



邵先锋 刘流 王震海 石雪梅 编著
李卫国 朱克亮 主审

超(特)高压 工程电气专业知识应用

CHAO TE GAO YA
GONGCHENG DIANQI ZHUANYE ZHISHI YINGYONG

非外借



邵先锋 刘流 王震海 石雪梅 编著
李卫国 朱克亮 主审

超(特)高压 工程电气专业知识应用

CHAO TFA
GONGCHENG DYE ZHISHI
OYA
NYE ZHISHI YINGYONG



合肥工业大学出版社

内 容 提 要

《电力发展“十三五”规划(2016—2020年)》指出,国家将进一步调整完善区域电网主网架,探索大电网之间的柔性互联,加强区域内省间电网互济能力;全国新增500千伏及以上交流线路9.2万公里,变电容量9.2亿千伏安。电力的快速发展促进了社会经济发展的同时也带来了繁重的建设任务,对专业人才提出了更高的要求。为满足电力建设管理人员所需的专业知识,启动了《超(特)高压工程电气专业知识应用》的撰写工作。

全书共四章,主要内容包括电力系统专业基础理论应用、电网设备与材料的应用、电网试验专业知识应用、变电站调试专业知识应用等内容。本书站在当前电网建设的前沿,将专业理论知识与当前超高压、特高压工程建设实际应用紧密结合,用通俗的语言、经典实际案例和大量的实体图片,使专业知识简单化、具体化,使电网建设管理者能够快速熟悉电网建设工程中电气专业的相关知识和业务,达到快速入门并适应电力建设高速发展的需要。

图书在版编目(CIP)数据

超(特)高压工程电气专业知识应用/邵先锋等编著. —合肥:合肥工业大学出版社, 2018. 12

ISBN 978 - 7 - 5650 - 4275 - 1

I. ①超… II. ①邵… III. ①电网—电力工程 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 271335 号

超(特)高压工程电气专业知识应用

邵先锋 刘 流 王震海 石雪梅 编著

责任编辑 张择瑞

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2018年12月第1版
地 址	合肥市屯溪路193号	印 次	2019年1月第1次印刷
邮 编	230009	开 本	787毫米×1092毫米 1/16
电 话	理工编辑部:0551-62903204 市场营销部:0551-62903198	印 张	15.5
网 址	www.hfutpress.com.cn	字 数	340千字
E-mail	hfutpress@163.com	印 刷	安徽联众印刷有限公司
		发 行	全国新华书店

ISBN 978 - 7 - 5650 - 4275 - 1

定价:98.00元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社市场营销部联系调换。

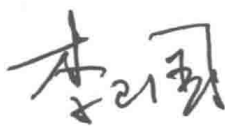
| 序 |

国家发展改革委、国家能源局《电力发展“十三五”规划（2016—2020年）》预测2020年全社会用电量将达到6.8万亿~7.2万亿千瓦时，年均增长3.6%~4.8%，同时规划明确要筹划外送通道，合理布局能源富集地区外送，建设特高压输电和常规输电技术的“西电东送”输电通道，增强资源配置能力，进一步优化电网主网架，加强省间联络线，探索大电网之间的柔性互联，加强区域内省间电网的互济能力；重点实施大气污染防治行动12条输电通道及酒泉至湖南、准东至安徽、金中至广西输电通道；建成东北（扎鲁特）送电华北（山东）特高压直流输电通道，解决东北电力冗余问题；适时推进陕北（神府、延安）电力外送通道建设等。宏伟蓝图已绘就，“十三五”期间将新增“西电东送”输电能力1.3亿千瓦，2020年将达到2.7亿千瓦，全国新增500千伏及以上交流线路9.2万公里，变电容量9.2亿千伏安，电力建设将迎来高速发展的新时代。

面对电力需求的快速增长，能源开发重心不断西移，特高压、大容量、远距离、新技术、新装备、大规模的电网建设任务悄然而至。良好的电力发展机遇背后是繁重的建设工作和急待提升的专业技术、智能化设备、施工装备、管理能力和人员技能，挑战无处不在。《超（特）高压工程电气专业知识应用》站在交、直流电网建设的角度，总结提炼了国内超、特高压工程的建设和技术应用情况，将电网建设的电气专业理论与实际应用密切联系，系统地剖析了当前电网建设中电气专业的理论知识和应用水平，语言通俗易懂、图表明晰、案例经典，反映了当前电网建设的最新高度和要求。

此书内容丰富、涵盖面广，从交、直流系统基础理论到设备和材料的应用、到电气试验、到阶段调试，深入浅出地介绍了当前电网建设的最新技术和装备水平，每章内容均具有很强的针对性和适用性，有较高的学习参考价值。

相信《超（特）高压工程电气专业知识应用》的出版，必将为电网建设人员专业技术水平的快速提升和持续提高发挥积极作用。



2018年10月10日

| 前 言 |

2015年9月26日，习近平主席在联合国发展峰会上倡议“探讨构建全球能源互联网，推动以清洁和绿色方式满足全球电力需求”。《电力发展“十三五”规划（2016—2020年）》指出，国家将进一步加大电力设施建设，合理布局能源富集地区外送，建设特高压输电和常规输电技术的“西电东送”输电通道，新增规模1.3亿千瓦，2020年达到2.7亿千瓦左右；电网主网架进一步优化，省间联络线进一步加强；进一步调整完善区域电网主网架，探索大电网之间的柔性互联，加强区域内省间电网互济能力；全国新增500千伏及以上交流线路9.2万公里，变电容量9.2亿千伏安。电力事业迎来了发展的春天。电网建设尤其是特高压骨干网架建设将在今后一段时间内持续快速发展。

电力发展离不开大电网输送电能，以满足日益增长的用电负荷。电网分为交流电网和直流电网，它是电力行业中除发电厂以外的变电站、开关站、换流站和输电线路工程的统称。交直流电网建设工程包括发电厂外至用户端的各电压等级变、配电及线路工程的建设，是电力工程建设的关键组成部分，是构建坚强智能电网、保证电力安全稳定运行和可靠供电的重要环节。

良好的电力发展机遇背后是繁重的建设任务。面对人力资源紧张、建设岗位人才专业素质参差不齐、涉及专业知识领域众多、建设管理手续繁、管理流程长等诸多困难，给繁重的建设任务提出了挑战。本书从交直流电网建设的角度逐一介绍了电网建设电气专业的知识应用，站在当前电网建设的前沿，结合国内超高压、特高压工程的建设情况，重点突出知识应用，将专业理论与实际应用紧密结合，用通俗的语言、经典的案例和大量的实体图片，

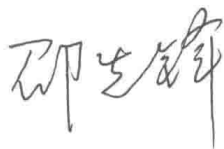
使专业知识条理化、具体化,使建设管理者能够快速熟悉相关专业知识和业务,适应电力建设高速发展的需要。

全书共四章,主要内容包括电力系统专业基础理论应用、电网设备与材料的应用、电网试验专业知识应用、变电站调试专业知识应用等内容。其中第一章介绍了电力系统概述、电力发电厂、变电站和换流站、通信与自动化系统、输电线路和电网发展概况;第二章介绍了交流电气设备应用、直流电气设备应用、通信设备应用、输电线路材料应用;第三章介绍了电气试验概述、变电站电气试验应用、输电线路电气试验应用;第四章介绍了变电站调试专业概述、变电站分系统调试、变电站系统调试、变电站启动调试等内容。

全书将具体应用融入专业知识,检验实践、提炼真知、学用结合,可作为电力行业建设管理人员的专业书籍,高等院校的工程项目管理、电气工程及自动化、工程监理、工程造价等专业参考书目,也可作为电力行业基建人员的岗前培训教材,供工程设计、施工、调试、试验、运行、质量监督、物资管理、造价管理、咨询等相关技术人员学习参考。

全书在撰写过程中参阅了近年来有关电网建设方面的专业书籍,吸收了其最新内容和研究成果,谨向这些著作的编者致以诚挚的谢意。同时,本书还凝结了国网安徽省电力有限公司及建设分公司各级领导和诸多人员的关心和帮助,对本书的出版提出了极具建设性的意见,在此一并致谢。最后,向百忙中担任本书主审的李卫国正高级工程师和朱克亮高级工程师表示诚挚的谢意。

由于学术水平有限,时间仓促,书中难免存在错误和疏漏之处,恳请广大读者批评指正。



2018年5月

C 目 录

Contents

第一章 电力系统专业基础理论应用	001
第一节 电力系统概述	001
1. 交流系统	003
2. 直流系统	012
第二节 电力发电厂	016
1. 火力发电	016
2. 水力发电	017
3. 核能发电	019
4. 风力发电	021
5. 太阳能发电	021
第三节 变电站和换流站	023
1. 变电站	023
2. 智能变电站	024
3. 换流站	029
第四节 通信与自动化系统	032
1. 通信系统	032
2. 变电站综合自动化系统	035
第五节 输电线路	037
1. 架空输电线路	038
2. 电缆输电线路	039
3. SF ₆ 气体绝缘金属封闭输电线路 (GIL)	040
第六节 电网发展概况	044

第二章 电网设备与材料的应用	046
第一节 交流电气设备应用	046
1. 电力变压器	046
2. 电抗器	052
3. 高压断路器	054
4. 高压隔离开关	055
5. 互感器	056
6. 避雷器(针、线)	059
7. 电容器	061
8. 组合电器	063
9. 母线	065
10. 低压电缆和控制电缆	066
11. 继电保护设备	067
12. 远动设备	071
13. 智能辅助控制系统	073
14. 智能一体化电源系统	073
15. 智能变电站在线监测系统	074
16. 电能量计量系统	075
第二节 直流电气设备应用	078
1. 换流变压器	078
2. 换流阀	080
3. 阀冷却系统	082
4. 平波电抗器	085
5. 直流分压器(光 PT)	085
6. 直流分流器(光 CT)	086
7. 直流断路器	086
8. 直流 PLC	087
9. 滤波器	088
第三节 通信设备应用	092
1. 光端机(主要是 SDH 设备)	092
2. PCM	094
3. 数据交换网	094
4. 通信辅助设备	096
第四节 输电线路材料应用	100

1. 铁塔	100
2. 导、地线材料	102
3. 光缆材料	104
4. 绝缘子材料	106
5. 金具材料	108
6. 高压电缆材料	111
7. 架空导地线展放	113
第三章 电网试验专业知识应用	120
第一节 电气试验概述	120
第二节 变电站电气试验应用	129
1. 变压器试验	129
2. 电抗器及消弧线圈试验	146
3. 互感器试验	148
4. 真空断路器试验	155
5. 六氟化硫断路器试验	155
6. 六氟化硫封闭式组合电器试验	163
7. 隔离开关、负荷开关及高压熔断器	166
8. 套管	171
9. 悬式绝缘子和支柱绝缘子	172
10. 电容器	174
11. 绝缘油和 SF ₆ 气体试验	176
12. 避雷器试验	185
13. 二次回路试验	188
14. 接地装置试验	189
第三节 输电线路电气试验应用	192
1. 1kV 以上架空电力线路试验	192
2. 电力电缆线路试验	195
第四章 变电站调试专业知识应用	200
第一节 变电站调试专业概述	200
1. 常规变电站与智能变电站的区别与联系	200
2. 智能变电站二次设备和常用术语	202
3. 调试的仪器仪表	204
4. 变电站调试流程	210

第二节 变电站分系统调试	211
1. 合并单元测试	211
2. 智能终端测试	213
3. 保护装置调试	215
4. 测控装置测试	219
5. 监控系统测试	221
第三节 变电站系统调试	223
1. 主间隔调试	223
2. 线路保护联调	225
3. 同步对时系统调试	227
4. 网络状态监测系统调试	227
5. 采样值系统调试	227
6. 站控层调试	228
第四节 变电站启动调试	229
1. 启动准备	229
2. 启动调试	230
参考文献	238

第一章

电力系统专业基础理论应用

电能以其清洁、高效、便捷的优势成为现代工农业应用最为广泛的二次能源，是生产过程不可或缺的生产动力，是现代经济发展和社会进步的重要基础和保障，因此电能生产、输送、变换和利用等就显得尤为关键。伴随着国民经济的快速发展，电力需求不断增加，对电网供电的可靠性提出了更高要求。而当前严峻的土地资源形势、大气污染治理形势以及城市空间发展趋势等情况，导致供电需求越来越多，电网建设任务越来越重，而电力发展可利用的资源越来越少。为了保护基本农田、节约城市空间、保护生态环境，电网建设出现了城市全地下户内变电站、装配式变电站、城市输电管廊、超高电压电缆、GIS组合电器、输电线路窄基钢管塔、1000kV交流特高压和±1100kV直流特高压输电技术等一大批新技术、新材料、新装备、新工艺，给工程项目管理带来了新的挑战，必须掌握最新的前沿技术和项目管理方法，更好地保证工程建设体系安全、优质、高效运转，实现工程建设目标。

第一节 电力系统概述

世界上第一盏电灯是由美国科学家爱迪生在1879年10月21日发明的。1882年7月26日，我国上海首次试燃15盏电灯，上海进入了全世界第一批使用电灯的城市行列。从此，中国大地亮起了电灯，中国电力工业也正式扬帆起航。

电力工业发展初期，电能是直接为用户附近的发电厂中生产的，各发电厂孤立运行。随着经济建设和城市的发展，负荷需求激增，而煤炭、水能和风能等资源丰富的地区又往往远离用电比较集中的城市和工厂。为了解决这个矛盾，就需要在能源丰富的地区建立大型发电站，然后将电能远距离输送给电力用户，这个过程称为输电。同时，为了提高供电可靠性和资源利用的经济性，又把许多分散的各种类型的发电厂，通过输电线路和变电站联系起来。这种由发电、变电、输电、配电、用电设备及相应的辅助系统（用于监视、测量、控制和保护变电设备的二次部分）组成的整体就称为电力系统，如图1-1-1所示。

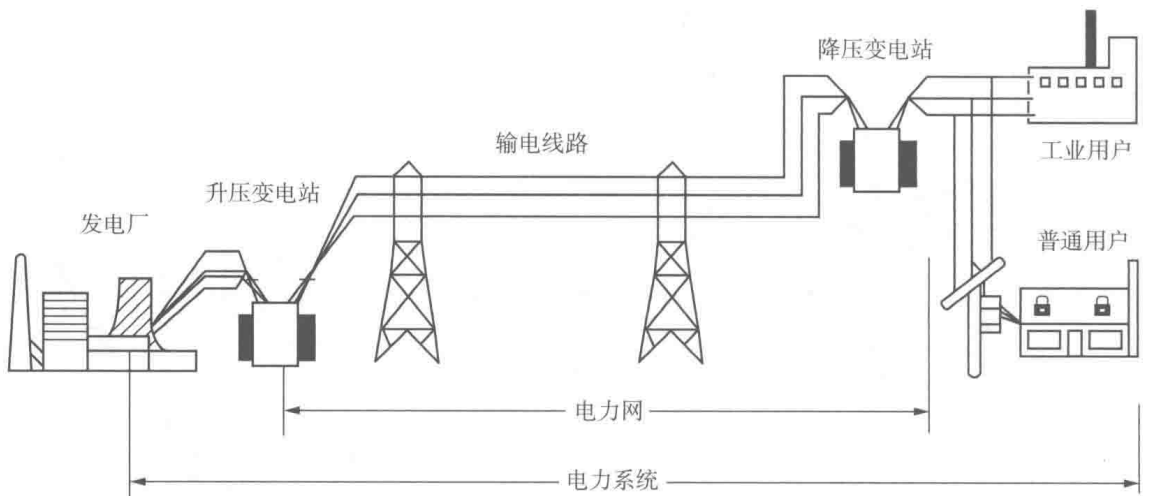


图 1-1-1 交流电力系统示意图

在电力系统中根据设计需要来选择交流或直流系统。交流电电压和电流的方向、大小是做周期性变化，又称交变电流，即随时间按照正弦函数规律变化的电压和电流；而直流电的电压方向和大小是不变的，电流随负荷的调整而变化。

电力系统包括电气一次系统和电气二次系统。构成电能生产、变换、输送、分配和使用的系统称为电气一次系统。电气一次系统的设备称为电气一次设备，主要有变压器、电抗器、电容器、断路器、隔离开关、接地开关、电流互感器、电压互感器、避雷器、GIS 或 HGIS 组合电器、变压器灭火装置、母线、封闭母线桥等。对一次系统进行保护、监控、测量、控制的系统称为电气二次系统。电气二次系统的设备称为电气二次设备，主要有继电保护及自动装置、测量表计、控制和信号装置、直流电源设备、通信设备等组成。

在电力系统中，电能的生产、变换、输送、分配和使用是同时进行的。发电厂在任一时刻生产的电能等于该时刻用电设备消耗的电能与变换、输送和分配等中间环节损耗的电能之和。因此必须采取各种自动装置、远动装置、保护装置等与计算机技术紧密结合、迅速而准确地完成各项监控、告警以及操作任务，以保证电网的安全运行，任一环节出现故障将会导致电厂和电网的连锁反应，当然这也与电能不能大量储存有着密切的关系。

在电力系统中由变电设备、配电设备和各种电压等级输电线路组成的部分称为电力网，简称电网。按电压高低电力网可分为低压网、中压网、高压网、超高压网和特高压网；按功能可分为输电网和配电网。电力网中架设在发电厂升压变电站与地区变电站，以及地区变电站之间的线路称为输电线路。它担负着输送和分配电能的任务。按照输电线路结构的不同可分为架空输电线路和电缆输电线路；按照输送电流的性质不同可分为交流和直流输电线路；按照输电距离和输送容量的不同，输电线路通常采用的电压等级也不同。

我国采用的常规交流电压等级包括：交流 220/380V、10kV、35kV、66kV、

110kV、220kV、330kV、500kV、1000kV；直流±400kV、±500kV、±660kV、±800kV、±1100kV（在建）。在我国通常交流电力系统电压称35kV~220kV为高压，330kV~750kV为超高压，1000kV为特高压；直流电力系统电压称±660kV及以下为高压，±800kV及以上为特高压。35kV以下电力系统主要用于配网，35kV~110kV电力系统主要用于供电电网，220kV~750kV主要用于区域性电网，交流1000kV、直流±800kV及以上特高压主要用于跨区电网。

1. 交流系统

与电力系统密切相关的是电气主接线，又称电气一次接线或一次系统，它是发电厂或变电站中的一次设备按照一定规律连接而成的电路，主要是通过断路器、隔离开关与母线的连接来实现多种运行方式的转换。电气主接线的不同，其电气设备选择、配电装置布置、继电保护和自动控制方式也不相同。电气主接线的形式分为有汇流母线接线和无汇流母线接线两类，见图1-1-2所示。

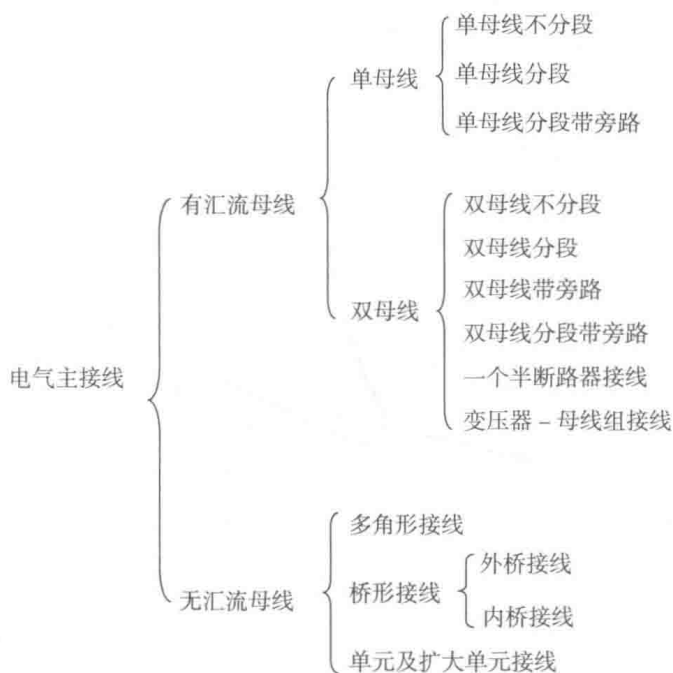


图 1-1-2 电气主接线分类

电气主接线第一类为有汇流母线接线，包括单母线接线（又称单母线不分段接线，图1-1-3）、单母线分段接线（图1-1-4）、单母线分段带旁母接线（图1-1-5）、双母线不分段接线（图1-1-6）、双母线分段接线（图1-1-7）、双母线带旁母接线（图1-1-8）、一台半断路器接线（图1-1-9）、变压器-母线组接线（图1-1-10、图1-1-11）等，各接线方式在电网工程中均常见，220kV多采用双母线双分段接线、500kV及以上多采用一台半断路器接线。另一种为无汇流母线的接线包括桥形接线（内桥形接线和外桥形接线，图1-1-12）、角形接线（图1-1-13）、单元接线（如变压器-线路等，图1-1-14），多用于发电厂主接线方式。

单母线接线是指只采用一条母线的接线,具体分为不分段、分段、分段带旁母三种形式。单母线不分段的接线方式如图 1-1-3 所示,每一回线路均经过一台断路器和隔离开关接于一组母线上。断路器用于在正常或故障情况下接通与断开电路。断路器两侧装有隔离开关,用于停电检修时作为明显断开点以隔离电压。靠近母线侧的隔离开关称为母线侧隔离开关,简称母线刀;靠近引出线路侧的称为线路侧隔离开关,简称线路刀。

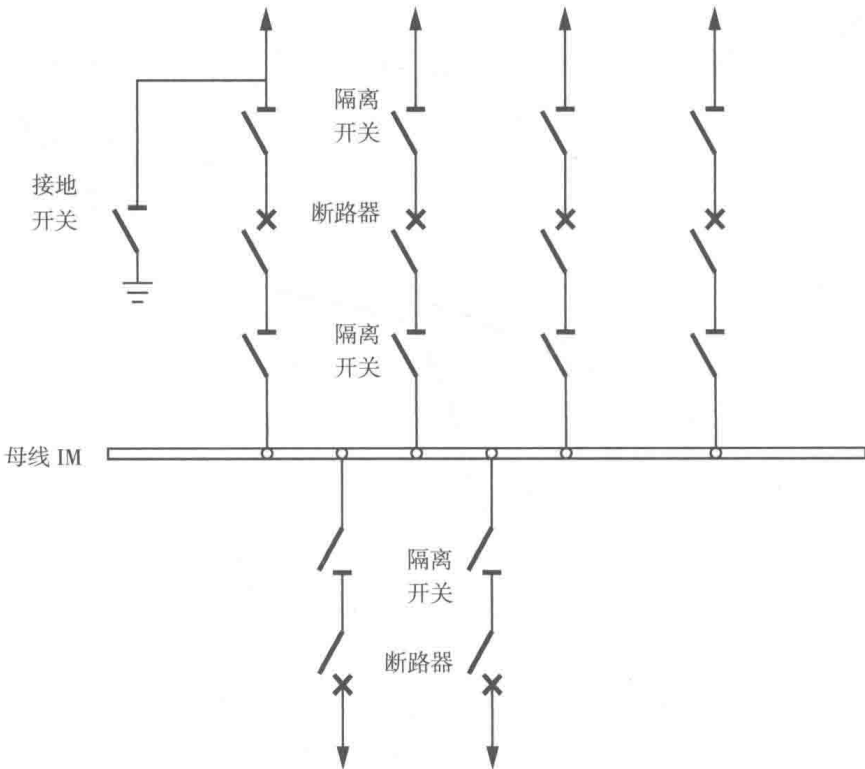


图 1-1-3 单母线不分段接线

单母线不分段的特点是接线简单清晰,设备少,投资少,但是当母线故障,需要检修时,整个系统要全部停电,当某台断路器需要检修时,则必须停止断路器所在回路的供电,故单母线不分段接线可靠性和灵活性较差。鉴于单母线不分段接线的缺点,为减少母线和断路器故障、检修时的停电范围,在单母线不分段接线方式的基础上出现了单母线分段和单母线分段带旁路的形式。

单母线分段是当母线发生故障时,仅故障段母线停止工作,另一段母线仍继续运行,两段母线可以看作是两个独立的电源,与不分段相比大大提高了供电可靠性和灵活性,最大程度减小了停电范围,如图 1-1-4 所示。

为了克服出线断路器检修时其所在回路必须停电的缺点,可采用增设旁路母线的办法。旁路母线经旁路断路器接至 I、II 段母线上,在正常运行时旁母和旁路断路器处于冷备用状态,如图 1-1-5 所示。单母线分段带旁母接线与不分段相比,在出线断路器故障或停电检修时可以用旁路断路器代路送电,使线路不停电。

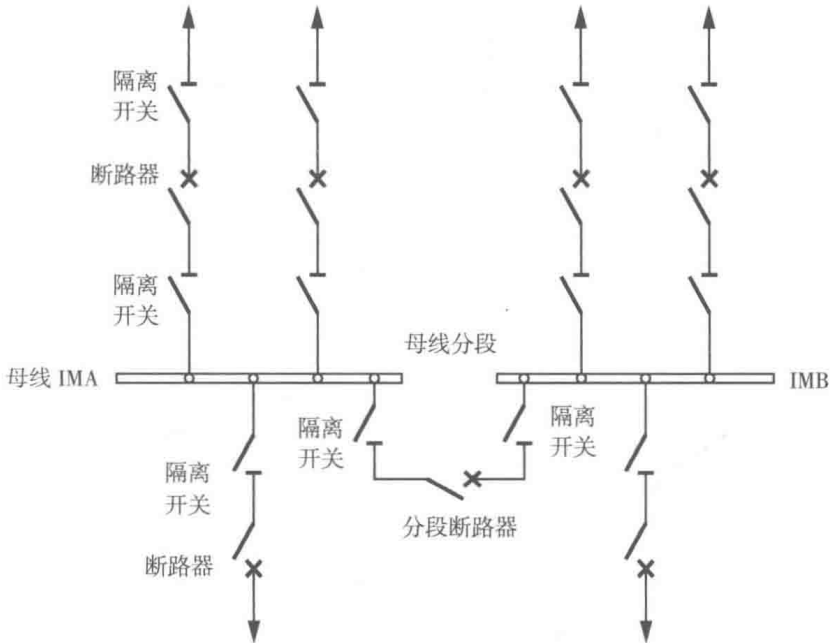


图 1-1-4 单母线分段接线

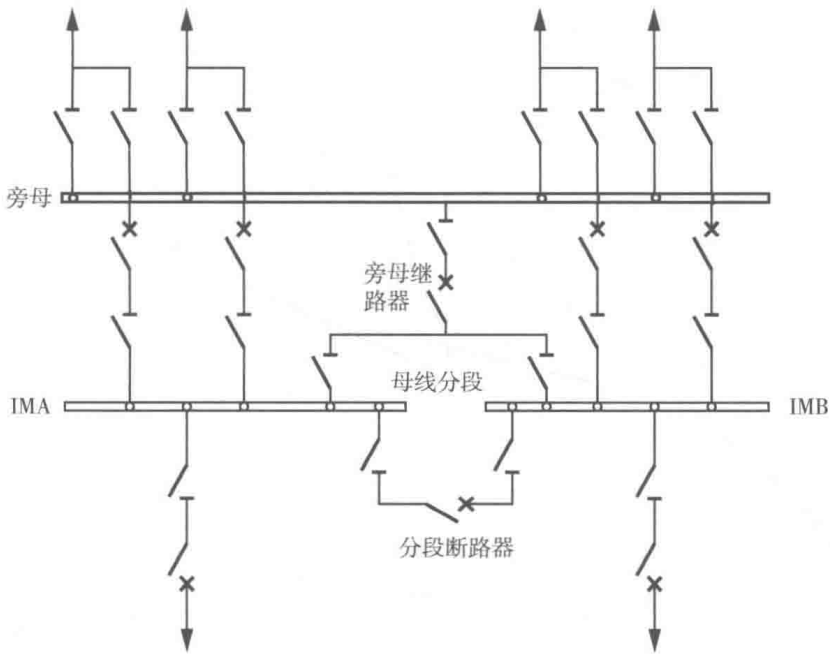


图 1-1-5 单母线分段带旁母接线

双母线接线是指采用两条母线的接线，分为不分段、分段、分段带旁母三种形式。双母线不分段接线是两条母线通过母线联络（简称母联）断路器连接，出线侧每一条出线和电源支路都经过母联分别接至两条母线上，如图 1-1-6 所示，出线 1、3 和电源 1# 主变（蓝色部分）接在 I M 上，出线 2、3 和电源 2# 主变（红色部分）接在 II M 上，两条母线通过母联（黑色部分）连接。双母线不分段接线可靠性高，灵活性好，可轮流检修母线而不影响正常供电，各个回路的负荷可以任意分配到某一条母线上，能灵活适应电力系统各种调度方式和潮流变化的需要，但检修出线断路器时该支

路仍然会停电。双母线接线的运行方式可以组成以下几种：①母联断路器断开，分出线分别接在两条母线上，相当于单母线分段运行；②母联断路器断开，一条母线运行，一条母线备用；③两条母线同时工作，母联断路器合上，即两条母线并联运行，电源和负荷平均分配在两条母线上，这是双母线常采用的运行方式。

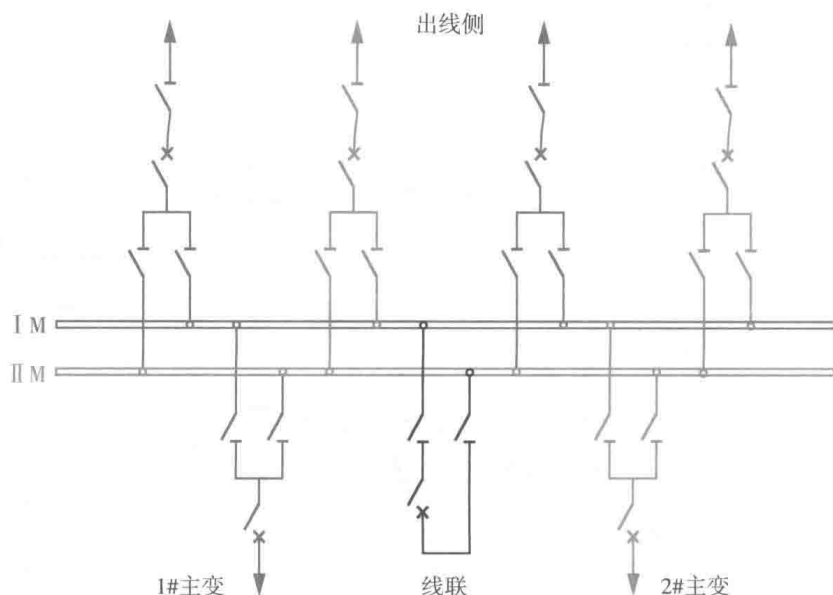


图 1-1-6 双母线不分段接线

双母线分段接线较双母线不分段具有更高的可靠性和灵活性，分为双母线单分段和双母线双分段。双母线单分段是指双母线中其中一条母线分为 A、B 段，与单母线分段相同，即组成 I MA、I MB、II M 或 I M、II MA、II MB 三段母线，1 个分段、2 个母联间隔；双母线双分段是指两条母线均分为 A、B 段，即组成 I MA、I MB、II MA、II MB 四段母线，2 个分段、2 个母联间隔，如图 1-1-7 所示。在 200kV 电压等级进出线较多时广泛采用双母线分段接线方式。

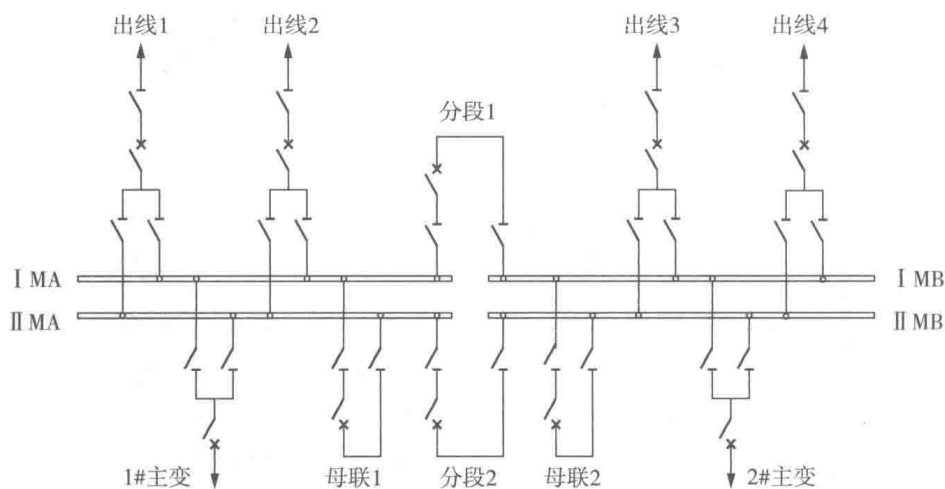


图 1-1-7 双母线双分段接线