



普通高等教育“十二五”规划教材

发电厂电气运行

林文孚 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

发电厂电气运行

林文孚 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书以电气一次系统为主线,介绍了发电厂电气设备,典型机组电气主接线与厂用电的构成特点、运行方式,发电厂继电保护基本原理,发电机变压器组和高、低压厂用电系统的控制与保护,单元机组电气设备的倒闸操作。

本书可作为集控、热动等专业教材,同时,也可作为集控运行培训班教材。

图书在版编目(CIP)数据

发电厂电气运行 / 林文孚主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2011.9
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5084-9047-2

I. ①发… II. ①林… III. ①发电厂—电气设备—运行—高等学校—教材 IV. ①TM621.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第201671号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 发电厂电气运行
作 者	林文孚 主编
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 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	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	北京市北中印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 14.25印张 338千字
版 次	2011年9月第1版 2011年9月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	28.00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

前言

本书以电气一次系统为主线，介绍了发电厂电气设备，典型机组电气主接线与厂用电的构成特点、运行方式，发电厂继电保护基本原理，发电机变压器组和高、低压厂用电系统的控制与保护，单元机组电气设备的倒闸操作。本书具有如下特点：

(1) 以电气一次系统为主线，按设备、系统、保护、控制、倒闸操作的顺序逐步展开，知识的介绍逐层深入。力求内容新颖、实例典型、紧贴运行实际。

(2) 以集控运行岗位的需要为原则，采用方框图介绍继电保护、自动装置的基本原理、功能与使用，以及装置在机组运行中的地位和作用，引导读者弄清一次系统与二次设备之间的联系。

(3) 力求用电工与电机学的基本理论分析、解释电气运行的实际问题，强调物理概念，突出发电机变压器组与厂用电设备的控制，着力提高读者电气设备监控能力与操作能力。

(4) 内容取材于近年新建典型机组的工程资料，具有很强的针对性和适用性。

本书可作为集控、热动等专业教材，同时，也可作为集控运行培训班教材和发电专业学生学习参考书。

为便于读者阅读，下面简要介绍各章的重点和难点。

(1) 发电厂电气设备，重点是各种电气设备的基本结构与作用，断路器的灭弧原理与操作机构。要了解各种操作机构的操作条件与动作特点，熟悉电压互感器与电流互感器的接线与使用。

(2) 电气主接线与厂用电，重点是机组电气主接线与厂用电接线方式、系统特点、运行方式，厂用工作电源与备用电源、保安电源及其切换方式。

(3) 发电厂继电保护基本原理，发电机、变压器、电动机、线路、母线保护的基本原理，重点是理解继电保护基本要求及其应用，电流保护、阻抗（接地）保护和差动保护的動作特点与保护范围，了解自动重合闸的功能与基本要求。

(4) 厂用电系统控制与保护,重点是厂用电系统与启动/备用变压器的保护配置,保护功能、保护压板作用,了解断路器操作机构接线、开关柜接线及其与对外接线的关系,熟悉实现断路器控制的条件、操作元件与相关操作。

(5) 发电机—变压器组控制与保护,重点是发电机同期与发电机励磁系统;发电机组主接线与厂用电、发变组保护配置,保护动时系统的行为,即它的出口作用方式;保护出口与自动装置和断路器控制回路间信号传递关系,以及在系统设备运行、停止状态下保护正确投退。

(6) 发电机组电气设备倒闸操作,重点是厂用电系统主要倒闸操作、发电机组的并、解列操作。对电气设备进行有效的维护、在正常和事故状态下正确地进行电气设备的倒闸操作,是讨论电气运行的落脚点,是对电气运行知识的综合运用。本章还介绍了误操作实例,是对正常倒闸操作的补充,意在开阔运行人员的视野,读者可从实例中进一步认识误操作与事故产生的原因及危害,思考防止误操作与事故的措施。

对电气设备的认识与操作,可以6kV配电装置装配实训为突破口,通过装配实训了解装置的基本结构和防误闭锁,熟悉断路器的控制回路,明确“动力电源”、“控制电源”的作用,明确实现断路器控制与保护的必要条件,熟悉控制屏上的信号、操作开关与操作接口,了解就地控制与远方控制。理解开关的“检修”、“冷备用”、“热备用”、“运行”状态。

电气设备倒闸操作与控制能力的培养,可以仿真机为平台,实现工学结合,在教、学、练结合中逐步掌握电气运行的基本知识与技能。例如,可以结合发电机升压操作,进一步熟悉发电机升压操作的条件与注意事项,熟悉发电机的空载特性,掌握自动励磁调节装置的功能与使用方法;结合发电机的手动同期与自动同期操作,理解发电机同期原理,同期条件与同期操作步骤,熟练同期装置的使用;结合厂用电切换操作,学习厂用电并联、串联切换的条件与注意事项;结合发电机有功、无功调节,理解发电机的运行特性与发电机安全运行限制;通过机组全冷态启动的厂用电送电操作,熟悉保护投入与设备送电、母线送电、保安电源切换的条件、操作顺序与注意事项,掌握电气设备倒闸操作的原则。通过电气故障仿真训练,熟悉机组电气异常与故障的现象,熟悉机组保护配置与保护出口作用方式及保护压板的正确使用,熟悉保护与自动装置和控制回路之间的信号联系,进一步认识电气故障对机、炉运行的影响,初步掌握电气故障的处理原则与方法。

各章后面的复习思考题反映本章的主要学习目标,读者在阅读每章节内容前后要认真阅读,根据思考题检查学习效果。

本书由武汉电力职业技术学院教授、高级工程师林文孚同志撰写。荆门

热电厂电气运行专工龙继胜同志主审，他认真审查了书稿，提出了许多宝贵意见，作者对龙继胜同志的辛勤劳动和真诚的帮助表示最真挚的感谢！在本书编写过程中，得到了武汉电力职业技术学院仿真中心全体同仁的热情支持和帮助，作者对他们表示衷心感谢。

由于作者学识水平有限，书中缺点和谬误在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2011年5月

目录

前言

第 1 章 发电厂电气设备	1
1.1 绝缘子、隔离开关和母线	2
1.2 高压断路器	8
1.3 低压电器	22
1.4 互感器	25
1.5 过电压保护设备与接地装置.....	33
复习思考题	39
第 2 章 电气主接线与厂用电	41
2.1 电气主接线.....	41
2.2 厂用电系统接线	48
2.3 直流电源	56
复习思考题	63
第 3 章 发电厂继电保护基本原理	64
3.1 继电保护概述	64
3.2 电流保护与阻抗保护	68
3.3 变压器保护.....	74
3.4 三相异步电动机保护	81
3.5 同步发电机保护	83
3.6 输电线路保护	93
3.7 母线保护与失灵保护	98
3.8 断路器保护与自动重合闸	102
复习思考题	106
第 4 章 厂用电系统控制与保护	107
4.1 380V 厂用电系统控制与保护	107
4.2 6kV 厂用电系统控制与保护	117
4.3 启动/备用变压器的保护与控制	127
复习思考题	138

第 5 章 发电机—变压器组控制与保护	140
5.1 发变组自动同期控制	140
5.2 发电机变压器组保护	147
5.3 发电机变压器组控制	161
5.4 发电机组励磁系统及其控制	172
复习思考题	176
第 6 章 电气设备倒闸操作	178
6.1 倒闸操作的一般要求	178
6.2 启动/备用变压器的送电操作	184
6.3 厂用电系统倒闸操作	191
6.4 发电机并列、解列操作	203
6.5 倒闸操作误操作实例	211
附录 兆欧表的原理与使用	215
复习思考题	218
参考文献	219

第 1 章 发电厂电气设备

根据电气设备作用的不同，电气设备可分为一次设备和二次设备。

1. 一次设备

通常把生产、转换和分配电能的设备，如发电机、变压器和断路器等统称为一次设备。它们包括：

(1) 生产和转换电能的设备，如发电机（用符号 G 或 F 表示）将机械能转换成电能、电动机（用符号 M 或 D 表示）将电能转换成机械能；变压器（用符号 T 表示）分升压变压器和降压变压器，升压变压器把低电压、大电流的电能转换成高电压、小电流的电能，以实现电能的远程经济输送。降压变压器的作用与升压变压器相反，是把高电压、小电流的电能转换成低电压、大电流的电能，便于用户使用。这些是发电厂中最主要的电气设备。

(2) 接通或断开电路的开关电器，如断路器、隔离开关、熔断器、接触器等，它们用于正常或事故时，将电路闭合或断开。

1) 断路器（用符号 QF 或 DL 表示）是用于高压电路、在正常或故障状态下接通或断开电路的专用电器。断路器的触头部分装有特殊的灭弧装置。灭弧装置能迅速地熄灭切断电路的过程中触头间所产生的电弧，使电路迅速可靠地断开。电力系统运行中，如果设备发生故障，则由继电保护装置动作，自动断开断路器，使故障部分与系统正常部分隔离，以保持电力系统正常部分的继续运行，并避免或减少电气设备遭受损害。

2) 隔离开关（用符号 QS、GL 或 G 表示）的触头部分没有特殊的灭弧装置，它不能可靠地熄灭在切断电路过程中触头间所产生的电弧。隔离开关一般应与断路器串联接入电路，通常是用断路器切断电路之后，再拉开隔离开关，隔离开关起隔离电压的作用，并使电路之间具有明显的断开点，以利于检修和运行的安全。只有在有特别规定的回路，需要切断的电流很小（如电压互感器回路等）时，才允许用隔离开关直接拉合电路。

(3) 汇集和分配电能的母线（用符号 W 表示）。例如，发电机发出的电能经变压器升压后，经出口断路器到母线，再经线路断路器送往负荷线路。

(4) 限制故障电流和防御过电压的电器。例如：限制短路电流的电抗器和防御过电压的避雷器等。

(5) 接地装置。无论是电力系统中性点的工作接地或是保护人身安全的保护接地，均与埋入地中的接地装置相连。

(6) 载流导体。如裸导体、电缆等，它们按设计的要求，将有关电气设备连接起来。

2. 二次设备

对上述一次设备进行测量、控制、监视和保护的设备统称二次设备，它们包括：

(1) 互感器。分电压互感器（用符号 TV、PT 或 T 表示）和电流互感器（用符号

TA、CT 或 T 表示)。电压互感器的一次线圈一般接在母线与地之间,测量母线(对地)电压。电流互感器的一次线圈一般串接在输、供电回路,测量回路电流。互感器将电路中的电压或电流降至较低值,送给显示、计量仪表和保护装置,供运行人员监视、电量计算和保护控制使用。

(2) 测量表计。如电压表、电流表、功率因数表等,用于测量电路中的参数值。

(3) 继电保护及自动装置。这些装置能迅速反应系统不正常情况并进行监控和调节,例如中性点直接接地系统发生单相接地故障时,反应过电流(包括零序过电流)、低电压的保护装置动作,作用于断路器跳闸,将故障切除。自动装置是用来实现机组自动调压、调频、自动并列、厂用备用电源自动投入和线路自动重合闸的各种装置。

(4) 直流电源设备。包括直流发电机、整流装置、蓄电池等,供给控制、保护和事故照明的直流用电。

(5) 信号设备及控制电缆等。信号设备给出信号或显示运行状态标志,控制电缆用于连接二次设备。

可见,一次设备是实现电能生产的设备和电能输送的通道,二次设备是一次设备与运行值班人员之间的联系接口,用来实现对一次设备的运行控制和保护。机组集控运行人员,必须掌握一次设备的原理与运行特性,并在此基础上熟悉二次设备的基本原理、基本功能和使用方法,用以维持发电机组的安全、经济运行。

发电机、变压器、电动机等一次设备在电工与电机学基础中已经介绍,本章先介绍实现电能汇集、分配与控制的设备,如母线、断路器、隔离开关、互感器等的原理与运行知识。以下各章分别介绍发电机组电气接线及其特点,以及电气设备的保护、控制与操作。

1.1 绝缘子、隔离开关和母线

1.1.1 绝缘子

绝缘子广泛地应用在发电厂和变电所的配电装置、变压器、开关电器及输电线之中。绝缘子是用来支持和固定裸载流导体的,并使裸导体与地绝缘,或者用于配电装置和电器中处在不同电位的载流导体之间相互绝缘。因此,要求绝缘子必须具有足够的绝缘强度、机械强度、耐热性和防潮性能。

绝缘子通常是用电工瓷制成的绝缘体,电工瓷具有结构紧密均匀、不吸水、绝缘性能稳定和机械强度高优点。也有绝缘子是采用钢化玻璃制成的,它具有重量轻、尺寸较小、机械强度高、价格低廉、制造工艺简单等优点。

绝缘子按安装地点,可分为户内(屋内)式和户外(屋外)式两种。户外式绝缘子由于它的工作环境条件要求,有较大的伞裙,用以增长沿面放电距离,并且能够阻断水流,保证绝缘子在恶劣的雨、雾等气候下可靠地工作。在有严重的灰尘或有害气体存在的环境中,应选用具有特殊结构的防污型绝缘子。户内式绝缘子表面无伞裙结构,故只适用于屋内电气装置中。

为了将绝缘子固定在支架上和将载流导体固定在绝缘子之上,绝缘子的瓷制绝缘体两端还要牢固地安装金属配件。金属配件与瓷制绝缘体之间多用水泥胶合剂粘合在一起。瓷

制绝缘体表面涂有白色或深棕色的硬质瓷釉，用以提高其绝缘性能和防水性能。运行中绝缘子的表面瓷釉遭受损坏之后，应尽快处理或更换绝缘子。

绝缘子又分支柱绝缘子和套管绝缘子，以下简要介绍两种绝缘子的结构特点。

1. 支柱绝缘子

支柱绝缘子又分为户内式支柱绝缘子和户外式支柱绝缘子两种。

户内式支柱绝缘子的使用范围较为广泛，目前在 3~110kV 各种电压等级中均有使用。ZA—10Y 型户内式支柱绝缘子的结构示意图如图 1.1 (a) 所示。绝缘瓷体为上小、下大的空心瓷件，它起着对地绝缘的作用。绝缘瓷体上端装有一个铸铁制成的铁帽，铸铁帽上平面内有螺孔，用于固定母线或其他导体。绝缘瓷体下端装有一个铸铁制成的底座(法兰盘)，底座上有圆孔，以便于用螺栓将绝缘子固定在墙壁或架构之上。绝缘瓷体与铸铁帽、铸铁底座之间，均用水泥胶合剂胶合在一起。

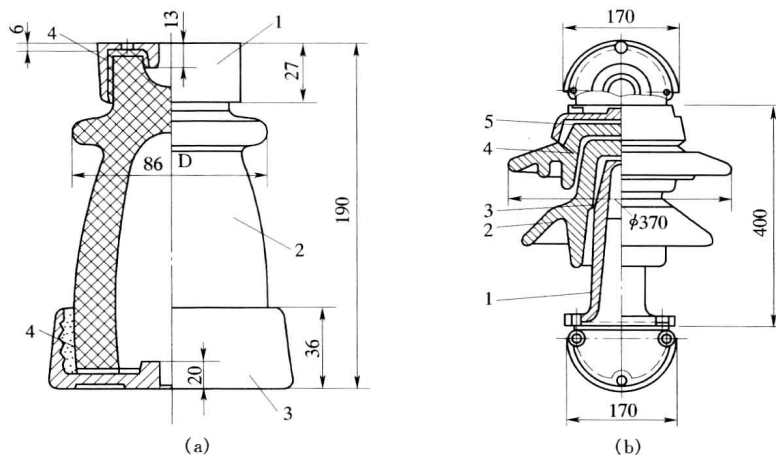


图 1.1 支柱绝缘子结构示意图

(a) 户内式

1—铸铁帽；2—绝缘瓷体；3—铸铁底座；4—水泥胶合剂

(b) 户外式

1—法兰盘装脚；2、4—绝缘瓷体；3—水泥胶合剂；5—铸铁帽

户外式支柱绝缘子有针式和实心棒式两种。户外针式绝缘子结构如图 1.1 (b) 所示。户外支柱绝缘子与户内型的明显差别是：户外式绝缘子的瓷体有伸展的裙边，裙边是在绝缘子表面上的伞形突出物，其末端具有滴管状结构。下雨时，仅裙边外面被打湿，水只能流到裙边的边缘上，而不会在绝缘子的铸铁帽与装脚间形成水膜，从而保证绝缘子的绝缘性能。绝缘瓷体 2 和 4 之间以及绝缘瓷体与铸铁帽、装脚之间均用水泥胶合剂粘合。

2. 套管绝缘子

套管绝缘子简称为套管。套管绝缘子按其安装地点也可分户内式套管绝缘子和户外式套管绝缘子两种。户内式套管绝缘子根据其载流导体的特征可分为以下三种型式：采用矩形截面的载流体、采用圆形截面的载流导体和母线型。前两种套管载流导体与其绝缘部分制作成一个整体，使用时由载流导体两端与母线直接相连。而母线型套管本身不带载流导体，安装使用时，将载流母线装于该套管的矩形窗口内。CA—6/400 型户内套管绝缘子

结构如图 1.2 所示。空心瓷套管和椭圆形法兰盘用水泥胶合剂粘合在一起。法兰盘用来将套管固定在墙壁或架构上。

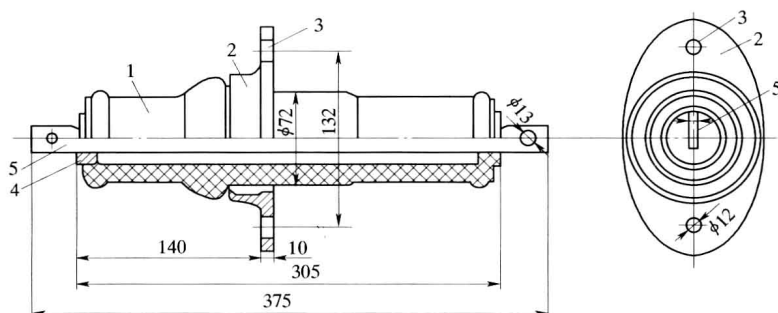


图 1.2 套管绝缘子结构示意图

1—空心瓷套；2—法兰盘；3—安装孔；4—金属圈；5—载流导体

1.1.2 隔离开关

隔离开关是高压电器中使用最多的一种电器，它的主要用途是保证高压电气装置检修工作的安全和切换电路。隔离开关的触头全部敞露在空气中，断开点明显可见。在停电检修时，用隔离开关将需要检修的部分与其他带电部分可靠地断开隔离，以保证检修人员的安全，而且不影响其他设备的正常工作。

隔离开关没有特殊的灭弧装置，不能用于切断负荷电流，否则会在其触头间形成电弧，危及人身和设备的安全，造成事故。隔离开关一般只能用于开闭只有电压没有电流的电路，在一定条件下允许用隔离开关拉、合不会在其触头间产生强电弧的小电流电路，例如电压互感器与避雷器、消弧线圈等。

隔离开关种类较多，例如，按安装地点分有户内式和户外式，户外式隔离开关安装在户外，它的工作条件比较恶劣，应考虑风、雨、雾、冰、灰尘和气温突变等多种的不良影响。户外式隔离开关应有较高的绝缘强度和机械强度，动、静触头间应有良好的防冻和破冰结构。

(1) GW_5-110D 型隔离开关。其一相的结构如图 1.3 所示。刀闸 1、2 端部装有楔形触头，并有防护罩；刀闸与接线端子之间用挠性导体 3 连接；刀闸与支承座之间为刚性连接。隔离开关合闸后，电流由接线端子流入经挠性导体、刀闸、触头到另一端刀闸，再经挠性导体和接线端子流出。

支承座 8 固定在棒式绝缘子 5 的上端，棒式绝缘子 5 装在底座 6 之上；两个棒式绝缘子的下端经伞型齿轮连接，可做 90° 旋转。隔离开关的分、合闸操作，是由操作机构经连杆带动伞型齿轮旋转，两个棒式绝缘子以相同的速度向相对的方向转动，使触头随刀闸运动而分、合。接地刀闸 7 的作用是，当主刀闸断开后，利用接地刀闸将隔离开关待检修的一侧设备接地，以保证检修工作的安全。

(2) GW_6-220GD 型隔离开关。为单柱式户外隔离开关，其单相结构如图 1.4 所示。它可以分相布置，单相操作。每相具有支持绝缘子 6 和操作绝缘子 7。动触头 2 固定在导电折架 3 之上。静触头 1 固定在配电装置的架空硬母线上，或者悬挂在架空软母线上。隔离开关进行合闸时，通过操作绝缘子 7 和传动装置 4 操纵导电折架 3 像剪刀一样上下运

动，使动触头夹住或释放静触头，完成合闸、分闸操作。

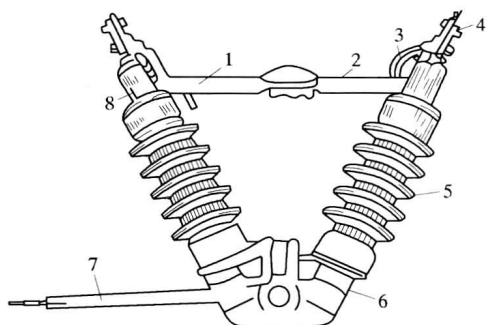


图 1.3 GW₅-110D 型隔离开关

- 1、2—刀闸；3—挠性连接；4—接线端子；
5—棒式绝缘子；6—底座；
7—接地刀闸；8—支承座

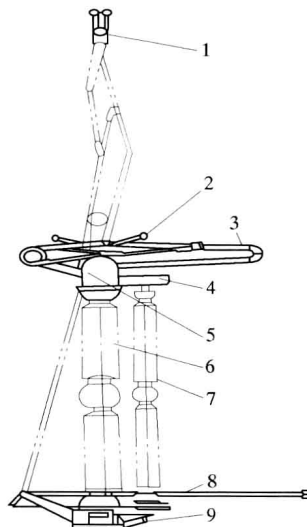


图 1.4 GW₆-220GD 型隔离开关

- 1—静触头；2—动触头；3—导电折架；
4—传动装置；5—接线板；6—支持绝缘子；
7—操作绝缘子；8—接地刀闸；9—底座

(3) GW₄-110 型双柱式隔离开关。如图 1.5 所示，双柱式隔离开关每相有两个绝缘支柱，并以交叉连杆连接，可以水平转动，两段闸刀各固定在一个绝缘支柱的顶上，触头为指形，加罩以防雨、尘、冰、雪等。进行操作时，操作机构带动一个绝缘支柱转动 90° 角；另一个支柱由于连杆传动也同时转动 90° 角，于是闸刀向同一侧断开或闭合。为使引出线不随支柱的转动而扭曲，在闸刀与出线接线座之间装有滚珠轴承和可以导电的挠性连接导体。

1.1.3 母线

1. 敞露母线

发电厂的配电装置中，各种电气设备之间的连接大都采用敞露式的硬裸导体，这些裸导体统称为母线。母线广泛地采用铝材。根据母线的截面形状和冷却方式等特点可分为：矩形母线、槽形母线和管内冷母线等。母线与地之间的绝缘靠绝缘子维持，相间绝缘主要靠空气维持。

(1) 矩形母线。其截面为矩形，它主要

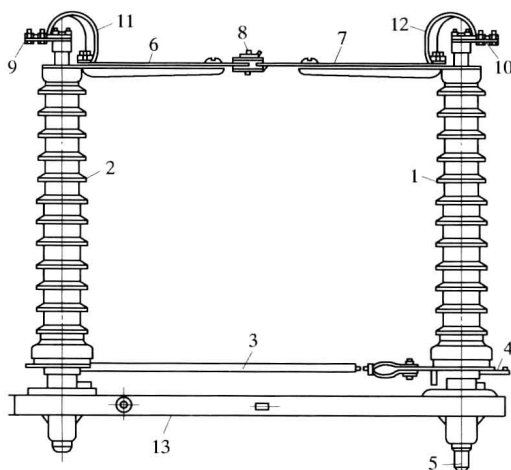


图 1.5 双柱式隔离开关

- 1、2—绝缘支柱；3—连杆；4—操动机构牵引杆；
5—绝缘支持的轴；6、7—闸刀；8—触头；
9、10—接线端子；11、12—挠性连接的导体；13—底座

适用于 35kV 及以下电压等级的配电装置中。为了改善母线的冷却条件并减少集肤效应的影响，通常采用厚度较小的矩形母线。如果需要更大截面的母线时，可以采用多条矩形母线并联方式，母线结构示意图如图 1.6 所示。

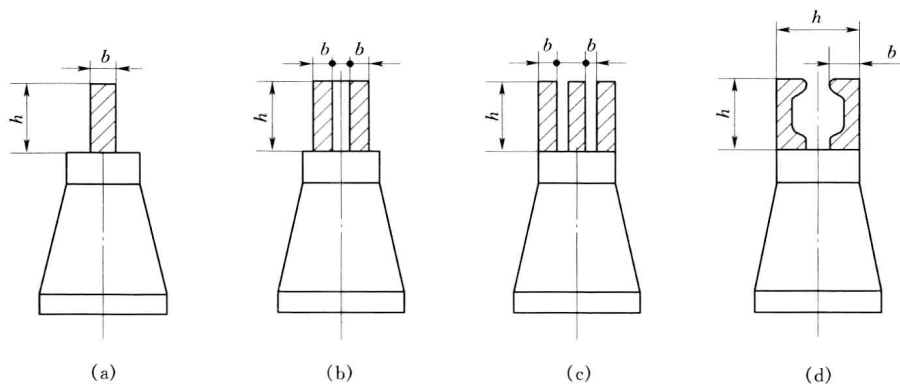


图 1.6 母线结构示意图
(a) 每相一条母线；(b) 每相两条母线；
(c) 每相三条母线；(d) 槽形母线

(2) 槽形母线。大电流回路中母线最好采用槽形母线，如图 1.6 (d) 所示。槽形母线是将铜材或铝材轧制成槽形截面，使用时每相由两根槽形母线相对地固定在同一绝缘子上。由于槽形母线比多条矩形母线的机械强度高，集肤效应影响小，所以槽形母线的利用率较高。

(3) 管形母线。管形母线的横截面为圆形、矩形或三角形，一般采用铝材。其具有集肤效应小，机械强度高，且容易在管内通入冷却介质等优点。管形母线一般用于 110kV 及以上屋外配电装置。

(4) 绞线圆形软母线。常用的有钢芯铝绞线，由多股铝线绕在单股或多股钢线的外层构成。一般用于 35kV 及以上屋外配电装置。

2. 封闭母线

随着发电机的单机容量不断扩大，大容量发电机的额定电流可高达数万安培。对大容量发电机的母线而言，采用敞露母线，不仅有本身的电动力、发热等严重问题，同时还有母线的支持物，悬吊钢架和母线附近建筑物，钢筋在强交变磁场中因电磁感应产生涡流所引起的发热问题。实践经验证明，采用金属外壳封闭母线是解决上述问题的有效办法。

所谓金属外壳封闭母线，是将载流母线用金属外壳密封保护起来，并让金属外壳接地。

(1) 金属外壳封闭母线的优点。采用金属外壳封闭母线，具有下列优点：

1) 可以减少接地故障，避免相间短路。大容量发电机出口短路电流很大，发电机承受不住出口短路的冲击。封闭母线因为具有金属外壳保护，所以基本上可消除外界潮气、灰尘和外界异物引起的接地故障。采用分相封闭母线，也基本上避免了相间短路故障，因而提高了发电机运行可靠性。

2) 减少母线周围钢结构发热。金属封闭母线的外壳起到屏蔽作用，使外壳以外部分

的磁场大约可降到敞露时的 10% 以下，因此大大减少了母线周围钢结构的发热。

3) 减少相间电动力。由于金属外壳的屏蔽作用，使短路电流所产生的磁通大大减弱。

④ 母线被封闭后，通常采用微正压方式运行，这样可以防止绝缘子结露，提高了运行的可靠性，并且为母线强迫通风冷却创造了条件。

(2) 封闭母线的分类：

1) 共箱封闭母线。三相母线共用一个金属“箱子”外壳，其间不设金属隔板时，故称为共箱封闭母线，如图 1.7 (a) 所示；三相母线之间有金属隔板时，称为有隔板的共箱封闭母线，如图 1.7 (b) 所示。共箱封闭母线主要用于单机容量为 200~300MW 发电机组的厂用电回路。

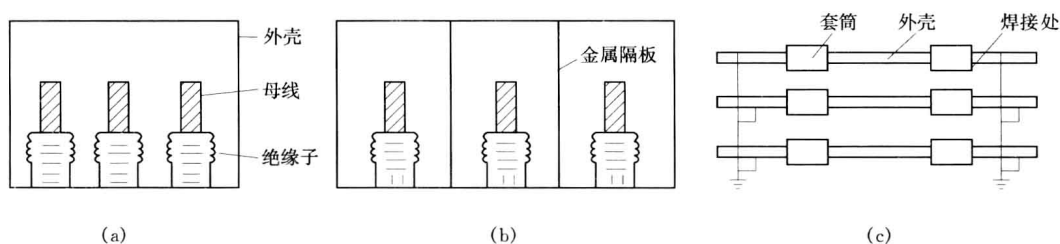


图 1.7 封闭母线

(a) 共箱封闭母线；(b) 有隔板的共箱封闭母线；(c) 全连分相封闭母线

2) 全连分相封闭母线。这种封闭母线每相金属外壳各段经套筒焊接，在电气上相连接，并在三相金属外壳的两端用短路板相互连接后接地，如图 1.7 (c) 所示。金属外壳一般为圆柱体，载流导体用绝缘子固定在圆柱体内中间，图 1.8 是其横截面结构示意图。全连式分相封闭母线以母线载流导体为一次侧，金属外壳为二次侧，类似一台变比为 1:1 的变压器，当母线载流导体通过电流时，金属外壳上将产生一个方向相反的而其数值几乎与载流导体上流过的电流相等的感应电流，使得金属外壳之外的剩余磁场降至敞露母线的百分之几。所以，采用全连式分相封闭母线，可以大大削弱母线周围钢结构中的涡流损耗和母线间短路电流的电动力。全连式分相封闭母线广泛地使用于 200MW 及以上发电机组的引出线回路中。

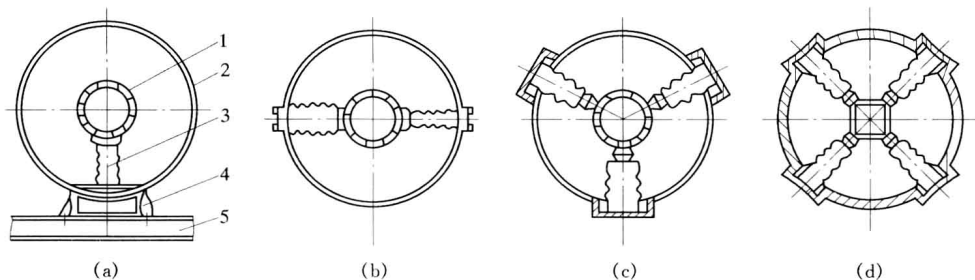


图 1.8 分相封闭母线结构示意图

(a) 单个绝缘子支持；(b) 两个绝缘子支持；(c) 三个绝缘子支持；(d) 四个绝缘子支持
1—母线；2—外壳；3—绝缘子；4—支座；5—三相支持槽钢

1.2 高压断路器

高压断路器具有可靠的灭弧装置，是发电厂最重要的控制和保护设备。正常运行时，用它来倒换运行方式，把设备或线路接入系统或退出运行，起着控制作用；当设备或线路发生故障时，能迅速切除故障部分，保证无故障部分继续运行，同时起着保护作用。

1.2.1 高压断路器的灭弧原理与技术参数

1. 高压断路器灭弧的基本原理

(1) 电弧。断路器中最基本的部件是触头，当断路器断开电路、加有电压的触头刚分开时，触头间隙很小，触头间会产生很高的电场强度。如果电路电压不低于 $10\sim 20\text{V}$ ，电流不小于 $80\sim 100\text{mA}$ ，触头间便会产生电弧。触头间的电弧，实际上是由于空气或其他绝缘介质中的中性质点游离而引起的一种气体放电现象。如图 1.9 所示，电弧的温度很高，常常超过金属气化点，可能烧坏触头，或使触头附近的绝缘物遭受破坏。如果电弧长久未熄，将会引起电器烧毁，危及电气设备的安全运行。

(2) 电弧的熄灭与重燃。由于电源电压是周期性变化的，电弧电流每经半周总要过零一次，在电弧电流过零时，电弧暂时熄灭。从这一时刻开始，在弧隙中就发生着两个相互影响而作用相反的过程，即电压恢复过程和介质强度恢复过程。电流过零后，一方面弧隙中的电压要恢复到电源电压，随着电压的升高可能引起间隙的再次击穿而使电弧重燃；另一方面，电弧熄灭后去游离的因素增强，使间隙的介质强度增加，可能阻碍间隙再次击穿而使电弧最终熄灭。因此，在弧隙电压和介质强度的恢复过程中，如果恢复电压高于介质强度，弧隙仍被击穿，电弧重燃；如果恢复电压始终低于介质强度，则电弧熄灭。如图 1.10 所示为弧隙电压与介质强度恢复的关系，若弧隙介质强度曲线 2 在任何时候都高于弧隙恢复电压曲线 1，则电弧熄灭；反之如果介质强度为曲线 3，恢复电压仍为曲线 1，则两者在 b 点相交，这时电弧将重燃。

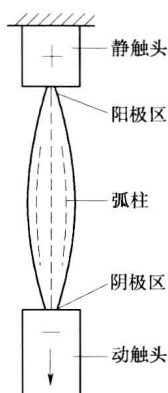


图 1.9 电弧

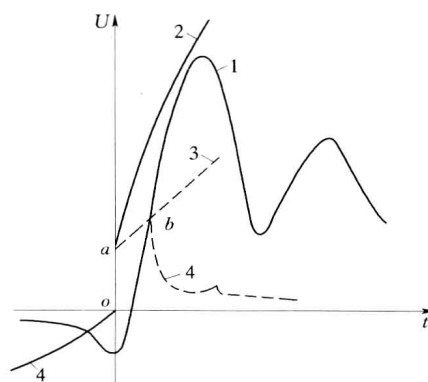


图 1.10 恢复电压与介质强度的关系

1—弧隙恢复电压曲线；2、3—弧隙介质强度曲线；4—电弧电流

(3) 熄灭交流电弧的基本方法。从上面的分析可知，电弧能否熄灭，决定于弧隙内部的介质强度和外部电路施加于弧隙的恢复电压两者的“竞赛”，而介质强度的增长又决定于游离和去游离的相互作用。增加弧隙的去游离速度或减小弧隙电压恢复速度，都可以促使电弧熄灭。根据这个原理，现代交流开关电器中广泛采用的灭弧方法有下列几种：

1) 利用灭弧介质。电弧中的去游离强度在很大程度上取决于电弧周围介质的特性，如介质的传热能力、介电强度、热游离温度和热容量。这些参数的数值越大，则去游离作用越强，电弧就越容易熄灭。氢气的灭弧能力是空气的 7.5 倍，所以可以利用变压器油或断路器油作灭弧介质，使绝缘油在电弧的高温作用下分解出氢气和其他气体来灭弧；六氟化硫 (SF_6) 是良好的负电性气体，氟原子具有很强的吸附电子的能力，能迅速捕捉自由电子而成为稳定的负离子，为与正离子复合创造了有利条件，因而具有很好的灭弧性能。 SF_6 气体的灭弧能力比空气约强 100 倍；若用真空作为灭弧介质时，在弧隙间自由电子很少，碰撞游离可能性大大减少，弧柱对真空中的带电质点的浓度差和温度差影响很大，有利于扩散，真空的介质强度比空气约大 15 倍。因此，采用不同介质可制造成不同类型的断路器，例如：空气断路器、油断路器、 SF_6 断路器、真空断路器等。

2) 采用特殊金属材料作灭弧触头。电弧中的去游离强度在很大程度上取决于触头材料。若采用熔点高、导热系数和热容量大的金属作触头，可以减少热电子发射和电弧中的金属蒸汽，抑制游离作用。同时，触头材料还要求有较高的抗电弧、抗熔焊能力。常用的触头材料有铜钨合金和银钨合金等。

3) 利用气体或油吹动电弧。电弧在气流或油流中被强烈地冷却而使气体复合加强，吹弧也有利于带电离子的扩散。气体或油的流速越大，其作用越强，在高压断路器中利用各种结构形式的灭弧室，使气体或油产生巨大的压力并有力地吹向弧隙，使电弧熄灭。如空气断路器利用充入压力约 2.3MPa 干燥压缩空气作为吹动电弧的灭弧介质； SF_6 断路器利用 0.304~0.608MPa 纯净 SF_6 气体作为灭弧介质；油断路器利用油在电弧作用下分解出的气体吹动电弧。吹动的方式有纵吹和横吹等，如图 1.11 所示。吹动方向与弧柱轴线平行的叫纵吹；吹动方向与弧柱轴线垂直的叫横吹。纵吹主要使电弧冷却变细，最后熄弧；而横吹则把电弧拉长，表面积增大并加强冷却。在断路器中更多地采用纵、横混合吹弧的方式，熄弧效果更好。此外，在某些高压断路器中，还采用环吹灭弧方式；在低压开关电器中，还采用磁吹熄弧等方法。

4) 采用多断口熄弧。在高压断路器中，每相采用两个或更多的断口串联，在熄弧时，断口把电弧分割成多个小电弧段，在相等的触头行程下，多断口比单断口的电弧拉长了，从而增大了弧隙电阻，而且电弧被拉长的速度，即触头分离的速度也增加，加速了弧隙电阻的增大，同时，也提高了介质强度的恢复速度。由于加在每个断口的电压降低，使弧隙恢复电压降低，亦有利于熄灭电弧。在低压开关电器中广泛采用灭弧栅装置，也就是把长弧变成短

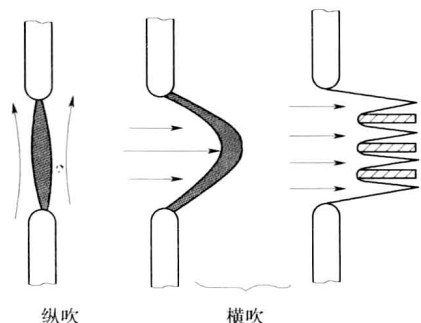


图 1.11 吹弧方式