

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241507

# 同时计及 SVG 和长线路分布参数的谐波不稳定源定位研究

邓伊扬<sup>1</sup>, 徐方维<sup>1</sup>, 杨永恒<sup>2</sup>, 赵波<sup>3,4</sup>, 李鑫玥<sup>1</sup>, 陈哲<sup>4</sup>, 胡鹏飞<sup>2</sup>, 梁武斌<sup>5</sup>, 范钰寅<sup>5</sup>

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 浙江大学, 浙江 杭州 310058; 3. 华北电力大学电气与  
电子工程学院, 北京 102206; 4. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310000;  
5. 南京双元电气有限公司, 江苏 南京 211000)

**摘要:** 现有考虑线路分布参数的风电场谐波不稳定分析均未考虑静止无功发生器(static var generator, SVG)动态特性的影响。而 SVG 在高频段呈现负阻感特性, 易与线路分布参数及其他元件发生感容耦合, 导致系统发生谐波不稳定。基于此, 提出一种基于泰勒近似的风电场谐波不稳定频域模态分析方法。通过求解系统频域节点导纳矩阵行列式零点判定系统稳定性, 并定义节点对不稳定模式的参与因子, 实现谐波不稳定中心位置定位及传递路径辨识。研究表明, SVG 易与长距离输电线路和交流电网交互, 导致新能源场站高频谐波进一步放大, 直至发生高频谐波不稳定问题, 且 SVG 为风电场高频谐波不稳定主导因素。最后, 基于 Matlab/Simulink 仿真验证了所提方法的准确性。

**关键词:** 分布参数; 风电场; 谐波不稳定; 频域模态分析法; 静止无功发生器

## Research on harmonic instability source localization considering both SVG and long transmission line distributed parameters

DENG Yiyang<sup>1</sup>, XU Fangwei<sup>1</sup>, YANG Yongheng<sup>2</sup>, ZHAO Bo<sup>3,4</sup>, LI Xinyue<sup>1</sup>, CHEN Zhe<sup>4</sup>,  
HU Pengfei<sup>2</sup>, LIANG Wubin<sup>5</sup>, FAN Yuyin<sup>5</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. College of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 4. State Grid Zhejiang Electric Power Company Ltd. Electric Power Research Institute, Hangzhou 310000, China; 5. Nanjing Shuangyuan Electric Co., Ltd., Nanjing 211000, China)

**Abstract:** Existing studies on harmonic instability in wind farms that consider transmission line distributed parameters do not account for the dynamic characteristics of the static var generator (SVG). However, SVG exhibits negative resistance and inductance characteristics at high frequency, making it prone to inductive-capacitance coupling with transmission line distributed parameters and other components, which can lead to harmonic instability in the system. Based on this, a frequency domain modal analysis method for wind farm harmonic instability is proposed using Taylor approximation. The system stability is determined by solving the zero point of the frequency domain node admittance matrix determinant, and the node's participation factor in the unstable mode is defined to achieve the source location of harmonic instability and identification of the transmission path. The paper reveals that an SVG tends to interact with long-distance transmission lines and AC power grids, leading to further amplification of high-frequency harmonics in renewable energy substations until high-frequency harmonic instability occurs. Moreover, an SVG is the dominant factor in high-frequency harmonic instability in wind farms. Finally, the accuracy of the proposed method is verified through Matlab/Simulink simulations.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 52277113).

**Key words:** distributed parameters; wind farm; harmonic instability; frequency domain modal analysis; static var generator

## 0 引言

“双碳”目标下, 新能源发电发展快速, 但我

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目资助(52277113)“新型电力系统非同步测量下多谐波溯源与责任量化关键技术研究”

国负荷分布和可再生能源资源分布不均现象异常突出<sup>[1]</sup>。例如西部地区风电场通常需通过长距离输电线路和多个变压器才能并网, 若此时电网侧阻抗较大, 系统会呈现弱电网特性。且长距离输电线路对地分布电容不可忽视, 易与新能源场站中元件发生谐振, 导致系统在宽频范围内存在多个弱阻尼谐振

点, 最终引发谐波不稳定问题<sup>[2-3]</sup>。因此, 在评估风电场谐波稳定性时, 有必要考虑线路分布参数模型。

目前, 谐波不稳定的分析方法主要有阻抗分析法<sup>[4-5]</sup>与模态分析法<sup>[6-9]</sup>。阻抗分析法以关注公共连接点为边界, 将系统划分为源侧子系统和网侧子系统, 由两个子系统阻抗比确定系统稳定性。针对新能源场站系统存在的谐波不稳定问题, 文献[10]分别研究了跟网型逆变器和构网型逆变器谐波不稳定问题, 研究表明由于构网型逆变器交流电压控制环节会提高系统阻尼, 构网型逆变器比跟网型逆变器更适用于在弱电网情况下运行。文献[11]提出了一种改进的电网电压前馈方案, 并针对实际电网电压难以获取的问题, 进一步提出一种从公共连接点获取电网电压的方法, 通过仿真证明了改进的电网电压前馈方法有较强的阻尼和谐波抑制能力。文献[12-13]建立了并网逆变器的频域阻抗模型, 进一步分析了锁相环带宽、控制系统参数等因素对系统稳定性的影响。阻抗分析法的优势在于可以直观分析系统的谐波稳定性, 但其在建模中通常对子系统阻抗等效聚合, 因此该方法仅能判断谐波稳定性, 而难以分析谐波不稳定源头及网络薄弱环节。

模态分析法包括时域模态分析法和频域模态分析法。时域模态分析法最早由徐文远教授提出用于分析谐波放大问题<sup>[14]</sup>。针对传统时域模态分析法仅能定量分析谐波放大特性, 但无法分析系统谐波稳定性的问题, 文献[15]提出一种频域模态分析法, 其可通过参与因子定位谐波不稳定源头, 还可通过求解系统固有模式, 以判断系统稳定性和谐波不稳定频率。文献[16-17]将频域模态分析法运用于风电并网系统次同步振荡分析中, 指出风电场经串补以引发次同步振荡问题。文献[18]针对交直流混联系统中频域模态法参与因子无法准确刻画振荡特性的问题, 提出了一种基于对角占优理论的改进频域模态分析法。

然而, 上述研究大都将线路等效为集总参数模型, 无法在宽频范围内描述线路端口特性, 导致稳定性误判。文献[19]计及线路分布参数求解谐波稳定性, 关键是通过欧拉公式求解系统传递函数的极点分布从而评估系统的稳定性, 但在欧拉展开过程中忽略了拉普拉斯算子的实部, 仅保留算子的虚部, 导致求得的极点信息不完整, 即仅能求出复平面虚轴附近的极点, 必然造成稳定性误判。文献[20-21]提出基于奈奎斯特判据的谐波不稳定分析方法, 但该方法需满足奈奎斯特判据的使用前提: 1) 没有并网逆变器时, 电网电压是稳定的; 2) 电网的阻抗为

0 时, 逆变器的输出是稳定的。文献[2]提出了一种通过 Pade 近似求解系统零极点分布的方法, 并同时计及线路分布参数模型, 判断系统稳定性; 文献[3]提出基于广义奈奎斯特稳定判据的谐波不稳定分析方法, 并计及  $dq$  轴耦合特性研究谐波不稳定性。但文献[2]和文献[3]均忽略了 SVG 动态特性对谐波稳定性的影响。需要注意的是, SVG 在高频段存在负阻感区间<sup>[22-23]</sup>, 非常容易与长距离输电线路、逆变器和交流电网产生感容耦合造成宽频谐波不稳定。因此, 研究风电场谐波稳定性应该同时计及线路分布参数和 SVG 动态特性, 并求解节点对关注模式的参与度, 准确揭示系统谐波不稳定的中心位置。

综上, 本文的创新点可总结为: 针对长线路分布参数效应引入的超越方程导致固有模式难以求解, 以及未考虑 SVG 动态特性对宽频谐波不稳定性的影响问题, 本文提出一种基于泰勒近似的谐波不稳定中心位置确定方法, 不仅可以求解系统模式频率和阻尼, 还可定位谐波不稳定的源头。首先, 本文建立了同时计及线路分布参数和 SVG 的风电场阻抗模型。其次, 基于所提方法建立了风电场谐波不稳定节点参与程度指标, 给出系统发生谐波不稳定时的传递路径和中心位置, 揭示系统谐波不稳定机理。最后, 基于 Matlab/Simulink 仿真验证了所提方法的有效性和准确性。

## 1 风电场阻抗模型

考虑线路分布参数和 SVG 动态特性影响时, 风电场拓扑结构如图 1 所示, 多台风电机组构成一个风电集群, 不同集群发出电能通过箱式变压器和 35 kV 集电线路汇集, 最终通过 35 kV/110 kV 主变压器升压后送出至 110 kV 电网。

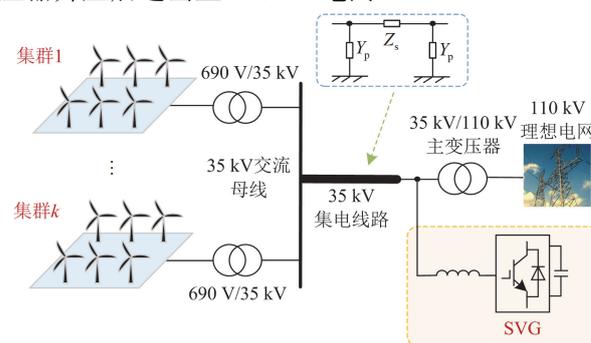


图 1 风电场结构拓扑

Fig. 1 Topology of wind farm

同时考虑线路分布参数和 SVG 的风电场电路模型如图 2 所示, 节点 1—3 分别连有 6 台逆变器, 节点 4—6 分别连有 3 台逆变器, 为便于表示, 仅画

出节点 1、2、6，节点 3、4、5 所连方式与节点 1、2、6 类似。各逆变器均采用相同控制系统，可用诺顿等效模型表示，建模过程见前期工作<sup>[21]</sup>。其中： $I_1$ — $I_6$  为不同风电机群的等效输出电流源； $Y_{inv1}$ — $Y_{inv6}$  分别为并网逆变器等效输出导纳；35 kV 线路阻抗和导纳分别用  $Z_s$  和  $Y_p$  表示；箱变和主变压器均采用纯电抗模型，分别用  $Y_{DT1}$ — $Y_{DT6}$  和  $Y_{mt}$  表示；110 kV 电网额定电压和等效阻抗分别为  $U_{grid}$  和  $Z_g$  ( $Y_g = 1/Z_g$ )；SVG 动态特性影响由其导纳  $Y_{Sinv}$  表示。

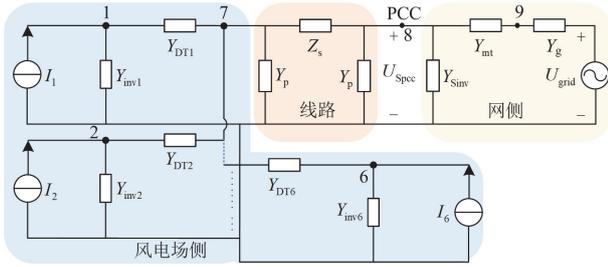


图 2 风电场等效阻抗模型  
Fig. 2 Equivalent impedance model of wind farm

复双曲函数修正的线路模型中  $Z_s$  和  $Y_p$  分别为

$$Z_s = Z_c \sinh(\gamma l) \quad (1)$$

$$Y_p = \frac{\cosh(\gamma l) - 1}{Z_c \sinh(\gamma l)} \quad (2)$$

式中： $l$  为线路的长度； $Z_c$  为线路的波阻抗； $\gamma$  为线路的传播系数。其表达式分别为<sup>[19]</sup>

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_0}{C_0} + \frac{R_0}{2s\sqrt{L_0 C_0}}} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{R_0}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0} + s\sqrt{L_0 C_0}} \quad (4)$$

式中： $R_0$ 、 $L_0$  和  $C_0$  分别为输电线路单位长度的电阻、电感和电容； $s = \sigma + j\omega$ 。

SVG 控制策略逻辑框图如图 3 所示<sup>[24]</sup>，由此可推导出简化后 SVG 等效导纳  $Y_{Sinv}$  为

$$Y_{Sinv}(s) = \frac{Y_{ps}(s)}{1 + Y_{ps}(s)G_{sd}(s)(G_{sis}(s - j\omega_1) - j\omega_1 L_s)} \quad (5)$$

式中： $\omega_1$  为系统基频角频率； $L_s$  为主电路滤波电感； $Y_{ps}(s) = 1/sL_s$ ； $G_{sd}(s)$  为 SVG 总时延传递函数，在  $s$  域的表达式如式(6)所示； $G_{sis}$  为 SVG 电流控制环节比例-积分控制器的传递函数，可表示为式(7)。

$$G_{sd} = e^{-1.5T_{ss}s} \approx \frac{1}{1.5T_{ss}s + 1} \quad (6)$$

式中， $T_{ss}$  为采样周期。

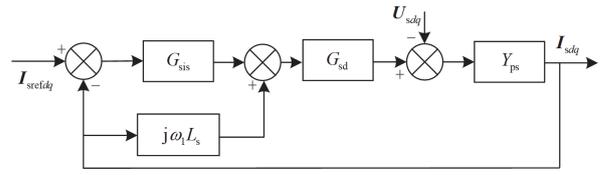


图 3 SVG 控制策略逻辑框图  
Fig. 3 SVG control strategy logic block diagram

$$G_{sis} = K_{ps} + \frac{K_{is}}{s} \quad (7)$$

式中： $K_{ps}$  为比例-积分控制器的比例系数； $K_{is}$  为比例-积分控制器的积分系数。

根据图 2 建立新能源场站的节点导纳矩阵  $Y_{SVG}(s)$  为

$$Y_{SVG}(s) = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D_{SVG} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中， $A$ 、 $B$ 、 $C$  和  $D_{SVG}$  表达式分别为

$$A = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & Y_{66} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$B = \begin{bmatrix} Y_{17} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{67} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$C = \begin{bmatrix} Y_{17} & \cdots & Y_{67} \\ 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$D_{SVG} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_s} + Y_p - \sum_{k=1}^6 Y_{k7} & -\frac{1}{Z_s} & 0 \\ -\frac{1}{Z_s} & \frac{1}{Z_s} + Y_p + Y_{mt} + Y_{Sinv} & -Y_{mt} \\ 0 & -Y_{mt} & Y_{grid} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中， $Y_{grid} = Y_{mt} + Y_g$ 。

由式(8)可推导出节点导纳矩阵行列式为

$$\det(Y_{SVG}(s)) = \left( \prod_{k=1}^6 Y_{kk} \right) (Y_g Y_{mt} Y_{total} + Y_g Y_{Sinv} Y_{total} - Y_{total} Y_{mt}^2 + \frac{Y_g}{Z_c^2} + (Y_g Y_{mt} + Y_g Y_{total} + Y_g Y_{Sinv} - Y_{mt}^2) \cosh(\gamma l) / (Z_c \sinh(\gamma l))) \quad (13)$$

式中， $Y_{total} = \sum_{k=1}^6 (-Y_{k7} - Y_{k7}^2 / Y_{kk})$ 。

根据式(13)可知，系统频域节点导纳矩阵行列式为含双曲函数的超越方程，无法得到其零点方程

的解析解。

## 2 谐波不稳定源头定位方法

网络的阻抗模型通常使用节点导纳矩阵  $\mathbf{Y}(s)$  表示, 节点电压方程可写为

$$\mathbf{U}(s) = \mathbf{Y}(s)^{-1} \mathbf{I}(s) \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{U}(s)$  为电压向量;  $\mathbf{I}(s)$  为注入电流向量。

在频域模态分析中, 通过求取节点导纳矩阵行列式  $\det(\mathbf{Y}(s))$  的零点, 可求得系统的固有模式为<sup>[25]</sup>

$$\det(\mathbf{Y}(s)) = 0 \quad (15)$$

将求得的固有模式记作  $s_i = \sigma_i + j\omega_i$ , 则模式频率  $f_i$  和模式阻尼  $\xi_i$  分别为

$$\begin{cases} \xi_i = -\frac{\sigma_i}{\sqrt{(\sigma_i^2) + (\omega_i^2)}} \\ f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \end{cases} \quad (16)$$

若存在  $\sigma_i > 0$ , 则系统呈现负阻尼状态, 对应谐波频率  $f_i$  将持续放大, 即系统发生谐波不稳定; 若  $\sigma_i$  均为负, 系统所有模式呈现正阻尼状态, 系统可稳定运行。若模式阻尼  $\xi_i$  过小, 此时系统表现为弱阻尼模式, 则对应谐波频率  $f_i$  将发生放大。

超越方程(13)的固有模式解析解无法获得, 但倘若能求得其近似解, 亦可基于固有模式分析谐波稳定性。为此, 提出一种基于多项式逼近方法求解系统超越方程的固有模式近似解。该方法通过多项式逼近, 将系统超越方程中的双曲函数近似为有理分式, 以求解系统的固有模式。

将固有模式  $s = \sigma + j\omega$  代入双曲函数中的指数函数可得

$$\begin{cases} e^{-\gamma l} = e^{-\frac{lR_0}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} - l\sqrt{L_0 C_0} \sigma} \angle -\omega l \sqrt{L_0 C_0} \\ e^{\gamma l} = e^{\frac{lR_0}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} + l\sqrt{L_0 C_0} \sigma} \angle \omega l \sqrt{L_0 C_0} \end{cases} \quad (17)$$

在新能源场站中, 对于选定的线路长度和型号, 线路的参数  $l$ 、 $R_0$ 、 $L_0$  和  $C_0$  均为常数, 因此  $e^{-\gamma l}$  和  $e^{\gamma l}$  幅值取决于  $\sigma$ 。将复平面按照实部轴划分为 3 个区域, 并用  $\sigma_L$  和  $\sigma_R$  分别表示 3 个区域划分的两条边界线实部值, 也即是  $\sigma < \sigma_L$  对应的复平面为区域一,  $\sigma > \sigma_R$  对应的复平面为区域三, 其余为区域二。只要  $\sigma$  足够小, 此时  $\sigma = \sigma_L$ , 则有  $e^{\gamma l} = \cosh(\gamma l) + \sinh(\gamma l) \approx 0$ 。同理, 只要  $\sigma$  足够大, 此时  $\sigma = \sigma_R$ , 则有  $e^{-\gamma l} = \cosh(\gamma l) - \sinh(\gamma l) \approx 0$ 。需要说明的是,

选取  $-\sigma_L = \sigma_R = 20000$ , 此时  $e^{\gamma l} = 9.1 \times 10^{-5} \approx 0$ ,  $e^{-\gamma l} = 8.6 \times 10^{-5} \approx 0$ 。

当  $\sigma_L < \sigma < \sigma_R$  时, 双曲正弦和双曲余弦函数均可采用泰勒多项式逼近:

$$\begin{cases} \sinh(\gamma l) \approx (\gamma l) + \frac{(\gamma l)^3}{3!} + \dots + \frac{(\gamma l)^{2m-1}}{(2m-1)!} \\ \cosh(\gamma l) \approx 1 + \frac{(\gamma l)^2}{2!} + \dots + \frac{(\gamma l)^{2m}}{(2m)!} \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $m$  表示多项式逼近阶数,  $m$  越大, 有理分式越逼近双曲函数。

综上, 当  $\sigma < \sigma_L$  时,  $\cosh(\gamma l) = -\sinh(\gamma l)$ ; 当  $\sigma > \sigma_R$  时,  $\cosh(\gamma l) = \sinh(\gamma l)$ 。此时, 双曲正余弦可进行约分,  $\det(\mathbf{Y}(s))$  可最终简化为有理分式。

为说明所提多项式近似方法的准确性, 仅须证明  $\det(\mathbf{Y}(s))$  中与双曲函数相关的方程式近似前后精确性即可, 将超越方程记为

$$\varphi = \frac{(Y_{mt}^2 + Y_g Y_{mt} + Y_g Y_{total}) \cosh(\gamma l)}{Z_c \sinh(\gamma l)} \quad (19)$$

利用多项式逼近后, 采用扫点法计算超越方程  $\varphi$  近似前后的实部和虚部相对误差。若实部和虚部相对误差不在可接受范围内, 可增加泰勒多项式阶数  $m$ 。由此, 系统节点导纳矩阵行列式最终可简化为有理分式, 并可获得其固有模式。

为定位谐波不稳定源头, 将任意一个固有模式  $s_k$  代入节点导纳矩阵, 得到  $\mathbf{Y}(s_k)$ , 并将  $\mathbf{Y}(s_k)$  进行特征分解, 如式(20)所示。

$$\mathbf{Y}(s_k) = \mathbf{L} \mathbf{\Lambda} \mathbf{T} \quad (20)$$

式中:  $\mathbf{L}$  为左特征向量矩阵,  $\mathbf{L} = [\mathbf{L}_1, \mathbf{L}_2, \dots, \mathbf{L}_n]$ ;  $\mathbf{\Lambda}$  为对角特征值矩阵,  $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ ;  $\mathbf{T}$  为右特征向量矩阵,  $\mathbf{T} = [\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{T}_n]$ ,  $\mathbf{L} = \mathbf{T}^{-1}$ 。由于矩阵行列式等于其各特征值的乘积, 模式  $s_k$  下的  $\det(\mathbf{Y}(s_k)) = 0$ , 存在一个特征值为 0, 将该特征值记为  $\lambda_p$ 。

将式(20)代入  $\mathbf{U} = \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{I}$  可得

$$\mathbf{U} = \mathbf{L} \mathbf{\Lambda}^{-1} \mathbf{T} \mathbf{I} \quad (21)$$

当系统发生模式  $p$  谐波不稳定时,  $\lambda_p^{-1}$  的值远大于其他特征值的倒数, 则式(21)可简化为

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \lambda_p^{-1} \mathbf{S}_m \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中,  $\mathbf{S}_m$  为参与因子矩阵, 表达式为

$$S_m = \begin{bmatrix} L_{1p}T_{p1} & L_{1p}T_{p2} & \cdots & L_{1p}T_{pn} \\ L_{2p}T_{p1} & L_{2p}T_{p2} & \cdots & L_{2p}T_{pn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{np}T_{p1} & L_{np}T_{p2} & \cdots & L_{np}T_{pn} \end{bmatrix} \quad (23)$$

将式(23)矩阵对角元素定义为参与因子,表示节点在固有模式下的可观度和可控度的结合,反映了节点对模式  $p$  的贡献度和参与度。

综上所述,频域模态分析法的优势在于该方法不仅可结合模式阻尼判断系统稳定性,还可通过模式频率确定谐波不稳定的频率,同时通过节点对模式的参与因子,定位发生谐波不稳定源头。同样,在系统稳定时,可通过模式频率确定潜在谐波放大点的频率,亦可根据参与因子定位谐波放大主导节点。

需要指出的是,一般而言尚需进一步定量描述影响谐振频带的主要因素,具体可参考文献[26]的研究成果,本质是基于偏导思想,通过固有模式直接求解元件灵敏度,解决了元件的灵敏度计算因特征值为 0 导致传统模态分析法失效的问题,可定量求解网络元件参数变化对任意关注模式阻尼和频率的影响程度。

### 3 SVG 接入及线路分布参数模型对固有模式的影响分析

#### 3.1 SVG接入及线路分布参数模型对稳定性的影响

为分析线路长度对系统固有模式的影响,对线路长度进行遍历。在工程中,线路长度取决于其所在的电压等级,例如,35 kV 线路长度通常在 20~50 km<sup>[27-28]</sup>。文中风电场参数如表 1 所示,SVG 参数如表 2 所示,分析中将所有参数归算到 35 kV 侧。

表 1 风电场参数

Table 1 Parameters of wind farms

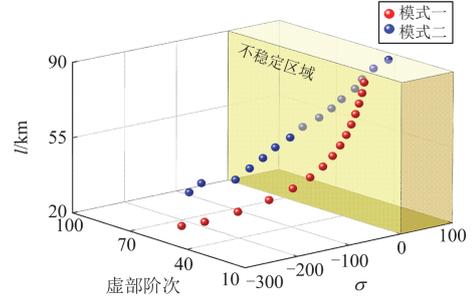
参数	数值	参数	数值
电感 $L_1$ /mH	0.025	MT 额定电压 $U_1^{MT}, U_2^{MT}$ /kV	35, 110
电感 $L_2$ /mH	0.4	MT 额定容量 $S_N^{MT}$ /MVA	100
滤波电容 $C_f$ /μF	33.4	MT 短路电压比 $U_k^{MT}$ %	10.5%
寄生电阻 $R_d$ /Ω	1	DT 额定电压 $U_1^{DT}, U_2^{DT}$ /kV	0.69, 35
PI 控制器 $K_p, K_i$	10, 1000	DT 额定容量 $S_N^{DT}$ /MVA	1.6
锁相环 $K_p^{PLL}, K_i^{PLL}$	0.4, 20	DT 短路电压比 $U_k^{DT}$ %	6.5%
线路每千米电阻 $R_0$ /Ω	0.047	线路每千米电感 $L_0$ /mH	0.3821
电网电压 $U_{\text{grid}}$ /kV	110	线路每千米电容 $C_0$ /μF	0.228

表 2 SVG 参数

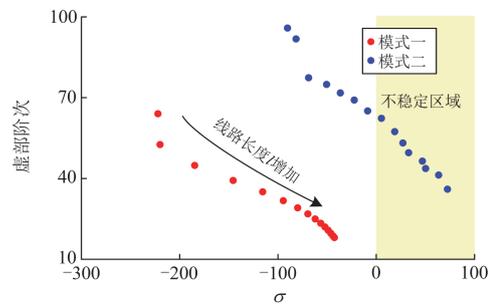
Table 2 Parameters of SVG

参数	数值	参数	数值
额定容量 $S_N^{SVG}$ /MVA	15	额定电压 $U_{\text{SVG}}$ /kV	38.5
滤波电感 $L_{\text{SVG}}$ /mH	4.8	内环 PI 控制器 $K_p^{SVG}, K_i^{SVG}$	0.3, 0.03

当系统短路比为 5.56 且线路长度从 20 km 增加到 90 km 时,SVG 接入后系统固有模式的实部和虚部阶次变化如图 4 所示。其中,模式一和模式二为所提方法获取的两个固有模式。



(a) 考虑SVG的新能源场站固有模式实部与虚部阶次变化



(b) 考虑SVG的新能源场站固有模式实部与虚部阶次变化俯视图

图 4 考虑 SVG 的新能源场站固有模式的实部与虚部阶次分布

Fig. 4 Natural mode real and imaginary part order distribution considering SVG in the renewable power plant

由图 4 可知,当考虑线路分布参数模型时,随着线路长度由 20 km 增加至 90 km,模式一和模式二的实部均不断增加,虚部阶次不断减小,且模式二的实部在线路长度  $l = 50$  km 时越过虚轴,导致系统呈现负阻尼状态,发生谐波不稳定现象。

为对比分析 SVG 接入对新能源场站谐波稳定性的影响,下面将以系统短路比为 5.56 的特殊场景,分析 SVG 接入前后系统弱/负阻尼固有模式实部和虚部阶次随线路长度  $l$  的变化情况。

当系统短路比为 5.56,线路长度  $l$  由 20 km 逐渐增加至 90 km 时,SVG 接入前后系统固有模式实部和虚部阶次变化如图 5 所示。其中,紫色三角图标和绿色三角图标分别为 SVG 接入前系统固有模式(即模式三)实部和虚部阶次变化趋势,红色圆形图标和蓝色圆形图标分别为 SVG 接入后系统固有模式(即模式四)实部和虚部阶次变化趋势。

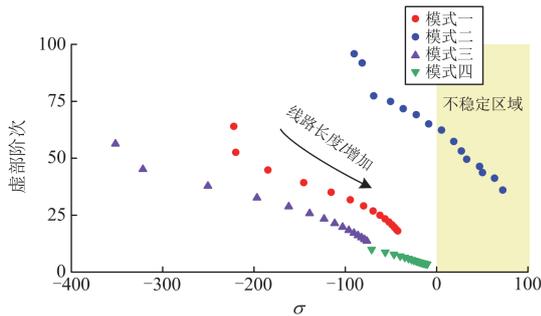


图 5 短路比为 5.56 时, SVG 接入前后固有模式的实部与虚部阶次分布

Fig. 5 Natural mode real and imaginary part order distribution before and after SVG access when  $S_{CR} = 5.56$

根据图 5, 对比模式一和模式四、模式二和模式三的变化可知, 当 SVG 接入后, 系统固有模式实部均增加, 虚部阶次增加, 说明 SVG 接入后, 系统模式阻尼降低, 且模式频率增加, 系统更易发生高频谐波不稳定。对比模式二和模式四可知, 当 SVG 接入前, 系统此模式均未越过虚轴, 系统保持稳定; 当 SVG 接入后, 系统固有模式在线路长度  $l = 55 \text{ km}$  时越过虚轴, 系统发生谐波不稳定现象; 对比模式一和模式三可知, 当 SVG 接入后, 系统阻尼降低, 且系统模式频率增加, 证明 SVG 易与逆变器和线路分布参数模型交互, 导致系统高频谐波放大, 恶化电能质量。

### 3.2 节点对固有模式参与因子分析

为进一步分析 SVG 接入后新能源场站发生谐波放大、谐波不稳定问题的主导节点, 对 SVG 接入后新能源场站系统进行参与因子分析。下面将讨论两种特殊场景: 第一种情况为 SVG 接入后系统仅存在弱阻尼高频固有模式, 此时系统短路比为 5.56 且线路长度  $l = 50 \text{ km}$ ; 第二种情况为 SVG 接入后系统存在负阻尼固有模式, 此时系统短路比为 2.37 且线路长度  $l = 50 \text{ km}$ 。

1) 情况一: SVG 接入后系统存在高频弱阻尼固有模式, 当系统短路比为 5.56 且线路长度  $l = 50 \text{ km}$  时, 系统存在一个弱阻尼模式。此时, 系统弱阻尼模式的实部和虚部阶次分别为 -8.68 和 65.08, 可以推测系统 65.08 次附近的谐波将发生放大。为进一步定位谐波放大的主要参与节点, 针对阻尼更低的弱阻尼模式一, 计算各节点的参与因子, 结果见表 3。

由表 3 可知, 当系统短路比为 5.56 且线路长度  $l = 50 \text{ km}$  时, 此时系统发生高频谐波放大问题, 节点 7—9 参与因子最高, 节点 7—9 最容易发生高频谐波放大现象, 为高频谐波放大的主导节点。可得结论: 线路分布参数和 SVG 易诱发新能源场站高频

谐波放大。

表 3 情况一下节点的参与因子

Table 3 Participation factor of nodes in scenario I

节点	参与因子/%	节点	参与因子/%	节点	参与因子/%
1	7.87	4	6.01	7	19.31
2	7.87	5	6.01	8	22.45
3	7.87	6	6.01	9	16.60

2) 情况二: SVG 接入后系统存在负阻尼固有模式和弱阻尼固有模式。当系统短路比为 2.37 且线路长度  $l = 50 \text{ km}$  时, 系统存在一个负阻尼固有模式。此时, 系统负阻尼模式实部和虚部阶次分别为 82.69 和 64.85, 由此可以推测系统会发生谐波不稳定现象, 且 64.85 次附近的谐波将被严重放大, 系统不稳定。为进一步定位谐波放大的主要参与节点, 针对不稳定固有模式, 计算各节点的参与因子, 结果见表 4。

表 4 情况二下节点的参与因子

Table 4 Participation factor of nodes in scenario II

节点	参与因子/%	节点	参与因子/%	节点	参与因子/%
1	8.45	4	5.56	7	14.42
2	8.45	5	5.56	8	28.47
3	8.45	6	5.56	9	15.08

由表 4 可知, 当系统短路比为 2.37 且线路长度  $l = 50 \text{ km}$  时, 系统发生高频谐波不稳定, 节点 8 的参与因子最高, 节点 9 的参与因子次之, 节点 7 的参与因子也较大, 节点 1—3 和节点 4—6 参与因子最小。说明在此高频谐波不稳定模式下, 节点 8 为发生谐波不稳定的主导节点。可得结论: 当 SVG 接入后新能源场站发生高频谐波不稳定的本质原因是 SVG 负阻感特性与线路容性分布参数感容耦合。

## 4 仿真实验

为验证 SVG 接入后频域模态分析法的准确性, 在电磁暂态仿真软件 Matlab/Simulink 平台上搭建如图 2 所示的新能源场站模型, 设计与 3.2 节相同的两种情况。

1) 设计情况一仿真场景如下: SVG 接入后新能源场站系统存在负阻尼固有模式和弱阻尼固有模式, 此时系统短路比为 5.56 且线路长度  $l = 70 \text{ km}$ 。仿真中系统并网点电压  $U_{Spcc}$  的时域波形见图 6。

由图 6 可知, 系统短路比为 5.56, 线路长度  $l = 70 \text{ km}$  且 SVG 接入后, 系统并网点电压  $U_{Spcc}$  发生了高频谐波严重放大, 并网点电压  $U_{Spcc}$  电能质量严重恶化, 即产生了高频谐波不稳定现象。仿真结果证明了系统稳定性理论分析的准确性(即短路比为 5.56, 线路长度  $l = 70 \text{ km}$  时, 系统不稳定)和 SVG

高频阻抗建模的准确性。

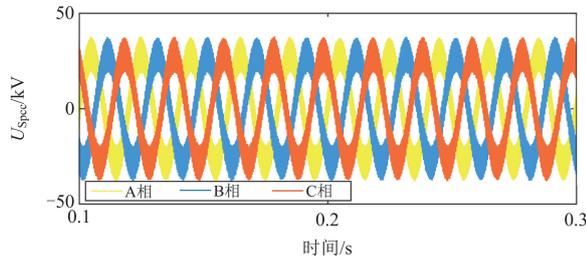


图 6 SVG 接入后,  $U_{Spcc}$  时域波形

Fig. 6  $U_{Spcc}$  time-domain waveform after SVG access

当系统短路比为 5.56, 线路长度  $l = 70$  km 时, 为了进一步验证所分析的 SVG 接入后谐波不稳定固有模式频率分析的准确性, 对图 6 中 A 相电压的时域波形进行傅里叶分解, 见图 7。注意, 谐波电压幅值百分比表示傅里叶分解后每个频率对应的谐波含量。当系统发生高频谐波不稳定时,  $U_{Spcc}$  的 A 相频谱尖峰与第 3.2 节中理论分析得出的系统谐波不稳定频率均在 2500 Hz 附近。此外, 可以看出  $U_{Spcc}$  的 A 相频谱于 1050 Hz 附近也存在一个尖峰, 与第 3.2 节中理论分析得出的系统存在弱阻尼导致谐波放大频率在 1098.5 Hz 的结论一致。仿真结果证明了频域模态分析法对 SVG 接入后系统谐波不稳定、谐波放大模式分析的准确性。

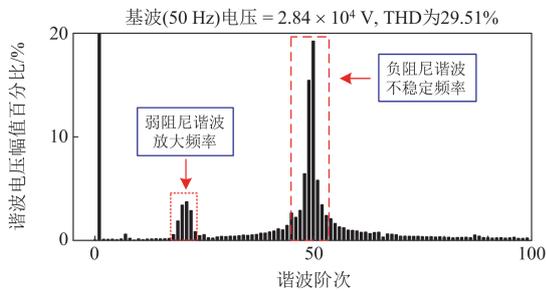


图 7 SVG 接入后,  $U_{Spcc}$  频谱图

Fig. 7 Spectrum of the  $U_{Spcc}$  after SVG access

为验证前文所分析的 SVG 接入后对系统谐波稳定性的影响并验证所提参与因子的准确性, 设计如下情况: 系统短路比为 5.56, 线路长度  $l = 70$  km, 在 0.4 s 时, 接入无功补偿装置 SVG。图 8 为  $U_{Spcc}$  时域波形图。

根据图 8 可知, 当新能源场站系统未接入 SVG 时, PCC 点电压  $U_{Spcc}$  波形良好, 系统稳定。仿真结果验证了第 3.2 节 SVG 接入前对新能源场站系统稳定性分析结果。同时在 0.4 s 时接入无功补偿装置 SVG, 也即是谐波不稳定主要元件, 系统失稳, PCC

点电压  $U_{Spcc}$  时域波形发散, 仿真结果验证了第 3.2 节 SVG 接入后对新能源场站系统稳定性分析结果。此外, 在 0.4 s 时接入无功补偿装置 SVG 后, 新能源场站系统失去稳定, 证明了 SVG 为谐波不稳定主导元件。

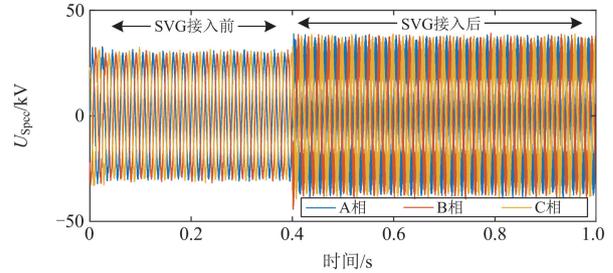


图 8  $U_{Spcc}$  时域波形

Fig. 8  $U_{Spcc}$  time-domain waveform

为进一步验证 SVG 接入后系统存在高频弱阻尼固有模式参与因子的准确性, 设计仿真场景如下: 系统短路比为 5.56 且线路长度  $l = 50$  km。仿真中系统并网点电压  $U_{Spcc}$  的时域波形见图 9。

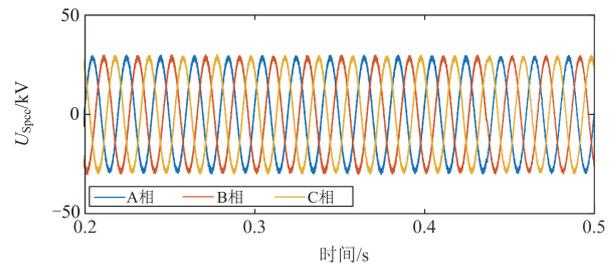


图 9 线路长度  $l = 50$  km,  $U_{Spcc}$  时域波形

Fig. 9  $U_{Spcc}$  time-domain waveform when  $l = 50$  km

由图 9 的仿真结果可知, 系统短路比为 5.56 且线路长度  $l = 50$  km, SVG 接入后系统并网点电压  $U_{Spcc}$  时域波形良好, 没有发散振荡, 系统稳定。由此, 仿真验证了第 3.2 节中基于频域模态分析法对系统稳定性的分析结果(即短路比为 5.56, 线路长度  $l = 50$  km 时, 系统稳定)。

当系统短路比为 5.56, 线路长度  $l = 50$  km 时, 为了验证所分析的 SVG 接入后谐波放大时固有模式频率分析的准确性, 对图 9 中 A 相电压的时域波形进行傅里叶分解, 见图 10。当系统发生高频谐波放大时,  $U_{Spcc}$  的 A 相频谱尖峰与第 3.2 节中理论分析得出的系统谐波放大频率均在 3254 Hz 和 1453.5 Hz 附近。仿真结果证明了频域模态分析法对 SVG 接入后系统谐波放大模式分析的准确性。

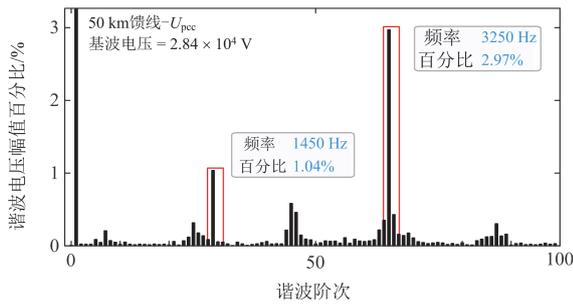


图 10 线路长度  $l = 50 \text{ km}$ ,  $U_{\text{Spec}}$  频谱

Fig. 10 Spectrum of the  $U_{\text{Spec}}$  when  $l = 50 \text{ km}$

系统短路比为 5.56, 线路长度  $l = 50 \text{ km}$  时, 为验证文中所提 SVG 接入后节点参与因子的准确性, 对各节点的时域波形进行傅里叶分解, 由于情况一有两个弱阻尼模式, 因此选择阻尼更低的模式(即频率为 3254 Hz 的模式)进行分析, 见表 5。

表 5 各节点 A 相 3200~3300 Hz 谐波电压幅值百分比

Table 5 A-phase 3200~3300 Hz harmonic voltage amplitude percentage of each node

节点编号	谐波电压幅值百分比/%		
	3200 Hz	3250 Hz	3300 Hz
节点 1—3	0.21	1.52	0.19
节点 4—6	0.20	1.43	0.18
节点 7	0.21	2.77	0.32
节点 8	0.35	2.97	0.43
节点 9	0.20	2.56	0.23

对比表 3 中各节点参与因子大小与表 5 中各节点的谐波含量大小, 可验证所计算节点参与因子的准确性。与前文中分析情况一类似, 表 3 中节点 8 参与因子最高, 因此当 SVG 接入后新能源场站系统发生高频谐波放大现象时, 节点 8 受到的影响最大, 节点 7 和节点 9 次之, 节点 1—3 和节点 4—6 所受影响较小; 表 5 中, 节点 8 的 3250 Hz 附近的谐波电压幅值百分比最高, 因此节点 8 为谐波放大主导节点, 节点 7 和节点 9 次之, 同时节点 1、2、3 和节点 4、5、6 的 3250 Hz 附近谐波电压幅值百分比逐渐降低, 由此验证了系统短路比为 5.56、线路长度  $l = 50 \text{ km}$  时, 第 4.3 节中所得节点参与因子的准确性。

2) 设计情况二仿真场景如下: SVG 接入后新能源场站系统存在负阻尼固有模式和弱阻尼模式时, 此时系统短路比为 2.37 且线路长度  $l = 50 \text{ km}$ 。对各节点电压 A 相时域波形进行傅里叶分解, 由于不稳定模式频率在 3242 Hz 附近, 因此仅取各节点 3242 Hz 附近谐波电压频谱进行分析, 见表 6。

对比表 4 中节点参与因子大小和表 6 中谐波电压幅值百分比大小, 可以验证 SVG 接入后所计算节

点参与因子的准确性。表 4 中, 节点 8 参与因子最高, 因此当 SVG 接入后新能源场站系统发生谐波不稳定现象时, 节点 8 受到的影响最大, 节点 7 和节点 9 次之, 节点 1—3 和节点 4—6 所受影响较小; 表 6 中, 节点 8 的 3242 Hz 附近谐波电压幅值百分比最高, 因此当谐波不稳定发生时, 节点 8 最容易受到系统谐波不稳定的影响, 节点 7 和节点 9 次之, 同时节点 1—3 和节点 4—6 的 3242 Hz 附近谐波电压幅值百分比逐渐降低, 由此验证了系统短路比为 2.37、线路长度  $l = 50 \text{ km}$  时, 第 4.3 节中所得节点参与因子的准确性。

表 6 各节点 A 相 3150~3300 Hz 谐波电压幅值百分比

Table 6 A-phase 3150~3300 Hz harmonic voltage amplitude percentage of each node

节点编号	谐波电压幅值百分比/%			
	3150 Hz	3200 Hz	3250 Hz	3300 Hz
节点 1—3	4.33	8.69	9.30	3.17
节点 4—6	3.32	8.53	8.28	3.23
节点 7	5.46	12.69	18.91	4.16
节点 8	6.42	15.53	20.52	5.21
节点 9	6.38	14.12	19.31	4.17

## 5 结论

针对 SVG 易与长距离输电线路和交流电网交互, 导致新能源场站高频谐波进一步放大, 直至发生高频谐波不稳定问题。首先建立了同时计及 SVG 和线路分布参数的新能源场站频域节点导纳矩阵, 然后提出一种基于泰勒逼近的新能源场站谐波不稳定频域模态分析法, 同时求解系统模式频率和阻尼, 并定位谐波不稳定源头。最后, 基于节点参与因子分析 SVG 接入后对系统高频谐波不稳定的影响。研究表明: 1) SVG 接入后, 系统固有模式阻尼降低且频率增高, 系统易发生高频谐波放大问题。2) 由于无功补偿装置 SVG 负阻感特性与线路容性分布参数感容耦合, 导致新能源场站高频谐波进一步放大, 直至发生高频谐波不稳定问题。当新能源场站发生高频谐波不稳定问题时, SVG 和线路分布参数均为高频谐波不稳定的主导因素。

利用本文研究结果, 可对风电场设计和运行阶段的宽频谐波稳定性进行技术指导, 具体而言:

- 1) 风电场设计阶段, 进行谐波不稳定源定位研究可评估系统的稳定性及谐波放大现象, 采取有效的谐波抑制措施, 如安装滤波器、无功补偿装置等;
- 2) 风电场运行阶段, 分析其谐波不稳定的中心位置, 切除系统主要不稳定源头, 或为系统谐波抑制装置的参数、安装位置等提供决策依据。

## 参考文献

- [1] 国家能源局. 新型电力系统发展蓝皮书[M]. 北京: 中国电力出版社, 2023.
- [2] 徐方维, 陈楷, 郑鸿儒, 等. 一种求解超越方程零极点分布的谐波不稳定分析方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 61-72.  
XU Fangwei, CHEN Kai, ZHENG Hongru, et al. A harmonic instability analysis method for solving the zero and pole distributions of the transcendental equation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 61-72.
- [3] 徐方维, 陈楷, 郑鸿儒, 等. 基于超越方程极点分布间接判定的分布式电站谐波不稳定分析方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(2): 139-146.  
XU Fangwei, CHEN Kai, ZHENG Hongru, et al. Harmonic instability analysis method of distributed power plants based on indirect determination of pole distribution of transcendental equation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(2): 139-146.
- [4] 刘普, 崔艺博, 刘兆峰, 等. 基于阻抗分析法的并网逆变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.
- [5] SINGH P, KUMAR U, CHOUDHARY N K, et al. Advancements in protection coordination of microgrids: a comprehensive review of protection challenges and mitigation schemes for grid stability[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(6): 156-183.
- [6] HUANG Zhenyu, CUI Yu, XU Wilsun. Application of modal sensitivity for power system harmonic resonance analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 222-231.
- [7] 唐振东, 杨洪耕. 偏远地区风电场并网系统串联谐振分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 120-125.  
TANG Zhendong, YANG Honggeng. Series resonance analysis on grid-connected system of wind farm in remote areas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 120-125.
- [8] 唐振东, 杨洪耕, 袁林. 弱电网下多逆变器并网控制通道间的交互影响分析[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3524-3531.  
TANG Zhendong, YANG Honggeng, YUAN Lin. Analysis on interactive influences among control loops of multi inverters connected to weak-structured power system[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3524-3531.
- [9] 陈林, 徐永海, 王天泽, 等. 弱电网下计及背景谐波的多并网逆变器阻抗重塑谐振抑制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 59-72.  
CHEN Lin, XU Yonghai, WANG Tianze, et al. Resonance suppression method for multiple grid-connected inverters with impedance remodeling with background harmonics in a weak power grid[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 59-72.
- [10] 雷雨, 李光辉, 王伟胜, 等. 跟网型和构网型新能源并网控制阻抗对比与振荡机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 150-163.  
LEI Yu, LI Guanghui, WANG Weisheng, et al. Comparison of impedance characteristics and oscillation mechanism for grid following and grid forming renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 150-163.
- [11] WANG Xuehua, QIN Kuang, RUAN Xinbo, et al. A robust grid-voltage feedforward scheme to improve adaptability of grid-connected inverter to weak grid condition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2): 2384-2395.
- [12] 吴恒, 阮新波, 杨东升. 弱电网条件下锁相环对 LCL 型并网逆变器稳定性的影响研究及锁相环参数设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5259-5268.  
WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng. Research on the stability caused by phase-locked loop for LCL-type grid-connected inverter in weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5259-5268.
- [13] 杨苓, 陈燕东, 周乐明, 等. 弱电网下锁相环对三相 LCL 型并网逆变器小扰动建模影响及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 3792-3804.  
YANG Ling, CHEN Yandong, ZHOU Leming, et al. Effect of phase locked loop on the small-signal perturbation modeling and stability analysis for three-phase LCL-type grid-connected inverter in weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3792-3804.
- [14] 徐文远, 张大海. 基于模态分析的谐波谐振评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 89-93.  
XU Wenyuan, ZHANG Dahai. A modal analysis method for harmonic resonance assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 89-93.
- [15] EBRAHIMZADEH E, BLAABJERG F, WANG Xiongfei, et al. Small signal modeling of wind farms[C]// Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), October 1-5, 2017, Cincinnati, OH, USA.
- [16] 占颖, 吴琛, 谢小荣, 等. 风电并网系统次同步振荡的频域模式分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 90-97.  
ZHAN Ying, WU Chen, XIE Xiaorong, et al. Frequency domain modal analysis of subsynchronous oscillation in

- grid-connected wind power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 90-97.
- [17] ZHAN Ying, XIE Xiaorong, LIU Huakun, et al. Frequency-domain modal analysis of the oscillatory stability of power systems with high-penetration renewables[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1534-1543.
- [18] 宗皓翔, 张琛, 蔡旭. 电力电子主导的交直流混联电网振荡分析与评估[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3844-3856.  
ZONG Haoxiang, ZHANG Chen, CAI Xu. Oscillation analysis and evaluation of the power electronics-dominated hybrid AC/DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3844-3856.
- [19] 陈智勇, 罗安, 黄旭程, 等. 基于欧拉公式的宽频谐波谐振稳定性评估法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1509-1523.  
CHEN Zhiyong, LUO An, HUANG Xucheng, et al. Euler's formula-based stability assessment for wideband harmonic resonances[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1509-1523.
- [20] PENG Xianghua, YANG Honggeng. Impedance-based stability criterion for the stability evaluation of grid-connected inverter systems with distributed parameter lines[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 9(1): 145-157.
- [21] PENG Xianghua, YANG Honggeng. Stability analysis of multi-paralleled grid-connected inverters including distribution parameter characteristics of transmission lines[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(1): 145-157.
- [22] 陈继开, 祝世启, 王瑞全, 等. 集群风场系统链式 SVG 高频谐振分析与抑制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 52-62.  
CHEN Jikai, ZHU Shiqi, WANG Ruiquan, et al. Analysis and suppression of chained SVG high-frequency resonance in a cluster wind farm system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 52-62.
- [23] 陈继开, 李平, 常旗峰, 等. 含 SVG 的双馈风场风速变化条件下高频谐振问题分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 38-50.  
CHEN Jikai, LI Ping, CHANG Qifeng, et al. Analysis of high frequency resonance problem in doubly-fed wind field systems with SVG with wind speed variation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5): 38-50.
- [24] 熊小玲, 罗博晨, 刘京波, 等. 计及 SVG 的双馈风电场高频阻抗建模及振荡分析[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 2905-2917.  
XIONG Xiaoling, LUO Bochen, LIU Jingbo, et al. High frequency impedance modeling and oscillation analysis of DFIG-based station considering SVG[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2905-2917.
- [25] 徐方维, 卢煜国, 郭凯, 等. 计及线路分布参数的新能源场站谐波不稳定源头定位[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(10): 124-131.  
XU Fangwei, LU Yuguo, GUO Kai, et al. Source location of harmonic instability in renewable energy stations considering line distribution parameters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(10): 124-131.
- [26] 徐方维, 李鑫玥, 刘桐雨, 等. 计及多电压等级电缆分布参数的海上风电场谐波不稳定灵敏度分析[J/OL]. 电网技术: 1-13[2025-03-04]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1167>.
- [27] 吴敬坤, 中国电力工程顾问集团有限公司, 中国能源建设集团规划设计有限公司. 电力工程设计手册 24: 电力系统规划设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- [28] XU Fangwei, ZHENG Hongru, WANG Chuan, et al. Online cable insulation condition evaluation using harmonic measurement data[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-13.

收稿日期: 2024-11-11; 修回日期: 2025-02-17

作者简介:

邓伊扬(2004—), 女, 本科生, 主要研究方向为电能质量及谐波; E-mail: dengyiyang2004@163.com

徐方维(1978—), 通信作者, 女, 博士, 教授, 主要研究方向为电能质量、谐波与海上风电并网等; E-mail: xufangwei@scu.edu.cn

李鑫玥(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源场站谐波不稳定。E-mail: lxy2000@stu.scu.edu.cn

(编辑 魏小丽)