

电力工人技术等级暨职业技能鉴定培训教材

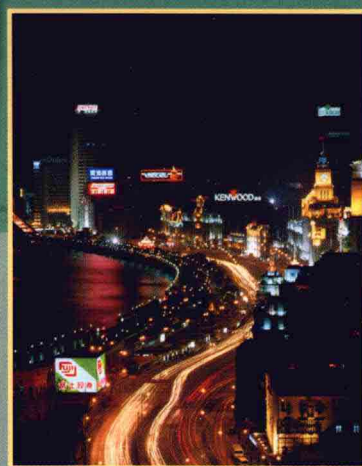
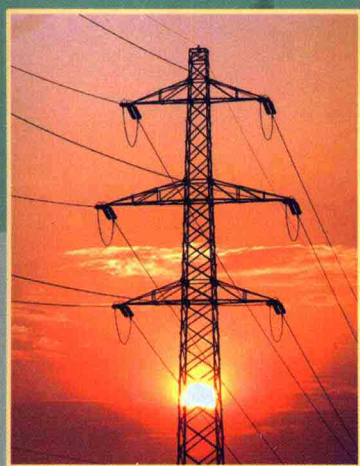
(初、中、高级工及技师、高级技师适用)

总主编 丁毓山 徐义斌

变电运行工

主 编 张洪俊 李学利

副主编 李 超 张 冰 高秀萍 刘胜伟



BIANDIAN YUNXING GONG

知识

技能

题库



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

电力工人技术等级暨职业技能鉴定培训教材
(初、中、高级工及技师、高级技师适用)

总主编 丁毓山 徐义斌

变 电 运 行 工

主 编 张洪俊 李学利
副主编 李 超 张 冰 高秀萍 刘胜伟



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书根据《电力工人技术等级标准》、《中华人民共和国职业技能鉴定规范》、职业技能鉴定指导书及相关国家标准、行业标准和岗位规范编写,为《电力工人技术等级暨职业技能鉴定培训教材》之一。

本书共十一章,内容包括:变压器的运行,电压和电流互感器,箱式变电站及其运行,断路器及其运行,重合器、分段器及其配合,隔离开关、负荷开关、跌落式熔断器,架空配电线路和电缆的运行,变电所的主接线和倒闸操作,雷电的防护,配电网的无功补偿,微机保护的基本知识。为了便于学习和培训,每章后附有大量复习思考题与习题,并附有答案。

本书为岗位及职业技能鉴定培训教材,也可供相关技术人员及管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

变电运行工/丁毓山,徐义斌主编;张洪俊,李学利
分册主编. —北京:中国水利水电出版社,2009
电力工人技术等级暨职业技能鉴定培训教材:初、中、
高级工及技师、高级技师适用
ISBN 978-7-5084-5735-2
I. 变… II. ①丁…②徐…③张…④李… III. 变电所—
电力系统运行—职业技能鉴定—教材 IV. TM63
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 100416 号

书 名	电力工人技术等级暨职业技能鉴定培训教材 (初、中、高级工及技师、高级技师适用) 变电运行工
总 主 编	丁毓山 徐义斌
作 者	主 编 张洪俊 李学利 副主编 李 超 张 冰 高秀萍 刘胜伟
出版发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales @ waterpub. com. cn
经 售	电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 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	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 18 印张 427 千字
版 次	2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—5000 册
定 价	38.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

有关电力工人技术等级及电力行业职业技能鉴定的培训教材已出版了很多,例如,由中国电力企业联合会名誉理事长张绍贤作序,原电力工业部副部长张凤祥和赵庆夫题词的《电力工人技术等级培训教材(初、中、高级工适用)》自1996年由中国水利水电出版社出版以来,已修订两次,共印刷了15次,总印数达100万册以上,深受电力系统广大读者的好评。但是,随着电力体制改革的深入,我国电力网正在向大电网、大电厂、超高压和特高压、核电站、高度自动化的方向前进,输电网和配电网正在经历着一次重大的变革。而变革最深、门类最多、面积最广的领域,还在配电网。110kV以下的配电网,在网络设备、接线方案、保护元件、运行方式、管理方法、操作工艺等方面,皆有不同程度的更新。可见,我国电力事业的发展速度是惊人的。面对电力系统这种发展的新形势,以往教材的内容以略显陈旧,特别是有些内容与当代的现实相差较远。为了配合新形势下电力系统人员培训的需要,中国水利水电出版社决定,组织有关专家和培训一线的教师编写这套教材。其编写宗旨是:保证编写质量,反映电力新技术、新设备、新方法,以满足当前电力企业的培训要求。全书包含三方面内容:知识、技能、题库。

为此,总主编聘请了辽宁省电力公司、铁岭电力公司、抚顺电力公司、海城供电公司、沈阳电力公司所属法库农电公司和于洪供电公司、沈阳农业大学信息电气工程学院、华北电力大学、中国农业大学信息电气工程学院、沈阳大学有关专家和教授参与编写。编写的原则是:不要求面面俱到,力求少而精,抓住重点,深入浅出。本着这些原则,本书共分十一章:变压器的运行,电压和电流互感器,箱式变电站及其运行,断路器及其运行,重合器、分段器及其配合,隔离开关、负荷开关、跌落式熔断器,架空配电线路和电缆的运行,变电所的主接线和倒闸操作,雷电的防护,配电网的无功补偿,微机保护的基本知识。每章后面皆附有复习思考题与习题,并附有答案。为了配合教学中使用,在书中标有(*)者,适于中级工使用;标有(**)者,适于高级工、技师、高级技师使用;没有标注者适于初级工。

本书编写人员有:张洪俊、李学利、李超、张冰、高秀萍、刘胜伟、

王今朝、尹安、郑元斌、孙悦迪、赵延海、刘海涛、徐芝。

参加本书部分编写工作的还有：叶常容、黄书红、张强、王卫东、石威杰、贺和平、潘利杰、张娜、石宝香、李新歌、尹建华、苏跃华、刘海龙、李小方、李爱丽、王志玲、李自雄、陈海龙、韩国民、刘力侨、任翠兰、张洋、李翱翔、孙雅欣、李景、赵振国、任芳、吴爽、李勇高、杜涛涛、李启明、郭会霞、霍胜木、李青丽、谢成康、马荣花、张贺丽、薛金梅、李荣芳、孙洋洋、余小冬、丁爱荣、王文举、徐文华、李键、孙运生、王敏州、杨国伟、刘红军、白春东、魏健良、周凤春、董小玫、吕会勤、孙金力、孙建华、孙志红、孙东生、王惊、李丽丽等。

作者虽尽了很大努力，但疏漏之处定然难免，深望广大读者多加批评指正。

作者

2009年1月于沈阳

目 录

前言

第一章 变压器的运行	1
第一节 变压器的发展	1
*第二节 变压器的工作原理和结构组成	5
*第三节 变压器的运行和中点接地方式	13
*第四节 变压器经济运行	17
*第五节 无载分接开关的运行、检测与调试	25
*第六节 电力变压器有载分接开关的运行	29
第七节 变压器安全运行	35
第八节 变压器的正常运行	42
*第九节 变压器的异常运行和事故处理	48
复习思考题与习题	51
第二章 电压和电流互感器	53
第一节 电压互感器	53
*第二节 电压互感器的使用维护和故障处理	58
第三节 电流互感器	61
*第四节 电流互感器常见故障与处理	66
复习思考题与习题	68
第三章 箱式变电站及其运行	72
第一节 箱式变电站概述	72
*第二节 箱变配变、补偿电容的容量确定	74
第三节 箱式变的运行	77
第四节 箱变的安装与现存问题	79
*第五节 箱式变电站的操作与维护	84
**第六节 箱式变电站实例	87
复习思考题与习题	96
第四章 断路器及其运行	98
第一节 真空断路器的概述	98
*第二节 真空断路器运行中的有关问题	101
第三节 真空断路器的维护	104

* 第四节 真空断路器的应用	107
* 第五节 截流过电压产生和对电机产生的危害	110
第六节 SF ₆ 断路器的概述	113
第七节 SF ₆ 断路器的优缺点分析	117
* 第八节 SF ₆ 断路器在寒冷地区的使用	119
* 第九节 SF ₆ 断路器气密性检查	120
复习思考题与习题	122
第五章 重合器、分段器及其配合	125
第一节 重合器综述	125
第二节 柱上重合器	126
第三节 线路分段器概述	127
第四节 FDK10—12/D 型户外交流高压跌落式分段器	128
第五节 配电开关	130
* 第六节 重合器与熔断器的配合	134
* 第七节 重合器和分段器在配电网自动化中的应用	138
复习思考题与习题	141
第六章 隔离开关、负荷开关、跌落式熔断器	144
第一节 隔离开关	144
* 第二节 SF ₆ 负荷开关在城乡电网中的应用	148
第三节 跌落式熔断器	150
复习思考题与习题	154
第七章 架空配电线路和电缆的运行	157
第一节 架空配电线路的运行	157
第二节 电缆线路的运行	160
复习思考题与习题	167
第八章 变电所的主接线和倒闸操作	170
第一节 变电所的主接线	170
第二节 变电所倒闸操作	174
第三节 倒闸操作的实施	176
第四节 变电所倒闸操作综合举例	181
复习思考题与习题	188
第九章 雷电的防护	190
第一节 雷电对人身及设备安全的危害	190
第二节 避雷器的运行	193
第三节 10kV 配电网的雷击原因分析	197
* 第四节 输电线路的防雷	198

第五节	变电所的防雷保护	200
第六节	农村电网的防雷措施	201
*第七节	沿海湿热地区配电网的防雷措施	203
*第八节	变电所电子设备和微机保护的防雷	204
*第九节	调度微波通信站的防雷措施	212
*第十节	无线电通信天线的防雷	214
	复习思考题与习题	215
第十章	配电网的无功补偿	217
第一节	配电网的无功补偿概述	217
第二节	补偿容量的确定和电容器的运行	221
	复习思考题与习题	225
第十一章	微机保护的基本知识	228
第一节	微机保护的软、硬件系统	228
*第二节	看门狗电路	231
第三节	线路保护的装设原则	234
*第四节	35/10kV 线路保护的基本原理	237
*第五节	中点不接地系统单相接地分析	239
**第六节	单相接地自动选线装置的硬件组成	242
*第七节	变压器微机保护的种类和装设原则	244
*第八节	变压器微机差动保护的工作原理和保护装置	249
**第九节	变压器后备保护	253
第十节	综合自动化系统问题的一般分析	256
第十一节	变电所综合自动化系统的构成	260
	复习思考题与习题	264
附录	考核题集锦	267

第一章 变压器的运行

第一节 变压器的发展

变压器是一种通过改变交流电压而传输电能的静止感应电器。它有一个共用的铁芯和与其交链的几个绕组，且它们之间的空间位置不变。当某一个绕组从电源接受交流电能时，通过电磁感应作用改变电压、电流，在其余绕组上以同一频率、不同电压传输出交流电能。

一、我国电力变压器技术的发展

自变压器问世以来，至今已有 100 余年的历史。在百余年的历史进程中，作为电力系统重要设备之一的电力变压器，与电力系统发展的同时，自身也获得了飞速的发展。1885 年，世界上第一台变压器诞生于欧洲，那时只应用在单相供电系统中，1890 年才制成了三相电力变压器。可是现在已能生产容量为上千兆伏安的巨型变压器。仅就我国而论，随着 500kV 大型变电站的建立，将要生产容量为 240MVA、360MVA 的变压器。三峡水电站将要采用 70 万 kW 机组，与之配合的变压器容量将为 900MVA。近年来，变电容量快速增长，2004 年底全国 220kV 及以上的输电线路有了 223 万 km，变电设备容量有 69676 万 kVA，500kV 的线路有 5.6 万 km，变电容量 21082 万 kVA，与 2000 年相比 220kV 以上的输电线路增加了 5.9 万 km，增长 36%，变电容量增加 28187 万 kVA，增长 67.9%，增长率也是很高的。其中 500kV 线路增加了 2.9 万 km，增长了 107%，变电容量增加 11635 万 kVA，增长了 123%。2005 年是全面实现“十五”计划，衔接“十一五”计划的关键年份，又是继续落实科学发展观，继续加强和改善宏观调控的重要时期。随着各地区负荷密度的增加，大容量变压器（额定电压为 500kV、1000MVA 或以上的变压器）将逐渐应用到电网中。目前，我国主要在负荷密集的华东、南京电网中陆续采用 100 万 kVA 设备。据统计，“十五”期间安排投产 25 组 100 万 kVA 变压器。北京新增变电所也拟采用 126 万~150 万 kVA 的变压器。目前，我国变压器发展主要有两方面：一是超高压大型变压器向大容量（超过 1000MVA）、轻结构、三相式和组合式方向发展；二是中小型变压器向节能化、小型化、低噪声、高阻抗、防爆型发展。变压器性能、质量水平的高低取决于变压器的专用制造设备性能、设计技术的优化以及新材料的开发与应用。现在，变压器制造设备与工具逐渐专业化，争取以装备水平、设备性能来保证加工质量，克服人为因素，提高质量和生产效率；而智能化优化设计程序、CAD 参数化设计始终是设计技术的努力方向。在“十一五”期间，随着我国大电网格局的逐步形成，高电压、大容量变压器需求将大幅增长，如：配套 60 万 kW 以上的大型发电机组的 500kV 以上电压等级，720MVA 及以上大容量变压器；500kV 级以上电压等级枢纽站中 1000MVA 以上容量的联络变压器，且心式、壳式、组合式变压器都有需求；±500kV 直流输电工程用换流变

压器。与长江三峡工程配套的三相大容量变压器及直流变压器也是以后开发的重点。

我国目前生产变压器的大、小厂家约为 500 多个,而且生产变压器的型号、结构、参数、性能在不断更新。诸如节能型的低损耗变压器、SF₆ 变压器、超导变压器,其产品性能不断向体积小、重量轻、低噪音、高效率、强过载、抗冲击的方向发展。

变压器在电力系统的使用数量是相当大的,一般从发电、输电、配电、用电的程序来看,电能从发电厂输出到用户使用共需 3~5 次变压。根据国内外的统计数字,运行变压器的容量通常为发电容量的 4~7 倍,是运行电机容量的 5~8 倍,这就决定了变压器必须是一个高效率的设备。尽管如此,但因其数量多、容量大,损耗仍然是相当可观的。1980 年,全国电网损耗约占发电功率的 5.11%,其中变压器损耗占全部损耗的 27%,因此,降低损耗,合理的确定变压器容量,加强经济运行,具有十分重要的意义。

自 20 世纪 60 年代以来,我国早期生产的电力变压器皆为依照国家 GB 500—64 和 JB 1300—73 标准制造的高能耗变压器,1983 年原水利电力部以 (83) 水电物字第 16 号文下达了《关于停止装用高能耗变压器的通知》,又于 1985 年以水电物字第 24 号文再次下达了《关于高能耗变压器更换问题的通知》。文中明确规定凡按 GB 500—64 和 JB 1300—73 标准制造的变压器,必须限期逐步更换为按新标准制造的 S7、S8、SL7、SZL7 系列的节能型变压器。

20 世纪 80 年代以来,全国统一设计的 SL7、SZL7 系列变压器在各变压器制造厂的产品中占绝对的优势,其原因是由于这些系列的变压器的损耗比按 JB 1300—73 标准生产的变压器损耗平均可下降 1/3 左右,且运行稳定、噪音小、质量可靠。SL7 及随后出现的 S7 系列变压器符合国家 GB 1094—85 标准,其性能数据与现行国家标准 GB 6541—86 《三相油浸电力变压器技术数据与要求》相吻合,与国际上 IEC 标准相等效。但是,随着时代的发展,国家已明令淘汰 S7 系列变压器,S9 系列变压器和 SH 非晶态系列变压器是目前国产最新节能变压器,S9 变压器与现行国家标准 GB/T 6451—1995 的规定值相比,总损耗下降了 15%~25%,而国产 SH 非晶态合金变压器的空载损耗仅为 S9 型同容量变压器的 20%,比现行国标 GB/T 10228—1997 规定数值降低 3/4。对于轻载运行时间长,年空载损耗占变压器总损耗比重较大场所,SH 型非晶态合金变压器的节能效果显著。

二、现代化的电网对变压器的要求

现代城市电网配电系统对电力变压器的要求,除满足基本技术性能外,还要求有较高的安全可靠。针对现代化城市的特点,变压器还需要满足环境保护、经济运行、节约能源、防灾害等方面的要求。如:

(1) 改进变压器的结构设计,选用优质原材料和先进的制造工艺,以提高安全可靠。

(2) 满足城市防灾需要,提高防灾能力。适应变压器在建筑物主体内安装、地下安装和在易燃易爆特殊环境中使用,变压器要实现无油化。

(3) 满足环境保护的要求。城市内的变压器在运行中产生的噪声,应符合国家标准 GB 3096 《城市区域环境噪声标准》的规定,一方面应改进变压器生产工艺。选用优质铁芯材料,另外,对大型变压器要有合理运行方式,提高自然冷却能力,不用或少用风冷设备,减少风扇噪声。必要时要有隔音措施。此外,还要加强油污管理,防止油污排放造成

的污染。

(4) 满足经济运行节约能源的要求。在变压器制造上改进结构设计,适当降低铁芯磁通密度,改进铁芯叠片方式;选用薄型晶粒取向硅钢片或采用非晶态合金,降低空载损耗;变压器绕组采用优质铜导线。降低负载损耗;变压器运行中选用合理的经济运行方式,保证高效率运行。

现代化的电网设备应坚持科技进步、安全可靠和节约能源的原则,实现电网设备小型化、无油化,自动化、免维护或少维护及环境保护的要求。

三、两网改造中的配电变压器的选择

1. S9 与 S11 系列浸油配电变压器

S9 系列配电变压器的设计首先是改变了设计观念,以增加有效材料用量来实现降低损耗,主要增加铁芯截面积以降低磁通密度、高低压绕组均使用铜导线,并加大导线截面,降低绕组电流密度,从而降低了空载损耗和负载损耗。

S9 与 S7 系列变压器相比,空载损耗平均降低 10%,负载损耗平均降低 25%,为了节约能源、推广新技术产品,国家已于 1998 年 3 月明令在当年年底停止生产和淘汰 S7 和 SL7 系列产品,推荐 S9 系列为更新替代产品。

在 S9 系列的基础上,改进结构设计,选用超薄型硅钢片,进一步降低空载损耗,开发了 S11 系列变压器。目前 S11 系列变压器的空载损耗比 S9 系列降低了 30%。

2. 密封式变压器

从变压器运行中发生故障的原因分析,由于绝缘部件损坏引起的变压器故障,是故障的主要原因。油浸变压器内的绝缘材料主要是变压器油和 A 级绝缘材料,主绝缘所承受的电压 90% 左右是由绝缘油所承担。在实际运行中,由于油与空气的直接接触,使油逐渐氧化,油与空气中的水分接触后,使油的含水量增加,氧化后的油和油中水分的作用使油的酸值升高。使油有一定的腐蚀作用,油中的含水量增加,降低了油的纯度,由此可见,变压器油的劣化是造成内部绝缘损坏的主要因素,而油的劣化是由于变压器油与空气接触造成的。采用全密封结构和新工艺的变压器就从根本上隔绝了变压器油和空气的接触。

我国自 20 世纪 80 年代后期开始研制全密封型配电变压器,并提出了中、小型配电变压器要推广全密封型结构,实现免维修,逐步取代普通型的配电变压器。

全密封型变压器的结构特点如下:

(1) 全密封型变压器的铁芯和绕组与普通油浸式变压器相同,目前为 S9 系列。

(2) 全密封型变压器的油箱,采用波纹式油箱。这是为了使油箱壁具有一定的弹性,以满足变压器运行中油的热胀冷缩的需要。

(3) 密封型变压器采用真空注油法。

(4) 全密封型变压器在上桶盖装有压力释放阀。当变压器内部压力达到一定值时,压力释放阀动作,可排除油箱内的过压。内部压力经释放后,释放阀自动关闭。

全密封型变压器在正常运行方式下,可连续运行 25 年而不需要对变压器内部进行维修工作。

3. 非晶态合金铁芯变压器

在变压器的运行费用中除维护费外，其中能量损耗费占了很大的比例，特别是变压器的空载损耗占了能量损耗的主要部分。

为了降低变压器空载损耗，采用高导磁率的软磁材料，将非晶态合金应用于变压器，制成非晶态合金铁芯的变压器。非晶态合金引起的磁化性能的改善，其 $B-H$ 磁化曲线很狭窄，因此其磁化周期中的磁滞损耗就会大大降低，又由于非晶态合金带厚度很薄，并且电阻率高，其磁化涡流损耗也大大降低，据实测，非晶态合金铁芯的变压器与同电压等级、同容量硅钢合金铁芯变压器相比，空载损耗要低 75%~80%。空载电流可下降 80% 左右。

非晶态合金铁芯配电变压器应用中有以下几个问题：

(1) 非晶态合金铁芯变压器的空载特性在变压器寿命期内，特性稳定，有较高的可靠性，加制成全密封型，即可实现免维修。

(2) 非晶态合金铁芯变压器最突出的特点是比硅钢片铁芯变压器的空载损耗和空载电流降低很多。所以非晶态合金铁芯变压器适合用于峰谷差大的用电负荷。

(3) 由于非晶态合金具有薄、硬、脆，对应力敏感等特性，所以，在变压器结构设计、制造、运行时必须采取措施，降低和减少对铁芯影响的应力，如运输、搬动、安装等，以保持其优越的空载特性。

4. 干式变压器

(1) 环氧树脂干式变压器具有结构简单、维护方便、防火阻燃、防尘等优点，被广泛应用于对消防有较高要求的场合。环氧树脂干式变压器，根据绕组包封方式分为两大类：一类为有填料树脂浇注绕组，由于在树脂中加入石英粉，可使树脂增加机械强度，减少膨胀系数，提高导热性能，降低材料成本，绕组外观较好。另一类为无填料树脂浇注，高低压绕组内外层采用玻璃纤维增强，在真空状态下采用环氧树脂用模具进行浇注，其包封层既薄又韧，富有弹性，改善了导热性能，降低了包封层内外温差。

环氧树脂浇注干式变压器的技术特点：电气强度高；机械强度高；具有较好的过负荷运行能力；具有难燃性和自熄性；电能损耗低；噪声低；体积小、重量轻；安装简单，可免去日常维护工作。

(2) 气体绝缘干式变压器。气体绝缘变压器为在密封的箱壳内充以六氟化硫 (SF_6) 气体代替绝缘油，利用六氟化硫气体作为变压器的绝缘介质和冷却介质。它具有防火、防爆、无燃烧危险，绝缘性能好，防潮性能好，运行可靠性高，维修简单等优点。

气体绝缘变压器的结构特点如下：

1) 气体绝缘变压器的工作部分（铁芯和绕组）与油浸变压器基本相同。

2) 为保证气体绝缘变压器有良好的散热性能，气体绝缘变压器需要适当增大箱体的散热面积，一般气体绝缘变压器采用片式散热器进行自然风冷却。

3) 气体绝缘变压器测量温度方式为热电偶式测温装置，同时还需装有密度继电器和真空压力表。

4) 气体绝缘变压器的箱壳上还装有充放气阀门。

(3) “赛格迈”干式变压器。近年来除了常用的环氧树脂真空浇注型干式变压器外，

又推出一种采用美国杜邦公司的 NOMEX 纸作绝缘的 H 级绝缘“赛格迈”干式变压器。NOMEX 纸具有非常稳定的化学性能，可以连续耐压 220℃ 高温，在起火情况下，具有自熄能力；即使完全分解，亦不会产生烟雾和有毒气体；电气强度高，介电常数较小。

5. 卷铁芯变压器

利用硅钢片制造变压器铁芯主要有叠装式和卷绕式两种形式，后者适用于 630kVA 及以下变压器。近年来，国内有不少厂家发展卷铁芯变压器。

单相卷铁芯变压器只有一个框，铁芯经退火后，其工艺系数仅为 1.05，空载电流仅为叠装式的 20%~30%。

三相卷铁芯变压器一般采用三相三柱内铁芯形式，有两个相同的内框和一个外框，铁芯经退火后，其工艺系数可达 1.15~1.2，空载电流仅为叠装式的 30%~40%。

其优点是：①从磁路看，卷铁芯充分发挥了高导磁冷轧硅钢片的导磁特点，经退火后，可降低铁芯空载损耗和空载电流；②铁芯四角为圆角，减少角部多余部分，节省硅钢片；③没有接缝，可使噪声降低到最低限度，可比一般变压器噪声降低 5~10dB，达到静音状态。

缺点是：铁芯卷成后需要退火处理，退火工艺要求较高，铁芯卷绕和绕组绕制需要专用设备。变压器的铁芯和绕组维修较困难，大、中型卷铁芯变压器（500kVA 以上）平面布置型铁芯存在磁路平衡问题，为解决这个问题，已研究采用三角式布置型铁芯。

目前国内已有生产厂开发矩形铁芯截面的卷铁芯单相、三相变压器，绕组采用矩形形式。这种变压器铁芯窗口填充系数和油箱的利用率较高，同时也解决了变压器的维修问题。

目前国内生产的 10kV、630kVA 及以下卷铁芯变压器，其空载损耗比 S9 系列变压器下降 30%，空载电流比 S9 系列变压器下降 20%。在农村电网建设与改造工程中推广使用卷铁芯变压器。

* 第二节 变压器的工作原理和结构组成

一、变压器的主要组成部分

变压器的主要组成部分是铁芯和绕组，如图 1-1 所示。其绕组有两个：一个是原绕组，其匝数为 N_1 ；另一个是副绕组，其匝数为 N_2 。有时将 N_1 称为一次绕组， N_2 称为二次绕组。一次绕组加有交流电压 $\dot{U}_1$ ，是变压器的输入端，二次绕组接有负载 Z ，是变压器的输出端，其输出电压为 $\dot{U}_2$ 。因为 N_1 和 N_2 匝数不同，故 $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_2$ 的数值也不同，即对电压进行了变换，故称该种设备为变压器。

二、变压器工作原理

今在图 1-1 的原绕组加交流电压 $\dot{U}_1$ ，流过原绕组中的电流为 $\dot{I}_1$ ，于是 $\dot{I}_1$ 在铁芯中产生交变磁通 Φ ，交变磁通在原绕组和副绕组分别建立

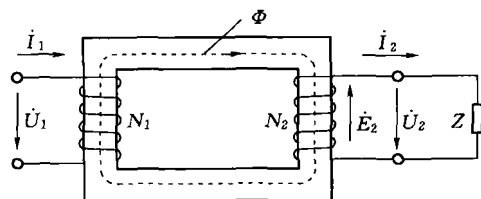


图 1-1 变压器工作原理图

感应电势

$$\dot{E}_1 = 4.44fN_1\Phi_m \times 10^{-8} (\text{V}) \quad (1-1)$$

$$\dot{E}_2 = 4.44fN_2\Phi_m \times 10^{-8} (\text{V}) \quad (1-2)$$

式中 f ——频率, Hz;

N_1 、 N_2 ——原、副绕组匝数;

Φ_m ——主磁通最大值, Wb。

1. 变压器空载运行

(1) 空载运行的定义。当变压器一次绕组加额定电压 $\dot{U}_1$, 二次绕组开路, 即不接负载的状态, 称为空载状态。

在空载状态下, 由于二次绕组不接负载 Z , 故一次绕组的电流 $\dot{I}_1$ 较小, 设其为 $\dot{I}_0$, 通常将 $\dot{I}_0$ 称为空载电流。空载电流 $\dot{I}_0$ 用来建立铁芯中的磁通, 而且还要负担一次绕组 N_1 的有功损耗以及铁芯中的磁滞和涡流损耗。

(2) 变压器的变比。在空载状态下, 变压器的二次绕组不接负载 Z , 因此, 二次绕组的空载电压 $\dot{U}_{20}$ 就等于二次绕组的电势, 即

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2 \quad (1-3)$$

式 (1-3) 就是在空载状态下, 变压器二次绕组的电压方程式。而变压器一次绕组的电压方程式为

$$\dot{U}_1 - \dot{I}_0 r_1 = \dot{E}_1 \quad (1-4)$$

因为在空载状态下, $\dot{I}_0$ 较小, $\dot{I}_0 r_1 \approx 0$, 所以 $\dot{U}_1 \approx \dot{E}_1$ 。

变压器的变比是

$$K_U = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_{20}} = \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{4.44fN_1\Phi_m \times 10^{-8}}{4.44fN_2\Phi_m \times 10^{-8}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-5)$$

可见, 变压器的变比是原绕组电压与副绕组电压之比, 等于其匝数比。

2. 变压器负载运行

在负载状态下, 变压器二次绕组接有负载 Z , 二次绕组中有电流 $\dot{I}_2$ 流过, 因此, 一次绕组电流也要相应地增加, 其值将由空载电流 $\dot{I}_0$ 增加至 $\dot{I}_1$ 。此时, 一、二次绕组的电压方程式为

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 \quad (1-6)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 \quad (1-7)$$

与 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$ 相比, $\dot{I}_1 r_1$ 和 $\dot{I}_2 r_2$ 很小, 将其略去, 则有下列近似关系

$$\dot{U}_1 \approx \dot{E}_1, \dot{U}_2 \approx \dot{E}_2$$

因此, 在负载状态下, 变压器的变比仍由式 (1-5) 给出的关系, 即

$$K_U = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \approx \frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

三、变压器的构造组成

变压器的结构如图 1-2 所示，其由下述部分组成。

1. 芯体

芯体包括变压器的铁芯、绕组、绝缘、引线、分接开关等。

2. 油箱

油箱包括油箱本体和附件。油箱本体包括箱盖、箱壁、箱底等；附件包括放油阀、油样阀、小车、接地螺栓等。

3. 冷却装置

它包括散热器或冷却器。

4. 保护装置

它包括油枕、油表、防爆管、呼吸器、测温元件、热虹吸、气体继电器等。

5. 出线装置

它包括高、中、低压套管。

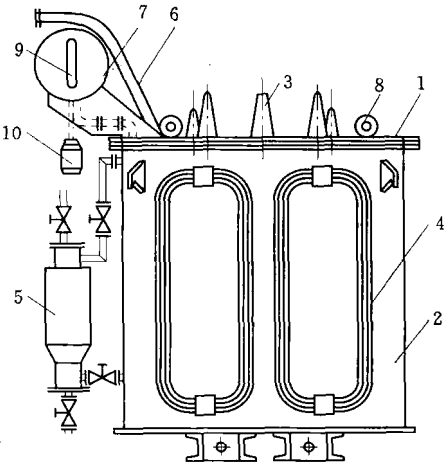


图 1-2 中小型变压器的外貌

- 1—箱盖；2—箱壳；3—套管；4—散热器；
5—热虹吸净油器；6—防爆管；7—油枕；
8—吊环；9—油位计；10—呼吸器

四、变压器型号的标注法和铭牌中的数据

国产电力变压器的型号标注法如图 1-3 所示。

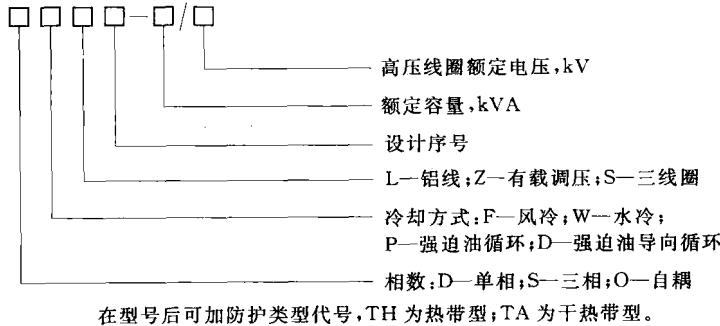


图 1-3 国产电力变压器型号标注法

1. 额定容量 S_n

在额定电压和额定电流下连续运行时，变压器所能输出的视在功率值称为额定容量，单位为 kVA。其计算公式是

单相 $S_n = U_n I_n \times 10^{-3} (\text{kVA})$

三相 $S_n = \sqrt{3} U_n I_n \times 10^{-3} (\text{kVA})$

式中 U_n ——二次绕组的额定电压, V;

I_n ——二次绕组的额定电流, A。

我国电力变压器按 R10 系列组合, 例如 SL7 系列便是如此。所谓 R10 系列, 则是按 $\sqrt[10]{10}=1.2589256\cdots\approx 1.259$ 倍数来递增容量的, 如此形成的容量 (kVA) 系列为: 10, 20, 30, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, ...。过去我国曾采用 R8 系列来递增容量, 即按 $\sqrt[8]{10}=1.33352\cdots\approx 1.33$ 倍数递增, 如此形成的容量 (kVA) 系列为: 10, 20, 30, 50, 75, 100, 135, 180, 240, 320, 420, 560, 750, 1000, ...。

2. 额定电压 U_n

所谓额定电压, 系指变压器长期运行所能承受的工作电压, 单位为 kV。

3. 额定电流 I_n

在额定电压和额定容量下, 变压器允许长期工作的电流, 称为额定电流, 其计算表达式是

$$\text{单相} \quad I_n = \frac{S_n}{U_n} (\text{A})$$

$$\text{三相} \quad I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_n} (\text{A})$$

4. 空载电流

当一次绕组加额定电压, 二次绕组开路, 一次绕组中所流过的电流, 称为空载电流。其以 I_n 的百分值来标定, 即

$$I_0 \% = \frac{I_0}{I_{n1}} \times 100 \%$$

式中 I_0 ——空载电流, A;

I_{n1} ——一次绕组的额定电流, A。

空载电流是变压器的一个重要技术参数, 其与变压器的容量和铁芯的材料有关, 通常容量越大的变压器, $I_0 \%$ 越小。从空载电流的大小, 可判断变压器下述性能:

(1) 判断铁芯质量的高低。例如节能型变压器 SL7—50/10, $I_0 \%=2.8 \%$, 而同等容量的高能耗变压器 SJL—50/10, $I_0 \%=8 \%$ 。整个 SL7 系列变压器, $I_0 \%$ 通常在 4% 以下, 可见, 这种变压器铁芯的材质是良好的。

(2) 判断切除空载变压器时过电压的倍数。因为切除空载变压器时, 空载电流 I_0 被强迫“切断”。由于“切断”前一次绕组所储存的能量为 $\frac{1}{2} I_0^2 L$, 将要转换为断口处电容 C 的电场能量 $\frac{1}{2} U^2 C$, 按能量守恒原理, 有

$$\frac{1}{2} I_0^2 L = \frac{1}{2} U^2 C$$

$$U = I_0 \sqrt{\frac{L}{C}}$$

显而易见, 过电压的倍数与 I_0 有关, 该电压将作用在断口处。有时, 在变压器一次

绕组和断路器之间装设阀型避雷器，作为操作过电压保护，该避雷器在非雷雨季节也不应该退出运行。

5. 空载损耗 P_0

所谓空载损耗，系指变压器一次绕组在额定电压作用下，二次绕组空载时所产生的损耗，以 W 或 kW 为单位。空载损耗实际上包括三部分，即一次绕组中的铜损 $I_0^2 r_1$ 、铁芯中的磁滞损失和涡流损失。但因 $I_0^2 r_1$ 很小，将其略去，所以空载损耗可近似认为是磁滞和涡流损失，这两种损失皆由变压器的铁芯生成，故合称为铁损。根据大连市农电局的试验测定结果，对 S7 系列的配电变压器，空载损耗 P_0 与电压的 2.7 次方成正比，故在运行中应尽量避免变压器过电压运行。又因空载损耗与负荷无关，故常将其称为固定损耗。空载损耗除与电压有关之外，尚与电源的频率、硅钢片的性质、厚度以及制造工艺有关。

6. 短路损耗 P_k

所谓短路损耗，系将变压器二次绕组短路，在一次绕组的额定分接头处通入额定电流时，变压器所消耗的功率，以 W 或 kW 为单位。短路损耗实际上包括下述两部分：

- (1) 一、二次绕组的铜损。
- (2) 铁芯中的损耗。

因为此时二次绕组短路，为使一、二次绕组中流过额定电流，一次绕组所加的电压 U_{k1} 远小于 U_{n1} 。由于

$$U_{k1} = 4.44 f N_1 \Phi_k$$

鉴于 $U_{k1} \ll U_{n1}$ ，则 $\Phi_k \ll \Phi_m$ ，故此时铁损很小，将其略去，如此， P_k 则可近似地认为等于一、二次绕组在额定状态下的铜损。

7. 短路电压 U_k

短路电压又称阻抗电压，该电压是将变压器二次绕组短路，并于一次绕组两端缓慢地增加的电压值，当二次绕组中电流等于额定电流 I_{n2} 时，此时一次绕组的电压值 U_{k1} 称为短路电压，常以一次绕组额定电压的百分值表示，即

$$U_k \% = \frac{U_{k1}}{U_{n1}} \times 100 \%$$

$U_k \%$ 对讨论变压器并列运行、突然短路有重要意义。

8. 接线组别

三相变压器常采用两种连接方法：

- (1) 星形连接，亦称 Y 接。
- (2) 三角形连接，或称 D 接。

Y 接时，三相绕组的末端 X、Y、Z 接成一点，形成中点 O，将首端 A、B、C 引出来作为输入或输出端，如图 1-4 (a) 所示。若将 Y 接的中点 O 引出接地，则称 YN 接法。

D 接有两种：

- (1) 连接次序为 A→Y；B→Z；C→X，并将 A、B、C 引出作为出线，如图 1-4 (b) 所示。
- (2) 连接次序为 A→Z；B→X；C→Y，并将 A、B、C 引出作为出线，如图 1-4 (c) 所示。