

# 项目一 牵引供电系统认知

## 【项目描述】

牵引供电系统负责为电力机车提供牵引电能，作为供电系统，其供电电压等级、电流制式及供电方式等均与通常的电力系统有很大的差别。牵引供电系统采用不同的供电方式时，其性能特点亦有很大的不同。要识别牵引供电系统供电方式，首先需要了解并认识电力系统。广义理解，电力系统是牵引供电系统的电源，牵引供电系统是电力系统的用户。在此基础上认识牵引供电系统的组成与牵引供电系统的供电方式，掌握不同供电方式的特点。通过应用这些知识，学会分析牵引供电系统运行的一些实际问题。

## 任务一 电力系统认知

### 【任务目标】

#### 一、知识目标

- (1) 了解电力系统的组成。
- (2) 熟悉发电厂、电力网、变电所等的相关基础知识。
- (3) 熟悉电力系统中性点的运行方式。

#### 二、能力目标

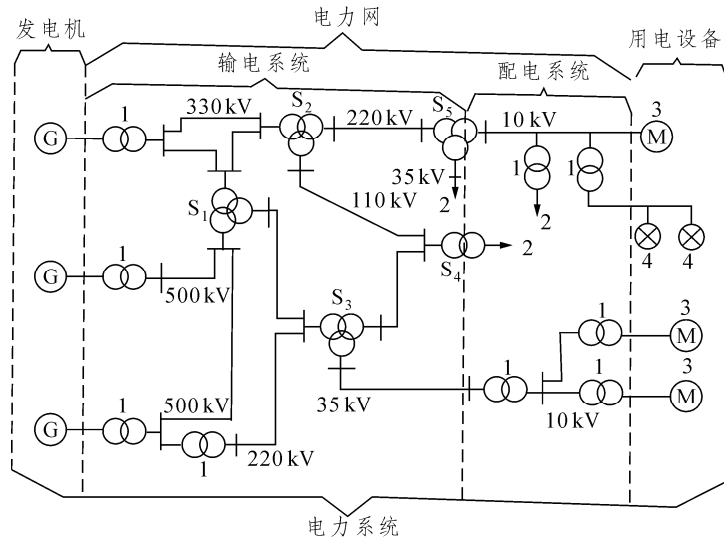
- (1) 会看电力系统图。
- (2) 会分析 3 种常见的电力系统中性点的运行方式。

### 【知识储备】

通过本任务的学习，使学生学会分析电力系统图，明白电力负荷的分级以及 3 种常见的电力系统中性点的运行方式。

#### 一、电力系统的组成

电力系统是由发电、输电、变电、配电和用电等设施所构成的整体。电力系统的示意图如图 1-1 所示。



1—变压器；2—负荷；3—电动机；4—电灯。

图 1-1 电力系统示意图

### (一) 发电

在电力系统中，发电厂是产生电能的场所，它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、核电厂等，此外还有地热电厂、风力电厂、潮汐海洋电厂等。

发电机一般采用三相同步发电机，电压多为 10.5 kV。每台发电机都有相应的升压变压器，组成发电机-变压器组。

### (二) 电力网

电力网简称电网，按其功能常分为输电网和配电网。

#### 1. 输电网

输电网是由 110 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。

#### 2. 配电网

配电网是由 35 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，电网按其规模主要分为地区电网和区域电网。其作用是将电能分配并短距离输送到各类用户。

地区电网多限于一个地区或一个省，电压等级为 110 ~ 220 kV；区域电网由几个地区或几个省联合而成，电压等级为 330 ~ 500 kV。输电线电压与输送距离、容量的关系如表 1-1 所示。

表 1-1 各级电压的输送容量及距离

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
0.38	0.1	0.6 以下	110	10 ~ 50	50 ~ 150
6	0.1 ~ 0.2	0.6 ~ 15	220	100 ~ 500	100 ~ 300
10	0.2 ~ 2.0	6 ~ 20	330	200 ~ 800	200 ~ 600
35	2.0 ~ 1.0	20 ~ 50	500	1 000 ~ 1 500	200 ~ 850

用电设备的额定电压就是输电线路的额定电压，输电线路的额定电压实际上是指线路末端的额定电压，而线路首端的额定电压要比线路的额定电压高 10%。

### (三) 变电所(站)和配电(站)

变电所(站)的作用是变换和调整电压、分配电能。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)。按变电所(站)在电力系统中的地位和作用，一般分为以下 3 种。

#### 1. 枢纽变电所(站)

它通常有两个及以上的电源汇集，进行电能的分配和交换，从而形成电能的枢纽，如图 1-1 中的  $S_1$ 、 $S_2$ 。枢纽变电所规模较大，并采用三绕组变压器以获得不同等级的电压，送到不同距离的地区。

#### 2. 区域变电所(站)

其作用是供给一个地区用电，如图 1-1 中的  $S_3$ 。区域变电所(站)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(站)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 1-1 中的  $S_4$ 、 $S_5$ 。电气化铁路牵引变电所就属于用户变电所。

## 二、电能的质量指标

衡量电能质量的主要指标是电压质量和频率质量。

### (一) 电压质量

#### 1. 电压偏差

电压偏差是指用电设备的实际工作电压与额定电压的差值，通常用百分数表示，见式(1-1)

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

国家标准规定的供电电压允许偏差标准如下：

(1) 线路额定电压  $U_N$  为 10 kV 及以下，电压允许偏差为  $\pm 7\%$ ；

(2) 线路额定电压  $U_N$  为 35 kV 及以上, 电压允许偏差为  $\pm 5\%$ ;

(3) 线路额定电压  $U_N$  为 220 kV, 电压允许偏差为  $-10\% \sim +7\%$ 。

当电力系统的电压偏差超过规定的范围时, 对用电设备的危害很大。对于照明用的灯泡, 当电压低于其额定值时, 发光效率将降低; 当电压高于额定值时, 发光效率虽然增加, 但灯泡的寿命将大大缩短。对于电动机, 当电压降低时, 转矩急剧下降, 造成启动困难; 运行中的电流增大, 使绕组温升增高, 加速绝缘老化, 甚至烧毁电动机。对于输电线路, 当输送功率一定时, 由于电压降低, 则电流增大, 导致电能损失增加。

## 2. 电压波动

电压波动是指急剧的电压变化, 通常用电压有效值的最大值与最小值的差值表示, 一般写成百分数的形式, 如式 (1-2) 所示。

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

## 3. 三相电压的不对称性和波形的非正弦性

在电力系统的用电负荷中, 有很大一部分是冲击性负荷、整流性负荷, 以及容量很大的单相负荷 (如轧钢机、电力机车等), 它们不但引起电压的偏差和波动, 而且造成三相电压不对称和电压波形畸变, 直接影响电气设备的正常工作。

## (二) 频率质量

国家规定电力系统的额定频率为 50 Hz, 允许偏差不得超过  $\pm 0.5$  Hz; 容量大于 3 000 MW 的用户, 允许偏差不得超过  $\pm 0.2$  Hz。

频率的变化对电力系统运行的稳定性影响很大。当系统低频率运行时, 将会导致汽轮发电机低压级叶片振动加大而产生裂纹甚至折断; 用户的电动机转速将下降, 影响企业的产品质量和数量; 引起计算机计算错误和控制混乱。

## 三、电力负荷的分级

电力用户是将电能转换为其他能量消耗掉。根据用户对供电连续性的不同要求, 一般将电力负荷分为三级。

一级负荷: 重要负荷。这类负荷的供电中断, 将给国计民生造成重大损失。故一级负荷要求有独立的双回路电源供电。电力牵引用户就属于这类用户。

二级负荷: 一般负荷, 这类负荷供电中断将给国计民生造成较大损失, 这类负荷是否设备用电源, 视具体条件而定。一般情况下应保证供电。

三级负荷: 次要负荷, 不属于一、二级负荷的用户, 如附属性质的企业、车间, 非生产性用户等, 一般只设一回电源供电。

在标准《铁路电力牵引供电设计规范》中规定, 电力牵引为一级负荷, 牵引变电所应有两路电源供电, 当其中任一路发生故障时, 另一路应仍能正常供电。

## 四、电力系统中性点运行方式

电力系统中性点：电力系统三相交流发电机、变压器接成星形连接的绕组的公共点，称为电力系统中性点。

电力系统中性点运行方式：电力系统中性点与大地间的连接方式，称为电力系统中性点的运行方式。电力系统中性点运行方式主要有中性点不接地、中性点经消弧线圈接地和中性点直接接地 3 种，前两种又称为小电流接地系统，后一种又称为大电流接地系统。

### (一) 中性点不接地的三相电力系统

#### 1. 中性点不接地系统正常运行分析

如图 1-2 所示，在正常运行时，电力系统的中性点与地处于绝缘状态，电力系统的三相导线之间及各相导线与地之间，沿导线全长都存在分布电容。如果三相导线完全对称，则各相导线对地的分布电容是相等的，可用位于线路中央的集中电容  $C$  代替，即  $C_A = C_B = C_C = C$ ；而相间电容较小，故不予考虑。

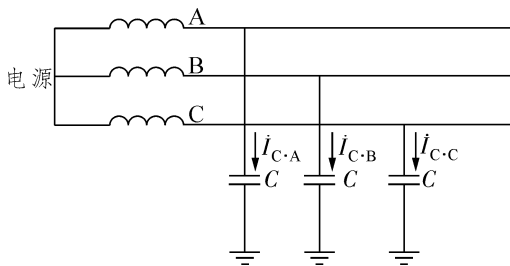


图 1-2 正常运行时中性点不接地的电力系统

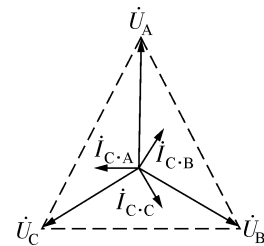


图 1-3 电容电流相量图

#### 1) 电压分析

电源三相相电压相量  $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$  是对称的，三相相电压数值相等： $U_A = U_B = U_C$ ，相位互差  $120^\circ$ （见图 1-3）。

线路各相对地电压均为相电压。

电源中性点对地电压  $U_N$  为零（电源中性点与地等电位）。

#### 2) 电流分析

(1) 线路三相对地电容电流相量  $\dot{I}_{C·A}$ 、 $\dot{I}_{C·B}$ 、 $\dot{I}_{C·C}$  是对称的，即

① 三相对地电容电流数值相等。

$$I_{C·A} = I_{C·B} = I_{C·C} = I_{C0}$$

$$I_{C0} = U_A / X_C = U_A \times 2\pi f C$$

② 相位互差  $120^\circ$ 。

(2) 线路三相对地电容电流  $\dot{I}_{C·A}$ 、 $\dot{I}_{C·B}$ 、 $\dot{I}_{C·C}$  的相量和为零，因此没有电流在地中流过。

由此可见，正常运行状态下的中性点不接地三相电力系统中，中性点电位为 0，三相集中电容的中性点电位也为 0。

## 2. 中性点不接地系统的单相接地故障

单相接地有两种方式：

- (1) 完全接地，即接地相接地电阻为零，也称为金属性接地。
- (2) 不完全接地，即接地相通过一定的阻抗接地。

当任何一相的绝缘受到破坏而接地时，各相的对地电压将发生改变，对地电容电流也将发生变化，中性点的电位不再为 0。为方便分析，我们假设：C 相发生金属性接地，接地电阻为零，如图 1-4 所示。

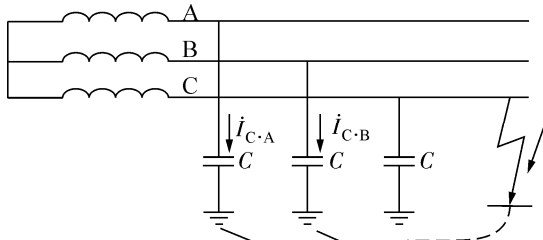


图 1-4 中性点不接地的 C 相接地三相电力系统原理图

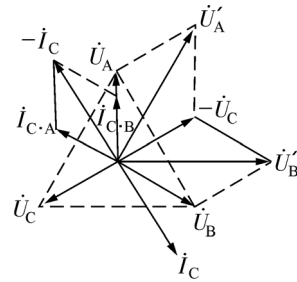


图 1-5 相量图

### 1) 电压分析

- (1) 接地故障相（C 相）对地电压降为零，即  $\dot{U}'_C = 0$ 。
- (2) 非故障相（A 相、B 相）对地电压由相电压升高为线电压，即

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A + (-\dot{U}_C) = \dot{U}_{\text{线}}$$

$$\dot{U}'_B = \dot{U}_B + (-\dot{U}_C) = \dot{U}_{\text{线}}$$

- (3) 中性点对地电压升高为相电压，即

$$\dot{U}'_N = -\dot{U}_C$$

- (4) 三相线电压仍保持对称，并且数值大小没变。

### 2) 电流分析

- (1) 接地故障相（C 相）对地电容被短接，C 相对地电容电流为零，即

$$\dot{I}'_{C-C} = 0$$

- (2) 非故障相（A 相、B 相）对地电容电流幅值增加  $\sqrt{3}$  倍，并且：

$$\dot{I}'_{C-A} \text{ 相位超前 } \dot{U}'_A \text{ } 90^\circ;$$

$$\dot{I}'_{C-B} \text{ 相位超前 } \dot{U}'_B \text{ } 90^\circ。$$

- (3) 非故障相（A 相、B 相）对地电容电流之和  $I_C$  经大地、故障点、故障相（C 相）和电源构成回路（从电源 C 相绕组流入，又分别从 A、B 相绕组流出）。

$$\dot{I}_C = -(\dot{I}'_{C-A} + \dot{I}'_{C-B}) \text{ (相量)}$$

$$I_C = \sqrt{3}I'_{C-A} = \sqrt{3} \times \sqrt{3}I_{C-A} = 3I_{C-A} = 3I_{C0} \text{ (数值)}$$

$\dot{I}_C$  在相位上正好超前 C 相电压  $\dot{U}_C$   $90^\circ$ ； $\dot{I}_C$  数值大小为正常运行时每相对地电容电流的 3 倍。

当发生单相金属性接地时，三个线电压仍保持对称关系，所以对接在线电压上的电力用户并没有什么影响。因为这种系统的各种设备的绝缘是按线电压考虑的，所以发生单相接地、相电压升高为线电压时，设备仍然可以继续运行。

在三相电力系统中发生非金属性接地（经接地阻抗接地）时，接地相的对地电压降大于0而小于相电压，非接地相对地电压将大于相电压而小于线电压，中性点的对地电压也介于零到相电压之间，三个相电压仍保持不变，接地电流比金属性接地时小。因此，在考虑设备和线路的绝缘水平时，一般都按单相金属性接地处理。

### 3) 中性点不接地系统单相接地故障时的特点

(1) 三相线电压保持对称，数值不变，负荷电流不会发生变化，所以当发生单相接地时，一般只动作于信号而不动作于跳闸，系统可以继续运行2h，向电力用户继续供电，因而提高了供电可靠性。

(2) 由于非故障相电压升高到线电压，所以电气设备和线路的对地绝缘应按能承受线电压设计，从而相应地增加了投资。

(3) 单相接地时所产生的接地电流将在故障处形成电弧。电弧的大小与接地电流成正比。

① 如果接地电流不大（5~10A以下），则电弧将在交流电流自然过零时自行熄灭，接地故障随之消失，电网即可恢复正常运行。

② 如果接地电流较大（30A以上），将形成稳定的电弧，造成持续性的电弧接地，强烈的高温电弧将会烧坏电弧附近的设备，并可能导致两相甚至三相短路（如三芯电缆中）。

③ 当接地电流大于10A而小于30A时，有可能形成一种周期性熄灭与复燃的间歇性电弧，这是由于电网中的电感和电容形成的振荡回路所致。间歇性电弧将会引起电网较严重的过电压，造成相对地电压升高，其幅值可达2.5~3倍的相电压，可能危及电网绝缘。

### 3. 中性点不接地系统的适用范围

电力网中的故障以单相接地为最多，而63kV及以下的电力网，由于单相接地电流不大，一般接地电弧均能自行熄灭，所以，这种电力网采用中性点不接地方式最为适宜。当发生单相接地时，一般只动作于信号而不动作于跳闸，系统可以继续运行2h，向电力用户继续供电。因而提高了供电可靠性。另外，中性点不接地系统的又一优点是单相接地电流较小，所以对临近的通信线路、信号系统的干扰也较小。因此，在干扰情况较严重的地区，即使对整个电网而言，不采用中性点不接地方式，但对局部地区也常按中性点不接地方式运行，以达到减少干扰程度的目的。电压等级较高的电力网，如果采用这种方式，则会使绝缘方面的投资增加（相对地按线电压绝缘）。同时，随着电压等级的提高，接地电流也相应增大，这也是不适宜的。此外由于单相接地电流较小，要实现灵敏而有选择性的接地继电保护也有困难。

通常只在电压为35~60kV，接地电流 $I_C \leq 10A$ 或电压为6~10kV，接地电流 $I_C \leq 30A$ 的电网中采用中性点不接地运行方式。

## (二) 中性点经消弧线圈接地系统

在3~63kV的电网中，当发生单相接地电流超过上述规定时，为了防止单相接地时产生稳定或间歇性电弧，应采取减小接地电流的措施。目前国内大多采用在中性点与地之间接入

消弧线圈的方式。

### 1. 消弧线圈

消弧线圈是一种带有不饱和铁心的电感线圈，电阻很小，感抗很大，铁心和线圈均浸在变压器油中。消弧线圈的外形和单相变压器相似，但其铁心的结构与一般变压器铁心的结构不同，消弧线圈铁心柱有很多间隙，间隙中填有绝缘纸板，如图 1-6 (a) 所示，可以避免磁饱和，减少高次谐波分量，使消弧线圈有一个稳定的电抗值，使消弧线圈的电流（补偿电流）与加在它上面的电压成线性关系。带有分接开关的消弧线圈如图 1-6 (b) 所示，它可以调整电感大小，以便达到调整补偿电流利于消弧的目的。

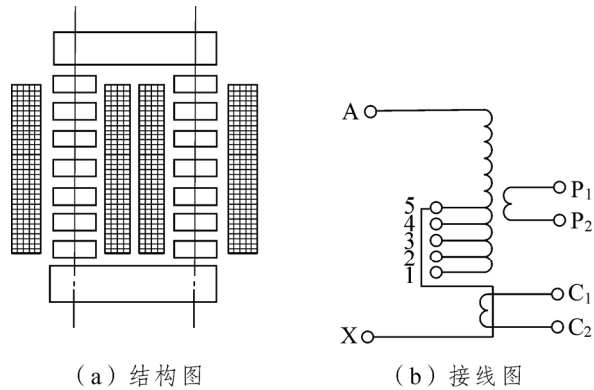


图 1-6 消弧线圈

### 2. 中性点经消弧线圈接地系统的正常运行（见图 1-7）

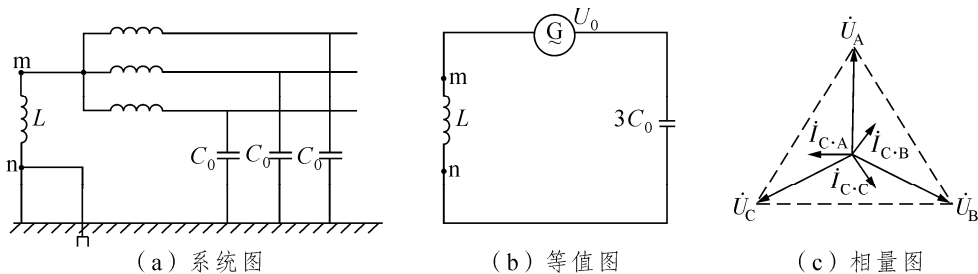


图 1-7 中性点经消弧线圈接地系统正常运行时

#### 1) 电压分析（与中性点不接地系统正常运行时相同）

(1) 电源三相相电压相量  $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$  是对称的，即幅值相等、相位互差  $120^\circ$ 。  
三相相电压数值相等：

$$U_A = U_B = U_C$$

(2) 线路各相对地电压均为相电压。

(3) 电源中性点对地电压  $\dot{U}_N$  为零（电源中性点与地等电位）。

#### 2) 电流分析（与中性点不接地系统正常运行时相同）

(1) 因为中性点对地电位为零，所以消弧线圈中没有电流流过。



(2) 线路三相对地电容电流相量  $\dot{I}_{C \cdot A}$ 、 $\dot{I}_{C \cdot B}$ 、 $\dot{I}_{C \cdot C}$  是对称的，即幅值相等、相位互差  $120^\circ$ 。三相对地电容电流数值相等：

$$I_{C \cdot A} = I_{C \cdot B} = I_{C \cdot C} = I_{C0}$$

$$I_{C0} = U_A / X_C = U_A \times 2\pi f C$$

(3) 线路三相对地电容电流  $\dot{I}_{C \cdot A}$ 、 $\dot{I}_{C \cdot B}$ 、 $\dot{I}_{C \cdot C}$  的相量和为零，因此没有电流在地中流过。

### 3. 中性点经消弧线圈接地的单相接地故障（见图 1-8）

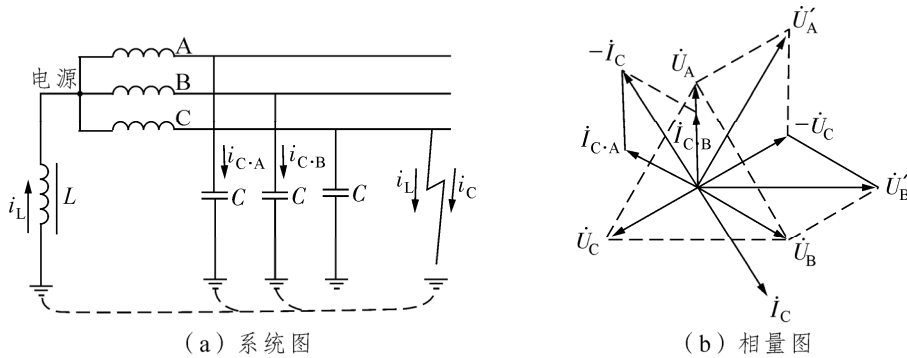


图 1-8 中性点经消弧线圈接地电力系统发生单相接地故障时

#### 1) 电压分析（与中性点不接地系统相同）

(1) 接地故障相（C 相）对地电压降为零，即

$$\dot{U}'_C = 0$$

(2) 非故障相（A 相、B 相）对地电压由相电压升高为线电压，即

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A + (-\dot{U}_C) = \dot{U}_{\text{线}}$$

$$\dot{U}'_B = \dot{U}_B + (-\dot{U}_C) = \dot{U}_{\text{线}}$$

(3) 中性点对地电压升高为相电压，即

$$\dot{U}'_N = -\dot{U}_C$$

(4) 三相线电压仍保持对称，并且数值大小不变。

#### 2) 电流分析

(1) 接地故障相（C 相）对地电容被短接，C 相对地电容电流为零，即

$$\dot{I}'_{C \cdot C} = 0$$

与中性点不接地系统发生单相接地相同。

(2) 非故障相（A 相、B 相）对地电容电流幅值增大，并且：

$$\dot{I}'_{C \cdot A} \text{ 相位超前 } \dot{U}'_A \text{ } 90^\circ$$

$$\dot{I}'_{C \cdot B} \text{ 相位超前 } \dot{U}'_B \text{ } 90^\circ$$

(3) 非故障相（A 相、B 相）对地电容电流之和  $I_C$  经大地、故障点、故障相（C 相）和

电源构成回路（从电源 C 相绕组流入，又分别从 A、B 相绕组流出）

$$\begin{aligned} \dot{I}_C &= -(\dot{I}_{C.A} + \dot{I}_{C.B}) \quad (\text{相量}) \\ I_C &= \sqrt{3}I'_{C.A} = 3I_{C.A} = 3I_{C0} \quad (\text{数值}) \\ I_{C0} &= U_A/X_C = U_A \times 2\pi fC \end{aligned}$$

$\dot{I}_C$  在相位上超前  $\dot{U}_C$   $90^\circ$ 。

$I_C$  数值大小为正常运行时每相对地电容电流  $I_{C0}$  的 3 倍。

(4) 消弧线圈中流过的电流  $I_L$  经大地、故障点、故障相（C 相）和电源构成回路。

$$I_L = U_C/X_L$$

$\dot{I}_L$  在相位上滞后  $\dot{U}_C$   $90^\circ$ ，正好与接地点电容电流  $\dot{I}_C$  相位相反。

(5) 接地点电流为  $\dot{I}_L$  与  $\dot{I}_C$  电流的相量和。

因为  $\dot{I}_L$  正好与接地点电容电流  $\dot{I}_C$  相位相反，所以  $\dot{I}_L$  与  $\dot{I}_C$  在接地点互相补偿，使接地点电流减小。

#### 4. 消弧线圈三种补偿方式

消弧线圈上的电流  $I_L$  为

$$I_L = \frac{U_C}{X_L} = \frac{U_C}{\omega L} \quad (1-3)$$

接地电容电流  $I_C$  为

$$I_C = 3\omega C U_C \quad (1-4)$$

补偿系数  $K$  定义为

$$K = \frac{\text{电容电流}}{\text{电感电流}} = \frac{I_C}{I_L} = \frac{3\omega C U_C}{\frac{U_C}{\omega L}} = 3\omega^2 LC \quad (1-5)$$

根据消弧线圈的电感电流对接地点电容电流补偿程度不同，有三种补偿方式：

##### 1) 全补偿

当  $K = 1$ ，即  $I_L = I_C$  时，通过接地点电流为零，称为全补偿方式，此时感抗等于容抗。

从消弧观点来看，全补偿最好，但在实际中并不采用全补偿方式。这是为了防止由于实际电网中性点电位偏移引起消弧线圈与线路对地电容的串联谐振，导致电网过电压，威胁电网绝缘。全补偿电网中，消弧线圈的感抗与线路三相对地容抗相等，若忽略电源及线路的感抗，且线路空载，从 mn 端向右看，利用戴维南定理可得到图 1-7 所示等效电路图。图中  $C_0$  是各相对地电容， $U_0$  是电源中性点对地电压，这正好是一个串联谐振电路。

正常运行的电网在理想情况下： $U_0 = 0$ 。

实际情况下：由于三相对地电容不完全相等，断路器三相触头不同时闭合，断路器出现一相断路等均会造成  $U_0 \neq 0$ 。当  $U_0 \neq 0$ （即中性点电位偏移）时，串联谐振将导致消弧线圈（或电容两端）出现过电压，即消弧线圈放大了中性点的电位偏移，这将造成三相对地电压长

期严重偏移，对设备绝缘不利，因而不允许的。

经消弧线圈接地系统，在正常运行情况下，中性点的长期位移电压不应超过额定相电压的 15%。

### 2) 欠补偿

当  $K > 1$ ，即  $I_L < I_C$  时，接地点还有未得到补偿的电容电流时，称为欠补偿，此时感抗大于容抗。

欠补偿方式也较少采用，为了防止在检修、事故切除部分线路或系统频率降低等情况下可能使系统接近或达到全补偿，以致出现串联谐振过电压。

### 3) 过补偿

当  $K < 1$ ，即  $I_L > I_C$  时，接地点的电容电流被电感电流全部抵消后，在接地点还有多余的电感电流时，称为过补偿方式，此时感抗小于容抗。

过补偿可避免谐振过电压的产生，因此得到广泛应用。

为了能可靠地熄灭电弧，过补偿接地处的电感电流也不能超过规定值。

## 5. 消弧线圈容量选择原则

整个补偿电网消弧线圈的总容量是根据电网的接地电容电流值选择的。选择原则：电网 5 年的发展远景及过补偿的要求。

$$Q_L = 1.35I_C \times U_{\text{相}}$$

为了适应系统运行方式的变化，消弧线圈设有分接头，用以调整线圈的匝数，改变电感值的大小，从而调节消弧线圈的补偿电流，以达到消弧的目的。

## 6. 中性点经消弧线圈接地系统的适用范围

凡单相接地电流较大，不符合中性点不接地要求的 3 ~ 35 kV 电网，均可采用中性点经消弧线圈接地方式。必要时 110 kV 电网也可采用，如雷害特别严重的电网。

电压等级更高的电网不宜采用。其原因因为中性点经消弧线圈接地方式将显著增加绝缘方面的费用。另外高压电网接地电流中由于损耗而存在较大的有功分量电流，而消弧线圈只能补偿无功分量，即使消弧线圈对接地电容电流全补偿，接地点仍然残存有功分量电流，电压等级愈高、线路愈长，其值愈大，以致电弧不能熄灭。

### (三) 中性点直接接地系统

随着电力系统的发展，输电电压不断提高，高压和超高压已被采用，中性点不接地或经消弧线圈接地的运行方式已不能满足电力系统正常、安全、经济运行的要求。这是因为，对于中性点不接地或经消弧圈接地的三相系统(二者统称为小电流接地系统)，当发生单相金属性接地故障时，除故障相电压变为零、中性点对地电压升高为相电压外，非故障相电压将升高到原来的  $\sqrt{3}$  倍而变成线电压。这样，电网电压越高，则电网的绝缘水平要求越高，大大增加了电气设备和线路的造价。为此，在高压和超高压系统中不能采用中性点不接地或经消弧线圈接地的运行方式，而是采用中性点直接接地的运行方式。

防止中性点电位变化及其电压升高和防止系统发生单相接地时不能自动熄弧的根本办法

是将中性点直接接地，如图 1-9 所示。

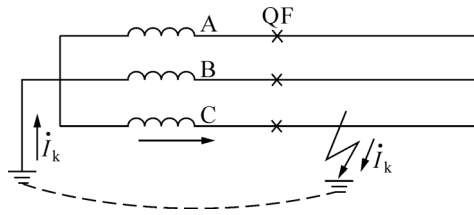


图 1-9 中性点直接接地的三相电力系统

### 1. 中性点直接接地的三相电力系统单相接地时

#### 1) 电压分析

发生单相接地故障时，故障相对地电压为零，非故障相对地电压维持相电压，不会升高。因此，中性点直接接地系统中供电设备的相绝缘只需按相电压来考虑，具有显著的经济技术价值。

高压电器，特别是超高压电器，其绝缘问题是影响电器设计制造的关键。电器绝缘要求的降低，直接降低了电器的造价，同时改善了电器性能。

#### 2) 电流分析

系统发生单相接地时即形成单相接地短路。单相短路电流  $i_k$  比线路正常负荷电流大得多，对系统危害很大。因此，这时系统中装设的短路保护装置立即动作，切断线路，切除接地故障部分。系统其他部分仍能正常运行。

### 2. 提高可靠性的方法

由于发生单相接地时会切断供电，将影响供电的可靠性，为了弥补这个缺点，在线路上广泛采用自动重合闸装置。对极重要的用户，为保证不中断供电，则应另外安装备用电源。

运行中为了限制单相接地短路电流，并不将系统中所有的中性点接地，而是由系统调度确定中性点接地的数量。每个电源通常有一个或几个中性点接地。

由于单相接地短路电流很大，会引起电压降低，以致影响系统的稳定。从提高电力系统稳定性的角度考虑，也可以在线路的升压和降压变压器中性点经一个小阻抗（小电阻或小电抗）接地。

目前，我国大部分的 110 kV 电力系统以及 220 kV、330 kV、500 kV 电力系统，都采用中性点直接接地的运行方式。

## 任务二 牵引供电系统认知

### 【任务目标】

#### 一、知识目标

- (1) 熟悉牵引供电系统的电流制。
- (2) 熟悉牵引供电系统的组成。

## 二、能力目标

- (1) 会分析 3 种常见电流值的特点及应用情况。
- (2) 会分析牵引供电系统的组成。

## 【知识储备】

通过本任务的学习,使学生清楚电气化铁路 3 种电流制的应用情况及牵引供电系统的组成。

### 一、牵引供电系统的电流制

牵引供电系统的电流制是指牵引供电系统中牵引网的供电电流种类。电气化铁路供电采用何种电流制,关系到许多重大技术问题和铁路运输的经济效益,是每个采用电气化铁路的国家首先要考虑的问题。目前主要有以下 3 种电流制。

#### (一) 直流制

牵引网的供电电流为直流时,称为直流制。电力系统将三相交流电送到牵引变电所,经降压、整流变成直流电,再通过牵引网供给电力机车使用。

直流制发展最早,目前有些国家的电气化铁路仍在应用,我国仅城市地下铁道、城市轻轨、城市电车、工厂矿山采用。

直流制的供电电压有 600 V、750 V、1 200 V、1 500 V、3 000 V 等几种,城市电车一般为 600 V,地下铁道和城市轻轨一般为 750 V 或 1 500 V,矿山运输一般为 1 500 V。

直流制的主要问题是直流牵引电动机额定电压受到换向条件的限制不能太高,因此供电电压较低,而要保证电力机车足够的功率,供电电流就比较大。由于电流较大,需要导线的截面大,金属消耗增加,线路损耗也大,所以牵引变电所之间的距离较短,一般只有 20 ~ 30 km,变电所的数量相应增加,并且为完成整流任务而变得较复杂。

由于这些缘故,许多国家已逐渐停止发展直流制电气化铁路。对于工矿企业、城市电车、地铁和轻轨供电,由于距离较近,对供电的安全性要求较高,所以采用电压较低的直流制供电更具有优越性。

#### (二) 低频单相交流制

牵引网的供电电流为低频单相交流时,称为低频单相交流制。牵引网的供电电流频率为 16.67 Hz,供电电压为 11 ~ 15 kV,电力机车采用交流整流子式牵引电动机。

与直流制比较,低频单相交流制的主要优点是供电电压提高,从而供电电流较小,导线截面减小,牵引变电所之间的距离可相应增加到 50 ~ 70 km。

低频单相交流制是继直流制之后出现的,目前在一些欧洲国家仍在应用。美国采用

25 Hz、11 kV 的低频单相交流制。这些国家之所以采用低频，是因为当时这些国家有低频的工业电力，并且低频的整流相对容易，低频交流的电抗也较工频小。当电力工业采用 50 Hz 的标准频率后，低频单相交流制的发展就受到了限制。

### (三) 工频单相交流制

工频单相交流制最早出现在匈牙利，电压为 16 kV。1950 年，法国试建了一条 25 kV 的工频单相交流电气化铁路。由于这种电流制的优越性比较明显，很快被许多国家所采用。我国电气化铁路从建设之初，就采用了这种电流制。

工频单相交流制的主要优点：

(1) 牵引供电系统结构简单。牵引变电所从电力系统获得电能，经过降压后直接供给牵引网，不需要在变电所设置整流和变频设备，使变电所结构大为简化。

(2) 供电电压提高。既可保证大功率电力机车的供电，提高电力机车的牵引定数和运行速度，又可使牵引变电所之间的距离延长，导线截面减小，建设投资和运营费用显著降低。

(3) 交流电力机车的黏着性能和牵引性能良好。通过电力机车上变压器的调压，牵引电动机可以在全并联状态下工作，防止轮对空转，从而提高了运用黏着系数。

(4) 交流制的地中电流对地下金属的腐蚀作用小，一般可不设专门的防护装置。

工频单相交流制存在的主要问题：

(1) 单相牵引负荷在电力系统中形成负序电流。

(2) 牵引负荷是感性的，功率因数低。

(3) 牵引电流为非正弦波，含有丰富的谐波电流。

(4) 牵引网中的工频单相电流会对沿线通信线路造成较大的电磁干扰。

如无特别说明，本教材所讨论的都是工频单相交流制的牵引供电系统。

## 二、牵引供电系统的构成

牵引供电系统是由牵引变电所和牵引网构成的，接受电力系统电能，向电力机车供电的一个系统，如图 1-10 所示。

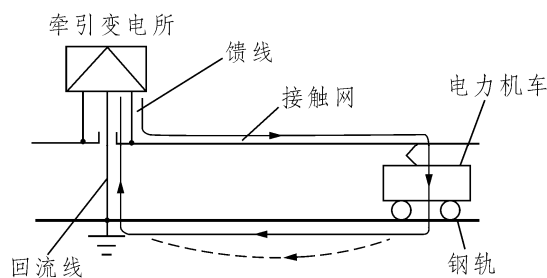


图 1-10 牵引供电系统

牵引供电系统的作用是将三相高压电经牵引变电所降压、分相后，通过牵引网供电力机

车使用。

电力系统输电线一般分为两路，电压为 110 kV。近年来也有采用 220 kV 的（哈大线），相比之下，后者电源的可靠性和稳定性等技术指标相对更高。电力系统和牵引供电系统以牵引变电所进线门形架为分界点。

### （一）牵引变电所

牵引变电所沿电气化铁路分布。每一个牵引变电所负责两侧接触网的供电。牵引变电所的左、右两侧接触网称为供电臂或供电分区，一个供电臂的长度对应线路的区间数为 1~5 个。

牵引变电所的作用是降压和分相。它将电力系统的三相高压电转换成两个单相电，通过馈电线分别供给两侧的接触网。

牵引变电所的主要设备是牵引变压器（又称主变压器）。牵引变压器的额定电压，原边为 110 kV（或 220 kV）；次边为 27.5 kV，比接触网额定电压 25 kV 高 10%；AT 供电方式的牵引变压器次边额定电压为 55 kV 或  $2 \times 27.5$  kV。牵引变电所中通常设置两台结构和接线完全相同的牵引变压器，一台运行，一台备用。

### （二）牵引网

牵引网由馈电线、接触网、钢轨和大地、回流线等组成。

馈电线是连接牵引变电所牵引母线和接触网的架空线。馈电线除直接向接触网送电外，还要向附近车站机务折返段、开闭所等送电，所以馈电线的数目较多，距离也可能较长。

接触网是牵引网的主体，由于接触网分布广、结构复杂、运行条件差，所以不仅日常维修工作量大，故障也较多，对牵引供电的可靠性影响极大。

流过电力机车的负荷电流经钢轨和大地、回流线回到牵引变电所。由于钢轨与地不绝缘，所以部分电流沿大地返回，形成地中电流。

### （三）分区所

为了提高供电的灵活性和可靠性，在两个相邻牵引变电所的接触网末端通常设置分区所。

分区所可以使单线区段相邻牵引变电所的相邻两接触网实行单边供电或双边供电，也可使复线区段牵引变电所的上、下行接触网实行分开供电或并联供电。当相邻牵引变电所发生故障而不能继续供电时，可以闭合分区所内的断路器，由非故障牵引变电所实行越区供电。

## 任务三 牵引变电所外部电源供电方式认知

### 【任务目标】

#### 一、知识目标

熟悉一边供电、两边供电及环形供电的外部电源供电方式。

#### 二、能力目标