

引用格式:冯洪赞,朱泓宇,董跃,等.基于电压源变流器的动态牵引网阻抗模拟方法[J].电力科学与技术学报,2025,40(1):237-244.

Citation:FENG Hongyun,ZHU Hongyu,DONG Yue, et al.Dynamic traction network impedance simulation method based on voltage source converter [J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(1):237-244.

基于电压源变流器的动态牵引网阻抗模拟方法

冯洪赞,朱泓宇,董跃,王俊辉,张逸凡,刘芸江,李朝阳,胡海涛

(西南交通大学电气工程学院,四川成都611756)

摘要:新型所群双边牵引供电系统能够减少电分相数量、增加供电臂距离并提高供电能力,可有效解决西部艰险山区电气化铁路建设中电分相设置困难的难题。目前,该系统仍处于理论验证及实验探索阶段,在仿真系统中,模拟因列车移动所导致的牵引网阻抗动态变化的过程较难实现。针对此问题,首先提出一种基于电压源变流器(voltage source converter, VSC)的牵引网阻抗模拟方法,通过对VSC交流端口等效阻抗的控制来模拟实物系统中列车两端牵引网阻抗的变化,进而实现对列车动态运行过程的实验模拟;随后运用所提方法在MATLAB/SIMULINK中搭建系统仿真模型。仿真结果表明:该方法能够模拟列车各种工况时牵引网阻抗的动态变化,所提出的牵引网阻抗模拟方法有利于进一步开展新型所群双边牵引供电系统的探索与验证。

关键词:阻抗模拟;电压源变流器;所群贯通供电;牵引供电; dq 解耦控制

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.01.025 **中图分类号:** TM46 **文章编号:** 1673-9140(2025)01-0237-08

Dynamic traction network impedance simulation method based on voltage source converter

FENG Hongyun, ZHU Hongyu, DONG Yue, WANG Junhui, ZHANG Yifan,
LIU Yunjiang, LI Zhaoyang, HU Haitao

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: The new type of bilateral traction power supply system of traction substation groups can reduce the number of neutral sections, increase the distance of the power supply arm, and improve the power supply capacity. Furthermore, it provides a solution to the setting of neutral sections in the construction of electrified railways in the western and dangerous mountainous areas. At present, the system is still in the stage of theoretical verification and experimental exploration. In the simulation system, it is difficult to achieve the dynamic change process of traction network impedance caused by train movement. To address this issue, a simulation method of traction network impedance based on the voltage source converter (VSC) is proposed. By controlling the equivalent impedance of the alternating current port of VSC, the change in the impedance of the traction network at both ends of the train in the physical system is simulated, thus realizing the experimental simulation of the dynamic operation process of the trains. The proposed method is employed to build a system simulation model in MATLAB/SIMULINK. The simulation results indicate that the proposed method is able to simulate the dynamic changes in the traction network impedance when the train is under various working conditions. Moreover, the proposed traction network impedance simulation method is conducive to the further exploration and validation of the new type of bilateral traction power supply system of traction substation groups.

Key words: impedance simulation; voltage source converter; continuous power supply of traction substation group; traction power supply; dq decoupling control

收稿日期:2024-05-02;修回日期:2024-08-12

基金项目:国家自然科学基金(52107125);国家级大学生创新创业训练计划支持项目(202310613025)

通信作者:胡海涛(1987—),男,博士,教授,主要从事电力系统、电力电子与储能电池的交叉研究领域、电气化铁路稳定性、电能质量与节能等研究;E-mail:hht@swjtu.edu.cn

目前,中国电气化铁路采用 25 kV 工频单相交流制。铁路牵引供电系统通常在轨道沿线设置多个牵引变电所,牵引变电所由所在地区外部电源供电,通过牵引变压器将三相交流电转变为单相交流电供给牵引网。传统牵引供电模式下牵引网中存在若干电分相,电分相不仅会造成供电断点,影响列车牵引功率的持续输出,而且是机械上的弱点,影响系统可靠性^[1-4]。在西部艰险山区,由于地形复杂、外部电源较为薄弱等原因,使得电分相设置困难,列车依靠惯性通过电分相时速度损失较为严重^[5-8]。使用新型所群双边牵引供电系统可以减少电分相,保证列车运行的稳定性,对促进电气化铁路进一步发展具有重要意义^[9-13]。新型所群双边牵引供电系统结构如图 1 所示。

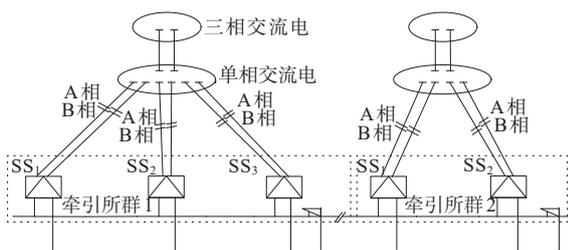


图1 新型所群双边牵引供电系统结构

Figure 1 Structure of new type of bilateral traction power supply system of traction substation groups

在研究新型牵引供电系统的过程中,由于通过计算机较难模拟列车的真实运行工况,无法探究实际新型所群双边牵引供电系统中可能出现的各种复杂科学与工程问题,所以急需构建等比例动态模拟系统模拟现实情况,验证系统的可行性,进一步促进电气化牵引供电系统的发展。其中,牵引网的模拟即列车行驶过程中牵引网阻抗的模拟是该模拟系统中的关键和难点。

针对实物模型中由于列车位置的动态变化,导致模拟列车与驶离站及驶向站之间的牵引网阻抗的动态变化过程较难实现的问题,相关学者对此进行了研究^[14-22]。目前已有的模拟方法是选取 MATLAB/SIMULINK 中 Series RLC Branch 作为等效导线分布电容的模块, Mutual Inductance 来表示等效导线自阻抗和互阻抗模块,利用 π 型等效电路搭建切割后的牵引网子网模型。该方案将牵引网阻抗进行集中等值,计算复杂程度高,也未能模拟真实的牵引网阻抗连续分布的情况,模拟得出的仿真结果存在一定的误差与不连续性。其中文献^[19]是用 π 型等效电路搭建切割后的子网模型,并在多

导体传输线模型的基础上在横向并联元件处进行切割,构成链式电路模型。在该模拟系统中,牵引网中的多导体传输线每隔 500 m 进行一次切割,由于切割距离较短,模拟需要的子网模块较多,故系统模拟结构复杂,较难模拟长距离线路,同时实物模型构建繁琐且经济成本较高。以上研究本质上是通过计算和分析将牵引网模型等效和简化成 π 型等效电路,然后根据实际需求将牵引网进行分段等值,是一种对有牵引网参与系统的理论计算和分析的简化方法,但是对于实物模拟来说,该模型较为繁琐和复杂,且不能模拟出列车行驶过程中牵引网阻抗变化的连续性,不利于实物模型的搭建和分析。文献^[21-22]基于双端口网络理论,建立牵引网等效解耦电路模型,将其简化为含受控源的戴维南等效电路,该模型降低了以往多导体传输线模型建模的计算复杂程度,但由于含有受控源,导致搭建实物模型时较为困难。另外,也有相关实验工作者运用多个开关及电阻、电感等来模拟牵引网,通过开关有规律的分合,来控制列车运行过程中两侧牵引网阻抗的变化,但该方案仍然没有模拟出牵引网阻抗变化的连续性,而且实物繁琐复杂,不利于实物模型的搭建。

上述模拟与控制方法在牵引网阻抗连续性等方面考虑欠妥。因此,本文提出一种基于电压源变流器(voltage source converter, VSC)的牵引网阻抗模拟系统及控制方法。该模拟系统利用 VSC 来模拟实物系统中列车两端的牵引网阻抗,由于 VSC 可以四象限运行,故可以控制其交流侧端口阻抗连续变化,通过预设列车所在位置和牵引网单位长度的阻抗,得到列车距离驶离侧和驶向侧牵引变电所的距离,将距离与牵引网单位长度阻抗相乘,分别得到列车距离驶离站和驶向站之间的牵引网阻抗。通过对电路网络的求解,分别得到列车距离驶离站和驶向站之间牵引网两端的电压,以及列车与驶离站和驶向站之间牵引网阻抗消耗的有功功率 P 和无功功率 Q ,以 P 、 Q 作为控制系统的输入量,通过 dq 解耦、PID 控制及 PQ 控制实现控制目标;通过嵌入函数实现牵引网阻抗的连续变化,从而实现牵引网阻抗动态模拟。此外,基于该方法搭建一个包括 2 个三相变压器(380 V/220 V)、5 个单相变压器(220 V/55 V)、列车以及 VSC 装置的新型所群双边牵引供电动态模拟仿真系统,验证所提模拟方法及其控制的有效性及其实用性。所提方法有利于相关人员据此搭建实物模拟平台,探索新型牵引供

电系统特性,促进电气化铁道的发展。

1 系统拓扑结构与 VSC 控制方法

1.1 牵引网阻抗模拟系统结构

基于电压源变流器的动态牵引网阻抗模拟系统结构如图 2 所示,其核心设备是三相变压器、单相降压变压器、电压源变流器及功率电阻。其中三相变压器模拟主变电站,将电源线电压为 380 V 的交流电转换为线电压 220 V 的交流电;单相降压变压器模拟牵引变电所将电压为 220 V 的单相交流电转换为电压为 55 V 的单相交流电。由于本文重点在于牵引网的模拟,所以将机车简化为恒功率列车,并用恒功率电阻进行模拟,即功率电阻模拟列车。VSC 模拟牵引网,每 2 个牵引变电所中间串入 2 个 VSC 以模拟 2 个变电站之间的牵引网,列车在行驶过程中,通过改变其前、后 VSC 模拟阻抗来模拟真实列车的运行情况。

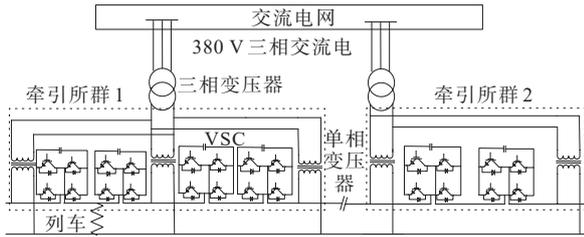


图 2 新型所群双边牵引供电模拟系统结构

Figure 2 Simulated system structure of new type of bilateral traction power supply of traction substation groups

1.2 VSC 拓扑及控制方法

VSC 主电路拓扑结构^[23-25]如图 3 所示,由 4 个带反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管(insulated

gate bipolar transistor, IGBT)(S_{11} 、 S_{12} 、 S_{13} 、 S_{14})、交流侧电感 L_1 以及直流侧电容 C 组成,是双极性输出的电力电子变换器,交流电压从 1a、1b 这 2 个端子输入,输出侧为直流,4 个 IGBT 配合导通,控制直流侧电压。此外,变换器直流侧还额外并联了由 L_2 、 C_2 组成的 LC 谐振支路抑制直流侧二次纹波。

VSC 对交流侧电流 I_m 采用 dq 电流解耦控制,得到电流的 d 、 q 轴分量 I_{ed} 、 I_{eq} ,对 U_{in} 交流侧电压解耦得到电压的 d 、 q 轴分量 U_{ed} 、 U_{eq} 以及频率 f ,控制电路如图 4 所示,可以分别实现对有功和无功的单独控制。外环由有功功率预设参考值 P_0 、无功功率预设参考值 Q_0 ,与实际计算得来的 P 、 Q 比较产生偏差信号,采用 PQ 控制,利用 PI 控制器实现对有功、无功参考指令的无静差跟踪。电流内环接收外环 PI 控制器发出的 d 、 q 轴电流指令,并通过内环 PI 控制器对电流指令进行无静差跟踪,生成电压参考值信号 U_{ind} 、 U_{inq} 。最后,与输入电压预设参考值 U_{inref} 进行比较,采用脉冲宽度调制 (pulse-width modulation, PWM) 法生成每个 IGBT 的开关信号。

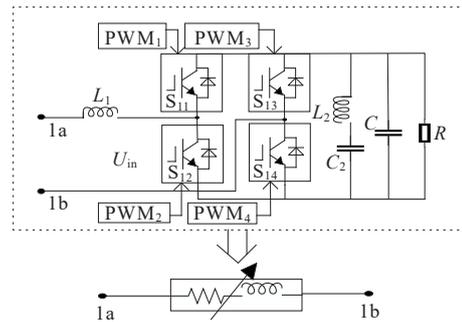


图 3 VSC 主电路结构

Figure 3 Main circuit structure of VSC

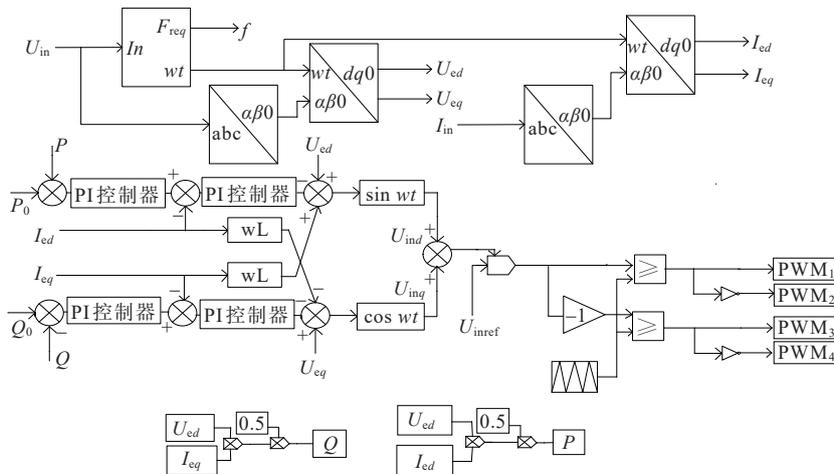


图 4 VSC 控制电路结构

Figure 4 Control circuit structure of VSC

2 动态牵引网阻抗的模拟方法

利用 VSC 实现列车运行过程中列车两侧牵引网阻抗变化,控制方法如下。

1) 将列车的动态运行等效为列车两侧牵引网阻抗的变化,列车两侧牵引网阻抗由计算得到的列车两侧牵引网阻抗所消耗的有功功率 P 和无功功率 Q 控制。通过列车两端线路的长度与牵引网单位长度阻抗得出列车两侧牵引网的阻抗,求解得出列车两侧牵引网阻抗的有功和无功功率,进而利用所得有功和无功功率控制 VSC,从而模拟列车运行过程中其两侧牵引网阻抗的变化。由于 VSC 变流设备具有非线性时变频率耦合等特性,因此,控制器的设计以及稳定性分析通常在 dq 坐标系下进行。VSC 的控制电路就是采用 dq 解耦的控制电路,通过输入参考量 P_0 、 Q_0 进行正弦脉宽调制,从而产生控制 VSC 的 PWM 波形, PWM 波形进一步控制 VSC 中的 IGBT,从而使得端口等效为交流阻抗。

2) 先将单相静止坐标通过延迟 $1/4$ 周期得到虚拟分量后得到两项静止坐标系,再通过 dq 解耦、PID 控制实现 VSC 的定功率控制,使其交流端口等效阻抗为特定值。设 2 个变压器二次侧电压均为 $U \angle 0^\circ$,列车两端电压为 $U_0 \angle \varphi$,牵引网单位长度的阻抗为 $R_0 + jX_0$,根据小车到驶离侧牵引变电所的距离 l_1 ,可得驶离侧线路阻抗为 $R_1 + jX_1 = (R_0 + jX_0)l_1$;根据小车到驶向侧牵引变电所的距离 l_2 ,可得驶向侧线路阻抗为 $R_2 + jX_2 = (R_0 + jX_0)l_2$ 。假设驶离侧线路阻抗分压为 $U_1 \angle \varphi_1$,驶向侧线路阻抗分压为 $U_2 \angle \varphi_2$,模拟列车的功率电阻为 R ,设小车驶离侧线路功率为 $P_1 + jQ_1$,驶向侧线路功率为 $P_2 + jQ_2$,则可推导得到:

$$P_1 = \operatorname{Re} \left[(U_1 \angle \varphi_1) \cdot \left(\frac{U_1 \angle \varphi_1}{R_1 + jX_1} \right)^* \right] \quad (1)$$

$$Q_1 = \operatorname{Im} \left[(U_1 \angle \varphi_1) \cdot \left(\frac{U_1 \angle \varphi_1}{R_1 + jX_1} \right)^* \right] \quad (2)$$

$$P_2 = \operatorname{Re} \left[(U_2 \angle \varphi_2) \cdot \left(\frac{U_2 \angle \varphi_2}{R_2 + jX_2} \right)^* \right] \quad (3)$$

$$Q_2 = \operatorname{Im} \left[(U_2 \angle \varphi_2) \cdot \left(\frac{U_2 \angle \varphi_2}{R_2 + jX_2} \right)^* \right] \quad (4)$$

根据所求线路阻抗的有功功率 P_1 和 P_2 、无功功率 Q_1 和 Q_2 控制 VSC,进而模拟线路阻抗。牵引网阻抗模拟方法流程如图 5 所示。

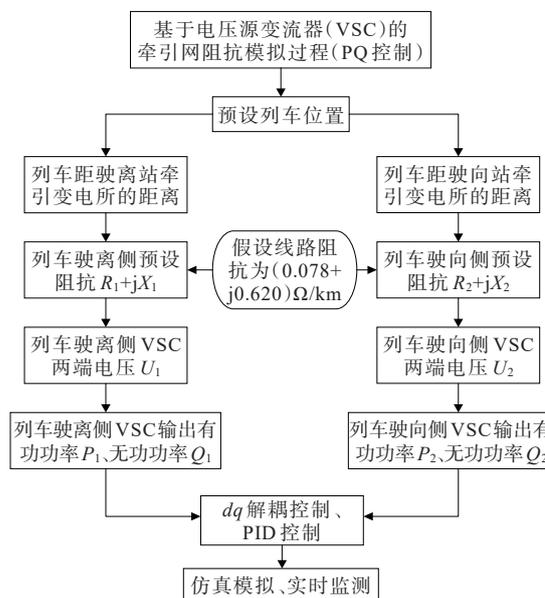


图 5 牵引网阻抗模拟方法流程

Figure 5 Flow diagram of traction network impedance simulation method

3 仿真实验

为进一步验证所提出的动态牵引网阻抗模拟方法的有效性,本文在 MATLAB/SIMULINK 仿真软件中搭建图 2 中牵引所群 2 的新型所群双边牵引供电模拟仿真系统(将牵引所群 2 拓展到整个系统的方法与此类似,不再赘述)。仿真系统由 2 个牵引变电所组成 1 个牵引变电所群,每个牵引变电所与 1 个 VSC 进行串联用以模拟牵引网阻抗。所群内部的 2 个牵引变电所间距选为 20 km,列车采用功率电阻模拟,列车正常运行时的功率选为 100 W。

使用带回流线直供方式的牵引网单位长度等效阻抗如表 1 所示, T_1 是上行线路接触线、承力索并联等效阻抗, T_2 是下行线路接触线、承力索并联等效阻抗, R 是上、下行线路 4 根钢轨以及 2 条回流线的并联等效阻抗。根据图 2,该牵引网阻抗模拟系统所模拟的牵引网阻抗主要是所群内 2 个牵引变电所之间的牵引网阻抗,结合表 1,牵引网单位长度阻抗取 $(0.078 + j0.620) \Omega/\text{km}$ 。仿真时主要模拟列车在 2 个牵引变电所之间运行时的牵引网阻抗变化。

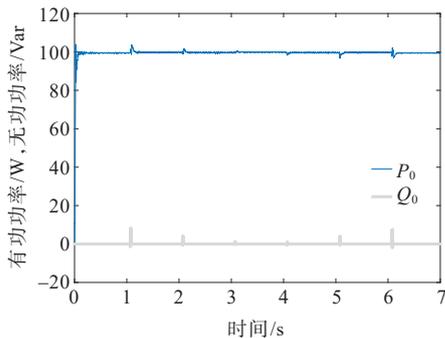
表 1 带回流线直供方式的牵引网单位长度等效阻抗

Table 1 Equivalent impedance per unit length of traction network in direct supply mode with return wire Ω/km

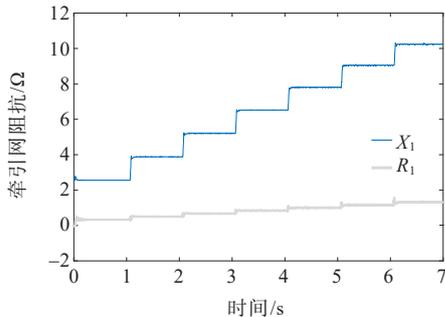
阻抗	T_1	R	T_2
T_1	$0.078 + j0.620$	$0.052 + j0.344$	$0.048 + j0.336$
R	$0.052 + j0.344$	$0.082 + j0.470$	$0.052 + j0.344$
T_2	$0.048 + j0.336$	$0.052 + j0.344$	$0.078 + j0.620$

3.1 牵引网仿真

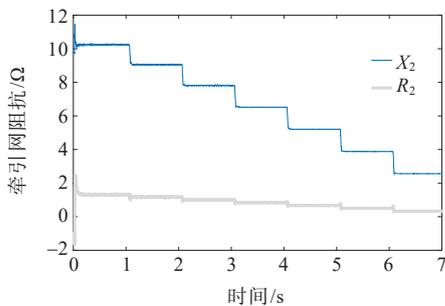
根据模拟仿真系统设定的牵引变电所间距、牵引网单位阻抗等条件,选取 2 个牵引变电所之间的一段路程进行列车运行的仿真。预设列车恒功率运行,列车有功功率为 100 W,无功功率为 0 Var,在 SIMULINK 中,采用 S-function 模块,将已提前计算出的两侧 VSC 的有功功率 P 、无功功率 Q 、端电压 U 、直流侧电阻 R 以及列车模拟电阻 R_0 等参数写入 S-function 函数中,通过 MATLAB 编程方法实现各参数随仿真时间变化而变化。取变化间隔为 1 s,每变化一次列车靠近驶向侧 2 km,即驶向侧牵引网阻抗减少 $(0.156+j1.240)\Omega$ 。假设从距驶离侧 4 km 运动至距驶离侧 16 km(驶向侧与驶离侧相距 20 km),仿真结果如图 6 所示。



(a) 列车有功、无功功率



(b) 列车驶离侧使用 VSC 等效的牵引网阻抗



(c) 列车驶向侧使用 VSC 等效的牵引网阻抗

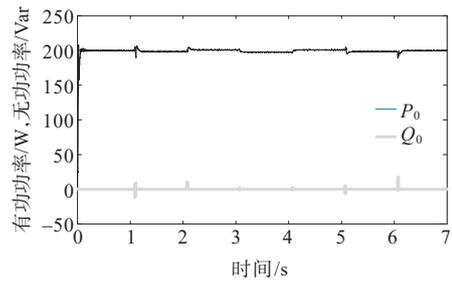
图 6 有功功率为 100 W 的列车所群内运行的仿真结果

Figure 6 Simulation results of train with active power of 100 W running in traction substation groups

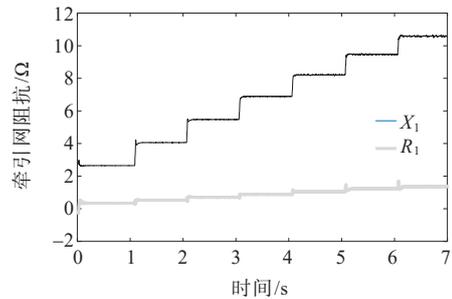
根据图 6(a)的仿真波形,在整个仿真过程中,列车有功功率基本维持在 100 W,无功功率基本维持在 0 Var(某些点的突变是假设列车的位置变化是瞬时完成的),满足列车恒功率运行时的运行特性。由图 6(b)、(c)的仿真波形可知,列车驶离侧牵引网的等效阻抗呈上升趋势,且每变化一次驶离侧阻抗便增加 $(0.156+j1.240)\Omega$,相对应地,列车驶向侧的牵引网阻抗呈下降趋势,驶向侧阻抗减少 $(0.156+j1.240)\Omega$ 。这与设置的仿真条件一致,说明本动态牵引网阻抗模拟方法能够稳定模拟有功功率为 100 W 列车运行时的牵引网阻抗。

3.2 系统稳定性验证

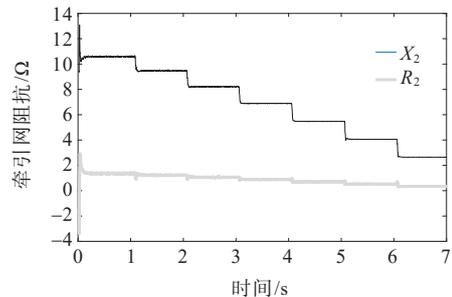
为了验证本阻抗模拟系统的稳定性,即该阻抗模拟系统不仅仅能够模拟有功功率为 100 W 列车运行时的牵引网阻抗变化情况,还能对列车有功功率为 200、-200 W 这 2 种情况分别进行仿真验证。仿真结果如图 7、8 所示。



(a) 列车有功、无功功率



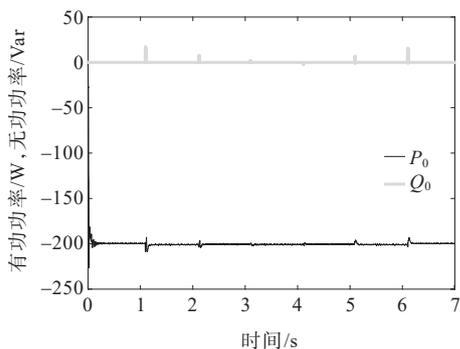
(b) 列车驶离侧使用 VSC 等效的牵引网阻抗



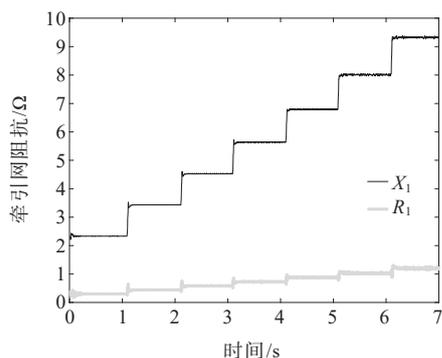
(c) 列车驶向侧使用 VSC 等效的牵引网阻抗

图 7 有功功率为 200 W 的列车所群内运行的仿真结果

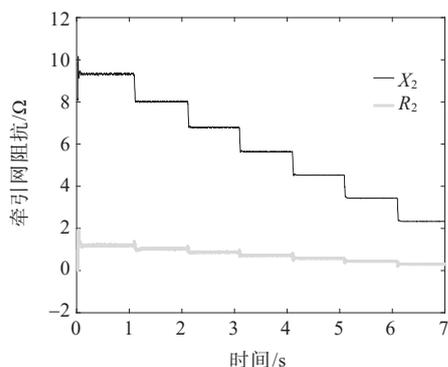
Figure 7 Simulation results of train with active power of 200 W running in traction substation groups



(a) 列车有功、无功功率



(b) 列车驶离侧使用VSC等效的牵引网阻抗

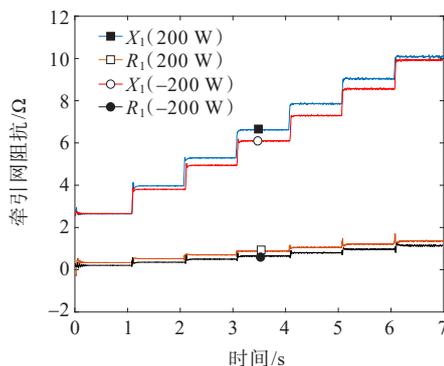


(c) 列车驶向侧使用VSC等效的牵引网阻抗

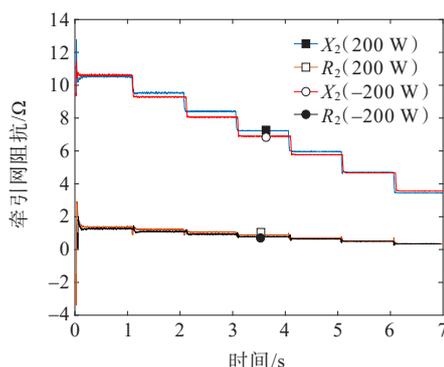
图8 有功功率为-200 W的列车所群内运行的仿真结果

Figure 8 Simulation results of train with active power of -200 W running in traction substation groups

根据图7(a)、8(a)的仿真结果可以发现,当列车的有功功率设置为不同值时,本动态牵引网阻抗模拟方法仍然能够保证列车以稳定功率运行。将图7(b)和8(b)、图7(c)和8(c)分别放置于同一张图内进行对比,如图9所示,可以发现,当列车有功功率为200、-200 W时,模拟出的列车驶离侧、驶向侧牵引网阻抗均大致相等。因此,本文动态牵引网阻抗模拟方法能够模拟不同有功功率要求的列车运行时两侧的牵引网阻抗。



(a) 不同功率列车驶离侧的牵引网阻抗的对比



(b) 不同功率列车驶向侧的牵引网阻抗的对比

图9 不同功率的列车在所群内的运行的对比

Figure 9 A comparison of trains with different power running in traction substation groups

4 结语

本文所提方法利用电压源变流器装置模拟列车运行过程中两侧牵引网的阻抗变化情况,应用该方法可以良好地实现牵引网阻抗的动态模拟,从而进一步实现对新型所群双边牵引供电系统的模拟。通过理论分析和仿真验证,得出主要结论如下:

1) 该系统下的VSC能够达到期望值并发生阻抗变化,以模拟列车的行进过程,能够实现对预定参考值的电压跟踪;

2) 该系统下的列车驶向侧、驶离侧VSC均能够实现对预定参考值的有功和无功跟踪,说明VSC在列车的驶向侧、驶离侧均达到了模拟牵引网阻抗值的功能;

3) 该系统可以良好地模拟列车不同工况下的运行状况,例如变速、回馈制动等情形。

综上所述,该系统可以稳定、良好地实现基于电压源变流器的牵引网阻抗动态模拟的功能。相关研究人员可利用该方法开展关于新型所群双边牵引供电系统相关理论的实验验证,进而更好地推

动新型所群双边牵引供电技术的发展,具有实际价值。

参考文献:

- [1] 郭世成,刘永生,吴晶,等.基于车体接地电流的故障列车精准识别方法[J].中国电力,2024,57(7):143-150.
GUO Shicheng, LIU Yongsheng, WU Jing, et al. A precise identification method for fault trains based on train grounding current[J]. Electric Power, 2024, 57(7): 143-150.
- [2] 罗忠游,赵普志,段玉,等.电气化铁路接入风电汇集地区电网的负序优化补偿策略研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(19):124-134.
LUO Zhongyou, ZHAO Puzhi, DUAN Yu, et al. A negative sequence optimization compensation strategy for an electrified railway connected to wind power integration areas[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 124-134.
- [3] 张开宇,郑佳雯,时珊珊,等.轨道交通柔性交流牵引供电系统无源一致性稳定控制方法[J].智慧电力,2024,52(7):119-127.
ZHANG Kaiyu, ZHENG Jiawen, SHI Shanshan, et al. Passivity-consensus-based control method for flexible AC traction power supply systems of rail transit[J]. Smart Power, 2024, 52(7): 119-127.
- [4] 胡海涛,葛银波,黄毅,等.电气化铁路“源-网-车-储”一体化供电技术[J].中国电机工程学报,2022,42(12):4374-4391.
HU Haitao, GE Yinbo, HUANG Yi, et al. ‘Source-network-train-storage’ integrated power supply system for electric railways[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4374-4391.
- [5] 邓云川,林宗良.川藏铁路电气化工程面临的挑战和对策思考[J].电气化铁道,2019,30(增刊1):5-11+15.
DENG Yunchuan, LIN Zongliang. Thoughts on challenges faced by Sichuan-Tibet railway electrification project and its solutions[J]. Electrified Railway, 2019, 30(sup 1): 5-11+15.
- [6] 王晓栋.川藏铁路长大坡道电分相缓坡设置方案研究[J].铁道标准设计,2021,65(3):12-18.
WANG Xiaodong. Research on the scheme of electric phase break setting on gentle slope of long and steep grade based on Sichuan-Tibet railway[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(3): 12-18.
- [7] 刘志刚,孟祥宇,张乔,等.高海拔山区铁路牵引供电系统——问题、挑战与对策思考[J].电网技术,2023,47(5):2039-2053.
LIU Zhigang, MENG Xiangyu, ZHANG Qiao, et al. Issues, challenges and countermeasures in traction power supply system of high-altitude mountain railway[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 2039-2053.
- [8] 任志伟,谢毅,王维,等.艰险山区高速铁路长大坡道线路设计技术研究——以渝昆高铁高县至昭通段为例[J].铁道标准设计,2023,67(7):42-50.
REN Zhiwei, XIE Yi, WANG Wei, et al. Research on the design technology of high-speed railway lines with long and steep slopes in tough mountainous areas—cast study of the section from Gaoxian to Zhaotong of Chongqing-Kunming high-speed railway[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(7): 42-50.
- [9] 李群湛,王辉,黄文勋,等.电气化铁路牵引变电所群贯通供电系统及其关键技术[J].电工技术学报,2021,36(5):1064-1074.
LI Qunzhan, WANG Hui, HUANG Wenxun, et al. Interconnected power supply system of traction substation group and its key technologies for the electrified railway[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(5): 1064-1074.
- [10] 杨颖,陈民武,盛望群,等.新型贯通同相供电系统建模与运行特性分析[J].铁道科学与工程学报,2018,15(8):2131-2139.
YANG Hao, CHEN Minwu, SHENG Wangqun, et al. Modeling and operation characteristic analysis of a new continuous co-phase traction power supply system[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(8): 2131-2139.
- [11] 张财源.牵引变电所群贯通供电系统牵引负荷建模与供电能力分析[D].成都:西南交通大学,2023.
ZHANG Caiyuan. Traction load modeling and power supply capacity analysis for the interconnected power supply system of traction substation group[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023.
- [12] 董志杰,杨振龙,马志远,等.牵引供电系统贯通供电方案研究[J].电气化铁道,2022,33(6):9-14.
DONG Zhijie, YANG Zhenlong, MA Zhiyuan, et al. Study on through power supply scheme for traction power supply system[J]. Electrified Railway, 2022, 33(6): 9-14.
- [13] 宋平岗,吴继珍,董辉.新型牵引供电系统直流侧二次波动分析与抑制[J].电工技术学报,2017,32(9):80-91.
SONG Pinggang, WU Jizhen, DONG Hui, et al. Analysis and suppressing DC-side twice ripples of a novel traction power supply system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 80-91.
- [14] 周志成.基于树形双边供电的重载铁路贯通同相供电方案[J].铁道科学与工程学报,2020,17(3):722-731.
ZHOU Zhicheng. Cophase connected power supply scheme of heavy haul railway based on tree bilateral power supply[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(3): 722-731.
- [15] 董文哲.高速铁路牵引供电系统电气参数与仿真研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2019.

- DONG Wenzhe. Research on electric parameters and simulation of traction power supply system for high-speed railway[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences,2019.
- [16] 孙榕泽,赵贺.高速铁路牵引网建模及谐波阻抗特性研究[J].自动化应用,2022(12):9-14.
SUN Rongze, ZHAO He. Research on modeling and harmonic impedance characteristics of high-speed railway traction network[J].Automation Application,2022 (12):9-14.
- [17] 晏寒.贯通式牵引供电系统模型与仿真研究[D].成都:西南交通大学,2021.
YAN Han. Research on model and simulation of continuous traction power supply system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2021.
- [18] 高强,田行军,雷云涛,等.全并联AT牵引网建模与仿真[J].价值工程,2020,39(6):292-294.
GAO Qiang, TIAN Xingjun, LEI Yuntao, et al. Modeling and simulation of full parallel AT traction network[J]. Value Engineering,2020,39(6):292-294.
- [19] 王佳文,赵闻蕾.电气化铁路牵引供电系统的建模与仿真[J].变频器世界,2018(1):64-69.
WANG Jiawen, ZHAO Wenlei. Modeling and simulation of traction power supply system for electrified railway [J].Inverter World,2018(1):64-69.
- [20] 李雁翎.高速铁路牵引网建模及仿真[D].成都:西南交通大学,2020.
LI Yanling. Modeling and simulation of traction network of high-speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2020.
- [21] 陈浔俊,李国荣,刘志刚,等.计及分布参数的双端口等效牵引网建模、验证及稳定性分析[J].电力自动化设备,2022,42(6):179-185.
CHEN Xunjun, LI Guorong, LIU Zhigang, et al. Modeling, verification and stability analysis of dual-port equivalent traction network considering distribution parameters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(6): 179-185.
- [22] 陈浔俊.基于谐波线性化建模的高速铁路车网系统谐波稳定性分析[D].成都:西南交通大学,2021.
CHEN xunjun. Harmonic stability analysis of vehicle-grid system in high-speed railways based on harmonic linearization method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2021.
- [23] 顾靖达,杨晓峰,郑琼林,等.基于不同接地方式与列车工况的负阻变流器牵引供电系统轨道电位与杂散电流[J].电工技术学报,2021,36(8):1703-1717.
GU Jingda, YANG Xiaofeng, ZHENG Qionglin, et al. Rail potential and stray current on negative resistance converter traction power system under different grounding schemes and train conditions[J]. Transactions of China Electronical Society,2021,36(8):1703-1717.
- [24] 吴广禄,王姗姗,周孝信,等.VSC接入弱电网时外环有功控制稳定性解析[J].中国电机工程学报,2019,39(21):6169-6183.
WU Guanglu, WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, et al. Analytical analysis on the active power control stability of the weak grids-connected VSC[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(21):6169-6183.
- [25] 邵冰冰,赵书强,裴继坤,等.直驱风电场经VSC-HVDC并网的次同步振荡特性分析[J].电网技术,2019,43(9):3344-3355.
SHAO Bingbing, ZHAO Shuqiang, PEI Jikun, et al. Subsynchronous oscillation characteristic analysis of grid-connected DDWFs via VSC-HVDC system[J]. Power System Technology,2019,43(9):3344-3355.