

高等学校教学用书

矿山电工学

赖昌干 张金程 邹有明 编

煤炭工业出版社

高等学校教学用书

矿 山 电 工 学

赖昌干 张金程 邹有明 编

煤炭工业出版社

(京) 新登字 042 号

内 容 提 要

本书是煤炭高等院校采矿工程、矿井建设、矿业机械和机电专业的通用教材。主要内容有：矿山供电系统及设备、安全用电及保护、煤矿机械设备的电气控制、矿井照明、节电及电气化指数、矿井供电设计计算及矿井信号与通讯等。和 1984 年出版的《矿山电工学》(采矿工程专业) 比较，本书增加了四大件控制、矿井信号与通讯和照明等方面的内容；充实了矿井电气安全，尤其是井下三大保护和采区供电设计的理论和应用等方面的内容。

本书亦适合作为成人高校有关专业的教材，对于矿山机电技术人员也是一本较好的参考书。

责任编辑：胡 玉 雁

高等学校教学用书

矿 山 电 工 学

赖昌干 张金程 邹有明 编

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街 21 号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787×1092mm¹/₁₆ 印张 23 ¹/₂ 插页 4

字数 562 千字 印数 1—9, 065

1991 年 11 月第 1 版 1991 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 7-5020-0563-3/TD·518

书号 3338 定价 6.10 元

前 言

本书是煤炭高等院校采矿工程、矿井建设、矿业机械和机电专业“矿山电工学”课程的通用教材；是在1984年《矿山电工学》（采矿工程专业）的基础上，根据1988年12月煤炭高校电气工程教材编审委员会修订的《矿山电工学》教材编写大纲编写的。

本书内容从适用专业和内容深度广度方面都有较大变化。适用专业由1984年版的采矿工程专业拓宽为采矿工程、矿井建设和矿业机械、机电等专业。内容增加了四大件控制、矿井信号与通讯和照明等方面的内容，加强了矿井电气安全，尤其是井下三大保护和采区供电设计的理论 and 应用等内容；同时对塑料在矿井中的广泛应用带来的静电及其防护问题作了介绍。此外，本书在编写过程中，注意贯彻电气图用图形符号（GB4728—84~85）及电气技术中的文字符号（GB7159—87）新国标；同时也注意尽量采用法定计量单位。

本书力图联系我国煤炭工业生产实际、正确贯彻煤炭工业生产的方针、政策、规程、规范，适当介绍了一些对我们有用的国内外先进技术和经验。

全书分七章，第一、六两章由山西矿业学院张金程编写；第二、五两章由焦作矿业学院邹有明编写；第三、四、七章由山东矿业学院赖昌干编写，全书由赖昌干任主编。在本书编写过程中得到山西矿业学院、焦作矿业学院和山东矿业学院领导和有关教师的大力支持和帮助，山东、山西煤矿设计研究院提供了部分资料，在此表示衷心的感谢。

编 者

1990年6月于山东矿业学院济南分院

目 录

前 言

第一章 矿山供电系统及设备	1
第一节 概述	1
第二节 矿山供电系统	8
第三节 高压供电设备	28
第四节 低压配电开关	45
第五节 电力变压器和移动变电站	54
第六节 矿用电缆	65
复习思考题及习题	71
第二章 安全用电及保护	73
第一节 矿用电气设备及其防爆原理	73
第二节 漏电与触电	78
第三节 井下低压电网的漏电分析	90
第四节 漏电保护	99
第五节 接地与接零	116
第六节 矿井电网短路电流计算	125
第七节 井下电网过流保护	141
第八节 过电压保护	161
第九节 静电及其防护	169
第十节 电火灾及其预防	172
复习思考题及习题	174
第三章 煤矿机械设备的电气控制	177
第一节 控制电器	177
第二节 控制线路图的绘制原则及分析方法	182
第三节 矿用隔爆磁力起动器	184
第四节 采煤机组的控制	202
第五节 输送机线的集中控制	216
第六节 掘进机械的控制	222
第七节 通风机、水泵、空气压缩机的控制	230
第八节 提升机的控制	248
复习思考题及习题	255
第四章 矿井照明	258
第一节 概述	258
第二节 常用照明术语	259
第三节 电光源及其用途	261
第四节 矿用照明器	264
第五节 矿井照明灯的选择	266

第六节 照明供电网络	268
复习思考题及习题	270
第五章 节电及电气化指标	271
第一节 矿山节电	271
第二节 功率因数及其补偿	278
第三节 电费计算法	287
第四节 主要电气化指标	289
复习思考题及习题	290
第六章 井下供电设计计算	292
第一节 概述	292
第二节 变电所及配电点位置的确定	292
第三节 负荷统计及变电所容量选择	296
第四节 采区供电系统的拟定	301
第五节 高压配电装置及电缆选择	302
第六节 井下低压电缆选择	311
第七节 低压电器设备选择	322
第八节 过电流保护装置整定计算	325
第九节 变电所硃室设备布置图和供电系统图的绘制	340
复习思考题与习题	341
第七章 矿井信号与通讯	342
第一节 概述	342
第二节 井下信号设备	343
第三节 采区信号系统	346
第四节 提升信号系统	349
第五节 井下电机车运输信号	356
第六节 矿山电话通信	357
复习思考题及习题	369
参考文献	370

第一章 矿山供电系统及设备

本章首先结合典型电力系统的组成,介绍有关的基本概念,继之介绍矿山供电系统的连接方式、典型矿山供电系统的分析、矿山各级变电所及配电点位置选择原则和典型的布置,最后介绍矿山供电系统中的高、低压设备。

第一节 概 述

一、电力系统

电能以功率形式表达时,俗称电力。电力由各种形式的发电厂产生,经过输送、变换和分配,到达分散的电能用户,这些生产——传输——分配——消费的环节,组成了一个有机的整体,叫做电力系统。

典型的电力系统如图 1-1 所示,其中各种标准图符的含义见表 1-1。

下面扼要介绍电力系统的各主要环节。

1. 发电厂

发电厂是把其它形式能量转换成电能的场所。这里其它能量系指燃料的热能、水流的位能或动能、核燃料的核能等。一般在能源丰富的地方建立发电厂。

常根据所用能源的不同,将发电厂加以分类,例如将使用热力作动力的,称为火力发电厂,将使用水力作动力的,称为水电厂等。近年来,我国为合理开发和利用能源,在煤炭资源集中的地区兴建了大型坑口电站,实行煤电综合开发,以减轻煤的运输量。

在发电厂中,由发电机产生的电能电压较低(10kV 及以下),它除供附近用户直接使用外,一般要先经厂内的升压变电站转换成高压,再送至外界的高压电力网。

2. 变电所

变电所是汇集电能、变换电压的中间环节,它由各种电力变压器和配电设备组成。不含电力变压器的变电所称为配电所。

可按不同标准将变电所分类。按用途分:有升或降压变电所、联络变电所、工矿企业变电所、农村变电所、整流变电所和电车变电所;按其在电力系统中的地位分:有枢纽变电所、穿越变电所和终端变电所;按供电范围分:有区域变电所(一次变电所)及地区变电所(二次变电所)等。

矿山供电系统中的矿区变电所属于地区变电所,它接受枢纽(或区域)变电所降压后的 110kV 电能,经降压后的 35kV 电能送至矿山地面变电所。矿山地面变电所多属终端或穿越变电所,它将电压降为 6~10kV 后,向额定电压为 10kV 及以下的用电设备供电。

3. 电力网

电力网主要由各种变电所及各种等级的电力线路组成,是电力系统的重要组成部分,担负着输送、变换和分配电能的任务。

一般根据电压等级的高低,将电力网分成低压、高压、超高压和特高压几种。电压在 1kV 以下的电力网为低压电网;3kV~330kV 的为高压电网;330kV~1000kV 的为超高压

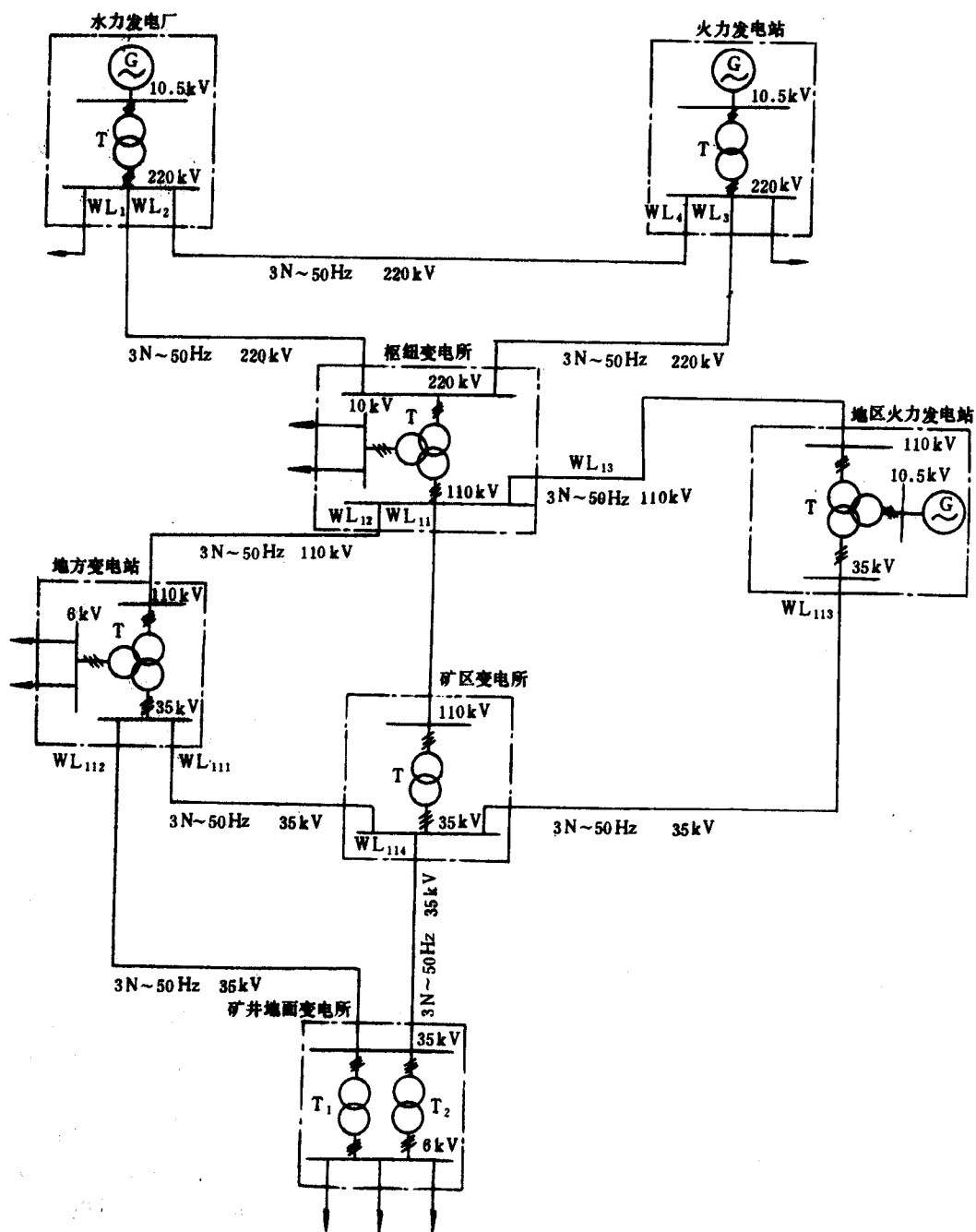
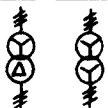
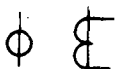


图 1-1 典型的电力系统

电网；1000kV 以上的为特高压电网。

表 1-1 主要电气设备符号表

电气设备名称及文字符号 单字母（双字母）	图形符号	电气设备名称及文字符号 单字母（双字母）	图形符号
电力变压器 T (TM)		母线及母线引出线 W	
断路器 Q (QF)		电流互感器（单次级） T (TA)	
负荷开关 Q		电流互感器（双次级） T (TA)	
隔离开关 Q (QS)		电压互感器（单相式压变） T (TV)	
熔断器 F (FU)		电压互感器（三线圈压变） T (TV)	
跌落式熔断器 F (FU)		阀型避雷器 F	
自动空气断路器 Q (QA)		电抗器 L	
刀开关 Q (QK)		移相电容器 C	
熔断器式开关 Q		电缆终端头 X	
交流发电机 G		线路 W	

二、电力系统的额定电压

1. 额定电压

能使受电器（电动机、白炽灯等）、发电机、变压器等正常工作的电压，称为它们的额定电压。当电力设备按额定电压运行时，一般可使其技术性能和经济效果为最好。

2. 额定电压等级

根据国民经济发展的需要、技术经济的合理性、电力设备制造工业的水平等因素，由国家统一规定额定电压，具有非常重要的意义。它可使电力设备的生产实现标准化及系列化，有利于电网的建设和运行。由国家规定的标准额定电压称为额定电压等级。

在我国，依照国家标准《GB156—80》的规定，3kV 以下的电气设备与系统的额定电压等级如表 1-2 所示；3kV 及以上电气设备与系统的额定电压与其所对应的设备最高电压如表 1-3 所示。表中的“设备最高电压”是根据设备绝缘性能和一些其它有关性能（如变压

表 1-2 3kV 以下电气设备与系统额定电压等级 (V)

直 流		单相交流		三相交流	
受电设备	供电设备	受电设备	供电设备	受电设备	供电设备
1.5	1.5				
2	2				
3	3				
6	6	6	6		
12	12	12	12		
24	24	24	24		
36	36	36	36	36	36
		42	42	42	42
48	48				
60	60				
72	72				
		100 ⁺	100 ⁺	100 ⁺	100 ⁺
110	115	127 [*]	133 [*]	127 [*]	133 [*]
220	230	220	230	220/380	230/400
400 [▽] , 440	400 [▽] , 460			380/660	400/690
800 [▽]	800 [▽]				
1000 [▽]	1000 [▽]			1140 ^{**}	1140 ^{**}

注：1. 电气设备和电子设备分为供电设备和受电设备两大类，受电设备的额定电压也是系统的额定电压；

2. 直流电压为平均值，交流电压为有效值；

3. 在三相交流栏下，斜线“/”以上为相电压，以下为线电压，无斜线者均为线电压；

4. 带“+”者只用于电压互感器、继电器等控制系统的电压；带“▽”者为单台供电的电压；带“*”者只用于矿井下、热工仪表和机床控制系统的电压；带“**”者只限于煤矿井下及特殊场合使用的电压。

表 1-3 3kV 及以上的设备与系统额定电压和其对应的设备最高电压 (kV)

受电设备与系统额定电压	供电设备额定电压	设备最高电压
3	3.15	
6	6.3	6.9
10	10.5	11.5
35		40.5
60		69
110		126
220		252
330		363
500		550
750		—

器的磁化电流及电容器的损耗等)确定的最高运行电压,该电压在数值上等于系统最高电压的最大值。

由表 1-2 和表 1-3 可以看出,由于额定电压是以受电器为中心制定的,故在同一电压等级中,电力系统各环节的额定电压值并不相同。一般规定,在同一电压等级中,受电器和系统的额定电压正好与等级电压相同,发电机的额定电压比同级受电器的额定电压高 5%。对于变压器,当一次侧与电网相连时,其额定电压与系统的网络电压相同;与发电机相连时,其额定电压与发电机相同。对于变压器二次侧,规定其额定电压比系统电网的电压高 5~10%。

对同级电网中各环节的额定电压作如上规定的原因,可借图 1-2 加以说明。从该图可知,由于线路中存在着电压损耗,使始端 A 的电压 V_1 和末端 B 的电压 V_2 不能相等。因此,为使受电设备的电压和与其相连的电力网的额定电压尽可能接近,就应使线路始端电压 V_1 比电力网额定电压(即受电器的额定电压) V_N 高 5%,末端电压 V_2 比 V_N 低 5%。这样,当受电器的额定电压取 V_1 和 V_2 的算术平均值 $(V_1 + V_2) / 2$ 时,就能保证它的端电压在不超出额定电压 $\pm 5\%$ 的范围内变动。对变压器来说,由于其在电网中具有发电机和受电器的双重地位,故对它的额定电压的规定应随使用情况不同而变。具体地说,当变压器一次侧接电力网时,相当于受电器,该侧的额定电压应为 V_N (直接与发电机相连接的变压器例外,此时,其一次侧额定电压应与发电机的相同)。当变压器二次侧送出电能时,相当于发电机的作用,由于其处于下一级线路的始端,故其额定(空载)电压应较后续的受电器与电力网的额定电压高出 5%。另外,由于在额定负荷下,变压器要产生 5% 的内部阻抗电压损耗,故对于短路电压较大的变压器(包括高压侧电压为 35kV 以上的和 35kV 以下而短路电压为 7.5% 以上的变压器)来说,为使它的二次侧输出实际电压比电力网额定电压高出 5%,其二次侧额定电压(如图 1-2 中的 V_{10} 、 V_{30})应较受电器和电力网高 10%。

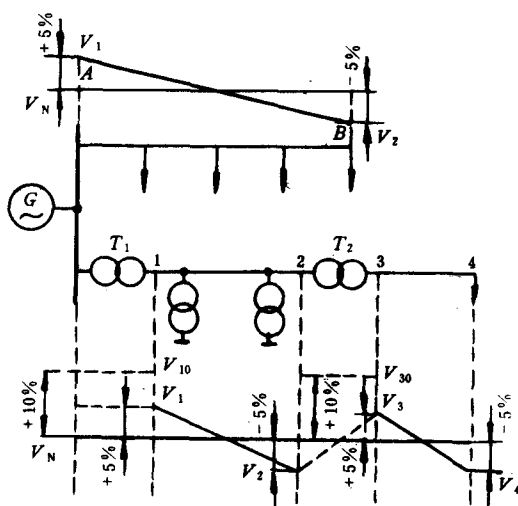


图 1-2 电力网中电压的变化

在实际应用中,由于变压器的高压绕组上有改变变压比而设的分接头,故可据电力网电压损失的大小及变电所对实际电压的要求,改变分接头进行电压调整。

3. 煤矿常见额定电压等级及应用范围

根据煤矿生产的特殊条件,有关部门制定了煤矿常用电压等级及其用途,如表 1-4 所示。

表 1-4 煤矿常用电压等级及应用范围

电压, kV	应用范围	备 注
0.036 及以下	井下电气设备的控制及局部照明	
0.127	井下照明及手持式电钻	
0.22	矿井地面照明	
0.25	电机车	直流
0.38	地面及井下低压动力	现有小型煤矿井下用
0.5	电机车	直流
0.66	井下低压动力	
0.75	露天煤矿工业电机车	直流
1.14	井下综合机械化采区动力	
1.5	露天煤矿工业电机车	直流
6	井上、下高压电机及配电电压	
10	井上、下高压电机及配电电压	正在研究实验
35 及 60	一般用于矿区配电或受电电压	
110	主要作矿区受电电压,大型矿区也作配电电压	

三、电力负荷分级及对供电的要求

1. 电力负荷分级

电力负荷是决定电力系统规划、设计、运行以及发电、送电、变电布局的主要依据。根据对供电可靠性要求的不同,矿山电力负荷可分成以下三级。

1) 一级负荷

凡因突然中断供电,将造成生命危险;导致重大设备破坏且难以修复;打乱复杂的生产过程并使大量产品报废,给国民经济造成重大损失者,均属一级负荷。例如在涌水量大的矿井中,若主排水泵因供电突然中断而停转,则会导致地下水大量涌出,因而有可能淹没矿井,造成长期停产,故此类负荷当属一级。又如有爆炸、火灾危险的矿井中,如因供电中断使主通风机停止运转,则有害气体将可能积聚超限,从而使操作人员会因缺氧窒息而死亡,并可能造成爆炸伤亡,故此类负荷亦属一级。此外,对具有沼气爆炸或水患危险的矿井,其竖井载人提升机及其配套的辅助高低压用电设备,均应列为一级负荷。

对属于一级负荷的设备,为使其可靠运行,采用两个独立电源供电。这里的独立电源,是指若干供电电源的任一个,当其发生故障或停止供电时,并不影响其它电源的供电。具备下述两个条件的发电厂或变电所的不同母线段,均属独立电源。

(1) 每段母线的电源来自不同的发电机，且以后的输、变、配电各环节又均为分列的；

(2) 母线段之间无联系，或虽有联系，但当其中一段发生故障时，其联系能自动断开，并且并不影响另一段继续供电。

2) 二级负荷

凡因突然中断供电，将造成大量减产，产生大量废品，大量原材料报废，使工业企业内部交通停顿的，均属二级负荷。例如大型矿井的地面空气压缩机，煤矿中的提、运设备，大型矿井井底车场整流设备，向综采工作面供电的采区变电所，井筒防冻设备，选煤厂浓缩机选矿、烧结等厂的主要生产流程中的运转设备以及保证主要流程所需的部分照明设备等，都属二级负荷。

对属于二级负荷的设备，应由两回线路供电，但若在取得两回线路有困难时，亦可由一回专用线路供电。对井下普采或高档普采工作面供电的采区变电所电源线，也可采用一回专用电缆。

3) 三级负荷

凡不属于一、二级负荷的用电设备，均列为三级负荷。此类负荷一般对供电无特殊要求，可设单一回路供电。

2. 电力负荷对供电的基本要求

1) 保证供电的安全可靠性

供电的可靠性是指供电系统不间断供电的可能程度。

为保证供电系统的可靠性，首先需保证系统中各设备、元件的可靠运行，为此就应经常对它们进行监视、维护，定期进行试验和检修，以使之始终处于完好的运行状态，并应在系统中备有必要的备用容量，以应急需。

针对矿井生产的高粉尘、高湿、有易爆、有害气体的特殊环境，为确保其供电安全，必须采取防触电、防爆、防潮、抗磨损等一系列技术措施，正确选用设备、拟制供电系统方案，并特别加强保护措施，经常进行维修。

2) 保证电能的良好质量

这一条主要是指应将供电系统中交流电的电压幅值和频率保持在一定允许变动范围内，并使其波形畸变在允许范围之内。

当电力设备的端电压与额定电压之差超过允许值时，它的运行状态就要恶化。电力用户供电电压允许变化范围见表 1-5。

表 1-5 电力用户供电电压允许变化范围

线路额定电压 V_N	电压允许变化范围
35kV 及以上	$\pm 5\% V_N$
10kV 及以下	$\pm 7\% V_N$
低压照明	$+5\% V_N \sim -10\% V_N$

交流电频率的变化不仅影响电力用户的正常作业（例如当其降低时，电动机的转速将随之下降，因而使所带动的机器或机械的生产率降低），而且还对系统本身有严重危害。我

国规定,电力系统的频率应经常保持在 50Hz 左右,同时规定:对 3000kW 及其以上的系统,频率偏差不应超过 $\pm 0.2\text{Hz}$;而对 3000kW 以下的系统,则不超过 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。

交流电压波形的畸变,表示其含有高次谐波。当总谐波电压(所有高次谐波电压的均方根值)超过基波电压的 5%时,就可能使继电保护、自动装置、电子计算机产生误动作,甚至不能正常工作。因此,一般要求任一高次谐波的瞬时值都不应超过同相基波电压瞬时值的 5%。在矿山企业地面变电所的 6~10kV 母线上,应保证其电压正弦波形畸变率不大于 10%。有多种原因可使电压波形产生畸变,比如在煤矿电力系统中,矿井提升机的晶闸管电控,钢丝绳牵引胶带输送机的晶闸管直流拖动、主通风机同步机的晶闸管励磁拖动、架线电机车的硅整流的牵引电源、矿用隔爆型荧光灯的采用等。特别是由于煤矿中广泛采用前述的硅元件或晶闸管组成的电流换流装置,且其容量愈来愈大,就使煤矿供电系统中高次谐波的“污染”日趋显著,故对这种情况必须格外留意加以抑制或补偿。

3) 保证供电系统运行的经济性

经济性涉及的范围很广,比如使系统在运行中尽量减少损耗、提高效率,使系统尽可能做到成本低,节约建设投资等。

总之,要在保证安全生产和安全用电的前提下,使用户得到可靠、优质、经济的电能,并且在保证技术、经济指标符合要求的同时,使系统尽可能达到结构简单,便于安装、维护,易于操作。

第二节 矿山供电系统

一、供电系统结线方式

供电系统结线,是指由各种电气设备及其联接线构成的电路,其功能是汇集和分配电能。

结线中的母线,又称汇流排,它实质上是电源线路或变压器与多个用户馈出线的连接处,表现为电路中的一个节点,起集中和分配电能作用。

电力系统长期的运行实践表明,认识和掌握以下几种基本供电系统结线方式是重要的。

1. 系统或网络结构的基本方式

放射式、干线式和环式是系统或网络结构的几种基本方式。

1) 放射式

(1) 单回路放射式

如图 1-3a 所示。适于向三级或二级小负荷或某些专用设备供电。这种结线方式的优点是:系统简单、运行维护方便;缺点是:使用的开关、线路多,供电可靠性较差。

(2) 双回路放射式

根据所含电源数目,双回路放射式又分为单电源双回路和双电源双回路两种。

单电源双回路放射式结线方式如图 1-3b 所示。在这种方式中,从一段母线上并列引出两回线路,且每回均由单独的开关控制。这种结线适用二级负荷。例如在由一路电源供电的采区变电所中,它的两台变压器低压侧采用分段母线。正常情况下分列运行,当一台变压器维修或故障时,接通母线联络开关,由另一台保证采区的重要负荷供电,或维持必要的生产设备供电。

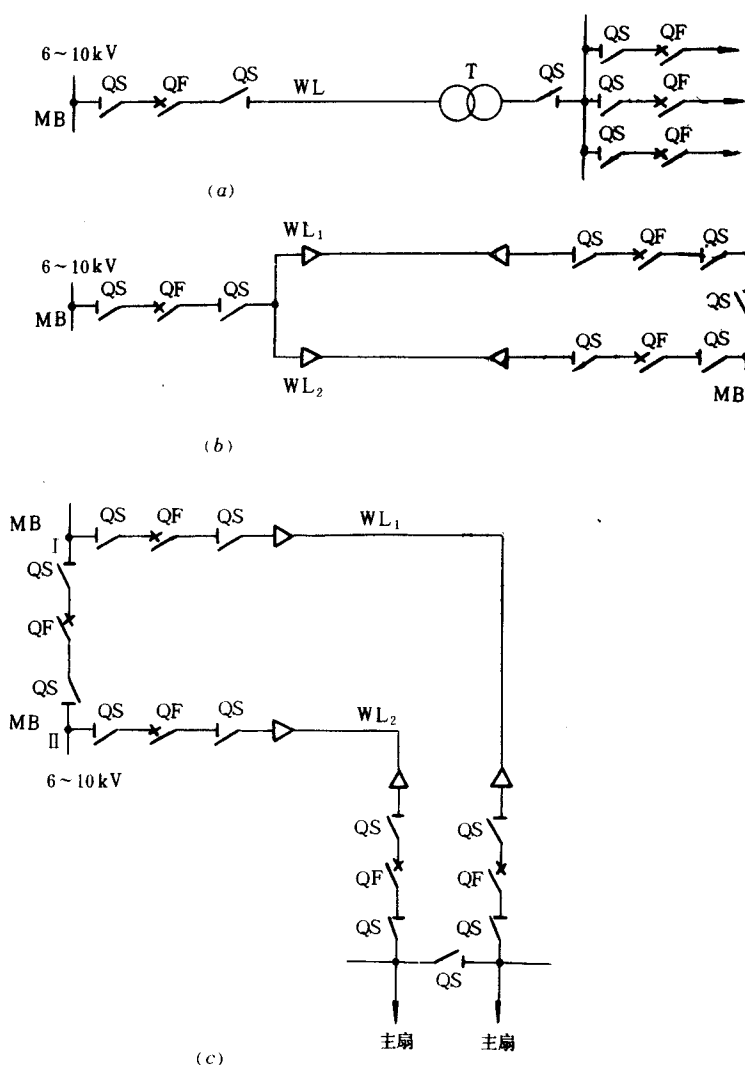


图 1-3 放射式结线

a—单电源单回路；b—单电源双回路；c—双电源双回路

与单回放射式相比，由于双回路放射式具有两个独立可控的回路，故其可靠性自然要高（电源故障情况除外）。此外，这种结线要比单回放射式有较好的灵活性，它既可采用双回路同时运行方式，使线路上的功率、电压损失减小，又可采用一回工作另一回备用运行方式，使两回互为备用。

双电源双回路放射式结线方式如图 1-3c 所示。在这种方式中，从两段母线上各引出一回路对用户供电。这种结线方式适用于具有较大容量或一级负荷的供电点，比如图 1-3c 中的主通风机。由于该方式具有两回电源，故较前述两种方式在可靠性上有了进一步的提高，即当任何一回线路或电源发生故障时，供电均不会中断。至于在负荷侧结线中的进线与母线分段开关是采用断路器，还是隔离开关，要根据用户点负荷出线数量及性质而定。比

如在图 1-3c 中, 由于主通风机不属于瞬时不能停电的矿山电力设备, 故其配电母线可采用隔离开关分段, 进线开关为断路器。在一回线路故障时, 能使其两侧开关均自动切断, 投入母线分段隔离开关, 由另侧电源线路连续供电。

2) 干线式

干线式结线分直接联接 (图 1-4a) 与贯穿联接 (图 1-4b) 两种。

直接联接的结线方式是从一路高压配电干线上直接引出分支线向用户供电, 其分支线数一般不超过 5, 且配电变压器容量不宜超过 3000kVA 。它一般适用于架空线上对三级负荷分散用户配电, 也适用于井下电缆线路对多台顺槽输送机的供电。

与放射式结线相比, 直接联接干线式具有回路少、能使高压配电装置数量减少、造价低等优点。但是, 当公用的干线发生故障时, 全部干线上的负荷供电均中断, 故其可靠性差。

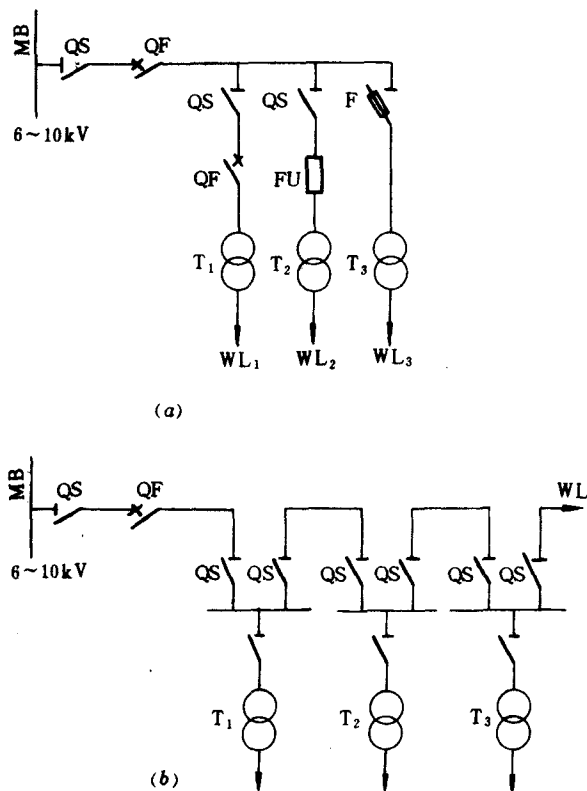


图 1-4 干线式结线

a—直接联接式; b—贯穿联接式

贯穿联接式结线方式的各用户变电所呈串接形式。由于在联接各用户干线的进出两端均采用了隔离开关, 故有可能减少因一段干线故障而引起的停电范围。

3) 环状式

环状式结线方式如图 1-5 所示, 线路将电能从两段母线或同一电源引出, 经过不同路径, 由不同方向和地点, 引入矿山地面变电所或某负荷点。此种结线方式适用于电源对矿区用户的相对位置居中或较远, 而用户间距较近, 且负荷相差不很悬殊的供电情况。特别

是适用于当初期建设的送电线路和变电所容量不足时,需在其它位置新建变电所的情况。

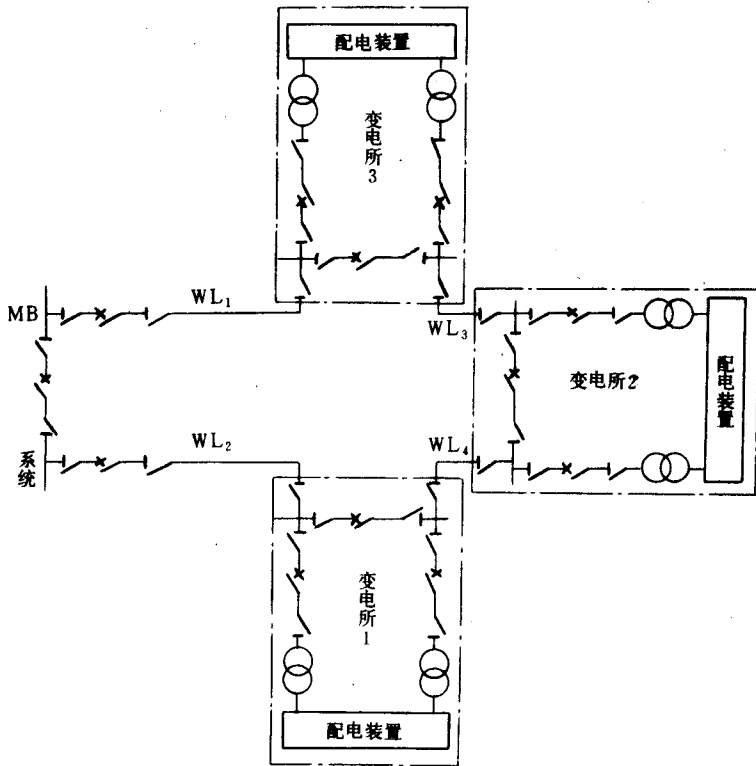


图 1-5 环状式结线

2. 矿山各级变电所常用结线方式

矿山各级变电所主结线分单母线、桥式、双母线、线路-变压器组 4 种,下面扼要介绍其中的前两种。

1) 单母线

在单母线结线方式中,进、出线均设有旨在切断负荷与故障电流的断路器,并设有与母线联接的“母线隔离开关”和与线路联接的“线路隔离开关”,其中前一种隔离开关用来在检修断路器时隔离母线;而后一种则用来防止在检修断路器时从用户侧反向送电,或防止雷电过电压侵入,从而保证维修人员和设备的安全。

单母线结线又分为分段和不分段两种形式。

(1) 单母线不分段

单母线不分段结线方式原理如图 1-6a 所示。这种结构虽有线路简单,配电装置造价低的优点,但在性能上却不够灵活与可靠,特别是在处理母线系统故障或检修时,因需全线停电,故其一般只适用于小容量的用户。这里,母线系统是指由母线本身与其隔离开关构成的系统。

(2) 单母线分段