

高速铁路管理人员和专业技术人员培训教材

● 科普教材

高速铁路牵引供电 知识读本

◎ 中国铁路总公司

GAOSU TIELU
QIANYIN GONGDIAN
ZHISHI DUBEN

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高速铁路管理人员和专业技术人员培训教材

科普教材

高速铁路牵引供电 知识读本

中国铁路总公司

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书为中国铁路总公司组织编写的高速铁路管理人员和专业技术人员培训教材之一,是供电专业科普教材。全书共分六章,主要内容包括:高速铁路牵引供电概述、高速铁路牵引变电所结构及主要供电设备、高速铁路牵引供电系统自动化技术、高速铁路接触网系统、高速铁路供电设备可靠性的影响因素及保障措施、高速铁路牵引供电与相关专业的接口。

本书适用于高速铁路供电专业技术人员培训,也可供高速铁路相关专业的管理人员和专业技术人员学习,对各类职业院校相关师生学习也有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

高速铁路牵引供电知识读本/中国铁路总公司编著.
—北京:中国铁道出版社,2015.6
高速铁路管理人员和专业技术人员培训教材
ISBN 978-7-113-16918-3

I. ①高… II. ①中… III. ①高速铁路—
牵引供电系统—技术培训—教材 IV. ①U238

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 143437 号

高速铁路管理人员和专业技术人员培训教材

书 名: 高速铁路牵引供电知识读本
作 者:中国铁路总公司

责任编辑:侯跃文 电话:(路)021-73421 电子信箱:tdpress@126.com
(市)010-51873421

封面设计:崔丽芳
责任校对:苗 丹
责任印制:陆 宁

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)

网 址:<http://www.tdpress.com>

印 刷:中国铁道出版社印刷厂

版 次:2015年6月第1版 2015年6月第1次印刷

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:8 字数:194 千

书 号:ISBN 978-7-113-16918-3

定 价:31.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)
打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

前 言

党的十六大以来,在党中央、国务院的正确领导下,我国铁路事业得到了快速发展,目前,中国高铁运营里程已经位居世界第一。在建设和运营实践中,我国高铁积累了丰富的经验,取得了大量创新成果。将这些经验和成果进行系统总结,编写形成规范的培训教材,对于提高培训质量、确保高铁安全有着十分重要的意义。为此,中国铁路总公司组织相关专业的技术力量,统一编写了这套高速铁路管理人员和专业技术人员培训系列教材。

本套培训教材共分高铁行车组织、机务、动车组、供电、工务、通信、信号、客运8个专业,每个专业分为科普教材、专业关键技术教材和案例教材三大系列。科普教材定位为高铁管理人员普及型读物,对本专业及相关专业知识进行概论性介绍,学习后能够基本掌握本专业所需的基本知识、管理重点、安全关键;专业关键技术教材定位为高铁专业技术人员使用的学习用书,对本专业关键技术进行系统介绍,学习后能够初步掌握本专业新技术和新设备的运用维护关键技术。案例教材定位为高铁岗位人员学习用书,对近年来中国高铁运营实践中发生的典型案例及同类问题的处理方法进行总结归纳,学习后能为处理同类问题提供借鉴。

本书为供电专业科普教材《高速铁路牵引供电知识读本》。全书共六章,主要内容包括:高速铁路牵引供电概述;高速铁路牵引变电所结构及主要供电设备;高速铁路牵引供电系统自动化技术;高速铁路接触网系统;高速铁路供电设备可靠性的影响因素及保障措施;高速铁路牵引供电与相关专业的接口。

Preface

本书由周利军主编,马珂、刘玉辉、高仕斌主审。参加编写的人员有:张丽艳(第一章)、曹晓斌(第二章),李岗(第三章第一节、第二节、第三节)、邓军(第三章第四节)、董昭德(第四章)、周利军(第五章、第六章),全书由周利军统稿。参加审定的人员有:陈修延、陈红英、宋新江、范华、张韬、李轶群、徐波、牟赞、陆云、左平、张忠权、左光联、王颢、张本川。本书编写过程中,还得到了西南交通大学电气工程学院牵引供电领域多个课题组老师们的大力支持与帮助,在此一并表示衷心感谢!

由于近年来高速铁路技术发展较快,同时编者的水平及精力所限,本书内容不全面、不恰当甚至错误的地方在所难免,热忱欢迎使用本书的广大读者以及行业内专家学者对本书提出批评、指正意见,以便编者对本书内容不断地改进和完善。

编 者
二〇一五年五月

目 录

第一章 高速铁路牵引供电概述	1
第一节 电气化铁路发展	1
第二节 牵引供电系统的基本结构	3
第三节 绿色牵引供电	5
第四节 牵引供电新技术	8
第二章 高速铁路牵引变电所结构及主要供电设备	13
第一节 变电所的结构	13
第二节 牵引变压器	14
第三节 高压开关电器	20
第四节 高压互感器	26
第五节 气体绝缘全封闭组合电器(GIS)	29
第三章 高速铁路牵引供电系统自动化技术	32
第一节 牵引供电系统自动化概述	32
第二节 变电所综合自动化技术	35
第三节 接触网故障测距技术	50
第四节 牵引供电 SCADA 系统	57
第四章 高速铁路接触网系统	67
第一节 接触网的基本功能与组成	67
第二节 高速铁路接触网的基本结构	72
第三节 高速铁路接触网系统的主要电气设备	80
第五章 高速铁路供电设备可靠性的影响因素及保障措施 ...	89
第一节 牵引供电系统的过电压及防护	89
第二节 牵引供电系统的雷击及其防护	93
第三节 接触网覆冰及除冰技术	100
第四节 牵引供电设备试验与检测	102

Contents

第六章 高速铁路牵引供电与相关专业的接口	115
第一节 接口概述.....	115
第二节 与电气化铁路外部系统的接口.....	116
第三节 与工务工程的接口.....	117
第四节 与电务工程的接口.....	118
第五节 与动车组接口关系.....	118
参考文献	120

第一章 高速铁路牵引供电概述

牵引供电系统作为高速电气化铁路的动力来源,由牵引变电所(含 AT 所、分区所、开闭所等)和接触网组成,其结构和接线形式由供电自身的要求决定。本章主要介绍电气化铁路的发展历程、牵引供电系统的基本结构、电能质量以及新型供电技术。

第一节 电气化铁路发展

一、国外电气化铁路发展概况

1825 年世界上第一条铁路在英国建成。1879 年 5 月 31 日在德国柏林举办的世界贸易博览会上,由西门子和哈尔斯克公司展出了世界上第一条电气化铁路。

最初,电气化铁路都修建在城市近郊线路和一些工矿线路上。后来,随着工业的发展,才逐渐发展到城市之间和运输繁忙的干线铁路上来。20 世纪 60~70 年代是世界电气化铁路发展最快的时期,平均每年修建达 5 000 多千米。在此期间,工业发达的西欧、日本、苏联以及东欧等国家,运输繁忙的主要铁路干线实现了电气化,而且基本上已经成网。1964 年 10 月日本建成世界上第一条高速电气化铁路——东海道新干线,以 210 km 的时速令世人瞩目。

20 世纪 80 年代以后,世界上又出现了一个电气化铁路建设高潮。一些发展中国家,如中国、印度、土耳其、巴西等国的电气化铁路建设也开始快了起来。例如,印度 1990~1991 年两年就建成电气化铁路 1 557 km,平均每年建成近 800 km;从 1981~2000 年,我国在二十年内建成的电气化铁路约 13 000 km。目前我国的电气化铁路在建设里程和建设速度上都已经跃居世界前列。在此期间继日本高速电气化铁路时速提高到 270~300 km 之后,德国和法国相继建成时速达 250~350 km(ICE 和 TGV)的高速电气化铁路,工业发达国家正在集中力量兴建时速 200 km 以上的高速电气化铁路。

截止到 2010 年底,已建成高速电气化铁路的国家有中国、日本、法国、德国、意大利、西班牙、比利时、韩国、荷兰、瑞典、英国、俄罗斯,正在积极建设或规划建设的还有美国、瑞士、奥地利、丹麦、加拿大、澳大利亚、印度等国;欧洲已经突破了国界,向路网化、国际化发展。

二、我国电气化铁路发展历程

自 1961 年 8 月 15 日我国开通了第一条电气化铁路——宝鸡—凤州段起,至今已有 50 多年。在这 50 余年中,我国电气化铁路迅速的发展,取得了巨大的成就。

我国电气化铁路的发展和建设历程主要分为四个阶段:第一条电气化铁路的诞生(1953~1961 年);恢复时期电气化铁路建设(1968~1980 年);改革开放后电气化铁路建设(1981~2000 年);新世纪电气化铁路建设(2001 年至今)。从第一条电气化铁路开始修建到 2012 年 12 月 1 日“哈(哈尔滨)大(大连)”高速铁路正式开通,中国电气化铁路总里程在 1954 年突破 4.8 万 km,超越俄罗斯位居世界第一位。这是中国铁路建设史上的一项重大成就,也是中国

铁路现代化进程中的一个重要里程碑。我国各个时期电气化铁路建设概况表如表 1-1 所示。

表 1-1 我国各个时期电气化铁路建设概况表

建设时期	全国铁路营业里程 (km)	各时期电气化铁路建设里程 (km)	电气化铁路累计里程 (km)	电气化率 (%)	电气化铁路承担运量比重 (%)	复线电气化铁路里程 (km)	电气化铁路复线率 (%)
“一五”(1953~1957)	23 136	1953 年 11 月开始设计,1957 年 10 月 1 日开始筹建,1958 年 6 月 15 日动工兴建					
“二五”(1961~1965)	38 406	93	93	0.24	0	0	0
“三五”(1966~1970)	42 580	197	290	0.68	0	0	0
“四五”(1971~1975)	47 980	386	676	1.40	0	0	0
“五五”(1976~1980)	51 140	1 003.6	1 679.6	3.28	2.6	119	7.0
“六五”(1981~1985)	55 120	2 507.6	4 187.2	7.59	7.1	1 052.4	25.13
“七五”(1986~1990)	57 650	2 664.5	6 851.7	11.88	17.7	2 486	36.28
“八五”(1991~1995)	62 615	3 012.2	9 863.9	15.75	25.0	3 544.34	35.93
“九五”(1996~2000)	68 649	5 029.1	14 893	21.69	40.2	6 394.89	42.94
“十五”(2001~2005)	75 619	5 587	20 132	27.08	>50	11 613.2	56.70
“十一五”(2006~2010)	85 000	14 520	35 000	41.17	>65	23 820	68.05
“十二五”(2011~2015)	92 000	7 000	42 000	45.65	>75	30 910	73.59
“十三五”(2016~2020)	100 000	8 000	50 000	50.5	>80	38 500	77.00

在电气化铁路建设发展过程中,电气化铁路的牵引供电技术装备也发生了巨大变化。从最初全面学习苏联,到改革开放后积极引进和自主开发创新,在牵引供电、变电所设备、接触网、远动控制和检测技术方面,已经基本形成了自己的技术模式。在工程设计手段和工程施工工艺、设备的运营和管理,以及各种专用器材的生产等方面也都有了长足进步。

2004 年 1 月 7 日,国务院常务会议原则通过了《中长期铁路网规划》。2008 年 10 月 31 日,经国家批准,《中长期铁路网规划》(以下简称《规划》)正式颁布实施。《规划》规定,到 2020 年,全国铁路营业里程达到 12 万 km,主要繁忙干线实现客货分线,复线率和电化率分别达到 50% 和 60% 以上,运输能力满足国民经济和社会发展需要,主要技术装备达到或接近国际先进水平。

具体目标是:

(1) 发展客运专线,为满足快速增长的旅客运输需求,建立省会城市及大中城市间的快速客运通道,规划“四纵四横”等客运专线以及经济发达和人口稠密地区城际客运系统。建设客运专线 1.6 万 km 以上。

(2) 以扩大西部路网规模为主,形成西部铁路网骨架,完善中东部铁路网结构,提高对地区经济发展的适应能力。规划建设新线约 4.1 万 km。

(3) 加强既有路网技术改造和枢纽建设,提高路网既有通道能力。规划既有线增建二线 1.9 万 km,既有线电气化 2.5 万 km。

根据《规划》预测,到 2020 年,中国电气化铁路总里程将达到 5 万 km,电气化铁路承担的铁路运量比重将达到 80% 以上。中国几条主要繁忙长大干线:京哈线、京广线、京沪线、陆桥线、沪汉蓉线和沪昆线都将全线实现电气化;几个主要省会城市之间及环渤海地区、长江三角

洲地区和珠江三角洲地区都将建成快速客运专线,其总里程将超过 1.6 万 km。中国西南、西北、华北、东北、中南和华东的电气化铁路将基本连接成网。一个多拉快跑,运输能力大,行车速度快,燃料消耗低,运输成本低,技术装备先进质量高,旅行环境好,不污染环境,分布比较合理的全国电气化铁路网将基本形成。到 2020 年,中国几条主要长大干线的旅客列车运行速度将普遍达到 160 km/h,部分区段将达到 200 km/h,新建的快速客运专线和城际客运线路将达到 200 km/h 及以上,几条主要繁忙干线的货物列车载重量将普遍达到 5 000 t 以上,而大秦和朔黄两条运煤专线的重载单元列车载重量将突破 1.5 万~2 万 t。旅客运输将全面实现“快速、准时、舒适”,主要城市间铁路旅行将实现 500 km 范围内“朝发夕归”,1 200~1 500 km 范围内“夕发朝至”,2 000~2 500 km 范围内“一日到达”的目标,货物运输将实现“大宗货物直达化,高值货物快速化”的目标。到 2020 年,中国电气化铁路在牵引供电设备的自动化水平,设备的国产化率,设备的运营可靠性及高速技术的应用等方面将呈现一个全新的局面,达到一个更高的水平。中国电力牵引动力的研发和生产,也将有重大的发展,跻身于世界先进国家行列。与此同时,在铁路电气化工程设计手段和标准化程度,电气化工程施工装备和施工质量标准,电气化铁路的运营管理现代化及电气化专用器材的生产等方面也将达到或接近世界先进水平。到 2020 年,中国电气化铁路的各项运营技术指标,如电力机车完成的工作量——日车公里和日产量、燃料消耗和能源利用率、能源使用结构、运输成本和运输质量以及环境的保护等都将达到或接近世界先进水平。还有中国电气化铁路的分布不合理状况、铁路电气化的投资回报率偏低,电气化铁路承担的铁路运量不大,牵引供电技术的自主研发能力不足等情况也将得到彻底扭转。

高速铁路全部采用电气化铁路的形式,2004 年起,我国通过引进消化吸收再创新的发展模式,极大地推动了高速铁路技术的发展,2008 年京津城际 300 km/h 高速铁路通车以来,陆续开通了武广、郑西、沪宁、沪杭、京沪等 350 km/h 高速铁路客运专线,并于 2010 年在京沪高速铁路创下 486.1 km 的世界铁路运营最高试验速度,目前我国高速铁路运营里程已经突破 1 万 km,接近世界高速铁路总里程的总和。

第二节 牵引供电系统的基本结构

一、牵引供电系统的构成

我国高速电气化铁路均采用工频(50 Hz)、单相交流电,额定电压为 27.5 kV 或 2×27.5 kV,牵引供电系统的构成如图 1-1 所示。相对牵引变电所而言,通常把为其供电的电力系统称为外部电源或一次系统。牵引供电系统由牵引变电所和牵引网组成。

(1)电力系统与输电线:它们为高速铁路提供高压电源,其电压一般为 220 kV,西北地区有些变电所为 330 kV。高速铁路的牵引负荷是一级负荷,故要求电源有足够的容量和较高的可靠度。公用电网通常能使这些要求得到满足,并具有经济性。

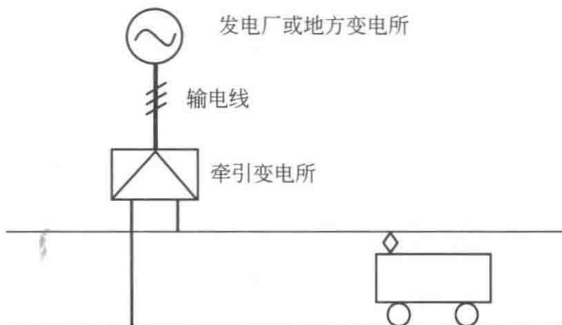


图 1-1 牵引供电系统的构成

(2)牵引变电所:将电力系统供应的电能转变为适于电力牵引及其供电方式的电能,其中的核心元件是牵引变压器(也称主变压器),并设有备用。与地方变电所相比,特别在我国,牵引变电所最主要的和绝大多数情况下是用于提供牵引用电,作为区别,而称为牵引变电所。

(3)牵引网:由馈(电)线、接触网、轨(地)、回流线等组成,是牵引供电网(回路)完成对电力机车的送电任务。馈线是接在牵引变电所牵引母线和接触网之间的导线,可以将电能由牵引变电所引向电气化铁路;接触网是一种特殊的输电线,架设在铁路上方,机车受电弓与其摩擦受电;钢轨既支持列车运行,又是导线,由于轨与地都是非绝缘的,故通常轨地一起接受机车的牵引电流;回流线是指牵引变电所处的横向回流线,它将轨或与轨平行的其他导线与牵引变压器指定端子相连,与馈线一起组成牵引端口的端子线。

(4)高速列车:采用动车组,通过牵引电机及其变换和控制机构,将电能转化为可用机械能,牵引列车运行。

(5)供电分区:正常供电时,由牵引变电所馈线到接触网末端的供电线路组成,也称为供电臂。

二、外部供电电源

外部电源的供电方式是指电力系统与牵引变电所的连接方式,它取决于牵引负荷的用电等级和电力系统的分布情况。

世界各国采用工频、单相、交流、接触网额定电压为 25 kV 的高速电气化铁路,毫无例外地均采用高压供电。日本山阳等新干线,牵引变电所的进线电压采用 275 kV(原来 70 kV)。法国大部分牵引变电所的进线电压为 225 kV,只有一个变电所为 63 kV。德国牵引网电压采用 15 kV,牵引变电所进线电压采用 110 kV。世界各国高速电气化铁路的电源电压,也是值得我们借鉴的。

过去我国牵引供电系统的电源电压等级普遍采用 110 kV,主要是为了保证安全、可靠供电。对于高速电气化铁路,由于牵引负荷功率增大,如仍采用 110 kV 供电,一般很难满足供电要求,电力网的运行指标也会恶化。单相独立的牵引负荷,由于牵引负荷电流大,波动剧烈,谐波含量丰富,为了增大电网对谐波、负序的承受力,减小牵引变电所母线电压的波动,降低输电线路损耗,保证输电线路的动态、静态稳定,供电电源应采用 220 kV 或以上电压等级。

TB 10009—2005《铁路电力牵引供电设计规范》规定:“电力牵引应为一二级负荷,牵引变电所应有两路电源供电,当任一路故障时,另一路仍应正常供电”。其中两路电源可来自不同的地区变电所或同一地区变电所的不同母线。外部电源的供电方式以保证供电可靠性为原则,同时注意电源容量及经济性。外部电源的供电方式主要有环形供电、双侧供电、单侧供电、放射供电等几种形式。从供电可靠性出发,牵引变电所应尽量采用环形供电或双侧供电。但是如果牵引变电所不能从两侧取得电源时,也可以采用单侧供电方式,但必须设置双回路输电线以保证供电的可靠性。当这两回输电线路连接到同一地区变电站时,这两回输电线路必须接至不同的分段母线上。

图 1-2 是陕西电网对三个牵引变电所进行单侧供电的情况;图 1-3 是四川电网与宝成线上两个牵引变电所的供电图。当备用开关合上时便是环形供电,否则就是单路输电线的单边供电方式。

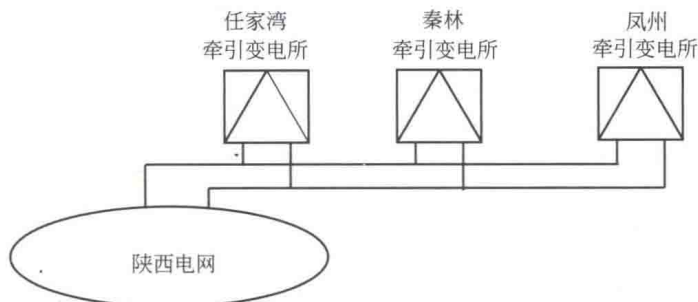


图 1-2 陕西电网供电图

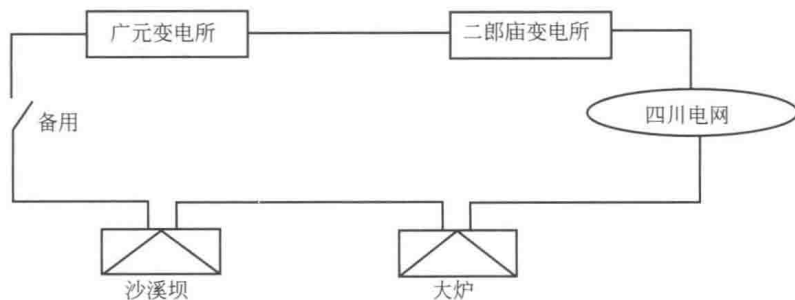


图 1-3 四川电网供电图

三、牵引变电所

牵引变压器接线方式包括：YNd11 接线、纯单相接线、 V_x 接线、三相一两相平衡接线（包括 Scott 接线、Le Blanc 接线、Wood-bridge 接线等）等，高速铁路中主要采用 V_x 接线变压器，也有少数变电所采用纯单相变压器供电。

四、牵引网的供电方式

高速铁路牵引网的供电方式是由牵引网所完成的特殊输电功能的技术要求和经济性能所决定的，基本上可以按分区所运行状态和牵引网设备类型进行分类。按分区所的运行状态，通常分单边供电、双边供电两种方式。按牵引网设备类型，目前主要采用直接供电方式（带回流线）和（自耦变压器）AT 供电方式。

由于高速电力牵引的速度快、电流大，因此要求供电系统的供电质量要高，并应尽量减少电分相、电分段的数量。AT 供电方式变电所间距大，一是可以大大减少电分相数量，并且牵引网阻抗小，能显著减小牵引网电压损失，改善供电质量，保证列车高速运行；二是可以密切配合电力系统向电气化铁路供电的电源选择，以降低工程造价。另外，AT 供电方式对通信线路的影响较小。

由于某种原因，有时牵引变电所的上、下行方向需采用直接供电 + AT 供电的混合供电方式。这种供电方式就是上、下行的某一方向使用直接供电方式，而另一方向使用 AT 供电方式。这种情况常常是由于牵引变电所的位置选择不宜、地形条件复杂造成的。有时，考虑沿线对通信线路干扰要求的不同，也会采用不同的供电方式。

第三节 绿色牵引供电

铁路相关运行、设计、施工、科研等机构对电能质量、电磁环境等问题非常重视，通过研究

和优化设计,努力提高电能质量,降低电磁发生水平,构建绿色牵引供电系统。

一、电能质量及其治理

1. 电能质量概述

单相工频交流电气化铁路作为电力系统的一级负荷,有其自身的工作特性——功率因数低、谐波含量大和不对称特性等。

电力牵引负荷由于变流、平波等措施的影响,其功率因数较低,无功功率含量过大。无功功率过大,会造成很多不良的影响:如额外占有供、变电设备(主要是变压器和输电线)的容量,增大了电能损失,额外增加了用户用电点的电压损失。

谐波的存在会额外占有系统及设备容量,产生附加热损,降低设备效率;并有可能引起系统局部谐振,危及设备的安全运行。此外,谐波还对临近电气化铁路供电系统的通信线路造成干扰。

电气化铁路作为单相的负荷,会使三相供电系统处于不对称运行状态。主要表现在:通过牵引变电所向电力系统注入波动的负序电流,使电力系统节点三相电压不平衡。负序电流在电力系统中会额外占有系统及设备容量,造成附加网损,引起三相电压不对称,降低发电机、电动机出力。

目前我国衡量电能质量的国家标准主要包括 6 个方面:

- (1)电力系统频率允许偏差;
- (2)供电电压允许偏差;
- (3)三相电压允许不平衡度;
- (4)公用电网谐波;
- (5)电压波动和闪变;
- (6)暂时过电压和瞬态过电压。

2. 电能治理措施

无功、负序和谐波的存在是电气化铁路单相交流供电系统所固有的三大技术问题。国际上对这三大技术问题的研究成果与对策也不尽相同。英国主要关注负序和谐波,基本代表欧共体的情况。原苏联则注重电压调整和无功补偿,兼顾负序和谐波的补偿,基本以改善牵引供电系统自身的技术指标为主。相比而言,日本的研究和应用较为全面,如可调无功补偿及滤波,三相—单相对称变换系统。但无论如何都未有任何一个国家从理论上将无功、负序乃至谐波的研究更全面、完备地统一起来。

国内对这三大技术问题的认识也有一个发展过程。电气化铁路建设初期,比较注重负序,但当时电气化铁路里程短,对电力系统造成的不良影响也是局部的,后来对功率因数愈加关注。随着我国高速铁路的大力发展,电气化铁路带来的电能质量问题也随之会发生相应的改变。仅就影响电力系统的主要电能质量指标而言,随着交—直—交型电力机车在我国新建电气化铁路上的大量使用,谐波电流含量大幅下降,牵引变电所的功率因数也大大改善,已经可接近 1。但相比既有电气化铁路而言,由于牵引功率的大幅增加,牵引供电系统的负序问题将变得更为突出。因此,未来新建电气化铁路面临的主要电能质量问题将是负序。

目前,国内高速铁路中改善电能质量的有效措施主要有以下几个方面:

- (1)优化牵引供电系统的供电方式。优化供电方式主要指将牵引变电所高压侧通过轮流

换相接入电力系统。

所谓轮流换相,就是指各相邻牵引变电所牵引变压器的原边各端子轮流接入电力系统中的不同相。如果各牵引变电所由同一电力系统供电,则各牵引变电所的牵引负荷在电力系统中引起的总负序电流与每个牵引变电所引入的相序有关。为使牵引供电系统的三相负荷趋于平衡,牵引供电系统采用了在牵引变压器高压侧按牵引变压器的位置轮流换相接入电力系统的方法,使接入电力系统的总负序电流减小。

(2)装设补偿装置。利用相对比较成熟的补偿技术,对电气化铁路牵引负荷引起的谐波、负序和无功进行综合的治理。

目前,我国仍然普遍采用在牵引变电所安装固定并联电容补偿装置的方法。由于其结构简单、投资少、运行可靠,特别对于多数干线电气化铁路牵引变电所,在固定补偿方式下,月平均功率因数能达到 0.9 以上。

随着电力电子技术的发展,能实现对无功功率动态补偿的 SVC(Static Var Compensator)和 SVG(Static Var Generator)也在牵引变电所中得到了应用。

SVC 装置主要有晶闸管投切电容器(TSC)和晶闸管控制电抗器(TCR),以及由该两种补偿装置结合固定并联电容补偿构成的混合补偿装置。例如,我国南昆线电气化铁路采用了 TCR+FC 构成的 SVC 补偿结构;宁夏银川迎水桥牵引变电所安装了单相 SVC,通过真空断路器将晶闸管控制的电容器和电抗器分成了 5 组,每组电容器和电抗器的容量分别为 400 kvar,补偿后牵引变电所的功率因数可达 0.92 以上。

日本东北新干线和东海道新干线均有 SVC 投入运行,将其安装在分区所,用于补偿接触网的电压降。英法隧道电气化铁路通过在 3 个牵引变电所安装了 3 组单相的 TCR+FC 型 SVC,用于补偿牵引变电所的供电电压、功率因数和进行谐波抑制。澳大利亚、南非等国也多使用 TCR+FC 结构的 SVC 用于无功和负序的综合补偿,具有多年的运行经验,运行效果显著。

SVG 是基于大功率全控型电力电子器件构成的动态无功补偿装置,具有响应速度快,谐波含量小和工作效率高等优点。采用两相结构的 SVG 可以实现无功和有功功率的四象限控制,不仅可以动态补偿牵引变电所的无功功率,也可以进行牵引变电所两供电臂有功功率的调节,实现牵引负荷的动态平衡。目前,我国上海南翔牵引变电所采用的就是背靠背 SVG 和固定补偿构成的混合补偿装置,有效地改善了南翔牵引变电所的谐波和负序。由于 SVG 初期的投资和运行费用均高于无源滤波装置,所以,只在国内个别牵引变电所使用。国外,SVG 的应用主要集中在日本和欧美国家,特别是日本早在 1982 年在新一沼宫内和新一八户两座牵引变电所安装了基于 IGCT 和 IGBT 的 RPC 装置,用于解决牵引负荷对电网电压波动和不平衡的影响。

二、电磁兼容问题

高速铁路在给交通运输带来了方便快捷的同时,也带来了电磁污染和噪声干扰等问题。由于信息技术的发展,在许多领域如电气化线路、电力牵引特别是交流传动,微电子器件大量用于设备的开环、闭环控制和监视;此外,由于经济的和生态学方面的需要,现代能源技术可保证开发出更加紧凑、能最佳利用资源的设备。这种高电磁负荷、大功率能源设备与低电压、小功率信息装置并存的局面,使得解决电磁兼容性问题变得更加紧迫也更加复杂了。据统计,1989 年德国电力系统故障的 28.7%是由电磁干扰引起的。

电气化铁路电磁兼容包含两个方面:首先,电气化铁路系统自身包含许多数字化子系统,因此高电压子系统可能会对低电压子系统产生电磁干扰。众所周知,铁路信号与列车的安全、有效运行密切相关,保证这两个系统之间的电磁兼容是很重要的。其次,电气化铁路也会对移动通信系统和其他灵敏度高的数字系统产生影响。

第四节 牵引供电新技术

高速铁路动车组均采用技术先进、性能优越的大功率交—直—交流牵引供电系统。仅就影响电力系统的主要电能质量指标而言,功率因数极度改善,可接近 1;谐波电流含量大幅下降,可等效为既有交—直牵引铁路安装了高效有源电力滤波器(APF);但相比既有铁路而言,由于牵引功率的大幅增加,负序问题更为突出。如能在联系电力系统与牵引供电系统的牵引变电所内采取措施,把干扰电力系统的负序问题和铁路的电分相问题同时解决,那无疑是最佳选择,更为有利于铁路与电力的和谐、良好发展。

同相供电技术是解决上述问题的最佳选择。同相供电是指一条电气化铁路全线牵引变电所输出电压均采用相同相位,理想情况下可以实现全线贯通供电。同相供电系统通过牵引变压器和对称补偿装置相结合,实现三相到单相的对称变换,不仅可以从根本上解决电气化铁路的无功、负序和谐波问题,而且还可以解决牵引网的电分相问题,有利于重载和高速牵引,提高电气化铁路运能,是电气化铁路电能质量治理较理想的措施。我国首套电气化铁路同相供电装置已在成都铁路局眉山牵引变电所成功投入运行。目前,已经有多条线路开展同相供电的方案论证和设计。

一、同相供电技术

1. 基于平衡变压器的同相供电技术方案

所谓同相供电是指线路上不同变电所供电的区段接触网电压相位相同,线路上无电分环节的牵引供电方式,如图 1-4 所示。理论上,全线各牵引变电所采用单相变压器就可实现同相供电,但由于单相负荷在电力系统引起负序电流,当电力系统薄弱时,会导致严重的三相不平衡,全部采用单相变压器不会得到电力部门的同意。因此,同相供电的技术关键是在牵引变电所实现三相—单相相对称变换。目前最合理、先进的技术是采用平衡变压器和潮流控制器(Power Flow Conditioner,简称 PFC),如图 1-5 所示。

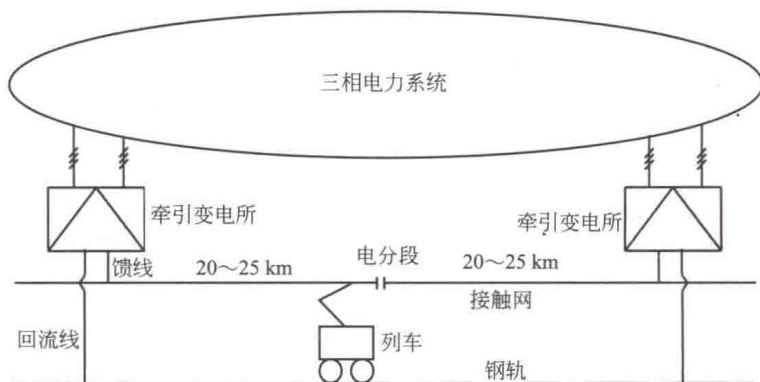


图 1-4 同相供电系统示意图

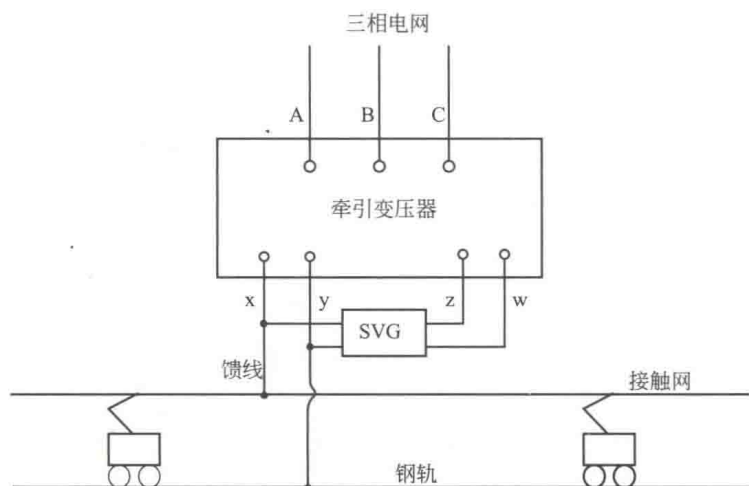


图 1-5 同相供电系统的牵引变电所

2. 同相供电技术的优越性

同相供电系统在技术上具有以下优越性：

(1)对电力系统而言，牵引负荷三相对称，功率因数为 1，谐波电流极小，满足电能质量要求。

(2)牵引变电所馈线出口处电分相取消，为不影响既有二次侧主接线模式和馈线保护配置整定方法，可用普通 4 跨绝缘锚段关节或分段绝缘器取代；当分区所两端的压差不足以产生影响时，分区所处的电分相亦可由简单的分段绝缘器取代（应进行试验研究）。列车在全线实现不断电运行，有利于高速和重载运输。

(3)PFC 在传输有功功率的同时，能对牵引端口的无功功率进行 100% 补偿，有利于稳定网压，减少负荷引起的网压波动。

(4)理论上，实现对单相负荷的理想对称补偿，使 $\cos\phi=1$ ，负序电流为 0，所需的最小容量与牵引容量相等。澳大利亚昆士兰铁路牵引变电所全面实施无源 SVC 方案，虽然也解决了电压波动、负序、谐波问题，但一个 $30\text{MV}\cdot\text{A}$ 的牵引变压器要辅以 $90\text{MV}\cdot\text{A}$ 的 SVC 装置，一次性投入约是原变压所的 3 倍左右。这里利用平衡变压器的自有平衡变换能力把 PFC 的容量减少为牵引负荷容量的一半左右，并且结构简单，是当前的最优方案。

同相供电系统在经济上带来的好处是：

(1)节省了在电分相上的投资和运营维护费。按日本方式，每处地面自动过分相装置要设置 8 台断路器和约 2 km 的中性区，显得过于复杂。朔黄线自动过分相装置投资约为 350 万元，而采用车上自动过分相，则需在线路旁边设置磁铁，在车上加装控制器，平均每车增加投资约 10 万元。并且，电分相的取消，有助于提高线路通过能力、增大运能。

(2)由于变电所左右两侧采用同一端口供电，负荷的均衡性得到改善，并且一次侧容量利用率为 100%，较之目前用于弱电源的 Vv 接线方式能减少安装容量，节省大量固定容量电费（目前这是影响电气化铁路经济性的重要因素）。

(3)由于采用 PFC 可以随时跟踪负荷变动，功率因数始终近似等于 1，无过补和欠补现象，节省了无功罚款。

3. 试验应用

由西南交通大学承担的国家重大科研项目——国家科技支撑计划“电气化铁路同相供电

装置”课题,于2010年10月28日10时50分在成都(明)铁路眉山牵引变电所投入试运行,10月29日10时45分,进入同相运行模式,到目前为止,系统运行稳定。现场试验表明:同相供电装置在同相运行模式下,能够完成有功传递功能,显著降低由牵引单相负荷引起的三相电压不平衡度、三相电流不平衡度,且能够完成无功补偿。眉山牵引变电所同相供电装置,如图1-6所示。



图 1-6 眉山牵引变电所同相供电装置

二、列车自动过电分相技术

电力系统采用三相供电方式,并要求每一相的电流大致相等,用以保证三相负荷的对称性。电气化铁路是大功率的单相负载,电气化铁路仅从一相取电将造成负荷的严重不对称,会引起较大的负序电流,造成电压不平衡。为尽量保证电力系统三相负荷的对称性,电气化铁路的供电系统采取分段供电方式,每一段由电力系统的不同相供电,通过这种轮流换相方式,实现负荷的基本平衡。这种分段供电、轮流换相的方式形成了电气化铁路牵引供电系统的一个独特结构——电分相。由于给铁路供电采取分段供电方式,每段相位亦不同,段与段之间需通过适当方式进行绝缘,这种段与段之间的绝缘结构即称为电分相。列车在运行过程中,从一个供电段过渡到另一个供电段的过程,称为列车过电分相或列车过分相。为使动车组或电力机车顺利过分相,多种过分相解决方案被提出来,主要有车载自动过分相、地面自动过分相等方案。

目前,应用于高速铁路列车自动过电分相技术主要有地面开关自动换相方式和车载自动换相方式。

(1) 地面开关自动切换过电分相

地面自动过分相,是通过地面开关设备与列车位置信号配合,通过开关分相处两端的供电臂电压切换到中性段上。列车通过中性段时,不断电,列车不需要做切换动作,仅由地面开关完成,这种方式在日本得到广泛采用。地面自动过分相方式实现了列车运行过程中不断电,可避免高速列车过分相时的速度损失,有益于高速列车的持续高速运行,增加重载铁路的通过能力。其局限体现在:首先,该过分相模式需在地面设置专门的自动过分相设备,一次性投资较大;其次,地面开关因带负荷频繁开断,受真空开关的寿命制约,需经常更换真空开关,后期维护费用也较大;再次,地面开关需带负荷频繁开断,具有较强的电气冲击,对列车和供电系统均