

# 特高压交流变电运维检修 技能培训教材

国网山西省电力公司 编



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 特高压交流变电运维检修 技能培训教材

国网山西省电力公司 编



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

为满足特高压电网进入全面大规模建设新形势下特高压交流变电运维人员技能培训的需要,国网山西省电力公司组织专家及技术人员编写了本书。本书共十章,内容包括:特高压交流变电站概述;1000kV 变压器、高压并联电抗器、GIS 设备、固定串补装置、隔离开关、接地开关、电压互感器、避雷器、套管等交流特高压一次主设备及110kV 无功补偿装置的原理、结构、运行维护操作要点和注意事项、检修项目及标准;特高压交流变电站综合自动化系统、继电保护设备、通信系统等二次主设备的原理、装置介绍、运行维护项目和检修项目;特高压交流变电站在线监测和带电检测技术;特高压交流变电站消防系统;特高压交流变电站运行管理及生产准备。本书紧密结合现场实际、全面系统、实用性强,对提高特高压交流变电运维人员的运维技能具有重要意义。

本书可作为电力系统从事特高压交流变电运行、维护、管理和教学人员的培训教材,也可供相关专业技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

特高压交流变电运维检修技能培训教材 / 国网山西省电力公司编. — 北京:中国水利水电出版社, 2014.12

ISBN 978-7-5170-2816-1

I. ①特… II. ①国… III. ①高电压—交流—变电所—维修—技术培训—教材 IV. ①TM63

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第311221号

书 名	特高压交流变电运维检修技能培训教材
作 者	国网山西省电力公司 编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 25.75印张 610千字
版 次	2014年12月第1版 2014年12月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	78.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

# 编 委 会

主 任 张建坤 黄 强

副主任 王礼田 沈 同

委 员 陈佩林 梁建伟 曹明德 原敏宏 王志平

孙国繁 郑会权 尉 镔 成小胜

主 编 原敏宏 李 坚

副主编 王志平 成小胜

成 员 杨爱民 时伟光 叶严军 张雍赞 解 涛

李东敏 胡 多 高文彪 高 辉 高 吉

赵成运 贺彦龙 赵宇亭 马伟伟 丁慧敏

李 倩 崔淑芳 王时光 李 翔 李晓杰

郭 靖 赵 刚 许 鹏 胡庆娟 苗 春

陈 超 王 磊 谢鹏军 郭希昌 张 鹏

渠瑞斌 李平伟 庞 震 李永亮 申晓东

秦艳伟 任林丽



## 序

中国电力“十二五”规划的指导思想是以加快转变电力发展方式为主线，以保障安全、优化结构、节能减排、促进和谐为重点，着力提高电力供应安全，推进资源优化配置和电力产业升级，促进电力和谐发展，努力构建安全、经济、绿色、和谐的电力工业体系，满足经济社会科学发展的有效电力需求，以实现2020年中国非石化能源在一次能源消费中达到一成五左右、单位GDP二氧化碳排放量比2005年下降四成到四成五的目标。同时习近平总书记也明确提出了要推动能源消费革命、供给革命、技术革命和体制革命，强调建设以电力外送为主的千万千瓦级大型煤电基地，发展远距离大容量输电技术。

国家电网公司“十年磨一剑”，全力推动的特高压技术是先进、安全、高效、绿色的输电技术。它能够以输电代替输煤，安全高效远距离输送电力，从根本上解决煤电运输紧张问题，能够建设大通道、构建大电网、发展大市场，大规模开发和大范围优化配置清洁能源，以清洁能源替代化石能源，使清洁能源逐步成为未来主导能源，实现能源清洁发展；能够促进“以电代煤、以电代油、电从远方来”，有效解决雾霾等污染问题，实现能源环保发展；能够构建友好、互动、开放的智能化服务平台，适应各类电源和负荷灵活接入与互动，满足客户多样化需求，实现能源友好发展；同时也可提高我国能源安全保障能力，实现能源安全发展。国家电网公司“四交四直”特高压工程已列入国家大气污染防治行动计划，并在此基础上加快推动“五交五直”，标志着特高压电网从技术创新、工程示范进入全面大规模建设的新阶段。

山西省作为国家重要的“电力供应基地、能源输出基地”和国家“五大综合能源基地”之一，距离京津冀鲁、长三角等负荷中心较近，在转型跨越发展中，全力加快建设综合能源基地，借势借力拓展以特高压为支撑的晋电外送新通道。通过向省外大量输送清洁能源，替代化石一次能源消耗，既是实现“两个一百年”发展目标的能源支撑，更是落实国家大气污染防治行动计划，破解雾霾困局、建设美丽中国的现实需要。据估算，到“十二五”末，山西省电力装机容量将超过8000万kW，发电能力的大幅增长不仅是满足山

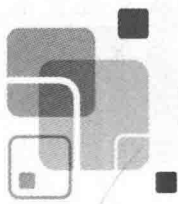
西省内用电负荷增长的需求，还可给周边省份提供更多的电力供应，使输电成为山西省除煤炭之外又一个强有力的经济支点。

山西省电力公司作为山西省唯一的大型电网企业，一贯高度重视特高压工程建设运行工作，将“拓展特高压外送电力大通道”列为公司四件大事之首，对特高压工程前期、建设、生产准备等方面工作进行了全面部署，全力加快“蒙西—晋北—天津南”、“榆横—晋中—潍坊”、“蒙西—晋中—晋东南—长沙”、“陇彬—晋东南—连云港”特高压工程建设。同时山西省电力公司在1000kV长治—南阳—荆门特高压交流试验示范工程成功投运和安全运行的基础上积累了丰富的特高压交流变电站运行维护管理经验，为满足后续特高压交流工程大规模建设运行对特高压交流变电运维人员技能培训的需要，结合特高压交流变电站运维实际和专业特点，山西省电力公司组织编写了《特高压交流变电运维技能培训教材》。本书坚持以能力为核心，遵循“知识够用、为技能服务”的原则，系统研究了特高压交流变电站设备运行维护、检修试验等关键知识，对特高压交流变电站运维业务的开展具有较强的针对性和指导性。

希望本书能够让从事特高压交流变电站运维检修专业的人员受益，在特高压交流电网波澜壮阔的发展中发挥积极的作用。

编委会

2014年9月25日



## 前 言

特高压相比常规电压等级交流输电具有输送容量大、输送距离远、线路损耗小、占地走廊少等特点，国外自 20 世纪 70 年代开始研究特高压交流输电技术，到 80 年代中期苏联建成世界上第一条特高压交流输电线路，投入运行 6 年后降压运行，目前其他国家因电力需求乏力，都处于研究试验阶段。但对我国而言，由于资源分布极不均衡，火电容量集中在山西、内蒙古、陕西、宁夏、黑龙江、贵州和安徽等省（自治区），且随着我国西南水电的开发，发展特高压可将目前电网的整体输电能力提高 4~5 倍，实现西南 7000kW 富裕水电和山西、陕西、蒙西、宁夏等西部地区的 9900kW 富裕火电容量的东送和南送，实现跨流域调节和水火电互济，减少备用和弃水电量。同时，全国经济发达城市所面临的环境污染也迫在眉睫。因此全面开展以特高压为重点的跨区域输电工程建设，是保障国家能源安全、提高能源利用效率、服务清洁能源、促进生态文明建设的重要选择，可以有效提升我国进行长距离、大容量能源转移的能力，缓解能源运输压力，提高经济效益，对转变经济发展方式、调整能源结构具有深远的影响。

我国第一条特高压交流输电线路 1000kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程，于 2006 年 8 月经国家发改委核准，同年底开工建设，2009 年 1 月 6 日正式投入商业运行。目前国网山西省电力公司受国家电网公司委托，不但负责 1000kV 长南 I 线（山西段）的生产管理和运行维护工作，而且也负责 1000kV 长治变电站包括安全管理、运行管理、检修抢修、技术监督、专业管理和科技项目管理等的安全生产管理。该工程投运至今一直保持安全稳定运行，经受了雷雨、大风、高温和严寒等恶劣条件的考验，进一步验证了特高压交流输电技术应用的安全性、可靠性和成熟性。

目前，我国在运的特高压交流工程有两条（晋东南—南阳—荆门、淮南—皖南—浙北—上海），在建的一条（浙北—福州）。根据国家电网公司特高压交流互联电网发展规划，到 2015 年、2017 年、2020 年，国家电网将分别建成“两纵两横”、“三纵三横”、“五纵五横”特高压“三华”（华北、华中、华

东)交流同步电网。为满足后续特高压交流工程建设运行对特高压交流变电运维人员技能培训的需要,国网山西省电力公司组织技术人员,编写了本教材,旨在通过不断提高运行维护人员自身技能水平,全面提升运维人员驾驭特高压交流变电设备的能力,为保障特高压交流变电站的安全稳定运行做出更大的贡献。

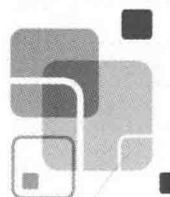
本书共十章,其中第一章特高压交流变电站概述主要由成小胜编写;第二章1000kV变压器由高辉编写;第三章1000kV GIS设备由叶严军编写;第四章、第五章1000kV隔离开关、接地开关、电压互感器、避雷器、套管由解涛编写;第六章1000kV高压并联电抗器由高吉编写,1000kV串补设备由赵成运编写,1000kV串补控保系统由高文彪编写,110kV无功补偿设备由时伟光编写;第七章特高压变电站综合自动化系统由赵宇亭编写,特高压交流设备继电保护由李东敏编写,特高压变电站通信系统由贺彦龙编写;第八章特高压变电站在线监测和带电检测技术由张雍赞编写;第九章特高压交流变电站消防系统由马伟伟编写;第十章特高压交流变电站运行管理及生产准备由胡多编写。全书由成小胜、解涛统稿,并由国网山西省电力公司李坚对全书进行了最终补充和修编。

由于时间仓促、水平有限,书中难免出现疏漏之处,恳请各位专家、读者批评指正。同时本书在编写过程中得到了多位上级领导专家的大力支持,也引用了公开发表的国内有关研究成果和各设备制造厂家公开发布的技术成果,在此特向有关专家和作者一并表示衷心的感谢!

**编者**

2014年9月





# 目 录

## 序 前言

<b>第一章 特高压交流变电站概述</b> .....	1
第一节 特高压交流变电站电气主接线 .....	1
第二节 特高压交流变电站主设备构成及主要技术指标 .....	9
第三节 特高压交流变电站主设备基本结构及运维检修特点 .....	32
<b>第二章 1000kV 变压器</b> .....	45
第一节 变压器基本原理及发展概述 .....	45
第二节 1000kV 变压器结构特点及调压原理 .....	50
第三节 1000kV 变压器运行维护基本操作要点和注意事项 .....	72
第四节 1000kV 变压器运维检修项目及标准 .....	75
<b>第三章 1000kV GIS 设备</b> .....	87
第一节 基本原理 .....	87
第二节 结构特点 .....	95
第三节 1000kV GIS 运行维护基本操作要点和注意事项 .....	107
第四节 1000kV GIS 技术监督项目及标准 .....	115
第五节 1000kV GIS 检修项目及标准 .....	117
<b>第四章 1000kV 隔离开关和接地开关</b> .....	127
第一节 1000kV 隔离开关和接地开关概述 .....	127
第二节 1000kV 隔离开关基本原理和结构 .....	127
第三节 1000kV 隔离开关和接地开关运行维护基本操作要点和注意事项 .....	137
第四节 1000kV 隔离开关和接地开关技术监督项目及标准 .....	138
第五节 1000kV 隔离开关和接地开关检修项目及标准 .....	139
<b>第五章 1000kV 电压互感器、避雷器及套管</b> .....	141
第一节 1000kV 电压互感器 .....	141
第二节 1000kV 避雷器 .....	147
第三节 1000kV 套管 .....	153

<b>第六章 无功补偿设备</b> .....	158
第一节 1000kV 高压并联电抗器 .....	158
第二节 1000kV 串补设备 .....	187
第三节 1000kV 串补控保系统 .....	223
第四节 110kV 无功补偿设备 .....	250
<b>第七章 特高压变电站二次系统</b> .....	274
第一节 特高压交流变电站综合自动化系统 .....	274
第二节 特高压交流设备继电保护 .....	283
第三节 特高压变电站通信系统 .....	343
<b>第八章 特高压变电站在线监测和带电检测技术</b> .....	353
第一节 在线监测技术原理介绍及运维注意事项 .....	353
第二节 带电检测技术原理介绍 .....	361
<b>第九章 特高压交流变电站消防系统</b> .....	368
第一节 特高压交流变电站消防系统概述 .....	368
第二节 特高压交流变电站火灾自动报警联动系统 .....	368
第三节 特高压交流变电站水喷雾灭火系统 .....	372
第四节 特高压交流变电站消防栓系统 .....	374
<b>第十章 特高压交流变电站运行管理及生产准备</b> .....	376
第一节 特高压交流变电站运行管理 .....	376
第二节 特高压交流变电站生产准备 .....	394
<b>参考文献</b> .....	399

# 第一章 特高压交流变电站概述

## 第一节 特高压交流变电站电气主接线

### 一、变电站电气主接线简介

#### (一) 变电站电气主接线的功能

变电站电气主接线是根据电能汇集、输送和分配的要求，表示主要电气设备相互之间的连接关系和本变电站（或发电厂）与电网的电气连接关系，通常用单线图表示。它对电网运行安全、供电可靠性、运行灵活性、检修方便及经济性等均起着重要的作用；同时也对电气设备的选择、配电装置的布置以及电能质量的好坏等都起着决定性的作用，同样也是运维人员进行各种倒闸操作和事故处理时的重要依据。

#### (二) 变电站电气主接线的要求

电气主接线应根据变电站在电力系统中的地位和作用，按照规划容量、供电负荷、电力系统短路容量、线路回路数以及电气设备特点等条件，满足电力系统的安全运行和经济调度的要求确定，其中应该考虑供电可靠性、运行灵活性、操作检修方便、节约投资及便于过渡和扩建等。

由于特高压变电站的重要性，其电气主接线的可靠性必须很高。

#### (三) 特高压变电站电气主设备

特高压变电站主设备包括电力变压器、开关设备、电压互感器、电流互感器、避雷器、母线、支柱绝缘子以及各种无功补偿装置（包括并联电抗器、并联电容器、串联补偿电容器等）等，其中配电装置主要分为户外敞开式和户外气体绝缘金属封闭式两种。

(1) 在电网中，变压器是一种变换电压的主要电气设备，按照用途不同可分为升压变压器、降压变压器及联络变压器等。依靠变压器可以把不同电压等级的电网联络在一起，组成复杂的大电网。电能经升压变压器升压后可以输送到很远的地方，能够达到减少线路损耗，提高送电经济性的目的；而在负荷中心则安装若干级降压变压器和大量分散装设的配电变压器，可将高电压降低为用户所需要的各级电压，以满足用户用电电压等级的需要。特高压变压器按照结构不同可分为普通变压器（两绕组一般用于发电机升压变压器）和自耦变压器等，且中性点直接接地。其中自耦变压器采用中压末端，即中性点调压的调压方式；并有第三绕组以流通三次及其他高次谐波，可装设无功补偿设备，通过补偿变压器无功消耗，以利于功率传输和站用电源使用。

(2) 并联电抗器主要用于 330kV 及以上的超高压电网和电缆线路较多的电网中, 以吸收电网过剩的容性无功。特高压并联电抗器分为容量固定式(不可控)电抗器和容量可控电抗器两种, 主要作用是补偿线路多余的容性无功, 减少线路损耗, 防止电力系统发生工频过电压, 与中性点电抗器配合消除潜供电流以提高线路单相重合闸的成功率, 有利于消除同步电机带空载长线路时可能出现的自励磁现象。

(3) 特高压开关设备包括断路器、隔离开关、接地开关等, 以及由上述产品与其他电气产品的组合产品, 它们在结构上相互依托, 有机地构成一个整体, 以完成特高压系统正常接通和断开导电回路、切除和隔离故障等运行任务。其中特高压断路器除完成一般高压断路器的任务外, 还要求采取特殊措施(如分闸和合闸电阻), 尽量降低开断和关合时的操作过电压, 以降低线路和变电站设备的绝缘水平和造价。

(4) 电压互感器是将一次侧交流电压按照额定电压比转换成可供仪表、继电保护或控制装置使用的二次侧电压的变压设备。

(5) 电流互感器是将一次侧交流电流按照额定电流比转换成可供仪表、继电保护或控制装置使用的二次侧电流的变流设备。

(6) 避雷器是一种释放过电压能量限制过电压幅值的保护设备, 它通过并联放电间隙或非线性电阻的作用, 对入侵流动波进行削幅, 以降低被保护设备所承受过电压幅值。在特高压电网中用于保护变电站电气设备免受雷电和操作过电压损害, 其性能是变电站其他设备绝缘水平选择的基础。

(7) 母线是用于汇集和分配多条进出线电能的设备, 常用高压母线大体上可分为软母线和硬母线两种, 其接线方式包括单母线、双母线、3/2 接线、4/3 接线等多种类型。

(8) 支柱绝缘子是变电站和高压电器(如隔离开关)的绝缘支持物。

(9) 套管是电气设备的一个较复杂又重要的配套元件, 用于将高压导体穿过与其电位不同的隔板或外壳, 起到绝缘和支撑作用。套管具有内外绝缘兼有、电场复杂, 结构和尺寸要求严格等特点。

(10) 特高压站电容器分为并联电容器和串联电容器两种。其中并联电容器安装于变压器低压侧, 用于补偿输变电设备消耗的无功, 减少输变电设备有功损耗和降压、提高传输功率、稳定电网电压等; 串联电容器安装于线路中用于补偿线路电抗, 减小线路总电抗值, 缩短线路电气距离和线路两端角差, 提高线路传输功率。

## 二、特高压交流变电站电气主接线

### (一) 特高压交流变电站电气主设备规模

以特高压长治站为例。

(1) 1000kV 配电装置采用 GIS 设备。

(2) 1000kV 变压器为单相、自耦、无励磁调压主变压器, 共设两组, 单组容量  $3 \times (1000/1000/334)$  MVA, 另装设一台备用变压器; 1000kV 线路出线一回, 至 1000kV 特高压南阳站, 线路装设一组高压并联电抗器及一台中性点小电抗器, 高压并联电抗器容量为  $3 \times 320$  Mvar, 中性点小电抗容量为 248kvar, 另装设一台备用高抗和备用中性点小

电抗。

(3) 1000kV 线路长治侧装设串补装置 1 组, 采用固定式, 额定容量 1500Mvar, 补偿度为 20%。

(4) 110kV 配电装置采用敞开式设备, 共装设 4 组低压电抗器、8 组低压电容器及 2 台高压站用变。单组主变低压侧 110kV 系统无功补偿装置配置 2 组低压电抗器 (每组容量 240Mvar) 和 4 组低压电容器 (每组容量 210Mvar)。

(5) 500kV 配电装置采用 HGIS 设备, 共 7 个不完整串。主变进线 2 串, 线路出线 5 回, 其中 2 回至 500kV 晋城变电站, 3 回至 500kV 久安变电站。

## (二) 特高压交流变电站电气主接线的选择

由于特高压交流线路输送容量很大, 发生故障时影响范围广, 因此, 应该采用高可靠性的电气主接线方式。另外, 由于特高压设备昂贵, 如何通过技术经济比较, 在电气主接线的设计方面, 选择最优设计方案, 使用较少的电气设备, 达到最好的性能和最高的可靠性, 使得效益投资比最大, 是特高压电气主接线设计上的一个重要问题。综上所述, 特高压交流变电站 1000kV、500kV 系统一般采用 3/2 接线方式。

由于特高压交流线路及特高压交流主变输送容量很大, 加上采用固定式特高压电抗器, 大功率输电时所需的无功补偿装置容量相应也很大, 按照相关电网运行规定, 所需无功需要就地解决, 因此主变低压侧主要用于装设无功补偿装置 (同时为 1 号高压站用变和 2 号高压站用变供电)。考虑到无功补偿装置故障时的备用情况以及目前电容器断路器制造能力的限制, 通过综合计算和统筹考虑, 单组主变低压侧 110kV 系统无功补偿装置的容量确定为  $2 \times 240\text{Mvar}$  容量电抗器和  $4 \times 210\text{Mvar}$  容量电容器, 110kV 系统接线方式采用两段单母线接线方式, 即: 每组主变低压侧 110kV 系统装设 2 台总断路器, 每台总断路器对应设置一段 110kV 母线。

为了确保特高压交流变电站设备安全可靠运行, 作为特级重要枢纽变电站, 特高压交流变电站站用电系统必须配置三路电源, 分别为 1 号站用电系统、2 号站用电系统、0 号站用电系统。其中 1 号站用电引自本站 1 号主变低压侧 110kV 母线, 经降压后对 400V 1 号母线供电; 2 号站用电引自本站 2 号主变低压侧 110kV 母线, 经降压后对 400V 2 号母线供电; 0 号站用电为备供电源, 由地区电网站外电源供电, 经降压后对 400V 0 号母线供电, 主备用电源间设置自投装置。

## (三) 特高压交流变电站典型电气主接线介绍

以特高压长治站为例。

- (1) 特高压交流变电站 1000kV 系统主接线, 见图 1-1。
- (2) 特高压交流变电站 1000kV 串联补偿系统主接线, 见图 1-2。
- (3) 特高压交流变电站 1000kV 线路并联高抗主接线, 见图 1-3。
- (4) 特高压交流变电站 1000kV 主变压器主接线, 见图 1-4。
- (5) 特高压交流变电站 500kV 系统主接线 (含线路避雷器和电压互感器), 见图 1-5。
- (6) 特高压交流变电站 110kV 系统主接线 (以 1 号母线设备为例), 见图 1-6。
- (7) 特高压交流变电站站用电系统主接线, 见图 1-7。

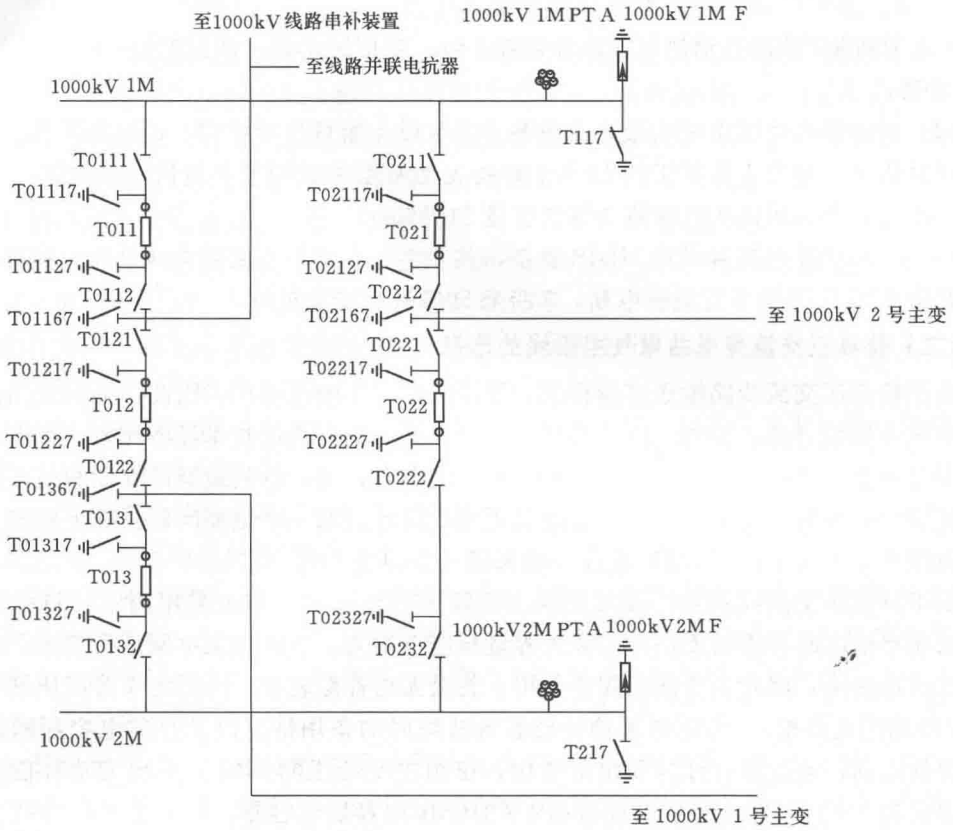


图 1-1 特高压交流变电站 1000kV 系统主接线

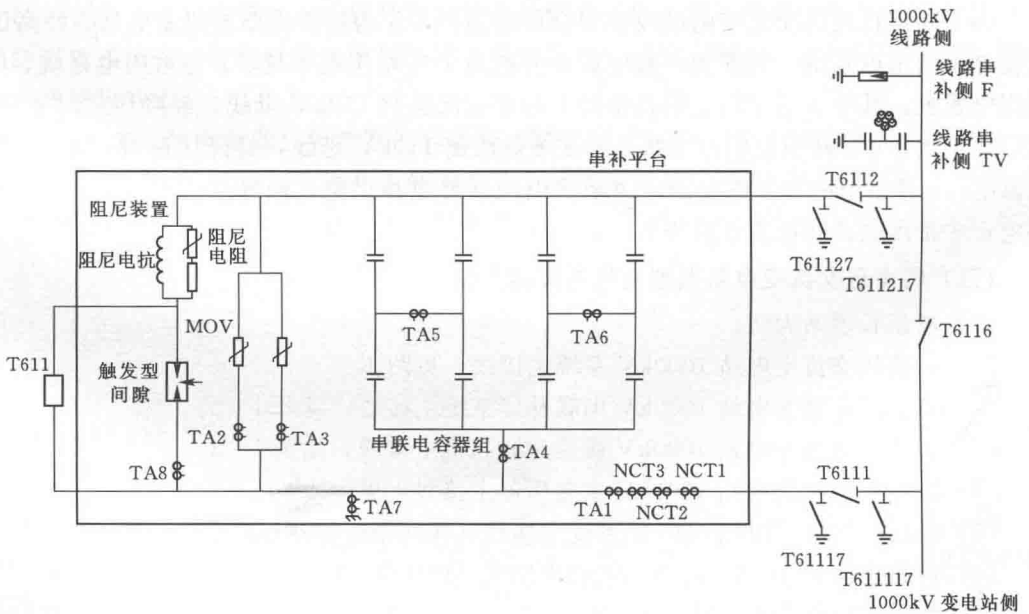


图 1-2 特高压交流变电站 1000kV 串联补偿系统主接线

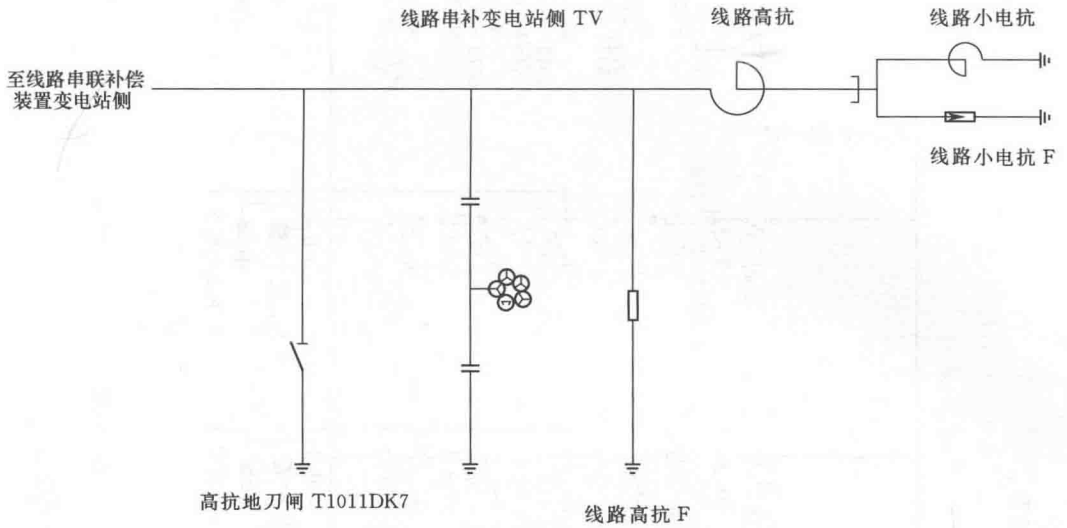


图 1-3 特高压交流变电站 1000kV 线路并联高抗主接线

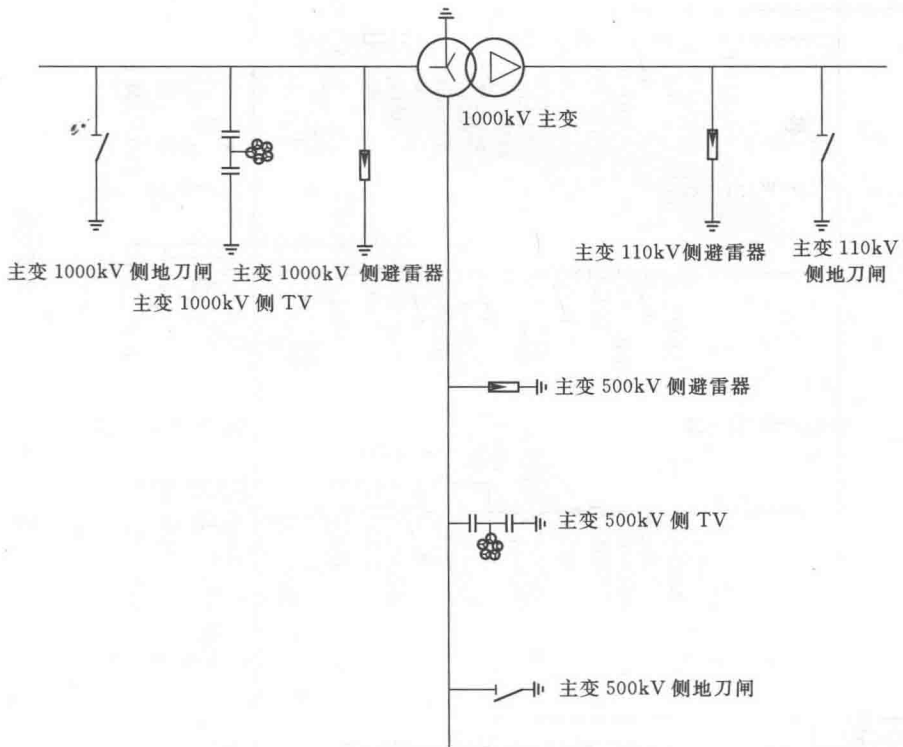


图 1-4 特高压交流变电站 1000kV 主变压器主接线

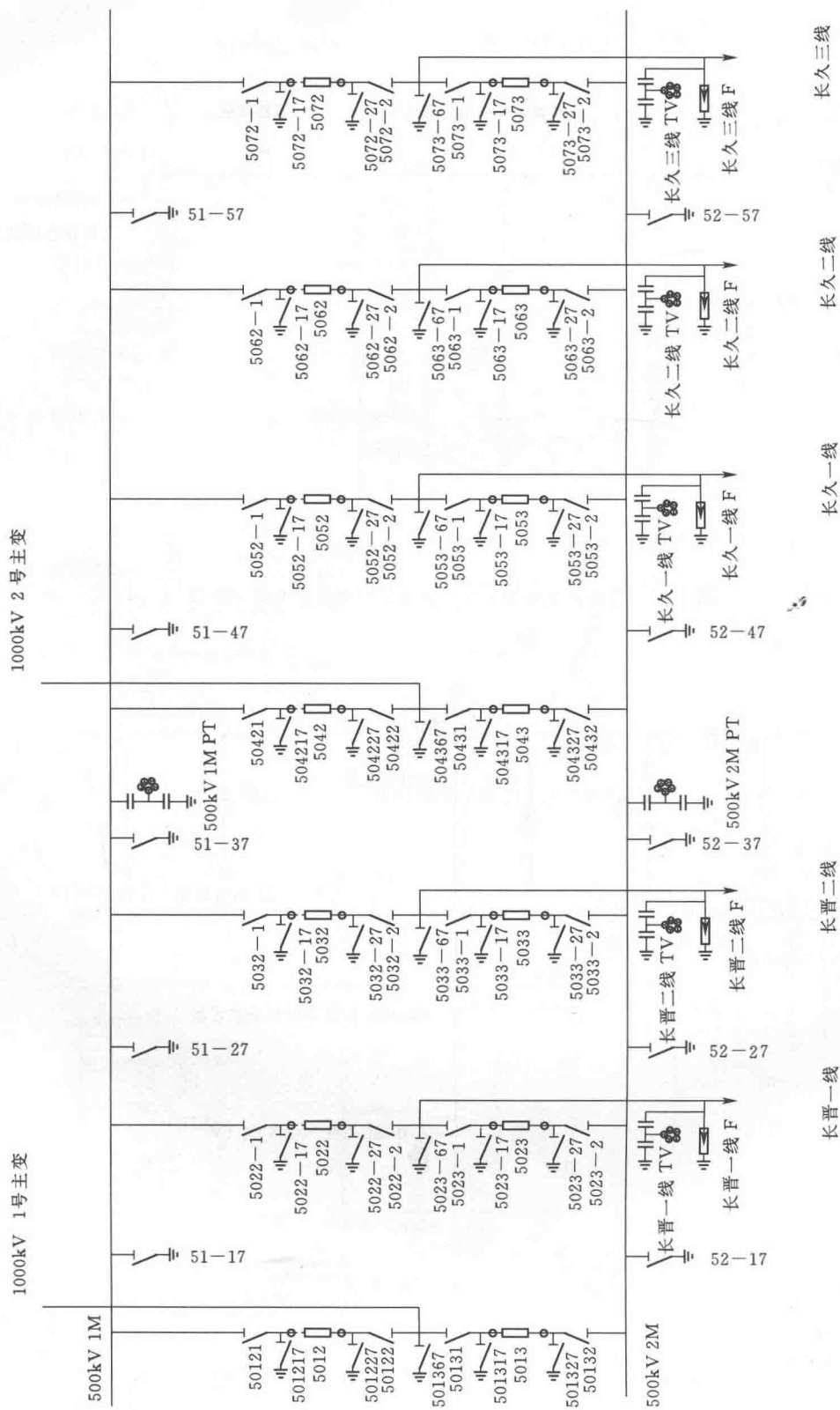


图 1-5 特高压交流变电站 500kV 系统主接线



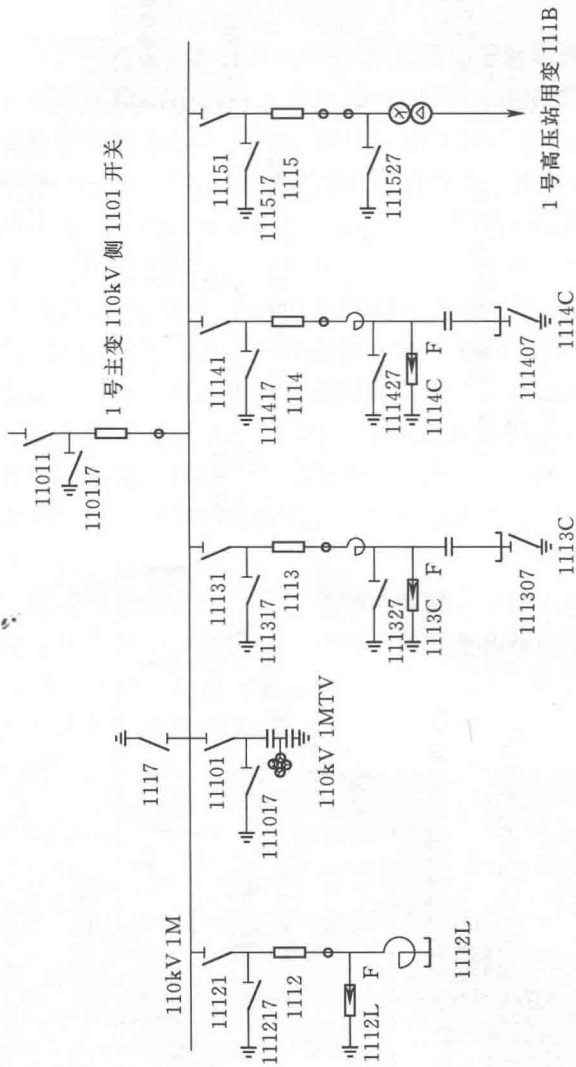


图 1-6 特高压交流变电站 110kV 系统主接线