

锅 内 过 程

华北电力学院 马 建 隆 主 编

水 利 电 力 出 版 社

内 容 提 要

本书着重阐述现代大、中型火力发电厂锅炉内部工作过程的本质。全书共分六章，内容包括：两相流体的流体动力特性；锅炉蒸发管内的沸腾传热；自然循环锅炉水循环计算和试验方法；强制循环锅炉和低循环倍率锅炉的水动力计算；直流锅炉的水动力计算；蒸汽净化等。

本书可作为“电厂热能动力”专业的教材，也可供有关的工程技术人员参考。

锅 内 过 程

华北电力学院 马建隆 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 10.5印张 231千字

1986年10月第一版 1986年10月北京第一次印刷

印数0001—2610册 定价2.50元

书号 15143·5930

前 言

配电自动化是技术进步的必然结果。要求供电线路没有停电事故是不可能的，但应用配电自动化达到停电频数少、时间短、供电恢复快则是完全可能的。这是配电自动化的第一个直接目标。接下来的要求是开关设备具备遥信、遥测、遥控、遥调的能力。这就要求有现代化的电网格局和与之相适应的开关设备。此外，为减少配电系统开关设备的投资而获得最佳的造价—收益比，必须有恰当的设计配合方案。要达到上述目的，必须有对这些开关设备及其配合使用透彻了解与掌握的人。本书正是在我国电力建设高速发展，配电网模式急需现代化改造，开关设备急需更新换代、推陈出新的背景下撰写的，希望它能为新技术的推广应用及人材的培养成长起到应有的推动作用，能对我国的配电自动化和现代化产生积极的影响。

断路器、熔断器本来是大家熟知的传统开关设备。鉴于它们与重合器、分段器的恰当配合，能起到自动隔离故障区段的目的，在讲解重合器、分段器的作用时离不开它们，它们与自动重合器、自动分段器已成为有内在联系的开关设备群体而存在；加之，很多重合器、分段器的开关本体部分是真空和六氟化硫开关，它们不象油开关那样为人们所熟悉，新型熔断器在结构上和性能上与老式熔断器相比，也作了很大改进。因此，本书在第二章中以相当的篇幅对真空、六氟化硫开关和熔断器作了必要的阐述。

新型成套组合电器既考虑了电网从运行控制的整体上对

开关设备的要求，又考虑了开关及其它电器元件之间的相互配合，往往集显示、保护、监控、自诊断于一身，能自行决定要否动作及如何动作，能远距离收发数据信息。成套组合电器是当然的配电自动化开关设备，代表着开关设备的发展方向，因此在本书中占有适当的位置。

第三章则是四、五两章乃至全书的基础，与全书各章节间互相呼应，力图使读者对开关设备的功能设置及其与系统结构、运行要求之间的内在联系有清晰的认识，对常用的短路电流计算方法有切实的理解和掌握。

全书取材于国内外大量文献、资料、会议论文、报告，也融进了编著者自己多年来的工作和所感所悟，该深的地方切中问题本质，该广的地方点到即止，让读者了解一个梗概。书中给出了一些适用的图表数据，并将电力主管部门对我国电网设计改造有指导作用的有关资料摘录附于书后，供使用。本书从基本概念的阐述到有关设备原理及应用举例都力求由面及点、居高临下、通俗易懂、简明实用，以利于扩大读者范围，使不同岗位的读者都能各有所得。

电力工业部水电农电司向世隆、杨洪义高级工程师（教授级）对全书作了仔细认真的审阅，提出了许多宝贵的改进意见，并提供了有价值的资料。华中理工大学电工理论教研室孙敏副教授对第三章的部分内容提出了认真的修改意见。在此一并致以深切的谢意。

由于编著者水平所限，难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

编著者

1994年11月

目 录

前 言

1. 绪论	1
1.1 城乡用户要求配电系统现代化	1
1.2 配电自动化的层次	2
1.3 当前技术条件下的配电自动化	4
1.3.1 故障自动定位和迅速切除故障	
1.3.2 以“四遥”为特征的计算机实时监控	
1.3.3 灭弧介质的无油化	
1.4 配电自动化开关设备的开发应用现状及前景	11
1.4.1 配电自动化涉及的开关设备	
1.4.2 配电自动化开关设备现状及前景	
参考文献	16
2. 配电自动化高压开关设备	18
2.1 自动重合器	18
2.1.1 重合器的功能及特点	
2.1.2 重合器的品种及典型结构	
2.1.3 重合器电子控制器	
2.1.4 重合器的时间-电流特性曲线	
2.2 自动分段器	48
2.2.1 自动分段器种类及结构	
2.2.2 过流脉冲计数型分段器	
2.2.3 电压-时间型重合式分段器	
2.2.4 分段器的电子控制原理	
2.2.5 分段器特征小结	
2.3 自动节能投切装置	64
2.3.1 线路补偿电容器自动投切装置	
2.3.2 配电变压器节能自动相数转换开关	
2.4 真空开关	68
2.4.1 概述	
2.4.2 真空的绝缘特性	
2.4.3 真空电弧的熄灭	
2.4.4 真空断路器在使用中的几个问题	

2.5 六氟化硫开关.....	83
2.5.1 概述 2.5.2 六氟化硫的绝缘特性 2.5.3 六氟化硫的 灭弧特性	
2.6 熔断器及熔断件.....	98
2.6.1 工作原理及有关术语参数 2.6.2 熔断器的分类及结构	
2.6.3 值得注意的几个问题	
2.7 新型成套组合电器.....	115
2.7.1 环网开关柜 2.7.2 箱式变电站 2.7.3 充气开关柜	
2.7.4 熔断器-接触器组合开关柜(F-C回路开关柜) 2.7.5 成套组合 电器的智能化	
2.8 配电开关设备的运动控制与监测.....	126
2.8.1 无线寻呼移动通信 2.8.2 高压开关设备“四遥”的实施方法	
参考文献.....	134
3. 配电系统结构及故障电流计算	138
3.1 配电系统的常见接线方式.....	138
3.2 单相短路电流及三相对称短路电流的计算.....	141
3.2.1 短路概述 3.2.2 标么制与标么值、阻抗百分比	
3.3 短路接地故障的计算与分析.....	154
3.3.1 对称分量法及序阻抗、序网络 3.3.2 单相接地故障的计算	
3.3.3 不同接地方式的故障特点	
3.4 故障电流计算步骤与方法小结.....	167
3.5 停电后负荷再启动所引起的短时浪涌电流.....	171
参考文献.....	175
4. 开关设备的动作配合	177
4.1 概论.....	177
4.1.1 传统的三段式过流保护动作配合的基本原则 4.1.2 开关设备 的基本技术参数及其选择应用	
4.2 喷逐式熔断器之间的配合.....	183
4.2.1 利用时间-电流曲线选择熔断件 4.2.2 用配合表选择熔断件	

4.3 限流熔断器配合.....	189
4.3.1 电源侧限流熔断器与负荷侧喷逐式熔断器的配合	4.3.2 负荷侧限流熔断器与电源侧喷逐式熔断器的配合
4.3.3 限流熔断器与限流熔断器的配合	4.3.4 后备限流熔断器与喷逐式熔断器的组合使用
4.4 保护变压器、电容器及电动机的熔断器选择.....	195
4.4.1 保护变压器的熔断器选择	4.4.2 保护电容器的熔断器选择
4.4.3 保护电动机的熔断器选择	
4.5 重合器与熔断器的配合及“K”系数.....	203
4.5.1 重合器与电源侧熔断器的配合	4.5.2 重合器与负荷侧熔断器的配合
4.6 断路器(继电器)与熔断器的配合.....	208
4.7 重合器与重合器的配合.....	214
4.7.1 液压控制重合器的配合	4.7.2 电子控制重合器的配合
4.8 重合器与断路器(继电器)的配合.....	223
4.9 分段器与重合器及熔断器的配合.....	226
4.9.1 液压控制分段器与重合器的配合	4.9.2 电子控制分段器与重合器的配合——各种抑制功能及应用举例
4.10 重合器的误动作.....	235
4.11 重合器、分段器在环网供电中的应用.....	237
4.12 自动负荷转换供电.....	242
4.12.1 用电子控制开关实现转换供电	4.12.2 用重合器实现转换供电
参考文献.....	244
5. 配电系统中开关设备的选用方法.....	246
5.1 引言.....	246
5.2 预备知识.....	247
5.3 用于定性选配开关设备的方法.....	251
5.4 与“成本-收益”法相关的基础知识及数据.....	255

5.4.1 基础知识	5.4.2 数据	
5.5 使用开关设备的收益计算		259
5.5.1 电源侧断路器	5.5.2 柱上自动重合器	5.5.3 柱上自动分段器
5.6 柱上熔断器收益计算		268
5.7 柱上隔离开关收益计算		271
5.8 邻网联络线		276
5.9 成本-收益法应用举例		279
参考文献		287
附录A 农村电网建设的有关资料		288
A1 关于农村小型化变电站建设的意见		288
A2 农村变电站模式方案说明(节选)		290
附录B 城网建设的有关资料		302
B1 关于加强城市中、低压配电网改造的若干意见		302
B2 城市电网接线方式推荐意见		305
附录C 自动重合器有关资料		311
C1 国产10kV自动重合器		311
C2 国内常见英美产重合器		316
附录D 国内外分段器的有关资料		323
附录E 熔断器及柱上断路器有关资料		326
附录F 短路计算常用资料		340
附录G 某些统计资料及事故率要求		349

1. 绪 论

1.1 城乡用户要求配电系统现代化

随着社会经济的日益发展,人民生活水平的不断提高,无论是繁华的都市还是偏远的乡镇都要求有现代化的配电系统与之相适应。这样说的理由是:无论城乡都有与日俱增的负荷要求,都希望得到充足、可靠、合格、廉价的高质量电能。

对城市而言,城市规模不断扩大,高层建筑及家用电器日益增加,统计资料表明,城区面积未变,而不到10年的时间里负荷密度却成倍增加。以北京为例,150km²的市中心区域,1981~1989年负荷密度增长率为109%(1989年已达4333kW/km²),这是尚未“空调热”时的情况。日本东京1980年,610km²的市区面积平均负荷密度达14600kW/km²,最繁华的银座商业区达12.1万kW/km²。把如此巨大的电能送入负荷中心,然后分配给成千上万的用户,并且做到通电迅速,使用安全,事故停电频数少、时间短,不污染环境,不酿成火灾,不是一个简单的问题,它要求有现代化的配电系统设计和装备。

对农村而言,没有通电的地方要求早日通电,已经通电的地方同样要求有高质量的供电水平。有些工业发达国家,城乡已难以区分。我国目前不少乡镇企业就设在村庄内,有的自动化水平已相当高,一些独资、合资企业引进国外最新设备,且发展异常迅速,规模愈来愈大。普通农民家庭电视机、洗衣机等也日益普及,现代化的养鸡场、养鱼池、食品

加工厂等农副业生产也对供电质量提出了越来越高的要求。江苏省的苏南一带，广东省的顺德、新会等地区由于乡镇企业的大力发展也早已出现城乡难分的局面。从长远看，我国广大的农村电网必将与城市电网水平相近，无优劣之分，其区别仅在于负荷密集程度及地皮的宽松程度不同而造成的差异。虽然从整体上看，农村文化技术水平要低一些，资金也欠缺一些，但这不仅不能成为降低农村电网供电水平的借口，相反却说明农村电网应有更高的自动化与智能化水平，开关设备应象“傻瓜”相机一样易于操作、便于掌握才更适应。农村变电站要小型化、造价低、安全可靠、无人值班，这是制订“农村变电站模式方案”时早已论证过的公认结论（见附录A）

1.2 配电自动化的层次

自80年代以来，由于微处理器(micro processor)与微控制器(micro controller, 又称单片机)在强电领域的成功应用，使欧美国家和日本等发达国家的配电自动化以惊人的速度向高层次推进。在这里，“层次”这个术语表征着对“技术集成(technology integration)”程度的划分，它涉及到软硬件的先进程度，系统模式及管理方式、经济利益及风险、事故所涉及的深度和广度等各个方面。文献[1]中类比生物学中的“细胞器—细胞—器官—生物体”将“技术集成”分作四个层次：单体(stand alone)—组合体(cells)—群体(linked islands)—全集成(full integration)。对配电自动化而言，联网规模愈大，控制管理所涉及的问题就愈多愈复杂。简洁地讲，配电自动化的“层次”如图1-1所示。

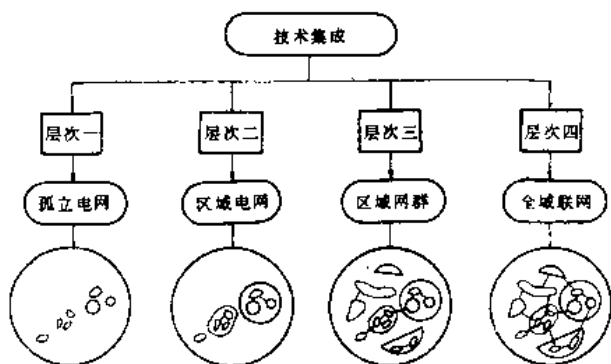


图 1 1 配电自动化的“层次”示意

图中:

“单体”相应于已应用微机控制的孤立电网，线路上装有重合器、遥控终端元件等智能设备，但其控制、保护及事故影响等都局限于本网所辖线路。

“组合体”相应于地方性的区域电网，电网间的通信联络上了一个大台阶，控制和管理的目标已是多方面的，电网间除了纵向联系外，横向联系随时可建立，也许还具有随时可接入的小孤立电网。这个层次较之孤立电网网内变电站及馈线的自动化与供电可靠性程度更高。

“群体”相应于大范围内的区域电网组合为统一管理的区域网群，虽然正常运行时各电压等级呈放射状串接，但一旦需要，电网结构随时可调整，尤其在10kV级电网，供电部门可根据负荷及故障等情况迅速合理地作出最佳调整或网络重构，接于此变电站的主馈线马上可转由彼变电站供电。电网愈大，非正常情况对用户所造成的影响愈小。

“全集成”相应于全国甚至全世界范围的全域联网。技术已发展到全域内所有电网已被高度完善的信息网所联络和

管理，不仅供方对用户的情况了如指掌，而且用户要求电网供电是自动化的，这可能包括现在尚未开发或尚未问世的技术及管理方式的成功应用。

1.3 当前技术条件下的配电自动化

对配电自动化所作的四个层次的划分从电网规模及管理方式上给出了清晰的轮廓，但就高技术的应用而言，四个层次间并无严格的界线。如实时监控、自动数据读取等在层次一就已出现，而负荷调整及网络重构等在层次二、三都会不同程度的涉及。据近年来的国际配电会议上对2000年配电系统所作展望与讨论的大量文章所介绍的情况看，在当前技术条件下，对配电自动化的要求可概括为以下几个方面。

1.3.1 故障自动定位和迅速切除故障

无论城市还是乡村，无论架空线路还是电缆线路，一旦发生故障，需要自动识别是瞬时性故障还是永久性故障。若为瞬时性故障应迅速排除；若为永久性故障，要迅速自动隔离故障段，使停电时间和停电范围限制到最小。要做到这一点，就要求有新的电网格局和比断路器“智能”更高的开关设备，例如柱上自动重合器和自动分段器。它们与断路器最大的区别就在于自具检测与控制操动能力，能视故障是否存在，且不依赖继电保护装置而自动完成预期的合分及闭锁操作。这是对配电自动化的第一个要求。

显然，按用电负荷自然发展来布点架线而逐渐形成的电网，不能满足这个要求。这种电网多为单回线放射式结构。其自动化程度一般只能靠断路器的重合闸去排除瞬时故障；若永久性故障，往往是一条线全停，人工找到故障点予以修

复后才能再送电。图1-2示出了能满足配电自动化的第一个要求的配电网示例。该配电网为网状结构、开环运行，每个支路都是一个网孔或两个网孔的一部分，因而每个支路都可以从一个以上的电源得到供电。由于是开环运行，在一些关键处设有常开点（如图中的联络型分段器QO4），因而在正常运行时每条支路只与一个电源相接，并视负荷分布情况装设若干台分段设备。一般情况下，A、B及C段由重合器（或断路器）QR1供电，一旦A处发生永久性故障，分段器QO1、QO2在预期的操作循环后最终将闭锁在分闸状态，QO4自动合上，B处由重合器QR3供电，保证了除A段外的各处供电。若B处发生永久性故障，QO2、QO3将最终闭锁在分闸状态，QO4最终保持在开位置，人工合上起联络作用的分段隔离开关

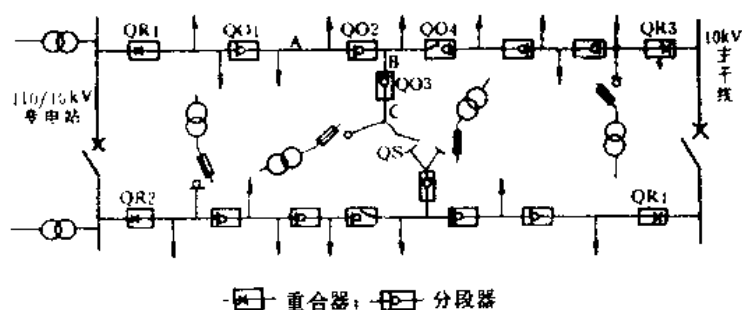


图 1-2 部分架空配电网结构示意图

QS，保证C段的供电。若故障发生在C段，QO4一直不动作，重合器QR1，分段器QO1、QO2、QO3在预定的动作后，仅QO3闭锁在分闸状态，保证了全线路健全段的供电。上述线路中，QR1、QR2、QR3、QR4如果改为断路器，则要求其有一次快速重合闸（消除瞬时故障）后二次延时重合闸的功能。这只是一个例子，至于各开关设备是如何自动操作的，如何根据负

荷大小和线路长短经济合理地安排和选择分段点及开关设备，如何正确整定其保护配合的关系，重合器、分段器的完整定义是什么等，将在以后的有关章节逐一讨论。

1.3.2 以“四遥”为特征的计算机实时监控

所谓“四遥”，即遥信、遥测、遥控、遥调。四遥信息的交换、数据的读取、命令的发送都可由控制中心与受控点间的计算机或智能终端通过“数据流”的传递去完成。实现四遥可以有线的，也可以是无线的。有线方式如配电网路载波、单独配备的电话专线、光缆等；而无线方式多用超短波段的频率，如美国多数农电合作社，目前采用900MHz。如实现了以四遥为特征的计算机实时监控，整个配电系统的实时状态，如电压、电流、负荷分布、各开关的分合位置，可以说从全局到某一具体设备的状况（如开关的动作次数、累计开断电流等）都可随时显示于屏幕，供查看。如在风暴情况下，某处发生了永久性故障，故障段被迅速隔离后，运行人员接到报警信号，通过人机接口能迅速得知是哪条线、在何区段、多少负荷尚未送电。英、法、日等发达国家，早已实现一个基地变电站控制十几个乃至百余个无人值班的二次变电站，且已有多年的运行经验。目前在一些国家的部分配电系统已具备相当于前述层次二、三的自动化水平。下面通过对图1-3的讲解，使读者对线路及设备的自动化作一梗概了解。

图1-3为澳大利亚维多利亚州某“不断电自动配电系统”的部分接线。该系统的中性点经电阻接地，能将70%以上的相对地故障电流限制在1500A以下，电站与线路开关设备间的通信联络由光缆沟通。该系统的主要特点有：

(1) 自动隔离故障。线路断路器QF都有开断1500A故

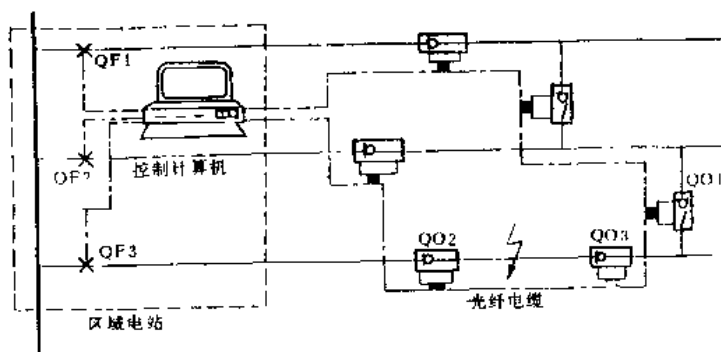


图 1-3 “不断电自动配电系统”
的部分接线

障电流的能力。图中当QO2、QO3间发生故障时,若为相对地故障,联络型分段器QO1将闭合,分段器QO2、QO3将分闸而使故障段隔离。这里采用了“合先于分”的办法以达到健全段不断电的目的。图中QO3以后的用户因QO1的关合而感觉不到有危害的电压降落,这比图1-2中的隔离故障办法又有所改进。若QO2、QO3间发生相对相故障,馈电断路器QF3按正常设定的操作到闭锁,分段器QO2和QO3打开,QO1及馈电断路器QF3合闸,恢复线路无故障段的工作。因此,这里的所谓“不断电”是针对70%以上的相对地故障和负荷管理而言的。

(2) 负荷管理。系统能检测过负荷的馈线段,并在不断电的情况下自动调整电网连接,完成负荷块的转移,消除过负荷段。这一功能的实现,能充分利用已建线路,推迟了因负荷增长所要求的系统扩建或导线增容。

(3) 实时监测。能精确地实时监测瞬时变更的系统状态,及时评价供电水平,对保证供电质量极具意义。由于能

准确地告之用户停电与恢复时间，与用户的关系更融洽

(4) 数据记录、能完成诸如负荷电流、故障详细情况的自动记录，这也使得系统的扩建不至盲目花费，针对性强。

显然，(2)、(3)特点对开关设备不仅在可靠性上要求更高，在自动化程度上也要求更高，除要求重合器、分段器等要自具检测及控制、操动能力外，还要求具有各种带微电脑的机电一体化的成套组合电器。这种成套组合电器既满足了电网从运行控制的整体上对开关设备的要求，又考虑了开关与其它电器元件间的相互配合，集显示、保护、监控、自诊断于一身，通过各种传感器及其它传输变换元件能经常监视上回路的温升、电压、电流、气体状态等参数并决定自身要否动作及如何动作。如法国电力公司(EDF)已用MG公司的开关设备组成具有四遥功能的配电网。

由于开关设备服务地域、负荷性质、电网容量及接线方式等的不同，要求有多品种的成套组合电器。70年代中后期逐渐投放市场的环网供电单元(RMU)、充气式开关柜、F-C回路柜、箱式变电站等就是为了适应市场需求应运而生的组合化、小型化设备。它们在增强供电可靠性、减少占地面积、缩短基建和调试时间、协调美化环境等方面给人以全新的供电现代化感觉。当然，要普遍达到上述自动化水平不是一二年的事，也不可能一步到位，只能分步走，从低的自动化程度到高的自动化程度。本书第二章还将对成套组合电器略作介绍。

1.3.3 灭弧介质的无油化

衡量配电系统现代化的另一重要标志是设备的无油化程度。因为用油作绝缘和灭弧介质，时刻潜伏着火灾和爆炸危

险，且检修维护工作量大，不适应故障自动定位和负荷自动调整中的频繁重合分。回顾开关设备的发展史，人们在灭弧介质和熄弧方法的寻求和探索上走过了曲折的历程，从在大气中灭弧的简单的角形间隙到利用油、水、磁吹、压缩空气、产气材料、真空、六氟化硫作为灭弧介质的各种型式的开关设备，不断更新改进。到目前为止，真正能立足市场、广为应用的断路器有多油、少油、真空和SF₆断路器（产气材料多用于负荷开关和熔断器中）。只是由于各种背景条件的不同，使它们在时间的先后上，在不同的国家和地区各自占据着不同的位置。在一些工业发达国家自70年代始就提出了无油化问题，在高压、超高压、特高压领域，开关设备的灭弧介质几乎为六氟化硫的一统天下是众所周知的。在中压领域，日本70年代末就基本实现了无油化，1981年就开发了77kV的SF₆绝缘变压器（美、法等国开发得更早），在我国无油化箱式变电站的呼声也日渐升高。就开关设备而言，取代油断路器的主导产品，世界各国无一不是真空或SF₆作灭弧介质的断路器。这是由于它们电寿命长，可以做到少维修或不检修的必然结果，也是配电开关设备要自动化、现代化的必然结果。

SF₆断路器由第一代的双压式、第二代的压气式发展到今天第三代的自能式，大大简化了结构，降低了操作功，对其灭弧机理、运行特性、密封技术的认识也日趋深刻，因而正广泛应用于配电领域。真空灭弧室由平板式触头、横磁场触头到今天的纵磁场触头，优化了电场结构，改善了触头材料，提高了触头表面的有效利用面积，减小了灭弧室尺寸，同时，其开断性能也得以改善。真空及SF₆开关设备在实现中压无油化的进程中正并驾齐驱、竞相发展，且从目前的势头