

2016年 电力新技术目录

(电网部分)

中国电机工程学会

国家电网公司

中国南方电网有限责任公司

组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

2016年 电力新技术目录

(电网部分)

中国电机工程学会

国家电网公司

组编

中国南方电网有限责任公司



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

为推动我国电网新技术推广应用,引导新技术研发、新产品研制和产业化,中国电机工程学会联合国家电网公司和中国南方电网有限责任公司,组织编写了本书。

本书包括特高压输变电技术,高压、超高压输电技术,高压、超高压变电技术,高压直流及柔性直流输电技术,输变电设备运行、维护和管理,电力系统自动化,电力系统分析,配电与用电,电力系统通信,电力企业信息化,输变电工程设计与施工,防灾与减灾,电网规划与经济,新能源发电及并网共 14 类技术领域、232 项新技术,分别说明了各项新技术的技术原理、技术路线、作用与效益、应用与现状、研发趋势、应用条件及其相应应用目标与原则、注意事项。

本书可供电网相关部门、各单位及各生产厂家使用,以帮助更好地把握新技术发展方向,推进新技术的应用。

图书在版编目(CIP)数据

电力新技术目录. 电网部分/中国电机工程学会, 国家电网公司, 中国南方电网有限责任公司组编. —北京: 中国电力出版社, 2016.11

ISBN 978-7-5123-9982-2

I. ①电… II. ①中…②国…③中… III. ①电力工业—高技术—专题目录②电网—高技术—专题目录 IV. ①Z88: TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 264974 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 11 月第一版 2016 年 11 月北京第一次印刷

880 毫米×1230 毫米 16 开本 14.5 印张 422 千字

印数 0001—2000 册 定价 75.00 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

编审领导小组

组 长 郑宝森

副组长 谢明亮

成 员 陈小良 周 宏 郑耀东

编审工作组

组 长 陈小良（兼）

副组长 严 胜 杨 奕 李庆峰 曾庆禹 顾锦汶

成 员 （按姓氏笔画排序）

王玉玲 于 汀 王庆红 王 琦 王景朝 白晓民

孙建锋 严 胜 李广凯 李端姣 李震宇 杨 奕

张祖平 张黎明 陈羽飞 胡 巨 胡湘燕 姚建国

聂定珍 贾 磊 宿志一

学术秘书 陈羽飞（兼）

编写人员名单

统 稿	陈小良	李庆峰	李震宇	孙建锋	于 汀	胡湘燕	严 胜	杨 奕
	王庆红	王 琦	胡 巨	李广凯	聂定珍	陈羽飞	李端姣	贾 磊
	刘 怡	彭在兴	刘 仲	何永君	田 娟	惠 娜	黄 平	蒋晓春
	杨 宇	刘易雄	王 威	王 明				
第 一 章	戴 敏	何 樱	戴朝波	薄志谦	董勤晓	何慧雯	赵志刚	段晓辉
	杨 堃	李广凯	刘 仲	张 杰	郭慧浩	吴士普	孙珂珂	张 建
	闻福岳	许佐明	赵 淳	朱伟星				
第 二 章	戴 敏	何 樱	周立宪	李 欣	张 冰	兰逢涛	祝志祥	陈保安
	张 翀	夏 荣	陈铮铮	邓显波	张 锐	毛 艳	李广凯	刘 仲
	袁端鹏	狄 谦	徐卫星	尹 立	戴朝波	薄志谦	赵国亮	吴金龙
	张海龙	丁 勇	吕 斌	刘胜春	赵 淳	丘 明	朱伟星	
第 三 章	戴 敏	何 樱	倪益民	樊 陈	官 澜	金光耀	杨 堃	尹军华
	孙鹏程	冯 英	赵志刚	莫 娟	蔡胜伟	李广凯	刘 仲	周竹君
	姚永其	张一茗	王文焕	田志国	郝后堂	李 刚	邓茂军	王广民
	郭利军	朱伟星	卫泽晨					
第 四 章	李 跃	魏晓光	刘雪莹	杨一鸣	蓝元良	刘 堃	李 强	韩 坤
	杨 杰	胡四全	李广凯	刘 仲	高 冲	范彩云	栾洪洲	屈海涛
	孙珂珂	李 灿	张 静	赵 淳	朱伟星	王子安		
第 五 章	文志科	张 斌	赵 淳	毕建刚	夏开全	周水斌	杜振波	鞠登峰
	李广凯	刘 仲	张一茗	路光辉	赵志刚	耿景都	毛 艳	李文杰
	朱伟星	刘幸蔚						
第 六 章	李 强	於益军	潘 毅	吴 锟	于 汀	崔 晖	解 梅	杨国生
	耿 建	郎燕生	庄卫金	鲁广明	李晓磊	郑亚先	葛贤军	戴 赛
	周泽昕	王 伟	李时光	王文焕	范士雄	韩 巍	史东宇	王晓阳
	侯 宇	芮 钧	李江林	单鹏珠	王建平	赵 宇	樊占峰	邓茂军
	张兆云							

第七章	田芳	蔡靖	杨海涛	李勤新	王铁柱	林伟芳	鲁广明	史东宇
	张艳	黄镔	刘涛	陶向宇	李文峰	解梅	曹珅	丁平
	李莹	刘福锁	吕斌	于弘洋	彭慧敏	樊占峰		
第八章	孟晓丽	王金丽	王利	韩筛根	赵晓龙	宋祺鹏	寇凌峰	吴鸣
	李建芳	李二霞	向驰	颜湘莲	蔡伟	王军	乔光尧	李广凯
	刘仲	林繁涛	岳长喜	姜春阳	胡浩亮	阿辽沙·叶		巫钟兴
	戴永正	葛乐矣	陈良亮	刘畅	李德智	钟鸣	孟珺遐	蒋利民
	朱伟星							
第九章	郭经红	安春燕	卢立峰	丁慧霞	孔祥宇	冯宝	吕玉祥	郝为民
	吴剑巍	刘世栋	卜宪德	高强	李炳林	王峥	欧清海	汪玉成
	刘柱	赵高峰	付云琦					
第十章	王亚玲	董爱强	刘迪	宫晓辉	张宏伟	于卓	赵光	张立新
	高胜杰	洪功义	罗强	王超	陈洪锦	朱广新	郭晶	刘丹
	李广凯	刘仲	石佳磊	赖伟平	杨剑	张海超	胡博	魏志丰
	张安华	郭志伟	严勇	王纪业	李炜键	国涛	朱伟星	
第十一章	胡君慧	万建成	官澜	苟晓彤	江明	崔强	鲁先龙	郑卫锋
	洪功义	杨风利	潘吉林	马文广	江明	周立宪	常林晶	张子富
第十二章	程永锋	刘彬	张立春	邓桃	杨风利	许衡	李广凯	刘仲
	朱祝兵	邵丽丽	郭雨松	王勇	朱伟星			
第十三章	彭冬	薛雅玮	张艳	郭飞	杨海涛	齐晓光	宋毅	徐珊
	武宏波	吴新景	杜佳桐					
第十四章	刘纯	黄越辉	王跃峰	马烁	李琰	冯双磊	胡菊	王勃
	张菲	张军军	李庆	张元栋	李官军	李相俊	贾学翠	李红莉

前言

中国电机工程学会是我国能源与电力行业有着悠久历史的学术团体，一直致力于服务广大电力科技工作者和促进学科与行业的科技进步。为了指导我国电网新技术研究与应用方向，引导新技术研发、新产品研制和产业化，发挥学会跨行业、跨部门、跨地区和专业人才荟萃的优势，中国电机工程学会联合国家电网公司和中国南方电网有限责任公司，组织编写了 2016 年《电力新技术目录（电网部分）》。

该书是在充分调研国际电网新技术发展基础上，围绕我国电网发展需求，根据能源与电力科技发展的最新成果，广泛征集国家电网公司、中国南方电网有限责任公司、相关生产设备厂家、中国电机工程学会各分支机构等单位的先进适用新技术，并经专家多轮评估、反复审核后编撰完成的。全书共包括 14 类技术领域、232 项新技术，明确了各项新技术的技术原理、技术路线、作用与效益、应用与现状、研发趋势、应用条件及相应应用目标与原则和注意事项。

电力系统覆盖范围广，地区经济发展水平、环境条件、电网运行条件都存在很大差异，各单位可根据本单位、本地区电网的实际情况和具体特点，积极采取适宜的新技术，强力推进新技术应用，以科技创新推进电网降低成本、提高效率、保障安全、减低损耗、改善环境、提高管理水平，实现电网技术的升级改造，为建设我国的坚强电网提供技术支撑服务。

编者

2016 年 10 月

目 录

前言

1	特高压输变电技术	1
1.1	特高压交流输变电技术	1
1.2	特高压直流输电技术	9
2	高压、超高压输电技术	19
2.1	导线新技术	19
2.2	电缆新技术	26
2.3	新型绝缘子技术	30
2.4	灵活交流输电技术	33
3	高压、超高压变电技术	37
3.1	智能气体绝缘金属封闭开关设备（GIS）技术	37
3.2	智能化变压器技术	38
3.3	变电站（换流站）噪声控制技术	39
3.4	隔离断路器	40
3.5	电子式互感器	41
3.6	晶闸管辅助熄弧有载分接开关技术	41
3.7	多功能测控装置	42
3.8	间隔纵向集成装置	43
3.9	预制舱式二次组合设备	44
3.10	高可靠性就地安装小型化保护装置	44
3.11	支持主子站协同互动的一体化监控系统	45
3.12	变电运行驾驶舱	46
3.13	继电保护人员的信息化单兵装备和移动式检测平台	47
3.14	电网高精度测频系统	48
4	高压直流及柔性直流输电技术	50
4.1	柔性直流换流阀	50
4.2	柔性直流连接变压器	51
4.3	柔性多端直流控制保护设备	52
4.4	直流断路器	53
4.5	直流电缆	54

4.6	双回直流共站技术	55
-----	----------------	----

5	输变电设备运行、维护和管理	57
----------	----------------------------	-----------

5.1	输电线路巡检技术	57
5.2	输变电设备带电检测技术	59
5.3	输变电设备状态检修技术	62
5.4	输变电设备监测技术	68
5.5	输变电设备巡检机器人技术	75

6	电力系统自动化	79
----------	----------------------	-----------

6.1	智能电网调度控制系统	79
6.2	电力系统自动控制	82
6.3	交直流大电网安全经济运行	85
6.4	电网安全稳定控制	89
6.5	电力系统继电保护运行管理	93
6.6	电力市场交易运营	97

7	电力系统分析	100
----------	---------------------	------------

7.1	电力系统建模技术	100
7.2	电力系统仿真技术	102
7.3	电力系统安全稳定分析技术	106

8	配电与用电	110
----------	--------------------	------------

8.1	配电装备	110
8.2	配电自动化技术	117
8.3	配电网运维检修技术	121
8.4	农电技术	124
8.5	用电与能效技术	126
8.6	电测量技术	132
8.7	电能质量技术	138
8.8	分布式电源与微电网技术	140

9	电力系统通信	144
----------	---------------------	------------

9.1	电力骨干传输网技术	144
9.2	电力终端通信接入网技术	146
9.3	电力通信业务网技术	151
9.4	电力支撑网技术	154
9.5	电力传感网络技术	157

10	电力企业信息化	160
-----------	----------------------	------------

10.1	一体化信息集成平台及关键技术	160
10.2	云计算技术	164
10.3	大数据技术	165

10.4	移动信息化技术	168
10.5	电力业务系统及应用	169
11	输变电工程设计与施工	174
11.1	输变电工程设计技术	174
11.2	输变电工程建设(施工)技术	176
11.3	海上风电场电气系统设计技术	180
12	防灾与减灾	182
12.1	防污闪技术	182
12.2	输电线路防冰害技术	183
12.3	输电线路防雷技术	185
12.4	输电线路防舞防风技术	191
12.5	变电站抗震技术	193
12.6	电网主要灾害规律及分布图	195
12.7	输电线路防山火技术	196
12.8	电力系统应急处理与提高电网抗灾能力技术	196
13	电网规划与经济	202
13.1	大电网规划技术	202
13.2	电网规划方案可靠性和经济性分析技术	204
13.3	配电网规划技术	206
13.4	资产全寿命周期管理通用技术方法	207
14	新能源发电及并网	209
14.1	新能源发电并网能力及分析技术	209
14.2	测风/测光及新能源资源分析技术	210
14.3	新能源发电功率预测与性能评估技术	212
14.4	新能源检测评价及模拟电源技术	214
14.5	新能源优先调度与后评估技术	215
14.6	电池储能与控制管理技术	216

我国国民经济持续快速增长,未来能源和电力需求的空间大、刚性强,而主要能源资源产地与需求中心呈逆向分布,相距 800~3000km,全国范围优化配置资源能力严重不足,“煤电运”紧张矛盾反复出现,中东部地区大气环境污染严重,能源可持续供应面临巨大挑战。发展大容量、远距离、高效率的特高压交流输变电技术,推动能源结构调整和布局优化,构建科学合理的能源综合运输体系,是我国能源发展战略的必然选择和重要战略途经。

特高压交流输变电技术是指 1000kV 及以上电压等级的大容量、远距离交流输变电技术,是目前世界上最高电压等级的输变电技术。20 世纪 60~90 年代,苏联、美国、意大利和日本等国先后开展过理论和试验研究,但均未形成整套成熟的技术和标准。我国发展特高压交流输变电技术的创新难度极大,既面临高电压、大电流的电磁与绝缘技术挑战,又面临重污秽、高海拔严酷自然环境的不利影响。我国科研单位针对本国国情对特高压输变电技术在工程规划、设计、施工、调试、运行等方面进行了深入细致的研究,解决了特高压技术遇到的系统无功补偿、安全稳定协调控制、过电压与绝缘配合、防雷保护、潜供电流及其控制、设备研制和电磁环境等关键问题。

2005 年以来,晋东南—南阳—荆门 1000kV 特高压交流试验示范工程及其扩建工程、皖电东送淮南—上海特高压交流输电工程、浙北—福州特高压交流输变电工程等重点工程相继建成投运,极大地促进了特高压输变电技术的成熟和完善,电网先进适用技术取得较大突破。研制成功了世界首台额定容量 1000MVA 的单体特高压变压器、额定容量 320Mvar 的单体式特高压并联电抗器、额定短路电流水平 63kA 的特高压气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)、特高压串联电容补偿装置、特高压避雷器、特高压油气管道和支柱绝缘子等设备;解决了重污秽、高海拔、超/特高压同塔并架等关键技术问题;互感器现场校验及计量等技术也在特高压输变电工程中得到广泛应用和发展;成功实现特高压工程环境友好的目标,全面推动了我国电网的技术升级,带动了电力和相关领域的技术创新。

1.1 特高压交流输变电技术

1.1.1 特高压串联电容补偿技术

特高压串联电容补偿(简称特高压串补)技术是在特高压交流输电线路中串联电容器组,通过电容器组的容抗补偿线路的部分感抗,等效缩短线路的电气距离,减小功率输送引起的电压降和功角差,从而提高线路的输送功率和系统稳定性。串联电容补偿技术是目前国际上得到广泛应用的提高长距离交流线路输送容量的重要技术。如图 1-1 和图 1-2 所示,串补技术分为固定串补和可控串补。特高压串补可以大幅提高线路的输送能力和输电线路的利用效率,并增强电力系统的稳定性,实现远距离、大容量、高效率地输送电力,从而更能体现出特高压输电的优势,具有显著的经济效益和社会效益。

经过 80 多年的发展,串补装置的制造、试验、运行和维护技术已日臻成熟。自 20 世纪 90 年代以来,固定串补和可控串补技术的研究和工程应用在我国得到了迅速发展。成碧 220kV 可控串补工程、三堡东 III 线 500kV 固定串补工程、伊冯 500kV 可控串补工程、浑源 500kV 固定串补工程等国产串

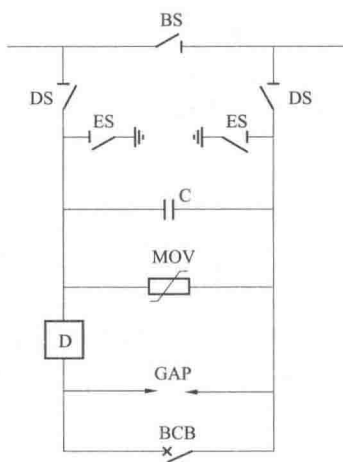


图 1-1 固定串补典型接线图

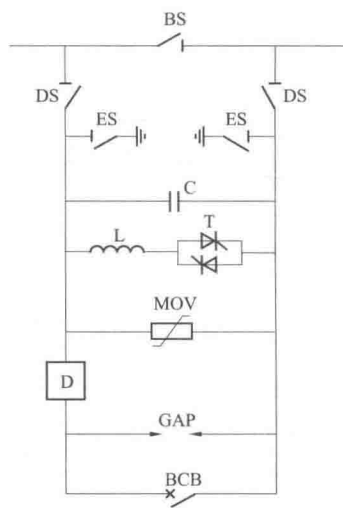


图 1-2 可控串补典型接线图

补工程先后建成并投运。为了充分发挥特高压线路的输电能力，自 2009 年开始，在充分吸取国产超高压串补研制和运行经验的基础上，我国开始自主研发特高压串补装置。研制的特高压串补装置满足串补电容器组最高额定电压 120kV、额定电流 6kA 的运行条件，串补用火花间隙和旁路开关等设备均能耐受电流峰值达 170kA 的电容器放电电流。在 2011 年 12 月，特高压串补装置在中线扩建工程中的成功投运，标志着我国已经掌握了特高压串补技术。特高压串补装置在世界范围内的首次应用充分表明我国在串补技术的研究、应用以及设备制造等方面取得了长足的进步，多项关键技术已处于国际领先水平，并具备了产业化和推广应用的基础。2016 年 7 月，1000kV 承德特高压串补成功投运。随着我国以特高压为骨干网架的坚强智能电网的快速建设，特高压电网规模将不断扩大、电网互联程度明显提高，远距离、大容量输电的发展对特高压串补技术的需求会越来越大，蒙西—长沙等多个特高压交流输电线路都将采用特高压串补。

应用目标与原则

- （1）以提高远距离、大容量输电为目标，在 1000kV 特高压长线路上，积极推进串补技术的应用，大幅提高线路输送能力的功能，抑制系统低频功率振荡和降低次同步谐振风险等方面的功能，优化电网的运行状态，提高特高压电网运行效益。
- （2）特高压串补安装地点、容量、固定串补和可控串补比例等应进行技术经济论证，并与其他解决方案进行比较，择优确定。
- （3）特高压串补在应用时应避免串联补偿线路与相关的汽轮发电机组产生次同步谐振。如果经计算有可能发生次同步谐振，应减少串联补偿电容器组的容抗值，避免次同步谐振的发生。
- （4）在 500kV 等级串补装置已经广泛应用的基础上，结合特高压中线扩建工程的串补运行经验和承德特高压串补的改进经验，加快开展特高压串补技术的工程应用。

应用注意事项

- （1）特高压输电线路加装串补装置应进行系统次同步谐振分析。
- （2）特高压输电线路加装串补装置后应分析对运行规程及继电保护的影响。

1.1.2 特高压同塔（杆）多回输电技术

特高压同塔（杆）多回输电技术是指在同一基塔（杆）上架设同一电压等级或不同电压等级的两回及以上线路的一种输电技术，与常规单回路架空输电线路相比，可明显减少线路走廊，显著增加单

位线路走廊面积的输送容量,实现电网建设与地区发展协调并进。

不同电压等级的同塔多回输电技术在美国、日本、法国、德国等国家都已得到广泛使用。目前在日本、美国、德国等发达国家的超高压电网中,同塔多回输电技术使用已十分普遍;巴西、印度、韩国等国家在 20 世纪 90 年代也相继采用同塔(杆)双回或四回输电线路。我国采用同塔(杆)多回输电始于 1980 年。目前国内在同塔(杆)多回输电工程的杆塔结构、导线布置形式、相导线排列方式、相间距离、电磁环境、绝缘配合、防雷保护、线路保护方式与故障识别、线路运行和检修(包括带电作业)和继电保护与控制等方面开展大量的研究,取得了大量研究成果,并已应用于实际的工程。至今国内 220kV 输电线路中已较多采用双回或四回输电;500kV 同塔(杆)双回输电技术在国内应用也较为普遍;500kV 同塔四回、750kV 同塔双回和 ±500kV 同塔双回输电均有投运的工程。随着输电电压等级的不断提高、社会和经济的发展以及环境保护对输电走廊要求的日益提高,超特高压输电线路采用同塔(杆)多回输电线路技术已成为必然趋势。如皖电东送苏州—上海特高压交流特高压输电工程采用同塔双回架设,输电能力等同于 3~4 条 500kV 同塔双回交流线路,可缩小走廊宽度 130~200m,大大节省了线路用地,工程节支和新增利润共计达到 4.5 亿元人民币,是充分利用走廊和跨江点等稀缺资源的必然要求。

应用目标与原则

(1) 以节省土地资源、提高单位线路走廊输送容量为目标,在线路走廊拥挤、人口稠密地区和树木较多的山区,应采用同塔多回输电技术。冰雪灾情多发地区不宜采用同塔(杆)多回输电技术。

(2) 特高压同塔(杆)多回输电线路的设计和建设,应重视输电线路的电磁环境,保证电磁环境指标符合有关国家标准,做到输变电工程与环境保护协调发展。

应用注意事项

(1) 总结特高压同塔双回所取得的研究成果和建设经验,注重对同塔多回输电线路运行数据的跟踪、积累,经过总结不断丰富运行经验,进一步提高特高压同塔多回输电技术的应用水平。

(2) 在电厂出口线路处采用同塔双回线路时,若双回线路同时发生故障,对电网的冲击非常严重。因此,电厂出口线路应尽量避免采用同塔双回输电技术。

1.1.3 特高压变压器新技术

特高压变压器新技术是指在针对工程需求,对特高压变压器开展的绝缘、温升或承受短路能力方面问题的设计、制造、试验等方面的技术问题。

随着国民经济的发展,电力需求不断增加,负荷密度不断增加。为了降低成本,特别是不断提高特高压输变电工程的输电经济性,需要容量越来越大、具有优良的结构设计、高性能和高可靠性的电力变压器。

国外有特高压变压器运行经验仅有日本、苏联和意大利三国。意大利特高压变压器的容量较小为 400MVA;苏联特高压变压器为两柱式,单柱容量 334MVA,单体容量 667MVA;日本特高压变压器单相容量 1000MVA,但为分体式,采用分体运输,每个分体为 500MVA,每个分体为三柱,单柱容量 167MVA。国外目前还没有更大容量的特高压变压器。

特变电工沈变、西电西变、天威保变、山东电力设备有限公司等国内企业自 2006 年以来为特高压交流试验基地、特高压交流试验示范工程及扩建工程、皖电东送工程相继分别研制了容量为 400MVA 和 1000MVA 的特高压变压器,积累了丰富的设计和制造经验。结合我国特高压输电技术的不断发展,根据实际特高压输电工程的规划情况,现有的 1000MVA 特高压变压器需要进一步提升容量,以便更好地与特高压线路输送容量相配合,目前国内联合研制的世界上首台单体式 1500MVA/1000kV 单相特高压交流变压器样机顺利通过全部型式试验项目,结果表明其具有电压高、容量大、损耗小、噪声低等

特点，主要技术性能指标达到国际领先水平。特高压大容量变压器体积、重量超限，目前仅适用于离港口距离较近的特高压变电站。因此，有必要开展现场组装式特高压大容量变压器的研制，400 万 kVA 变压器和可铁路运输的特高压变压器，满足工程需求的同事，解决交通运输问题，特别是中西部内陆地区苛刻的大件运输条件对特高压大容量变压器应用的制约。另外，结合工程实践，提出了站内整装运输需求，从而降低备用变更换周期，提高系统运行效率。

应用目标与原则

- (1) 实现特高压大容量变压器（1500MVA）应用，以进一步提升特高压工程输送容量。
- (2) 实现 4000MAV 高压变压器、以及可铁路运输的特高压应用，满足工程建设对于特高压变压器不同容量需求，以及满足可铁路运输的需求。
- (3) 实现现场组装特高压大容量变压器的应用，克服运输条件（如需通过山区、远离港口等水路运输等情况）对特高压工程建设的制约。
- (4) 应采用经过验证的成熟结构，确保特高压大容量变压器可长期安全稳定可靠运行；积极推进大容量变压器用材料和组部件的完全国产化。
- (5) 实现特高压变压器整装运输技术应用，缩短站内特高压变压器更换工期。

应用注意事项

- (1) 应充分考虑现场组装特高压大容量变压器对制造工艺和环节等带来的变化及可能对变压器绝缘性能等造成的影响。
- (2) 应研究现场组装特高压变压器漏磁和冷却方式，实现变压器温升控制。
- (3) 应结合现场组装式特高压大容量变压器特点，充分研究其现场组装工艺、安装环境控制方案、现场试验方案。
- (4) 结合运输条件，对特高压变压器绝缘、温升和承受短路能力等方面进行优化。
- (5) 应充分考虑高、中压套管固定，验证在变压器整装运输情况下，特别是经过铁轨接缝处的套管承受冲击的加速度控制。

1.1.4 特高压开关新技术

特高压开关新技术是指在针对工程需求，对特高压开关设备开展的绝缘、开断关合能力及功能应用等方面问题的新技术研究，涉及设计、制造、试验等多方面技术问题。我国成功研制出了代表世界最高水平的 63kA、1100kV 特高压开关设备，并且首次在国内完成全部型式试验项目，是目前世界上运行电压最高且参数最高的 GIS/HGIS 产品，实现了产业升级和跨越式发展。通过在特高压交流试验基地实测研究，在世界上首次研究测试了特高压全尺度下隔离开关操作产生的特快速暂态过电压（VFTO）水平及特点，并成功研制了 VFTO 校准装置，对未来特高压工程建设和安全运行具有重要的指导意义。另外，成功研制了特高压串联补偿装置用 1100kV 交流旁路隔离开关和接地开关，为串补装置的投入、特高压工程满负荷运行提供了技术保证；特高压交流隔离开关及超 B 类接地开关用于线路在无载荷情况下进行换接，以及对被检修的高压母线、断路器等高压电气设备与带电的高压线路进行电气隔离，还可用于倒闸操作过程中进行切合母线转移电流、电压互感器或避雷器等规定范围内的充电电流，以及空载变压器的励磁电流、空载母线的电容电流等。

我国特高压开关设备应用已积累了大量经验，但是，灭弧室、操动机构、瓷套管、绝缘件等核心元件的研制仍需不断深入推进及完善，关键部件的设计和制造技术仍需不断探索及实践应用。

与 500kV 和 800kV 等超高压开关设备相比，1100kV 特高压开关设备的设计、制造和试验均具有更大的难度，主要体现在以下几个方面：

- (1) 特高压开关设备绝缘水平提高，额定容量大，设备尺寸增加，机械强度和绝缘设计要求更

高,增加了设备制造、运输与安装的难度。

(2) 特高压断路器开断容量进一步增大,需开断直流分量衰减时间常数为 120ms 的 63kA 短路电流,灭弧室烧蚀更加严重,弧后的介质强度恢复难度更大。

(3) 特高压系统绝缘配合比其他系统允许的过电压倍数低,对操作过电压的抑制更重要且难度更大,断路器操作产生的过电压及隔离开关操作引起的 VFTO 均应采取合理的措施进行抑制。

(4) 特高压断路器的短路开断/关合试验,对试验条件、试验方法、试验回路提出了新的要求。尤其对整极试验采用电流引入法,进行直流分量衰减时间常数 120ms 的短路开断试验时,对试验设施要求很高。

(5) 特高压交流隔离开关基于绝缘要求,需要高度更高、强度更大的支撑绝缘子和操作绝缘子,增加了绝缘子设计、制造以及运维的难度。

(6) 为满足特高压系统对开关设备的需求,对制造厂的研发能力、工艺装备、质量控制、试验条件均提出了更高要求。

应用目标与原则

(1) 在特高压输变工程建设中,推广国产特高压开关设备。

(2) 国内已具备特高压断路器灭弧室装配及部分组部件的生产能力,但一些关键部件的国产化水平仍需提高,如喷口、均压电容、合闸电阻、支撑绝缘筒等,应逐步推进国内设计和制造。

(3) 特高压开关设备的操动机构目前仍以进口为主,而国内制造厂已成功研发,应稳步扩大国产化操动机构的应用。

(4) 特高压开关设备用瓷套管主要是进口产品,仍需推动国内瓷质套管和复合套管研制的研制和应用。

(5) 我国特高压盆式绝缘子等绝缘件的设计和工艺与国际先进水平仍有差距,应快速推进该领域研究并逐步扩大国产化应用。

应用注意事项

(1) 应充分考虑特高压开关设备制造工艺、试验检测、运输安装等环节对于内部绝缘性能等造成的影响,严格执行标准、反措要求,确保设备运行可靠性。

(2) 依据工程情况、设备状况,现场加强交接试验验证,将固有缺陷发现、消除在投运之前。

(3) 针对异物、盆式绝缘子、支撑绝缘子、绝缘拉杆等易造成内部击穿闪络的诱因,从部件质量、安装环境、检测技术等多方面研究。

(4) 基于不同运行环境、不同工况下的特高压开关设备,合理设计、布置伸缩节。

1.1.5 特高压并联固定及可控电抗器技术

特高压并联电抗器绝缘水平高,设备容量大,设备的主纵绝缘设计、漏磁和局部过热、噪声、振动等的控制是技术难点。根据在运行中电抗值是否可以调节,并联电抗器分为固定式和可控式。目前我国特高压工程中的 1000kV 并联电抗器全部是固定式,其铁芯结构有三种,见图 1-3~图 1-5。其中的单相单芯柱结构,具有节材、节能等特点。

可控并联电抗器可根据系统运行方式不同灵活调节输出容量,从而有效解决超/特高压输电系统中无功电压控制难题以及无功补偿和限制过电压间的矛盾,具有广泛的应用前景。可控并联电抗器可分为高阻抗变压器型(包括分级式和晶闸管控制式 TCT 式)和磁控式两大类,见图 1-6~图 1-8。

目前我国超高压磁控式和分级式并联电抗器在 500、750kV 工程中已有示范应用;已研制出了 1000kV、200Mvar 分级可控并联电抗器样机;超高压 TCT 式可控并联电抗器关键技术尚缺。

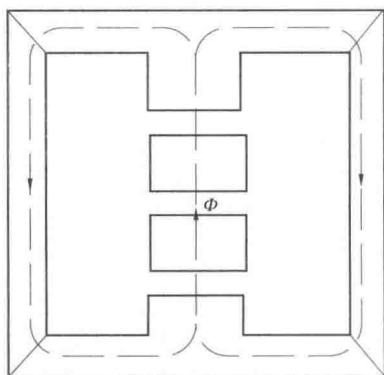


图 1-3 单芯柱结构

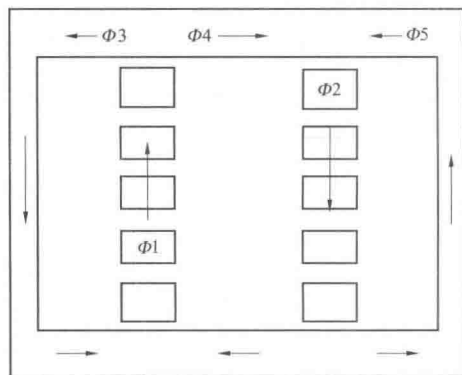


图 1-4 双芯柱结构

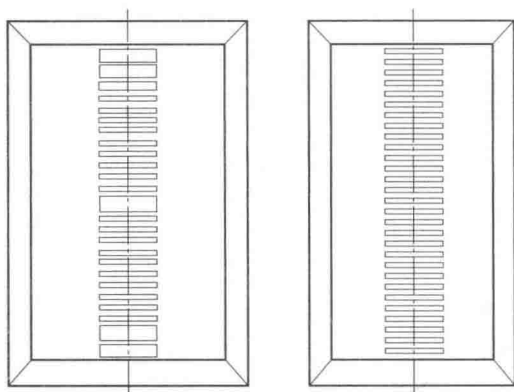


图 1-5 双器身铁芯结构

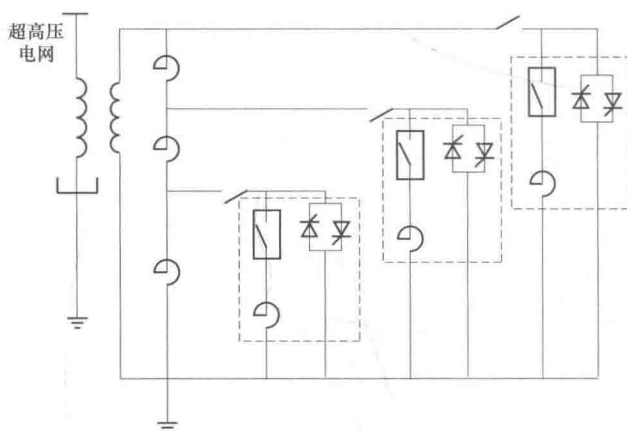


图 1-6 分级式可控并联电抗器原理图

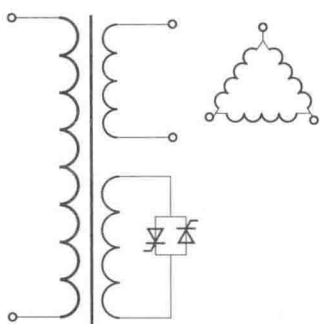


图 1-7 TCT 式可控并联电抗器原理图

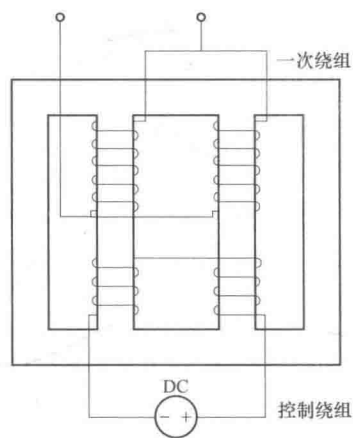


图 1-8 磁控式可控并联电抗器结构原理图

应用目标与原则

(1) 固定式特高压并联电抗器应用目标是高可靠性、节材、节能、环保（低噪声和振动）。特别是单相心柱式结构，适合运输的更大容量的设备应进一步的推广应用。

(2) 可控式特高压并联电抗器最终目标是实现有级可控或无级可控。分级式可控并联电抗器原理简单，响应速度快，适合应用于潮流变化剧烈但具有季节性或日负荷特性特点的超/特高压输电系统。磁控式、TCT 式可控并联电抗器可实现输出容量连续、平滑调节，在新能源发电大规模集中接入的超

/特高压交流输电系统中应用具有优势。

应用注意事项

(1) 对于固定式特高压并联电抗器, 要结合电抗器的安装位置(站址), 从改善线路电压分布、限制工频和操作过电压、无功补偿、设备制造运输能力等方面综合考虑设备选型; 配套用中性点接地电抗器的参数要合理。

(2) 对于可控式特高压并联电抗器, 应总结分级式可控并联电抗器工程经验基础上, 提升技术水平, 开展特高压示范应用。磁控式可控并联电抗器应用于超高压输电系统技术基本成熟, 具备推广的技术条件, 但仍需要不断进行技术优化, 降低成本; 应推进特高压磁控式可控并联电抗器、超高压 TCT 式可控并联电抗器关键技术研究工作。

1.1.6 特高压气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)技术

气体绝缘金属封闭输电线路(Gas-insulated Metal-enclosed Transmission Line, GIL)由同轴结构的中间导体和外壳构成, 中间导体为导电率较高的铝合金管, 用绝缘子加以固定; 外壳为铝合金或钢制, 管道中一般充以压缩 SF₆ 或 SF₆/N₂ 混合气体作为绝缘介质, 端部与 GIS、变压器等直接连接或通过套管连接。

世界上首条 GIL 于 1972 年投入商业运行, 自此 GIL 进入实用化进程, 最初用于发电厂和变电站 GIS 引出或联络时短距离延伸。目前, GIL 产品电压等级覆盖 73~1200kV, 在全世界范围内投入应用的总长度超过 700km。现有产品中, 550kV 和 420kV 等级的 GIL 应用最为普遍, 特高压等级 GIL 尚未有正式的产品, 仅有 AZZ/CGIT 公司于 20 世纪 80 年代在美国的 Waltz Mill 试验站建成了特高压 GIL 试验线段。近年来, 随着特高压输电技术的进步, 国内开展了特高压交流 GIL 样机的研制工作, 基本完成了特高压 GIL 样机的研发, 并在特高压变电站实现了替代 GIS 母线的示范应用。以特高压皖电东送某变电站为例, GIS 母线总长达到 1600m, 综合造价约 8 万元/m, 在 GIS 造价中所占比例超过 15%。

特高压 GIL 具有传输容量大、损耗小、不受环境影响、运行可靠性高、节省占地等显著优点。与架空线路或电力电缆相比, GIL 的传输容量更大、电能损耗更低, 但一次设备投资较大。相比于 GIS, GIL 标准管道和气室更长、连接和密封面减少, 采用内置式盆式绝缘子, 结构简化、成本降低、可靠性提高。随着公众环保意识的加强、设备制造水平的提高, GIL 将朝着小型化、低损耗、高可靠、绿色环保的方向发展, 在今后的工程中获得更为广泛的应用。

应用目标与原则

(1) 特高压变电站中 GIS 母线替代应用。特高压变电站输电容量日益扩大, GIS 母线长度越来越长、成本越来越高, 可以采用 GIL 取代 GIS 母线, 大幅简化 GIS 母线结构、降低成本、提高可靠性。此外, 采用 GIL 部分取代架空出线连接, 可以简化变电站布置, 节省占地。

(2) 江河跨越等特殊地形环境中作为输电线路应用。特高压输电线路跨越江河时须设立跨越塔, 施工难度大且存在雷电防护、覆冰、舞动等运行问题, GIL 的独特优势为输电线路跨江提供了全新的解决方案。

(3) 常规输电的特殊要求场合。作为常规输电方式应用于特殊要求场合的备用方式, 例如在架设输电线路困难、铺设电缆造价过高、抗电磁干扰能力要求高的场合等。

应用注意事项

(1) 应提升产品设计、制造和长期运行的可靠性, 在隧道、管廊应用中解决气体泄漏、绝缘放电和机械应力损伤等问题。

(2) 考虑技术经济性, GIL 应用宜以超、特高压等级电网应用为主, 用于 GIS 变电站母线升级、