

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241624

基于振荡能量法的构网型变流器振荡特性分析与参数优化

徐虹伟¹, 王炜宇¹, 曹一家¹, 杨智临¹, 李勇²

(1. 电网防灾减灾全国重点实验室(长沙理工大学), 湖南 长沙 410114;

2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 构网型变流器能够主动向电网提供惯量、频率支撑, 然而其类似同步发电机的外部特性可能使系统振荡特性更为复杂, 导致系统中振荡源辨识与控制器参数整定较为困难。为评估构网型变流器接入后系统的振荡特性, 提出了一种基于振荡能量法的构网型变流器振荡特性分析与参数优化方法。首先构建了详细的构网型变流器模型及其振荡能量模型, 并验证了能量模型的准确性。在此基础上, 基于轨迹灵敏度技术量化分析了控制器参数对振荡能量的影响, 筛选出影响系统振荡状态的主导控制参数, 并据此对构网型变流器的控制参数进行优化整定。最后, 在 DigSILENT/PowerFactory 中构建了含构网型变流器的四机两区系统仿真模型, 刻画了系统中振荡能量的流通过程, 验证了振荡源辨识和控制器关键参数辨识的准确性, 以及参数整定后构网型变流器振荡抑制的有效性。

关键词: 构网型变流器; 振荡能量; 参数优化; 轨迹灵敏度

Analysis of oscillation characteristics and parameter optimization of grid-forming converters based on the oscillation energy method

XU Hongwei¹, WANG Weiyu¹, CAO Yijia¹, YANG Zhilin¹, LI Yong²

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Reduction for Power Grid (Changsha University of Science and Technology), Changsha 410114, China; 2. College of Electrical and Information Engineering,

Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Grid-forming converters can actively provide inertia and frequency support to the power grid. However, their external characteristics, similar to those of synchronous generators, may complicate the system oscillation characteristics, making oscillation source identification and controller parameter tuning more challenging. To evaluate system oscillation characteristics with grid-connected converters, this paper proposes a method for analyzing the oscillation characteristics and optimizing the parameters of grid-forming converters based on the oscillation energy method. First, a detailed model of the grid-forming converter and its oscillation energy model are constructed, and the accuracy of the energy model is verified. Based on this, the influence of controller parameters on oscillation energy is quantitatively analyzed using trajectory sensitivity techniques, allowing for the identification of the dominant control parameters that affect system oscillation state. Consequently, converter control parameters are optimized and tuned. Finally, a four-machine two-area system model with grid-forming converters is constructed in DigSILENT/PowerFactory. The oscillation energy flow paths within the system are illustrated, verifying the accuracy of oscillation source identification and key parameters recognition, as well as the effectiveness of oscillation suppression after parameter tuning.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52307077).

Key words: grid-forming converter; oscillation energy; parameter optimization; trajectory sensitivity

0 引言

随着“双碳”目标的提出以及绿色低碳能源发

展战略的实施, 我国电网将形成以新能源为主体、大规模复杂交直流混联的新型电力系统。2023年底并网风电和光伏发电合计装机规模达到10.5亿kW, 占总装机容量的36%, 风光新增发电量占总新增发电量的58.1%^[1-2]。新能源和直流系统主要通过电力电子变流器并网^[3-6], 其快速响应特性增加了电力系统运行控制的灵活性, 但是引入的强非线性、随机性

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52307077); 湖南省自然科学基金项目资助(2024JJ5015); 国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目资助(U23B20128)

等因素也给系统带来了新的稳定性问题^[7-9],如惯量降低、频率失稳、宽频振荡等问题,可能造成风机脱网、设备损坏、风电场停运甚至大停电事故等^[10]。英国“8·9”大停电事故是近年来一起典型的大停电事故,由于英国霍恩海上风电场在次同步振荡阻尼性能不足,系统出现雷击扰动后,风电场并网点发散振荡,导致风电场脱网进而引发大停电事故^[11]。在2021年欧洲电网“1·8”事故中,由于西班牙、葡萄牙和法国南部系统惯量较小,难以控制频率跌落,导致系统解列为西北和东南两个区域^[12]。

上述事故表明,系统受扰后变流器可能会参与系统振荡,甚至成为振荡的主要设备或环节。近年来得到较多关注的构网型变流器,虽然能够向电网提供惯量、频率和电压支撑,但是其类似同步机组的外部特性,导致其将会参与交流电网的固有振荡模态^[13],导致系统振荡特性恶化、振荡传播范围扩大等问题。因此亟需研究构网型变流器在系统振荡过程中的实时参与程度及其阻尼特性,辨识关键振荡环节和参数,从而采取有效措施实现振荡的快速平抑。

目前常用的振荡分析方法主要有特征值法、阻抗法、复转矩系数法等。特征值法^[14-16]最为常见,能够反映全系统振荡模态信息,该方法在平衡点处将非线性系统线性化,通过系统的特征值分布情况分析系统振荡模态特征参数,如振荡幅值、振荡频率、模态阻尼比以及参与因子等信息。阻抗法^[17-19]从设备并网点处将系统划分为源/荷子系统,根据电路谐振原理、奈奎斯特定理等方法分析振荡机理,并判断是否会与电网出现负电阻谐振失稳问题。然而,以上方法难以在网络系统中实现振荡源实时定位和实时阻尼特性评估。

近年来,振荡能量法^[20-22]得到较多关注,该方法定义了各设备通用的振荡能量计算方法和元件阻尼特性评估方法,通过刻画系统受扰后振荡能量的分布情况,辨识振荡传播路径和振荡源。针对快速定位振荡源问题,文献[23-26]将时域耗散能量流计算公式拓展至频域和时频域,并在强迫振荡场景中验证了振荡源定位的准确性。文献[27]推导了双馈感应发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)内部组件和控制环节的动态能量流详细表达式,计算DFIG内部元件动态能量流与控制环节之间的因果关系值,定量描述DFIG内部元件动态能量流之间的相互作用强度,根据因果图的分布模式,识别振荡传播途径、定位振荡源。

在振荡源设备定位的基础上,可进一步分析振荡源设备内部关键控制环节和控制器参数对振荡特性的影响规律,筛选影响振荡的主导参数,并根据系统阻尼性能优化参数,从而改善电力电子设备阻尼不足的问题^[28-29]。文献[30]提出一个基于方差的指标,用于衡量单个风险因素对系统减载风险的影响,筛选最关键的风险因素采取控制措施。文献[31]提出了一种个体参数优化方法,采用快速参数边界计算作为绘制根轨迹的替代方法,以选择合适的主导参数数值,仅调整少量参数来快速提高稳定性。文献[32]通过分析饱和参数的调相机无功特性的影响规律和饱和参数与输出无功之间的关系式,提出分阶段参数优化策略。文献[33]研究了变流器控制参数对机组能量耗散性和振荡源定位效果的影响,发现在风电场中其他机组阻尼够强的情况下,个别机组控制参数不合理不一定会导致振荡,但振荡定位效果不受影响。现有方法凭借对振荡能量曲线线性拟合^[34]和对时间求导表示能量耗散率^[35],但能量耗散率变化无法准确体现每个时刻控制参数变化对振荡能量的影响程度。文献[36]将灵敏度分析应用到阻抗分析中,量化参数变化对系统阻抗曲线的影响,从而确定影响风电场并网点次同步振荡特性的主导因素,并制定具有抑制次同步振荡作用的参数调整方案。文献[37]建立含风光机组的电力系统闭环传递函数模型,提出阻尼系数对风光出力灵敏度的解析表达,通过调整风光出力来改善电网稳定性,文献[38]将电压对无功功率的灵敏度作为控制动作幅度依据,提出一种自适应电压控制方法。文献[39]通过灵敏度分析实现同步调相机的关联参数分类,提出参数辨识方法。但上述研究中对灵敏度的应用均依赖模型,对于模型未知或模型不全的情况难以应用。

本文提出了基于振荡能量法的构网型变流器振荡特性分析与参数优化方法,首先根据构网型变流器的典型控制结构,建立构网型变流器的振荡能量函数详细表达式,据此验证了端口振荡能量对构网型变流器的适应性。在此基础上,基于轨迹灵敏度技术量化了构网型变流器控制参数对振荡能量的影响能力,辨识出关键参数并制定参数调整方法,然后调节控制参数提高构网型变流器对系统振荡能量的耗散能力。最后,在DIGSILENT/PowerFactory中构建了含构网型变流器的四机两区系统仿真模型,通过时域仿真验证了本文所提方法的有效性,针对所总结规律对关键参数进行优化,能有效抑制系统振荡。

1 构网型变流器模型

本文研究对象为构网型变流器, 其模型如图 1 所示, 主要包括控制系统模型和变流器本体模型。

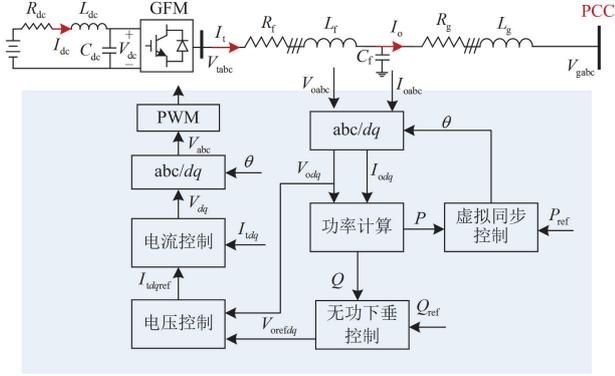


图 1 构网型变流器控制结构图

Fig. 1 Control structure diagram of grid-forming converter

变流器的控制包括功率计算、虚拟同步控制、无功控制、电压控制、电流控制和脉冲调制等环节。功率计算环节可以表示为

$$\begin{cases} P = V_{od} I_{od} \\ Q = -V_{od} I_{oq} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P 、 Q 分别为构网型变流器交流侧的有功功率、无功功率; V_{od} 为构网型变流器交流侧的 d 轴电压分量; I_{od} 、 I_{oq} 分别为构网型变流器交流侧的 d 、 q 轴电流分量。

虚拟同步控制通过调变流器交流侧母线电压的相位 θ 对有功进行调控, 其控制方程可以写为

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = \omega \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2H} (P_{ref} - P - D(\omega_0 - \omega)) \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{ref} 为变流器有功功率参考值; ω_0 、 ω 分别为电网额定频率、实际频率; D 、 H 分别为惯性时间常数、阻尼系数。

无功功率控制采用下垂控制, 根据变流器输出的无功功率偏差调整端口电压大小, 其控制方程可以写为

$$\begin{cases} V_{odref} = K_q (Q_{ref} - Q) + V_{odref0} \\ V_{oqref} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: Q_{ref} 为变流器无功功率参考值; V_{odref} 、 V_{oqref} 分别为变流器交流侧 d 、 q 轴电压分量参考值; V_{odref0} 为 d 轴电压分量参考值的初始值; K_q 为无功控制环

节的下垂系数。

电压控制环节经由两个 PI 控制器跟踪交流侧电压, 生成 d 轴参考电流 I_{dref} 和 q 轴参考电流 I_{qref} , 控制方程可表示为

$$\begin{cases} I_{dref} = K_{p1} (V_{odref} - V_{od}) + K_{i1} \int (V_{odref} - V_{od}) dt - \omega C_f V_{oq} \\ I_{qref} = K_{p1} (V_{oqref} - V_{oq}) + K_{i1} \int (V_{oqref} - V_{oq}) dt + \omega C_f V_{od} \end{cases} \quad (4)$$

式中: V_{od} 、 V_{oq} 分别为变流器交流侧 d 、 q 轴电压分量; K_{p1} 、 K_{i1} 分别为电压控制环节的比例系数、积分系数; C_f 为变流器并网滤波电容。

电流控制环节经由 PI 控制器生成输出信号 U_{td} 和 U_{tq} , 控制方程可表示为

$$\begin{cases} U_{td} = K_{p2} (I_{dref} - I_{td}) + K_{i2} \int (I_{dref} - I_{td}) dt - \omega I_{tq} L_g \\ U_{tq} = K_{p2} (I_{qref} - I_{tq}) + K_{i2} \int (I_{qref} - I_{tq}) dt + \omega I_{td} L_g \end{cases} \quad (5)$$

式中: I_{td} 、 I_{tq} 分别为变流器交流侧 d 、 q 轴电流分量; K_{p2} 、 K_{i2} 分别为电流控制环节的比例系数、积分系数; L_g 为变流器并网线路等效电感。

考虑开关特性的变流器本体模型十分复杂, 会导致在系统级分析中仿真效率低。本文主要研究系统间的振荡能量交互, 在保证仿真精度的前提下, 采用平均值模型 (averaged-value model, AVM) 能够降低计算负担, AVM 模型如图 2 所示。

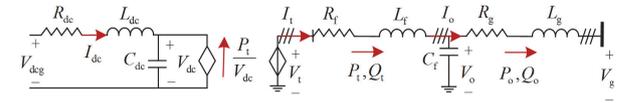


图 2 变流器与受端电网 AVM 模型

Fig. 2 AVM model of converter and receiving-end power system

变流器直流侧 AVM 模型可表示为

$$\begin{cases} \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} (I_{dc} - \frac{P_v}{V_{dc}}) \\ \frac{dI_{dc}}{dt} = \frac{1}{L_{dc}} (V_{dcg} - V_{dc} - R_{dc} I_{dc}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: I_{dc} 为直流电流; P_v 为变流器输出功率; C_{dc} 为变流器等效直流电容; V_{dcg} 、 V_{dc} 分别为直流电网电压和构网型变流器直流侧母线电压; R_{dc} 、 L_{dc} 分别为构网型变流器桥臂等效电阻、等效电感; $R_{dc} = 2/3 R_{arm}$, $L_{dc} = 2/3 L_{arm}$, $C_{dc} = 6/M C_{arm}$, 其中 R_{arm} 、 L_{arm} 分别为桥臂电阻、桥臂电感, C_{arm} 为子模块电容; M 为子模块数量。

变流器交流侧 AVM 模型可表示为

$$\begin{cases} \frac{dI_{td}}{dt} = \frac{1}{L_f}(V_{td} - V_{od}) - \frac{R_f}{L_f}I_{td} + \omega I_{tq} \\ \frac{dI_{tq}}{dt} = \frac{1}{L_f}(V_{tq} - V_{oq}) - \frac{R_f}{L_f}I_{tq} - \omega I_{td} \\ V_{td} = m_d V_{dc} \\ V_{tq} = m_q V_{dc} \end{cases} \quad (7)$$

式中： V_{td} 、 V_{tq} 分别为变流器交流侧母线 d 、 q 轴电压分量； I_{td} 、 I_{tq} 分别为变流器交流侧 d 、 q 轴电流分量； V_{od} 、 V_{oq} 分别为公共处 d 、 q 轴电压分量； m_d 、 m_q 分别为脉冲调制占空比 d 、 q 轴分量； R_f 和 L_f 分别表示交流侧变压器、输电线路、滤波器和 VSC 桥臂的等效电阻和电感。

2 基于振荡能量理论的振荡特性分析

振荡能量法是一种系统振荡源定位方法。该方法忽略设备内部结构，通过支路和节点数据可计算各设备的振荡能量激发情况，从而定位系统中振荡源设备^[17-18]。根据振荡能量流理论，系统中的振荡能量流 W_{ij} 可以表示为

$$W_{ij} = \int (\Delta P_{ij} d\Delta\theta_i + \Delta Q_{ij} d(\Delta \ln U_i)) = \int (\Delta P_{ij} 2\pi \Delta f_i dt + \Delta Q_{ij} d(\Delta \ln U_i)) \quad (8)$$

式中： P_{ij} 、 Q_{ij} 分别为支路的有功功率、无功功率； U_i 、 θ_i 分别为节点 i 的电压幅值、相角； f_i 为母线频率； Δ 表示相较于初始值的变化量。

文献[17]建立了发电机能量消耗和其阻尼转矩的对应关系，可知通过式(8)计算所得振荡能量能够反映该设备在系统振荡时的阻尼贡献。以潮流流出节点作为支路始端，观察节点数据计算所得振荡能量，当振荡能量流曲线随时间递增时，振荡能量流向与潮流方向相同，若振荡能量由设备流向电网，表明该设备持续向电网注入能量，对系统振荡产生促进作用，为负阻尼设备；反之，表明该设备作为正阻尼设备消耗系统中的振荡能量，为抑制系统振荡做出贡献。向系统发出能量的负阻尼设备即为振荡源所在设备。若设备向电网注入能量，振荡能量随时间的变化速率越快，该设备向系统中注入能量越多；若设备吸收电网中能量，振荡能量随时间的变化速率越快，该设备对系统中产生的振荡能量的消耗越强。

2.1 构网型变流器的振荡能量模型

由于振荡能量法忽略内部结构的特点，无法直观地观察设备内部控制参数对端口能量的影响，本

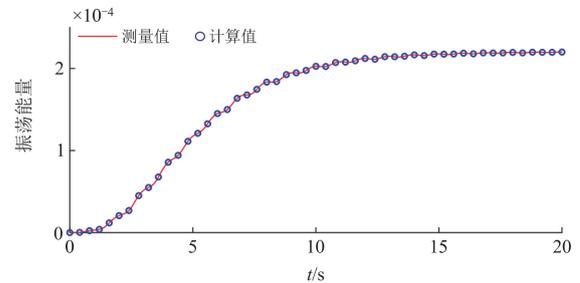
节构造包含控制参数的换流器端口能量函数详细表达式，并验证准确性。

将式(1)一式(5)、式(7)代入式(8)，推导过程见附录 A 式(A1)一式(A6)，可得到包含构网型变流器控制参数的振荡能量详细表达式，如式(9)所示。

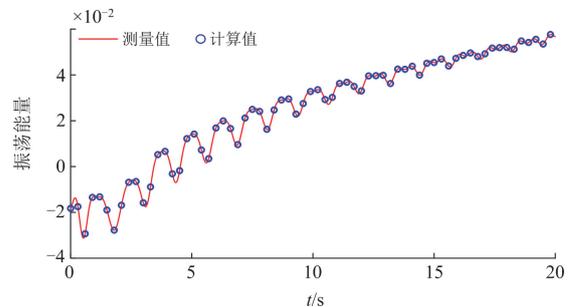
从式(9)中可以看出变流器的振荡能量由多个控制环节共同影响，影响变流器振荡能量的因素包括虚拟同步控制环节、无功下垂控制环节和电压、电流控制环节，并且构网型控制策略各环节之间呈现递进关系，使得有功控制参数和无功控制参数所影响的振荡能量分量始终与电压电流环控制参数耦合，因此，需要进一步研究上述 4 个控制环节的控制参数对振荡能量的影响。

2.2 振荡能量函数验证

为验证所建立变流器能量函数详细表达式(9)的正确性，在 DIgSILENT/PowerFactory 中构建构网型变流器模型，并设置两个扰动事件激发系统的振荡响应，将由端口母线处测量值和本文构建表达式计算所得振荡能量曲线进行对比。在变流器处设置有功功率参考值 P_{ref} 周期波动： $P_{ref} = 0.1 \sin(2\pi t)$ ，构建强迫振荡场景，变流器振荡能量计算值与测量值如图 3(a)所示；在线路 L8-9-1 设置持续 0.2 s 的短时三相短路故障，构建系统自由振荡场景，变流器振荡能量计算值与测量值如图 3(b)所示。



(a) 强迫振荡时振荡能量对比



(b) 短路故障时振荡能量对比

图 3 变流器振荡能量计算值与测量值对比图

Fig. 3 Comparison diagram of calculated values and measured values of converter oscillation energy

在系统强迫振荡和短路故障两种情况下, 计算值与测量值振荡能量曲线吻合, 在后续研究控制参

数对设备振荡能量影响时, 可以直接使用测量值评估设备振荡能量耗散强度, 简化计算。

$$\begin{aligned}
 W = & \int \left(\Delta \left(\left(\left(\left(K_{p1} \left((K_q (Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od} \right) + \right. \right. \right. \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. \left. \left. K_{p2} \left(\left(K_{i1} \int \left((K_q (Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od} \right) dt - \omega C_f V_{oq} \right) - I_{td} \right) + \right. \right. \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. \left. \left. K_{i2} \int \left(\left(K_{p1} \left((K_q (Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od} \right) + \right. \right. \right. \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. \left. \left. K_{i1} \int \left((K_q (Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od} \right) dt - \omega C_f V_{oq} \right) - I_{td} \right) dt - \omega I_{tq} L_g \right) - \Delta I_{od} \right) dt - \\
 & \left. \left(L_f I_{td} - R_f I_{td} + \omega L_f I_{tq} \right) \right) \\
 & \left(\Delta \int \frac{P_{ref} - P - D(\omega_0 - \omega)}{2H} dt \right) \\
 & \Delta \left(\left(\left(\left(\left(K_{p1} \left((K_q (Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od} \right) + \right. \right. \right. \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. \left. \left. K_{p2} \left(\left(K_{i1} \int \left((K_q (Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od} \right) dt - \omega C_f V_{oq} \right) - I_{td} \right) + \right. \right. \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. \left. \left. K_{i2} \int \left(\left(K_{p1} \left((K_q (Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od} \right) + \right. \right. \right. \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. \left. \left. K_{i1} \int \left((K_q (Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od} \right) dt - \omega C_f V_{oq} \right) - I_{td} \right) dt - \omega I_{tq} L_g \right) - \Delta I_{oq} \times \right. \\
 & \left. \left(L_f I_{tq} - R_f I_{tq} - \omega L_f I_{td} \right) \right) \\
 & \int \left(\Delta \ln \left(\left(\left(\left(\left(K_{p1} \left((K_q (Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od} \right) + \right. \right. \right. \right. \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. \left. \left. K_{p2} \left(\left(K_{i1} \int \left((K_q (Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od} \right) dt - \omega C_f V_{oq} \right) - I_{td} \right) + \right. \right. \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. \left. \left. K_{i2} \int \left(\left(K_{p1} \left((K_q (Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od} \right) + \right. \right. \right. \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. \left. \left. K_{i1} \int \left((K_q (Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od} \right) dt - \omega C_f V_{oq} \right) - I_{td} \right) dt - \omega I_{tq} L_g \right) \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right) + \\
 & \left(\left(\left(\left(\left(K_{p1} (V_{ogref} - V_{oq}) + K_{i1} \int (V_{ogref} - V_{oq}) dt + \omega C_f V_{od} \right) - I_{tq} \right) + \right. \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. \left. \left. K_{i2} \int \left(\left(K_{p1} (V_{ogref} - V_{oq}) + K_{i1} \int (V_{ogref} - V_{oq}) dt + \omega C_f V_{od} \right) - I_{tq} \right) dt + \omega I_{td} L_g \right) \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right) \right) \right) \right) \right) \quad (9)
 \end{aligned}$$

3 控制参数对振荡能量耗散性的影响分析

设备端口振荡能量能够反映该设备的阻尼情况, 同时反映该设备对系统振荡抑制的贡献程度。根据式(9)所展示的构网型变流器振荡能量模型可知, 变流器端口能量涉及到虚拟控制环节、电压下垂环节、电压控制环节以及电流控制环节, 且各流通支路内部不同控制参数相互耦合, 共同影响换流器内部的能量流通, 难以直接判断控制参数对振荡能量的影响程度。

为辨识影响系统振荡特性的主导控制参数, 本节引入轨迹灵敏度的方法, 量化控制参数对振荡能量的影响。轨迹灵敏度可以反映参数变化对系统动态轨迹的影响, 系统的状态变量与参数的关系可以表示为

$$x(t) = \varphi(x_0, t, \alpha) \quad (10)$$

式中: x 为系统的状态变量; x_0 表示系统变量的原始值; α 为系统参数。

状态变量 x 对参数 α 的轨迹灵敏度为

$$x_\alpha(t) \approx \frac{\Delta x(t)}{\Delta \alpha} = \frac{\varphi(x_0, t, \alpha + \Delta \alpha) - \varphi(x_0, t, \alpha)}{\Delta \alpha} \quad (11)$$

由式(11)可以近似求得参数 α 的轨迹灵敏度, 并采用中值差分法计算相对轨迹灵敏度, 可以表示为^[40]

$$S_\alpha^x(t) = \frac{\partial_x(\alpha, t)/x_0}{\partial \alpha / \alpha_0} = \frac{[x(\alpha + \Delta \alpha, t) - x(\alpha - \Delta \alpha, t)]/x_0}{2\Delta \alpha / \alpha_0} \quad (12)$$

式中: α_0 表示系统参数的原始值。

为了更直观地比较各参数轨迹灵敏度大小, 计算轨迹灵敏度的绝对值的平均值, 如式(13)所示。

$$GS_\alpha^x = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |S_\alpha^x(t_k)| \quad (13)$$

式中: t_k ($k=1, 2, \dots, N$) 为轨迹灵敏度的采样点;

$S_{\alpha}^x(t_k)$ 为 t_k 时刻的相对轨迹灵敏度; N 为轨迹灵敏度的采样点数。

GS_{α}^x 通过量化控制参数改变后的变流器端口发出或吸收振荡能量的相对变化程度, 确定影响振荡的主导控制参数。 GS_{α}^x 越大, 说明控制参数对构网型变流器振荡能量的影响也越大。对于 GS_{α}^x 数值大的参数, 研究此参数不同取值时振荡能量的变化情况, 提出参数优化的方案。

综上, 构网型变流器振荡特性分析与参数优化方法的具体步骤如下。

步骤 1: 获取不同控制参数下设备端口的有功功率、无功功率、电压幅值和频率的量测数据;

步骤 2: 计算各组数据的变化量, 根据式(1)计算振荡能量;

步骤 3: 绘制网络中的振荡能量流路径, 定位振荡源;

步骤 4: 在初始设定参数的基础上, 保持其他参数不变, 依次对各参数相对于原始值分别 $\pm 20\%$, 计算此参数设定下的振荡能量, 得到 3 组振荡能量结果, 根据式(12)计算相对轨迹灵敏度;

步骤 5: 采样点数 N 设置为实际仿真时长/仿真步长, 在步骤 4 所得结果的基础上, 根据式(13)计算各轨迹灵敏度的绝对值的平均值;

步骤 6: 根据该平均值的大小, 判断对振荡能量影响最大的控制参数;

步骤 7: 选取对振荡能量影响较大的控制参数, 总结参数大小对变流器振荡能量的影响规律;

步骤 8: 依据步骤 7 所总结规律, 调整参数提升变流器阻尼性能, 抑制系统振荡。

4 仿真验证

为验证所提方法的有效性, 本文在电力系统暂态仿真软件 DlgSILENT/PowerFactory 中搭建了含构网型变流器的四机两区系统模型, 测试系统结构如图 4 所示, 在母线 8 处经变流器接入直流, 变流器采用构网型控制策略。构网型变流器参数具体设置如表 1 所示, 系统其他参数见文献[41]。在线路 L8-9-1 近端设置瞬时三相短路故障(1 s 时发生, 持续 0.2 s 后消失)。

4.1 振荡源定位

将电压控制比例系数 K_{p1} 设置为 0.7 (原为 1.4), 各设备的功率、电压幅值和频率波动情况如图 5 所示, 故障消除后, 振荡呈发散趋势, 系统失稳。

为判断系统失稳时各设备对发出或吸收振荡能

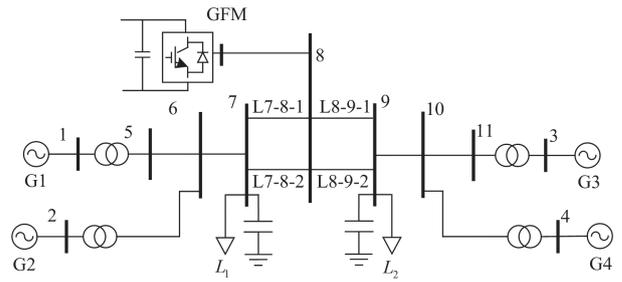


图 4 含构网型变流器的四机两区系统
Fig. 4 Four-generator two-area system with grid-forming converters

表 1 构网型变流器控制系统参数

Table 1 Control system parameters of grid-forming converter

| 参数设置 | |
|----------|--|
| 构网型控制器参数 | $D = 10; H = 5; K_q = 0.5$ $K_{p1} = 0.5; K_{i1} = 1.4; K_{p2} = 2.5; K_{i2} = 100$ |
| 变流器电路参数 | 额定容量/MW 8000 交流侧额定电压/kV 220 直流侧额定电压/kV 500 直流侧等效电感/mH 50 直流侧等效电阻/ Ω 2.546 直流侧等效电容/ μF 500 |

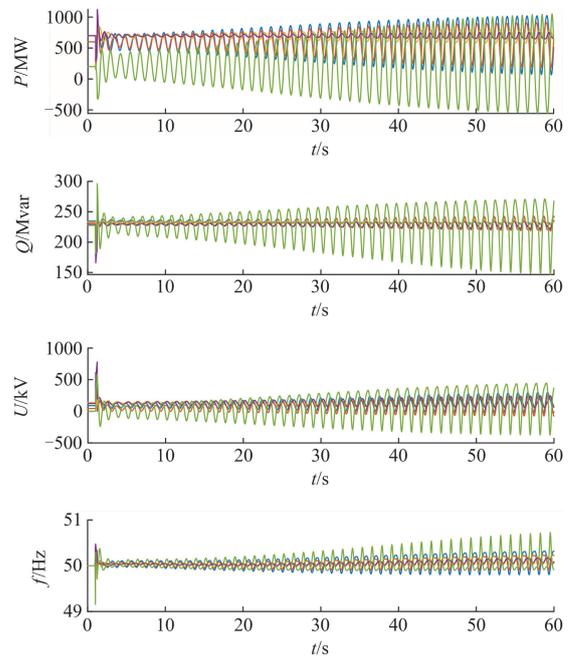


图 5 系统失稳时的设备电气参数

Fig. 5 Electrical parameters of devices during system instability

量的情况, 选取故障切除后系统持续振荡数据进行振荡能量分析。系统失稳时, 各设备的振荡能量情况如图 6 所示, 变流器的振荡能量曲线随时间递增,

发电机组的振荡能量曲线均随时间递减。依据振荡能量绘制系统中的振荡能量流路径,如图 7 所示,说明变流器在此时间段向系统中注入能量导致系统振荡,而发电机组消耗能量。

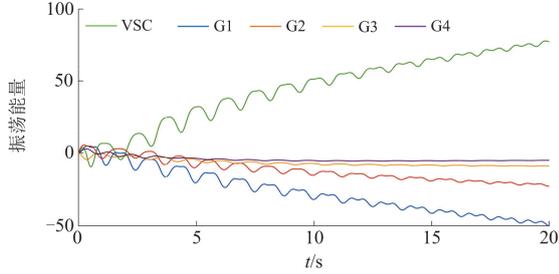


图 6 各设备的振荡能量

Fig. 6 Oscillation energy of each device

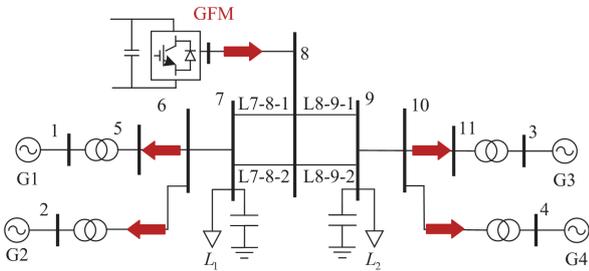


图 7 系统振荡能量流路径

Fig. 7 Oscillation energy flow path of the system

将电压控制环节的比例系数 K_{p1} 设置为 1.4, 各设备的功率、电压幅值和频率波动情况如图 8 所示, 故障消失后系统振荡幅值减小, 逐渐恢复稳定。说明构网型变流器控制参数不当会导致变流器向系统注入振荡能量, 加剧系统振荡, 甚至导致失稳。因此, 可以判断构网型变流器为系统的振荡源。

4.2 控制参数对振荡能量的轨迹灵敏度

由式(9)可知, 影响变流器振荡能量的控制参数包括: 阻尼系数 D 、惯性时间常数 H 、电压下垂系数 K_q 、电压控制环节比例系数 K_{p1} 、电压控制环节积分系数 K_{i1} 、电流控制环节积分系数 K_{i2} 、电流控制环节比例系数 K_{p2} 。仿真时长为 10 s, 仿真步长为 1 ms, 采样点数 N 为 10 000, 根据第 3 节所提分析方法步骤 4 和步骤 5, 计算上述控制参数的轨迹灵敏度。

各参数轨迹灵敏度绝对值的平均值的计算结果如图 9 所示, 由大到小依次为: 电压控制环节比例系数 K_{p1} 、电压控制环节积分系数 K_{i1} 、电压下垂系数 K_q 、阻尼系数 D 、电流控制环节积分系数 K_{i2} 、惯性时间常数 H 、电流控制环节比例系数 K_{p2} 。

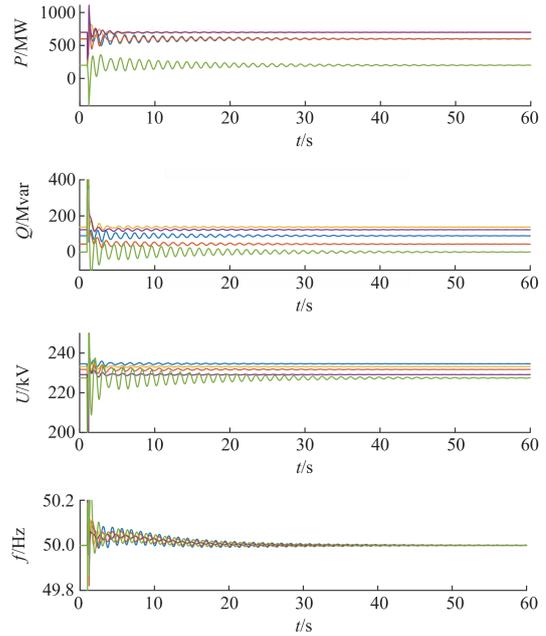


图 8 各设备电气参数时域响应

Fig. 8 Time-domain response of electrical parameters of each device

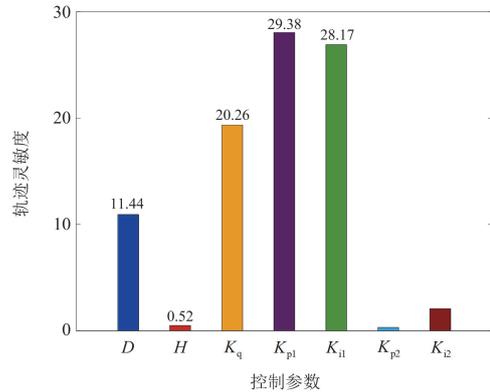


图 9 控制参数对振荡能量的轨迹灵敏度(绝对值的平均值)

Fig. 9 Trajectory sensitivity of the control parameter to the oscillation energy (the average value of absolute value)

根据轨迹灵敏度结果, 可以判断对振荡能量影响大的控制参数为: 电压控制环节比例系数 K_{p1} 、电压控制环节积分系数 K_{i1} 、电压下垂系数 K_q 和阻尼系数 D , 电流控制环节的控制参数对变流器的振荡能量几乎不产生影响。

4.3 控制参数对振荡能量的影响规律

为研究关键参数变化对振荡能量的影响规律, 保持其他控制参数不变, 分别改变 K_{p1} 、 K_{i1} 、 K_q 和 D 并进行时域仿真, 不同参数下的振荡能量结果如图 10 所示。

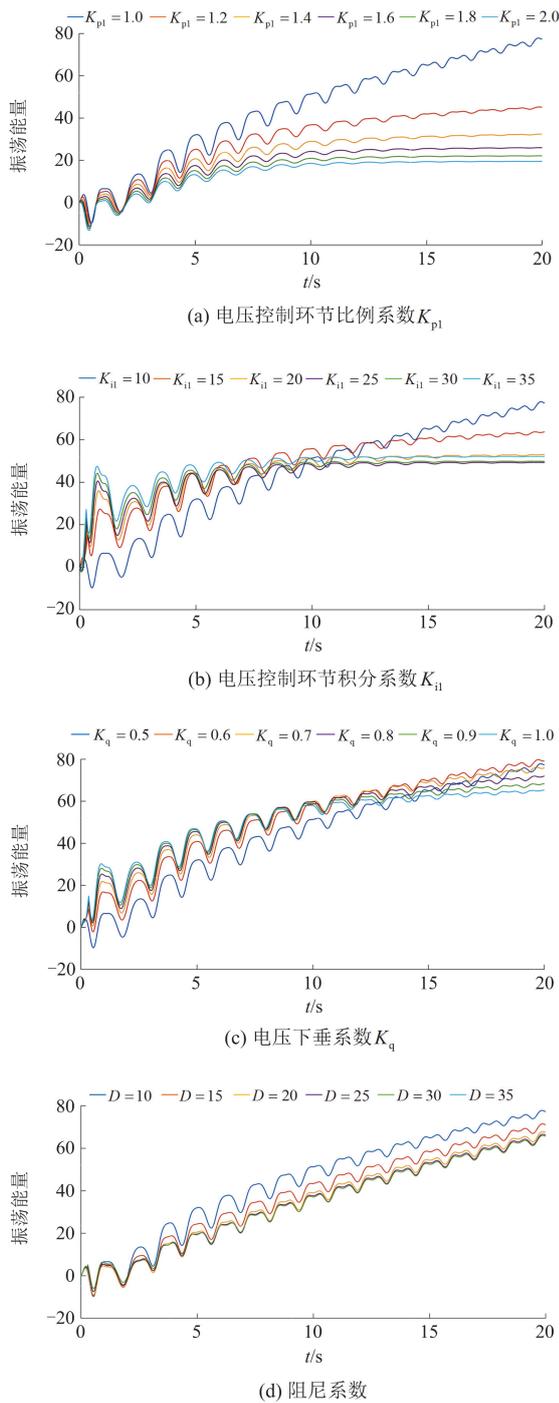


图 10 控制参数对振荡能量的影响

Fig. 10 Effect of control parameters on oscillation energy

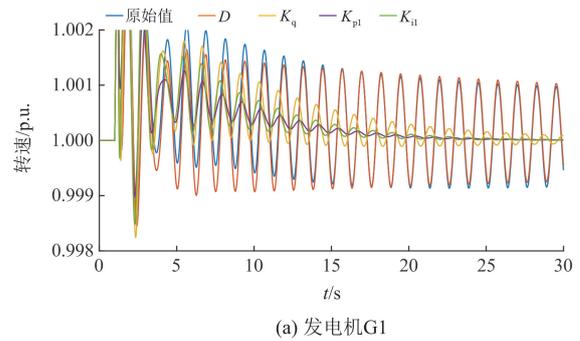
由图 10(a)可知，变流器所发出振荡能量随着 K_{pi} 增大而减小，且当 K_{pi} 大于 1.4 时，变流器振荡能量曲线趋于平缓，不随时间递增。图 10(b)中虽然 K_{ii} 增大会导致振荡能量的增长速率加快，但 K_{ii} 取值为 10 和 15 时，振荡能量随时间持续增长，随着 K_{ii} 的增大至 20，振荡能量曲线趋势逐渐趋于平缓，

说明 K_{ii} 大于 15 时，变流器在 10 s 后不再向系统发出能量，总体来看增大 K_{ii} 有利于减少振荡能量发出。由图 10(c)可知，随着 K_q 的增大，振荡能量随时间增长速率变快，但 K_q 取值大于 0.7 所对应振荡能量曲线在 15 s 后逐渐不再增长， K_q 取值小于 0.7 所对应的振荡能量曲线随时间持续增长，说明 K_q 取值小于 0.7 时，变流器持续向系统注入振荡能量，因此增大 K_q 有利于减小变流器发出振荡能量。由图 10(d)可知，随着 D 增大，振荡能量随时间增长速率减慢，同时间段内发出振荡能量减少，但振荡能量并未随着 D 增大改变增长趋势。综上，增大 K_{pi} 、 K_{ii} 、 K_q 和 D 具有抑制振荡，缩短系统恢复稳定的作用。

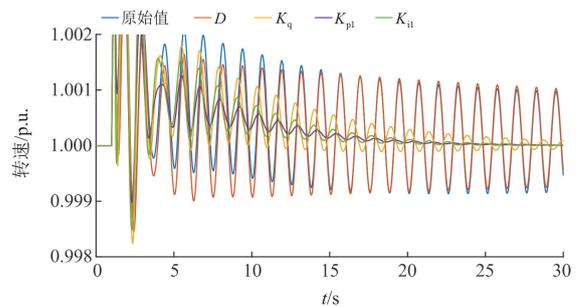
4.4 参数调整效果验证

根据所总结规律，保持其他参数不变，原始参数如表 1 所示，依次增大 K_{pi} 为 5.6，增大 K_{ii} 为 40，增大 K_q 为 2，增大 D 为 40；参数调整前后交流系统中同步发电机转速对比与线路的振荡情况分别如图 11 和图 12 所示。

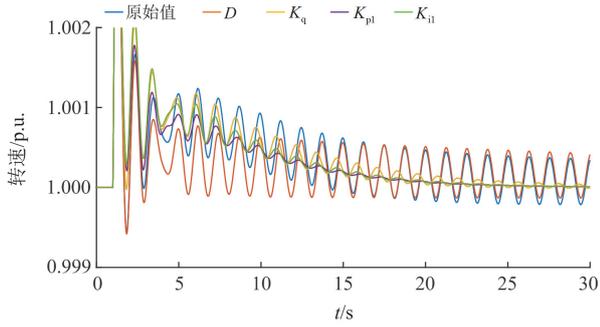
图 11 为参数调节前后系统中 4 台同步发电机的转速变化情况，随着 K_{pi} 、 K_{ii} 和 K_q 的增大，发电机转速振荡幅值变小，振荡时间缩短。图 12 为三相短路故障所在线路的有功功率和频率变化情况，可以明显看出，增大 K_{pi} 、 K_{ii} 和 K_q 后，故障线路有功



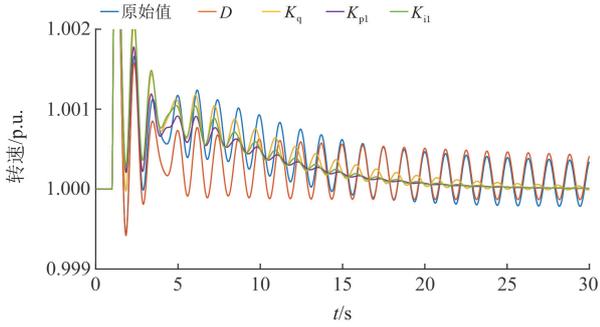
(a) 发电机G1



(b) 发电机G2



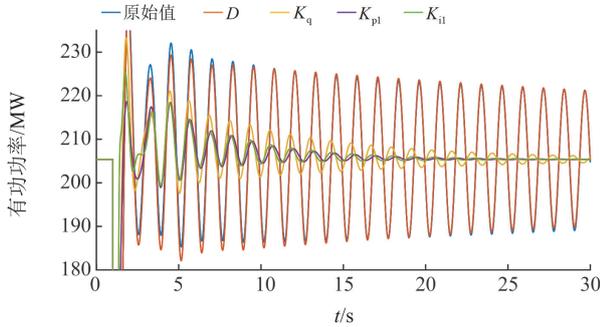
(c) 发电机G3



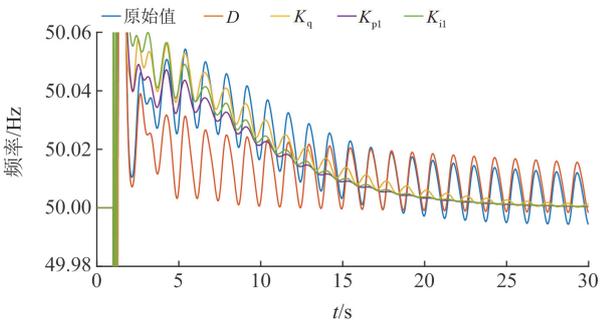
(d) 发电机G4

图 11 发电机转速对比

Fig. 11 Comparison of generator rotation speeds



(a) 有功功率



(b) 频率

图 12 故障线路振荡情况对比

Fig. 12 Comparison of oscillation conditions of faulty lines

功率和频率振荡幅度减弱明显。其中, 增大 K_{p1} 效果最显著, 其次是 K_{i1} 和 K_q , 与轨迹灵敏度结果吻合; 增大 D 发电机转速和线路振荡幅度减小, 但振荡持续时间未见明显改变, 与图10(d)中根据 D 对振荡能量的影响规律所得结论相同。

综上, 通过控制参数对振荡能量的轨迹灵敏度能做到准确辨识主导参数, 且基于此辨识结果调节对应参数可有效抑制系统振荡。

5 结论

本文提出一种基于振荡能量分析法的构网型变流器振荡特性分析与参数优化方法, 将振荡能量与轨迹灵敏度相结合, 分析对振荡能量影响大的控制参数, 进而提出参数优化方案, 提升变流器阻尼性能。主要结论如下:

1) 构网型变流器能够为系统提供阻尼和惯性支撑, 但变流器控制参数设置不当会导致变流器向系统注入振荡能量, 在整个系统中呈现为负阻尼设备, 加剧系统振荡, 甚至导致失稳;

2) 引入轨迹灵敏度, 能够定量计算控制器参数对振荡能量的影响程度, 本文发现电压控制环节的控制参数 K_{p1} 和 K_{i1} 对系统稳定影响最大, 其次是电压下垂环节的下垂系数 K_q 和虚拟同步控制环节的阻尼系数 D , 电流控制环节参数对变流器的振荡能量几乎不产生影响;

3) 增大电压控制环节比例系数 K_{p1} 、积分系数 K_{i1} 和电压下垂环节下垂系数 K_q 可改善构网型变流器发出振荡能量的情况, 从而提升构网型变流器的阻尼性能。

在本文的基础上, 后续工作可以进一步研究包括多变流器系统的参数优化策略。

附录 A

振荡能量详细表达式推导步骤如下。将式(3)代入式(4), 可得到 d 轴参考电流 I_{dref} 和 q 轴参考电流 I_{qref} 为

$$\begin{cases} I_{dref} = K_{p1}((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) + \\ K_{i1} \int ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) dt - \omega C_f V_{oq} \\ I_{qref} = K_{p1}(V_{oqref} - V_{oq}) + K_{i1} \int (V_{oqref} - V_{oq}) dt + \omega C_f V_{od} \end{cases} \quad (A1)$$

将式(A1)代入式(5), 可得到 U_{td} 、 U_{tq} 为

$$\begin{cases} U_{td} = K_{p2} \left(\left(K_{p1} ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) + K_{i1} \int ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) dt - \omega C_f V_{oq} \right) - I_{td} \right) + \\ K_{i2} \int \left(\left(K_{p1} ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) + K_{i1} \int ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) dt - \omega C_f V_{oq} \right) - I_{td} \right) dt - \omega I_{tq} L_g \\ U_{tq} = K_{p2} \left((K_{p1}(V_{ogref} - V_{oq}) + K_{i1} \int (V_{ogref} - V_{oq}) dt + \omega C_f V_{od}) - I_{tq} \right) + \\ K_{i2} \int \left((K_{p1}(V_{ogref} - V_{oq}) + K_{i1} \int (V_{ogref} - V_{oq}) dt + \omega C_f V_{od}) - I_{tq} \right) dt + \omega I_{td} L_g \end{cases} \quad (A2)$$

$$U = \sqrt{U_{td}^2 + U_{tq}^2} = \left(\left(K_{p2} \left(\left(K_{p1} ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) + K_{i1} \int ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) dt - \omega C_f V_{oq} \right) - I_{td} \right) + K_{i2} \int \left(\left(K_{p1} ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) + K_{i1} \int ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) dt - \omega C_f V_{oq} \right) - I_{td} \right) dt - \omega I_{tq} L_g \right)^2 + \left(K_{p2} \left((K_{p1}(V_{ogref} - V_{oq}) + K_{i1} \int (V_{ogref} - V_{oq}) dt + \omega C_f V_{od}) - I_{tq} \right) + K_{i2} \int \left((K_{p1}(V_{ogref} - V_{oq}) + K_{i1} \int (V_{ogref} - V_{oq}) dt + \omega C_f V_{od}) - I_{tq} \right) dt + \omega I_{td} L_g \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (A3)$$

由式(2)所给虚拟同步控制方程, 可得到

$$\theta = \iint \frac{P_{ref} - P - D(\omega_0 - \omega)}{2H} dt dt \quad (A4)$$

$$\begin{cases} V_{od} = V_{td} - L_f (dI_{td}/dt) - R_f (dI_{td}/dt) + \omega L_f I_{tq} \\ V_{oq} = V_{tq} - L_f (dI_{tq}/dt) - R_f (dI_{tq}/dt) - \omega L_f I_{td} \end{cases} \quad (A5)$$

由式(7)可得到

将式(A3)和式(A4)代入式(8), 可得到计及构网型变流器控制参数的振荡能量表达式为

$$W = \int \left(\Delta \left(\left(K_{p2} \left(\left(K_{p1} ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) + K_{i1} \int ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) dt - \omega C_f V_{oq} \right) - I_{td} \right) + K_{i2} \int \left(\left(K_{p1} ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) + K_{i1} \int ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) dt - \omega C_f V_{oq} \right) - I_{td} \right) dt - \omega I_{tq} L_g \right) \Delta I_{od} - \left(L_f (dI_{td}/dt) - R_f I_{td} + \omega L_f I_{tq} \right) \right) \Delta \left(\int \frac{P_{ref} - P - D(\omega_0 - \omega)}{2H} dt \right) \right) dt - \int \left(\Delta \left(\left(K_{p2} \left(\left(K_{p1} ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) + K_{i1} \int ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) dt - \omega C_f V_{oq} \right) - I_{td} \right) + K_{i2} \int \left(\left(K_{p1} ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) + K_{i1} \int ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) dt - \omega C_f V_{oq} \right) - I_{td} \right) dt - \omega I_{tq} L_g \right) \Delta I_{oq} \times \left(L_f I_{tq} - R_f I_{tq} - \omega L_f I_{td} \right) \right) \int \left(\left(K_{p2} \left(\left(K_{p1} ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) + K_{i1} \int ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) dt - \omega C_f V_{oq} \right) - I_{td} \right) + K_{i2} \int \left(\left(K_{p1} ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) + K_{i1} \int ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) dt - \omega C_f V_{oq} \right) - I_{td} \right) dt - \omega I_{tq} L_g \right)^2 + \left(K_{p2} \left((K_{p1}(V_{ogref} - V_{oq}) + K_{i1} \int (V_{ogref} - V_{oq}) dt + \omega C_f V_{od}) - I_{tq} \right) + K_{i2} \int \left((K_{p1}(V_{ogref} - V_{oq}) + K_{i1} \int (V_{ogref} - V_{oq}) dt + \omega C_f V_{od}) - I_{tq} \right) dt + \omega I_{td} L_g \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right) \Delta \ln \left(\left(K_{p2} \left(\left(K_{p1} ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) + K_{i1} \int ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) dt - \omega C_f V_{oq} \right) - I_{td} \right) + K_{i2} \int \left(\left(K_{p1} ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) + K_{i1} \int ((K_q(Q_{ref} - Q) + V_{odref0}) - V_{od}) dt - \omega C_f V_{oq} \right) - I_{td} \right) dt - \omega I_{tq} L_g \right)^2 + \left(K_{p2} \left((K_{p1}(V_{ogref} - V_{oq}) + K_{i1} \int (V_{ogref} - V_{oq}) dt + \omega C_f V_{od}) - I_{tq} \right) + K_{i2} \int \left((K_{p1}(V_{ogref} - V_{oq}) + K_{i1} \int (V_{ogref} - V_{oq}) dt + \omega C_f V_{od}) - I_{tq} \right) dt + \omega I_{td} L_g \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right) \right) \quad (A6)$$

参考文献

- [1] 国家能源局. 2024年度中国电力市场发展报告[EB/OL]. [2025-03-17]. <https://www.nea.gov.cn/20250717/54ae0fdb11f04b39a5b670999c04ef81/c.html>
National Energy Administration. China power market development report 2024[EB/OL]. [2025-03-17]. <https://www.nea.gov.cn/20250717/54ae0fdb11f04b39a5b670999c04ef81/c.html>
- [2] 李周, 王宇涵, 顾伟, 等. 直流电网及其运行控制策略发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(24): 1-21.
LI Zhou, WANG Yuhan, GU Wei, et al. Development trend of DC power grid and its operation control strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(24): 1-21.
- [3] 李康, 黄萌, 查晓明, 等. 高压直流输电系统可靠性分析方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 174-187.
LI Kang, HUANG Meng, ZHA Xiaoming, et al. An overview of reliability analysis methods for an HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 174-187.
- [4] 张兴, 战祥对, 吴孟泽, 等. 高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网混合模式控制综述[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(21): 1-15.
ZHANG Xing, ZHAN Xiangdui, WU Mengze, et al. Review on grid-following/grid-forming hybrid mode control for grid-connected converter in high penetration rate of renewable energy generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(21): 1-15.
- [5] 郑云平, 焦春雷, 亚夏尔·吐尔洪, 等. 基于新能源发电的构网型协调储能控制策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 65-74.
ZHENG Yunping, JIAO Chunlei, YAXAR·Turgun, et al. Research on grid-forming coordinated energy storage control strategy based on converter-interfaced generation[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 65-74.
- [6] 林宇轩, 李威, 朱玲, 等. 电网电压跌落下构网型变流器暂态控制策略综述[J]. 电力工程技术, 2025, 44(2): 55-68.
LIN Yuxuan, LI Wei, ZHU Ling, et al. Review of transient control strategies for grid-forming converters under grid voltage sag conditions[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(2): 55-68.
- [7] 尹聪琦, 谢小荣, 刘辉, 等. 柔性直流输电系统振荡现象分析与控制方法综述[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1117-1123.
YIN Congqi, XIE Xiaorong, LIU Hui, et al. Analysis and control of the oscillation phenomenon in VSC-HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1117-1123.
- [8] 孙鹏飞, 田震, 查晓明, 等. 功率同步型构网变流器并网系统暂态同步稳定性研究综述[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(2): 1-19.
SUN Pengfei, TIAN Zhen, ZHA Xiaoming, et al. Review on research of transient synchronization stability for grid-connected system based on power-synchronization grid-forming converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(2): 1-19.
- [9] 周国梁, 高丽萍, 梁言桥, 等. 柔性直流输电系统多端异构通用化阻抗建模与分析[J]. 中国电力, 2025, 58(3): 73-85.
ZHOU Guoliang, GAO Liping, LIANG Yanqiao, et al. Multi-terminal heterogeneous generalized impedance modeling and analysis of MMC-MTDC transmission systems[J]. Electric Power, 2025, 58(3): 73-85.
- [10] 陈露洁, 徐式蕴, 孙华东, 等. 高比例电力电子电力系统宽频带振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2297-2310.
CHEN Lujie, XU Shiyun, SUN Huadong, et al. A survey on wide-frequency oscillation for power systems with high penetration of power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2297-2310.
- [11] 樊陈, 姚建国, 张琦兵, 等. 英国“8·9”大停电事故振荡事件分析及思考[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 34-41.
FAN Chen, YAO Jianguo, ZHANG Qibing, et al. Reflection and analysis for oscillation of the blackout event of 9 August 2019 in UK[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 34-41.
- [12] 张鹏飞, 麻常辉, 李威, 等. 2021年欧洲电网两次解列事故分析及对中国电网安全的思考[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(24): 22-29.
ZHANG Pengfei, MA Changhui, LI Wei, et al. Analysis of two splitting accidents of European Power grid in 2021 and consideration on power grid security in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 22-29.
- [13] 王炜宇, 张一平, 李帅虎, 等. 基于扰动观测的构网型柔直系统阻尼控制器设计[J]. 电网技术, 2024, 48(6): 2262-2271.
WANG Weiyu, ZHANG Yiping, LI Shuaihu, et al. Disturbance observer-based damping controller of grid-forming VSC-HVDC systems[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2262-2271.
- [14] WANG P, LIU P, GU T, et al. Small-signal stability of DC current flow controller integrated meshed multi-terminal

- HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(1): 188-203.
- [15] CASTRO L M, ACHA E. On the dynamic modeling of marine VSC-HVDC power grids including offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2889-2900.
- [16] 程静, 苏乐, 岳雷. 双馈风电并网系统的宽频振荡机理分析与抑制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 1-13.
CHENG Jing, SU Le, YUE Lei. Mechanism analysis and suppression of broadband oscillation in a DFIG wind power grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 1-13.
- [17] ZHANG H, MEHRABANKHOMARTASH M, SAEEDIFARD M, et al. Impedance analysis and stabilization of point-to-point HVDC systems based on a hybrid AC-DC impedance model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(4): 3224-3238.
- [18] 年珩, 徐韵扬, 陈亮, 等. 并网逆变器频率耦合特性建模及系统稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1421-1432.
NIAN Heng, XU Yunyang, CHEN Liang, et al. Frequency coupling characteristic modeling of grid-connected inverter and system stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1421-1432.
- [19] 聂永辉, 张德伟, 高磊, 等. MMC 型柔性直流输电系统的中高频振荡无源阻尼抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(16): 141-149.
NIE Yonghui, ZHANG Dewei, GAO Lei, et al. Passive damping suppression strategy for medium and high frequency oscillations in MMC type flexible DC transmission systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(16): 141-149.
- [20] 陈磊, 闵勇, 胡伟. 基于振荡能量的低频振荡分析与振荡源定位(一)理论基础与能量流计算[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 22-27, 86.
CHEN Lei, MIN Yong, HU Wei. Low frequency oscillation analysis and oscillation source location based on oscillation energy part one mathematical foundation and energy flow computation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 22-27, 86.
- [21] 陈磊, 陈亦平, 闵勇, 等. 基于振荡能量的低频振荡分析与振荡源定位(二)振荡源定位方法与算例[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 1-5, 27.
CHEN Lei, CHEN Yiping, MIN Yong, et al. Low frequency oscillation analysis and oscillation source location based on oscillation energy part two method for oscillation source location and case studies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 1-5, 27.
- [22] CHEN L, MIN Y, HU W. An energy-based method for location of power system oscillation source[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 828-836.
- [23] 姜涛, 李孟豪, 李雪, 等. 电力系统强迫振荡源的时频域定位方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 98-106.
JIANG Tao, LI Menghao, LI Xue, et al. Time-frequency domain location method for forced oscillation source in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 98-106.
- [24] 姜涛, 高滢, 李雪, 等. 电力系统强迫振荡源定位的耗散能量谱方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(8): 2940-2953.
JIANG Tao, GAO Han, LI Xue, et al. Forced oscillation source location in power system using dissipation energy spectrum[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(8): 2940-2953.
- [25] 姜涛, 高滢, 李筱静, 等. 基于小波耗散能量谱的电力系统强迫振荡源定位[J]. 电工技术学报, 2023, 38(7): 1737-1750.
JIANG Tao, GAO Han, LI Xiaojing, et al. Forced oscillation source location in power system using wavelet dissipation energy spectrum[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(7): 1737-1750.
- [26] 姜涛, 叶楠, 李国庆. 电力系统强迫振荡源定位的时-频域耗散能量流方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(19): 120-128.
JIANG Tao, YE Nan, LI Guoqing. Time-frequency domain dissipation energy flow method for forced oscillation source location in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(19): 120-128.
- [27] MA J, ZHANG Y, SHEN Y, et al. Equipment-level locating of low frequency oscillating source in power system with DFIG integration based on dynamic energy flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 35(5): 3433-3447.
- [28] CHEN A, XIE D, ZHANG D, et al. PI parameter tuning of converters for sub-synchronous interactions existing in grid-connected DFIG wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7): 6345-6355.
- [29] 王渝红, 王馨瑶, 廖建权, 等. 交直流电网宽频振荡产生、辨识及抑制研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(8): 3148-3162.
WANG Yuhong, WANG Xinyao, LIAO Jianquan, et al. Review of generation, identification and suppression of wide-band oscillation in AC-DC power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3148-3162.
- [30] ZHAO Siying, SHAO Changzheng, DING Jinfeng, et al.

- Unreliability tracing of power systems for identifying the most critical risk factors considering mixed uncertainties in wind power output[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2024, 9(5): 96-111.
- [31] GU H, HU Y, JIAO Z, et al. Rapid individual parameter optimization of plug-and-play modules in DC active distribution networks considering virtual impedance[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2024, 15(5): 4522-4536.
- [32] 袁彬, 李辉, 向学位, 等. 考虑调相机饱和和参数的分阶段励磁控制优化策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(15): 42-54.
- YUAN Bin, LI Hui, XIANG Xuewei, et al. Optimization strategy of phased excitation control considering phasemodulator saturation parameters[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(15): 42-54.
- [33] 刘俊磊, 曹娜, 钱峰, 等. 考虑双馈风电机组变流器控制参数的风电场内机组振荡分析[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(10): 42-49.
- LIU Junlei, CAO Na, QIAN Feng, et al. Analysis of unit oscillation in wind farm considering control parameters of converter for DFIG-based wind turbine[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(10): 42-49.
- [34] 曹娜, 赵旭, 于群. 基于暂态能量流的双馈风电机组强迫振荡源定位[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(10): 103-110.
- CAO Na, ZHAO Xun, YU Qun. Forced oscillation source location of doubly-fed wind turbine based on transient energy flow[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(10): 103-110.
- [35] 沈雅琦, 马静, 李鹏冲, 等. 含附加能量支路的虚拟同步双馈风机次同步振荡抑制策略[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(23): 83-93.
- SHEN Yaqi, MA Jing, LI Pengchong, et al. Subsynchronous oscillation suppression strategy for virtual synchronous DFIG-based wind turbines with additional energy branch[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(23): 83-93.
- [36] 张明远, 肖仕武, 田恬, 等. 基于阻抗灵敏度的直驱风电场并网次同步振荡影响因素及参数调整分析[J]. *电网技术*, 2018, 42(9): 2768-2777.
- ZHANG Mingyuan, XIAO Shiwu, TIAN Tian, et al. Analysis of SSO influencing factors and parameter adjustment for grid-connected full-converter wind farm based on impedance sensitivity[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(9): 2768-2777.
- [37] 李生虎, 陈东, 叶剑桥, 等. 基于阻尼系数灵敏度的风光电网动态交互分析与稳定提升方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(16): 150-161.
- LI Shenghu, CHEN Dong, YE Jianqiao, et al. Dynamic interaction analysis and stability improvement method for wind/PV integrated power systems based on damping coefficient sensitivity[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(16): 150-161.
- [38] 欧奕昊, 姜彤, 张一航, 等. 考虑变流器无功调节特性的含高比例分布式光伏配电网电压控制方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(20): 105-118.
- OU Yihao, JIANG Tong, ZHANG Yihang, et al. Voltage regulation method for a distribution network with high-penetration of distributed photovoltaic energy considering a converter's reactive power regulation characteristics[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(20): 105-118.
- [39] 马睿聪, 邹世豪, 曹永吉, 等. 基于灵敏度分析的同步调相机及其励磁系统参数分类辨识方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(4): 26-37.
- MA Ruicong, ZOU Shihao, CAO Yongji, et al. Sensitivity analysis-based classification and identification method of a synchronous condenser and its excitation system parameter[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(4): 26-37.
- [40] 左煜, 李欣然, 宋军英. 应用暂态稳定测度指标的参数灵敏度分析方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2016, 28(12): 77-82.
- ZUO Yu, LI Xinran, SONG Junying. Method for parameter sensitivity analysis of the transient stability measurement index application[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2016, 28(12): 77-82.
- [41] KUNDUR P. *Power system stability and control*[M]. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.
-
- 收稿日期: 2024-12-04; 修回日期: 2025-03-26
- 作者简介:
徐虹伟(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统振荡阻尼抑制; E-mail: xu_hongwei11@163.com
王炜宇(1992—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为新能源电力系统振荡阻尼抑制。E-mail: WYWang@csust.edu.cn
- (编辑 石晋美)