

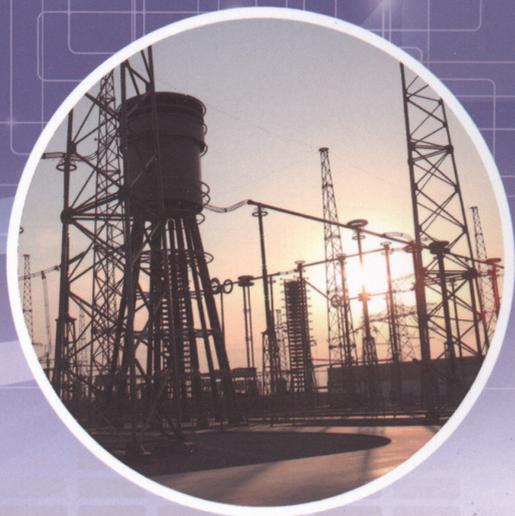


国家电网
STATE GRID

直流换流站运维技能培训教材

换流站运行

国家电网公司运维检修部 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

直流换流站运维技能培训教材

换流站运行

国家电网公司运维检修部 组编

中国电力出版社

内 容 提 要

为提高直流换流站运维人员的操作技能，国家电网公司运维检修部组织编写了《直流换流站运维技能培训教材》，本套教材包括《直流换流站设备状态检修管理标准及工作标准》、《换流站运行》、《直流控制保护》、《换流阀及阀控系统》、《阀冷却系统》五个分册。

本书为《换流站运行》分册，分设备运行和系统运行两篇。设备运行篇包括换流变压器、平波电抗器、换流阀、断路器、隔离开关、互感器、滤波器、电抗器、避雷器、直流控制保护系统、交流保护装置和辅助系统的原理功能和运行维护技能介绍；系统运行篇包括运行操作技能和故障处理技能介绍。

本套教材面向生产一线，实用性强，可供直流换流站运维人员技能培训和 Learning 使用。

图书在版编目（CIP）数据

换流站运行 / 国家电网公司运维检修部组编. —北京：中国电力出版社，2012.9
直流换流站运维技能培训教材
ISBN 978-7-5123-3546-2

I. ①换… II. ①国… III. ①直流换流站—运行—技术培训—教材 IV. ①TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 228213 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

北京博图彩色印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 11 月第一版 2012 年 11 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 19.25 印张 327 千字 1 插页

印数 0001—1500 册 定价 120.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

编 委 会



主 任 帅军庆
副 主 任 张启平 邓永辉 葛兆军
委 员 冀肖彤 曾南超 姚为正 李海英 张爱玲
邓占锋 李继辉 丁 雁 吴石光 张 涛
李帅兵

本册编写人员 鄂士平 李帅兵 郑希云 姚 孟 常 勇
王 鹏 刘 颀 秦晓俐 陕华平

2003 年以来，随着三峡电力外送，国家电网公司直流输电进入了快速发展时期，目前已投运直流输电工程 14 个、换流站 25 座，输送容量达 4225 万 kW，国家电网公司已成为世界上运行直流输电规模最大的电网公司。随着公司“一特四大”战略的实施，直流输电将呈现广阔的发展前景。

直流输电承担着大型能源基地电力外送和跨大区联网重任，是实现资源优化配置的重要手段，事关大电网安全稳定运行，确保其长期安全可靠运行意义重大。

为加强直流换流站运维人员的技能培训，国家电网公司组织运维单位、设备厂家、科研院所编制了《直流换流站运维技能培训教材》，并邀请 16 位公司系统内专家、设备厂家和运维单位技术人员录制了 60 学时的《直流换流站运维技能培训讲座》，全面、系统地介绍了直流换流站运行、控制保护、换流阀及阀控系统、阀冷却系统的运维技术。相信该套教材的出版将进一步加快直流运维人才的培养，提高直流运维人员技能水平和驾驭直流输电系统安全运行的能力。



二〇一二年十一月

直流输电工程输送容量大、输电距离长、技术先进、设备复杂，引起直流闭锁的环节多，对现场运维工作要求高。直流输电在我国发展速度快，运维人才缺乏问题日益突出。由于缺乏系统的培训资源，在一定程度上限制了运维人员技术水平的提高，亟须编制一套系统的、贴合现场实际的直流换流站运维技能培训教材。

为此，国家电网公司运维检修部组织运维单位、设备厂家和科研院所编写了《直流换流站运维技能培训教材》，并邀请 16 位系统内著名专家、设备厂家和运维单位资深技术人员录制了 60 学时的配套教学光盘。教材涵盖了直流换流站运行、直流控制保护、换流阀及阀控系统、阀冷却系统的运维技术，特别对现场作业技能进行了详细的描述，编写力求准确、清晰，面向生产一线，突出现场实用性。

书本教材包括《直流换流站设备状态检修管理标准及工作标准》、《换流站运行》、《直流控制保护》、《换流阀及阀控系统》、《阀冷却系统》五个分册。教学光盘包括直流输电原理，端对端和背靠背直流系统运行，MACH2 和 SIMADYN D 技术直流控制保护，ABB、SIEMENS 和 AREVA 技术换流阀及阀冷却系统。

由于编写时间仓促，疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

2012 年 11 月

序
前言

第一篇 设备运行

第一章	换流变压器	3
第一节	原理功能.....	3
第二节	运行维护.....	12
第二章	平波电抗器	24
第一节	原理功能.....	24
第二节	运行维护.....	25
第三章	换流阀	27
第一节	原理功能.....	27
第二节	运行维护.....	30
第四章	断路器	34
第一节	交流断路器.....	34
第二节	直流断路器.....	43
第五章	隔离开关	48
第一节	原理功能.....	48
第二节	运行维护.....	49
第六章	互感器	52
第一节	交流电压互感器.....	52
第二节	直流电压分压器.....	57

第三节	交流电流互感器	59
第四节	光电式电流互感器	65
第五节	直流电流互感器	70
第七章	滤波器	74
第一节	交流滤波器	74
第二节	直流滤波器	79
第八章	电抗器	81
第一节	原理功能	81
第二节	运行维护	82
第九章	避雷器	84
第一节	原理功能	84
第二节	运行维护	85
第十章	直流控制保护系统	87
第一节	原理功能	87
第二节	运行维护	108
第十一章	交流保护装置	114
第一节	原理功能	114
第二节	运行维护	129
第十二章	辅助系统	137
第一节	原理功能	137
第二节	运行维护	147
第二篇 系 统 运 行		
第一章	运行操作技能	161
第一节	调度知识	161
第二节	直流系统运行方式	168

第三节	典型操作.....	194
第二章	故障处理技能.....	253
第一节	故障处理原则与规定	253
第二节	直流闭锁故障处理	256
第三节	典型故障波形分析	274



第一篇

设备运行

换流变压器

第一节 原理功能

一、基本原理

换流变压器的基本原理与普通变压器相似，其工作原理如图 1-1-1 所示。

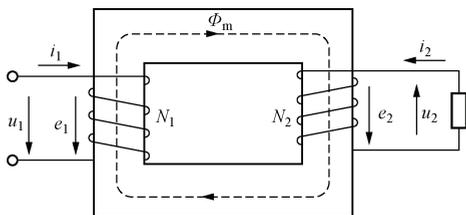


图 1-1-1 换流变压器工作原理图

在一次绕组上外施交流电压 u_1 便有 i_1 流入，因而在铁芯中励磁产生交流磁通 Φ_m ，磁通 Φ_m 同时也流过二次绕组。由于磁通 Φ_m 的交变作用在二次绕组中感应出电动势 e_2 。通过改变二次绕组的匝数来改变电动势 e_2 的数值，如果二次绕组接上用电设备，二次绕组便有电压输出。

假设一、二次绕组的匝数分别为 N_1 ， N_2 ，当换流变压器的一次绕组接到频率为 f 、电压为 u_1 的正弦交流电源时，根据电磁感应原理，铁芯中的交变磁通 Φ_m 将分别在一、二次绕组中感应出电动势。一次绕组感应的电动势为

$$e_1 = N_1 \times \frac{d\Phi}{dt}$$

式中 $\frac{d\Phi}{dt}$ ——磁通的变化率，负号表示磁通增大时，电动势 e_1 的实际方向与电

动势的正方向相反。

如果不计漏阻抗，根据回路电动势平衡规律可得

$$U_1 = -e_1 = -4.44 \times f \times N_1 \times \Phi_m \quad (1-1-1)$$

在二次侧，同理可以得出

$$U_2 = -e_2 = -4.44 \times f \times N_2 \times \Phi_m \quad (1-1-2)$$

由式 (1-1-1)，式 (1-1-2) 之比得

$$U_1 / U_2 = e_1 / e_2 = N_1 / N_2 = k$$

式中 k ——变压器的变比，或称匝数比。

设计时选择适当的变比就可以实现把一次电压变到需要的二次电压。

双绕组换流变压器一、二次侧均只有 1 个绕组，如图 1-1-2 所示。

三绕组换流变压器一次侧只有 1 个绕组，而二次侧有 2 个绕组，如图 1-1-3 所示。

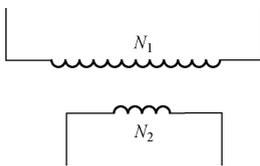


图 1-1-2 双绕组换流变压器结构示意图

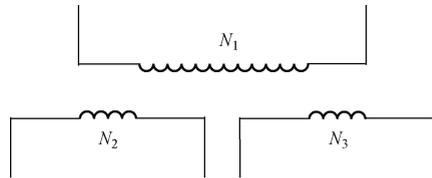


图 1-1-3 三绕组换流变压器结构示意图

二、结构类别

换流变压器的总体结构分为三相三绕组式、三相双绕组式、单相双绕组式和单相三绕组式四种。采用何种结构型式的换流变压器，应根据换流变压器交流侧及直流侧的系统电压要求、变压器的容量、运输条件以及换流站布置要求等因素进行全面考虑确定。

对于中等额定容量和电压的换流变压器，可选用三相变压器。采用三相变压器的优点是减少材料用量，减少变压器占地空间及损耗，特别是空载损耗。对于 12 脉动换流阀的两个 6 脉动换流桥，宜采用两台三相变压器，其阀侧输出电压有 30° 的相角差，网侧绕组均为 Y 连接，而阀侧绕组，一台为 Y 连接，另一台为 D 连接。

对于容量较大的换流变压器，可采用单相变压器。在运输条件允许时应采用

单相三绕组变压器。这种型式的变压器带有 1 个交流网侧绕组和 2 个阀侧绕组，阀侧绕组分别为 Y 连接和 D 连接。两个阀侧绕组具有相同的额定容量和运行参数（如阻抗和损耗），线电压之比为 $\sqrt{3}$ ，相角差为 30° 。

高压大容量直流输电系统采用单相三绕组换流变压器，相对于采用单相双绕组换流变压器来说，具有更小的铁芯、油箱、套管以及有载调压开关，因此原则上采用三绕组变压器要更经济、可靠。

三、技术数据

(1) 额定容量（额定功率， S_N ）：变压器在厂家铭牌规定的条件下，在额定电压、额定电流连续运行时所输送的容量（功率）。其计算公式为

$$\text{三相变压器} \quad S_N = \sqrt{3}U_N I_N$$

$$\text{单相变压器} \quad S_N = U_N I_N$$

(2) 额定电压（ U_N ）：变压器长时间运行时所能承受的工作电压（铭牌上的 U_N 为变压器开关位于 0 档的额定电压值）。其计算公式为

$$\text{三相变压器} \quad U_N = S_N / \sqrt{3}I_N$$

$$\text{单相变压器} \quad U_N = S_N / I_N$$

(3) 额定电流（ I_N ）：变压器在额定容量下允许长期通过的电流。

(4) 短路阻抗：即阻抗电压，当变压器二次绕组短路（稳态），一次绕组流通额定电流而施加的电压称阻抗电压 U_Z ，通常 U_Z 以额定电压的百分数表示，即 $U_Z = (U_Z / U_{1n}) \times 100\%$ 。

(5) 负载损耗：变压器二次绕组短路（稳态）、一次绕组流通额定电流时所消耗的有功功率。由绕组的电阻损耗、涡流损耗、环流损耗、杂散损耗等构成。

(6) 空载损耗：变压器二次绕组开路，一次绕组施加额定频率、额定电压的正弦波形时，所消耗的有功功率。

(7) 空载电流：变压器在额定电压下空载运行时一次侧通过的电流（不是指刚合闸瞬间的励磁涌流峰值，而是指合闸后的稳态电流）。

四、功能特点

换流变压器与换流阀一起实现交流与直流电之间的相互转换。换流变压器主要作用为：①为换流阀换相提供电压；②将送端交流电力系统的电功率送到整

流器或从逆变器接受功率送到受端交流系统；③通过两侧绕组的磁耦合实现交流系统和直流部分的电绝缘和隔离；④实现电压的变换，使换流变压器网侧交流母线电压和换流桥的直流侧电压能分别符合两侧的额定电压及容许电压偏移；⑤对从交流电网入侵换流阀的过电压波起抑制作用。

与常规变压器相比，换流变压器具有漏抗大、同时承受交直流电压应力、有载调压范围广等特点，在短路阻抗、绝缘、谐波、直流偏磁、有载调压和试验方面和普通电力变压器有着不同之处，制造难度大。

（一）短路阻抗

为了限制阀臂及直流母线短路时的故障电流，以免损坏换流阀的晶闸管元件，换流变压器应有足够大的短路阻抗。短路阻抗也不能太大，否则会使运行中的无功损耗增加，需要相应增加无功补偿设备，并导致换相压降过大。大容量换流变压器的短路阻抗百分数通常为 12%~18%。

（二）绝缘

换流变压器阀侧绕组同时承受交流电压和直流电压。在由两个 6 脉动换流阀串联而形成的 12 脉动换流阀接线中，由接地端算起的第一个 6 脉动换流阀的换流变压器阀侧绕组直流电压升高 $0.25U_d$ (U_d 为 12 脉动换流阀的直流电压)，第二个 6 脉动换流阀的阀侧绕组升高 $0.75U_d$ ，因而换流变压器的阀侧绕组除承受正常交流电压产生的应力外，还要承受直流电压产生的应力。另外，直流全压启动以及极性反转，都会造成换流变压器的绝缘结构比普通变压器复杂得多。

（三）谐波

换流变压器在运行中有特征谐波电流和非特征谐波电流流过。变压器漏磁的谐波分量会使变压器的杂散损耗增大，有时还可能使某些金属部件和油箱产生局部过热现象。对于有较强漏磁通过的部件要用非磁性材料或采用磁屏蔽措施。数值较大的特征谐波所引起的磁致伸缩噪声，一般处于听觉较为灵敏的频带，必要时采取更为有效的隔音措施。

（四）有载调压

为了补偿换流变压器交流网侧电压的变化以及将触发角运行在适当的范围内以保证运行的安全性和经济性，要求有载调压分接开关的调压范围较大，特别是可能采用直流降压模式时，要求的调压范围往往高达 20%~30%。

有载调压调节分接头时不需要将换流变压器从电网中退出，即可以带着负载切换。它的基本原理就是在换流变压器的绕组中引出若干分接头，通过有载调压

机构切换,在保证不切断负荷电流的情况下,由一个分接头切换到另一个分接头,以达到改变绕组的有效匝数,从而改变换流变压器变比的目的。

(五) 直流偏磁

运行中由于以下原因,使得流经变压器中性点的直流电流较大,导致换流变压器阀侧及网侧绕组的电流中产生直流分量,使换流变压器产生直流偏磁。

- (1) 换流阀触发角的不平衡。
- (2) 换流变压器网侧存在正序 2 次谐波。
- (3) 在稳态运行时由并行的交流线路感应到直流线路上的基频电流。
- (4) 单极大地回线方式运行时由于换流站中性点电位升高。

换流变压器直流偏磁将导致变压器损耗、温升及噪声增加。由于直流偏磁电流相对较小,一般不会换流变压器的安全造成影响。

(六) 试验

换流变压器除了要进行与普通变压器一样的型式试验之外,还要进行直流方面的试验,如直流电压试验、直流电压局放试验、直流电压极性反转试验等。

五、主要附件

(一) 套管

1. SF₆—油绝缘套管

SF₆—油绝缘套管结构如图 1-1-4 所示, SF₆—油套管分为内、外两部分。套管内部下半部分充油,套管的油与变压器本体油相通。外部主要包括玻璃纤维环氧树脂管、硅外裙组成的绝缘体,并充上一定压力的 SF₆ 气体。变压器油箱应高于套管顶部,该类型套管多用于换流变压器阀侧套管。

2. 油绝缘套管

油绝缘套管由最内层的导电管、中间层的油浸式电容纸质芯子和分层的铝箔及最外层的瓷绝缘子外套组成,内部充满油。在套管上有一个油枕,可对套管中的油进行调节。套管油与变压器本体油不相通。该类套管多用于网侧高压套管。

3. 环氧树脂浸纸电容式充气套管

环氧树脂浸纸电容式充气套管由导电管、法兰及电容芯子连接组成。主绝缘电容芯子是由绝缘纸和铝箔电极在导电管上卷绕而成的同心圆柱型串联电容器,

用以均匀电场。套管充 SF₆ 气体进行绝缘，该类套管多用于阀侧套管。

4. 环氧树脂浸纸电容型干式套管

环氧树脂浸纸电容型干式套管由环氧树脂浸纸的圆筒状绝缘件组成，以环氧树脂浸纸式电容芯子作为主绝缘，外部加装高度硫化的硅橡胶材料外壳以承担机械负荷并作为外绝缘，主绝缘与外绝缘间的空隙以硅脂类膏状物干式绝缘材料作为填充，该类套管多用于阀侧套管。

5. 硅橡胶套管

硅橡胶套管结构如图 1-1-5 所示。套管是以树脂浸渍纸作主绝缘、硅橡胶作户外伞裙的干式套管。套管通过两根软导线或硬导杆与换流变压器连接，其优点是在任意方向垂直安装，此类套管一般用于网侧中性点套管。

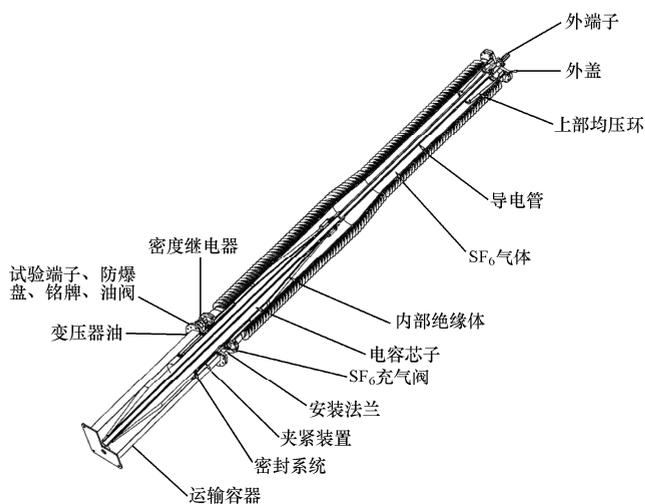


图 1-1-4 SF₆—油绝缘套管结构图

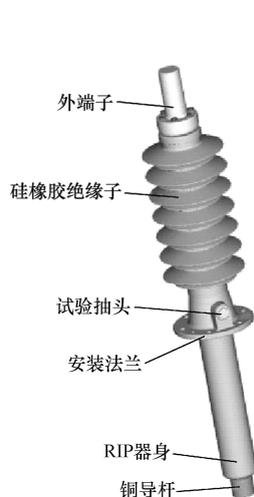


图 1-1-5 硅橡胶套管结构图

6. 瓷套管

瓷套管为电容性套管，其主绝缘由油浸式芯子构成，芯子被绝缘油包裹。芯子为分层结构以优化电压分布。套管外壳由瓷绝缘子、法兰、外罩等组成，此类套管一般用于网侧中性点套管。

(二) 冷却器

1. 强油循环冷却方式

冷却器为强油循环风冷式，强油循环冷却方式就是在油路中加入了使油流速