

1

项目一

认识供配电系统

学习目标

- 掌握供配电系统的构成。
- 了解供配电系统的电压及额定电压的确定方法。
- 了解电力负荷的等级及供电要求。
- 掌握供配电系统中性点的运行方式。
- 了解城轨供电系统选用的一次设备类型。



电能属于二次能源,是现代社会的重要能源,在生产、生活、运输等各领域得到广泛应用。城市轨道交通的电源来自城市电网,所以城市轨道交通供电系统就是城市供电系统的一个电能用户。城市电网的布局对城市轨道交通供电系统的设计方案具有决定作用,其供电能力和供电质量直接影响城市轨道交通供电系统的安全性与可靠性,从而直接影响城市轨道交通系统的运行安全和费用。那么电能是如何产生的?如何输送到各用户?供电系统又是如何运行的?在本项目中将逐一讲解。

任务一

供配电系统基本知识

供配电系统就是电能的供应和分配系统,包括电能的生产、输送、分配和应用各环节。为了能够连续、优质地为各用户提供电能,国家制定了多项与供配电系统相关的标准和规范。

一、供配电系统的组成和特性

供配电系统包括电力系统和配电系统,电力系统一般指 35 kV 及以上的输电网络,配电系统指 10 kV 及以下的配电网。

1. 电力系统的组成

由发电厂的发电机、升压及降压变电设备、电力网及电能用户构成的发电、输电、变配电和用电的整体称为电力系统。

(1)发电厂是生产电能的场所,利用发电机将自然界的煤、水力、核能、风力、太阳能等一次能源转换成方便传输和应用的二次能源——电能。

(2)电力网的主要功能是变换电压和输送电能,负责将发电厂的电能输送给电力用户,它由各类变电所和不同电压等级的线路连接组成。电力网的电压等级一般在 10 kV 以上,是电能的输送通道。

(3)配电系统(电力用户)位于电力系统的末端,负责将电能传输、分配给电力用户。配电系统的电压等级一般在 110 kV 及以下,是电能的分配通道。

2. 配电系统的组成

配电系统是电力系统的一个组成部分,负责输送、分配和应用电能。

(1)供电电源一般取自电力系统的电力网,由地区(区域)变电所的 35 kV 或 10 kV 电压供电;在使用城市电网不便的情况下也可以由用户自备的发电机供电。

(2)配电网的作用是接受电力网的电能,将其变换为适合的电压,经过电能分配后通过输电线路安全、可靠、经济地输送给各种用电设备。它主要由用户的总降压变电所(或高压配电所)、高压输电线路、降压变电所(或配电所)和低压输电线路组成。

(3)用电设备指专门消耗电能的电气设备,将电能转换成需要的其他形式的能量,如机械能、热能、光能等。用电设备根据额定电压分为高压设备和低压设备,高压设备的额定电压一般在 1 kV 以上,低压设备的额定电压一般为 220/380 V。

配电系统在结构上与电力系统极其相似,它实际上是电力系统的电力用户,由电力系统中的电网供电。



3. 电力系统的特性

(1)电力系统是一个有机整体,电力系统中任何一个主要设备出现非正常运行状况,都会影响整个系统的正常运行。

(2)电力系统时刻处在动态平衡的相对稳定之中。发电厂发出的交流电不能大量存储,要求电能的生产、输送、分配和使用必须同时进行,而且要保持动态平衡状态。能量的转换以功率的形式表现,要时刻保持电力系统有功功率和无功功率的平衡。

(3)随机变化、实时调整。电力系统的运行状态是动态变化的,除了设备的计划停送电外,异常和事故对系统的冲击是随机的;正常情况下,电力系统的负荷和机组出力的变化也是随机的。所以,各级调度部门必须运用一切手段不断进行调节和控制,以维持电力系统的平衡。

(4)易实现自动化,分配控制简单,可进行远距离自动控制。

二、供配电系统的电压

根据三相功率 S 与线电压 U 、线电流 I 的关系 $S = \sqrt{3}UI$ 可知,在输送功率一定的情况下,电压越大则电流越小,有利于减少线路上的电压损失和电能损耗,也可减小导线截面以节约有色金属。但电压越高对线路和设备的绝缘能力与灭弧能力的要求也越高,所以所需的投资也相应增加。因而在供配电系统中对应一定的输送功率和输送距离,均有相应技术上的合理输送电压等级。

1. 额定电压

额定电压就是用电设备、发电机和变压器正常工作时具有最佳技术经济指标的电压。为了便于设备制造的标准化和系列化,我国颁布了额定电压的国家标准。根据国家标准《标准电压》(GB/T 156—2007)规定,额定电压等级分为 3 类:第 1 类是 100 V 以下的安全电压,用于直流控制、操作电源、蓄电池和安全照明用具等电气设备;第 2 类是 100~1 000 V 的电压,用于一般工业和民用电气设备;第 3 类是 1 000 V 以上的电压,用于发电、变电、输电、配电和高压电气设备。我国三相交流电网、发电机和电力变压器的额定电压如表 1-1 所示,各级电压电力线路合理的输送功率和输送距离如表 1-2 所示。

表 1-1 我国三相交流电网、发电机和电力变压器的额定电压

分 类	电网和用电设备 额定电压/kV	发电机额定 电压/kV	电力变压器额定电压/kV	
			一次绕组	二次绕组
低压	0.38	0.40	0.38	0.40
	0.66	0.69	0.66	0.69
高压	3	3.15	3 及 3.15	3.15 及 3.3
	6	6.3	6 及 6.3	6.3 及 6.6
	10	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11
	—	13.8、15.75、18、20	13.8、15.75、18、20	—
	35	—	35	38.5
	66	—	66	72.6
	110	—	110	121
	220	—	220	242
	330	—	330	363
	500	—	500	550



表 1-2 各级电压电力线路合理的输送功率和输送距离

线路电压/kV	线路类型	输送功率/kW	输送距离/km
0.22	电缆	≤ 100	≤ 0.20
0.38	电缆	≤ 175	≤ 0.35
6	架空	$\leq 2\,000$	3~10
	电缆	$\leq 3\,000$	≤ 8
10	架空	$\leq 3\,000$	5~15
	电缆	$\leq 5\,000$	≤ 10
35	架空	1\,500~2\,000	20~50

需要指出的是,750 kV 及以上超高压虽然不是我国的标准电压等级,但已经在部分输电网有所应用;20 kV 虽然不属于国家标准额定电压,但在输电能力和设备造价上具有明显优势,已经在配电网络中应用,将来有可能应用于城市轨道中压网络。

我国铁路牵引电压为交流 25 kV,城市轨道交通牵引电压为直流 1 500 V 和 750 V,属于行业特殊电压等级。

2. 额定电压的确定

1) 电网的额定电压

电网(电力线路)的额定电压是指线路首末两端电压的平均值,是国家根据国民经济发展的需要和电力工业的水平经技术经济分析后确定的,是确定其他电力设备和用电设备额定电压的依据。

2) 用电设备的额定电压

用电设备的额定电压与同级电路线路的额定电压相同。

3) 发电机的额定电压

由于电网在传输电能时有电压损耗,所以发电机的额定电压比同级电网的额定电压高 5%。

4) 变压器的额定电压

变压器与发电机相连时,其一次绕组额定电压与发电机额定电压相同,即比同级电网的额定电压高 5%;变压器与电网相连时,其一次绕组额定电压与线路额定电压相同,即等于同级电网额定电压。

变压器二次绕组的额定电压要考虑变压器自身的电压损耗和输电线路的电压损耗。当变压器距离用户较近时,可不考虑线路电压损耗而只考虑变压器自身的电压损耗,此时二次绕组额定电压比同级电网高 5%;当变压器距离用户较远时,要同时考虑自身电压损耗和线路电压损耗,此时二次绕组的额定电压比同级电网高 10%。

三、供电电能质量指标

电能质量指标是指供配电装置在正常情况下不中断、不干扰用户使用电能的指标,表征了供配电系统工作的优劣。供电质量要从安全性、可靠性、优质性和经济性几方面综合



评价。

1. 频率偏差

频率偏差指供电实际频率与电网标准频率的差值。我国电网的标准频率为 50 Hz, 通常称为工频。频率变化对电力系统运行的稳定性不利, 调整频率主要依靠调节发电机的转速来实现。在实际供配电系统中频率是不可调的, 只能通过提高电压的质量来提高供配电系统的电能质量。

当电网容量大于 3 000 MW 时, 频率偏差不允许超过 ± 0.2 Hz; 当电网容量小于 3 000 MW 时, 频率偏差不允许超过 ± 0.5 Hz; 在电力系统非正常情况下, 供电频率偏差不应超过 ± 1 Hz。

2. 电压偏移

电压偏移指用电设备的实际端电压 U 偏离额定电压 U_N 的百分比, 计算公式为

$$\Delta U_N = \frac{U - U_N}{U_N} \times 100\% \quad (1-1)$$

产生电压偏移的主要原因是系统滞后的无功负荷和线路损耗所引起的系统电压损失。10 kV 及以下三相配电系统的电压偏移允许值是 $\pm 7\%$, 220 V 单相配电系统的电压偏移允许值是 $+7\%$ 、 -10% ; 在供配电系统非正常运行情况下, 用户受电端的电压偏移允许值是 $\pm 10\%$ 。

3. 电压波动

电压在某一时段内急剧变化而偏离额定值的现象称为电压波动, 其程度通常以电压幅度波动值和电压波动频率来衡量。电压波动主要由用户负荷的剧烈变化引起。例如, 大型晶闸管整流装置、电焊机、大功率电动机的启动等都会引起电压波动, 从而直接影响系统中其他电气设备的正常运行。电压幅度波动的相对值为

$$\Delta U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max}} \times 100\% \quad (1-2)$$

4. 电压正弦波畸变

电力系统中存在大量的非线性供电设备, 使得电压波形偏离正弦波, 这种现象称为电压正弦波畸变。电压波形的畸变程度用电压正弦波畸变率来衡量, 也称为电压谐波畸变率。电压正弦波畸变会影响某些电气设备的正常工作。

5. 供电可靠性

供电可靠性指标是根据用电负荷的等级要求制定的, 用全年平均供电时间占全年时间的百分比来表示。绝对可靠的供配电系统是不存在的, 可以通过合理的供电方案和保护装置隔离事故、减小事故范围, 尽快恢复供电, 维持较高的供电可靠性指标, 但也要考虑经济性。

四、负荷分级及供电要求

负荷指发电机或变电所供给用户的电力, 即电气设备(发电机、变压器)和线路中通过的功率或电流。为方便应用, 设备负荷通常用功率表示, 而线路负荷用通过的电流值来表征。发电机、变压器等电气设备的负荷指其输出功率, 而电动机类用电设备的负荷指其输入功率。



1. 负荷的分级

电力负荷应根据供电可靠性及中断供电在政治、经济上所造成的损失或影响程度分为三级。

城市轨道交通的通信、信号、电力牵引、车站通风、消防等重要设备属一级负荷。

2. 供电要求

(1) 一级负荷应由两个电源供电,当一个电源发生故障时,另一个电源不应同时受到损坏。一级负荷中特别重要的负荷,除由两个电源供电外,还应增设应急电源,并严禁将其他负荷接入应急供电系统。可作为应急电源的有独立于正常电源的发电机组,供电网络中独立于正常电源的专用的馈电线路、蓄电池、干电池。

(2) 二级负荷的供电系统应由两个回线路供电。

(3) 三级负荷的供电无特殊要求,但是也应该尽量保证供电的可靠性。

任务二

供配电系统中性点运行方式

为了提高供配电系统的安全性、可靠性和经济性并且保证人身安全,供配电系统的不同位置常采用不同的中性点接地方式。电力系统中性点常采用不接地、经消弧线圈接地、直接接地和经低电阻接地 4 种运行方式,低压电网采用 TN 系统、TT 系统、IT 系统 3 类接地系统。

一、电力系统中性点运行方式

电力系统中发电机的三相绕组和变压器高压侧绕组通常为星型联结,星型绕组的联结点称为中性点,系统接地方式的实质就是中性点的接地方式。

1. 中性点直接接地系统

中性点直接接地系统称为大接地电流系统,指系统中性点经金属导线直接与大地相接,中性点电压为地电位。正常运行时,中性点无电流通过;单相接地时构成单相短路,将会产生很大的故障电流和零序电流,继电保护在此电流的启动下,迅速将故障线路切除。为了提高供电可靠性,可在线路上加装自动重合闸装置。

采用中性点直接接地方式的系统对线路绝缘水平的要求较低,能明显降低线路造价。其缺点之一是单相接地短路对附近的通信线路有电磁干扰。我国 110 kV 及以上电压等级的电力系统多采用大接地电流系统,在接有单相负载的低压 220/380 V 配电系统中一般也采用该接地方式。

2. 中性点不接地系统

中性点不接地系统是指系统中性点对地绝缘。正常运行时,电力系统的三相导线之间及各相对地之间,沿导线全长都分布有电容,这些电容在电压作用下将有附加的电容电流通过。单相接地后系统的三相对称关系并未破坏,线电压不变,中性点的电压上升到相电压,非故障相对地电压值增大为 $\sqrt{3}$ 倍相电压,接地点的短路电流是正常运行的单相对地电容电



流的 3 倍,故中性点不接地系统可以带故障继续运行。

我国配电网大多采用中性点不接地方式,因为该接地方式在发生单相接地故障时系统还是对称的,一般可以带故障连续供电 2 h,为排除故障赢得了时间,相对提高了供电的可靠性,而且不需要任何附加设备,投资小,只需安装绝缘监视装置,以便及时发现单相接地故障。

目前,我国中性点不接地系统适用于电压等级在 500 V 以下的三相三线制系统、接地电流小于或等于 30 A 的 3~10 kV 系统、接地电流小于或等于 10 A 的 20~35 kV 系统、与发电机有直接电气联系的 3~20 kV 系统。

3. 中性点经阻抗接地系统

中性点经阻抗接地系统是指在系统中性点与大地之间用一消弧线圈相连的接地方式,在系统发生单相接地故障时,消弧线圈产生的电感电流补偿单相接地电容电流,以使通过接地点电流减少并能自动灭弧。消弧线圈接地方式在技术上不仅拥有了中性点不接地系统的所有优点,还避免了单相故障可能发展为两相或多相故障、产生过电压损坏电气设备绝缘和烧毁电压互感器等危险。中性点经消弧线圈接地的电网发生单相接地故障时,故障电流很小,所以它属于小接地电流系统。根据接地电阻值的大小,该系统分为高电阻接地和低电阻接地两种方式。

高电阻接地方式接地电流较小,通常在 5~10 A 范围内,但至少应等于系统对地的总电容电流。此接地的保护方式需要配合接地指示器或警报器,保证故障时线路立即跳脱。

低电阻接地方式增大了接地短路电流,使保护迅速动作,切除故障线路。接地电阻的大小必须使系统具有足够的最小接地故障电流,保证接地继电器准确动作。

目前,我国大城市的配电网大多采用中性点经低电阻接地的方式。

二、低压配电系统中性点接地方式

在低压配电系统中,广泛采用中性点直接接地的运行方式,而且引出有中性线(N)、保护线(PE)和保护中性线(PEN)。中性线用来引出单相电源、传输三相系统中的不平衡电流和单相电流,还可以减小负荷中性点的电位偏移。保护线是为了保护人身安全,防止发生触电事故而设的接地保护线。保护中性线兼具中性线和保护线的作用。

低压电网有三类接地方式,分别是 TN 系统、TT 系统和 IT 系统,其中 TN 系统又分为 TN-C、TN-S、TN-C-S 三种。第一个字母表示电源中性点的对地关系,第二个字母表示装置外露可导电部分的对地关系,横线后的字母表示中性线和保护线的关系。

1. TN 系统

TN 系统即保护接零系统,有 TN-C、TN-S、TN-C-S 三种接线方式。T 表示电源中性点直接接地;N 表示设备外露可导电部分与配电网中性点直接相连,即与配电网保护零线相连,所以称为保护接零系统;C 表示中性线和保护线合并为保护中性线,S 表示中性线和保护线分别设置。



1) TN-C 系统

TN-C 系统由三根相线和一根 PEN 线构成,所以也称为三相四线制系统,如图 1-1(a)所示。在该系统中,设备外露可导电部分接在 PEN 线上。当系统存在不平衡三相负荷或单相负荷时,PEN 线上有电流通过,电气设备的外露可导电部分有对地电压。由于保护线不得断线,因而 PEN 线在进入建筑物前应重复接地。

TN-C 系统适用于正常运行时三相负荷基本平衡的情况,也适用于 220 V 的单相设备及便携式用电设备。

2) TN-S 系统

TN-S 系统由三根相线、一根 N 线和一根 PE 线共五条线构成,故也称为五线制系统,如图 1-1(b)所示。在该系统中,设备外露可导电部分直接接到 PE 线上。PE 线在正常时没有电流通过,当电气设备发生漏电事故或接地故障时有电流通过,使保护迅速切除故障,保证操作人员的安全。

PE 线和 N 线的区别有以下几点。

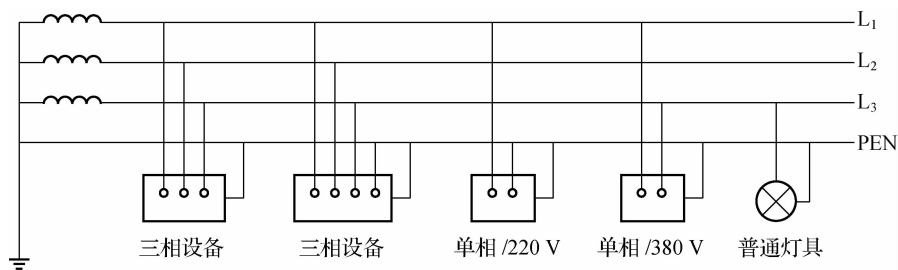
- (1) PE 线是专用保护接地线,N 线是工作零线。
- (2) PE 线在正常时无电流通过,N 线在三相负荷不平衡或有单相负荷时可能有电流通过。
- (3) PE 线用黄、绿双色表示,N 线用黑色或淡蓝色表示。
- (4) PE 线不得进入漏电保护器,N 线可以。
- (5) 在照明支路中,PE 线必须用铜线,截面积不得小于 2.5 mm^2 ,而 N 线截面积根据计算负荷确定。

TN-S 系统适用于工业与民用建筑等低压供电系统,是目前我国低压系统中普遍采用的接地方式。

3) TN-C-S 系统

TN-C-S 系统是在 TN-C 系统的末端将 PEN 线分开为 PE 线和 N 线,分开后不允许再合并,如图 1-1(c)所示。此系统前面部分具有 TN-C 系统的特点,后面部分具有 TN-S 系统的特点。

该系统适用于工业建筑和民用建筑,也可用于新建住宅小区的供电系统,一般在电源进户总配电箱处将 PEN 线分为 PE 线和 N 线。



(a) TN-C 系统

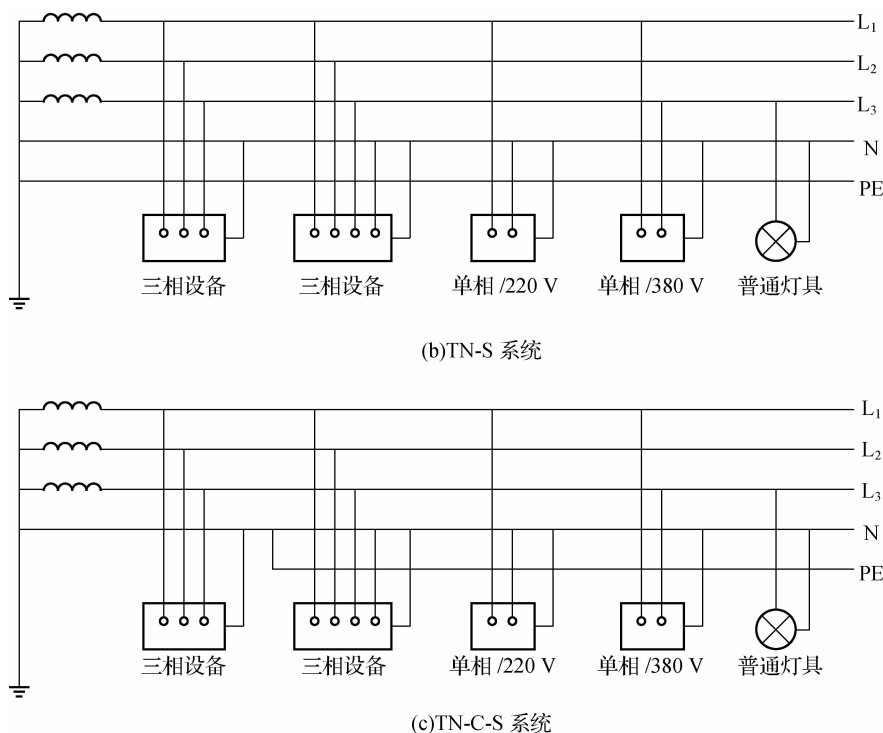


图 1-1 TN 系统接地方式

2. TT 系统

TT 系统是配电网中性点和电气设备外露可导电部分分别接地的系统,外露可导电部分采用各自的 PE 线直接接地,如图 1-2 所示。

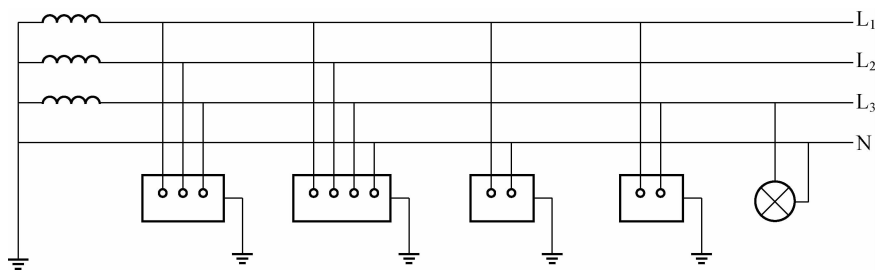


图 1-2 TT 系统接地方式

在 TT 系统中,当电气设备的外露可导电部分带电时,接地保护装置可以减少触电危险,但低压断路器不一定动作,所以外露可导电部分对地电压有可能超过安全电压。当漏电电流较小时,需加漏电保护器。接地装置的接地电阻应保证接地电压小于 50 V,并当出现单相接地故障时能在规定的时间内切断供电线路。

TT 系统主要用于低压共用用户,即用于未装备配电变压器,从外面直接引进低压电源的小型用户,如小型车间 220/380 V 照明负荷、动力负荷等。



3. IT 系统

IT 系统即保护接地系统,主要用于配电网中性点不接地或经高阻抗接地的系统,用电设备外露可导电部分采用各自的 PE 线接地,如图 1-3 所示。

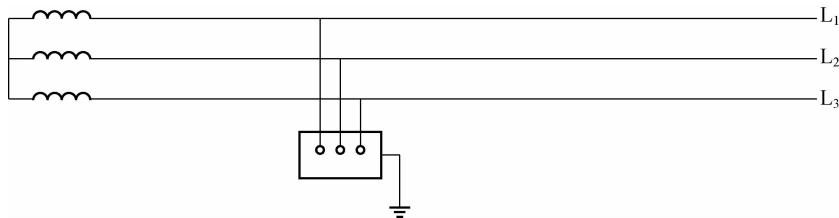


图 1-3 IT 系统接地方式

IT 系统的 PE 线正常时无电流,发生漏电故障时有电流通过。任何一相发生接地故障时,系统可以大地为相线继续运行,所以须加单相接地检测和监视装置。另外,为了避免发生双重故障,即两台设备不同相漏电的情况,应采取等电位连接措施或加装漏电保护装置。

任务三 认识常用电气设备

城市轨道交通工程是城市电网的重大电力用户,城市轨道交通供电系统(以下简称城轨供电系统)所接受的城市电网的不同电压等级的电源并不能直接为城轨的车辆和机电设备所用,需要具备变换和分配功能的各类电气设备将引入电源进行接受、变换和再分配。城轨供电系统包括交流供电系统和直流牵引供电系统两个部分,电压等级包括交流 110 kV、35 kV、10 kV、0.4 kV 和直流 1 500 V、750 V 等多个级别,所以涉及的电气设备比较多。在交流供电系统中有变压器和高、中、低压配电设备;在直流牵引供电系统中,有牵引变压器、整流器和直流配电设备。同时,为了保证供电系统的安全、可靠运行,还设有监视、保护、测量、自动控制设备。

一、电气设备的分类与要求

变配电系统的电气设备可分为一次设备和二次设备两大类,二者共同协调工作来保证变配电系统的安全、可靠运行。一次设备是变配电系统的主体,负责电能的转换与传输;二次设备是变配电系统安全、可靠运行的重要保障。

1. 一次设备

在变配电所中,直接用来接收电能、改变电压和分配电能的设备都称为一次设备或主设备,由一次设备构成的电路称为一次电路或主电路。一次设备可按照功能、安装地点及电流制式进行分类。

1) 按照设备功能分类

(1) 变换电器。变换电器在变配电系统中改变电压或电流,包括变压器、电流互感器和电压互感器。变压器用来变换电压和传输电能,根据需要电压升高或降低,完成电能的传



输和分配。电流互感器和电压互感器用来变换电路中的电流与电压,以便供电给测量仪表、继电器或自动装置,并使之与高压电路隔离。

(2)开关电器。开关电器是用来正常控制主电路开断或闭合的电器,具有控制、隔离、保护和接地作用,包括断路器、隔离开关、负荷开关、熔断器、负荷开关-熔断器组合电器等。断路器具有灭弧能力,用来在电路正常工作和发生故障时关合或开断电路。隔离开关具有明显的断开点,用来隔离电源和设备,保证设备检修时工作人员的安全。负荷开关主要用于电路通断,它可以关合正常负荷和过载负荷,但不能开断短路电流。熔断器用在电路过载或短路时通过熔件的熔断开断电路,因而具有保护作用。

(3)限制电器。限制电器主要用来限制电路中的电流或电压,包括电抗器、避雷器、阻波器等。电抗器是一个扼流线圈,用来限制电路中的短路电流。避雷器是一种泄能装置,用来限制电路中出现的过电压或内部操作过电压。阻波器是一种电感线圈,主要用于载波通信,能限制高频载波进入变电所。

(4)补偿电器。补偿电器是指用于变配电系统中补偿无功功率、提高功率因数的设备,如电力电容器和同步补偿机等。

(5)成套装置。成套装置又称组合电器,根据一次电路的要求将各种一次设备组装成一个整体,如高压开关柜、低压成套电器装置、气体绝缘金属封闭组合电器 GIS 等。

2)按照安装地点分类

一次设备按照安装地点可分为户内式和户外式两大类。户内式设备不具有防风、雨、雷、露、冰、灰尘等功能,须安装在特殊的建筑物内使用,设备运行和维护条件好。户外式设备具有防风、雨、雷、露、冰、灰尘等功能,直接安装在露天环境中使用,设备运行和维护条件差。35 kV 及以下电压等级的电器大都是户内式设备,基本上采用成套产品形式。35 kV 及以上电压等级的电器以户外式为主,但随着电器设备小型化、无油化的发展,户内式 35 kV 及以上电器也越来越多,如 SF₆ 封闭式组合电器 GIS。

3)按照电流制式分类

一次设备按照电流制式可划分为交流电器和直流电器。交流电器工作于三相或单相工频交流电路,也有个别电器工作于非工频电路;直流电器工作于直流电路。城市轨道交通由城市电网工频交流电源供电,牵引网采用直流供电方式,所以在城轨供电系统中交流电器和直流电器使用量都很大。

2. 二次设备

在变配电系统中,对一次设备进行控制、保护、监测和指示的设备称为二次设备,又称为辅助设备。二次设备与一次设备保持电气隔离,通过电流互感器和电压互感器与一次设备取得电联系。二次设备属于低电压、小容量设备,主要包括测量仪表、控制和信号器具、继电保护装置、自动远传装置、操作电源、控制电缆等。

3. 主要电气设备的基本要求

变配电系统主要设备出现故障可能会导致供电中断甚至造成严重的安全事故,在对电气设备进行设计和选择时应综合考虑安全、可靠和经济等多方面因素,并应满足以下基本要求。

(1)能长期承受系统最高工作电压、短期承受内部过电压和外部过电压的作用而不被



击穿。

(2)能长期承受额定电流和短期过载电流的作用,温升保持在允许范围内。

(3)能承受短路热效应和力效应的作用而不损坏。

(4)开关电器的断流能力应符合相关规定,供测量和保护用的变换电器应符合规定的精度要求。

(5)在规定的使用环境中能承受一定的外界条件影响并安全可靠地运行。

二、城轨供电系统设备配置

城市轨道交通工程是城市电网的重大电力用户,接受城市电网不同电压等级的电源,而这些电源不能直接为城轨的车辆和机电设备所用。因此,城轨供电系统需要将引入电源进行接受、变换和再分配。而完成这些变换和分配功能需要各类电气设备,主要分为开关设备类、变压器类、整流器类、继电保护类的设备。

1. 设备的分类

按照设备功能可划分为开关设备、变压器、整流器和继电保护设备四大类。开关设备包括交流开关设备和直流开关设备。变压器包括主变压器、所用变压器、接地变压器、配电变压器、牵引变压器。

按照电压等级可划分为高压设备、中压设备和低压设备。高压设备包括高压开关设备、主变压器;中压设备包括中压开关设备和配电变压器、牵引变压器、1 500 V 直流开关设备;低压设备包括低压开关设备、整流器、750 V 直流开关设备、继电保护类设备。

按照设备所在位置可分为主变电所设备、牵引变电所设备和降压变电所设备。

按照设备系统可分为交流供电系统设备、直流牵引供电系统设备、动力照明供电系统设备。

2. 高压开关设备

高压开关设备应用于城轨工程主变电所,作为高压配电设备,接受城市电网电源并分配给主变压器。高压开关设备为户内式安装,一般采用高压 GIS 全封闭组合电器设备。

高压 SF₆ 全封闭组合电器将 SF₆ 断路器、隔离开关、接地开关、互感器、避雷器、母线、连接件和三线终端等组合在一起,这些设备或部件全部封闭在已接地的金属外壳中,在其内部充有一定压力的 SF₆ 绝缘气体,该设备简称 GIS(gas isolate system)。由于 GIS 将多个高压电器元件有机组合在一起,因此具有结构紧凑、元器件不受污染及大气环境因素的影响、安装方便、有利于缩短安装工期等特点。

3. 中压开关设备

中压开关设备应用于城轨工程的主变电所、电源开闭所、牵引变电所和降压变电所,用于接受和分配中压电能。

中压开关柜按照电气绝缘介质可分为空气绝缘开关柜、复合绝缘开关柜和 SF₆ 气体绝缘开关柜。按照开关柜内安装的开关设备可分为断路器柜、负荷开关柜、隔离开关柜和熔断器柜。空气绝缘和复合绝缘开关柜的结构形式为金属铠装封闭式,内部设有不同功能隔室,手车可为落地式或中置式。SF₆ 气体绝缘开关柜可分为全密封充气(SF₆)环网开关柜和 C-GIS(cubicle type-GIS)开关柜。不同的电气绝缘介质对开关柜的外形尺寸影响很大,采用



空气绝缘的开关柜体积最大,采用复合绝缘次之,采用 SF₆ 气体绝缘时开关柜体积最小。

35 kV 开关柜多采用 C-GIS 开关柜,以减小变电所的土建规模,20 kV 及以下开关柜应采用空气绝缘的金属铠装开关柜,避免温室气体 SF₆ 对环境的影响。金属铠装封闭手车式开关柜、C-GIS 开关柜可用于主变电所、牵引变电所和降压变电所,全密封充气(SF₆)环网开关柜、负荷开关柜一般用于跟随式降压变电所。

4. 断路器类型

目前,城轨工程一般采用真空断路器。真空断路器的主要部件是真空灭弧室,灭弧室是一个高度真空的玻璃泡或矾土陶瓷,内置动静触头,利用真空的绝缘性能强迫灭弧,灭弧时没有游离气体产生,电弧容易熄灭,触头不会烧损。由于真空的绝缘性能很好,动静触头的开距较小,适合于频繁操作。真空断路器的灭弧原理是在断路器跳闸动静触头分开的瞬间,真空灭弧室内触头间形成高温液态的金属桥,金属桥被拉断时,金属桥蒸发,产生金属蒸气,使触头间隙击穿,产生电弧。电弧电流流过触头时,将产生磁场,驱使电弧在电流过零点时熄灭,或在过零点前被强迫熄灭。在熄灭的瞬间,金属蒸气离子在磁场的作用下迅速扩散,并被吸附在触头和金属屏蔽罩上,金属离子的密度迅速降低,使触头间恢复真空间隙,不再被较高的恢复电压击穿,使电弧熄灭,实现断路器的开断功能。

5. 低压开关设备

1) 低压开关设备的功能

低压开关设备用于降压变电所中,是动力照明供电系统的核心内容。它接受配电变压器提供的低压电能,为车站、停车场和控制中心的低压动力照明设备提供电源。

低压开关设备一般设置安装于断路器本体的脱扣器作为保护设备。

2) 低压开关柜的型式

城轨工程降压变电所低压开关柜多采用金属封闭间隔式刀开关柜。开关柜的电气绝缘和开关设备的灭弧介质均为空气,其外壳防护等级在 IP20 及以上。开关柜柜体为模块化框架结构,基本分三个功能隔室:水平母线室、功能单元隔室、电缆室。功能单元某一隔室产生故障电弧时,不影响相邻的其他隔室。开关能前接线或后接线,接线端子规格及固定的牢靠性能满足所连接电缆的需要。

开关柜的类型按低压电器的安装方式可分为固定式、抽出式和混合式。抽出式断路器可以是插拔式也可以是固定安装在开关柜的抽屉中。混合式断路器是在同一低压开关柜中,低压电器既有固定式安装,也有抽出式安装。无论低压电气设备为何种安装方式,低压开关柜的各安装单元之间均采用金属或绝缘板分隔,以避免在某安装单元出现故障时,对其他安装单元产生影响,扩大故障范围。

低压电器安装于低压开关柜内,一般分为配电电器和控制电器。配电电器包括低压断路器、熔断器、低压负荷开关、低压隔离开关等;控制电器包括接触器、起动器、主令电器和各种控制继电器等。低压开关柜的主要电器是低压断路器。

3) 低压断路器的类型

低压断路器主要用于配电线路和电气设备的过载、失压和短路保护。在 IEC 国际电工词汇中,对断路器的定义为:断路器是能接通、承载及分断正常电路条件下的电流,也能在规定的非正常电路条件下(如短路)接通、承载一定时间和分断电流的开关电器。



按照断路器的极数可分为单极、双极、三极和四极断路器;按照是否具有隔离功能,可分为具有隔离功能断路器和不具有隔离功能断路器;按照动作速度可分为一般型和快速型(快速型断路器通常为限流型,其分断时间短到足以使电流在未达到预期值之前即被分断);按照结构分为框架式(万能式)断路器和塑壳断路器;按照用途分为配电断路器、保护电动机用断路器、剩余电流断路器等。

6. 直流开关设备

直流开关设备在直流牵引供电系统中承担接受和分配直流电能的作用。它接受牵引整流机组提供的直流电能,分配给上、下行牵引网,为电动列车提供直流电能。直流开关设备包括牵引变电所内的直流开关柜和一般设于牵引变电所外的上网开关柜。

直流开关柜包括正极开关柜、负极开关柜、馈线开关柜和上网开关柜。正极开关柜内可采用直流快速断路器或电动隔离开关;负极开关柜内设电动隔离开关或手动隔离开关;馈线开关柜采用直流快速断路器;上网开关柜(包括纵向联络开关设备)采用电动隔离开关,为短轨供电采用直流接触器或直流快速断路器。上网开关柜用于牵引网断电检修和形成大双边越区供电。

目前,城轨工程采用的直流开关柜均为金属铠装落地手车式,直流快速断路器安装在手车上,电动或手动隔离开关在开关柜内固定安装。

直流开关柜无论其标称电压为 750 V 还是 1 500 V,其电气绝缘介质和断路器的灭弧介质都是空气。

7. 微机保护装置

供电系统在运行过程中不可避免地会出现一些故障,最常见的是各种形式的短路及频率下降等,故障的基本特征是导致电流突增、电压下降及电流与电压间相角的变化。继电保护装置对这些故障和不正常工作状态会自动发出故障报警或跳闸信号,实现对电气设备的保护,满足供电系统可靠运行的要求。

继电保护装置采集电流互感器、电压互感器二次侧的实时电流和电压数值,并与继电保护装置中预先设定的门槛值进行比较,当超过限定值时,装置可发出报警信号或驱动开关操作机构分闸线圈,使断路器跳闸。

继电保护可通过各种电磁继电器实现,如利用电流继电器判断线路电流是否越限,利用电压继电器判断线路电压是否正常,利用中间继电器驱动指示灯、开关的操作机构合闸、分闸线圈等。

微机保护装置也是实现继电保护的一种设备,它的基本功能包括继电保护、测量计量、装置的自诊断功能和通信功能,其中通信功能可实现微机保护装置内各种信息的上传。

有些微机保护装置除了上述基本功能外,还有 PLC 的功能,可实现控制联锁等逻辑编程功能。微机保护装置一般不会将所有保护功能集于一身,主要是价格和装置大小将影响产品的适用性。目前,微机保护装置在城轨工程中已得到广泛应用,交流高压、中压系统和直流牵引供电系统的继电保护多采用微机保护装置。

微机保护装置的主要特点在于灵活方便的远方调整功能、故障录波功能和可编程功能,采用微机保护装置大大减少了二次控制电缆的数量,提高了继电保护的可靠性。

8. 牵引整流机组

牵引整流机组由牵引变压器和整流器构成。牵引变压器接受中压开关设备提供的中压



电压,经过降压,为整流器提供适合的低压交流电源;整流器则将交流电源整流为电动列车所需要的直流电源。

牵引整流机组是牵引变电所的核心设备,是列车高速、安全、可靠、经济、节电运行的保证。牵引整流机组需要牵引变压器和整流器两种完全不同的设备相互匹配,才能实现牵引整流机组的整体性能。

牵引变压器的绝缘类型分为树脂浇注、浸绝缘漆和杜邦纸绝缘,城轨工程多采用树脂浇注绝缘方式。整流器中的整流元件可分为大功率二极管、可控硅和晶闸管,采用可控硅、晶闸管可以控制整流桥臂的导通或关闭,使直流输出的纹波系数更小,而且可以在不同负载情况下对直流输出电压进行调节,使直流输出电压恒定。城轨工程多采用二极管作为整流元件。

按照中压系统和直流牵引供电系统标称电压的不同,目前国内牵引变压器采用的网侧电压为 35 kV、33 kV 和 10 kV,阀侧电压对于 750 V 系统为 0.59 kV、0.61 kV,对于 1500 V 系统为 1.18 kV、1.22 kV。

牵引整流机组为Ⅵ类重牵引负荷等级,即在额定负荷时能够长期运行,在 1.5 倍过载时能够运行 2 h,在倍过载时能够运行 1 min。

9. 主变压器

主变压器是城轨工程中设在主变电所的配电变压器,用于将城市电网引入的高压电源转换成中压电源并满足容量要求。主变压器的网侧和阀侧电压等级依据供电系统设计确定,目前使用的主变压器主要有 110/35 kV、110/33 kV 和 110/10 kV 三种。

为了减少城市电网电压波动和负荷变化对城轨中压系统电压质量的影响,主变压器多采用有载调压型电力变压器。有载调压开关具有就地、远方操作功能。

110 kV 级变压器按照绝缘介质的不同可分为复合油绝缘式、油浸式、SF₆ 气体绝缘式(GIT)和树脂浇注干式变压器(RCDT)。由于油浸式变压器价格低,应用成熟,目前多采用自冷油浸式变压器。

10. 配电变压器

配电变压器就是将中压电源降压成适合动力照明负荷的低压电源并满足容量要求。根据中压网络电压等级的不同,配电变压器的电压比主要分为 35(33)/0.4 kV 和 10/0.4 kV 两种,绝缘材质可采用绝缘油、环氧树脂和杜邦纸,相应配电变压器可分为油浸式变压器、环氧树脂浇注干式变压器和杜邦纸绝缘干式变压器。

油浸式变压器、环氧树脂浇注干式变压器和杜邦纸绝缘干式变压器在城市电网大量采用,但出于防火要求,城轨工程配电变压器已不采用油浸式变压器,而多采用环氧树脂浇注干式变压器。由于杜邦纸绝缘产品具有承受热冲击的能力强,过负载能力大,难燃,防火性能高,对湿度、灰尘不敏感,可回收等优势,从而具有广泛的适应性,并适用于防火要求高、负荷波动大、污秽潮湿的恶劣环境。因此,杜邦纸绝缘干式变压器以其良好的性能和环保特点越来越受到关注。





学 习 评 价

1. 供配电系统由哪几部分组成？各有什么作用？
2. 电能质量的评价指标有哪些？允许的偏差各是多少？
3. 我国额定电压分为几级？如何确定额定电压？
4. 电力负荷分为几级？各级负荷对供电有什么具体要求？
5. 电力系统中性点有几种运行方式？分别应用于什么环境？
6. 配电系统中性点接地方式有哪几种？各有什么特点？
7. 一次设备有哪些？各有什么功能？
8. 二次设备的作用是什么？
9. 城轨供电系统都选用什么类型的一次设备？

2

项目二

认识城市轨道交通供电系统

学习目标

- 了解城轨供电系统的功能。
- 熟悉城轨供电系统的要求。
- 初步掌握城轨供电系统的基本结构和各系统的功能。
- 掌握城轨供电系统的电磁兼容措施。



城轨供电系统是城市轨道交通工程中重要的机电设备系统之一,它不仅为城市轨道交通电动列车提供牵引用电,还为照明、通风、空调、电梯、防灾报警、通信、信号等运营服务设施提供电能。安全可靠又经济合理的供电系统是城市轨道交通正常运营的重要保障和前提,运营中的城市轨道交通线路一旦供电中断,不仅会造成运输系统的瘫痪,还会危及乘客和工作人员的生命安全,造成严重的财产损失。

任务一 了解城轨供电系统的功能与要求

城轨供电系统的功能就是为城市轨道交通的运行提供电能,而城市轨道交通系统与一般电力用户有很大区别,所以城轨供电系统的功能和要求也存在一定的特殊性。

一、城轨供电系统的功能

城轨供电系统是城市轨道交通运营的动力源泉,负责为电动列车提供牵引用电,为车站、车辆段、控制中心等建筑物提供动力和照明用电。城轨供电系统应具备安全可靠、经济适用、调度方便的特点,具备供电服务、自我保护、故障自救、防误操作等功能。

1. 供电服务功能

为城市轨道交通的安全运营服务是城轨供电系统的最基本功能,即为所有用电设备提供安全可靠的电能。城市轨道交通系统中的用电设备既有风机、水泵、照明灯具等固定设备,也有运动着的列车,这些设备的电压等级和制式不同,对电源的要求也不同。城轨供电系统就是为这些用电设备提供合格的电力,使其正常运行,保证城市轨道交通安全运营。

2. 故障自救功能

系统的安全性、可靠性是对供电系统的首要要求,城轨供电系统应设置必要的备用措施,以保证供电系统发生任何一种故障时都不影响城市轨道交通的正常运行。双电源是城轨供电系统的主要原则,两路电源互为备用,一路电源故障时另一路电源应能满足系统正常供电的要求。城轨供电系统的主变电所、牵引变电所和降压变电所均为双电源、双机组,两路电源应来自不同的上级变电所或同一变电所的不同母线。动力照明系统的一级、二级负荷采用双电源、双回路供电,牵引网则采用双边(故障时大双边)供电方式以实现双电源供电要求。

3. 自我保护功能

城轨供电系统应设置完整、协调的保护措施,各级保护应相互配合和协调,保护装置应满足可靠性、灵敏性、速动性、选择性的要求。在系统某处发生故障时,应使最近的保护装置动作,只切除故障部分的设备,从而缩小故障影响范围。对于牵引供电系统,为了保证乘客的安全,保护装置的速动性是第一要求,保护原则是“宁可误动作,不可不动作”,误动作可以通过自动重合闸进行校正,而保护装置不动作则可能造成比较严重的后果。



4. 防误操作功能

防止误操作是保证系统安全、可靠地运行所不可缺少的环节。供电系统中任何一个环节的操作都应有相应的联锁条件,避免因误操作而发生故障。联锁条件可以是机械的,也可以是电气的,还可以是电气设备本身所具备的或在操作规程上所规定的。

5. 灵活的调度功能

城轨供电系统应能在控制中心进行集中控制、监视和测量,并根据运行需要方便灵活地进行调度,变更运行方式,分配负荷潮流,实现系统在更加经济合理的模式下运行。在系统因故障造成一路或两路电源退出运行时,电力调度可以对供电分区进行调度和调整,以保证城轨列车的正常运行。

6. 控制、显示和计量功能

系统应能方便地进行各种控制操作,各环节的运行状态应有明确的显示,各种电量的测量和电能的计量应准确。另外,应具备远距离控制、监视和测量功能,在控制中心即可根据运行需要方便地进行调度,提高系统运行的经济性。

7. 电磁兼容功能

城市轨道交通处于强电、弱电多个系统共存的电磁环境,为了使各种设备或系统在这个环境中能正常工作且不对该环境中其他设备、装置或系统构成不能承受的电磁干扰,各种电气和电子设备的系统内部及与其他系统之间的电磁兼容显得尤为重要。供电系统既是电磁干扰源,又是电磁敏感设备,要在技术上采取措施抑制干扰,提高抗干扰能力。

二、城轨供电系统的基本要求

城轨供电系统对保证城市轨道交通正常、安全运行具有重大的影响,应满足安全性、可靠性、适用性、经济性、先进性的基本要求。

1. 安全性

安全性是指在城市轨道交通工程运营过程中供电系统的安全程度,它直接关系到乘客、运营人员、行车和设备的安全。为了保证供电系统的安全,要从系统安全性和设备安全性两个方面着手。系统安全性设计一般包括电气联锁、继电保护、综合接地系统、应急照明电源等方面;设备安全性设计主要是选择安全、适合的变压器、牵引整流器、断路器、隔离开关、接地开关、电缆等设备。

2. 可靠性

可靠性是指城轨供电系统对列车及各种动力、照明负荷的持续供电能力,是保证城市轨道交通系统正常运营、事故处理、灾害救援等方面的前提条件。城轨供电系统可靠性涉及规划、设计、运行管理等各个方面,涵盖供电、变电、配电等各个环节,由电气原理的可靠性和电气设备的可靠性作为支撑。

为了提高城轨供电系统的可靠性,在系统设计时应从各个环节着手,分析系统的故障现象和原因,研究定性或定量的评定指标,提出具体可行的保证措施。城轨供电系统设计和评





价时应满足“ $N-1$ 准则”，即供电系统的 N 个元件中的任一独立元件发生故障而被切除后，供电系统应能保持稳定运行和正常供电。电源供电方式是决定系统可靠性的一个重要因素，根据城市轨道交通可靠性要求，一般采用双电源供电。当电源点（主变电所或电源开闭所）一个电源退出时，另一个电源应能保证系统的正常供电；当一个电源点的两个电源都退出时，应能从相邻电源点引入两路应急电源，保证重要负荷的电力供应，能维持城市轨道交通继续运行。

3. 适用性

适用性是指城轨供电系统的建设应满足业主的建设目的和对性能的要求，主要通过系统设计来实现。供电系统设计时根据业主需求确定系统的建设标准、技术水平、设备档次、施工工期、建设费用等项目，并与城市特点、功能定位及特殊要求相适应。

4. 经济性

经济性是指在满足供电系统的安全性、可靠性、适用性的前提下，实现项目全生命周期内供电系统费用的最低化。经济性不但要求节省初期的工程投资，还要尽量降低运营成本，以保证项目全生命周期内实现最佳的技术经济效果。供电系统设计时通过优化电源网络结构实现外部电源资源共享，可以降低工程投资；选用成熟的设备和新型的材料，可以降低系统的投资和运行费用。

5. 先进性

先进性体现在设计理念、系统方案、设备及工艺、管理手段等多个方面，并兼顾系统基本功能、投资规模、运营成本、环保要求、操作灵活性及技术发展等因素。先进的设计理念要充分认识到环境保护与节约能源的重要性，采取必要措施进行环境保护与降低能耗，要解决好电磁辐射、噪声、温室气体、不易分解废料等问题。

任务二 掌握城轨供电系统的构成

城轨供电系统的外部电源有集中式、分散式和混合式三种供电方案，采用不同的外部电源方案时，城轨供电系统的结构有所不同，但均主要由电源、变配电系统和电力监控系统构成。城轨供电系统从不同角度可按系统功能、设计任务、采购单元来划分，在此主要讲解按系统功能和设计任务划分的城轨供电系统的构成。集中式和分散式城轨供电系统构成框图如图 2-1 和图 2-2 所示。

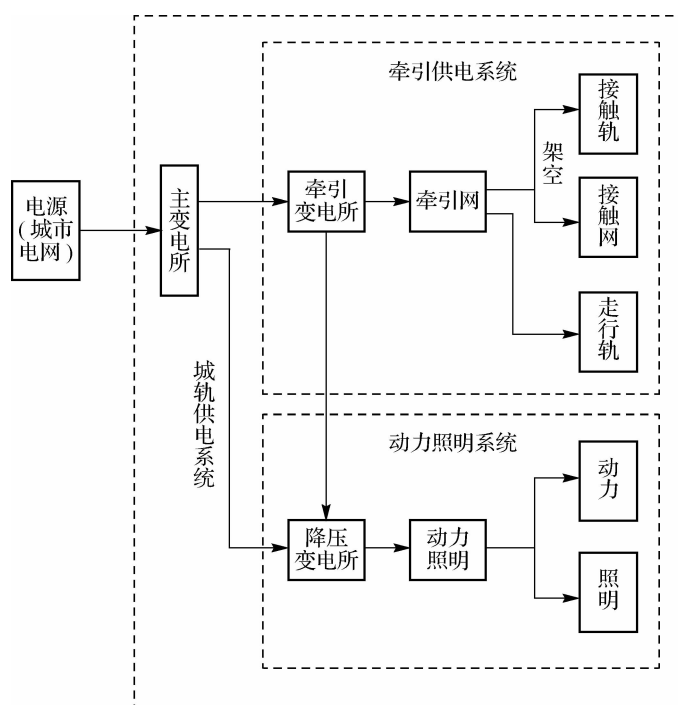


图 2-1 集中式城轨供电系统构成框图

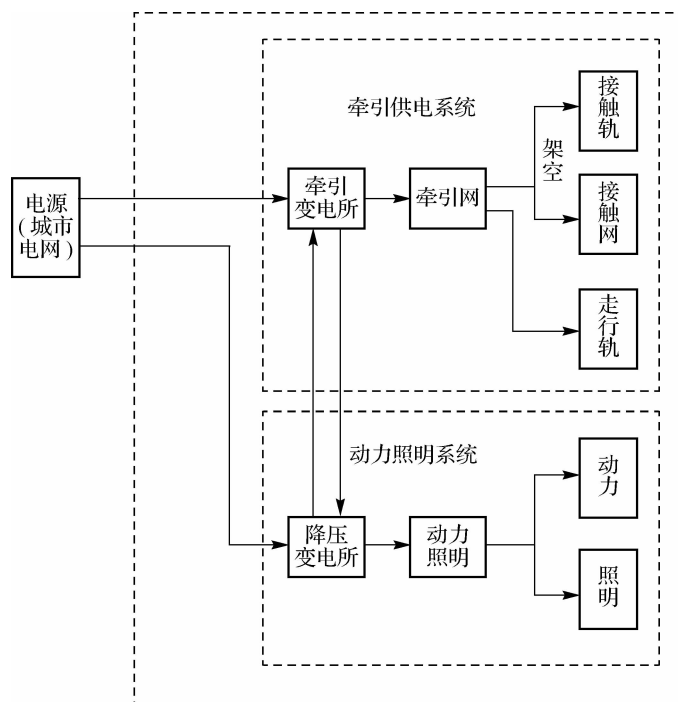


图 2-2 分散式城轨供电系统构成框图





一、按系统功能划分

城轨供电系统按功能的不同可分为外部电源、主变电所或电源开闭所、牵引供电系统、动力照明供电系统、杂散电流腐蚀防护系统、电力监控系统几部分。

1. 外部电源

外部电源是为系统的主变电所或电源开闭所提供电力的外部城市电网电源,供电方式有集中式供电、分散式供电和混合式供电。

外部电源设计主要根据城市轨道交通系统的电力负荷、城市现有供电网络及发展规划、主变电所或电源开闭所的布置等情况,确定外部电源的供电方式和电源引入位置。

2. 主变电所或电源开闭所

主变电所适用于外部电源集中供电方式,其功能是接受城市电网高压电源经降压向牵引变电所、降压变电所提供中压电源。电源开闭所适用于外部电源分散供电方式,一般与车站牵引(或降压)变电所合建,其功能是接受城市高压电源为牵引变电所、降压变电所转供中压电源。

3. 牵引供电系统

牵引供电系统包括牵引变电所与牵引网,其功能是将交流中压电压经降压整流变成直流 1 500 V 或 750 V 电压,为电动列车提供牵引供电。

牵引变电所分为正线牵引变电所、车辆段或停车场牵引变电所,正线牵引变电所又分为车站牵引变电所和区间牵引变电所,一般采用建筑物内变电所的形式,也有少量的箱式牵引变电所。牵引网包括接触网与回流网,接触网有架空接触网和接触轨两种悬挂方式;回流网一般利用走行轨,少数工程单独设置回流轨。

4. 动力照明供电系统

动力照明供电系统包括降压变电所、动力照明配电系统,其功能是将中压网络的交流高压电压降压变成交流 220/380 V 电压,为轨道交通系统运营需要的各种机电设备提供低压电源。

降压变电所可以分成车站降压变电所、车辆段或停车场降压变电所、控制中心降压变电所,可与牵引变电所合建成牵引、降压混合变电所,对于地面轨道交通线路,还可以采用箱式降压变电所。

5. 杂散电流腐蚀防护系统

杂散电流腐蚀防护系统的功能是减少因直流牵引供电产生的杂散电流并防止其扩散,尽量避免杂散电流对城市轨道交通本身及其附近结构钢筋、金属管线的电腐蚀,并对杂散电流及其腐蚀防护情况进行监测。尽管杂散电流防腐系统涉及多个专业,但其主要由直流牵引供电系统造成,所以将杂散电流腐蚀防护系统归供电系统设计。

6. 电力监控系统

电力监控系统的功能是实时对城市轨道交通各变电所、接触网设备进行远程数据采集和监控,并在城市轨道交通控制中心通过变电所综合自动化系统对主要电气设备进行遥控,以实现对整个供电系统的运营调度和管理。



二、按设计任务划分

动力照明供电系统属于城轨供电系统的一部分,但动力照明设备属于车站等建筑物附属设备,一般与土建结构一起进行设计,降压变电所设计属于城轨供电系统设计范畴。

1. 主变电所

主变电所的设计内容包括主接线、二次接线、设备选择、设备布置、土建设计等。主变电所与城市电网的设计界面为城网变电所 110 kV(或 66 kV)高压出线间隔,电源外线一般由当地电力部门配合主变电所设计单位设计;主变电所与全线系统的设计界面为主变电所中压馈线开关的电缆接线端,馈出线一般归全线系统设计。

2. 全线系统

全线系统的设计内容包括供电系统方案、中压网络、牵引变电所布点、系统运行方式、潮流分析、谐波计算、综合接地系统、再生能量吸收装置、UPS 整合等,其与牵引变电所和降压变电所的设计界面为中压进线开关的引入端。

3. 牵引变电所

牵引变电所的设计内容包括主接线、二次接线、自用电、设备平面布置、电缆敷设等。牵引变电所与接触网的设计界面为接触网隔离开关的电源端、回流箱的电源端、上网电缆及回流电缆由牵引变电所负责设计。

4. 降压变电所

降压变电所的设计内容包括主接线、二次接线、自用电、低压无功补偿、设备平面布置、电缆敷设等。降压变电所与动力照明的设计界面为降压变电所低压开关柜的馈出端子,低压馈出电缆及配电系统由动力照明负责设计。

5. 牵引网

牵引网的设计内容包括接触悬挂、支持结构与基础、附加导线、防雷与接地、平面布置等,接触网隔离开关、回流箱及尾线也由牵引网设计。

6. 电力监控系统

变电所综合自动化由变电所设计,综合自动化屏的通信端口开始归电力监控系统设计,所需要的通信通道由通信专业设计。如果城市轨道交通系统采用综合监控系统,则电力监控系统将被集成到综合监控系统中作为综合监控系统的一部分而进行统一设计。

7. 杂散电流腐蚀防护系统

杂散电流腐蚀防护系统涉及多个专业,设计内容包括排流柜设置、排流钢筋设置、监测系统设置等。

三、牵引网供电制式

牵引网供电制式主要指电流制、电压等级和馈电方式及其与电压等级的关系等。

1. 牵引网的电流制

直流馈电方式不但适用于电阻起动控制方式,也适用于斩波调压和变频调压等电子控





制方式。采用直流供电的电动车辆具有调速范围大、调速方便、易于控制、起动制动平稳、接触网简单、投资省、电压质量高等优点。所以,目前城市轨道交通电力机车基本上都采用直流制。

2. 牵引网的电压等级

世界上城市轨道交通中的直流牵引电压等级繁多,如 570 V、600 V、625 V、650 V、700 V、750 V、780 V、825 V、900 V、1 000 V、1 100 V、1 200 V、1 500 V、3 000 V,其发展趋势是 IEC 标准中的 600 V、750 V 和 1 500 V;我国国家标准规定为 750 V、1 500 V 两种,其电压允许波动范围分别为 500~900 V 和 1 000~1 800 V。在选择电压等级时,要结合系统馈电方式,根据车辆、线路等工程特点综合比较确定。

3. 牵引网馈电方式及其与电压等级的关系

电压等级与馈电方式是牵引网供电制式中的关键点,两者密切相关。对于一个具体的轨道交通工程,电压等级与馈电方式的选择,应该结合起来统一考虑。牵引网的馈电方式有架空接触网和接触轨两种方式,我国牵引网供电制式有直流 1 500 V 架空接触网、直流 1 500 V 接触轨、直流 750 V 架空接触网和直流 750 V 接触轨 4 种方式。

与 750 V 电压等级相比,1 500 V 电压等级的供电距离更远,电压损失和电能损耗更小,但防护要求也更高。在我国早期城轨项目中,1 500 V 主要用于架空接触网,但随着支持和防护材料的不断发展,目前在接触轨系统中也有大量应用,而且直流 1 500 V 接触轨在供电能力、施工难度、对城市景观的影响等诸多方面都更有优势。

任务三

城轨供电系统的电磁兼容措施

城市轨道交通电气系统包括供电系统、通信系统、信号系统、综合监控系统等多个弱电系统,属于强电、弱电共存的电磁环境。为了使各种电气设备或系统在这个电磁环境中能正常工作,且不产生该环境中其他设备、装置或系统不能承受的电磁骚扰,各种电气和电子设备或系统内部及与其他系统之间应满足电磁兼容要求。

为实现城市轨道交通电气系统的电磁兼容,首先要研究构成电磁兼容的三要素:骚扰源、耦合途径和敏感设备,并根据系统特点采取必要的、合理的、经济的技术措施,以抑制骚扰源、消除或减弱骚扰耦合、提高敏感设备的抗干扰能力。

在城市轨道交通电气系统这个电磁环境中,城轨供电系统及其设备首先是电磁骚扰源,同时也是敏感设备。这里仅就城轨供电系统中的谐波、杂散电流、屏蔽、电缆敷设、防雷、接地等几个环节的电磁兼容问题进行简单的介绍。

一、抑制骚扰源

在城市轨道交通这个电磁环境中,供电系统为保证系统安全、可靠地运行,除了要向运送乘客的列车供电外,还要为提供舒适、安全环境的机电设备和确保系统高效、安全运行的通信信号设施供电。城轨供电系统不仅是城市轨道交通的能源设施,同时也作为电磁骚扰



源而存在,因此在设计中必须采取相应的技术措施来抑制骚扰源。牵引供电系统产生的谐波和杂散电流就属于城市轨道交通电磁环境中的骚扰源。

1. 谐波抑制

城轨供电系统的牵引供电系统在将交流电整流为脉动直流电时,必然会产生含有高次交流成分的谐波,并通过传导耦合对系统的其他用电设备存在有害的影响,因此把这种有害影响降低到能容忍的程度是必须解决的问题。由于交流成分的脉冲数和大小与整流的脉冲数有关,因此增加整流的脉冲数是抑制谐波非常有效的办法,使谐波电流和谐波电压符合《电力系统电能质量技术管理规定》(DL/T 1198—2013)和国家标准《电能质量 公用电网谐波》(GB/T 14549—1993)的规定,并实现与其他系统或设备的电磁兼容。

城市轨道交通采用直流牵引供电系统,通过整流机组将中压的交流 10 kV 或 35 kV 降压、整流为直流 750 V 或 1 500 V 向牵引网供电。整流后的直流并非纯直流,而是含有交流成分的脉动直流,其中的谐波分量会通过传导耦合对其他电力、电子设备产生不利的影响。为了降低谐波产生的影响,提高供电系统的电磁兼容性,牵引整流设备已从原来的 6 脉冲整流提高到 12 脉冲整流,并通过双牵引状整流机组并列运行构成等效 24 脉冲整流。

目前,国内的城轨供电系统已普遍采用等效 24 脉冲整流来减小对系统其他设备的电磁骚扰。等效 24 脉冲整流的 23、25 次谐波已符合要求,其他附加谐波电流远远小于规定值,也符合要求。

2. 杂散电流抑制

杂散电流是牵引供电系统对其他设备或装置产生的另一种传导耦合电磁骚扰,如何抑制杂散电流,并把它危害程度降低到最小,是牵引供电系统必须解决的问题。

城轨供电系统的直流牵引网采用接触网正极送电,走行轨负极回流。随着列车的运行,绝大部分回流电流沿着走行轨流回到牵引变电所,但也有部分电流从走行轨向地下泄漏,形成杂散电流。杂散电流的大小主要取决于走行轨对地电位和走行轨对地过渡电阻的大小。走行轨对地电位越低、对地电阻越大,则杂散电流越小。减小杂散电流就可以在城市轨道交通这个电磁环境中降低对其他设备、装置、系统的传导耦合电磁骚扰。牵引供电系统在向列车供电的同时,也随着列车的移动从走行轨向地下泄漏电流,为了抑制泄漏电流必须采取相应的措施。

对杂散电流的抑制,遵循“以防为主、以排为辅、防排结合、加强监测”的原则,根据杂散电流的成因采取相应的措施,并根据规程的要求把杂散电流限制在最小范围内。

1) 降低走行轨的对地电位

降低走行轨的对地电位的措施之一就是牵引供电系统采用双边供电方式。正常运行时供电分区采用双边供电,事故状态时也应该采用大双边供电。双边供电比单边供电有很大优势,降低走行轨对地电位就是其中之一,无论是轨道中的平均电压损失还是最大电压损失,双边供电都为单边供电的 $1/4 \sim 1/3$,即双边供电轨道对地电位为单边供电时的 $1/4 \sim 1/3$,双边供电时的杂散电流也降低为单边供电时的 $1/4 \sim 1/3$ 。

降低走行轨的对地电位的另一措施是减小走行轨电阻。为了降低回流电阻将上下行走行轨并联,在区间用铜芯电缆每隔一定距离把上下行与走行轨连接起来,以减小回流电阻,降低走行轨对地电位,起到抑制杂散电流的作用。





2) 增加走行轨的对地过渡电阻

走行轨采取绝缘方式安装。安装走行轨时,为加大走行轨对地绝缘电阻,在其混凝土垫块上安装绝缘垫,固定走行轨用绝缘螺栓。每个绝缘垫的绝缘电阻在 $4\text{ M}\Omega$ 以上,走行轨敷设完毕时对地电阻应为 $15\text{ }\Omega\cdot\text{km}$ 以上,这样可以保证对杂散电流的抑制符合规程要求。

道床的排水沟设在列车运行方向的右侧。混凝土道床的潮湿程度对其电阻率影响很大。因此,保证混凝土整体道床的干燥是提高走行轨对地过渡电阻的有效措施。过去城市轨道交通通常将排水沟设在两条轨道之间,这样会使走行轨下道床潮湿,降低了走行轨对地过渡电阻,加大了杂散电流的泄漏。若把排水沟设在行车方向的右侧,则可以避免这一弊端,使道床干燥,增加走行轨对地过渡电阻,从而减小杂散电流。

3) 设置杂散电流收集网

在走行轨下的整体道床中敷设网状钢筋,纵向连通,通过排流柜引向牵引变电所的负极,这样可以使泄漏到道床的杂散电流被收集网回收,避免其流向结构钢筋,以减小对结构钢筋的腐蚀。收集网的纵向钢筋的总截面积应不小于 $1\text{ }600\text{ mm}^2$ 。

二、消除或减弱骚扰耦合

1. 屏蔽并接地

屏蔽并接地是消除或减弱感应骚扰和辐射骚扰的唯一途径。因此,对供电系统来说,无论是设备内部还是设备本身,都应采取屏蔽措施,以消除或减弱感应骚扰和辐射骚扰。

(1) 供电系统的所有设备外壳均应采用封闭式金属铠装柜体,即便是通风散热孔也应用金属网覆盖,以加强屏蔽性能,并且金属外壳应可靠接地,以起到良好的屏蔽作用。这样既可以防止外来电磁骚扰,又可以使设备本身产生的电磁骚扰不向外辐射。

(2) 设备内部的电子器件及其连线和接头都应做好密封与屏蔽,做到设备本身内部电磁兼容。

(3) 控制电缆采用屏蔽电缆,其屏蔽层一点接地。

(4) 电力电缆采用钢带铠装绝缘外护套电缆,钢带在变电所一点接地,钢带铠装可以起到屏蔽和防鼠咬的双重作用。

2. 电缆敷设

敷设电缆时需注意以下几个问题。

(1) 尽可能加大不同电压等级电缆的间距,减小辐射耦合和感应耦合。

(2) 强、弱电电缆应分侧敷设,一般强电电缆及接触轨在列车运行方向的左侧,弱电电缆在列车运行方向的右侧。

(3) 电缆应分层敷设,高压、低压、控制电缆分层敷设。

(4) 金属电缆托架应可靠接地。

三、提高敏感设备的抗干扰能力

1. 防雷

对大自然产生的雷电现象,供电系统属于敏感设备,是首当其冲的受害者,在技术上应严加防范。直击雷是无条件的,它可以直击空中、地面、地下的任何物体,感应雷和侵入雷是



有条件的,它们的影响范围有限。

- (1)在空旷的地面线路或高架线路应设避雷线,保护高架桥、接触网和区间电缆。
- (2)地面变电所的高压母线、中压母线、低压母线和直流正负极母线均应设避雷器。

2. 接地

- (1)变电所综合接地装置需要接地的设备或系统分别用接地线引到接地母线上。
- (2)变电所接地电阻不大于 $0.5\ \Omega$ 。
- (3)电力变压器中性点直接接地,低压系统采用 TN-S 系统。
- (4)需要屏蔽的设备外壳及电缆屏蔽均需接地。

学 习 评 价

1. 在城市轨道交通系统中,供电系统有哪些功能?
2. 对城轨供电系统有哪些要求?
3. 城轨供电系统按功能划分为几部分? 各有什么作用?
4. 城轨供电系统按设计任务分为几部分? 各部分的设计内容是什么?
5. 城轨牵引网选用什么电流形式和电压等级?
6. 什么是电磁兼容? 城轨供电系统采取哪些电磁兼容措施?



3

项目三

城轨电源与主变电所

学习目标

- 掌握城轨外部电源供电方案的类型、特点和适用环境。
- 了解主变电所的设置原则。
- 掌握主变电所的主接线方案。
- 掌握中压网络的类型、特点及发展趋势。
- 熟悉中压网络在不同情况下的运行方式。



城市轨道交通由城市电网供电,可采用集中式供电、分散式供电和混合式供电三种方案。在集中式供电方案中,主变电所作为城市电网与城轨供电系统的交接点,从城市电网获得电能经过降压后通过中压网络分配给城轨牵引系统和动力照明系统。

任务一 城轨供电系统外部电源系统

城市轨道交通系统就是城市电网的一个电力用户,城轨供电系统外部电源就是城市的电力网络,作为城轨供电系统中主变电所或电源开闭所的电源,为城市轨道交通系统的电力机车、动力和照明系统提供电能。外部电源供电方案有集中式供电、分散式供电和混合式供电三种,对于具体城市轨道交通工程的供电方案,需要从城市电网状况、城轨交通电力负荷等多角度考虑,由技术、经济综合比较确定。

一、外部电源供电方式

城市轨道交通系统作为城市电网的特殊用户,一条线路的用电范围一般为 $10\sim 40\text{ km}$, 负荷呈线状分布。城市轨道交通系统的外部电源供电方案根据线路和城市电网的实际情况,可采用集中式供电、分散式供电或混合式供电。

1. 集中式供电

集中式供电方案是指由城轨供电系统的主变电所引入两路独立的电源,降压后经中压网络集中为牵引变电所及降压变电所提供电力的外部电源供电方式,如图 3-1 所示。主变电所进线电压一般为 110 kV ,经降压后变成 35 kV 、 10 kV 或 20 kV 进入中压网络。

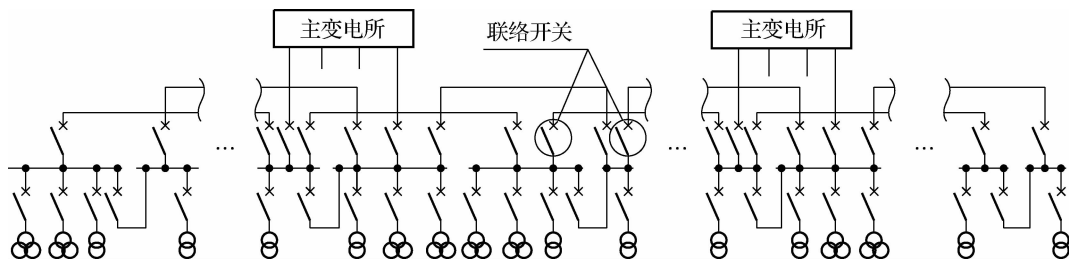


图 3-1 集中式供电方案示意图

每个牵引变电所和降压变电所均从中压网络获得两路独立的引入电源。

集中式供电方案的主要特点是在城市轨道交通沿线建设专用主变电所,集中为牵引变电所及降压变电所供电;城轨供电系统由主变电所从城市电网引入高压电源(一般为 110 kV),每座主变电所只从城市电网引入两路独立的进线电源,与城市电网接口比较少,有利于降低相互之间的干扰;城轨供电系统相对独立,自成系统,便于运营管理。



2. 分散式供电

分散式供电方案是指在轨道交通沿线分散由城市中压电网通过电源开闭所向牵引变电所及降压变电所供电,或直接从城市中压电网向牵引变电所和降压变电所供电的外部电源供电方式,其示意图如图 3-2 所示。为了提高供电可靠性,一般要在两个电源开闭所之间建立电源联系,即两个电源开闭所之间的供电分区间通过双环网电缆进行联络。由于城市电网 35 kV 电压等级趋于淘汰,因而分散式供电一般从城市电网引入 10 kV 中压电源,但也有少量的 35 kV 中压电源。

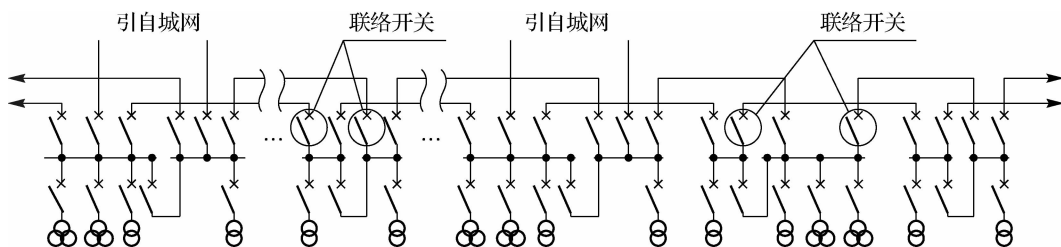


图 3-2 分散式供电方案示意图

分散式供电方案的主要特点是在城市轨道交通沿线,分散地从城市电网引入多路中压电源作为城市轨道交通电源;由于城市轨道交通电力负荷较大,平均每 4~5 个车站就要引入两路电源,所以城轨供电系统与城市电网接口比较多;城轨供电系统与城市电网关系紧密,系统独立性差,运营管理要比集中式供电方案复杂。

3. 混合式供电

混合式供电方案是指以集中式供电为主、以分散式供电为辅,或以分散式供电为主、以集中式供电为辅的供电方式,是介于集中式供电与分散式供电之间的一种综合供电方案,其示意图如图 3-3 所示。混合式供电方案吸收了集中式供电与分散式供电的优点,是根据城市电网现状和规划及城市轨道交通的电力需求灵活设置的系统方案,提高城轨供电系统的可靠性。

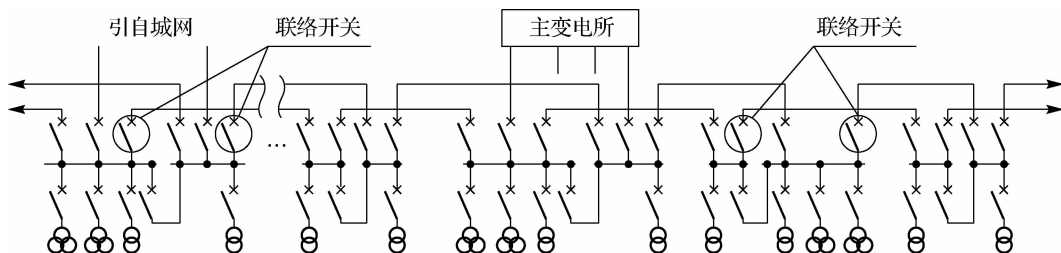


图 3-3 混合式供电方案示意图

在采用集中式供电方案时,如果主变电所的设置不能满足线路末端中压网络电压要求,可就近从城市电网引入中压电源作为补充,构成以集中式供电为主的混合式供电方案。

在采用分散式供电方案时,如果沿线有城轨供电系统的主变电所可以共享,则可从该主变电所引入中压电源代替部分城市电网中压电源引入点,构成以分散式供电为主的混合式供电方案。



4. 外部电源供电方式的选择

(1)当城市轨道交通沿线的城市电网具有中压供电能力时,城轨供电系统的中压电源点可以从城市电网直接引进电源,则外部电源可以采用分散式供电方案。

(2)当城市轨道交通沿线的城市电网中压供电能力不足时,城轨供电系统的中压电源难以从城市电网直接引进,但沿线具备 110 kV 或其他高压输电能力时,则应该优先考虑采用集中式供电方案。

(3)当线路末端或车辆段等地方如果由主变电所引入电源电压不能满足要求,但有城市电网中压电源可以利用,则可以在正线中间区域采用集中式供电,在线路末端或车辆段引进城市电网中压电源作为补充,采用以集中式为主的混合式供电方案。

(4)当绝大部分线路能够得到城市电网中压电源,而且沿线有可以共享的城轨供电系统的主变电所提供中压电源,则可以采用以分散式为主的混合式供电方案。

二、外部电源供电方案的比选

具体的城市轨道交通工程在选择外部电源供电方案时,应在确定计算负荷之后,根据城市轨道交通线网规划、城市电网的现状 & 规划、工程实际情况等综合比较确定。

1. 供电质量

采用集中式供电方案时,城轨供电系统的外部电源引自城市高压电网,一般为 110 kV 或 66 kV。电网的电压等级高,输电容量和短路容量大,抗干扰能力强,电压波动小。另外,城轨供电系统的主变电所一般装设有载调压装置,中压网络电压相对稳定,供电质量高。

采用分散式供电方案时,城轨供电系统的外部电源引自城市 10 kV 电网。由于可以从就近的城市变电所直接引入电源,所以输电线路较短,线路损耗较少。但是 10 kV 电压等级较低,用户较多,电网电压稳定性差,所以城轨供电系统的中压网络电压波动较大。

2. 供电可靠性

采用集中式供电方案时,城轨供电系统的主变电所进线电源电压等级较高,电气设备的绝缘等级、制造水平、继电保护配置等要求也比较高,线路故障率相对较低。同时,城轨供电系统与城市电网接口较少,系统相对独立,城市其他负荷对城轨供电系统干扰较少。所以,城轨供电系统采用集中式外部电源供电方案时可靠性比较高。

采用分散式供电方案时,城轨供电系统通过电源开闭所间接或牵引变电所和降压变电所直接从城市电网引入 10 kV 电源。虽然该接线方式能满足系统可靠性要求,但由于城市电网 10 kV 系统处于城市电网继电保护的中末端,且该等级用户较多,因此城轨供电系统的运行会受到其他用户的干扰。

3. 中压网络电压

采用集中式供电方案时,城轨供电系统中压网络的电压等级不受城市电网电压等级的限制,可根据用电负荷、供电距离等情况确定。目前,集中式供电的中压网络电压一般选用等级较高的 35 kV,这样可以提高系统的供电能力与供电可靠性,有利于降低供电线路的功率损耗。

采用分散式供电方案时,城轨供电系统中压网络的电压等级完全受城市电网电压等级



的制约,必须选择与城市电网相同的电压等级。目前,我国城轨供电系统多采用 10 kV 电压等级,也有少量的采用 35 kV 电压等级。

4. 对城市电网的影响

城轨供电系统对城市电网的影响主要表现在谐波影响和网压波动两个方面。目前,牵引整流机组一般采用双机组等效 24 脉波整流装置,产生的低次谐波越少,对城市电网的影响就越小。在网压波动方面,由于城市轨道交通牵引系统是一个实时变化的移动负荷,电源电压必然会受到一定影响。但相对而言,采用集中式供电要经过多级变电所变换,对城市电网的谐波和网压波动影响都要比分散式供电小得多。

5. 资源共享

采用集中式供电方案有利于实现城轨供电系统的主变电所电力资源共享:一方面,两条及以上数量的城市轨道交通线路可以共享主变电所;另一方面,城轨供电系统的主变电所可与城市电网主变电所合建,同时向城市轨道交通系统及地区其他用户提供电源。

采用分散式供电方案时,在城市电网中压网络资源丰富的城市可以充分利用已有外部中压资源,节省主变电所的建设费用,有利于降低城市轨道交通工程的投资。

6. 工程实施

采用集中式供电方案时,城轨供电系统与城市电网接口较少,外部电源引入路径相对容易解决。采用分散式供电方案时,由于与城市电网接口较多,部分外部电源引入路径难以解决;而且中心城区城市电网变电站负荷相对饱和,直接增加如此大的电力用户,有时供电容量也难以满足需求。

7. 工程投资

资金是城市轨道交通建设的关键问题,城轨供电系统设计时必须考虑控制工程投资。采用集中式供电方案的城轨供电系统,虽然主变电所的数量较少,但电压等级比较高,设备的要求也较高,而且需要土建投资,所以整个供电系统的投资要比分散式供电方案高一些。不过随着城市轨道交通网络化的发展,城轨供电系统的主变电所可以实现资源共享,能够减少后续轨道交通工程的供电系统投资。因此,从网络化发展角度来看,采用集中式供电方案整体上还是比较合适的。

8. 运营管理

采用集中式供电方案时,城轨供电系统相对独立,改变运行方式属于系统内部调整,易于调度,操作方便,工作效率较高。而采用分散式供电方案时,因城轨供电系统与城市电网的接口较多,还会分布于多个行政区域,所以改变运行方式或对电源开闭所进线控制操作需要与城市电力部门协调配合,工作效率明显降低。另外,集中式供电方案与分散式供电方案相比,城市电力部门与城市轨道交通产权划分明晰,计量计费方便,维护维修简单。

三、电源外线的设计

城市轨道交通工程电源外线的设计,一般结合城市电网架空线走廊或电缆通道进行,多由当地电力部门的设计单位负责设计。





1. 城市电网电压等级的现状与发展

我国国家标准中规定的标准电压有十几个等级,一般认为 220 kV 及以上用于高压送电网,110 kV、66 kV 用于高压配电网,1 kV 以上 35 kV 以下用于中压配电网,1 kV 及以下用于低压配电网。

20 kV 虽非我国标准电压,却是国际标准电压中应用广泛的中压电压,功能上可以替代 35 kV 和 10 kV 两个配电层,而造价上与 10 kV 设备差异不大。20 kV 电压等级适合于高密度负荷地区的城市电网,我国第一个 20 kV 一次配电的供电区已经于 1996 年 5 月在苏州工业园区投入运行。目前,国内城轨供电系统中压网络主要采用 35 kV 和 10 kV 电压等级,国外城轨供电系统则广泛采用 20 kV 中压网络。

2. 城轨供电系统外部电源电压等级

城轨供电系统采用集中式供电时,要求从城市电网引进高压电源。330 kV 及以上电压等级作为地区高压送电电压级不直接用于电力用户,220 kV 变电所的远期变压器装机容量一般不小于 $(3 \times 180) \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。城轨供电系统主变电所的变压器容量一般不超过 $(2 \times 63) \text{ MV} \cdot \text{A}$,若外部电源采用 220 kV,将不能充分发挥其供电能力,从而造成电力资源的浪费和设备投资的增加。因此,采用集中式供电的城轨供电系统的外部电源电压等级一般为 110 kV,东北地区的沈阳、哈尔滨等城市为 66 kV。

城轨供电系统采用分散式供电时,需要从城市电网直接引入中压电源,故中压网络的电压等级应与城市电网一致。根据城市电网情况,目前采用分散式供电的城轨供电系统的外部电源电压等级主要采用 35 kV 和 10 kV,但随着 20 kV 电压等级在城市电网中的应用,未来也必将会作为城轨供电系统的外部电源电压等级使用。

3. 电源外线的一般要求

主变电所或电源开闭所的所有电源外线应就近从城市电网引入。采用分散式供电方案时,同一电源开闭所的两回电源线路应从城市电网变电站不同馈电母线直接引入;采用集中式供电方案时,同一主变电所的两回电源线路至少应有一回电源直接从城市电网变电站馈电母线专用回路引入。

电源线路在城区应采用电缆线路,在郊区可采用架空线路。使用电缆线路引入时,引至同一电源变电所的两回电源线路应敷设在不同的电缆通路或同一通路的不同支架和管道内。电缆或架空线设计与施工应满足《电力工程电缆设计规范》的相关要求。

任务二

城轨供电系统主变电所

城轨供电系统主变电所的功能是在采用集中式外部电源方案时,接受城市电网高压电源,经降压后为牵引变电所、降压变电所提供中压电源。

采用分散式外部电源方案时,一般需要设置电源开闭所负责向供电分区供电。电源开闭所一般不单独建设,而是与牵引变电所或降压变电所合建且共用中压母线,所以电源开闭所与牵引变电所或降压变电所一起设计。



一、所址选择

城轨供电系统主变电所的位置是否合理,不但直接影响变电所工程投资和运行的经济效益,还关系到城市配电网的网络结构、供电质量和运行经济性。所以,主变电所选址除考虑自身因素外,还必须与城市电网的现状及规划相结合。

1. 主变电所选址应符合的原则

主变电所选址应符合以下原则。

- (1)靠近负荷中心,邻近城市轨道交通线路布置。
- (2)满足中压网络电缆压降要求。
- (3)满足城市轨道交通供电网络规划中主变电所资源共享的要求。
- (4)应和城市规划、城市电网规划相协调。
- (5)可独立设置,也可合建。为节约城市土地资源,市区内主变电所宜与其他建筑合建或建于地下;当与城市电力部门合建时也可设置于地面,但距离轨道交通线路的距离不宜过长。
- (6)主变电所的位置和形式应便于电缆线路引入与引出,便于设备运输。
- (7)主变电所周围环境宜无明显污秽,具有适宜的地质、地形和地貌条件,并尽量避免和减小与周围环境及邻近设施的相互影响。

2. 根据负荷特点确定主变电所沿线布置

城市轨道交通主变电所的用电负荷沿城市轨道交通线路走向呈线状布置,主变电所的位置应尽量靠近轨道线路,一般控制在几百米范围之内。在实际工程中,许多主变电所就贴近线路布置。

3. 根据电压损失要求确定主变电所数量

一条城市轨道交通线路的主变电所数量取决于负荷的分布与大小,要保证中压网络的压降满足要求。中压网络要考虑线路远期的运行要求,互为备用线路应能承担另一条线路的一级和二级负荷,线路末端电压损失不宜超过5%。主变电所应尽量沿线路均匀布置,并考虑城市轨道交通线路网络化发展后主变电所的资源共享要求。

4. 根据城市规划要求确定主变电所位置

主变电所位置大致确定后,其具体位置要与城市规划部门沟通,与城市规划相协调。同时,还要与城市电网规划相协调,以方便电源的引入。

5. 根据所处城市位置确定主变电所结构形式

城市轨道交通主变电所多数采用户内式、半户外式或地下式,基本不采用全户外式。布置在市区边缘或郊区、县的主变电所,可采用布置紧凑、占地较小的半户外式。市区内及市中心区规划新建的主变电所宜采用户内式结构。

二、高压侧主接线

城轨供电系统的主变电所与城市电网直接相连,为了实现相对独立性,其高压侧与城市电网之间应设明显的电气分断点,但其电气主接线应与当地电力部门协商确定。



1. 线路-变压器组接线

如图 3-4(a)所示,主变电所高压侧主接线采用线路-变压器组、两断路器的连接形式,两路高压电源进线可以都是专线,也可以是一路专线、另一路 T 接。这种接线的优点是接线简洁,高压设备少,变电所占地少、投资省、继电保护简单。

在正常运行方式下,两路线路各带一台主变压器。如果主变压器一级、二级负荷的负载率较低,则系统发生故障时恢复供电操作十分方便。当一台主变压器或一条线路故障退出运行时,只需在主变电所中压侧进行转移负载操作,由另一路进线电源的主变压器承担本主变电所范围内的全部一级、二级用电负荷,对相邻主变电所无影响。如果主变压器一级、二级负荷的负载率较高,当主变压器或线路发生故障时,需要通过相邻主变电所联络来转移部分负荷,实现相互支援。

该接线方式适用于不设高压配电装置的主变电所,广泛应用于城轨供电系统主变电所。

2. 内桥式接线

如图 3-4(b)所示,桥式接线有内桥式和外桥式之分,两路高压电源进线可以都是专线,也可以是一路专线、另一路 T 接。外桥式接线适用于电源线路较短、故障率较低、有一定穿越功率的变电所。目前,国内城轨供电系统的主变电所一般没有穿越功率,因而基本不采用这种接线形式。

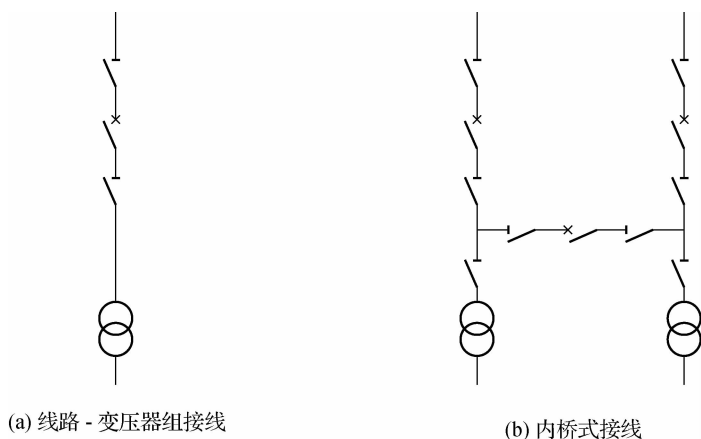


图 3-4 高压侧主接线图

内桥式接线只需 3 台断路器,系统接线清晰,而且线路侧装有断路器,发生故障线路的投入和切除操作简单方便。在正常运行方式下,桥联断路器打开,类似于线路-变压器组接线,两路线路各带一台主变压器。当送电线路发生故障时,只需断开故障线路的断路器,而不影响另一回路正常运行。需要时也可以合上桥联断路器由一路进线带两台主变压器。

内桥式接线适用于电源线路较长、故障率较高、一般没有穿越功率的变电所,在城轨供电系统的主变电所采用这种接线方式可以提高供电可靠性。



三、中压侧主接线形式

如图 3-5 所示,主变电所中压侧一般采用单母线分段形式,并设置母线分段开关。这种接线的优点是正常情况下两段母线分列运行,牵引变电所和降压变电所可以从不同母线段取得中压电源;当主变电所一段中压母线失电时,另一段中压母线可以迅速恢复供电。

当一路高压进线失电或一台主变压器退出后,通过中压母线分段开关迅速合闸,由另一台主变压器承担本主变电所范围内的全部一级和二级用电负荷,根据供电系统负荷情况及变压器容量确定是否切除三级负荷。当一段中压母线出现故障时,该段母线上的进、出线开关分闸,根据中压供电网络运行方式,由主变电所的另一段中压母线继续供电。

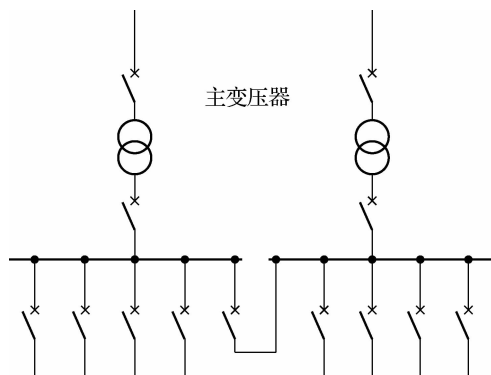


图 3-5 中压侧主接线图

四、主变压器的选择

主变压器的选择包括主变压器台数和容量的确定、主变压器选型、主变压器变压调整方式的选择及冷却方式等。

1. 主变压器台数的确定

主变压器台数应结合供电网络规划、中压网络形式、系统运行方式、主变电所容量备用要求等因素综合分析确定。目前,国内城市轨道交通主变电所均设置两台主变压器,互为备用。在正常情况下两台变压器并列运行,各负担约 50% 的用电负荷。

2. 主变压器容量的确定

主变电所容量的选择涉及供电网络资源共享、运行方式、建设时序、建设资金等多个因素,需要综合考虑确定。

1) 根据是否考虑供电网络资源共享确定主变压器容量

对于已经完成城市轨道交通供电网络规划的城市,新建主变电所的主变压器容量的选择,应依据城市轨道交通供电网络规划进行。设计阶段要对主变电所的供电范围进行确认,并根据最新资料对主变电所容量进行核算。在供电网络资源共享的情况下,主变压器容量规格与单线建设时相比会有所增加。

对于尚未完成城市轨道交通供电网络规划的城市,作为确定主变压器容量的设计条件,应首先确定是否考虑主变电所的资源共享。如果考虑资源共享,要确定主变压器按照多少





容量预留,可以考虑加大一级容量规格。

2) 根据运行方式确定主变压器容量

城市轨道交通属于一级负荷,从可靠性要求来说,主变电所设置、主变压器容量、中压网络电缆规格满足 $N-1$ 准则即可,即系统中任意一个元件发生故障后满足供电范围内一级和二级负荷的要求。目前,国内城市轨道交通主变电所均设置两台主变压器。正常运行时,两台主变压器共同承担本供电分区内的用电负荷。当一台主变压器出现故障时,另一台主变压器应能承担重新调整后供电范围内的一级和二级负荷。此时,主变压器容量必须满足 $N-1$ 准则要求。

当一座主变电所退出运行时,是否由其他相邻主变电所承担本供电范围内的一级和二级负荷的供电,这属于 $N-2$ 运行方式下的问题。根据《地铁设计规范》(GB 50157—2013)的要求,城轨供电系统满足 $N-1$ 准则即可。然而,在实际工程中,当一座主变电所退出运行时,系统有两种运行方式:一是由相邻的主变电所承担本主变电所供电范围内的全部一级和二级负荷,保证系统正常运行;二是相邻主变电所不能全部承担本主变电所供电范围内的全部一级和二级负荷,此时系统降效运行。前者对主变压器备用容量要求高、投资大、能耗大;后者对主变压器备用容量要求低、投资小、能耗小。

3) 根据建设时序确定主变压器容量

对于同期建设的具有主变电所共享条件的线路,主变电所近期与远期负荷均应按共享后合并计算;对于建设时序相差较大的具有变电所共享条件的线路,主变压器的近期负荷只考虑先期建设线路的用电负荷,但对于远期负荷应按共享后合并计算。

4) 根据建设资金确定主变压器容量

根据《地铁设计规范》,地铁工程的设计年限分为初期、近期和远期三期。初期按建成通车后第 3 年要求设计,近期按第 10 年要求设计,远期按第 25 年要求设计。主变压器应根据远期高峰小时各类负荷的用电需求设计一次完成。经综合比较后,主变压器配置可以接近、远期分期实施,也可以按远期需求一次建成。但在分期实施时土建规模应按远期预留。

经计算,如果近、远期主变压器容量差别不大,初期投资相差不大,则主变压器等设备配置可以按远期一次到位;如果近、远期主变压器容量差别较大,结合主变压器使用寿命,则主变压器等设备配置接近、远期分期实施,以节省工程初期投资。

5) 根据用电负荷确定主变压器容量

接近、远期两种情况,分别计算正常用电负荷及一台主变压器退出运行时两种运行方式下的用电负荷。根据两者中的较大值,分别确定近、远期主变压器容量。

3. 主变压器型式的确定

目前,国内城市轨道交通主变电所高压侧电压为 110 kV 或 66 kV(东北地区),而干式变压器用于 35 kV 及以下电压等级,所以主变压器选用油浸式变压器。当运输条件没有限制时,330 kV 及以下的发电厂和变电所均应选用三相变压器,在城市轨道交通主变电所中一般选用三相变压器。主变压器一般采用两线圈变压器,根据中压网络电压等级的不同,主要采用 110/35 kV 两线圈变压器和 110/10 kV 两线圈变压器。主变压器绕组接线方式多采用 Y、D 接线,如有载调压开关则装在高压侧。



4. 主变压器的冷却方式

主变压器可以采用的冷却方式有自然风冷却、强迫油循环风冷却、强迫油循环水冷却、强迫油循环导向冷却等。小容量变压器一般采用自然冷却或自然风冷却方式,大容量变压器一般采用强迫油循环风冷却或强迫油循环水冷却方式。城市轨道交通用主变压器容量一般不超过 $63 \text{ MV} \cdot \text{A}$,多采用自然冷却方式。

任务三 认识中压网络

通过中压电缆,纵向把上级主变电所和下级牵引变电所、降压变电所连接起来,横向把全线的各个牵引变电所、降压变电所连接起来,便形成了中压网络,其功能类似于电力系统中的输电线路。中压网络不是供电系统中独立的子系统,但它是供电系统设计的核心内容,涉及外部电源供电方案、主变电所的位置及数量、牵引变电所及降压变电所的数量、牵引变电所与降压变电所的主接线等。

一、中压网络的电压等级

电压等级是中压网络两大属性之一。下面结合我国现行中压配电标准电压等级来介绍城市轨道交通中压网络电压等级的选用。

1. 国内城市轨道交通中压网络现状

我国现行中压网络标准电压等级有 35 kV 、 10 kV 、 6 kV 和 3 kV ,而 20 kV 是目前公认的具有发展前景的优选电压级,发展城乡 20 kV 配电网已提上议事日程。 20 kV 开关柜、变压器、电力电缆等一系列设备也完全实现了国产化。

目前,国内城市轨道交通普遍采用牵引动力照明混合网络,中压网络电压等级采用 35 kV 或 10 kV 。例如,北京地铁、长春轨道交通 3 号线等采用 10 kV ,武汉地铁 2 号线、深圳地铁 5 号线等为 35 kV 。集中式供电系统相对独立,中压网络的电压等级不一定与外部城市电网电压等级相一致,如上海地铁、广州地铁采用了国外的 33 kV 设备,南京地铁、深圳地铁采用的 35 kV 也是这两座城市电网所要取消的电压等级。因此,在城市轨道交通中压网络电压等级与外部城市电网电压等级的关系上,城轨中压网络要在综合分析线路走向、站点设置、外部电源条件、设备供应情况等诸多因素的前提下,进行技术经济比较。

2. 电压等级与供电能力和功率损耗的关系

中压系统的供电能力与电压等级密切相关,在其他条件不变的情况下,供电线路的功率输送能力与电压成正比,功率损耗与电压的平方成反比。在考虑可实施性的前提下,电压越高,系统的功率输送能力越强、供电距离越远、功率损耗越小。当然,电压等级的选择要从工程的技术经济角度进行综合考虑,不仅仅要考虑系统的供电能力,还要考虑工程造价及长期运营的经济性。



3. 不同电压等级的中压网络的特点

(1)35 kV 中压网络,国家标准电压级。输电容量较大、距离较长;设备来源国内;设备体积较大,占用变电所面积较大,不利于减小车站体量;设备价格适中;国内没有环网开关,因而不能用相对于断路器柜价格较便宜的环网开关构成接线与保护简单、操作灵活的环网系统。广州地铁、上海地铁等已经普遍采用。

(2)33 kV 中压网络,国际标准电压级。输电容量较大、距离较长,基本与 35 kV 一致;设备来源国外,不利于国产化;国外开关设备体积较小、价格较高,广州、上海地铁部分先期建设线路有所采用;国外 C-GIS 产品有环网单元。该电压等级不适合国内新建线路。

(3)20 kV 中压网络,国际标准电压级。输电容量及距离适中,比 10 kV 系统大。设备完全实现国产化;引进国外技术的开关设备,体积较小,占用变电所面积远小于国产 35 kV 设备,有利于减小车站体量,节省土建投资;价格适中;有环网单元,能构成接线与保护简单、操作灵活的环网系统;国内城市轨道交通尚没有采用,但国外城市轨道交通普遍采用。

(4)10 kV 中压网络,国家标准电压级。输电容量较小、距离较短;设备来源国内;设备体积适中;设备价格较低;环网开关技术成熟、运营经验丰富,可用其构成保护简单、操作灵活的环网系统;国内外城市轨道交通广为采用。

二、中压网络的构成形式

1. 中压网络的要求

城市电网中压网络的典型接线有:单电源辐射网、手拉手环网、网格式环网、电缆单环网、电缆双环网等。在城轨供电系统中,单电源辐射网、手拉手环网及网格式环网基本不采用。上海地铁 1 号线牵引网络为独立式,采用了电缆单环网,基于消防等系统电源特殊需要,不适合于动力照明网络,目前国内城市轨道交通已基本不采用。电缆双环网是国内城市轨道交通最为常见的中压网络接线形式。

在城轨供电系统中压网络设计中,应根据中压网络优化准则,结合外部电源的实际情况,通过对供电分区的用电性质、负荷密度的分析研究,确定安全可靠、经济实用的中压网络接线方式。

中压网络的重要指标是供电可靠性,即供电系统设备对用户连续供电的能力。具体要求如下。

(1)中压网络负荷转移能力必须满足 $N-1$ 准则。

(2)主变电所(电源开闭所)失去任何一回进线或一台主变压器而降低供电能力,或中压一段母线因故障退出时,中压网络应具有转移一级和二级负荷的能力。

2. 中压网络的构成原则

中压网络的构成形式涉及很多方面,在电压等级确定的前提下,应遵循以下原则:满足安全可靠的供电要求;每一座变电所均应有两个独立电源;设备容量及电压降满足要求;满足负荷分配平衡的要求;供电分区应就近引入电源,尽量避免反送电;具有良好的经济指标;满足继电保护的要求;系统接线方式尽量简单;全线牵引变电所、降压变电所的主接线尽量一致;满足运行管理、倒闸操作要求,满足设备选型要求。



3. 集中式供电系统的中压网络

1) 独立牵引网络+独立动力照明网络

(1) 牵引网络的接线方式。当中压网络为两个独立网络时,牵引网络的常用接线方式有 4 种。

①A 型:牵引变电所主接线为单母线,牵引变电所的两个独立电源来自同一个主变电所的不同母线,牵引变电所的进线与出线均采用断路器。该类型接线适用于位于线路始末端及紧邻主变电所的牵引变电所。A 型如图 3-6(a)所示。

②B 型:两个牵引变电所为一组,牵引变电所主接线均为单母线。这一组牵引变电所的两个独立电源来自同一个主变电所的不同母线,每个牵引变电所均从主变电所接入一路主电源,两个牵引变电所通过联络电缆实现电源互为备用。牵引变电所的进线与出线均采用断路器。该类型接线适用于位于线路始末端的牵引变电所。B 型如图 3-6(b)所示。

③C 型:两个牵引变电所为一组,牵引变电所主接线均为单母线。这一组牵引变电所的两个独立电源来自不同的主变电所,左侧牵引变电所从左侧主变电所接入一路主电源,右侧牵引变电所从右侧主变电所接入一路主电源,两个牵引变电所通过联络电缆实现电源互为备用。牵引变电所的进线与出线均采用断路器。该类型接线适用于位于两个主变电所之间的牵引变电所。C 型如图 3-6(c)所示。

④D 型:牵引变电所主接线为单母线。牵引变电所的两个独立电源来自左右两侧不同的主变电所,牵引变电所的进线与出线均采用断路器。该类型接线适用于位于两个主变电所之间的牵引变电所。D 型如图 3-6(d)所示。

B 型和 C 型接线方式的备用电源投入方式比较复杂,现以 B 型接线为例进行分析。 QF_1 、 QF_2 分别为两个牵引变电所主电源, QF_3 、 QF_4 分别为两个牵引变电所备用电源。为避免变电所合环运行, QF_1 、 QF_2 、 QF_3 、 QF_4 开关不得同时处于合闸状态。假设 QF_1 、 QF_2 、 QF_3 同时处于合闸状态,当 QF_1 因进线电源失压跳闸后, QF_4 开关合闸,以保障该牵引变电所正常运行,因此两个牵引变电所之间需要建立联锁关系。

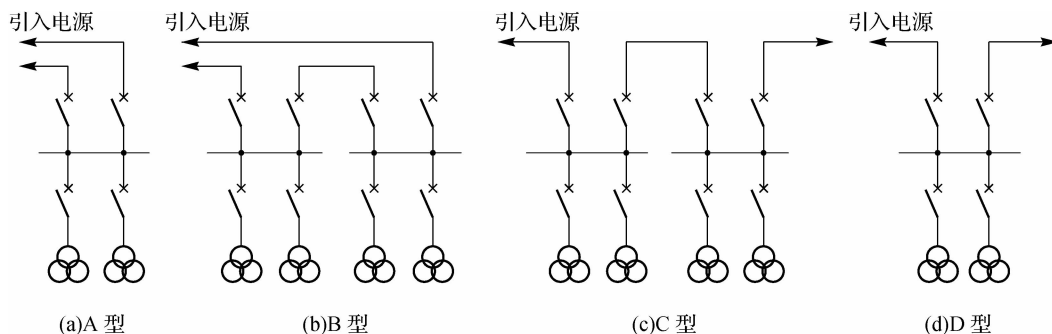


图 3-6 牵引网络的常用连接方式

(2) 动力照明网络的接线方式。动力照明网络的基本接线方式如图 3-7 所示。

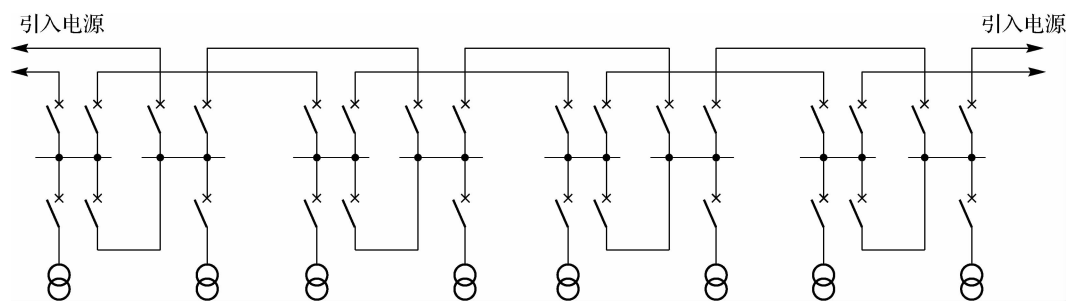


图 3-7 动力照明网络的基本连接方式

将全线的降压变电所分成若干个供电分区，每一个供电分区均从主变电所（如 35/10 kV 主变压器）就近引入两个独立电源。根据负荷力矩、电压等级及节能的需要，确定每个供电分区内的降压变电所数量。中压网络采用双环网接线方式，两个主变电所各自负责的供电分区间（彼此相邻的两个供电分区）可以通过环网电缆联络建立电源关系。降压变电所主接线一般采用分段单母线形式，其进线开关采用断路器，该接线方式运行灵活。

2) 牵引动力照明混合网络

当牵引网络与动力照明网络采用同一个电压等级时，就可以采用牵引动力照明混合网络。其基本接线方式如图 3-8 所示。

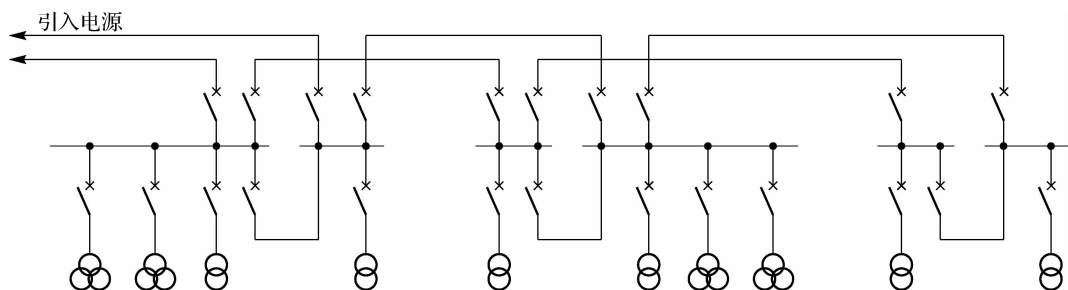


图 3-8 牵引动力照明混合网络的基本连接方式

将全线的牵引变电所及降压变电所分成若干个供电分区，根据负荷力矩、电压等级及节能的需要，确定每个供电分区内的牵引变电所和降压变电所的数量。每一个供电分区均从主变电所的不同母线就近引入两个中压电源，中压网络采用双线双环网接线方式。

牵引降压混合变电所、牵引变电所的主接线采用分段单母线加母线分段开关形式；降压变电所的主接线可采用分段单母线加母线分段开关形式，也可以取消母线分段开关，对于同一城市轨道交通线路的降压变电所，其主接线应尽量一致。同一个主变电所供电范围内的供电分区间可以不设联络电缆（尤其是当这些供电分区间分别只有一个牵引变电所时）。

牵引动力照明混合网络接线方式运行灵活。一般情况下，35 kV 牵引动力照明混合网络因其输电容量大、距离长，一般应用于地下和运能大的线路；10 kV 牵引动力照明混合网络因其输电容量小、距离短，一般应用于地面线路。



4. 分散式供电系统的中压网络

对分散式供电系统,中压网络采用牵引动力照明混合网络,常用的接线方式有 3 种类型:A 型、B 型和 C 型。

(1)A 型分散式中压网络如图 3-9 所示。全线的牵引变电所、降压变电所被分成若干个供电分区,中压网络采用双环网接线方式,两个相邻供电分区之间通过两路环网电缆联络。每一个供电分区均从城市电网就近引入两个独立电源,牵引变电所、降压变电所的主接线均采用分段单母线加母线分段开关形式。牵引变电所、降压变电所的环网进线开关均采用断路器。同一个供电分区的外部电源可以来自不同地区的城市电网变电所,也可以来自同一地区城市电网变电所的不同母线。该方式运行灵活,要求城市电网有比较多的中压电源点,且不存在供电能力不足问题。

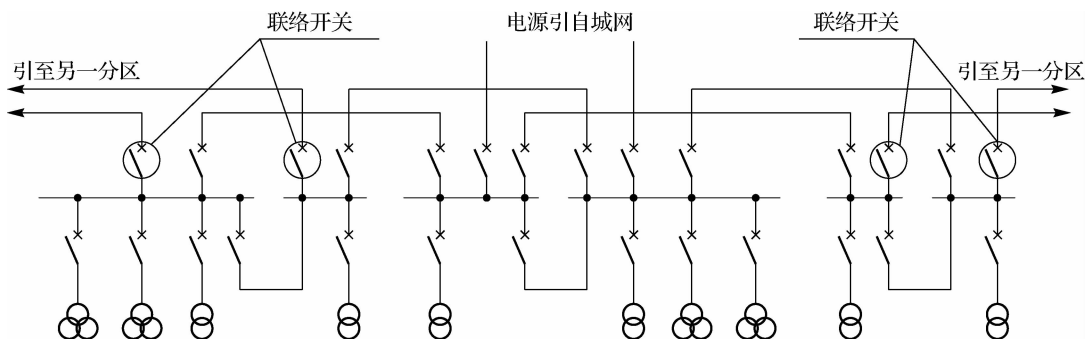


图 3-9 A 型分散式中压网络

(2)B 型分散式中压网络如图 3-10 所示。全线的牵引降压混合变电所(或牵引变电所)每两个分成一组,每一组均从城市电网引入两个独立电源分别作为两个牵引降压混合变电所的主电源;同时,同一组的两个牵引降压混合变电所间设双路联络电缆,实现电源互为备用。相邻两组牵引降压混合变电所之间设单路联络电缆,以增加系统的供电可靠性。

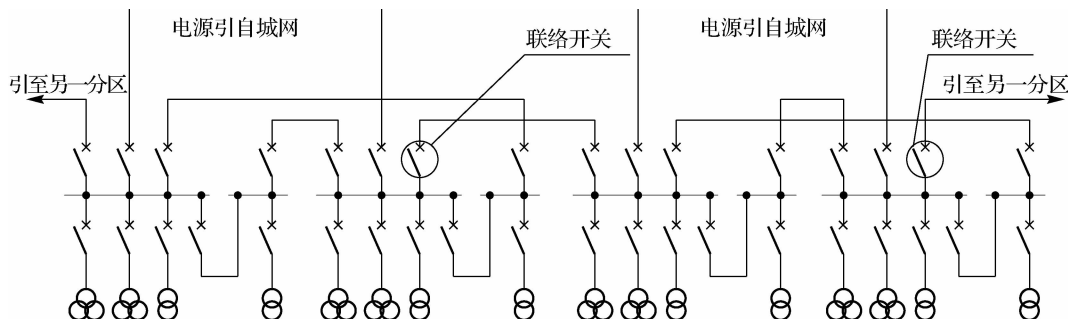


图 3-10 B 型分散式中压网络



牵引降压混合变电所、牵引变电所的主接线均采用分段单母线加母线分段开关形式。没有牵引变电所的地面车站,其降压变电所可按跟随式降压变电所考虑。没有牵引变电所的地下车站,其降压变电所的中压电源可以由相邻两组间的单路联络电缆提供,中压侧采用分段单母线主接线。

该接线方式比较简洁,对城市电网中压电源点的数量要求不多,但要求每组从城市电网引来的两个独立电源应来自不同地区的城市电网变电所,以增加供电的可靠性。该接线方式适合于地面线路。

(3)C型分散式中压网络如图 3-11 所示。全线的牵引降压混合变电所(或牵引变电所)均从城市电网引入一个独立电源,最后一个牵引降压混合变电所从城市电网直接引入两个中压电源,这路电源既是本变电所的主电源,又是前一个变电所的备用电源。当前面变电所的主电源直接来自城市电网时,备用电源则来自下一个变电所,这样所有变电所均有两个独立的进线电源。牵引降压混合变电所、牵引变电所的主接线均采用分段单母线加母线分段开关形式。没有牵引变电所的车站,其降压变电所可按跟随式降压变电所考虑。

该接线方式最为简洁。 N 个变电所需要 $N+1$ 路 10 kV 电源,相邻变电所间只有一路联络电源。该方式对城市电网中压电源点的数量要求不多,但要求这些城市电网引来的中压电源应来自不同地区的城市电网变电所,以增加供电的可靠性。该接线方式适合于运输能力较小的地面线路。

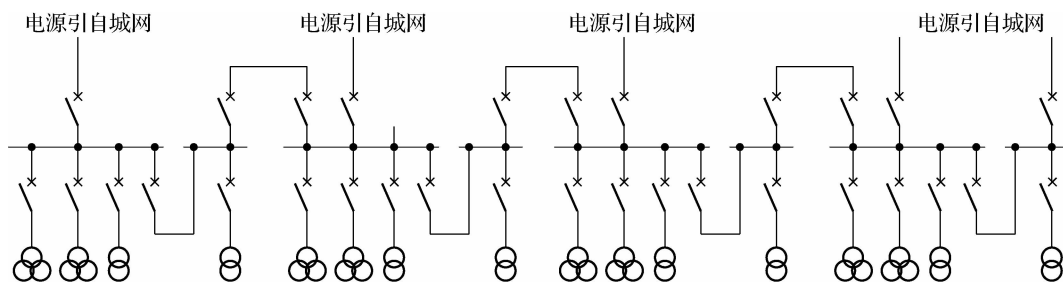


图 3-11 C型分散式中压网络

三、新型中压网络

1. 既有中压网络形式

1) 独立牵引网络+独立动力照明网络接线形式

由于城市轨道交通线路用电负荷呈线状分布,因此,在确定中压网络形式时,电压等级的选取是很重要的因素。在集中式供电系统中,10 kV 电压的负荷力矩比较小,供电距离受到限制,将牵引供电系统和动力照明供电系统设置为两个独立的中压网络,减轻了 10 kV 中压网络的负荷力矩。使用 35 kV、10 kV 两种电压等级,输变压的环节较多,配电线路变得复杂,变压器及配电线路的损耗增加。

2) 牵引动力照明混合网络接线形式

在集中式供电系统中,混合网络采用 35 kV 时,供电距离长、负荷力矩大,但造价较高;混合网络采用 10 kV 时,设备造价较低,但负荷力矩较小、供电距离较短,主变电所之间的供



电距离不宜过长或需增加 10 kV 供电分区数量。在分散式供电系统中,混合网络采用了 10 kV,利用了与城市电网电力资源共享的优势,但该中压网络形式要求引入较多数量的城市电网中压电源。

3) 变电所主接线形式

一般情况下,变电所主接线大都采用了分段单母线加母线分段开关形式,进线开关和母线分段开关采用断路器。

2. 新型中压网络

针对既有中压网络形式存在的不足,这里介绍一种新型中压网络,即 20 kV 牵引动力照明混合网络,如图 3-12 所示。

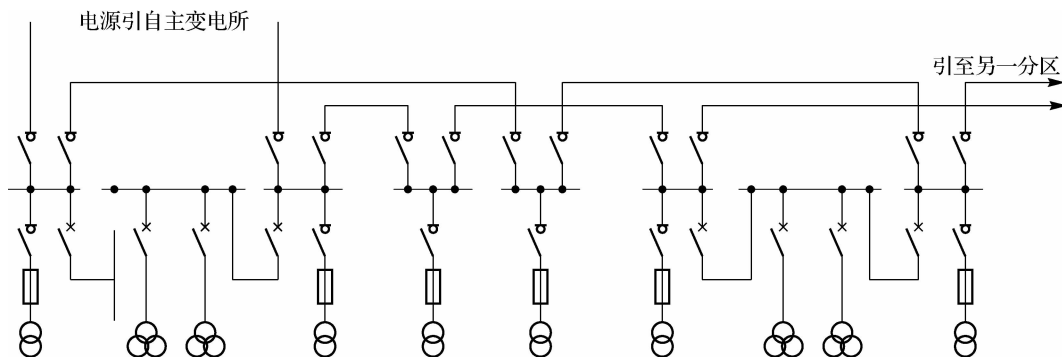


图 3-12 20 kV 牵引动力照明混合网络

全线的牵引降压混合变电所及降压变电所被分成若干个供电分区,每个供电分区车站数量根据潮流分布计算结果确定。每一个供电分区均从主变电所的不同母线就近引入两个 20 kV 电源。

牵引降压混合变电所的主接线均采用分段单母线形式,即设有两段环网电源母线及一段牵引电源母线,牵引母线与两段环网电源母线间设有联络断路器,任何时候只允许一个联络断路器处于合闸位置,另一进线断路器(作为备用)投入的条件是“失压自拔、过流闭锁”。两套牵引整流机组均接入牵引母线,两台配电变压器则分别接入两段环网电源母线。降压变电所主接线采用分段单母线形式,配电变压器可以采用负荷开关-熔断器组合电器保护。

中压网络采用双环网接线方式。牵引降压混合变电所、牵引变电所、降压变电所的环网进线开关均采用负荷开关,需要注意的是,负荷开关的短路耐受电流值应与系统配合。两个主变电所的供电分区之间通过双环网电缆联络,其他供电分区之间可以不设联络电缆。

该接线方式的特点为:传统的 10 kV 动力照明网络、10 kV 牵引动力照明混合网络和 35(33)kV 牵引动力照明混合网络,尽管也采用了环网接线方式,但除了 10 kV 牵引动力照明混合网络中的降压变电所可采用负荷开关外,基本上以断路器作为环网进线开关。20 kV 牵引动力照明混合网络的最大构成特点是利用 20 kV 负荷开关作为环网进线开关,同时设置了两段环网电源母线,主接线简洁,投资省,充分利用了 20 kV 电压级设备的特点。



该接线方式的优点为:当中压网络中的一个环网电缆出现故障时,主变电所中相应的20 kV 馈出断路器将跳闸,相关牵引母线的联络断路器也将失压跳闸,随之备用联络断路器将自动投入,保证对牵引整流机组的不间断供电。

四、中压网络中应处理的几个关系

中压网络构成形式的确定涉及城轨供电系统安全准则、供电系统运行方式、继电保护及电力调度等方面,这主要体现在应处理好以下几个关系。

1. 中压网络与主变电所运行方式的关系

中压网络构成及其运行方式依托于主变电所(电源开闭所)之间的电源关系,即供电系统的正常运行方式和故障运行方式。两个主变电所之间的电源关系有以下两种形式。

(1)两个主变电所相邻的供电分区之间通过环网电缆联络,建立彼此电源关系。该方式区间电缆较少,属于常用的一种方式。

(2)两个主变电所中压母线之间设联络电源,两个主变电所的供电分区之间不必再设联络电缆。该方式需要单独设置中压电缆,造价高,一般不采用。

2. 中压网络与供电分区的关系

根据负荷用电量、线路长度及中压电缆电压损失允许值,确定中压电缆的规格和实际长度,由此初步确定供电分区内变电所的数量。根据线路能耗与中压电缆、中压开关设备造价的综合比较,最后确定供电分区内变电所的合理数量。供电分区内变电所的数量主要取决于线路的负荷力矩和经济指标。

相邻供电分区之间是否设联络电源,取决于上面所讲到的主变电所的运行方式。

3. 中压网络与线路继电保护的关系

中压网络与线路继电保护的关系主要体现在变电所进线和联络馈线开关形式、中压网络运行方式。

变电所进线与联络馈线开关采用隔离开关或负荷开关时,由于隔离开关不具备继电保护功能,中压网络电源电缆故障由主变电所或电源开闭所馈线开关切除,故障范围容易扩大。

变电所进线与联络馈线开关均采用断路器,由于断路器具备继电保护功能,中压网络电源电缆故障由故障电缆两端的开关切除,容易控制故障范围。

需要说明的是,供电分区内变电所的数量与线路继电保护内容及实现手段没有直接联系,线路继电保护仅是保证城轨供电系统安全可靠运行的一种辅助手段。对于继电保护的内容及实现手段,国家相关规范和规程另有规定。

4. 中压网络与电力调度的关系

(1)变电所进线与联络馈线开关均采用隔离开关,隔离开关不能带负荷操作。这种接线形式简单实用、经济合理。对于电力管理和调度来说,只能实现遥信、遥测功能,不能遥控。

(2)变电所进线与联络馈线开关均采用负荷开关,负荷开关可带负荷操作。这种接线形式经济且较为合理,简单实用,能实现遥信、遥测和遥控功能。

(3)变电所进线与联络馈线开关均采用断路器,断路器具备继电保护及带负荷操作功



能。这种接线形式可靠性高,经济性欠佳,可以实现遥信、遥测和遥控功能。

五、供电系统的运行方式

供电系统的运行方式是由城市轨道交通用电负荷等级决定的。除非在得到当地电力部门允许的情况下,变电所可以短时间内合环运行,即短时间内两个进线开关和母线分段开关同时处于合闸状态,否则变电所两个进线电源必须分列运行。

牵引用电负荷为一级负荷,动力照明用电负荷分为一级负荷、二级负荷及三级负荷。一级负荷应由双电源双回线路供电,当一路电源发生故障时,另一路电源不应同时损坏。

对互为备用线路,一路退出运行,另一路应承担其一级和二级负荷的供电,且技术指标不降低,如电源电缆的电压损失、谐波含量等控制在允许的范围內。

城轨供电系统要满足列车与动力照明用电设备对电源的不同要求,满足灾害下电源的可靠性,使城轨的所有设备都能发挥各自的功能和作用,保证安全运营。

1. 电源变电所运行方式

电源变电所运行方式是指集中式供电系统中主变电所运行方式及分散式供电系统中电源开闭所运行方式。

1) 主变电所的运行方式

主变电所有三种主要运行方式:正常运行方式、单故障运行方式和主变电所退出运行方式。两个主变电所之间的供电分区设置环网电缆联络,如图 3-13 所示。

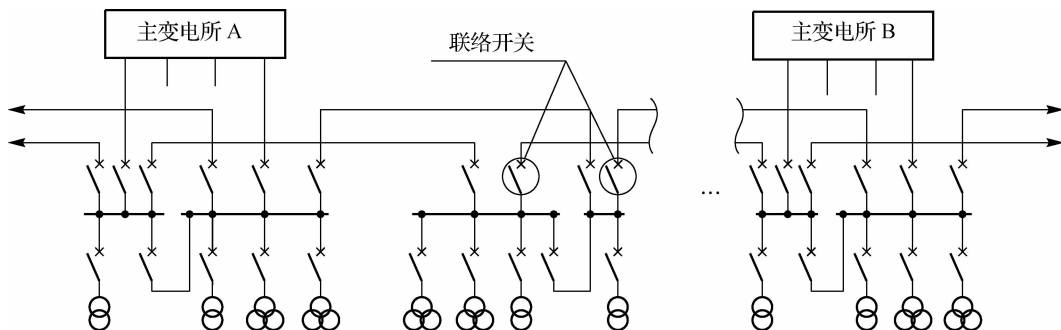


图 3-13 新型中压网络

(1) 正常运行方式。在正常情况下,每座主变电所各自承担所辖范围内所有变电所的负荷,除中压母线分段开关、应急联络开关为分断状态外,其余进、出线开关均为闭合状态。

(2) 单故障运行方式。主变电所的单故障类型有主变电所一个进线电源失电、单台主变压器退出、主变电所一段中压母线故障三种。

① 当主变电所一个进线电源失电后,内桥或外桥断路器合闸,由另一个进线电源向分挂在两段母线上的两台主变压器供电,承担本主变电所范围内的全部一级和二级负荷。例如,主变电所采用线路-变压器组接线形式,当主变电所一个进线电源失电后,由另一个进线电源的主变压器承担本主变电所范围内的全部一级和二级负荷。



②当单台主变压器退出后,中压母线分段开关合闸,由另一台主变压器承担本主变电所范围内的全部一级和二级用电负荷。

③当主变电所一段中压母线故障时,该段母线上的进线开关跳闸,同时该段母线上馈线所接的第一级变电所进线开关也应失压跳闸,主变电所的另一段中压母线继续供电。

(3)主变电所退出运行方式。当一座主变电所退出后,首先应将该主变电所所有馈线开关分闸,将该主变电所和中压网络电气隔离,使该主变电所处于无电状态;解除 QF_1 、 QF_2 应急联络开关的闭锁关系并合闸。此时,通过两个主变电所的供电分区间的联络电缆,由相邻主变电所向该主变电所供电,承担该主变电所所辖范围内一定的用电负荷。

2) 电源开闭所的运行方式

(1)正常运行方式。在正常情况下,每座电源开闭所各自承担所辖范围内所有变电所的负荷,除中压母线分段开关为分断状态外,其余进、出线开关均在闭合状态。相邻电源开闭所的供电分区通过环网电缆联络,供电分区应急联络开关处于分闸位,并与所在中压母线的进线开关、母线联络开关有闭锁关系。

(2)单故障运行方式。当电源开闭所一路进线电源失电后,启动备用进线自动投入装置(简称备自投),母线分段开关合闸,由另一路进线电源承担本电源开闭所范围内的全部一级和二级用电负荷。

(3)电源开闭所退出运行方式。当电源开闭所退出(两段中压母线无故障)后,首先应将该电源开闭所进线开关和母线分段开关全部分闸,防止向城市电网反送电;解除应急联络开关的闭锁关系并合闸。此时,通过相邻电源开闭所的供电分区间的联络电缆,由相邻电源开闭所向该电源开闭所供电,承担该电源开闭所所辖范围内一定的用电负荷。

此时,根据退出后的电源开闭所所辖范围内的用电负荷大小,需要界定左右相邻电源开闭所的供电范围。为避免合环运行,由控制中心严格管理新供电分界点的维护 and 操作。

2. 放射式中压网络运行方式

对于放射式中压网络供电,变电所之间没有直接的电气联系,变电所电源可靠性较差,而且投资较高。但当任意一回路中压电缆出现故障时,不影响其他回路供电,且操作灵活方便,易于实现保护和自动化。这种网络结构在中大运量城轨交通中不被采用,在小运量的新交通制式中有类似单回路接线方式。

放射式中压网络不存在中压电缆故障后的负荷转移,可以不考虑线路的备用容量,每回路线路可满载运行,即正常最大供电负荷不超过该线路安全载流量。

放射式中压网络有两种形式:单回路放射式和双回路放射式。

1) 单回路放射式——单母线接线

单回路放射式单母线中压网络如图 3-14 所示。

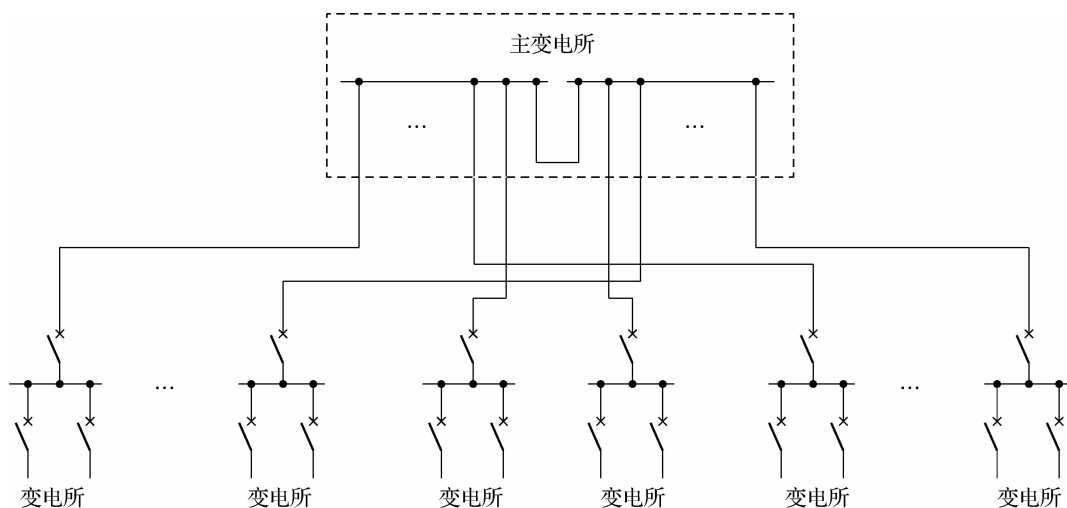


图 3-14 单回路放射式单母线中压网络

(1) 正常运行方式。在正常情况下,主变电所(电源开闭所)分别馈出一回路中压电源为各变电所直接供电,中压母线分段开关处于分闸状态,变电所进线开关处于合闸状态。

(2) 进线电源退出运行方式。变电所进线电源故障时,主变电所(电源开闭所)相应的馈线开关跳闸,由于该变电所仅有一个进线电源,因此该变电所退出运行。

(3) 变电所母线退出运行方式。当变电所的母线退出时,其进线开关或主变电所(电源开闭所)相应的馈线开关跳闸,该变电所退出运行。其后果和进线电源退出运行方式相同。

2) 双回路放射式——单母线接线

双回路放射式单母线中压网络如图 3-15 所示。

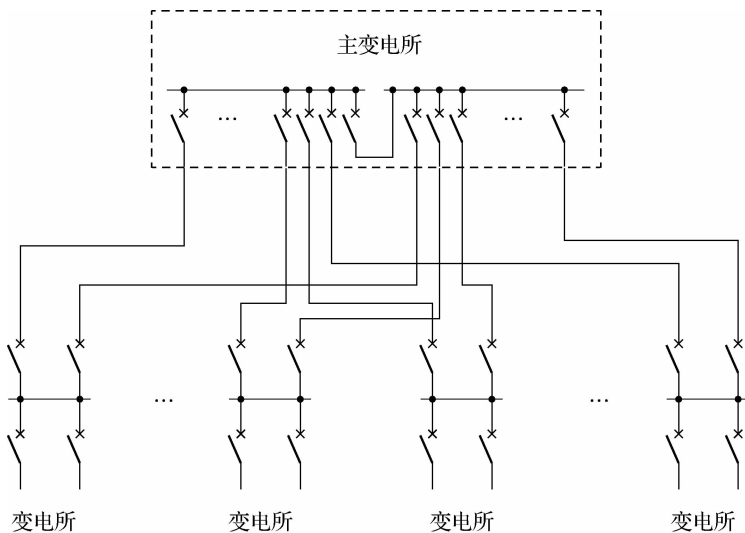


图 3-15 双回路放射式单母线中压网络



(1)正常运行方式。在正常运行情况下,主变电所(电源开闭所)分别馈出两回路中压电源为城轨各变电所直接供电,此时两个进线电源均接于同一段母线。正常情况下只有一个进线电源投入运行为变电所提供电源,另一个进线电源备用。

(2)一个进线电源退出运行方式。当变电所正常工作的一个进线电源退出运行时,另一个备用的电源将投入运行。

(3)两个进线电源退出运行方式。当变电所的两个进线电源均退出运行时,主变电所相应的馈线开关跳闸,该变电所退出运行。

(4)变电所中压母线故障运行方式。由于变电所中压侧为单母线接线形式,当中压母线故障时,正常工作的进线开关跳闸,备用进线开关被闭锁,该变电所退出运行。

3) 双回路放射式——分段单母线接线

双回路放射式分段单母线中压网络如图 3-16 所示。这种网络结构在靠近主变电所的牵引变电所中所采用。

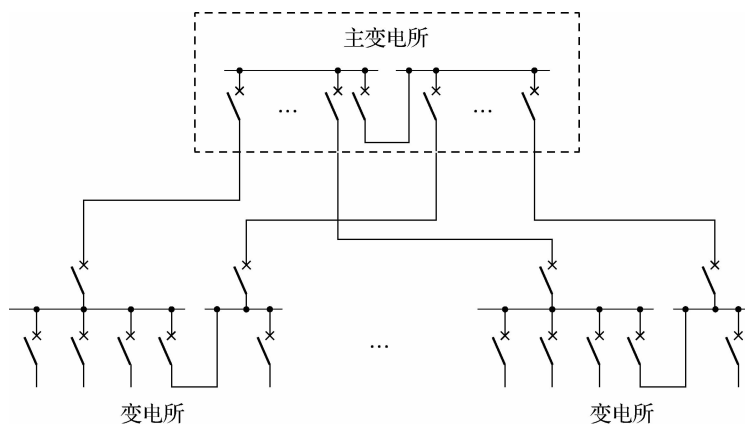


图 3-16 双回路放射式分段单母线中压网络

(1)正常运行方式。在正常运行情况下,主变电所(电源开闭所)分别馈出两回路中压电源为城轨各变电所直接供电,两个电源分别接于两段不同的母线。正常情况下,母线分段开关处于分闸状态,两个电源均正常分列工作,共同承担该变电所范围内的全部负荷。

(2)一个进线电源退出运行方式。当一个进线电源退出运行时,该变电所进线开关跳闸,起动备自投,母线分段开关合闸,由另一个进线电源承担该变电所的全部一级和二级用电负荷。

(3)两进线电源退出运行方式。变电所的两个进线电源均退出运行时,主变电所相应的馈线开关跳闸,该变电所退出运行。

(4)变电所中压母线故障运行方式。变电所一段中压母线退出时,本段母线上的进线开关跳闸,分段开关被闭锁不合闸,由另一个进线电源承担该变电所的动力照明系统的一级和二级负荷。若牵引整流机组所挂母线故障,则该牵引整流机组将退出运行。