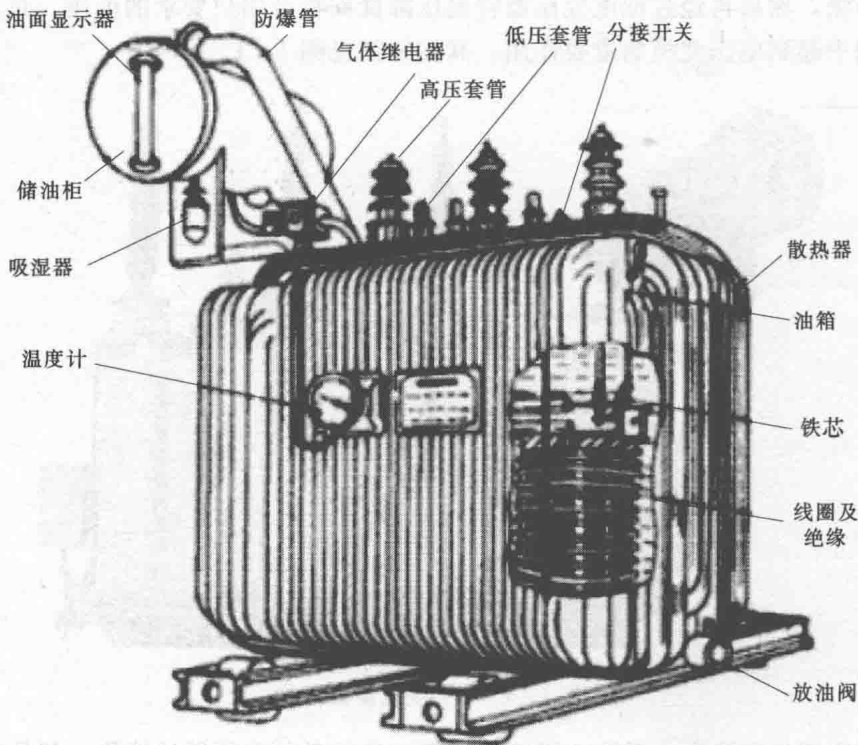


图 1-2 变压器外形图

变压器因使用场合和工作要求不同，其结构形式是多种多样的，但是，最基本的结构都是由铁芯与绕在铁芯上相互绝缘的线圈（绕组）构成，图 1-3 是变压器的示意图及符号。

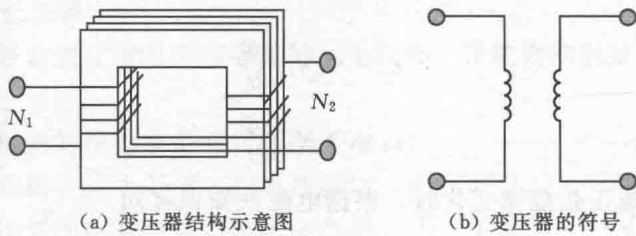


图 1-3 变压器示意图及其符号

铁芯是变压器的磁路部分，一般采用表面涂有漆膜、厚度为 0.35mm 或 0.5mm 的硅钢片交错叠成，使磁路具有较高的磁导率和较小的磁滞涡流损耗。

绕组是变压器的电路部分，通常用涂有绝缘漆的铜线或铝线绕制而成。与电源连接的绕组称为原绕组，又称一次绕组或初级绕组；与负载连接的绕组称为副绕组，简称二次绕组或次级绕组。绕组的形状有筒式和盘式两种，筒式绕组又称同心式绕组，一次、二次绕组相套在一起，低压绕组套在靠铁芯的里层，高压绕组套在低压铁芯的外层；盘式绕组又称交叠式绕组，分层交叠在一起，低压绕组通常是套在铁芯柱靠上、下铁轭的外端，高压绕组则夹在两低压绕组的中间。根据实际需要，一个变压器可以只有一个绕组，如自耦变压器；也可以有多个二次绕组以输出不同的电压。

变压器工作时铁芯和绕组都要发热，为了防止变压器过热而损坏绝缘材料，必须采用适当的冷却方式。对于小容量变压器，通常采用空气自冷，依靠空气的自然对流把铁芯和绕组的热量散发到周围的空气中（船用变压器全部采用风冷）；对容量较大的变压器，通常采用油浸自冷、油浸风冷或强迫油循环冷却等方式。

1.2.2 变压器的工作原理

变压器的工作原理是电磁感应原理，是电生磁、磁生电现象的一个具体应用。以相同的频率，在两个或更多的绕组之间，变换交流电压和电流而传输交流电能。变压器的基本组成部分是由绕在共同磁路上的两个或两个以上的绕组所构成，下面将对变压器电压、电流、阻抗变换和外特性进行阐述。

1. 变压器的空载运行和电压变换

变压器的空载运行见图 1-4。变压器的一次侧接上交流电压 u_1 ，二次侧开路，这种运行状态称为空载运行，见图 1-4。这时二次电流 $i_2 = 0$ ，电压为开路电压 u_{20} ，一次绕组中通过的电流为空载电流 i_{10} ，设一次绕组的匝数为 N_1 ，二次绕组的匝数为 N_2 。

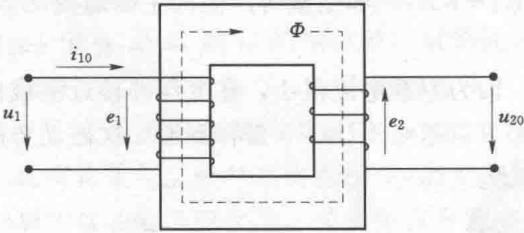


图 1-4 变压器的空载运行

由于二次侧开路，这时变压器的一次

电路相当于一个交流铁芯线圈电路，空载电流 i_{10} 就是励磁电流。因为 i_{10} 是交变电流，所以在磁动势 $i_{10} N_1$ 作用下，铁芯中的主磁通 Φ 也是交变的，并在一次、二次绕组中分别感应出电动势 e_1 、 e_2 。当 e_1 、 e_2 与 Φ 的参考方向之间符合右手螺旋定则时，由电磁感应定律可得

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \tag{1-1}$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \tag{1-2}$$

当外加电压 u_1 按正弦规律变化时，根据电磁铁知识可知

$$u_1 \approx e_1 = 4.44 f N_1 \Phi \tag{1-3}$$

$$u_{20} \approx e_2 = 4.44 f N_2 \Phi \tag{1-4}$$

因此一次电压 u_1 与二次电压 u_{20} 之间的关系为

$$\frac{u_1}{u_{20}} \approx \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \tag{1-5}$$

式 (1-5) 表明，变压器空载运行时，一次、二次绕组的电压比等于它们的匝数比。

这个比值称为变压器的变比，是变压器的一个重要参数，当 $K > 1$ 时为降压变压器，当 $K < 1$ 时则为升压变压器。

2. 变压器的负载运行和电流变换

变压器的负载运行见图 1-5。变压器的一次侧接交流电压 u_1 ，二次侧接负载 Z_L ，这种运行状态称为负载运行。

变压器未接负载之前，一次电流为 i_{10} ，它在一次侧建立磁动势 $i_{10} N_1$ ，在磁路中产生主磁通 Φ 。接入负载后，在感应电动势 e_2 的作用下，二次绕组有电流 i_2 。二次电流 i_2 的出现反过来要影响变压器铁芯内的磁通，从而影响一次、二次绕组的感应电动势。在一次电压 u_1 保持不变的情况下， e_1 的变化会使一次绕组电流发生变化，这时一次电流将从空载电流 i_{10} 变为 i_1 。

在变压器外加电压 u_1 和电源频率 f 不变的条件下，主磁通应基本保持不变，即 $\Phi = \frac{u_1}{4.44 f N_1} = \text{常数}$ 。但当变压器有载时，由于二次磁动势 $I_2 N_2$ 的影响，一次绕组中的电流必须由 i_{10} 增加到 i_1 来抵消二次绕组的磁动势对主磁通的影响，从而维持铁芯中的主磁通的大小不变，即与空载时在数量上接近相等。因此，变压器有载时产生的主磁通磁动势 ($i_1 N_1 + i_2 N_2$) 和空载时产生的主磁通磁动势应该相等，即

$$i_1 N_1 + i_2 N_2 = i_{10} N_1 \tag{1-6}$$

因为空载电流很小，在变压器接近满载的情况下， $i_{10} N_1$ 相对于 $i_1 N_1$ 或 $i_2 N_2$ 而言基本上可以忽略不计，于是得到原二次磁动势的关系式为 $i_1 N_1 \approx -i_2 N_2$ 其数值关系为 $i_1 N_1 \approx i_2 N_2$

即

$$\frac{i_1}{i_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K} = K_i \tag{1-7}$$

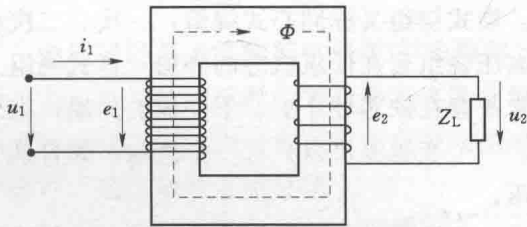


图 1-5 变压器的负载运行

式中 K_i ——变压器的变流比，是变压比 K 的倒数。

由此可见，变压器一次、二次的电流与它们的匝数成反比，且一次电流随二次电流变化而变化。

3. 变压器的阻抗变换

变压器除了能够改变交流电压和电流的大小以外，还能变换阻抗，这个功能广泛应用于电子技术领域。

变压器对其二次侧的用电设备而言相当于电源，它的实际负载阻抗 $|Z_L|$ 等于二次电压除以二次电流；但对变压器的电源而言，整个变压器又是供电电源的一个等值负载阻抗，该阻抗等于一次电压除以一次电流，见图 1-6。显然，当一次、二次绕组的匝数不同时， $|Z_L| \neq |Z'|$ ，由此可见，对同一用电负载，从变压器一次侧看的等值负载阻抗不等于负载的实际阻抗，这就是变压器的阻抗变换作用。

根据上述忽略绕组内阻、忽略漏磁、忽略损耗的理想变压器的一次、二次电压和电流的变比关系，可得到一次等值阻抗与二次实际负载阻抗的数值变换关系，即

$$|Z'| = \frac{u_1}{i_1} = \frac{(N_1/N_2)u_2}{(N_2/N_1)i_2} = \left(\frac{N_1}{K_2}\right)^2 \frac{u_2}{i_2} = K_2 |Z_L| \tag{1-8}$$

式 (1-8) 表明，一次等值阻抗等于二次实际阻抗乘以匝数比的平方，采用不同的匝数比，可将实际负载阻抗 $|Z_L|$ 变换为所需要的一次等值阻抗 $|Z'|$ ，以实现阻抗匹配。

4. 变压器的外特性

上面分析的变压器负载运行是在理想状态下进行的，即忽略了绕组的电阻和漏磁通，实际上，当二次电流为 i_2 ，考虑二次电阻和二次漏磁通时，二次电压方程式为

$$\dot{u}_2 = \dot{e}_2 - Z_2 \dot{i}_2 \tag{1-9}$$

式中 Z_2 ——二次电阻和二次漏磁通的等效阻抗，是感性的。

式 (1-9) 表明，当负载变化引起二次电流 i_2 发生变化时，二次绕组的阻抗电压降将发生变化，二次电压 u_2 也随之变化。

当 u_1 为额定值时， $u_2 = f(i_2)$ 的关系曲线称为变压器的外特性曲线，见图 1-8。分析表明，当负载为阻性或感性时，二次电压将随 i_2 的增加而降低；负载为容性且电容较大时，输出电压 u_2 可能高于 u_{1N} 。图 1-7 中 φ_2 是 u_2 和 i_2 的相位差，对感性负载来说，功率因数越低， u_2 下降得越快。

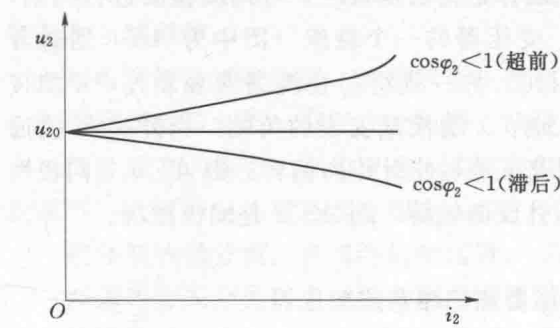


图 1-7 变压器的外特性曲线

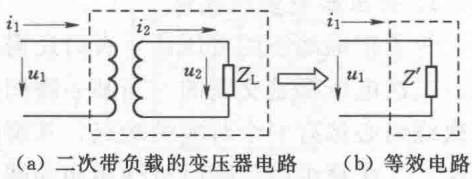


图 1-6 变压器的阻抗变换

变压器从空载到满载时，二次电压 u_2 的变化量与空载时二次电压 u_{20} 的比值称为变压器的电压变化率，通常用百分数表示，其公式为