

第一章 供电系统概述

【学习目标】

1. 了解供电系统的组成；
2. 熟悉供电系统变电所的分类及运行方式；
3. 了解供电系统中压环网系统的组成及设计要求；
4. 了解供电系统中直流牵引供电系统的组成及设计要求；
5. 熟悉供电系统中直流牵引供电系统的运行方式。

【知识要求与技能要求】

1. 掌握供电系统集中供电方式、分散供电方式及混合供电方式的区别；
2. 掌握主变电所、降压变电所、牵引降压混合变电所的功能和作用；
3. 掌握变电所主要设备的功能和作用；
4. 能绘制直流牵引供电系统的一次接线图。

第一节 供电系统的基本组成与运行方式

供电系统是为城市轨道交通运营提供所需电能的系统，它不仅为城市轨道交通电动列

车提供牵引用电，而且还为城市轨道交通运营服务的其他设施提供电能，如照明、通风、空调、给排水、通信、信号、防灾报警、自动扶梯等。在城市轨道交通的运营中，供电一旦中断，不仅会造成城市轨道交通的瘫痪，而且还会危及乘客的生命、造成财产损失。因此，高度安全、可靠并且经济合理的电力供给是城市轨道交通正常运营的前提和重要保证。

一、供电系统的组成

供电电源一般取自城市电网，通过城市电网一次电力系统和城市轨道交通供电系统实现输送或变换，然后以适当的电压等级供给城市轨道交通的各类用电设备。

供电系统一般包括电源系统（主变电所或电源开闭所）、牵引供电系统、动力照明供电系统和电力监控 SCADA 系统。其中，牵引供电系统包括牵引变电所和牵引网，动力照明供电系统包括降压变电所和动力照明配电系统。

在我国，用电负荷根据重要程度可分为一级负荷、二级负荷和三级负荷。其中一级负荷应由两路独立电源供电，当任何一路电源发生故障中断供电时，另一路应能保证继续供电。在城市轨道交通供电系统中，牵引用电负荷为一级负荷，而动力照明等用电负荷根据实际情况可分为一级、二级或三级负荷。城市轨道交通的外部电源供电方案应根据供电公司线网规划和城市电网的具体情况进行规划设计，而不应局限在某一条线路上。根据实际情况的不同，外部电源方案可分为集中供电方式、分散供电方式和混合供电方式。

现我国大多数城市地铁多采用集中供电方式，而有轨电车一般采用分散供电方式或混合

供电方式。

集中供电方式是指在线路的适当站位，根据总容量的要求设置主变电所，由发电厂或城市电网区域变电所以高压（常见的如 110 kV）向主变电所供电，经主变电所降压成中压（常见的如 35 kV 或 10 kV）向各车站变电所供电，结合各车站变电所进线形成中压环网，再由环网供沿线设置的牵引变电所，并降压整流为直流电（如 750 V 或 1 500 V），从而对电动列车供电。另外，各车站机电设备用电需由降压变电所降压为 AC380/220 V。为了便于城市轨道交通供电系统的统一管理，城市轨道交通供电系统目前较多地采用集中供电方式。这种供电方式的中压网络电压等级的确定，需要考虑用电容量、供电距离、城市当地电网现状及发展规划等因素。

分散供电方式是指不设置主变电所，而直接由城市电网区域变电所的 35 kV 或 10 kV 中压供电线路直接向城市轨道交通沿线设置的牵引变电所、降压变电所供电并形成环网。采用这种供电方式的前提是城市电网比较发达，并且在有关车站附近有符合可靠性要求的供电电源，其中压网络的电压等级应与城市电网相一致。分散供电方式可设置电源开闭所，并可与车站变电所合建。

混合供电方式，是以上两种方式的混合，即轨道交通线路的一部分采用集中供电方式，另一部分采用分散供电方式，但一般以集中供电方式为主、分散供电方式作为补充。

SCADA 系统是以计算机为基础的生产过程控制与调度自动化系统。它可以对现场的运行设备进行监视和控制，以实现数据采集，设备控制，测量，参数调节以及各类信号报警的遥信、遥测、遥调、遥控功能。

在电力系统中，SCADA 系统应用最为广泛，技术发展也最为成熟。它作为能量管理系统（EMS 系统）的一个最主要的子系统，有着信息完整、提高效率、正确掌握系统运行状态、加快决策、能帮助快速诊断出系统故障状态等优势，现已经成为电力调度不可缺少的工具。它对提高电网运行的可靠性、安全性与经济效益，减轻调度员的负担，实现电力调度自动化与现代化，提高调度的效率和水平等方面有着不可替代的作用。

二、变电所及其运行方式

（一）变电所的分类

变电所是城市轨道交通供电系统的重要组成部分，一般在城市轨道交通沿线设置，其数量、容量及其在线路上的分布应综合考虑后计算确定。城市轨道交通的变电所可以建在地下，也可以建在地面。地下变电所不占用地上面积，但土建造价高；地面变电所占地面积大，但土建造价低。城市轨道交通的变电所（尤其是地下变电所）在防火方面都有一定的要求，其防火措施主要应从结构和建筑材料以及变电所电气设备本身的不燃性等方面来考虑。变电所应装设自动消防报警装置、防火门和防火墙等隔离设施和有效的灭火系统。

城市轨道交通供电系统一般设置三类变电所，即主变电所（分散式供电方式为电源开闭所）、降压变电所、牵引降压混合变电所。

主变电所是指采用集中供电方式时，接受城市电网 35 kV 及以上电压等级的电源，经其降压后以中压供给城市轨道交通牵引变电所和降压变电所。主变电所选址时要考虑其供电的半径，一般一条地铁线路需要 2~3 座主变电所。

降压变电所从主变电所（电源开闭所）获得电能并降压变成低压交流电，供给地铁动力照明等设备使用。当由其他变电所引入中压电源而独立设置降压变电所时，称为跟随式降压变电所。

牵引变电所从主变电所（电源开闭所）获得电能，经过降压和整流变成电动列车所需要的直流电。在既有牵引变电所又有降压变电所的站点，为了方便运行管理，降低工程造价，可将二者合并建成一座牵引及降压混合变电所，简称牵混所。由于每个车站都需要降压变电所，所以一般没有单独的牵引变电所。

（二）变电所的运行方式

1. 供电系统正常运行方式

（1）主变电所。主变电所电源侧（如 110 kV）通常采用单元接线或桥形接线，两路电源同时供电，互为备用。负荷侧（如 35 kV）通常采用单母线分段形式，设置分段母线联络断路器，正常运行时，分段断路器断开，两台主变压器分列运行，共同负担全站的全部负荷。某主变电所的电气主接线如图 1-1-1 所示。

（2）降压变电所。降压变电所高压侧为单母线分段，而除跟随式降压变电所外，0.4 kV 侧也为单母线分段。每个降压变电所或跟随式降压变电所均设两台动力变压器，分别负责向各变电所所在的半个车站及半个区间内的动力照明负荷供电。正常运行时，两台动力变压器分别运行，同时供电。

（3）牵引降压混合变电所。牵混所与降压变电所的主要差别就在于多了一套牵引供电设备。某牵引降压混合变电所的电气主接线如图 1-1-2 所示，35 kV 侧和 0.4 kV 均为单母

线分段，和降压变电所没有差别。牵引部分有两台整流机组，接在同一段 35 kV 母线上，整流后的直流经正负极母线分配出去，正负极母线也没有分段。可以这么说，牵混所中的牵引部分其高压侧和直流侧均采用单母线接线形式。正常运行时，这两组牵引整流机组并列工作。

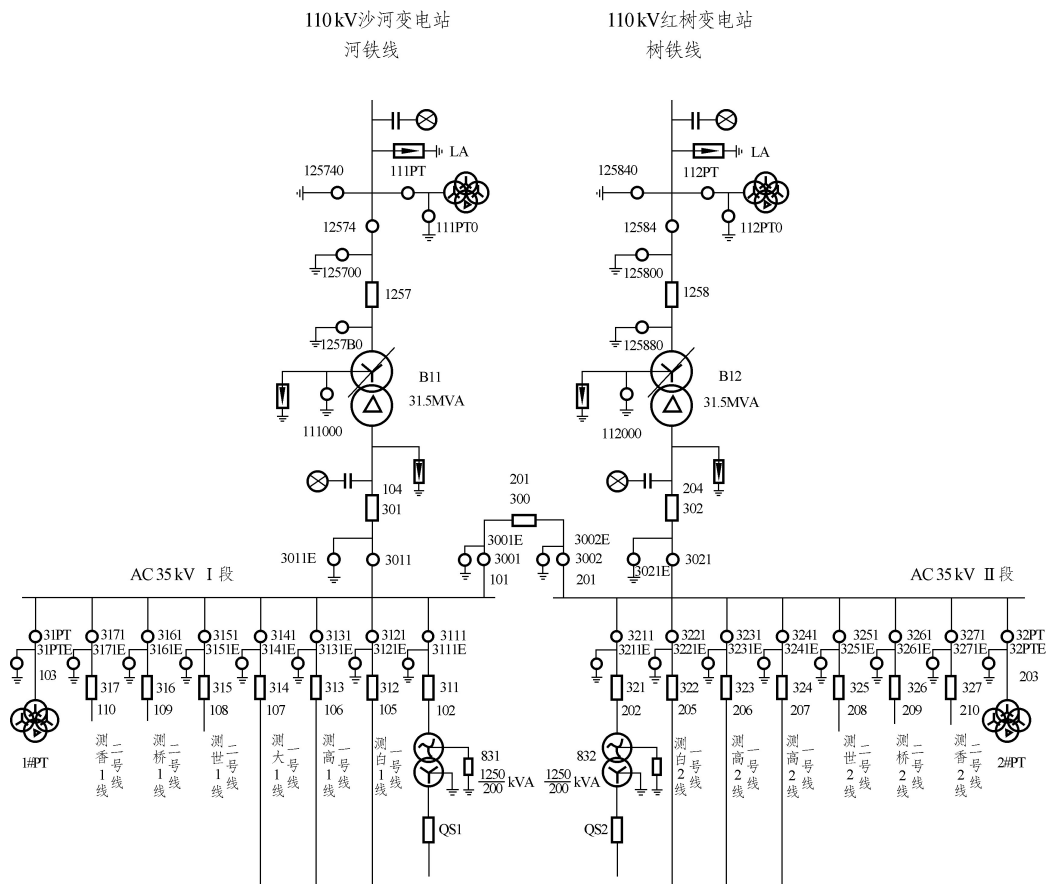


图 1-1-1 主变电所接线

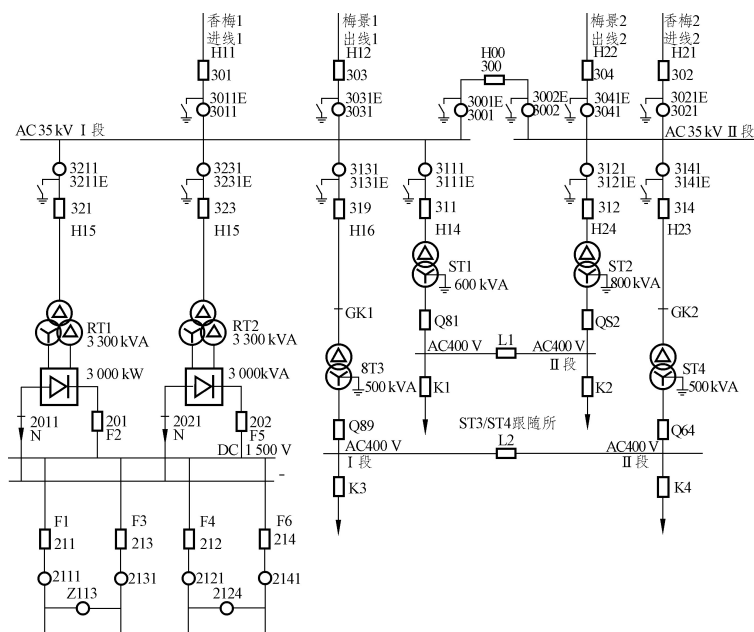


图 1-1-2 牵引降压变电所接线图

2. 供电系统故障运行方式

故障运行方式的基本要求：

- (1) 当一座主变电所故障时，不考虑 35 kV 母线同时故障（包括环网电缆）。
- (2) 不考虑相邻两座牵引变电所同时故障。
- (3) 不考虑相邻两座变电所两路进线同时故障。

1) 110 kV 进线故障

当主变电所的一路 110 kV 进线电缆故障时，该线路对应的主变压器退出运行。主变电所的 35 kV 母联断路器自投，切除主变电所供电区域内的三级负荷，另一台主变压器担负本所供电区域内的牵引负荷和一、二级动力、照明负荷用电。

2) 主变电所内故障

当变电所的一台主变压器故障，故障主变压器退出运行，主变电所的 35 kV 母联断路器自投，切除主变电所供电区域内的三级负荷，另一台主变压器担负本所供电区域内的牵引负荷和一、二级动力、照明负荷用电。

3) 主变电所解列时

当主变电所的两台主变压器故障或进线与变压器交叉故障时，故障主变电所退出运行，主变电所的 35 kV 母联断路器处于热备用状态，切除两座主变电所供电区域内的三级负荷，合上主变电所的联络开关，相邻主变电所承担全线供电区域内的牵引负荷和一、二级动力、照明负荷用电。

4) 35 kV 环网电缆故障

主变电所与变电所间的 35 kV 环网电缆故障，切除故障电缆，故障电缆进线端所在变电所的 35 kV 母联断路器自动投入；



相邻变电所间任一回 35 kV 进线电源（电缆）故障，切除故障电源，故障电缆进线端所在变电所的 35 kV 母联断路器自动投入；

5) 牵引变电所故障

① 当牵引变电所一台整流机组解列时，由另一台整流机组在允许过载的条件下继续运行（初期）。

② 顺序相邻的三座牵引变电所 A、B、C，当 B 牵引变电所解列退出运行时，通过 B 变电所的接触网越区隔离开关或本所直流母线，由 A、C 变电所实现大双边供电。合上 B 牵引变电所越区隔离开关前，本所直流快速断路器和 A、C 所两端供电区间的 4 个直流快速断路器需在分闸状态，由闭锁回路实现闭锁，控制中心发指令，由相邻牵引变电所越区供电。为了不停电，也可以仅将 B 牵引变电所解列退出，A、C 变电所实现大单边供电。

③ 当车辆段牵引变电所解列时，合上正线出入段线与车辆段出入库线联络处的电动隔离开关，由正线牵引变电所支援供电，两路来自正线的电源通过车辆段牵引变电所的馈线（车辆段出入库线专供回路）改为进线，解列牵引变电所整流机组的正、负极隔离开关应打开，回流通过单向导通装置（隔离开关闭合）回归正线。但车辆段变电所发生框架保护故障时，则支援供电存在问题。此时正线支援供电，只能通过接触网之间的联络隔离开关网上支援，合上段内专供出入库线与段内停车线电分段处设置的隔离开关，考虑两种方式支援供电是必要的。

当正线牵引变电所解列时，可由车辆段牵引变电所就近向正线牵引网支援供电，但该支援供电仅限于车辆段牵引变电所临近线路末端，才可能向相邻正线牵引网支援供电。

④ 直流馈线断路器故障，拉出故障断路器小车，用备用断路器小车代替故障断路器继续供电。

6) 接触网或连接设备故障

接触网或连接设备故障时，在切除故障接触网供电区段后，相邻接触网供电区段采用单边供电方式。

7) 降压变电所故障

降压变电所的一台变压器故障，切除三级负荷，0.4 kV 母线断路器自动投入，由另一台变压器担负本所供电区域内的一、二级动力、照明负荷用电。

第二节 交流中压环网系统

一、环网系统概述

地铁的外部电源，也即主变电所的高压系统，受地方供电系统控制，对于地铁而言是不可控因素。当高压系统发生故障时，中压环网系统的可靠性就成了地铁供电的关键因素。

交流中压环网系统有两大属性；一是电压等级，二是构成形式。交流中压环网系统不是供电系统中独立的子系统，但它却是地铁供电系统设计的核心内容。它涉及外部电源方案、主变电所的位置及数量、牵引变电所及降压变电所的位置与数量、牵引变电所与降压变电所的主接线等。

地铁的牵引供电和动力照明等用电是通过中压环网系统来先降压后供电的，地铁供电系统在获得电源之后，需要通过城市电网一次电力系统和地铁供电系统实现传输和变换，降压变压器提供适当电压等级的电能给地铁各类设备。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，便形成了中压供电网络。

根据网络功能的不同，把为牵引变电所供电的中压供电网络，称为牵引网络；同样，把为降压变电所供电的中压供电网络称为动力照明网络。对于牵引与动力照明相对独立的网络，牵引供电网络与动力照明网络的电压等级可以相同，也可以不同。供电系统中的中压网络应按列车运行的远期通过能力设计，对于互为备用线路，一路退出运行时，另一路应能承担其一、二级负荷的供电，线路末端电压损失不宜超过 5%。

一个运行可靠、调度灵活的环网供电系统，一般要满足以下设计原则和技术条件：

(1) 供电系统应满足经济、可靠、接线简单、运行灵活的要求。

(2) 供电系统（含牵引供电）容量按远期高峰小时负荷设计，根据路网规划的设计可预留一定裕度。

(3) 供电系统按一级负荷设计，即平时由两路互为备用的独立电源供电，以实现不间断供电。

(4) 环网设备容量应满足远期最大高峰小时负荷的要求，并满足当一个主变电所发生故障时（不含中压母线故障），另一个主变电所能承担全线牵引负荷及全线动力照明一、二级负荷的供电。

(5) 电缆载流量应满足最大高峰小时负荷的要求，同时当主变电所正常运行，环网中一条电缆故障时，应能保证城市轨道交通的正常运行。这里不考虑主变电所和环网电缆同时发生故障的情况，但要保证主变电所与一个牵引变电所同时发生故障时，系统能正常供电（三级负荷除外）。

配图 1-2-1 所示为某城市轨道交通工程采用集中供电方式时的中压环网系统中的一部分。