



高等院校规划教材



矿山电工学

Mine Electrotechnics

主编 赖昌干

煤炭工业出版社

高等院校规划教材

矿 山 电 工 学

主编 赖昌千
参编 邹有明 成凌飞

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书是普通高等院校采矿工程、矿山安全工程、矿山机电专业的通用专业课教材。主要内容有矿山供电系统及设备、安全用电及保护、采掘机械的电气控制、矿井照明、节电及电气化指标、采区供电设计计算等。和 1991 年出版的《矿山电工学》比较,这次修订贯彻了新的《煤矿安全规程》、《煤炭工业矿井设计规范》等规程、标准、规范,更新了部分设备,更贴近煤矿安全生产实际。

本书也可作为成人教育相关专业、相关的专业证书班(培训班)的教材,对矿山机电技术人员也是一本较好的参考书。

前 言

高等学校规划教材《矿山电工学》(1991年11月版)自问世以来,为煤炭高等院校以及成人教育采矿、建井、机电等专业广泛使用,信誉颇佳。该书于1996年7月获原煤炭工业部颁发的第二届煤炭高等学校优秀教材二等奖。

由于煤炭工业的飞速发展,对安全生产要求进一步提高,电气设备不断更新,有必要对1991年版《矿山电工学》进行修订。修订遵循以下原则:

(1) 适应专业基本不变,即适用普通高校本科采矿工程、矿山安全工程、矿山机电等专业,也可用于成人教育相关专业。

(2) 贯彻从2005年1月1日起执行的《煤矿安全规程》,贯彻国家标准GB 3836—2000爆炸性气体用电气设备和其他相关标准、规程、规范。

(3) 对教材内容作了适当的更新和删节。保留了原书基本体系、内容和一些现在还广泛使用的旧设备;增加了电缆故障检测、选择性漏电保护装置等内容;删去了通风机、水泵、空气压缩机、提升机控制及矿井信号通讯等内容。

修订后,本教材更加贴近煤矿安全生产实际。

全书共6章,第一、六章由山东科技大学赖昌干教授编写;第二、五章由河南理工大学邹有明教授编写;第三、四章由河南理工大学成凌飞博士编写。全书由赖昌干教授统稿并担任主编。在本书修订过程中,得到了山东科技大学、河南理工大学领导的大力支持,济南煤矿设计研究院、淄博科汇电气公司提供了部分资料,在此表示感谢。

由于编者水平所限,书中疏漏和错误之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编 者

2006年6月29日

目 录

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	9
第三节 高压供电设备	27
第四节 低压配电开关	39
第五节 电力变压器和移动变电站	48
第六节 矿用电缆	60
第七节 电缆故障探测	68
复习思考题及习题	78
第二章 安全用电及保护	80
第一节 电气设备及其防爆原理	80
第二节 漏电与触电	86
第三节 井下低压电网的漏电分析	98
第四节 漏电保护	107
第五节 接地与接零	126
第六节 矿井电网短路电流计算	136
第七节 井下电网过流保护	153
复习思考题及习题	172
第三章 采掘机械设备的电气控制	175
第一节 控制电器	175
第二节 控制线路图的绘制原则及分析方法	180
第三节 矿用隔爆磁力起动器	182
第四节 采煤机组的电气控制	201
第五节 掘进机械的电气控制	215
复习思考题及习题	220
第四章 矿井照明	222
第一节 概述	222
第二节 常用照明术语	223
第三节 电光源及其用途	225

第四节 矿用照明器	228
第五节 矿井照明灯的选择	230
第六节 照明供电网络	233
复习思考题及习题	235
第五章 节电及电气化指标	236
第一节 矿山节电	236
第二节 功率因数及其补偿	243
第三节 电费计算法	253
第四节 主要电气化指标	254
复习思考题及习题	256
第六章 采区供电设计计算	258
第一节 概述	258
第二节 变电所及配电点位置的确定	261
第三节 负荷统计及变电所容量选择	262
第四节 采区供电系统的拟定	267
第五节 高压配电装置及电缆选择	272
第六节 井下低压电缆选择	281
第七节 低压电器设备选择	292
第八节 过电流保护装置整定计算	294
第九节 变电所硐室设备布置图和供电系统图的绘制	308
复习思考题与习题	314
参考文献	315

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、矿山供电系统的结线方式、典型矿山供电系统的分析、矿山各级变电所及配电点位置的选择原则和典型的布置方式,然后介绍矿山供电系统中的变压器、高低压开关、电缆等元件。考虑到煤矿井下电气事故中电缆故障占70%~80%,最后介绍了电缆故障探测技术及电缆测距仪。

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生产,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,图中各种电气设备的图形符号及含义见表1-1。

下面扼要介绍电力系统的各个主要环节。

1. 发电厂

发电厂是把其他形式的能量转换成电能的场所。这里,其他形式的能量指燃料(煤、石油等)的热能、水流的位能、风流的动能、核元素(铀等)的核能(原子能)等。一般在能源丰富的地方建立发电厂。

通常根据所用能源的不同,将发电厂分为:使用热能作动力的火力(热力)发电厂,使用水的位能作动力的水力发电厂,使用风流动能作动力的风力发电厂,使用核能作动力的核电站等。

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火力发电厂(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,由于发电机产生的电能电压较低,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,通过高压电力网输送至远方,再经降压变电站降压后才能供用户使用。

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。变电所按用途可分为升压或降压变电所、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有枢纽变电所、穿越变电所和终端变电所;按供电范围有区域变电所(一次变电所)及地区变电所(二次变电所)等。

矿山供配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

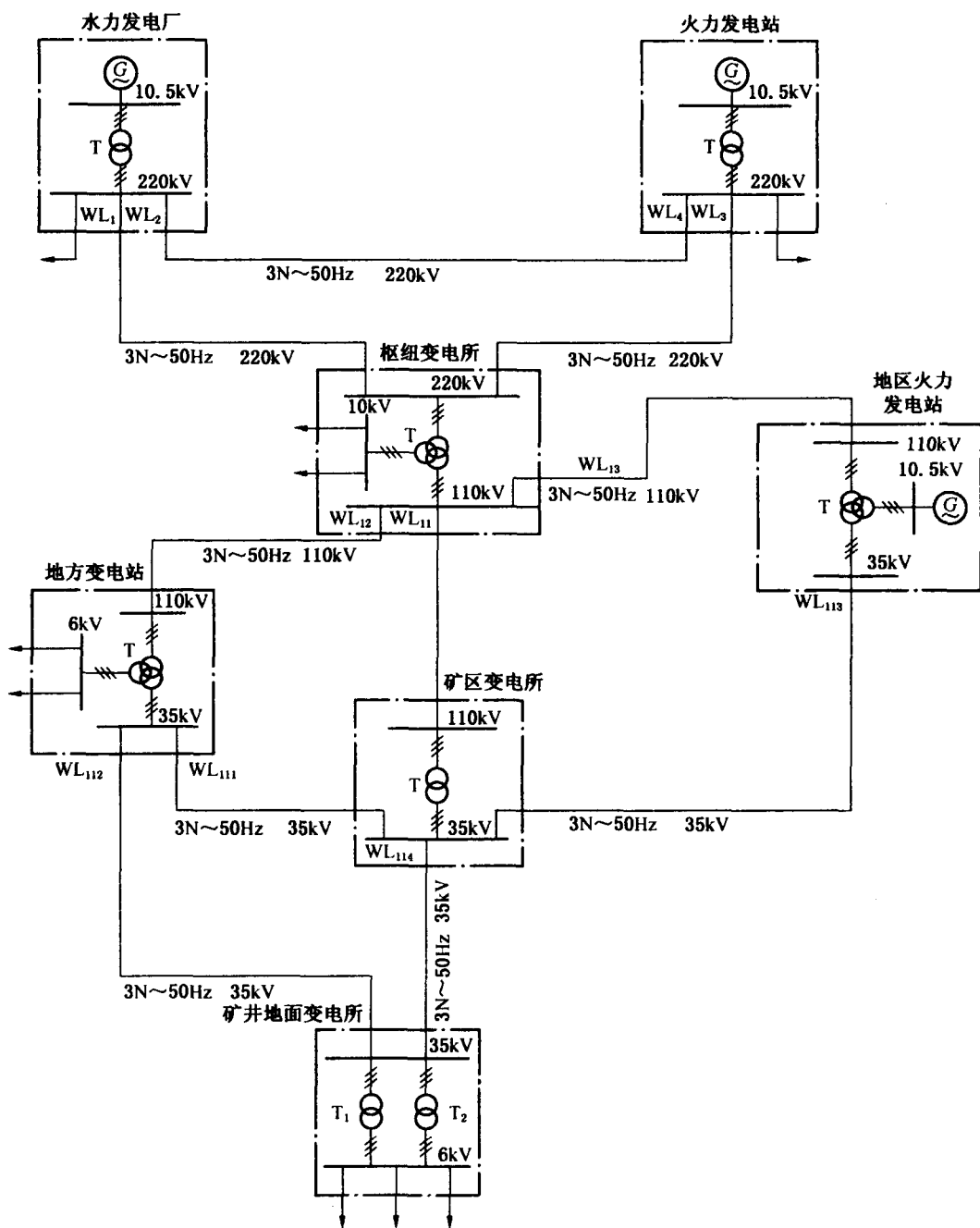


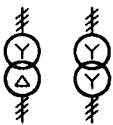
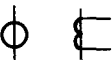
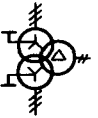
图 1-1 典型的电力系统

后的 110kV 电能，经降压至 35kV 后，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电压等级的电力线路组成，是电力系统的重要组成部分

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	

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, 将电力网分为:

- (1) 低压电网——电压在 1kV 以下的电力网。
- (2) 高压电网——电压为 3 ~ 330kV。

- (3) 超高压电网——电压为 330 ~ 1000kV。
 (4) 特高压电网——电压在 1000kV 以上。

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等级，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。

在我国，依照国家标准的规定，3kV 以下的电气设备与系统的额定电压等级见表 1-2；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见表 1-3。表中的“设备最高电压”是根据设备绝缘性能和一些其他有关性能（如变压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。

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		—

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, 发电机额定电压比同级受电器额定电压高 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额定电压相同。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%。

对在同一电压等级电网中, 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

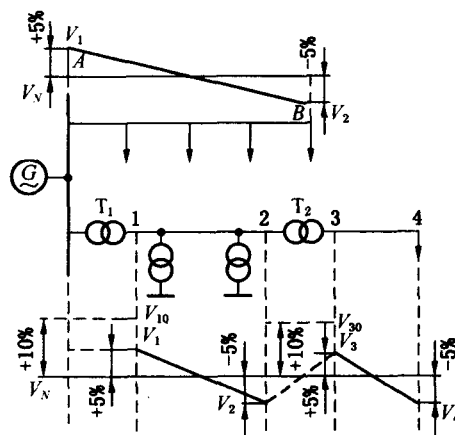


图 1-2 电力网中的电压变化

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，为使它的二次侧实际输出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额定电压高 10%。

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. 煤矿常用额定电压等级及应用范围

根据煤矿生产的特殊条件，有关部门制定的煤矿常用电压等级及其用途见表 1-4。

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	
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3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。矿井因突然停电，可能造成人身伤亡或重要设备损坏，造成重大经济损失，故为一级负荷。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。

《煤矿安全规程》第四百四十一条规定：“矿井应有两回电源线路。当任一回路发生故障停止供电时，另一回路应能担负矿井全部负荷。年产60000t以下的矿井采用单回路供电时，必须有备用电源，备用电源的容量必须满足通风、排水、提升等的要求。矿井的两回电源线路上都不得分接任何负荷。正常情况下，矿井电源应采用分列运行方式，一回路运行时另一回路必须带电备用，以保证供电的连续性。10kV及其以下的矿井架空电源线路不得共杆架设。矿井电源线路上严禁装设负荷定量器。”

两回电源线路应符合下列条件之一：

(1) 两个电源之间相互独立、无联系。

(2) 若两个电源之间有联系，应符合下列规定：

①在发生任何一种故障时，两个或两个以上的电源线路不得同时受到损坏。

②在发生任何一种故障且保护动作正常时，至少应有一个电源不中断供电，并能担负矿井全部负荷。

③在发生任何一种故障且主保护失灵，以致所有电源都中断供电时，应能有人在值班的处所完成必要的操作，迅速恢复一个电源的供电，并能担负矿井全部负荷。

必须指出：矿井的两回电源线路，应分别来自电力网中的两个区域变电所或发电厂。如实现这一要求确有困难时，则必须引自同一区域变电所或发电厂的不同母线段。

同时，《煤矿安全规程》第四百四十二条规定：“对井下各水平中央变（配）电所、主排水泵房和下山开采的采区排水泵房供电的线路，不得少于两回路。当任一回路停止供电时，其余回路应能担负全部负荷。主要通风机、提升人员的立井绞车、抽放瓦斯泵等主要设备房，应各有两回路直接由变（配）电所馈出的供电线路；受条件限制时，其中一回路可引自上述同一种设备房的配电装置。”

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，煤矿中的主要提升、运输设备，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、烧结厂等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，并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，以防不测。

针对矿井生产的高粉尘、高湿、易爆、有害气体的特殊环境，为确保其供电安全，必须严格按《煤矿安全规程》及其他相关行业规定进行矿井供电作业。

2) 保证电能的良好质量

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	$\pm 5\% \sim -10\% V_N$

保证电能的良好质量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。

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 3000kV 及其以上的系统，频率偏差不应超过 $\pm 0.2\text{Hz}$ ；而对 3000kV 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、控制装置、计算机等产生误动作。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，例如在煤矿电力系统中，矿井提升机的晶闸管电控、钢丝绳牵引带式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，并加以抑制或补偿。

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。

(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出现故障时，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。

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线路对用户供电。与单回路放射式相比，由于双回路放射式具有两个独立可控的回路，故其可靠性较高。此外，这种结线与单回路放射式相比有较好的灵活性，它既可采用双回路同时运行的方式，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的运行方式，使两回互为备用。这种结线方式适用于具有较大容量或一级负荷的供电点，如图 1-3c 中的主要通风机。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，由于主要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。在一回线路发生故障时，能使其两侧开关均自动切断，投入母线分段隔离开关，由另一侧电源线路继续供电。

2) 干线式

干线式结线分直接连接（图 1-4a）与贯穿连接（图 1-4b）两种。

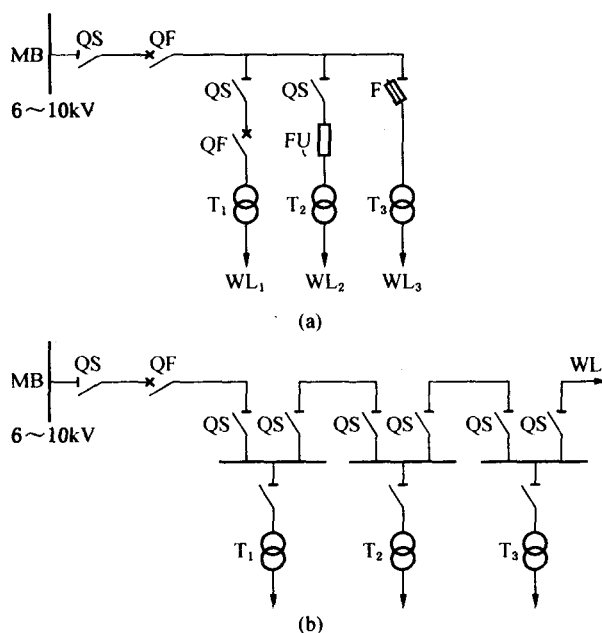


图 1-4 干线式结线

a—直接连接式；b—贯穿连接式

直接连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,其分支线一般不超过 5 个,且配电变压器容量不宜超过 $3000\text{kV}\cdot\text{A}$ 。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工作面巷道输送机的供电。

与放射式结线相比,直接连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。

贯穿连接式结线方式的各用户变电所呈串接形式。由于在连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,需在其他位置新建变电所的情况。

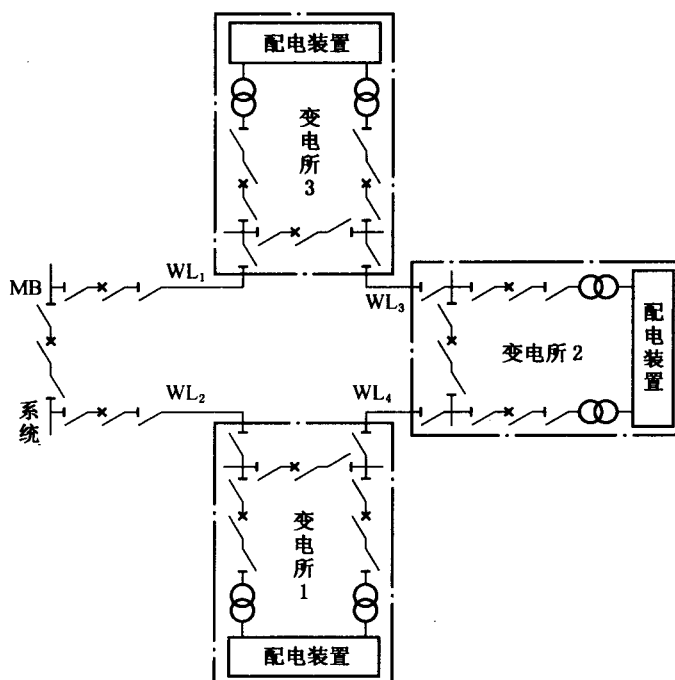


图 1-5 环状式结线

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,下面扼要介绍前两种。

1) 单母线结线

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