

电气设备丛书

变压器原理与应用

张植保 主编



化学工业出版社

·北京·

本书为《电气设备丛书》之一，主要介绍了变压器结构、工作原理、数学模型、分析方法、参数求取、连接组、并联运行等基本知识；并且介绍了变压器中的过电压、过电流，变压器发热和冷却的物理规律、各种冷却方式、相关的计算方法及变压器的负载能力问题；详细地介绍了变压器的安装和试验方法，电力变压器的运行、维护及常见故障的解决方法，电力变压器的设计计算方法；并在附录中给出了部分电力变压器的技术参数。

本书可供从事变压器设计制造、安装使用、运行维护等方面的工程技术人员和技术工人参考使用，也可供大专院校、职业技术学校师生参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

变压器原理与应用/张植保主编. —北京：化学工业出版社，2007.3
(电气设备丛书)
ISBN 978-7-122-00036-1

I. 变… II. 张… III. 变压器 IV. TM4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 027020 号

责任编辑：刘 哲 周国庆 赵丽霞

文字编辑：朱 磊

责任校对：郑 捷

装帧设计：于 兵

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 刷：北京永鑫印刷有限责任公司

装 订：三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 14½ 字数 351 千字 2007 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：29.00 元

版权所有 违者必究

前 言

随着科学技术的迅猛发展，电气设备发展日新月异。尤其是以计算机、信息技术为代表的高新技术的发展，使制造技术的内涵和外延发生了革命性的变化，传统的电气设备设计、制造技术不断吸收信息控制、材料、能源及管理等领域现代成果，综合应用于产品设计、制造、检测、生产管理和售后服务。在生产技术和生产模式等方面，许多新的思想和概念不断涌现，而且，不同学科之间相互渗透、交叉融合，衍生新的研究领域，迅速改变着传统电气设备制造业的面貌，产品更新换代极为频繁。21世纪电气设备发展的总趋势是强弱电技术的融合更为密切；多学科、多专业的交叉更为深入；我国电气产品与国际接轨的步伐将迈得更大，国内外的技术交流也将更为广泛。

当今世界，科学技术发展迅速，知识经济发展显现端倪，综合国力的竞争日趋激烈。国力的竞争，归根结底是科技与人才的竞争。为了适应社会主义现代化建设的需要，我们组织编写了这套《电气设备丛书》（以下简称《丛书》），满足广大电气工作者和爱好者的迫切需要。

《丛书》编写时从实用出发，力求理论与实际相结合，突出新颖性，介绍电气设备的结构、工作原理、技术参数、适用场合、技术操作要点、运行与维护经验等，并注重理论联系实际，融入应用实例，突出技能和技巧。

《丛书》本着求精避繁的原则，对电气设备的基础理论、材料、器件、应用电路、安装、调试、运行与维护等适用面广、使用频率高和实用性强的技术内容做了详细的阐述。同时，还从实际出发，介绍反映电工电子、电力电子、计算机、自动控制、传感器技术、机电一体化相互交叉、纵横结合的发展大趋势。

本套丛书共10分册，包括：《防爆电器》、《防雷与接地装置》、《电气测量设备》、《电热设备》、《开关电源技术》、《漏电保护器》、《高压电器》、《低压电器》、《变压器原理与应用》、《电机原理与应用》。

本书为《变压器原理与应用》分册。主要介绍了变压器结构、工作原理、数学模型、分析方法、参数求取、连接组、并联运行等基本知识；并且介绍了变压器中的过电压、过电流，三绕组变压器、自耦变压器、电压互感器和电流互感器、调压变压器、电焊变压器、整流变压器以及用量愈来愈大的干式变压器，变压器发热和冷却的物理规律、各种冷却方式、相关的计算方法及变压器的负载能力问题；详细地介绍了变压器的安装和试验方法，电力变压器的运行、维护及常见故障的解决方法，电力变压器的设计计算方法；并在附录中给出了部分电力变压器的技术参数。

本书由张植保主编，负责确定本书的主要内容和统稿，参加本书编写工作的还有陈坤华、胡文锋、张新华、潘伟、郑斐等同志。全书由李金伴教授主审。

本书可供从事变压器设计制造、安装使用、运行维护等方面的工程技术人员和技术工人参考使用，也可供大专院校、职业技术学校师生参考使用。

由于编者水平有限，不足之处在所难免，敬请读者指正。

编 者
2007年2月

主要符号表

B ——磁通密度 (Wb/m ²)	t ——时间 (s)
B_m ——最大磁通密度 (Wb/m ²)	S_N ——额定容量 (kV·A)
D_{Fe} ——变压器铁芯直径 (mm)	U ——电压 (kV, V)
D ——三角形接法	U_N ——额定电压 (kV)
E_1 ——原方电动势 (V)	u_k ——阻抗电压
E_2 ——副方电动势 (V)	u_{kR} ——阻抗电压电阻分量
e ——电动势瞬时值 (V)	u_{kx} ——阻抗电压电抗分量
F ——磁动势 (A)	x ——电抗 (Ω)
f ——频率 (Hz)	x_1 ——原绕组漏电抗 (Ω)
I ——电流 (A)	x_2 ——副绕组漏电抗 (Ω)
I_N ——额定电流 (A)	x_m ——励磁电抗 (Ω)
I_0 ——空载电流 (A)	Y ——星形接法
I_m ——励磁电流 (A)	Z_k ——短路阻抗 (Ω)
I_1 ——原方电流 (A)	Z_m ——励磁阻抗 (Ω)
I_2 ——副方电流 (A)	η ——效率
I_{1L} ——原方电流中的负载分量 (A)	η_N ——额定效率
k ——变比, 匝数比	η_{max} ——最大效率
m ——相数	θ ——温度 ($^{\circ}\text{C}$)
N_1, N_2 ——原方匝数, 副方匝数	θ_a ——空气温度 ($^{\circ}\text{C}$)
P ——功率 (kW, W)	θ_o ——变压器油温度 ($^{\circ}\text{C}$)
P_N ——额定功率 (kW, W)	θ_w ——绕组温度 ($^{\circ}\text{C}$)
P_1 ——输入功率 (kW, W)	μ ——磁导率 (H/m)
P_2 ——输出功率 (kW, W)	τ_{wo} ——绕组对油的温升 ($^{\circ}\text{C}$ 或 K)
p_{Cu} ——铜损耗 (kW, W)	τ_{oa} ——油对空气的温升 ($^{\circ}\text{C}$ 或 K)
p_{Fe} ——铁损耗 (kW, W)	τ_{wa} ——绕组对空气的温升 ($^{\circ}\text{C}$ 或 K)
p_0 ——空载损耗 (kW, W)	Φ_m ——铁芯磁通最大值 (Wb)
p_k ——短路损耗 (kW, W)	$\Phi_{1\sigma}$ ——原绕组漏磁通 (Wb)
p_{kN} ——额定电流时的短路损耗 (kW, W)	$\Phi_{2\sigma}$ ——副绕组漏磁通 (Wb)
R ——电阻 (Ω)	ω ——角频率
R_1 ——原绕组电阻 (Ω)	(')——右上角加撇表示折算值
R_2 ——副绕组电阻 (Ω)	(*)——右上角加星号表示标么值
R_m ——励磁电阻 (Ω)	

第 1 章

变压器的结构和工作原理

1.1 变压器的用途

变压器是一种静止的电器，由绕在共同铁芯上的两个或两个以上的绕组通过交变磁场而联系着。用以把某一种等级的电压与电流转变成另外一种等级的电压与电流。

变压器的用途是多方面的，十分广泛地用在国民经济的各个领域里。比如在电力系统中，变压器就是一个主要的元件。通常要将大功率的电能输送到很远的地方去，利用低电压大电流传输是有困难的，一方面电流大引起输电线的极大损耗，另外输电线路的压降也会使电能送不出去。因此，需用升压变压器将发电机的端电压升高（容量一定，电压升高电流会减小）。一般而言，当输电距离愈远，输送的电功率愈大时，要求的输电电压也愈高。例如，输电长度为 200~400km，输电容量为 20~30 万千瓦的输电线，输电电压一般要求 220kV；输电距离在 1000km 以上，则要求更高的输电电压，例如用到 500kV。

当电能送到受电区（例如城市或工厂区），又必须用降压变压器将输电线上的高电压降低到配电系统的电压。然后再经过一系列的配电变压器将电压降低到用电的电压以供使用（大型动力负荷用 3000V 或 6000V；小型动力负荷或照明负荷用 380V/220V）。

由此可见，在电力系统里变压器的地位是十分重要的。不仅需要的变压器数量较多（一般发电机与变压器的相对总容量之比是 1:5~1:8），还要求变压器性能好，运行安全可靠，这就对制造部门提出了较高的要求。变压器除了应用在电力系统中外，还应用在需要特种电源的工业企业中，如供电给电炉、整流设备等，在量测设备、试验设备和控制设备中也广泛应用着变压器。

1.2 变压器的分类和结构

1.2.1 变压器的分类

变压器是利用电磁感应原理，以交变磁场为媒介，把线圈从电源吸收的某一种电压的交流电能转变成频率相同的另一种电压的交流电能，由另一线圈向负载提供。接电源的一方称为原方，或原绕组，或初级绕组，或一次侧绕组；接负载的一方称为副方，或副绕组，或次级绕组，或二次侧绕组。除自耦变压器外，一般的变压器原绕组和副绕组之间只有磁的耦合，而没有电路上的直接联系。

最简单的变压器就是把两个互相绝缘的线圈套在同一个铁芯上，线圈的电压近似地和匝数成正比，线圈的电流近似地和匝数成反比。变压器只能用来传送交流电功率而不能用来传送直流电功率，如果使用不慎误将直流电压加在变压器线圈上，这时，线圈中的电流等于电压除以电阻，由于线圈的电阻一般很小，所以，即使直流电压不是特别高，也会产生很大

的电流，超过一定时间可能会将变压器烧坏。

变压器可按其用途进行分类，有电力变压器、特种变压器、仪用互感器、试验用的高压变压器和调压器等。

电力变压器是指电力系统中使用的变压器，用以实现交流电能的远距离输送，减少输电线路上的电能损耗和输电线路上的压降。此外，电网中不同电压等级的电能之间需要实现调剂、分配等，这时也要用到电力变压器。

所谓特种变压器，是指有专门用途的特殊变压器。例如电炉变压器、电焊变压器、整流变压器等。

仪用互感器本质上也是变压器。一种是测量高电压时用的，叫电压互感器；另一种是测量大电流时用的，叫电流互感器。除用于测量外，互感器还有其他用途。

试验用的高压变压器和调压器是为了满足某些特殊试验的要求而制造的。有些试验中需要特别高的电压，那就需要专门的高压变压器；有些试验要求电压能在一定的范围内调节，那就需要调压器。

除按用途分类外，变压器还可按绕组数目的多少来分类。例如双绕组变压器、三绕组变压器、多绕组变压器和自耦变压器等。双绕组变压器指同一台变压器有两种电压等级，三绕组变压器指同一台变压器有三种电压等级，例如，同一铁芯上套着三个匝数不等的线圈，工作时就可以有三种电压，如果一个线圈作为输入（从电源吸收电功率），另外两个线圈就可作为输出（向负载输送电功率）。如果是三相三绕组变压器，那就有三个低压线圈、三个中压线圈、三个高压线圈。当然也可以用多个线圈套在同一铁芯上构成多绕组变压器，工作时可提供多种输出电压。所谓自耦变压器是指输出绕组与输入绕组有一部分是共用的变压器，这种变压器与普通的双绕组变压器相比，在同样容量的情况下消耗的材料较少。

变压器还可按相数来分类，有单相变压器、三相变压器。单相变压器只能变换单相电压，三相变压器能同时变换三相电压。

此外，按冷却方式分，有自冷式、它冷式；按冷却介质分，有空气冷却的干式变压器和用油冷却的油浸式变压器。

1.2.2 变压器的结构

油浸式电力变压器在电力系统中应用广泛，图 1-1 是油浸式电力变压器的外形构造。这种变压器主要由铁芯、绕组、油箱和绝缘套管等部分组成。铁芯构成了磁路，线圈套在铁芯上。线圈由导线绕制而成，绕组是指与电源（或负载）相接的线圈或线圈的组合，即绕组是由线圈所组成的。通常把铁芯和绕组合在一起称为变压器的器身，是变压器的最基本的组成部分。变压器器身放置在油箱内，油箱起机械支撑、冷却散热和保护作用。油箱内充满了变压器油，变压器油既是冷却介质，同时也起绝缘作用。变压器在运行过程中，各种损耗最终转变为热量，热量传给变压器油，再传给油箱壁向外散出。变压器油箱上装有很多油管，在变压器内部，热油上升，再由油管往下流，这实际上相当于增加了油箱壁的散热面积和散热能力。绝缘套管主要是起绝缘作用，使变压器绕组的引出线与油箱妥善绝缘。下面对变压器的主要结构部件作较详细的介绍。

(1) 铁芯 变压器内部的磁场主要集中在铁芯部分。交变磁通从铁芯中经过形成闭合回路。为了降低铁损耗，铁芯通常采用 0.35mm 厚且表面涂有绝缘漆的硅钢片叠压制成，称

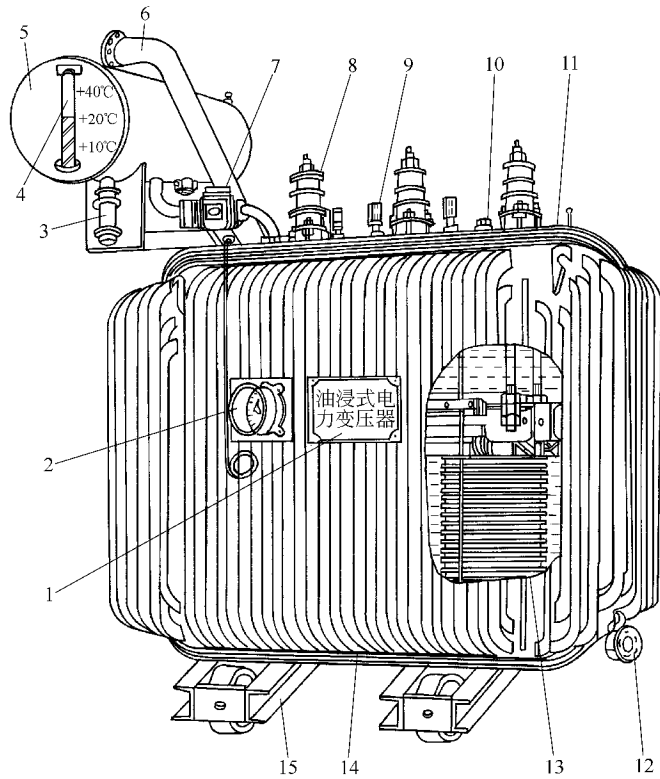


图 1-1 油浸式电力变压器

- 1—铭牌；2—信号式温度计；3—吸湿器；4—油表；5—储油柜；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—放油阀门；13—器身；14—接地板；15—小车

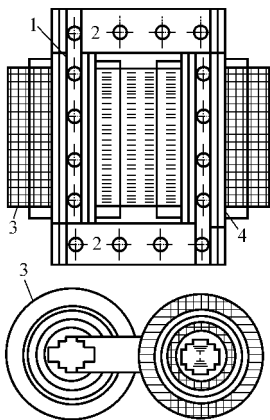


图 1-2 单相心式变压器

- 1—铁芯柱；2—铁轭；
3—高压线圈；4—低压线圈

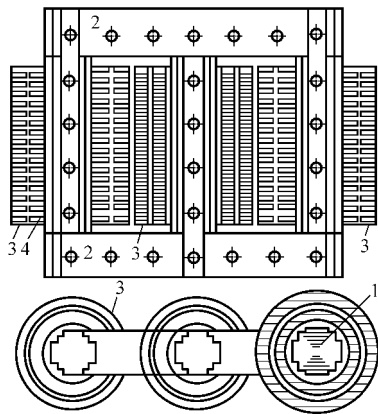


图 1-3 三相心式变压器铁芯

- 1—铁芯柱；2—铁轭；
3—高压线圈；4—低压线圈

为叠片式铁芯。铁芯又分为铁芯柱和铁轭两部分，线圈套在垂直的铁芯柱上，铁芯柱上下通过铁轭连接起来，从而构成闭合的磁回路。图 1-2 和图 1-3 分别是单相变压器和三相变压器的铁芯及线圈的剖面图。

在制作叠片式铁芯时，需要把裁剪成一定尺寸的长方形硅钢片交错叠装，长方形硅钢片之间的接缝要适当错开，如图 1-4 所示。图 1-4(a) 表示了某一层叠片接缝的位置，图 1-4(b) 表示了相邻的另一层叠片的接缝位置，显然，在这两个图中，接缝的位置是错开的。为了节省制造工时，每层约有 2~3 张硅钢片厚。

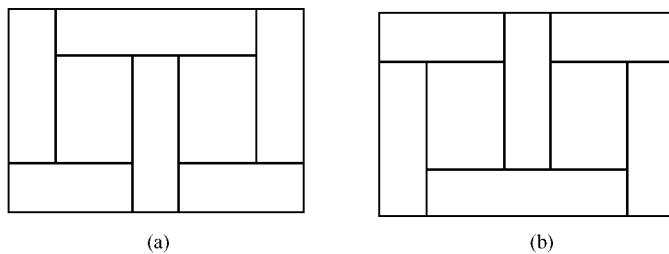


图 1-4 硅钢片

硅钢片有冷轧硅钢片和热轧硅钢片之分，通常冷轧硅钢片性能较好，但冷轧硅钢片往往各向异性，即沿着轧制方向有较少铁耗和较高磁导率，如仍按图 1-4 那样下料和叠装，则在拐角处磁路发生转弯，在接缝的某一侧，磁密方向将和轧制方向垂直，引起铁耗和励磁电流增加。为了克服这一缺点，采用了斜切硅钢片的叠装法。当然，相邻层的接缝也应错开，相邻层的接缝分别如图 1-5(a) 和图 1-5(b) 所示。

在电力变压器中，为了使线圈便于制造，并使其在电磁力作用下受力均匀，力学性能好，一般都把线圈做成圆形，与此对应，铁芯的截面也应当是圆形的。但为了便于制造，减少制造工时，铁芯截面实际上是做成阶梯形的多边形，如图 1-6(a) 所示，其包络线是一个圆。小容量变压器的铁芯柱截面也有做成正方形的，见图 1-6(b)。大容量变压器为了改善铁芯的冷却条件，常在铁芯柱中开设油道。

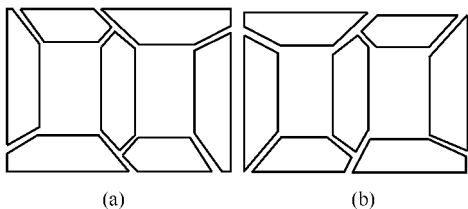


图 1-5 冷轧硅钢片的叠装法

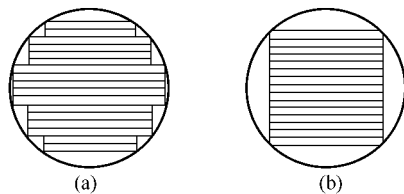


图 1-6 铁芯柱截面

需要指出的是，上面介绍的变压器属于心式变压器，在实用中占优势。但也有少数情况下用到壳式变压器。壳式变压器的铁芯构成有分支的磁路系统，围绕在绕组的两面，好像是绕组的一个“外壳”。单相壳式变压器如图 1-7 所示，三相壳式变压器可以看作由三个并排在一起的单相壳式变压器组成，如图 1-8 所示。

(2) 绕组 绕组由线圈组成，是变压器的电路部分，一般用纸包的铜线或铝线绕成，也有用圆漆包线绕制的。

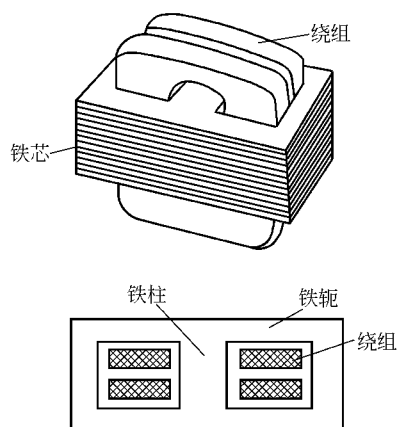


图 1-7 单相壳式变压器

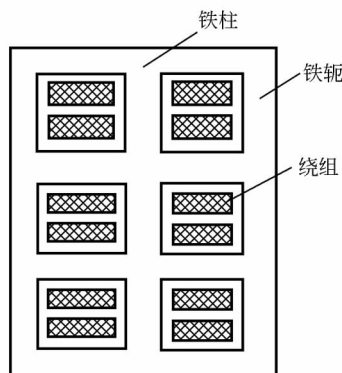


图 1-8 三相壳式变压器

在变压器中，接高压电网的绕组为高压绕组，接低压电网的绕组为低压绕组。通常在一个铁芯柱上既套着一个高压线圈，又套着一个低压线圈。如果是单相变压器，如图 1-2 所示，有两个铁芯柱，分别套在两个铁芯柱上的两个低压线圈可以串联或并联，形成低压绕组；分别套在两个铁芯柱上的高压线圈也可以串联或并联，形成高压绕组。采用并联接法，额定电流较大，若串联，则额定电压较高。在三相心式变压器中，共有三个铁芯柱，如图 1-3 所示，每个铁芯柱上既有一个高压绕组，又有一个低压绕组，三个高压绕组可接成星形或三角形，三个低压绕组也可接成星形或三角形。对同一台变压器，通常高压绕组匝数较多，导线较细，而低压绕组匝数较少，导线较粗。

电力变压器的绕组有多种形式，如圆筒式、连续式、螺旋式等，其中最简单的是圆筒式。

圆筒式绕组通常由一根或几根并在一起的绝缘导线沿铁芯柱高度方向连续绕制。一般用于 $10\sim 630\text{kV}\cdot\text{A}$ 的三相变压器。圆筒式绕组的高压绕组常绕成多层圆筒式，当层数较多时，中间要留出轴向油道，以利于散热。低压绕组常用扁线绕制。从绝缘性能考虑，套在同一个铁芯柱上的两个线圈一般都是低压线圈在里面（靠近铁芯），高压线圈套在低压线圈的外面，当然，高、低压线圈之间要留出足够的绝缘距离。对于三相心式变压器，相邻两个铁芯柱上的高压线圈之间也要留出足够的距离，以保证绝缘。

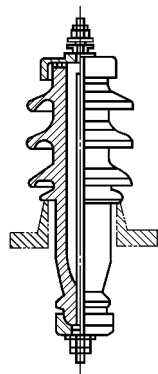


图 1-9 绝缘套管

(3) 套管 变压器绕组的引出线从油箱内穿过油箱盖时，必须经过绝缘套管，使带电的引线和接地的油箱绝缘，绝缘套管的形状如图 1-9 所示。绝缘套管一般是瓷质的，其结构主要取决于电压等级， 1kV 以下采用实心瓷套管， $10\sim 35\text{kV}$ 采用空心充气式或充油式套管。

1.3 变压器的额定数据

制造厂按国家标准，根据某种变压器的设计和试验数据而规定的该种变压器的正常运行状态和条件，称为该种变压器的额定运行状况。表征额定运行状况的各种数值称为额定值。额定值一般都在铭牌上标明或写在产品说明书上，所以额定值又被称为铭牌数据。

变压器的额定值主要有以下几项。

(1) 额定容量 S_N 变压器的额定容量是指其额定视在功率，以 $\text{kV} \cdot \text{A}$ 表示。变压器效率高，设计时，通常认为原、副方额定容量相等。

(2) 原方额定电压 U_{1N} 及副方额定电压 U_{2N} 额定电压单位以 kV 或 V 表示。变压器副方额定电压是指其原方加额定电压时副方的开路电压。对于三相变压器，铭牌上标出的额定电压都是指线电压。

(3) 原方额定电流 I_{1N} 及副方额定电流 I_{2N} 额定电流单位以 A 表示。根据额定容量和额定电压算出的电流称为额定电流，也是变压器的满载电流。对三相变压器而言，铭牌上标出的额定电流都是指线电流。

对单相变压器有

$$I_{1N} = S_N / U_{1N}, \quad I_{2N} = S_N / U_{2N}$$

对三相变压器，额定容量是指三相的总容量，但由于电压、电流都是指线值，所以

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}, \quad I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}}$$

(4) 额定频率 额定频率单位以 Hz 表示，我国规定额定频率为 50Hz 。

此外，额定值还包括额定运行时的效率、温升、冷却方式、运行方式等。除额定值外，铭牌上还标有变压器的型号、接线图、阻抗电压（短路电压）、三相变压器的连接组、变压器的总重量、变压器油的重量、变压器器身的重量等。

额定电压有一定的等级，国家标准规定的三相交流电网和用电设备的标准电压等级如下（单位为 kV ）：

0.22, 0.38, 3, 6, 10, 35, 63, 110, 220, 300, 500, 750

上列数字表示电网电压的等级，是电网上受电端的电压，电源端的电压将比这些数值高。而变压器额定电压的规定略为复杂。变压器接受功率一侧的绕组为一次绕组（原绕组），输出功率一侧的绕组为二次绕组（副绕组）。一次绕组的作用相当于用电设备，其额定电压与电网的额定电压相等；但直接与发电机相连接时（如升压变压器），其一次侧额定电压与发电机的额定电压相等。二次绕组的作用相当于电源设备，其额定电压规定比电网的额定电压高 10% 。如果变压器的短路电压（亦称阻抗电压）百分值小于 7% 或变压器直接与用户相连接（包括通过短距离线路与用户相连接）时，则规定比电网额定电压高 5% 。

为了生产和使用的方便，对电力变压器的额定容量也规定了一系列标准的等级。我国所用的标准容量等级如下（单位为 $\text{kV} \cdot \text{A}$ ）：

10、20、30、40、50、63、80、100、125、160、200、250、315、400、500、630、800、1000、1250、1600、2000、2500、3150……（后级近似为前级的 $\sqrt[10]{10}$ 倍）以及 30、50、75、100、135、180、240、320、420、560、750、1000……（后级近似为前级的 $\sqrt[8]{10}$ 倍）。

已知变压器的额定容量和原、副绕组的额定电压，就可以求出原、副绕组的额定电流。例如一台三相双绕组变压器，额定容量 $S_N = 100\text{kV} \cdot \text{A}$ ，原、副绕组额定电压 $U_{1N}/U_{2N} = 6/0.4\text{kV}$ ，于是，原、副绕组的额定电流为：

$$I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6000} = 9.63 \text{ A}, \quad I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 400} = 144 \text{ A}$$

变压器副边电流达到额定值时，这时变压器的负荷也叫做额定负荷（或额定负载）。

变压器实际使用时的视在功率往往与额定容量不相同。这是因为在实际运行时副边电流不一定等于额定值，同时副边电压 U_2 是变化的（变化较小）。例如上述变压器，当 $I_2 = I_{2N} = 144 \text{ A}$ 且 $\cos\varphi_2 = 0.8$ （滞后）时，副边电压降低到 $U_2 = 380 \text{ V}$ （以后再介绍 U_2 降低的原因），则此时变压器的实际输出的视在功率为 $100 \times 380 / 400 = 95 \text{ kV} \cdot \text{A}$ 。

为便于读者对照，表 1-1 中列出了变压器型号中各字母的含义。

表 1-1 变压器的型号及意义

电力变压器		调压变压器		自耦变压器	
D	单相	T	调压器	O	自耦
J	油浸	O	自耦		注：O 在前为降压
G	干式	Y	移圈		O 在后为升压
C	干式浇注	A	感应	S、D、J、F、FP、Z	同电力
S	油浸水冷	C	接触		
F	油浸风冷	P	强油循环		
S	三绕组，三相	X	线端	干式变压器	
FP	强油风冷	Z	中点	G	干式
Z	有载	C	串联	Q	加强的
SP	强油水冷	S、D、G、F、J、Z	同电力	H	防火
T	成套			D、S	同电力
D	移动式	矿用变压器		低电压变压器	
L	铝线	K	矿用变压器	D	低电压
整流变压器		D、G、S	同电力	S	水冷
Z	整流变压器	船用变压器		D、J	同电力
K	电抗器	S	防水	串联变压器	
J	电力机车用	D、G	同电力	C	
S、D、J、F、FP	同电力	电阻炉用变压器		S、D、J、SP	同电力
		ZU	电阻炉用		
启动变压器		S、D、J、SP	同电力	消弧线圈	
Q	启动			X	消弧
S、J	同电力	电炉用变压器		D、J	同电力
试验变压器		H	电炉	其他	
Y	试验	K	附电抗器	L	滤波
D、J、G、S	同电力	S、J、FP、SP	同电力	F	放大器
				C	磁放大器
中频淬火用变压器		封闭电弧炉用变压器		T	调幅
R	中频	BH	封闭电弧炉	TN	电压调整器
G	同电力	S、J	同电力	TX	移相器

注：在变压器型号后面的数字部分，斜线的左面表示额定容量（ $\text{kV} \cdot \text{A}$ ），斜线的右面表示高压侧的额定电压（ kV ），例如有一台电力变压器 SJL-560/10，此变压器为三相油浸自冷式铝线电力变压器，额定容量为 $560 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ，高压侧额定电压 10 kV 。

电力变压器全型号的表示及含义如图 1-10 所示。

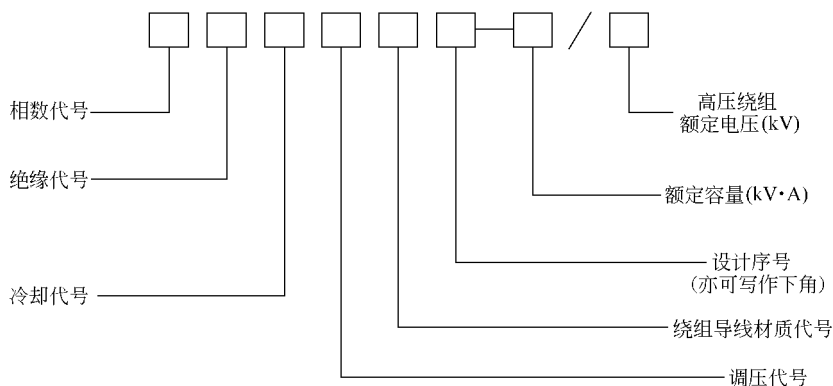


图 1-10 电力变压器全型号的表示及含义

1.4 变压器的工作原理

电力变压器大多是三相变压器。三相变压器作对称运行时，三相的电压、电流有效值相同，相位互差 120° ，所以对三相变压器，只要知道一相的参数和一相的电压、电流即可。下面先分析单相变压器，其结论很容易应用到三相变压器中。

1.4.1 空载运行时的物理情况

图 1-11 是单相变压器空载运行时的示意图。所谓空载，是指原绕组接到交流电源上，而副绕组开路。在图 1-11 中，设原绕组为 AX，接在电压为 u_1 的交流电源上，副绕组为 ax，且开路。

由于原绕组 AX 接在交流电源上，所以原绕组中有电流流过，称其为空载电流 i_0 。空载电流必然要在铁芯建立磁通，磁通随时间交变，必然要在绕组中感应电动势。对原绕组，外施电压基本上与感应电动势平衡；对副绕组，感应电动势等于开路电压。一旦副绕组接上负载，将会有电流流过负载，变压器也就由空载运行变成负载运行了。

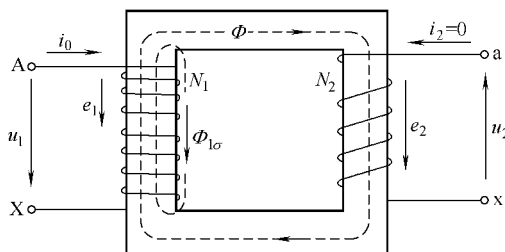


图 1-11 变压器空载运行时的示意

为了便于分析，把变压器中的磁通分为两类：一类是从铁芯中通过，既和原绕组环链，又和副绕组环链，称为主磁通，如图 1-11 中的 Φ ；另一类磁通并不沿铁芯闭合，而需要经过变压器油或空气形成闭路，称为漏磁通，如图 1-11 中的 $\Phi_{1\sigma}$ ，显然 $\Phi_{1\sigma}$ 只与原绕组环链，不与副绕组环链。在数量上，主磁通远大于漏磁通。

由于主磁通既和原绕组环链，又和副绕组环链，所以主磁通应由原绕组的磁动势和副绕组的磁动势共同产生，下面将要分析的负载运行即属于这种情况。但空载运行时，副绕组中没有电流，所以主磁通仅由原绕组的磁动势所产生。

空载时，只有原绕组中有电流，所以，只有原绕组有漏磁通；负载时，原、副绕组中都有电流，所以，原、副绕组都有漏磁通。换言之，原绕组的漏磁通只和原绕组环链且仅由原

绕组的磁动势所产生，而副绕组的漏磁通只和副绕组环链且仅由副绕组的磁动势所产生。

由于漏磁通必须经过空气或变压器油形成闭路，而磁路中如果有空气隙（变压器油的磁导率与空气的相等，从导磁的角度看，相当于空气），磁动势就主要是消耗在空气隙中，而空气的磁导率是常数，所以，原绕组的漏磁通可认为是正比于原绕组的磁动势，即正比于原绕组的电流。同样，副绕组的漏磁通正比于副绕组的电流。正因为如此，当原绕组（或副绕组）中有电流流过时，原绕组（或副绕组）漏磁通的作用只是在原绕组（或副绕组）中产生一个电抗压降，称为漏抗压降。

下面对空载运行时各物理量之间的关系进行定量的分析。

变压器空载运行时各量的参考方向如图 1-11 所示。其中规定“正电流产生正磁通”，即电流与磁通的参考方向符合右手螺旋规则，即右手四指弯曲，与大拇指垂直，四指方向表示电流参考方向，而大拇指表示磁通参考方向。规定电动势参考方向与电流参考方向一致。而 u_1 与 i_0 的参考方向符合电动机惯例，即 $u_1 i_0 > 0$ 时，原绕组从电源吸收电功率。

特别要注意的是：对电压来说，如果某瞬时电压为正，则顺着该电压的箭头方向（即参考方向）从高电位指向低电位；而对电动势来说，如果某时刻某电动势为正，则顺着该电动势的箭头方向（参考方向）从低电位指向高电位。通俗地说，电压的参考方向表示的是电位降，而电动势的参考方向表示的是电位升。

通常，在电路方程中，对于随时间作正弦交变的物理量，用小写字母表示其瞬时值，大写字母表示其有效值，而用大写字母上加“·”表示该物理量所对应的复数。

当对原绕组外施电压 u_1 时，该电压主要是和感应电动势 e_1 平衡，但因原绕组中有 i_0 流过，要产生电阻压降，因有漏磁通，如前所述，还要产生漏抗压降。根据电路中的基尔霍夫第二定律，结合图 1-11 所示的参考方向，且所有的量都写成复数形式，可得空载运行时原绕组的电动势平衡方程式如下。

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 R_1 + j\dot{I}_0 x_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \quad (1-1)$$

式中 R_1 ——原绕组的电阻；

x_1 ——原绕组的漏抗；

Z_1 ——原绕组的漏阻抗， $Z_1 = R_1 + jx_1$ 。

漏阻抗压降通常很小，所以从有效值看

$$U_1 \approx E_1$$

对副绕组，根据相应的参考方向，不难写出

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2$$

考虑有效值

$$U_2 = E_2$$

根据电磁感应定律可以证明

$$E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m \quad (1-2)$$

式中 f ——电源频率，Hz；

N_1 ——原绕组匝数；

Φ_m ——主磁通最大值，Wb。

同理可得

$$E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m \quad (1-3)$$

式中， N_2 为副绕组匝数。

不难看出，变压器原方和副方的感应电动势是同相位的，两者之比（也等于有效值之比）称为变压器的变比，用字母 k 表示，根据上面的分析可得

$$k = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \quad (1-4)$$

顺便指出，变压器在正常运行时，副方也有漏阻抗压降，故 E_2 和 U_2 也只是近似相等。但总的来讲，由于漏阻抗压降在电压中所占的比例都很小，所以式(1-4)总是正确的。

对于三相变压器，式(1-4)中的电压、电动势应理解为相电压、相电动势，而 N_1 、 N_2 也只能是一相原、副绕组的匝数。

在变压器的铁芯中建立主磁通所需要的电流称为励磁电流，常用 \dot{I}_m 表示。空载时，副绕组中没有电流，这时，铁芯中的主磁通仅由原绕组的磁动势产生，所以空载运行原绕组的电流就是励磁电流，即 $\dot{I}_0 = \dot{I}_m$ 。

变压器在正常运行时，原绕组上所加的电压等于额定电压，可认为是不变的（指有效值），因漏阻抗压降很小，原绕组的感应电动势与原绕组的电压基本相等，所以，正常运行时原绕组的感应电动势 E_1 ，可认为是基本不变的，而 E_1 与 Φ_m 成正比，故 Φ_m 基本不变，在此前提下，可认为

$$\Phi_m = K_1 I_0$$

式中， K_1 是常数，而 E_1 正比于 Φ_m ，所以可写成

$$E_1 = x_m I_0$$

式中， x_m 称为励磁电抗，在变压器的正常运行范围内，可认为 x_m 是常数。

根据电磁感应定律 $e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$ ，任何随时间作正弦交变的物理量对时间求导后其相位将超前原物理量 90° ，考虑到公式右端带一负号，所以 \dot{E}_1 在相位上滞后 $\Phi_m 90^\circ$ ，而 Φ_m 与 I_0 同相，所以

$$\dot{E}_1 = -j x_m \dot{I}_0 \text{ 或 } -\dot{E}_1 = j x_m \dot{I}_0$$

上面的分析完全忽略了铁损耗。若考虑铁损耗，需引入励磁电阻，且

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_0 (R_m + j x_m) = \dot{I}_0 Z_m \quad (1-5)$$

式中 R_m —— 励磁电阻；

Z_m —— 励磁阻抗。

通常， $x_m \gg R_m$ 。另外，要注意 R_m 是一个体现铁损耗的模拟电阻，并不是一个真实的电阻。

将式(1-5)代入式(1-1)中，可得

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 = \dot{I}_0 Z_m + \dot{I}_0 Z_1 = \dot{I}_0 (Z_m + Z_1) \quad (1-6)$$

变压器空载运行时的矢量图如图 1-12 所示。图中 $\dot{I}_0 R_1$ 及 $j \dot{I}_0 x_1$ 的矢量是为了更清楚地表示它们的关系而放大的了。实际上 U_1 很接近 E_1 。

1.4.2 变压器的负载运行

变压器负载运行时各物理量的参考方向如图 1-13 所示。 \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 与 $\dot{\Phi}_m$ 的参考方向符合正电流产生正磁通； \dot{E}_2 与 \dot{I}_2 参考方向一致； \dot{U}_1 、 \dot{I}_1 的参考方向之间符合电动机惯例，即

$u_1 i_1 > 0$ 时, 变压器原方从电源吸收电功率, 但 \dot{U}_2 、 \dot{I}_2 的参考方向之间符合发电机惯例, 即 $u_2 i_2 > 0$ 时, 变压器副方向负载输出电功率。

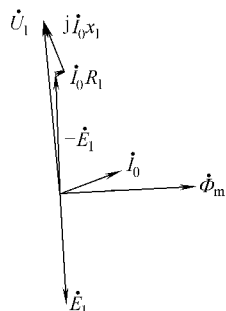


图 1-12 空载时的矢量图

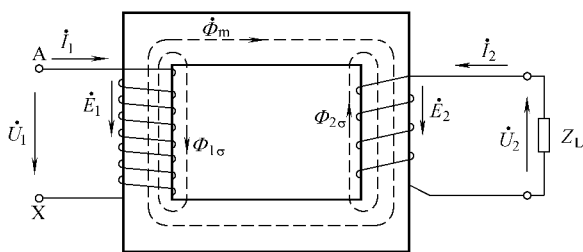


图 1-13 变压器负载运行原理图

可以认为负载运行时原绕组中的电流由两部分组成, 即

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + \dot{I}_{1L}$$

\dot{I}_m 为励磁分量, \dot{I}_{1L} 称为负载分量, 于是

$$\dot{I}_1 N_1 = \dot{I}_m N_1 + \dot{I}_{1L} N_1$$

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_m N_1 + \dot{I}_{1L} N_1 + \dot{I}_2 N_2$$

可以认为

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

于是

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

也就是说, 负载运行时原绕组电流产生的磁动势分成了两部分, 其中的一部分 $\dot{I}_{1L} N_1$ 与副绕组中的磁动势 $\dot{I}_2 N_2$ 互相抵消了 ($\dot{I}_{1L} N_1 + \dot{I}_2 N_2 = 0$), 而另一部分 $\dot{I}_m N_1$ 就是在铁芯中建立主磁通所需要的磁动势。或者说, 负载运行时, 铁芯中的主磁通仅由原绕组电流中的励磁分量所建立。副绕组磁动势本应对主磁通有贡献, 但它被原绕组电流中的负载分量 \dot{I}_{1L} 所产生的磁动势抵消掉了, 所以, 真正在铁芯中建立主磁通的只是原绕组电流中的励磁分量。

(1) 负载运行时的方程组 负载运行时, 原绕组的电动势平衡方程式为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \quad (1-7)$$

与空载相比 [见式(1-1)], 只是将 \dot{I}_0 换成了 \dot{I}_1 。

负载运行时, 副绕组的电动势平衡方程式为

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 x_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 Z_2 \quad (1-8)$$

式中, R_2 、 x_2 、 Z_2 分别为副绕组的电阻、漏抗、漏阻抗, 且 $Z_2 = R_2 + jx_2$ 。副绕组有电阻, 所以必定有电阻压降; 副绕组的漏磁通和副绕组电流成正比, 所以副绕组漏磁通的作用可用漏抗压降 $j\dot{I}_2 x_2$ 来表示。

负载运行时, 磁动势平衡方程式为

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_m N_1 \quad (1-9)$$

从产生主磁通、感应电动势的角度看, 负载运行时的 \dot{I}_m 与空载运行时的 \dot{I}_0 相当, 所

以，负载运行时，应有

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_m(R_m + jx_m) = \dot{I}_m Z_m \quad (1-10)$$

负载运行时，考虑副绕组的输出端，应有

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_L \quad (1-11)$$

式中， Z_L 为负载阻抗。

此外，负载运行时仍有

$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \quad (1-12)$$

将式(1-7)~式(1-12) 写在一起，便可得负载运行时的方程

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(R_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{E}_2 &= \dot{U}_2 + \dot{I}_2 Z_2 \\ \dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 &= \dot{I}_m N_1 \\ -\dot{E}_1 &= \dot{I}_m Z_m \\ \dot{U}_2 &= \dot{I}_2 Z_L \\ \dot{E}_1 &= k \dot{E}_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

(2) 折合算法 所谓折合算法，从数学上来看，就是一种变量置换法。引入中间变量 $\dot{U}'_2, \dot{E}'_2, \dot{I}'_2, R'_2, x'_2, Z'_2, Z'_L$ 。令 $\dot{U}'_2 = k \dot{U}_2, \dot{E}'_2 = k \dot{E}_2, \dot{I}'_2 = \dot{I}_2 / k, R'_2 = k^2 R_2, x'_2 = k^2 x_2, Z'_2 = k^2 Z_2, Z'_L = k^2 Z_L$ ，方程组(1-13) 中第一个方程和第四个方程保持不变，第二个方程两边同时乘以 k ，可得

$$\begin{aligned} \dot{E}'_2 &= \dot{U}'_2 + \dot{I}'_2 Z'_2 \\ Z'_2 &= R'_2 + jx'_2 \end{aligned}$$

且

方程组中第三个方程两边都除以 N_1 ，可得

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_m$$

方程组中第五个方程两边乘以 k ，可得

$$\dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 Z'_L$$

方程组中第六个方程变为

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$$

称右上角带撇号“'”的物理量为副方折算到原方的折算值，这样，就可得到用折算值写成的一组方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{E}'_2 &= \dot{U}'_2 + \dot{I}'_2 Z'_2 \\ \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 &= \dot{I}_m \\ -\dot{E}_1 &= \dot{I}_m Z_m \\ \dot{U}'_2 &= \dot{I}'_2 Z'_L \\ \dot{E}_1 &= \dot{E}'_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

不难证明,采用折合算法,变压器副方的磁动势和变压器的功率关系均保持不变。

(3) 等值电路 除自耦变压器外,变压器的原副方之间没有电路上的直接联系,但为了便于分析和计算,可以找到一个与方程组(1-14)完全对应的等值电路,如图1-14所示。该电路中,由变压器本身的参数所组成的部分很像字母T,故称其为T形等值电路。又因为该电路中原方的量是实际值,而副方的量是折算

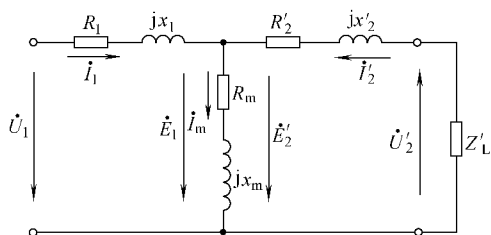


图 1-14 变压器的 T 形等值电路

值,所以它是从原方看入的等值电路。等值电路中的励磁阻抗是反映原方励磁电流和原方感应电动势之间关系的,所以是从原方看入的励磁阻抗。

对于三相变压器,等值电路是指一相的等值电路,等值电路中所有的量均指一相的量。

在电力变压器中,由于 Z_m 很大, i_m 在 i_1 中所占的百分比很小,故在进行变压器负载运行和短路情况的定量计算时,往往可将 T 形等值电路中的励磁支路断开,相当于近似地认为 $i_m = 0$ 。于是,可得到图 1-15 所示的变压器简化等值电路。

用简化等值电路分析问题时,常将有关参数进行合并,令

$$R_k = R_1 + R_2', \quad x_k = x_1 + x_2', \quad Z_k = R_k + jx_k = Z_1 + Z_2'$$

于是,变压器的简化等值电路就如图 1-16 所示。

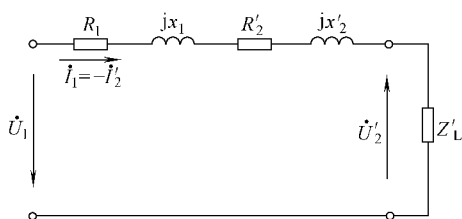


图 1-15 变压器的简化等值电路(一)

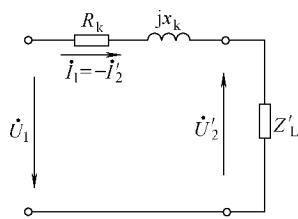


图 1-16 变压器的简化等值电路(二)

读者不难想像,如果变压器副方短路,即 $Z_L' = 0$,从原方看入的等效阻抗就是 Z_k ,所以,称 Z_k 为变压器的短路阻抗。相应地,称 R_k 为短路电阻,称 x_k 为短路电抗。

在实际工作中,可以把变压器副方的量向原方折算,得到从原方看入的等值电路;也可以把原方的量向副方折算,得到从副方看入的等值电路。不难看出,对同一台变压器,这两种等值电路中相对应的阻抗是不相等的。以短路阻抗为例,设高压方为原方,电阻和漏抗为 R_1 和 x_1 ,低压方为副方,电阻和漏抗为 R_2 和 x_2 ,这时 $k > 1$, $R_k = R_1 + R_2' = R_1 + k^2 R_2$ 。但是同一变压器,如果把低压方作为原方,高压方作为副方,这时的变比为 k' ,显然 $k' = 1/k$,这时从原方(低压方)看入的短路阻抗为

$$R_k' = R_2 + R_1' = R_2 + R_1 k'^2 = (R_2 + R_1/k^2) = (R_1 + R_2 k^2)/k^2 = R_k/k^2$$

这说明就短路电阻而言,从低压方看入的值是从高压方看入的 $1/k^2$ ($k > 1$)。按同样的思路可以证明从低压方看入短路电抗的值也是从高压方看入的 $1/k^2$ 。不仅短路阻抗,励磁阻抗也是这样的(可参见例 1-3),所以结论很清楚:从高压方看入的等值电路中的各阻抗是从低压方看入的等值电路中相应阻抗的 k^2 倍。这里 k 是高压方一相匝数(或额定相电压)与低压方一相匝数(或额定相电压)之比。