

- 校企合作双元开发优质教材
- 高等职业院校技能型人才培养“十四五”新形态立体化教材

电机与电气控制技术

主 编 ● 罗 文 程晶晶
副主编 ● 成 茜 王晶晶
欧梁斌 黄中羲



西南交通大学出版社

校企合作双元开发优质教材

高等职业院校技能型人才培养“十四五”新形态立体化教材

电机与电气控制技术

主 编 © 罗 文（重庆机电职业技术大学）

程晶晶（重庆机电职业技术大学）

副主编 © 成 茜（重庆机电职业技术大学）

王晶晶（重庆机电职业技术大学）

欧梁斌（重庆腾旺汽车配件有限责任公司）

黄中羲（重庆云网科技股份有限公司）

西南交通大学出版社

• 成 都 •

图书在版编目 (C I P) 数据

电机与电气控制技术 / 罗文, 程晶晶主编. —成都:
西南交通大学出版社, 2021.2
ISBN 978-7-5643-7963-6

I. ①电… II. ①罗… ②程… III. ①电机学 - 高等
职业教育 - 教材②电气控制 - 高等职业教育 - 教材 IV.
①TM3②TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 271190 号

Dianji yu Dianqi Kongzhi Jishu

电机与电气控制技术

主编 罗文 程晶晶

责任编辑	梁志敏
封面设计	何东琳设计工作室

出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
邮政编码	610031
发行部电话	028-87600564 028-87600533
网址	http://www.xnjdcbs.com
印刷	成都中永印务有限责任公司

成品尺寸	185 mm × 260 mm
印张	12.25
字数	277 千
版次	2021 年 2 月第 1 版
印次	2021 年 2 月第 1 次
书号	ISBN 978-7-5643-7963-6
定价	42.00 元

课件咨询电话: 028-81435775

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

视频资源列表

序号	资源名称	资源类型	资源页码
1	断路器动画	动画	083
2	按钮动画	动画	091
3	时间继电器动画	动画	103
4	热继电器动画	动画	106
5	速度继电器动画	动画	107
6	接触器动画	动画	110
7	点动自锁控制动画	动画	118
8	顺序控制动画	动画	120
9	互锁控制电路动画	动画	124
10	自动往返电路动画	动画	125
11	定子串电阻降压启动控制电路动画	动画	126
12	Y-△启动控制电路动画	动画	128
13	能耗制动控制动画	动画	134

前言

Preface

教材切合学生的实际情况，根据骨干高职院校对专业的要求，以必须够用为原则，以“工学结合”为指导，在内容编排上，改变了以知识能力点为体系的框架，以理论联系实践活动为组织编排教材。为了适应高职高专教育体制改革的需要，培养符合社会经济发展、服务于生产第一线的高技能技术应用型人才，适用型教材的建设不可或缺。教材的改革是实现教学改革的重要手段。本教材的内容把增强学生的职业适应能力和应变能力作为课程目标的基本要素，形成“基本素质职业能力——岗位技能”三位一体的课程目标模式，使学生既有迅速上岗的能力，又有可持续发展和创新的能力。

本教材遵循“精选内容、模块化结构、有机整合、合理排序、突出应用”的原则，力求做到以基本知识为基础，以专业目标培养为主线，体现针对性、实用性、先进性、适用性。将新知识融入，按由浅入深、循序渐进的方式进行编写。

主编带领全体参编人员树立精品教材意识，对教学内容、教学条件、教学手段与方法按思想的先进性、科学性、适用性的原则进行统筹安排，特别是结合高职高专教育的特点，使教材具有鲜明的基础性、可操作性、实用性的特点，使学生能学以致用，走上工作岗位后能较快地解决实际的技术问题。同时，在编写的过程中将教材中的重点、难点内容进行分散，使之图文并茂、易学易懂，也便于有关技术人员自学。

本书由罗文（重庆机电职业技术大学）、程晶晶（重庆机电职业技术大学）担任主编，成茜（重庆机电职业技术大学）、王晶晶（重庆机电职业技术大学）、欧梁斌（重庆腾旺汽车配件有限责任公司）、黄中羲（重庆云网科技股份有限公司）担任副主编。具体分工如下：

罗文副教授负责教材的统稿；程晶晶负责教材模块一、模块四、模块五、模块六和模块七的编写；成茜老师负责模块二和模块三的编写；王晶晶负责所有模块练习题的编写。重庆腾旺汽车配件有限责任公司的欧梁斌、重庆云网科技股份有限公司的黄中羲等企业专家为本书提供了企业真实案例，并对书中生产应用相关内容的撰写进行指导。

由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请广大读者批评指正。

编者

2020年10月

项目 1	<u>变压器的运行与应用</u>	1
任务 1.1	变压器的认识与使用	2
任务 1.2	单相变压器的认识与使用	11
任务 1.3	三相变压器的认识与使用	18
任务 1.4	其他用途变压器的认识与使用	21
练习题		34
项目 2	<u>三相异步电动机的运行与应用</u>	35
任务 2.1	三相异步电动机的工作原理和基本结构	36
任务 2.2	三相异步电动机的运行	44
任务 2.3	三相异步电动机的特性	47
练习题		52
项目 3	<u>直流电动机的运行与应用</u>	54
任务 3.1	直流电动机的基础知识	55
任务 3.2	直流电动机的特性	63
任务 3.3	直流电动机的运行原理	65
练习题		71
项目 4	<u>常用低压电器的运行与应用</u>	72
任务 4.1	常用低压电器基础知识	73
任务 4.2	低压开关的认识与使用	79
任务 4.3	熔断器的认识与使用	86
任务 4.4	主令电器的认识与使用	90
任务 4.5	继电器的认识与使用	97
任务 4.6	接触器的认识与使用	109
练习题		115

项目 5	<u>电气控制基本环节认知</u>	116
任务 5.1	电气控制电路基本控制规律	117
任务 5.2	鼠笼式异步电动机降压起动控制	125
任务 5.3	绕线式异步电动机启动控制	129
任务 5.4	三相鼠笼式异步电动机制动控制线路设计	131
任务 5.5	调速控制电路的认识与使用	139
任务 5.6	电气控制保护环节设计	141
任务 5.7	电气控制线路的绘制	142
练习题		146
项目 6	<u>典型机床电气控制系统分析</u>	147
任务 6.1	电气控制系统分析基础	148
任务 6.2	CA6140 普通车床的电气控制系统分析	149
任务 6.3	Z3040 型摇臂钻床的电气控制系统分析	152
任务 6.4	T68 型卧式镗床的电气控制系统分析	155
练习题		161
项目 7	<u>典型电气控制系统的故障检修</u>	162
任务 7.1	典型电气控制系统的故障检修方法	163
任务 7.2	普通常见车床的故障分析与检修	180
练习题		186
参考文献		187

项目 1

PART ONE

变压器的运行与应用



任务 1.1 变压器的认识与使用

1.1.1 变压器的结构、用途与分类

1. 变压器的用途

变压器是一种静止的电气设备，是应用电磁感应原理来改变电压、电流的装置。在电力系统和电子线路中，变压器有着广泛的应用。在输电方面，输电线路的电压越高，线路中的电流和相应的线路损耗就越小。因为发电机受绝缘结构的制约，发出的电压不可能太高，为此要用变压器把发电机发出的电压升高到输电电压，然后接入电路进行传送。

在用电方面，为保证用电安全和满足用电设备的电压要求，要利用变压器把输电线路上的高压降低到配电电压，供用户使用。

在电子线路中，变压器常用于实现信号的传递、阻抗的匹配。在电焊、整流、测量等方面，也需要各种专用的变压器，图 1-1-1 所示为变压器的实物外形图。

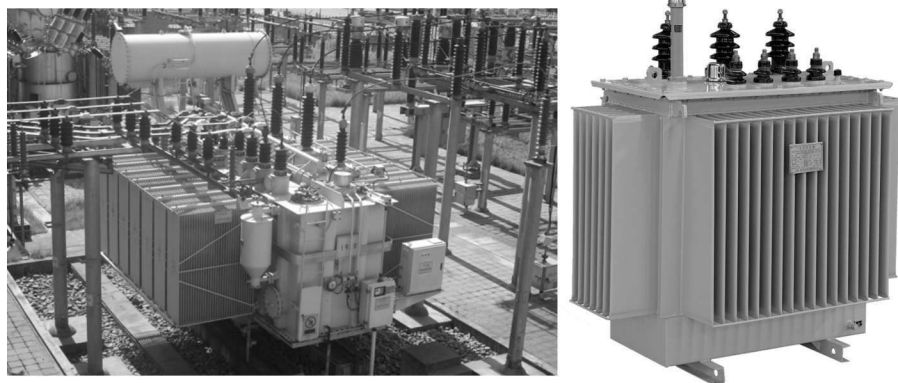


图 1-1-1 变压器外形图

变压器是一种静止的电磁机械，主要由铁心和线圈组成，通过磁的耦合作用把交流电从一次侧传送到二次侧。它利用铁心上一次绕组和二次绕组匝数的不等，改变绕组上的电压与电流。

图 1-1-2 是双绕组变压器的原理图。接电源的线圈称为一次绕组，与负载相连的线圈称为二次绕组。一次绕组和二次绕组的匝数分别用 N_1 和 N_2 表示。



变压器的主要组成部分是铁心和绕组，铁心是磁路部分，绕组是电路部分。铁心与绕组构成变压器的主体，它们装配在一起，称为变压器的器身。对于大、中容量的变压器，为了改善散热条件，器身要进行油冷或风冷。油冷是将变压器器身浸在盛满变压器绝缘油的密封油箱中，借助绝缘油的导热作用，通过变压器外壳的散热装置，将变压器工作时产生的热量传送到外界。各绕组的出线端用绝缘套管引出。此外，为了变压器能安全、可靠地运行，一般还设有附件。

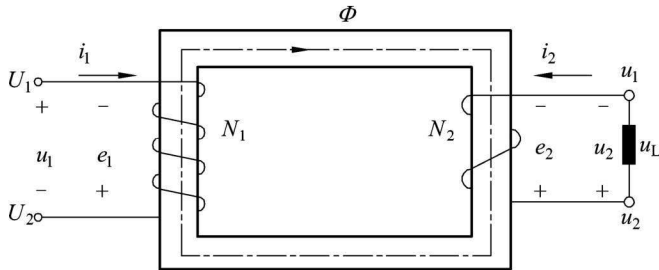
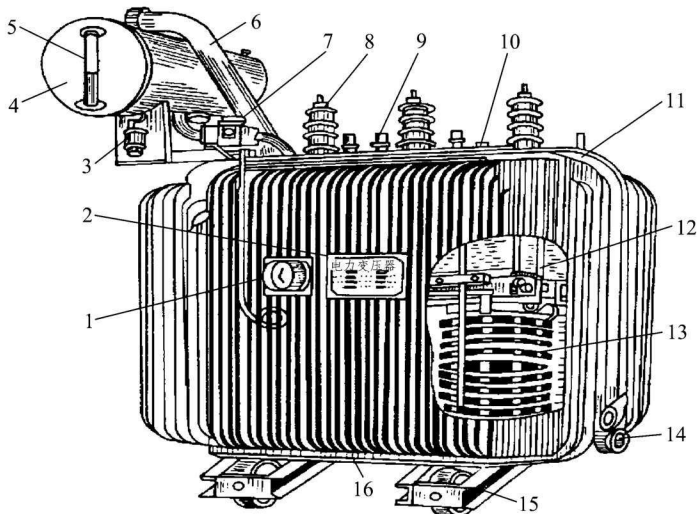


图 1-1-2 双绕组变压器的原理图

2. 变压器的结构

变压器的结构如图 1-1-3 所示。



- 1—信号温度计；2—铭牌；3—吸湿器；4—油枕；5—套管；6—防爆灌；
7—瓦斯继电器；8/9—高低压套管；10—分接开关；11—油箱；
12—铁心；13—绕组；14—放油阀；15、16—接地端子。

图 1-1-3 变压器的结构示意图

1) 铁心

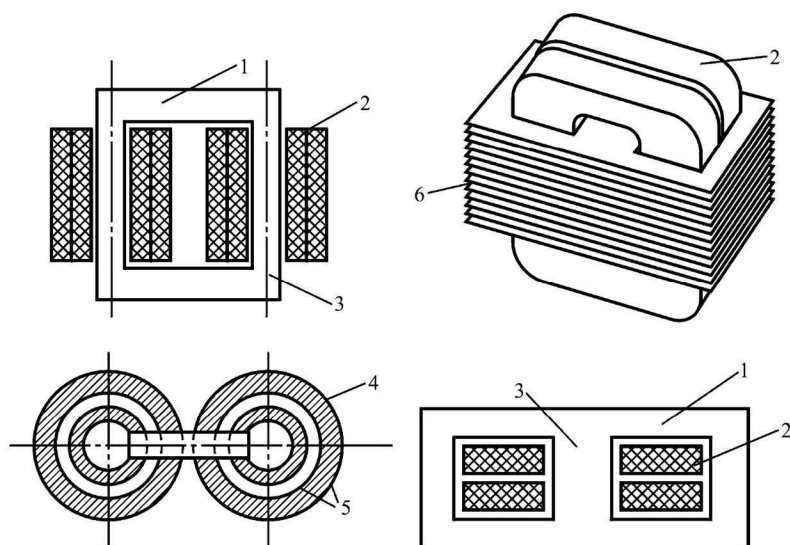
变压器的铁心是由 0.28 ~ 0.35 mm 厚的硅钢片叠成的。叠片的两面均涂以绝缘漆，使片间绝缘，用以减小涡流损耗。另外，为减小磁阻与



励磁电流，铁心中不能有明显的间隙，每层叠片的接缝需要相互错开。因为硅钢片在顺轧制方向有较高的磁导率和较小的损耗，为了避免磁力线与硅钢片轧制方向直交，现在多采用全斜接缝。这样可以使空载电流下降 20%~30%，铁心损耗下降 7%~10%。

图 1-1-4 (a) 所示的心式铁心变压器中，一次、二次绕组环绕在铁心柱上。这种铁心构造比较简单，所以是应用较多的结构形式。另外，在这种结构中有较多的位置装设绝缘，所以适用于电压较高的变压器。

图 1-1-4 (b) 所示的壳式变压器中，一次、二次绕组被铁心包围。这种变压器用铜量较少，铁心散热较容易，适用于小功率大电流的单相变压器和特殊用途的变压器，如电焊变压器、电炉变压器等。



(a) 心式结构

(b) 壳式结构

1—铁轭；2—绕组；3—铁心柱；4—高压绕组；5—低压绕组；6—铁心。

图 1-1-4 变压器铁心的结构形式

变压器铁心内的磁通是交变的，因此会产生一定的磁滞损耗与涡流损耗。为了减少铁心内的这些损耗，铁心通常都用表面涂有漆膜、厚度为 0.35 mm 或 0.5 mm 的硅钢片冲压成一定的形状后叠装而成。新型节能变压器的铁心采用非晶合金铁心材料制成后，其空载损耗大为降低，所以要积极推广采用。可以说，变压器的发展史就是铁心的发展史，铁心的类型从 1885 年的卷铁心、1903 年的热轧硅钢片、1935 年的晶体无取向硅钢片，到 1964 年晶体有取向的冷轧硅钢片，最后发展为 1974 年至 1980 年的非晶合金钢片。

2) 绕组

根据变压器高压绕组与低压绕组的相对位置，绕组可分为同心式与交叠式两种。



同心式绕组适用于心式变压器，同心式绕组大都是低压绕组套在里面，高压绕组套在外面。高压绕组与低压绕组之间有一定的绝缘间隙，并用绝缘纸筒隔开，绝缘的厚度根据绕组额定电压而定。

同心式绕组根据制造方法的不同，又可分为圆筒式、螺旋式、连续式和纠结式等，如图 1-1-5 所示。

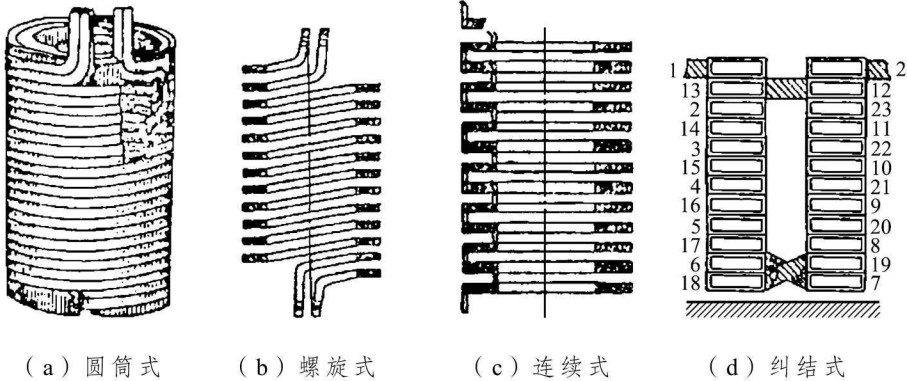


图 1-1-5 同心式绕组的几种形式

3) 油箱

油箱由箱体、箱盖、散热装置、放油阀组成，其主要作用是把变压器连成一个整体并进行散热。其内部是绕组、铁心和变压器油。变压器油既有循环冷却和散热作用，又有绝缘作用。绕组与箱体（箱壁、箱底）有一定的距离，通过油箱内的油绝缘。油箱一般采用散热管油箱。散热管的管内两端与箱体内相通，油受热后，经散热管上端口流入管体，冷却后经下端口流回箱内，形成循环。散热管油箱用于 $1\ 600\ \text{kV} \cdot \text{A}$ 及以下的变压器。还有一种带有散热器的油箱，用于 $2\ 000\ \text{kV} \cdot \text{A}$ 以上的变压器。

4) 油枕

油枕的容积一般为箱体容积的 10%，其作用是储油和补油，保证变压器的油位高度，减少油面与空气的接触面积，减缓油的氧化过程。空气中吸入的水分、灰尘和氧化油垢沉积于油枕的底部积污区，减缓了绝缘油劣化速度，当变压器内部故障时，箱体内压增大，油枕起到减缓内压的作用。

5) 呼吸器

油枕经呼吸器与大气相通，呼吸器内装有氯化钙或氯化钴浸渍过的硅胶，当大气流入后，硅胶吸收空气中的水分和杂质，起到过滤空气、使绝缘油保持良好性能的作用。

6) 散热器

运行中的变压器箱体上的上、下油产生温差时，绝缘油经散热管形成对流循环，经散热器冷却后流回油箱底部，起到降低油温的作用。大



容量变压器运行中，为了提高油冷却的效果，采用的冷却方式主要有：

- (1) 油浸自冷式。
- (2) 油浸风冷式。
- (3) 强迫油循环风冷式。
- (4) 强迫油循环水冷式。

7) 防爆管

防爆管装于变压器的顶盖上，通过喇叭形的管子与大气相通，管口用玻璃防爆膜封住。当运行中的变压器内部发生故障而其保护装置失灵时，变压器箱体内压增大，超过一定数值后，防爆玻璃破裂，将油分解的气体排出，防止了变压器内部压力骤增对油箱的破坏。

8) 绝缘套管

绝缘套管是变压器高、低压绕组引线的固定和连接装置。变压器绕组通过绝缘套管、接线端子从内部引出到外部，与一次、二次电路连接，是变压器相对箱体的绝缘部分。

9) 瓦斯继电器

瓦斯继电器是一种非电量的气体继电器，装于变压器油箱和油枕连接管上，是反应变压器内部故障的保护装置。变压器运行中发生故障时，若故障不严重，油箱内压力增大，瓦斯继电器的触点接通发出信号；若变压器内部严重故障，油箱内压力剧增，瓦斯继电器触点接通动作，断路器跳闸，防止故障的扩大。

10) 分接开关

分接开关是调整变压器变比的装置，双卷变压器、三卷变压器的一次、二次绕组一般有 3~5 个分接抽头挡位。三挡分接头的中间挡位为分接头额定电压，相邻的分接头相差 $\pm 5\%$ ；五挡分接头的变压器相邻的分接头相差 $\pm 2.5\%$ ；对有载调压变压器，相邻的分接头相差 $\pm 1.25\%$ 。改变分接头的位置，可调节中压和低压绕组的输出电压。

无励磁调压是在不带电的情况下进行切换分接头的调压方式，在实际应用中，通过停电来切换变压器分接开关往往是不允许的，这就需要能在带电的情况下切换分接头的调压装置。这就是有载调压方式。

有载调压装置的基本原理就是将变压器引出的分接头通过有载开关，在保证不切断负载电流的情况下，由一个分接头切换到另一个分接头以改变变比，从而实现调压。这种方式可以适用于各种容量的变压器。

3. 变压器的分类

按用途分：电力变压器和特种变压器。

按绕组数目分：单绕组（自耦）变压器、双绕组变压器、三绕组变压器和多绕组变压器。



按相数分：单相变压器、三相变压器和多相变压器。

按铁心结构分：心式变压器和壳式变压器。

按调压方式分：无励磁调压变压器和有载调压变压器。

按冷却介质和冷却方式分：干式变压器、油浸式变压器和充气式变压器。

1.1.2 变压器的使用

1. 型号

变压器的型号由两部分组成：前一部分描述变压器的种类、结构、特征和用途，用汉语拼音表示；后一部分描述变压器的容量和绕组的等级，用具体的数字表示。例如：S9—315/10 型变压器，表示这是三相油浸式铜绕组电力变压器，其容量为 315 kV·A，一次侧额定电压为 10 kV。

2. 额定参数

1) 额定电压

一次侧额定电压 U_{1N} 是根据绝缘程度和允许发热量，所规定的加在一次绕组上的工作电压有效值。

二次侧额定电压 U_{2N} 是指在电力系统中一次侧施加额定电压时的二次侧空载电压有效值。

三相变压器一次侧和二次侧额定电压均指线电压。

2) 额定电流

变压器一、二次侧额定电流是指根据变压器允许温升范围内，一、二次侧绕组长期允许通过的电流。

三相变压器一次侧和二次侧额定电流均指线电流。

计算公式：

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

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

上式中， S_N 代表变压器额定容量。

3) 额定容量

二次侧额定电压和额定电流的乘积，即二次侧的额定视在功率称为额定容量，用 S_N 表示。额定容量反映了变压器的传递功率的能力。

额定容量计算公式：

$$\text{单项变压器： } S_N = U_{2N} \cdot I_{2N}$$



三相变压器： $S_N = \sqrt{3}U_{2N} \cdot I_{2N}$

4) 短路电压 $U_d\%$

将变压器二次侧短路，一次侧慢慢施加电压，直到二次侧产生的短路电流等于二次侧的额定电流 I_{2N} 时，所对应的电压称为短路电压。

$$U_d\% = \frac{U_d}{U_{1N}} \times 100\%$$

5) 空载电流 $I_0\%$

变压器二次侧开路，一次侧施加额定电压 U_{1N} 时，流过一次侧的电流称为空载电流。

$$I_0\% = \frac{I_0}{I_{1N}} \times 100\%$$

6) 空载消耗 P_0

空载消耗即变压器二次侧开路，一次侧施加额定电压 U_{1N} 时变压器的损耗，近似等于变压器的铁损。

7) 短路损耗 P_d

短路损耗即变压器一、二次绕组流过额定电流时，在绕组的电阻消耗的功率。

8) 额定温升

额定温升是以环境温度 $+40^\circ\text{C}$ 为参考，规定在运行中允许的变压器的温度超出环境的最大温升。我国标准规定，绕组的温升值为 65°C ，上层油面的温升限值为 35°C ，确保变压器上层油面最高温度不超过 95°C 。

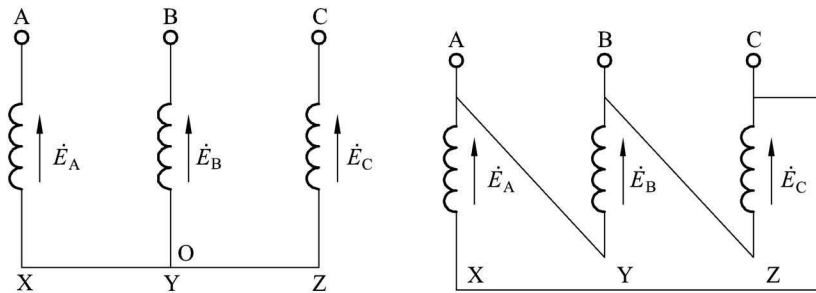
9) 冷却方式

铭牌上标明了变压器稳定运行时的冷却循环方式和冷却介质。

10) 连接组号

连接组号是三相变压器一、二次侧连接和极性关系的一种代号，表示变压器一、二次绕组对应电压之间的相位关系。

常见的连接方式有星形联结、三角形联结、曲折联结。如图 1-1-6 所示为三相变压器绕组接法。



(a) 星形接法

(b) 三角形接法之一

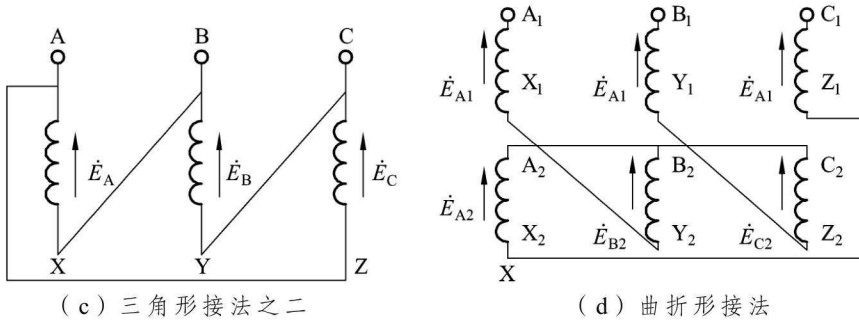


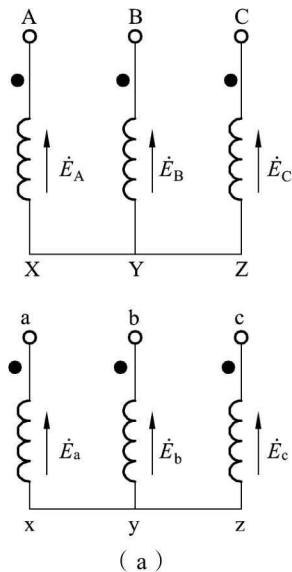
图 1-1-6 三相变压器绕组接法

星形联结方式是将三个绕组的尾端 X、Y、Z 接成中性点 O，将首端 A、B、C 引出。三角形联结的两种方式中，将相邻绕组的首、末端相连，将三相首端 A、B、C 引出。曲折联结方式的接线图中，将每相绕组分成两半，然后将每一项绕组的一半与相邻绕组的下一半倒串联组成新的一相，将 A₂、B₂、C₂ 连在一起作为中性点。

三相变压器一次、二次绕组根据不同的接线方式连接后，其一次、二次电压对应相量之间存在相位差。这种相位差的表示原来采用时钟法，新的标准采用变压器连接组标号表示。两种表示方法如下：

(1) 时钟法：采用线电压相量间的角度，分成 12 个时区，每隔 30° 为一种号。将一次线电压相量定为时钟的分针，定位于 12 时区上，将二次线电压相量定为时针，所指的时区数，即为变压器的连接组别的组号。

(2) 连接组标号：相位差表示用一次、二次绕组对应端与中性点（三角形联结为虚设中性点）间的电压相量角度差。相位差为 30° 的倍数，为 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12。为变压器设计制造标准化，连接组标号仅为 0 和 11 两种，如图 1-1-7 和图 1-1-8 所示。



(a)

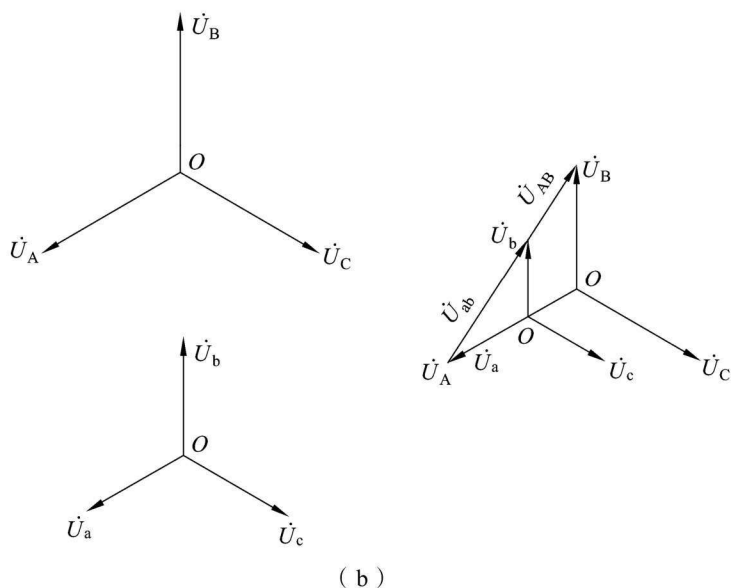


图 1-1-7 Y/yn0 (Y/y0-12) 接线图和向量图

图 1-1-7 所示的连接组别一般用在低压侧电压为 400/230 V 的配电变压器中，供电给动力和照明混合负载。三相动力负载用 400 V 线电压，单相照明负载用 230V 相电压。yn 表示星形连接的中心点引至变压器箱壳的外面再与“地”相接。

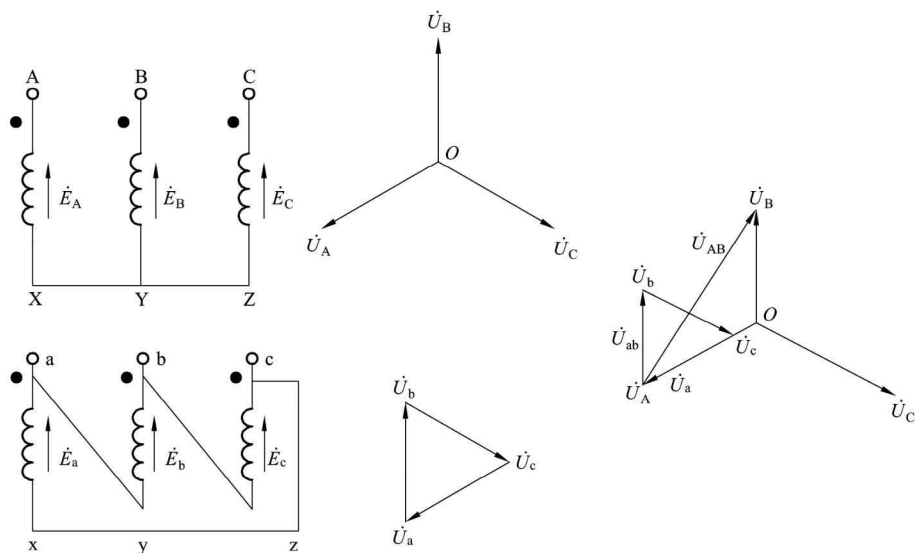


图 1-1-8 Y/d11 接线图和向量图

图 1-1-8 所示的连接组别通常用于低压侧电压高于 400 V，高压侧电压为 35 kV 及以下的输配电系统中。