

铁路运行的电能质量影响(一):建模基础

李涛¹,梁雨林¹,李俊¹,黄可²,崔荣¹,何小平¹,周虹屹²,张乔²,胡萍³

(1. 国网重庆市电力公司,重庆 401120;2. 西南交通大学

电气工程学院,四川 成都 611756;3. 成都医学院

人文信息管理学院,四川 成都 610500)

摘要:电气化铁路负荷易对电网母线造成较严重的电能质量污染,有必要通过建模分析。作为两篇系列文章的第一篇,详细阐述了用于分析普铁和高铁在各种工况运行对变电站电能质量影响的建模方法。建模分为变电站建模、牵引网及车辆建模、运行电铁外的其他负荷建模。为保证分析结果的精确性,牵引网模型在已有研究基础上采用链式电路模型,考虑各导线之间的耦合;为比较客车和货车对电网电能质量影响,列车建模计及高铁客车和普铁货车。

关键词:电能质量污染;电气化铁路运行;变电站建模;牵引网及车辆建模;负荷建模;链式模型

中图分类号:TM922 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd19389

Power Quality Impact of Railway Operation —— Part I: Modeling Foundation

LI Tao¹, LIANG Yulin¹, LI Jun¹, HUANG Ke², CUI Rong¹, HE Xiaoping¹, ZHOU Hongyi², ZHANG Qiao², HU PING³

(1. Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401120, China; 2. School of Electrical Engineering, Southwest

Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 3. School of Humanities and Information

Management, Chengdu Medical College, Chengdu 610500, Sichuan, China)

Abstract: Considering that electrified railway load easily brings about serious power quality pollution for the power grid buses, it is necessary to give analyses through modeling. As the first part of this two-part paper, the modeling method that to analyze the influence of various operation situations of both ordinary railway and high-speed railway on the substation's power quality was detailedly elaborated. The modeling was composed of the modeling of substation, the modeling of traction network and running vehicle, and the modeling of other loads except for the studied railway. To enable the accuracy of analyses, the chain circuit was adopted in the traction network model, where the couplings of each conductor were considered. Besides, to realize the comparison of the power quality influence between passenger vehicle and truck on the power grid, the modeling of vehicle took into account the passenger vehicle of high-speed railway and the truck of ordinary railway into account.

Key words: power quality pollution; electrified railway operation; modeling of substation; modeling of traction network and running vehicle; modeling of loads; chain model

随着电气化铁路接入电网,其对整个电网系统的影响不可忽视,尤其是大量不平衡负荷的接入,对变电站的正常运行带来巨大挑战。根据已有运行经验,电气化铁路运行主要会对电网造成注入电压偏差、谐波无功、三相负荷不平衡等问题。

近年来,很多学者针对电气化铁路接入电力系统带来的电能质量问题进行研究。文献[1]指出机车采用的大容量单相整流供电设施,除了产生大量谐波电流,还对三相交流供电系统产生不

平衡负荷和负序电压电流;文献[2]归纳总结了铁路运行对电网带来的谐波、无功和负序问题的解决方案,并基于此提出无牵引变压器新型同相供电系统的实现思路及关键控制技术。针对实际的变电站和电铁线路,文献[3]分析了不同运行方式下黔桂电铁对110 kV水任变电站的电能质量影响;文献[4]通过分析指出目前电铁接入电网谐波的预评估结果不宜直接作为供电方强制要求用电方采取滤波措施的依据;文献[5]针

作者简介:李涛(1973-),男,本科,高级经济师,Email:57674399@qq.com

通讯作者:胡萍(1982-),女,讲师,Email:whoopingfwl@163.com

对京沪电气化铁路牵引负荷带来的电能质量的主要问题(谐波和负序),通过研究建议选择平衡变压器作为普通电气化铁路的优化供电方式;文献[6]围绕河南电气化铁路负荷对电网电能质量的影响,从理论上给出了讨论和建议。也有一些学者对不同类型客车(包括高速动车组和普铁电力机车)运行对牵引网造成的不同电能质量问题(如牵引网低频振荡、谐波污染)及其解决措施进行了分析^[7-8]。

围绕电气化铁路接入对电网的影响,不少学者通过建模求解进行研究^[9-13],但存在2点不足:1)仿真模型涉及的电路结构和控制策略较复杂;2)只评估了单工况单辆列车运行下的影响。因此,文献[14]提出了基于PSCAD/EMTDC建模分析方法。该方法结合了电力机车的车型、工况、数量组合3个维度的仿真场景设置建模方案,模型能相对全面地评估铁路接入对电网电能质量的影响。然而,接入电网的铁路可能不仅包括普速铁路,也包括高速铁路;同时,普速铁路中也有货车运行,运行的货车可能对电网电能质量造成更严重污染。鉴于此,本文针对某变电站受电铁运行影响的问题,以电网主变压器、牵引变电所、牵引网、列车的铭牌参数、出厂测试报告和所研究时间点各负荷实测数据为依据,给出了能用于分析普速铁路和高速铁路在各种工况运行对变电站电能质量影响的建模方法。

1 变电站建模

本文根据某一具体的变电站进行建模,变电站接线图见图1。

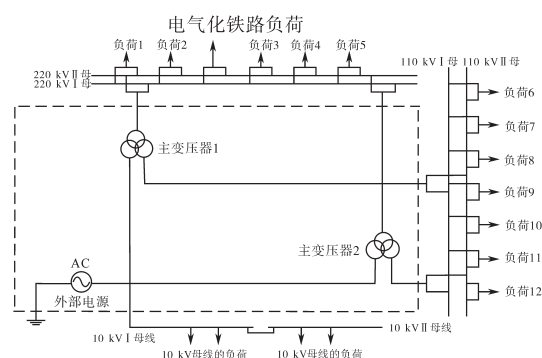


图1 变电站主接线图

Fig.1 Main wiring diagram of substation

此220 kV的变电站有主变压器2台,其容量分别为120 MV·A和150 MV·A;有3个电压等级,分别为220 kV,110 kV,10 kV;主接线方式

为:220 kV,110 kV系统采用双母线带专用旁母的接线方式(母联兼旁路),10 kV系统采用两段单母线的接线方式;220 kV出线6回,分别接入6处负荷;110 kV系统出线7回,分别接入7处负荷;10 kV系统出线4回,分别连接2个其他变电站。在变电站模型中,三相变压器等值各绕组的等值电阻 R_B 、等值电抗 X_B 和励磁电阻 R_Z 、励磁电抗 X_Z 计算式如下式:

$$R_B = \frac{\Delta P_B U_B^2}{S_c^2} \times 10^3 \quad (1)$$

$$X_B = \frac{U_d \% U_B^2}{100 S_c} \times 10^3 \quad (2)$$

$$R_Z = \frac{U_B^2}{\Delta P_0} \times 10^3 \quad (3)$$

$$X_Z = \frac{100}{I_0 \%} \times \frac{U_B^2}{S_c} \times 10^3 \quad (4)$$

式中: ΔP_B 为短路损耗; U_B 为变压器额定线电压; S_c 为变压器额定容量; $U_d \%$ 为短路电压百分数; ΔP_0 为变压器的空载有功损耗; $I_0 \%$ 为空载电流。

2 牵引网与运行列车建模

2.1 牵引网建模

本文利用链式模型对牵引网进行建模。假设电气化铁道采用我国常见的AT牵引供电系统,链式网络模型由串联子网和并联支路2部分组成,通过牵引变电所、AT所(即ATS)、分区所(即SP)、开闭所(SSP)和列车等并联支路可将牵引网分割成若干个串联子网。平行的多导体传输线构成了子网中的串联支路,以并联支路作断面,AT牵引网的断面划分如图2所示。

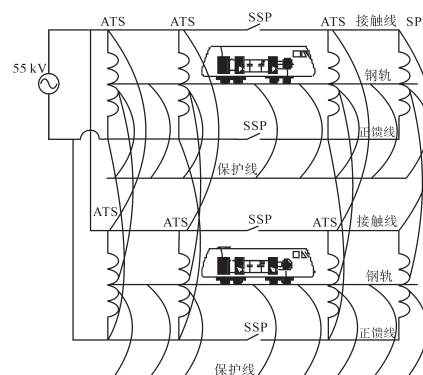


图2 AT牵引网断面划分

Fig.2 Section division of AT traction network

根据图2和图3所示的链式网络的等效方法,在Matlab/Simulink中用 π 型等效电路建立切

割后的子网模型,如图4所示。图4中的子网表达10 km的牵引网线路,该线路包括上行的接触网(T1)、钢轨(R1)、保护线(P1)、正馈线(F1)和下行的接触网(T2)、钢轨(R2)、保护线(P2)和正馈线(F2)。由图4可知,链式模型考虑了各导线的自电感、自电容和两两之间的互电感、互电容。每个子网中的平行多根传输导体可用 π 型等效电路表示,从而将整个牵引网等效为链式网络

(见图3)^[15]。

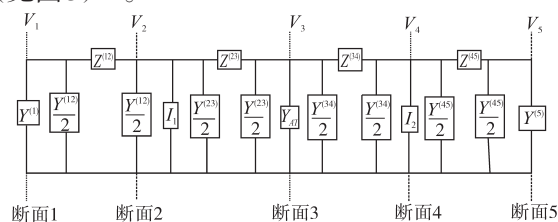


图3 AT牵引网等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of AT traction network

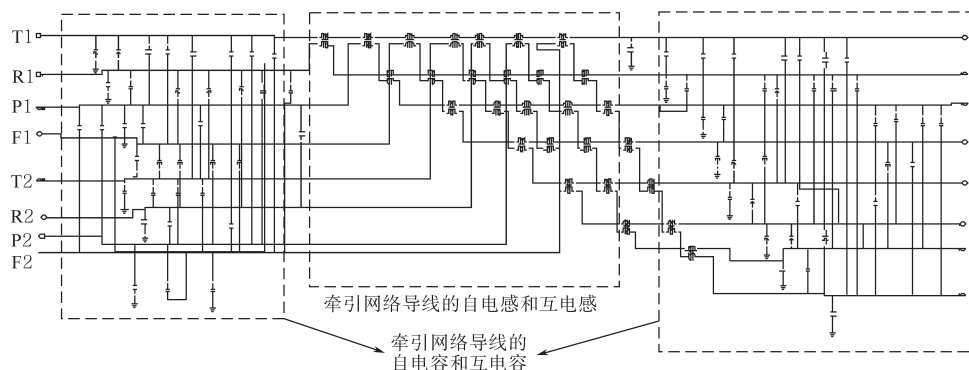


图4 牵引网子网Matlab/Simulink建模

Fig.4 Matlab/Simulink modeling of traction sub-network

典型的AT牵引供电系统参数如表1所示。

表1 牵引网模型计算参数

Tab.1 Calculation parameters of traction network model

导体名称	直流电阻/ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	导体计算半径/ m	水平坐标/ m	垂直坐标/ m
接触线1	0.159 67	0.007 2	0	6.45
承力索1	0.242	0.007	0	8.05
钢轨1	0.135	0.012 79	-0.717 5 0.717 5	0
保护线1	0.238 2	0.007 63	-3.4	6.4
正馈线1	0.118 1	0.010 8	-4.5	7.6
接触线2	0.159 67	0.007 2	4.6	6.45
承力索2	0.242	0.007	4.6	8.05
钢轨2	0.135	0.012 79	3.882 5 5.317 5	0
保护线2	0.238 2	0.007 63	8	6.4
正馈线2	0.118 1	0.010 8	9.1	7.6

基于如上数据,采用Carson公式计算链式模型中各导线的阻抗参数和导纳参数。其中,阻抗参数的计算式如下式^[16-17]:

$$\begin{cases} Z_{ii} = r_i + r_c + j0.1466 \lg \frac{D_g}{R_{ci}} \\ Z_{ij} = r_c + j0.1466 \lg \frac{D_g}{d_{ij}} \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$D_g = \frac{0.2085}{\sqrt{f\sigma \times 10^{-9}}}$$

式中: Z_{ii} 为导线*i*的自阻抗; Z_{ij} 为导线*i*和导线*j*的互阻抗; r_i 为导线*i*的直流电阻; r_c 为大地自身

电阻,取0.049 3 Ω/km ; R_{ci} 为导线*i*的等效半径; d_{ij} 为导体*i*与导体*j*之间的几何距离; f 为电流频率,取工频50 Hz; D_g 为大地等效深度,当土壤电导率为 $\sigma=10^{-4} \Omega/\text{km}$ 时通常将其视为930 m。

导纳参数的计算式如下式^[16-17]:

$$\begin{aligned} P_{ij} &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_i} \\ &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: ϵ_0 为空气介电常数; r_i 为导体*i*的等效半径; h_i 为导体*i*到地面的高度; d_{ij} 为导体*i*与导体*j*之间的空间距离; D_{ij} 为导体*i*与导体*j*之间的镜像距离。

1.2 列车建模

以CRH3型动车组和HXD2B型货车为例,分别建立客车模型和货车模型。其中,CRH3型动车组采用4动4拖模式,每个动力单元有4个变流器柜,每个变流器柜中含有2个整流器、1个中间直流环节和1个逆变器,每个逆变器带动4个牵引电机;HXD2B型货车含有3个主变流器柜,其中每个主变流器柜中含有2个逆变器、2个整流器以及2套中间直流环节,每个逆变器带动1台牵引电机^[18-19]。CRH3型动车组和HXD2B型货车的Matlab/Simulink模型的动力单元模型和车载变压器次边模型分别如图5、图6所示。

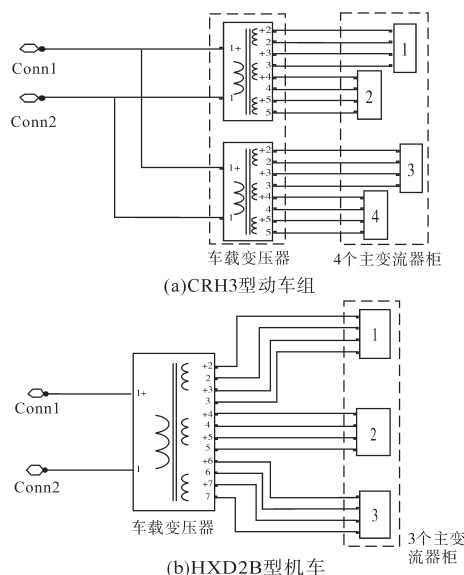


图5 客车和货车的动力单元模型
Fig.5 Dynamic unit model of passenger vehicle and truck

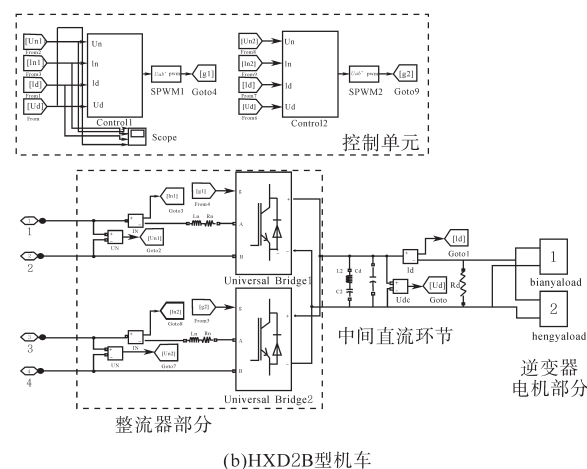
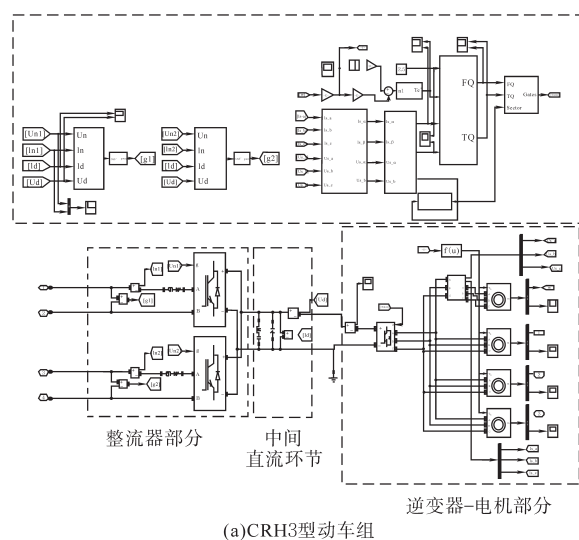


图6 客车和货车的车载变压器次边模型
Fig.6 Secondary side model for transformer of passenger vehicle and truck

在图5a和图6a中,CRH3型动车组模型的整流器控制单元采用瞬态直接电流控制策略,中间直流环节包括2倍电网频率的串联谐振电路、支撑电容和过电压限制电路,逆变器控制单元采用直接转矩控制策略。HXD2B型货车每个环节的建模方法与CRH3型动车组类似,CRH3型动车组中间直流环节电压为1 550 V,HXD2B型机车中间直流环节电压为3 775 V,其他电路结构与电路参数也不同,由于篇幅限制,这里不再赘述。

3 运行地铁外的其他负荷建模

除了第2节建模所针对的电气化铁路,本文所考虑的变电站还外接了大量负荷,这些三相动态负荷的建模参考文献[20]。图7为利用Matlab/Simulink所建立的除运行地铁外的其他负荷模型。如图7所示,负荷模块的有功和无功率(即PQ端口)受外部信号控制。针对所研究的时间点,外部信号根据变电站实时采集的有功功率和无功率输入。

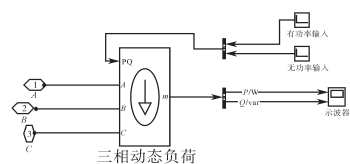


图7 变电站负荷 Matlab/Simulink 建模
Fig.7 Matlab/Simulink modeling of substation load

4 整体的变电站-负荷模型

将第1~第3节中所建立的变电站模型、电铁模型和运行地铁外的其他负荷模型按照图1所示接线方式连接得到整体的电力系统变电站-负荷模型,具体如图8所示。由于在选取的变电站中10 kV侧母线的负荷很小且对电网220 kV侧母线的影 响微乎其微,所以在负荷建模时将其忽略不计。

为研究电铁负载对变电所的影响,可以改变模型中电铁负载的接入情况,形成不同的电铁运行情况 进行仿真分析。本文计及客车运行和货车运行2种情况,4种工况分别为:没有车经过、有1列客车运行、有1列货车运行、2列货车同时运行。

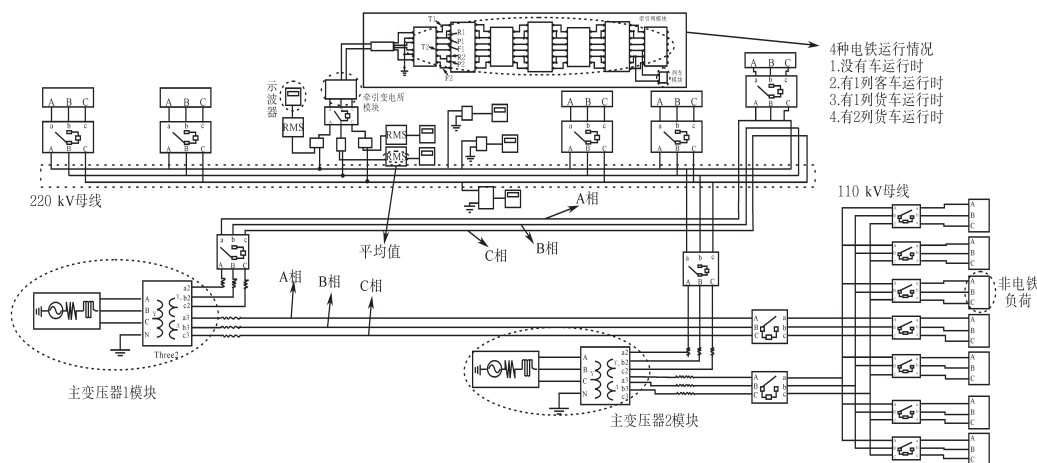


图8 计及电铁运行对变电站母线电能质量影响分析的Matlab/Simulink电力系统变电站-负荷模型

Fig.8 Established substation-load model with Matlab/Simulink software regarding the influence of electrified railway's operation on power quality of substation bus

5 结论

电气化铁路负荷易对电网母线造成较严重的电能质量污染,甚至对其他负荷带来负面影响。围绕电气化铁路接入对电网系统的电能质量影响,本文针对某变电站受电铁运行影响的问题,在已有研究的基础上给出了能用于分析普速铁路和高速铁路在各种工况运行对变电站电能质量影响的建模方法。建模以电网主变压器、牵引变电所、牵引网、列车的铭牌参数、出厂测试报告和所研究时间点各负荷实测数据为依据,分为3部分:变电站建模、牵引网及车辆的建模、运行电铁外的其他负荷建模。其中,牵引网建模考虑了各导线之间的感性耦合和容性耦合,采用精细的链式电路模型;列车建模包括客货车建模,分别以CRH3型动车组和HXD2B型货车为例,详细阐述了相应的方案。

参考文献

[1] 陈卓毅. 变电站的谐波分析与抑制[D]. 南宁:广西大学,2005.
 [3] 周京华,祝天岳,曾鹏,等. 电气化铁路牵引供电系统研究现状及关键技术[J]. 电气传动,2015,45(6):3-9.
 [3] 覃江英,黄启哲. 黔桂电铁对110 kV水任变电站谐波影响分析[J]. 广西电力,2012,35(2):62-65.
 [4] 吴命利,杨少兵,崔铁久. 电气化铁路接入电网谐波预评估有关问题分析及谐波国家标准修订建议[J]. 铁道学报,2016,38(8):1-7.
 [5] 王同勋,于坤山. 电气化铁路负荷对电网电能质量的影响及对策[J]. 供用电,2009,26(3):8-11,32.
 [6] 杜习周,陈栋新,余晓鹏,等. 电气化铁路负荷对电网电能质量的影响[J]. 华中电力,2010,23(6):35-37.

[7] 韩智玲. 浅析电力机车对牵引网电能质量的影响[J]. 电气传动,2010,40(4):41-42,56.
 [8] 刘玉洁,盛彩飞,林飞,等. 郑琼林高速动车组网侧电流谐波特性的研究[J]. 电气传动,2010,40(1):33-37,50.
 [9] 刘莹. 电气化铁路接入对电网电能质量的影响评估及治理研究[D]. 济南:山东大学,2014.
 [10] 刘金鑫,葛琼璇,王晓新,等. 双端供电模式下高速磁浮列车牵引控制策略研究[J]. 电工电能新技术,2015,34(6):16-21,44.
 [11] 余丹萍. 电气化铁路牵引供电系统的仿真及影响研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.
 [12] 傅裕斌,段拴峰,曹玉胜,等. 风电场与电铁同母线接入对供电质量的影响研究[J]. 电测与仪表,2018,55(12):1-6.
 [13] 周盛. 高速铁路牵引负荷建模及分析[D]. 杭州:浙江大学,2011.
 [14] 欧阳森,梁伟斌. 基于PSCAD/EMTDC的电气化铁路接入电网的电能质量评估方法[J]. 电工电能新技术,2016,35(12):52-58.
 [15] 宋小翠,刘志刚. 计及弓网二次燃弧的高铁车-网建模与电磁暂态影响研究[J]. 电力自动化设备,2018,38(4):118-124.
 [16] 张桂南,刘志刚,郭晓旭,等. 高速铁路隧道及高架桥路段牵引网建模与分析[J]. 铁道学报,2015,37(11):16-24.
 [17] Cheng Y, Liu Z, Huang K, et al. Modeling Analysis of Electric Multiple Units Passing Insulated Rail Joints in High-speed Railway Station[C]//IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific. 2017:1-6.
 [18] 董明,姜悦礼. HXD2型和HXD2B型电力机车电传动系统技术比较[J]. 机车电传动,2013(5):45-48.
 [19] 陶海东,胡海涛,姜晓峰,等. 牵引供电低频网压振荡影响规律研究[J]. 电网技术,2016,40(6):1830-1838.
 [20] 于群,曹娜. 电力系统建模与仿真[M]. 北京:机械工业出版社,2013.

收稿日期:2018-08-09

修改稿日期:2018-09-27