

# 中国高速铁路牵引供电关键技术

钱清泉,高仕斌,何正友,陈奇志,吴积钦

(西南交通大学电气工程学院,成都 610031)

**[摘要]** 本文结合中国高铁建设和运营的经验,从高速铁路牵引供电不同层面,系统地介绍了高铁牵引供电系统的一系列关键技术。同时,就目前牵引供电系统的发展现状,展望了新型供电技术、主动运营维护、节能与效能提升、检测监测等新技术,可为中国高铁牵引供电技术的发展与应用提供指导。

**[关键词]** 高速铁路;牵引供电系统;关键技术

**[中图分类号]** U223 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2015)04-0009-12

## 1 前言

近年来,高速铁路在中国取得了快速的发展。截至2014年9月,中国已投运高铁里程达到11 132 km,占世界高速铁路运营里程的一半。中国高速铁路的发展,特别是我国仅用几年的时间就超过了发达国家几十年高速铁路里程的总和,这进一步证明了中国高速铁路综合技术自身的优越性。在牵引供电系统方面<sup>[1]</sup>,中国经过多年运营,已经形成自己的标准技术体系,部分领域还处于领先地位,但随着高速电气化铁路和客运专线供电管理标准的提高,对供电设备安全、可靠性也提出更高要求,就目前中国电气化铁路电气设备管理方式来说,要满足其标准要求,将花费大量的运行维护成本。如何确保高速度、大规模、大功率、高密度的牵引供电系统高效、安全、可靠性运行,是中国高速铁路快速发展的迫切问题。

随着高速铁路在中国的发展应用,中国在高速铁路供变电技术、弓网关系、综合自动化、供电安全检测监测等关键技术方面已经取得了突出的成果。目前中国的高速铁路牵引供电系统已经能够满足高速运行中的弓网关系,最小行车间隔可

达3 min,最大编组为16辆,行车组织实现了“高速度、高密度、重负荷”行车编组;高速列车功率需求最高功率可达24 MW,恒功率持续时间长;大量采用交直交传动系统,动车组谐波含量少,频谱较宽,功率因数高。高铁牵引负荷的特殊性和牵引网络的复杂性,给牵引供电系统的服役安全和可靠性带来了新的课题,系统地梳理和研究适合于高速铁路的牵引供电基础理论和关键技术是迫切需要的。基于此,本文从牵引供电系统的供变电技术、保护监控技术、弓网关系、供电检测监测等部分和一系列新技术等方面,分析了高速铁路牵引供电系统最新理论技术,给出了适合中国的高铁牵引供电系统理论体系。

## 2 高速铁路牵引供电系统概述

中国高速铁路主要由三相220 kV电网供电(西北330 kV,特殊地区110 kV)。牵引变压器将三相电压转变为两相 $2 \times 27.5$  kV分别为左右供电臂供电,自耦变压器(AT)的两个接头分别接:接触线27.5 kV,正馈线-27.5 kV,而中性线接地并与钢轨相连。由于牵引网采用全并联AT供电方式,沿线平均10~15 km需要设置一台AT于AT所和分区

**[收稿日期]** 2015-01-05

**[作者简介]** 钱清泉,1936年出生,男,江苏丹阳市人,中国工程院院士,西南交通大学教授,长期从事铁道电气化与自动化领域的科研与教学工作

所。在复线 $2 \times 27.5$  kV供电系统的基础上,在AT所和分区所,横连线将上下行同类线路进行并联连

接。其结构示意图如图1所示。

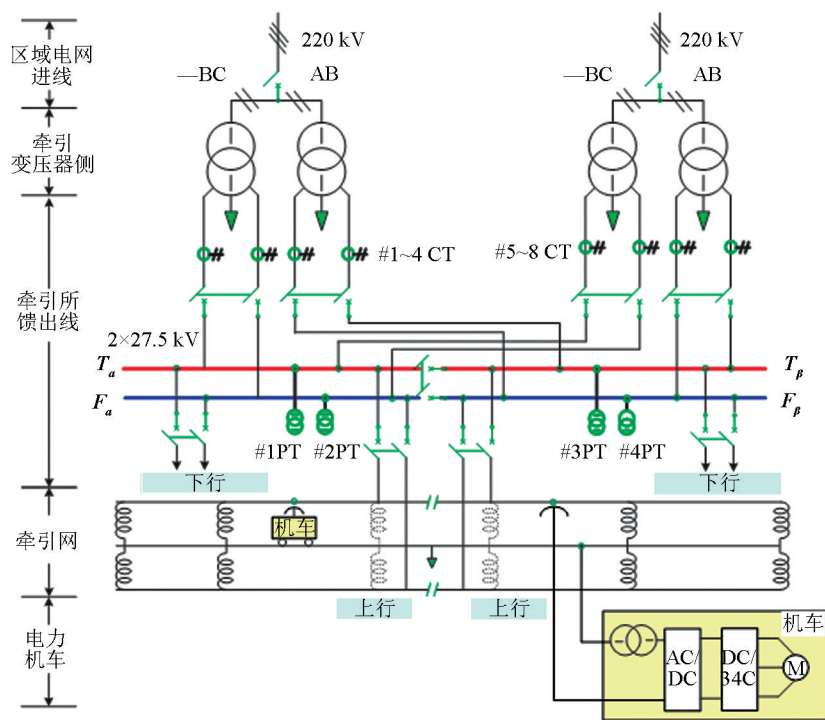


图1 高速铁路牵引供电系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of high-speed railway traction power supply system

### 2.1 全并联AT供电系统

全并联AT供电系统(见图2)广泛应用于高速铁路中,全并联AT网是在复线AT网的基础上将上、下行线路在AT处通过横连线进行并联连接,上下

行共用自耦变压器。即在原有AT供电方式中,将所有AT所处的上下行接触网、正馈线和钢轨并联连接,并在变电所出口处,上下行线路采用同一馈线供电。

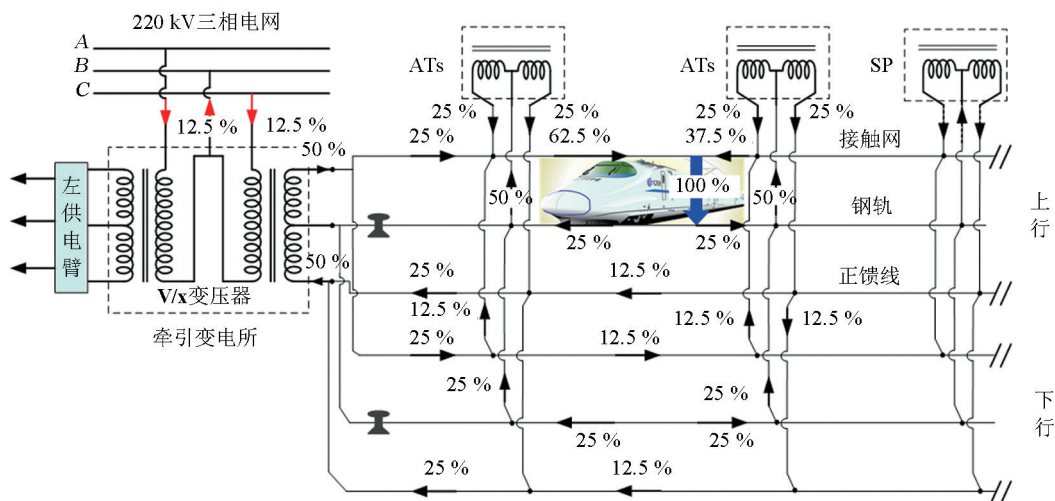


图2 全并联AT供电系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of all parallel AT power supply system

图2为全并联AT供电系统的电流分布特性,沿线上的AT将经过钢轨的电流平均分为四部分到上

下行正馈线和接触网。正馈线和接触网在电气上具有较强的对称性,因此上行线路和下行线路的电

流分布也较为相似。全并联AT供电系统的电流分布可以进一步降低线路中的电流、电压损失和通信线路的电磁干扰。其供电性能优于单线AT供电系统和复线AT供电系统,提高了牵引网的传输线路长度,可以减少线路中的牵引变电所的数量。因此,全并联AT供电方式广泛应用于中国高速铁路。

## 2.2 高速铁路牵引变电所关键设备

高速铁路牵引变电所中最为重要的关键设备是牵引变压器<sup>[2]</sup>。目前中国高铁主要采用的主变压器接线型式有单相V/x接线、中点抽出式Scott接线。下面分别分析两种变压接线和工作原理。

### 2.2.1 单相V/x接线牵引变压器

V/x变压器包含两个单相三绕组的变压器,分别为左右AT牵引网(供电臂)供电。二次侧绕组中性点抽出并接地,使得两个绕组电压为 $\pm 27.5$  kV,分别与T母线和F母线相连,形成AT供电方式,省去了牵引变电所出口处的AT。V/x变压器具有较高的容量利用率和简单的接线方式,因此在中国高铁牵引变电所中应用最为广泛。图3给出了V/x牵引变压器的电路示意图及 $\alpha$ 供电臂的等效电路图。

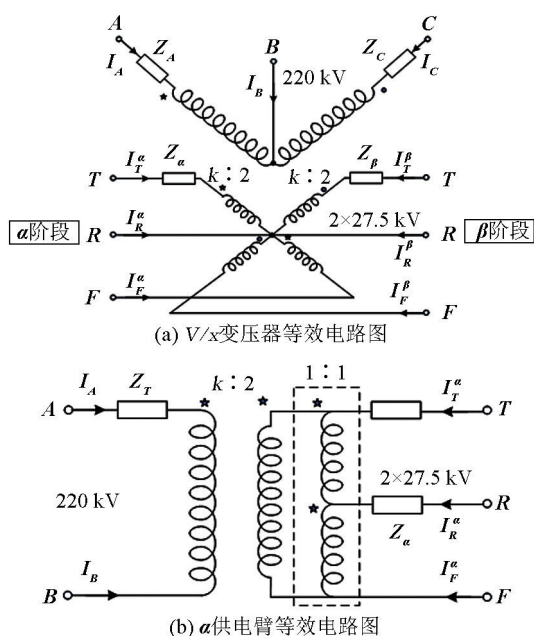


图3 V/x牵引变压器电路模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the circuit model of V/x traction transformer

### 2.2.2 中性点抽出式Scott牵引变压器

中性点抽出式Scott变压器的二次侧与V/x变压器相似,均从二次侧中性点抽出并接地,同时提

供 $\pm 27.5$  kV的电压分别为T线、F线。220 kV中性点抽出式Scott变压器在国际上首次应用于杭甬客专的上虞北牵引变电所。Scott变压器是一种应用较为广泛的平衡变压器,可有效地降低牵引供电系统对外部电网的功率不平衡等电能质量问题。其电路结构如图4所示。

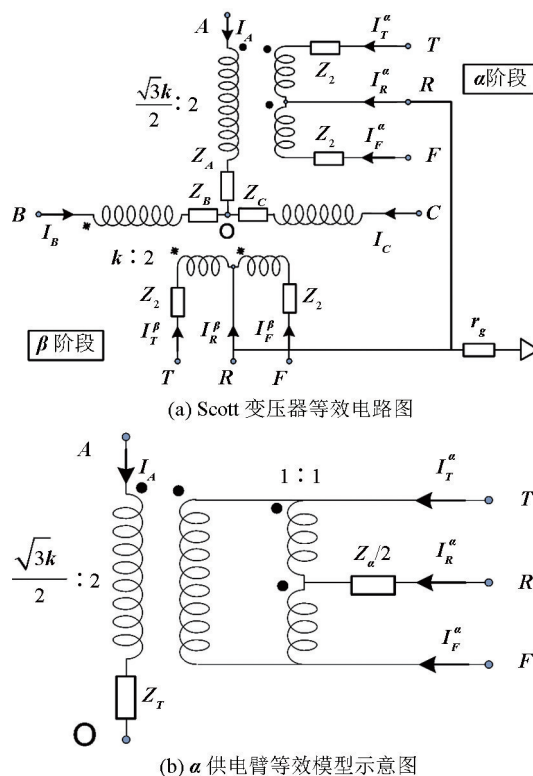


图4 Scott变压器接线与等效模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the circuit model of Scott traction transformer

## 3 弓网关系理论

受电弓与接触网在材料组合、电气和机械的耦合联系所组成的系统(以下称弓网系统)是高速列车获取电能的唯一方式。弓网相互作用决定了列车受电的可靠性和电能品质,这依赖于受电弓和接触网的设计方案及大量参数的选取。弓网系统<sup>[3]</sup>的电接触性能、动态性能、材料接口及几何相互作用是弓与网相互作用的重要内容,也是限制列车实现更高速度的重要因素。

### 3.1 弓网电接触性能

弓网接触区域在微观上总是凹凸不平的,在集流过程中只有少数的“点(或小的接触面)”发生了接触。这些实际接触的“点”是受电弓与接触网之间联系的纽带,通常称这些发生接触的“点”为“导电斑点”。导电斑点承载着列车所需的电流,也导

致弓网接触电阻的产生。

弓网之间的静态接触电阻可由式(1)给出

$$R_c = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4} \cdot \sqrt{\frac{\pi H}{F}} \quad (1)$$

式(1)中:  $R_c$  为接触电阻,  $\Omega$ ;  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  分别为滑板与接触线材料电阻率,  $\Omega\text{mm}^2/\text{mm}$ ;  $F$  为滑板与接触线间的接触力,  $\text{N}$ ;  $H$  为滑板与接触线中较软材料的接触硬度,  $\text{N}/\text{mm}^2$ 。

根据电位—温度理论,弓网接触点的静态接触温升与通过接触点的电流、接触电阻有以下函数关系

$$\theta = \frac{U^2}{8k} = \frac{(IR_c)^2}{8k} = \frac{\pi H(\rho_1 + \rho_2)^2}{128k} \cdot \frac{I^2}{F} \quad (^\circ\text{C}) \quad (2)$$

式(2)中:  $\theta$  为弓网接触点超出接触区的温度(温升);  $U$  为接触压降,  $\text{V}$  ( $U=IR$ );  $I$  为通过接触点的电流,  $\text{A}$ ;  $k$  为滑板与接触线材料的热导率与电阻率乘积的平均值。

温升是限制停车状态时弓网系统集成电能力的重要因素,其与弓网材料组合、弓网接触力大小等密切相关。当弓网系统材料及载流量确定后,静态接触温升与弓网接触力成反比。滑动过程中,接触力过大,会带来无法接受的机械磨损和抬升;接触力过小或为零,电气损耗增加,并会产生电弧。电弧能维持弓网系统的电气接触,却会带来噪声与电磁干扰。接触力成为评估弓网接触质量的重要指标,而接触力的动态范围是由弓网动态性能决定的。

### 3.2 弓网动态性能

接触力是影响弓网接触质量的主要因素之一,接触力除了受电弓的静态抬升力外,还有运行中气流作用产生的空气动力,以及弓网动态相互作用产生的惯性力。弓网接触力的表达式为

$$F_c = F_s + kV^2 \pm F_m \pm M_l a \quad (3)$$

式(3)中:  $F_c$  为接触力;  $F_s$  为受电弓静态抬升力;  $kV^2$  为空气动力,与速度的平方成正比,系数  $k$  与受电弓参数有关;  $M_l a$  表示弓网动态相互作用产生的惯性力,  $M_l$  为受电弓的归算质量,  $a$  为接触线处受电弓的振动加速度;  $F_m$  为受电弓铰接处的摩擦力。为使弓网接触力控制在合理的范围内,需对高速弓网系统进行科学的设计和匹配。

国外高速接触网悬挂类型基本上可归为三类:以日本为代表的复链型悬挂、以法国为代表的简单链型悬挂和以德国为代表的弹性链型悬挂。由于列车运行速度的提高,弓网之间振动加剧,接触线

抬升量波动增大。结合三种接触网悬挂类型特性和中国高铁受电弓的特征,中国接触网主要以简单链型悬挂和弹性链型悬挂为主,目前对于 200 ~ 350 km/h 速度段内二者均能满足列车高速受流的要求。为改善受电弓的动态跟随特性,减少离线和拉弧,达到良好的跟随性,主动控制受电弓的使用改善了弓网间的动态匹配特性。主动控制受电弓能快速响应高度变化和振动,有效控制弓网接触力的动态范围,也能将接触线的抬升量控制在允许范围内。

### 3.3 弓网材料接口

弓网系统的载流量及运行寿命很大程度上依赖于滑板与接触线的材料组合。高速列车运行速度提高,要求提高接触网的弹性均匀度及波动传播速度,这就要求增大接触线的抗拉应力。为满足这一需要,时速超过 300 km/h 的接触网要求选用高抗拉应力的接触线,铜镁合金接触线为其中的典型代表,但铜镁合金接触线导电性能却相当于同等截面铜银合金接触线的 60%。

在现行滑板材料中,碳素材料密度最小,碳滑板已被证明特别适用于铜及铜合金接触线。碳滑板导电性能差,机械强度低,但其质量轻、自润滑性能好,能满足高速弓网系统的动态需要和延长接触线使用寿命的要求;导电性能虽差,但其耐弧性能得到了提高。使用碳滑板时,接触温升对接触线的热侵蚀不容忽视,应避免引起接触线的局部温度超过允许限度。

### 3.4 弓网相互作用性能评估

表1为弓网接触质量评价表。

表1 弓网接触质量评价表

Table 1 Pantograph catenary current collection quality evaluation table

评价原则	目标定义	评价参数
运行可靠性	受电弓无障碍运行	弓网几何相互作用参数、定位器坡度
接触质量	传输必需的功率	弓网接触力、燃弧时间、温升、接触线抬升
运行寿命	滑板和接触线的磨损	接触线磨损
影响	对环境的干扰	电弧

结合表1可知,可靠传输电能是弓网系统的根本目的,弓网接触力是高速弓网动态性能的核心参数。如何控制弓网接触力的动态范围是列车高速受流的关键,弓网系统达到期望的寿命也是重点考

虑的因素。

#### 4 全并联AT保护与故障定位原理

为保障牵引供电系统安全可靠地向动车组供给电能,供电系统的保护装置发挥了极其重要的作用。在正常运行状态下,保护装置应满足列车运行的要求<sup>[4]</sup>;当牵引网发生故障时,保护装置应有选择地迅速切除故障。同时,根据故障后的相关电流电压信息,应用相关故障定位算法,实现故障的精确定位,指导运营维护单位迅速、准确地找到故障位置,使牵引系统迅速恢复供电,减少因停电带来的损失,保证供电的可靠性。

牵引网中装设的保护大体分为3种:主变压器保护,馈线保护,并联电容器组保护。在全并联AT

供电方式下,整个牵引网的电路拓扑结构变得更加复杂,其故障特性也与常规铁路牵引网有很大的不同。高速铁路主变压器保护和并联电容器组保护与常规相同,故不作详细介绍。

##### 4.1 牵引网故障隔离过程

从图5可看出,当牵引网任一点发生故障时(假设 $k$ 点故障),从电源到故障点将会有多个故障电流回路。此时,继电保护装置将变电所馈线断路器1QF、2QF跳开以切除故障。为了将故障隔离在最小范围,在1QF、2QF跳开后,断路器3QF、4QF、5QF、6QF也要跳开以将上下行解列。在3QF~6QF跳开后,1QF、2QF的重合闸分别动作,以恢复非故障线路的供电或消除故障线路上的瞬时电弧故障。

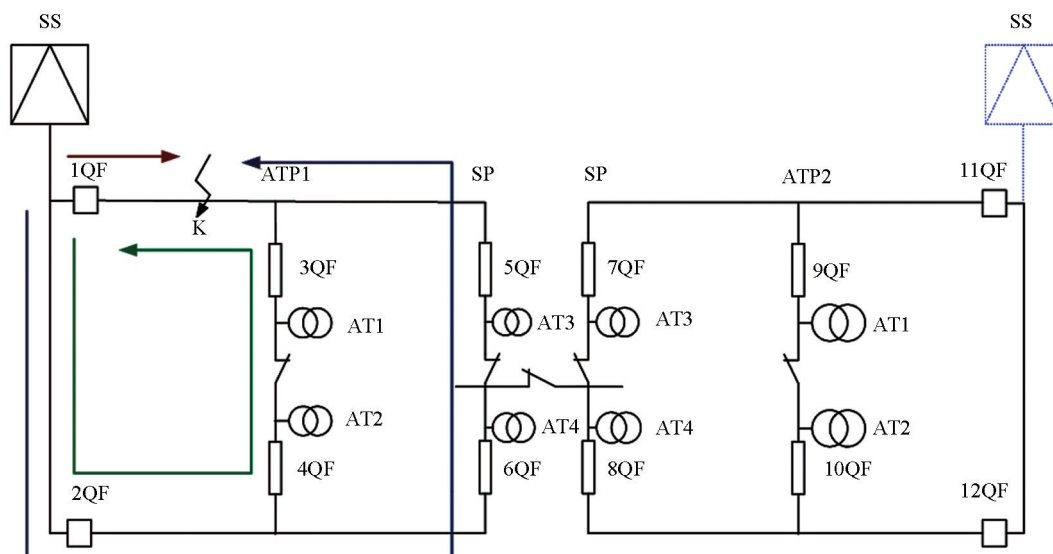


图5 故障隔离示意图

Fig. 5 Schematic diagram of fault isolation

当某个变电所电源失效时,相邻变电所要越过分区所向其供电。相邻供电区间的开关设备进行合闸操作将分区相邻的供电臂接通,由相邻牵引变电所进行临时供电。

在越区供电下,供电变电所到分区所再故障时仍需要跳开变电所馈线上1QF、2QF,而分区所到失效变电所故障时仅需要跳开分区所馈线断路器7QF、8QF,隔离失效变电所供电区的故障线路,再进行重合闸等操作。越区供电提高了牵引网供电的持续可靠性,避免了因故障引起供电的中断。但越区供电增加了供电变电所的负担,势必会进一步地降低线路的供电能力,应及时排除故障恢复失效

变电所的供电。

牵引网故障隔离的主要任务是在故障发生时能迅速跳开变电所出口断路器,将上、下行解列从而减少故障范围。变电所出口断路器重合闸操作,可以排除60%~90%的瞬时性故障。在发生永久性故障时能快速定位故障点,及时隔离,将事故范围降到最低。

##### 4.2 牵引网馈线保护

根据运营统计,牵引网馈线故障中绝大多数是发生线路短路故障。由于AT网电流与电压的非线性关系,馈线保护以距离保护为主保护,并以电流速断保护作为距离保护的辅助保护。为消除馈线

断线接地故障,可增设电流增量保护。本文重点介绍下自适应阻抗保护。

高速牵引网大量励磁涌电流以及再生制动电流反向流动,使传统的距离保护易误动或者拒动。自适应阻抗保护(见图6)可根据电流中谐波含量的变化自动调节测量阻抗和阻抗元件动作边界达到可靠的动作。这种保护较传统阻抗保护在牵引网中的应用更为可靠。

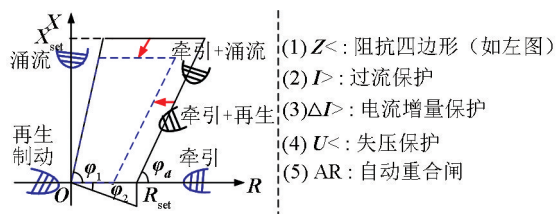


图6 自适应阻抗继电器动作特性  
Fig. 6 Schematic diagram of adaptive impedance relay characteristic  
注:  $\varphi_d$  为线路阻抗角

定义综合谐波含量为

$$K_{\Sigma} = \frac{I_2 + I_3 + I_5 + I_7}{I_1} \quad (4)$$

式(4)中:  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $I_5$ 、 $I_7$  分别为测量电流中的基波、二、三、五、七次谐波电流。

如图6新的动作特性表达式为

$$\left. \begin{aligned} X \cot \varphi_d - R_D \leq R \leq X \cot \varphi_d + \frac{1}{1+K_{\Sigma}} R_{zd} \\ -X_D \leq X \leq \frac{1}{1+K_{\Sigma}} X_{zd} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由于高速铁路负荷综合谐波含量较小,阻抗元件的动作边界的收缩范围不大,其抗拒动的办法可采用二次谐波制动的四边形距离保护。如抗拒动e-f区域,边界的整定应满足高速铁路的实际需要。

在牵引网正常供电与越区供电时,上下行的保护配置是不一样的。因此,对正常供电和越区供电时分别配置了不同的保护功能元件,方案如表2、表3所示。

表2 正常供电时馈线保护配置方案

Table 2 Normal power supply feeder protection configuration scheme

所别	保护配置	自动装置
牵引变电所	一段阻抗保护 一段过电流保护 电流增量保护	一次自动重合闸
AT分区所	失压保护	检有压自动重合闸
AT所	失压保护	检有压自动重合闸

表3 越区供电情况下馈线保护方案

Table 3 Trans regional power supply feeder protection configuration scheme

所别	保护配置	自动装置
牵引变电所	二段阻抗保护 二段过电流保护 电流增量保护	一次自动重合闸
AT分区所	一段阻抗保护 一段过电流保护 电流增量保护	检有压自动重合闸
AT所	失压保护	检有压自动重合闸

此外,以供电臂为单元的协同保护策略,实现变电所、AT所、分区所分散协同保护控制策略,从而解决继电保护选择性与快速性的矛盾,实现了牵引网故障区段的快速隔离和供电恢复,详细策略如图7所示。

### 4.3 故障测距

当牵引网发生瞬时性故障,应尽快消除隐患,防止发展成为永久性故障;当牵引网发生永久性故障后,应尽快找到故障点排除故障和恢复供电。因此,全并联AT供电牵引网的故障点定位是维护牵引供电系统安全运行的重要技术措施。

当牵引网运行时发生故障,其故障阻抗为鞍形曲线,只能采用AT中性点吸上电流比等原理测距。而在重合闸重合于故障时,牵引网为直供状态,此时的故障阻抗与故障距离成单调对应关系,可以采用电抗法测距。以下对AT中性点吸上电流比测距原理做简要介绍(见图8)。

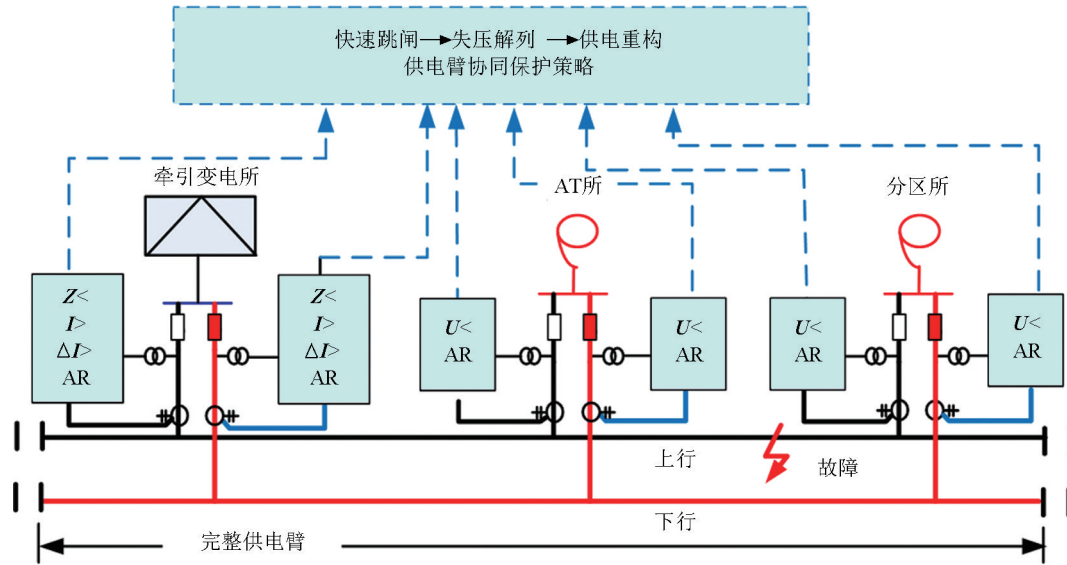


图7 全并联AT网协同保护原理

Fig. 7 Schematic diagram of all parallel AT network collaborative protection principle

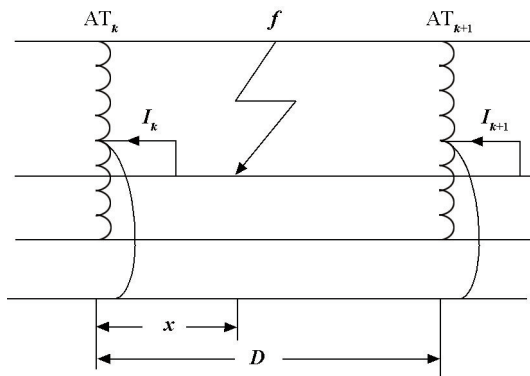


图8 AT中性点吸上电流比测距原理图

Fig. 8 Schematic diagram of AT neutral current ratios ranging principle

在图8中假设AT为理想变压器、钢轨对地全绝缘,且沿线路阻抗参数均匀分布。则当故障发生在第 $k$ 至第 $k+1$ 个AT之间时,有

$$l = l_k + \frac{I_{k+1}}{I_k + I_{k+1}} D \quad (6)$$

式(6)中: $l_k$ 为第 $k$ 个AT距变电所的距离,km; $I_k$ 、 $I_{k+1}$ 为第 $k$ 个和第 $k+1$ 个AT中性点吸上电流,A; $D$ 为第 $k$ 至第 $k+1$ 个AT间距,km。

考虑AT漏抗及钢轨对地泄漏,式(6)可以写成

$$l = l_k + \frac{D}{1 - (Q_1 + Q_2)} \left( \frac{I_{k+1}}{I_k + I_{k+1}} - Q_1 \right) \quad (7)$$

式(7)中: $Q_1$ 、 $Q_2$ 为与AT之间的距离大小、钢轨漏导、AT漏抗、馈线长短、钢轨连接导电情况等因素有关的系数,一般取值为0.05~0.1。

AT中性点吸上电流比测距法在全并联AT网保护中发挥更重要的作用,对T-R、F-R短路故障有很好的测量效果,但由于其不能对天窗运行和发生T-F故障进行测距,有一定的局限性,但仍能满足工程需要。

## 5 高速铁路综合监控(SCADA)技术

高速铁路四大核心系统之一的供电系统为高速动车组提供动力电源,为通信信号等运行控制系统提供工作电源,是高速铁路安全可靠运行必不可少的支撑系统。高速铁路综合SCADA系统<sup>[5]</sup>包括:设置在铁路沿线供电站中的被控站系统、设置在各个铁路局的调度系统,以及连接被控站和调度系统的远程通信网络三大部分,是将先进的计算机技术、信息通信技术、智能分析决策技术、自动控制技术、电力电子技术和传感测量技术高度集成,远程实现对全国范围内高速铁路供电设备运行工况的自动数据采集和监测控制等基本功能,实现海量数据的故障分析与辅助决策、供电运行调度指挥、与高铁其他运行控制系统的协同互动等高级功能。

高铁供电综合监控系统包括调度系统和被控站系统,如图9所示。调度系统部署于铁道部调度中心和各铁路局区域调度所,实现高铁供电系统的调度指挥、监视控制、故障诊断及可靠性评估;被控站系统含牵引变电所自动化、电力变/配电所自动化及远程终端(RTU)等技术装备,安装于牵引变电所、

AT所、分区所、电力变/配电所、箱式变电所,实现对 供电系统的保护、控制、监测、故障测距等功能。

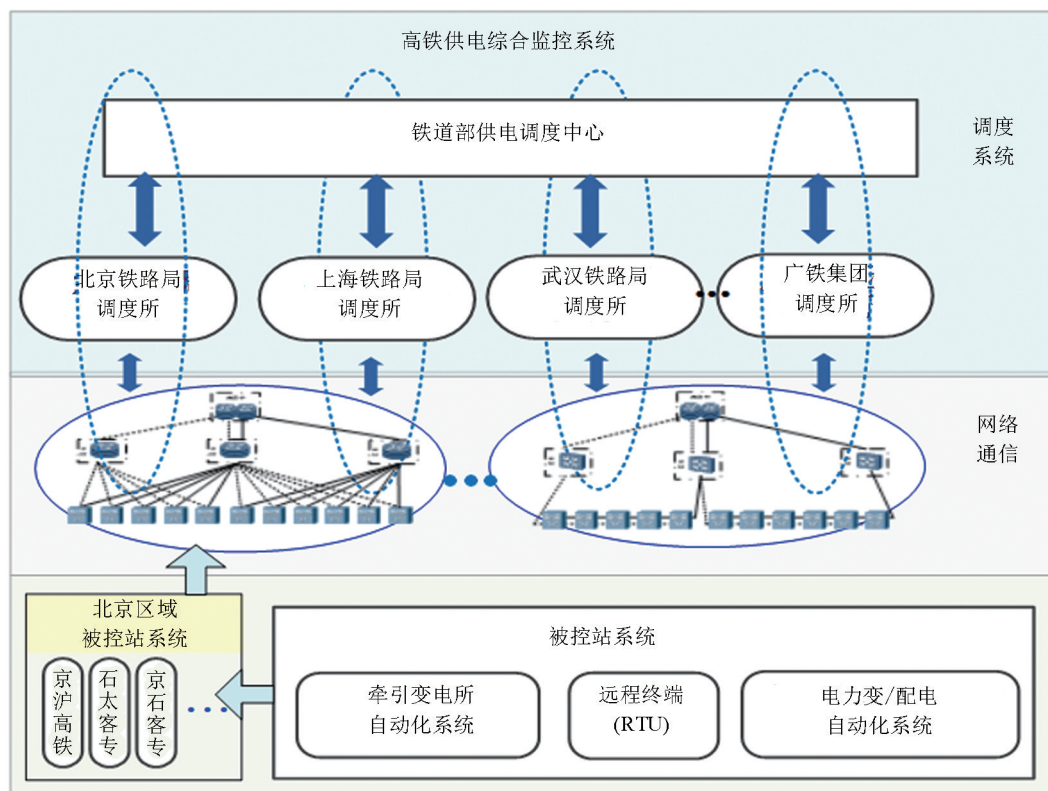


图9 高速铁路供电自动化系统的体系结构

Fig. 9 System structure of high-speed railway power supply automation system

传统铁路供电综合监控系统集成度低、规模小、监控面窄、功能简单,国外系统不满足中国的调度模式和功能需求,二者都难以适应中国高铁供电系统面临的监控容量“大”、处理信息“多”、响应速度“快”和可靠性要求“高”的巨大挑战。基于此,从理论上发展了供电综合监控系统调度计算、保护控制与可靠性分析等理论;建立了“统一规划、统一标准、统一调度、统一平台”(简称“四统一”)的技术体系;突破系列关键技术,研制了高铁供电综合监控成套技术装备。依据上述技术路线,建立了全国统一的高速铁路综合SCADA系统体系架构,其外部接口示意如图10所示。

高速铁路牵引供电SCADA技术的应用,提高了牵引供电的整体功能和管理水平。牵引供电SCADA系统在高速铁路牵引供电行业的应用是向着标准化、智能化、通用、可靠的方向发展。应该说,采用具有高可靠性、功能强大且自动化程度相当高的牵引变电所SCADA系统,将是国内高速铁路自动化技术发展的必然趋势。

## 6 高速铁路供电安全检测监测系统

高速铁路的快速发展和运营品质的需求,对于牵引供电系统供电设备的安全运行提出了更高的要求。为确保高速铁路动车组<sup>[6]</sup>运营秩序,提高动车组的供电安全性、可靠性,构建高速铁路供电安全检测监测系统(6C系统)。其目的是对高速铁路的牵引供电系统进行全方位、全覆盖的综合检测监测,主要功能包括对高速接触网悬挂参数和弓网运行参数的检测,对接触网悬挂、腕臂结构、附属线索和零部件的检测,对接触网参数的实时检测,对动车组受电弓滑板状态及接触网特殊断面和地点的实时监测,对接触网运行参数和供电设备参数的实时在线检测等。

### 6.1 系统总体组成

6C系统(见图11)包括高速弓网综合检测装置、接触网安全巡检装置、车载接触网运行状态检测装置、接触网悬挂状态检测监测装置、受电弓滑板监测装置、接触网及供电设备地面监测装置。



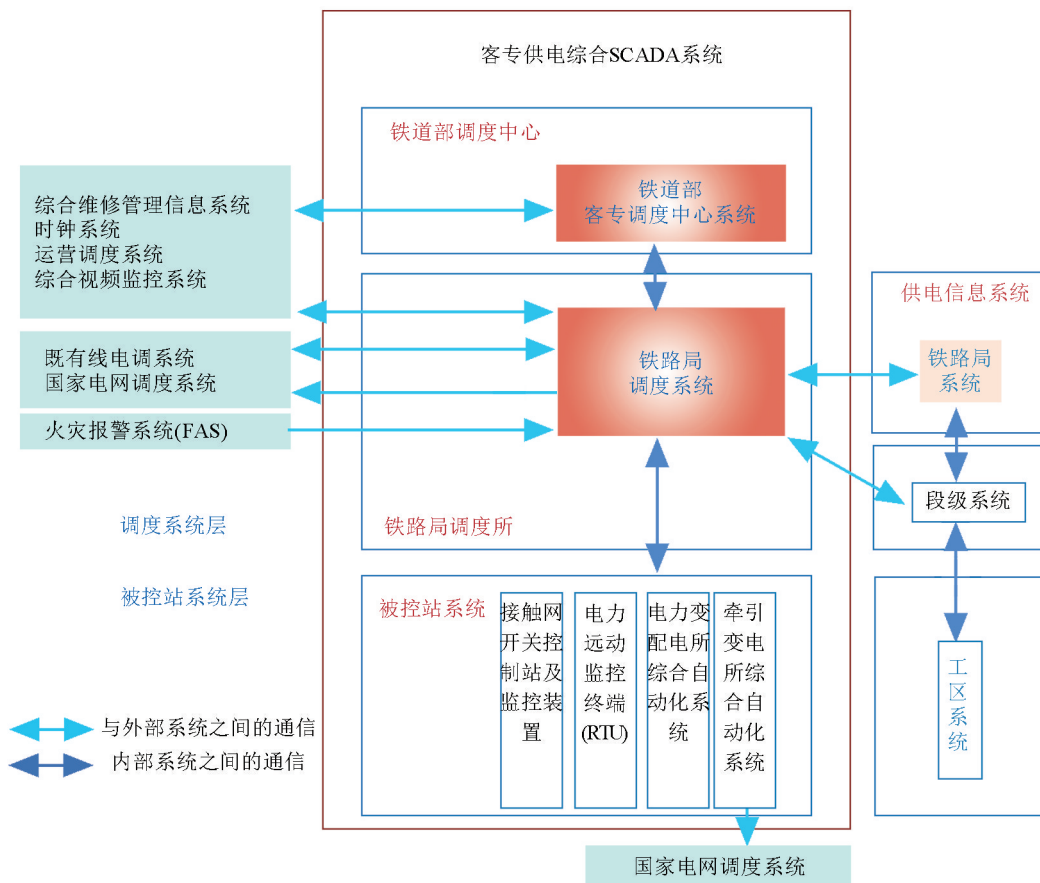


图 10 高速铁路综合 SCADA 系统体系外部接口示意图

Fig. 10 Schematic diagram of high speed railway comprehensive SCADA system external interface

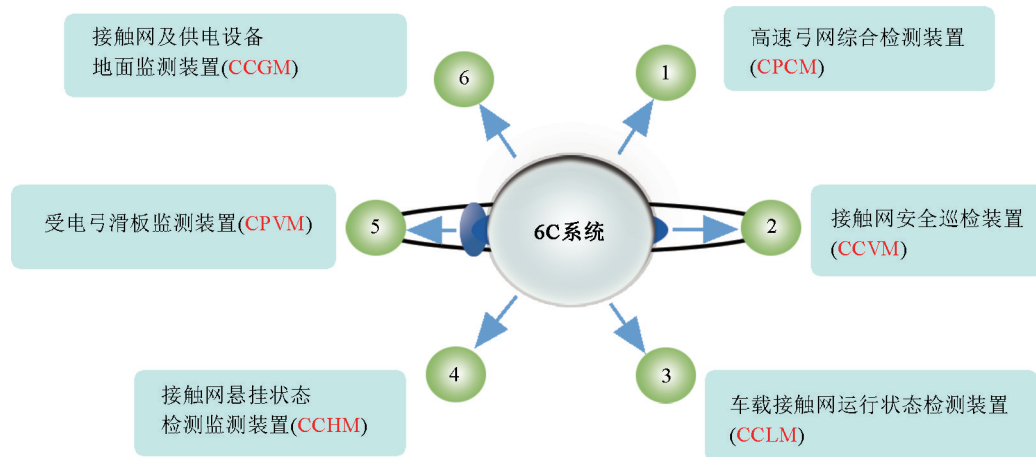


图 11 6C 系统

Fig. 11 6C system

6C 系统是建成对牵引供电和接触网设备进行全面检测与监测的综合系统,为高速铁路供电设备的安全运行、运行状态和参数的综合分析、设备的维修提供技术依据。6C 系统总体架构如图 12 所示。

### 6.1.1 高速弓网综合检测装置(CPCM)

高速弓网综合检测装置为在综合检测列车安装的车载式接触网检测设备,随着综合检测列车在高速铁路上巡回检测运行,对高速铁路接触网的参数和状态、高速弓网关系进行综合性检测。

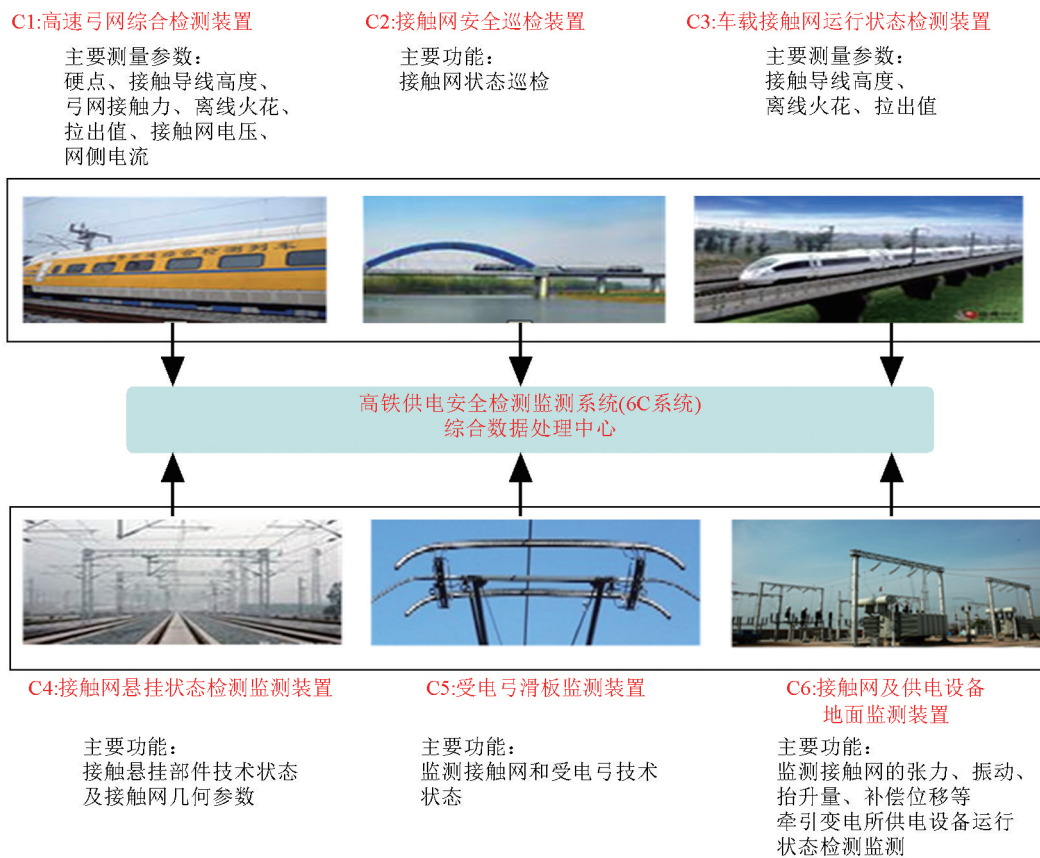


图 12 6C 系统总体架构图  
Fig. 12 The overall framework of 6C system

### 6.1.2 接触网安全巡检装置(C2VM)

接触网安全巡检装置为在运营动车组上临时安装的检测设备,对接触网的状态进行检测,统计分析接触悬挂部件技术状态,指导接触网状态维修。

### 6.1.3 车载接触网运行状态检测装置(CCLM)

在运营的动车组加装车载接触网运行状态检测装置,随着运营动车组的运行监测接触网的运行状态,以实现高速铁路接触网状态的全覆盖、全天候的动态检测。

### 6.1.4 接触网悬挂状态检测监测装置(CCHM)

接触网悬挂状态检测监测装置安装在接触网作业车或专用车辆上,周期性地对接触网悬挂系统的零部件及接触网几何参数,特别是腕臂区域的零部件进行高分辨率成像检测,在检测数据的自动识别与分析的基础上,形成维修建议,指导接触网检修。

### 6.1.5 受电弓滑板监测装置(CPVM)

在高速铁路的车站、动车组出入库区域、车站

咽喉区加装受电弓滑板监测装置,监测动车组受电弓滑板的技术状态,及时发现运营动车组受电弓滑板的异常状态,指导故障消缺,确保接触网和受电弓的运行状态良好。

### 6.1.6 接触网及供电设备地面监测装置(CCGM)

接触网及供电设备地面监测装置为在接触网特殊断面(如定位点、隧道出入口)及牵引变电所设置的监测设备,监测接触网张力、振动、抬升量、线索温度、补偿位移;供电设备的绝缘状态、电缆头温度等参数,指导接触网及供电设备的维修。

## 6.2 系统功能

6C 系统的主要功能是对高速铁路的牵引供电系统进行全方位、全覆盖的综合检测监测,主要包括对高速接触网悬挂参数和弓网运行参数的等速检测(C1 装置)、在运营的动车组上对接触网的悬挂部分进行周期性图像采集和分析(C2 装置)、在运营的动车组上对接触网参数及技术状态的在线检测(C3 装置)、对接触网悬挂、腕臂结构、附属线索和零部件的高清图像检测(C4 装置)、对动车组受电弓滑

板状态的实时监测(C5装置)、对接触网运行参数和供电设备参数的实时在线检测(C6装置)。

在前期各种检测设备运行基础上,通过完善功能、技术集成,形成完整的系统性、平台化的6C系统。

6C系统中的中央处理平台对各装置进行数据集中、信息共享,并通过数据库进行综合分析。各装置必须遵照统一的6C系统通信协议,及其定义的帧格式和数据编码,与中央处理平台通信。

6C系统具备的系统功能包括:检测监测功能、综合诊断功能、数据存储功能、视频显示功能和数据通信功能。

### 6.3 数据中心与网路通道

在国家铁路局建立高速铁路供电安全检测监测系统综合数据处理中心,在地方各铁路局建立数据处理中心,为整个高速铁路供电安全检测监测系统提供数据处理、信息展示、数据交换的平台,完成对高速铁路供电设备综合检测监测数据的集中存储和统计、数据融合和挖掘、预测预警,以及应急指挥等功能,为调度管理及供电运营维护人员提供维修、抢修的作业依据。

在国家铁路局、地方各铁路局、各基层站段及

车间设立用户终端,供电系统管理、检修人员通过终端上传与下载浏览各类检测监测数据,以满足不同供电部门对设备进行管理维修的需求。

## 7 需要进一步发展的关键技术

为了满足“高速度、大功率、高密度、高可靠性”的运行要求,高速和重载铁路牵引供电系统应具有高效率和高可靠性、节约供电资源、降低运营成本、消除供电死区、提高列车通过能力等特点,有必要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。

### 7.1 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<sup>[7]</sup>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。同相供电包括基于既有牵引变压器的技术方案和贯通供电两种,图13为基于YN,vd平衡变压器实现同相供电技术。

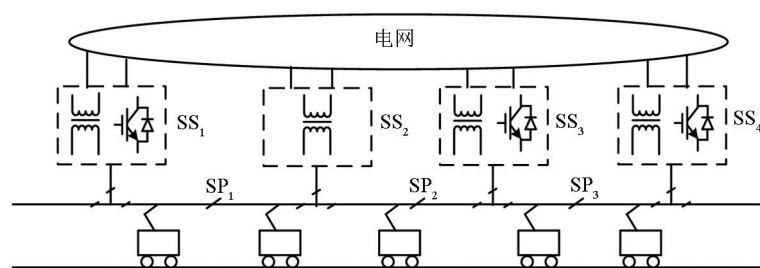


图13 同相供电系统示意图

Fig. 13 Schematic diagram of cophase traction power supply system

### 7.2 弓网理论及匹配关系

在持续350 km/h及以上高速铁路弓网中,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,即能否可靠的受流、减摩耐磨性、抑制离线电弧和对环境的适应性,这也是在350 km/h及以上高速铁路弓网匹配中要解决的关键问题。

### 7.3 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将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。

### 7.4 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,这就需要建立一个协调、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。

### 7.5 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,如何能够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,是需要利用超大规模 SCADA 系统技术来解决这一现实问题。

### 7.6 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,具有非常重要的理论与现实意义。

上述大量新技术的应用会给高速铁路牵引供电的发展注入新的活力,新型同相供电技术,智能化牵引供电等技术的应用将提高高速铁路牵引供电的运行可靠性。目前西南交通大学已经开始了更高速度的试验平台建设和关键技术研究。

## 8 结语

高速铁路牵引供电关键技术的研究是中国高

速铁路发展的可靠保障,该技术体系不仅包括外部电源、弓网、车网间相互作用联系机理,而且包含牵引网对外界的电磁干扰等。本文从牵引供电系统的供变电技术、弓网受流、保护系统、综合监控、供电检测监测等方面进行了整理分析,对中国高速铁路所用的关键技术进行了分析和阐述,并提出了一些急需进一步推动发展的关键技术,可为中国高速铁路的发展提供一定的指导依据,期望能够抛砖引玉,引起同仁们的共同关注。

### 参考文献

- [1] 曹建猷. 电气化铁道供电系统[M]. 北京:中国铁道出版社, 1983.
- [2] 谭秀炳. 交流电气化铁道牵引供电系统[M]. 成都:西南交通大学出版社,2007.
- [3] 吴积钦. 弓网系统电弧的产生及其影响[J]. 电气化铁道, 2008(2):27-29.
- [4] 高仕斌. 客运专线牵引自动化[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2010.
- [5] 陈奇志. 铁路供电调度自动化与信息化[M]. 北京:中国铁道出版社,2013.
- [6] 铁道科学研究院高速铁路技术研究总体组. 高速铁路技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2005.
- [7] 李群湛. 论新一代牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报,2014(8):559-568.

# Study of China high-speed railway traction power supply key technology

Qian Qingquan, Gao Shibin, He Zhengyou, Chen Qizhi, Wu Jiqin

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**[Abstract]** The theoretical analysis and key technologies for high-speed railway(HSR) TPSS are needed to be studied. Firstly, a series of key basic theories and technologies of high-speed railway TPSS are described in this paper. Meanwhile, on the present development situation of traction power supply system, the new technologies are prospect such as the new power supply technology, active operation and maintenance, energy saving and improve the efficiency of energy utilization and the detection and monitoring technology. This will provide guidance for the development and application of China high-speed rail traction power supply technology.

**[Key words]** high-speed railway; traction power supply system; key technology