

高速铁路牵引供电系统动态模拟综合实验系统的设计与实现

李勇, 王江峰, 何正友, 黄立敏

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 针对我国轨道交通电气化专业实验教学仪器较为缺乏的现状, 在详细研究高速铁路牵引供电系统之后, 对高速铁路的牵引变电所、接触网、高速列车、综合接地系统及其远动监控系统进行了物理建模。开发出一套从电气量和物理量比例缩小的高速铁路牵引供电动态模拟系统, 实现高速铁路接触网结构, 牵引变电所供电、电力机车运行等功能的综合模拟。可通过远动模块实时监测与控制变电所以及机车模块的运行状态, 真实地反映了高速铁路牵引供电系统的实际工作状况, 为从业人员和相关院校提供了一套适用于培训与教学的综合实验系统。

关键词: 高速铁路; 牵引供电系统; 物理建模; 动态模拟; 实验系统

Design and implementation of integrated dynamic simulation experiment system of high-speed railway traction power supply system

LI Yong, WANG Jiang-feng, HE Zheng-you, HUANG Li-min

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

Abstract: In order to create a set of experimental instrument on the high-speed railway traction power supply system for the high school students and railway engineers, after having carefully studied this system, the models of catenary, high-speed trains, integrated grounding systems, and remote monitoring system are firstly given in detail. Besides, a set amount of the speed railway traction power supply integrated dynamic simulation experiment system with the scaled-down electrical and physical quantity is designed and developed carefully. The behaviors of the high-speed railway traction power supply in each module can be simulated by this experimental system accurately. The reaction and the electrical quantity can truly reflect the high-speed railway traction power supply system operating conditions. This system helps to improve the relevant practitioners and tertiary students' recognition for high-speed railway traction power supply system, and provides the experimental environment for research institutes.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1234203).

Key words: high-speed railway; traction power supply system; physical modeling; dynamic simulation; experimental system

中图分类号: TM74

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)13-0123-06

0 引言

随着我国高速铁路的快速发展, 越来越多的大专院校开设了轨道交通电气化专业, 同时众多科研单位也参与到高速铁路的研究中。然而, 由于牵引供电系统结构复杂、电压等级高、运行无法中断, 难以在现场开展相关培训工作及科学研究; 另一方面, 轨道交通电气化相关院校及单位缺少实验教学环节和实验教学仪器, 学生及从业人员对高速铁路牵引供电系统缺乏整体、形象的认知。因此, 建立

真实、形象、可信的高速铁路牵引供电模拟实验仿真系统迫在眉睫。

目前, 对高速铁路牵引供电系统的研究主要集中在对其进行数学模型分析^[1]和计算机仿真分析^[2-4]。虽然文献[5-6]分别对牵引供电系统的微机保护和微机远动监控的教学实验系统进行研究, 但还没有对整个高速铁路牵引供电系统的牵引变电所、牵引网、综合接地系统、电力机车以及远动监控系统进行综合模拟。

本文针对高速铁路牵引供电系统, 对其中的牵引变电所、牵引网、综合接地系统、电力机车以及远动监控系统进行综合分析和研究, 设计开发出一套从电气量和物理量按比例缩小真实牵引供电系统

基金项目: 国家自然科学基金(U1234203); 发明专利已受理(201310101168.7)

的高速铁路牵引供电动态模拟综合实验系统。

1 实验系统的组成

图 1 为高速铁路牵引供电系统的组成结构。高铁牵引供电系统是指从电力系统接受电能，通过牵引变电所变压、变相后，向电力机车供电的系统。牵引供电回路是由牵引变电所、馈线、接触网、电力机车、钢轨、综合接地系统构成。

针对牵引供电系统这一复杂的综合系统，如何进行合理的简化以及选取准确的参数对于建立模拟综合实验系统至关重要。在本文中，选择对牵引供电系统的核心元件建模，即建立牵引变电所、牵引网、高速列车的缩小比例模型。为实现对模拟实验系统的电气量监测及控制，需搭配远动监控系统。因此，本模拟实验平台主要由牵引变电所模块、牵引网模块、电力机车模块以及远动监控模块四部分组成，其结构图如图 2 所示。

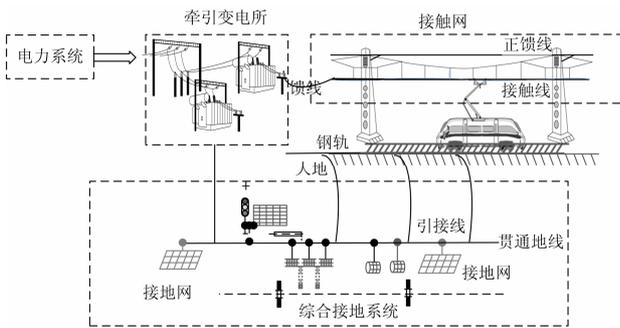


图 1 高速铁路牵引供电系统组成结构

Fig. 1 System of high-speed railway traction power supply

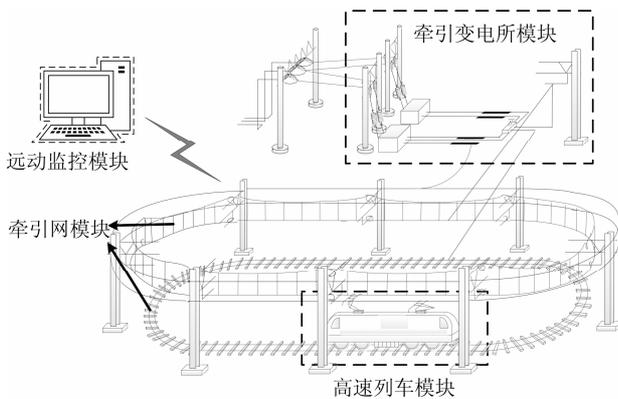


图 2 高速铁路牵引供电动态模拟综合实验系统结构图

Fig. 2 Structure of the system experimental for the dynamic simulation of high-speed railway traction power supply

2 实验系统的设计与开发

2.1 牵引变压器模块的设计

牵引变压器是高速铁路牵引供电系统的核心，

主要是将电力系统中的三相交流电变换成合适的单相交流电通过馈线接入接触网为列车提供电能。我国高速铁路牵引供电系统多采用自耦变压器（AT）供电方式，其主变压器常见的接线方式有：（1）单相 V/V 接线；（2）三相 V/V 接线；（3）Scott 接线；（4）V/X 接线。文献[7]对 V/X 接线牵引变压器进行研究，说明了选择 AT 供电方式和 V/X 接线牵引变压器的合理性。文献[8-9]在工程应用的角度上对 V/X 接线、Scott 接线和单相接线牵引变压器进行系统的分析比较，得出 V/X 接线牵引变压器在工程应用上的合理性。综合考虑，本系统采用 V/X 接线牵引变压器，其电路原理图如图 3 所示。

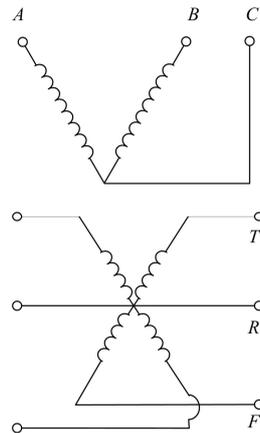


图 3 V/X 接线牵引变压器原理图

Fig. 3 Schematic diagram of V/X traction transformer

由于在实际牵引供电系统中电压等级高、电流较大，本文考虑实验操作的安全性，选取变比为 $380\text{ V}/27.5\text{ V}$ 变压器作为牵引主变压器，变比为 $55\text{ V}/27.5\text{ V}$ 的自耦变压器模拟实际 AT 变压器。由于本系统的供电臂的最大运行机车数量为 1 列，且由于机车额定功率的限制，机车正常运行时馈线电流为 $I_\epsilon=5\text{ A}$ ，机车满载运行时馈线电流为 $I_{\epsilon,\text{max}}=10\text{ A}$ ，牵引主变压器的计算容量为

$$S = U_{2N} I_\epsilon \quad (1)$$

选择的牵引主变压器的最大容量为

$$S_{\text{max}} = U_{2N} I_{\epsilon,\text{max}} \quad (2)$$

牵引主变压器的校核容量为

$$S_{\text{校}} = S_{\text{max}} / k \quad (3)$$

式(3)中 k 为过负荷倍数，选取 k 为 175% ^[10]。通过式(1)~式(3)可得出牵引变压器的计算容量为 $S=275\text{ V}\cdot\text{A}$ ，校核容量为 $S_{\text{校}}=314.3\text{ V}\cdot\text{A}$ 。选择计算容量和校核容量中较大者作为牵引变压器的安装容量。故牵引变压器的容量选定为 $315\text{ V}\cdot\text{A}$ 。AT 变压器的容量选定为 $150\text{ V}\cdot\text{A}$ 。牵引变压器的设计参数

如表 1 所示。

表 1 牵引变压器模块设计参数

Table 1 Parameters design for the traction transformer module

名称	额定容量/ VA	空载变压比/ (V/V)	短路阻抗 U_k / %
牵引变压器	315	380/2*27.5	8.6

2.2 牵引网模块的设计

牵引网是电力机车供电和取流回路的总称, 是由馈线、接触网、钢轨回流线组成的双导线供电系统。

接触网是牵引网的核心部件, 包含接触悬挂、支柱与基础、支持与定位装置三大部分。

真实牵引供电系统中接触网参数如图 4 (a) 所示, 在实验系统设计中, 依据高速铁路中的工程实物, 按照 1:22.5 的比例将牵引网系统进行缩小简化设计, 接触网模块的设计参数如图 4 (b) 和表 2 所示。利用 CAD 软件进行尺寸设计并进行机械加工。

(1) 接触悬挂装置中的接触线、吊弦、承力索均采用导电良好的铜丝制作而成, 便于整体装卸, 将接触线、吊弦、承力索按照实际的相互连接关系焊为一体。设计参数与结构如图 5(a)所示, 制作实物模型如图 6(a)所示。

(2) 支柱与基础以工字型支柱为原型进行等比例缩小设计, 考虑到成本、重量、绝缘性等因素, 选取尼龙为材料进行加工。设计参数与结构如图 5(b)所示, 制作实物模型如图 6(b)所示。

(3) 采用平腕臂—斜腕臂的基本结构对支持与定位装置进行设计, 选用不锈钢为加工材料。根据线路的弧度以及支柱的位置, 设计加工了正定位、反定位两种不同的定位装置。设计参数与结构如图 5(c)、图 5 (d)所示, 制作实物模型如图 6(c)、图 6 (d)所示。

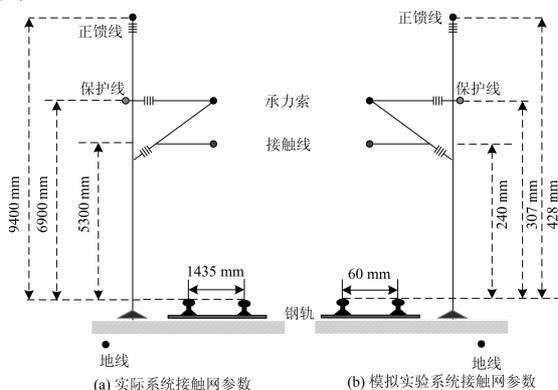


图 4 接触网模块设计参数
Fig. 4 Parameters design for the catenary module

表 2 牵引网机械设计参数 (1:22.5 等比例缩小)

Table 2 Parameters design for the catenary module (1:22.5 scaled down)

	真实系统	模拟实验系统
支柱	H 形钢柱 高 7.4~7.6 m	H 形尼龙棒高 32 cm
腕臂	平腕臂长 4.6 m	平腕臂长 205 mm
接触线	距钢轨高 6 m±30 mm	距钢轨高 26 cm

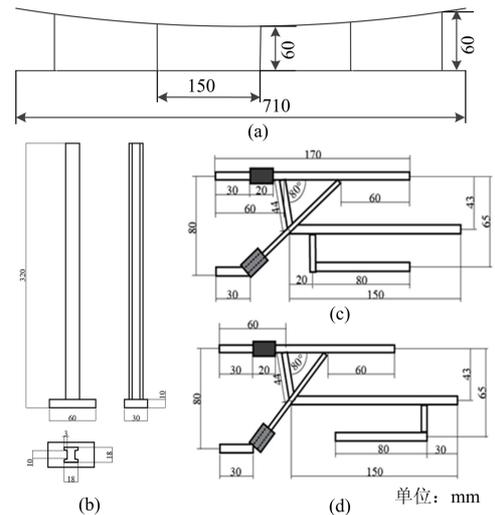


图 5 牵引网组成结构

Fig. 5 Structure of the traction network

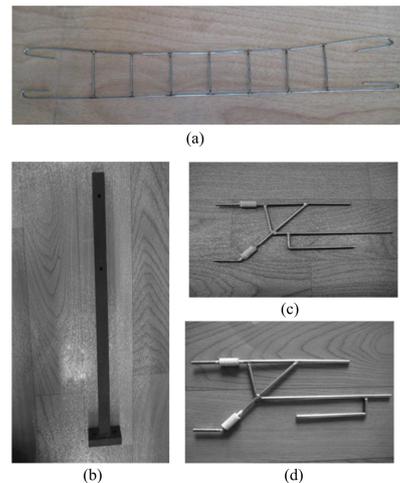


图 6 牵引网各组成部分实物模型图

Fig. 6 Physical models of the components in traction network

轨道采用与电力机车模型配套的 1:22.5 缩小的模型轨道, 占地面积为 3.6 m×3.7 m。沿轨道外圈铺设一条地线, 并且每隔一段距离通过横联线将地线与轨道相连, 达到良好的接地效果, 从而模拟实

际接地系统，达到降低钢轨电位的目的。

2.3 电力机车模块的设计

电力机车模型主要由电力机车车体、电机调速电路以及无线通信电路构成。采用 1:22.5 比例缩小的电力机车头作为机车模型如图 7 所示，机车内部驱动电机采用直流电机，其额定电压为 24 V，额定电流为 10 A，最大功率 240 W。电力机车利用受电弓从接触网接受 27.5 V、50 Hz 单相交流电，通过两电平 PWM 整流器进行交-直变换，输出直流电能；中间直流回路由直流支撑电容和撬棒放电回路等构成，用于稳定中间直流电压；Buck 变换器进行直-直变换，将中间直流电压变换成合适的直流电压，驱动直流电机，牵引电动机的转矩和转速通过齿轮箱传递给轮对驱动列车运行，从而将电能转换成机械能。为了机车安全、平稳运行，增加速度采集单元与无线通信单元，机车内部电路组成框图如图 8 所示。

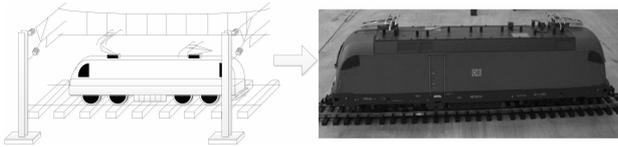


图 7 1:22.5 比例缩小的电力机车车体

Fig. 7 Design of electric locomotive (1:22.5 scaled down)

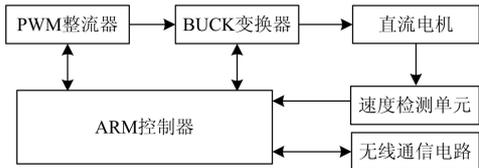


图 8 机车内部电路组成框图

Fig. 8 Block diagram of the internal circuit in the locomotive

在机车内部，采用 PWM 整流器将受电弓获取的交流电变换为直流电，相比于二极管不可控整流，它有以下优点^[11]：

- (1) 交流侧电流谐波含量小；
- (2) 交流侧功率因数接近为 1；
- (3) 直流侧电压恒定。

实验系统采用单相两电平 PWM 整流器模拟真实机车内部整流器，PWM 整流器电流控制策略采用瞬态直接电流控制，其调制函数如式(4)^[12]。

$$\begin{cases} I_N^* = I_d U_d / U_N + K_p (U_d^* - U_d) + 1/T_i \int (U_d^* - U_d) dt \\ u_{ab}(t) = u_N(t) - \omega L I_N^* \cos \omega t - R_N I_N^* \sin \omega t - K [I_N^* \sin \omega t - i_N(t)] \end{cases} \quad (4)$$

式中： K_p 、 T_i 为 PI 调节器的参数； U_d^* 为中间直流侧电压给定值； I_d 、 U_d 为中间直流环节电流和电压； K 为比例放大系数； ω 为网侧电压的角频率； $u_{ab}(t)$ 为调制信号。图 9 为系统运行工作时，交流侧电压、电流波形，得到了较好的结果。

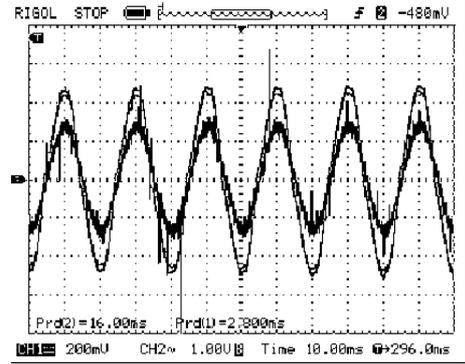


图 9 交流侧电压、电流波形

Fig. 9 Voltage and current waveforms at AC side

电力机车模型是由直流电机进行驱动，采用 Buck 直-直变换器对其进行速度控制，具有控制算法简单，动态响应速度快，稳态误差小的优点。系统采用 PI 控制器，通过编码器采集机车瞬时速度进行反馈，与设定速度相减误差传入 PI 控制器，PI 控制器进行计算输出速度控制指令信号，经过控制器转换成 PWM 信号对 Buck 进行控制，控制框图如图 10 所示。

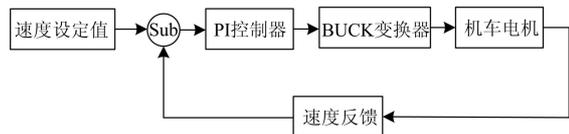


图 10 机车速度调节控制框图

Fig. 10 Block diagram of the system adjustment for locomotive speed

通过在机车上装载无线通信模块，可进行数据无线收发，实现与远动监控模块的数据通信。无线通信模块接收远动监控模块传来的速度设定信号，进行速度控制，同时可将网侧电流和电压等电气信号传输给远动监控模块。控制器内部有 CRC 校验寄存器，通过相关设置，实现冗余校验，在保证传输速度的同时，实现数据传输的可靠性和抗干扰功能。

2.4 远动监控模块的设计

远动监控子系统主要由调度端、通信信道和 RTU（远动终端装置）三部分组成。远动是利用远程通信技术进行信息传输，实现对远方运行设备的监视和控制。监视和控制的过程包括遥测、遥信、

遥控、遥调。

调度端是由一台 PC (个人计算机) 机做调度主机, 通过无线通信技术使调度端与 RTU 进行数据传输, 用以监测模拟牵引变电所和电力机车的运动装置分别为 RTU1 和 RTU2。在 RTU1 和 RTU2 都安装数据采集电路、控制电路和无线通信电路, 调度端能实时监控各模拟运动装置。其结构图如图 11 所示。

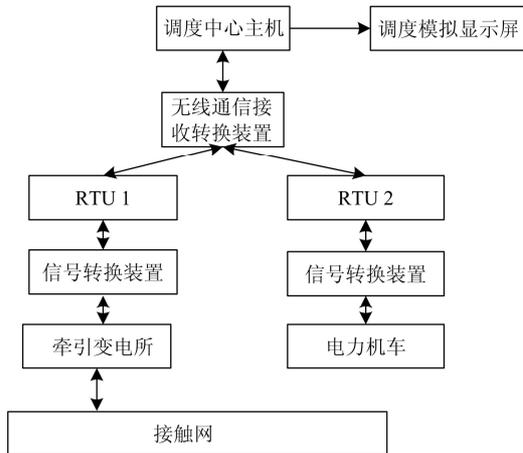


图 11 远动监控模块结构图

Fig. 11 Structure of remote monitoring module

远动监控模块软件主要由通信驱动模块、调度管理模块、图像显示模块、数据处理模块和实时数据库模块组成。远动监控模块采用图形化编译软件 Labview 进行操作界面的编写, 易于升级管理, 提高软件的灵活度, 根据教学、培训需要可以适当更新版本。同时 LabView 库里含有大量的图形化控件, 可以将 RTU 传送的数据形象地用图形显示出来。同时通过数据库模块可以回显历史数据, 便于观察与分析。通过分析采集数据可以对实验系统进行健康诊断和故障类型识别分析等功能。远动监控模块操作界面如图 12 所示。

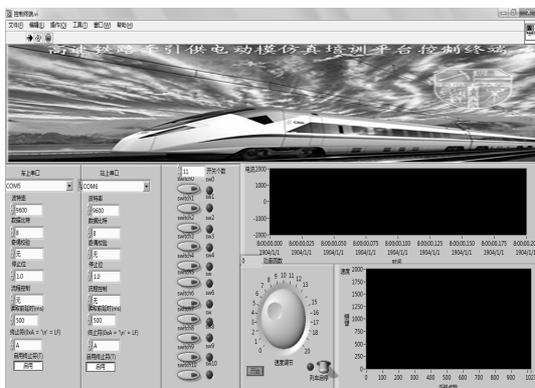


图 12 远动监控模块操作界面图

Fig. 12 Interface of remote monitoring system

按照设计参数制作出高速铁路牵引供电系统动态模拟综合实验系统, 其实验模型如图 13 所示。



图 13 实验系统实物模型图

Fig. 13 Physical models of the experimental system

3 结束语

本文从实际的高速铁路牵引供电系统出发, 分别从牵引变压器、牵引网、电力机车及运动监控四个模块, 完整地阐述了高速铁路牵引供电模拟仿真实验平台的设计过程。在完成牵引供电模拟系统的实物仿真模块后, 进一步编写出上位机远动监控软件。该实验系统具有较高的拟真度, 能够形象地还原高速铁路牵引供电系统的现场运行情况, 同时, 该系统操作方便、易于安装使用, 适用于专业从业人员以及各大专院校的培训、教学、实验等, 为高速铁路牵引供电系统教学开辟了一种新思路。

参考文献

- [1] 何俊文, 李群湛, 刘炜, 等. 交流牵引供电系统仿真通用数学模型及其应用[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 25-29. HE Jun-wen, LI Qun-zhan, LIU Wei, et al. General mathematical model for simulation of AC traction power supply system and its application[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 25-29.
- [2] 高然, 徐永海, 夏瑞华. 电气化铁路负序电流对发电机负序过流保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(19): 42-45. GAO Ran, XU Yong-hai, XIA Rui-hua. Analysis of the operation of the generator negative current protection impacted on by the electric railway loading[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(19): 42-45.

- [3] 王奇, 刘志刚, 白玮莉, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的牵引供电系统仿真模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 35-40.
WANG Qi, LIU Zhi-gang, BAI Wei-li, et al. Research on the simulation model of traction power supply system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(16): 35-40.
- [4] 刘建强, 郑琼林, 杨其林. 高速列车牵引传动系统与牵引网谐振机理[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 221-227.
LIU Jian-qiang, ZHENG T Q, YANG Qi-lin. Resonance mechanism between traction drive system of high-speed train and traction network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 221-227.
- [5] 刘家军, 姚李孝, 刘小勇, 等. 基于牵引供电微机远动综合实验系统的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 116-118.
LIU Jia-jun, YAO Li-xiao, LIU Xiao-yong, et al. Design and realization based on comprehensive experimental system for traction power supply and microcomputer telecontrol[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 116-118.
- [6] 柯志敏. 牵引供电系统微机远动仿真教学系统设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
KE Zhi-min. Design of the simulation teaching system for telemechanical apparatus in the electric railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.
- [7] 杨振龙. V/x 接线牵引变压器的研究与应用[J]. 电气化铁道, 2004(4): 12-15.
YANG Zhen-long. Research and application of V/x wiring traction transformer[J]. Electric Railway, 2004(4): 12-15.
- [8] 杨振龙. V/x 接线与 Scott 接线牵引变压器的工程应用比较[J]. 电气化铁道, 2006(3): 4-7.
YANG Zhen-long. The comparison of V/x wiring and Scott wiring traction transformer in engineering applications[J]. Electric Railway, 2006(3): 4-7.
- [9] 吴命利, 黄足平, 楚振宇, 等. 适用于 AT 供电系统的二次侧中点抽出式 Scott 接线牵引变压器[J]. 电工技术学报, 2011, 26(2): 95-100.
WU Ming-li, HUANG Zu-ping, CHU Zhen-yu, et al. The Scott traction transformer with secondary midpoint drawn-out applicable to at feeding systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(2): 95-100.
- [10] 李群湛, 贺建闽. 牵引供电系统分析[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007: 26-40.
LI Qun-zhan, HE Jian-min. Analysis of traction power supply system[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2007: 26-40.
- [11] 吴振兴, 邹云屏, 张哲宇, 等. 单相 PWM 整流器的输入电流自适应预测控制器[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 73-79.
WU Zhen-xing, ZOU Yun-ping, ZHANG Zhe-yu, et al. Adaptive predictive controller of supply current applied in single-phase PWM rectifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 73-79.
- [12] 冯晓云. 电力牵引交流传动及其控制系统[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2009: 95-118.
FENG Xiao-yun. AC drive electric traction and control system[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2009: 95-118.

收稿日期: 2013-09-23; 修回日期: 2013-11-03

作者简介:

李 勇(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无线电能传输; E-mail:leeo1864@163.com

王江峰 1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为牵引供电系统潮流计算;

何正友(1970-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事信号处理和信息理论在电力系统故障分析中的应用、新型继电保护原理、配网综合自动化等方向的研究。