

电气一次设备运行与维护

(修订本)

虞 放 编

河海大学出版社

发展小水电的关键
是培训人才

钱正英
一九九〇年十一月廿日

全国政协副主席、原水利电力部部长钱正英同志为《小水电培训教材》题词。

《小水电培训教材》编委会

主 审：单克明

主 任：王经权

副 主 任：查一民 周仲钺 陈彩云

编 委：陈建农 虞 放 李淑勤 方勇耕

李永国 张新干 程泾川 唐文品

余国治

编委会秘书：吴俊燕

加強專業培訓
提高职工素質
楊振懷

水利部部长楊振懷同志一九九一年二月为《小水电培训教材》
题词。

万发展祖国水电
事业而奋斗

陈绍沂

一九六十年

浙江省水利厅长陈绍沂题词

序

我国幅员广大、山峦起伏、河流纵横、水力资源十分丰富，理论蕴藏量为6.8亿千瓦，可开发蕴藏量为3.7亿千瓦，居世界首位。建国四十年来，我国农村水电事业取得了很大成绩。到1990年底，全国农村水电装机容量已达一千四百万千瓦，年发电量四百十八亿千瓦小时。与此同时，建成了具有相当规模的配套电网，拥有高、低压输、配电线路二百零八万公里，变电设备四千六百万千伏安，担负着全国三分之一以上县（市）的工农业生产和广大人民生活的供电任务。为全国五百二十万平方公里国土上的三亿亩耕地、三亿人口提供了廉价的电力。

农村水电关系着国民经济中农业和能源两个战略重点，农村水电的建设和地方电网的发展，有力地促进了这些地区的经济发展和精神文明建设，对发展地方工业特别是乡镇企业、改善人民生活、脱贫致富方面起着十分重要的作用。

如何把这些工程设施和机电设备管好用好，使其充分发挥作用，这是摆在我们全国农村水电战线上五十万职工的一项迫切而艰巨的任务，当前最大的问题是管理人员素质偏低，技术水平和技术装备远远赶不上发展的需要。

由浙江省水利部门的领导和专家历经辛苦编写的《小水电培训教材》现已由河海大学出版社出版。

这套培训教材图文并茂，内容简明扼要、生动而丰富，教材实用性强，第一版发行后，经过几期培训班的教学，深受广大职工的普遍欢迎。这套教材可以作为我国农村水电职工学习基本知识和进行岗位培训的教材，这对加强专业培训、提高广大职工的技术素质和岗位生产工作能力将发挥积极的促进作用。

水利部农村水电司司长邓秉礼

一九九一年六月

再 版 前 言

“八五”计划和十年规划的实施，将使我国小水电事业进一步迅猛发展。新形势对小水电提出了新要求，为了提高职工素质和对新职工进行上岗技术培训，就必须进行系统的教育，“百年大计，教育为本”。我们在1990年6月出版了“小型水电站培训教材”，全套书共六本：（一）《水轮机及辅助设备运行与维修》；（二）《调速器调试与故障处理》；（三）《电气一次设备运行与维修》；（四）《电气二次回路运行与维护》；（五）《低压水轮发电设备运行与维修》；（六）《小型水电站运行规程与管理》。本书第一版一万一千余套，时仅数月，即告售缺。各地纷纷要求再版，经水利部农电司邓秉礼司长同意，决定再版后本书为全国小水电系统统一的职工培训专用教材，并指定作为统考命题的根据。有鉴于此，水利电力出版社音像部以这套教材为依据，正在配套制作音像教材。

再版前，水利部老部长、全国政协副主席钱正英同志，水利部杨振怀部长都肯定了这套教材，并分别为本书题了词。

这套书除《低压水轮发电设备运行与维修》一书外，其余都是针对高压机组的机电设备进行编写的，因此全套书可供不同工作类型的水电站职工选用。整套书的内容涉及面广，包括小型水电站全部机电设备的运行、维修和故障处理等。读者依据本教材经过技术培训后，能直接上岗对设备进行操作运行，并能独立进行一般的设备故障处理和完成常规的设备检修工作。

考虑到读者大部分为初中文化程度这一特点，在编写过程中，我们力求“短小精悍，通俗实用”。对必需用到的理论公式一般不作深入的推导，在简明扼要地导出公式后，重点放在公式所揭示的物理意义和应用中需着重解决的问题上。对复杂的设备，我们尽量多地配置插图，并以立体图、透视图作辅助手段，以便于读者看懂图，建立实物空间概念。对运行、维修的常规操作和处理手段，书中提供了较多实例，以便于读者针对工作中遇到的实际问题及时查阅。

本书曾作为浙江省小水电系统统一的职工培训教材和考试发证用书，于1984年前后在浙江省水电系统内部发行了八千余套，得到读者普遍好评。1988年又被定为浙江省小水电行业农民技术职称评定的理论考试用书。1984年10月原水电部在广西恭城县召开的全国小水电培训工作座谈会上，各地选送推荐了一批教材，对这套教材反映较好。会后，根据各方面的反映，原水电部农电司有关负责同志多次函告浙江省水利厅，要求对这套书进一步修改充实后，作为全国小水电统一的职工培训教材。

本书出版一年多来，各地反映良好，并提出了不少的宝贵意见，在此基础上，我们又组织原班人马进行了修订，聘请专家作了核实，其中有的还作了较大的改动，使全书的内容更为全面、翔实。

这套书由浙江省水利厅再次组织编写，编写委员会主任为浙江水利水电专科学校王经权，副主任为河海大学出版社查一民，水利电力出版社杭州发行站周仲钺、浙江省水电开发管理中心陈彩云，委员为陈建农、虞放、李淑勤、方勇耕、李永国、张新干、程泾川、唐文品、余国治。浙江省水利水电勘测设计院张道宏、苏孝炆、吕诚源、胡文宝、周宁星、陈家骢负责审稿。

在再版过程中，得到了浙江水利水电专科学校、水利电力出版社杭州发行站、浙江省水电开发管理中心、浙江省水利水电勘测设计院、浙江水电技工学校等单位大力协助，在此表示衷心感谢。

全书再版时虽作了认真的修改，但难免还会存在缺点和错误，热忱希望读者予以批评指正。

单克明

一九九一年七月

注：再版前言作者单克明同志为浙江省水利厅副厅长。

目 录

第一篇 电气设备及运行

第一章 电气设备及电气主接线	(1)
第一节 水电站及其电气一次设备概述	(1)
第二节 电气主接线	(1)
第二章 电气运行的基本知识	(7)
第一节 电气运行工作的主要任务	(7)
第二节 运行组织、值班人员的职责及要求	(8)
第三节 运行日志的记录及主要参数计算	(10)
第四节 水电站的安全运行	(11)
第三章 电气设备的倒闸操作	(16)
第一节 概 述	(16)
第二节 拟写和传送操作命令及操作程序	(16)
第三节 倒闸操作的基本原则和要求	(18)
第四节 倒闸操作的实例分析	(22)
第四章 水轮发电机组运行及事故处理	(25)
第一节 同步发电机的基本构造和工作原理	(25)
第二节 同步发电机的励磁装置	(29)
第三节 同步发电机的运行特性	(35)
第四节 水轮发电机组的试运行	(37)
第五节 水轮发电机组的运行操作	(39)
第六节 水轮发电机组的异常运行及事故处理	(44)
第五章 变压器运行及事故处理	(50)
第一节 变压器的作用和构造	(50)
第二节 变压器的工作原理	(53)
第三节 三相变压器	(54)
第四节 变压器的运行操作	(58)
第五节 变压器的事故处理	(68)
第六章 高、低压配电装置运行及事故处理	(73)
第一节 电弧的产生和熄灭	(73)
第二节 高压油断路器及其操作机构	(73)
第三节 高压油断路器的运行	(83)
第四节 高压油断路器的常见故障及处理	(84)
第五节 隔离开关的运行及事故处理	(88)
第六节 互感器运行及事故处理	(93)
第七节 高低压熔断器	(100)
第八节 低压开关电器	(104)

第九节 主令电器	(114)
第十节 绝缘子、母线及电缆	(116)
第七章 防雷保护及接地装置简介	(130)
第一节 防雷保护	(130)
第二节 接地装置	(135)

第二篇 电气设备维修

概述	(138)
第八章 水轮发电机及励磁机维修	(138)
第一节 检修间隔与项目	(138)
第二节 水轮发电机的拆卸和组装	(140)
第三节 发电机定子的检修	(140)
第四节 发电机转子和其他装置的检修	(143)
第五节 发电机的干燥	(146)
第六节 水轮发电机试验	(149)
第七节 直流励磁机的拆卸与组装	(149)
第八节 直流励磁机的大修	(151)
第九节 换向器、电刷、刷握的检修	(151)
第九章 变压器维修	(154)
第一节 检修间隔与项目	(154)
第二节 变压器不吊芯检查	(155)
第三节 变压器吊芯检修	(156)
第四节 其他部件的检修	(158)
第五节 变压器油的处理	(161)
第十章 高、低压配电装置维修	(163)
第一节 高压断路器的检修	(163)
第二节 隔离开关的检修	(178)
第三节 低压开关的检修	(179)
第四节 其他开关的检修	(184)
第五节 母线、电缆及其它检修	(184)
附录 I 电气常用图形符号与文字符号	(189)
附录 II 变压器连接组表示方法及其油检测项目和标准	(191)
附录 III 国际单位制简介	(193)
复习题与思考题	(195)

第一篇 电气设备及运行

第一章 电气设备及电气主接线

第一节 水电站及其电气一次设备概述

水电站是利用拦河筑坝等方式形成有落差的水流，直接推动水轮机旋转，将水能转换成机械能，再由水轮机带动发电机旋转，将机械能转换成电能的综合体。

水电站电气部分的主要工作是，①根据用电负荷的变化，起动、调节和停止机组；②对电路进行必要的操作；③不间断地监视主要电气设备的工作；④定期对主要电气设备进行检查、维护和检修；⑤消除运行中发生的事故或不正常状态等。根据以上要求，水电站中应装设下列主要电气设备：

- (1) 生产和变换电能的设备：如发电机、变压器等；
- (2) 接通或切断电路的高低压开关设备：如断路器、隔离开关、自动空气开关、闸刀开关、接触器和磁力起动器等；
- (3) 短路或过电压的保护设备：如熔断器、避雷器等；
- (4) 保护电器：如各种保护用继电器以及由继电器构成的继电保护装置；
- (5) 测量和监测设备：如各种电工测量表计、电流互感器及电压互感器等；
- (6) 自动调节设备：如用于发电机自动调压的复式励磁装置、可控硅励磁装置等。

除上述设备外，还有直流设备、电气照明设备、电动机及其他厂用电设备等。

水电站中的电气设备可分为一次设备和二次设备两大类。其中一次设备是直接生产、变换和传输电能的发、变、供电设备。通过这些设备，电能从水电站通过输电线路输送和分配给各电力用户。若水电站和电力系统并网运行时，则将电能输入电力系统进行统一分配。一次设备主要是发电机、主变、断路器、隔离开关、互感器、电力电缆和输电线路等。二次设备则是对一次设备的工作进行监察、测量、控制和保护的装置。如各种电工测量表计、继电器、控制和信号电器、控制电缆及自动装置等。鉴于目前我国小水电的规模和特点，本书只介绍35千伏电压级的电气一次设备及其运行、维护和检修。同时，由于绝大多数已建小水电的图纸系采用GB314-64、GB315-64的图形符号和文字符号，为了使运行与检修工人能尽快熟悉图纸，本教材也仍采用上述标准，但在附录中列出了GB4728-85(84)和GB7159-87以及GB1094.1~5-85的新标准和新旧符号对照表，以便逐步熟悉和过渡到使用新国标。

第二节 电气主接线

一、电气主接线概述

电气主接线图又称为一次接线图或主电路图，它是由各种电气元件如发电机、变压器、断路器、隔离开关、互感器、母线、电缆、线路等依照实际顺序连接起来，并用统一规定的

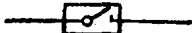
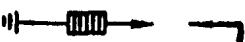
图形符号和文字符号表示的发、变、供电电路图。

电气主接线图可用单线图，也可用三线图表示。因为三相交流电气设备的每相结构是相同的，一般都采用单线图表示。这样不仅省事，图纸也更为清晰明了。图中断路器和隔离开关的位置则表示未投入运行的状态。

最常用的一次电气设备的图形符号和文字符号见表1-1所示。

表1-1

一次电气设备的图形符号和文字符号

名 称	图 形 符 号	文字符号
发 电 机		F
变 压 器		B
断 路 器		DL
隔 离 开 关		GK
负 荷 开 关		FK
阀 型 避 雷 器		BL
电 容 器		C
电 阻 器		R
熔 断 器		RD
电压互感器		YH
电流互感器		LH
自动空气开关		ZK
母 线		M
电 动 机		D

主接线图是电气运行人员进行各种操作和事故处理的重要依据之一，因此，电气运行人员必须熟悉本站电气主接线图，了解电路中各种电气设备的用途、性能及维护、检查项目和运行操作的步骤等，以确保安全发电。

主接线对水电站电气设备的选择、配电装置的布置、继电保护方案的拟订以及运行的经济性和可靠性等都有十分密切的关系。在选择和确定主接线时还应考虑如下原则：①运行的可靠性；②运行及检修的灵活性；③运行操作的方便性；④运行的经济性；⑤具有扩建的可能性（必要时才需考虑）。

对主接线的基本要求是

(1) 根据电力系统和电力用户的要求, 应保证对用户供电的可靠性和电能质量。

(2) 基建投资少, 运行费用低, 这一点对小型水电站尤其应加以考虑。

(3) 主接线应力求简单、清晰和灵活。如: 主接线不应有多余的设备。操作次要少, 这样就可以减少误操作事故, 提高运行的可靠性; 处理事故也简单迅速。当然, 不适当地简化必要的设备, 也会引起不良的后果。

主接线的灵活性表现在: 为了经济合理的运行, 可以很方便地投入或断开某些机组和变压器; 当某些设备(如断路器)需要检修时, 如有条件可由备用的设备来代替, 以保证供电不致中断。

(4) 进行一切操作时应保证设备及人身的安全, 以及有可能在安全的条件下进行维护检修工作。

二、主接线的基本形式

小型水电站主接线基本形式一般如下:

1. 单母线接线

图1-1为单母线接线, 这种接线是最简单的主接线, 发电机(F)和供电线路(L)都经过断路器(DL)和隔离开关(GK), 连接到公共的母线(M)上。

母线(也称为汇流排)的作用是把发电机 $1F$ 和 $2F$ 发出的电能汇集并分配到各条供电线路上去。在各电路中的断路器用来接通和断开电路(包括断开故障电流), 隔离开关用来保证检修断路器时的工作安全。例如当断路器 $2DL$ 要检修时, 应将线路侧隔离开关 $3GK$ 和母线侧隔离开关 $2GK$ 打开。这样断路器两侧便与电源隔离了。发电机电路中断路器的检修一定要在发电机停止工作时, 才能进行。因此发电机与断路器(如 $2F$ 与 $1DL$)之间就没有必要装设隔离开关。

单母线接线的优点是: 简单清晰, 所需的电气设备少, 造价低。隔离开关仅在断路器修理及断路器断开时间较长时才需要操作, 因而误操作的机会少。

单母线接线的缺点是: 不够可靠和灵活。母线或任一个母线侧隔离开关故障或检修时, 必须切断全部电源。停电时间决定于损坏设备修复和更换所需时间, 这可能使停电时间很长。不过运行经验证明, 母线和母线隔离开关是很少发生故障的。

对可靠性要求不高的小型水电站, 大多数采用单母线接线。

2. 单母线分段接线

为了提高单母线接线的可靠性和灵活性, 可将单母线进行分段, 母线分段后可使上述缺点局部化, 缩小事故停电的范围。

(1) 用隔离开关分段 如图1-2所示, 有了分段隔离开关 GK , 母线的某一段和母线隔离开关可以分别在不同的时间内进行检修, 这时只停止一个分段母线的工作, 第二段段母线的电源和引出线仍可继续工作。

分段隔离开关 GK 在正常运行时是台上的, 任一分段母线上发生故障, 将使全部电源中

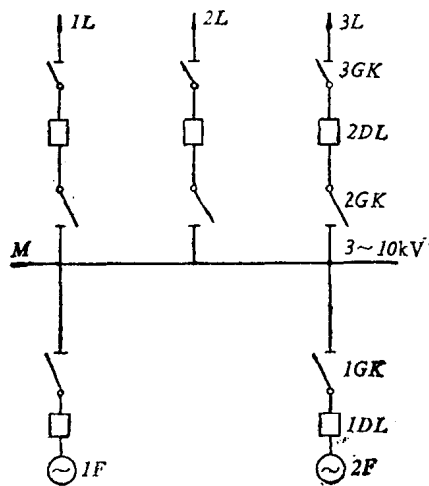


图1-1 单母线接线

断，非故障段停电的时间，决定于将分段隔离开关 GK 断开并恢复非故障段电源的时间，这比故障段恢复供电要快得多，因为后者决定于修复或更换损坏设备所需的时间。

(2) 用断路器分段 如图1-3所示，分段断路器 DL 装有继电保护装置，母线在某一分段发生短路故障时，在继电保护装置的作用下，分段断路器自动分闸，保证其余非故障段母线的继续正常供电，因而大大提高了供电的可靠性。母线分段数目，可以根据发电机数目来分，也可以将两台或两台以上的发电机接在同一段内。母线分段的数目越多，停电的范围就越小，但断路器的数目也随之增加。分段断路器 DL 经常处于接通状态以保持并联运行。

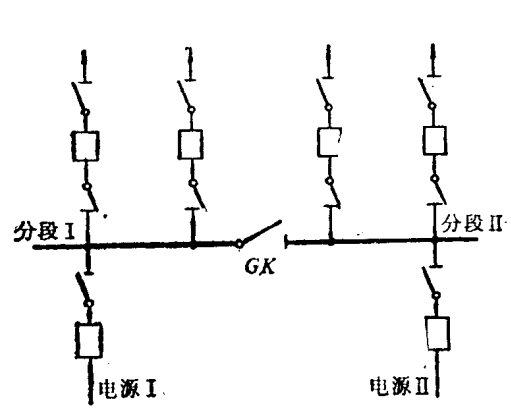


图1-2 母线用隔离开关分段

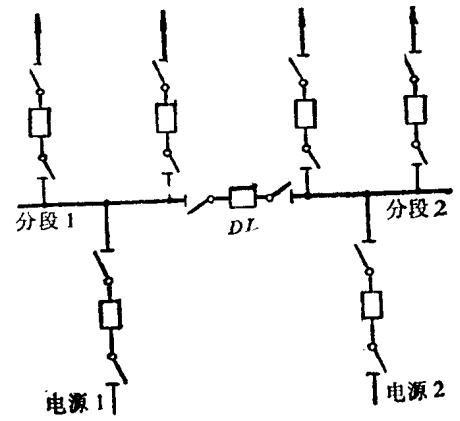


图1-3 母线用断路器分段

3. 组式接线

如图1-4所示，电力装置中各元件串联而没有任何横的联系接线叫做组式接线(或单元接线)。例如发电机——变压器组（ a 图），变压器——线路图（ b 组），发电机——变压器——线路组（ c 图）等。

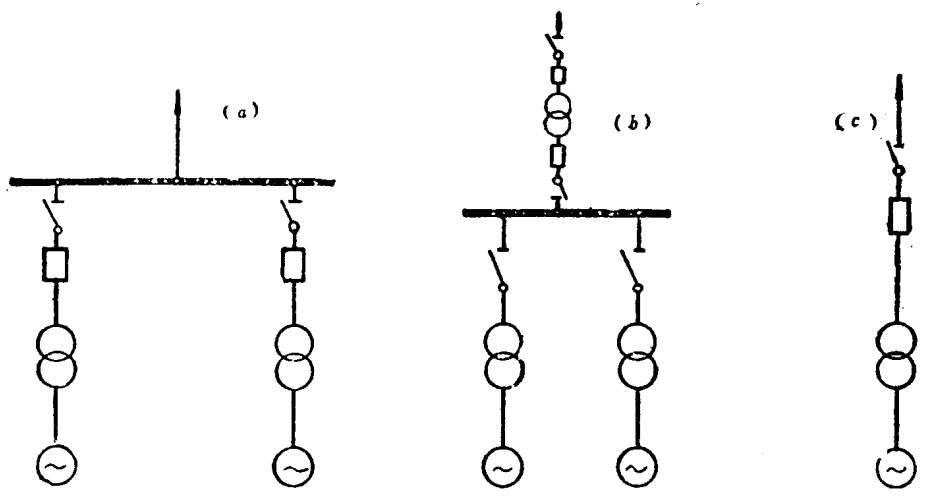


图1-4 组式接线的各种形式

组式接线各元件之间可以不装断路器。这样，可以减少所用的电气设备，简化配电装置和节省基建费用。

发电机——变压器组接线还有一种扩大单元接线如图1-5所示，即两台或两台以上发电机

共用一台变压器构成的组式接线。扩大单元接线由于减少了变压器和电气设备的数目，不仅减少了投资，而且便于配电装置的布置，尤其是变压器台数的减少，为变压器装设在厂房附近创造了有利的条件，因此这种接线形式应用得较多。

图1-6为小型水电站电气主接线的一个例子(用单线图表示)。在图中，水电站内装有三台水轮发电机组，发电机发出的电能先送到6千伏母线，母线起着汇集和分配电能的作用。电能的一部分由母线分配到6千伏输电线，供近区用电。其余的电能通过升压变压器送到35千伏母线，经过两条35千伏高压输电线，向较远地区的用户供电，并将发电厂与电力系统并列运行。

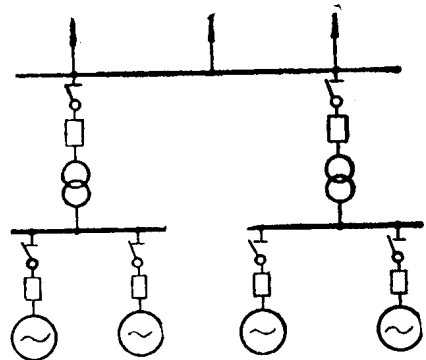


图1-5 发电机—变压器组扩大单元接线

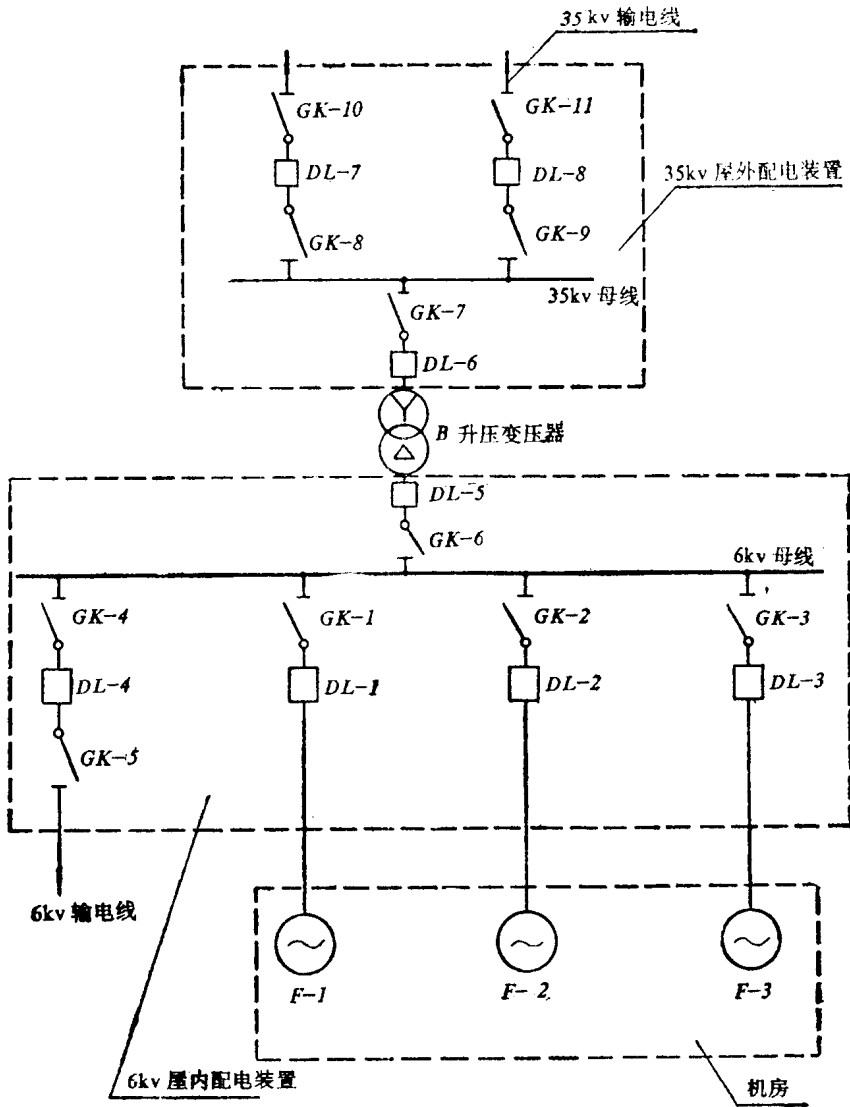


图1-6 小型水电站电气主接线示例

断路器 ($DL-1$ 、 $DL-2$ 等) 在正常工作时用来接通或切断电路; 故障时, 由继电器的作用能自动切断电路。

隔离开关 ($GK-1$ 、 $GK-6$ 等) 没有灭弧装置, 不能用来接通和切断有负荷电流的电路。它的作用是当电路中某些一次设备需要停电检修时, 使这些设备与带电部分可靠地隔离。例如, 检修发电机 $F-1$ 时, 需要断开 $GK-1$, 检修升压变压器 B 时, 需要断开 $GK-6$ 和 $GK-7$ 。隔离开关只有在同一条电路中的断路器已分闸, 没有电流流过的情况下才允许操作。例如, 要先切断断路器 $DL-1$, 才能断开隔离开关 $GK-1$ 。

图中, 电流互感器、电压互感器和厂用变压器没有表示出来。在水电站内, 一般10千伏及以下的电器设备放在屋内, 而升压变压器和35千伏及其以上电压的各种电器设备通常放在屋外。测量仪表、继电器、信号装置等二次设备一般装在主控制室中的控制盘、保护盘或配电盘上。

小型水电站电气主接线除上述几种基本形式外, 双母线带旁路、桥式以及菱形 (多角形) 等接线方式也有所采用, 限于篇幅, 本书不作详细介绍。

在具体进行培训或教学时, 可结合当地电站实际的电气主接线图, 讲清各设备的规格、型号、参数、作用、图形符号和文字符号的意义以及主接线的特点等。

第二章 电气运行的基本知识

第一节 电气运行工作的主要任务

水电站电气运行工作的主要任务可以用一句话来概括,那就是“确保安全、经济、可靠、优质发电”。

一、确保安全生产

电力生产的特点是连续生产,发、供、用电同时进行。若发生重大事故,不仅会使人身和设备受到损害,而且会直接影响到千家万户,甚至使国民经济蒙受严重损失。安全生产也是保证经济、满发,保证电能质量和对用户正常供电的前提条件。为此,水电站电气运行、检修人员必须牢固树立“安全第一”的思想。

为了确保安全生产,必须经常对全站职工进行安全生产的教育,使广大职工充分认识搞好安全生产的重要意义及忽视安全生产的危害性。从而使全站职工,特别是运行、检修人员加强政治责任感和工作责任心。同时,还必须建立和健全必要的规章制度,加强对运行、检修工人的技术培训,不断提高他们的技术水平和分析处理事故的能力,及时、正确地进行事故处理,排除设备故障。要加强对设备的巡视检查和维护检修,提高设备完好率,把电力安全生产提高到一个新水平。

二、确保电能质量

衡量电能质量的主要指标是频率和电压。我国电力系统的额定频率是50Hz。正常运行时,系统频率的容许偏差,对于中、小容量系统不应超过 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。当系统负荷超过或低于电站出力时,系统频率就要相应地降低或升高。频率下降不仅会使机组效率下降,而且对用户的影响极大。因为这将使所有交流电动机的转速按比例下降,导致产品的产量减少、质量下降、次品废品率增加。对于10kV及以下供电的电力用户,电压的允许偏差不应超过额定电压的 $\pm 7\%$,而对低压照明用户,则不应超过额定电压的 5% 及低于额定电压的 10% 。电压过高,将使电动机的铁芯过热,电压降低太多,则电动机电流会过大,使线圈温度升高,严重时拖不动所带动的机械,甚至会使电动机烧坏。对于照明设备(例如白炽灯),当电压降低 5% ,照度就要降低 18% ;当电压降低 10% ,则照度就要降低约 35% ;当电压升高 5% ,则灯泡寿命约缩短一半。电气运行人员要随时注意发电机频率表和电压表的指示值,当偏离额定值较多时,应及时调节水轮机导水翼开度大小以调节频率;通过调节水轮发电机励磁电流的大小来调整电压的高低,使频率和电压的变化不超出容许偏差范围,以确保电能质量。

三、确保经济运行

为了确保经济运行,必须加强技术管理,提高技术水平,采用经济运行方式,合理分配负荷,提高设备检修质量,缩短检修时间,消除设备缺陷,提高设备健康水平和完好率,做到经济、优化运行。要千方百计减少水能损耗,检查并及时消除漏水、漏油现象,要提高厂用机械及其电动机运行的经济性,降低厂用电率。

为了确保安全经济发电,运行人员必须做到“四勤”。