

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231394

# 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

李生虎<sup>1,2</sup>, 陈东<sup>1,2</sup>, 叶剑桥<sup>1,2</sup>, 齐楠<sup>1,2</sup>, 徐志雄<sup>1,2</sup>

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 新能源利用与节能安徽省  
重点实验室, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 风电、光伏与同步发电机(synchronous generator, SG)间动态交互, 影响电力系统稳定性。基于阻尼系数灵敏度, 研究了风光并网电力系统动态交互过程与稳定提升方法。首先, 基于线性化表达验证了风光机组对 SG 暂态响应存在影响。其次, 建立电力系统闭环传递函数模型, 分析风光机组与 SG 间的动态交互过程。新定义风光机组向 SG 提供阻尼系数, 以量化风光并网对电网振荡的影响。然后, 提出阻尼系数对风光出力灵敏度的解析表达, 作为内点法梯度信息, 调整风光出力以改善电网稳定性。最后, 仿真验证表明, 调节风电(光伏)出力可提高光伏(风电)场站相关危险模式的阻尼, 改善电网稳定性。以灵敏度作为梯度信息, 可提高优化算法的计算效率与准确性, 优化前后功角平均振幅分别为 25.1589°、18.0165°。

**关键词:** 风光并网; 低频振荡; 阻尼转矩; 传递函数; 灵敏度

## Dynamic interaction analysis and stability improvement method for wind/PV integrated power systems based on damping coefficient sensitivity

LI Shenghu<sup>1,2</sup>, CHEN Dong<sup>1,2</sup>, YE Jianqiao<sup>1,2</sup>, QI Nan<sup>1,2</sup>, XU Zhixiong<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Anhui Province Key Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Dynamic interactions among wind power, photovoltaic (PV), and synchronous generators (SG) affect power system stability. The dynamic interaction mechanism and stabilization enhancement method in the wind/PV integrated power system are studied based on the sensitivity of the damping coefficient. First, the impact of the doubly-fed induction generator (DFIG) and PV generators on the transient response to the SG is determined using linearized expression. Secondly, the closed-loop transfer function of the DFIG/PV integrated power system is derived to analyze the dynamic interaction process among the DFIG, PV, and SG. The damping coefficients provided by DFIG and PV to SG are newly derived to quantify the impact of the DFIG/PV on power system oscillation. Then, an analytical expression for the sensitivities of the damping coefficients to the output of the DFIG/PV is proposed. It is used as the gradient information of the interior point method to improve power system stability by adjusting the outputs of the DFIG/PV. Finally, the simulation results verify that adjusting the output of DFIG/PV can improve the damping of dangerous modes of PV/DFIG and the stability of the system. The calculation efficiency and accuracy of the optimization method with sensitivity as gradient information are verified. The average amplitudes of the power angle with and without optimization are 25.1589° and 18.0165° respectively.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877061).

**Key words:** wind/PV integrated power system; low-frequency oscillation; damping torque; transfer function; sensitivity

## 0 引言

双馈感应发电机(doubly-fed induction generator,

DFIG)与光伏发电具有时间互补性<sup>[1-3]</sup>, 因此现有研究多针对电网调度<sup>[4-6]</sup>。随着新能源容量增加, 新能源机组间、新能源机组与同步发电机(synchronous generator, SG)间动态交互<sup>[7-8]</sup>, 可能引发振荡<sup>[9-11]</sup>, 威胁电网稳定运行<sup>[12]</sup>。如 2014 年德国高压直流和

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877061)

风电场相互作用引发的海上风电场次同步振荡<sup>[13]</sup>, 2019年台州、温州由光伏发电引起的低频振荡<sup>[14]</sup>。

电力系统分析方法包括阻抗分析、模式分析等。阻抗分析适合描述快速电磁暂态, 不适合描述机电暂态<sup>[15-17]</sup>。模式分析可分析状态变量参与振荡的程度, 但是不易反映振荡路径和动态交互机理<sup>[18-20]</sup>。由模式分析或传递函数得到阻尼转矩, 可以量化阻尼特性, 揭示交互作用过程<sup>[21-22]</sup>。文献[23]建立了直驱风场与柔直间的传递函数, 详尽描述了两者间的相互作用, 研究了不同风电出力对互联系统稳定性的影响。文献[24]利用阻尼路径分析了直驱风场与高压直流间相互作用引发的次同步振荡, 采用摄动法调节参数验证交互。文献[25]利用阻尼转矩分析虚拟同步发电机稳定影响因素。文献[26]利用净阻尼法分析了DFIG场站内交互、DFIG台数与内环参数对SG的影响。文献[27]将复转矩系数法推广至多变量系统, 从阻尼角度描述了多风电场-多机系统次同步振荡的物理意义, 关注风电场引发的次同步振荡失稳。文献[28]通过调节风光输入状态、控制参数观察系统特征值变化。文献[29]定义阻抗灵敏度以量化PI参数对系统稳定性的影响。上述研究只针对风电场站或光伏场站并网, 忽略了风光场站间交互作用及其对SG的影响, 未对风电出力对系统稳定性影响提供依据。针对不同新能源场站间的交互作用, 需要建立分析风光出力对系统稳定性影响的风光并网闭环交互模型。

传递函数可展示中间环节/参数间动态交互及其对电网稳定的影响, 其阻尼系数反映了SG与风光机组间的动态交互、量化了风光出力对阻尼系数的影响, 有助于提升风光并网系统稳定性, 其研究难点在于:

1) DFIG(PV)出力不仅影响DFIG(PV)场站稳定, 还影响PV(DFIG)场站稳定, 二者间存在动态交互, 且与SG动态交互。现有交互分析多针对单能源场站, 需要推导多场站输入的闭环模型, 分析多类型机组间交互作用对电网稳定性的影响。

2) 传统阻尼系数灵敏度主要针对PI控制参数<sup>[30]</sup>, 这些参数不影响潮流初值, 且出现在状态矩阵中, 因此不难求解振荡模式对其的灵敏度。风光机组出力改变影响潮流分布和传递函数, 不易建立阻尼系数与风光出力间灵敏度的解析表达。

本文针对风光并网的电力系统, 提出基于阻尼系数灵敏度的稳定提升方法。首先建立含风光机组的电力系统闭环传递函数模型, 分析风光机组与SG间的动态交互过程, 证实风光机组对SG暂态存在

影响。其次计算风光机组向SG提供的阻尼系数, 量化风光并网对电网振荡的影响。然后判断阻尼系数表达式中受风光出力影响的元素, 建立其与电压幅值、相角的关系式, 通过潮流方程获取其对风光出力的灵敏度。最终推导得到阻尼系数对风光出力灵敏度的解析表达, 作为内点法梯度信息, 以调整风光出力来改善电网稳定性。仿真结果验证了所提算法的有效性。

## 1 风光机组对SG暂态的影响

### 1.1 风光机组动态模型线性化

DFIG控制模型见图1, 由桨距角控制、传动轴、感应电机、背靠背变流器及直流电容组成, 其线性化模型为

$$\begin{cases} p\Delta X_w = A_w \Delta X_w + b_w^v \Delta V_w + b_w^\theta \Delta \theta_w \\ \Delta P_w = c_w^p \Delta X_w + d_w^{pv} \Delta V_w + d_w^{p\theta} \Delta \theta_w \\ \Delta Q_w = c_w^q \Delta X_w + d_w^{qv} \Delta V_w + d_w^{q\theta} \Delta \theta_w \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $p$  为微分算子;  $\Delta X_w$  为DFIG状态变量变化量, 包括桨距角和其参考值  $\beta$ 、 $\beta^*$ , 风力机和感应电机转速  $s_t$ 、 $s_r$ , 扭转角  $\gamma$ , 定子电流  $I_{sd}$ 、 $I_{sq}$ , RSC、GSC 电流和其参考值  $I_{rd}^*$ 、 $I_{rq}^*$ 、 $I_{gd}^*$ 、 $I_{gq}^*$ 、 $I_{gd}^*$ 、 $I_{gq}^*$ , RSC 和 GSC 输出电压  $V_{rd}$ 、 $V_{rq}$ 、 $V_{gd}$ 、 $V_{gq}$  以及直流电压  $V_{dc}$ ;  $\Delta P_w$ 、 $\Delta Q_w$  分别为 DFIG 有功、无功变化量;  $\Delta V_w$ 、 $\Delta \theta_w$  分别为 DFIG 电压幅值、相角变化量;  $A_w$  为 DFIG 状态矩阵;  $b_w^v$ 、 $b_w^\theta$  分别为状态变量关于电压幅值、相角的输入矩阵;  $c_w^p$ 、 $c_w^q$  分别为 DFIG 有功、无功对  $\Delta X_w$  的输出矩阵;

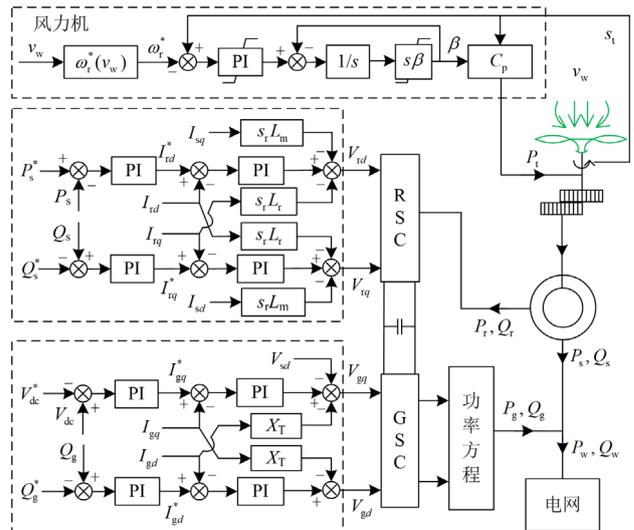


图1 DFIG控制模型

Fig. 1 Control model of DFIG

$d_w^{pv}$ 、 $d_w^{p\theta}$ 、 $d_w^{qv}$ 、 $d_w^{q\theta}$  分别为 DFIG 有功、无功对电压幅值、相角的传递矩阵。

PV 控制策略见图 2, 由逆变器直流模块、滤波模块、外环控制系统和内环控制系统组成, 其线性化模型如式(2)所示。

$$\begin{cases} p\Delta X_{PV} = A_{PV}\Delta X_{PV} + b_{PV}^v\Delta V_{PV} + b_{PV}^\theta\Delta\theta_{PV} \\ \Delta P_{PV} = c_{PV}^p\Delta X_{PV} + d_{PV}^{pv}\Delta V_{PV} + d_{PV}^{p\theta}\Delta\theta_{PV} \\ \Delta Q_{PV} = c_{PV}^q\Delta X_{PV} + d_{PV}^{qv}\Delta V_{PV} + d_{PV}^{q\theta}\Delta\theta_{PV} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\Delta X_{PV}$  为 PV 状态变量变化量;  $\Delta P_{PV}$ 、 $\Delta Q_{PV}$  分别为 PV 有功、无功变化量;  $\Delta V_{PV}$ 、 $\Delta\theta_{PV}$  分别为 PV 电压幅值、相角变化量;  $A_{PV}$  为 PV 状态矩阵;  $b_{PV}^v$ 、 $b_{PV}^\theta$  分别为  $\Delta X_{PV}$  关于电压幅值、相角的输入矩阵;  $c_{PV}^p$ 、 $c_{PV}^q$  分别为 PV 有功、无功对状态变量的输出矩阵;  $d_{PV}^{pv}$ 、 $d_{PV}^{p\theta}$ 、 $d_{PV}^{qv}$ 、 $d_{PV}^{q\theta}$  分别为 PV 有功、无功对电压幅值、相角的传递矩阵。

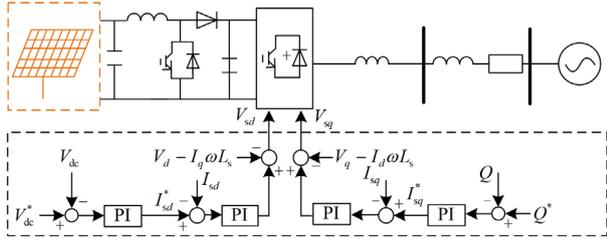


图 2 PV 控制模型

Fig. 2 Control model of PV

### 1.2 风光机组与 SG 间的暂态作用

将整个系统划分子系统, 可以推导和分析子系统间阻尼影响机理、模态相互作用/位移原因。为反映风光机组与 SG 间的暂态作用, 建立 DFIG、PV、剩余子系统传递函数闭环模型。SG 控制策略见图 3, 包括转子方程、电磁暂态、励磁系统、调速系统。其线性化模型见式(3)。

$$\begin{cases} p\Delta X_G = A_G\Delta X_G + B_G\Delta V_G \\ \Delta I_G = C_G\Delta X_G + D_G\Delta V_G \end{cases} \quad (3)$$

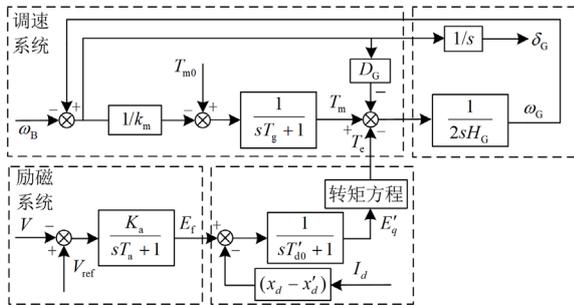


图 3 SG 控制模型

Fig. 3 Control model of SG

式中:  $\Delta X_G$  为 SG 状态变量变化量;  $\Delta I_G$ 、 $\Delta V_G$  分别为 SG 电流、电压;  $A_G$ 、 $B_G$ 、 $C_G$ 、 $D_G$  分别为 SG 状态矩阵、输入矩阵、输出矩阵、传递矩阵。

为验证风光机组对 SG 的影响, 通过节点电流方程建立  $\Delta V_G$ 、 $\Delta I_G$  与 DFIG、PV 电压、输出功率的联系, 如式(4)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta I_G \\ \Delta I_w \\ \Delta I_{PV} \\ \Delta I_{PN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_G \\ \Delta V_w \\ \Delta V_{PV} \\ \Delta V_{PN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $Y_{11}$ 、 $Y_{12}$ 、 $\dots$ 、 $Y_{44}$  均为导纳矩阵;  $\Delta I_w$ 、 $\Delta I_{PV}$  分别为 DFIG、PV 节点的电流;  $\Delta V_{PN}$ 、 $\Delta I_{PN}$  分别为普通节点的电压、电流。

消去普通节点得式(5), 提取  $\Delta I_G$  得式(6), 代入式(3)得  $\Delta V_G$  与  $\Delta V_w$ 、 $\Delta V_{PV}$  的关系如式(7)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta I_G \\ \Delta I_w \\ \Delta I_{PV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y'_{11} & Y'_{12} & Y'_{13} \\ Y'_{21} & Y'_{22} & Y'_{23} \\ Y'_{31} & Y'_{32} & Y'_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_G \\ \Delta V_w \\ \Delta V_{PV} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\Delta I_G = Y'_{11}\Delta V_G + Y'_{12}\Delta V_w + Y'_{13}\Delta V_{PV} \quad (6)$$

$$\Delta V_G = [Y'_{11} - D_G]^{-1} C_G \Delta X_G + K_1 \begin{bmatrix} \Delta V_w \\ \Delta V_{PV} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $Y'_{11}$ 、 $Y'_{12}$ 、 $\dots$ 、 $Y'_{33}$  均为变换后的导纳矩阵;  $K_1$  为系数矩阵, 如附录 A 式(A1)所示。

建立并网节点有功、无功与电压、电流  $x$ 、 $y$  轴分量关系的增量形式, 如式(8)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x & V_y \\ V_y & -V_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_x \\ I_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_x & I_y \\ -I_y & I_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $\Delta P$ 、 $\Delta Q$  分别为节点有功和无功功率变化量;  $V_x$ 、 $V_y$ 、 $I_x$ 、 $I_y$  分别为节点电压、电流的  $x$ 、 $y$  轴分量。

结合式(5)、式(8)可得  $\Delta V_w$ 、 $\Delta V_{PV}$  与 DFIG、PV 输出功率的表达式, 如式(9)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta V_w \\ \Delta V_{PV} \end{bmatrix} = K_2 \begin{bmatrix} \Delta P_w \\ \Delta P_{PV} \end{bmatrix} + K_3 \begin{bmatrix} \Delta Q_w \\ \Delta Q_{PV} \end{bmatrix} + K_4 \Delta V_G \quad (9)$$

式中,  $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$  均为系数矩阵, 如附录 A 式(A7)和式(A8)所示。

结合式(3)、式(7)和式(9), 得到含风光出力的 SG 传递函数模型如式(10)和式(11)所示。

$$p\Delta X_G = A_G\Delta X_G + b_G^p \begin{bmatrix} \Delta P_w \\ \Delta P_{PV} \end{bmatrix} + b_G^q \begin{bmatrix} \Delta Q_w \\ \Delta Q_{PV} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta V_w \\ \Delta V_{PV} \end{bmatrix} = \mathbf{c}_G^v \Delta \mathbf{X}_G + \mathbf{d}_G^{vp} \begin{bmatrix} \Delta P_w \\ \Delta P_{PV} \end{bmatrix} + \mathbf{d}_G^{vq} \begin{bmatrix} \Delta Q_w \\ \Delta Q_{PV} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Delta \theta_w \\ \Delta \theta_{PV} \end{bmatrix} = \mathbf{c}_G^\theta \Delta \mathbf{X}_G + \mathbf{d}_G^{\theta p} \begin{bmatrix} \Delta P_w \\ \Delta P_{PV} \end{bmatrix} + \mathbf{d}_G^{\theta q} \begin{bmatrix} \Delta Q_w \\ \Delta Q_{PV} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{b}_G^p$ 、 $\mathbf{b}_G^q$  分别为  $\Delta \mathbf{X}_G$  对 DFIG、PV 有功、无功的输入矩阵;  $\mathbf{c}_G^v$ 、 $\mathbf{c}_G^\theta$  分别为 DFIG、PV 电压幅值、相角对  $\Delta \mathbf{X}_G$  的输出矩阵;  $\mathbf{d}_G^{vp}$ 、 $\mathbf{d}_G^{vq}$ 、 $\mathbf{d}_G^{\theta p}$ 、 $\mathbf{d}_G^{\theta q}$  分别为 DFIG、PV 电压幅值、相角对有功、无功的传递矩阵。

综合式(1)和式(2)可知, 风光出力影响  $\Delta \mathbf{X}_G$ , 风光机组和 SG 间存在动态交互作用。

结合式(1)、式(2)、式(10)和式(11), 将 3 个开环子系统进行集成, 可以得到整个电力系统的闭环传递函数模型, 如图 4 所示。

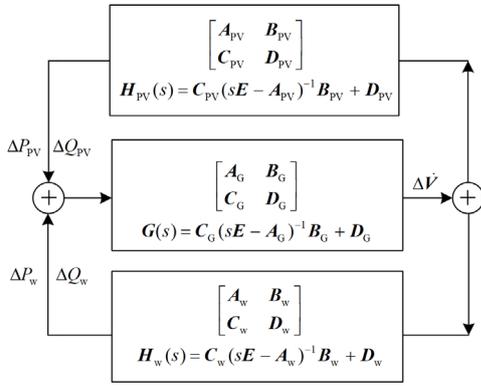


图 4 电力系统闭环传递函数模型

Fig. 4 Closed-loop transfer function model of the power system

## 2 风光并网系统阻尼转矩及其灵敏度分析

### 2.1 基于闭环传递函数的风光暂态交互过程

图 5 中 DFIG、PV 接入公共连接点(point of common coupling, PCC)。将式(1)、式(2)联立得

$$\begin{bmatrix} \Delta P_w \\ \Delta Q_w \\ \Delta P_{PV} \\ \Delta Q_{PV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_w(s) \\ \mathbf{H}_{PV}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{PCC} \\ \Delta \theta_{PCC} \end{bmatrix} \quad (12)$$

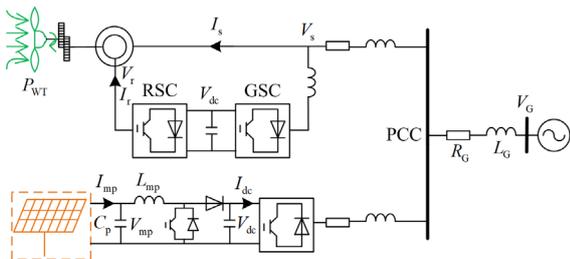


图 5 风光系统

Fig. 5 Wind power and PV integrated system

式中:  $\mathbf{H}_w(s)$ 、 $\mathbf{H}_{PV}(s)$  分别为 DFIG、PV 的传递函数;  $\Delta V_{PCC}$ 、 $\Delta \theta_{PCC}$  分别为并网点电压、相角的变化量。

为验证风光交互作用, 建立 PCC 电压变化量  $\Delta V_{PCC}$  与  $\Delta V_w$ 、 $\Delta V_{PV}$  的关系, 如式(13)所示。将式(9)代入式(13), 得到电压与输出功率的关系, 如式(14)所示。

$$\Delta V_{PCC} = \begin{bmatrix} 1/Z_G & 0 \\ 0 & 1/Z_G \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}'_{12} & \mathbf{Y}'_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_w \\ \Delta V_{PV} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{PCC} \\ \Delta \theta_{PCC} \end{bmatrix} = \mathbf{K}_5 \mathbf{K}_4 \mathbf{K}_2 \begin{bmatrix} \Delta P_w \\ \Delta P_{PV} \end{bmatrix} + \mathbf{K}_5 \mathbf{K}_4 \mathbf{K}_3 \begin{bmatrix} \Delta Q_w \\ \Delta Q_{PV} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中:  $Z_G$  为 PCC 与无穷大电源连接阻抗;  $\mathbf{K}_5$  为电压幅值、相位与  $V_x$ 、 $V_y$  的转换矩阵。

结合式(12)、式(14), 可得到风光动态交互作用模型, 如图 6 所示, 其中  $\mathbf{K} = [\mathbf{K}_5 \mathbf{K}_4 \mathbf{K}_2 \quad \mathbf{K}_5 \mathbf{K}_4 \mathbf{K}_3]$ 。

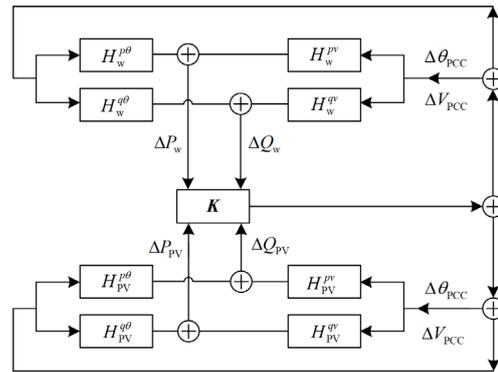


图 6 基于闭环传递函数的风光动态交互模型

Fig. 6 Dynamic interaction model of wind power and PV based on closed-loop transfer function

当 PCC 点发生扰动时, 存在两条传递路径。路径 1: 扰动从  $\Delta V_{PCC}$ 、 $\Delta \theta_{PCC}$  出发, 经过  $\mathbf{H}_w(s)$  传递到  $\Delta P_w$ 、 $\Delta Q_w$ , 通过系数矩阵  $\mathbf{K}$  返回  $\Delta V_{PCC}$ 、 $\Delta \theta_{PCC}$ 。路径 2: 扰动从  $\Delta V_{PCC}$ 、 $\Delta \theta_{PCC}$  出发, 经过  $\mathbf{H}_{PV}(s)$  传递到  $\Delta P_{PV}$ 、 $\Delta Q_{PV}$ , 通过系数矩阵  $\mathbf{K}$  返回  $\Delta V_{PCC}$ 、 $\Delta \theta_{PCC}$ 。路径 1 反映了 DFIG 机组对  $\Delta V_{PCC}$ 、 $\Delta \theta_{PCC}$  的影响; 路径 2 反映了 PV 机组对  $\Delta V_{PCC}$ 、 $\Delta \theta_{PCC}$  的影响。两条路径存在以下耦合关系: 当扰动从  $\Delta V_{PCC}$ 、 $\Delta \theta_{PCC}$  出发, 经过 DFIG、PV 机组引起  $\Delta P_w$ 、 $\Delta Q_w$ 、 $\Delta P_{PV}$ 、 $\Delta Q_{PV}$  功率扰动时, 功率扰动经过系数矩阵  $\mathbf{K}$  共同作用于  $\Delta V_{PCC}$ 、 $\Delta \theta_{PCC}$ 。DFIG、PV 机组产生的功率扰动与原始扰动  $\Delta V_{PCC}$ 、 $\Delta \theta_{PCC}$  叠加, 可能放大  $\Delta V_{PCC}$ 、 $\Delta \theta_{PCC}$ , 影响系统稳定性。

### 2.2 基于阻尼转矩法的风光并网电力系统分析

阻尼转矩分析法是对发电机转子运动所受力矩  $\Delta T$  的分解, 如式(15)<sup>[31]</sup>所示, 其中  $T_s$  为同步转矩。发电机低频振荡与转子角位移  $\Delta\delta$  密切相关, 而  $\Delta\delta$  的阻尼由角速度  $\Delta\omega$  比例项  $T_d$  决定。本文在风光闭环传递函数模型基础上, 推导风光出力对  $T_d$  的贡献, 提出阻尼系数对风光出力灵敏度的解析表达, 作为内点法梯度信息, 调整风光出力以改善电网稳定性。

$$\Delta T = T_d \Delta\omega + T_s \Delta\delta \quad (15)$$

当风光机组并入电网时, 拓展图 6 交互模型。以功率扰动为例,  $\Delta P_w$ 、 $\Delta Q_w$ 、 $\Delta P_{PV}$ 、 $\Delta Q_{PV}$  作用于 SG, 再传递至 DFIG、PV 电压。结合式(1)、式(2)得到式(16)。

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{PV} \\ \Delta P_w \\ \Delta Q_{PV} \\ \Delta Q_w \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} H_{PV}^{pv} & \mathbf{0} & H_{PV}^{p\theta} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & H_w^{pv} & \mathbf{0} & H_w^{p\theta} \\ H_{PV}^{qv} & \mathbf{0} & H_{PV}^{q\theta} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & H_w^{qv} & \mathbf{0} & H_w^{q\theta} \end{bmatrix}}_{G_{T1}(s)} \begin{bmatrix} \Delta V_{PV} \\ \Delta V_w \\ \Delta\theta_{PV} \\ \Delta\theta_w \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中:  $G_{T1}(s)$  为 DFIG、PV 出力与电压间的传递函数;  $H_{PV}^{pv}$ 、 $H_{PV}^{p\theta}$ 、 $H_{PV}^{qv}$ 、 $H_{PV}^{q\theta}$  和  $H_w^{pv}$ 、 $H_w^{p\theta}$ 、 $H_w^{qv}$ 、 $H_w^{q\theta}$  分别为  $H_{PV}(s)$ 、 $H_w(s)$  中相应元素。

将式(10)、式(11)展开得

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \omega_0 E & \mathbf{0} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ b_{G1}^p & b_{G1}^q \\ b_{G2}^p & b_{G2}^q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{PV} \\ \Delta P_w \\ \Delta Q_{PV} \\ \Delta Q_w \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \Delta V_{PV} \\ \Delta V_w \\ \Delta\theta_{PV} \\ \Delta\theta_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{G1}^v & c_{G2}^v & c_{G3}^v \\ c_{G1}^\theta & c_{G2}^\theta & c_{G3}^\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_G^{vp} & d_G^{vq} \\ d_G^{p\theta} & d_G^{p\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{PV} \\ \Delta P_w \\ \Delta Q_{PV} \\ \Delta Q_w \end{bmatrix} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $\Delta z$  表示 SG 其他状态量变化量;  $\omega_0$  为电网角频率;  $E$  为单位矩阵;  $b_{G1}^p$ 、 $b_{G1}^q$ 、 $b_{G2}^p$ 、 $b_{G2}^q$  分别为  $\Delta\omega$ 、 $\Delta z$  对 PV、DIFG 有功、无功的输入系数矩阵;  $c_{G1}^v$ 、 $c_{G2}^v$ 、 $c_{G3}^v$ 、 $c_{G1}^\theta$ 、 $c_{G2}^\theta$ 、 $c_{G3}^\theta$  分别为 PV、DIFG 电压幅值、相角对  $\Delta\delta$ 、 $\Delta\omega$ 、 $\Delta z$  的输出系数矩阵。最终得到风光并网电力系统动态交互模型, 如图 7 所示。

风光机组与同步电网间动态交互体现在扰动传递作用过程, 例如风光机组输出功率扰动  $\Delta P$ 、 $\Delta Q$  经两条路径在系统中传递。路径 1: 扰动  $\Delta P$ 、 $\Delta Q$  通过  $b$  矩阵传递到  $\Delta X_G$ ,  $\Delta X_G$  通过  $c$  矩阵传递到并网点电压变化量  $\Delta V$ 、相角变化量  $\Delta\theta$ 。路径 2: 扰动  $\Delta P$ 、 $\Delta Q$  通过  $d$  矩阵, 与路径 1 的  $\Delta X_G$  共同作用

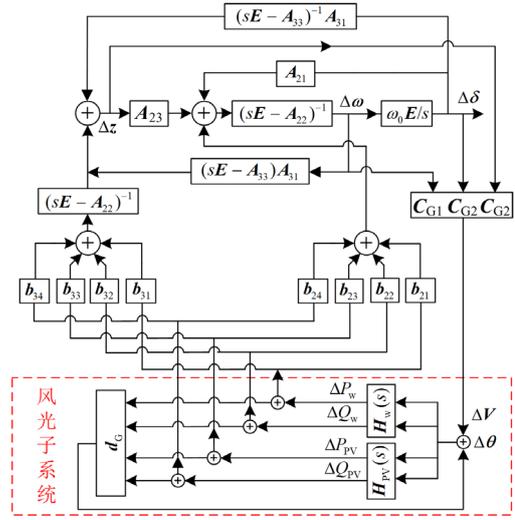


图 7 基于闭环传递函数的风光动态交互模型

Fig. 7 Dynamic interaction model of power system with wind power and PV based on closed-loop transfer function

于  $\Delta V$ 、 $\Delta\theta$ 。 $\Delta V$ 、 $\Delta\theta$  再次经过风光子系统传递函数  $H_w(s)$ 、 $H_{PV}(s)$  作用于  $\Delta P$ 、 $\Delta Q$ , 形成新的输出功率波动, 直至系统失稳或再平衡。在此过程中, 各模块参数均会对系统稳定性造成影响。

为量化阻尼系数, 推导风光机组所提供电磁转矩, 如式(18)所示。

$$\begin{aligned} \Delta T = & G_w^{PT}(s) \Delta P_w + G_{PV}^{PT}(s) \Delta P_{PV} + \\ & G_w^{QT}(s) \Delta Q_w + G_{PV}^{QT}(s) \Delta Q_{PV} = \\ & G_w^{PT}(s) (H_w^{pv}(s) \Delta V_w + H_w^{p\theta}(s) \Delta\theta_w) + \\ & G_w^{QT}(s) (H_w^{qv}(s) \Delta V_w + H_w^{q\theta}(s) \Delta\theta_w) + \\ & G_{PV}^{PT}(s) (H_{PV}^{pv}(s) \Delta V_{PV} + H_{PV}^{p\theta}(s) \Delta\theta_{PV}) + \\ & G_{PV}^{QT}(s) (H_{PV}^{qv}(s) \Delta V_{PV} + H_{PV}^{q\theta}(s) \Delta\theta_{PV}) \end{aligned} \quad (18)$$

式中,  $G_w^{PT}$ 、 $G_{PV}^{PT}$ 、 $G_w^{QT}$ 、 $G_{PV}^{QT}$  分别为 DFIG、PV 功率对电磁转矩的传递函数。

对式(1)、式(2)、式(10)、式(11)进行变换得到

$$\begin{bmatrix} \Delta P_w \\ \Delta Q_w \\ \Delta P_{PV} \\ \Delta Q_{PV} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} H_w(s) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & H_{PV}(s) \end{bmatrix}}_{H_{wp}} \begin{bmatrix} \Delta V_w \\ \Delta\theta_w \\ \Delta V_{PV} \\ \Delta\theta_{PV} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_w \\ \Delta V_{PV} \\ \Delta\theta_w \\ \Delta\theta_{PV} \end{bmatrix} = (E - D_G H_{wp}(s))^{-1} C_G \Delta X_G \quad (20)$$

对状态方程进行拉氏变换, 得  $\Delta V_w$ 、 $\Delta V_{PV}$ 、 $\Delta\theta_w$ 、 $\Delta\theta_{PV}$  与  $\Delta\omega$  间的传递函数, 如式(21)和式(22)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta V_w \\ \Delta V_{PV} \end{bmatrix} = \mathbf{G}_v(s) \frac{\mathbf{u}_{Gi}}{u_{ki}} \Delta \omega \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_w \\ \Delta \theta_{PV} \end{bmatrix} = \mathbf{G}_f(s) \frac{\mathbf{u}_{Gi}}{u_{ki}} \Delta \omega \quad (22)$$

式中:  $\mathbf{G}_v(s)$ 、 $\mathbf{G}_f(s)$  分别为 DFIG、PV 电压幅值、相角变化量与  $\Delta \mathbf{X}_G$  间的传递函数;  $\mathbf{u}_{Gi}$  为右特征向量  $\mathbf{u}$  中与  $\Delta \mathbf{X}_G$  有关的向量;  $u_{ki}$  为右特征向量  $\mathbf{u}$  中与  $\Delta \omega$  有关的元素。

结合式(18)、式(21)和式(22)得到风光子系统向 SG 提供的阻尼转矩, 如式(23)所示。

$$\Delta T_i = \mathbf{G}_{T2}(s) \mathbf{G}_{T1}(s) \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{G}_v(s) \frac{\mathbf{u}_{Gi}}{u_{ki}} \\ \mathbf{G}_f(s) \frac{\mathbf{u}_{Gi}}{u_{ki}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{G}_{T3}(s)} \Delta \omega_i = D_i \Delta \omega_i \quad (23)$$

式中:  $\mathbf{G}_{T2} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_w^{PT} & \mathbf{G}_{PV}^{PT} & \mathbf{G}_w^{QT} & \mathbf{G}_{PV}^{QT} \end{bmatrix}$ ;  $D_i$  为阻尼系数;  $\Delta \omega_i$  为第  $i$  个发电机的转速。

### 2.3 阻尼系数对风光出力灵敏度的解析式

基于阻尼系数灵敏度调整控制参数, 可以提升电网稳定性。DFIG(PV)出力变化, 不仅影响自身提供阻尼, 还影响 PV(DFIG)提供阻尼。考虑风光机组出力并未出现在传递函数中, 但是通过电压间接影响传递函数, 因此求取系统变量对风光机组出力的灵敏度, 如式(24)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_{sys} \\ \Delta \mathbf{x}_w \\ \Delta \mathbf{x}_{PV} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{sys} & \mathbf{J}_{sys/w} & \mathbf{J}_{sys/PV} \\ \mathbf{J}_{w/sys} & \mathbf{J}_w & \mathbf{J}_{w/PV} \\ \mathbf{J}_{PV/sys} & \mathbf{J}_{PV/sys} & \mathbf{J}_{PV} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{S}_{sys} \\ \Delta \mathbf{S}_w \\ \Delta \mathbf{S}_{PV} \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中:  $\Delta \mathbf{x}_{sys}$ 、 $\Delta \mathbf{x}_w$ 、 $\Delta \mathbf{x}_{PV}$  分别为系统节点, DFIG 定子、励磁、转子节点, PV 节点电压幅值、相角矩阵;  $\Delta \mathbf{S}_{sys}$ 、 $\Delta \mathbf{S}_w$ 、 $\Delta \mathbf{S}_{PV}$  分别为系统节点, DFIG 定子、励磁、转子节点, PV 有功、无功矩阵;  $\mathbf{J}_{sys/w}$ 、 $\mathbf{J}_{sys/PV}$  对应位置矩阵为电压对 DFIG、PV 输出的灵敏度矩阵,  $\mathbf{J}^{-1}$  矩阵中其他元素, 可类似定义。

将电压作为中间变量, 采用复合函数求导, 求解传递函数  $\mathbf{G}(s)$  对 DFIG 有功  $P_w$  的灵敏度见式(25), 其中  $\theta_{sys}$ 、 $V_{sys}$  分别为系统节点的相角和电压;  $\mathbf{x}_w$ 、 $\mathbf{x}_{PV}$  分别为 DFIG、PV 的状态变量。由此得阻尼系数对 DFIG 出力的灵敏度, 如式(26)所示。

$$\frac{\partial \mathbf{G}(s)}{\partial P_w} = \sum \frac{\partial \mathbf{G}(s)}{\partial \theta_{sys}} \frac{\partial \theta_{sys}}{\partial P_w} + \sum \frac{\partial \mathbf{G}(s)}{\partial V_{sys}} \frac{\partial V_{sys}}{\partial P_w} + \sum \frac{\partial \mathbf{G}(s)}{\partial \mathbf{x}_w} \frac{\partial \mathbf{x}_w}{\partial P_w} + \sum \frac{\partial \mathbf{G}(s)}{\partial \mathbf{x}_{PV}} \frac{\partial \mathbf{x}_{PV}}{\partial P_w} \quad (25)$$

$$\frac{\partial D_i}{\partial P_w} = \frac{\partial [\mathbf{G}_{T2}(s) \mathbf{G}_{T1}(s) \mathbf{G}_{T3}(s)]}{\partial P_w} \quad (26)$$

对  $P_{PV}$ 、 $Q_w$ 、 $Q_{PV}$  的灵敏度可类似推导。为验证灵敏度准确性, 可与摄动法结果进行比较。建立阻尼系数灵敏度的风光并网电力系统动态交互过程与稳定提升方法, 如图 8 所示。

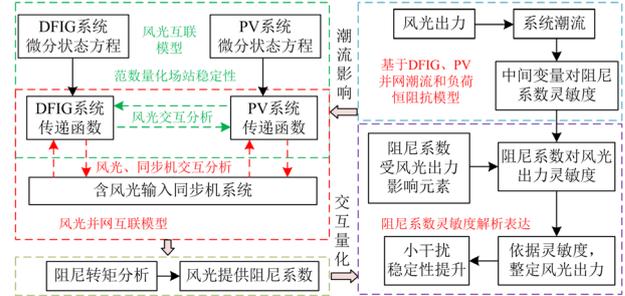


图 8 风光并网电力系统交互分析与稳定提升方法

Fig. 8 Interaction analysis and stability improvement for DFIG-PV integrated power system

本文风光机组采用单机等值模型, 这是现有文献常见的处理方法<sup>[31-33]</sup>。当涉及较多风电场、光伏场站时, 所提方法可能存在维数灾问题, 需要对关注场站之外部分降阶等值, 或研究部分网络稳定性<sup>[34]</sup>, 以改善计算效率和收敛性。若将本文所提阻尼系数灵敏度解析表达用于其他类型可再生能源机组, 仅需要修改机组传递函数。

### 3 仿真分析

针对所提算法编写 Matlab 程序。计算机配置为: Intel(R) Core(TM)i5-13400 CPU, 2.50 GHz, 16 GB 内存。负荷采用恒阻抗模型, DFIG、PV 参数分别如表 1、表 2 所示, 均采用 MPPT 运行方式。

表 1 DFIG 参数

Table 1 Parameters of DFIG

风力机	叶片半径	34 m	惯性时间常数	3.5 s
传动轴	刚度系数	0.8 p.u./rad	互阻尼系数	3.4 p.u.
桨距角	$k_{p1} = 6$		$k_{i1} = 2.5 \times 10^{-4}$	
感应电机	额定功率	2 MW	额定电压	690 V
	定子电阻	0.03 p.u.	定子电抗	0.44 p.u.
	转子电阻	0.045 p.u.	转子电抗	0.45 p.u.
	励磁电抗	6.55 p.u.	惯性时间常数	3 s
直流电容	电容电压	1200 V	电容值	0.5 F
RSC	控制内环	$k_{p2} = 0.57, k_{i2} = 0.042, k_{p3} = k_{p2}, k_{i3} = k_{i2}$		
	控制外环	$k_{p4} = 0.048, k_{i4} = 2.1 \times 10^{-4}, k_{p5} = k_{p4}, k_{i5} = k_{i4}$		
GSC	控制内环	$k_{p6} = 0.57, k_{i6} = 0.042, k_{p7} = k_{p6}, k_{i7} = k_{i6}$		
	控制外环	$k_{p8} = 0.048, k_{i8} = 2.1 \times 10^{-4}, k_{p9} = k_{p8}, k_{i9} = k_{i8}$		
	变压器电抗		0.08 p.u.	

表 2 PV 参数

Table 2 Parameters of PV

参数	数值	参数	数值
直流电压/V	800	直流电容/ $\mu\text{F}$	2000
滤波电容/ $\mu\text{F}$	3	直流电感/mH	3
电网侧电感/mH	2	电压控制器参数 $k_p$	0.13
电压控制器参数 $k_i$	12.6	电流控制器参数 $k_p$	0.07
电流控制器参数 $k_i$	1	PV 板数量	$35 \times 10^4$

### 3.1 风光交互分析

对图 5 系统, 表 3 给出 DFIG、PV 出力变化时, 传递函数 2 范数( $\|H_w(s)\|_2$  和  $\|H_{PV}(s)\|_2$ ) 和并网点电压  $V_{PCC}$ 、相角  $\theta_{PCC}$  的变化趋势。随着 DFIG(PV) 出力增加, DFIG(PV) 机组稳定性下降, PV(DFIG) 机组稳定性相应提升。 $P_w$  变化 0.1 p.u.,  $\|H_w(s)\|_2$  变化约为 0.07,  $\|H_{PV}(s)\|_2$  变化 0.0007; PV 出力  $P_{PV}$  变化 0.1 p.u.,  $\|H_w(s)\|_2$  变化 0.0013,  $\|H_{PV}(s)\|_2$  变化约 0.11。PV 出力变化影响高于 DFIG。因此可在 DFIG(PV) 稳定的前提下, 调节出力, 消除 PV(DFIG) 危险模式, 提升风光场站稳定性。

表 3 风光出力对 PCC 电压与场站稳定性的影响

Table 3 Effect of  $P_w$  and  $P_{PV}$  on  $V_{PCC}$  and stability of station

$P_w$ /p.u.	$V_{PCC}$ /p.u.	$\theta_{PCC}$ /p.u.	$\ H_w(s)\ _2$	$\ H_{PV}(s)\ _2$
0.4	1.0458	0.0104	0.4477	0.2305
0.5	1.0488	0.0120	0.5175	0.2298
0.6	1.0519	0.0134	0.5888	0.2291
1.0	1.0605	0.0185	0.8327	0.2272

$P_{PV}$ /p.u.	$V_{PCC}$ /p.u.	$\theta_{PCC}$ /p.u.	$\ H_w(s)\ _2$	$\ H_{PV}(s)\ _2$
0.2	1.0458	0.0104	0.4477	0.2305
0.3	1.0478	0.0124	0.4464	0.3441
0.4	1.0499	0.0144	0.4451	0.4566
0.8	1.0579	0.0225	0.4415	0.8959

在 PCC 施加负荷扰动, 取 DFIG 不同出力, 结果见图 9。DFIG 转差  $s_1$  振荡加剧, 与表 3 中  $\|H_w(s)\|_2$  趋势相同。取不同  $P_w$ ,  $s_1$  振荡均得到改善。

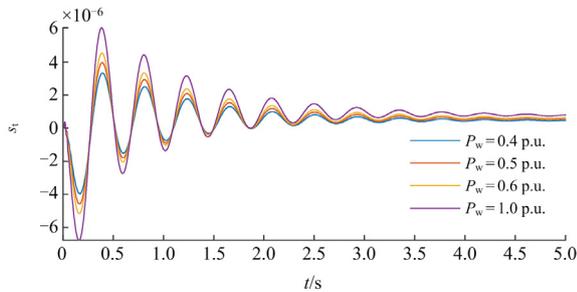


图 9 不同  $P_w$  下  $s_1$  振荡

Fig. 9 Oscillation of  $s_1$  under different  $P_w$

### 3.2 风光子系统对同步机组暂态作用

以新英格兰系统为例, 在节点 8 接入 DFIG、PV。DFIG 容量为  $100 \times 2$  MW, PV 容量为 100 MW。取风速 10 m/s, 捕获功率 1.07 p.u.; 温度 25  $^{\circ}\text{C}$ , 辐照度  $1000 \text{ W/m}^2$ , 接近满发, 两者出力相同。

为量化风光交互作用及对 SG 的影响, 设 DFIG、PV 出力变化相同, 计算提供的阻尼系数。以模式 15/16 为例, 风光子系统提供的阻尼系数如图 10、图 11 所示。结果表明,  $P_{PV}$  对风光子系统提供的阻尼影响大于  $P_w$ 。当  $P_w$  变化时,  $D_9$  呈平缓下降趋势, 保持单调性; 当  $P_{PV}$  变化时,  $D_9$  变化幅度增加, 单调性改变, 对系统稳定性恶化程度降低。DFIG 波动较 PV 波动对电网稳定性的影响小。对阻尼系数随风光出力非单调场景(图 11), 在调节风光出力以改善稳定性时, 须判断拐点, 分段计算灵敏度, 避免基于当前运行点灵敏度调整出力, 反而降低了电网稳定性。

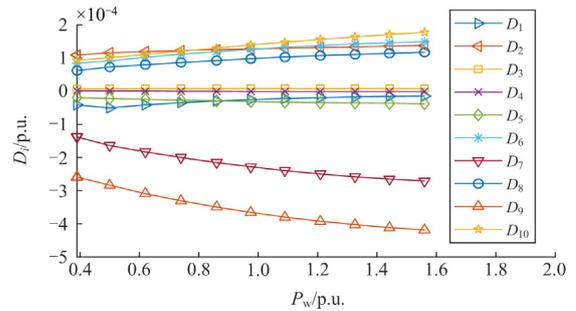


图 10 不同  $P_w$  下风光子系统对 SG 的阻尼系数

Fig. 10 Damping coefficients of wind and PV subsystems for SG with different  $P_w$

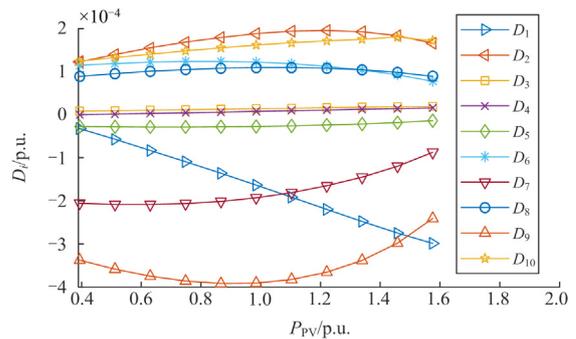


图 11 不同  $P_{PV}$  下风光子系统对 SG 的阻尼系数

Fig. 11 Damping coefficients of wind and PV subsystems for SG with different  $P_{PV}$

取节点 7 负荷突增导致电压幅值、相角变化。在 19 号节点三相短路, 持续时间 0.1 s, DFIG、PV 出力各增加 50%, 由图 12 可见, PV 出力增加对 DFIG、PV 电压幅值、相角波动改善更为明显, 验证了上述

阻尼系数的分析结果。

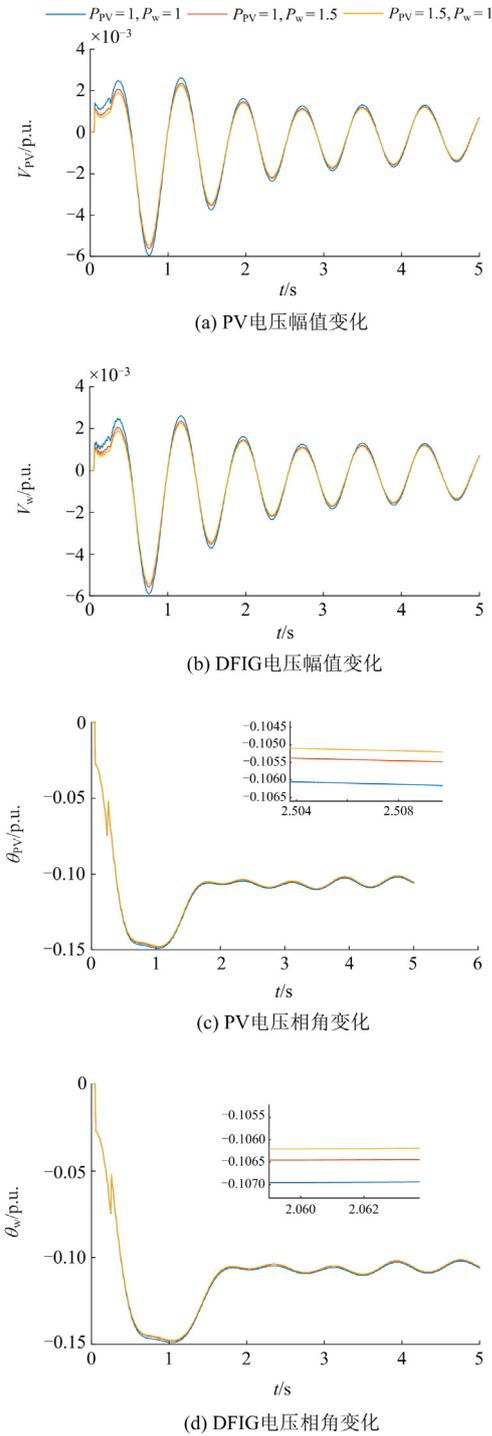


图 12 风光出力变化对系统稳定性的影响

Fig. 12 Impact of adjustments of the  $P_w/P_{pv}$  on system stability

以 DFIG 对 PV 场站影响为例, 计算  $P_{pv}$  变化, 风光子系统提供的阻尼见图 13。相较图 11 风光动态交互场景, 此时风光子系统提供的阻尼变化幅度更明显。以  $D_7$  为例, 在 PV 出力变化时, 忽略

DFIG 动态特性下风光子系统提供的阻尼从负转变为正, 而计及 DFIG 动态特性下风光子系统提供的阻尼在相同变化下未发生该变化,  $P_{pv}$  波动引起阻尼转矩变化被 DFIG 机组动态特性抑制。

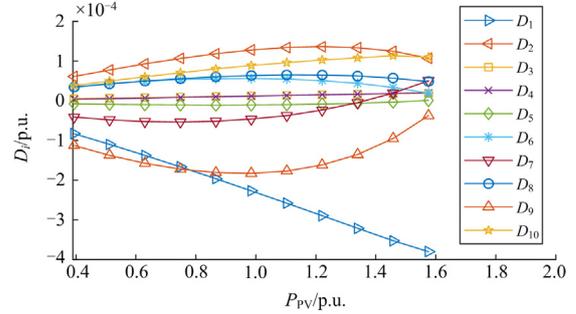


图 13 忽略 DFIG 动态特性的风光子系统对 SG 的阻尼系数  
Fig. 13 Damping coefficients of wind and PV subsystems for SG neglecting dynamic characteristics of DFIG

在 PV 机组出力变化下, DFIG 机组提供的阻尼见图 14。DFIG 出力虽未发生变化, 但由于风光交互,  $P_{pv}$  变化, 影响 DFIG 提供的阻尼。因此分别考虑每个能源机组对系统稳定的影响, 得到的阻尼系数存在误差。

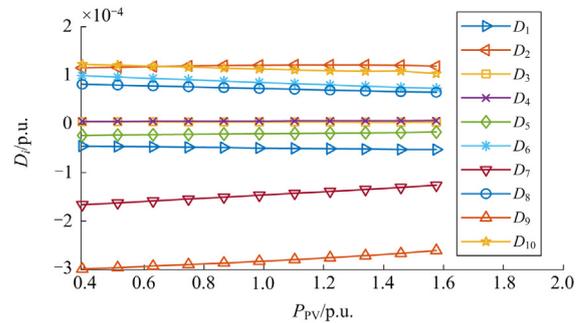


图 14 不同  $P_{pv}$  下 DFIG 对 SG 的阻尼系数

Fig. 14 Damping coefficients of DFIG to SG with different  $P_{pv}$

### 3.3 阻尼系数对出力的灵敏度

$P_w$  或  $P_{pv}$  发生变化时, 阻尼系数随之改变。基于阻尼系数对风光出力的灵敏度, 绘制新英格兰系统  $D_7$  对  $P_w/P_{pv}$  灵敏度曲线并与修改参数方法相比, 如图 15 所示。曲线在初始运行点相切, 且变化趋势一致, 验证了阻尼系数灵敏度解析表达的正确性。

表 4 为新英格兰系统阻尼系数对风光出力的灵敏度。根据计算结果, 阻尼系数对  $P_w$ 、 $P_{pv}$  的灵敏度均为正数, 增加  $P_w$ 、 $P_{pv}$  有利于增强系统稳定性。

依据上述灵敏度分析结果分别调整 DFIG、PV 出力, 观察电网振荡特性:  $P_w$  从 1.4 p.u. 增至 2.0 p.u.,  $P_{pv}$  从 0.8 p.u. 增至 1.5 p.u., 节点 19 三相短路, 持续

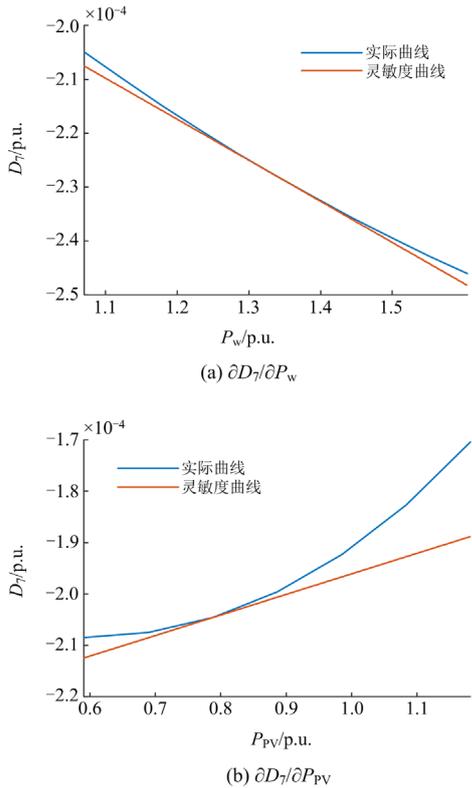


图 15 阻尼系数对  $P_w/P_{pv}$  的灵敏度

Fig. 15 Sensitivity of damping coefficient to  $P_w/P_{pv}$

表 4 新英格兰系统阻尼系数灵敏度

Table 4 Damping coefficient sensitivity in New England system

阻尼系数	数值/p.u.	灵敏度	
		$\partial D_i/\partial P_w$	$\partial D_i/\partial P_{pv}$
$D_1$	$-1.8635 \times 10^{-4}$	$4.9245 \times 10^{-5}$	$-2.2690 \times 10^{-4}$
$D_2$	$1.9336 \times 10^{-4}$	$3.5446 \times 10^{-6}$	$3.7557 \times 10^{-5}$
$D_3$	$1.5305 \times 10^{-5}$	$-6.4544 \times 10^{-7}$	$9.5251 \times 10^{-6}$
$D_4$	$9.4686 \times 10^{-6}$	$2.8109 \times 10^{-7}$	$1.3751 \times 10^{-5}$
$D_5$	$-2.5936 \times 10^{-5}$	$-8.8429 \times 10^{-6}$	$1.2628 \times 10^{-5}$
$D_6$	$1.1915 \times 10^{-4}$	$2.8681 \times 10^{-5}$	$-3.7005 \times 10^{-5}$
$D_7$	$-1.8273 \times 10^{-4}$	$-5.9898 \times 10^{-5}$	$1.1088 \times 10^{-5}$
$D_8$	$1.0976 \times 10^{-4}$	$2.3701 \times 10^{-5}$	$-3.7507 \times 10^{-5}$
$D_9$	$-3.8420 \times 10^{-4}$	$-7.7385 \times 10^{-5}$	$9.3745 \times 10^{-4}$
$D_{10}$	$1.6636 \times 10^{-4}$	$4.4347 \times 10^{-5}$	$4.2805 \times 10^{-4}$
总计	$-1.6581 \times 10^{-4}$	$3.0280 \times 10^{-6}$	$4.3233 \times 10^{-5}$

时间 0.1 s。仿真结果如图 16 所示，调节后振荡得到改善，与阻尼系数灵敏度结果一致，验证了本文根据阻尼系数灵敏度调整风光出力、提升电网稳定性的有效性。

为检验所提算法的适应性，4 机 2 区域系统节点 9 接入新能源。风电场容量为  $30 \times 2$  MW，风速为 11 m/s。光伏电站容量为 40 MW，环境温度为

25 °C，辐照强度为  $1000 \text{ W/m}^2$ ，出力均为 40 MW。计算阻尼系数对风光出力的灵敏度，如表 5 所示。阻尼系数对  $P_w$  灵敏度有正有负，对  $P_{pv}$  灵敏度也是有正有负，但是，总体来看，阻尼系数对  $P_w$  的灵敏度为负数，对  $P_{pv}$  的灵敏度为正数。减少  $P_w$  或增加  $P_{pv}$  有利于改善系统稳定性。依此调节风光机组出力， $P_w$  从 0.4 p.u. 降至 0.3 p.u.， $P_{pv}$  从 0.2 p.u. 增至 0.4 p.u.，在节点 7 施加三相短路，持续时间 0.1 s，仿真结果如图 17 所示，系统稳定特性得以改善。

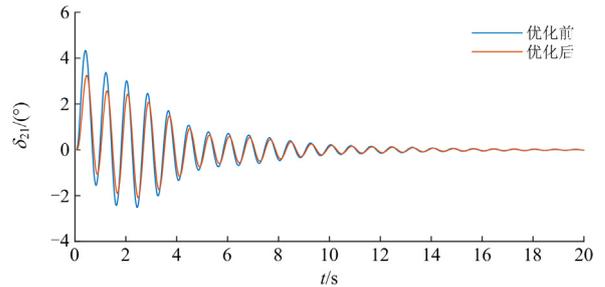


图 16 参数调整对振荡阻尼的效果

Fig. 16 Effect of parameter adjustment on oscillation damping

表 5 四机两区域系统阻尼系数灵敏度

Table 5 Sensitivity of damping coefficient of 4-SG 2-area system

阻尼系数	数值/p.u.	灵敏度	
		$\partial D_i/\partial P_w$	$\partial D_i/\partial P_{pv}$
$D_1$	$6.4136 \times 10^{-4}$	$5.7985 \times 10^{-2}$	$1.1128 \times 10^{-1}$
$D_2$	$2.6559 \times 10^{-3}$	$-3.8192 \times 10^{-2}$	$4.6646 \times 10^{-3}$
$D_3$	$-3.5056 \times 10^{-3}$	$-1.8403 \times 10^{-2}$	$-1.3743 \times 10^{-2}$
$D_4$	$-1.5106 \times 10^{-3}$	$-1.2841 \times 10^{-2}$	$4.6739 \times 10^{-2}$
总计	$-1.7189 \times 10^{-3}$	$-1.1457 \times 10^{-2}$	$5.5459 \times 10^{-2}$

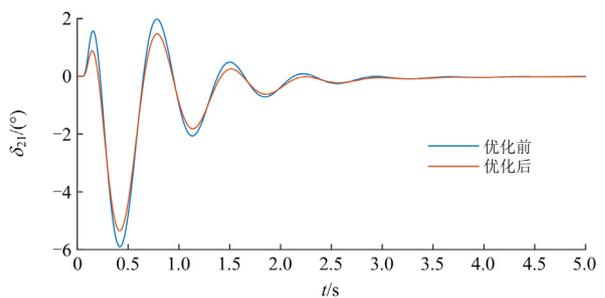


图 17 四机两区域功角振荡优化效果

Fig. 17 Effect of power angle oscillation optimization in 4-SG 2-area test system

比较基于阻尼系数灵敏度的内点法与粒子群算法的优化效果。针对同一振荡模式，以阻尼系数为优化目标。优化变量为  $P_w$ 、 $P_{pv}$ ，变量上下限分别为 0.5、2.0。设置粒子群初始种群数为 100，最大迭代次数为 30，两种算法分别以对偶间隙  $C_{Gap}$ 、目标

函数稳定作为收敛判据, 迭代特性如表 6 所示。基于阻尼系数灵敏度的内点法仅需 5 次迭代达到稳定, 粒子群算法需要 15 次迭代达到稳定, 优化时间较长。

表 6 优化算法收敛性对比

	迭代次数	时间/s	$P_w$ /p.u.	$P_{PV}$ /p.u.
粒子群优化	15	13.008	1.6049	1.4278
本文优化	5	0.223	1.9804	1.7725

为进一步检验优化后的应用效果, 设新英格兰测试系统节点 19 三相短路, 持续时间 0.1 s, 发电机 2 和发电机 1 的功角差  $\delta_{21}$  变化曲线如图 18 所示。两种优化方案均可改善振荡特性。综合比较收敛特性、计算时间和控制效果, 基于阻尼系数灵敏度的内点法明显优于启发式粒子群算法。

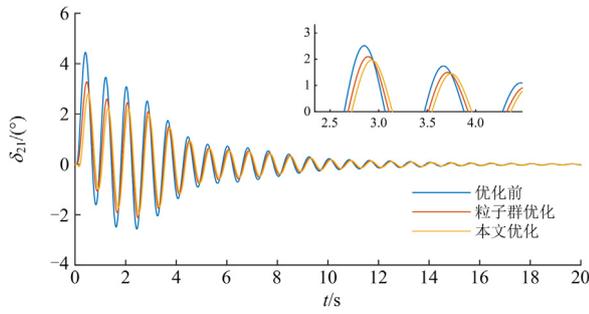


图 18 不同优化方法对振荡阻尼的效果

Fig. 18 Effect of different optimization methods on oscillation damping

## 4 结论

本文揭示了风光系统动态交互过程及其并网对 SG 的影响, 提出阻尼系数对风光出力灵敏度的解析表达, 以改善风光并网系统的稳定性。得到以下结论:

1) 风光并网系统存在动态交互, 在场站稳定裕度允许的情况下, 调节 DFIG(PV)场站出力, 可提高 PV(DFIG)场站危险模式的阻尼, 改善系统稳定性。

2) DFIG 波动与 PV 波动对系统阻尼系数的影响存在差异。PV 波动对阻尼系数影响更大; 风光并网系统降低了 PV 波动对阻尼系数的影响。

3) 与传统优化方法相比, 利用阻尼系数对风光出力的灵敏度作为梯度信息进行优化, 在收敛性、计算时间、控制效果上均具有优势。

理论上新能源机组可解耦控制有功、无功, 但是实际两者间常存在耦合(尤其 DFIG)。因此后续研究可结合有功、无功控制策略, 改善风光并网系统稳定性。

## 附录 A

$$\mathbf{K}_1 = [\mathbf{Y}'_{11} - \mathbf{D}_G]^{-1} [-\mathbf{Y}'_{12} \quad -\mathbf{Y}'_{23}] \quad (\text{A1})$$

$$\mathbf{M}_{w1} = \begin{bmatrix} V_{wx} & V_{wy} \\ V_{wy} & -V_{wx} \end{bmatrix}, \mathbf{M}_{w2} = \begin{bmatrix} I_{wx} & I_{wy} \\ I_{wy} & -I_{wx} \end{bmatrix} \quad (\text{A2})$$

$\mathbf{M}_{PV1}$ 、 $\mathbf{M}_{PV2}$  可类似定义。从而建立  $\Delta V_w$ 、 $\Delta V_{PV}$  与  $\Delta P_w$ 、 $\Delta Q_w$ 、 $\Delta P_{PV}$ 、 $\Delta Q_{PV}$  关系, 如式(A3)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta V_w \\ \Delta V_{PV} \end{bmatrix} = -\mathbf{M}_2^{-1} \mathbf{M}_1 \Delta V_G + \mathbf{M}_2^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_w \\ \Delta Q_w \\ \Delta P_{PV} \\ \Delta Q_{PV} \end{bmatrix} \quad (\text{A3})$$

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{w1} \mathbf{Y}'_{21} \\ \mathbf{M}_{PV1} \mathbf{Y}'_{31} \end{bmatrix} \quad (\text{A4})$$

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{w1} \mathbf{Y}'_{22} + \mathbf{M}_{w1} & \mathbf{M}_{w1} \mathbf{Y}'_{23} \\ \mathbf{M}_{PV1} \mathbf{Y}'_{32} & \mathbf{M}_{PV1} \mathbf{Y}'_{33} + \mathbf{M}_{PV2} \end{bmatrix} \quad (\text{A5})$$

$$\mathbf{M}_2^{-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{2,11}^{-1} & \mathbf{M}_{2,12}^{-1} & \mathbf{M}_{2,13}^{-1} & \mathbf{M}_{2,14}^{-1} \\ \mathbf{M}_{2,21}^{-1} & \mathbf{M}_{2,22}^{-1} & \mathbf{M}_{2,23}^{-1} & \mathbf{M}_{2,24}^{-1} \end{bmatrix} \quad (\text{A6})$$

$$\mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{2,11}^{-1} & \mathbf{M}_{2,13}^{-1} \\ \mathbf{M}_{2,21}^{-1} & \mathbf{M}_{2,23}^{-1} \end{bmatrix}, \mathbf{K}_3 = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{2,12}^{-1} & \mathbf{M}_{2,14}^{-1} \\ \mathbf{M}_{2,22}^{-1} & \mathbf{M}_{2,24}^{-1} \end{bmatrix} \quad (\text{A7})$$

$$\mathbf{K}_4 = -\mathbf{M}_2^{-1} \mathbf{M}_1 \quad (\text{A8})$$

## 参考文献

- [1] SHAIR J, XIE X R, YANG J J, et al. Adaptive damping control of subsynchronous oscillation in DFIG-based wind farms connected to series-compensated network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(2): 1036-1049.
- [2] 吴雄, 贺明康, 何雯雯, 等. 考虑储能寿命的风-光-火-储打捆外送系统容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 66-75.
- [3] WU Xiong, HE Ming Kang, HE Wenwen, et al. Optimal capacity of a wind-solar-thermo-storage-bundled power transmission system considering battery life[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 66-75.
- [4] VIJAY M, SINGH B, BHUVANESWARI G, et al. Sensorless SYNRRG based variable speed wind generator and single-stage solar PV array integrated grid system with maximum power extraction capability[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(9): 7529-7539.
- [5] 姜海洋, 杜尔顺, 金晨, 等. 高比例清洁能源并网的跨国互联电力系统多时间尺度储能容量优化规划[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2101-2115.
- [6] JIANG Haiyang, DU Ershun, JIN Chen, et al. Optimal planning of multi-time scale energy storage capacity of cross-national interconnected power system with high proportion of clean energy[J]. Proceedings of the CSEE,

- 2021, 41(6): 2101-2115.
- [5] ANGADI S, YARAGATTI U, SURESH Y, et al. Comprehensive review on solar, wind and hybrid wind-PV water pumping systems an electrical engineering perspective[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2021, 6(1): 1-19.
- [6] 沙伟燕, 胡伟, 何宁辉, 等. 大规模虚拟储能平抑新能源功率预测误差优化调度方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(6): 167-174.
- SHA Weiyan, HU Wei, HE Ninghui, et al. Optimal scheduling method for stabilizing power prediction error of new energy by large-scale virtual energy storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6): 167-174.
- [7] LI S H. Sensitivity-based expression of the voltage-power characteristic (VPC) of the wind farm from the VPCs of the DFIGs and the collector[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 39(1): 2143-2153.
- [8] 李生虎, 叶剑桥, 陈东. 基于无源控制的 DFIG 并网次同步控制相互作用抑制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 77-85.
- LI Shenghu, YE Jianqiao, CHEN Dong. Passive control strategy to mitigate sub-synchronous control interaction of DFIG-based integrated power systems[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 77-85.
- [9] XI X Z, GENG H, YANG G, et al. Torsional oscillation damping control for DFIG-based wind farm participating in power system frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(4): 3687-3701.
- [10] CHI Y N, TANG B J, HU J B, et al. Overview of mechanism and mitigation measures on multi-frequency oscillation caused by large-scale integration of wind power[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(4): 433-443.
- [11] 李生虎, 张奥博, 夏伟健, 等. 并网 DFIG 多通道附加阻尼控制器设计及其控制参数整定[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(7): 73-79.
- LI Shenghu, ZHANG Aobo, XIA Weijian, et al. Design and parameter setting for multi-band supplementary damping controllers of system integrated DFIG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(7): 73-79.
- [12] 刘普, 崔艺博, 刘兆峰, 等. 基于阻抗分析法的并网变流器稳定性统一分析方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 114-125.
- LIU Pu, CUI Yibo, LIU Zhaofeng, et al. The unified analysis method of grid-connected converter stability based on impedance analysis[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 114-125.
- [13] SHAO B B, ZHAO S Q, YANG Y H, et al. Sub-synchronous oscillation characteristics and analysis of direct-drive wind farms with VSC-HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 12(2): 1127-1140.
- [14] 熊鸿韬, 汪宗恒, 尚磊, 等. 一种用于电力系统低频振荡抑制的新能源电站阻尼注入控制器设计及其特性分析[J]. 电网技术, 2022, 46(7): 2690-2700.
- XIONG Hongtao, WANG Zongheng, SHANG Lei, et al. Damping injection controller of renewable energy for power system low frequency oscillation mitigation and its dynamic characteristics analysis[J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2690-2700.
- [15] SUN K, YAO W, FANG J K, et al. Impedance modeling and stability analysis of grid-connected DFIG-based wind farm with a VSC-HVDC[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 8(2): 1375-1390.
- [16] 赵书强, 李忍, 高本锋, 等. 光伏并入弱交流电网次同步振荡机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7215-7225, 7448.
- ZHAO Shuqiang, LI Ren, GAO Benfeng, et al. Analysis of mechanism and characteristics in sub synchronous oscillation between PV and weak AC networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7215-7225, 7448.
- [17] 王众, 吕敬, 蔡旭. 基于数据驱动的双馈风电机组阻抗辨识及稳定性分析[J]. 电力建设, 2023, 44(8): 31-40.
- WANG Zhong, LÜ Jing, CAI Xu. Data-driven impedance identification and stability analysis of doubly-fed induction generator based wind turbine[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(8): 31-40.
- [18] 罗魁, 郭剑波, 王伟胜, 等. 跟网型新能源附加频率控制对频率稳定及小扰动同步稳定影响分析综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1262-1281.
- LUO Kui, GUO Jianbo, WANG Weisheng, et al. Review of impact of grid following variable renewable energy supplementary frequency control on frequency stability and small-disturbance synchronization stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1262-1281.
- [19] ZHOU Y H, XIN H H, WU D, et al. Small-signal stability assessment of heterogeneous grid-following converter power systems based on grid strength analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(3): 2566-2579.
- [20] LI S H. Improvement to observability measures of LFO modes in power systems with DFIGs[J]. Frontiers in Energy, 2021, 15(2): 539-549.
- [21] HU Y, BU S Q, ZHANG X, et al. Connection between damping torque analysis and energy flow analysis in damping performance evaluation for electromechanical oscillations in power systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(1): 19-28.
- [22] DU W J, FU Q, WANG H F. Damping torque analysis of DC voltage stability of an MTDC network for the wind

- power delivery[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 35(1): 324-338.
- [23] 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): 1485-1498.  
WANG Yifan, ZHAO Chengyong, GUO Chunyi. Transfer function model and low-frequency stability analysis for PMSG-based wind farm interconnected with Flexible-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1485-1498.
- [24] GAO B F, DENG P C, WANG Y, 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 and Energy Systems, 2023, 144.
- [25] 巨云涛, 马雅蓉, 齐志男. 基于阻尼转矩分析的虚拟同步机对小干扰稳定的影响机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增刊 1): 98-107.  
JU Yuntao, MA Yarong, QI Zhinan. Research on the effect mechanism of virtual synchronous generator on small-signal stability based on damped torque analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 98-107.
- [26] YAN G G, JIA Q, LIU K, et al. Impact of DFIG based WTs on subsynchronous oscillation damping of SG based on the net electrical damping method[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2021, 16: 725-736.
- [27] 王一珺, 杜文娟, 王海风. 基于改进复转矩系数法的多风电场接入引发多机电力系统次同步振荡机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2383-2395.  
WANG Yijun, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Analysis of subsynchronous oscillation in multi-machine power system caused by the integration of multiple wind farms based on improved complex torque coefficient method[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2383-2395.
- [28] 甄自竞, 杜文娟, 苏田宇, 等. 风-光伏混合电场并网对电力系统次同步振荡的影响[J]. 南方电网技术, 2019, 13(3): 64-72.  
ZHEN Zijing, DU Wenjuan, SU Tianyu, et al. Influence of wind-photovoltaic hybrid farm's integration on the sub-synchronous oscillation of power system[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(3): 64-72.
- [29] 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.
- [30] 陈中, 唐浩然, 严绍兴, 等. 基于时滞灵敏度和多目标优化的广域电力系统稳定器参数设计[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 208-214.  
CHEN Zhong, TANG Haoran, YAN Shaoxing, et al. Parameter design of wide area power system stabilizer based on time delay sensitivity and multi-objective optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 208-214.
- [31] 李伟超, 蔡德宇, 武守远, 等. 风电机组附加有功控制参数对系统低频振荡的影响[J/OL]. 高电压技术: 1-14[2023-09-09].  
<https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230493>.  
LI Weichao, CAI Deyu, WU Shouyuan, et al. Impact of supplementary active power control parameters of wind turbine on power system low-frequency oscillations[J/OL]. High Voltage Engineering: 1-14[2023-09-09]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230493>.
- [32] DU W J, BI J T, CAO J, et al. A method to examine the impact of grid connection of the DFIGs on power system electromechanical oscillation modes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3775-3784.
- [33] 董文凯, 任必兴, 王海风, 等. 适用于系统次同步振荡分析的风电场等值建模方法综述[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 33-43.  
DONG Wenkai, REN Bixing, WANG Haifeng, et al. Small-signal equivalent modeling methods of the wind farm and its application in sub-synchronous oscillations analysis of grid-connected wind power systems[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4): 33-43.
- [34] 于飞, 董乐, 李梅航, 等. 基于等效短线路解耦法的风电场模型分割仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 164-172.  
YU Fei, DONG Le, LI Meihang, et al. Model segmentation simulation of a wind farm based on an equivalent short-circuit decoupling method[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 164-172.

收稿日期: 2023-10-31; 修回日期: 2024-01-31

作者简介:

李生虎(1974—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为风电并网电力系统分析与控制、HVDC 和 FACTS、电力系统规划与可靠性; E-mail: shenghuli@hfut.edu.cn

陈东(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风电并网电力系统分析与控制; E-mail: cd@mail.hfut.edu.cn

叶剑桥(1995—), 男, 博士研究生, 研究方向为风电并网电力系统分析与控制。E-mail: jianqiao\_ye1122@mail.hfut.edu.cn

(编辑 周金梅)