

光储接入牵引供电系统频率耦合对系统稳定性影响与抑制策略研究

董志鹏¹, 魏春宇², 李欣²

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 兰州 730070; 2. 兰州交通大学新能源与动力工程学院, 兰州 730070)

摘要: 随着高比例新能源接入牵引供电系统,原有的交流系统变为交直流混联系统,同时交直流端口之间的频率耦合效应加剧了系统失稳风险,这对牵引供电系统稳定运行构成严重威胁。为解决由频率耦合效应引发的系统稳定性问题,本研究建立了光储接入牵引供电系统的交直流三端口阻抗模型,分析了频率耦合效应对系统稳定性的影响,并提出一种基于对称锁相环的频率耦合抑制方法。研究对比了原始模型、忽略交流侧耦合模型及忽略交直流端口耦合模型的稳定性差异,基于频率耦合效应对系统稳定性影响机理,进一步设计对称锁相环控制结构,通过对称化 d 轴与 q 轴电压控制抑制锁相环节不对称性导致的频率耦合效应。由 Matlab/Simulink 的仿真实验表明:在铁路功率调节器(RPC)输出相同电感时,原系统因频率耦合效应失稳,经采用频率耦合抑制后,输出电压、电流及直流母线电压均保持稳定,系统稳定边界显著提升,为光储安全接入牵引供电系统提供了理论支撑与工程参考。

关键词: 牵引供电系统; 频率耦合效应抑制; 阻抗建模

Research on Influence of Frequency Coupling on System Stability and Suppression Strategy of Optical Storage Access Traction Power Supply System

DONG Zhipeng¹, WEI Chunyu², LI Xin²

(1. College of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. College of New Energy and Power Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: With access of high proportion of new energy to the traction power supply system, the original AC system becomes into an AC-DC hybrid system and, at the same time, the frequency coupling effect between the AC and DC ports exacerbates the risk of system instability, which poses a serious threat to the stable operation of the traction power supply system. In order to solve the problem of system stability due to the frequency coupling effect, in this study an AC/DC three-port impedance model for optical storage access to the traction power supply system is established, the influence of the frequency coupling effect on the system stability is analyzed, and a symmetric phase-locked-loop-based frequency coupling suppression method is proposed. Moreover, the stability differences among the original model, the neglected AC side coupling model and the neglected AC/DC port coupling model are studied and compared. Based on the mechanism of the frequency coupling effect on the system stability, the symmetric phase-locked loop control structure is designed further to suppress the frequency coupling effect caused by the asymmetry of the phase-locked loop section by symmetrizing the d -axis and q -axis voltage control. The simulation experiments by MATLAB/Simulink show that the original system is destabilized due to frequency coupling effect when the same inductance is output from the railway power conditioner (RPC), and after the frequency coupling suppression is adopted, the output voltage, current, and DC bus voltage remain stable, and the stability boundary

of the system is significantly improved, which provides theoretical support and engineering references for the safe access of optical storage to the traction power supply system. It provides theoretical support and engineering reference for the safe access of optical storage to the traction power supply system.

Keywords: traction power system; frequency coupling effect suppression; impedance modeling

0 引言

截至2024年底,我国铁路营业里程达到16.2万公里(其中电气化铁路12.2万公里),城市轨道交通营业里程达1.2万公里。我国轨道交通年总电能消耗约为1200亿kW·h,其中约2/3的牵引用电完全依赖公用电网。为推动低碳发展并实现碳达峰目标,绿色铁路建设、绿色机车比例和绿电使用成为新的发展方向^[1]。为了实现双碳战略,推进能源结构转型,以光伏风电为代表的新能源在我国新能源体系所占比重越来越大,因此大量电力电子装置被广泛应用于风力和光伏发电^[2]。在传统牵引供电系统中,同步发电机主导的机电暂态特性仍遵循准稳态假设,其戴维南等效模型可近似为理想电压源,此时并网逆变器与电网间的耦合作用呈现弱交互特征^[3]。但是在高比例电力电子化牵引供电系统中,逆变器快速开关特性与同步机组电磁动态过程产生多时间尺度解耦,需依赖矢量控制等主动调节手段维持系统稳定。研究表明弱电网阻抗的存在会导致逆变器并网系统谐波频率上的互相耦合,进一步加剧振荡^[5-9]。谐波频率耦合现象已在我国多地发生^[10],例如2007年7月,京哈线出现过频率在850 Hz到1 150 Hz的谐波谐振,造成电器设备烧毁;2008年,京津城际出现过频率在1 250 Hz到1 550 Hz的谐波谐振,造成避雷器烧损和牵引网断电。牵引供电系统稳定性关系到铁路安全,在含高比例电力电子设备的新型牵引供电系统中,频率耦合效应对铁路系统的安全运行构成了巨大威胁。

因此研究如何通过抑制频率耦合来解决牵引供电系统的稳定性问题成为研究热点^[11-15]。文献[16]提出了一种基于dq轴前馈与补偿的对称控制方法,通过消除锁相环(phase-locked loop, PLL)和直流链路电压控制器在耦合项中引入的分量,抑制频率耦合现象。但该文献主要针对特定控制环节(PLL和直流电压控制器),未考虑其他潜在耦合源(如电网阻抗与滤波器交互)并且在高比例新能源渗透的复杂电网场景中,控制鲁棒性可能受限。文献[17]通过阻抗模型分析公共耦合点(point of common coupling, PCC)的电压扰动对锁相环(PLL)和直流电压控制环的影响路径,提出在电流控制器中插入 d

轴和 q 轴补偿项以抑制扰动,补偿方法针对性强;但是多补偿项的叠加可能增加控制复杂度,实际工程调试难度较高。文献[18]提出一种不对称电流控制器,通过调整 d 轴和 q 轴控制器的增益差异,缓解PLL引起的频率耦合效应,通过阻抗模型建立自导纳与伴随导纳,量化PLL对稳定性的影响;但是未考虑不对称控制可能引入新的动态耦合问题。因此本文提出了一种基于对称锁相环的频率耦合抑制结构,并在原有模型的基础上改进并重新建立了频率耦合抑制后的交直流三端口阻抗模型,经稳定性分析与仿真分析结果的验证,本文所给出的频率耦合抑制结构能够减弱系统交流侧与交直流端口间的频率耦合效应,增强系统的稳定性,同时提升系统的稳定边界,为光储稳定接入牵引供电系统奠定了理论基础。

本文针对频率耦合效应产生的机理分析与频率耦合效应对系统稳定性分析的显著影响,首先建立了交直流三端口阻抗模型,其次分别建立忽略交流侧耦合效应和忽略交直流端口间的耦合效应的两种简化模型。基于这两种简化模型对光储接入牵引供电系统的稳定性进行分析,明确不同耦合效应对系统稳定性的具体影响,揭示交流侧和交直流端口间耦合效应在系统稳定性分析中的作用机制。最后,根据频率耦合效应产生机理给出了一种基于对称锁相环结构的频率耦合抑制方法,并在Matlab/Simulink中搭建仿真环境,所提方法经过实验验证,可以有效抑制频率耦合效应。

1 考虑频率耦合效应的光储接入牵引供电系统阻抗建模

1.1 光储接入牵引供电系统的拓扑结构

本文研究的光储两相接入牵引供电系统拓扑结构如图1所示。在这种拓扑结构中,系统分别由光伏、储能、铁路功率调节器(railway power conditioner, RPC)等基本结构组成。RPC具有的模块化拓展性、易控性、优越的负序无功补偿能力使其在光储两相接入牵引供电系统中展现出巨大的潜力^[19-20]。由于光伏输出易受外界气象条件因素的影响,具有较大的波动性与间歇性。因此在光伏输出侧,采用Boost电路结构与直流母线连接,使其在最大功率点处输出。

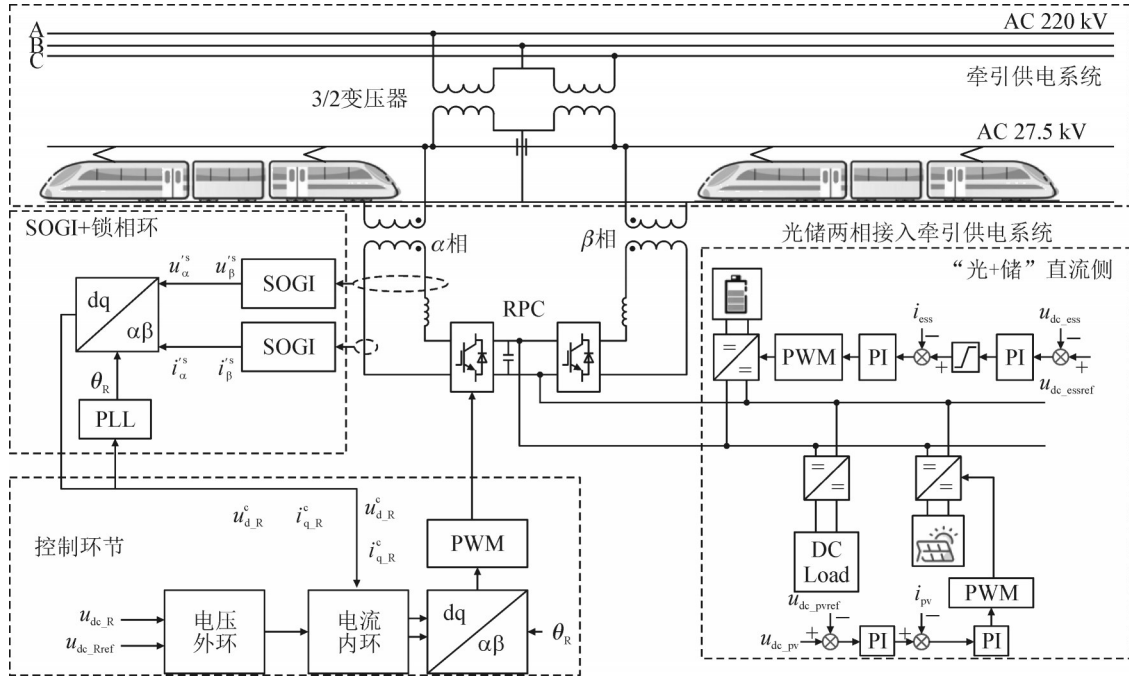


图1 光储接入牵引供电系统拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of optical storage access traction power supply system

1.2 考虑频率耦合效应的交直流三端口阻抗模型建立

在光储接入牵引供电系统的背景下,并网逆变器作为主要的功率接口单元,其稳定性直接影响并网系统的可靠运行。然而,大多数阻抗分析方法将并网逆变器视为单输入单输出系统,忽略了频率耦合特性的影响。这种简化导致逆变器在低频段的稳定性分析不够精确;并且大多数研究采用单端口或双端口阻抗模型,未能充分考虑光储直流侧与车网交流侧之间的耦合特性,尤其是在频率耦合效应影响下阻抗特性的变化规律仍未明确。此外,现有阻抗建模方法在分析复杂拓扑结构下的光储接入系统时,适用性和准确性仍有待提升。为此,本文在文献[21]建立的光储两相接入牵引供电阻抗模型的基础上进行改进,将其改为建立考虑频率耦合效应的交直流网络三端口模型,全面分析光储直流侧与车网交流侧的耦合特性与端口阻抗特性,为光储接入牵引供电系统的稳定性研究提供理论基础。

由文献[21]可知牵引供电系统阻抗模型表达式为

$$Z_s = \begin{bmatrix} R_s + sL_s & -\omega_1 L_s \\ \omega_1 L_s & R_s + sL_s \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: R_s 为牵引供电系统等效输出总电阻; L_s 为牵引供电系统等效输出总电感。

光储接入牵引供电系统有两种耦合特性,交流侧的频率耦合特性和交直流侧动态间的耦合特性。为了解决传统的二端口网络无法同时对两种耦合信息进行处理难题^[22],本文将 dq 坐标系下建

立的二阶系统阻抗矩阵做升维处理,从而得到可以同时刻画 RPC 交流侧和直流侧端口特性的三维导纳矩阵式为

$$\begin{pmatrix} \Delta I_s \\ \Delta I_c \\ \Delta I_{dc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11}(s) & Y_{12}(s) & Y_{13}(s) \\ Y_{21}(s) & Y_{22}(s) & Y_{23}(s) \\ Y_{31}(s) & Y_{32}(s) & Y_{33}(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta V_s \\ \Delta V_c \\ \Delta V_{dc} \end{pmatrix} \quad (2)$$

由于不涉及频率耦合效应,dq 坐标系下的导纳模型往往形式较为简单,但其缺点是缺乏明确的物理意义,测量困难。相比之下,三相 abc 静止坐标下的序导纳矩阵模型可以直观地反映控制不对称引起的频率耦合效应,并且其物理意义明确,也很容易通过测量得到。因此,有必要建立变流器 abc 坐标下的三端口导纳模型。由 abc 坐标和 dq 坐标下的小信号变量的转换关系式为

$$\begin{bmatrix} \Delta u_d^c \\ \Delta u_q^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j \\ -j & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_s \\ \Delta u_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -U_1 \Delta \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

设转换矩阵式为

$$T_{\text{tran}}^{2 \times 2} = \begin{bmatrix} 1 & j \\ -j & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

将转换矩阵扩展至三维形式,可得式

$$T_{\text{tran}}^{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -j & j & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

将上式转换至 abc 坐标系下,因此可得 abc 坐标系下 CRH5 列车的三端口导纳模型为

$$Y_c^{\text{abc}} = (T_{\text{tran}}^{2 \times 2})^{-1} Y_c T_{\text{tran}}^{2 \times 2} \quad (6)$$

式中, Y_c 为 dq 坐标系下的 CRH5 列车阻抗矩阵。

因此可得 abc 坐标系下 RPC 的三端口导纳模型为

$$Y_{RPC}^{abc} = (T_{tran}^{3 \times 3})^{-1} Y_{RPC} T_{tran}^{3 \times 3} \quad (7)$$

式中, Y_{RPC} 为 dq 坐标系下经式升维处理后的阻抗矩阵。

根据 abc 坐标下电压电流变量之间的关系,可以得到交直流网络的三端口阻抗模型为

$$Z_{net}^{abc}(s) = \begin{bmatrix} -Z_{ac}(s) & 0 & 0 \\ 0 & -Z_{ac}(s - j2\omega_0) & 0 \\ 0 & 0 & Z_{dc}(s - j\omega_0) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $Z_{ac}(s)$ 由牵引供电系统折算至 27.5 kV 馈线侧的等效阻抗与 CRH5 型列车端口等效阻抗并联得到, $Z_{dc}(s)$ 由光伏、储能输出等效阻抗并联得到。

2 基于对称锁相环结构的频率耦合效应抑制方法

2.1 频率耦合效应对系统稳定性的影响

频率耦合效应在系统稳定性中的表现取决于系统的设计与控制策略,其既可能带来稳定性的增强,也可能引发复杂的动态问题^[23-26]。当车网交流端口的阻抗匹配良好且控制策略设计合理时,频率耦合效应有助于实现功率的动态分配和平滑过渡,从而提高系统的抗扰能力和稳定性。此外,通过合理设计,车网交流侧的耦合效应还可以抑制局部振荡并增强系统的整体电压和频率稳定性。交直流端口间的频率耦合效应反映了交直流系统之间的动态交互,当牵引负载发生扰动时,直流端口可以通过储能系统快速响应,稳定交流侧的频率;反之,直流侧电压波动也可以通过交流侧的控制环路得到有效缓解,这种交直流动态交互有助于提升系统

的动态响应性能和抗扰能力。

当光储两相接入牵引供电系统时,结合 RPC 的三端口导纳模型与交直流网络的三端口阻抗模型,可以得到光储接入牵引供电系统的特征方程为

$$I + Y_{RPC}^{abc} Z_{net}^{abc} = 0 \quad (9)$$

本文给出的交直流三端口导纳模型在分析端口间耦合效应方面展现出了显著的准确性和独特的优势。相比传统的双端口模型,该模型能够全面考虑车网交流侧端口之间的耦合效应,以及交直流端口间的动态交互特性,从而更准确地描述复杂电力电子系统中多端口之间的频率耦合机制与动态行为,变流器的三端口导纳模型为

$$Y^{abc} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: Y_{11} 、 Y_{12} 、 Y_{21} 、 Y_{22} 为交流端口的导纳特性; Y_{33} 为直流端口的导纳特性; Y_{13} 、 Y_{23} 、 Y_{31} 、 Y_{32} 为交直流端口间的频率耦合, Y_{12} 、 Y_{21} 为交流侧的频率耦合。因此当忽略交流侧频率耦合时,得到变流器的三端口导纳模型为

$$Y_{ac}^{abc} = \begin{bmatrix} Y_{11} & 0 & Y_{13} \\ 0 & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \quad (11)$$

当忽略交直流端口间的频率耦合时,得到变流器的三端口导纳模型为

$$Y_{dc}^{abc} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & 0 \\ Y_{21} & Y_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Y_{33} \end{bmatrix} \quad (12)$$

将第 1 章中 RPC 的三端口导纳模型做上述处理,带入系统的特征方程,分别绘制其在系统稳定时的特征值轨迹,见图 2。

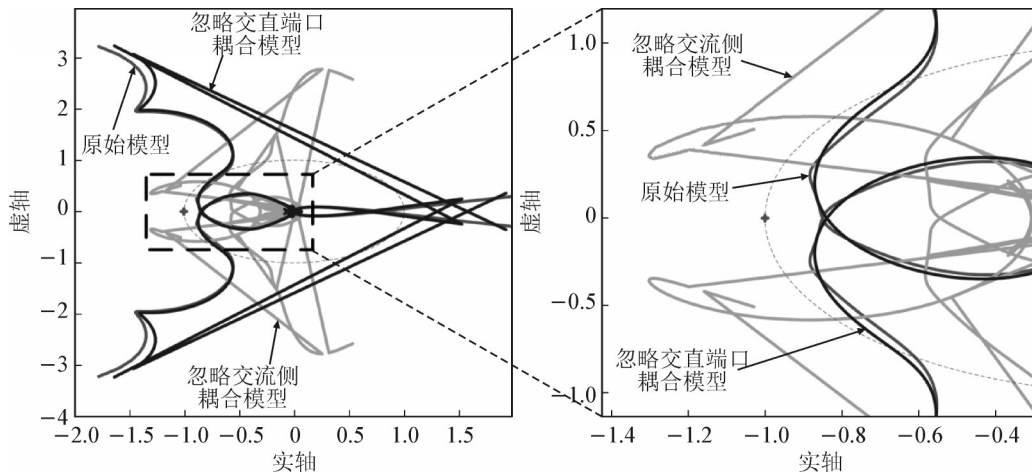


图2 光储两相接入结构下三种模型在系统稳定时的特征值轨迹

Fig. 2 Eigenvalue trajectories of three models at system stabilization under two-phase access structure for optical storage

从图2可以看出,在光储两相接入结构下,通过对比3种不同模型的特征值轨迹,可以观察到以下规律:3种模型的系统特征值轨迹均未包围复平面上的关键点 $(-1, j0)$,因此系统整体处于稳定状态。然而,不同模型之间的特征值轨迹分布存在明显差异,其中忽略交直流端口耦合的模型与原始模型的特征值轨迹非常接近,表明交直流端口耦合在此场景下对系统特征值的影响较小。然而,忽略交流侧耦合的模型特征值轨迹则表现出较大的变化,其轨迹分叉现象显著增多,并且轨迹的分布呈现出

更加不规则的特性。这一现象表明,交流侧耦合对系统稳定性的分析结果具有重要影响,不可忽视。

为了进一步探讨交流侧耦合与交直流端口耦合对系统稳定性分析结果的具体影响,选取一个典型失稳案例进行研究。当RPC输出电感值设定为30.6 mH时,系统处于失稳状态。RPC输出电感的合理选取不仅能够有效提高系统的稳定裕度,抑制振荡、增强阻尼,还能降低系统失稳的风险。因此设置RPC输出电感从10.6 mH开始逐渐增大,每次增大5 mH,直至30.6 mH,绘制系统特征值轨迹见图3。

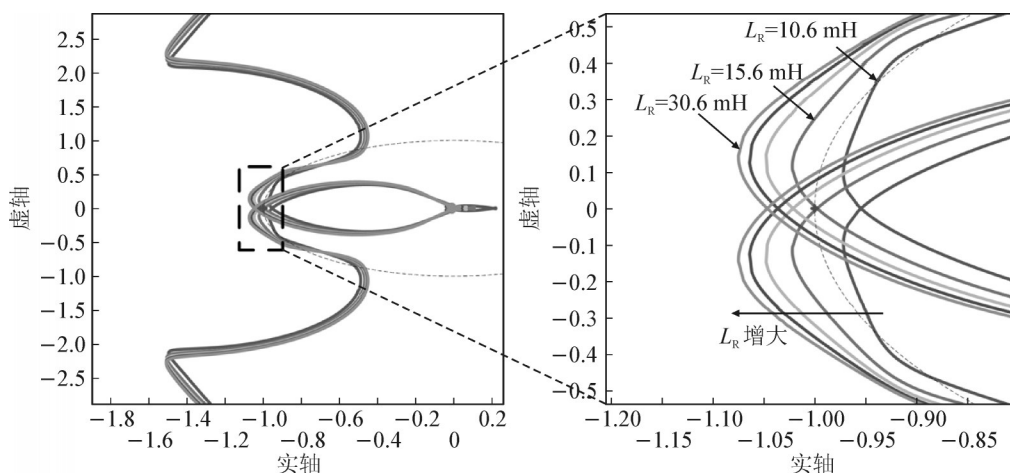


图3 RPC输出电感变化时系统特征值轨迹

Fig. 3 System characteristic trajectory in case of RPC output inductance variation

由图3可知,当RPC输出电感从10.6 mH开始逐渐增大时,系统特征值轨迹逐渐靠近 $(-1, j0)$ 点。这表明系统的稳定裕度随着电感的增大而不断下降。由于电感的增大使得系统阻尼减弱、动态响应变慢、谐振频率降低。若系统无功功率补偿能力不足,系统稳定性会进一步恶化。为确保系统稳定性,应通过优化控制参数、增强无功补偿能力以及引入

虚拟阻尼控制等策略来提高系统的动态性能和稳定裕度,抑制因电感增大引起的振荡和失稳现象。

当RPC输出电感值设定为30.6 mH时,系统处于失稳状态。基于这一工况条件,分别对原始模型、忽略交流侧耦合模型以及忽略交直流端口耦合模型进行系统特征值分析,并绘制3种模型在此条件下的特征值轨迹分布图,见图4。

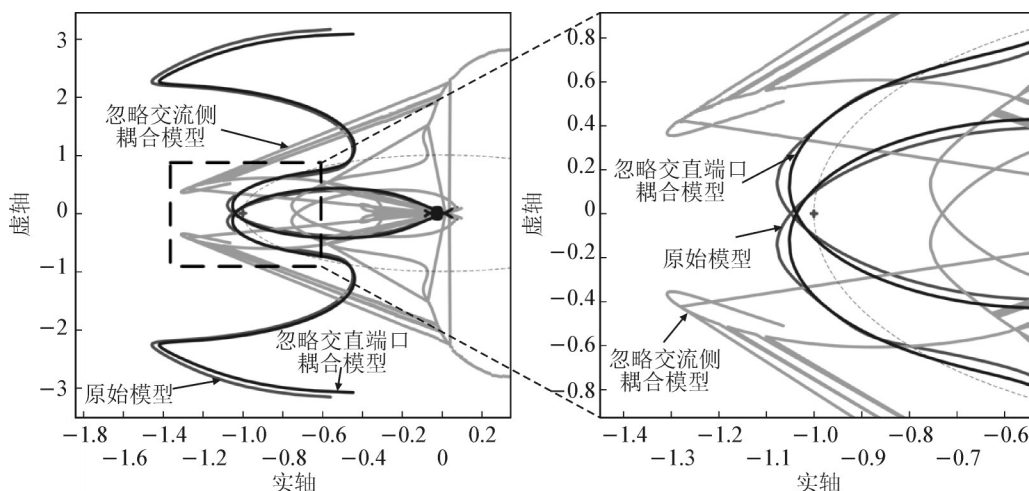


图4 当RPC输出电感为30.6 mH时3种模型的系统特征值轨迹

Fig. 4 System eigenvalue trajectories for the three models when the RPC output inductance is 30.6 mH

由图4可知,原始模型与忽略交直流端口耦合模型的系统特征值轨迹均包围 $(-1, j0)$ 点,因此系统处于不稳定状态,而忽略交流侧耦合模型在此条件下的系统特征值轨迹不包围 $(-1, j0)$ 点,系统处于稳定状态。两种忽略耦合模型的分析结果出现了相反的结论,这一现象表明,在当前工况参数下,主导系统稳定性的关键因素是交流侧耦合,而交直流端口耦合对系统稳定性的影响较为有限。该结果进一步验证了交流侧耦合在此工况下对系统稳定性分析的重要性,同时说明了交直流三端口阻抗模型的精确性与全面性。

2.2 基于对称锁相环结构频率耦合效应抑制方法

频率耦合效应有助于实现端口间的动态功率分配与协调。例如,在多端口系统中,当某一端口受到扰动时,频率耦合效应可以通过动态交互,使其他端口迅速响应并分担功率波动,从而提高系统的抗扰能力和动态性能。但频率耦合效应的存在导致系统动态行为更加复杂,使得传统的简单模型难以准确描述系统特性。为了全面反映耦合作用,需要引入更加复杂的多端口导纳模型,这增加了建模和分析的难度。除此之外,如果耦合作用未被正确分析和控制,可能导致系统出现低频振荡、次同步振荡或谐振现象。例如,交流侧

端口间的强耦合可能放大局部扰动,引发整个系统范围内的振荡;交直流端口间频率耦合过强时,可能使直流侧扰动传递至交流侧,甚至导致系统失稳。

由于频率耦合效应在多端口系统中可能引发一系列负面影响,尤其是在系统耦合强度较高或参数设计不合理的情况下,其潜在风险会进一步放大,可能导致系统振荡、动态性能恶化甚至失稳等问题。对于光储接入牵引供电系统,频率耦合效应显著增加了系统动态特性的复杂性,特别是在高比例新能源接入或运行工况频繁变化时,可能对局部和全局稳定性造成显著影响。频率耦合效应的产生与控制器的不对称特性密切相关,尤其是PLL的不对称结构在与电网同步的过程中会导致频率耦合效应的产生。传统的PLL由于仅追踪 q 轴电压分量,其控制结构具有不对称性,从而在 dq 轴之间引入了交叉耦合现象。PLL的动态特性进一步将这种耦合效应传递到变流器与牵引网的交互过程中,尤其在弱电网条件下,PLL与电网阻抗的相互作用会放大由不对称结构引起的频率耦合问题,显著影响系统的动态性能和稳定性。而对称锁相环结构通过控制 q 轴电压得到 θ_d ,通过控制 d 轴电压来得到 θ_q ,能够显著削弱因锁相环不对称引起的频率耦合效应。对称锁相环的控制框图见图5。

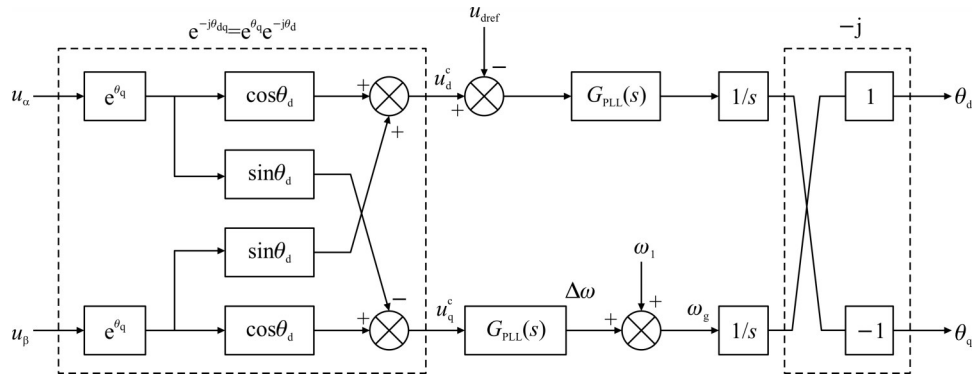


图5 对称锁相环控制框图

Fig. 5 Symmetrical phase-locked loop control block diagram

由图5可知,对称锁相环结构同时控制 d 轴、 q 轴电压,输出的相角为复矢量相角 θ_{dq} 公式为

$$\theta_{dq} = \theta_d + j\theta_q \quad (13)$$

复矢量相角改变了原有的坐标变换,修改后的坐标变换写为二阶矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = e^{j\theta_q} \begin{bmatrix} \cos \theta_d & \sin \theta_d \\ -\sin \theta_d & \cos \theta_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = e^{-j\theta_q} \begin{bmatrix} \cos \theta_d & -\sin \theta_d \\ \sin \theta_d & \cos \theta_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \quad (15)$$

PLL的输出复相角 $\theta = \theta_d + j\theta_q$,其中 θ_d 为理想相位, θ_q 为扰动相位。在变流器输出端口施加小扰动,因此输出电压在 $\alpha\beta$ 坐标系中的 $u_{\alpha\beta}$ 可被表示为

$$u_{\alpha\beta} = (U_d + \Delta u_{dq}^s) e^{-j\theta} = u_{dq}^c e^{-j\theta} \quad (16)$$

在上式加入小信号扰动,经整理可得式

$$\Delta u_{dq}^c = \Delta u_{dq}^s - jU_d \Delta \theta \quad (17)$$

由对称锁相环控制框图可得锁相环输出复相角小扰动值式为

$$\Delta\theta = -jG_{\text{PLL}}(s)\frac{1}{s}\Delta u_{\text{dq}}^c \tag{18}$$

结合式(18),整理可得式

$$\Delta\theta = -j\frac{G_{\text{PLL}}(s)}{s+G_{\text{PLL}}(s)U_{\text{d}}} \Delta u_{\text{dq}}^s = -jH_{\text{PLL}}(s)\Delta u_{\text{dq}}^s \tag{19}$$

根据第1章的建模过程,将上述锁相环输出复

相角的小扰动值代入RPC交直流三端口阻抗模型,经整理可以得到第1章中变换矩阵在对称锁相环下的三维矩阵形式。基于上述修改后的交直流三端口导纳模型,绘制对称锁相环结构下,当RPC输出电感值设定为50 mH时,系统的特征值轨迹见图6。

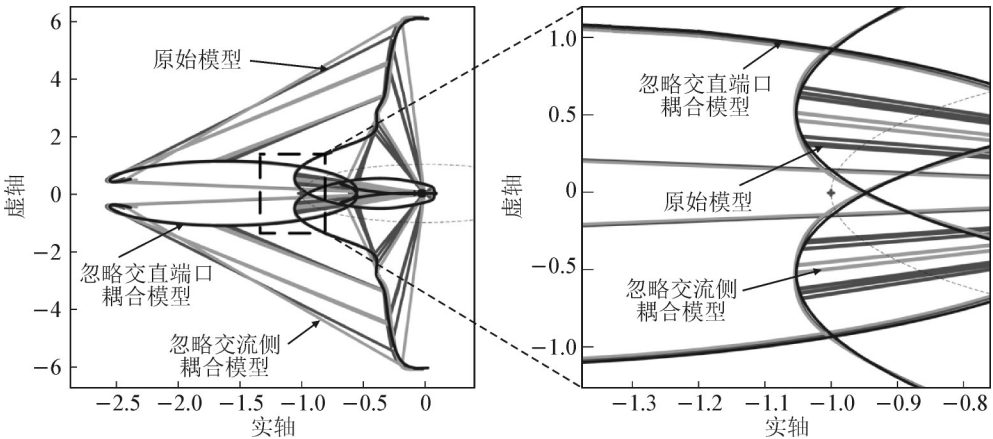


图6 对称锁相环结构下RPC输出电感为50 mH时3种模型的系统特征值轨迹
Fig. 6 System eigenvalue trajectories for three models with RPC output inductance of 50 mH under symmetric phase-locked loop structure

通过对比图6中对称锁相环结构下3种模型的系统特征值轨迹可以看出,3种模型的特征值轨迹呈现出较高的一致性。这表明,在采用对称锁相环结构时,频率耦合效应对系统稳定性分析结果的影响已基本消除,即无论是交流频率耦合还是交直流端口频率耦合均得到了有效抑制。从图中进一步可以观察到,在对称锁相环结构下,当RPC输出电感为50 mH时,系统特征值轨迹并未包围(−1,j0)点,即系统处于稳定状态。结合上一小节的分析结果,对比可以发现,由于频率耦合效应得到了抑制,系统在该电感参数下的稳定边界同时也得以提升至50 mH以上。这一结果验证了频率耦合效应的抑制对系统稳定边界的显著提升作用。

3 仿真分析

为了验证上述系统稳定性分析结果的正确性,在Matlab/Simulink仿真环境下搭建了图1中基于对称锁相环结构的光储两相接入牵引供电系统的仿真模型,相关系统参数见表1、表2、表3、表4。

经仿真得到了当RPC输出电感 $L_{\text{R}}=50\text{ mH}$ 时,原始系统结构与频率耦合抑制后RPC交流侧输出电压、输出电流以及直流母线电压的波形图,见图7、图8。

表1 RPC仿真参数表
Table 1 Simulation parameter table of RPC

符号	参数	数值
$U_{\text{dc,R}}$	RPC直流侧电压	3 600 V
L_{R}	RPC交流侧滤波电感	5.6 mH
$k_{\text{T,R}}$	变压器变比	27 500/1 500
f_{s}	开关频率	250 Hz
$k_{\text{pPLL,R}}$	锁相环比例系数	0.7
$k_{\text{iPLL,R}}$	锁相环积分系数	25
$k_{\text{pv,R}}$	电压环比例系数	0.2
$k_{\text{iv,R}}$	电压环积分系数	3
$k_{\text{pi,R}}$	电流环比例系数	2
$k_{\text{ii,R}}$	电流环积分系数	20

表2 光伏储能仿真参数表
Table 2 Simulation parameter table for photovoltaic energy storage

符号	参数	数值
L_{pv}	光伏输出电感	5 mH
C_{pv}	光伏滤波电容	0.6 mF
$k_{\text{pv,pv}}$	光伏电压环比例系数	5
$k_{\text{iv,pv}}$	光伏电压环积分系数	150
$k_{\text{pi,pv}}$	光伏电流环比例系数	0.005
$k_{\text{ii,pv}}$	光伏电流环积分系数	0.1
L_{ess}	储能输出电感	20 mH
C_{ess}	储能滤波电容	100 μF
$k_{\text{pv,ess}}$	储能电压环比例系数	0.02
$k_{\text{iv,ess}}$	储能电压环积分系数	1.3
$k_{\text{pi,ess}}$	储能电流环比例系数	0.3

k_{ii_ess}	储能电流环积分系数	36.7
---------------	-----------	------

表3 CRH5列车仿真参数表 Table 3 Simulation parameter table of CRH5 train		
符号	参数	数值
U_{dc_C}	CRH5牵引直流侧电压	3 600 V
L_C	整流器滤波电感	5.4 mH
k_{pPLL_C}	锁相环比例系数	51
k_{iPLL_C}	锁相环积分系数	64.56
k_{pv_C}	电压环比例系数	0.5
k_{iv_C}	电压环积分系数	0.05
k_{pi_C}	电流环比例系数	0.86
k_{ii_C}	电流环积分系数	7.5
n_Z	整流器数目	10

表4 牵引供电系统仿真参数 Table 4 Simulation parameters of traction power supply system		
参数符号	参数含义	取值
U_g	外部电网额定电压	220 kV
S_g	外部电网容量	300 MVA
S_T	变压器额定容量	31.5 MVA
P_k	变压器短路功率	71 kW
f_s	系统频率	50 Hz
k_g	电抗电阻比值	14
$r\angle\varphi$	单位长度等效阻抗	$0.6\angle 67^\circ$
l	牵引网长度	7 km
L_n	等效输出总电感	24.1 mH
R_n	等效输出总电阻	$1.054\ \Omega$

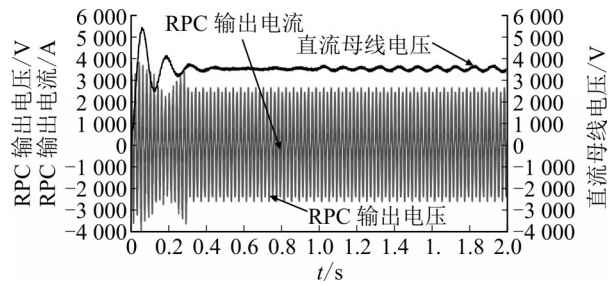


图7 原始模型下RPC输出电感 $L_R=50\text{ mH}$ 时的波形图
Fig. 7 Waveform when RPC output inductance $L_R=50\text{ mH}$ under the original model

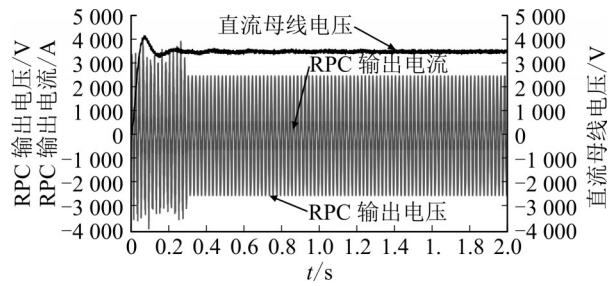


图8 频率耦合抑制后RPC输出电感 $L_R=50\text{ mH}$ 时的波形图
Fig. 8 Waveform when RPC output inductance $L_R=50\text{ mH}$ after frequency coupling suppression

通过观察上图可知,当RPC输出电感 $L_R=50\text{ mH}$ 时,在原始系统结构下的RPC直流母线电压出现较为明显的纹波,交流侧电压电流波形出现低频振荡,因此系统处于不稳定状态。当RPC输出电感 $L_R=50\text{ mH}$ 时,经频率耦合效应抑制后的RPC输出电压、输出电流以及直流母线电压能够在设定值保持稳定,系统处于稳定状态,系统在此电感参数下的稳定边界被提升至 50 mH 以上。结合原始系统结构下与频率耦合效应抑制后系统特征值轨迹的分析,在原始系统结构下系统的特征值轨迹包围 $(-1, j0)$ 点,稳定性分析结果与仿真结果基本一致,系统处于失稳状态。在频率耦合效应抑制后的系统特征值轨迹不包围 $(-1, j0)$ 点,稳定性分析结果与仿真结果基本一致,系统处于稳定状态。综上所述,针对光储两相接入牵引供电系统的分析结果充分证明了抑制频率耦合效应能一定程度上减弱系统交流侧与交直流端口间的频率耦合效应,增强系统的稳定性,提升系统的稳定边界。

4 结语

随着高比例电力电子设备在牵引供电系统中的广泛应用,频率耦合效应引发的牵引供电系统失稳问题对铁路系统的安全运行构成严峻挑战。本文针对由频率耦合效应引发的光储接入牵引供电系统的失稳问题,提出了一种基于对称锁相环的频率耦合抑制方法,通过改进传统阻抗建模方法建立交直流三端口阻抗模型,系统性地分析了多端口耦合机制对稳定性的影响。在此基础上,设计对称锁相环控制结构,通过对称化 d 轴与 q 轴电压控制,削弱PLL不对称性导致的频率耦合效应。研究从理论建模、控制策略设计到仿真验证,揭示了关键动态交互规律,为光储系统接入牵引供电网络提供了理论支撑与工程实践依据。

1)交直流三端口阻抗模型的构建与验证。通过引入三维矩阵形式的方程,建立了交直流三端口阻抗模型,精确描述了光储接入牵引供电系统交直流端口之间的动态交互。研究发现,交流侧耦合对系统稳定性具有主导作用。当RPC输出电感为 30.6 mH 时,原始模型与忽略交直流端口耦合模型均显示系统失稳,而忽略交流侧耦合模型则误判为稳定状态。

2)对称锁相环的抑制机理与效果。对称锁相环通过同时控制 d 轴与 q 轴电压分量,修正了传统PLL仅追踪 q 轴分量的不对称性。理论分析表明,该方法通过消除 dq 轴间的交叉耦合项,显著削弱

了频率耦合效应。通过对比对称锁相环结构下3种模型的特征值轨迹(图6),发现其轨迹高度一致,且未包围复平面关键点 $(-1, j0)$,验证了频率耦合抑制的有效性。仿真结果显示,当RPC输出电感为50 mH时,原始系统因低频振荡失稳(图7),而采用对称锁相环后,输出电压、电流及直流母线电压均保持稳定(图8),系统稳定边界提升至50 mH以上。

3)稳定边界的显著提升。通过特征值分析与时域仿真相结合,量化了频率耦合抑制对系统稳定边界的改善效果。在未抑制频率耦合时,系统在弱电网条件下易受参数变化影响,稳定运行范围受限;而采用对称锁相环后,系统抗扰能力增强,稳定边界扩展,为高比例新能源接入场景提供了更高的鲁棒性。

参考文献

- [1] 陈冲,贾利民,赵天宇,等.去碳化导向的轨道交通与新能源融合发展——形态模式、解决方案和使赋能技术[J].电工技术学报,2023,38(12):3321-3337.
CHEN Chong, JIA Limin, ZHAO Tianyu, et al. Decarbonization-oriented rail transportation and renewable energy integration development—configurations, solutions, and enabling/empowering technologies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(12): 3321-3337.
- [2] 袁小明,程时杰,胡家兵.电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J].中国电机工程学报,2016,36(19):5145-5154.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-scale voltage power angle dynamic stabilization problem for power electronic power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154.
- [3] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [4] 胡家兵,袁小明,程时杰.电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J].中国电机工程学报,2019,39(18):5457-5467.
HU Jiabing, YUAN Xiaoming, CHENG Shijie. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5457-5467.
- [5] YANG Dongsheng, WANG Xiongfei, LIU Fangcheng, et al. Symmetrical PLL for SISO impedance modeling and enhanced stability in weak grids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2): 1473-1483.
- [6] QIAN Qiang, XIE Shaojun, XU Jinming, et al. Output impedance modeling of single-phase grid-tied inverters with capturing the frequency-coupling effect of PLL[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(5): 5479-5495.
- [7] WANG Xiongfei, HARNEFORS L, BLAABJERG F. Unified impedance model of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1775-1787.
- [8] YANG D, WANG X. Unified modular state-space modeling of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 9700-9715.
- [9] DONG Dong, WEN Bo, BOROYEVICH D, et al. Analysis of phase-locked loop low-frequency stability in three-phase grid-connected power converters considering impedance interactions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1): 310-321.
- [10] 裴顺新,苏鹏程,吴命利.高次谐波谐振引起网压异常波动的治理措施[C]//2008年铁路电气化新技术学术年会论文集.北京,2008.
- [11] 潘鹏宇,胡海涛,肖冬华,等.高速列车变流器“扫频式”dq阻抗测量中的频率耦合干扰机理及抑制策略[J].电工技术学报,2022,37(4):990-999.
PAN Pengyu, HU Haitao, XIAO Donghua, et al. Frequency coupling interference mechanism and suppression strategy for frequency-sweeping-based dq impedance measurement of high-speed train converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(4): 990-999.
- [12] 李志远,胡鑫焯,吴思奇,等.基于自抗扰STATCOM装置的车网耦合系统低频振荡抑制策略[J].电网技术,2020,44(4):1514-1524.
LI Zhiyuan, HU Xinxuan, WU Siqi, et al. A strategy of low frequency oscillation suppression for vehicle-grid coupling system based on STATCOM with ADRC[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1514-1524.
- [13] 王迎晨,杨少兵,宋可荐,等.基于滑模结构无源控制的车网耦合系统低频振荡抑制方法[J].电工技术学报,2020,35(3):553-563.
WANG Yingchen, YANG Shaobing, SONG Kejian, et al. An approach based on SMS to suppress low-frequency oscillation in the EMUs and traction network coupling system using PBC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 553-563.
- [14] 魏调忠,江珂滕.基于非线性控制的高速铁路车网系统低频振荡的抑制分析[J].铁道机车与动车,2019(10):27-29.
WEI Diaozhong, JIANG Keteng. Suppression analysis of low-frequency oscillations in high-speed railroad vehicle

- network system based on nonlinear control[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2019(10): 27-29.
- [15] 郭健, 陈燕东, 王翔宇, 等. 负荷虚拟同步机的宽频带dq阻抗建模及弱电网下与传统PWM整流器的稳定性对比分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4758-4769.
- GUO Jian, CHEN Yandong, WANG Xiangyu, et al. Wide-band dq-frame impedance modeling of load-side virtual synchronous machine and its stability analysis in comparison with conventional PWM rectifier in weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4758-4769.
- [16] ZHANG X, FU S, CHEN W, et al. A symmetrical control method for grid connected converters to suppress the frequency coupling under weak grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(12): 13499.
- [17] ZHANG Xueguang, LI Meng, XU Dianguo. PCC voltage perturbation path analysis and compensation for grid-connected voltage-source converter under weak grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12): 12331-12339.
- [18] DU Xiong, WANG Guoning, SHI Ying, et al. Using asymmetric current controller to improve the stability of grid-inverter system due to PLL effect[C]//2017 IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL). [S.l.]: IEEE, 2017: 1-7.
- [19] 邓文丽, 戴朝华, 陈维荣, 等. 铁路功率调节器研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4640-4655.
- DENG Wenli, DAI Chaohua, CHEN Weirong, et al. Research progress of railroad power conditioner[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4640-4655.
- [20] 陈维荣, 王小雨, 韩莹, 等. 基于RPC的光储接入牵引供电系统协调控制方法[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(1): 1-10.
- CHEN Weirong, WANG Xiaoyu, HAN Ying, et al. Coordinated control method of photovoltaic and battery system connected to traction power supply system based on railway power conditioner[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2024, 59(1): 1-10.
- [21] 上官郭雪. 光储接入高铁牵引供电系统稳定性分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.
- [22] 吴天昊, 谢小荣, 姜齐荣, 等. 考虑频率耦合及交直流端口耦合效应的并网变流器三端口导纳模型[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 248-259.
- WU Tianhao, XIE Xiaorong, JIANG Qirong, et al. Three-port admittance modeling of grid-connected converters considering frequency-coupling and AC/DC coupling effects[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 248-259.
- [23] LIN J, SU M, SUN Y, et al. Frequency coupling suppression control strategy for single-phase grid-tied inverters in weak grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(9): 8926 - 8938.
- [24] 易善军, 李原, 马宁嘉, 等. 实际次/超同步振荡事件的多频率耦合效应分析[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(7): 56-61.
- YI Shanjun, LI Yuan, MA Ningjia, et al. A study on multi-frequency coupling effects in an actual sub/super synchronous oscillation event[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2024, 40(7): 56-61.
- [25] ZHANG Chen, MOLINAS M, FOYEN S, et al. Harmonic-domain SISO equivalent impedance modeling and stability analysis of a single-phase grid-connected VSC[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 9770-9783.
- [26] 聂飞. 弱电网下并网变流器频率耦合振荡机理及抑制策略研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2022.
- 作者简介:**
- 董志鹏(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为牵引供电系统稳定性分析。E-mail: 15367154031@163.com。
- 魏春宇(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为牵引供电系统稳定性分析。E-mail: 12222139@stu.lzjtu.edu.cn。
- 李欣(1978—), 男, 教授, 研究方向为电气化交通与能源融合技术、电力电子与新型电能变换技术。E-mail: lxfp167@163.com。