



中国石油高技能人才培训丛书

变电站值班员技师培训教程

中国石油天然气集团公司人事部 © 编

石油工业出版社

中国石油高技能人才培训丛书

变电站值班员技师培训教程

中国石油天然气集团公司人事部 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了变电站配套设备的基本知识、运行、操作与维修,并结合运行、检修、管理当中的事故和问题,进行了典型案例分析。本书还对智能化的数字化变电站进行了介绍。

本书可作为变电站值班员高技能人才培养教材,还可供从事电力工作的操作人员、管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

变电站值班员技师培训教程/中国石油天然气集团公司人事部编.
北京:石油工业出版社,2012.3

(中国石油高技能人才培养丛书)

ISBN 978 - 7 - 5021 - 8882 - 5

I. 变…

II. 中…

III. 变电所 - 电工 - 技术培训 - 教材

IV. TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 274186 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www. petropub. com. cn

编辑部:(010)64523585 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012 年 3 月第 1 版 2012 年 3 月第 1 次印刷

787 × 1092 毫米 开本:1/16 印张:13

字数:328 千字

定价:30.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

《中国石油高技能人才培训丛书》

编 委 会

主 任：单昆基

副 主 任：任一村

执行主任：丁传峰

委 员：(按姓氏笔画排序)

王子云 左洪波 吕凤军 刘 勇 刘德如

杨 锋 杨静芬 李世效 李建军 李孟洲

李钟磬 李保民 李超英 李禄松 何 波

张建国 陈宝全 尚全民 周宝银 徐进学

高 强 高丽丽 职丽枫 崔贵维 韩贵金

傅敬强 霍 良

前 言

为加快高技能人才知识更新,提升高技能人才职业素养、专业知识水平和解决生产实际问题的能力,进一步发挥高端带动作用,在总结“十一五”技师、高级技师跨企业、跨区域开展脱产集中培训的基础上,中国石油天然气集团公司人事部依托承担集团公司技师培训项目的培训机构,组织专家力量,历时一年多时间,将教学讲义、专家讲座、现场经验及学员技术交流成果资料加以系统整理、归纳、提炼,开发出首批 15 个职业(工种)高技能人才培训系列教材,由石油工业出版社陆续出版。

本套教材在内容选择上,突出新知识、新技术、新材料、新工艺等“四新”技术介绍,重视工艺原理、操作规程、核心技术、关键技能、故障处理、典型案例、系统集成技术、相关专业联系等方面的知识和技能,以及综合技能与创新能力的知识介绍,力求体现“特、深、专、实”的特点,追求理论知识体系的通俗易懂和工作实践经验的总结提炼。

本套教材是集团公司加快适用于高技能人才现代培训技术和特色教材开发的有益尝试,适合于已取得技师、高级技师职业资格的人员自学提高、研修培训、传承技艺使用,也适合后备高技能人才超前储备知识使用,同时,也为现场技术人员和培训机构提供了一套实践参考用书。

《变电站值班员技师培训教程》由大庆油田电力职业技术培训中心组织编写,王平、黄圣明、宋俭任主编,参加编写的人员有朱敏、杨庆、冷光夺、王汀、郇万科、乔梁、葛轶峰、郇娇林、刘勇军、白睿涵、周庆峰、沐彧、刘畅、郑艺花、姜婷婷,参加审定的人员有中国石油勘探与生产分公司吕家滨、大港油田电力公司何继友、辽河油田公司电力集团公司马艳辉、华北油田公司张晓菊等。

由于编者水平有限,书中错误、疏漏之处在所难免,请广大读者提出宝贵意见。

编者

2011 年 10 月

目 录

第一章 新型变压器	(1)
第一节 变压器的基本知识	(1)
第二节 S11 系列配电变压器	(11)
第三节 变压器运行和事故处理	(12)
第二章 GIS 组合电器	(32)
第一节 GIS 组合电器及其基本结构	(32)
第二节 GIS 的组成元件	(37)
第三节 GIS 的安装和运行维护	(41)
第四节 ZF10-126(L)/T2000-31.5 型气体绝缘金属封闭开关	(45)
第三章 高压断路器	(69)
第一节 高压断路器运行及维护	(69)
第二节 操作机构运行及维护	(87)
第三节 成套开关柜	(95)
第四节 高压断路器案例分析	(98)
第四章 直流装置	(108)
第一节 概述	(108)
第二节 充电设备	(111)
第三节 直流电源监控系统	(113)
第四节 直流系统的异常运行	(114)
第五章 微机保护及自动化装置	(119)
第一节 保护配备原则	(119)
第二节 微机保护	(127)
第三节 变电站综合自动化系统	(128)
第四节 集中控制主站系统	(132)
第五节 变电站综合自动化系统运行可靠性与日常维护	(134)
第六节 综合自动化变电站微机五防系统	(144)
第七节 典型案例分析	(159)
第六章 数字化变电站	(162)
第一节 数字化变电站简介	(162)
第二节 数字化变电站技术	(163)

第七章 事故处理及案例分析	(170)
第一节 变电运行事故	(170)
第二节 变电检修事故	(173)
第三节 调度指令事故	(177)
第四节 电气设备事故	(182)
第八章 变电站工程验收	(187)
第一节 验收的组织及流程	(187)
第二节 电气设备分项验收	(189)
第三节 二次接线验收方法及技巧	(197)
参考文献	(199)

第一章 新型变压器

第一节 变压器的基本知识

变压器在电力系统中的主要作用是变换电压,以满足高压输电、低压配电的要求。一方面发电厂的发电机出口电压为 3.15 ~20kV,输电线路的电压为 110kV、220kV、330kV、500kV、765kV,这就要求把发电机输出电压升高后再输送给高压输电线路。另一方面当电能输送到用电区时,为了用电安全,再把高电压降为配电系统所需要的电压等级向用户供电。由此可见,变压器在电力系统中起着相当重要的作用。电力系统示意图如图 1-1 所示。

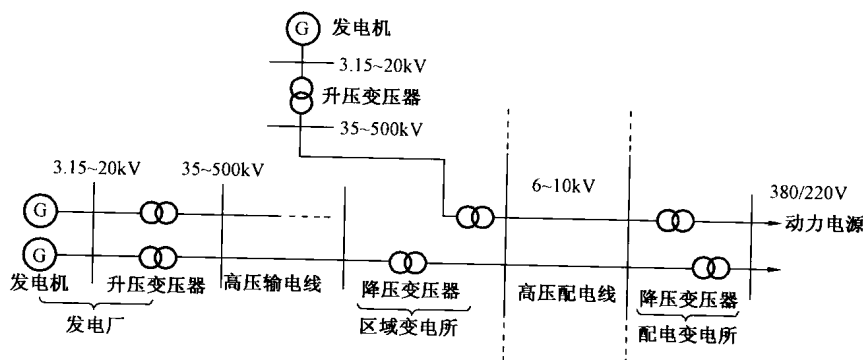


图 1-1 电力系统示意图

一、变压器的基本原理

变压器是根据电磁感应原理工作的。变压器原绕组、副绕组(或称为一次侧绕组、二次侧绕组)之间无直接电的联系,有直接磁的联系。实际变压器绕组基本上是同心绕制在铁心柱上,如图 1-2 所示。当交流电源电压 u_1 加到一次侧绕组后,就有交流电流 i_1 通过该绕组,在铁心中产生交变磁通 Φ ,两个绕组分别产生感应电动势 e_1 和 e_2 。这时,如果二次侧绕组与外电路接通,便产生电流 i_2 ,即二次侧绕组有电能输出。

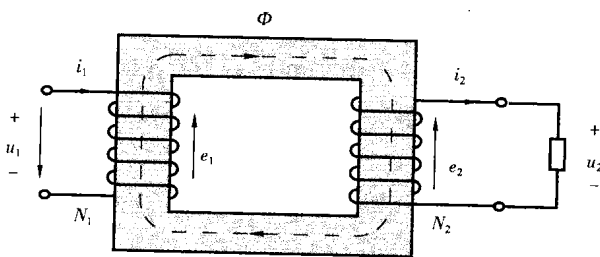


图 1-2 单相变压器原理图

根据电磁感应定律可以导出:

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \rightarrow \begin{cases} e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \end{cases} \quad (1-1)$$

一次侧绕组感应电动势为:

$$E_1 = 4.44fN_1\Phi_m \quad (1-2)$$

二次侧绕组感应电动势为:

$$E_2 = 4.44fN_2\Phi_m \quad (1-3)$$

式中 f ——电源频率, Hz;

N_1 ——一次侧绕组匝数;

N_2 ——二次侧绕组匝数;

Φ_m ——铁心中主磁通幅值, Wb。

由式(1-2)、式(1-3)得出:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-4)$$

由于变压器一次侧、二次侧的漏电抗和电阻都比较小,可以忽略不计,因此可以近似地认为:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad (1-5)$$

式中 K ——变压器的变比。

当变压器通入直流电时,由式(1-1)得到:

$$e = N \frac{d\Phi}{dt} \rightarrow d\Phi = 0 \rightarrow \frac{d\Phi}{dt} = 0 \rightarrow e = 0$$

因此,变压器具有通交流、隔直流的作用。

二、变压器的分类

(一)变压器的分类

按用途分类——电力变压器、仪用变压器、特殊用途变压器。

按绕组数分类——自耦变压器、双绕组变压器、三绕组变压器。

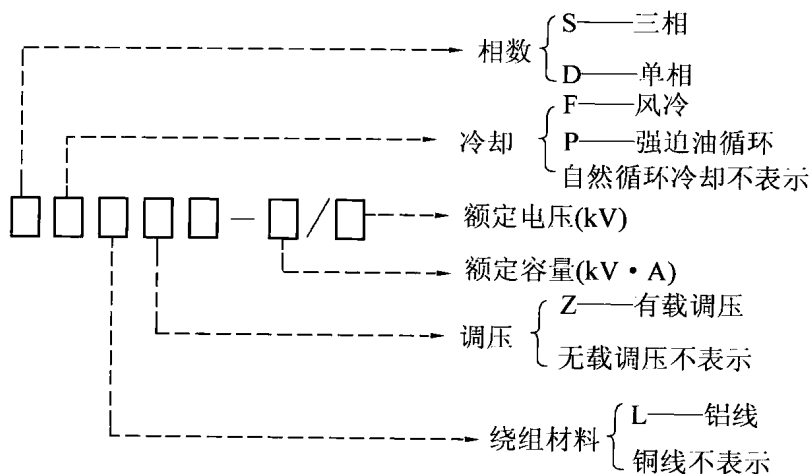
按绝缘介质分类——油浸式变压器、干式变压器。

按冷却方式分类——油浸自冷式、油浸风冷式、强迫油循环风冷式、强迫油循环水冷式、强迫油循环导向冷却式。

按调压方式分类——无载调压变压器、有载调压变压器。

(二)变压器的型号

变压器型号表示如下:



三、变压器的基本结构

变压器的基本结构如图 1-3 所示。

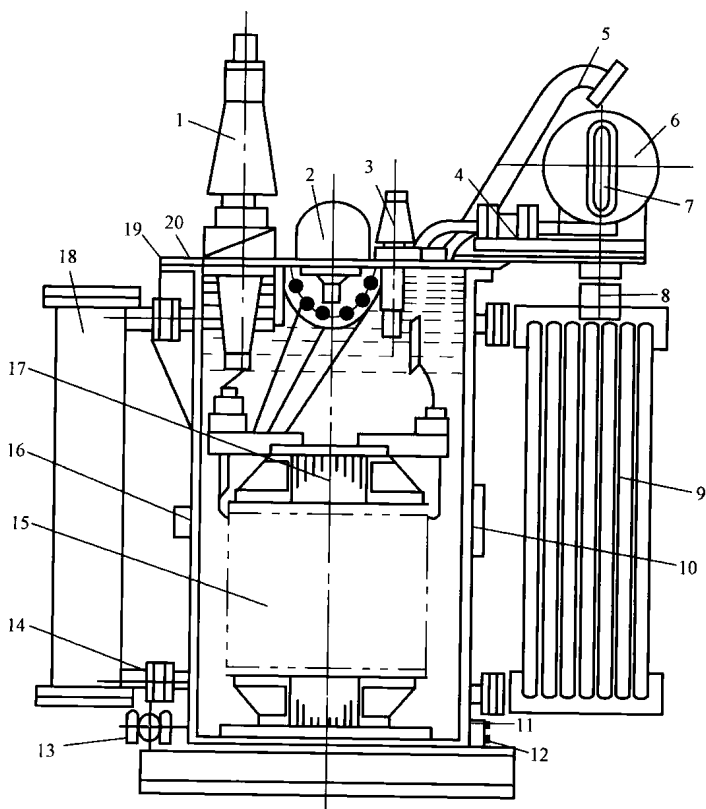
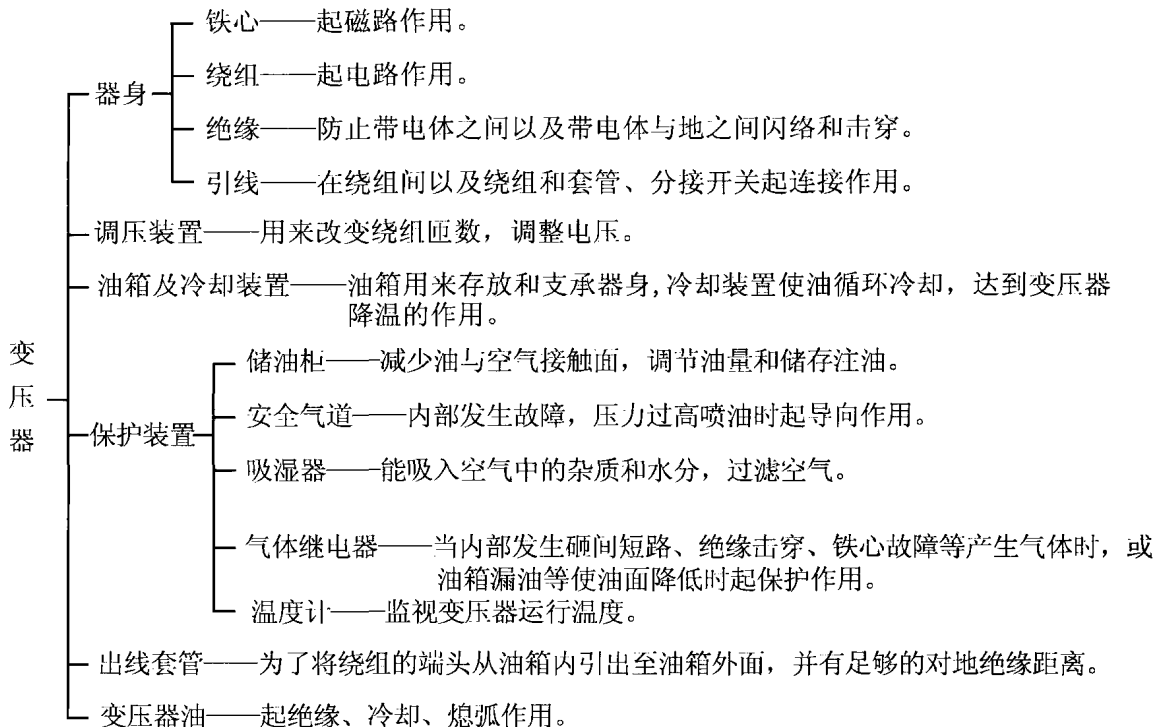


图 1-3 变压器的基本结构

- 1—高压套管;2—分接开关;3—低压套管;4—瓦斯继电器;5—防爆管;6—油枕;7—油位表;
8—呼吸器;9—散热管;10—铭牌;11—接地螺栓;12—油样阀门;13—放油阀门;
14—阀门;15—绕组;16—温度计;17—铁心;18—净油器;19—油箱;20—变压器油

变压器各主要部件的作用如下:



四、变压器的有载调压

电力系统正常运行时, 必须控制电压的波动, 范围一般规定不得超过额定电压值的 $\pm 5\%$ 。为了保证电压波动在规定范围, 就必须进行调压。用改变变压器的绕组匝数进行调压是常用的方法之一。为了改变绕组的匝数, 常在高压侧的绕组上, 引出若干分接头, 并把这些分接头接在分接开关上, 当分接开关切换到不同的分接头时, 就改变了绕组的有效匝数。改变绕组有效匝数的调压方式又分为无载调压和有载调压两种。

有载调压分接开关可在变压器带负载运行中, 在正常的负载电流下进行手动或电动调整一次分接头, 以改变一次绕组的匝数, 进行分级调压, 其调压范围可达到额定电压的 $\pm 15\%$, 常采用独立的调压绕组, 选用中性点调压接线方式, 三相用一个分接开关。

(一) 有载调压变压器的主要作用

- (1) 稳定电压, 提高供电质量。
- (2) 作为两个电网的联络变压器, 利用有载调压来分配和调整网络之间的负载。
- (3) 作为带负载调节电流和功率的电源, 以提高生产效率。

有载调压变压器的调压范围: 电压为 10kV 及以下的高压绕组, 调压范围为 $U_N \pm 4 \times 2.5\%$; 35kV 的高压绕组, 调压范围为 $U_N \pm 3 \times 2.5\%$; 63kV 及以上的高压绕组, 调压范围为 $U_N \pm 8 \times 1.25\%$ 。有载调压的方式有三种, 即线性调压、正反调压和粗细调压。大容量的变压器一般采用粗细调压方式, 如图 1-4 所示。

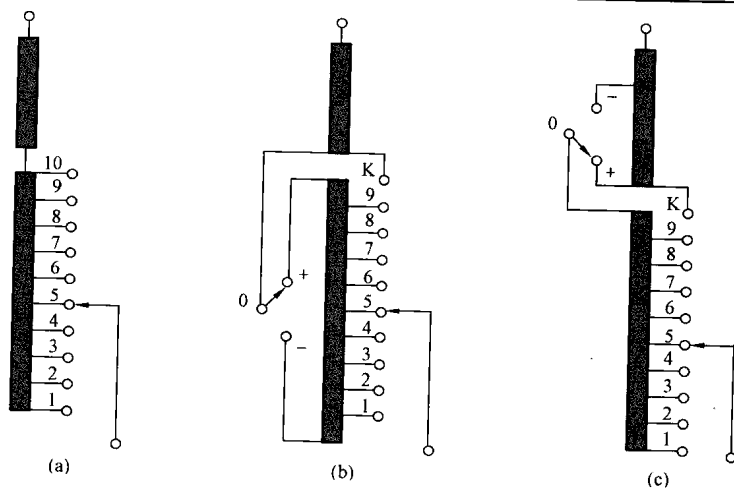


图 1-4 有载分接开关的线性调压、正反调压、粗细调压接线原理图
(a)线性调压;(b)正反调压;(c)粗细调压

(二)有载分接开关的结构

一般有载分接开关是由选择开关本体和选择开关油室组成。其结构如图 1-5 所示。

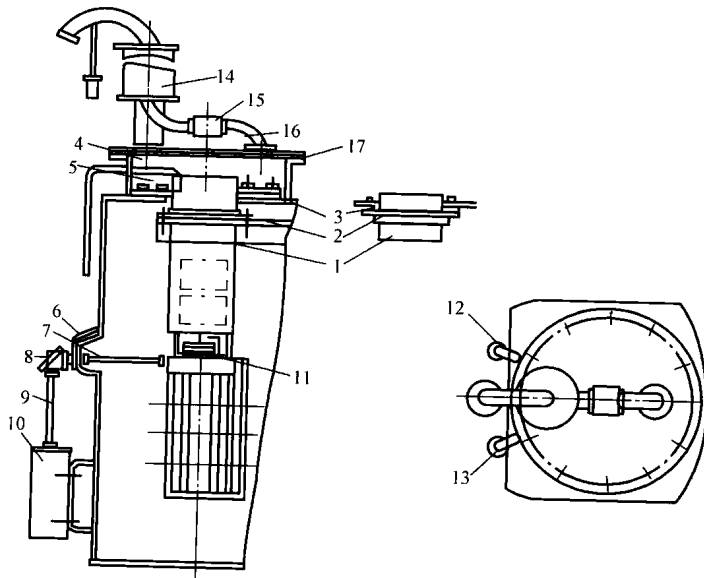


图 1-5 有载分接开关

- 1—绝缘筒;2—法兰盘;3—密封垫;4—油室;5—胶纸管;6—观察窗;
- 7—绝缘水平传动轴;8—圆锥齿轮传动箱;9—垂直轴;10—操作机构;
- 11—有载分接开关;12—抽油管;13—注油管;14—储油柜;
- 15—气体继电器;16—连管;17—箱盖

1. 选择开关本体

选择开关本体是由储能机构、操作轴、触头系统、过渡电阻组成。

(1) 储能机构:选择开关的动作由储能机构来实现。

(2) 触头系统:是由转换选择器动触系统和选择动触头系统组成。

2. 选择开关油室

选择开关油室是由分接开关触头、绝缘筒组成。

(三)有载分接开关动作原理

1. 分接开关机械动作原理

分接开关的操作由电动机输出的转动力经垂直传动轴,圆锥齿轮传动箱,水平传动轴送至分接开关的圆锥齿轮转动装置,然后传递到储能机构,储能弹簧拉伸过死点释放,使槽件拨动槽轮转动一个槽,选择开关操作轴转过一个角度,使切换组件从一个定触头运动到相邻的另一个定触头上,从而完成了一次分接的变换。

2. 分接开关工作原理

有载分接开关在变换分接位置时,要保证电流不间断,同时改变分接时在分接之间不许有不允许的循环电流出现。为了限制循环电流,从一个分接过渡到另一个分接时,用阻抗限制循环电流,如图 1-6 所示。

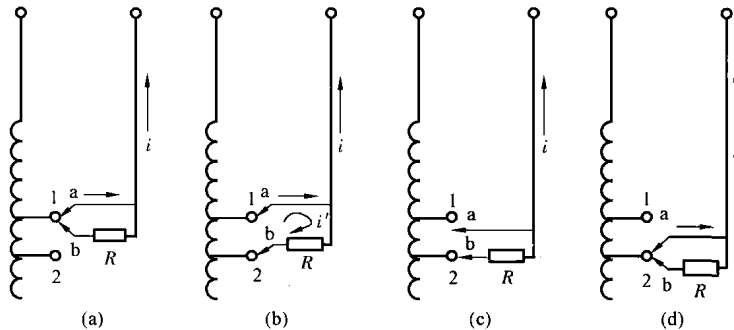


图 1-6 单电阻过渡过程

a—主通断触头;b—过渡触头

图 1-6(a)表示过渡开始,触头 a 和 b 同时接在分接头 1 上,过渡电阻 R 被短接,负载电流 i 经主通断触头 a 输出。

图 1-6(b)表示过渡触头 b 从分接头 1 断开,与分接头 2 连通,形成桥接,循环电流 i 被过渡电阻 R 限制在允许范围内。

图 1-6(c)表示动触头 a 从分接头 1 断开,产生电弧,负载电流 i 经过 R 输出。

图 1-6(d)表示动触头 a 与分接头 2 接通,负载电流从分接头 2 经触头 a 输出,整个调压过程结束。

3. 分接开关的运行

1) 无载分接开关的运行

无载分接开关变换分接头时,变压器必须停电,做好安全措施后,在运行值班人员的配合下,由检修人员进行。在切换分接开关触头时,一般将分接开关各正、反方向转动 5 圈,以消除

触头上的氧化膜和油污,使触头接触良好。分接头切换完毕,应检查分接头位置是否正确,检查是否在锁紧位置。同时,还应测量绕组挡位的直流电阻应合格,其相差值不应超过2%,并做好分接头变换记录。之后,方可拆除安全措施,进行送电操作。

2) 有载分接开关的运行

有载分接开关的运行维护,应按制造厂的规定进行,无制造厂规定,可参照下列要求:

(1) 有载分接开关切换调节时,应注意分接开关位置指示、变压器电流和母线电压变化情况,并做好记录。

(2) 有载调压时应逐级调压,有载分接开关原则上每次只操作一档,隔1min后再进行下一档的调节。严禁分接开关在变压器严重过负荷(超过1.2倍额定电流)的情况下进行切换。

(3) 单相变压器组和三相变压器分相安装的有载分接开关,应三相同步电动操作,一般不允许分相操作。

(4) 两台有载调压变压器并联运行时,其调压操作应轮流逐级进行。

允许在85%变压器额定电流以下情况进行分接变换操作。升压操作,应先操作负荷电流相对较少的一台,再操作负荷电流相对较大的一台,防止过大的环流。降压操作与升压操作相反。

(5) 有载调压变压器与无载调压变压器并联运行时,有载调压先切断操作电源再并列运行。有载调压变压器的分接位置应尽量靠近无载变压器的分接位置。

电动操作机构应经常保持良好状态,分接开关的电动控制应正确无误,电源可靠;各接线端子接触良好,驱动电机运转正常,转向正确;控制盘上电动操作按钮和分节开关、控制箱上的按钮应完好;电源和行程指示灯应完好;极限位置的电气闭锁应可靠;大修(或新装)后的有载分接开关,应在变压器空载下,用电动操作按钮至少操作一个循环(升—降),观察各项指示应正确,极限位置电气闭锁应可靠,之后再调至调度要求的分接头挡位带负荷运行,并加强监视。有载分接开关的切换箱应严格密封,不得渗漏,如发现其油位升高或异常或满油位,说明变压器与有载分接开关切换箱窜油。应保持变压器油位高于分接开关切换箱的油位,防止分接开关切换箱的油渗入变压器本体内,影响其绝缘油质,如有此况,应及时停电处理。有载分接开关箱内绝缘油的试验与更换,每运行6个月取油样进行工频耐压试验一次,其油耐压值不低于30kV/2.5min;当油耐压在25~35kV/2.5min之间时,应停止使用自动调压装置;若油耐压低于25kV/2.5min时,应禁止调压操作,并及时安排换油;当运行1~2年或切换操作达5000次后,应换油,且切换的触头部分应吊出检查。有载分接开关装有气体保护及防爆装置,重气体动作于跳闸,轻气体动作于信号,当保护装置动作时,应查明原因。

五、变压器的技术参数及接线组别

(1) 额定电压 U_N 。指由制造厂规定的变压器在空载时额定分接头上的电压,在此电压下能保证长期安全可靠运行,单位伏(V)或千伏(kV)。当变压器空载时,一次侧额定分接头处加上额定电压 U_{1N} ,二次侧的端电压即为二次侧额定电压 U_{2N} 。

(2) 额定容量 S_N 。指变压器在额定条件下长期运行时输出的功率,以视在功率表示,单位千伏安(kV·A)或兆伏安(MV·A)。

双绕组变压器两侧绕组容量相等,即为变压器的额定容量,三绕组变压器由于中压或低压绕组容量为变压器额定容量的50%或66.7%(另一个为100%),所以变压器的额定容量通常是指高压绕组的容量。

小型变压器额定容量 $630\text{kV} \cdot \text{A}$ 以下;中型变压器额定容量 $800 \sim 6300\text{kV} \cdot \text{A}$;大型变压器额定容量 $8000 \sim 63000\text{kV} \cdot \text{A}$;特大变压器额定容量 $90000\text{kV} \cdot \text{A}$ 以上。

(3) 额定电流 I_N 。变压器各侧的额定电流是由相应侧的额定容量除以相应绕组的额定电压计算出来的线电流值,单位安(A)或千安(kA)。

三相变压器额定电流为:

$$I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} \quad (1-6)$$

式中 I_N ——额定电流,A;

U_N ——额定电压,V;

S_N ——额定容量, $\text{kV} \cdot \text{A}$ 。

(4) 空载电流。变压器一次侧绕组输入额定电压时,二次侧绕组开路,一次侧绕组中流过的电流称为空载电流 I_0 ,通常以额定电流的百分数表示:

$$I_0\% = \frac{I_0}{I_{1N}} \times 100 \quad (1-7)$$

空载电流是变压器的一个重要技术参数,新投入变压器或变压器大修前后,必须测试变压器空载电流。空载电流与变压器容量和铁心的材料有关,容量越大的变压器空载电流的百分值越小。从变压器空载电流的大小,可以判断变压器的下述性能:

① 判断铁心质量的高低。最新的 S11 型卷铁心变压器空载电流在 0.4% 以下,S9 型叠铁心变压器空载电流在 2% 以下。

② 判断切除空载变压器时过电压倍数。因为切除空载变压器时,空载电流被强迫切断,由于切断前一次侧绕组所储存的能量为 $\frac{1}{2}I_0^2L$,将要转换为端口处电容 C 的电场能量,即 $\frac{1}{2}U^2C$,根据能量守恒定律有:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}I_0^2L &= \frac{1}{2}U^2C \\ U &= I_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \end{aligned} \quad (1-8)$$

式中 U ——端口电压,V;

L ——变压器铁心电感,H;

C ——端口电容,F。

显而易见,过电压的倍数与空载电流有关,该电压将作用在开关设备断口处。有时,在一次侧绕组和开关设备之间装设阀型避雷器,作为操作过电压保护,该避雷器始终投入。

(5) 空载损耗(铁损)。空载时的功率损耗,单位为瓦特(W)或千瓦(kW)。

变压器空载时没有输出功率,从电源吸取的功率全部消耗于内部,故称为空载损耗,空载损耗的绝大部分是铁心损耗,只有极少部分是原绕组电阻产生的铜损耗,但空载电流以及原绕组电阻都很小,铜损耗约占空载损耗的 2%,因此可以认为空载损耗等于铁心损耗。

(6) 短路电压(阻抗电压)。变压器二次侧绕组短路,一次侧绕组两端缓慢加入电压,使变

压器一次侧绕组电流达到额定值时,加压停止,此时电压值称为短路电压,以与额定电压之比的百分数表示,即:

$$U_d\% = \frac{I_{IN}Z_d}{U_{IN}} \times 100 \quad (1-9)$$

短路电压是变压器的一个重要技术参数,一方面决定变压器并列运行的条件,另一方面决定变压器供电质量和短路时的稳定性。

典型阻抗电压值见表 1-1、表 1-2。

表 1-1 双绕组变压器典型阻抗电压值

额定容量, kV·A	阻抗电压, %	额定容量, kV·A	阻抗电压, %
630 及以下	4.0	6301 ~ 12500	8.35
631 ~ 1250	5.0	12501 ~ 25000	10.0
1251 ~ 3150	6.25	25001 ~ 20000	12.5
3151 ~ 6300	7.15	—	—

表 1-2 三相油浸双绕组电力变压器典型阻抗电压值

电压等级, kV	6 ~ 10	35	66	110	220
阻抗电压, %	4 ~ 5.5	6.5 ~ 8	8 ~ 9	10.5	12 ~ 14

注:阻抗电压标准值有的给出了一个数值范围,这是考虑到变压器容量大小不同,容量小的取较小的阻抗电压,容量大的取较大的阻抗电压,与表 1-1 形成对照。此外,还与电压有关,例如,10/6.3kV 的变压器,800kV·A 以上的阻抗电压为 5.5%。

(7) 短路损耗。指将变压器的二次侧绕组短路,一次侧绕组的电流为额定电流时,变压器绕组导体所消耗的功率,单位瓦(W)或千瓦(kW)。

(8) 接线组别。一方面表示变压器一、二次侧绕组的连接方法(Y 星形接法、D 三角接法);另一方面表示变压器一、二次侧绕组对应线电压的相位关系。实际中接线组别采用时钟法表示,用时钟的长针表示一次侧绕组线电压,固定在 12 点钟,用时钟的短针表示二次侧绕组线电压,短针所指的点数记为该组别的标号。

常采用接线组别有 Y,yn0、D,yn11、Y,d11、YN,d11。

① Y,yn0 接线变压器容量不超过 1600kV·A,能够满足三相四线制供电,但是由于不平衡负荷引起的中性线电流不得超过二次侧绕组额定电流的 25%,其中一相的电流在满载时不得超过额定电流,因此限制了变压器接用单相负载的容量,影响变压器设备容量的充分利用。Y,yn0 接线变压器与同容量同规格的 D,yn11 接线变压器对比,其空载损耗和负载损耗均小,有利于降低配电网中的电能损耗。

② D,yn11 接线变压器有利于抑制输出高次谐波电流,保证供电波形的质量,允许中线电流达到相电流的 75% 以上,使变压器容量能够充分利用。由于高压绕组 D 形连接使得三次磁通和三次电动势不可能太大,因此附加损耗很小,不会有局部过热的问題,所以变压器容量不受限制。

③ Y,d11 接线变压器一般用于 10kV 或 35kV 小接地电流系统中。

④ YN,d11 接线变压器一般用于 110kV 及以上大接地电流系统中。

(9) 额定频率。我国规定标准工业频率为 50Hz, 故电力变压器的频率都是 50Hz。

六、变压器的经济运行

由于负载在昼夜和一年四季中的变化, 对 n 台并列运行的变压器应考虑采用最经济的运行方式。由于变压器当其铁损和铜损相等时, 效率最高, 这时变压器带的负载最经济。因此, 它是判断变压器经济运行的依据。

假定有 n 台型号和容量相同的变压器并列运行, 其经济运行点应满足下述公式:

$$n \left(\frac{S}{nS_e} \right)^2 (P_d + KQ_d) = n(P_0 + KQ_0) \quad (1-10)$$

式中 S ——全负荷, $\text{kV} \cdot \text{A}$;

S_e ——一台变压器的额定容量, $\text{kV} \cdot \text{A}$;

n ——已运行的变压器台数;

P_0 ——变压器空载时有功损耗, 近似为铁损, kW ;

Q_0 ——变压器空载时无功损耗, kvar ;

P_d ——变压器短路时有功损耗, 近似为铜损, kW ;

Q_d ——变压器短路时无功损耗, kvar ;

K ——无功经济当量的系数, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{kvar}$ 。

对于 110 ~ 35kV 的降压变压器, 当系统负荷最小时, K 值可取 0.06, 系统负荷最大时, K 值可取 0.1。

式(1-10)中所列各量, 均可从铭牌或试验报告查得, 而其中:

$$Q_0 = i_0 S_e \times 10^{-2}$$

$$Q_d = U_{d1} S_e \times 10^{-2}$$

式中 i_0 ——空载电流百分值, %;

U_{d1} ——短路电压百分值, %。

若负荷增加, 就破坏了上述等式, 铜损将大于铁损。此时, 若不投入一台变压器, 负荷继续增加就不经济了。当 n 台变压器的铜损大于 $(n+1)$ 台的铁损时, 投入一台变压器, 有可能达到新的经济运行点。对本来运行在经济点的变压器, 当负荷减少时, 也就离开了经济运行点, 当负荷减少到使 n 台变压器的铜损比 $(n-1)$ 台的铁损还小时, 可以切除一台运行, 使铜损反而增加, 有可能等于 $(n-1)$ 台的铁损, 使变压器重新回到经济运行点运行。

因此, 当并列运行的各台变压器型号和容量相同, 不同负荷时投入变压器的台数, 可以按下式计算决定:

当负荷增加时: $S > S_e \sqrt{n(n+1) \frac{P_0 + KQ_0}{P_d + KQ_d}}$ 时, 在并列运行的 n 台变压器中应再投入一台运行比较经济。

当负荷减少时: $S < S_e \sqrt{n(n-1) \frac{P_0 + KQ_0}{P_d + KQ_d}}$ 时, 在并列运行的 n 台变压器中应切除一台运