

第一章 城市轨道交通供电系统的组成

第一节 电力系统概述

本节导读

电力系统由发电、输电、配电及用电等环节构成。城轨供电系统作为电力系统的用电负荷（俗称用户），与电力系统有着紧密的联系。因此，需要了解并掌握有关电力系统的一些基本知识，如电能的产生、电能的输送与分配、电压等级的设置、电网结构与接线方式、电能质量及有关的技术术语等，为后续学习城轨供电系统奠定基础，这是本节的主要内容。

一、电力系统基本概念

现代社会使用最广泛的能源就是电能。电力系统最根本的任务就是生产和传输电能，即将其他形式的能源转换成电能，并将电能提供给各类用户使用（包括城市轨道交通系统）。同时，为提高社会的电气化程度，以电能代替其他形式的能源，也是节能的一个重要途径。

（一）电力系统

发电机把机械能转换为电能，电能经变压器、电力线路等电力设备输送并分配到用户，用户的电动机、电炉、电灯等用电设备又将电能转换为需要的机械能、热能和光能等。这些发电、输电、配电和用电的所有装置及设备连接在一起组成了电力系统，如图 1.1 所示。

电能的生产、输送、分配和使用是同时进行的。不考虑储能时，发电厂任何时刻生产的电功率必须等于该时刻用电设备消耗的电功率和电力网损耗的电功率之和。电力系统中用电设备主要有电动机、电热装置、整流装置和照明设备等。所有用电设备所消耗的电功率总和称为电力系统综合用电负荷。综合用电负荷加上电力网的功率损耗就是发电厂应该供给的功率，称为电力系统的供电负荷。供电负荷再加上发电厂用电消耗的功率，就是各发电厂应该发出的功率，称为电力系统的发电负荷。随时间随机变化是电力系统负荷的一个重要特点。

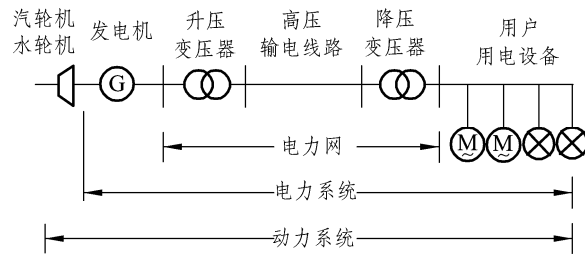


图 1.1 电力系统示意图

（二）发电厂

在电力系统中，发电厂是产生电能的场所，能将其他形式的能源转换为电能。根据转换能源的不同，发电厂分为火电厂、水电厂和核电厂等，此外还有地热电厂、风力电厂、潮汐海洋电厂等。

1. 火电厂

火电厂夜景如图 1.2 所示。目前我国仍以燃煤为主的火电厂居多。这些电厂多建在煤炭基地附近，故称为“坑口”电厂，其单机容量可达 1 000 MW（兆瓦）。如果把已做过功的乏气再供给用户作为热能，这种电厂又称为热电厂。



图 1.2 火电厂夜景

2. 水电厂

水电厂又称水电站或水力发电厂。它建于江河之上，是将水的落差产生的势能转换为电能的发电厂。水能发电不仅效率高，而且水能是在自然界不断循环的再生资源，具有用之不竭的特点。

为了充分利用水力资源，在水电站的上、下游集中一定的落差，形成发电的动能。

我国水能资源丰富，水能发电的潜力很大，目前世界最大发电机的单机容量为 750 MW。我国水轮发电机的单机容量为 700 MW，例如长江三峡电厂（见图 1.3）装设了 32 台 700 MW 的水轮发电机。



图 1.3 三峡水电站鸟瞰图

3. 核电厂

核电厂又称核电站。它的发电原理和火力发电原理相类似，只是热能的产生方式不同而已。核电站能源是原子能燃料铀或钚，它利用原子能燃料裂变产生的大量热能进行发电。因为原子能燃料储藏量大、能量集中，原子能裂变时不需要空气助燃，故核电站可建在地下、山洞、海底或空气稀薄的高原，不占农田，建造和发电成本低，事故率低，故其有着广阔的发展前景。但核电站的核泄漏会对人类产生极大的危害，在建设和运营过程中尤其需要注意安全生产。

4. 风力发电厂

风力发电的原理，是利用风力带动风车叶片旋转，再通过增速机将旋转的速度提升，来促使发电机发电。风力发电是把风的动能转变成机械动能，再把机械动能转化为电能的过程，如图 1.4 所示。



图 1.4 风力发电厂

因为风力发电不需要使用燃料，也不会产生辐射或空气污染，而且它取之不尽、用之不竭，所以它是一种清洁的可再生能源，越来越受到世界各国的重视。其蕴含量巨大，全球的风能约为 2.74×10^9 MW，其中可利用的风能为 2×10^7 MW，比地球上可开发利用的水能总量还要大 10 倍。因此，国内外都很重视利用风力来发电，开发新能源。

风力发电机因风量不稳定,故其输出的交流电须经整流,对蓄电池充电,使风力发电机产生的电能变成化学能,然后用有保护电路的逆变电源,把蓄电池里的化学能转变成电能,才能保证稳定使用。目前,风力发电作为一种新能源,正处在大力开发与推广应用阶段。

(三) 电力网

电力系统中除发电机和用电设备外的部分称为电力网,简称电网。由各种电压等级的输、配电线路和变(配)电站(所)组成。电力网是电力系统的重要组成部分,电力网的任务是将电能从发电厂输送和分配到电能用户。它对于电力系统的可靠性和经济运行有着重要的意义。

电力系统是并网运行的。这指的是在一个电力系统中,所有发电机和用户的用电设备是通过电力网连接在一起的。目前,我国电网已基本上全国联网,并形成四个同步运行电网:东北电网、三华电网(华北电网、华东电网、华中电网)、西北电网和南方电网。其中:东北电网与华北电网直流互联;西北电网与华中电网、华北电网直流互联;华中电网与南方电网直流互联;西藏电网与西北电网直流互联。

1. 输电网和配电网

电力网按其功能常分为输电网和配电网两大部分。输电网是由 220 kV 及以上的输电线路和与其相连接的变电所组成,是电力系统的主要网络,其作用是将电能输送到各个地区的配电网或直接输送给大型企业用户,如图 1.5 所示。



图 1.5 输电网

配电网是由 110 kV 及以下的配电线路和与其相连接的配电所(或简单的配电变压器)组成,其作用是将电能分配并短距离输送到各类用户。根据电压等级的不同,配电网通常分为高压配电网(66~110 kV),中压配电网(1~35 kV)和低压配电网(1 kV 及以下)。

2. 变电所(站)和配电所(站)

图 1.6 为电力系统构成图。

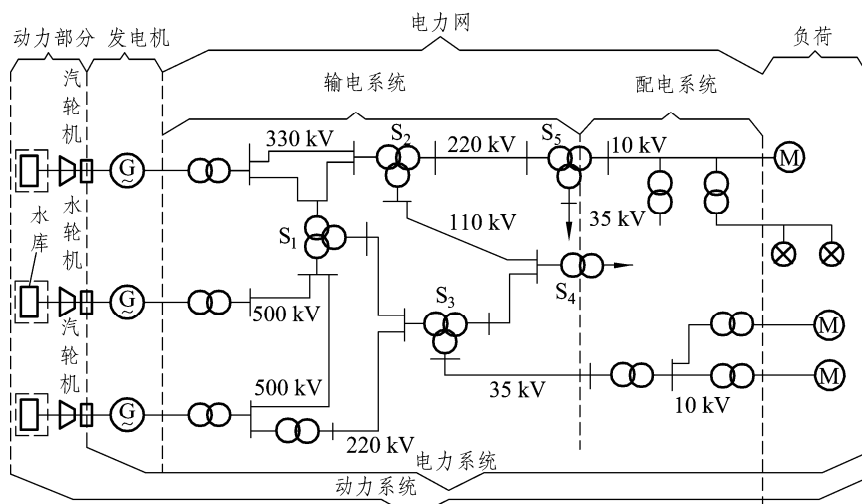


图 1.6 电力系统构成图

变电所（站）由电力变压器和配电装置组成，它具有变换电压、集中电能、分配电能、控制电能以及调整电压的作用。将电压升高的称为升压变电所（站）；将电压降低的称为降压变电所（站）。配电所（站）最大的特点是不变换电压，只承担分配电能的任务。一般把变电所（站）分为以下 3 种：

（1）枢纽变电所（站）。它通常都有两个及其以上电源汇集，进行电能的分配和交换，从而形成电能的枢纽，如图 1.6 所示的 S_1 、 S_2 变电所。此类变电所（站）规模大，并采用三绕组变压器获得不同级别的电压，送到不同距离的地区。

（2）地区变电所（站）。其作用是供给一个地区用电，如图 1.6 中的 S_3 等。通常也采用三绕组变压器，高压受电，中压转供，低压直配。

（3）用户变电所（站）。此类变电所属于电力系统的终端变电所，直接供给用户电能。通常采用双绕组变压器，如图 1.6 中的 S_4 、 S_5 等。城市轨道交通供电系统中的主变电所就属于此类变电所。

二、电力系统电压等级

输电技术发展的特点是努力减少线路损失。减少线损的经济合理的方法是提高输电电压。由于电功率是电压和电流的乘积，电力线路输电功率一定时，输电电压愈高，则电流愈小，线损愈小；另一方面，电流愈小，则导线等载流部分的截面面积愈小，投资愈小。但电压愈高，对绝缘的要求愈高。提高输电电压，与线路、变压器和断路器等绝缘技术发展水平密切相关。

迄今为止，输电技术的发展史就是持续不断地提高电压等级、提高输送功率与输送距离的历史。1898 年，美国研制出 33 kV 电力线针式绝缘子；1910—1914 年，美国和苏联科学家发现电晕临界电压与导线直径成正比例，促使了铝线、钢芯铝绞线、扩径或分裂导线的使用；1906 年，美国发明 11 ~ 500 kV 电力线悬式绝缘子，并于 1908 年和 1923 年分别建成 110 kV

和 220 kV 输变电工程；1959 年，苏联建成 500 kV 输变电工程；1965 年，加拿大建成 760 kV 输变电工程；1985 年，苏联建成 1 150 kV 输变电工程；2010 年中国建成晋东南-南阳-荆门 1 000 kV 输变电工程。

电压越高，对绝缘的要求越高，对杆塔、变压器、断路器等投资也越大。综合考虑这些因素，对应一定的输送功率和输送距离有最合理的电压等级。从设备制造角度考虑，为保证生产的系列性，应规定标准电压，用以确定元件、器件或设备的额定工作条件的电压。我国国家标准《标准电压》(GB/T 156—2007)规定了电力系统以及相关设备的标准电压。其中，交流(或直流)系统的标准电压用“标称电压”表示；相关设备的标准电压用“额定电压”表示。该标准给出了三相交流系统的标称电压值有 1 000、750、500、330、220、110、66、35、20、10、6、3、1、0.38、0.22(单位为 kV)等电压等级。其值均为线电压。同一电力系统中往往有几种不同电压等级。最高电压等级是指该系统中最高的标称电压值。

同一电压等级下，电力线路和用电设备的额定电压与系统标称电压相等。用电设备都是按照额定电压来进行设计和制造的，在额定工况下运行时，具有最好的技术经济性能。

线路输送电功率时，会产生电压损失，沿线的电压分布往往是始端高于末端，沿线路的电压降落一般为 10%。由于实际供电电压与系统标称电压正、负偏差绝对值之和不能超过标称电压的 10%(35 kV 及以上)，所以如果线路始端电压为标称值的 105%，可以使其末端电压不低于标称值的 95%即可。发电机往往接在线路始端，所以发电机的额定电压通常为标称电压的 105%。

变压器一次侧接电源，相当于用电设备，二次侧向负荷供电，又相当于发电机，因此，变压器一次侧额定电压应等于系统标称电压(直接和发电机相连的变压器一次侧额定电压应等于发电机额定电压)。升压变压器二次侧额定电压较系统标称电压高 10%；降压变压器二次侧额定电压则有两种：一种是较系统标称电压高 10%，另一种是较系统标称电压高 5%。

设多种电压等级主要是为了满足不同输送容量、不同输送距离和不同用户的需要。各级电压线路输送能力(输送功率和输送距离)的大致范围如表 1.1 所示。从表中可见，线路电压等级越高，能够输送的电功率越大，能够传送电功率的距离也越远。大功率长距离输电通常采用超高压或特高压线路。

表 1.1 各级电压的输送容量与距离

线路电压/kV	输送容量/MW	输送距离/km	线路电压/kV	输送容量/MW	输送距离/km
3	0.1~1	1~3	220	100~500	100~300
6	0.1~1.2	4~15	330	200~800	200~600
10	0.2~2.0	6~20	500	1 000~1 500	200~850
35	2.0~10	20~50	750	2 000~2 500	500 以上
110	10~50	50~160	1 000	4 000~6 000	1 000 以上

三、电网结构与接线方式

(一) 电力网结构

电力网主要是由变压器和不同电压等级的电力线路组成。通常一个大的电力网是由许多子电力网互联而成。电力网采用分层结构，一般可划分为输电网、高压配电网、中压配电网和低压配电网，如图 1.7 所示。

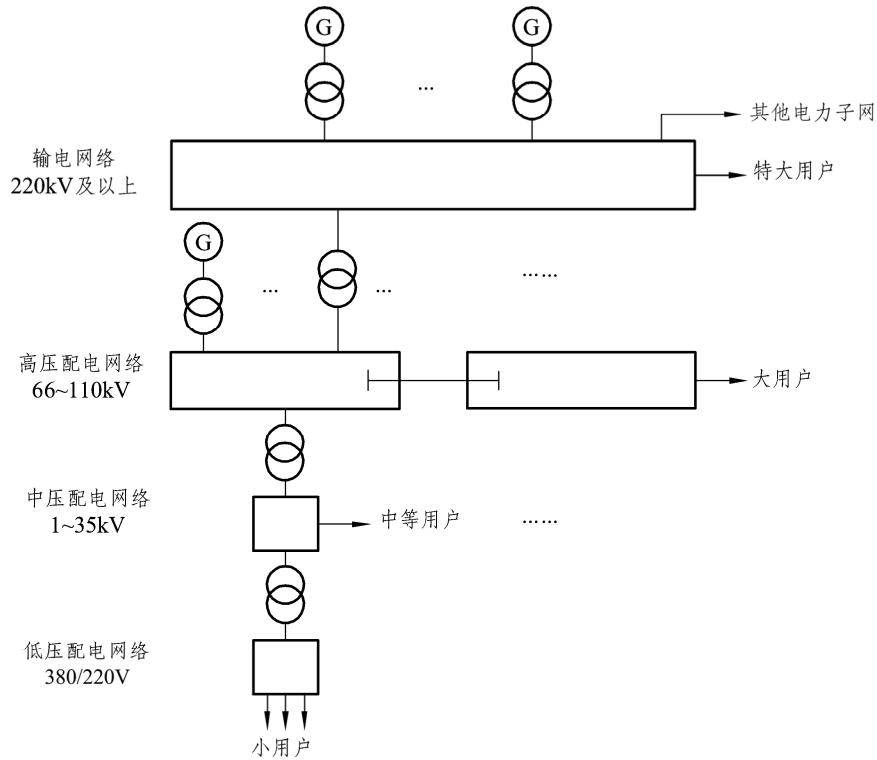


图 1.7 电力网结构示意图

一级输电网一般是由电压为 330 kV 及以上的主干电力线路组成，它连接着大型发电厂、大容量用户以及相邻电力子网。二级输电网的电压一般为 220 kV，它上接一级输电网，下连高压配电网，并连接较大型的发电厂，向较大容量用户供电。配电网是向中等用户和小用户供电的网络，高压配电网通常用于城市和农村分片供电，也用于大用户供电；35 kV 与 10 kV 配电网是最为常用的中压配电网，主要用于各类中等用户的供电，也用于大工业企业的内部电网；3 kV 配电网只限于工业企业内部使用，且正在被 6 kV 配电网所代替。电压为 380/220 V 及以下的低压配电网主要用于各类动力与照明用电系统。

（二）电力网的接线方式

电力网的接线方式大致可分为无备用和有备用两类。无备用接线包括单回路放射式、干线式和链式网络。有备用接线包括双回路放射式、干线式、链式以及环式和两端供电网络。

无备用接线电力网又称为开式电力网，其接线简单、经济、运行方便，但供电可靠性差，通常在中低压配电网中使用较多。有备用接线电力网又称为闭式电力网，其供电可靠性高，一条线路的故障或检修一般不会影响对用户的供电，但投资大，且操作较复杂。其中，环式

供电和两端供电方式较为常用，通常在高压配电网与输电网中运用。

（三）电力系统中性点接地方式

电力系统中性点接地方式是指电力系统中的变压器和发电机的中性点与大地之间的连接方式。中性点接地方式有：不接地（绝缘）、经电阻接地、经电抗接地、经消弧线圈接地（谐振接地）、直接接地等。就主要运行特征而言，可将它们归纳为两大类：中性点直接接地或经小阻抗接地，采用这种中性点接地方式的电力系统称为有效接地系统或大接地电流系统；

中性点不接地或者经消弧线圈接地，或者中性点经高阻抗接地，从而使接地电流被控制到较小数值的中性点接地方式，采用这种中性点接地方式的电力系统称为非有效接地系统或小接地电流系统。

现代电力系统中采用得较多的中性点接地方式是：直接接地、不接地和经消弧线圈接地。在对绝缘水平的考虑占首要地位的 110 kV 及以上的高压电力系统中，均采用直接接地方式。在绝缘投资所占比重不太大的 35 kV 及以下中低压系统中，出于供电可靠性等方面的考虑，大都采用不接地或经消弧线圈接地的方式。不过，当城市配电系统中电缆线路的总长度增大到一定程度时，它会给消弧线圈的灭弧带来困难，系统单相接地易引发多相短路。所以，近几年来，有些大城市的配电系统改用中性点经低值（不大于 $10\ \Omega$ ）或中值（ $11\sim 100\ \Omega$ ）电阻接地，它们也属于有效接地系统。

第二节 城市轨道交通供电系统构成

本节导读

通过本节介绍，可以从系统功能、设计任务和采购单元三个不同的角度对城市轨道交通供电系统的组成有一个初步的了解。

城市轨道交通供电系统（以下简称“城轨供电系统”）的构成可以按照系统功能、设计任务和采购单元的不同来进行划分。

一、按系统功能划分

按功能的不同，城轨供电系统一般可划分成以下几个部分：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和电力监控系统等。

1. 外部电源

顾名思义，城轨交通的外部电源就是为城轨供电系统的主变电所或电源开闭所供电的外部城市电网电源。外部电源方案的形式，有集中式供电、分散式供电和混合式供电等几种。

2. 主变电所或电源开闭所

主变电所的功能是接受城市电网高压电源，经过降压后再为牵引变电所与降压变电所提供中压电源；主变电所适用于集中式供电。电源开闭所的功能是接受城市中压电源，为牵引变电所、降压变电所转供中压电源，电源开闭所一般与车站牵引（或降压）变电所合建；电源开闭所适用于分散式供电。

3. 牵引供电系统

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

牵引变电所可以分成正线牵引变电所、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。牵引变电所一般采用设备安装在建筑物内的形式，另外也有少量的箱式牵引变电所。作为试点，上海轨道交通 5 号线工程采用了箱式牵引变电所。

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。大多数工程利用走行轨兼作回流网，少数工程单独设置回流轨。

4. 动力照明供电系统

动力照明供电系统的功能是将交流中压电压降压变成交流 380/220 V 电压，为运营需要的各种机电设备提供低压电源。它包括降压变电所和动力照明配电系统。

根据设置的位置不同，降压变电所可以分为车站降压变电所、车辆段或停车场降压变电所、控制中心降压变电所；根据主接线的形式不同，降压变电所又可以分为一般降压变电所、跟随式降压变电所；当降压变电所与牵引变电所合建时，将形成牵引降压混合变电所；另外，有的地面线路采用了箱式降压变电所。

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引起的杂散电流并防止其对外扩散，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。尽管杂散电流腐蚀防护系统涉及多个专业，但由于直流牵引供电系统是产生杂散电流的根源，因而通常将杂散电流腐蚀防护系统归由供电系统设计。

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。在城市轨道交通控制中心，通过调度端、通信通道和执行端（变电所综合自动化系统），对主要电气设备进行遥控（含遥调）、遥信、遥测，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

为便于设计任务的分割及设计界面的清晰，城轨供电系统可以划分成以下设计单元：主变电所、全线系统、牵引变电所、降压变电所、接触网、电力监控系统、杂散电流腐蚀防护系统。动力照明设备则列入车站等建筑物附属设备，一般划归土建工点单位连同建筑结构一起进行设计，而不由供电系统设计单位进行设计。

1. 主变电所

主变电所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市电网变电所 110 kV（或 66 kV）高压出线间隔，电源外线一般由主变电所设计单位同时设计；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，主变电所馈出电缆一般由全线系统设计单位设计。

2. 全线系统

全线系统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 电源整合等。全线系统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，低压馈出电缆由动力照明负责设计。

5. 接触网

接触网设计内容包括接触悬挂、支持结构与基础、附加导线、防雷与接地及平面布置等。接触网隔离开关、回流箱及尾线由接触网设计。

6. 电力监控系统