

文章编号: 1674—8247(2021)03—0079—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.03.014

高速度铁路牵引供电系统适应性关键技术研究

智 慧 林宗良 李 剑 袁 勇 宋梦容

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:随着铁路向更复杂线路条件、更高速度、更高安全性、更高可靠性和更智能化的方向发展,作为牵引列车唯一的动力来源,牵引供电系统面临的外部电网供电能力不足与冲击性负荷随机波动的平衡问题、服役环境恶劣与高供电可靠性之间的匹配问题、多元新能源灵活接入与实际节能减排效果之间的优化问题等将更加突出。针对电气化铁路牵引负荷的特殊性,本文结合目前正在开展的成渝中线项目,深入研究速度 400 km/h 及以上高速度铁路牵引负荷需求与牵引供电系统技术的适应性,进一步研究提高牵引供电能力、延长供电范围、减少速度损失的供电新方式,解决速度 400 km/h 及以上高速铁路牵引供电系统的技术难题,为工程设计方案的优化奠定基础。

关键词:高速铁路;牵引供电系统;适应性;关键技术

中图分类号:U223.6

文献标志码:A

On the Key Technologies of Adaptability of Traction Power Supply System of Higher-speed Railway

ZHI Hui LIN Zongliang LI Jian YUAN Yong SONG Mengrong

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: As the railway is developing into a system of more complex line conditions with the prospect of higher speed, safety, reliability, and more intelligence, the traction power supply system, as the only power source of traction train, is facing more and more prominent problems, such as the balance between making up the insufficient power supply capacity of the external power grid and overcoming the random fluctuation of impact load, the requirement of matching the high power supply reliability to the harsh service environment, and the optimization between providing flexible accesses of multiple new energy sources and improving the actual energy saving and emission reduction effects. In view of the particularity of traction load of electrified railway, combined with the ongoing Chengdu-Chongqing Middle Line Project, this paper made an in-depth study on the adaptability of the traction power supply system technology to the traction load demand of high-speed railway with a speed of 400 km/h and above, and further on the new power supply modes to improve traction power supply capacity, extend power supply range and reduce speed loss for the purpose of solving the technical problems of traction power supply system of high-speed railway with a speed of 400 km/h and above, and laying a foundation for the optimization of the engineering design scheme.

Key words: high-speed railway; traction power supply system; adaptability; key technologies

收稿日期:2020-09-28

作者简介:智慧(1981-),女,高级工程师。

基金项目:中铁二院工程集团有限责任公司科技发展计划项目(KYY2020132(20-22))

引文格式:智慧,林宗良,李剑,等.高速度铁路牵引供电系统适应性关键技术研究[J].高速铁路技术,2021,12(3):79-83.

ZHI Hui, LIN Zongliang, LI Jian, et al. On the Key Technologies of Adaptability of Traction Power Supply System of Higher-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(3):79-83.

1 研究背景

随着京沪、成渝、鲁南等速度 350 km/h 高速铁路项目的开通运营,我国高速铁路牵引供电系统成套的设计规范和技术标准更加成熟。目前,我国高速铁路牵引供电系统采用 2×27.5 kV 单边全并联 AT 供电模式,其特征为牵引变电所内不设置 AT,由牵引变压器二次绕组中间抽头与钢轨直接相接,常规供电模式如图 1 所示。

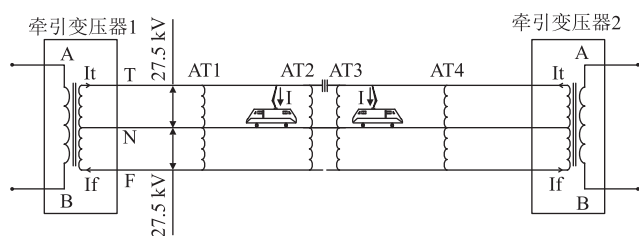


图1 常规供电模式示意图

常规供电模式满足 350 km/h 高速动车组连续追踪运行的供电能力需求^[1-2],但随着行车速度和密度的进一步提高,由列车的牵引阻力公式可知,400 km/h 高速动车组的功率将增大 20% ~ 30%^[3-4]。当同型大功率列车连续追踪运行时,牵引网供电臂首端载流能力将出现不足,故本文主要研究满足速度 400 km/h 及以上高速铁路牵引负荷需求的供电能力的提升优化措施,为列车保持更高速度运行提供技术保障。

2 供电能力提升措施

为满足牵引网供电臂首端载流能力的需求,主要研究均衡牵引网内上下行供电臂、相邻牵引变电所间供电臂之间电流分布的两种供电方式^[5-6]。

2.1 供电臂中增加 AT 的供电模式

供电臂中增加 AT 的单边全并联 AT 供电模式如图 2 所示。其特征为供电臂内增设 AT 所,将原先 1 个 AT 段三等分,在 1/3 处和 2/3 处分别增设 1 个 AT 所,缩短 AT 段间距,缩短列车在首端 AT 段中的运行时间。全并联供电还可在上行供电臂间均衡电流,有效地提高供电系统的供电能力,

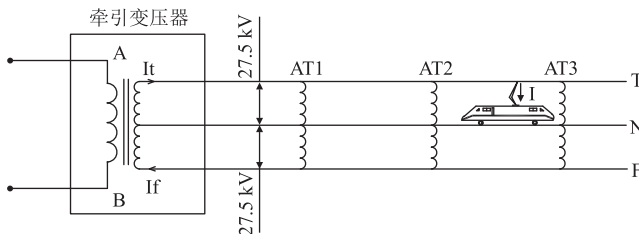


图2 供电臂中增加 AT 的 AT 供电模式示意图

当机车运行在任意 AT 段时,牵引网的电流分布如图 3 所示。

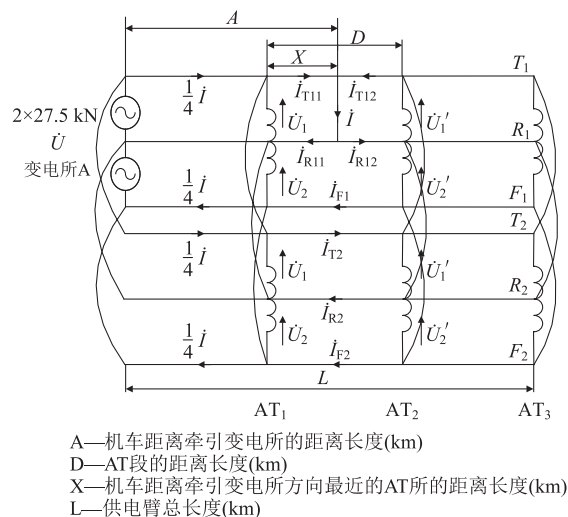


图3 供电臂中增加 AT 的单边全并联 AT 供电牵引网电流分布图

假设 AT 为理想变压器,且上下行在每个 AT 所进行了并联。根据回路方程,当认为接触网与正馈线自阻抗近似相等时,简化的列车在 AT 段中的电流流量值为:

$$\begin{cases} i_{T11} = i - \frac{3X}{4D}i & i_{T12} = \frac{3X}{4D}i \\ i_{R11} = i - \frac{X}{D}i & i_{R12} = \frac{X}{D}i \\ i_{F1} = \frac{X}{4D}i & i_{T2} = \frac{X}{4D}i \\ i_{R2} = 0 & i_{F2} = \frac{X}{4D}i \end{cases} \quad (1)$$

根据以上分析,当线路上仅有一列动车组运行时,仿真得到牵引变电所出口处各导线的电流分配比例系数曲线如图 4 所示。

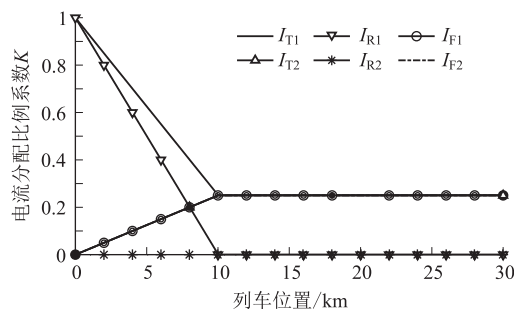


图4 供电臂中增加 AT 的单边全并联 AT 供电牵引变电所出口处各导线电流分配比例系数曲线图(单机运行)

当线路上同时存在两列新型动车组追踪运行时(考虑运行速度为 400 km/h,追踪运行间隔为 4 min),

绘制出牵引变电所出口处各导线的电流分配比例系数曲线如图 5 所示。

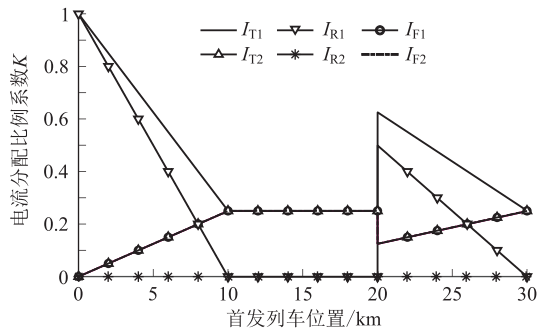


图 5 供电臂中增加 AT 的单边全并联 AT 供电牵引变电所出口处各导线电流分配比例系数曲线图(追踪运行)

2.2 双边 AT 供电模式

双边全并联 AT 供电模式如图 6 所示。其特征在于通过牵引变压器二次绕组中间抽头,将牵引变压器出口的 55 kV 电压输送至 2×27.5 kV 的 T 和 F 绕组,并在相邻两供电臂的分区所处实施双边供电。

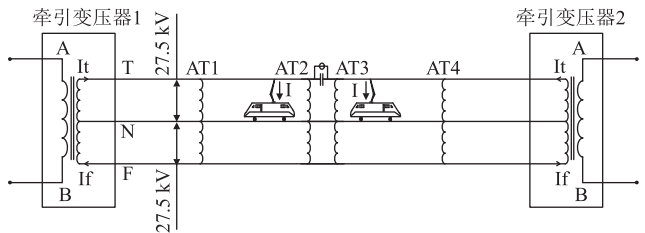


图 6 双边 AT 供电模式示意图

采用双边 AT 供电模式,机车在供电臂内的每个 AT 段中均具有相同的电流分布规律,因此,对机车运行在任意 AT 段时牵引网的电流分布进行分析即可,牵引网的电流分布如图 7 所示。

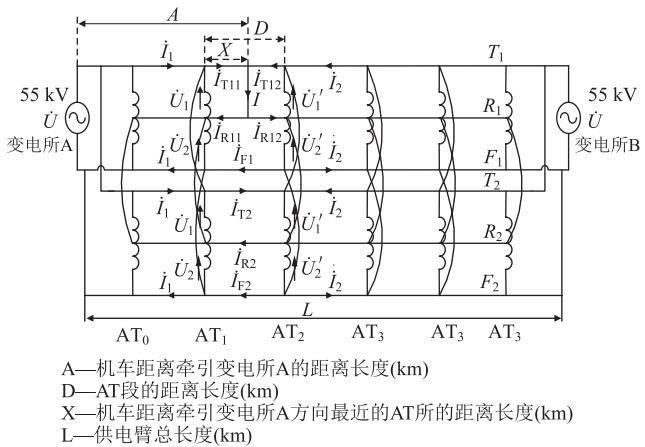


图 7 双边全并联 AT 供电牵引网电流分布图

假设 AT 为理想变压器,且上下行在每个 AT 所进

行了并联,则负荷点之前各 AT 段的上下行 T 线和 F 线电流大小相等,方向相反,且满足左右两侧 T 线电流之和与 F 线电流之和的差等于机车电流。根据回路方程,当认为接触网与正馈线自阻抗近似相等时,简化的列车在 AT 段中的电流量值为:

$$\begin{cases} i_{T11} = i - \frac{DA + 3LX}{4LD} i & i_{T12} = \frac{DA + 3LX}{4LD} i \\ i_{R11} = i - \frac{X}{D} i & i_{R12} = \frac{X}{D} i \\ i_{F1} = \frac{LX - DA}{4LD} i & i_{T2} = \frac{LX - DA}{4LD} i \\ i_{R2} = 0 & i_{F2} = \frac{LX - DA}{4LD} i \\ i_1 = \frac{i}{4} - \frac{iA}{4L} & i_2 = \frac{iA}{4L} \end{cases} \quad (2)$$

根据以上分析,当线路上仅有一列动车组运行时,仿真得到牵引变电所出口处各导线的电流分配比例系数曲线,如图 8、图 9 所示。

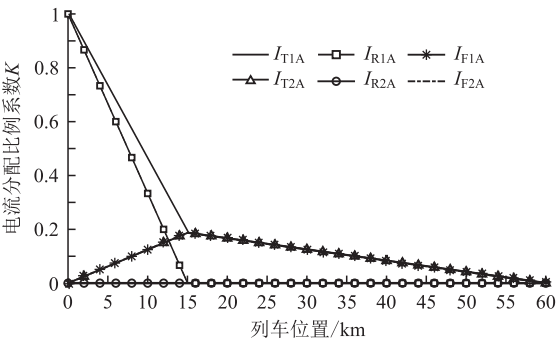


图 8 双边全并联 AT 供电牵引变电所 A 侧各导线电流分配比例系数曲线图(单机运行)

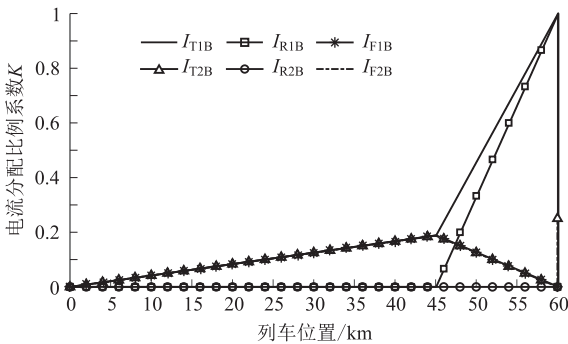


图 9 双边全并联 AT 供电牵引变电所 B 侧各导线电流分配比例系数曲线图(单机运行)

当线路上同时存在两列新型动车组追踪运行时,牵引变电所 A、B 两侧出口处各导线的电流分配比例系数曲线如图 10、图 11 所示。

2.3 仿真分析

基于牵引网潮流计算原理,构建高速铁路牵引供

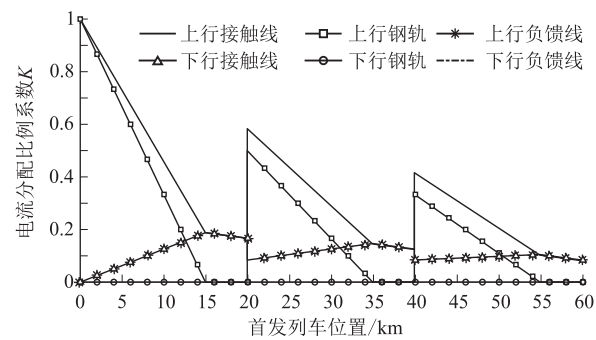


图 10 双边全并联 AT 供电牵引变电所 A 侧各导线电流分配比例系数曲线图(追踪运行)

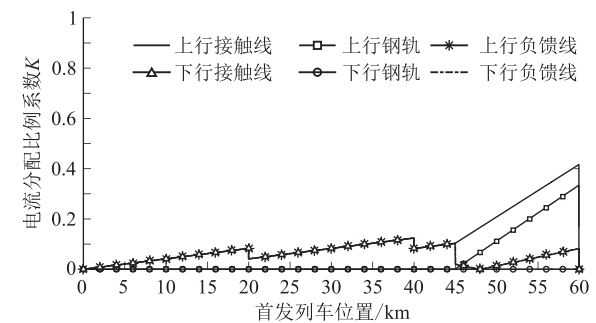


图 11 双边全并联 AT 供电牵引变电所 B 侧各导线电流分配比例系数曲线图(追踪运行)

82

电系统计算模型^[7-8],针对不同的网络拓扑结构,建模分析其供电能力需求(主要是牵引网电流分布),并采用专业技术软件仿真验证其牵引供电系统能力。

以成渝中线拟建的某牵引变电所右臂为例进行仿真(新型动车组以 400 km/h 速度追踪运行,双边供电时与相邻牵引变电所左臂贯通),在上坡方向,常规 AT 供电模式、供电臂中增加 AT 的 AT 供电模式以及双边 AT 供电模式下,牵引变电所供电臂电流的对比如图 12、图 13 所示,不同供电模式下牵引变电所供电臂电流的结果统计如表 1 所示。

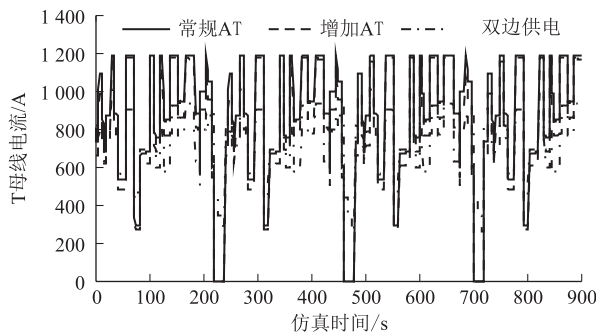


图 12 不同供电模式下牵引变电所供电臂电流 T 线电流对比图

从图 11、图 12 及表 1 可以看出,采用常规 AT 供

电模式时,牵引变电所供电臂首端的接触网载流能力(20 min 有效电流)在 400 km/h 运行时的最大需求为

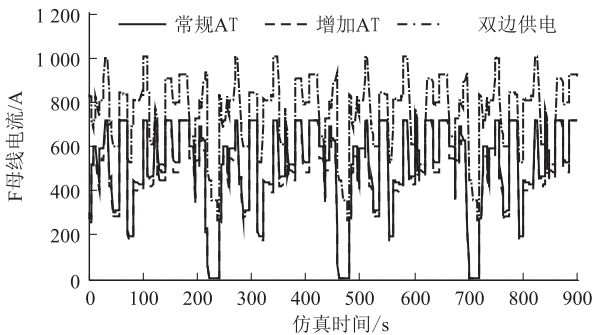


图 13 不同供电模式下牵引变电所供电臂电流 F 线电流对比图

表 1 不同供电模式牵引变电所供电臂电流统计表(A)

指标			供电方式		
			常规 AT	增加 AT	双边供电
电流	T 线	最大值	1 190	1 185	1 009
		平均值	843	791	734
		20 min	911	862	755
	F 线	最大值	713	715	1008
		平均值	497	469	737
		20 min	540	515	756

911 A,而现行设计中牵引网采用 JTMH120 + CTMH150 导线组合的持续载流量为 899 A,故需采取加强措施。采用供电臂中增加 AT 的 AT 供电模式可将需求降低至 862 A,采用双边 AT 供电模式可将需求降低至 755 A,都有明显的改善效果,均可提高牵引供电能力,延长供电臂长度,满足更高行车速度的需求。

3 牵引供电系统方案

为进一步提高供电能力,实现电能潮流合理调配、再生制动能量利用和能耗综合管理,解决速度 400 km/h 高速铁路牵引供电系统的技术难题,以成渝中线高速铁路为依托,拟定优化的牵引供电系统方案。

(1) 柔性连续牵引供电系统方案

牵引变电所采用单相变压器,供电臂首端电分相处开关可调整为常闭状态,供电线分束上网,供电臂末端分区所处设置功率融通装置,实现两相邻供电臂间的功率平衡。柔性连续牵引供电系统方案布置如图 14 所示。

该方案牵引变电所变压器结构简单、可实现左右供电臂同相供电。供电臂首端电分相处开关仅在越区供电时打开,配合供电线分束上网方向,实现不同供电方式的转换,缩小故障范围。但需利用广域保护判断故障方向,还需结合电网潮流分布校核负序等电能质量问题。若负序超标,可在牵引变电所内设置补偿

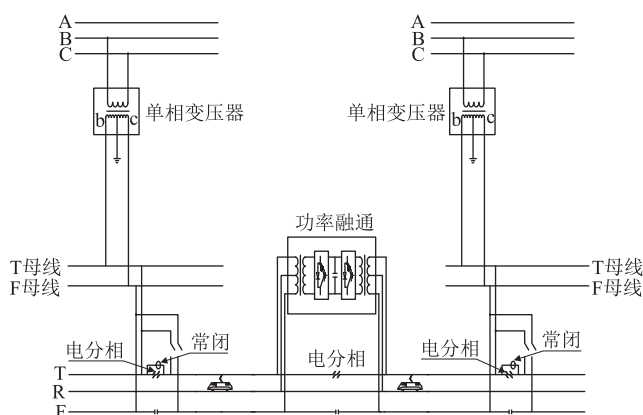


图14 柔性连续牵引供电系统方案示意图

装置。

只要两个牵引变电所的最大需量(即峰值功率)不在同一时刻出现,就可通过两个牵引变电所之间的能量调度,实现功率削峰填谷,即功率融通。

(2) 单相变压器双供系统方案

牵引变电所采用单相变压器,取消供电臂首端电分相,牵引变电所从供电范围的供电臂中部上网向两边供电,并合理控制AT段长度,使连续的两个AT段同时仅有1列车运行,供电臂末端仍设置分区所。单相变压器双供系统方案布置如图15所示。

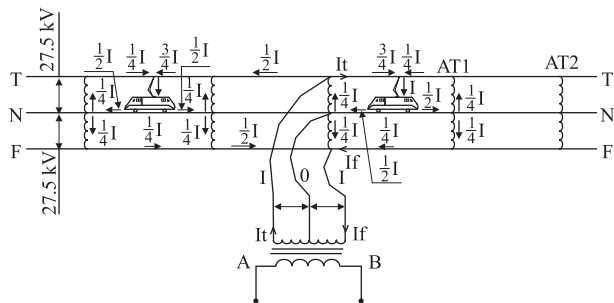


图15 单相变压器双供系统方案示意图

此方案牵引变电所变压器结构简单、可实现左右供电臂同相供电。取消了供电臂首端电分相,可保障列车高速运行的需求。利用广域保护判断故障方向,且为保证连续的两个AT段同时仅有1列车运行,相邻两个AT段的长度不能超过1个追踪间隔,即牵引变电所的供电范围不能超过2个追踪间隔,可有效减小牵引网的载流量需求。如当动车组以400 km/h的速度4 min追踪运行时,1个追踪间隔约为26 km,若采用常规供电方式,牵引变电所的供电范围需控制在60 km以内;若采用双向供电系统,牵引变电所的供电范围需控制在52 km以内。同时供电范围内列车数少,可有效降低负序等电能质量问题。以成渝中线为例,若采用此供电方案,结合线路方案,全线不需增设牵引变电所,且电分相数量可减少一半,还可取消接触

网首端的加强线,方案适应性和经济性良好。

4 结束语

为满足牵引网供电臂首端载流能力的需求,本文主要研究了均衡牵引网内上下行供电臂、相邻牵引变电所间供电臂之间的电流分布的供电方式,提出了在供电臂中增设AT和双边AT的供电模式,并建模仿真其供电能力提升效果;提出了适应400 km/h及以上高速铁路的柔性连续牵引供电系统方案,通过在供电臂末端分区所处设置功率融通装置,实现两相邻供电臂间的功率平衡与能量调度;提出了牵引变电所采用单相变压器、取消供电臂首端电分相的双向供电方案,并分析了其在成渝中线高速铁路工程上的适用性和技术优势。

参考文献:

- [1] 李群湛,连级三,高仕斌. 高速铁路电气化工程[M]. 成都:西南交通大学出版社,2006.
LI Qunzhan, LIAN Jisan, GAO Shibin. High-speed Railway Electrification Engineering [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2006.
- [2] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].
TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway[S].
- [3] 智慧. 基于实测数据的高速铁路牵引供电系统供电能力分析[J]. 高速铁路技术, 2013, 4(4): 28-31.
ZHI Hui. Analysis of Traction Power Supply Capability for High-speed Railway Based on Test Data[J]. High Speed Railway Technology, 2013, 4(4): 28-31.
- [4] 西南交通大学. 高速铁路牵引供电系统测试报告[R]. 成都:西南交通大学,2019.
Southwest Jiao Tong University. Test Report of High-speed Railway Traction Power Supply System[R]. Chengdu: Southwest Jiao Tong University,2019.
- [5] 陈民武,许臣友,黄文勋,等. 基于改进粒子群算法的牵引供电系统多目标优化设计[J]. 中国铁道科学,2016, 37(1): 85-92.
CHEN Minwu, XU Chenyou, HUANG Wenxun, et al. Multi-Objective Optimization Design of Traction Power Supply System Based on Improved Particle Swarm Algorithm[J]. China Railway Science, 2016, 37(1): 85-92.
- [6] 陈民武,李群湛,智慧,等. 牵引供电系统设计方案的综合评判[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 525-530.
CHEN Minwu, LI Qunzhan, ZHI Hui, et al. Comprehensive Evaluation for Design Scheme of Traction Power Supply System[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 525-530.
- [7] 吴双. 高速铁路牵引供电系统负荷建模[D]. 成都:西南交通大学, 2013.
WU Shuang. High-speed Railway Traction Power Supply System Load Modeling[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [8] 孙震洋. 高速铁路牵引供电系统运行方式研究[D]. 成都:西南交通大学, 2014.
SUN Zhenyang. Study of High-speed Railway Traction Power Supply System Operation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.