

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.05.002

光储经铁路功率调节器接入车网系统的网压低频波动 分析与抑制综述

蔡瑾¹, 王英¹, 陈小强¹, 葛磊蛟^{1,2}, 马喜平³

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 兰州 730070; 2. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072;
3. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 兰州 730070)

摘要: 随着能源交通互联与“双碳”目标推进,构建以新能源为主体的新型电气化铁路牵引供电系统势在必行。然而,高比例新能源的接入存在电力电子设备的广泛使用,尤其是光伏、储能并网情况下,基于机电耦合,光储功率波动影响电压、频率稳定性,加剧电网振荡,造成列车失稳运行。由于光储自身不确定性,导致系统动态行为复杂化,从而引发车网系统中的低频振荡现象。在抑制措施中,存在不同策略的切换,长期运维成本高、参数匹配难等问题。根据控制策略,稳定性判据可预警振荡风险,但关于准确性与普适性仍有待研究。为深入综述该问题,从电气化铁路牵引供电系统参数设计、优化控制和稳定性判据三个角度,分析光伏、储能并入车网耦合系统对低频振荡的本质影响因素。针对低频振荡现象,阐明其产生机理及分析方法,并在新型电气化铁路“光储-车网”的架构下,研究低频振荡抑制方法及稳定性判据的适用性。最后,针对低频振荡影响因素,对最新研究成果进行总结与展望,以期为未来的研究提供参考和指导。

关键词: 光储-车网系统;电气化铁路;低频振荡;优化控制;稳定性判据

A Review on Low Frequency Voltage Fluctuation Analysis and Mitigation for Vehicle-grid Systems with Integrated PV and Energy Storage Using Railway Power Conditioners

CAI Jin¹, WANG Ying¹, CHEN Xiaoqiang¹, GE Leijiao^{1,2}, MA Xiping³

(1. College of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. State Grid Gansu Electric Power Company Electric Power Science Research Institute, Lanzhou 730070, China)

Abstract: With the advancement of energy and transportation interconnection and the implementation of the *dual Carbon* goals, it is imperative to develop a new type of electrified railway traction power supply system dominated by new energy sources. However, the integration of high proportion of renewable energy involves the extensive use of power electronic devices, particularly in grid-connected photovoltaic and energy storage system. Due to the electromechanical coupling, power fluctuations from photovoltaics and energy storage affect voltage and frequency stability, exacerbate grid oscillations, and lead to unstable train operation. The inherent uncertainty of the PV leads to the dynamic behavior of the system more complex, causing low-frequency oscillation in the vehicle network system. In the suppression measures, such issues as switching of different strategies, high long-term operation and maintenance costs and difficult parameter matching are existed. According to the control strategy, the stability criterion can warn the oscillation risk, but the accuracy and universality still need to be studied. In order to provide an in-depth review of this issue, this

收稿日期:2025-01-20

基金项目:国家自然科学基金(52367009);2025年甘肃省教育厅“创新之星”项目(2025CXZX-661);天津大学横向技术服务项目(525006)。

paper analyzes the essential influencing factors of photovoltaic and energy storage integration into vehicle-grid coupling system on low-frequency oscillations from such three perspectives as parameter design, optimal control and stability criterion of electrified railway traction power supply system. In view of the low-frequency oscillation phenomenon, its generation mechanism and analysis method are elucidated, and the applicability of the low-frequency oscillation suppression method and stability criterion are studied in the new electrified railroad "PV storage-vehicle network" architecture. Finally, the latest research results are summarized and prospected with respect to the influencing factors of low-frequency oscillations, so to provide reference and guidance for future research.

Keywords: PV storage-vehicle-grid system; electrified railway; low-frequency oscillation; optimized control; stability criterion

0 引言

2024年,中国中车集团实施的“轨道交通网-源-储-车协同供能技术应用研究”成功实现了国内首个分布式光伏接入高速铁路牵引供电系统工程并网验收。这个系统不仅能够利用铁路沿线的光伏资源,还配备了储能设施,实现了新能源电力高效消纳和轨道交通绿色化、智能化转型升级^[1-2]。随着全球对环境保护和可持续发展重视,铁路运输作为公共交通的重要组成部分,其能源消耗和碳排放问题日益受到关注^[3-5]。为了实现绿色低碳发展,提高铁路运输的能源利用效率,减少对传统化石能源依赖,降低温室气体排放,同时增强电力供应稳定性和可靠性,新能源接入牵引供电系统成为必然趋势^[6]。

由于新能源发电具有较高随机性和波动性,使光储系统在快速响应过程中可能会与电力系统动态特性发生相互作用。光储系统接入对牵引供电系统的稳定性和电能质量造成一定影响,使原有车网系统变成一个更为复杂的单相电力电子化系统^[7-8]。光储-车网系统不同变换器装置间存在相互影响,容易引发低频网压波动^[9],多出现在低频区域,导致系统频率失稳、电压波动等问题,对电力系统的安全和稳定运行构成威胁。新能源发电,如风力发电和光伏发电,具有较大不确定性和较弱惯性^[10],这使得它们在并网时对电力系统的动态稳定性产生不利影响^[11]。当新能源大规模接入牵引网时,其出力波动性和间歇性会导致系统频率波动加剧,系统惯性不足^[12],由于控制策略不当、且新能源接入引起电网结构变化从而引发低频振荡。在新型电气化铁路牵引供电系统中,多采用光伏与储能结合模式^[13-14]。随着光储接入,光伏发电系统中逆变器和储能设备的动态行为与传统同步发电机有所不同,它们的快速调节能力会在特定条件下与系统自然振荡模式相互作用,降低传统同步发电机转动惯量,影响系

统固有稳定性^[15],增加牵引网压低频振荡风险。光储系统接入车网耦合系统后,为抑制低频振荡发生,需采用有效控制策略、实施协调控制及优化系统结构与控制策略^[16-17]。综合治理可有效抑制低频振荡问题,确保系统稳定运行。

目前,对光储并入车网耦合系统进行低频振荡综合研究仍有待深入。对此,本文首先综述了车网低频振荡机理,并在车网系统基础上引入光储系统,揭示光储对车网耦合系统的影响规律;其次,针对已有车网耦合系统低频振荡抑制方法进行分析,总结现有方法的内在联系,为后续光储接入对车网系统低频振荡影响的研究提供了一定参考;最后,通过多输入多输出级联系统阻抗建模与稳定性判据分析方法间的关系,研究已有稳定性判据对系统低频振荡抑制效果,找出关键影响因素,提升系统整体低频稳定性。

1 牵引网压低频波动产生机理

1.1 车网耦合系统低频振荡

交-直-交型高速列车投入牵引供电系统后,在多辆机车同时升弓整备或运行时,牵引网与电力机车的等效阻抗不一致,参数不匹配,车网系统稳定性下降,引发低频振荡。电力机车为非线性负载,投入牵引网后,增加非线性负荷,引起非线性强耦合关系,加剧低频振荡发生。对此,文献[18]指出在多车共网情况下,由牵引网和电力机车相互作用引起小信号的不稳定,如图1所示,造成了车网耦合系统低频振荡现象。

1.2 光储车网耦合系统建模

为实现电气化铁路持续稳定供电,引入新能源发电系统到车网系统,光储车网系统拓扑图见图2,光储-车网耦合系由牵引网,电力机车,铁路功率调节器(railway power conditioner, RPC)以及光储子系统构成。

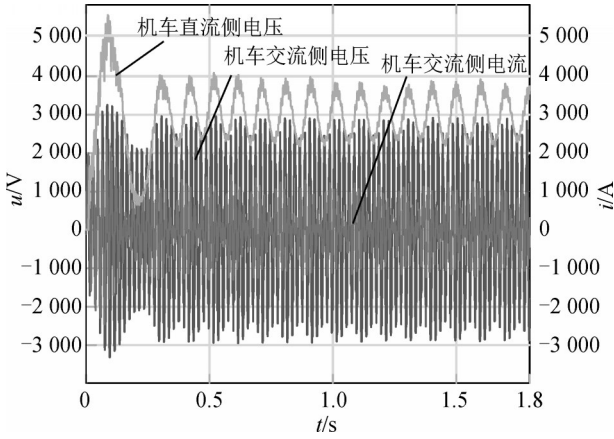


图1 车网系统低频振荡

Fig. 1 Low-frequency oscillation in vehicle-grid system

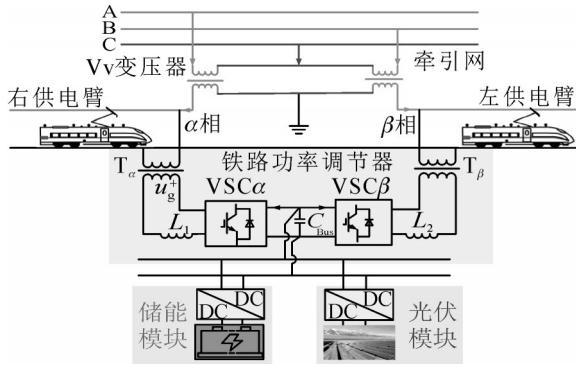


图2 光储车网系统拓扑图

Fig. 2 Topological diagram of PV storage-vehicle network system

三相电力经 V/v 牵引变压器转换为 27.5 kV 单相交流电供向 α 和 β 侧供电臂, V/v 接线方式下电压相位相差 60° 。除三相电网外, 新型电气化铁路牵引供电系统含有新能源系统, 光储经 DC/DC 变换器并入直流母线, 通过 RPC 及 LC 型滤波电路转换为单相交流电, 经升压至供电臂两侧。

根据图 2 光储并入车网结构框图, 以 CRH5 机车为例, 依次建立低频段下的光伏、储能子系统、RPC、车网系统阻抗模型。其阻抗建模如下:

$$\begin{cases} Z_{pv}(s) = \frac{\Delta u_{Bus}}{\Delta i_{Bus}} = \frac{G_{PBB} + G_{PBB}G_{Pi}G_{PLP} - G_{PLB}G_{Pi}G_{PBP}}{1 + G_{Pi}G_{PLP} + G_{Pu}G_{Pi}G_{PBP}} \\ Z_{sc}(s) = \frac{\Delta u_{Bus}}{\Delta i_{Bus}} = \frac{G_{Bis} + G_{Bis}G_{Si}G_{isd} - G_{isi}G_{Bds}G_{Si}}{1 + G_{Si}G_{isd} + G_{Su}G_{Si}G_{Bds}} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Z_{inv} = k_a^2 Z_{rpc} \\ Y_{crh} = n_{crh} \times 5 \times 2 \times (G_{usur}G_{urir}G_{iris} + G_{(e-u)usur})^{-1} \times \\ (I - G_{usur}G_{urir}G_{eres} - G_{usur}G_{urir}G_{ires} - G_{uses}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Z_{pv}(s)$ 、 $Z_{sc}(s)$ 分别为光伏、储能系统等效阻抗; k_a 为升压变压器变比; Z_{inv} 为 RPC 归算至升压变压器高压侧的阻抗; I 为二阶单位矩阵; n_{crh} 为电力机

车数量。

1.3 低频振荡产生机理及现象

当机车和光储系统中不同单相电力电子装置间参数不匹配时, 不同单相电力电子装置之间存在相互作用, 会引起新的振荡问题。根据车网耦合系统等效到直流侧的阻抗值 Z_g 以及光储子系统等效并联阻抗值 Z_0 , 可得到等效电路, 如图 3 所示。

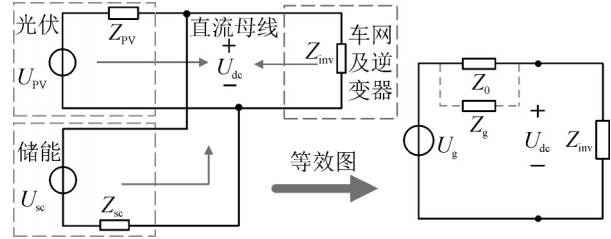


图3 光储车网耦合系统等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of PV storage-vehicle-grid coupling system

根据之前建立的数学模型, 光伏和储能系统中变流器的 PI 控制器参数会影响系统输出阻抗。其中, Z_g 值取决于输电线路材料、长度、变压器容量等因素, 在实际运行中难以调整。相比之下, Z_0 、 Z_{pv} 、 Z_{sc} 值与 PI 控制器参数有关, 调整 PI 控制器控制参数成本更低, 也更简单、快速。

理论上引入可控等效阻抗易加剧系统低频振荡, 也能防止阻抗不匹配引起的系统不稳定, 这一特性使得探索控制参数和光储并联模块数量对系统低频稳定性影响尤为重要。在光储共同牵引供电模式下, 可以得到基于 Z_0/Z_{inv} 阻抗比的奈奎斯特曲线, 用传递函数 $G(s)$ 来表示。改变阻抗模型参数值变化会影响 Z_0 , 进而修正 $G(s)$ 奈奎斯特曲线。

为更清晰揭示变量不同取值下系统状态, 可通过幅值裕度进一步探究参数影响系统稳定性规律及对系统稳定性影响的关键程度。

$$\varepsilon = \frac{CAM_n}{(k_s - k_y)/k_y} \times 100\% \quad (3)$$

式中: CAM_n 为临界幅值裕度; k_y 为原始参数; k_s 为最小参数扰动值。

根据式(3), 系统变量的影响可转化为幅值裕度影响, 揭示原始参数最接近系统临界不稳定状态电气敏感性。该系统阻抗比传递函数的奈奎斯特图也会由于不同参数而发生变化, 会出现曲线包围点 $(-1, j_0)$ 和未包围点 $(-1, j_0)$ 。

如图 4 所示, 光储接入 CRH5 机车后造成参数不匹配, 引发低频振荡现象, 影响机车安全稳定运行。

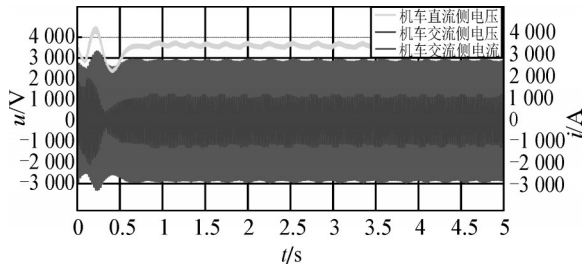


图4 光储车网系统低频振荡

Fig. 4 Low-frequency oscillations in PV storage-vehicle-grid system

2 牵引网压低频波动治理方案

针对铁路牵引供电系统,保证电力机车正常牵引时,低频振荡带来的影响不能忽视。为治理电气化铁路中低频振荡,通常将光储-车网耦合系统等效为源、荷侧级联系统,如图5所示。

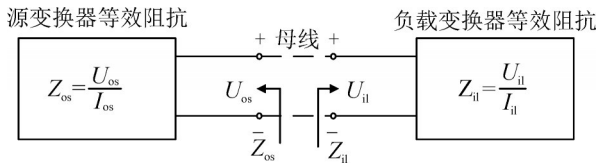


图5 源荷侧等效图

Fig. 5 Source-load side equivalent diagram

图中: U_{os} 、 I_{os} 为源变换器输出的电压和电流; U_{il} 、 I_{il} 为负载变换器输入的电压和电流; Z_{os} 、 Z_{il} 分别为电源侧等效输出阻抗和负载侧等效输入阻抗。假定等效的源、荷侧是稳定的,且具有良好动态性能。对于低频振荡治理研究,文献[19-33]多以源侧或负荷侧控制为出发点,论述并提出多种控制策略。其中,滑模控制,反馈线性化控制策略,主动阻尼控制策略,前馈控制策略,统一阻尼控制策略等方案。

由于牵引网压低频振荡易造成机车牵引封锁,影响电气化铁路安全稳定运营。文献[19]针对该类型低频振荡问题,提出了基于滑模控制的方法来抑制此现象。首先构建了车网耦合系统回比矩阵模型作为分析基础;再通过改进的sum-范数判据和幅频特性曲线进行了系统稳定性分析。在此基础上,文献[20]从滑模电压控制器和滑模电流控制器两个角度出发,设计了一种电压外环滑模控制器以取代传统的PI控制器,减少了由系统动态变化和外部扰动引起的系统输出值与预设值之间较大偏差,使直流侧输出电压在设定滑模面附近平滑且迅速调整,直至达到稳定状态;其次利用其快速响应和鲁棒性特性^[23],及时应对机车刚投入系统时可能遇到的大

扰动冲击,能较好地抑制牵引网低频振荡。同时,在电流环控制器引入PI比例系数以平缓降低系统抖振,改善直流侧电压稳态性能,从而抑制了低频振荡。

在多车升弓准备时期,易引发网压低频振荡现象。针对多车接入牵引网供电系统存在的低频振荡现象,文献[24]阐述了一种结合虚拟磁链和滑模观测器的反馈线性化虚拟惯量控制策略,该方法在减少传感器数量的同时,提出改进的虚拟磁链观测器,消除直流偏置的影响,滤除谐波,弥补了现有积分器的不足之处,提高系统的鲁棒性。为了对网侧电压进行估计,在传统虚拟磁链观测器基础上,引入一个带通滤波器,消除串联一阶低通滤波器暂态分量的影响。

改进的高铁牵引变流器反馈线性化控制器主要由电压外环和电流内环两部分组成,为了向反馈线性化电压外环控制提供直流侧的电流估计值^[25],设置了滑模观测器,虚拟惯量控制可提高系统整体的惯性,减小外界波动对系统的影响^[26]。控制框图见图6。

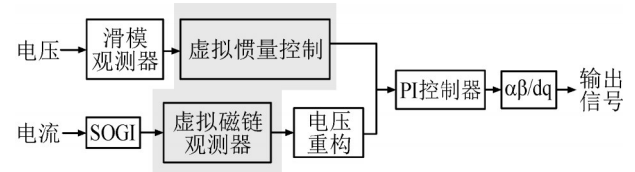


图6 虚拟磁链观测器改进控制图

Fig. 6 The improved control diagram for virtual magnetic chain observer

设计了反馈线性化控制、滑模观测器、虚拟惯量控制以及虚拟磁链观测器的部分,具有更好的静态和动态特性,能有效地抑制低频振荡的发生。

由于电力机车和牵引网的电气参数失配,也易引发低频振荡现象,影响牵引网的供电,为防止低频振荡现象的发生,文献[27]阐述了基于主动阻尼优化控制的振荡抑制方法,以提高抑制策略的动态性能。在建立车网系统的闭环小信号模型建立的基础上,采用双闭环控制策略,说明车网系统的等效电路拓扑和控制策略,并利用系统稳定性分析,达到抑制低频振荡的目的。

在发生低频振荡过程中,由于车网系统阻尼过低,低频交流分量无法完全消除,故而在原有的抑制方法基础上加入主动阻尼控制策略。即在电流环输入环节部分设置一个负反馈通路^[28],引入反馈增益系数 K ,优化后的结构如图7所示。

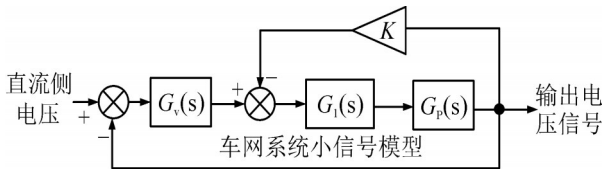


图7 主动阻尼优化控制图

Fig. 7 Optimized control diagram for active damping

在优化主动阻尼控制的参数设计中,反馈增益系数 K 取值时应考虑系统的稳态工作点,在满足稳态工作点的基础上,尽可能减小所取值。

将新能源引入传统铁路供电系统,形成新型电气化铁路供电系统,在保持电力供应同时,加剧低频振荡的发生。针对车-光-储-网系统的低频振荡问题,文献[29]以 CRH5 型机车为例,提出在原有车组的控制策略基础上加入了前馈控制策略,如图 8 所示。以机车整流器并网点电流扰动量或直流侧电压扰动量为输入信号,进一步分析引入前馈控制对系统主导低频振荡模式的影响。

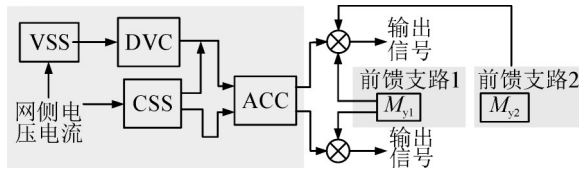


图8 引入前馈控制后整流器控制框图

Fig. 8 Control block diagram of rectifier after introducing feed-forward control

在抑制低频振荡时,文献[31]先获取整流器并网点侧的电流或者直流侧电压的低频扰动分量,再将已获得的扰动分量通过前馈传递至电流环的输出部分,可以减缓扰动分量造成系统的不稳定,从而提升系统的稳定性。

对于光伏储能系统接入弱电网后自身稳定性问题,文献[32]阐述了一种适用于光伏储能系统的统一阻尼控制策略,以抑制电网的低频振荡。控制器基本框图如图 9 所示。

原有光伏储能系统建模已处于成熟阶段,可供

参考的参数也很普遍,在已有参数的基础上,保证光伏储能发电电子系统自身稳定性的同时,也需考虑光储接入电网后的整体系统稳定性^[33]。说明控制策略的通用结构,阻尼控制器参数设计的原则,从理论方面分析控制策略的基本思想。

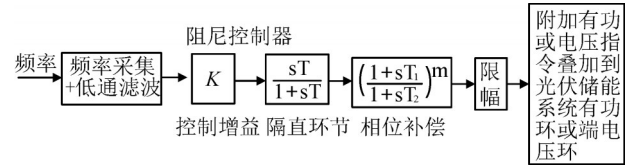


图9 阻尼控制器控制框图

Fig. 9 Control block diagram of damping controller

在光伏储能系统的阻尼控制器中,主要有控制增益、隔直环节、相位补偿环节以及限幅环节,根据附加指令值的类型不同分为有功阻尼控制器与电压阻尼控制器。其中,控制增益系数 K 能够影响阻尼控制器提供阻尼的强弱。

上述控制策略在理论上具有很好的鲁棒性,然而在实际应用过程中,当外部干扰较大、变化较快时,抗干扰灵敏性稍弱。现有文献[34-41]对车侧变流器控制进行更细致的优化,分析了优化控制器对于车网耦合系统低频稳定性的影响。光储接入车网耦合系统势必会带来多种电力电子变流器装置,在原有控制器基础上对控制策略进一步优化,深入探讨控制参数对于系统稳定性的影响不可或缺。文献[34]在传统PI控制器理念基础上,考虑了非线性控制^[35]与自抗扰^[37]因素,提出了分流模型下的PI控制。该控制较之前,提升响应速度前提下,实现快速无超调的跟踪,抑制信号突变引非线性系统的激变,控制性能更为优越^[38-40]。此外,在电压电流信号被计算处理之前,需先经过二阶广义积分器对输入信号进行积分运算和滤波处理,增强输入信号频率变化的响应能力。针对该问题,文献[42]阐明了二阶广义积分器的带宽对整流器的负电阻特性存在一定的影响,进而影响车网系统的稳定性。

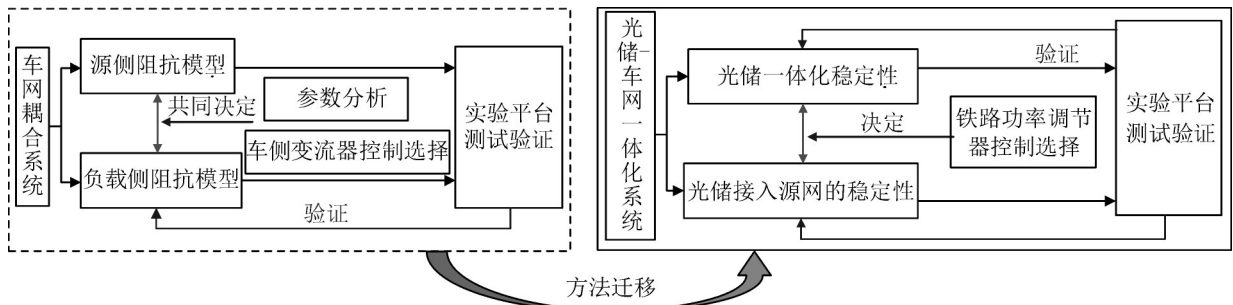


图10 控制迁移模型

Fig. 10 Control migration model

光储一般通过 RPC 并入车网耦合系统,车侧变流器与 RPC 具有相似的技术原理,控制目标以及系统稳定性。可将上述控制策略迁入 RPC 控制中,并深入优化,达到更好的抑制效果。

3 牵引网压低频波动治理效果的稳定性评估

光伏储能子系统接入铁路牵引供电系统后,引起整个系统电气参数变化,造成系统的稳定性边界的改变,进而引发低频振荡,导致电压和频率的异常波动,甚至引发电力系统崩溃。现有判据都基于系统的阻抗或导纳特性进行分析,可从电路本质上理解系统的稳定性问题。文献[43–60]以车网耦合系统为目标对象,提出了阻抗比判据、范数判据、禁区判据 3 大类型,普适性较强,对于光储并网后的复杂多并联并网逆变器系统也可做分析。

在车网系统低频稳定性分析中,阻抗比判据^[43–47]相比其他判据适用性强,将系统整体阻抗分为源侧与负载侧阻抗,通过比较系统源阻抗与负载阻抗的比值来判断系统的稳定性。当光储接入车网系统后,阻抗比判据被用于评估光伏储能系统与车网之间的电气匹配关系,从而判断系统是否容易发生低频振荡。

在复域中的级联系统的传递函数分别为 G_1 及 G_2 ,如图 11 所示。

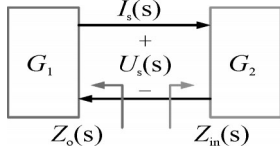


图 11 源荷系统等效模型

Fig. 11 Equivalent model of a source-load system

图中: U_s 、 I_s 表示牵引电网输出的电压和电流; Z_o 、 Z_m 分别为牵引网侧等效输出阻抗和负载侧等效输入阻抗。系统次环路增益为 $L(s)$, $L(s)$ 表达式为

$$L(s) = \frac{Z_o(s)}{Z_m(s)} \quad (4)$$

源荷侧等效系统的阻抗比值远小于 1 时,满足 nyquist 判据稳定性条件,系统可安全运行。

已有的 Middlebrook 判据^[54]、奇异值判据^[55]、范数判据^[56]、d 通道判据^[57]均适用于分析较为单一的阻抗并联系统,不用考虑多个电力电子装置的相互作用,判断系统不稳定时振荡的频率,评估不同参数配置下系统的稳定性,找到最优的参数设置,抑制低频振荡。而光储接入车网系统通常是一个复杂的多输入多输出系统,其参数是动态变化的,影响系统阻抗特性,阻抗比判据受限,且各个子系统之

间存在相互影响、相互耦合关系。在该系统中,不同的参数取值会引起系统稳定性的变化。分析光储车网系统稳定性时,需从变流器的交流侧直观地评估光储车网系统对牵引电网稳定性的影响。文献[58]基于源模块输出阻抗模块和负载模块输入阻抗模块,先后提出 G-范数及 sum-范数判据,通过分析矩阵运算的特征值,改进判据,降低保守性。G-范数表示源侧的输出阻抗 $Z_{sdq}(s)$, sum-范数表示负载侧的输入阻抗 $Y_{ldq}(s)$,其稳定性判据表达式为

$$\begin{cases} \|Z_{sdq}(s)\|_G \times \|Y_{ldq}(s)\|_{sum} < 1 \\ \|Z_{sdq}(s)\|_G = \max\{|Z_{sdd}|, |Z_{sdq}|, |Z_{sqd}|, |Z_{sqq}|\} \\ \|Y_{ldq}(s)\|_{sum} = \sum_d \sum_q |Y_{ldq}| \end{cases} \quad (5)$$

若系统源侧输出阻抗和负载侧的输入阻抗满足上式,则级联系统稳定。

在原有范数判据治理低频振荡基础上,针对车网系统低频振荡问题,文献[59–61]分析并改进了 sum-范数判据,表达式为

$$\|X\|_{sum} = \sqrt{ab} \sum_i \sum_j |x_{ij}| \quad (6)$$

多车网回比矩阵是一个二维矩阵,图 12 为其特征值 λ_1 、 λ_2 的分布。当特征值 λ_1 、 λ_2 都在盖尔圆内时,系统稳定。

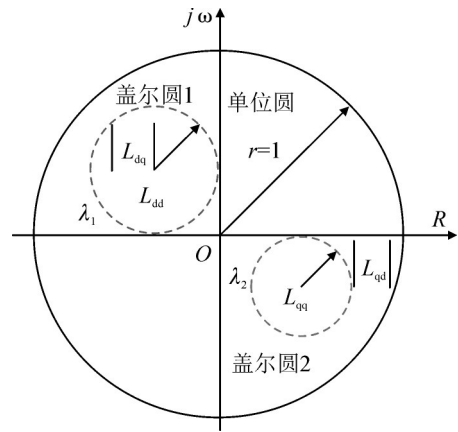


图 12 回比矩阵盖尔圆特征值分布图

Fig. 12 Distribution diagram of the eigenvalues of the Gale's circle of the back-ratio matrix

由多个变换器相互作用导致低频振荡,范数判据分析时,保守性较大,存在一定误差。而文献[62–63]说明了禁区判据能针对不同类型的系统进行拓展,普适性强。一般基于系统模型分析低频稳定性,可准确描述系统动态行为,评估系统稳定性。针对光储并入车网牵引供电系统的低频振荡问题,禁区判据可进一步分析参数对稳定性的影响,以更直观的方式说明系统稳定性边界,优化参数设计。且光储

并网存在多种方式,一般分为单输入单输出系统和多输入多输出系统,禁区判据可灵活考虑各个子系统间的相互影响和耦合关系,从而全面评估系统的稳定性。

通过禁区判据分析车网系统低频振荡时,与现实相比较存在较大的差异性,针对降低稳定性判据的保守性,文献[64]提出改进禁区判据的方法,表达式为

$$\begin{cases} A_1: \operatorname{Re}[L_{dd}(j\omega)] - |L_{dq}(j\omega)| > -1 \\ A_2: \operatorname{Im}[L_{dd}(j\omega)] - |L_{dq}(j\omega)| > 0 \\ B_1: \operatorname{Re}[L_{qq}(j\omega)] - |L_{qd}(j\omega)| > -1 \\ B_2: \operatorname{Im}[L_{qq}(j\omega)] - |L_{qd}(j\omega)| > 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: A_1 、 A_2 表示第1个特征值的可行域; B_1 、 B_2 表示第2个特征值的可行域。当系统满足 $[(A_1 \cup A_2) \cap (B_1 \cup B_2)]$ 的条件时,矩阵特征曲线在稳定区域范围内,限定特征值可能出现的范围在系统稳定可行域之内,此时系统处于稳定状态。

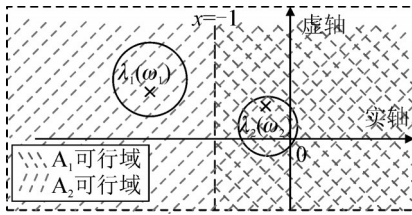


图13 特征值的可行域

Fig. 13 Feasible domain of eigenvalues

文献[65]提出了拓展禁区判据,深入分析光伏-车网系统的低频振荡问题,通过对系统回比矩阵的盖尔圆缩放,降低禁区判据的保守性。表达式为

$$\left\{ \begin{aligned} & \left| \frac{A_{dd} + 1}{L_{dq}} \right| > \left| \frac{1}{\mu_1} \right| \\ & \left| \frac{A_{qq} + 1}{L_{qd}} \right| > |\mu_1| \end{aligned} \right\} \cup \left\{ \begin{aligned} & \left| \frac{A_{dd} + 1}{L_{qd}} \right| > \left| \frac{1}{\mu_2} \right| \\ & \left| \frac{A_{qq} + 1}{L_{dq}} \right| > |\mu_2| \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

当 μ_1 、 $\mu_2 \neq 0$ 时,满足其中任意一组条件,则系统稳定。

然而,在光储并入车网的特殊情况下,增加了计算的复杂性,分析难度上升,且光储并网模型目前仍处于研究的阶段,这3类判据的分析结果高度依赖于所使用的系统模型的准确性,增加结果误差的风险,导致系统设计过于严格,限制了系统的性能潜力。针对上述保守性问题,文献[66-74]以光储并网的直流侧为对象,利用稳定性判据分析时,在无需建立复杂高阶的系统模型的基础上,可以有效地评估系统的小干扰稳定性,识别影响系统稳定性的关键

因素,极大地简化了计算和分析过程。文献[75-77]又进一步证明了直流侧的分析判据不仅适用于单一工况,还能够应对多种运行条件下的稳定性分析需求,能更精准、有效地抑制低频振荡现象。

由于新能源直流并网系统结构与新能源并入车网系统结构类似,可将分析直流并网系统的稳定性判据理念引入至光储-车网系统,综合考虑光伏发电、储能系统的充放电、直流母线侧电压和电流变化等因素对系统稳定性的影响。稳定性判据的分析结果进一步优化了控制参数设计,全面准确评估光储并网稳定性。针对线性系统,文献[66]提出的无源判据,如式(9)所示,若并联在母线上的子系统总导纳实部恒大于0时,则所有子系统均能稳定工作。

$$\operatorname{Re}[Y_{\text{tot}}(s)] = \operatorname{Re}[Y_{s1}(s) + Y_{s2}(s) + Y_{sn}(s)] \geq 0 \quad (9)$$

文献[67-70]利用无源判据,导纳判据分析光储并入车网系统的阻抗特性和频率响应,可得低频振荡临界点,揭示光储车网系统中各参数对低频振荡现象的影响规律,优化系统的控制参数,减小直流母线电压的波动范围,提高电能质量。然而,利用无源判据分析非线性时变系统时,需证明连续衰减的充要条件,计算复杂,不利于对光储-车网系统稳定性的快速评估,及时调整控制策略,分析受限。稳定性判据的改进与应用,需简化计算,提高普适性。对此,文献[76-77]分析了基于母线电压控制变换器(bus voltage control converter, BVCC)和母线电流控制变换器(bus current control converter, BCCC)的稳定性判据弥补了这一缺点,且简化了计算过程。该判据能快速适应由换流器控制系统动态特性引起的小扰动,为分析和解决大规模并网系统中的稳定性问题提供有力支持。

目前,光储-车网模型仍处于研究阶段,上述总结的稳定性判据,分析结果高度依赖于精准的建模,建模的误差会导致保守性增大,限制系统性能潜力,易造成误判。未来分析光储-车网耦合系统稳定性时,在系统准确建模的基础上,对比上述判据,阐明影响因素,提出优化后的稳定性判据,结合系统模型验证,提高判据与系统之间的匹配度,揭示影响规律,降低判据局限性对系统造成误判,提升系统稳定性。

4 结语

随着中国新型电气化铁路的持续发展,铁路供电模式正在经历一场变革,特别是对于低碳、经济

的新能源供电需求日益增长。这一趋势将促使更多的光储和风储等分布式能源并入牵引网,为机车提供动力。然而,这种转变使得低频振荡的风险增加。尽管铁路运营部门已积极行动,如优化控制策略、补偿动态功率、调整系统参数,并取得一定成效,却仍难彻底攻克这一难题。当前我国在新能源并入铁路牵引供电系统的低频振荡抑制领域尚处起步阶段。展望未来,研究重点聚焦于以下几个关键领域:

1)结合实际案例情况,针对光储接入车网系统不同工作模式,建立光储-车网耦合系统模型,分析系统的能量流动、交互机制,阐明产生低频振荡的机理。

2)根据光储-车网模型与机车运行计划,预测低频振荡在某个区段内产生风险,采取整治措施。

3)深入研究光储变换器及并网整流器的优化控制方法,在不同运行工况下,深入分析变换器的运行特性与控制短板,提出更具适应性、高效性的优化控制方法,提高鲁棒性。在实际应用时,确保新能源稳定并网,减少功率波动引发的振荡风险。

4)设计新型稳定性判据,满足传统电网结构稳定性需求,兼顾新能源并网后的全新特点。并对比分析现有多种判据,洞察系统稳定性本质,通过精细化模型验证,设置最优参数,全面评估系统稳定性,为抑制低频振荡提供坚实理论支撑。

在轨道交通“源-网-车-储”协同供能技术发展的趋势下,网压低频波动分析与抑制需推动技术创新,优化能源结构,增强系统协同性,优化光储系统配置。同时,新能源的接入,引起电网结构复杂性增加,控制难度加大等问题。为保证“源-网-车-储”协同供能的平稳发展,需优化能源布局,制定协同运行标准,提出新型控制策略,加强光储协同控制,降低对车网系统稳定性影响。

在新型电力系统相关领域,智能电网的自动化控制、自愈能力和信息通信技术,可用于光储-车网系统,实现实时监控与精准调控,增强适应性与稳定性。在一定区域内,微网技术的能源自给自足与稳定运行,为提升车网系统稳定性提供了参考,保障局部安全,可靠供电。分布式发电与储能协同管理模式,可进一步优化光储系统配置,提高可再生能源利用率,抑制功率变化,减少网压波动,提升系统稳定性。

参考文献

[1] 于鑫. 太阳能光伏发电在铁路中的发展路径研究[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(10): 1-7.

YU Xin. Development path of solar photovoltaic power Generation in railway[J]. Railway Transport and Economy, 2024, 46(10): 1-7.

[2] 张舜, 张蜚. 基于光伏发电的铁路与新能源融合潜力评估[J]. 中国铁路, 2023(11): 64-71.

ZHANG Shun, ZHANG Zhe. Evaluation of the potential application of new energy in the railway sector based on PV power generation[J]. Chinese Railways, 2023(11): 64-71.

[3] 贾利民, 程鹏, 张蜚, 等. “双碳”目标下轨道交通与能源融合发展路径和策略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 173-183.

JIA Limin, CHENG Peng, ZHANG Zhe, et al. Integrated development of rail transit and energies in China: development paths and strategies[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 173-183.

[4] ZAHEDMANESH A, VERBIC G, RAJARATHNAM G, et al. Optimal design of greenfield energy hubs in the context of Carbon neutral energy supply[J]. Energy, 2024, 305: 132284.

[5] DHARMAPRIYA N, EDIRISINGHE S, GUNAWARDENA V, et al. Towards a greener future: examining Carbon emission dynamics in Asia amid gross domestic product, energy consumption, and trade openness[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2024, 31(14): 21488-21508.

[6] 邓文丽, 戴朝华, 陈维荣. 轨道交通能源互联网背景下光伏在交/直流牵引供电系统中的应用及关键问题分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5692-5702.

DENG Wenli, DAI Chaohua, CHEN Weirong. Application of PV generation in AC/DC traction power supply system and the key problem analysis under the background of rail transit energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5692-5702.

[7] 梁乐乐. 新能源发电的安全稳定与电能质量问题探讨[J]. 智能建筑与智慧城市, 2024(10): 97-99.

LIANG Lele. Discussion on the problems of safety and stability of new energy power generation and power quality[J]. Intelligent Building & Smart City, 2024(10): 97-99.

[8] 王璐. 大规模光伏发电对电力系统的影响研究[J]. 光源与照明, 2024(7): 102-104.

WANG Lu. Study on the impact of large-scale photovoltaic power generation on electric power system[J]. Lamps and Lighting, 2024(7): 102-104.

[9] AHMAD T, SAJEEB S, MOHAMMAD AT, et al. Impacts of grid integration of solar PV and electric vehicle on grid stability, power quality and energy economics: a review[J]. IET Energy Systems Integration, 2020, 2(3): 243-260.

[10] 程珊珊, 王海鑫, 杨子豪, 等. 虚拟同步发电机对系统低频振荡的影响及抑制方法综述[J]. 太阳能学报, 2023, 44

- (8):119-129.
- CHENG Shanshan, WANG Haixin, YANG Zihao, et al. Overview of effect of virtual synchronous generators on low-frequency oscillation of power system and suppression methods[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2023, 44 (8) : 119-129.
- [11] LI B, ZHOU Z, HU J, et al. Research on optimal scheduling strategy of differentiated resource microgrid with Carbon trading mechanism considering uncertainty of wind power and photovoltaic[J]. *Energies*, 2024, 17(18) : 4633-4633.
- [12] 杨振斌. 高比例新能源电力系统惯量评估方法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
- [13] SHAO Yuhao, LIN Yangshu, YANG Chao, et al. Enhancing the integration of PV and coal-fired power plant for low-carbon, low-cost, and reliable power supply through various energy storage systems[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2024, 69: 103924.
- [14] MAJI S, KAYAL P. Reconfigurable topology assessment for efficient allocation of photovoltaic generators in unbalanced power delivery networks[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2024, 119: 109560.
- [15] 张恒旭, 高志民, 曹永吉, 等. 高比例可再生能源接入下电力系统惯量研究综述及展望[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2022, 52(5): 1-13.
- ZHANG Hengxu, GAO Zhimin, CAO Yongji, et al. Review and prospect of research on power system inertia with high penetration of renewable energy source[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2022, 52(5) : 1-13.
- [16] 贺子润, 陈振, 邢昊中. 电网超低频振荡影响因素综合分析及抑制措施研究[J]. *四川电力技术*, 2020(3): 24-28.
- HE Zirun, CHEN Zhen, XING Haozhong. Comprehensive analysis of factors affecting ultra-low frequency oscillations in power grid and research on control measures[J]. *Sichuan Electric Power Technology*, 2020(3) : 24-28.
- [17] 何世杰, 康博, 张利民. 电力系统低频振荡的原因及抑制方法分析[J]. *电子技术与软件工程*, 2015(1): 246.
- HE Shijie, KANG Bo, ZHANG Limin. Analysis of causes and suppression methods of low-frequency oscillations in power systems[J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2015(1) : 246.
- [18] HU Haitao, ZHOU Yi, LI Xin, et al. Low-frequency oscillation in electric railway depot: a comprehensive review[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36 (1) : 295-314.
- [19] 胡颖新, 宁志毫, 兰征, 等. 基于滑模控制的牵引网低频振荡抑制方法[J]. *电气工程学报*, 2022, 17(1): 129-136.
- HU Yingxin, NING Zhihao, LAN Zheng, et al. Low frequency oscillation suppression method of traction network based on sliding mode control[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2022, 17(1) : 129-136.
- [20] LIU Zhigang, LIU Shuang, LI Zhiyuan, et al. A novel approach based on extended state observer sliding mode control to suppress voltage low frequency oscillation of traction network[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 52440-52454.
- [21] YU Wenqian, LIU Zhigang, TASIU I A. Virtual inertia control strategy of traction converter in high-speed railways based on feedback linearization of sliding mode observer[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(11) : 11390-11403.
- [22] GUO Xin, REN Haipeng. Nonlinear feedback control of compound active-clamp soft-switching three-phase PFC converter base on load observer[C]//2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). [S.l.]: IEEE, 2014: 1153-1158.
- [23] 张康, 王丽梅. 基于反馈线性化的永磁直线同步电机自适应动态滑模控制[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(19) : 4016-4024.
- ZHANG Kang, WANG Limei. Adaptive dynamic sliding mode control of permanent magnet linear synchronous motor based on feedback linearization[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(19) : 4016-4024.
- [24] 喻文倩, 刘志刚, 张友刚, 等. 一种改进的高铁牵引变流器反馈线性化控制策略[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(8) : 2136-2147.
- YU Wenqian, LIU Zhigang, ZHANG Yougang, et al. An improved feedback linearization control strategy for high-speed railway traction converters[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(8) : 2136-2147.
- [25] ZHOU Yi, HU Haitao, YANG Xiaowei, et al. Low frequency oscillation traceability and suppression in railway electrification systems[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(6) : 7699-7711.
- [26] JIANG Xiaofeng, HU Haitao, YANG Xiaowei, et al. Analysis and adaptive mitigation scheme of low-frequency oscillations in AC railway traction power systems[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2019, 5 (3) : 715-726.
- [27] 李向超, 牛可. 车-网耦合系统低频振荡的抑制策略优化及其参数设计[J]. *机车电传动*, 2022(5): 129-134.
- LI Xiangchao, NIU Ke. Optimization and parameter design for suppression strategy of low-frequency oscillation in the vehicle-network coupling system[J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2022(5) : 129-134.
- [28] ZHANG Xueguang, XIA Danni, FU Zhichao, et al. An improved feed forward control method considering PLL dynamics to improve weak grid stability of grid-connected in-

- verters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 5143-5151.
- [29] 葛茗瑞. 车-光-储-网系统低频振荡分析与抑制措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [30] LEON A E, SOLSONA J A. Power oscillation damping improvement by adding multiple wind farms to wide-area coordinating controls[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1356-1364.
- [31] JUÁREZ C A, RUEDA J L, ERLICH I, et al. Probabilistic approach-based wide-area damping controller for small-signal stability enhancement of wind-thermal power systems [C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. [S. l.]: IEEE, 2011: 1-4.
- [32] 易铭. 光伏储能系统连接弱电网的稳定性分析及低频振荡抑制研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.
- [33] 张杰, 尚敬, 张志学, 等. 电气化铁路车网低频振荡机理研究[J]. 机车电传动, 2016(4): 16-22.
- ZHANG Jie, SHANG Jing, ZHANG Zhixue, et al. Study on low frequency resonance mechanism for locomotives and grid of electrified railway[J]. Electric Drive for Locomotives, 2016(4): 16-22.
- [34] 逯华, 耿民, 刘明杰, 等. 基于分流模型PI控制的车网耦合系统低频振荡抑制方法[J]. 北京交通大学学报, 2024, 48(5): 118-129.
- LU Hua, GENG Min, LIU Mingjie, et al. Low-frequency oscillation suppression method for EMU-traction network coupling systems based on shunting model PI control[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2024, 48(5): 118-129.
- [35] 孔睿, 吕晓琴, 王晓茹, 等. 列车混运的车网系统低频振荡建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3768-3780.
- KONG Rui, LYU Xiaoqin, WANG Xiaoru, et al. Modeling and analysis of low frequency oscillation in train-network system under mixed operation of trains[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3768-3780.
- [36] LI Teng, ZHOU Yongjun, WU Mingli, et al. A new low-frequency oscillation suppression method based on EMU on-board energy storage device[J]. IEEE Access, 2021, 9: 22304-22316.
- [37] ZHANG G N, LIU Z G, YAO S L, et al. Suppression of low-frequency oscillation in traction network of high-speed railway based on auto-disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2016, 2(2): 244-255.
- [38] MIDDLEBROOK R D. Input filter considerations in design and application of switching regulators[C]//IEEE IAS Annual Meeting. Chicago, 1976: 366-382.
- [39] 王颖杰, 邢涛, 焦岚轶, 等. 基于模糊PI控制的牵引网低频振荡抑制方法[J]. 铁道学报, 2021, 43(3): 62-69.
- WANG Yingjie, XING Tao, JIAO Lanyi, et al. Low-frequency oscillation suppression method for traction network based on fuzzy PI control[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(3): 62-69.
- [40] 张惠娣, 刘士荣, SIMON X Y. 分流模型PID与鲁棒补偿的复合控制策略[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(3): 706-709.
- ZHANG Huidi, LIU Shirong, SIMON X Y. Composite control strategy based on shunting model PID and robust compensative controller[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(3): 706-709.
- [41] 朱正斌, 徐航捷, 潘本仁, 等. 直流分布式系统源荷对等型阻抗比判据研究[J]. 电源学报, 2021, 19(6): 64-73.
- ZHU Zhengbin, XU Hangjie, PAN Benren, et al. Research on source and load peer-to-peer impedance-based stability criterion for DC distributed system[J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(6): 64-73.
- [42] 张炜璐, 吴思奇, 刘志刚. 二阶广义积分器对车网系统低频振荡的影响分析与抑制研究[J]. 电网技术, 2025, 49(2): 699-708.
- ZHANG Weilu, WU Siqi, LIU Zhigang. Low-frequency stability analysis and enhancement of vehicle-grid system considering the impact of SOGI[J]. Power System Technology, 2025, 49(2): 699-708.
- [43] 陶海东, 胡海涛, 姜晓锋, 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): 1835-1843.
- TAO Haidong, HU Haitao, JIANG Xiaofeng, et al. Research on low frequency voltage oscillation in traction power supply system and its affecting factors[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1835-1843.
- [44] 张桂南, 刘志刚, 向川, 等. 高铁车网耦合系统电压低频振荡现象机理研究[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1956-1962.
- ZHANG Guinan, LIU Zhigang, XIANG Chuan, et al. Mechanism on voltage low frequency oscillation of high-speed railway traction network and EMU coupling system[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1956-1962.
- [45] HUANG Ruanming, ZHANG Mengyao, LI Zhengzhao, et al. Influence of SOGI bandwidth on stability of single phase inverter in weak grid[C]//IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. [S. l.]: IEEE, 2020: 3779-3784.
- [46] Y ZHOU H H Y M, Z. Impact of quadrature signal generation-based PLLs on low-frequency oscillation in an electric railway system[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(4): 3124-3136.
- [47] Z. LING, J. XU, Y. WU, et al. Adaptive tuning of phase-locked loop parameters for grid-connected inverters in weak grid cases[C]//2021 IEEE 16th Conference on Industrial

- Electronics and Applications (ICIEA), Chengdu, China, 2021: 821-826.
- [48] ZHANG Q. Modeling of regenerative braking energy for electric multiple units passing long downhill sectionin [J]. IEEE transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(3): 3742-3758.
- [49] 许加柱,程慧婕,黄文,等. 自适应自抗扰比例积分控制下的高速铁路车网耦合系统低频振荡抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4035-4045.
- XU Jiazhu, CHENG Huijie, HUANG Wen, et al. A novel approach based on self-adaptive auto disturbance rejection proportional integral controller to suppress low frequency oscillation of high speed railway electric multiple units - traction network coupling system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4035-4045.
- [50] 张国堃. 含有新能源和储能设备的分布式发电系统的稳定性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [51] K. WANG, P YANG, X. Ge. Stability enhancement strategy based on an improved OSG method for high-speed train-network system[C]//2021 IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition-Asia (ECCE-Asia), Singapore, Singapore, 2021: 2274-2279.
- [52] BURGOS R, BOROEYEVICH D, WANG F, et al. On the AC stability of high power factor three-phase rectifiers[C]//2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. [S. l.]: IEEE, 2010: 2047-2054.
- [53] MACFARLANE A, POSTLETHWAITE I. The generalized nyquis stability criterion and multivariable root loci[J]. International Journal of Control, 1977, 25(1): 81-127.
- [54] 张辉,朱刘柱,潘鹏鹏,等. 直流配电系统阻抗判据与导纳判据的比较分析[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 1167-1174.
- ZHANG Hui, ZHU Liuzhu, PAN Pengpeng, et al. Comparison between impedance-based criterion and admittance-based criterion for the DC distribution power system[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 1167-1174.
- [55] CHANDRASEKARAN S, BOROJEVIC D, LINDNER D K. Input filter interaction in three phase AC-DC converters [C]//30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Record. (Cat. No. 99CH36321). [S. l.]: IEEE, 1999: 987-992
- [56] MAO Hengchun, BOROEYEVICH D, LEE F C Y. Novel reduced-order small-signal model of a three-phase PWM rectifier and its application in control design and system analysis[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(3): 511-521.
- [57] 刘方诚,刘进军,张昊东,等. 基于G-范数和sum-范数的三相交流级联系统稳定性判据[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(24): 4092-4100.
- LIU Fangcheng, LIU Jinjun, ZHANG Haodong, et al. G-norm and sum-norm based stability criterion for three-phase AC cascade systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(24): 4092-4100.
- [58] 母秀清,王英,陈思彤,等. 基于改进sum-范数判据的高速铁路车网电气耦合系统稳定性研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(15): 3253-3264.
- MU Xiuqing, WANG Ying, CHEN Sitong, et al. Stability research on high-speed railway vehicle network electric coupling system based on improved sum-norm criterion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(15): 3253-3264.
- [59] BURGOS R, BOROEYEVICH D, WANG F, et al. On the Ac stability of high power factor three-phase rectifiers[C]//2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. [S. l.]: IEEE, 2010: 2047-2054.
- [60] 胡颖新. 高速铁路车网耦合系统低频振荡分析与抑制方法研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2022.
- [61] JIANG Keteng, ZHANG Chengxiang, GE Xinglai. Low frequency oscillation analysis of train-grid system based on an improved forbidden-region criterion[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 5064-5073.
- [62] ZHOU Yi, HU Haitao, YANG Jie, et al. A novel Forbidden-region-based stability criterion in modified sequence-domain for AC grid-converter system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(4): 2988-2995.
- [63] 金程,王小君,姚超,等. 基于改进禁区判据的电气化铁路车网耦合系统稳定性研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4459-4469.
- JIN Cheng, WANG Xiaojun, YAO Chao, et al. Research on stability of electrified railway train-network coupling system based on improved forbidden region criterion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(21): 4459-4469.
- [64] 赵霞,谢子昀,王英,等. 基于拓展禁区判据的光伏接入牵引供电系统低频稳定性分析[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 1997-2007.
- ZHAO Xia, XIE Ziyun, WANG Ying, et al. Low-frequency stability analysis of photovoltaic connected traction power supply system based on extended forbidden region-based criterion[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1997-2007.
- [65] RICCOBONO A, SANTI E. A novel passivity-based stability criterion (PBSC) for switching converter DC distribution systems[C]//2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). [S. l.]: IEEE, 2012: 2560-2567.
- [66] 王英,辛月阳,谢子昀,等. 光储接入牵引供电系统应急供电方案下低频稳定性研究[J]. 铁道科学与工程学报,

- 2024,21(3):1189-1201.
- WANG Ying, XIN Yueyang, XIE Ziyun, et al. Low-frequency stability under emergency power supply scheme of photovoltaic and battery access traction power supply system[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(3): 1189-1201.
- [67] 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): 4374-4390.
- 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): 4374-4390.
- [68] 王晖, 吴命利. 电气化铁路低频振荡研究综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 70-78.
- WANG Hui, WU Mingli. Review of low-frequency oscillation in electric railways[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 70-78.
- [69] 徐瑞梓零. 基于导纳判据的多母线直流微电网小信号稳定性分析方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- [70] PAN Pengpeng, CHEN Wu, SHU Liangcai, et al. An impedance-based stability assessment methodology for DC distribution power system with multivoltage levels[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4033-4047.
- [71] MU Han, ZHANG Yao, TONG Xiangqian, et al. Impedance-based stability analysis methods for DC distribution power system with multivoltage levels[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(8): 9193-9208.
- [72] CAO W, LIU K, WANG S, et al. Harmonic stability analysis for multi-parallel inverter-based grid-connected renewable power system using global admittance[J]. Energies, 2019, 12(14): 2687-2697.
- [73] CAO Wu, WANG Shunyu, KANG Haotian, et al. Inherent interaction analysis for harmonic oscillations in the multi-parallel grid-connected inverter system using a sum type criterion: global admittance (GA)[J]. IEEE Access, 2020, 8: 8275-8285.
- [74] LIAO Yicheng, LIU Zhigang, ZHANG Han, et al. Low frequency stability analysis of single-phase system with dq-frame impedance approach: part I: impedance modeling and verification[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 4999-5011.
- [75] INDU RANI B, SARAVANA ILANGO G, NAGAMANI C. Control strategy for power flow management in a PV system supplying DC loads[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3185-3194.
- [76] 王久和, 王勉, 吴学智, 等. 直流分布式电源系统稳定性判据研究综述[J]. 发电技术, 2020, 41(2): 175-185.
- WANG Jiuhe, WANG Mian, WU Xuezhi, et al. Review of stability criteria study for direct current distributed power system[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(2): 175-185.

作者简介:

蔡瑾(2000—),女,硕士研究生,研究方向为光储接入牵引供电系统稳定性。E-mail:1900700569@qq.com。

王英(1978—),男,教授,研究方向为高速铁路“弓-车-网-桥-隧”动力学、牵引“源-网-荷-风光储”多源供电和人工智能、信息处理在电力系统的应用等。E-mail:wangying01@mail.lzjtu.cn。

陈小强(1966—),男,教授,研究方向为铁路电能质量分析与控制。E-mail:xqchen@mail.lzjtu.cn。

葛磊蛟(1984—),男,副教授,研究方向为智能配电网态势感知、新能源并网优化控制和人工智能赋能微电网/配电网等。E-mail:legendglj99@tju.edu.cn。

马喜平(1987—),男,博士,主要从事为新能源并网技术及电网降损节能技术工作。E-mail:maxpgs@163.com。

(上接第15页)

- Xi Lei, Liu Zhihong, Li Yanying. Automatic power generation control based on lagrangian relaxation reinforcement learning algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1359-1369.
- [80] 葛磊蛟, 范延赫, 来金钢, 等. 面向低碳经济的人工智能赋能微电网优化运行技术[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2219-2238.
- GE Leijiao, FAN Yanhe, LAI Jingang, et al. Artificial intelligence enabling microgrid optimal operation technology for low-carbon economy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2219-2238.

作者简介:

葛磊蛟(1984—),男,副教授,研究方向为智能配电网态

势感知、新能源并网优化控制和人工智能赋能微电网/配电网等。E-mail:legendglj99@tju.edu.cn。

林可愿(2002—),男,硕士研究生,研究方向为贯通式柔性牵引供电系统运行状态感知。E-mail:linkeyuan328@126.com。

任丽苗(1982—),女,讲师,研究方向为贯通式柔性牵引供电系统运行状态感知。E-mail:renlimiao@mail.lzjtu.cn。

赵珊鹏(1983—),男,副教授,研究方向为牵引供电理论与新技术、电能质量预测、评估与控制技术。E-mail:zsp@mail.lzjtu.cn。

程宏波(1979—),男,教授,研究方向为输变电设备的健康管理及电网的智能控制等。E-mail:hbcheng@ecjtu.edu.cn。

陈晓婧(1988—),女,讲师,研究方向为贯通式柔性牵引供电系统运行状态感知。E-mail:chenxiaojing@mail.lzjtu.cn。