



第一章 高铁牵引供电系统概况

第一节 高铁牵引供电系统简介

1964年，世界上第一条高速铁路——东海道新干线在日本开通，高速铁路以其高效、快速、节能、安全、舒适、环保、准时等特点受到世界各国的关注，并呈现出蓬勃发展的势头。几十年来，日本、法国、德国、意大利大力发展高速铁路技术，高速铁路速度不断被刷新。经过几十年的发展，高速铁路进入了干线化、国际化、网络化的新的飞速发展时期^[1, 2]。

高速铁路的建设需要加强加快高速铁路各方面技术的研究。一方面，电力牵引在实现高速、重载、节能和环境保护方面具有显著的优越性；另一方面，电力牵引负荷的非线性、单相性与冲击性，会导致牵引负荷功率因数较低、注入电力系统的谐波与负序较大。高速铁路运行的源动力和关键系统——牵引供电系统，是保证列车运行高速、安全、可靠的关键系统之一。但目前高铁牵引供电系统还存在着许多问题，如三相不平衡、负序、谐波、无功、通信干扰、过电分相等，不仅对高速铁路的安全和可靠运行构成了威胁，而且大大降低了供电的效率与质量。因此，采用新的技术、寻找解决这些问题的措施，具有重要的现实意义^[3]。

电力系统提供两路独立电源进线，由牵引变电所进行电能变换后送上牵引网，供电力机车取流实现电力牵引，如图 1-1 所示。牵引变电所、牵引网和电力机车组成了牵引供电系统。

一、牵引变电所、分区所、AT 所

牵引变电所的作用是将电力系统引入的 110 kV、220 kV 电压等级的三相交流电变换成 27.5 kV 的单相交流电，通过馈电线送至铁路沿线的接触网，为电力机车供电^[4]。由于牵引负荷是单相负荷，为了尽可能将单相负荷均匀地分配到电力系统三相中，牵引变压器常采用特殊接线变压器，如

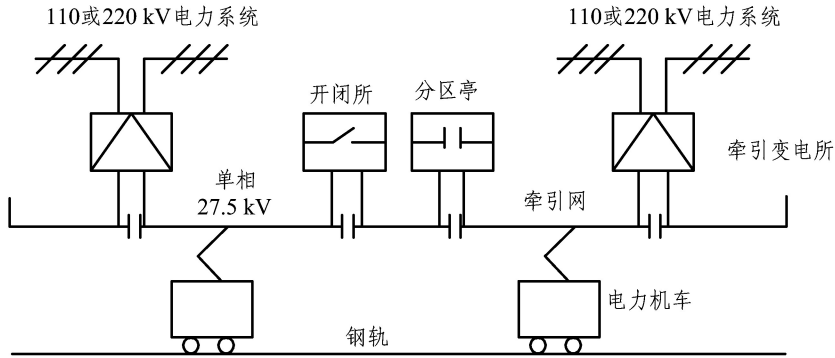


图 1-1 牵引供电系统示意图

V/V 接线、斯科特接线、阻抗匹配平衡接线等变压器。高速铁路采用 V/X 接线等牵引变压器。由于牵引变压器接线的特殊性和多样性，需要进一步研究适用的保护原理。

为了增加供电的灵活性，在两个牵引变电所的供电区中间常增设分区所，如图 1-2 所示。

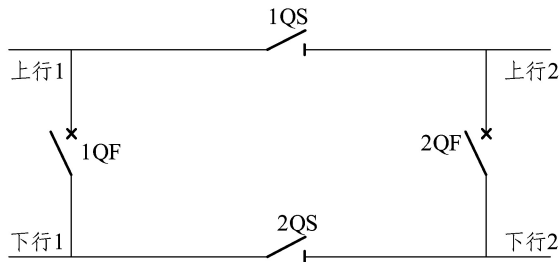


图 1-2 分区所主接线示意图

断路器 1QF、2QF 正常工作时闭合，实现上、下行牵引网并联运行。隔离开关 1QS、2QS 在正常运行时断开，当相邻牵引变电所发生故障而不能继续供电时，可以闭合 1QS、2QS，由非故障牵引变电所实现越区供电，使行车不至中断。

采用 AT 供电方式时，在沿线间隔 15~20 km 设置一个自耦变压器站(AT 所)。

二、牵引网

牵引网是由馈电线、接触网、回流线组成的多导线供电回路^[5]。其供

电方式主要有：直接供电方式、带吸流变压器（BT）的供电方式、自耦变压器（AT）供电方式和全并联 AT 供电方式。其中，BT 供电由于大地回流和“半段效应”，其对通信线路的防护效果并不理想，同时由于“吸-回”装置使得接触网结构复杂，机车受流条件恶化，故目前已很少采用。

1. 直接供电方式

直接供电方式较为简单，是将牵引变电所输出的电能直接供给电力机车的一种供电方式，其结构如图 1-3 所示。其优点是结构简单、投资较少。但是直接供电方式回路电阻大，供电距离较短。同时由于牵引供电系统为单相负荷，该类供电方式的牵引回流为钢轨，是不平衡的供电方式，对通信线路产生感应影响大。

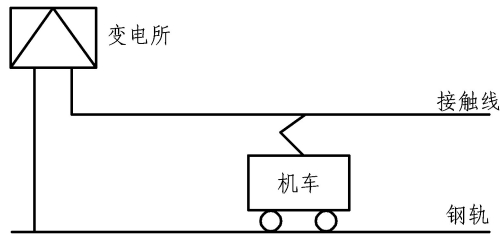


图 1-3 直接供电方式

2. 带回流线的直接供电方式

为了克服对通信线路的干扰，带回流线的直接供电方式被提出，其结构如图 1-4 所示。利用回流线与钢轨之间的并联分流作用，使钢轨中的电流尽可能地由回流线流回牵引变电所，因而部分抵消接触网对临近通信线路的干扰。这种供电方式设备简单，因此供电设备的可靠性得到了提高；牵引网阻抗比直接供电方式低一些，供电能力好一些，造价也不太高，所以这种供电方式在我国普速电气化铁路上得到了广泛应用。

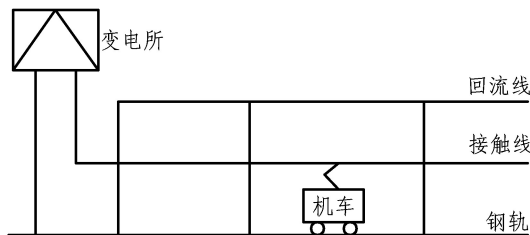


图 1-4 带回流线的直接供电方式

3. AT 供电方式

随着铁路的提速以及高速、大功率电力机车的不断投入运行，牵引网需要提供更高的电能，为此引入 AT 供电方式，其结构如图 1-5 所示。牵引变电所主变输出电压为 55 kV，经 AT 向接触网供电，一端接接触线，另一端接正馈线，其中点抽头则与钢轨相连。在这种供电方式，馈电电压高，供电能力强，牵引变电所的数量可以减少，从而可节省投资。而其接触线和正馈线中的电流近似大小相等且方向相反，所以牵引电流对通信线路的影响较小。目前，我国的大秦、京秦、郑武等普速电气化铁路线路就采用了 AT 供电方式。

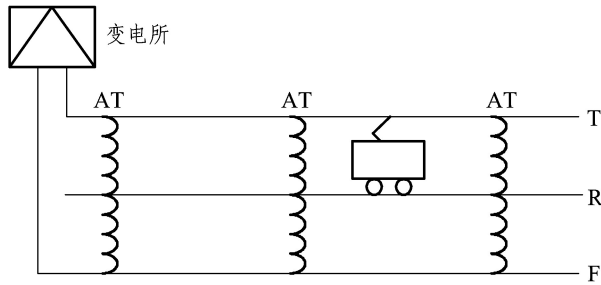


图 1-5 AT 供电方式

4. 全并联 AT 供电方式

为了进一步提高牵引网电压，减小牵引网电能损失，采用了牵引网的上下行线路在 AT 所和分区所处进行并联的接线方式，其结构如图 1-6 所示。我国高速铁路普遍采用全并联 AT 供电方式。由图 1-6 可以看到，这种供电方式下机车的负荷电流由于并联支路的存在将会有多个供电回路，减小了牵引网的阻抗，增强了供电能力。但是，在牵引网故障时，这种方式同样存在多个回路给短路点供电，使故障分析更加复杂，同时使其继电保护与普速铁路时有很大不同。

三、电力机车负荷

电力机车按照牵引驱动电机的不同分为直流电力机车（又称交-直电力机车）和交流电力机车（又称交-直-交电力机车）。在普速铁路中通常采用交-直电力机车，而在高速铁路中全部采用交-直-交电力机车。两种机车由于采用的整流电路不同，使得其谐波成分、功率因数等有很大区别，进而

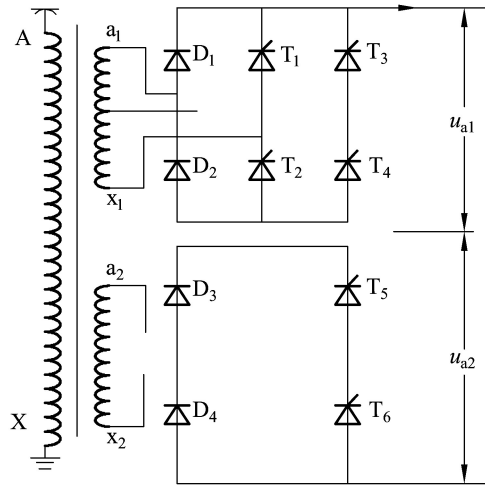


图 1-7 三段不等分半控桥式整流电路

对于交-直-交电力机车的研究始于 20 世纪 70 年代末,目前成功运用的有 HXD 系列电力机车和 CRH 系列动车组。我国高速铁路全部采用 CRH 系列动车组,它们的整流部分均采用四象限 PWM 整流器。图 1-8 给出了单相三电平四象限 PWM 整流器。整流器通过 IGBT 或 GTO 控制导通和关断角,控制机车主变压器低压绕组的整流,并进行多重 PWM 调制,使电流波形近似正弦波,同时电流与电压基本同相位。交-直-交电力机车或动车组的谐波含量低,功率因数高。机车运行时的功率因数大于 0.98,谐波中的低次谐波含量很少,而高次谐波含量有所增加,CRH₁、CRH₃、CRH₅ 型动车组的主要谐波为 17~31 等各次谐波,CRH₂ 型动车组的主要谐波为 50 谐波附近的各奇数次谐波,但所有动车组的总谐波畸变率较小,一般不超过 3%~5%。

通过上述对交-直电力机车和动车组的对比分析可以看出,普速铁路和高速铁路牵引负荷特性上有很大不同。首先是功率因数增大,其次是谐波含量和成分不同,最后牵引功率有很大增加。表 1-1 给出了我国常用的各型交-直电力机车和动车组的牵引功率。从表中可以看到,高速铁路的动车组牵引功率最大可达 20 400 kW。由于动车组一般按恒功率出力,在牵引网电压较低时负荷电流更大,最大时近 1 000 A,远大于普速铁路电力机车的单车负荷电流^[6]。

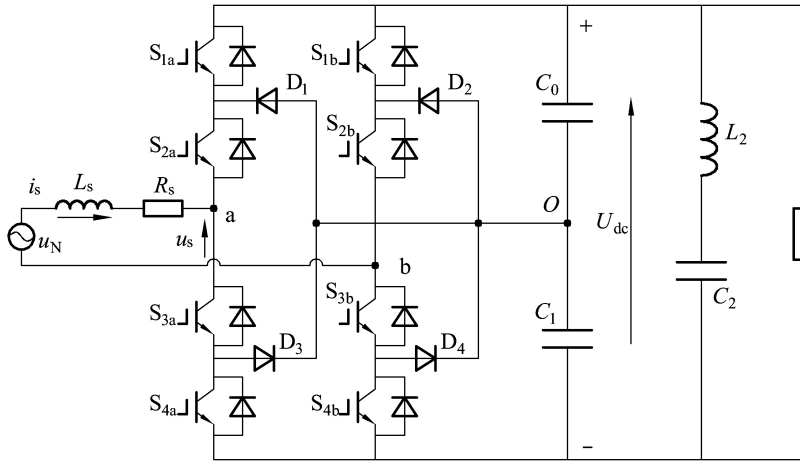


图 1-8 单相三电平四象限 PWM 整流器

表 1-1 交-直电力机车与动车组牵引功率

交-直车型号	牵引功率/kW	动车组型号	牵引功率/kW
SS ₁	3 780	CRH _{1A}	5 500
SS ₂	4 440	CRH _{1B}	11 000
SS _{3B}	8 640	CRH _{1E}	11 000
SS ₃	4 320	CRH _{2A}	4 800
SS _{4B}	6 400	CRH _{2B}	9 600
SS _{4C}	6 400	CRH _{2C}	8 760
SS ₄	6 400	CRH _{2E}	9 600
SS ₅	3 200	CRH _{3C}	8 800
SS ₆	4 800	CRH _{5A}	5 500
SS _{7C}	4 800	CRH380A	8 800
SS _{7D}	4 800	CRH380AL	20 440
SS _{7E}	4 800	CRH380B	8 800
SS ₇	4 800	CRH380BL	18 400
SS ₈	3 600	CRH380CL	20 000
SS ₉	4 800	CRH380D	5 500

第二节 高铁牵引供电系统关键技术及目前存在的问题

高速铁路运行的源动力和关键系统——牵引供电系统，是保证列车运行高速、安全、可靠的关键系统之一。开展高速铁路新型的牵引供电技术、牵引供电系统弓网匹配与供电智能化技术、牵引供电系统主动运维技术、牵引供电综合节能与效能提升技术以及更大规模的牵引供电综合监控系统的研发工作，不仅是目前高铁牵引供电系统研究关键问题，也是发展趋势。

一、关键技术发展趋势

（1）电气化铁路同相供电技术。

采用同相供电技术，可取消电分相环节，使机车平滑连续受流，从而保证了高速重载列车安全可靠运行。同相供电系统是指线路上不同变电所供电的区段接触网电压相位相同、线路上无电分相环节的牵引供电方式。

（2）弓网理论及匹配关系。

在速度持续为 350 km/h 及以上的高速铁路弓网中，接触网材料参数确定并在简单链型或弹性链型悬挂形式下，受电弓能否有良好的跟随特性，即能否可靠地受流、减摩耐磨性、抑制离线电弧和对环境的适应性，是在 350 km/h 及以上高速铁路弓网匹配中要解决的关键问题。

（3）牵引供电系统的智能化（智能供电系统）。

确保高速列车运行安全，全面了解掌握高速列车运行的状态，及时对高速列车运行情况进行判断以做出安全决策，也就是高速列车应该具有自我状态感知、自我诊断和主动预警、主动修复的功能。因此，下一代高速列车发展方向应该从提升运营速度转向朝着实现高速列车智能化的方向发展。

（4）牵引网及供电设备的安全性、可靠性。

在大规模高速铁路供电系统体系结构下，由于其功能的复杂化，使用设备急剧增多以及设备间的相互协调问题，需要建立一个协调、可靠、安全的牵引供电系统，牵引网及其设备的安全性、可靠性评估体系急需进一

步完善适应高速铁路的发展。

(5) 超大规模 SCADA 系统技术的应用。

当前高速铁路分布广、扩展空间巨大、控制点海量、设备种类繁多,如何有效地监控到每一个监视点,并根据监控所获得的海量数据进行分析监视高速铁路供电系统的状态和进行故障诊断,需要利用超大规模 SCADA 系统技术来解决这一现实问题。

(6) 牵引供电新型节能技术。

随着中国高速铁路的快速发展,现有电气化轨道交通运行中能量损耗较大,因此,利用新能源技术、电力电子技术、新型再生制动储能与能量管理技术、节能变压器技术,研究高速铁路牵引供电综合节能与效能提升技术,构筑适用于新型多源系统的电能质量综合监控与治理系统,进而开发牵引供电系统综合能量监控系统与智能能量管理系统,对系统能量进行全面的优化管理,达到综合节能与效能提升的目标,具有重要的理论与现实意义。

二、目前存在的问题

目前,牵引供电系统还存在着许多问题,如三相不平衡、负序、谐波、无功、通信干扰、过电分相^[7-10]等,不仅对高速铁路的安全和可靠运行构成了威胁,也大大降低了供电的效率与质量。因此,采用新的技术、寻找解决这些问题的措施,具有重要的现实意义。

(一) 无功和谐波

1. 牵引负荷的特点

相对于三相电力负荷而言,牵引负荷电力机车具有显著特点,这些特点直接影响到电力系统的稳定安全运行、牵引供电系统的结构与运行以及供电设备的接线方式等。

牵引负荷的特点与机车类型直接相关,主要特点如下^[11]:

(1) 电力机车是单相、移动、冲击性负荷。负荷电流由于受到线路状况和机车本身运行工况多变因素的作用,具有随机剧烈波动性。

(2) 交-直型电力机车是一种非线性、低功率因数负荷。工频单相交流

电通过受电弓从接触网上取得给电力机车，机车变压器降压整流成直流电，供给直流牵引电动机。这种电力机车采用硅整流器或晶闸管整流器，具有很大的牵引功率。但由于谐波含量大、功率因数低，将会注入各次谐波电流给牵引供电系统和电力系统，成为一种谐波源。

(3) 高速铁路采用交-直-交型电力机车或动车组。由于交直交机车采用了大功率电力半导体和计算机 PWM 控制技术,将 25 kV 工频单相交流电经牵引变压器降压后整流成直流电，再逆变成交流供交流电动机。交直交电力机车具有以下特点：① 动车组负荷大，对牵引供电能力要求高；② 短时集中负荷特征明显，易对系统产生冲击；③ 功率因数较高（各次谐波含量低）；④ 针对紧急及事故情况，越区供电能力要求高。但是，在近期一段时间内，在既有线仍将以交-直型机车为主。

2. 无功功率对电力系统的不良影响

无功功率对电力系统的不良影响主要有以下几方面：

(1) 无功功率的增加会导致线路中的电流和系统的整体视在功率增大，从而使发电机、输电线路、变压器和其他各类电气设备的容量增加。

(2) 在一定的电力传输容量下，无功功率的增加会使有功功率降低，导致电力系统内多种电气设备的容量得不到充分利用。

(3) 无功功率的增加会使发电机、变压器和输电线路的损耗增大，电力机车作为冲击性低功率因数负载，会造成电网电压的剧烈波动，严重危害公共电能质量，影响电力设备的安全运行。

3. 谐波对电力系统的不良影响

谐波对电力系统的不良影响主要有以下几方面：

(1) 谐波电流会在变压器和输电线路中产生附加损耗，降低变电和输电效率。此外，由于输电线路存在电感和对地电容，谐波在一定条件下会引发串联谐振或并联谐振，谐振所产生的过电压或过电流对电力设备具有很大的危害性。

(2) 谐波会对电力系统中广泛存在的测量和计量仪器产生不良影响，导致电压电流表、功率表等仪表的测量准确度降低。

(3) 谐波会对各类继电保护装置和其他自动装置产生影响，可能引起该类装置的误动或拒动，严重影响电力系统的安全运行，降低了可靠性。

据此，世界各国已制定了国家标准来限制谐波的含量。国际电工委员

会 (IEC)、电气电子工程师协会 (IEEE) 等推出了建议标准, 如 (IEC 6100/IEEE 519)。我国也制定相应的国家标准《电能质量公用电网谐波》(GB/T 14549—93)。

一般采用两种办法解决谐波污染的问题: 一种是装设谐波补偿装置^[12]进行补偿; 另一种是改造谐波源, 使其产生的谐波减少, 如电力机车, 采用四象限整流器, 可提高功率因数并使机车的低次谐波大大减少。交-直-交机车就是一个很好的范例。

(二) 负序电流

目前我国的电气化铁路供电系统广泛采用单相工频交流制, 电力机车额定电压为 25 kV。除了单相牵引变压器外, 主要通过三相-两相牵引变压器将 110 kV 或 220 kV 三相公共高压变为两相空载 27.5 kV 电压, 分别接入牵引变电所两边的供电臂。我国采用的牵引变压器主要有 YNd11 接线变压器、YNvd 接线变压器、Vv 接线变压器、Scott 接线变压器和阻抗匹配平衡变压器等。上述接线方式的变压器均可以等效为图 1-9 所示的三相-两相牵引变压器形式。

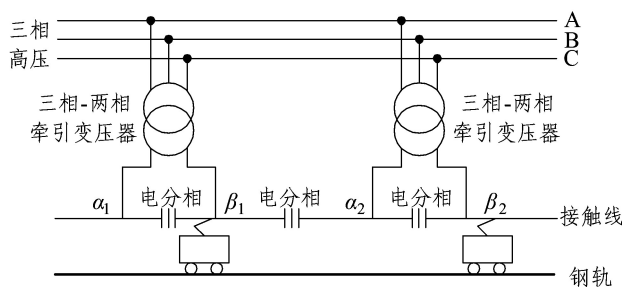


图 1-9 三相-两相牵引变压器模型

由于电力机车是非线性的单相交流负载, 而正常运行的公共电力系统是三相对称的, 这种牵引供电系统结构会严重破坏三相电力系统的对称性, 从而产生负序电流。利用对称分量法可将牵引变压器一次侧三相电流分解为正序电流分量 I^+ 、负序电流分量 I^- 和零序电流分量 I^0 , 牵引变压器引起的三相不平衡度可表示为:

$$\varepsilon = \frac{I^-}{I^+} \times 100\% \quad (1-1)$$

在三相-两相牵引变压器中，两供电臂的负荷电流之比为：

$$m = \frac{I_\alpha}{I_\beta} \quad (1-2)$$

式中， I_α 和 I_β 分别为 α 和 β 供电臂的负荷电流，设 φ_α 和 φ_β 为其相位角，且 I_α 相位超前于 I_β ，那么常用的牵引变压器产生的电流不平衡度特性如表 1-2 所示。

表 1-2 牵引变压器电流不平衡度特性

变压器类型	最小不平衡度		最大不平衡度		不平衡变化趋势
	ε_{\min}	负荷情况	ε_{\max}	负荷情况	
单相接线	100%	任何负荷	100%	任何负荷	不变
Vv 接线	0	$\varphi_\alpha - \varphi_\beta = 60^\circ$ 且 $m=1$	140%	$\varphi_\alpha - \varphi_\beta = -90^\circ$ 且 $m=1$	随着 $ m-1 $ 或 $ \varphi_\alpha - \varphi_\beta - 60^\circ $ 的增大而增大
YNd11	0	$\varphi_\alpha - \varphi_\beta = -60^\circ$ 且 $m=1$	140%	$\varphi_\alpha - \varphi_\beta = 90^\circ$ 且 $m=1$	随着 $ m-1 $ 或 $ \varphi_\alpha - \varphi_\beta + 60^\circ $ 的增大而增大
Scott	0	$\varphi_\alpha - \varphi_\beta = 0^\circ$ 且 $m=1$	100%	$\varphi_\alpha - \varphi_\beta = \pm 90^\circ$ 或 $m=0, \infty$	随着 $ m-1 $ 或 $ \varphi_\alpha - \varphi_\beta $ 的增大而增大
阻抗匹配		$\varphi_\alpha - \varphi_\beta = 0^\circ$ 且 $m=1$	100%	$\varphi_\alpha - \varphi_\beta = \pm 90^\circ$ 或 $m=0, \infty$	随着 $ m-1 $ 或 $ \varphi_\alpha - \varphi_\beta $ 的增大而增大

从表 1-2 可以看出，某些牵引变压器在两相负荷完全相同的情况下，可以将负序降到最低，如阻抗匹配平衡变压器和 Scott 接线变压器等，但对于电力机车这类大功率且具有非线性和随机性特征的负载，实际运行时平衡变压器几乎不可能出现两边负载对称的情况，所以负序电流难以避免^[13-16]。而单相接线的牵引变压器由于始终会导致严重的负序，现已很少使用。负序电流对电力系统具有多方面的不良影响，主要体现在以下几点：

(1) 负序电流会增加发电机转子的附加损耗和温升，引起附加振动。考虑到发电机的安全运行，各相电流都不允许超过额定值。如果存在负序电流，当电流最大的一相达到额定值时，其余两相电流就会小于额定值，因此，负序电流限制了发电机的出力。同理，负序电流也会使得变压器的

容量得不到有效利用。

(2) 负序电流会在感应电动机中产生负序旋转磁场,对转子造成制动力矩,从而降低电动机的出力,同时还会造成额外发热,甚至烧毁电动机。

(3) 电流经过输电线路时,负序分量产生的有功功率为 0,导致电能损失,从而削弱了输电线路的输送能力。

(4) 负序电流易导致电力系统中以负序分量为启动判据的继电保护装置和其他自动装置误动作,增加了保护装置的复杂性,降低了电力系统的稳定性和可靠性。

各国对负序电流都制定了严格的限制标准来防止其对电力系统和电力设备带来的严重影响,同时采取了以下措施限制系统不平衡程度在规定的标准范围内:

(1) 由于高电压、大容量电源系统具有较强的承受不平衡负荷的能力,因此尽量采用高电压、大容量的电源供电,如法国采用 235 kV 电压等级,日本采用 154 kV、220 kV、275 kV 三种电压等级,西班牙采用 132 kV、220 kV 两种电压等级。采用三相-两相平衡牵引变压器,如日本广泛采用 wood-bridge 变压器和 Scott 变压器。我国主要采用阻抗匹配平衡变压器和 Scott 变压器。优点是:当两端口负荷完全相同时,变压器原边三相电流对称,不会产生负序电流;即使两端口负荷不完全相同,经过平衡变压器的作用,也能减弱系统的不平衡程度。

(2) 采用不平衡补偿装置进行补偿,实现系统平衡,如日本采用单相负荷补偿装置(SFC)。

(3) 采用轮换相序的接线方法,即各变电所的变压器原边依次轮换接入电力系统的不同相,虽然各变电所产生的负序电流数值不能改变,但换相接人的相序不同,负序电流相位也不同,多个不同相位的负序电流相加,可减小系统总负序电流。

(三) 电分相

在电气化铁路供电系统中,由于牵引变压器负载侧两端的相位不同,其分界必须加装分相装置进行两相隔离。此外,为了降低牵引变电所在电力系统中产生的负序电流,通常采取牵引变电所轮换相序接入高压电网的措施。所谓轮换相序,就是将相邻牵引变电所的变压器一次侧轮换接入三相电力系统的不同相,反映到各相的总功率趋于一致,从而使得整体负序

电流降低^[17]。以单相牵引变压器为例，轮换相序的原理如图 1-10 所示，其中 T 为接触网，R 为钢轨。

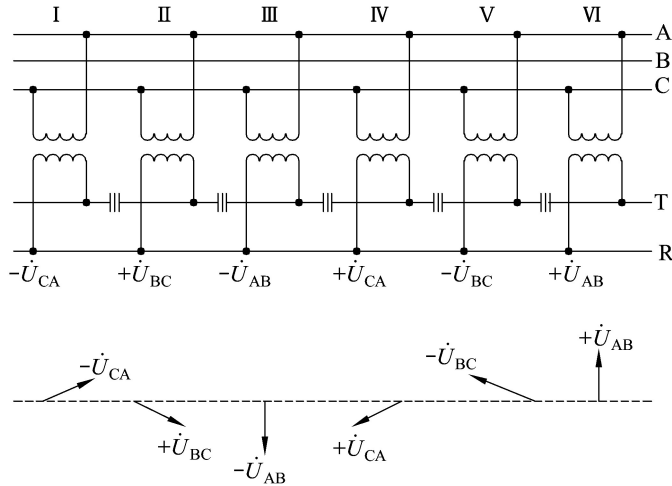


图 1-10 单相变压器轮换相序示意图

图 1-10 中，根据轮换相序的原理，I~VI号单相牵引变压器的连接相序依次为 U_{CA} 、 U_{BC} 、 U_{AB} 、 U_{CA} 、 U_{CA} 、 U_{AB} ，根据其相量关系可以看出，处于反方向的两相负序可以相互抵消，因此能够从整体上降低不平衡度。虽然轮换相序的接入方式可以在一定程度上降低负序电流，但由于相邻的牵引变电所接入不同相，负载侧电压相位不同，必须在相邻变电所之间加入分相装置，这样同一变电所出口处两相之间、相邻变电所供电臂之间均存在电分相装置，导致整个线路中电分相密集。由于电力机车的速度较快，经过电分相的频率非常高，电力机车在经过电分相时，必须进行切断主断路器、降受电弓、关闭辅助机组等一系列操作，依靠惯性经过电分相后，再重新升起受电弓取流。这个过程容易出现拉弧现象，产生过电压，且操作复杂程度和风险系数较高^[18]。目前虽然有许多自动过分相措施可以降低过分相时司机的劳动强度^[19]，但由于电力机车速度快，电流被频繁切断，使速度和牵引力遭受损失，不利于电气化铁路的高速化和重载化。此外，电分相装置故障率高，检修维护工作量大，是整个牵引供电系统中非常薄弱的环节。因此，必须设法减少甚至取消电分相装置^[20]。

总之，电分相问题已成为我国当前牵引供电系统的技术瓶颈，而谐波、负序问题则成为电力部门与铁路部门同时关注的焦点，三者的存在严重制

约了我国高速铁路的发展。因此，有必要寻求一种新的供电技术，在取消牵引变电所出口处电分相、消除供电瓶颈的同时，有效治理无功和谐波、负序电流，达到相电压不平衡度国标限值为主的电能质量要求，促进电力部门与铁路部门的共同与和谐发展^[21]。

（四）电压波动及闪变

电气化铁道是典型的冲击型负载，其引起的电压波动非常大。供电系统的容量、网络参数和负载容量的大小等直接与电压波动的范围相关。如果系统同时接入其他用电负荷，则电压波动会则影响到它们。多数情况下，电压波动的最大受害者是电气化铁道牵引系统。

三、国内外研究现状

鉴于电气化铁路在整个交通运输行业的重要地位以及高速重载化的发展要求，研究新型牵引供电系统方案，为改造现有牵引供电系统和新建同相供电系统提供新的思路，促进电气化铁路供电系统的改革，对提高公共电能质量、改善人们出行条件、促进国家经济发展，均具有非常深远的意义。如何解决电气化铁路供电系统存在的问题，一直是各国相关专家学者的热门研究课题，日本、德国、中国、法国、澳大利亚等国家均在研究具有本国特色的解决方案。

日本对电气化铁路供电系统的研究较早，为了降低机车通过电分相时的操作复杂度，采用地面自动过分相系统，但其系统结构复杂，初期投资较大，且运维成本较高。为了缓解电气化铁路导致的电能质量问题，采用静止无功补偿装置（SVC）、有源电力滤波器（APF）和静止无功发生器（STATCOM）等方式^[22-24]进行补偿，并成功运用了铁路功率调节器（RPC），其原理如图 1-11 所示，图中牵引变压器采用 Vv 接线方式，牵引变压器两负载侧分别为 α 相和 β 相，当两相的功率 P_α 和 P_β 不相等时，RPC 将重载侧的部分有功功率 P_c 转移到轻载侧，其中 P_c 为两侧负载有功功率之差的二分之一。在实现三相不平衡补偿的同时，RPC 还负责补偿负荷产生的无功和谐波。目前 RPC 已成功运用多年，其良好的补偿效果得到了广泛认可，但仍然遗留了电分相问题。此外其所需的背靠背变流器和相应的变压器容量大，初期投资和运行成本高。

法国的电气化铁路一般接入 225 kV 或 400 kV 的高电压，由于其电压等级高、短路容量大，由电力机车引起的一系列电能质量问题对电力系统的影响得到缓解；采用分段供电的方式，为了降低不平衡度，牵引变压器以轮换相序的形式接入高压电网，导致接触网中存在大量的电分相。为了抑制无功和谐波，在牵引变压器负载侧加装无功补偿和滤波装置。

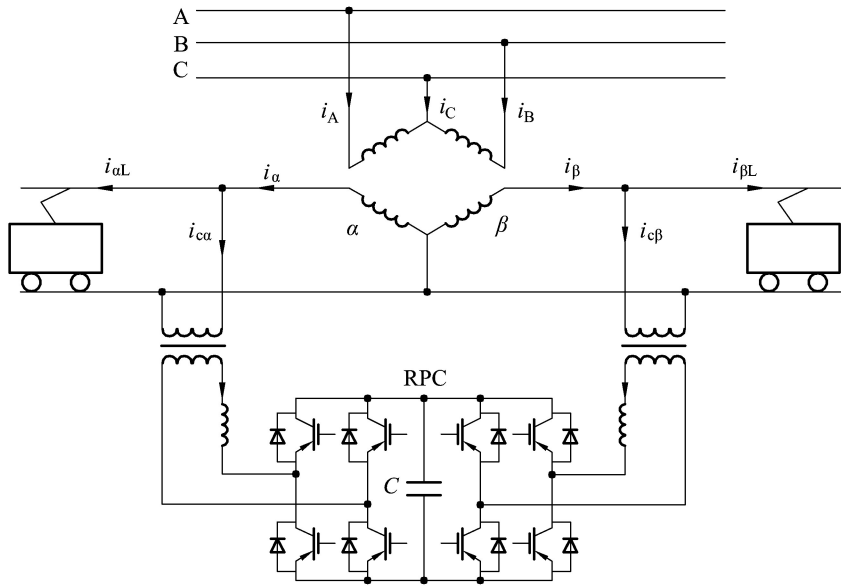


图 1-11 RPC 补偿原理图

澳大利亚的牵引供电系统中，主要采用 SVC 补偿无功和谐波，得到了良好的补偿效果，电能质量明显改善，但是其补偿代价大，存在电分相问题。

德国的电气化铁路供电系统比较特殊，采用自建电网产生 15 kV/16.7 Hz 的单相交流电供给电力机车，这种供电方式能够使整个供电线路的电压具有相同的幅值、频率和相位，不需要电分相装置。由于牵引供电系统与公共电网隔离，不会对公共电网产生不良影响。德国模式是一种较为理想的同相供电方式，具有非常明显的优势，但其 15 kV/16.7 Hz 的电压制式与其他各国的主流电压制式不兼容，且自建电网的费用昂贵，单个牵引变电所的容量小，供电臂较短。鉴于上述诸多因素，德国模式很难在其他国家推广。

我国的电气化铁路供电系统兼具日本和法国的特点，由三相-两相牵引

变压器将三相高压转换成两相 27.5 kV 电压分别接入左右供电臂,高压侧逐步由 110 kV 向 220 kV 过渡,结合 AT 供电方式,提高牵引变电所的供电能力;牵引变压器广泛采用 YNd11 接线、Vv 接线和 Scott 接线等形式,结合轮换相序的方式改善不平衡度;加装车载自动过分相装置,降低电力机车通过电分相时的操作复杂度。

全方位改善牵引供电系统,为电力机车提供一个安全、可靠、稳定的运行环境,具有非常重要的意义。电气化铁路供电系统导致的无功、谐波、电压波动和闪变等电能质量问题,以及其自身存在电分相的弊端,在当前大力发展高速化和重载化铁路运输的情况下变得更加严重。对于上述诸多问题,比较理想的综合解决方案是同相供电,并进一步实现贯通式同相供电。相对于现有的三相-两相牵引供电方式,同相供电具有多方面的突出优势。

2010 年世界上第一套基于平衡变压器和动态补偿装置(APC)的电气化铁路同相供电系统在我国成昆线眉山牵引变电所成功运用,牵引变电所内的电分相得以取消,电能质量也有了明显改善。此后动态平衡补偿装置与 YN, d11 接线变压器^[26]、阻抗匹配平衡变压器^[27]、Scott 接线变压器^[28]、Vv 接线变压器^[29]、YN, vd 接线变压器^[30]等常用牵引变压器构成的同相供电系统方案均被提出。为了保持牵引变电所和补偿装置的独立性,又进一步出现了组合式同相供电系统^[31-33],并于 2014 年在我国山西铁路综合试验段成功投入运行,基于平衡变压器和对称补偿的同相供电方案理论逐渐被完善。与此同时,电力电子技术的发展和电力开关器件耐压耐流水平的大幅度提高,为越来越多的同相供电方案创造了条件。研究更先进的电气化铁路供电方案,逐渐得到各国相关科技工作者的重视。

首先,同相供电方案可以同时缓解牵引变电所给公共电力系统带来的无功、谐波、负序等电能质量问题,克服当前各类补偿方法功能单一的缺点,使牵引供电系统更加稳定可靠,电能质量更高。

其次,同相供电能够减少电分相的个数,若实现了贯通式同相供电,则电分相装置可完全取消,电力机车电流不被切断,速度和牵引力不受损失,有利于电气化铁路的进一步高速化和重载化。贯通式同相供电方式中,相邻的牵引变电所容量可以相互支持,当某个牵引变电所出现故障时,机车可暂时从附近的其他牵引变电所取得电能,这是一种特殊的备用方式,其可靠性较高。

与此同时,基于三相-单相变换的同相供电方式可以友好接纳其他能源

的接入，如太阳能、核能、风能、水能等新型清洁能源。在当代化石能源日益短缺、环境污染亟待治理的情况下，能源必然会逐渐趋向于多元化。电气化铁路供电系统作为一种特殊的大功率负载，能够友好接纳清洁能源，将有利于保护环境，促进新能源的发展。

