

文章编号: 1006-4710(2013)01-0103-06

交流传动牵引负荷冲击特性研究

杨国清, 姚李孝, 熊峰

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 分析了牵引供电系统的组成结构, 对HXD3交流传动电力机车的牵引传动系统进行了研究, 建立了V/v接线牵引变压器的带回流线的直接供电方式这种典型牵引供电系统的Simulink仿真模型。在此基础上, 分析交流传动牵引负荷的特点, 并且指出了牵引负荷对电网造成功率冲击的主要原因。最后基于总体测辨法的建模思路, 运用最小二乘支持向量机的回归原理, 建立交流传动牵引负荷的非机理模型。仿真建模结果表明, 该模型能够反映交流传动牵引负荷的冲击特性和负荷特性。

关键词: 交流传动; 牵引负荷; 冲击特性; 总体测辨法; 最小二乘支持向量机

中图分类号: TM714

文献标志码: A

Research on the Shock Characteristics of AC Drive Traction Loads

YANG Guoqing, YAO Lixiao, XIONG Feng

(Faculty of Water Resource and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The composition of traction power supply system is analyzed, also, the HXD3 traction drive system is studied, and then the simulation model of typical traction power supply system is set up based on Simulink, namely direct feeding system with return wire mode with V/v transformer. On the basis of which, this paper analyzes the characteristics of electrified railway traction loads, and points out the main cause of the shock of the traction loads on the power system. According to the measurement-based modeling, the least square support vector machine is applied to the establishment of the non-mechanism model of traction loads. The simulation test results show that the model can reflect the shock load characteristics of AC driving traction loads.

Key words: AC drive; traction loads; shock characteristics; measurement-based modeling; least square support vector

电气化铁路牵引负荷作为一种大功率单相整流负荷, 其产生的负序和高次谐波电流注入到电力系统, 将对旋转电机、电力变压器、继电保护装置等产生一定的影响^[1-2], 威胁到电力系统的安全稳定运行。因此系统研究电气化铁路牵引负荷特性具有现实的重要意义。文献[3]从牵引负荷的综合负荷特性出发, 根据牵引负荷的实际负荷构成特性提出了“感应电动机并联牵引电机和恒阻抗”的机理模型。文献[4]针对此模型无功描述能力的不足, 提出采用附加动态无功补偿元件的方法, 进而提出了改进的牵引供电系统综合负荷模型。

直流牵引电机由于受到结构尺寸和重量的限制, 牵引制动性能和效率都不及交流传动机车, 已不

能满足当今社会对铁路高速、重载的要求, 因此交流传动是电气化铁路牵引动力发展的必然趋势。文献[3]、[4]对研究电气化铁路牵引负荷特性有很好的指导意义, 但并未对交流传动类型电力机车进行研究, 并且所建立的牵引供电系统负荷模型虽然描述能力好, 但不能反映牵引负荷的冲击特性。

负荷模型的准确与否对电力系统数字仿真的结果有很大影响^[5-6]。在某些情况下, 采用不同的负荷模型会得出截然相反的结论。建立准确的冲击负荷模型是研究电气化铁路牵引负荷对电网影响的基础。目前, 冲击负荷的研究主要集中在电弧炉、硅铁、电解铝等^[7-9], 对电气化铁路牵引负荷的冲击特性研究较少。

收稿日期: 2012-09-26

作者简介: 杨国清, 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统的测量控制。E-mail: 163usher@163.com。

姚李孝, 男, 教授, 博导, 研究方向为电力系统规划与运行。

本文对HXD3交流传动电力机车的牵引传动系统进行了研究,建立了V/v接线牵引变压器的带回流线的直接供电方式这种典型牵引供电系统的Simulink仿真模型。在此基础上仿真分析了电气化铁路牵引负荷的特点,并且指出了牵引负荷对电网造成功率冲击的主要原因。最后基于仿真数据的总体测辨法建模思路,建立牵引负荷的最小二乘支持向量机模型。

1 牵引供电系统仿真模型的构建

牵引供电系统由牵引变电站、牵引网、电力机车等部分组成。牵引变电站实现变压、变相,把电力系统供应的电能为适合于电力牵引的电能。牵引变压器是牵引变电站的主要电气设备,常用的接线形式有:YNd11接线牵引变压器、V/v接线牵引变压器及三相-两相Scott接线牵引变压器等。牵引网由馈线、接触网、钢轨、回流线等构成,组成牵引供电回路,对电力机车送电。

交流电力牵引网的供电方式按牵引网对抑制通信线路的干扰可分为直接供电方式、带回流线的直接供电方式、吸流变压器供电方式及自耦变压器供电方式等。一般电气化铁路以带回流的直供方式为主。

1.1 V/v接线牵引变压器

两台单相变压器接成开口三角形,即构成V/v接线牵引变压器。变压器的一次侧分别接到A、C相与B、C相,二次侧各取一端分别接到 α 、 β 供电臂上,另一端接到钢轨。

1.2 牵引网等值模型

牵引网结构复杂,其建模的准确程度关系到能否成功模拟整个牵引供电系统,有必要对其进行合理的等效与化简。将相互并联的、处于同极性电压的多根导线合并为一组,接触线和承力索等效为一根导体,牵引网最终可简化为三根导线平行传输的系统^[10-11],由于每个供电臂很短(不超过50 km),因此可以忽略线间电容。

1.3 HXD3电力机车牵引传动系统

HXD3型电力机车是大连机车车辆有限公司与日本东芝公司联合制造的6轴大功率交流传动电力机车。HXD3电力机车牵引传动系统由整流单元、中间电路、逆变电路和交流牵引电动机等组成。其结构如图1所示。

整流单元采用IGBT元件,额定输入电压为1450 V,单相两点式电压型。本文整流器采用瞬态直接电流控制策略,仿真模型如图2所示。

$$I_N = K_P(U_d^* - U_d) + \frac{1}{T} \int (U_d^* - U_d) dt + I_d U_d / U_N$$

$$U_{AB} = U_N(t) - \omega L I_N \cos(\omega t) - R I_N \sin(\omega t) - k [I_N \sin(\omega t) - i_N]$$

式中, K_P 、 T 为比例积分环节的系数; U_d^* 为中间直流侧电压给定值; U_d 为中间直流环节电压, I_d 为中间直流环节电流; ω 为网侧电压的角频率; L 、 R 分别为牵引绕组漏电感和电阻。

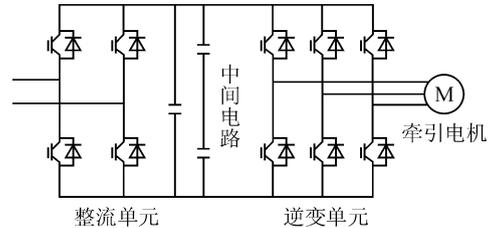


图1 HXD3电力机车牵引传动系统

Fig.1 HXD3 traction drive system

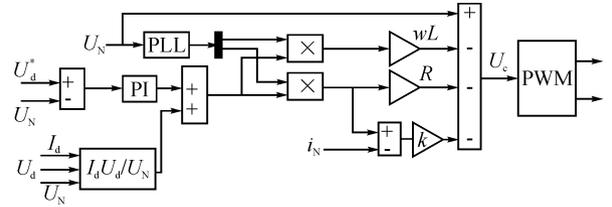


图2 瞬态直接电流控制

Fig.2 Transient current control

逆变单元同整流单元一样使用模块化的IGBT元件,额定输入电压为2800 V,两电平电压源型。逆变器采用空间矢量脉宽调制控制策略(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM),其算法包括:判断电压矢量所在扇区、计算工作时间、计算电压矢量切换点等。仿真模型如图3所示, T 为SVPWM开关周期。

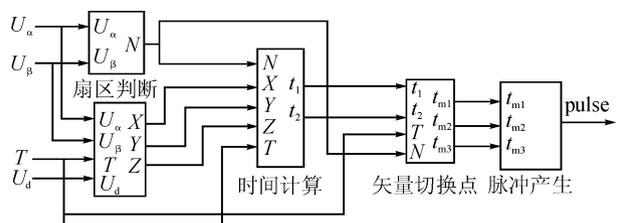


图3 空间矢量脉宽调制

Fig.3 Space vector pulse width modulation

HXD3电力机车牵引电动机采用按转子磁场定向的间接矢量控制。矢量控制的思想就是用直流电动机的控制模式来对交流电机进行控制,使同步坐标系M轴在转子磁连方向定向,实现定子电流的磁场分量和转矩分量解耦控制。

按转子磁场定向的矢量控制的基本控制策略建立的牵引电机矢量控制模型如图4所示。将给定速度 V^* 和牵引电机速度 V 进行比较后,通过比例积分

环节PI得到转矩指令 T_e^* ;将指令电流 i_q^* 、 i_d^* 和牵引电机电流 i_q 、 i_d 进行比较后,分别通过比例积分环节PI得到反馈电压 U_q^* 、 U_d^* 。

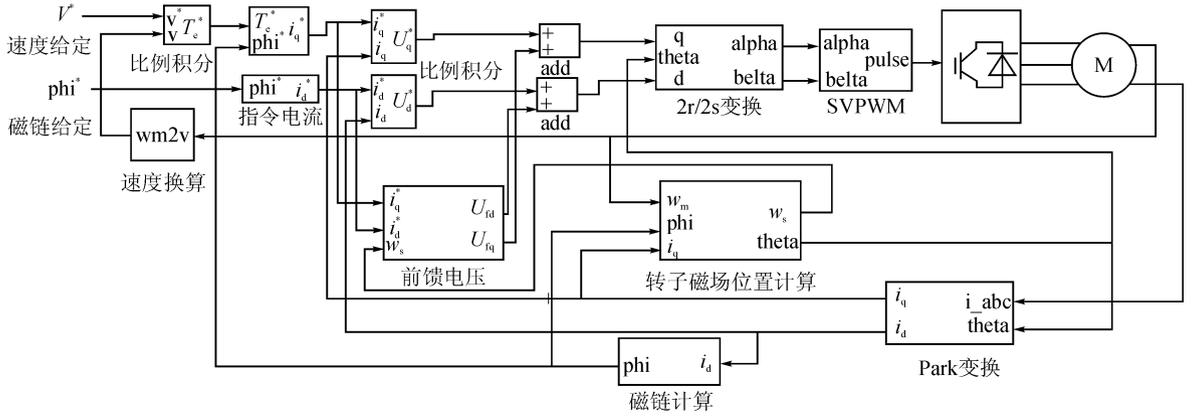


图4 牵引电机矢量控制模型
Fig. 4 The model of vector control of traction electric machine

2 电气化铁路牵引负荷特性分析

图5为牵引供电系统的仿真原理图。图中模型将公共电网等效为三相电源,连接于牵引变电站的主变压器高压侧,牵引网长度为30 km。负荷建模的数据在母线B处测得。

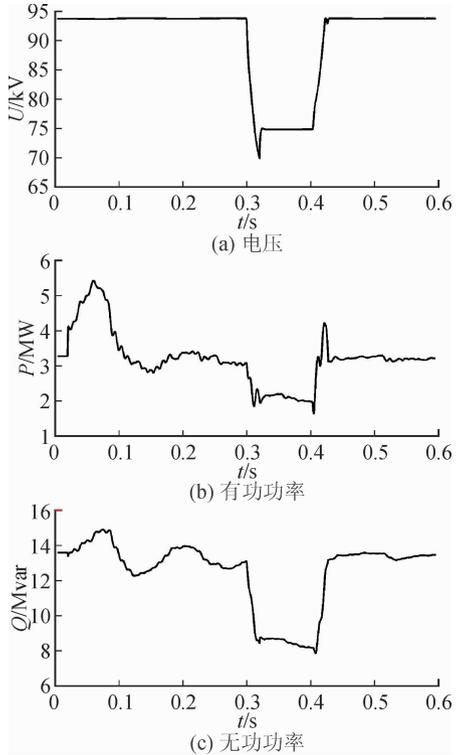


图6 短路时测量到的电压和功率
Fig. 6 Measured voltage and power when short circuit occurs

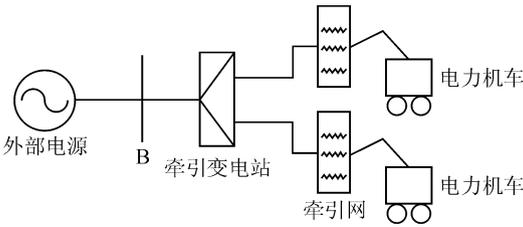


图5 牵引供电系统仿真原理
Fig. 5 The schematic diagram of simulation system

图6是机车恒速 $V = 100 \text{ km/h}$ 牵引变电站高压侧三相短路时测量到的电压、有功及无功功率。

由图6可以看出,牵引负荷进入稳态的时间较长且波动较大,初始时刻有暂时的冲击性,这种特性主要体现在有功上,而无功的变化相对不很明显。

当机车进入稳定运行时,牵引负荷的特性与常规负荷一致。

造成这种功率冲击的主要原因是机车牵引传动系统中中间直流回路的支撑电容器上的电压不能突变而形成冲击电流。

因此电气化铁路牵引负荷初始时有暂时的冲击性,而在稳定运行时的特性与传统负荷一致。

当机车运行于其它工况时,可得出相同的结论。

3 电气化铁路牵引负荷建模研究

本文研究的牵引负荷模型是从牵引变电站高压侧看下去的所有元件的集成。由于交流传动牵引负荷的冲击性,传统的感应电动机并联静态负荷模型不能描述此种特性^[19],必须寻找更有效的建模方法。支持向量机(Support Vector Machine, SVM)是

在统计学习理论上发展起来的一种新的通用学习方法,具有很强的非线性拟合能力和泛化能力。最小二乘支持向量机(Least Square Support Vector Machine, LSSVM)是支持向量机的一种扩展,它是将SVM的二次规划问题转化为线性方程组的求解,提高了求解的速度和收敛精度。

3.1 LSSVM 回归理论

给定 N 个样本可以表示为 $\{x_k, y_k\}$, 其中 x_k 是 n 维输入向量, y_k 是输出。首先用一个非线性函数 $\varphi(\cdot)$ 把输入数据映射到多维特征空间, 在这个特征空间中支持向量机模型为:

$$y(x) = \mathbf{w}^T \varphi(x) + b \quad (1)$$

利用结构风险最小化原则, 寻找 \mathbf{w} 、 b 就是求解如下问题:

$$\begin{aligned} \min J &= \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} + \frac{1}{2} \gamma \sum_{k=1}^N e_k^2 \\ \text{s. t. } y(x) &= \mathbf{w}^T \varphi(x) + b + e_k \quad k = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (2)$$

建立拉格朗日函数求解它的最优解:

$$\begin{aligned} L(\mathbf{w}, b, e, \alpha) &= J(\mathbf{w}, e) - \\ &\sum_{k=1}^N \alpha_k (\mathbf{w}^T \varphi(x_k) + b + e_k - y_k) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, α_k 为拉格朗日乘子。

令拉格朗日函数对 \mathbf{w} 、 b 、 e_k 、 α_k 的一阶偏导数为零, 可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \mathbf{w}} = 0 &\rightarrow \mathbf{w} = \sum_{k=1}^N \alpha_k \varphi(x_k) \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 &\rightarrow \sum_{k=1}^N \alpha_k = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial e_k} = 0 &\rightarrow \alpha_k = \gamma e_k \\ \frac{\partial L}{\partial \alpha_k} = 0 &\rightarrow \mathbf{w}^T \varphi(x_k) + b + e_k - y_k = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

令核函数 $K(x_i, x_j) = \varphi^T(x_i) \varphi(x_j)$ 为满足 Mercer 条件的对称函数。则由式(4)可得:

$$\begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I}_v^T \\ \mathbf{I}_v & \mathbf{\Omega} + \frac{1}{\gamma} \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中: $\mathbf{I}_v = [1, \dots, 1]$, $\mathbf{\Omega}_{ij} = K(x_i, x_j)$, $i, j = 1, \dots, N$, 则最小二乘支持向量机的回归估计函数:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i K(x, x_i) + b \quad (6)$$

式中 α 、 b 由式(5)求出。

核函数的种类较多, 一般选择 RBF 核: $K(x_i, x_j) = \exp[-\|x_i - x_j\|^2 / (2\sigma^2)]$, 它只有一个待定参

数 σ , 其值越大, 收敛速度越快, 但是由此模型估计的值不能真实反映各点的数据。正规化参数 γ 决定了适应误差的最小化和平滑程度。这样需要优化的参数有核函数宽度 σ 和正规化参数 γ , 这两个参数决定了 LSSVM 的学习和泛化能力。本文采用粒子群算法^[20]对参数优化选择, 以尽量保证模型的全局最优性。

3.2 LSSVM 负荷建模方法

LSSVM 建模的基本思想是用两个 LSSVM 分别描述有功功率 $P(t)$ 、无功功率 $Q(t)$ 和输入矢量之间的非线性映射关系, 本文所建有功和无功 LSSVM 模型如下:

$$\begin{aligned} P(t) &= f_p(P(t-1), P(t-2), \dots, P(t-n); \\ &\quad u(t), u(t-1), u(t-2), \dots, u(t-n)) \\ Q(t) &= f_q(Q(t-1), Q(t-2), \dots, Q(t-n); \\ &\quad u(t), u(t-1), u(t-2), \dots, u(t-n)) \end{aligned}$$

式中, P 、 Q 为牵引变电站高压侧的功率, u 为牵引变电站高压侧的电压。这样就可以分别形成有功和无功 LSSVM 模型的输入、输出样本对:

$$\begin{aligned} (x_1, y_1) &= (P(t-1), \dots, P(t-n), u(t), u(t-1), \dots, u(t-n); P(t)) \\ (x_2, y_2) &= (Q(t-1), \dots, Q(t-n), u(t), u(t-1), \dots, u(t-n); Q(t)) \end{aligned}$$

LSSVM 建模的步骤为: ①对图 5 中的母线 B 处的测量数据分析处理形成 LSSVM 要求的样本对; ②将正规化参数 γ 和核函数宽度 σ 作为粒子的位置向量, 并初始化粒子群算法的各参数; ③用 LSSVM 对样本进行训练, 得到误差目标函数并作为粒子群算法的适应度值; ④将各粒子当前的适应度值与该粒子自身的最优适应度值进行比较, 如果更优, 则将该粒子的位置作为该粒子的最优位置; ⑤将各粒子自身最优位置适应度值与群体最优位置的适应度值作比较, 如果更优, 则将该粒子的最优位置作为群体的最优位置; ⑥按照粒子群算法的原理更新粒子的位置和速度向量; ⑦训练完毕, 得到优化的 σ 、 γ 和最小二乘支持向量。

4 仿真建模分析

在牵引变电站的高压侧设置不同的故障形式, 得到不同电压扰动下的仿真测量数据。选择三组数据进行 LSSVM 的建模与泛化能力的研究。第一组电压扰动幅度为 20.04% 的数据用于 LSSVM 的建模, 第二组和第三组电压扰动幅度为 41.4% 和 9.6% 的数据用于研究模型的泛化能力。选择 LSSVM 模型的阶数为二阶, 即输入矢量中的 n 取 2。由

粒子群算法优化的有功和无功 LSSVM 模型的最优参数如表 1 所示。

表 1 优化后的 LSSVM 模型最优参数

Tab.1 The optimal parameters of LSSVM model

参数	σ	γ
有功模型	100	70
无功模型	150	80

图 7 和图 8 分别为 41.4% 和 9.6% 电压扰动时实测响应与模型响应的拟合结果。

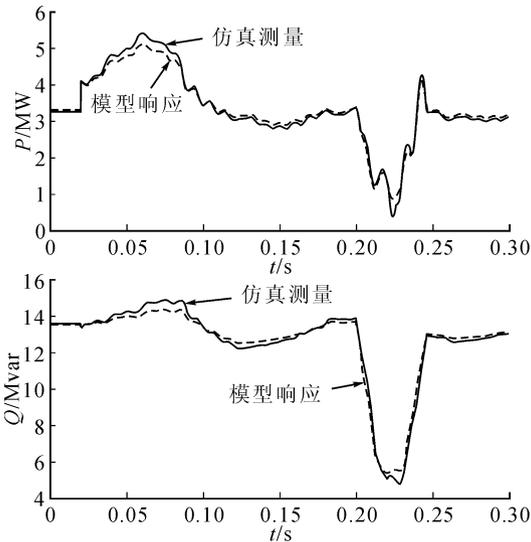


图 7 41.4% 电压扰动时的功率拟合结果

Fig.7 Power of the measured and the LSSVM model output at 41.4% of voltage disturbance

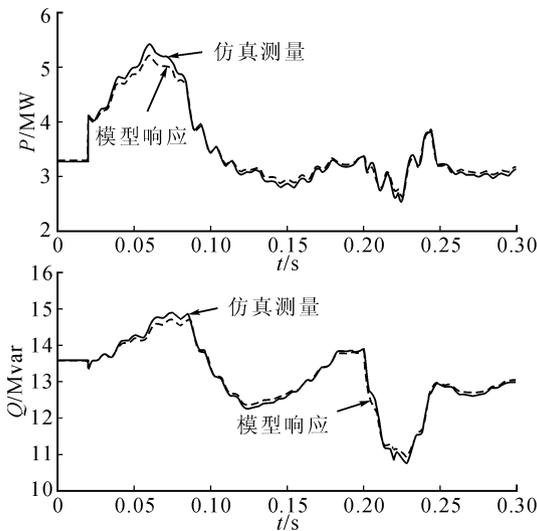


图 8 9.6% 电压扰动时的功率拟合结果

Fig.8 Power of the measured and the LSSVM model output at 9.6% of voltage disturbance

从拟合效果可以看出:①LSSVM 模型能在电压大范围变化下描述交流传动牵引负荷特性,说明 LSSVM 模型有很好的动态电压特性和很强的泛化

能力;②LSSVM 模型不仅对仿真测量数据有功功率拟合较好,而且也对无功功率拟合较好,这与 LSSVM 很强的非线性能力有关,同时也表明了优化参数的合理性;③LSSVM 模型能够描述初始时刻交流传动牵引负荷的冲击特性,对冲击性表现明显的有功和变化相对较小的无功都能很好描述,克服了传统负荷模型描述冲击特性的不足;④LSSVM 模型能描述机车稳定运行时的传统负荷特性,表明了 LSSVM 模型的通用性。

5 结论

本文建立了典型牵引供电系统的仿真模型,对交流传动牵引负荷特性进行了分析,并指出交流传动牵引负荷对电网造成功率冲击的主要原因。仿真结果表明,交流传动牵引负荷的波动性较大,与传统负荷的区别主要表现在接入电网的初始时刻有暂时的冲击性,这对于确保电气化铁路影响下电网的安全稳定运行有一定的指导意义。最后根据交流传动牵引负荷的特点,建立了牵引负荷的非机理模型。由于该模型物理意义不明确,很难与电力系统分析软件(BPA、PSASP 等)实现接口,因此下一步的研究重点应该是建立能在电力系统分析中使用的机理模型。

参考文献:

[1] 卢志海,厉吉文,周剑. 电气化铁路对电力系统的影响[J]. 继电器,2004,32(11):32-35.
 Lu Zhihai, Li Jiwen, Zhou Jian. The impact of electrified railway on electric power system [J]. Relay, 2004, 32(11):32-35.

[2] 姚金雄,张涛,林榕,等. 牵引供电系统负序电流和谐波对电力系统的影响及其补偿措施[J]. 电网技术,2008,32(9):62-64.
 Yao Jinxiong, Zhang Tao, Lin Rong, et al. Impacts of negative sequence current and harmonics in traction power supply system for electrified railway on power system and compensation measures [J]. Power System Technology, 2008, 32(9):62-64.

[3] 李欣然,张广东,朱湘有,等. 牵引供电系统综合负荷模型结构[J]. 电力系统自动化,2009,33(16):71-75.
 Li Xinran, Zhang Guangdong, Zhu Xiangyou, et al. A load model of traction power supply system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16):71-75.

[4] 张永旺,李欣然,李金鑫,等. 牵引供电系统综合负荷实测建模[J]. 电力系统及其自动化学报,2012,24(1):95-98.
 Zhang Yongwang, Li Xinran, Li Jinxin, et al. Measurement-

- based composite load modeling of traction power supply system [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24 (1): 95-98.
- [5] 张明理,王天,唐果,等. 负荷模型对系统暂态稳定计算的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(22): 26-29.
Zhang Mingli, Wang Tian, Tang Guo, et al. Effect of load model on transient stabilization calculation [J]. Power System Technology, 2007, 31(22): 26-29.
- [6] Borghetti A, Caldon R, Mari A, et al. On dynamic load models for voltage stability studies [J]. IEEE Trans on Power System, 1997, 12(1): 293-298.
- [7] 祁碧茹,肖湘宁. 用于电压波动研究的电弧炉的模型和仿真[J]. 电工技术学报, 2000, 15(3): 31-35.
Qi Biru, Xiao Xiangning. Modeling an simulation of an arc furnace for voltage fluctuation investigation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(3): 31-35.
- [8] 王晶,束洪春,林敏,等. 用于动态电能质量分析的交流电弧炉的建模与仿真[J]. 电工技术学报, 2003, 18(3): 54-58.
Wang Jing, Shu Hongchun, Lin Min, et al. Modeling an simulation of an arc furnace for dynamic power quality studies [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(3): 54-58.
- [9] 贺仁睦,王吉利,史可琴,等. 实测冲击负荷分析与建模[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 59-64.
He Renmu, Wang Jili, Shi Keqin, et al. Analysis and modeling of shock load via measurement [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 59-64.
- [10] 李群湛,贺建闽. 牵引供电系统分析[M]. 重庆:西南交通大学出版社, 2007: 70-95.
- [11] 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): 36-39.
Wang Qi, Liu Zhigang, Bai Weili, 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): 36-39.
- [12] 杨守君,刘会岩. HXD3型交流传动电力机车[J]. 电力机车与城轨车辆, 2007, 30(4): 9-12.
Yang Shoujun, Liu Huiyan. Type HXD3 AC drive electric locomotive [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2007, 30(4): 9-12.
- [13] 桂武鸣,刘子健,刘连根,等. 电压型四象限变流器的数值仿真[J]. 电气自动化, 2003, 25(2): 33-35.
Gui Wuming, Liu Zijian, Liu Liangen, et al. Numerical simulation of the voltage source 4-quadrant converter [J]. Electrical Automation, 2003, 25(2): 33-35.
- [14] 冯晓云. 电力牵引交流传动及其控制系统[M]. 北京:高等教育出版社, 2009: 111-126.
- [15] 刘家军,姚李孝,吴添森,等. PSCAD/EMTDC中SVPWM算法的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 121-124.
Liu Jiajun, Yao Lixiao, Wu Tiansen, et al. Implementation of SVPWM algorithm in PSCAD/EMTDC [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 121-124.
- [16] 朝泽云,康勇,钟和清,等. 异步电机矢量控制系统的建模与仿真[J]. 电机与控制应用, 2007, 34(3): 11-14.
Chao Zeyun, Kang Yong, Zhong Heqing, et al. Modeling and simulation of asynchronous motor vector control system [J]. Electric Machines & Control Application, 2007, 34(3): 11-14.
- [17] 洪乃刚. 电力电子和电力拖动控制系统的MATLAB仿真[M]. 北京:机械工业出版社, 2006: 196-207.
- [18] 鞠平,马大强. 电力系统负荷建模[M]. 北京:水利电力出版社, 1995: 2-9.
- [19] 张宏斌,贺仁睦,刘应梅. 基于KOHONEN神经网络的电力系统负荷动特性聚类与综合[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 2-5.
Zhang Hongbin, He Renmu, Liu Yingmei. The characteristics clustering and synthesis of electric dynamic loads based on KOHONEN neural network [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 2-5.
- [20] Suykens J A K, Vandewalle J. Least squares support vector machine classifiers [J]. Neural Processing Letter, 1999, 9(3): 293-300.
- [21] 郭辉,刘贺平,王玲. 最小二乘支持向量机参数选择方法及其应用研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(3): 2033-2036.
Guo Hui, Liu Heping, Wang Ling. Method for selecting parameters of least squares support vector machines and application [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(3): 2033-2036.
- [22] 纪震,廖惠连,吴青华. 粒子群算法及应用[M]. 北京:科学出版社, 2009: 48-64.
- [23] 章健,王雷涛,张锋. 基于SVM的电力系统动态负荷建模的研究[J]. 继电器, 2008, 36(7): 39-41.
Zhang Jian, Wang Leitao, Zhang Feng. Study of dynamic load modeling for power system based on SVM [J]. Relay, 2008, 36(7): 39-41.

(责任编辑 王卫勋)