

# 第一章 电力牵引供电系统综述

## 第一节 电力牵引的制式

电力牵引用于轨道交通系统已有 100 多年的历史，随着经济和科学技术的不断发展，用于轨道交通的电力牵引方式有许多不同的制式出现。这里所说的制式是指供电系统向电动车辆或电力机车供电所采用的电流和电压制式，如直流制或交流制、电压等级、交流制中的频率（工频或低频）以及交流制中是单相或三相。

为了便于理解电力牵引制式的变化和发展原因，首先介绍一下对牵引列车的电动车辆或电力机车特性的基本要求：

### 一、起动加速性能

要求起动加速力大而且平稳，即恒定的大的起动力矩，便于列车快速平稳起动。

### 二、动力设备容量利用

对列车的主要动力设备——牵引电动机的基本性能要求为，列车轻载时，运行速度可以高一些，而列车重载时运行速度可以低一些。这样无论列车重载或轻载都可以达到牵引电动机容量的充分利用，因为列车的牵引力与运行速度的乘积为其功率容量，这时近于常数。

### 三、调速性能

列车运输，特别是旅客运输，要求有不同的运行速度，即调速。在调速过程中既要达到变速，还要尽可能经济，不要有太大的能量损耗，同时还希望容易实现调速。

了解了以上对列车牵引的基本特性要求以后，不难看出，直流串激电动机的性能是很符合这个要求的，即其机械特性（转矩与转速的关系特性）正符合重载时速度低，轻载时速度高的要求。更形象一点说它具有牛马特性，牛可以拉得多一些，但跑得慢，马跑得快，但力气小，拉得少一些。

此外，从直流串激电动机的起动和调速方法看，也是比较容易实现的。为了限制直流串激电动机刚接通电源时起动电流太大和正常运行时为了降速而降低其端电压，最早采用在电动机回路中串联大功率电阻的方法来达到限流和降压的目的。这种方法实现是容易的，但在起动和调速过程中却带来了大量的能量损耗，很不经济。尽管如此，由于局限于一定时期的技术发展水平，采用直流串激电动机作为牵引动力就成为最早也是迄今为止被长期应用的形式，这就是供电系统直接以直流电向电动车辆或电力机车供电的电力牵引“直流制式”。

随着矿山和干线电力牵引的发展，列车需要的功率愈来愈大，如果采用直流供电制式，则因受直流串激电动机（牵引电动机）端电压不能太高的限制，会导致供电电流很大，因而供电系统的电压损失和能量损耗必然增大。因此出现了“低频单相交流制”。

低频单相交流制是交流供电方式，交流电可以通过变压器升降压，因此可以升高供电系统的电压，到了列车以后再经车上的变压器将电压降低到适合牵引电动机应用的电压等级。由于早期整流技术的关系，这种制式采用的牵引电动机在原理上与直流串激电动机相似的单相交流整流子电动机。这种电动机存在着整流换向问题，其困难程度随电源频率的升高而增大，因此采用了“低频”单相交流制，它的供电频率和电压有 25 Hz、6.5~11 kV 和  $16\frac{2}{3}$  Hz、12~15 kV 等类型。由于用了低频电源使供电系统复杂化，需由专用低频电厂供电，或由变频电站将国家统一工频电源转变成低频电源再送出，因此没有得到广泛应用，只在少量国家的工矿或干线上应用。

由于低频单相交流制存在以上缺点，长期以来人们一直在寻求一种更理想的牵引供电方式，这就是“工频单相交流制”。这种制式既保留了交流制可以升高供电电压的长处，又仍旧采用直流串激电动机作为牵引电动机的优点，在电力机车上装设降压变压器和大功率整流设备，它们将高压电源降压，再整流成适合直流牵引电动机应用的低压直流电，电动机的调压调速可以通过改变降压变压器的抽头或可控制整流装置电压来达到。工频单相交流制是当前世界各国干线电气化铁路应用较普遍的牵引供电制式。我国干线电气化铁路即采用这种制式，其供电电压为 25 kV。

在牵引制的发展过程中曾出现过“三相交流制”的形式，但由于供电网比较复杂，必须要有两根（两相）架空接触线和走行轨道构成三相交流电路，两根架空接触线之间又要高压绝缘，造成的困难和投资更大，因此被淘汰。

关于直流制式的电压等级应用情况大致如下：干线电气化铁路的供电电压有 3 kV 的，电压没有再提高是因为受到直流牵引电动机端电压的限制，其值一般为 1.5 kV 左右，用 3 kV 供电，一般就需要将两台电动机串联联接，再提高供电电压其联接就更复杂，还涉及当时整流装置绝缘水平的问题。这种制式在原苏联和东欧一些国家应用最普遍。

供电电压为 1.2~1.5 kV 的直流制多用于工矿和部分国家的干线电力牵引，如日本等国家。

城市轨道交通几乎毫无例外地都采用直流供电制式，这是因为城市轨道交通的列车功率并不是很大，其供电半径（范围）也不大，因此供电电压不需要太高，还由于直流制比交流制的电压损失小（同样电压等级下），因为没有电抗压降。另外由于城市内的轨道交通，供电线路都处在城市建筑群之间，供电电压不宜太高，以确保安全。基于以上原因，世界各国城市轨道交通的供电电压都在直流 550~1500 V 之间，但其档级很多，这是由各种不同交通形式，不同发展历史时期造成的。现在国际电工委员会拟定的电压标准为：600 V、750 V 和 1500 V 三种。后两种

为推荐值。我国国标也规定为 750 V 和 1500 V，不推荐现有的 600 V。

我国北京地铁采用的是 750 V 直流供电电压，上海地铁采用的是 1500 V 直流供电电压。目前我国许多大城市都在考虑建造快速轨道交通线路，选择 750 V 或者 1500 V 供电电压就成为一个重大问题，它涉及到供电系统的技术经济指标、供电质量、运输的客流密度、供电距离和车辆选型等等，必须根据各城市的具体条件和要求，综合论证决定。

最后还必须说明，由于大功率半导体整流元件（晶闸管）的出现，在直流制电动车辆上，采用以晶闸管为主体的快速电子开关（斩波器），可对直流串激牵引电动机进行调压调速，消除了用串联电阻起动和降压调速的不经济方法。这种方法给直流制增添了新的生命力。

另外还由于快速晶闸管的出现，近年来发展由快速晶闸管等组成逆变器，它不但将直流电逆变成交流电，而且频率可以调节，这样就解决了多年来想采用结构简单、结实的鼠笼式异步电动机作为牵引电动机的愿望，用变频率改变异步电动机速度的方法（简称变频调速），使异步牵引电动机性能满足牵引列车特点的要求。这种方法在国外无论在城市轨道交通还是在工矿和干线电牵引车辆上都应用较多。上海市地铁二号线的电动车辆也将采用这种形式。不过，尽管电动车辆上采用的是交流异步牵引电动机，其架线供电电压还是直流的，所以还属于直流制式的范畴，这就给直流制的应用打开一个更宽广的天地，使它更有生命力。

## 第二节 电力牵引供电系统的组成

我国和大多数国家一样，电力生产由国家经营管理，因此无论是干线电气化铁路，还是工矿电力牵引和城市轨道交通电力牵引用电均由国家统一电网供给。

为了说明电力牵引供电系统各个组成部分的关系和作用，下

面以城市轨道交通直流电力牵引供电系统为例，用示意图 1-1 表示之。

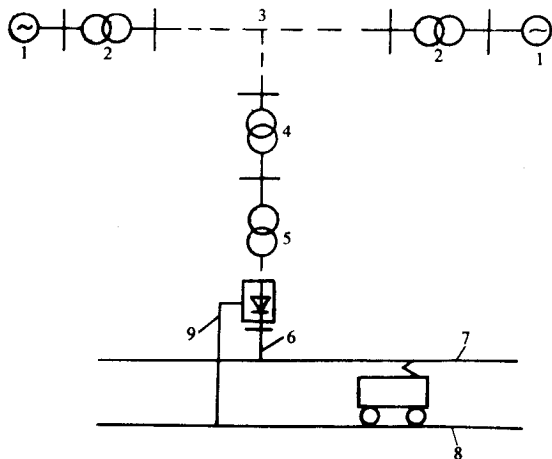


图 1-1 城市轨道交通电力牵引供电系统

1——发电厂(站)；2——升压变压器；3——电力网；4——主  
降压变电站；5——直流牵引变电所；6——馈电线；7——接触  
网；8——走行轨道；9——回流线。

生产电能的发电厂(站)由于它所利用的能源的不同，可以分为火力发电厂(用煤、油为燃料)、水力发电厂、原子能发电厂以及风力、地热、太阳能和潮汐发电厂等等。电厂可能与其用户相距甚远，为了能得到经济输电，必须将输电电压升高，以减少线路的电压损失和能量损耗，因此在发电厂的输出端接入升压变压器以提高输电电压。目前我国用得最普遍的输电电压等级为 110~220 kV。

通常国家供电系统总是把在同一个区域(或大区)的许多发电厂通过高压输电线和变电所联结起来成为一个大的统一的供电系统，向该区域的负荷供电，这样由各级电压输电线将发电厂、变电所和电力用户联结起来的一个发电、输电、变电、配电和用户

的统一体被称为电力系统。组成统一的电力系统有如下的一些优越性。

1. 可以充分利用动力资源。火力发电厂发出多少电能就需要相应地消耗多少燃料，而其他的某些类型发电厂，它能发出多少电能取决于当时该发电厂的动力资源情况，如水电站的水位高低，它随自然条件的变化而变化，因此，组成统一的电力系统以后，在任何时候，可以动态地调整各种动力资源，以求其发挥最大效益。

2. 减少燃料运输，降低发电成本。大容量火力发电厂所消耗的燃料是很可观的，如果不用高压远距离输电，则发电厂必然要建在负荷中心附近而不能建在燃料资源的生产地，这样就要大量运输燃料，造成发电成本升高。采用高压输电电力系统以后就可以解决以上问题，将发电厂建在动力资源丰富的地方。

3. 提高供电的可靠性。由于供电区域内的负荷是由多个发电厂组成的电力系统共同供电的，这样与单个发电厂独立向自己的负荷供电比较起来，对负荷的供电可靠性就可以提高很多，因为系统内发电厂之间可以起到互为后备的作用。与此同时，整个系统的发电设备容量也可以减少很多，降低了设备的投资费用。

4. 提高发电效率。没有组成电力系统之前，每个发电厂的容量是按照它的供电负荷大小来设计选择的，如果该地区负荷小，则发电设备单机容量必小。通常单机小容量的发电设备总是比大容量的设备运行效率低些，因此组成电力系统以后，不但各发电厂的单机容量可以尽可能选得大一些，以提高单机的运行效率，而且总机组数目也可减少，还不受各地区负荷大小的牵制，因为它们是由统一系统供电的，这就达到了提高发电效率的目的。

通常高压输电线到了各城市或工业区以后通过区域变电所(站)将电能转配或降低一个等级如  $35\sim 10\text{ kV}$  向附近各用电中心送电。城市轨道交通牵引用电既可从区域变电所高压线路得电，也可以从下一级电压的城市地方电网得电，这取决于系统和城市

地方电网具体情况以及牵引用电容量大小。

对于直接从系统高压电网获得电力的城市轨道交通系统，往往需要再设置一级主降压变电站，将系统输电电压如 110~220 kV 降低到 10~35 kV 以适应直流牵引变电所的需要。从管理的角度上看，主降压变电站可以由电力系统（电业部门）直接管理，也可以归属于城市轨道交通部门管理。

以上，从发电厂（站）经升压、高压输电网、区域变电站至主降压变电站部分通常被称为牵引供电系统的“外部（或一次）供电系统”。

从主降压变电站（当它不属于电力部门时）及其以后部分统称为“牵引供电系统”。它应该包括：主降压变电站、直流牵引变电所、馈电线、接触网、走行轨及回流线等。直流牵引变电所将三相高压交流电变成适合电动车辆应用的低压直流电。馈电线是将牵引变电所的直流电送到接触网上。接触网是沿列车走行轨架设的特殊供电线路，电动车辆通过其受流器与接触网的直接接触而获得电力。走行轨道构成牵引供电回路的一部分。回流线将轨道回流引向牵引变电所。

牵引供电系统各组成部分将在以后各章详尽讨论，这里不多加叙述。

### 第三节 向牵引变电所供电的接线图

由于交通运输的重要性，所有轨道的牵引供电都属于电力部门供电的一级负荷，即要确保向它供电的可靠性。为此，牵引变电所均由两个独立的电源供电。又由于轨道交通线路分布范围较广，通常需要在轨道沿线设置多个牵引变电所向它供电，再加上电源线路的具体分布情况不同，因此，造成向牵引变电所供电的形式复杂多样，但可以将它归纳成以下几种典型的形式。

#### 1. 环行供电接线（图 1-2）

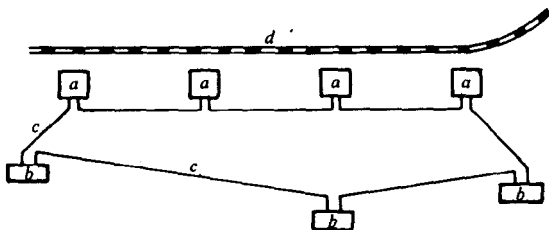


图 1-2 环行供电接线图

$a$ ——牵引变电所； $b$ ——主降压变电站（所）； $c$ ——线条表示一路三相输电线； $d$ ——轨道线。

以下各图符号意义相同。

由两个或两个以上主降压变电站和所有的牵引变用输电线联成一个环形。环行供电是很可靠的供电线路，因为在这种情况下，一路输电线和一个主降压变电站同时停止工作时，只要其母线仍保持通电，就不致中断任何一个牵引变电所的正常供电。但其投资较大。

## 2. 双边供电接线（图 1-3）

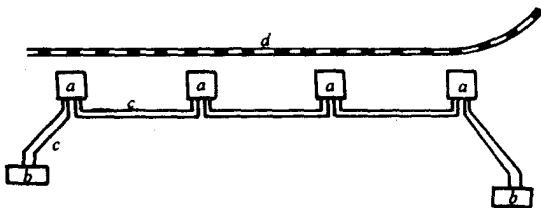


图 1-3 双边供电接线图

由两个主降压变电站向沿线牵引变电所供电，通往牵引变电所的输电线都经过其母线联接，为了增加供电的可靠性，用双路输电线供电，而每路按输送功率计算。这种接线可靠性稍低于环行供电。当引入线数目较多时，开关设备多，投资增加。

## 3. 单边供电接线（图 1-4）

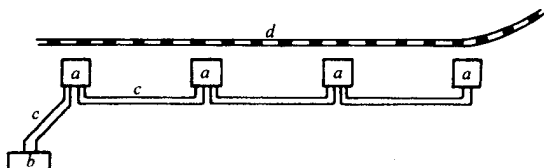


图 1-4 单边供电接线图

当轨道沿线附近只有一侧有电源时，则采用单边供电。单边供电较环形供电和双边供电的可靠性差，为了提高可靠性，应用双回路输电线供电。单边供电设备较少，投资也少些。

在双边供电和单边供电的情况下，每路输电线可以不必都进入所有的牵引变电所，而是轮流地每隔一个进入一个，这样可以减少进线的数目而降低变电所的投资。

#### 4. 辐射形供电接线（图 1-5）

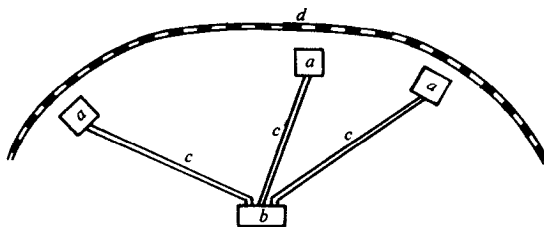


图 1-5 辐射形供电接线图

每个牵引变电所用两路独立输电线与主降压变电站联接。这种接线方式适合于轨道线路成弧形的情况。这种接线简单，但当主降压变电所停电时，将全线停电。

应当指出，实际情况常常是以上某些典型接线方式的综合。变配电接线图的选择应该是这样的，当供电系统的一个元件故障损坏时，它应能自动解列而不致破坏牵引供电。

下面以上海地铁一号线一期工程供电系统（图 1-6）为例，加以说明。

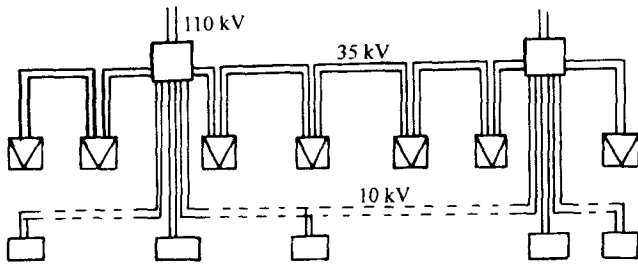


图 1-6 上海地铁一号线供电系统接线图

该供电系统接线图采用两个支柱式主降压变电所，以双回路输电线向牵引变电所和沿线车站区间用电的降压变电所供电。主降压变电所为 110 kV 双回路进线，它以 35 kV 双路输电线向沿线牵引变电所作双边或单边供电，以 10 kV 双路输电线向降压变电所供电，其供电接线方式分别为单边供电或双“T”形供电，“T”形供电的特点是主降压变电站供电给其他降压变电所的负荷电流不流入本降压变电所。

这种接线方式建设投资比较低，而供电可靠性却相当高，当轨道线路延长时，可酌情在线路两端搭建主降压变电站，建设的灵活性较大。

#### 第四节 直流牵引变电所的整流装置

直流牵引变电所的主要功能为，将其交流进线电压通过整流变压器降压，然后经整流器将交流电变成直流电供电动车辆的直流牵引电动机用。为了提高直流电的供电质量，降低直流电源的脉动（波动）量，通常采用多相整流的方法，它可以是六相、十二相整流，还可以增加到二十四相整流。为此，整流变压器不仅起降压作用，还要将三相交流电变成多相交流电供整流器整流，整流变压器与整流器合称为整流装置。

设计选择整流装置时，既要考虑直流供电质量，还要顾及整

流变压器的利用率。从这一点说，直流牵引供电制式比交流牵引供电制式有利，因为交流牵引供电制式是在机车上将高压交流电进行降压整流的，即整流装置全安装在机车上，而车上的空间是有限的，它不可能安装太复杂而庞大的设备，只能进行单相整流供电。相反，直流牵引变电所却可以在地面上安装比较完善的整流装置。

下面就直流牵引变电所应用的多相整流基本工作原理加以叙述。

### 一、最简单的三相半波整流电路（图 1-7）

图中（a）表示整流变压器的二次侧三相绕组  $a$ 、 $b$ 、 $c$  成星形联结， $a$ 、 $b$ 、 $c$  三相分别接大功率半导体整流管  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$ ，

$R$  为负载电阻，三相交流电压（ $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ ）波形如图（b）所示。在任何时刻，相电压最高的一相的整流管导通，此时整流电压（加在负载  $R$  上的电压）即为该相的瞬时电压，如图中  $\omega t_1 \sim \omega t_2$  时，为  $a$  相  $D_1$  管导通，此时整流电压为  $U_a$ ，同理依次为  $D_2$ 、 $D_3$  导通，整流电压依次为  $U_b$ 、 $U_c$  波形。

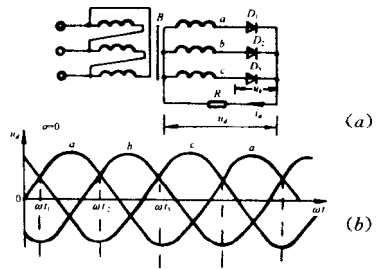


图 1-7 三相半波整流电路

这种线路的特点为：

1. 变压器副边每相绕组只导通  $1/3$  周期，即相差  $120^\circ$  电度角，利用率较差。

2. 整流管承受的反向电压高。当一个整流管导通时，另外两个管必承受反向电压，其值为副边绕组线电压。如  $D_1$  导通时， $D_2$ 、 $D_3$  分别承受反电压  $U_{ab}$ 、 $U_{ac}$ 。

3. 变压器绕组总是通过单方向电流，引起直流磁化，造成铁心饱和，必要求加大铁心尺寸，且漏抗增大，损耗增大。

以上电路属共阴极接线，即三相整流管的阴极连接在一起。

要改善以上整流电路，首先可以设想有两组负荷相近的整流电路（都是三相半波整流电路），但是一组为共阴极接线，另一组则为共阳极接线，即  $a$ 、 $b$ 、 $c$  三相绕组连接的三个整流管的阳极连接在一起。如图 1-8 (a) 所示。此时整流电路的工作情况就有所改善。

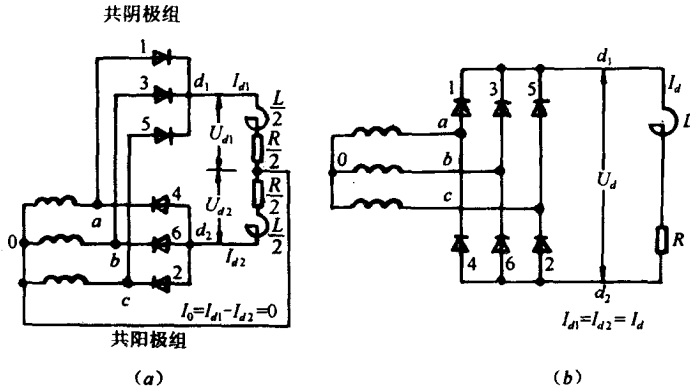


图 1-8 三相半波共阴极组与共阳极组串联电路

图 (a) 为两组半波共阴、阳极串联电路，如其负荷电流  $I_{d1}$ 、 $I_{d2}$  相等，则零线电流  $I_0$  为零，零线可以取消，同时两组整流器共用一组三相副边绕组，对每相绕组其通过的电流方向依次相反，各占  $1/3$  周期，这样就提高了各绕组的通电时间（加倍），提高了利用率，而且先后的电流方向是相反的，又消除了直流磁化的问题。

## 二、三相桥式整流电路

以上接线中两组半波整流的负荷电流数值相等，即  $I_{d1} = I_{d2}$ ，则  $I_{d1} - I_{d2} = 0$ ，零线可以取消，将两组负载阻抗叠加为一个，则成为图 1-8 (b) 所示的三相桥式整流电路。

桥式整流电路对同样变压器绕组电压来说，其整流电压升高一倍。反之，如整流电压保持一定，则变压器绕组电压可以降低，

因而整流元件承受的反电压可以低些。三相桥式整流变压器无直流磁化问题。整流电压  $U_d$  的波形为六相脉动波形，其整流电压的次序依次为线电压  $U_{ab}$ 、 $U_{ac}$ 、 $U_{bc}$ 、 $U_{ba}$ 、 $U_{ca}$ 、 $U_{cb}$ 、 $U_{ab}$ 、……。如图 1-9 所示。

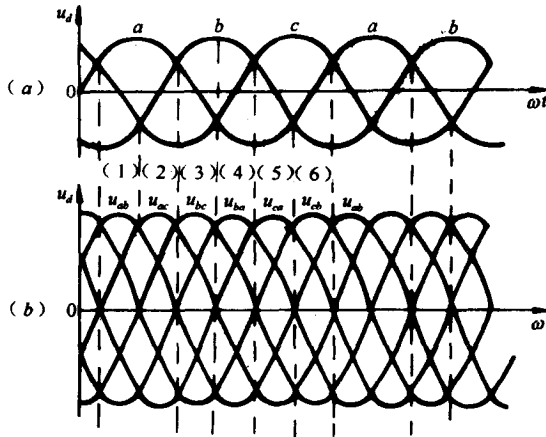


图 1-9 三相桥式整流电路整流电压波形

### 三、大功率供电整流电路

对于化工、冶金和电力牵引用的大功率整流设备，由于其直流电压不太高，而电流很大，为了避免整流支路的整流元件（管）并联数目不致太多，而造成元件之间电流分布不均的问题，可以用两组整流器并联工作的方法。同时可以使两组整流器相互之间有相位移（相差），以求得多相整流，减少整流电压脉动的目的。下面介绍两种这样的电路：

#### 1. 带平衡电抗器的双反星形整流电路（图 1-10）

所谓双反星形是整流变压器的次边每相有两个匝数相同的绕组，分别接成两组三相半波整流电路，即  $a$ 、 $b$ 、 $c$  和  $a'$ 、 $b'$ 、 $c'$  两组。 $a$  与  $a'$ 、 $b$  与  $b'$ 、 $c$  与  $c'$  分别绕在同一个铁芯上，其极性相反，或者说电压的相位差  $180^\circ$ 。如图 1-10 中表示同名端的“·”符号

所示，故称双反星形电路。图中两组三相半波整流电路并联连接，每组只供给总负荷电流的一半。它与由两组三相半波电路串联而成的三相桥式电路相比，输出电流可增大一倍。变压器次边两绕组的极性相反可以消除变压器中的直流磁化问题。

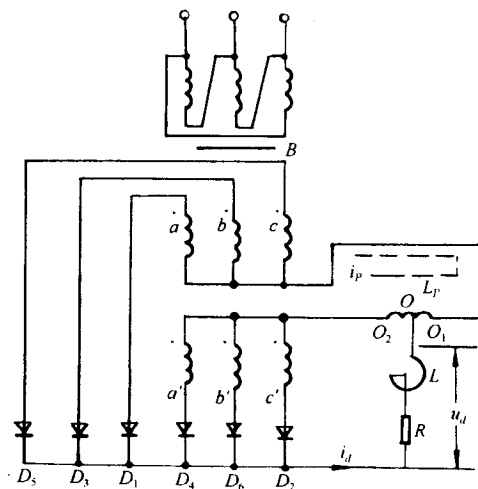


图 1-10 双反星形整流电路

两组整流电路的整流电压、电流波形如图 1-11 所示。

实际上两组整流电路并联连接，要达到真正并联工作，必须两个电源的情况完全相同（平均值和瞬时值均相等）才行。在双反星形电路中，虽然两组整流电压的平均值  $U_{d1}$  和  $U_{d2}$  相等，但是它们的脉动波相差  $60^\circ$ ，它们的瞬时值  $u_{d1}$  和  $u_{d2}$  是不同的。为了解决这个问题，在两组整流电路的中心点  $O_1$  与  $O_2$  之间接入了一个平衡电抗器  $L_p$ ， $L_p$  分成两半，两组整流电路各占一半。平衡电抗器的作用既起到限制由于瞬时电压  $u_{d1}$  与  $u_{d2}$  的不同而造成的在两组整流电路内部流通的不平衡电流  $i_p$ ——称环流的数值，从而均化两组整流电路的负荷电流，同时还在中点  $O_2O$  和  $\omega_1$  中产生感应电势以补偿两个整流电路瞬时电压  $u_{d1}$  和  $u_{d2}$  的差异，使两组整

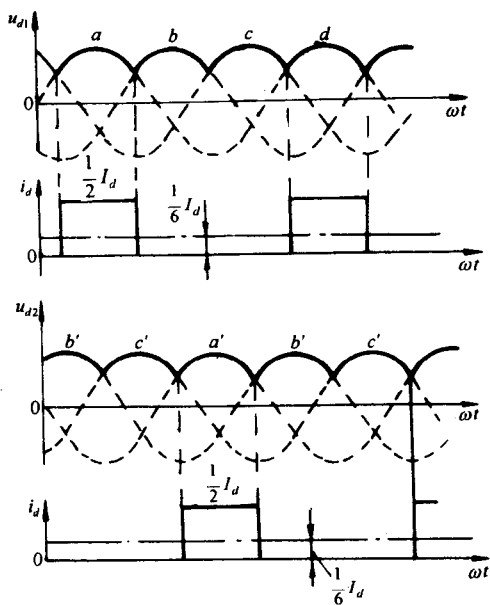


图 1-11 双反星形整流电路整流电压、电流波形图

流电路加到负荷上的电压相等，即两组整流电路真正并联工作。此时的整流电压波形如图 1-12 所示。

为了说明平衡电抗器的作用过程，可见图 1-13。从图 1-12 中，在  $\omega t_1$  时  $U'_b$  电压最

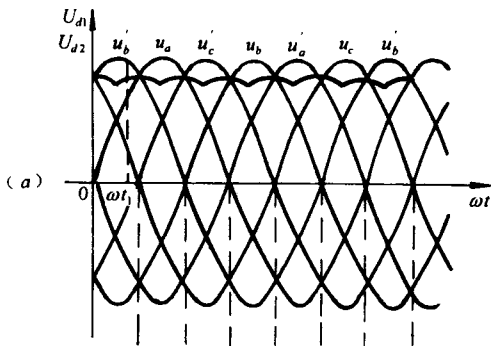


图 1-12 平衡电抗器作用下的输出电压的波形

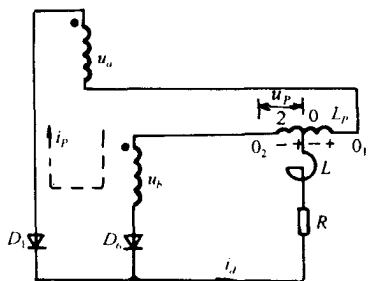


图 1-13 平衡电抗器作用下，二个整流管同时导电及环流的情况

高，二极管  $D_6$  导通，此电流流经  $L_p$  时，平衡电抗器的一半绕组 ( $OO_2$ ) 端要感应一电势  $\frac{1}{2}U_p$ ，它的方向是要阻止电流增长（即  $O$  端为正， $O_2$  端为负）。因为平衡电抗器的另一半 ( $OO_1$  端) 是与 ( $OO_2$  端) 绕在同一铁心上的，且匝数相等，绕向相同的，所以在绕组 ( $OO_1$  端) 上也要

感应出电势  $\frac{1}{2}U_p$  来，它的方向为  $O_1$  端正， $O$  端为负。很显然， $OO_2$  绕组上的电势与  $U'_b$  方向是相反的，而  $OO_1$  端绕组上的电势与  $U_a$  的方向是一致的，因此只要平衡电抗器上感应的电势  $U_p$  与  $U'_b$ 、 $U_a$  的差值相等，则

$$U'_b - \frac{1}{2}U_p = U_a + \frac{1}{2}U_p$$

此时整流管  $D_1$  与  $D_6$  必同时导通，达到了该期间两组整流电路的相应整流管并联工作的目的。同样理由，在其他任何时间，必然会有另外两个属于不同整流电路的整流管同时导通，这就达到两组整流电路并联工作运行的目的。

必须注意，平衡电抗器的电感量要足够大，以限制环流电流  $i_p$  值。当环流值大到等于  $\frac{1}{2}I_a$ （负荷电流的一半）时则从电路图可以看出，必有一组整流电路要中止导通，破坏了两组整流电路并联工作的条件，因为每组整流电路承担的电流为  $\frac{1}{2}I_a \pm i_p$ 。当环流增至  $\frac{1}{2}I_a$  时，单向导电性的整流管必定有一组会阻断，成为单组运行。

## 2. 两组三相桥并联组成的十二相整流电路

目前城市轨道交通直流牵引变电所用的大功率半导体整流装置，为了提高直流供电质量，降低电压脉动量，减少注入电网的谐波含量和提高整流变压器的利用率，普遍采用多相整流电路。

下面介绍一种如图 1-14 所示的两组三相桥式并联组成的十二相整流电路。

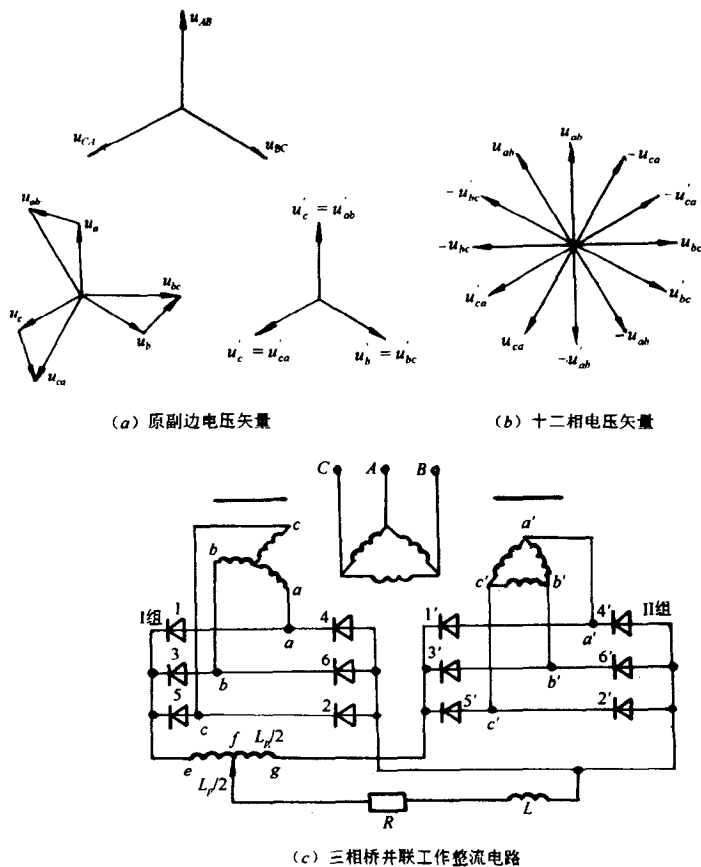


图 1-14  $\Delta/Y-\Delta$  接线整流变压器和两组三相桥式  
并联工作构成的十二相脉动整流电路