第 52 卷 第 7 期：3123-3138 高电压技术 Vol.52, No.7: 3123-3138
2026 年 7 月 31 日 High Voltage Engineering July 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251286

基于交互能量-哈密尔顿路径的风场经柔性直流输电并网系统的振荡源定位方法

马　静，陈乐童，闻　宪
（新能源电力系统全国重点实验室(华北电力大学)，北京 102206）

摘　要：为实现风场经柔性直流输电并网系统中振荡源的精确定位，该文提出了一种基于交互能量与哈密尔顿路径的振荡源定位方法。首先，建立了并网系统的动态能量模型，通过分析子系统间的交互能量，提取表征其连接关系的正负因子，以量化各环节对系统稳定性的影响；随后，构建系统哈密尔顿图拓扑，赋予各边交互能量权重，通过回溯算法求解全局最优路径，识别振荡的发生与传播链路；最后，在 RT-LAB 硬件在环仿真平台上进行实验验证。结果表明，所提方法能够准确识别出送端换流站 VSC1 电压外环 *d* 轴子系统与受端换流站 VSC3 锁相环子系统为引发系统振荡的关键环节。该研究为复杂电力电子并网系统的振荡溯源与抑制提供了新的分析思路与理论依据。

关键词：风电并网；柔性直流输电系统；交互能量；哈密尔顿路径；振荡源定位；稳定性分析

Oscillation Source Location Method for Wind Farms Connected to the Grid via VSC-HVDC Systems Based on Interaction Energy-Hamiltonian Paths

MA Jing, CHEN Letong, WEN Xian
(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: To achieve accurate localization of oscillation sources in direct-drive wind farms connected to the grid via a VSC-MTDC system, this paper proposes an oscillation source localization method based on interaction energy and Hamiltonian paths. First, a dynamic energy model of the grid-connected system is established. By analyzing the interaction energy between subsystems, positive and negative factors characterizing their connections are extracted to quantify the impact of each link on the system stability. Then, a Hamiltonian graph topology of the system is constructed, with each edge assigned interaction energy weights. The global optimal path is solved using a backtracking algorithm to identify the oscillation initiation and propagation links. Finally, experimental validation is carried out on the RT-LAB hardware-in-the-loop simulation platform. The results demonstrate that the voltage outer-loop *d*-axis subsystem of the sending-end converter VSC1 and the phase-locked loop (PLL) subsystem of the receiving-end converter VSC3 are identified as the key links causing system oscillations. This study provides a new analytical approach and a theoretical basis for oscillation tracing and suppression in complex power-electronics-dominated grid-connected systems.

Key words: grid connection of wind power; VSC-HVDC system; interaction energy; Hamiltonian path; oscillation source location; stability analysis

0　引言

近年来，新能源经柔直并网系统规模的逐步发展以及高比例电力电子装置的广泛应用，导致振荡现象愈加错综复杂，振荡发生的原因及机理难以准确分析[1-2]。国内外振荡事件频发，其现象呈宽频带、强交互趋势，严重危害电力系统的安全运行[3-5]。因此，研究新能源经柔直并网系统的振荡失稳问题、揭示影响系统振荡稳定性的关键因素具有重要意义。

现有针对新能源经柔直并网系统振荡源定位的研究方法可分为基于物理模型和基于数据驱动 2 种。基于物理模型的振荡源定位方法根据系统的数学模型，在物理层面对振荡产生原因进行分析，经典的有阻抗分析法和模态分析法[6]，例如：文献[7]

基金资助项目：国家自然科学基金(52130709)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52130709).

利用元件频域导纳模型计算新能源并点系统侧等效阻抗，通过阻抗分析评估系统内新能源场站并网振荡风险；文献[8]基于所建立的风电经柔直送出系统的详细序阻抗模型，从阻抗角度定量分析次/超同步振荡发生的内在机理，明确参数的设计边界，但未从全局揭示振荡的传播过程；文献[9]提出了一种基于风电并网系统的阻抗辨识方法，通过在线测量风场支路阻抗并结合预估电网侧阻抗极限值对次同步频段下的振荡源进行定位，但系统参数与控制参数的动态耦合以及多模态会影响测量的准确性；文献[10]利用阻抗分析法，得到虚拟同步机的感性阻抗特性与串补网络容性阻抗特性间的耦合效应是引发次同步振荡的关键因素；针对电力电子装置主导的交直流电网振荡，文献[11-12]分析了时域模态分析法与频域分析法在振荡源定位中的优缺点及适用范围。

基于数据驱动的振荡源定位方法通过实测数据提取振荡特征，利用信号分析法等手段定位振荡源，例如：文献[13]针对电网低频振荡期间发电机功率难以直接测量的问题，提出一种结合动态相量测量的实用算法，但针对次/超同步振荡，该算法难以动态跟踪振荡的变化；文献[14]提取系统振荡期间保护安装处的电压余弦分量特征，提出一种自适应的系统振荡和故障识别方案；文献[15]提出了一种基于孤立森林算法的数据驱动强迫振荡源定位方法，提高了定位的鲁棒性，但仅利用监测装置和定位算法对结构日益复杂的电网进行振荡溯源的准确性有限；文献[16-17]为评估耗能元件对振荡衰减的贡献程度，提出了一种基于量测数据能量流的振荡源定位方法；文献[18]则结合短时傅里叶变换图像和迁移学习算法，构建了振荡源与映射图的互联关系，提高了定位的效率和精度；文献[19-20]利用迁移智能算法研究由高比例电力电子设备引起的多种振荡模式，有效解决振荡源定位时缺乏数据的问题，但当振荡模式随工况动态变化时该模型难以实时更新；文献[21-22]基于压缩采样时序信息，运用图卷积神经网络、软阈值迭代算法实现振荡源定位，能够实现数据缺失、传输偏差等情况下对宽频振荡的在线定位；文献[23]结合快速独立分量分析技术和总体最小二乘-旋转不变技术，有效提升了抗干扰性能和辨识精度。

综上，物理模型法对模型参数要求高，在强非线性区、多源耦合场景下难以全面刻画振荡的交互现象，振荡源定位的准确性有限。而对于机理复杂的宽频振荡而言，数据驱动法的算法训练和溯源计算量庞大且耗时过长，并且在振荡源定位时高度依赖数据的质量和场景的覆盖率，难以揭示振荡的物理本质。

此外，基于能量函数的振荡源定位方法也受到了国内外学者的广泛关注，例如：文献[24]为溯源次同步振荡，提出了一种基于弹性能量的能量函数分析方法；文献[25-26]针对双馈风机并网系统和直驱风电场经柔性直流输电(voltage source converter-based high voltage direct current, VSC-HVDC)并网系统次同步振荡源定位问题，提出了一种次同步模态能量函数分析方法。但上述方法多独立分析各子系统参数的影响以进行系统级振荡源定位，未从系统全局的角度具体描述系统部分之间和控制环节内的交互影响，无法展现并网系统内部控制环节的振荡传递特性，准确定位引发振荡的关键因素，对振荡传播路径的刻画能力有限。

为此，本文以四端环网风电经柔直并网系统为研究对象，提出了一种基于交互能量-哈密尔顿路径的振荡源定位方法。首先，基于首次积分理论建立并网系统动态能量模型，分析各子系统间交互能量并提取表征各子系统联系的正负因子，量化其对并网系统振荡稳定性的影响程度。然后，基于并网系统提取哈密尔顿图拓扑，赋予各边交互能量正负因子及权重，进而求解出振荡发生-演化的路径，定位主导系统振荡的关键源头。最后在 RT-LAB 平台搭建并网系统仿真模型，验证文中所提方法的有效性和正确性。

1 四端环网风电经柔直并网系统动态能量建模

四端环网风电经柔直并网系统的结构如图 1 所示，直驱风电 PMSG1、PMSG2 发出的电能分别经送端换流站 VSC1、VSC2 整流，由受端换流站 VSC3、VSC4 换流送出。

送端换流站 VSC1、VSC2 采用交流电压-频率(U–f)控制，受端主换流站 VSC3 采用定直流电压控制，受端从站 VSC4 采用 PQ 控制。因此计及控制系统的四端环网风电经柔直并网系统的部分子系统数学模型如式(1)—式(8)所示。

对于直驱风电场 1 的 d、q 轴子系统，有：

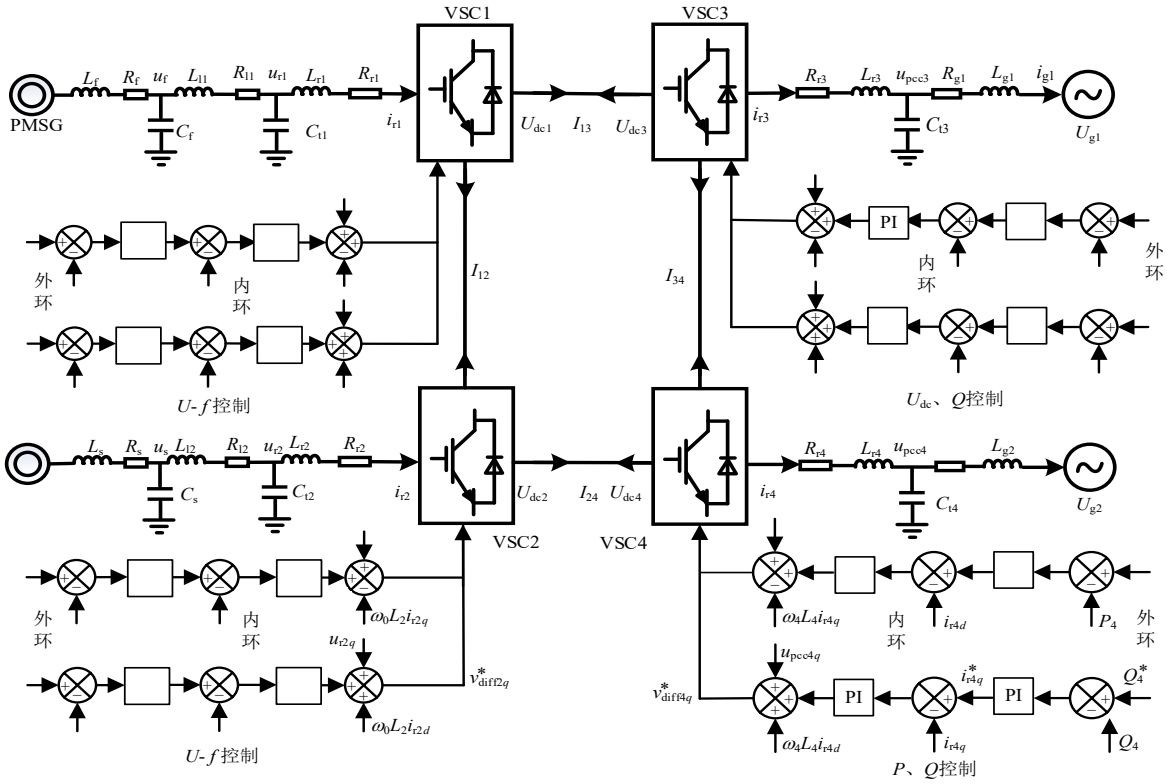


图 1　四端环网风电经柔直并网系统结构

Fig.1　Topology of four-terminal ring network wind power grid-connected system via VSC-HVDC

$$\begin{cases}\dfrac{1}{k_{\mathrm{iF1}}}\dfrac{\mathrm{d}\Delta u^{\mathrm{c}}_{\mathrm{ct}dF1}}{\mathrm{d}t}=-\Delta i_{dF1}\cos\theta_{\mathrm{F1}}+\Delta i_{dF1\text{-ref}}\cos\theta_{\mathrm{F1}}+\\ (\Delta i_{qF1\text{-ref}}-\Delta i_{qF1})\sin\theta_{\mathrm{F1}}+(i_{qF10\text{-ref}}-i_{qF10})\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\cos\theta_{\mathrm{F1}}-\\ (i_{dF10\text{-ref}}-i_{dF10})\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\sin\theta_{\mathrm{F1}}\\ L_{\mathrm{f1}}\dfrac{\mathrm{d}\Delta i^{\mathrm{c}}_{dF1}}{\mathrm{d}t}=-(R_{\mathrm{f1}}-k_{\mathrm{pF1}})\Delta i_{dF1}\cos\theta_{\mathrm{F1}}+\Delta u_{\mathrm{ct}dF1}-\\ (R_{\mathrm{f1}}-k_{\mathrm{pF1}})\Delta i_{\mathrm{qF1}}\sin\theta_{\mathrm{F1}}-k_{\mathrm{pF1}}\cos\theta_{\mathrm{F1}}\Delta i_{dF1\text{-ref}}-\\ k_{\mathrm{pF1}}\sin\theta_{\mathrm{F1}}\Delta i_{qF1\text{-ref}}+\left(u_{dF10}-\omega L_{\mathrm{g}}i_{qF10}\right)\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\sin\theta_{\mathrm{F1}}+\\ \left(k_{\mathrm{pF1}}i_{dF10\text{-ref}}-k_{\mathrm{pF1}}i_{dF10}\right)\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\sin\theta_{\mathrm{F1}}-u_{qF10}\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\cos\theta_{\mathrm{F1}}-\\ \omega L_{\mathrm{g}}i_{dF10}\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\cos\theta_{\mathrm{F1}}+\left(k_{\mathrm{pF1}}i_{qF10}-k_{\mathrm{pF1}}i_{qF10\text{-ref}}\right)\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\cos\theta_{\mathrm{F1}}\end{cases}\tag{1}$$

$$\begin{cases}\dfrac{1}{k_{\mathrm{iF1}}}\dfrac{\mathrm{d}\Delta u^{\mathrm{c}}_{\mathrm{ct}qF1}}{\mathrm{d}t}=-\Delta i_{qF1}\cos\theta_{\mathrm{F1}}+\Delta i_{qF1\text{-ref}}\cos\theta_{\mathrm{F1}}+\\ (\Delta i_{dF1}-\Delta i_{dF1\text{-ref}})\sin\theta_{\mathrm{F1}}+(i_{dF10}-i_{dF10\text{-ref}})\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\cos\theta_{\mathrm{F1}}+\\ (i_{qF10}-i_{qF10\text{-ref}})\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\sin\theta_{\mathrm{F1}}\\ L_{\mathrm{f1}}\dfrac{\mathrm{d}\Delta i^{\mathrm{c}}_{qF1}}{\mathrm{d}t}=-(R_{\mathrm{f1}}-k_{\mathrm{pF1}})\Delta i_{dF1}\cos\theta_{\mathrm{F1}}+\Delta u_{\mathrm{ct}qF1}+\\ (R_{\mathrm{f1}}-k_{\mathrm{pF1}})\Delta i_{dF1}\sin\theta_{\mathrm{F1}}-k_{\mathrm{pF1}}\Delta i_{qF1-\mathrm{ref}}\cos\theta_{\mathrm{F1}}+\\ k_{\mathrm{pF1}}\Delta i_{dF1\text{-ref}}\sin\theta_{\mathrm{F1}}+\left(u_{dF10}-\omega L_{\mathrm{g}}i_{qF10}\right)\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\cos\theta_{\mathrm{F1}}+\\ \left(-k_{\mathrm{pF1}}i_{dF10}+k_{\mathrm{pF1}}i_{dF10\text{-ref}}\right)\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\cos\theta_{\mathrm{F1}}+u_{qF10}\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\sin\theta_{\mathrm{F1}}+\\ \omega L_{\mathrm{g}}i_{dF10}\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\sin\theta_{\mathrm{F1}}+\left(k_{\mathrm{pF1}}i_{qF10\text{-ref}}-k_{\mathrm{pF1}}i_{qF10}\right)\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\sin\theta_{\mathrm{F1}}\end{cases}\tag{2}$$

式中：$\Delta u^{\mathrm{c}}_{\mathrm{ct}dF1}$ 和 $\Delta u^{\mathrm{c}}_{\mathrm{ct}qF1}$ 为直驱风电场 1 的电流内环输出量的扰动值；$\Delta i^{\mathrm{c}}_{dF1}$ 和 $\Delta i^{\mathrm{c}}_{qF1}$、$i_{dF10}$ 和 i_{qF10} 分别为直驱风电场 1 输出电流的扰动值及初始值；k_{iF1} 和 k_{pF1} 分别为电流内环的积分和比例系数；θ_{F1} 为锁相环与送端换流站的工频坐标系间的相角差；$\Delta\theta_{\mathrm{pll}}$ 为锁相环角度的扰动变化量；$\Delta i_{dF1\text{-ref}}$ 和 $\Delta i_{qF1\text{-ref}}$、$i_{dF10\text{-ref}}$ 和 $i_{qF10\text{-ref}}$ 分别为电流内环输入的参考值及初始值；L_{f1} 和 R_{f1} 分别为滤波电感和等效电阻。

对于送端 VSC1 换流站 d、q 轴子系统，有：

$$\begin{cases}\dfrac{1}{k_{\mathrm{ir1}}}\dfrac{\mathrm{d}\Delta u_{\mathrm{cr1}d}}{\mathrm{d}t}=-\Delta i_{\mathrm{r1}d}+\Delta i_{\mathrm{r1}d\text{-ref}}\\ L_{\mathrm{r1}}\dfrac{\mathrm{d}\Delta i_{\mathrm{r1}d}}{\mathrm{d}t}=-(R_{\mathrm{r1}}+k_{\mathrm{pr1}})\Delta i_{\mathrm{r1}d}+\Delta u_{\mathrm{cr1}d}+k_{\mathrm{pr1}}\Delta i_{\mathrm{r1}d\text{-ref}}\end{cases}\tag{3}$$

$$\begin{cases}\dfrac{1}{k_{\mathrm{ir1}}}\dfrac{\mathrm{d}\Delta u_{\mathrm{cr1}q}}{\mathrm{d}t}=-\Delta i_{\mathrm{r1}q}+\Delta i_{\mathrm{r1}q\text{-ref}}\\ L_{\mathrm{r1}}\dfrac{\mathrm{d}\Delta i_{\mathrm{r1}q}}{\mathrm{d}t}=-(R_{\mathrm{r1}}+k_{\mathrm{pr1}})\Delta i_{\mathrm{r1}q}+\Delta u_{\mathrm{cr1}q}+k_{\mathrm{pr1}}\Delta i_{\mathrm{r1}q\text{-ref}}\end{cases}\tag{4}$$

式中：k_{pr1} 和 k_{ir1} 分别为电流内环的积分和比例系数；$\Delta u_{\mathrm{cr1}d}$ 和 $\Delta u_{\mathrm{cr1}q}$ 分别为电流内环输出量的扰动值；$\Delta i_{\mathrm{r1}d}$ 和 $\Delta i_{\mathrm{r1}q}$ 为送端 VSC1 换流站输出电流的扰动值；$\Delta i_{\mathrm{r1}d\text{-ref}}$ 和 $\Delta i_{\mathrm{r1}q\text{-ref}}$ 为送端 VSC1 换流站电流内环输入的参考值；L_{r1} 和 R_{r1} 分别为送端 VSC1 换流站

的滤波电感和等效电阻。

对于受端 VSC3 换流站 d、q 轴子系统，有：

$$\begin{cases}\dfrac{1}{k_{\mathrm{ir3}}}\dfrac{\mathrm{d}\Delta u^{\mathrm{c}}_{\mathrm{cr3}d}}{\mathrm{d}t}=-\Delta i_{\mathrm{r3}d}\cos\theta_3+\Delta i_{\mathrm{r3}d\text{-ref}}\cos\theta_3+\\ (\Delta i_{\mathrm{r3}q\text{-ref}}-\Delta i_{\mathrm{r3}q})\sin\theta_3+(i_{\mathrm{r3}q0\text{-ref}}-i_{\mathrm{r3}q0})\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\cos\theta_3-\\ (i_{\mathrm{r3}d0\text{-ref}}-i_{\mathrm{r3}d0})\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\sin\theta_3\\ L_{\mathrm{r3}}\dfrac{\mathrm{d}\Delta i^{\mathrm{c}}_{\mathrm{r3}d}}{\mathrm{d}t}=-(R_{\mathrm{g3}}+k_{\mathrm{pr3}})\Delta i_{\mathrm{r3}d}\cos\theta_3-\Delta u^{\mathrm{c}}_{\mathrm{cr3}d}-\\ (R_{\mathrm{g3}}+k_{\mathrm{pr3}})\Delta i_{\mathrm{r3}q}\sin\theta_3+k_{\mathrm{pr3}}\Delta i_{\mathrm{r3}d\text{-ref}}\cos\theta_3+\\ k_{\mathrm{pr3}}\sin\theta_3\Delta i_{\mathrm{r3}q\text{-ref}}+\left(u_{\mathrm{r3}d0}+\omega L_{\mathrm{r3}}i_{\mathrm{r3}q0}\right)\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\sin\theta_3+\\ \left(k_{\mathrm{pr3}}i_{\mathrm{r3}d0}-k_{\mathrm{pr3}}i_{\mathrm{r3}d0\text{-ref}}\right)\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\sin\theta_3-u_{\mathrm{r3}q0}\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\cos\theta_3+\\ \omega L_{\mathrm{r3}}i_{\mathrm{r3}d0}\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\cos\theta_3+\left(-k_{\mathrm{pr3}}i_{\mathrm{r3}q0}+k_{\mathrm{pr3}}i_{\mathrm{r3}q0\text{-ref}}\right)\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\cos\theta_3\end{cases}\tag{5}$$

$$\begin{cases}\dfrac{1}{k_{\mathrm{ir3}}}\dfrac{\mathrm{d}\Delta u^{\mathrm{c}}_{\mathrm{cr3}q}}{\mathrm{d}t}=-\Delta i_{\mathrm{r3}q}\cos\theta_3+\Delta i_{\mathrm{r3}q\text{-ref}}\cos\theta_3+\\ (\Delta i_{\mathrm{r3}d}-\Delta i_{\mathrm{r3}d\text{-ref}})\sin\theta_3+(i_{\mathrm{r3}d0}-i_{\mathrm{r3}d0\text{-ref}})\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\cos\theta_3+\\ (i_{\mathrm{r3}q0}-i_{\mathrm{r3}q0\text{-ref}})\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\sin\theta_3\\ L_{\mathrm{r3}}\dfrac{\mathrm{d}\Delta i^{\mathrm{c}}_{\mathrm{r3}q}}{\mathrm{d}t}=-(R_{\mathrm{g3}}-k_{\mathrm{pr3}})\Delta i_{\mathrm{r3}d}\cos\theta_3+\Delta u_{\mathrm{cr3}q}+\\ (R_{\mathrm{g3}}-k_{\mathrm{pr3}})\Delta i_{\mathrm{r3}d}\sin\theta_3-k_{\mathrm{pr3}}\Delta i_{\mathrm{r3}q\text{-ref}}\cos\theta_3+\\ k_{\mathrm{pr3}}\Delta i_{\mathrm{r3}d\text{-ref}}\sin\theta_3+\left(u_{\mathrm{r3}d0}-\omega L_{\mathrm{r3}}i_{\mathrm{r3}q0}\right)\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\cos\theta_3+\\ \left(-k_{\mathrm{pr3}}i_{\mathrm{r3}d0}+k_{\mathrm{pr3}}i_{\mathrm{r3}d0\text{-ref}}\right)\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\cos\theta_3+u_{\mathrm{r3}q0}\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\sin\theta_3+\\ \omega L_{\mathrm{r3}}i_{\mathrm{r3}d0}\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\sin\theta_3+\left(-k_{\mathrm{pr3}}i_{\mathrm{r3}q0}+k_{\mathrm{pr3}}i_{\mathrm{r3}q0\text{-ref}}\right)\Delta\theta_{\mathrm{pll}}\sin\theta_3\end{cases}\tag{6}$$

式中：$\Delta u^{\mathrm{c}}_{\mathrm{cr3}d}$ 和 $\Delta u^{\mathrm{c}}_{\mathrm{cr3}q}$ 为受端 VSC3 换流站的电流内环输出量的扰动值；$\Delta i^{\mathrm{c}}_{\mathrm{r3}d}$ 和 $\Delta i^{\mathrm{c}}_{\mathrm{r3}q}$、$i_{\mathrm{r3}d0}$ 和 $i_{\mathrm{r3}q0}$ 分别为受端 VSC3 换流站输出电流的扰动值及初始值；k_{ir3} 和 k_{pr3} 分别为电流内环的积分和比例系数；θ_3 为锁相环与受端换流站的工频坐标系间的相角差；$\Delta i_{\mathrm{r3}d\text{-ref}}$ 和 $\Delta i_{\mathrm{r3}q\text{-ref}}$、$i_{\mathrm{r3}d0\text{-ref}}$ 和 $i_{\mathrm{r3}q0\text{-ref}}$ 分别为电流内环输入的参考值及初始值；L_{r3} 和 R_{g3} 分别为受端 VSC3 换流站侧的滤波电感和等效电阻。

对于交流线路 1 的 d、q 轴子系统，有：

$$\begin{cases}C_{\mathrm{t}}\dfrac{\mathrm{d}\Delta u_{\mathrm{pcc}d1}}{\mathrm{d}t}=\Delta i_{\mathrm{r1}d}+\Delta i_{d\mathrm{F1}}+\omega C_{\mathrm{t}}\Delta u_{\mathrm{pcc}q1}\\ -L_{\mathrm{r1}}\dfrac{\mathrm{d}\Delta i_{\mathrm{r1}d}}{\mathrm{d}t}=-R_{\mathrm{r1}}\Delta i_{\mathrm{r1}d}+\Delta u_{\mathrm{pcc}d1}+\omega L_{\mathrm{r1}}\Delta i_{\mathrm{r1}q}\\ L_{\mathrm{g}}\dfrac{\mathrm{d}\Delta i_{d\mathrm{F1}}}{\mathrm{d}t}=R_{\mathrm{g}}\Delta i_{d\mathrm{F1}}-\Delta u_{\mathrm{pcc}d1}-\omega L_{\mathrm{g}}\Delta i_{q\mathrm{F1}}\end{cases}\tag{7}$$

$$\begin{cases}C_{\mathrm{t}}\dfrac{\mathrm{d}\Delta u_{\mathrm{pcc}q1}}{\mathrm{d}t}=\Delta i_{\mathrm{r1}q}+\Delta i_{q\mathrm{F1}}+\omega C_{\mathrm{t}}\Delta u_{\mathrm{pcc}d1}\\ -L_{\mathrm{r1}}\dfrac{\mathrm{d}\Delta i_{\mathrm{r1}q}}{\mathrm{d}t}=-R_{\mathrm{r1}}\Delta i_{\mathrm{r1}q}+\Delta u_{\mathrm{pcc}q1}-\omega L_{\mathrm{r1}}\Delta i_{\mathrm{r1}d}\\ L_{\mathrm{g}}\dfrac{\mathrm{d}\Delta i_{q\mathrm{F1}}}{\mathrm{d}t}=R_{\mathrm{g}}\Delta i_{qF1}-\Delta u_{\mathrm{pcc}q1}+\omega L_{\mathrm{g}}\Delta i_{\mathrm{dF1}}\end{cases}\tag{8}$$

式中：$\Delta u_{\mathrm{pcc}d1}$ 和 $\Delta u_{\mathrm{pcc}q1}$ 为交流线路 1 处的并网点电压；C_{t}、L_{g} 分别为线路滤波电容和滤波电感；ω 为工频角速度。

直驱风电场 2 的 d 轴和 q 轴子系统、送端 VSC2 换流站 d 轴和 q 轴子系统、受端 VSC4 换流站 d 轴和 q 轴子系统、交流线路 2 的 d 轴和 q 轴子系统数学模型的原理与式(1)—式(8)一致，此处不再赘述。

进一步地，并网系统的各子系统数学模型通用表达形式[27]为：

$$\begin{cases}C\dfrac{\mathrm{d}\Delta U}{\mathrm{d}t}=-K_{\mathrm{L}}\Delta I+F_{\mathrm{C}}\\ L\dfrac{\mathrm{d}\Delta I}{\mathrm{d}t}=-R\Delta I+K_{\mathrm{C}}\Delta U+F_{\mathrm{L}}\end{cases}\tag{9}$$

式中：R、L 和 C 分别表示等效电阻、电感和电容；ΔU、ΔI 分别为等效电压和电流；F_{C}、F_{L} 分别表示各子系统之间的交互项；K_{L} 和 K_{C} 均为正系数。

将(9)中的两式相除可得：

$$\frac{C}{L}\frac{\mathrm{d}\Delta U}{\mathrm{d}\Delta I}=\frac{-K_{\mathrm{L}}\Delta I+F_{\mathrm{C}}}{-R\Delta I+K_{\mathrm{C}}\Delta U+F_{\mathrm{L}}}\tag{10}$$

将式(10)进行交叉相乘，并利用首次积分可得到该子系统的动态能量函数为：

$$\begin{aligned}&\frac{1}{2}CK_{\mathrm{C}}\Delta U^2+\frac{1}{2}LK_{\mathrm{L}}\Delta I^2+K_{\mathrm{L}}R\int\Delta I^2\mathrm{d}t-\\ &K_{\mathrm{C}}\int F_{\mathrm{C}}\Delta U\mathrm{d}t-K_{\mathrm{L}}\int F_{\mathrm{L}}\Delta I\mathrm{d}t=C_{\mathrm{con}}\end{aligned}\tag{11}$$

式中：C_{con} 为积分常数。

对式(11)进行进一步整理，可定义系统动态能量函数为：

$$E=E_{\mathrm{S}}-E_{\mathrm{D}}-E_{\mathrm{T}}=C_{\mathrm{con}}\tag{12}$$

式中：

$$\begin{cases}E_{\mathrm{S}}=\dfrac{1}{2}CK_{\mathrm{C}}\Delta U^2+\dfrac{1}{2}LK_{\mathrm{L}}\Delta I^2\\ E_{\mathrm{D}}=-K_{\mathrm{L}}R\int\Delta I^2\mathrm{d}t\\ E_{\mathrm{T}}=K_{\mathrm{C}}\int F_{\mathrm{C}}\Delta U\mathrm{d}t+K_{\mathrm{L}}\int F_{\mathrm{L}}\Delta I\mathrm{d}t\end{cases}\tag{13}$$

式中：E_{S} 表示存储能；E_{D} 表示耗散能；E_{T} 表示交互能；$\frac{1}{2}CK_{\mathrm{C}}\Delta U^2$、$\frac{1}{2}LK_{\mathrm{L}}\Delta I^2$ 分别表示等效电容 C 和等效电感 L 中的存储能量；$-K_{\mathrm{L}}R\int\Delta I^2\mathrm{d}t$ 表示等效电阻 R 消耗的耗散能量；$K_{\mathrm{C}}\int F_{\mathrm{C}}\Delta U\mathrm{d}t$、$K_{\mathrm{L}}\int F_{\mathrm{L}}\Delta I\mathrm{d}t$ 分别表示不同子系统间的交互能量。

由式(13)对时间 t 求导，可得系统动态能量变化速率：

$$\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial E}{\partial x}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}+\frac{\partial E}{\partial y}\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}+\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t}=K_{\mathrm{C}}F_{\mathrm{C}}\Delta U-\\ K_{\mathrm{C}}K_{\mathrm{L}}\Delta U\Delta I+K_{\mathrm{L}}R\Delta I^2+K_{\mathrm{C}}K_{\mathrm{L}}\Delta U\Delta I+\\ K_{\mathrm{L}}F_{\mathrm{L}}\Delta I+K_{\mathrm{L}}R\Delta I^2-K_{\mathrm{C}}F_{\mathrm{C}}\Delta U-K_{\mathrm{C}}F_{\mathrm{L}}\Delta I=0\end{aligned}\tag{14}$$

由式(14)可知，系统总动态能量函数 E 随时间

的导数为 0，证明系统满足能量守恒定律。

由式(12)可得，系统储存能、耗散能及交互能有以下关系：

$$\dot{E}_{\mathrm{S}}=\dot{E}_{\mathrm{D}}+\dot{E}_{\mathrm{T}}=-K_{\mathrm{L}}R\Delta I^{2}+K_{\mathrm{C}}F_{\mathrm{C}}\Delta U+K_{\mathrm{L}}F_{\mathrm{L}}\Delta I \quad (15)$$

当系统发生振荡时，电压和电流的振荡分量可表示为：

$$\begin{cases}\Delta U=A_{\Delta\mathrm{U}}\mathrm{e}^{\alpha t}\cos(\omega_{\mathrm{a}}t+\varphi_{\Delta\mathrm{U}})\\ \Delta I=A_{\Delta\mathrm{I}}\mathrm{e}^{\alpha t}\cos(\omega_{\mathrm{a}}t+\varphi_{\Delta\mathrm{I}})\\ F_{\mathrm{C}}=A_{\mathrm{F_C}}\mathrm{e}^{\alpha t}\cos(\omega_{\mathrm{a}}t+\varphi_{\mathrm{F_C}})\\ F_{\mathrm{L}}=A_{\mathrm{F_L}}\mathrm{e}^{\alpha t}\cos(\omega_{\mathrm{a}}t+\varphi_{\mathrm{F_L}})\end{cases} \quad (16)$$

式中：α 为振荡衰减系数；$A_{\Delta\mathrm{U}}$、$A_{\Delta\mathrm{I}}$、$A_{\mathrm{F_C}}$ 和 $A_{\mathrm{F_L}}$ 分别为变量 ΔU、ΔI、F_{C} 和 F_{L} 的幅值；ω_{a} 为振荡角速度；$\varphi_{\Delta\mathrm{U}}$、$\varphi_{\Delta\mathrm{I}}$、$\varphi_{\mathrm{F_C}}$ 和 $\varphi_{\mathrm{F_L}}$ 为振荡分量的相位。将式(16)代入式(13)可计算得到 $\dot{E}_{\mathrm{s}}$、$\dot{E}_{\mathrm{D}}$ 和 $\dot{E}_{\mathrm{T}}$，并提取其非周期分量用以表征该项能量的累积变化趋势，如式(17)—(19)所示。

$$\dot{E}_{\mathrm{S_dc}}=\frac{CK_{\mathrm{C}}A_{\Delta\mathrm{U}}^{2}+LK_{\mathrm{L}}A_{\Delta\mathrm{I}}^{2}}{2}\alpha\mathrm{e}^{2\alpha t} \quad (17)$$

$$\dot{E}_{\mathrm{D_dc}}=-\frac{RK_{\mathrm{L}}}{2}\mathrm{e}^{2\alpha t}A_{\Delta\mathrm{I}}^{2} \quad (18)$$

$$\dot{E}_{\mathrm{T_dc}}=\frac{1}{2}\mathrm{e}^{2\alpha t}(K_{\mathrm{C}}A_{\Delta\mathrm{U}}A_{F_{\mathrm{C}}}\cos(\varphi_{\Delta\mathrm{U}}-\varphi_{\mathrm{F_C}})+K_{\mathrm{L}}A_{\Delta\mathrm{I}}A_{F_{\mathrm{L}}}\cos(\varphi_{\Delta\mathrm{I}}-\varphi_{\mathrm{F_L}})) \quad (19)$$

式中：$\dot{E}_{\mathrm{S_dc}}$、$\dot{E}_{\mathrm{D_dc}}$ 和 $\dot{E}_{\mathrm{T_dc}}$ 分别为存储能量、耗散能量和交互能量的非周期分量。

根据系统储存能量与系统振荡幅值的关系[28]可得稳定判据如下：当 $\dot{E}_{\mathrm{s}}>0$ 时，振荡发散，系统失稳；当 $\dot{E}_{\mathrm{s}}<0$ 时，振荡收敛，系统最终稳定；当 $\dot{E}_{\mathrm{s}}=0$ 时，等幅振荡，系统处于临界状态。

由式(18)可见，$\dot{E}_{\mathrm{D_dc}}$ 始终小于 0，对 $\dot{E}_{\mathrm{s}}$ 的减少提供正贡献，因此有利于系统稳定。由式(19)可见，$\dot{E}_{\mathrm{T_dc}}$ 正负性由 ΔU、ΔI、F_{C} 和 F_{L} 共同决定，当 $\dot{E}_{\mathrm{T_dc}}>0$ 时，$\dot{E}_{\mathrm{T}}$ 对 $\dot{E}_{\mathrm{s}}$ 的减少提供负贡献，因此不利于系统稳定；当 $\dot{E}_{\mathrm{T_dc}}<0$ 时，$\dot{E}_{\mathrm{T}}$ 对 $\dot{E}_{\mathrm{s}}$ 的减少提供正贡献，因此有利于系统稳定；当 $\dot{E}_{\mathrm{T_dc}}=0$ 时，$\dot{E}_{\mathrm{T}}$ 对 $\dot{E}_{\mathrm{s}}$ 的变化无影响。

2　基于动态能量流的交互路径分析

将恢复期间的电压电流代入式(13)，并通过式(19)计算各子系统间交互能量导数的非周期分量，分析其对系统稳定的影响，进一步定位影响系统失稳的关键环节。

风场与整流站 VSC1、VSC2 之间交互能量表达式及其对系统稳定性的影响在文献[29]中已进行详细分析，此处不作赘述。换流站间及换流站 VSC3、VSC4 与交流电网交互能量表达式见附录 A。

2.1　送端换流站交互能量流分析

(1) VSC1 送端站子系统交互能量流分析

VSC1 送端站子系统与 VSC2 送端站子系统、VSC3 换流站间的交互能量导数的非周期分量如附录 A 式(A1)所示。

基于交互能量关于时间的变化率，通过建立状态变量间传递函数，得到幅相特性曲线，进而得到状态变量间的相位关系：$\cos(\varphi_{\mathrm{ir1}d\text{-ref}}-\varphi_{\mathrm{ir1}d})>0$，$\cos(\varphi_{\mathrm{ir1}d\text{-ref}}-\varphi_{\mathrm{ucr1}d})\approx 0$，$\cos(\varphi_{\mathrm{ir1}q\text{-ref}}-\varphi_{\mathrm{ucr1}q})>0$，$\cos(\varphi_{\mathrm{ir1}q\text{-ref}}-\varphi_{\mathrm{ir1}q})<0$。这表明 VSC1 站外环 d 轴子系统与送出线 d 轴子系统间交互能量 $-E_{\mathrm{Trou1}d\mathrm{Lw}d}$ 不利于系统稳定，VSC1 站外环 d 轴子系统与送出线 q 轴子系统间交互能量 $-E_{\mathrm{Trou1}d\mathrm{Cw}q}$ 对系统稳定几乎不产生影响，VSC1 站外环 q 轴子系统与送出线 q 轴子系统间的交互能量 $-E_{\mathrm{Trou1}q\mathrm{Lw}q}$ 有利于系统稳定，交互能量 $-E_{\mathrm{Trou1}q\mathrm{Cw}q}$ 不利于系统稳定。

对于送端 VSC1 换流站直流线路子系统而言，其与送端 VSC2 换流站直流线路子系统、受端 VSC3 换流站直流线路子系统、送端 VSC1 换流站交流子系统间交互能量导数的非周期分量如附录 A 式(A2)所示。

由状态变量相位关系可知：$\cos(\varphi_{\mathrm{i13+i12}}-\varphi_{\mathrm{udc3}})>0$，$\cos(\varphi_{\mathrm{i13+i12}}-\varphi_{\mathrm{udc2}})>0$。这表明 VSC1 送端站直流线路子系统和 VSC3 受端站直流线路子系统发生交互作用产生的能量 $-E_{\mathrm{Trou1dcrou3}}$，以及和 VSC2 送端站直流线路子系统发生交互作用产生的能量 $-E_{\mathrm{Trou1dcrou2}}$，不利于系统的稳定。VSC1 送端站交流子系统和 VSC1 送端站直流线路子系统间的交互能量 $-E_{\mathrm{Trou1dcrou1}}$ 不利于系统的稳定。由上述分析可以得到 VSC1 送端换流站交互能量路径图，如图 2 所示。

(2) VSC2 送端站子系统交互能量流分析

VSC2 送端站子系统与 VSC1 送端站子系统、VSC4 换流站间的交互能量导数的非周期分量如附录 A 式(A3)所示。

基于交互能量关于时间的变化率，通过建立状态变量间传递函数，得到幅相特性曲线，进而得到状态变量间的相位关系：$\cos(\varphi_{\mathrm{ir2}d\text{-ref}}-\varphi_{\mathrm{ir2}d})<0$，

$\cos(\varphi_{\text{ir2}q\text{-ref}}-\varphi_{\text{ir2}q})\approx 0$，$\cos(\varphi_{\text{ir2}d\text{-ref}}-\varphi_{\text{ucr2}d})<0$，$\cos(\varphi_{\text{ir2}q\text{-ref}}-\varphi_{\text{ucr2}q})<0$。这表明 VSC2 站外环 d 轴子系统与送出线 d 轴子系统间通过 $i_{\text{r2}d}$ 和 $u_{\text{cr2}d}$ 产生交互作用，其产生的交互能量有利于系统的稳定，VSC2 站外环 q 轴子系统与送出线 q 轴子系统间通过 $i_{\text{r2}q}$ 产生的交互能量 $-E_{\text{Trou2}q\text{Lw}q}$ 对于系统稳定几乎不产生影响，而通过 $u_{\text{cr2}q}$ 产生的交互能量则有利于系统的稳定。

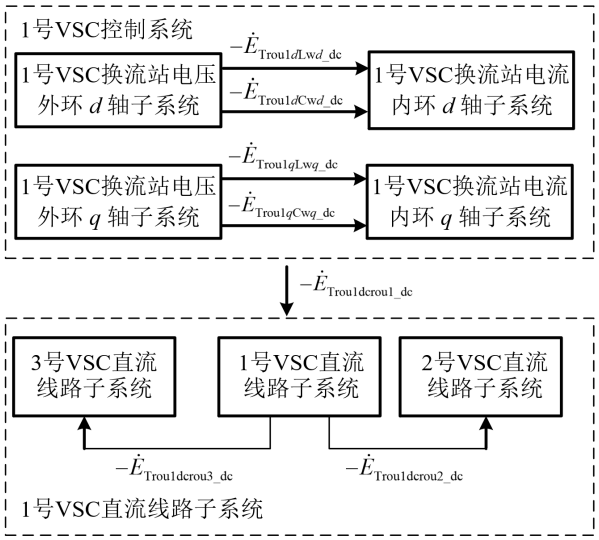


图 2 换流站 VSC1 子系统能量交互路径

Fig.2 Energy interaction path of VSC1 subsystem in converter station

对于送端 VSC2 换流站直流线路子系统而言，其与送端 VSC1 换流站直流线路子系统、受端 VSC4 换流站直流线路子系统、送端 VSC2 换流站交流子系统间交互能量导数的非周期分量如附录 A 式(A4)所示。

由状态变量相位关系可知：$\cos(\varphi_{\text{i24}}-\varphi_{\text{udc4}})<0$，$\cos(\varphi_{\text{i21}}-\varphi_{\text{udc1}})<0$。这表明 VSC2 送端站直流线路子系统和 VSC4 受端站直流线路子系统发生交互作用产生的能量 $-E_{\text{Trou2dcrou4}}$，以及和 VSC1 送端站直流线路子系统发生交互作用产生的能量 $-E_{\text{Trou2dcrou1}}$，有利于系统的稳定。VSC2 送端站交流子系统和 VSC2 送端站直流线路子系统间的交互能量 $-E_{\text{Trou2dcrou2}}$ 有利于系统的稳定。由上述分析可以得到 VSC2 送端换流站交互能量路径图，如图 3 所示。

2.2 受端换流站交互能量流分析

(1) VSC3 换流站子系统交互能量流分析

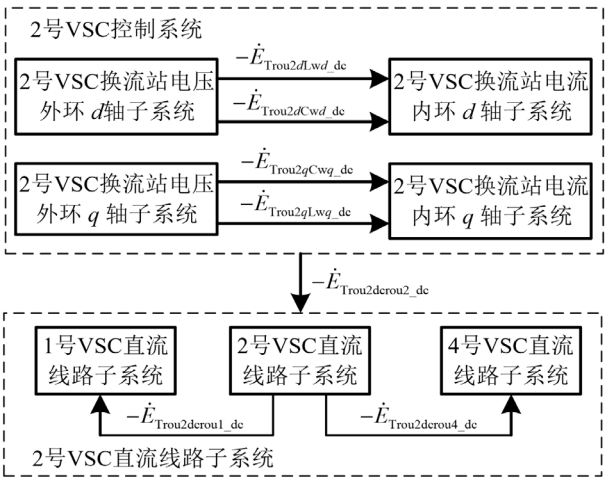


图 3 换流站 VSC2 子系统能量交互路径

Fig.3 Energy interaction path of VSC2 subsystem in converter station

对于受端 VSC3 换流站 d 轴子系统而言，其与锁相环子系统、受端 VSC3 换流站 q 轴子系统、受端 VSC3 换流站外环 d 轴子系统及受端 VSC3 换流站外环 q 轴子系统间交互能量导数的非周期分量如附录 A 式(A5)所示。

基于交互能量关于时间的变化率，通过建立状态变量间传递函数，得到幅相特性曲线，进而得到状态变量间的相位关系为：$\cos(\varphi_{\text{ir3}q}-\varphi_{\text{ir3}d})>0$，$\cos(\varphi_{\text{ir3}q}-\varphi_{\text{ucr3}d})\approx 0$，$\cos(\varphi_{\text{ir3}d\text{-ref}}-\varphi_{\text{ir3}d})>0$，$\cos(\varphi_{\text{ir3}d\text{-ref}}-\varphi_{\text{ucr3}d})<0$，$\cos(\varphi_{\text{ir3}q\text{-ref}}-\varphi_{\text{ir3}d})>0$，$\cos(\varphi_{\text{ir3}q\text{-ref}}-\varphi_{\text{ucr3}d})\approx 0$。

因此，受端 VSC3 换流站 d 轴子系统与受端 VSC3 换流站 q 轴子系统交互产生的能量 $-E_{\text{Trou3L}dq}$、与受端 VSC3 换流站外环 q 轴子系统交互产生的能量 $-E_{\text{Trou3}d\text{Lw}q}$，均不利于系统的稳定；而受端 VSC3 换流站 d 轴子系统与风电场的 d 轴、q 轴外环子系统交互产生的能量 $-E_{\text{Trou3}d\text{Cw}d}$ 和 $-E_{\text{Trou3}d\text{Cw}q}$ 均有利于系统的稳定。

受端 VSC3 换流站 d 轴子系统与锁相环子系统交互产生能量 $-E_{\text{Trou3}d\text{Lpll}}$ 和 $-E_{\text{Trou3}d\text{Cpll}}$，根据状态变量相位关系可知 $\cos(\varphi_{\text{pll}}-\varphi_{\text{ir3}d})>0$，因此 $-\dot{E}_{\text{Trou3}d\text{Lpll}}>0$，表明受端 VSC3 换流站 d 轴子系统与锁相环子系统交互产生的能量 $-E_{\text{Trou3}d\text{Lpll}}$ 不利于系统的稳定；对于交互能量 $-E_{\text{Trou3}d\text{Cpll}}$ 而言，在系统受到扰动之前有 $i_{\text{r3}q\text{-ref0}}-i_{\text{r3}q0}=0$、$i_{\text{r3}d\text{-ref0}}-i_{\text{r3}d0}=0$，因此随着时间的增加，$-\dot{E}_{\text{Trou3}d\text{Cpll}}\approx 0$，$-E_{\text{Trou3}d\text{Cpll}}$ 保持不变，即该交互能量几乎不影响系统的稳定。

对于受端 VSC3 换流站 q 轴子系统而言，其与受端 VSC3 换流站 d 轴子系统、受端 VSC3 换流站外环 d、q 轴子系统间的交互能量导数的非周期分量如附录 A 式(A6)所示。

由状态变量相位关系可知：$\cos(\varphi_{\text{ir3}q}-\varphi_{\text{ir3}d})>0$，$\cos(\varphi_{\text{ir3}d\text{-ref}}-\varphi_{\text{ir3}q})>0$，$\cos(\varphi_{\text{ir3}d\text{-ref}}-\varphi_{\text{ur3}q})\approx 0$，$\cos(\varphi_{\text{r3}d}-\varphi_{\text{ur3}q})\approx 0$，$\cos(\varphi_{\text{ir3}q\text{-ref}}-\varphi_{\text{ir3}q})\approx 0$，$\cos(\varphi_{\text{ir3}q\text{-ref}}-\varphi_{\text{ur3}q})\approx 0$。这表明只有受端 VSC3 换流站 q 轴子系统与受端 VSC3 换流站外环 d 轴子系统交互产生的能量 $-E_{\text{Trou3}q\text{Lw}d}$ 不利于系统的稳定，其余交互能量均有利于系统的稳定。

对于受端 VSC3 换流站直流线路子系统而言，其与送端 VSC1 换流站直流线路子系统、受端 VSC4 换流站直流线路子系统、受端 VSC3 换流站交流子系统间交互能量导数的非周期分量如附录 A 式(A7)所示。

根据幅相分析法可得：$-\dot{E}_{\text{Trou3dcrou1_dc}}<0$，$-\dot{E}_{\text{Trou3dcrou4_dc}}<0$。这表明受端 VSC3 换流站直流线路子系统与送端 VSC1 换流站直流线路子系统、受端 VSC4 换流站直流线路子系统交互产生的能量随着时间的增加而减小，有利于系统的稳定；但与受端 VSC3 换流站交流子系统间交互能量导数的非周期分量 $-\dot{E}_{\text{Trou3dcrou3_dc}}>0$，表明该交互能量会随着时间的增加而增加，不利于系统的稳定。由上述分析可以得到受端 VSC3 换流站交互能量路径图，如图 4 所示。

(2) VSC4 换流站子系统交互能量流分析

对于受端 VSC4 换流站 d 轴子系统而言，其与受端 VSC4 换流站 q 轴子系统、受端 VSC4 换流站外环 d 轴子系统以及受端 VSC4 换流站外环 q 轴子系统间交互能量导数的非周期分量如附录 A 式(A8)所示。

基于交互能量关于时间的变化率，通过建立状态变量间传递函数，得到幅相特性曲线得到状态变量间的相位关系：$\cos(\varphi_{\text{ir4}d}-\varphi_{\text{ir4}q})<0$，$\cos(\varphi_{\text{ir4}q}-\varphi_{\text{ucr4}d})\approx 0$，$\cos(\varphi_{\text{ir4}d\text{-ref}}-\varphi_{\text{ir4}d})>0$，$\cos(\varphi_{\text{ir4}d\text{-ref}}-\varphi_{\text{ucr4}d})\approx 0$，$\cos(\varphi_{\text{ir4}q\text{-ref}}-\varphi_{\text{ucr4}d})\approx 0$，$\cos(\varphi_{\text{ir4}q\text{-ref}}-\varphi_{\text{ucr4}d})\approx 0$。由此表明，受端 VSC4 换流站 d 轴子系统和受端 VSC4 换流站 q 轴子系统交互产生的能量 $-E_{\text{Trou4L}dq}$ 有利于系统的稳定，而和受端 VSC4 换流站外环 d 轴子系统交互产生的能量 $-E_{\text{Trou4}d\text{Lw}d}$ 不利于系统的稳定，其余交互能量对系统稳定性几乎不产生影响。

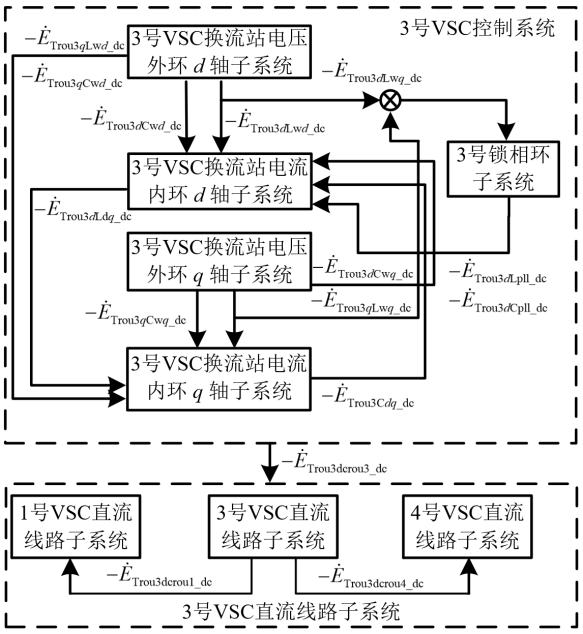


图 4　换流站 VSC3 子系统能量交互路径

Fig.4　Energy interaction path of VSC3 subsystem in inverter station

对于受端 VSC4 换流站 q 轴子系统而言，其与受端 VSC4 换流站 d 轴子系统、受端 VSC4 换流站外环 d、q 轴子系统间交互能量导数的非周期分量如附录 A 式(A9)所示。

由状态变量相位关系可知：$\cos(\varphi_{\text{ir4}d}-\varphi_{\text{ir4}q})\approx 0$，$\cos(\varphi_{\text{ir4}d}-\varphi_{\text{ucr4}q})\approx 0$，$\cos(\varphi_{\text{ir4}d\text{-ref}}-\varphi_{\text{ir4}q})\approx 0$，$\cos(\varphi_{\text{ir4}d\text{-ref}}-\varphi_{\text{ucr4}q})\approx 0$，$\cos(\varphi_{\text{ir4}q\text{-ref}}-\varphi_{\text{ir4}q})\approx 0$，$\cos(\varphi_{\text{ir4}q\text{-ref}}-\varphi_{\text{ucr4}q})\approx 0$。这表明受端 VSC4 换流站 q 轴子系统与受端 VSC4 换流站 d 轴子系统、受端 VSC4 换流站外环 d 轴和 q 轴子系统间交互能量导数的非周期分量均不会随着时间的增加而发生变化，所以该部分的交互能量对系统的稳定性不产生影响。

对于受端 VSC4 换流站直流线路子系统而言，其与送端 VSC1 换流站直流线路子系统、受端 VSC3 换流站直流线路子系统、受端 VSC4 换流站交流子系统间交互能量导数的非周期分量如附录 A 式(A10)所示。

根据幅相分析法可得 $-\dot{E}_{\text{Trou4dcrou2_dc}}<0$、$-\dot{E}_{\text{Trou4dcrou3_dc}}<0$，表明受端 VSC4 换流站直流线路子系统与送端 VSC2 换流站直流线路子系统、受端

VSC3 换流站直流线路子系统交互产生的能量随着时间的增加而减小，有利于系统的稳定；但与受端 VSC4 换流站交流子系统间交互能量导数的非周期分量 $-\dot{E}_{\text{Trou4dcrou4_dc}}>0$，表明该交互能量会随着时间的增加而增加，不利于系统的稳定。由上述分析可以得到受端 VSC4 换流站交互能量路径图，如图 5 所示。

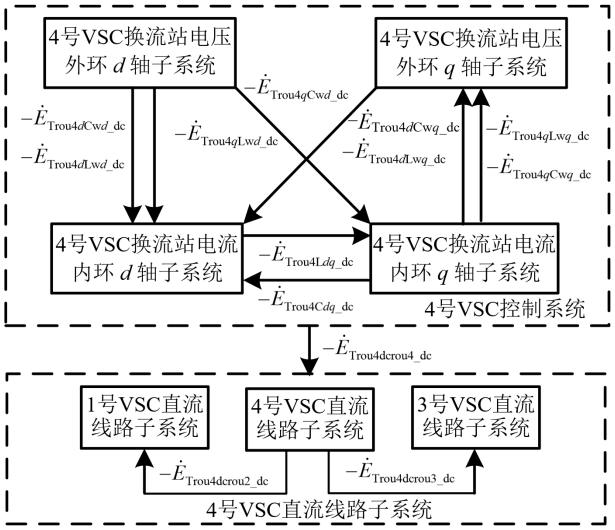


图 5 换流站 VSC4 子系统能量交互路径

Fig.5 Energy interaction path of VSC4 subsystem in inverter station

3 基于交互能量-哈密尔顿路径的振荡源定位方法

第 2 章通过动态能量模型分析子系统间交互能量的非周期分量，量化局部能量交互对稳定性的影响，为辨识关键环节奠定了基础。然而，该方法侧重于子系统间的点对点分析，未能结合全局拓扑刻画振荡能量在复杂多端网络中的连续传递链路。

为解决振荡溯源中的全局路径追踪问题，本章提出了一种基于交互能量-哈密尔顿路径的定位方法。其核心思想在于：哈密尔顿路径旨在复杂网络中寻找一条经过所有节点且不重复的连续回路。该方法的核心优势是能够全局性地完整刻画系统内能量传播路径，通过节点序列映射异常扰动能量传递过程，通过采集瞬时性的各交互路径能量并进行稳定性权重计算，能够实时和动态捕捉振荡能量发展和路径变化。

本章将第 2 章提取的交互能量非周期分量作为量化子系统间连接的“稳定性权重”指标，并将其嵌入描述系统固有物理/控制连接关系的全局拓扑图中。通过求解该加权拓扑图上的哈密尔顿路径，即可揭示振荡能量在系统内传播的完整、连续路径，最终精确定位诱发振荡的源头及其关键传播链路。

根据第 2 章交互能量中状态变量的相位关系分析，进一步对交互能量导数的非周期分量做统一处理，表征交互能量对边稳定性影响程度的交互能量正负因子为：

$$\eta_{\text{T}}=-\frac{\dot{E}_{\text{T_dc}}}{M_{\text{T}}} \tag{20}$$

式中：$-\dot{E}_{\text{T_dc}}$ 为各交互能量变化趋势的非周期分量；M_{T} 为该分量的数值；η_{T} 为该分量的正负因子。

文中选取 VSC3 换流站与交流主网之间的交流输电线路并网点发生经三相接地短路开展研究，所以根据式(20)可得 VSC3 换流站各子系统间交互能量流的正负因子如表 1 所示。

表 1 VSC3 的正负因子

Table 1 Positive and negative factors of VSC3

交互能量	正负因子	数值
$-E_{\text{Trou3}d\text{Lpll}}$	$\eta_{\text{Trou3}d\text{Lpll}}$	1
$-E_{\text{Trou3}d\text{Cpll}}$	$\eta_{\text{Trou3}d\text{Cpll}}$	1
$-E_{\text{Trou3L}dq}$	$\eta_{\text{Trou3L}dq}$	0
$-E_{\text{Trou3C}dq}$	$\eta_{\text{Trou3C}dq}$	0
$-E_{\text{Trou3}d\text{L}wd}$	$\eta_{\text{Trou3}d\text{L}wd}$	1
$-E_{\text{Trou3}d\text{C}wd}$	$\eta_{\text{Trou3}d\text{C}wd}$	−1
$-E_{\text{Trou3}d\text{L}wq}$	$\eta_{\text{Trou3}d\text{L}wq}$	1
$-E_{\text{Trou3}d\text{C}wq}$	$\eta_{\text{Trou3}d\text{C}wq}$	0
$-E_{\text{Trou3}q\text{L}wd}$	$\eta_{\text{Trou3}q\text{L}wd}$	1
$-E_{\text{Trou3}q\text{C}wd}$	$\eta_{\text{Trou3}q\text{C}wd}$	0
$-E_{\text{Trou3}q\text{L}wq}$	$\eta_{\text{Trou3}q\text{L}wq}$	0
$-E_{\text{Trou3}q\text{C}wq}$	$\eta_{\text{Trou3}q\text{C}wq}$	0
$-E_{\text{Trou3dcrou1}}$	$\eta_{\text{Trou3dcrou1}}$	−1
$-E_{\text{Trou3dcrou4}}$	$\eta_{\text{Trou3dcrou4}}$	−1
$-E_{\text{Trou3dcrou3}}$	$\eta_{\text{Trou3dcrou3}}$	1

基于交互能量-哈密尔顿路径的振荡源定位方法的主要步骤为：

1）基于四端环网风电经柔直并网系统动态能量模型的交互能量流分析，计算各子系统间交互能量非周期分量的正负因子。

2）根据原始系统的结构拓扑图和控制方法图提取哈密尔顿图拓扑，并对哈密尔顿图拓扑进行增边处理，构造满足哈密尔顿路径存在性条件的图结构。

3）计算哈密尔顿图拓扑原始边和新增边的权重因子，采用回溯算法求解得到哈密尔顿路径。

4）确定诱发振荡的关键能量因素和振荡作用

的关键能量子系统间的传导路径。

从图 1 中提取各换流站的图拓扑，图拓扑中各顶点对应编号为 Vertice0—Vertice17，如图 6 所示，各编号的含义详见附录 B。

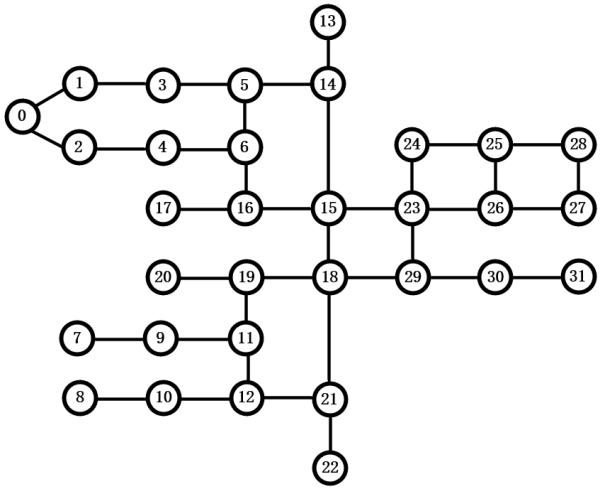


图 6　并网系统的原始图拓扑

Fig.6　Original graph topology of grid-connected system

考虑到并网系统原始图拓扑无法满足全局遍历性，需要对图拓扑进行增边处理，通过最小边集优化打破局部分离性，构造满足哈密尔顿路径存在性条件的图结构，得到哈密尔顿图，如图 7 所示。

新增边为：

$$\begin{Bmatrix} \text{side}(13,20) & \text{side}(13,22) & \text{side}(13,25) & \text{side}(13,27) & \text{side}(13,31) \\ \text{side}(17,20) & \text{side}(17,22) & \text{side}(17,31) & \text{side}(17,27) & \text{side}(17,25) \\ \text{side}(20,31) & \text{side}(20,25) & \text{side}(20,27) & \text{side}(1,3) & \text{side}(1,7) \\ \text{side}(22,31) & \text{side}(22,27) & \text{side}(22,25) & \text{side}(2,13) & \text{side}(2,17) \\ \text{side}(31,27) & \text{side}(31,25) & \text{side}(13,17) & \text{side}(20,7) & \text{side}(20,8) \\ \text{side}(20,22) & \text{side}(7,8) & \text{side}(7,22) & & \end{Bmatrix}$$

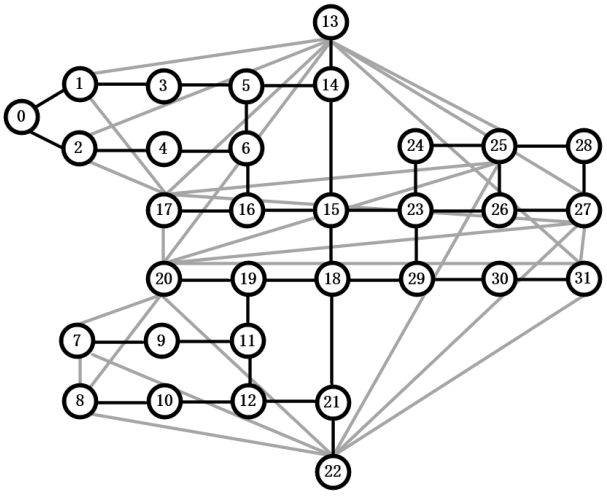


图 7　并网系统的哈密尔顿图拓扑

Fig.7　Hamiltonian topology of grid-connected system

对边所表示的各子系统间的交互能量进行归一化处理，并设权重因子以表征该边在哈密尔顿图中对目标的影响大小。原始边权重因子计算式为：

$$\sigma_{\mathrm{T}} = \eta_{\mathrm{T}} \frac{M_{\mathrm{T}}}{\sum M_{\mathrm{T}}^2} \tag{21}$$

新增边的权重因子计算式为：

$$\sigma_{\mathrm{T.add}} = \eta_1 \eta_2 \tag{22}$$

式中：η_1 表示两点是否为同一换流站，相同取 1，不同取 0.5；η_2 表示两点是否都为整流站或换流站，相同取 1，不同取 0.5。

基于建构的哈密尔顿图拓扑和上述各边的权重因子，采用回溯算法进行求解，可得到四端环网风电经柔直并网系统的哈密尔顿路径如图 8 所示。

输出哈密尔顿路径为：24→23→26→25→28→27→13→14→5→3→1→0→2→4→6→16→15→18→19→11→9→7→20→8→10→12→21→22→17→31→30→29。

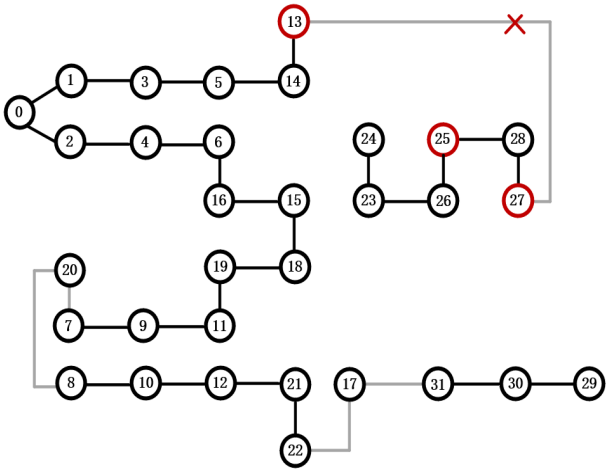


图 8　并网系统的哈密尔顿路径

Fig.8　Hamiltonian path of the grid-connected system

在本文研究场景下，受端 VSC3 锁相环子系统因扰动产生动态失稳，成为系统中持续注入负面交互能量的“起振源”，因此断开节点 27 所连新增边 side(13, 27)，得到该能量经直流网络传递至送端后，于 VSC1 电压外环 *d* 轴子系统形成终端汇聚，成为振荡源终端。研究表明，送端换流站 VSC1 电压外环 *d* 轴子系统与受端换流站 VSC3 锁相环子系统分别作为振荡能量的放大环节和初始扰动环节，共同主导了并网系统的振荡稳定性。

4　仿真分析

根据图 1 所示四端环网风电经柔直并网系统拓

扑结构，本文在 RT-LAB 平台搭建其仿真模型，如附录 D 所示，仿真模型的主要参数如表 2 所示。

表 2　仿真系统主要参数

Table 2　Main parameters of the simulation system

换流站	参数	数值
VSC1	外环比例/积分参数	1.4/75
	内环比例/积分参数	0.5/15
	锁相环比例/积分参数	0.25/45
VSC2	外环比例/积分参数	1.4/75
	内环比例/积分参数	0.5/15
VSC3	外环比例/积分参数	0.1/10
	内环比例/积分参数	0.000 5/0.247 5
	锁相环比例/积分参数	0.25/45
VSC4	外环比例/积分参数	0.1/10
	内环比例/积分参数	0.000 5/0.247 5
滤波线路	滤波电感/mH	0.35
	滤波电容/F	0.000 1

设置并网系统在 0~4 s 内进入稳定运行，在 t=4.5 s 时，调节受端电网短路比至 1.8，同时调节 VSC3 的锁相环控制带宽，引入持续时间 0.05 s 的扰动。仿真结果如图 9 所示，其基准值分别为：换流站 VSC1 直流侧电压稳态值 U_{VSC1_dc0}=1 200 V，换流站 VSC2 并网电压 d 轴分量稳态值 U_{VSC2_d0}=563.1 V，换流站 VSC3 并网电流 d 轴分量稳态值 I_{VSC3_d0}=47 A，换流站 VSC4 直流侧电压稳态值 U_{VSC4_dc0}=1 200 V。

由图 9 可见，t=4.5 s 时，由于扰动的引入，各换流站电气量出现波动；在 t=4.55 s 扰动结束后仍无法稳定，系统内出现振荡发散现象。

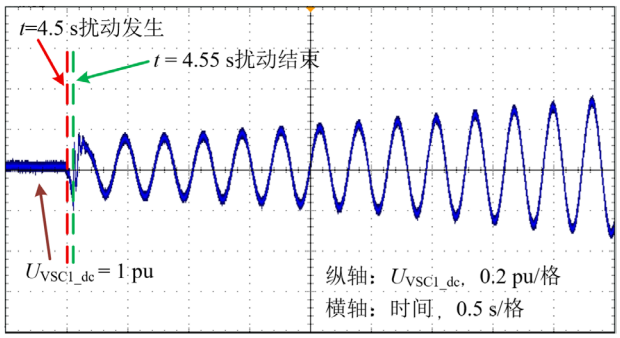
4.1　动态能量模型验证

上述振荡场景中，各换流站及相关控制系统子系统交互能量变化趋势如图 10 所示，柱状图的高度表示交互能量大小，交互项上方的正负号表示正负，正号表明该项大于 0，负号表明该项小于 0，采用对数坐标，为 0 的项不再在图中展示。

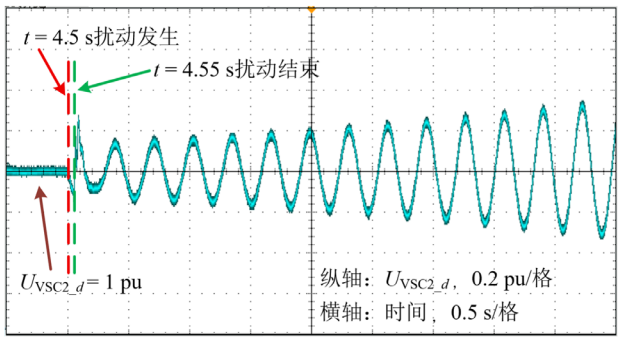
由图 10 可知，送端换流站 VSC1 外环 d 轴对应的交互能量项$-E_{Trou1dLwd}$、$-E_{Trou1dCwd}$ 分别为+1 015 和+23 310；受端换流站 VSC3 锁相环对应的交互能量项$-E_{Trou3Cpll}$、$-E_{Trou3Lpll}$ 分别为+1 885 和+5 636，均为正值，且远高于系统内其他交互能量项，与理论推导一致。

4.2　振荡源定位验证

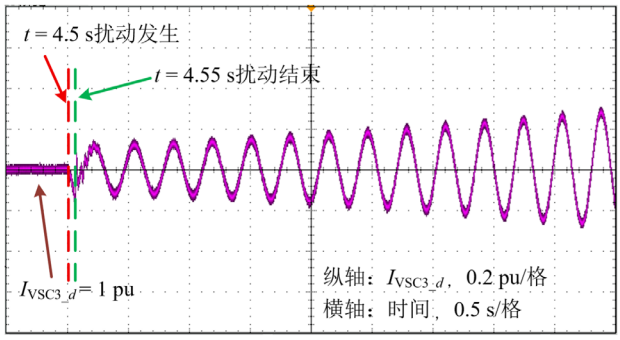
通过调节控制参数，设置如图 11 所示不同程度的系统振荡失稳对照实验，图中 U_d 为换流站 VSC3 并网电压 d 轴分量。对比导致系统振荡稳定性劣化



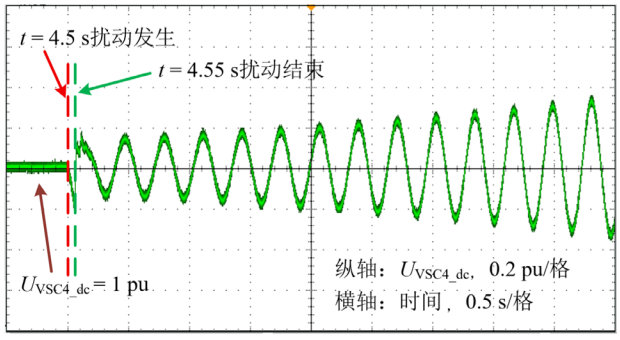
(a) 换流站VSC1直流侧电压



(b) 换流站VSC2并网电压d轴分量



(c) 换流站VSC3并网电流d轴分量



(d) 换流站VSC4直流侧电压

图 9　仿真波形

Fig.9　Simulation waveforms

的关键交互能量(如图 12 所示)，可判断为系统的振荡源。

由图 12 可知，在系统经历从轻度失稳到振荡发散的严重稳定性劣化前后，送端换流站 VSC1 外

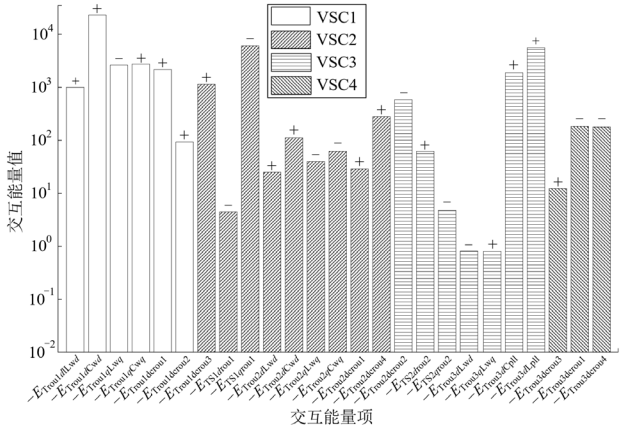


图 10　换流站 VSC1—VSC4 的交互能量曲线

Fig.10　Interaction energy curves of converter stations VSC1—VSC4

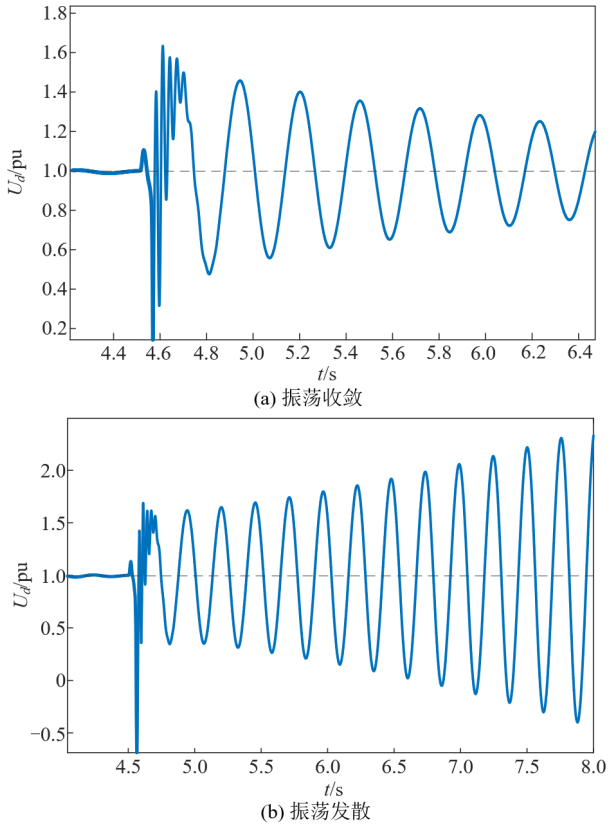


图 11　稳定劣化前后 VSC3 并网电压 d 轴分量

Fig.11　The d-axis components of VSC3 grid-connected voltages before and after stability deterioration

环 d 轴交互能量项$-E_{\mathrm{Trou1}d\mathrm{Lw}d}$从+92 增长为+24 325，较初值增加了 263.402 倍；受端换流站 VSC3 锁相环的交互能量项从+3 684 增长为+7 521，较初值增加了 1.04 倍。这表明送端换流站 VSC1 外环 d 轴和受端换流站 VSC3 锁相环的交互能量不仅在系统中占主导地位，且随着振荡稳定性改变产生显著变化，

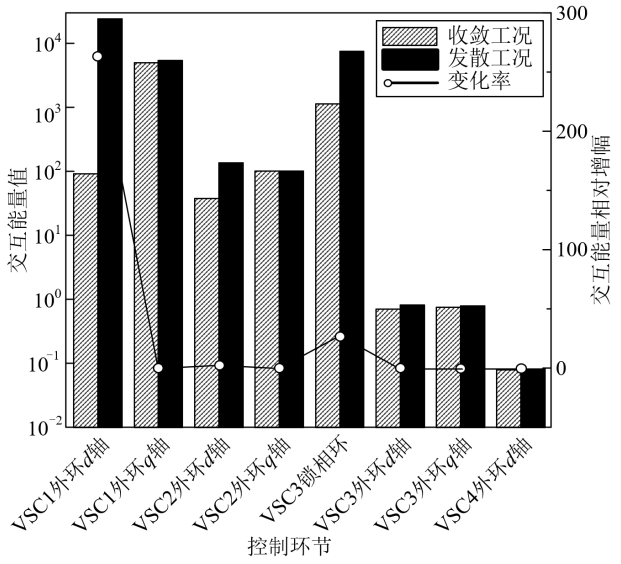


图 12　稳定性劣化前后各环节交互能量对比

Fig.12　Comparative analysis of interactive energy in subsystems before and after stability deterioration

表明该环节是主导系统振荡的关键环节，与理论推导一致。

进一步，通过定量分析不同控制环节控制器参数对系统振荡的灵敏性，从多维度交叉检验基于能量的振荡源定位结果的准确性。

不同组合的控制器参数如表 3 所示，设置比例 k_{p} 和积分 k_{i} 2 个参数的仿真对照实验，并另设作用系数 $\varepsilon_i=(E_i-E_0)/E_0$，以表征不同控制环节参数影响振荡幅值的程度，其中 E_i、E_0 分别表示第 i 组和对照组的电气量。

表 3　比例参数和积分参数的分组设置

Table 3　Grouped setting of proportional parameters and integral parameters

换流站	组合	交互能量	比例参数	积分参数
VSC1	Comb1	$-E_{\mathrm{Trou1}d\mathrm{Lw}d}$	0.1	10
	Comb2	$-E_{\mathrm{Trou1}q\mathrm{Lw}q}$	0.001	0.01
VSC2	Comb3	$-E_{\mathrm{Trou2}d\mathrm{Lw}d}$	0.02	0.1
	Comb4	$-E_{\mathrm{Trou2}q\mathrm{Lw}q}$	0.001	0.01
VSC3	Comb5	$-E_{\mathrm{Trou3}d\mathrm{Cpll}}$ $-E_{\mathrm{Trou3}d\mathrm{Lpll}}$	0.25	45
VSC4	Comb6	$-E_{\mathrm{Trou4}d\mathrm{Lw}d}$	15	75

取 t 在 4.25~4.5 s 间各曲线峰值计算作用系数，无明显峰值则取最大值计算，得到如图 13、14 所示的柱状图。

由图 13 和图 14 可知，Comb1 和 Comb5 的作用系数数值较大，在+5%比例参数调节下分别为 0.071 与 0.048，在+5%积分参数调节下分别为 0.061

和 0.043，表明对应送端换流站 VSC1 外环 d 轴与受端换流站 VSC3 锁相环子系统的控制环节对于系统振荡具有高灵敏性，进一步证明该环节对于系统振荡稳定性具有的关键作用。

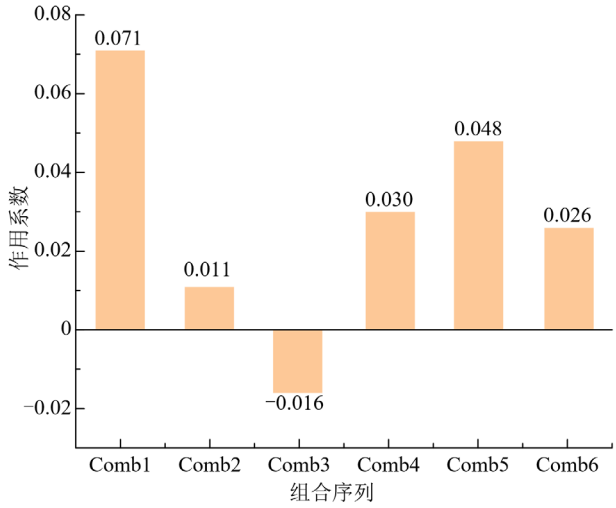


图 13 +5%比例参数调整下的作用系数

Fig.13 Effect coefficient under +5% proportional parameter adjustment

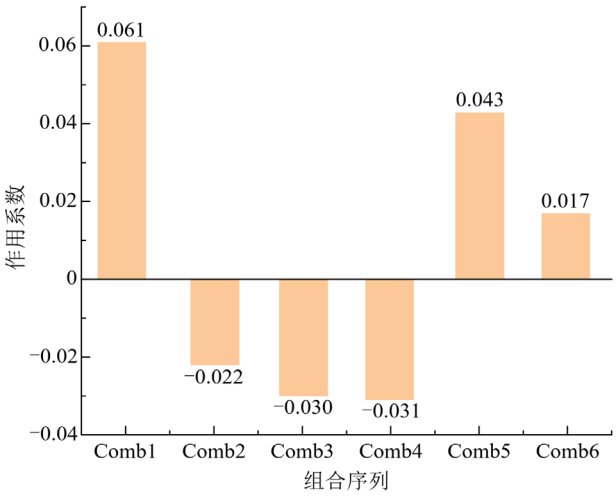


图 14 +5%积分参数调整下的作用系数

Fig.14 Effect coefficient under +5% integral parameter adjustment

5 结论

本文提出了一种基于交互能量-哈密尔顿路径的振荡源定位方法。通过在四端环网风电经柔直并网系统受端主站引入扰动后激发振荡，证明该方法可表征不同子系统间能量的空间传递与发展路径，准确辩识定位诱发系统振荡失稳的关键环节。主要结论如下：

1）得到振荡产生-发展路径为：受端换流站 VSC3(锁相环 d 轴子系统→外环 d、q 轴子系统→电流内环 d、q 轴子系统)→(VSC3，VSC4)直流子系统→换流站 VSC4(内环 d 轴子系统-外环 d 轴子系统)→换流站 VSC2(外环 d 轴子系统→电流内环 d、q 轴子系统→外环 q 轴子系统) →换流站 VSC1(外环 q 轴子系统→电流内环 d、q 轴子系统→外环 d 轴子系统)。

2）通过交互能量-哈密尔顿路径方法定位诱发振荡关键环节：送端换流站 VSC1 电压外环 d 轴子系统和受端主换流站 VSC3 锁相环子系统。

3）通过量化子系统间交互能量传递强度，构建定向传播网络，完整刻画导致系统失稳的不利能量从源到关键支路的连续传递链路。其核心在于系统性揭示能量传递路径的拓扑连贯性，为振荡全局的有效阻断提供参考。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 任冲，任景，王智伟，等. 高比例新能源电网宽频振荡云边端协同防控系统构建[J]. 新型电力系统，2025，3(4)：466-473.
REN Chong, REN Jing, WANG Zhiwei, et al. Construction of cloud-edge-end collaborative prevention and control system for wide-band oscillations in high proportion renewable energy power grid[J]. New Type Power Systems, 2025, 3(4): 466-473.

[2] 马士聪，郭剑波，汪梦军，等. 能量视角下电力系统暂态频率问题初探[J]. 电网技术，2024，48(4)：1373-1382.
MA Shicong, GUO Jianbo, WANG Mengjun, et al. A preliminary exploration of transient frequency issues in the power system from an energy perspective[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1373-1382.

[3] 郑超，孙华东，吕思卓. 并网光伏低电压穿越对低频振荡阻尼影响及抑制[J]. 电网技术，2024，48(11)：4464-4472.
ZHENG Chao, SUN Huadong, LÜ Sizhuo. Influence of PV grid connected LVRT control on low-frequency oscillation damping and suppression strategy[J]. Power System Technology, 2024, 48(11): 4464-4472.

[4] 聂永辉，曲铭锐，周恒宇，等. 基于小脑模型-模糊滑模控制的电力系统低频振荡控制策略研究[J]. 电网技术，2024，48(2)：789-798.
NIE Yonghui, QU Mingrui, ZHOU Hengyu, et al. Control strategy of low-frequency oscillation suppression in power system based on CMAC-FSMC[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 789-798.

[5] 汪云涛，张哲，汤皓环，等. 海上直驱风电场弱连接时 LVRT 引发的次同步振荡机理与特性分析[J]. 电网技术，2024，48(7)：2902-2909.
WANG Yuntao, ZHANG Zhe, TANG Haohuan, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by LVRT in offshore direct drive wind farm with weak connection[J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 2902-2909.

[6] 刘芳，刘威，汪浩东，等. 高比例新能源电力系统振荡机理及其分析方法研究综述[J]. 高电压技术，2022，48(1)：95-113.
LIU Fang, LIU Wei, WANG Haodong, et al. Review on oscillation mechanism and analysis methods of high proportion renewable energy power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 95-113.

[7] 熊馨瑶，付红军，熊浩清，等. 基于频域阻抗的新能源并网振荡风险评估方法[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3745-3756.

XIONG Xinyao, FU Hongjun, XIONG Haoqing, et al. Risk assessment method for the oscillation of renewable energy grid-connected system based on frequency domain impedance[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3745-3756.

[8] 魏麒璇，陈家帆，陈新，等. 风场柔直互联系统次/超同步交互失稳机理分析及其阻抗优化控制方法[J]. 中国电机工程学报，2026，46(3)：887-900.
WEI Qixuan, CHEN Jiafan, CHEN Xin, et al. Sub/super-synchronous stability analysis and impedance optimization method of wind farms with MMC-HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(3): 887-900.

[9] 薛峰，吴家龙，崔晓丹，等. 基于阻抗辨识的沽源地区风电并网系统次同步振荡控制策略[J]. 电力系统自动化，2023，47(5)：200-207.
XUE Feng, WU Jialong, CUI Xiaodan, et al. Sub-synchronous oscillation control strategy based on impedance identification for wind power grid-connected system in Guyuan area of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 200-207.

[10] LI G X, CHEN Y D, LUO A, et al. Analysis and mitigation of subsynchronous resonance in series-compensated grid-connected system controlled by a virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(10): 11096-11107.

[11] 宗皓翔，张琛，蔡旭. 电力电子主导的交直流混联电网振荡分析与评估[J]. 中国电机工程学报，2023，43(10)：3844-3855.
ZONG Haoxiang, ZHANG Chen, CAI Xu. Oscillation analysis and evaluation of the power electronics-dominated hybrid AC/DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3844-3855.

[12] ALI M T, ZHOU D, SONG Y P, et al. Analysis and mitigation of SSCI in DFIG systems with experimental validation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(2): 714-723.

[13] 李莹，富亚洲，王官宏，等. 电力系统超低频频率振荡分析及扰动源定位[J]. 电网技术，2023，47(5)：1770-1779.
LI Ying, FU Yazhou, WANG Guanhong, et al. Ultra-low frequency oscillation analysis and location in power system[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1770-1779.

[14] 王兴国，程琪，于溯. 利用电压变化特征的识别电力系统振荡的方法[J]. 高电压技术，2024，50(10)：4655-4661.
WANG Xingguo, CHENG Qi, YU Su. Method for identifying power system swing by using voltage variation characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4655-4661.

[15] 戴珍，曹尚，黄文琦，等. 基于广域测量数据驱动的电力系统强迫振荡源定位[J]. 电力信息与通信技术，2023，21(6)：24-30.
DAI Zhen, CAO Shang, HUANG Wenqi, et al. Forced oscillation location in power systems using wide area measurement data-driven method[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(6): 24-30.

[16] CHEVALIER S, VOROBEV P, TURITSYN K. A passivity interpretation of energy-based forced oscillation source location methods[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 3588-3602.

[17] ESTEVEZ P G, MARCHI P, GALARZA C, et al. Complex dissipating energy flow method for forced oscillation source location[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 4141-4144.

[18] 刘志坚，黄建，骆军. 基于 STFT 图像和迁移学习的次同步振荡源定位方法[J]. 电机与控制应用，2024，51(7)：119-130.
LIU Zhijian, HUANG Jian, LUO Jun. Localization method for sub-synchronous oscillation sources based on STFT images and transfer learning[J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(7): 119-130.

[19] 陈剑，杜文娟，王海风. 采用深度迁移学习定位含直驱风机次同步振荡源机组的方法[J]. 电工技术学报，2021，36(1)：179-190.
CHEN Jian, DU Wenjuan, WANG Haifeng. A method of locating the power system subsynchronous oscillation source unit with grid-connected PMSG using deep transfer learning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(1): 179-190.

[20] 黄睿. 含风机并网的电力系统低频振荡源定位方法研究[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2020.
HUANG Rui. Research on location method of low frequency oscillation source in power systems with wind power integration[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2020.

[21] 王渝红，李晨鑫，周旭，等. 压缩感知和图卷积神经网络相结合的宽频振荡扰动源定位方法[J]. 高电压技术，2024，50(3)：1080-1089.
WANG Yuhong, LI Chenxin, ZHOU Xu, et al. Localization method of wide-band oscillation disturbance sources based on compressed sensing and graph convolutional neural networks[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1080-1089.

[22] 蒋奇良，郑宗生，史云翔，等. 基于压缩感知与 ISTA 的宽频振荡扰动源分级定位方法[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3725-3735.
JIANG Qiliang, ZHENG Zongsheng, SHI Yunxiang, et al. Hierarchical localization method of broadband oscillation disturbance source based on compressive sensing and ISTA[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3725-3735.

[23] 张程，刘佳静，匡宇，等. 基于 FastICA 技术与 TLS-ESPRIT 方法的电力系统低频振荡模态辨识[J]. 高电压技术，2021，47(6)：2214-2222.
ZHANG Cheng, LIU Jiajing, KUANG Yu, et al. Power system low frequency oscillation modal identification based on the FastICA technique and TLS-ESPRIT algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2214-2222.

[24] LIU C X, HAN J B. Evaluation of the sub-synchronous control interaction based on the elastic energy equivalent system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(4): 3897-3910.

[25] 陈曦，吴熙，顾文，等. 基于次同步模态能量的双馈风机并网系统次同步振荡能量分析与溯源方法研究[J]. 中国电机工程学报，2023，43(15)：5863-5876.
CHEN Xi, WU Xi, GU Wen, et al. Research on energy analysis and SSO source location method for power grids with DFIGs based on the sub-synchronous modal energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 5863-5876.

[26] 张芳，梁修功，黄河. 基于 Hamilton 能量函数的直驱风电场经 MMC-HVDC 并网系统次同步稳定性分析[J]. 电力自动化设备，2025，45(7)：43-53.
ZHANG Fang, LIANG Xiugong, HUANG He. Sub-synchronous stability analysis of direct-drive wind farm via MMC-HVDC grid-connected system based on Hamilton energy function[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(7): 43-53.

[27] MA J, XU H L. Study on dynamic energy model and subsynchronous oscillation mechanism for direct-drive wind farm considering the interaction between generators[J/OL]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022: 1-13[2025-07-20]. https: //doi.org/10.17775/CSEEJPES. 2022.06750.

[28] MA J, WANG L T, SHEN Y Q. Interaction energy-based stability analysis method and application in grid-tied type-4 wind turbine generator[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(5): 5542-5557.

[29] MA J, YANG Z M, ZHOU Y Q, et al. Study on the oscillation transmission paths in direct-drive wind farm transmitted via flexible dc system based on dynamic energy flow[J]. IET Renewable Power Generation, 2022, 16(5): 966-987.



马　静(通信作者)
1981—，男，博士，教授，博导
主要从事电力系统分析、稳定与控制等方面研究
E-mail: hdmajing@163.com

MA Jing
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2025-08-28　修回日期　2025-12-04　　编辑　程子丰

附录 A

换流站 VSC1 其他换流站的交互能量非周期分量：

$$\begin{cases} -\dot{E}_{\text{Trou1}d\text{Lw}d_\text{dc}} = \dfrac{k_{\text{pr1}} A_{\text{ir1}d\text{-ref}} A_{\text{ir1}d}}{2} \text{e}^{2\alpha t} \cos(\varphi_{\text{ir1}d\text{-ref}} - \varphi_{\text{ir1}d}) > 0 \\ -\dot{E}_{\text{Trou1}d\text{Cw}d_\text{dc}} = \dfrac{A_{\text{ir1}d\text{-ref}} A_{\text{ucr1}d}}{2} \text{e}^{2\alpha t} \cos(\varphi_{\text{ir1}d\text{-ref}} - \varphi_{\text{ucr1}d}) \approx 0 \\ -\dot{E}_{\text{Trou1}q\text{Lw}q_\text{dc}} = \dfrac{k_{\text{pr1}} A_{\text{ir1}q\text{-ref}} A_{\text{ir1}q}}{2} \text{e}^{2\alpha t} \cos(\varphi_{\text{ir1}q\text{-ref}} - \varphi_{\text{ir1}q}) < 0 \\ -\dot{E}_{\text{Trou1}q\text{Cw}q_\text{dc}} = \dfrac{A_{\text{ir1}q\text{-ref}} A_{\text{ucr1}q}}{2} \text{e}^{2\alpha t} \cos(\varphi_{\text{ir1}q\text{-ref}} - \varphi_{\text{ucr1}q}) > 0 \end{cases} \tag{A1}$$

换流站 VSC1 直流子系统与其余直流子系统的交互能量非周期分量：

$$\begin{cases} -\dot{E}_{\text{Trou1dcrou3_dc}} = -\dfrac{A_{\text{i13}} A_{\text{udc3}}}{4} \text{e}^{2\alpha t} \cos(\varphi_{\text{i13+i12}} - \varphi_{\text{udc3}}) > 0 \\ -\dot{E}_{\text{Trou1dcrou2_dc}} = -\dfrac{A_{\text{i12}} A_{\text{udc2}}}{4} \text{e}^{2\alpha t} \cos(\varphi_{\text{i13+i12}} - \varphi_{\text{udc2}}) > 0 \\ -\dot{E}_{\text{Trou1dcrou1_dc}} = \dfrac{1}{2} \left(\begin{array}{l} A_{\text{ir1}d} A_{\text{ur1}d} \cos(\varphi_{\text{ir1}d} - \varphi_{\text{ur1}d}) + \\ \dfrac{1}{2} A_{\text{ir1}q} A_{\text{ur1}q} \cos(\varphi_{\text{ir1}q} - \varphi_{\text{ur1}q}) \end{array} \right) \text{e}^{2\alpha t} > 0 \end{cases} \tag{A2}$$

换流站 VSC2 与其他换流站的交互能量非周期分量：

$$\begin{cases} -\dot{E}_{\text{Trou2}d\text{Lw}d_\text{dc}} = \dfrac{k_{\text{pr1}} A_{\text{ir2}d\text{-ref}} A_{\text{ir2}d}}{2} \text{e}^{2\alpha t} \cos(\varphi_{\text{ir2}d\text{-ref}} - \varphi_{\text{ir2}d}) < 0 \\ -\dot{E}_{\text{Trou2}d\text{Cw}d_\text{dc}} = \dfrac{A_{\text{ir2}d\text{-ref}} A_{\text{ucr2}d}}{2} \text{e}^{2\alpha t} \cos(\varphi_{\text{ir2}d\text{-ref}} - \varphi_{\text{ucr2}d}) < 0 \\ -\dot{E}_{\text{Trou2}q\text{Lw}q_\text{dc}} = \dfrac{k_{\text{pr2}} A_{\text{ir2}q\text{-ref}} A_{\text{ir2}q}}{2} \text{e}^{2\alpha t} \cos(\varphi_{\text{ir2}q\text{-ref}} - \varphi_{\text{ir2}q}) \approx 0 \\ -\dot{E}_{\text{Trou2}q\text{Cw}q_\text{dc}} = \dfrac{A_{\text{ir2}q\text{-ref}} A_{\text{ucr2}q}}{2} \text{e}^{2\alpha t} \cos(\varphi_{\text{ir2}q\text{-ref}} - \varphi_{\text{ucr2}q}) < 0 \end{cases} \tag{A3}$$

换流站 VSC2 直流子系统与其他直流子系统的交互能量非周期分量：

$$\begin{cases} -\dot{E}_{\text{Trou2dcrou4_dc}} = -\dfrac{A_{\text{i24}} A_{\text{udc4}}}{4} \text{e}^{2\alpha t} \cos(\varphi_{\text{i24}} - \varphi_{\text{udc4}}) < 0 \\ -\dot{E}_{\text{Trou2dcrou1_dc}} = \dfrac{A_{\text{i21}} A_{\text{udc1}}}{4} \text{e}^{2\alpha t} \cos(\varphi_{\text{i21}} - \varphi_{\text{udc1}}) < 0 \\ -\dot{E}_{\text{Trou2dcrou2_dc}} = \dfrac{1}{2} \left(\begin{array}{l} A_{\text{ir2}d} A_{\text{ur2}d} \cos(\varphi_{\text{ir2}d} - \varphi_{\text{ur2}d}) + \\ \dfrac{1}{2} A_{\text{ir2}q} A_{\text{ur2}q} \cos(\varphi_{\text{ir2}q} - \varphi_{\text{ur2}q}) \end{array} \right) \text{e}^{2\alpha t} < 0 \end{cases} \tag{A4}$$

换流站 VSC3 的 d 轴子系统与其他换流站的交互能量非周期分量：

$$\begin{cases} -\dot{E}_{\text{Trou3}d\text{Lpll_dc}} = \dfrac{1}{4} k_1 A_{\text{pll}} A_{\text{ir3}d} \text{e}^{2\alpha t} \sin 2\theta \cos(\varphi_{\text{pll}} - \varphi_{\text{ir3}d}) > 0 \\ -\dot{E}_{\text{Trou3}d\text{Cpll_dc}} = \dfrac{1}{2} k_2 A_{\text{pll}} A_{\text{ncr3}d} \text{e}^{2\alpha t} \cos(\varphi_{\text{pll}} - \varphi_{\text{ucr3}d}) \approx 0 \\ -\dot{E}_{\text{Trou3}d\text{C}w q_\text{dc}} = \dfrac{1}{2} \sin\theta A_{\text{ir3}q\text{-ref}} A_{\text{ucr3}d} \text{e}^{2\alpha t} \cos(\varphi_{\text{ir3}q\text{-ref}} - \varphi_{\text{ucr3}d}) \approx 0 \\ -\dot{E}_{\text{Trou3}d\text{C}q_\text{dc}} = \dfrac{1}{2} \cos\theta A_{\text{ir3}q\text{-ref}} A_{\text{ucr3}q} \text{e}^{2\alpha t} \cos(\varphi_{\text{ir3}q} - \varphi_{\text{ucr3}d}) \approx 0 \\ -\dot{E}_{\text{Trou3}d\text{Lw}d_\text{dc}} = \dfrac{1}{2} k_{\text{pr3}} \text{e}^{2\alpha t} A_{\text{ir3}d} A_{\text{ir3}d\text{-ref}} \cos^2\theta \cos(\varphi_{\text{ir3}d\text{-ref}} - \varphi_{\text{ir3}d}) > 0 \\ -\dot{E}_{\text{Trou3}d\text{Cw}d_\text{dc}} = \dfrac{1}{2} \text{e}^{2\alpha t} A_{\text{ir3}d\text{-ref}} A_{\text{ucr3}d} \cos\theta \cos(\varphi_{\text{ir3}d\text{-ref}} - \varphi_{\text{ucr3}d}) < 0 \\ -\dot{E}_{\text{Trou3L}dq_\text{dc}} = -\dfrac{1}{2} k_{\text{pr3}} A_{\text{ir3}q} A_{\text{ir3}d} \text{e}^{2\alpha t} \sin 2\theta \cos(\varphi_{\text{ir3}q} - \varphi_{\text{ir3}d}) > 0 \\ -\dot{E}_{\text{Trou3}d\text{Lw}q_\text{dc}} = \dfrac{1}{2} k_{\text{pr3}} A_{\text{ir3}q\text{-ref}} A_{\text{ir3}d} \text{e}^{2\alpha t} \sin\theta \cos(\varphi_{\text{ir3}q\text{-ref}} - \varphi_{\text{ir3}d}) > 0 \\ -\dot{E}_{\text{Trou3C}dq_\text{dc}} = -\dfrac{1}{2} A_{\text{ir3}q} A_{\text{ucr3}d} \text{e}^{2\alpha t} \sin\theta \cos(\varphi_{\text{ir3}q} - \varphi_{\text{ucr3}d}) \approx 0 \end{cases} \tag{A5}$$

式中：$\begin{cases} k_1 = u_{\text{r3}d} - \omega L_{\text{g1}} i_{\text{r3}q} - k_{\text{pr3}} i_{\text{r3}d0} + k_{\text{pr3}} i_{\text{r1}d\text{-ref}} \\ k_2 = (i_{\text{r3}q\text{-ref}} - i_{\text{r3}q}) \cos\theta - (i_{\text{r3}d\text{-ref}} - i_{\text{r3}d}) \sin\theta \end{cases}$。

换流站 VSC3 的 q 轴子系统与其他换流站的交互能量非周期分量：

$$\begin{cases} -\dot{E}_{\text{Tron3L}qd_\text{dc}} = -\dfrac{1}{2} k_{\text{pr4}} A_{\text{ir3}q} A_{\text{ir3}d} e^{2\alpha t} \sin 2\theta \cos(\varphi_{\text{ir3}q} - \varphi_{\text{ir3}d}) > 0 \\ -\dot{E}_{\text{Tron3}q\text{C3}d_\text{dc}} = \dfrac{1}{2} \text{e}^{2\alpha t} A_{\text{ir3}d} A_{\text{ur3}q} \sin\theta \cos(\varphi_{\text{r3}d} - \varphi_{\text{ur3}q}) \approx 0 \\ -\dot{E}_{\text{Tron3}q\text{Lw}d_\text{dc}} = -\dfrac{1}{2} k_{\text{pr3}} A_{\text{ir3}q} A_{\text{ir3}d\text{-ref}} \text{e}^{2\alpha t} \sin 2\theta \cos(\varphi_{\text{ir3}d\text{-ref}} - \varphi_{\text{ir3}q}) > 0 \\ -\dot{E}_{\text{Tron3}q\text{Cw}d_\text{dc}} = -\dfrac{1}{2} A_{\text{ir3}d\text{-ref}} A_{\text{ur3}q} \text{e}^{2\alpha t} \sin\theta \cos(\varphi_{\text{ir3}d\text{-ref}} - \varphi_{\text{ur3}q}) \approx 0 \\ -\dot{E}_{\text{Tron3}q\text{Lw}d_\text{dc}} = \dfrac{1}{2} k_{\text{pr3}} A_{\text{ir3}d\text{-ref}} A_{\text{ur3}q} \text{e}^{2\alpha t} \cos^2\theta \cos(\varphi_{\text{ir3}q\text{-ref}} - \varphi_{\text{ir3}q}) \approx 0 \\ -\dot{E}_{\text{Tron3}q\text{Cw}q_\text{dc}} = \dfrac{1}{2} A_{\text{ir3}q\text{-ref}} A_{\text{ur3}q} \text{e}^{2\alpha t} \cos\theta \cos(\varphi_{\text{ir3}q\text{-ref}} - \varphi_{\text{ur3}q}) \approx 0 \end{cases} \tag{A6}$$

换流站 VSC3 直流子系统与其他直流子系统的交互能量非周期分量：

$$\begin{cases} -\dot{E}_{\text{Trou3dcrou1_dc}} = -\dfrac{1}{4} A_{\text{i13}} A_{\text{uck1}} \text{e}^{2\alpha t} \cos(\varphi_{\text{i13}} - \varphi_{\text{udc3}}) < 0 \\ -\dot{E}_{\text{Trou3dcrou4_dc}} = -\dfrac{1}{4} A_{\text{i34}} A_{\text{uck4}} \text{e}^{2\alpha t} \cos(\varphi_{\text{i34}} - \varphi_{\text{udc4}}) < 0 \\ -\dot{E}_{\text{Trou3dcrou3_dc}} = \dfrac{1}{2} \left(\begin{array}{l} A_{\text{ir3}d} A_{\text{ir3}d} \cos(\varphi_{\text{ir3}d} - \varphi_{\text{ur3}d}) + \\ A_{\text{ir3}q} A_{\text{ir3}q} \cos(\varphi_{\text{ir3}q} - \varphi_{\text{ur3}q}) \end{array} \right) \text{e}^{2\alpha t} > 0 \end{cases} \tag{A7}$$

换流站 VSC4 的 d 轴子系统与其他换流站的交互能量非周期分量：

$$\begin{cases}-\dot{E}_{\text{Trou4L}dq_\text{dc}}=-\dfrac{1}{2}k_{\text{pr4}}A_{\text{ir4}d}A_{\text{ir4}q}\text{e}^{2\alpha t}\cos(\varphi_{\text{ir4}d}-\varphi_{\text{ir4}q})<0\\ -\dot{E}_{\text{Trou4C}dq_\text{dc}}=-\dfrac{1}{2}A_{\text{ir4}q}A_{\text{ucr4}d}\text{e}^{2\alpha t}\cos(\varphi_{\text{ir4}q}-\varphi_{\text{ucr4}d})\approx 0\\ -\dot{E}_{\text{Trou4}d\text{Lw}d_\text{dc}}=\dfrac{1}{2}k_{\text{pr4}}A_{\text{ir4}d}A_{\text{ir4}d\text{-ref}}\text{e}^{2\alpha t}\cos(\varphi_{\text{ir4}d\text{-ref}}-\varphi_{\text{ir4}d})>0\\ -\dot{E}_{\text{Trou4}d\text{C}wd_\text{dc}}=\dfrac{1}{2}A_{\text{ir4}d\text{-ref}}A_{\text{ucr4}d}\text{e}^{2\alpha t}\cos(\varphi_{\text{ir4}d\text{-ref}}-\varphi_{\text{ucr4}d})\approx 0\\ -\dot{E}_{\text{Trou4}d\text{C}wq_\text{dc}}=\dfrac{1}{2}A_{\text{ir4}q\text{-ref}}A_{\text{ucr4}d}\text{e}^{2\alpha t}\cos(\varphi_{\text{ir4}q\text{-ref}}-\varphi_{\text{ucr4}d})\approx 0\\ -\dot{E}_{\text{Trou4}q\text{C}wd_\text{dc}}=-\dfrac{1}{2}A_{\text{ir4}q\text{-ref}}A_{\text{ucr4}d}\text{e}^{2\alpha t}\cos(\varphi_{\text{ir4}q\text{-ref}}-\varphi_{\text{ucr4}d})\approx 0\end{cases}\tag{A8}$$

换流站 VSC4 的 q 轴子系统与其他换流站的交互能量非周期分量：

$$\begin{cases}-\dot{E}_{\text{Trou4L}qd_\text{dc}}=\dfrac{1}{2}k_{\text{pr4}}A_{\text{ir4}d}A_{\text{ir4}q}\text{e}^{2\alpha t}\cos(\varphi_{\text{ir4}d}-\varphi_{\text{ir4}q})\approx 0\\ -\dot{E}_{\text{Trou4C}qd_\text{dc}}=\dfrac{1}{2}A_{\text{ir4}d}A_{\text{ucr4}q}\text{e}^{2\alpha t}\cos(\varphi_{\text{ir4}d}-\varphi_{\text{ucr4}q})\approx 0\\ -\dot{E}_{\text{Trou4}q\text{Lw}d_\text{dc}}=-\dfrac{1}{2}k_{\text{pr4}}A_{\text{ir4}q}A_{\text{ir4}d\text{-ref}}\text{e}^{2\alpha t}\cos(\varphi_{\text{ir4}d\text{-ref}}-\varphi_{\text{ir4}q})\approx 0\\ -\dot{E}_{\text{Trou4}q\text{C}wd_\text{dc}}=-\dfrac{1}{2}A_{\text{ir4}d\text{-ref}}A_{\text{ucr4}q}\text{e}^{2\alpha t}\cos(\varphi_{\text{ir4}d\text{-ref}}-\varphi_{\text{ucr4}q})\approx 0\\ -\dot{E}_{\text{Trou4}q\text{Lw}q_\text{dc}}=\dfrac{1}{2}k_{\text{pr4}}A_{\text{ir4}q\text{-ref}}A_{\text{ir4q}}e^{2\alpha t}\cos(\varphi_{\text{ir4}q\text{-ref}}-\varphi_{\text{ir4}q})\approx 0\\ -\dot{E}_{\text{Trou4}q\text{C}wq_\text{dc}}=\dfrac{1}{2}A_{\text{ir4}q\text{-ref}}A_{\text{ucr4}q}e^{2\alpha t}\cos(\varphi_{\text{ir4}q\text{-ref}}-\varphi_{\text{ucr4}q})\approx 0\end{cases}\tag{A9}$$

换流站 VSC4 直流子系统与其他直流子系统的交互能量非周期分量：

$$\begin{cases}-\dot{E}_{\text{Trou4dcrou2_dc}}=-\dfrac{1}{4}A_{\text{i42}}A_{\text{udc3}}\text{e}^{2\alpha t}\cos(\varphi_{\text{i42}}-\varphi_{\text{udc3}})<0\\ -\dot{E}_{\text{Trou4dcrou3_dc}}=-\dfrac{1}{4}A_{\text{i43}}A_{\text{udc4}}\text{e}^{2\alpha t}\cos(\varphi_{\text{i43}}-\varphi_{\text{udc4}})<0\\ -\dot{E}_{\text{Trou4dcrou4_dc}}=\dfrac{1}{2}\left(\begin{matrix}A_{\text{ir4}d}A_{\text{ir4}d}\cos(\varphi_{\text{ir4}d}-\varphi_{\text{ir4}d})+\\ A_{\text{ir4}q}A_{\text{ir4}q}\cos(\varphi_{\text{ir4}q}-\varphi_{\text{ir4}q})\end{matrix}\right)\text{e}^{2\alpha t}>0\end{cases}\tag{A10}$$

附录 B

表 B1　各换流站图拓扑中各编号的含义

Table B1　Meanings of numbers in topology diagrams of each converter station

编号	对应位置	含义
1	直驱风电场 1 及交流线路 1	锁相环子系统
2		直驱风电场 1 外环 q 轴子系统
3		直驱风电场 1 外环 d 轴子系统
4		直驱风电场 1 内环 q 轴子系统
5		直驱风电场 1 内环 d 轴子系统
6		交流线路 1q 轴子系统
7		交流线路 1d 轴子系统
8	直驱风电场 2 及交流线路 2	直驱风电场 2 外环 d 轴子系统
9		直驱风电场 2 外环 q 轴子系统
10		直驱风电场 2 内环 d 轴子系统
11		直驱风电场 2 内环 q 轴子系统
12		交流线路 2d 轴子系统
13		交流线路 2q 轴子系统
14	送端 VSC1 换流站	VSC1 外环 q 轴子系统
15		VSC1 内环 q 轴子系统
16		VSC1 直流电压控制子系统
17		VSC1 内环 d 轴子系统
18		VSC1 外环 d 轴子系统
19	送端 VSC2 换流站	VSC2 直流电压控制子系统
20		VSC2 内环 d 轴子系统
21		VSC2 外环 d 轴子系统
22		VSC2 内环 q 轴子系统
23		VSC2 外环 q 轴子系统
24	受端 VSC3 换流站	VSC3 直流电压控制子系统
25		VSC3 内环 q 轴子系统
26		VSC3 外环 q 轴子系统
27		VSC3 内环 d 轴子系统
28		VSC3 外环 d 轴子系统
29		锁相环子系统
30	受端 VSC4 换流站	VSC4 直流电压控制子系统
31		VSC4 内环 d 轴子系统
32		VSC4 外环 d 轴子系统

附录 C

由如下控制方程(C1)—(C2)所示：

$$\begin{aligned}&(I_{\text{r1}d\text{-ref}}-I_{\text{r1}d})k_{\text{pr1}}+k_{\text{ir1}}\int(I_{\text{r1}d\text{-ref}}-I_{\text{r1}d})\text{d}t-\\&\qquad\omega_0L_1I_{\text{r1}q}+U_{\text{pccd}}=U_{1d}\end{aligned}\tag{C1}$$

$$U_{1d}=U_{\text{pccd}}+L_1\frac{\text{d}I_{\text{r1}d}}{\text{d}t}-\omega_0L_1I_{\text{r1}q}+R_1I_{\text{r1}d}\tag{C2}$$

联立后消去中间变量得到：

$$\begin{aligned}&(I_{\text{r1}d\text{-ref}}-I_{\text{r1}d})k_{\text{pr1}}+k_{\text{ir1}}\int(I_{\text{r1}d\text{-ref}}-I_{\text{r1}d})\text{d}t-\\&\qquad L_1\frac{\text{d}I_{\text{r1}d}}{\text{d}t}-R_1I_{\text{r1}d}=0\end{aligned}\tag{C3}$$

由时域转换为频域并移项得到传递函数为：

$$(I_{\text{r1}d\text{-ref}}-I_{\text{r1}d})\left(k_{\text{pr1}}+\frac{k_{\text{ir1}}}{s}\right)-sL_1I_{\text{r1}d}-R_1I_{\text{r1}d}=0\tag{C4}$$

$$G_{I_{\text{r1}d\text{-ref}}-I_{\text{r1}d}}(s)=\frac{I_{\text{r1}d\text{-ref}}}{I_{\text{r1d}}}=\frac{s^2L_1+\left(R_1+k_{\text{pr1}}\right)s+k_{\text{ir1}}}{sk_{\text{pr1}}+k_{\text{ir1}}}\tag{C5}$$

同理，在求解 $\varphi_{\text{ir1}q\text{-ref}}$ 与 $\varphi_{\text{ucr1}q}$ 相位关系时，亦可先由时域的子系统数学模型变换到频域如式(C6)：

$$\begin{cases}\dfrac{\text{d}u_{\text{cr1}q}}{\text{d}t}=-k_{\text{ir1}}i_{\text{r1}q}+k_{\text{ir1}}i_{\text{r1}q\text{-ref}}\\ L_{\text{r1}}\dfrac{\text{d}i_{\text{r1}q}}{\text{d}t}=-(R_{\text{r1}}+k_{\text{pr1}})i_{\text{r1}q}+u_{\text{cr1}q}+k_{\text{pr1}}i_{\text{r1}q\text{-ref}}\end{cases}\Rightarrow\tag{C6}$$

$$\begin{cases}sU_{\text{cr1}q}=-k_{\text{ir1}}I_{\text{r1}q}+k_{\text{ir1}}I_{\text{r1}q\text{-ref}}\quad①\\ U_{\text{cr1}q}=\left(sL_{\text{r1}}+R_{\text{r1}}+k_{\text{pr1}}\right)I_{\text{r1}q}-k_{\text{pr1}}I_{\text{r1}q\text{-ref}}\quad②\end{cases}$$

转换到频域并联立得到：

$$\left(s^2L_{\mathrm{r1}}+\left(R_{\mathrm{r1}}+k_{\mathrm{pr1}}\right)s+k_{\mathrm{ir1}}\right)U_{\mathrm{cr1}q}=\left(sk_{\mathrm{ir1}}L_{\mathrm{r1}}+R_{\mathrm{r1}}k_{\mathrm{ir1}}\right)I_{\mathrm{r1}q\text{-ref}} \tag{C7}$$

移项求解得到传递函数如(C8)所示：

$$G_{i_{\mathrm{r1}q\text{-ref}}-u_{\mathrm{cr1}q}}=\frac{s^2L_{\mathrm{r1}}+\left(R_{\mathrm{r1}}+k_{\mathrm{pr1}}\right)s+k_{\mathrm{ir1}}}{sk_{\mathrm{ir1}}L_{\mathrm{r1}}+R_{\mathrm{r1}}k_{\mathrm{ir1}}} \tag{C8}$$

绘制频域特性图得到：

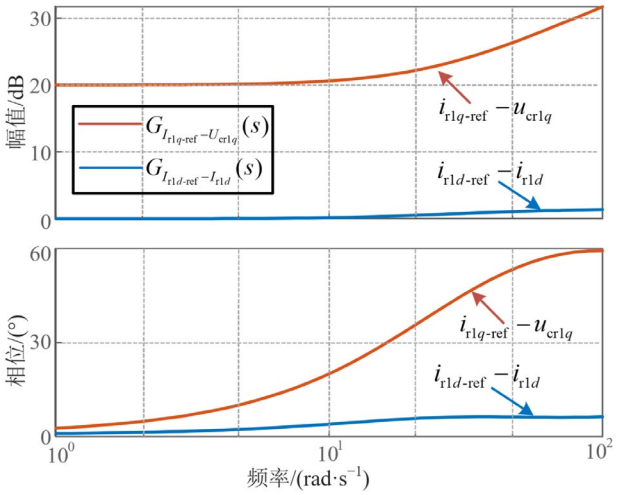


图 C1　状态变量频域幅相特性图

Fig.C1　State variable frequency-domain magnitude-phase characteristics

由图 C1 可知，$\varphi_{\mathrm{ir1}q\text{-ref}}-\varphi_{\mathrm{ucr1}q}\in\left(0,\frac{\pi}{2}\right)$，$\varphi_{\mathrm{ir1}d\text{-ref}}-\varphi_{\mathrm{ir1}d}\in\left(0,\frac{\pi}{2}\right)$，且幅值均大于 0，因此得到相位关系 $\cos(\varphi_{\mathrm{ir1}q\text{-ref}}-\varphi_{\mathrm{ucr1}q})>0$，$\cos(\varphi_{\mathrm{ir1}d\text{-ref}}-\varphi_{\mathrm{ir1}d})>0$。

附录 D

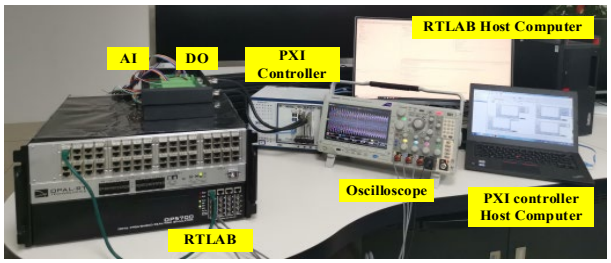


图 D1　硬件在环实验平台

Fig.D1　Hardware-in-the-loop experimental platform