总模块 L

理论知识

分模块 LA　基础知识

子模块 LA1　城轨供电系统概论

城市轨道交通供电系统是为轨道交通运营提供动力能源的一个庞大系统，是国家和城市电网中的用电大户。它从国家和城市电网接受电能，通过变配电，将合适的电能提供给城市轨道交通各个部门和系统。城市轨道交通供电系统又是国家电力系统中的一部分，它的安全、可靠运行离不开国家电力系统的支撑。电力系统是由发电厂、变电所、输电线、配电系统及负荷组成的，国家电力系统运行的稳定与否将最终影响城市轨道交通供电的可靠性。

一、电力系统基本知识

随着城市轨道交通的迅猛发展，对电能的需求越来越大。城市轨道交通的电能取自城市电网，是电网的重要用户，城市电网中任何一个环节出现问题，都会影响城轨供电的质量和可靠性。同样，如果城轨供电系统出现故障，也会影响城市电网的电力平衡。

（一）电力系统及其额定电压

1．电力系统

电力系统是由发电、输电、变电、配电和用电等环节组成的电能生产与消费的系统。它的功能是将自然界的一次能源通过发电动力装置转化成电能，再经输电、变电和配电将电能供应给各用户。它通常是由两个及以上的发电厂和若干个变配电所及其输电线、配电网和它们的用户组成的一个庞大整体，其中，输电线和相连的变电所部分称为电力网。发电厂向电网输送电能，用户从电网接受电能。在这个过程中电网起着电能调节、分配和输送的重要作用。如果电

能不够，它可以通过增加连接发电厂数量或减少用户连接数量（减负荷）来平衡电能；如果电能富余，它还可以通过减少连接发电厂数量或向其他电网输送电能来平衡电能。为实现这一功能，电力系统在各个环节和不同层次还具有相应的信息与控制系统，对电能的生产过程进行测量、调节、控制、保护、通信和调度，以保证用户获得安全、经济、优质的电能。

2．电力系统的额定电压

电力系统的额定电压是指系统中所有电气设备都在这一指定电压下工作的电压，电气设备在此电压下工作，将具有最好的技术和经济效果。

3．电网的额定电压

同一电压级别下，各种设备的额定电压并不完全相等，为了使各种相互连接的电气设备都能运行在较有利的电压下，各电气设备的额定电压之间需要相互配合。为此通常认为电力线路的额定电压和系统的额定电压相等，把它称作为电网的额定电压。

4．电气设备的额定电压

所谓电气设备的额定电压就是指电气设备能够长时间工作的、最适合的电压。此时，电气设备中的元器件都工作在最佳状态，只有工作在最佳状态时，电气设备的性能才能比较稳定地发挥，电气设备的寿命在这样的工作电压下才能得以延长。

变压器的额定电压较为复杂，一次绕组与系统的额定电压相同，二次绕组比系统的额定电压高 10%，如果变压器的短路阻抗小于 7%或直接与用户连接时，则规定二次绕组额定电压比系统的额定电压高 5%。

（二）发电厂

发电厂是把不同形式的能源转换成电能的工厂，如化学能、水能、原子能等。根据发电厂所利用的能源不同，可以分为以下几类：

1．火力发电厂

利用煤、石油、天然气等燃料来发电的发电厂称为火力发电厂，简称火电厂。为了提高燃烧效率，现代的火电厂都把煤块粉碎成煤粉，然后把煤粉置于炉膛内完全燃烧，将锅炉内的水烧成高温、高压的蒸汽，蒸汽冲动汽轮，使其带动与其联轴的发电机旋转，将机械能转换成电能。

2．水力发电厂

水力发电厂是从水库引水，利用水的动能带动水轮机，并使其带动与其联轴的发电机旋转来产生电能的。例如，三峡的水力发电，就是在长江中拦江筑坝，提高上游的水位，形成

水库，使上、下游形成尽可能大的落差，这样的能源是环保清洁的。

3．原子能发电厂

原子核在核反应堆中的分裂过程会产生大量的热能(原子能转换热能),用此热能把水加热成蒸汽，蒸汽冲动轮机使其带动发电机旋转发电。

此外，还有潮汐发电厂、地热发电厂、风力发电厂、太阳能发电厂等。

我国现有的发电厂是以火力发电厂为主，其中，凝汽式火力发电厂仍占多数。南方电网正在大力发展水力和风力发电，例如，澜沧江的水力发电站和大理大风坝的风力发电厂。

（三）电力网

通常把由输电、变电、配电设备及相应的辅助系统组成的联系发电与用电的统一整体称为电力网，简称电网。它将相邻的电厂、变电所联络起来，形成地区或全国性网络，以便进行统一管理和运行调度，为电能的输送提供一个庞大的网络。如图 LA1-1 所示。另外，为了把电能输送到较远的用电地区，降低输电线路对电能的损耗，通常发电厂发出的电能都经升压变压器把电压升高（例如，升高到 110 kV、220 kV、500 kV 等），然后通过电网和输电线路送到用电地区。再经变电所的降压变压器把电压逐级降低后分配使用。所以，变电所的主要任务是变换电压，其次还有集中和分配电能，控制电能的流向和调整电压的任务。电网的电压一般为 0.4 kV、10 kV、35 kV、110 kV、220 kV 等，而发电机的电压一般为 6.3 kV、10.5 kV、13.8 kV、15.75 kV、18 kV 等。发电厂不能直接向用户供电，必须通过电网变配电后供给用户。

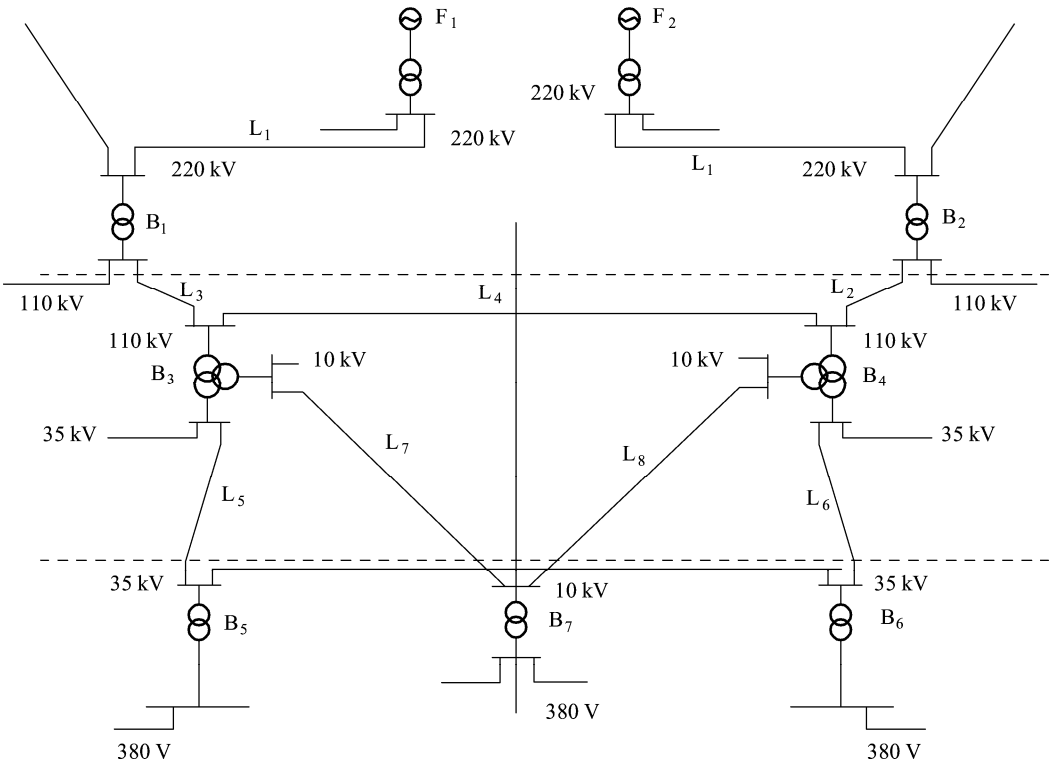


图 LA1-1　电力系统原理性电路图

F—发电厂；B—变电所；L—电力线路

（四）建立统一的电力系统的优点

1．降低最高负荷

因为在同一电网中，当某一地区出现用电高峰时，另一地区可能是用电低谷，电网中总电能需求量的增加或减少是很少的，此时电网是不需额外增加电能供给的。电网越大、容量越大，出现上述情况的可能性越多，越容易调节。因此可以相对减少发电机的装机容量。

2．减少备用容量

只要各电厂错开检修时间，就可以利用系统中的有些发电厂备用机组互相支援，不必为每个电厂都装备用机组，这样就减少了总的备用容量。

3．提高供电的可靠性和电能质量

由于电网越大，上网供电的发电机组越多，系统容量也就越大，个别机组的容量占整个电网容量的比重相对较小，所以故障时对系统的影响较小，因而提高了供电的可靠性和电能的质量（频率、电压）。

4．提高发电设备的经济运行

水电厂发电受季节的影响，在夏秋丰水期水量过剩，在冬春枯水期水量短缺。水电厂容量占的比例较大的系统（如云南省电网）将造成枯水期缺电。丰水期弃水的后果。组成联合电力系统后，水火电联合运行，丰水期水电厂多发电，火电厂少发电并适当安排检修；枯水期火电厂多发电，水电厂少发电并安排检修，这样充分利用水力资源，减少燃料消耗，从而降低了电能成本，提高了运行的经济性。

（五）电力系统的中性点

电力系统中性点与大地之间的电气连接方式，称为电网中性点接地方式。中性点接地方式涉及电网的安全可靠性、经济性；同时直接影响系统设备绝缘水平的选择、过电压水平及继电保护方式、通信干扰等。一般来说，电网中性点接地方式也就是变电所中变压器的各级电压中性点接地方式。我国 110 kV 及以上电网一般采用大电流接地方式，即中性点直接接地方式。3～10 kV 配电网一般采用小电流接地方式，即中性点不直接接地方式。

中性点不直接接地方式主要可分为以下三种：不接地、经消弧线圈接地和经电阻接地。按相关规定：3～60 kV 系统，当单相接地电流大于 30 A；20 kV 以上电网中，接地电流大于 10 A 时，则采取中性点经消弧线圈接地的运行方式。110 kV 及以上的系统，一般采取中性点直接接地的运行方式。对于 380 V/220 V 的低压配电网络，为得到两个不同的电压级也可采取中性点直接接地的三相四线制。

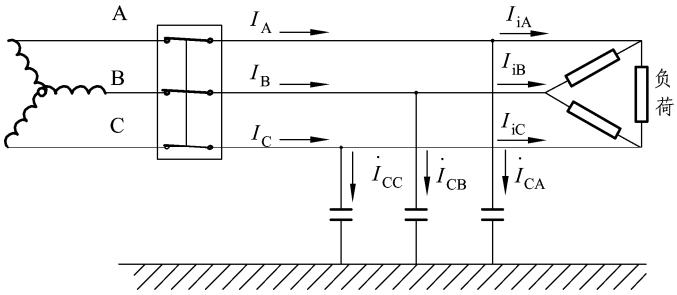
1．中性点不接地系统

我国 3～10 kV 配电网大多采用中性点不接地的运行方式。这主要是因为电压等级不高，单相接地时，虽然非故障相电压升高 $\sqrt{3}$ 倍，而设备的绝缘是根据系统的线电压设计的，对设备绝缘影响不大。当单相接地时系统可以允许继续运行 2 h，这就为查找故障赢得了时间，大大提高了供电的可靠性。系统的故障 70%以上是接地故障，对线路的损害主要由接地点的电容电流造成的。

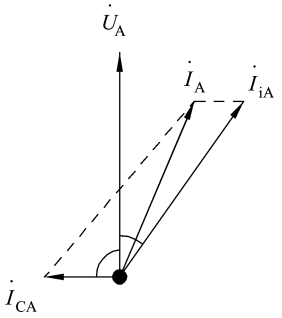
正常运行时，三相系统是对称的，用 $\dot{I}_{CA}$、$\dot{I}_{CB}$、$\dot{I}_{CC}$ 表示各相对地电容，$\dot{I}_{C0}$ 表示对地总的电容电流，同时不考虑相间电容，电力系统中性点不接地时的电路图如图 LA1-2（a）所示。

1）系统正常运行

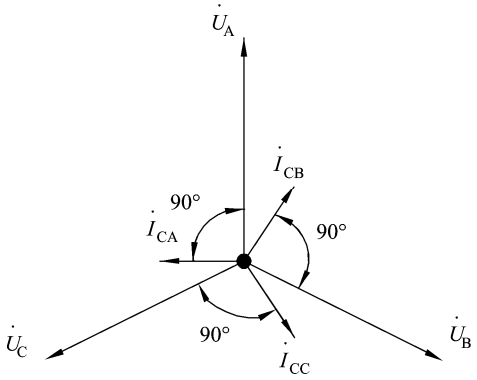
系统正常运行时，理想情况下，负荷是对称的。那么三相电压 $\dot{U}_A$、$\dot{U}_B$、$\dot{U}_C$ 是对称的，中性点的电位为零。各相对地电容电流也是对称的（各相对地的电容是相等的），即 $\left|\dot{I}_{CA}\right|=\left|\dot{I}_{CB}\right|=\left|\dot{I}_{CC}\right|=\left|\dot{I}_{C0}\right|$。图 LA1-2（b）为 A 相电流向量图；图 LA1-2（c）为电容电流向量图。



（a）电路图



（b）A 相的电流向量图



（c）电容电流向量图

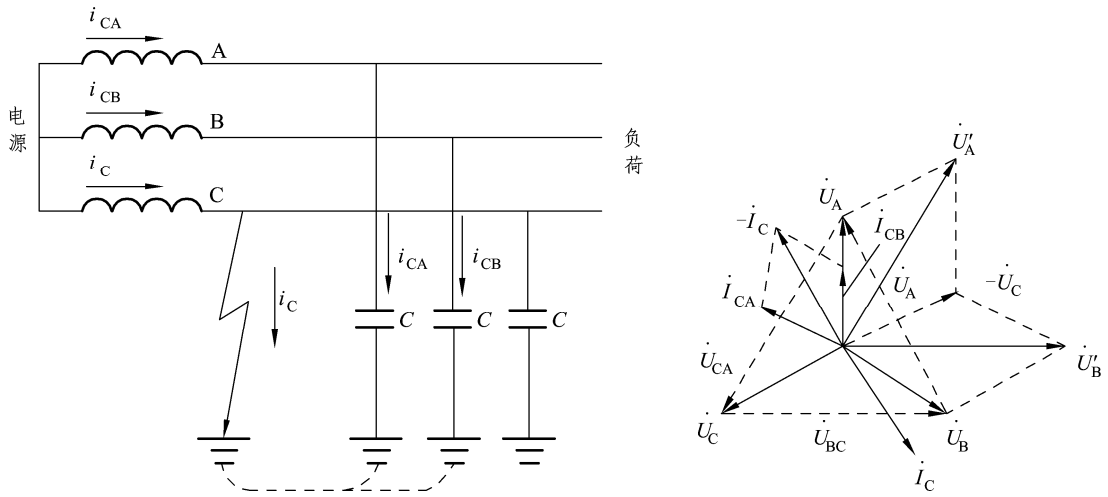
图 LA1-2　正常运行时，中性点不接地的三相系统图

2）系统发生单相接地故障

当任何一相（例如 C 相）绝缘受到破坏而接地时的电路图，如图 LA1-3（a）所示。此时，C 相对地的电压变为零，中性点电位偏移，非故障两相对地的电压升高 $\sqrt{3}$ 倍，即变为线电压。C 相发生完全接地时的向量图如图 LA1-3（b）所示。由图可以确定各相对地的电压 $\dot{U}'_A$、$\dot{U}'_B$、$\dot{U}'_C$ 的大小和方向。

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A + (-\dot{U}_C) = \dot{U}_A - \dot{U}_C = \dot{U}_{AC}$$
$$\dot{U}'_B = \dot{U}_B + (-\dot{U}_C) = \dot{U}_B - \dot{U}_C = \dot{U}_{BC}$$
$$\dot{U}'_C = \dot{U}_C + (-\dot{U}_C) = 0$$

从图 LA1-3（b）可以确定，$\left|\dot{U}'_A\right| = \left|\dot{U}'_B\right| = \sqrt{3}\left|\dot{U}_A\right|$，$\dot{U}'_A$ 和 $\dot{U}'_B$ 之间的夹角为 60°，A、B 两相对地电压值升高 $\sqrt{3}$ 倍。这样其对地电容上所加的电压也升高 $\sqrt{3}$ 倍。所以，对地电容电流也较正常时的电容电流 $\dot{I}_{C0}$ 升高 $\sqrt{3}$ 倍。根据图中可确定非故障相对地的电容电流，因 C 相对地的电容被短路了，所以 C 相对地的电容电流为零。



（a）电路图　　（b）向量图

图 LA1-3　C 相发生接地时，中性点不接地系统的三角图

设电流的正方向是从电源到电网，则可得出通过 C 相接地点的电流（简称接地电流）$\dot{I}_C=-(\dot{I}'_{CA}+\dot{I}'_{CB})$；$\left|\dot{I}'_{CA}\right|=\left|\dot{I}'_{CB}\right|=\sqrt{3}\left|\dot{I}_{C0}\right|$；$\left|\dot{I}_{CA}\right|=\sqrt{3}\left|\dot{I}_{C0}\right|$；$\left|\dot{I}_{CB}\right|=\sqrt{3}\left|\dot{I}_{C0}\right|$，由于 $\dot{I}'_{CA}$ 和 $\dot{I}'_{CB}$ 是电容电流，故分别超前 $\dot{U}'_A$ 和 U'_B 90°，因而 $\dot{I}'_{CA}$、$\dot{I}'_{CB}$ 两电流之间的夹角也是 60°，将它们相加即得 $-\dot{I}_C$。C 相接地电流 $\dot{I}_C$ 为电容电流，故 $\dot{I}_C$ 超前电压 $\dot{U}_C$ 90°。由向量图可得

$$\dot{I}_C=\dot{I}_{CA}+\dot{I}_{CB}$$
$$I'_{CA}=I'_{CB}=\sqrt{3}I_{C0}$$

所以

$$I_C=3I_{C0}$$

由上式可知，单相接地电流等于正常时一相对地电容电流的 3 倍。

若已知每相的对地电容 C，则可得到

$$I_{C0}=\frac{U_\varphi}{X_C}$$

因为

$$X_C=\frac{1}{\omega C}\times10^{-3}$$

所以

$$I_C=3I_{C0}=3U_\varphi\omega C$$

式中　U_φ —— 正常运行时的相电压，kV；

ω —— 角频率，rad/s；

C —相对地的电容，F；

X_C —对地电容的容抗，kΩ。

中性点直接接地系统图如图 LA1-4 所示。

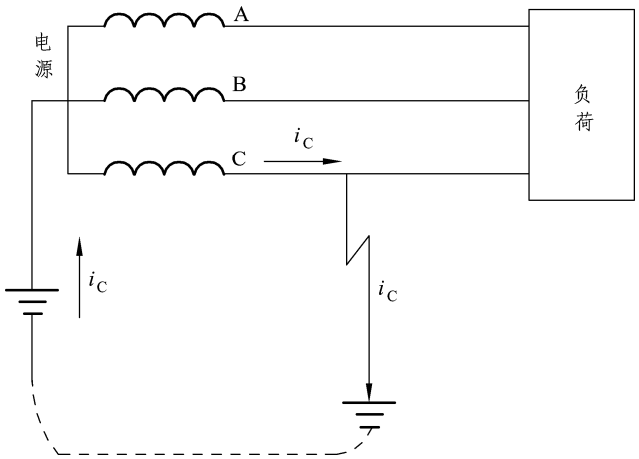


图 LA1-4　中性点直接接地系统图

因此，接地电流 $\dot{I}_C$ 的值与网络的电压、频率和每相对地的电容有关，而每相对地的电容与电网的结构（电缆、架空线）和线路的长度有关。在实用中，接地电流可近似地用下式计算：

架空线路：

$$I_C = \frac{Ul}{350}$$

电缆线路：

$$I_C = \frac{Ul}{10}$$

式中　U —电网的线电压，kV；

l —线路长度，km；

I_C —接地电流，A。

非金属性接地（包括经过一定电阻或消弧线圈接地）：接地相对地的电压大于零而小于相电压，非接地相对地的电压则大于相电压而小于线电压。

由前面分析可知，在中性点不接地的系统中发生单相接地时，网络非故障相线电压的大小和相位差仍维持不变，在这种系统中相对地的绝缘水平是根据线电压设计的，虽然未故障相的相电压会升高 $\sqrt{3}$ 倍，但对设备的绝缘没有多大影响。因而中性点不接地系统在发生单相接地时，可以继续运行。但是不允许长期运行，因为长期运行时可能引起非故障相绝缘薄弱的地方损坏而造成相间短路。为此，在这种系统中，一般都装设专门的绝缘监察装置，以监视有无接地故障发生。中性点不接地系统中发生单相接地时，按规定一般允许暂时继续运行不超过 2 h。

2．变压器中性点不接地系统的优、缺点

优点：采用变压器中性点不接地系统，由于限制了单相接地电流，对通信的干扰较小；另外单相接地时可以运行一段时间，提高了供电的可靠性。

缺点：采用变压器中性点不接地系统，当一相接地时，另两相对地电压升高$\sqrt{3}$倍，易产生间歇性电弧，使绝缘薄弱地方击穿，从而造成两相接地短路。

3．中性点直接接地系统

将系统的中性点直接接地也是防止单相接地时产生间歇电弧过电压的一种方法，如图LA1-4所示。由于单相短路电流很大，因而零序保护灵敏，继电保护装置能可靠动作，将接地的线路切除，使系统的其他部分恢复正常运行。这样在发生单相接地时，就不会产生间歇电弧。同时，因中性点电位由接地体所固定，非故障相对地的电压不升高，因而各相对地的绝缘水平只需按相电压考虑，这就降低了设备对绝缘的要求。设备的绝缘要求降低，实际就降低了高压电气设备的造价。所以110 kV及以上的超高压系统，一般采取中性点直接接地的方式。

中性点直接接地系统的缺点如下：

单相接地时，短路电流值很大，故障被切除前将引起电压降低，会影响系统的稳定。另外，由于强大的短路电流，通电导体周围形成较强的单相磁场，使邻近的电子设备受到干扰，例如，城轨交通的信号和通信设备。因此，在大容量的电力系统中，为了减小单相短路电流，也有采用中性点经电抗器接地的（这样可限制单相短路电流值，不过却损失了部分零序保护的灵敏度）。

在发生单相接地时，由于必须断开故障线路，用户供电不得不中断。为了克服这一缺点、提高供电的可靠性，在易发生瞬时性单相接地故障的中性点直接接地系统中，通常装设了自动重合闸装置（ZCH）。故障发生时保护装置使断路器自动断开，经一定延时后再自动重合，若故障消除，用户供电即可得到恢复。如果单相接地为永久性的，则继电保护将再次断开断路器，这样供电设备还要遭受二次故障电流的损害。对于重要的一类负荷，为保证不间断供电，则应另装设备用电源。

4．变压器中性点接地系统的优、缺点

优点：对中性点接地系统，若发生单相接地，另两相电压不升高，这样可使整个系统绝缘水平降低；另外，单相接地会产生较大的短路电流，从而使保护装置（继电器、熔断器等）迅速准确地动作，提高了保护的可靠性。

缺点：对中性点接地系统，由于单相短路电流很大，开关及电气设备等要选择较大容量，并且还会造成系统不稳定和干扰通信线路等。

5．各种电压等级供电线路的接地方式

在110 kV及以上的高压或超高压系统中，一般采用中性点直接接地系统，其目的是为了

降低电气设备的绝缘水平，提高继电保护的灵敏性，免除由于单相接地后继续运行而形成的不对称性。

工厂供电系统采用电压为 10～35 kV，一般为中性点不接地系统，因工厂供电距离短，对地电容小，单相接地电流小，这样允许运行一段时间，提高了系统的稳定性和供电的可靠性，对通信干扰小等。

1 kV 以下的供电系统（380 V/220 V），除某些特殊情况下（井下、游泳池），绝大部分是中性点接地系统，主要是为了防止绝缘损坏而遭受触电的危险。

二、城市轨道交通供电系统

城市轨道交通供电系统是轨道交通的重要组成部分，没有城市轨道交通供电系统的可靠安全供电，就不可能有城市轨道交通的正常运行。城市轨道交通供电系统由主变电所、牵引变电所、降压变所、馈电线路、接触网、走行轨、回流线、迷流防护系统等部分组成。其中，主变电所把从城市电网 110 kV 电源引入的三相高压交流电降压配送给轨道交通沿线的牵引变电所和降压变电所。牵引变电所是将交流电经降压整流后换成适合于电动列车使用的直流电。直流馈电线路是将牵引变电所的直流电输送到接触网上。接触网是沿电动列车行驶轨迹架设的特殊供电设备，电动列车通过其受电器(集电器)与接触网的直接接触而获得电能。走行轨是作为牵引供电回路的一部分，回流线是将轨道回流引向牵引变电所。迷流防护系统是将经轨道流入大地的杂散电流通过迷流网收集起来，通过排流柜及其电缆将迷流送回整流器的负端，保护地下或地面建筑物的结构钢筋不被腐蚀。

（一）特点及要求

1．供电的可靠性和安全性

城市轨道交通供电不同于一般工业、企业供电和民用供电，它主要是为运送乘客的电动列车提供持续的电能，这些电动列车往往处于交通线路沿线的不同线段、不同运行状态之中，有高架、地面、地下；有上坡、下坡；还有牵引 (包括启动状态)、滑行、制动(包括电气再生制动)等。列车的运行工况比较复杂，对供电的质量和可靠性要求高。因此，城市轨道交通需要一个稳定而又经济合理的城市轨道交通供电系统。

此外，城市轨道交通供电系统还要对为乘客运营服务的辅助设施进行供电。这些设施包括照明、自动扶梯、通信、信号、通风、给排水、防灾报警、自动售检票机等。城市轨道交通供电是城市电网中的重要用户。大量的人群滞留在车站和列车上的时间长短不一，交通供电的中断不仅会造成交通运输的全线瘫痪，而且可能导致生命和财产的重大损失。因此，城市轨道交通供电系统必须具备高度的可靠性和安全性。

2．供电负荷多样性

供电负荷主要包括：供电系统中各级变配电设备的本身既有损耗、电动列车的负荷、车站用户的负荷、车辆段维修负荷、车站商业用电等。

一般来说客运高峰时是供电的负荷高峰；客运低谷时是供电的负荷低谷。城市轨道交通供电必须满足这些负荷的变化，才能保证整个城市轨道交通运营的正常状态。

3．供电系统运行的经济性

城市轨道交通是城市电网的一个耗能大户，必须实行经济运行。城市轨道交通供电系统经济运行的基本原则是：在保证电力系统安全可靠运行和电能质量符合标准的前提下，尽量降低总电能的损耗量，提高电能的使用效率。这就对整个电力系统中的耗电设备从设计、选型到运行和管理提出了更高的要求。对运行中的变配电设备，要降低损耗，首先必须从合理安排系统运行方式入手，因为这些措施不需要增加投资，而且在降低损耗的技术措施中是最合理和最经济的。通过适当调整各级电网的运行电压，合理组织变压器的经济运行，调整用户的负荷曲线，安排好设备检修计划等措施来加强系统的运行管理，才能实现系统的经济运行，从而达到降低系统损耗的目的。

所以要想实现系统的经济运行，就必须把握负荷的变化情况，及时调整运行方式。要想保证用户的电压稳定在额定值附近，就必须了解系统无功的变化情况，平衡系统的无功负荷，合理调整主变压器的分接头开关的位置。这就需要供电系统能满足经济运行的要求。

（二）城市轨道交通系统的供电方式

1．系统电源供电方式

城市轨道供电系统有分散式和集中式两种不同类型的供电方式，城市轨道供电系统多是采用设置主变电所的集中供电方式。

2．城市轨道牵引系统的电力制式

城市轨道牵引系统的电力制式按接触网的电流制有直流制和交流制两种。直流制是将高压、三相交流电源经牵引变电所降压和整流后，向接触网提供直流电。交流制是将高压、三相交流电源在变电所降压后，向接触网提供交流电。我国电气化铁路的牵引供电制式就采用单相工频（50 Hz）25 kV 交流制。

然而，城市轨道交通牵引供电制式和电气化铁路有很大的不同，电气化铁路站点间距长，周围空间环境宽阔，绝缘安全距离大，可选用较高的牵引电压，而城轨交通站点间距短，周围环境狭窄，绝缘安全距离小，牵引电压不能选得很高，但考虑到电压损失，牵引电压又不能太低，所以采用直流供电较为妥当。因为直流电不产生电抗压降，在相同的电压等级下，在电压损失方面直流供电优于交流供电，且结构简单。因此城市轨道交通几乎都采用直流供

电制式。世界各国城市在不同的历史发展时期采用的交通模式不同，采用的直流供电电压等级较多，主要集中在 550～1 500 V。

3．城市轨道交通供电系统的电压指标

110 kV 为额定电压的 - 3%～ + 7%；

35 kV（33 kV）为额定电压的±5%；

10 kV 及以下为额定电压的±7%；

0.4 kV 为额定电压的+5%～ - 10%；

DC 750 V 为额定电压的 - 33%～ + 20%。