

基于交互电流扩展小干扰互联矩阵的同步发电机-等效异构风电场-高压直流系统低频振荡抑制

李生虎, 陶帝文

(新能源利用与节能安徽省重点实验室(合肥工业大学), 安徽省 合肥市 230009)

Suppressing LFO in Power System With SG, Equivalent Heterogeneous WF, and HVDC Based on Small-signal Interconnection Matrix Extended by Interactive Current

LI Shenghu, TAO Diwen

(Anhui Province Key Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving

(Hefei University of Technology), Hefei 230009, Anhui Province, China)

ABSTRACT: Interaction among synchronous generator (SG), wind farm, and high-voltage direct current (HVDC) adds risk of power system low-frequency oscillation (LFO). Installing the supplementary damping controller (SDC) at the doubly-fed induction generator (DFIG) can improve small-signal stability. Due to system requirement and installation cost, not all DFIGs have SDCs, which yields the heterogeneous wind farm (HWF). This paper proposes the equivalent wind-farm-grid oscillation model for the HWF, and quantifies the impact of interactions among HWF, SG, and HVDC on the LFO. At first, the non-diagonal state submatrices relating to SDCs are derived. With the same control effect of SDCs, equivalent HWF equations are proposed. Based on relation of the outputs of equivalent DFIGs and HWF, the equivalent wind-farm-grid oscillation model of the HWF is proposed. Then, substructure models of the HWF-SG-HVDC are derived, whose output currents are given by the superposition of interaction currents with equipments' terminal voltage and transmission system admittance. The component connection method is used to derive state matrix considering the interactions. Finally, nonlinear interactive matrix is derived, whose F-norm is defined as interactive strength. With elements of interactive matrix as the intermediate variables, sensitivity of critical mode with respect to interactive strength is proposed, and an optimization model to suppress the LFO is derived. The simulation results show that after the optimization, the system interactive strength is reduced by 24.5%, and the damping ratio of critical mode is increased from 0.02 to 0.06.

KEY WORDS: equivalent heterogeneous wind farm;

nonlinear interactive matrix; extended component connection method; interaction sensitivity; high voltage direct current; synchronous generator; low frequency oscillation

摘要: 同步发电机(synchronous generator, SG)、风电场、高压直流(high-voltage direct current, HVDC)间交互,增加了电力系统低频振荡风险。在双馈感应电机(doubly-fed induction generator, DFIG)安装附加阻尼控制器(supplementary damping controller, SDC),可提高小干扰稳定性。由于电网需求和安装成本,并非所有DFIG都配置SDC,从而形成异构风电场(heterogeneous wind farm, HWF)。该文提出HWF场网振荡等效模型,量化HWF-SG-HVDC交互对低频振荡影响。首先,推导SDC对应的非对角状态子矩阵。保持SDC控制效果不变,提出HWF等效方程。根据各等效DFIG输出与HWF输出间关系,建立HWF场网振荡等效模型;其次,建立HWF-SG-HVDC子结构模型。根据设备端电压和输电网络导纳,将子结构输出电流表示为交互电流叠加形式。基于组件连接法,建立计及交互作用的状态矩阵;最后,推导非线性交互矩阵,将其F-范数定义为交互强度。以交互矩阵元素为中间变量,提出关键模态对交互强度的灵敏度,进而建立抑制低频振荡优化算法。仿真结果表明:优化后系统交互强度降低24.5%,关键模态阻尼比由0.02增加至0.06。

关键词: 等效异构风电场;非线性交互矩阵;扩展组件连接法;交互灵敏度;高压直流;同步发电机;低频振荡

0 引言

风电和火电通过高压直流(high-voltage direct current, HVDC)送出,有助于平抑风电出力波动,实现大规模远距离输电。但风电机组和HVDC缺乏惯性,导致同步发电机(synchronous generator, SG)

基金项目: 国家自然科学基金项目(51877061)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51877061).

低频振荡(low-frequency oscillation, LFO)风险增加^[1-2]。2015年,新疆风电场经HVDC送出系统振荡,引起邻近火电脱网^[3-4];2017年,广西永富HVDC发生3 Hz低频振荡,威胁电网稳定运行^[5]。

为提高电网抑制振荡能力,可在双馈感应电机(doubly-fed induction generator, DFIG)安装附加阻尼控制器(supplementary damping controller, SDC)。考虑系统稳定需求和安装成本,并非所有DFIG都要安装SDC,由此形成异构风电场(heterogeneous wind farm, HWF)^[6]。现有同构风电场等值模型,不适合分析HWF对振荡的影响,原因在于:

1) HWF等效建模。风电场单机等效模型容易实现^[7-8],但忽略了机组间交互。文献[9]针对同构风电场拓展等效开环过程,推导DFIG间动态交互。文献[10]对跟网-构网逆变器建立单机等效模型,不能体现异构逆变器间交互。SDC控制目标是远处SG参数,因此,异构风电场存在场内交互和场网交互,不易建立等效模型。

2) 计及交互作用的HWF-SG-HVDC小干扰模型。阻尼转矩法可分析设备或控制器间交互对振荡的影响^[11-12]。文献[13-14]推导风电场、火电和直流间的交互作用。文献[15-16]基于阻尼转矩,研究风电场内阻尼和风电-直流交互作用阻尼,但需将系统简化为单输入单输出系统^[17],不适合HWF-SG-HVDC的多输入多输出结构。输入状态稳定理论以各设备稳定为前提,根据交互信息建立系统稳定判据^[18-19];特征值分析不能描述设备间的交互^[20-21],更不能量化解析交互作用对低频振荡的影响。

3) 计及交互作用的振荡抑制算法。摄动法每次调整1个参数,计算交互指标和振荡模态间的灵敏度^[22-23],不适合调节多个参数。文献[24]分析风电场与直流间的交互作用,研究控制参数对振荡的抑制效果,但未推导参数、交互、振荡间的解析关系。文献[25]建立风电场内交互路径,提出交互指标关于参数的灵敏度,但不适用于存在场内交互和场网交互的HWF。文献[26]基于阻抗灵敏度筛选关键参数,但难以解析设备交互变化、控制策略对设备响应的影响。启发式优化算法^[27-28]不用求解灵敏度,容易实现,但不能量化设备交互与电网稳定间的关系,且计算效率低,容易陷入局部最优,因此,需要建立直接优化算法。

建立HWF等效模型,分析HWF-SG-HVDC交互作用对抑制电网LFO的影响,存在以下难点:

1) 如何推导HWF场网振荡等效模型。有无SDC时,DFIG结构和控制策略不同,难以确定HWF等效模型结构。将控制策略相同的DFIG等效为一台DFIG,无法分析由于异构耦合引起的振荡。异构风电场通过集电网络与主网交互,且SDC将场网振荡信息引入风电机组控制策略,因此,难以描述场内交互和场网交互作用。

2) 如何推导基于HWF、SG、HVDC间交互作用的小干扰稳定模型。HWF、SG、HVDC通过输电网络相连,交互作用由设备传递函数和输电网络共同决定,难以推导交互作用的解析表达。状态矩阵不能描述各设备输入输出在网络中的交互,因此,难以建立交互作用与状态矩阵之间的解析表达。

3) 如何推导交互与振荡模态之间的解析关系,建立优化算法,调整HWF、HVDC参数以削弱交互作用和抑制振荡。灵敏度模型可用于估计参数控制效果,为优化算法提供梯度信息。现有研究推导关键模态对控制参数的灵敏度,但不能分析交互对振荡的影响,因为交互作用不直接出现在动态模型中,因此,很难建立交互灵敏度的解析表达。

本文提出HWF场网振荡等效模型,量化HWF-SG-HVDC交互对低频振荡的影响。首先,推导SDC对应的非对角状态子矩阵。保持SDC控制效果不变,提出HWF等效方程。根据各等效DFIG输出与HWF输出间的关系,建立HWF场网振荡等效模型。其次,建立HWF-SG-HVDC子结构模型。根据设备端电压和输电网络导纳,将子结构输出电流表示为交互电流叠加形式。基于组件连接法,建立计及交互作用的状态矩阵。最后,推导非线性交互矩阵,将其F-范数定义为交互强度。以交互矩阵元素为中间变量,提出关键模态对交互强度的灵敏度,进而建立抑制低频振荡优化算法。

1 HWF-SG-HVDC系统动态建模

风电场中各DFIG通过集电网络连接,经升压变和线路并网。每台DFIG包括风力机、桨距角控制、传动轴、感应电机、变流器控制等^[29](见附录A)。通过在转子侧变流器有功外环安装SDC和DFIG可抑制电网振荡。公共耦合点(point of common coupling, PCC)有功功率 P_{PCC} 包含风电场输出和主网电压响应,后者体现网侧振荡信息,因此,在此取为SDC输入信号。

$$\Delta P_{PCC} = \mathbf{H}_1 \Delta \mathbf{I}_{PCC} + \mathbf{H}_2 \Delta \mathbf{U}_{PCC} \quad (1)$$

式中： ΔP_{PCC} 为 P_{PCC} 的增量； ΔI_{PCC} 、 ΔU_{PCC} 分别为 PCC 电流和电压向量 I_{PCC} 、 U_{PCC} 的增量， $I_{PCC}=[I_{x,PCC}, I_{y,PCC}]^T$ ， $U_{PCC}=[U_{x,PCC}, U_{y,PCC}]^T$ ，下标 x 、 y 表示 x 、 y 轴； H_1 和 H_2 分别为 ΔI_{PCC} 和 ΔU_{PCC} 的系数矩阵。

SDC 传递函数 G_{SDC} 如下：

$$\Delta P_{SDC} = K_{SDC} \left(\frac{sT_w}{1+sT_w} \right) \left(\frac{1+sT_{d1}}{1+sT_{d2}} \right)^{N_{lead-lag}} \Delta P_{PCC} = G_{SDC} \Delta P_{PCC} \quad (2)$$

式中： ΔP_{SDC} 为 SDC 有功功率 P_{SDC} 的增量； K_{SDC} 、 T_w 、 T_{d1} 、 T_{d2} 为控制参数； $N_{lead-lag}$ 为超前滞后环节个数； s 为拉普拉斯算子。

DFIG 状态方程如下：

$$\begin{cases} s\Delta x_{DFIG,i} = A_{DFIG,i}\Delta x_{DFIG,i} + B_{DFIG,i}\Delta U_{DFIG,i} + \eta_i S_{SDC,i}\Delta P_{SDC,i} \\ \Delta I_{DFIG,i} = C_{DFIG,i}\Delta x_{DFIG,i} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\Delta x_{DFIG,i}$ 为第 i 台 DFIG 状态变量 $x_{DFIG,i}$ 的增量； $\Delta I_{DFIG,i}$ 、 $\Delta U_{DFIG,i}$ 分别为其输出电流和输出电压的增量； $A_{DFIG,i}$ 、 $C_{DFIG,i}$ 分别为其状态矩阵和输出系数矩阵； $B_{DFIG,i}$ 为其定子电压与 $x_{DFIG,i}$ 间系数； $S_{SDC,i}$ 为 SDC 输出与 $x_{DFIG,i}$ 间系数； η_i 为配置系数，取 1 表示有 SDC，取 0 表示没有。

当只有部分 DFIG 配置 SDC 时，各 DFIG 控制策略和动态响应存在差异，形成图 1 所示异构风电场。

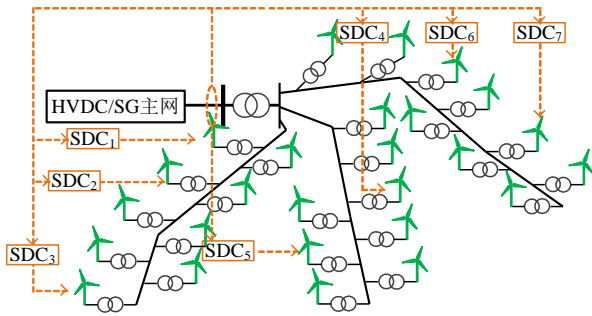


图 1 异构风电场结构

Fig. 1 Configuration of heterogeneous wind farm

联立 DFIG 状态方程，以 PCC 点电压为输入、PCC 电流为输出，建立 HWF 状态方程：

$$\begin{cases} s\Delta x_{HWF} = \{\text{diag}[A_{DFIG,i}] + T_1 \text{diag}[C_{DFIG,i}]\} \cdot \Delta x_{HWF} + [T_2^T \quad T_3^T]^T \Delta U_{PCC} \\ \Delta I_{PCC} = C_{HWF} \Delta x_{HWF} \end{cases} \quad (4)$$

式中： T_1 、 T_2 、 T_3 的解析式见附录 B； $\Delta x_{HWF}=[\Delta x_{DFIG,1}^T, \Delta x_{DFIG,2}^T, \dots, \Delta x_{DFIG,N_{DFIG}}^T]^T$ ， N_{DFIG} 为风电场中 DFIG 个数； $C_{HWF}=[C_{DFIG,1}, C_{DFIG,2}, \dots, C_{DFIG,N_{DFIG}}]$ ；

$\text{diag}[\cdot]$ 表示对角矩阵。

新能源基地打捆输电送端结构中，HWF 和 SG 输出通过 HVDC 外送。图 2 给出修改后 4 机 2 区域测试系统，其中，SG 模型包括励磁器、转子运动方程、电磁暂态等。HVDC 整流侧采用定电流控制^[30]，开环传递函数为 G_{SG} 和 G_{DC} ，详见附录 C。

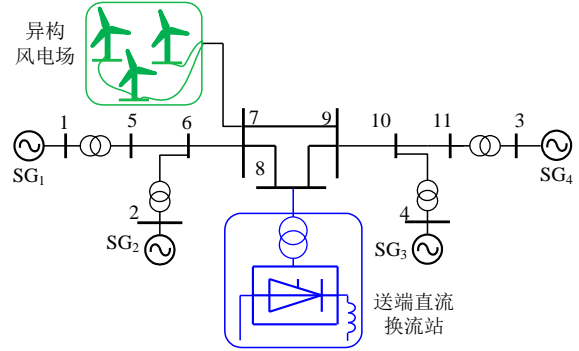


图 2 含 HWF 和 SG 的高压直流送端

Fig. 2 Sending-end with HVDC for HWF and SG

2 HWF 场网交互等效模型

现有风电研究多采用等值模型，将风电场等值为 1 台或少数几台机组，不能保留 DFIG 之间的动态交互。在 HWF 中，SDC 将远端 SG 信息引入 DFIG，DFIG 动态交互对网侧振荡影响较大，因此，需要推导计及交互作用的等效模型。以下根据相似变换原理，推导 HWF 等效模型，将 SDC 等效作用于 1 台 DFIG。进而推导 HWF 等效状态/输出方程，分析场网/场内交互，提出 HWF 场网振荡等效模型。

DFIG 异构控制策略导致 HWF 状态矩阵呈非对角排列，变量耦合增强。SDC 引入状态变量耦合矩阵 $T_4 \text{diag}[C_{DFIG}]$ 。基于解耦标准形式，构造变换矩阵 M ：

$$M = [M_1^T, \dots, M_{N_{DFIG}}^T]^T = \begin{bmatrix} \mathbf{1} \\ \vdots \\ \mathbf{1} \end{bmatrix}_{N_{SDC} \times 1} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{1} & \dots & -\mathbf{1} \\ \mathbf{E}_{(N_{DFIG}-1) \times (N_{DFIG}-1)} & \mathbf{0}_{(N_{DFIG}-N_{SDC}) \times 1} \end{bmatrix}$$

式中： $\mathbf{E}_{(N_{DFIG}-1) \times (N_{DFIG}-1)}$ 为 $(N_{DFIG}-1) \times (N_{DFIG}-1)$ 维单位阵； N_{SDC} 为 SDC 的个数。

对 $T_4 \text{diag}[C_{DFIG}]$ 构造相似变换：

$$A = M^{-1} [T_4 \text{diag}[C_{DFIG}]] M = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \dots & A_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 A 为对角矩阵，元素 $A_i = N_{SDC} C_{DFIG} S_{SDC} G_{SDC} H_1$ 。

由 \mathbf{A} 的矩阵结构可知, SDC 等效作用于一台 DFIG。

为使 SDC 解耦后 HWF 特性不变, 对 HWF 进行整体变换(用 ET 表示), 推导等效状态变量见式(7), 将其状态方程改为式(8), 等效 DFIG 的状态变量仍通过 SDC 耦合。

$$\Delta \mathbf{x}_{\text{HWF}} = \mathbf{M} \Delta \mathbf{x}_{\text{HWF,ET}} \quad (7)$$

$$s(\mathbf{M} \Delta \mathbf{x}_{\text{HWF,ET}}) = \text{diag}[\mathbf{A}_{\text{DFIG}}] \mathbf{M} \Delta \mathbf{x}_{\text{HWF,ET}} + \mathbf{T}_1 \text{diag}[\mathbf{C}_{\text{DFIG}}] \mathbf{M} \Delta \mathbf{x}_{\text{HWF,ET}} + [\mathbf{T}_2^T \quad \mathbf{T}_3^T]^T \Delta \mathbf{U}_{\text{PCC}} \quad (8)$$

式中 $\Delta \mathbf{x}_{\text{HWF,ET}} = [\Delta \mathbf{x}_{\text{ET},1}^T, \Delta \mathbf{x}_{\text{ET},2}^T, \dots, \Delta \mathbf{x}_{\text{ET},i}^T, \dots, \Delta \mathbf{x}_{\text{ET},N_{\text{DFIG}}}^T]^T$, $\Delta \mathbf{x}_{\text{ET},i}$ 为第 i 台等效 DFIG 的状态变量。为解耦 SDC 状态子矩阵, 式(8)两侧左乘 \mathbf{M}^{-1} , 以 \mathbf{U}_{PCC} 为输入, 推导 HWF 等效状态方程如下:

$$s \Delta \mathbf{x}_{\text{HWF,ET}} = \mathbf{A}_{\text{ET}} \Delta \mathbf{x}_{\text{HWF,ET}} + \mathbf{B}_{\text{ET}} \Delta \mathbf{U}_{\text{PCC}} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{A}_{\text{ET}} = \text{diag}[\mathbf{A}_{\text{DFIG}}] + \mathbf{A}$, \mathbf{A}_{ET} 为对角分块矩阵, 前 $(N_{\text{DFIG}} - 1)$ 个对角元素均为 \mathbf{A}_{DFIG} , 第 N_{DFIG} 个对角元素为 $(\mathbf{A}_{\text{DFIG}} + \mathbf{A}_1)$; \mathbf{B}_{ET} 见附录 D, \mathbf{B}_{ET} 为 3 分块的列矩阵。

分析式(9)中状态矩阵、输入矩阵, 得到 3 类等效 DFIG 式(10), 每类等效 DFIG 的数量由 \mathbf{A}_{ET} 、 \mathbf{B}_{ET} 的子矩阵维度确定。

$$\begin{cases} s \Delta \mathbf{x}_{\text{ET},m} = \mathbf{A}_{\text{DFIG}} \Delta \mathbf{x}_{\text{ET},m} + \mathbf{F}_1 \Delta \mathbf{U}_{\text{PCC}} \\ s \Delta \mathbf{x}_{\text{ET},n} = \mathbf{A}_{\text{DFIG}} \Delta \mathbf{x}_{\text{ET},n} + \mathbf{F}_2 \Delta \mathbf{U}_{\text{PCC}} \\ s \Delta \mathbf{x}_{\text{ET},N_{\text{DFIG}}} = (\mathbf{A}_{\text{DFIG}} + \mathbf{A}_1) \Delta \mathbf{x}_{\text{ET},N_{\text{DFIG}}} + \mathbf{F}_3 \Delta \mathbf{U}_{\text{PCC}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $m=1, \dots, N_{\text{SDC}}-1$; $n=N_{\text{SDC}}, \dots, N_{\text{DFIG}}-1$; \mathbf{F}_1 、 \mathbf{F}_2 、 \mathbf{F}_3 为 \mathbf{U}_{PCC} 的输入矩阵。

重新排列输入变量和 SDC 传递函数, 可得:

$$\begin{cases} s \Delta \mathbf{x}_{\text{ET},m} = \mathbf{A}_{\text{DFIG}} \Delta \mathbf{x}_{\text{ET},m} + \kappa_1 \mathbf{B}_{\text{DFIG}} \Delta \mathbf{U}_m \\ s \Delta \mathbf{x}_{\text{ET},n} = \mathbf{A}_{\text{DFIG}} \Delta \mathbf{x}_{\text{ET},n} + \kappa_2 \mathbf{B}_{\text{DFIG}} \Delta \mathbf{U}_n \\ s \Delta \mathbf{x}_{\text{ET},N_{\text{DFIG}}} = \mathbf{A}_{\text{DFIG}} \Delta \mathbf{x}_{\text{ET},N_{\text{DFIG}}} + \kappa_3 \mathbf{B}_{\text{DFIG}} \Delta \mathbf{U}_{N_{\text{DFIG}}} + \mathbf{S}_{\text{SDC}} \mathbf{G}_{\text{SDC}} \Delta \mathbf{P}_{\text{PCC}} \end{cases} \quad (11)$$

通过相似变化将控制策略不同的 DFIG 等效为 3 类, 其状态矩阵均为 \mathbf{A}_{DFIG} , 输入电压为定子电压, 与等效前各 DFIG 输入电压一致; 输入矩阵由 \mathbf{B}_{DFIG} 和等效系数矩阵 κ_1 、 κ_2 、 κ_3 组成。等效后 SDC 配置于第 3 类 DFIG。

为量化等效后各 DFIG 输出响应以及 HWF 场网振荡信息, 对式(4)中输出方程进行变换。等效 DFIG 和 HWF 的输出方程见式(12)和(13)。等效前后 DFIG 输出的对应关系由 \mathbf{M}^{-1} 建立。分析式(13)中 μ_i 可知, 前 2 类等效 DFIG 对主网输出的电流为

0。HWF 输出由第 3 类等效 DFIG 表征, 由等效前所有 DFIG 输出响应叠加得到。

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{I}_{\text{ET},i} = \mathbf{C}_{\text{DFIG}} \Delta \mathbf{x}_{\text{ET},i}, \quad i=1, \dots, N_{\text{DFIG}} \\ \Delta \mathbf{I}_{\text{HWF,ET}} = \text{diag}[\mathbf{C}_{\text{DFIG}}] \Delta \mathbf{x}_{\text{HWF,ET}} = \\ \mathbf{M}^{-1} \text{diag}[\mathbf{C}_{\text{DFIG}}] \Delta \mathbf{x}_{\text{HWF}} = \mathbf{M}^{-1} \Delta \mathbf{I}_{\text{HWF}} \end{cases} \quad (12)$$

$$\Delta \mathbf{I}_{\text{PCC}} = \mathbf{C}_{\text{HWF}} \Delta \mathbf{x}_{\text{HWF}} = \mathbf{C}_{\text{HWF}} \mathbf{M} \Delta \mathbf{x}_{\text{HWF,ET}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{DFIG}}} \mu_i \Delta \mathbf{I}_{\text{ET},i} \quad (13)$$

式中: $\Delta \mathbf{I}_{\text{HWF,ET}} = [\Delta \mathbf{I}_{\text{T}} \quad \Delta \mathbf{I}_{\text{ET},1}, \Delta \mathbf{I}_{\text{T}} \quad \Delta \mathbf{I}_{\text{ET},2}, \dots, \Delta \mathbf{I}_{\text{T}} \quad \Delta \mathbf{I}_{\text{ET},N_{\text{DFIG}}}^T]^T$; μ_i 为 \mathbf{M} 的第 i 列的和, 其中, $\mu_{N_{\text{DFIG}}} = N_{\text{SDC}}$, 其他元素为 0。

结合式(12)、(13), 等效后 HWF 如图 3 所示, 共有 3 类等效 DFIG, 数量分别为 $N_{\text{SDC}}-1$ 、 $N_{\text{DFIG}}-N_{\text{SDC}}$ 和 1。前 2 类 DFIG 对主网输出电流为 0, 描述场内振荡特性。第 3 类 DFIG 装有 SDC, 其输出体现 HWF 对外振荡特性。因此, HWF 场网振荡模型可由第 3 类等效 DFIG 描述, 其开环传递函数记为 \mathbf{G}_{W} 。

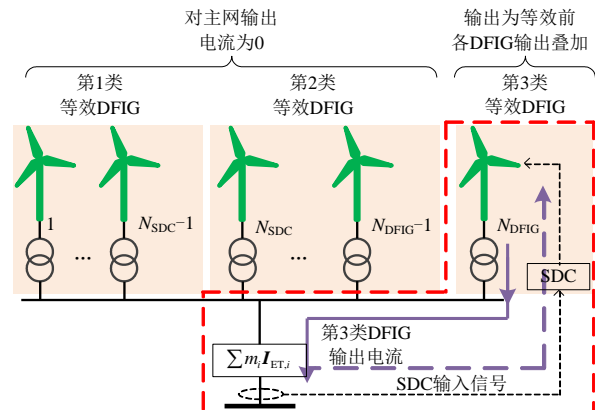


图 3 异构风电场等效模型

Fig. 3 Equivalent model of the HWF

3 基于交互电流的 HWF-SG-HVDC 系统小干扰分析建模

如果能解析 HWF、SG、HVDC 交互, 并将其表达式代入系统状态矩阵, 则可分析交互对系统稳定性的影响。现有单通道分析理论可将两输入两输出系统分解为单输入单输出模型, 但不适于含异构新能源场站的并网系统。特征值分析适用于多输入多输出系统, 不受设备异构特性影响, 但难以分析设备交互对特征值的影响。因此, 下文推导 HWF-SG-HVDC 间交互解析表达, 建立交互与系统状态矩阵间的关系。考虑各设备通过输电网络互联, 其输出电流描述各设备动态响应, 若能在网络方程基础

上分解各设备输出电流，推导各设备输出电流对其他设备的影响，则可通过电流分量描述各设备间的交互作用，提出计及交互作用的小干扰分析模型。

3.1 HWF-SG-HVDC 交互电流推导

HWF、SG、HVDC 状态变量相互独立，输入/输出通过交流电网耦合，因此，建立 HWF-SG-HVDC 子结构，如图 4 所示。设备受扰动时，输出变化通过输电网络影响其他设备输入，进而影响系统响应。由于多输入多输出特性，难以推导设备间交互。本节将各设备输出电流分解为设备输入电压差值与导纳系数乘积的多项式叠加，推导交互电流解析表达。

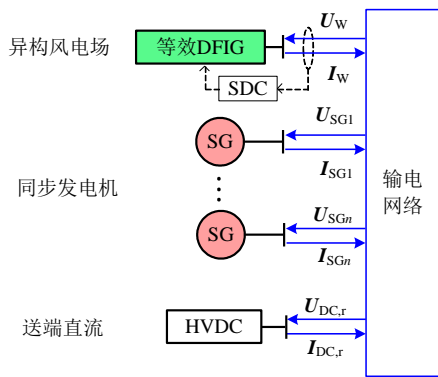


图 4 HWF-SG-HVDC 系统子结构耦合

Fig. 4 Coupling of substructures of the HWF-SG-HVDC

通过矩阵变换，消去 HWF、SG、HVDC 并网节点以外节点电压和注入电流，得到节点电流方程：

$$\Delta I = J \Delta U \quad (14)$$

式中： $\Delta I = [\Delta I_{SG1}^T, \dots, \Delta I_{SGn}^T, \Delta I_{DG,r}^T, \Delta I_W^T]^T$ ， ΔI_{SGn} 、 $\Delta I_{DC,r}$ 、 ΔI_W 分别为第 n 台 SG、高压直流送端节点、风电场输出电流的增量； $\Delta U = [\Delta U_{SG1}^T, \dots, \Delta U_{SGn}^T, \Delta U_{DG,r}^T, \Delta U_W^T]^T$ ， ΔU_{SGn} 、 $\Delta U_{DC,r}$ 、 ΔU_W 分别为第 n 台 SG、高压直流送端节点、风电场端电压的增量。

由式(14)给出第 j 台同步发电机输出电流解析式，将其扩展为由各设备端电压构成的多项式：

$$\begin{aligned} \Delta I_{SG_j} = & \left(\sum_{i=1}^{N_{SG}} J_{SG_j/SG_i} \Delta U_{SG_i} \right) + J_{SG_j/DC} \Delta U_{DC,r} + \\ & J_{SG_j/W} \Delta U_W = \left[\sum_{i=1, i \neq j}^{N_{SG}} J_{SG_j/SG_i} (\Delta U_{SG_i} - \Delta U_{SG_j}) \right] + \\ & J_{SG_j/DC} (\Delta U_{DC,r} - \Delta U_{SG_j}) + J_{SG_j/W} (\Delta U_W - \Delta U_{SG_j}) \end{aligned} \quad (15)$$

式中： J_{SG_j/SG_i} 、 $J_{SG_j/W}$ 、 $J_{SG_j/DC}$ 分别为第 j 台 SG 与第 i 台 SG、风电场、高压直流之间等效网络系数； N_{SG} 为 SG 的数量。解析 SG 之间、SG 与直流、SG 与 HWF 的交互电流，其推导见附录 E。

综上，将 SG 输出电流写成交互电流叠加的形式(16)，其余设备类似推导。2 个设备间交互电流大小相等、方向相反，如图 5 所示。

$$\Delta I_{SG_j} = \left(\sum_{i=1, j \neq i}^{N_{SG}} \Delta I_{SG_j/SG_i} \right) + \Delta I_{SG_j/DC,r} + \Delta I_{SG_j/W} \quad (16)$$

式中 I_{SG_j/SG_i} 、 $I_{SG_j/W}$ 、 $I_{SG_j/DC}$ 分别为第 j 台 SG 与第 i 台 SG、风电场、高压直流之间的交互电流。

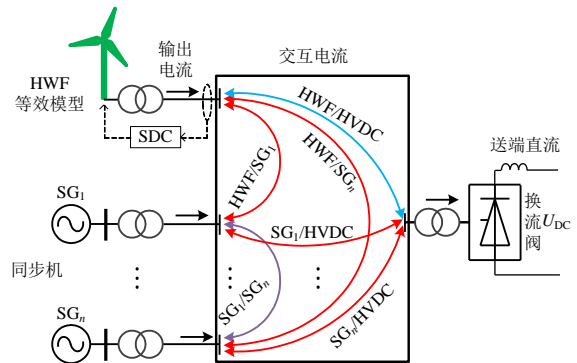


图 5 HWF-SG-HVDC 之间交互电流

Fig. 5 Interactive currents among HWF, SG, and HVDC

为分析设备动态对交互的影响，根据线性化反馈连接特性，将式(14)中 J 的逆矩阵记为 Z ，将 Z 代入式(15)的 $\Delta I_{SG_j/W}$ 解析表达，推导交互电流与各设备输出电流间的解析表达式(17)。其余子结构交互电流类似。

$$\begin{aligned} \Delta I_{SG_j/W} = & J_{SG_j/W} (\Delta U_W - \Delta U_{SG_j}) = \\ & J_{SG_j/W} z_{SG_j/W} [\Delta I_{SG_1}^T \ \dots \ \Delta I_{DC,r}^T \ \Delta I_W^T]^T = \\ & K_{SG_j/W} [\Delta I_{SG_1}^T \ \dots \ \Delta I_{DC,r}^T \ \Delta I_W^T]^T \end{aligned} \quad (17)$$

式中： z 为 Z 的元素； $K_{SG_j/W}$ 为系数矩阵，用于量化各设备输出电流对 $\Delta I_{SG_j/W}$ 的影响。式(17)基于电网导纳矩阵，引入设备输出响应以推导交互电流。实际运行中，各场站参数和出力改变、动态特性变化，将影响交互电流，可重新计算 ΔI 代入式(17)。

3.2 基于交互电流扩展子结构互联矩阵的小干扰分析模型

整体线性化建模难以分析交互作用对电网稳定的影响。基于组件连接法的小干扰分析对各设备分别建模，以电压方程建立各设备互联矩阵，但难以建立交互信息与状态矩阵解析表达。本节以交互电流拓展互联矩阵，推导状态矩阵，求解关键模态特征值。由组件连接法^[31]可知各组件关系为式(18)，系统状态方程为式(19)和(20)，推导见附录 F。

$$\begin{cases} \Delta u = L_1 \Delta y + L_2 \Delta a \\ \Delta b = L_3 \Delta y + L_4 \Delta a \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} s\Delta x = R\Delta x + Y\Delta a \\ \Delta b = O\Delta x + W\Delta a \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} R = A + BL_1(E - DL_1)^{-1}C \\ Y = BL_1(E - DL_1)^{-1}DL_2 + BL_2 \\ O = L_3(E - DL_1)^{-1}C \\ W = L_3(E - DL_1)^{-1}DL_2 + L_4 \end{cases} \quad (20)$$

式中： L_1 — L_4 为连接矩阵； a 和 b 为系统输入和输出； u 和 y 分别为各设备输入和输出； R 、 Y 、 O 、 W 为系统状态方程的系数矩阵； A 、 B 、 C 、 D 为各设备状态方程的系数矩阵。

式(20)由各设备线性化模型及网络矩阵组成，但难以解析各设备间交互对 R 矩阵特征值的影响，因此，引入交互电流，扩展互联矩阵，推导解析交互作用的小干扰分析模型。基于3.1节HWF、SG、HVDC交互电流，扩展组件连接法。将交互电流式(16)代入式(18)，将 y 扩展为多个子矩阵叠加形式(21)，具体见附录G。

$$Z\Delta y = Z(\Delta y_{SG_1/SG_2} + \Delta y_{SG_1/SG_3} + \cdots + \Delta y_{W/DC,r}) \quad (21)$$

根据子结构交互电流，扩展 L_1 见式(22)，记为 L'_1 ，将其代入式(20)的 R 矩阵，推导基于交互作用的系统状态矩阵 R' 。

$$L'_1 = L_{SG_1/SG_2} + L_{SG_1/SG_3} + \cdots + L_{W/DC,r} \quad (22)$$

为描述交互电流对稳定影响，将 $(E - DL'_1)^{-1}$ 按Neumann级数展开为式(23)。显然，系统稳定性受交互电流多阶耦合影响。

$$\begin{aligned} [E - D(L_{SG_1/SG_2} + L_{SG_1/SG_3} + \cdots + L_{W/DC,r})]^{-1} = \\ E + D(L_{SG_1/SG_2} + L_{SG_1/SG_3} + \cdots + L_{W/DC,r}) + \\ [D(L_{SG_1/SG_2} + L_{SG_1/SG_3} + \cdots + L_{W/DC,r})]^2 + \cdots \end{aligned} \quad (23)$$

保留一阶项，得到根据交互电流扩展的 R' 见式(24)，将HWF、SG、HVDC交互作用代入小干扰模型。 R' 含有交互矩阵的一阶项和二阶项，前者体现单个交互影响，后者反映不同交互之间耦合效应。

$$\begin{aligned} R' = A + B(L_{SG_1/SG_2} + L_{SG_1/SG_3} + \cdots + L_{W/DC,r})C + \\ B(L_{SG_1/SG_2} + L_{SG_1/SG_3} + \cdots + L_{W/DC,r}) \cdot \\ D(L_{SG_1/SG_2} + L_{SG_1/SG_3} + \cdots + L_{W/DC,r})C \end{aligned} \quad (24)$$

将式(22)代入式(19)、(20)，求解 Y 、 O' 、 W' ，推导可解析交互信息的小干扰分析模型，具体解析表达见附录G。

4 交互电流对小干扰稳定影响分析及优化

交互电流为非线性耦合作用叠加，通过网络和

线性化反馈特性影响各自动态。交互电流对系统稳定影响体现在2个方面：1)增加了设备间耦合，使得子结构扰动更容易传递到其他子结构，放大外界扰动影响；2)交互电流可能引发新的振荡模式。考虑新能源设备多、系统惯量降低，交互电流易削弱系统阻尼。本节根据等效HWF、SG、HVDC传递函数，推导子结构交互矩阵，将其F-范数定义为交互强度。推导关键模态对交互的灵敏度，提出基于交互灵敏度的低频振荡抑制算法，优化HWF、HVDC控制参数，调整系统交互以抑制LFO。

4.1 基于F-范数的交互强度指标

将SG、HWF、HVDC传递函数代入式(17)，推导交互电流非线性解析表达式(25)，量化各设备动态响应对交互的影响。其展开见附录H，矩阵元素由 K 和 G 组成，前者由输电网络等效阻抗-导纳系数计算，近似不变；后者为场站传递函数，当其动态特性变化时需重新计算。

$$\Delta I_{int} = \Gamma \Delta U \quad (25)$$

式中： ΔI_{int} 为交互电流 I_{int} 的增量； Γ 为交互矩阵。

式(25)中， Γ 为非线性传递函数矩阵，不易直接量化交互强度。F-范数反映系统整体或者局部响应特性，可用于评估输出对输入的响应强度。定义 Γ_{SG_i/SG_j} 、 $\Gamma_{SG_i/HWF}$ 、 $\Gamma_{SG_i/DC}$ 、 $\Gamma_{HWF/DC}$ 的F-范数为子结构交互强度。 Γ_{SG_i/SG_j} 的F-范数见式(26)，其余交互强度指标可类似定义。

$$\begin{aligned} \|\Gamma_{SG_i/SG_j}\|_F = [\sum_{k=1}^{N_{SG}} (\|K_{SG_i/SG_j}^{SG_k} G_{SG_k}\|_F^2 + \\ \|K_{SG_i/SG_j}^{DC} G_{DC}\|_F^2 + \|K_{SG_i/SG_j}^W G_W\|_F^2)]^{1/2} \end{aligned} \quad (26)$$

式中 $K_{SG_i/SG_j}^{SG_k}$ 、 K_{SG_i/SG_j}^{DC} 、 K_{SG_i/SG_j}^W 为系数矩阵，分别用于量化第 k 台SG、HVDC和风电场的输出对于 I_{SG_i/SG_j} 的影响，下标F表示F-范数。

4.2 交互电流对稳定性影响的灵敏度分析

为解析交互对振荡模态的影响，由 R' 确定系统关键模态 λ_c 。由交互强度增量推导 λ_c 增量式(27)，以交互灵敏度描述交互与特征值间关系。但是 λ_c 由 R' 及其左右特征向量确定，其对动态交互的灵敏度不易直接求解。考虑 R' 矩阵包含交互电流，以交互矩阵元素(KG)为中间变量，推导交互灵敏度。式(28)给出 $\partial\lambda_c/\partial\| \Gamma_{SG_i/SG_j} \|_F$ 解析式，相比于以控制参数为中间变量，交互电流中包含设备非线性特征。其余交互灵敏度可类似推导。

$$\Delta\lambda_c = \underbrace{\sum_{i=1}^{N_{SG}-1} \left(\sum_{j=i+1}^{N_{SG}} \frac{\partial\lambda_c}{\partial\|\Gamma_{SG_i/SG_j}\|_F} \Delta\|\Gamma_{SG_i/SG_j}\|_F \right)}_{\text{SG交互对特征值的影响}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{N_{SG}} \frac{\partial\lambda_c}{\partial\|\Gamma_{SG_i/DC}\|_F} \Delta\|\Gamma_{SG_i/DC}\|_F}_{\text{SG与HVDC交互对特征值的影响}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{N_{SG}} \frac{\partial\lambda_c}{\partial\|\Gamma_{SG_i/HWF}\|_F} \Delta\|\Gamma_{SG_i/HWF}\|_F}_{\text{SG与HWF交互对特征值的影响}} + \dots + \underbrace{\frac{\partial\lambda_c}{\partial\|\Gamma_{HWF/DC}\|_F} \Delta\|\Gamma_{HWF/DC}\|_F}_{\text{HWF与HVDC交互对特征值的影响}} \quad (27)$$

$$\frac{\partial\lambda_c}{\partial\|\Gamma_{SG_i/SG_j}\|_F} = \frac{\partial\lambda_c}{\partial(\mathbf{K}_{SG_i/SG_j}^{DC} \mathbf{G}_{DC})} \frac{\partial(\mathbf{K}_{SG_i/SG_j}^{DC} \mathbf{G}_{DC})}{\partial\|\Gamma_{SG_i/SG_j}\|_F} + \frac{\partial\lambda_c}{\partial(\mathbf{K}_{SG_i/SG_j}^W \mathbf{G}_W)} \frac{\partial(\mathbf{K}_{SG_i/SG_j}^W \mathbf{G}_W)}{\partial\|\Gamma_{SG_i/SG_j}\|_F} \quad (28)$$

本文优化 DFIG-SDC 和 HVDC 参数以调整交互作用，因此， \mathbf{G} 取 \mathbf{G}_W 和 \mathbf{G}_{DC} 。由 F-范数灵敏度推导 $\partial(\mathbf{K}\mathbf{G})/\partial\|\Gamma\|_F$ 见式(29)，下标 (m, n) 表示矩阵元素位置。易求矩阵范数对其元素灵敏度，但是不易直接求解矩阵 Γ 对子矩阵范数 $(\mathbf{K}\mathbf{G})$ 的灵敏度，因此选择 $(\mathbf{K}\mathbf{G})$ 中元素为中间变量，分步求导 $(\mathbf{K}\mathbf{G})$ 对各元素灵敏度和 $\|\Gamma\|_F$ 对 $(\mathbf{K}\mathbf{G})$ 各元素灵敏度，然后累加。

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial(\mathbf{K}_{SG_i/SG_j}^W \mathbf{G}_W)}{\partial\|\Gamma_{SG_i/SG_j}\|_F} &= \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 \left\{ \frac{\partial(\mathbf{K}_{SG_i/SG_j}^W \mathbf{G}_W)}{\partial(\mathbf{K}_{SG_i/SG_j}^W \mathbf{G}_W)_{(m,n)}} \cdot \left[\frac{\partial\|\Gamma_{SG_i/SG_j}\|_F}{\partial(\mathbf{K}_{SG_i/SG_j}^W \mathbf{G}_W)_{(m,n)}} \right]^{-1} \right\} \\ \frac{\partial(\mathbf{K}_{SG_i/SG_j}^{DC} \mathbf{G}_{DC})}{\partial\|\Gamma_{SG_i/SG_j}\|_F} &= \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 \left\{ \frac{\partial(\mathbf{K}_{SG_i/SG_j}^{DC} \mathbf{G}_{DC})}{\partial(\mathbf{K}_{SG_i/SG_j}^{DC} \mathbf{G}_{DC})_{(m,n)}} \cdot \left[\frac{\partial\|\Gamma_{SG_i/SG_j}\|_F}{\partial(\mathbf{K}_{SG_i/SG_j}^{DC} \mathbf{G}_{DC})_{(m,n)}} \right]^{-1} \right\} \end{aligned} \right. \quad (29)$$

\mathbf{K} 由输电网络阻抗/导纳系数组成， \mathbf{G}_W 、 \mathbf{G}_{DC} 由 HWF 和 HVDC 的 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{D} 矩阵推导，但二者乘积不直接出现在 \mathbf{R} 中。考虑 \mathbf{R} 包含交互信息， \mathbf{K} 直接出现在 \mathbf{R} 解析式中。因此，以 \mathbf{K} 为中间变量，推导 $\partial\lambda_c/\partial(\mathbf{K}\mathbf{G})$ 如式(30)所示。将式(29)、(30)代入式(28)，分析交互强度对系统稳定性的影响。

$$\frac{\partial\lambda_c}{\partial(\mathbf{K}_{SG_i/SG_j}^W \mathbf{G}_W)} = \frac{\partial\lambda_c}{\partial\mathbf{K}_{SG_i/SG_j}^W} \frac{\partial\mathbf{K}_{SG_i/SG_j}^W}{\partial(\mathbf{K}_{SG_i/SG_j}^W \mathbf{G}_W)} \quad (30)$$

4.3 基于交互电流灵敏度的小干扰稳定优化

通过分析交互对稳定性影响，可优化参数以抑制不利动态反馈，因此，提出基于交互电流灵敏度的优化算法。以关键模态阻尼比 ξ 建立目标函数 f ：

$$f = \xi(\lambda_c) \geq 0.05 \quad (31)$$

考虑 HWF 和 HVDC 控制参数对系统交互的影响，计及 SDC 和 HVDC 控制参数范围，建立如下约束：

$$\mathbf{g} : \begin{cases} K_{SDC}^{\min} \leq K_{SDC} \leq K_{SDC}^{\max} \\ T_{d1}^{\min} \leq T_{d1} \leq T_{d1}^{\max} \\ T_{d2}^{\min} \leq T_{d2} \leq T_{d2}^{\max} \\ K_{p,r}^{\min} \leq K_{p,r} \leq K_{p,r}^{\max} \\ K_{i,r}^{\min} \leq K_{i,r} \leq K_{i,r}^{\max} \end{cases} \quad (32)$$

式中： $K_{p,r}$ 、 $K_{i,r}$ 分别为高压直流定电流控制器的 PI 控制参数；max 和 min 分别表示上、下限。

引入松弛变量 $\boldsymbol{\varepsilon}, \mathbf{l}$ 将不等式约束化为等式约束，建立拉格朗日函数式 \mathfrak{J} ：

$$\mathfrak{J} = f - \mathbf{w}^T (\mathbf{g} - \mathbf{g}^{\min} - \mathbf{l}) - \mathbf{o}^T (\mathbf{g} + \boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{g}^{\max}) - \varphi \sum_{j=1}^r \log(l_j) - \varphi \sum_{j=1}^r \log(\varepsilon_j) \quad (33)$$

式中： \mathbf{w} 和 \mathbf{o} 为拉格朗日乘子； φ 为系数； r 为松弛变量的数量。

采用内点法求解优化上述问题，需要求解目标函数对交互强度指标的 1 阶和 2 阶灵敏度，其中，1 阶灵敏度，可由式(28)中 $\partial\lambda_c/\partial\|\Gamma\|_F$ 得到；2 阶灵敏度 \mathbf{v} 可用 BFGS 方法构造如下：

$$\mathbf{v}_k = \mathbf{v}_{k-1} + \frac{\mathbf{m}_k \mathbf{m}_k^T}{\mathbf{m}_k^T \mathbf{m}_k} - \frac{\mathbf{v}_{k-1} \mathbf{d}_k \mathbf{d}_k^T \mathbf{v}_{k-1}}{\mathbf{d}_k^T \mathbf{v}_{k-1} \mathbf{d}_k} \quad (34)$$

式中： k 为迭代次数； $\mathbf{m}_k = \mathbf{g}_k - \mathbf{g}_{k-1}$ ， \mathbf{g}_k 为目标函数梯度信息； \mathbf{d}_k 为第 k 次迭代结果。具体优化流程如图 6 所示。

4.4 算法优缺点讨论

本文算法的优点在于：1) 通过相似变化将多台 SDC 等效成 1 台 SDC，推导等效附加阻尼结构。所提等效模型保留 HWF 场网特性，适用不同规模风电场及 SDC 配置方案；2) 以交互电流描述各研究对象交互影响。推导关键模态关于交互的灵敏度解析表达，其包含设备非线性特征，减小了参数大范围变化造成的截断误差；3) 所提振荡抑制算法根据灵敏度梯度信息进行参数优化，减少搜索过程随机性，收敛性较好。

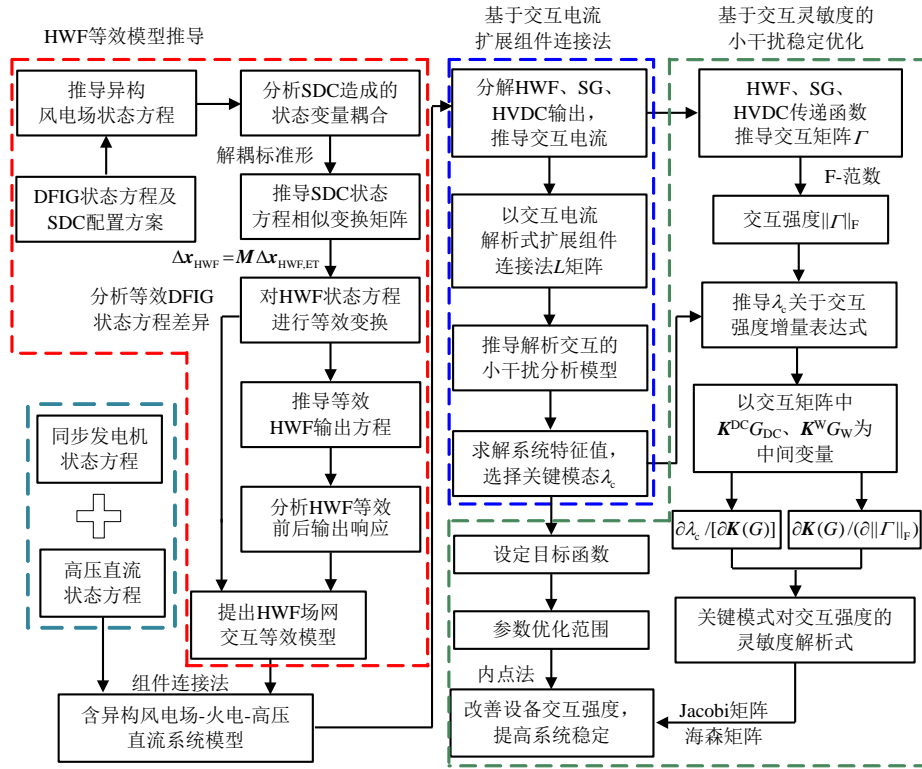


图6 基于交互电流的HWFF-SG-HVDC系统稳定控制优化

Fig. 6 Stability control optimization to power system with HWFF, SG, and HVDC based on interactive current

本文算法不足在于: 1) 对DFIG自身稳定讨论不足, 后者可能引起DFIG脱网, 影响系统稳定性; 2) 由于DFIG位置和出力不同, SDC控制效果存在差异, 应差异化设置各DFIG参数范围; 3) 未考虑通信延迟, 原因在于其时间尺度较短(几~几十ms), 在低频振荡研究(周期大于400ms)中多被忽略。

5 算例分析

测试系统见图2, 送端有4台SG; 异构风电场在节点7, 有100台DFIG。集电网络为辐射状, 共10串, 每串10台中有3台DFIG配置SDC。DFIG单机容量2MW, 风速10m/s。节点8接HVDC送端。DFIG参数见文献[32], HVDC参数见文献[33]。

5.1 异构风电场等效模型验证

为说明SDC对DFIG动态/交互的调制作用, 附录I对比了配置SDC与否的DFIG的输出和交互。对比方案选择详细模型、现有等值思路, 后者将含SDC的DFIG等效为一台, 其他DFIG等效为另一台。图7给出PCC点有功响应曲线, 所提等效模型曲线更接近详细模型。

表1给出小干扰LFO分析结果。与详细模型结果相比, 所提模型所得特征值平均误差为0.42%。

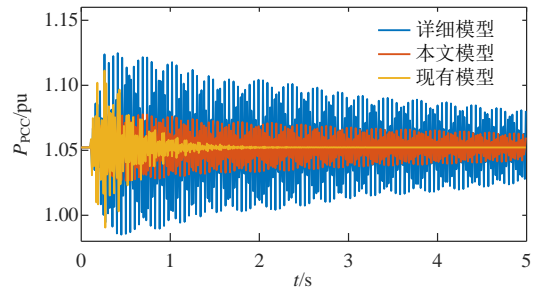


图7 异构风电场PCC有功功率动态响应

Fig. 7 Dynamic response of active power of HWFF's PCC

表1 小干扰分析比较

Table 1 Comparison of the small-signal analysis

详细模型		本文所提模型		特征值 误差/%
λ	ξ	λ	ξ	
-0.201 ± j6.632	0.030	-0.193 ± j6.610	0.029	0.35
-0.138 ± j5.775	0.024	-0.149 ± j5.799	0.026	0.76
-0.135 ± j5.231	0.026	-0.141 ± j5.238	0.027	0.18
-0.059 ± j2.951	0.020	-0.055 ± j2.940	0.019	0.40

选取阻尼比最小模态为关键模态, 误差为0.40%, 验证了等效模型正确性和精确性。

为验证所提模型的适用性, 改变风电场规模及SDC配置方案, 计算振荡模态, 结果见附录J。为验证模型线性化影响, 在SDC、HVDC控制参数大范围变化场景下, 比较线性模型与非线性时域辨识模型, 结果见附录K。进一步讨论详细模型、本文

模型和现有模型的响应特性和精度，见附录 L。

5.2 系统交互作用及小干扰 LFO 分析

图 8 给出各设备间交互强度。可知：SG₄ 与 HVDC 交互最强，指标 $\|\mathbf{I}_F\|$ 为 34.73 pu；SG₁ 与 SG₃ 交互最弱， $\|\mathbf{I}_F\|$ 为 0.11 pu。HWF 与 HVDC 间 $\|\mathbf{I}_F\|$ 为 0.821 pu。4 台 SG 交互强度差异明显，交互最强的是 SG₃ 和 SG₄， $\|\mathbf{I}_F\|$ 为 20.819 4 pu；交互最弱的是 SG₁ 和 SG₃， $\|\mathbf{I}_F\|$ 为 0.113 6 pu。4 台 SG 与 HVDC、HWF 之间交互强度不同，最弱的是 SG₂/HVDC 和 SG₂/HWF， $\|\mathbf{I}_F\|$ 分别为 0.301 6 和 1.138 1 pu；最强的是 SG₄/HVDC 和 SG₄/HWF， $\|\mathbf{I}_F\|$ 分别为 34.734 1 和 27.276 2 pu。SG₁ 和 SG₄ 有功基本相等，但 SG₄ 与 HWF、HVDC 交互强度要高于 SG₁ 与 HWF、HVDC 交互强度。SG₃ 有功小于 SG₂，但 SG₃ 与风、直流交互强度高于后者。交互强度不仅受运行参数影响，还受控制参数和电网结构影响。为验证交互电流模型的适用性，比较不同风速下时域仿真和传递函数得到的交互电流，具体见附录 M。

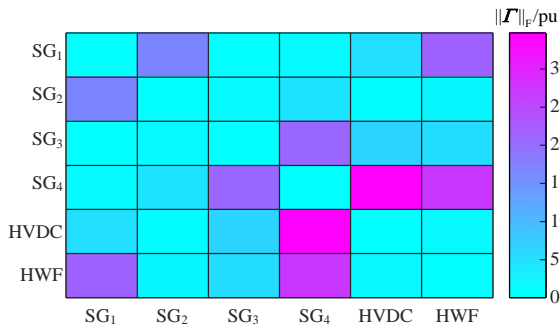


图 8 SG、HVDC、HWF 交互强度

Fig. 8 Interactive strength among SG, HVDC, and HWF

SDC 影响 HWF 振荡特性，改变 HWF、SG、HVDC 间交互。改变 SDC 控制参数，计算各设备交互强度变化，分析关键模态阻尼。令 SDC 增益参数 K_{SDC} 从 5 增加至 11，SG 间交互强度变化如图 9 所示。可知：当 K_{SDC} 增加时，SG 交互强度均先减小后增加；SG₁/SG₂ 交互变化最大值为 -0.026 2 pu，SG₃/SG₄ 交互变化最大值为 -0.028 9 pu，SG₁/SG₃ 交互变化较小，为 -1.189×10^{-4} pu。

附录 N 给出 K_{SDC} 变化时，HVDC/SG 及 HWF/SG 之间交互变化。图 9 中 SG 间交互指标变化量约为附录 N 中 HVDC/SG、HWF/SG 交互指标变化量的 50%，因此，改变单一参数难以有效调整交互。为讨论不同设备引起的交互变化及其对系统稳定性影响，附录 O 分析了直流定电流控制参数 $K_{p,r}$ 从 0.598 9 增加到 1.598 9 时的系统交互及特征

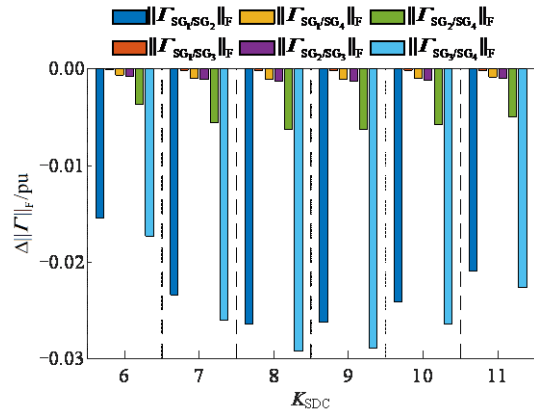


图 9 不同 DFIG-SDC 参数下 SG 交互强度
Fig. 9 Interactive strength among the SGs with different parameters of the DFIG-SDC

值变化。

5.3 特征值对交互电流灵敏度分析

为量化交互灵敏度，求解 $\partial\|\mathbf{I}_F\|/\partial(KG)$ ，要通过计算其 F-范数进行分析。图 10 给出 $\|\mathbf{I}_F\|$ 关于交互矩阵元素 $K^{DC}G_{DC}$ 、 $K^W G_W$ 的灵敏度对比。对于 SG 交互强度， $\partial\|\mathbf{I}_F\|/\partial(K^{DC}G_{DC})$ 差异明显，在 SG₃/SG₄ 位置最大，数值为 298.8； $\partial\|\mathbf{I}_{SG1/SG2}\|/\partial(K^{DC}G_{DC})$ 最小，为 29.1。 $\partial\|\mathbf{I}_F\|/\partial(K^W G_W)$ 数值较低，HWF 对 SG 之间的交互强度影响较小。 $\partial\|\mathbf{I}_{SG3/SG4}\|/\partial(KG)$ 灵敏度最大，对 $K^{DC}G_{DC}$ 和 $K^W G_W$ 灵敏度分别为 298.8 和 299。 $\partial\|\mathbf{I}_{SG2/DC}\|/\partial(K^{DC}G_{DC})$ 小于 $\partial\|\mathbf{I}_{SG2/DC}\|/\partial(K^W G_W)$ ，分别为 44.039 和 48.280。HWF、HVDC 对 SG 之间交互强度的影响受自身参数和外部设备特性影响。相比 $K^W G_W$ ， $K^{DC}G_{DC}$ 对 SG 之间交互影响更大。

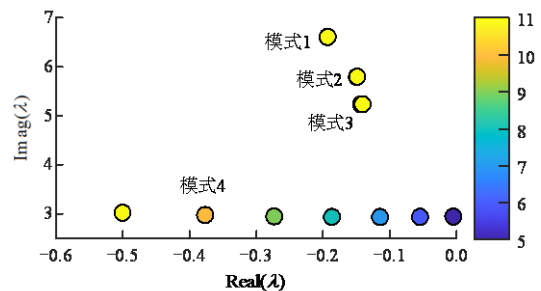


图 10 交互强度指标对交互电流矩阵元素的灵敏度
Fig. 10 Sensitivities of interactive strength with respect to the elements of the matrix of interactive currents

图 11 给出 λ_c 对不同设备间交互强度的灵敏度绝对值。 λ_c 对 SG₁/SG₃、SG₂/SG₃ 交互的灵敏度绝对值分别为 1.1×10^{-5} 和 1.228×10^{-5} ，因此，SG₂/SG₃ 交互对 λ_c 影响最大。 λ_c 对 SG₁/SG₂、SG₁/HVDC、SG₁/HWF 交互的灵敏度绝对值较低。 λ_c 对 SG₁/SG₄ 交互的灵敏度为 8.928×10^{-6} ，高于其对 SG₁/HVDC 和 SG₁/HWF 交互灵敏度，但低于 SG₂/SG₃ 的灵敏度。

通过参与因子分析, 可知 λ_c 与 SG_2 、 SG_3 强相关。

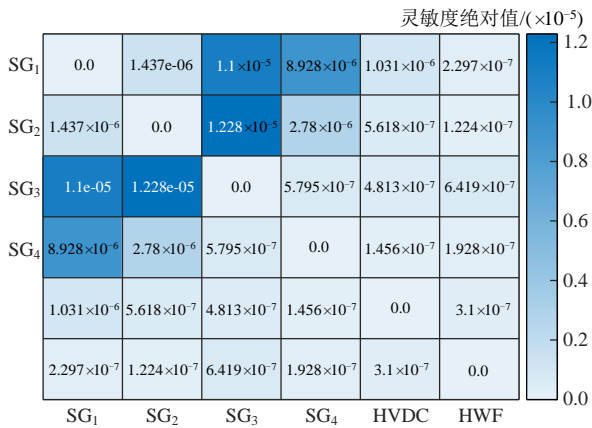


图 11 关键模式特征值对交互强度的灵敏度绝对值

Fig. 11 Absolute values of sensitivities of the eigenvalue of the critical mode with respect to the interactive strength

λ_c 对HWF/ SG_1 、HWF/ SG_2 、HWF/ SG_3 、HWF/ SG_4 交互的灵敏度值在 10^{-7} 数量级, 低于 λ_c 对SG间交互的灵敏度。HWF交互灵敏度较小, 数量级均为 10^{-7} , 对系统稳定性影响有限。 λ_c 对HVDC/SG交互的灵敏度数值整体高于其对HWF/SG交互的灵敏度。 SG_2/SG_3 之间交互强度对 λ_c 最敏感。可调整 $K^W G_W$ 和 $K^{DC} G_{DC}$ 改变 SG_2 、 SG_3 交互强度, 抑制低频振荡。

5.4 基于交互优化的低频振荡阻尼分析

采用内点法优化交互强度。表 2 给出优化前后SG、HWF及HVDC之间交互强度和关键模式对比结果。优化后各交互强度均减小, λ_c 实部减小, 远离虚轴, 振荡被抑制。系统交互强度平均减小24.5%, $\|I_{SG2/SG3}\|_F$ 减小23.7%、 $\|I_{SG2/DC}\|_F$ 减小29.5%、 $\|I_{SG3/DC}\|_F$ 减小24.6%、 $\|I_{DC/HWF}\|_F$ 减小比例最小, 为12.69%。

表 2 优化前后交互强度和关键模式对比
Table 2 Comparison of interactive strength and critical mode without and with the optimization

参数	数值/pu		参数	数值/pu	
	优化前	优化后		优化前	优化后
$\ I_{SG1/SG2}\ _F$	16.5889	12.5727	$\ I_{SG2/HWF}\ _F$	1.0945	0.7380
$\ I_{SG1/SG3}\ _F$	0.1136	0.0849	$\ I_{SG3/SG4}\ _F$	20.8194	15.7290
$\ I_{SG1/SG4}\ _F$	0.6249	0.4749	$\ I_{SG3/DC}\ _F$	5.8640	4.4226
$\ I_{SG1/DC}\ _F$	4.4601	3.3540	$\ I_{SG3/HWF}\ _F$	4.6074	3.4906
$\ I_{SG1/HWF}\ _F$	21.3102	16.0742	$\ I_{SG4/DC}\ _F$	34.6471	26.1551
$\ I_{SG2/SG3}\ _F$	0.6564	0.5008	$\ I_{SG4/HWF}\ _F$	27.2085	20.5805
$\ I_{SG2/SG4}\ _F$	3.9089	2.9656	$\ I_{DC/HWF}\ _F$	0.8385	0.7321
$\ I_{SG2/DC}\ _F$	0.2921	0.2060	λ_c	-0.0549 ±	-0.1868 ±
				j2.9400	j2.9388

为验证交互优化对功角振荡的影响, 设节点 9

在 2.1 s 时发生三相短路故障, 2.2 s 故障切除。优化前后功角差 $\delta_{2,4}$ 、 $\delta_{3,4}$, 如图 12 所示。优化后功角振荡减弱, 振幅优化比例分别为 22%和 18%, 功角稳定提升。

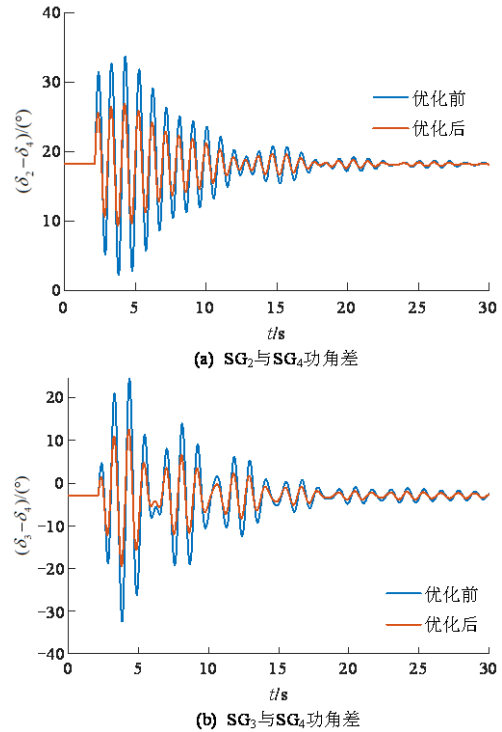


图 12 交互优化对功角振荡的阻尼效果

Fig. 12 Damping effect on the power angle oscillation with optimization to the interactive strength

为量化所提低频振荡抑制算法的响应时间, 分别从等效HWF稳定分析时间和所提振荡抑制算法计算时间进行比较, 具体结果见附录 P。

6 结论

本文建立了SDC状态方程解耦矩阵, 重构异构风电场线性化模型, 提出了HWF场网振荡等效模型。提出HWF-SG-HVDC子结构交互电流解析表达, 拓展小干扰分析模型。基于传递函数定义交互强度指标, 推导了特征值关于交互强度的灵敏度解析表达, 提出了基于灵敏度的低频振荡抑制优化算法。得到以下结论:

- 1) 本文所提HWF等效模型适用于不同规模的异构风电场和不同的SDC配置方案, 其特征值平均误差为0.6%, 暂态响应平均误差为3.5%。
- 2) HVDC对系统交互强度有较大影响。HWF对系统交互强度有所影响, 但相对较小。关键模式对HVDC/SG交互灵敏度总和, 大于其对HWF/SG的交互灵敏度。HWF/ SG_3 、HWF/ SG_4 的交互对关键模式的影响, 大于HVDC/ SG_3 、HVDC/ SG_4 交互对

关键模式的影响。

3) 增大高压直流控制参数 $K_{p,r}$, 可削弱 SG 间交互强度。HWF 与 SG 之间交互, 受 HVDC 控制参数影响。随 $K_{p,r}$ 增大, HWF 与 SG 交互强度减弱。

4) 通过所提优化算法, 系统交互强度平均减小 24.5%, $\|I_{DC/HWF}\|_F$ 减小 12.69%、 $\|I_{SG/SG}\|_F$ 平均减小 24.3%、 $\|I_{DC/SG}\|_F$ 平均减小 25.8%、 $\|I_{HWF/SG}\|_F$ 平均减小 26.4%, 关键模式阻尼比由 0.02 调整为 0.06。

后续研究可关注 SDC 对自身及主网稳定性影响, 确定 SDC 配置方案; 考虑风电场与主网阻尼控制协调, 减小前者内部振荡风险。本文研究成果可用于不同类型、不同控制特征的异构新能源场站(如双馈/直驱混合风电场、风电机组含虚拟同步机与否的混合风电场、风光储一体化场站)等效建模和参与电网稳定控制。

参考文献

- [1] 于琳, 孙华东, 徐式蕴, 等. 电力电子设备接入电压支撑强度量化评估指标综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 499-514.
YU Lin, SUN Huadong, XU Shiyun, et al. Overview of strength quantification indexes of power system with power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 499-514(in Chinese).
- [2] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4720-4731.
MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4731(in Chinese).
- [3] 肖云涛, 李光辉, 王伟胜, 等. 新能源基地经 LCC-HVDC 送出系统振荡机理分析与抑制策略(三): 振荡抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(12): 4748-4758.
XIAO Yuntao, LI Guanghui, WANG Weisheng, et al. Oscillation mechanism analysis and suppression strategy of renewable energy base connected into LCC-HVDC (Part III): Oscillation suppression strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(12): 4748-4758(in Chinese).
- [4] WANG Miaoyuan, CHEN Yu, DONG Xiaoliang, et al. Impedance modeling and stability analysis of DFIG wind farm with LCC-HVDC transmission[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2022, 12(1): 7-19.
- [5] LEI Xinyu, WANG Wei, WEI Zheng, et al. Analysis and prospects of status of broadband oscillation and suppression methods for new energy stations connected to power system[C]//Proceedings of the 7th Purple Mountain Forum on Smart Grid Protection and Control(PMF2022). Singapore: Springer, 2023.
- [6] LI Shenghu, TAO Diwen. Dynamic equivalence to heterogeneous wind farm while preserving interaction among DFIGs based on interactive currents and their sensitivities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2025, 40(5): 4261-4277.
- [7] LI Shenghu, YE Jianqiao. Analytical evaluation to power system oscillation damping capability of DFIG-POD based on path damping torque analysis[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2025, 16(1): 496-511.
- [8] YUAN Liang, MENG Ke, HUANG Jingjie, et al. Investigating subsynchronous oscillations caused by interactions between PMSG-based wind farms and weak AC systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 115: 105477.
- [9] 叶剑桥, 李生虎, 齐楠, 等. 基于拓展等效开环过程的多 DFIG 风电场振荡模式交互路径分析[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(3): 973-985.
YE Jianqiao, LI Shenghu, QI Nan, et al. Analysis to interaction paths of oscillation modes in multi-DFIG wind farm based on extended effective open-loop process[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(3): 973-985(in Chinese).
- [10] 张加卿, 郭春义. 跟网-构网光伏与火电打捆经传统直流外送系统次同步扭振机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(20): 7962-7974.
ZHANG Jiaqing, GUO Chunyi. Research on subsynchronous torsional vibration mechanism for grid-following and grid-forming photovoltaic and thermal power bundling system via LCC-HVDC transmission [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(20): 7962-7974(in Chinese).
- [11] GAO Benfeng, DENG Pengcheng, WANG Yi, et al. Evaluation of damping of subsynchronous interaction between direct-drive wind farm and LCC-HVDC based on the damping path analysis[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 144: 108532.
- [12] 付强, 杜文娟, 王海风. 交直流混联电力系统小干扰稳定性分析综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2829-2840.
FU Qiang, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Small signal stability analysis of AC/DC hybrid power system: an

- overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2829-2840(in Chinese).
- [13] 郭春义, 刘晓颖, 吕乃航, 等. 风火打捆传统直流外送系统中控制环节对轴系-控制交互模式的影响机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(9): 3463-3475.
GUO Chunyi, LIU Xiaoying, LYU Naihang, et al. Research on the influence mechanism of control loops on shaft-control interactive mode for wind-thermal-bundled power transmission through LCC-HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(9): 3463-3475(in Chinese).
- [14] ZHENG Liwen, MA Shiyang. Damping characteristic analysis and optimization of wind-thermal-bundled power transmission by LCC-HVDC systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2024, 12(1): 299-312.
- [15] ZHANG Meiqing, YUAN Xiaoming, HU Jiabing. Mechanism analysis of subsynchronous torsional interaction with PMSG-based WTs and LCC-HVDC [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(2): 1708-1724.
- [16] 高本锋, 刘毅, 李蕴红, 等. 直驱风电场与 LCC-HVDC 次同步交互作用的扰动传递路径及阻尼特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1713-1728.
GAO Benfeng, LIU Yi, LI Yunhong, et al. Analysis on disturbance transfer path and damping characteristics of sub-synchronous interaction between D-PMSG-based wind farm and LCC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1713-1728(in Chinese).
- [17] 高本锋, 刘洋洋, 王潇. 基于路径分析法的直驱风电场经柔直并网系统次同步振荡机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6646-6659.
GAO Benfeng, LIU Yangyang, WANG Xiao. Subsynchronous oscillation mechanism analysis of direct-drive wind farm with VSC-HVDC system based on path analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6646-6659(in Chinese).
- [18] 刘宿城, 褚勇智, 刁吉祥, 等. 基于输入-状态稳定条件的直流微电网集群分布式大信号稳定性[J]. 电工技术学报, 2025, 40(2): 544-558, 573.
LIU Sucheng, CHU Yongzhi, DIAO Jixiang, et al. Distributed large signal stability based on input-to-state stability conditions for DC microgrid clusters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(2): 544-558, 573(in Chinese).
- [19] MIRABILIO M, LOVINE A, DE SANTIS E, et al. Scalable mesh stability of nonlinear interconnected systems[J]. IEEE Control Systems Letters, 2022, 6: 968-973.
- [20] 高本锋, 董涵泉, 卢亚军, 等. 直驱风电场并网对直流输电引起的火电机组轴系扭振影响机理分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(7): 1971-1984.
GAO Benfeng, DONG Hanxiao, LU Yajun, et al. Mechanism analysis of the influence of direct drive wind farm integration on SSTI of thermal generator caused by LCC-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(7): 1971-1984(in Chinese).
- [21] 高本锋, 崔意婵, 李蕴红, 等. D-PMSG 经 LCC-HVDC 送出系统的次同步振荡特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2084-2095.
GAO Benfeng, CUI Yichan, LI Yunhong, et al. Analysis of subsynchronous oscillation characteristics of D-PMSG integrated with LCC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2084-2095(in Chinese).
- [22] 赵薇, 郭春义, 杨硕. 混合级联直流输电系统整流/逆变不同控制回路动态交互作用与稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(1): 231-243.
ZHAO Wei, GUO Chunyi, YANG Shuo. Research on dynamic interaction and stability of rectifier/inverter control loop in hybrid cascade HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(1): 231-243(in Chinese).
- [23] 周一辰, 李沙, 李永刚, 等. 基于嵌合转矩法的虚拟同步机多回路保结构稳定分析[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 733-749.
ZHOU Yichen, LI Sha, LI Yonggang, et al. Stability analysis of multi-loop guarantee structure of virtual synchronous machine based on chimeric torque method [J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 733-749(in Chinese).
- [24] 王一凡, 赵成勇, 郭春义. 直驱风电场与柔直互联系统的传递函数模型及其低频振荡稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1485-1497.
WANG Yifan, ZHAO Chengyong, GUO Chunyi. Transfer function model and low-frequency stability analysis for PMSG-based wind farm interconnected with flexible-誉感 HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1485-1497(in Chinese).
- [25] LI Shenghu, YE Jianqiao. EEOP-based interaction path differentiation and control parameter optimization to mitigate oscillation in multi-DFIG wind farm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(6): 7403-7416.
- [26] 刘其辉, 田若菡, 史淳, 等. 基于变风况阻抗优化重塑的双馈风电机组 SSO 抑制策略[J]. 太阳能学报, 2023,

- 44(5): 349-359.
- LI Qihui, TIAN Ruohan, SHI Chun, et al. SSO mitigation of wind turbine using DFIG based on impedance optimization reshaping under variable wind conditions [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(5): 349-359(in Chinese).
- [27] ZHANG Yang, YANG Yongheng, CHEN Xin, et al. Intelligent parameter design-based impedance optimization of STATCOM to mitigate resonance in wind farms[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(3): 3201-3215.
- [28] ZHANG Zuan, LIANG Yanchang, ZHAO Xiaowei. Adaptive inter-area power oscillation damping from offshore wind farm and MMC-HVDC using deep reinforcement learning[J]. *Renewable Energy*, 2024, 224: 120164.
- [29] LI Shenghu, FANG Tianyang, ZHANG Hao, et al. Damping the electromechanical oscillation modes (EOMs) in DFIG-integrated power systems with sensitivity analysis and optimization to outputs of SGs[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 135: 107565.
- [30] 傅闯, 叶运铭, 汪娟娟, 等. 基于 D 分割法的 LCC-HVDC 系统控制器参数整定方法[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(13): 139-150.
- FU Chuang, YE Yunming, WANG Juanjuan, et al. D-partition method based controller parameter setting method for LCC-HVDC system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(13): 139-150(in Chinese).
- [31] YANG Dongsheng, WANG Xiongfei. Unified modular state-space modeling of grid-connected voltage-source converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(9): 9700-9715.
- [32] LI Shenghu, TAO Diwen. Optimization to controllability measure of the POD in DFIG-integrated power systems to improve small-signal stability margin considering the impact of pre-fault slip[J]. *Electrical Engineering*, 2024, 106(5): 5937-5952.
- [33] 王晓辉, 陈庆军, 张彦涛, 等. 特高压直流分层接入的稳定性模态分析方法[J]. *电网技术*, 2018, 42(9): 2869-2875.
- WANG Xiaohui, CHEN Qingjun, ZHANG Yantao, et al. Modal analysis on system stability of UHVDC hierarchical connection to AC grid[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(9): 2869-2875(in Chinese).

附录

<http://ntps.epri.sgcc.com.cn/djgxcb/CN/10.13334/j.0258-8013.pcsee.242323>



李生虎

在线出版日期: 2025-08-20。

收稿日期: 2024-10-09。

作者简介:

李生虎(1974), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为风电并网电力系统分析与控制、特高压直流和柔性交流输电、电力系统规划与可靠性, shenghuli@hfut.edu.cn;

陶帝文(1995), 男, 博士研究生, 研究方向为风电并网和交直流并网电力系统稳定分析与控制, taodiwen@mail.hfut.edu.cn。

(责任编辑 李泽荣)