双类型风机协同离网风电场序阻抗建模与小干扰稳定分析

籍宏震[1]，王媛媛[1]，叶宇轩[2]，屈俊辉[1]，樊秋敏[1]
（1. 长沙理工大学电网防灾减灾全国重点实验室，长沙市 410114；
2. 中车株洲电力机车有限公司，湖南省株洲市 412001）

摘　要：【目的】风电场送出线路故障或检修后会进入离网状态，该状态系统支撑薄弱、易诱发小干扰失稳。为维持离网状态风场热备用稳定运行，实现送出线路故障消除后风场快速并网、减少弃风损失，提出离网风场序阻抗建模与小干扰稳定分析方法。【方法】首先，依托谐波线性化建立虚拟同步发电机（virtual synchronous generator，VSG）构网型风机与无功补偿策略跟网型风机的序阻抗模型，明晰构网风机主动频率电压支撑、无功补偿风机精准匹配系统无功需求的协同运行机制；其次，基于电路叠加定理，将离网风场整体复杂序阻抗模型解构为构网风机、无功补偿风机主导的子网络，进一步结合奈奎斯特判据，提出了系统小干扰稳定性分析方法，揭示关键参数对系统稳定-失稳演化规律的影响，为关键参数区间的选择与稳定性评估提供理论参考。【结果】Matlab/Simulink 仿真结果表明，所提方法能够有效判别离网风场小干扰稳定性。电压幅值与线路阻抗参数对系统稳定性存在显著影响，通过优化核心参数区间可保证风场离网状态下黑启动及后续热备用稳定运行。【结论】所提方法能够为风电场离网黑启动、热备用状态的小干扰稳定运行提供理论支撑与技术参考，该方法可为其他类型新能源装备构成的离网电力系统小干扰稳定性分析提供建模框架参考。

关键词：风电场离网系统；黑启动；热备用；构网型风机；风机无功补偿能力；等值序阻抗模型；小干扰稳定性评估
中图分类号：TM614　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-7229（2026）11-0102-14
DOI：10. 12204/j. issn. 1000-7229. 2026. 11. 008

Sequence Impedance Modeling and Small-Signal Stability Analysis of Off-Grid Wind Farms with Coordinated Dual-Type Wind Turbines

JI Hongzhen[1], WANG Yuanyuan[1], YE Yuxuan[2], QU Junhui[1], FAN Qiumin[1]
（1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou 412001, Hunan Province, China）

ABSTRACT: [**Objective**] Wind farms will operate in an off-grid state when faults occur or maintenance is performed on transmission lines, where the system exhibits weak support capability and is susceptible to small-signal instability. To maintain the stable hot-standby operation of off-grid wind farms and realize rapid grid reconnection after fault clearance for reducing wind curtailment losses, this paper proposes a sequence impedance modeling and small-signal stability analysis method for off-grid wind farms. [**Methods**] First, based on the harmonic linearization method, sequence impedance models are established for virtual synchronous generator (VSG)-controlled grid-forming wind turbines and grid-following wind turbines with reactive power compensation strategies. The coordinated operation mechanism is clarified, in which grid-forming wind turbines provide active frequency and voltage support while reactive power compensation wind turbines accurately match the system reactive power demand. Second, according to the circuit superposition theorem, the complex overall sequence impedance model of the off-grid wind farm is decomposed into subnetworks dominated by grid-forming wind turbines and reactive power compensation wind turbines. Combined with the Nyquist criterion, a systematic small-signal stability analysis method is proposed to reveal the influence of key parameters on the system stability-instability evolution law, providing a theoretical reference for the selection of key parameter ranges and system stability evaluation. [**Results**] Matlab/Simulink simulation results verify that the proposed method can effectively judge the small-signal stability of off-grid wind farms. Voltage amplitude and line impedance parameters have significant effects on system stability, and optimizing the ranges of core parameters can ensure the reliable black start and

基金项目：国家自然科学基金项目（52577142）；湖南省博士研究生省级创新资助项目（CX20240077）；湖南省杰出青年基金项目（2026JJ20044）

© Editorial Department of Electric Power Construction. OA under CC BY-NC-ND 4. 0.

subsequent stable hot-standby operation of wind farms in off-grid mode. [**Conclusions**] The proposed method provides solid theoretical support and technical guidance for the small-signal stable operation of wind farms during off-grid black start and hot-standby conditions. Meanwhile, it can serve as a general modeling framework for the small-signal stability analysis of off-grid power systems composed of other types of new energy equipment.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52577142), Postgraduate Scientific Research Innovation Project of Hunan Province (No. CX20240077) and Distinguished Young Scholars Fund of Hunan Provincial Natural Science Foundation (No. 2026JJ20044).

KEYWORDS: off-grid wind farm system; black start; hot standby; grid-forming wind turbine; reactive power compensation capability of wind turbines; equivalent sequence impedance model; small-signal stability assessment

0　引　言

随着新能源的持续发展，大规模的风电、光伏并网，风电场作为新能源并网的典型载体，其选址多倾向于风能资源丰富的偏远地区。此类偏远山区风电场具有显著的工程特性：场内集电线路长达上百千米，无功需求大、补偿精度要求高，通常具有并网运行与离网热备用运行2种模式。并网运行时，场内无功需求由电网补偿，风电机组变流器置于跟网控制模式[1-4]，通过直接控制输出电流，实现风能高效利用；而当送出线路发生故障或检修时，风电场与主网解列进入离网运行状态，且需通过黑启动过程完成系统电压由0至额定值的抬升，进而转入离网热备用状态[5-6]，保持系统带电、可控、同步的离网运行状态，以确保送出线路故障恢复或检修完成后，风电场能够立即实现无冲击并网送电，最大程度降低离网期间的风能损失[7]。

然而，风电场离网并转入热备用运行的全过程面临严峻的稳定性挑战：黑启动阶段系统电压由0逐步抬升，电压水平动态变化易引发设备间控制交互失稳[8-10]；进入额定电压热备用阶段后，系统彻底失去电网的电压与频率支撑，场内有功、无功功率的瞬时波动难以平抑，且长集电线路带来的极大容性无功缺额进一步加剧了系统稳定运行的难度，成为制约偏远地区风电场离网热备用实现与新能源高效消纳的关键问题。因此，开展离网风电场黑启动至热备用运行全阶段的小干扰稳定性分析研究，具有重要的工程实际意义[11-13]。

针对风电场离网后缺乏主动频率和电压支撑的问题，在构网控制层面，国内外学者提出了多种构网型变流器(grid-forming converter)控制策略[14-16]。文献[17]提出了虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制的基本外特性机理，建立了虚拟惯量与阻尼调节的理论框架；文献[18]基于特征值分析法论证了构网型变流器对电网强度的提升作用。上述文献均聚焦于构网型变流器本身的控制设计与单机并网稳定性，未涉及构网与无功补偿型风机在离网场景下的协同运行机制。

在无功补偿层面，文献[19-21]以静止无功补偿器(static var compensator, SVC)/静止无功发生器(static var generator, SVG)为对象研究无功补偿配置，文献[22-24]提出了规划与运行相结合的双层无功规划方法。上述研究均以专用无功补偿设备为核心，且依赖系统额定电压环境。而本文所研究的离网风电场黑启动过程中，系统电压由0逐步递增至额定值，传统SVC/SVG无法满足低电压启动需求。

在阻抗建模与稳定性分析层面，文献[25-26]采用dq轴阻抗建模方法，适用于d、q轴对称控制的场景；文献[27]基于谐波线性化建立了跟网型变流器的正负序阻抗模型；文献[28-29]采用状态空间法进行稳定性分析，面临高维方程求解困难的问题；文献[30-32]提出基于阻抗的稳定性判据，为本文提供了方法论基础。上述研究的共同局限在于：建模对象单一(仅考虑跟网型或仅考虑构网型)，且均以并网运行场景为背景。

针对上述问题，本文首先将VSG构网型风机与无功补偿策略跟网型风机纳入统一的离网风电场框架，明确二者“主动频率/电压支撑-精准无功补偿”的分工与协同机制；然后，提出利用风电机组自身变流器进行无功补偿的新模式——通过切除机侧控制、重置网侧控制参考量、采用零起升压策略，使风机自身具备离网黑启动及后续热备用状态全过程的无功补偿能力，无需额外配置专用无功补偿设备；进一步将谐波线性化方法同时应用于构网型(VSG控制)与无功补偿型(零起升压+无功补偿控制)2类差异化控制风机的序阻抗建模，基于叠加定理将复杂离网系统解耦为构网风机主导与无功补偿风机主导的子网络，降低分析复杂度，分阶段(黑启动阶段+热备用阶段)开展离网系统小干扰稳定性分析，揭示了参数“稳定→临界→失稳”的演化规律，为关键参数区间的选择与稳定性评估提供理论参考，最后通过仿真验证所提方法的有效性。

1 离网风电场拓扑及场内设备控制方法

1.1 离网风电场系统拓扑结构

风电场离网后，其拓扑如图1所示。场内构网风机与无功补偿风机通过风电集电线路实现并列运行，二者协同承担场内有功、无功负荷的供电任务，共同维持系统电压与频率的稳定。场内风机控制方案为：1）构网型风机。采用虚拟惯量与阻尼调节机制，使其具备系统电压与频率的自主支撑能力。2）无功补偿风机。切除机侧控制，停止对风能的捕获，网侧采用零起升压控制，同时重置控制参考量，将控制目标设为维持离网系统无功平衡，实现对系统无功的精确补偿。

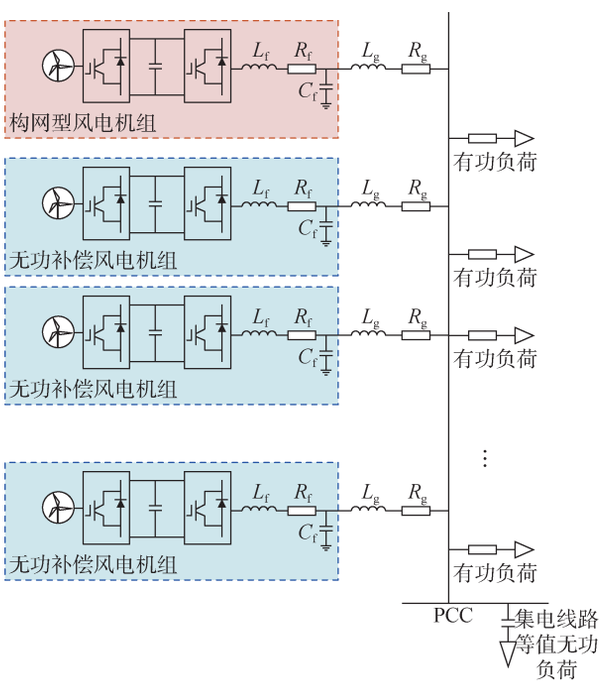


图1 离网系统网络拓扑

Fig. 1 Network topology of the off-grid system

图1中：L_f、R_f、C_f为构网型风机与无功补偿风机联络线阻抗参数；L_g、R_g为场内风机与负荷间的联络线阻抗。

场内无功补偿风机均为同型号、同控制参数机组，其数量n根据系统无功缺额确定。n台无功补偿风机经集电线路并联后，可采用容量等值方法等效为单台容量扩大n倍的等值机组，其等值正序阻抗为单台阻抗的$1/n$。该等值方法对系统稳定性的基本演化规律不产生影响。

1.2 构网型风机并网拓扑及控制方法

构网型风机并网拓扑及控制策略示意如图2和图3所示。其中：机侧变流器采用最大功率控制策略，最大程度利用风能；网侧变流器采用VSG控制，为离网系统提供电压和频率支撑[33]。

如图3所示，VSG的有功控制器模拟了同步发电机的惯性和一次调频特性；无功控制器模拟了同步发电机的一次调压特性。VSG的有功控制器和无功控制器的数学模型为：

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = \omega_e \\ J\dfrac{\mathrm{d}\omega_e}{\mathrm{d}t} = T_{set} - T_e - D_p(\omega_e - \omega_0) \\ T_e = \dfrac{P_e}{\omega_e} \approx \dfrac{P_e}{\omega_0} \\ T_{set} = \dfrac{P_{set}}{\omega_e} \approx \dfrac{P_{set}}{\omega_0} \end{cases} \tag{1}$$

$$Q_{set} + \sqrt{2}\,D_q(V_{nom} - V) - Q_e = \sqrt{2}\,K\frac{\mathrm{d}E_m}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

式中：θ为VSG内电势相角；ω_e、ω_0分别为VSG的输出角频率和电网的额定角频率；J为虚拟转动惯量；T_{set}、T_e分别为额定转矩和电磁转矩；D_p、D_q分别为有功阻尼系数和无功阻尼系数；P_e、Q_e分别为瞬时输出有功功率、无功功率；P_{set}、Q_{set}分别为给定的有功功率、无功功率；V_{nom}、V分别为额定电压有效值和输出电压有效值；K为无功惯性系数；E_m为VSG内电势有效值。

VSG的输出有功功率P_e和输出无功功率Q_e可根据瞬时功率理论计算得到。

$$\begin{cases} P_e = 1.5(v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) \\ Q_e = 1.5(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) \end{cases} \tag{3}$$

式中：i_α、i_β为$\alpha\beta$坐标系下VSG的输出电流；v_α、v_β为$\alpha\beta$坐标系下VSG的输出电压。

VSG控制下构网型风机的调制波由有功控制器

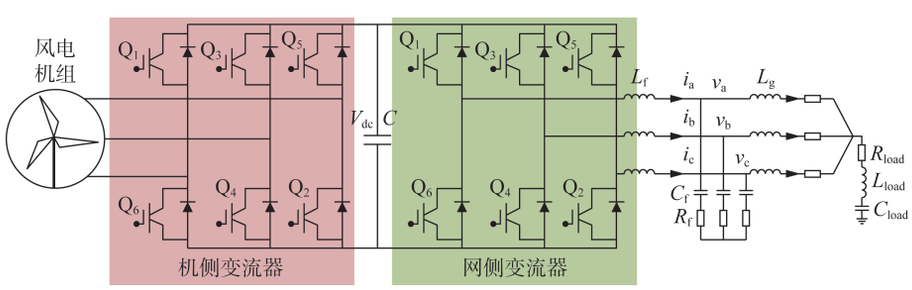


图2 风电机组并网拓扑结构

Fig. 2 Grid-connection topology of wind turbine generators

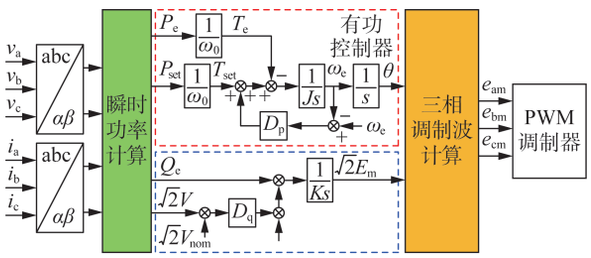


图3　VSG控制策略

Fig. 3　VSG control strategy

和无功控制器的输出共同决定，其表达式为：

$$\begin{cases} m_{\mathrm{a}} = \sqrt{2}\,E_{\mathrm{m}}\cos\theta \\ m_{\mathrm{b}} = \sqrt{2}\,E_{\mathrm{m}}\cos(\theta - 2\pi/3) \\ m_{\mathrm{c}} = \sqrt{2}\,E_{\mathrm{m}}\cos(\theta + 2\pi/3) \end{cases} \tag{4}$$

式中：m_{a}、m_{b}、m_{c}均为VSG的调制波。

1.3　无功补偿风机控制方法

无功补偿风机的并网拓扑与构网型风机一致，具体策略如图4所示。黑启动开始前，直流侧电容会先经预充电回路预先建立初始直流电压；此后黑启动及热备用阶段，网侧变流器通过电压外环PI调节器独立维持直流电压稳定。网侧变流器维持直流电压所需的有功功率由构网型风机经交流母线提供，该部分有功功率仅用于补偿变流器自身损耗，对系统有功平衡的影响可忽略。

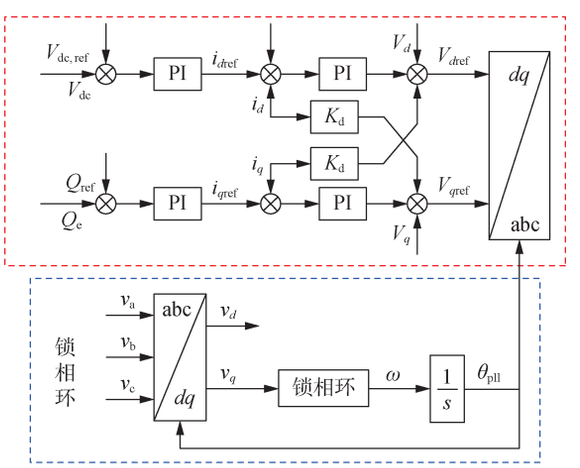


图4　无功补偿风机并网控制策略

Fig. 4　Grid-connected control strategy for reactive power compensated wind turbine

黑启动过程中，系统采用零起升压的控制策略（电压参考值由0按照固定斜率递增至额定电压值）。基于参考电压与系统实际电压反馈信号计算电流内环的有功电流参考值；其次结合离网运行模式下的系统无功缺额需求，经过矢量控制算法推导并确定电流内环的无功电流参考值，最终实现对系统无功缺额的精准补偿。数学方程为：

$$\begin{cases} i_{d\mathrm{ref}} = K_{\mathrm{Pdc}}(V_{\mathrm{dc,ref}} - V_{\mathrm{dc}}) + K_{\mathrm{Idc}}\int(V_{\mathrm{dc,ref}} - V_{\mathrm{dc}})\,\mathrm{d}t \\ i_{q\mathrm{ref}} = K_{\mathrm{Pq}}(Q_{\mathrm{ref}} - Q) + K_{\mathrm{Iq}}\int(Q_{\mathrm{ref}} - Q)\,\mathrm{d}t \end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases} v_{d\mathrm{ref}} = K_{\mathrm{Pi}}\left(i_{d\mathrm{ref}} - i_d\right) + K_{\mathrm{Ii}}\int(i_{d\mathrm{ref}} - i_d)\,\mathrm{d}t + i_q K_{\mathrm{d}} + v_d \\ v_{q\mathrm{ref}} = K_{\mathrm{Pi}}\left(i_{q\mathrm{ref}} - i_q\right) + K_{\mathrm{Ii}}\int(i_{q\mathrm{ref}} - i_q)\,\mathrm{d}t - i_d K_{\mathrm{d}} + v_q \end{cases} \tag{6}$$

式中：$i_{d\mathrm{ref}}$、$i_{q\mathrm{ref}}$分别为内环控制d、q轴并网电流参考值；K_{Pdc}、K_{Idc}、K_{Pq}、K_{Iq}为并网参考电流计算过程的比例和积分系数；V_{dc}为直流侧电压；$V_{\mathrm{dc,ref}}$为外环控制直流侧电压参考值；Q_{ref}为外环控制无功功率参考值；Q为系统无功缺额；$v_{d\mathrm{ref}}$、$v_{q\mathrm{ref}}$分别为输入脉冲宽度调制（pulse width modulation，PWM）的d、q轴并网电压参考值；K_{Pi}、K_{Ii}分别为并网参考电压计算过程的比例和积分系数；i_d、i_q为同步旋转坐标系下网侧电流；v_d、v_q为同步旋转坐标系下网侧电压；$K_{\mathrm{d}} = \omega L_{\mathrm{f}}$，$\omega$为电网角频率。

2　风机序阻抗建模与阻抗特性分析

在上述构网型风机与无功补偿风机控制策略的基础上，本文基于谐波线性化方法[34-35]建立了构网型风机与无功补偿风机的等值序阻抗模型。需要说明的是，黑启动过程中系统电压缓慢递增，相对于变流器电磁暂态时间尺度，短时间内电压可近似恒定。因此，基于稳态工作点的小信号谐波线性化方法假设仍成立。

2.1　VSG控制构网型风机序阻抗建模

借助谐波线性化思想构建VSG控制下构网型风机等值序阻抗模型。在时域中，含小信号扰动的A相输出端电压和输出电流为：

$$\begin{cases} v_{\mathrm{a}}(t) = V_1\cos(2\pi f_1 t) + V_{\mathrm{p}}\cos(2\pi f_{\mathrm{p}} t + \phi_{\mathrm{vp}}) + \\ \qquad V_{\mathrm{n}}\cos(2\pi f_{\mathrm{n}} t + \phi_{\mathrm{vn}}) \\ i_{\mathrm{a}}(t) = I_1\cos(2\pi f_1 t + \phi_{\mathrm{i1}}) + I_{\mathrm{p}}\cos(2\pi f_{\mathrm{p}} t + \phi_{\mathrm{ip}}) + \\ \qquad I_{\mathrm{n}}\cos(2\pi f_{\mathrm{n}} t + \phi_{\mathrm{in}}) \end{cases} \tag{7}$$

式中：V_1、V_{p}、V_{n}分别为基波电压、正序扰动电压、负序扰动电压的幅值；I_1、I_{p}、I_{n}分别为基波电流、正序扰动电流响应、负序扰动电流响应的幅值；f_1、f_{p}、f_{n}分别为基波频率、正序扰动频率、负序扰动频率；ϕ_{vp}、ϕ_{vn}分别为正序扰动电压、负序扰动电压的初相角；ϕ_{i1}、ϕ_{ip}、ϕ_{in}分别为基波电流、正序扰动电流响应、负序扰动电流响应的初相角。

由图2可得，构网型风机VSG的内电势、输出端电压、输出电流在abc坐标系下的电路方程为：

$$\left(L_{\mathrm{f}}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\right)\begin{bmatrix} i_{\mathrm{a}} \\ i_{\mathrm{b}} \\ i_{\mathrm{c}} \end{bmatrix} + R_{\mathrm{f}}\begin{bmatrix} i_{\mathrm{a}} \\ i_{\mathrm{b}} \\ i_{\mathrm{c}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{\mathrm{a}} \\ m_{\mathrm{b}} \\ m_{\mathrm{c}} \end{bmatrix} K_{\mathrm{m}} V_{\mathrm{dc}} - \begin{bmatrix} v_{\mathrm{a}} \\ v_{\mathrm{b}} \\ v_{\mathrm{c}} \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中：i_{a}、i_{b}、i_{c}和v_{a}、v_{b}、v_{c}分别为构网型风机输出的三相电流和三相电压；K_{m}为调制增益。

根据式(1)、(2)电压控制型VSG的有功控制器可得风机输出电压相位θ的表达式：

$$\begin{aligned}&Js^2\theta=\frac{P_{\text{set}}}{\omega_0}-\frac{P_{\text{e}}}{\omega_0}-D_{\text{p}}(s\theta-\omega_0)\Rightarrow\\&Js^2\theta+D_{\text{p}}s\theta=\frac{P_{\text{set}}}{\omega_0}-\frac{P_{\text{e}}}{\omega_0}+D_{\text{p}}\omega_0\Rightarrow\\&(Js^2+D_{\text{p}}s)\theta=\frac{P_{\text{set}}}{\omega_0}-\frac{P_{\text{e}}}{\omega_0}+D_{\text{p}}\omega_0\Rightarrow\\&\theta=M(s)\left(\frac{P_{\text{set}}}{\omega_0}-\frac{P_{\text{e}}}{\omega_0}+D_{\text{p}}\omega_0\right)\end{aligned}\tag{9}$$

式中：$M(s)=1/(Js^2+D_{\text{p}}s)$。

在VSG的三相调制波的相角θ中引入相角扰动$\Delta\theta$，即$\theta=\theta_1+\Delta\theta$。$\Delta\theta$为小信号电压扰动引起的相角扰动，$\theta_1$为VSG基波电压的相角。由式(9)可得$\Delta\theta$在频域的表达式$\Delta\theta[f]$：

$$\Delta\theta[f]=\begin{cases}-M(s)\dfrac{3}{\omega_{\text{n}}}(V_1^*I_{\text{p}}+V_{\text{p}}I_1^*),f=\pm(f_{\text{p}}-f_1)\\-M(s)\dfrac{3}{\omega_{\text{n}}}(V_1I_{\text{n}}+V_{\text{n}}I_1),f=\pm(f_{\text{n}}+f_1)\end{cases}\tag{10}$$

式中：V_1^*、I_1^*分别为基波电压、电流的共轭。由式(10)可知，正、负序扰动电压和电流对$\Delta\theta[f]$的影响是解耦的，可独立分析正序扰动电压、电流和负序扰动电压、电流与$\Delta\theta[f]$之间的关系。$\Delta\theta$在θ中是由于小信号电压扰动引起的，为小扰动量，可得：

$$\cos\theta=\cos(\theta_1+\Delta\theta)\approx\cos\theta_1-\Delta\theta\times\sin\theta_1\tag{11}$$

根据式(10)和频域卷积定理并忽略在$f=\pm(f_{\text{p}}-2f_1)$和$f=\pm(f_{\text{p}}+2f_1)$的非线性耦合，可求出正、负序扰动电压电流与$\cos\theta[f]$的关系为：

$$\cos\theta[f]=\begin{cases}-\dfrac{1}{2}\text{e}^{\pm\text{j}\phi_{\text{vir}}}M(s\mp\text{j}2\pi f_1)\dfrac{3}{\omega_{\text{n}}}(V_1^*I_{\text{p}}+V_{\text{p}}I_1^*),f=\pm f_{\text{p}}\\-\dfrac{1}{2}\text{e}^{\mp\text{j}\phi_{\text{vir}}}M(s\pm\text{j}2\pi f_1)\dfrac{3}{\omega_{\text{n}}}(V_1I_{\text{n}}+V_{\text{n}}I_1),f=\pm f_{\text{n}}\end{cases}\tag{12}$$

式中：$\phi_{\text{vir}}=\arcsin(P_{\text{e}}\omega_{\text{n}}L_{\text{f}}/E_{\text{m}}V_1)+\pi/2$，$\arcsin(P_{\text{e}}\omega_{\text{n}}L_{\text{f}}/E_{\text{m}}V_1)$为VSG的功角。

VSG的无功-电压控制环(式(2))模拟同步发电机的一次调压特性，电压控制型VSG的输出无功功率是由滤波电感L_{f}上的电压幅值差决定，L_{f}的值通常较小，所以其上的电压幅值差较小，另外电压控制型VSG的输出端电压波动也较小，所以在小信号建模时可认为E_{m}为常量。

联立式(8)—(12)，得：

$$\begin{aligned}sL_{\text{f}}I_{\text{p}}+R_{\text{f}}I_{\text{p}}=&-\frac{1}{2}E_{\text{m}}\text{e}^{\pm\text{j}\phi_{\text{vir}}}M(s\mp\text{j}2\pi f_1)\frac{3}{\omega_{\text{n}}}V_1^*I_{\text{p}}-\\&\frac{1}{2}E_{\text{m}}\text{e}^{\pm\text{j}\phi_{\text{vir}}}M(s\mp\text{j}2\pi f_1)\frac{3}{\omega_{\text{n}}}V_{\text{p}}I_1^*-V_{\text{p}}\end{aligned}\tag{13}$$

$$\begin{aligned}&\left[sL_{\text{f}}+R_{\text{f}}+\frac{1}{2}E_{\text{m}}\text{e}^{\pm\text{j}\phi_{\text{vir}}}M(s\mp\text{j}2\pi f_1)\frac{3}{\omega_{\text{n}}}V_1^*\right]I_{\text{p}}=\\&-\left[\frac{1}{2}E_{\text{m}}\text{e}^{\pm\text{j}\phi_{\text{vir}}}M(s\mp\text{j}2\pi f_1)\frac{3}{\omega_{\text{n}}}I_1^*+1\right]V_{\text{p}}\end{aligned}\tag{14}$$

由式(13)、(14)推导构网型风机小信号正、负序输出阻抗为：

$$\begin{cases}Z_{\text{vp}}(s)=-\dfrac{V_{\text{p}}(s)}{I_{\text{p}}(s)}=[\dfrac{3V_1}{4\omega_{\text{n}}}M(s-\text{j}2\pi f_1)K(s)\text{e}^{\text{j}\phi_{\text{vir}}}+sL_{\text{f}}+R_{\text{f}}]/[1+\dfrac{3I_1}{4\omega_{\text{n}}}M(s-\text{j}2\pi f_1)K(s)\text{e}^{\text{j}(\phi_{\text{vir}}-\phi_{\text{il}})}]\\Z_{\text{vn}}(s)=-\dfrac{V_{\text{n}}(s)}{I_{\text{n}}(s)}=[\dfrac{3V_1}{4\omega_{\text{n}}}M(s+\text{j}2\pi f_1)K(s)\text{e}^{-\text{j}\phi_{\text{vir}}}+sL_{\text{f}}+R_{\text{f}}]/[1+\dfrac{3I_1}{4\omega_{\text{n}}}M(s+\text{j}2\pi f_1)K(s)\text{e}^{\text{j}(\phi_{\text{il}}-\phi_{\text{vir}})}]\end{cases}\tag{15}$$

2.2 无功补偿风机序阻抗建模

离网系统中无功补偿风机的核心作用为补偿系统无功缺额。由于无功补偿风机已切除机侧控制(P_{m}=0)，直流电容电压的动态仅由网侧有功功率P_{g}决定，其小信号扰动传递路径为$\Delta P_{\text{g}}\rightarrow\Delta V_{\text{dc}}\rightarrow\Delta i_{d\text{ref}}\rightarrow\Delta v_{d\text{ref}}$，相比于正常双端馈电运行状态，该耦合路径更为直接，减少了机侧动态引入的模型阶数。其锁相环输出的旋转参考角θ_{PLL}包含基波正序电压产生的正转向角θ_1[36-38]以及小信号电压扰动引发的相角扰动$\Delta\theta$，即$\theta_{\text{PLL}}=\theta_1+\Delta\theta$。频域内小信号电压扰动与$\Delta\theta$的传递函数表示为：

$$\Delta\theta[f]=\begin{cases}G_{\text{p}}(s)V_{\text{p}},f=\pm(f_{\text{p}}-f_1)\\G_{\text{n}}(s)V_{\text{n}},f=\pm(f_{\text{n}}+f_1)\end{cases}\tag{16}$$

式中：$G_{\text{p}}(s)$、$G_{\text{n}}(s)$分别为正、负序扰动下电压与$\Delta\theta$的传递函数。

为实现dq轴解耦控制，将三相电压、电流信号由abc坐标系转换至dq同步旋转坐标系，转换过程计及相角扰动$\Delta\theta$的影响，电压转换关系为：

$$\begin{bmatrix}V_d\\V_q\\V_0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1&\Delta\theta&0\\-\Delta\theta&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}\boldsymbol{T}(\theta_1)\begin{bmatrix}v_{\text{a}}\\v_{\text{b}}\\v_{\text{c}}\end{bmatrix}\tag{17}$$

基于该转换关系，可得d-q轴电压在频域的分布特征，其中V_d直流量为基波电压V_1，在$f=\pm(f_{\text{p}}-f_1)$和$f=\pm(f_{\text{p}}+f_1)$处分别为正、负序扰动电压；V_q直流量为0，扰动频段电压与$\Delta\theta$相关，频域表达式可由V_d及$\Delta\theta$的传递关系推导得到。

同理，电流信号转换公式及频域表达式推导与电压一致，在此不做重复阐述。

结合锁相环的控制特性，$\Delta\theta$与V_q在频域满足$\Delta\theta[f]=H_{\text{PLL}}(s)V_q[f]$，其中$H_{\text{PLL}}(s)=(k_{\text{p_PLL}}+k_{\text{i_PLL}}/s)/s$为锁相环传递函数，联立$dq$轴电压的频域特征，可推导出正、负序扰动下电压与$\Delta\theta$的传递函数：

$$G_{\mathrm{p}}(s)=\frac{\mp \mathrm{j}H_{\mathrm{PLL}}(s)}{1+V_1H_{\mathrm{PLL}}(s)} \tag{18}$$

$$G_{\mathrm{n}}(s)=\frac{\pm \mathrm{j}H_{\mathrm{PLL}}(s)}{1+V_1H_{\mathrm{PLL}}(s)} \tag{19}$$

无功补偿风机网侧变流器采用电压外环-电流内环双环控制，直流侧电压外环参考值$V_{\mathrm{dc,ref}}$为恒定值5000 V，无功功率外环参考值$Q_{\mathrm{ref}}=V^2\omega C$，$C$为离网系统等值对地电容；电流内环$d$、$q$轴参考值由外环调节结果经比例积分环节得到，即$i_{d\mathrm{ref}}=(V_{\mathrm{dc,ref}}-V_{\mathrm{dc}})H_{\mathrm{dc}}(s)$、$i_{q\mathrm{ref}}=(Q_{\mathrm{ref}}-Q)H_{\mathrm{q}}(s)$，$H_{\mathrm{dc}}(s)$、$H_{\mathrm{q}}(s)$为外环控制器传递函数。

计及小信号扰动时，直流侧电压会因有功功率波动产生偏差ΔV_{dc}，其频域值与正、负序扰动下的有功功率分量相关；而无功功率外环的参考值扰动则由电压扰动及$G_{\mathrm{p}}(s)$、$G_{\mathrm{n}}(s)$共同决定。结合变流器输出电流前馈解耦控制规律，同步旋转坐标系下调制波c_d、c_q满足：

$$\begin{cases}c_d=(i_{d\mathrm{ref}}-i_d)H_{\mathrm{i}}(s)-K_{\mathrm{d}}i_q\\ c_q=(i_{q\mathrm{ref}}-i_q)H_{\mathrm{i}}(s)+K_{\mathrm{d}}i_d\end{cases} \tag{20}$$

基于谐波线性化建模方法，联立上述控制环节的频域特性、坐标系转换关系及变流器电路方程[37]，同时结合频域卷积定理，忽略高阶非线性耦合项，最终可推导出无功补偿风机的正序输出阻抗Z_{cp}模型。由于设备正、负序阻抗满足共轭关系，分析正序阻抗即可表征其整体阻抗特性。

$$Z_{\mathrm{cp}}=-\frac{V_{\mathrm{p}}(s)}{I_{\mathrm{p}}(s)}=\frac{N(s)}{D(s)} \tag{21}$$

$$\begin{aligned}N(s)=&K_{\mathrm{m}}V_{\mathrm{dc}}[H_{\mathrm{i}}(s-\mathrm{j}2\pi f_1)-\mathrm{j}K_{\mathrm{d}}+\\&\frac{3V_1^*H_{\mathrm{i}}(s-\mathrm{j}2\pi f_1)H_{\mathrm{dc}}(s-\mathrm{j}2\pi f_1)}{sCV_{\mathrm{dc,set}}}-\\&3V_1^*H_{\mathrm{q}}(s-\mathrm{j}2\pi f_1)H_{\mathrm{i}}(s-\mathrm{j}2\pi f_1)]\cdot G_{\mathrm{i}}(s)+sL_{\mathrm{f}}\end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}D(s)=&\{1-K_{\mathrm{f}}K_{\mathrm{m}}V_{\mathrm{dc}}G_{\mathrm{v}}(s)+\frac{1}{2}\{\{\frac{3I_1^*H_{\mathrm{dc}}(s-\mathrm{j}2\pi f_1)}{sCV_{\mathrm{dc,set}}}-\\&\left[\frac{V_1^2sT_{\mathrm{PLL}}(s-\mathrm{j}2\pi f_1)C}{V_1}+3I_1^*\right]H_{\mathrm{q}}(s-\mathrm{j}2\pi f_1)-\\&A(s)\}H_{\mathrm{i}}(s-\mathrm{j}2\pi f_1)G_{\mathrm{v}}(s)K_{\mathrm{m}}V_{\mathrm{dc}}+\\&B(s)G_{\mathrm{v}}(s)K_{\mathrm{m}}V_{\mathrm{dc}}\}\}^{-1}\end{aligned} \tag{23}$$

$$A(s)=\frac{T_{\mathrm{PLL}}(s-\mathrm{j}2\pi f_1)P_{\mathrm{set}}}{V_1^2}+\frac{\mathrm{j}T_{\mathrm{PLL}}(s-\mathrm{j}2\pi f_1)Q_{\mathrm{set}}}{V_1^2} \tag{24}$$

$$B(s)=\frac{\mathrm{j}K_{\mathrm{d}}P_{\mathrm{set}}T_{\mathrm{PLL}}(s-\mathrm{j}2\pi f_1)}{V_1^2}-\frac{K_{\mathrm{d}}Q_{\mathrm{set}}T_{\mathrm{PLL}}(s-\mathrm{j}2\pi f_1)}{V_1^2} \tag{25}$$

2.3　两类型风机阻抗幅相特性分析

本文构网型风机和无功补偿风机参数如表1所示，其参数参照文献[18]和湖南省四海坪风电场实际参数。

表1　孤网系统设备参数

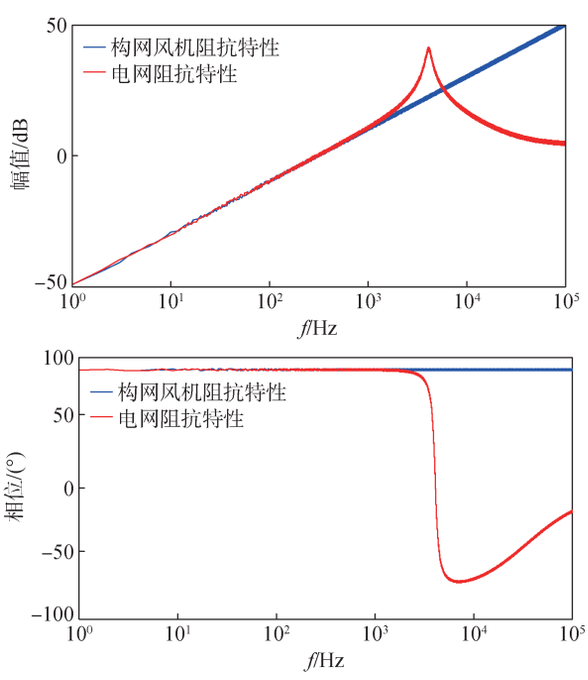
Table 1　Equipment parameters of the islanded power system

参数	数值	参数	数值
V_{dc}/V	5000	J/(kg·m^2)	0.057
V_{g}/V	690(时变)	D_{p}	5
L_{f}/mH	0.1~15.0 参数扫描范围	D_{q}	321
L_{g}/mH	0.1~15.0 参数扫描范围	K	7.1
C_{f}/μF	20	f_1/Hz	50
R_{f}/Ω	1.5	P_{load}/kW	800
R_{g}/Ω	1.5	Q_{load}/kvar	3.5

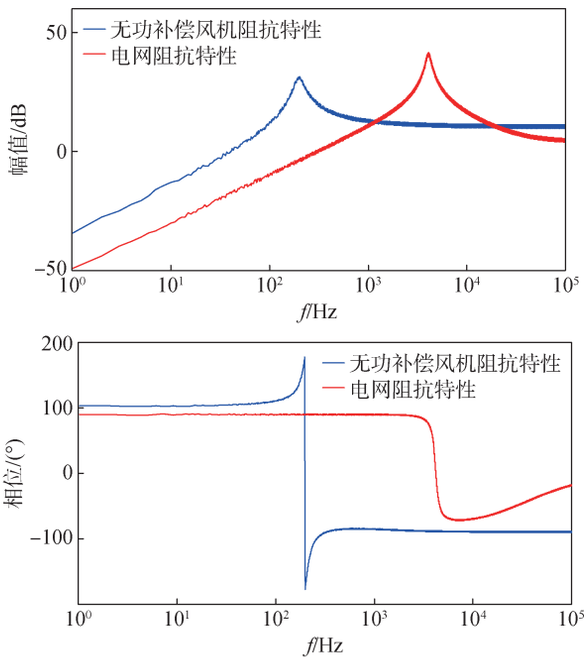
注：表中L_{f}、L_{g}为小干扰稳定性分析中的参数扫描范围，实际工程中可根据稳定性分析结果选取小于临界值的参数以确保系统稳定。

构网型风机与无功补偿风机正序阻抗模型的幅频特性曲线如图5所示。由图5(a)可见，构网型风机等效输出阻抗的幅频、相频特性均呈现感性特征；在中高频段，其等效输出阻抗的频率响应特性均能与电网阻抗高度吻合。而图5(b)显示，无功补偿风机输出阻抗的幅相特性呈现分段特征：低频段呈感性，中高频段则表现出负阻抗特性(阻抗相角处于90°~270°区间)，该特性易与感性电网的阻抗发生谐振交互，进而诱发系统振荡。

构网型风机的核心控制目标是模拟同步发电机外特性，为系统提供电压与频率支撑。从幅相特性



(a) 构网型风机



(b) 无功补偿型风机

图5 构网型与无功补偿型风机正序阻抗幅频特性曲线

Fig. 5 Magnitude-frequency characteristic curves of positive-sequence impedance for grid-forming and reactive power compensation wind turbines

曲线可知,其输出阻抗特性与电网阻抗具有良好的匹配性,这一结果验证了本文所构建VSG控制型构网风机序阻抗模型的准确性;而无功补偿风机的功能定位是补偿场内容性无功,因此其幅相特性在部分频段呈现负阻抗特性,该现象与理论推导的阻抗特性一致,进一步佐证了模型的合理性。

3 离网风电场小干扰稳定判据

离网系统中常采用Nyquist稳定判据分析其小干扰稳定性[39-40]。利用第2章所得风机序阻抗模型,将构网型风机外特性等效为理想电压源与其等值序阻抗串联的形式,无功补偿风机等效为理想电流源与其等值序阻抗并联的形式。由构网型风机和无功补偿风机组成的离网系统等效阻抗网络模型如图6所示。

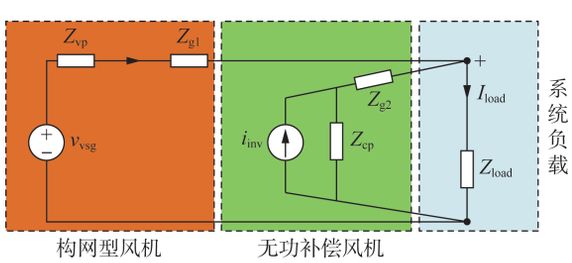
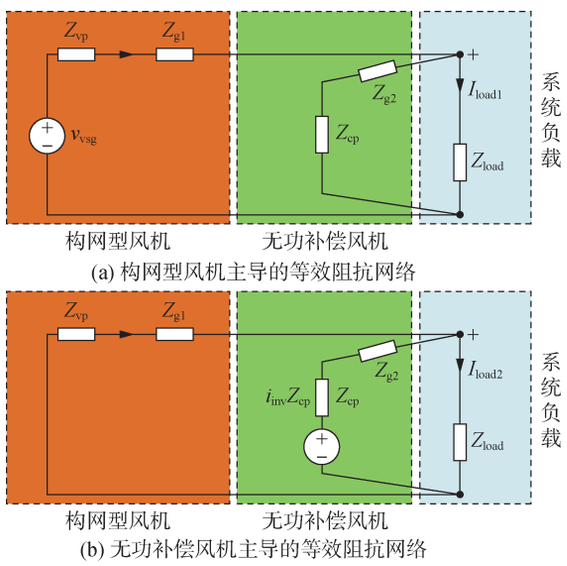


图6 离网系统整体等效阻抗网络

Fig. 6 Overall equivalent impedance network of the off-grid system

基于系统叠加定理,将离网系统阻抗网络模型分解为由构网风机和无功补偿风机主导的子系统阻抗网络模型,如图7所示。



(a) 构网型风机主导的等效阻抗网络

(b) 无功补偿风机主导的等效阻抗网络

图7 基于叠加定理的子系统解耦阻抗网络

Fig. 7 Decoupled impedance network of subsystems based on the superposition theorem

由图7所示的等效阻抗网络模型推导构I_{load1}、I_{load2}的表达式:

$$I_{load\,1}=\frac{v_{vsg}\cdot(Z_{g2}+Z_{cp})}{(Z_{g2}+Z_{cp})Z_{load}+(Z_{vp}+Z_{g1})(Z_{g2}+Z_{cp}+Z_{load})} \tag{26}$$

$$I_{load\,2}=\frac{i_{inv}Z_{cp}(Z_{g1}+Z_{vp})}{(Z_{g1}+Z_{vp})Z_{load}+(Z_{g2}+Z_{cp})(Z_{g1}+Z_{vp}+Z_{load})} \tag{27}$$

$$I_{load}=I_{load\,1}+I_{load\,2}=H_1(s)v_{sg}+H_2(s)I_{s2} \tag{28}$$

$$\begin{cases}H_1(s)=\dfrac{1/Z_{load}}{1+\dfrac{Z_{vp}+Z_{g1}}{Z_{g2}+Z_{cp}}(Z_{g2}+Z_{cp}+Z_{load})\dfrac{1}{Z_{load}}}\\ H_2(s)=\dfrac{1/Z_{load}}{1+\dfrac{Z_{g2}+Z_{cp}}{Z_{vp}+Z_{g1}}(Z_{g1}+Z_{vp}+Z_{load})\dfrac{1}{Z_{cp}Z_{load}}}\end{cases} \tag{29}$$

式中:I_{load1}为构网型风机电压源单独作用形成的负荷电流分量;I_{load2}为无功补偿风机电流源单独作用形成的负荷电流分量;v_{vsg}为构网型风机VSG控制形成的等效电压源;Z_{vp}为构网型风机的等值正序输出阻抗;Z_{g1}、Z_{g2}分别为构网型风机、无功补偿风机侧的等效线路阻抗;Z_{load}为离网风场的等效负荷阻抗;i_{inv}为无功补偿风机的等效电流源。

由式(22)、(23)和Nyquist判据可知,当I_{load1}、I_{load2}均稳定时,离网系统稳定。I_{load1}、I_{load2}可看作2个闭环传递函数,其稳定性取决于开环传递函数$G_1(s)$和

$G_2(s)$。

$$\begin{cases} G_1(s)=\dfrac{Z_{vp}+Z_{g1}}{Z_{g2}+Z_{cp}}(Z_{g2}+Z_{cp}+Z_{load})\dfrac{1}{Z_{load}} \\ G_2(s)=\dfrac{Z_{g2}+Z_{cp}}{Z_{vp}+Z_{g1}}(Z_{g1}+Z_{vp}+Z_{load})\dfrac{1}{Z_{cp}Z_{load}} \end{cases} \tag{30}$$

若 $G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 的 Nyquist 图按逆时针方向包围 $(-1,\mathrm{j}0)$ 点 p 周（p 为位于 S 右半平面的开环极点个数），则离网系统稳定。

离网系统参数如表 1 所示，根据第 3 章离网系统稳定判据，分析系统关键参数变化下系统小干扰稳定情况。

本文中，离网风电场利用零起升压的控制策略，在黑启动过程中将系统电压由 0 逐渐提高至额定电压，进一步依靠构网风机的电压频率支撑能力和无功补偿风机的无功补偿能力共同维持风电场离网热备用运行的稳定性。

综上，从系统黑启动和离网热备用运行 2 个阶段对风电场小干扰稳定性问题展开研究。

3.1　黑启动过程系统小干扰稳定性分析

本节选取黑启动过程不同电压水平下的准稳态工作点，分别建立小信号阻抗模型并开展 Nyquist 分析，以评估黑启动全程的小干扰稳定性。针对不同电压阶段，图 8 给出了开环传递函数 $G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 的 Nyquist 曲线。分析可知：随着机端电压的逐步提升，$G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 的 Nyquist 轨迹均未包围复平面上的临界点 $(-1,\mathrm{j}0)$；同时，开环传递函数的正实部极点数量 p=0。结合 Nyquist 稳定判据，在表 1 所示的系统参数下，黑启动阶段的系统可维持稳定运行状态。

3.2　离网热备用阶段小干扰稳定性分析

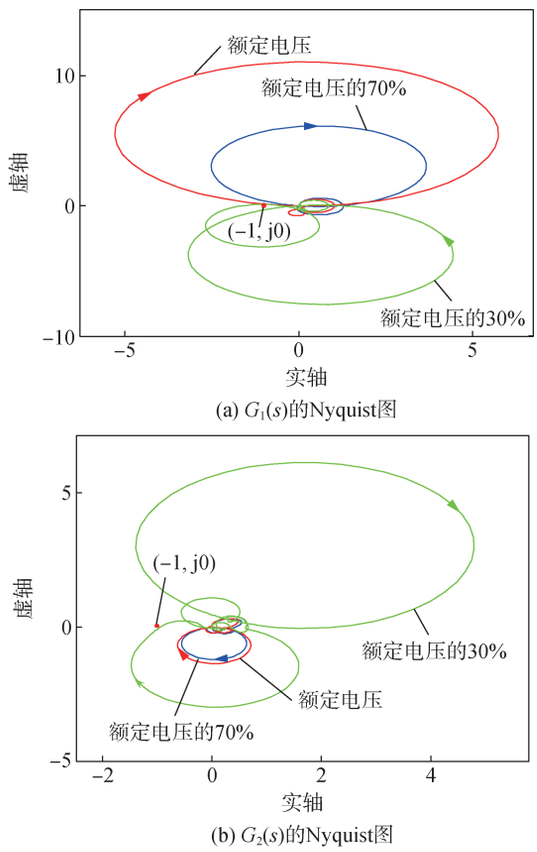
完成黑启动后，风电场转入额定电压下的离网运行模式。在此阶段，系统稳定性主要受设备间联络线阻抗参数的影响。本节基于表 1 给出的参数扫描范围，通过 Nyquist 判据分析不同阻抗参数对系统小干扰稳定性的影响机理，为工程参数选择提供理论依据。

3.2.1　滤波电感 L_f 对系统小干扰稳定性影响分析

为探究滤波电感 L_f 对系统小干扰稳定性的作用机制，本文将 L_f 在 0.1~15.0 mH 范围内进行梯度递增扫描，并绘制不同 L_f 下开环传递函数 $G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 的 Nyquist 曲线，如图 9 所示。

图中，对于 $G_1(s)$，随 L_f 由 0.1 mH 逐步增大至 15.0 mH，其 Nyquist 轨迹始终未包围临界点 $(-1,\mathrm{j}0)$，且开环传递函数无正实部极点，依据 Nyquist 稳定判据，该通道始终保持稳定。

对于 $G_2(s)$，当 L_f=0.1 mH，Nyquist 曲线未包围 $(-1,\mathrm{j}0)$，系统稳定；当 L_f 递增至 1.0 mH 时，Nyquist 轨迹开始包围 $(-1,\mathrm{j}0)$，且随 L_f 进一步增大，包围次数持续增加，表明系统出现失稳趋势并逐步恶化。



(a) $G_1(s)$的Nyquist图

(b) $G_2(s)$的Nyquist图

图 8　不同电压水平下 $G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 的 Nyquist 图

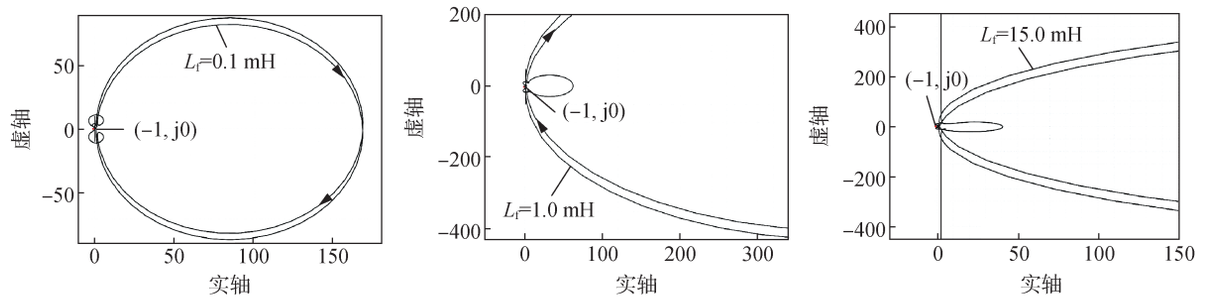
Fig. 8　Nyquist plots of $G_1(s)$ and $G_2(s)$ under different voltage levels

3.2.2　网络等效电感 L_g 对系统小干扰稳定性的影响分析

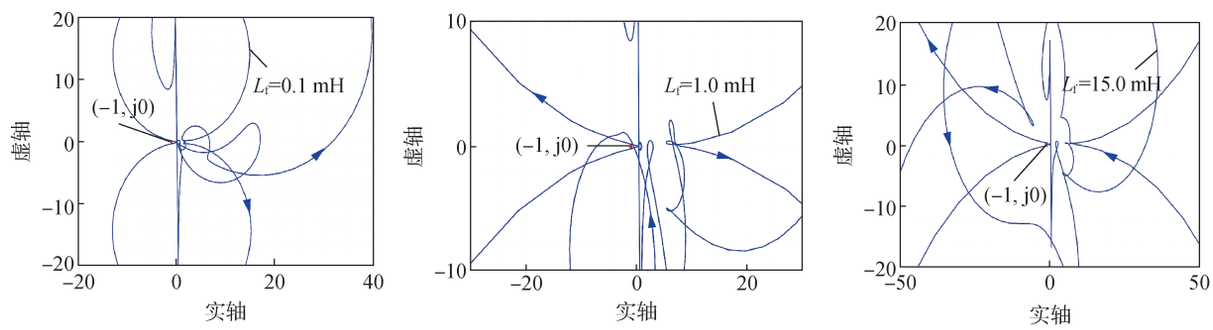
为揭示电网等效电感 L_g 对系统稳定性的影响，本文将 L_g 在 0.1~15.0 mH 范围内进行梯度递增扫描，获取不同 L_g 下开环传递函数 $G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 的 Nyquist 曲线，如图 10 所示。

由图 10 可知，对于 $G_1(s)$，其 Nyquist 轨迹随 L_g 变化的规律与 L_f 影响下的特性一致：随 L_g 由 0.1 mH 增至 15.0 mH，Nyquist 曲线始终未包围临界点 $(-1,\mathrm{j}0)$，且开环传递函数无正实部极点，依据 Nyquist 稳定判据，该通道始终保持稳定。

对于 $G_2(s)$，稳定性随 L_g 呈现阶段性演化特征：当 L_g=0.1 mH 时，Nyquist 曲线未包围 $(-1,\mathrm{j}0)$，系统稳定；当 L_g=1.0 mH 时，Nyquist 轨迹开始包围 $(-1,\mathrm{j}0)$ 1 周，同时存在 1 个正实部极点，结合 Nyquist 判据，系统仍保持稳定；当 L_g=15.0 mH 时，Nyquist 曲线仍包围 1 周，但 $G_2(s)$ 正实部极点数量增至 4 个，此时系统满足失稳条件，进入不稳定状态。



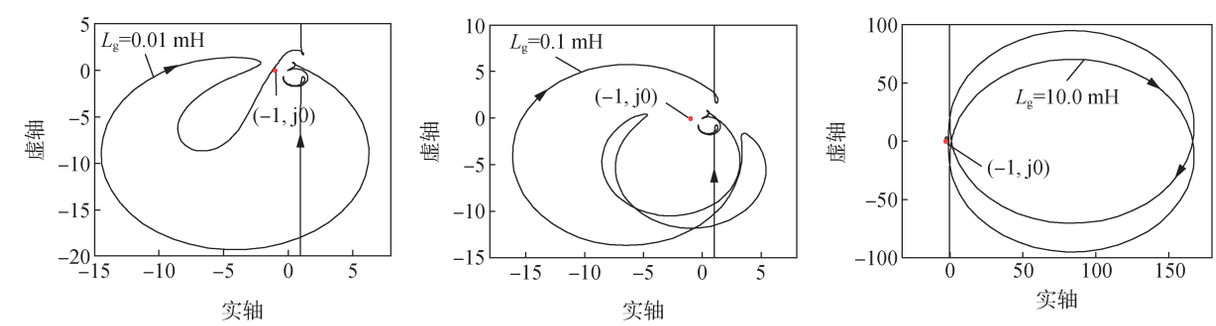
(a) $G_1(s)$的Nyquist图



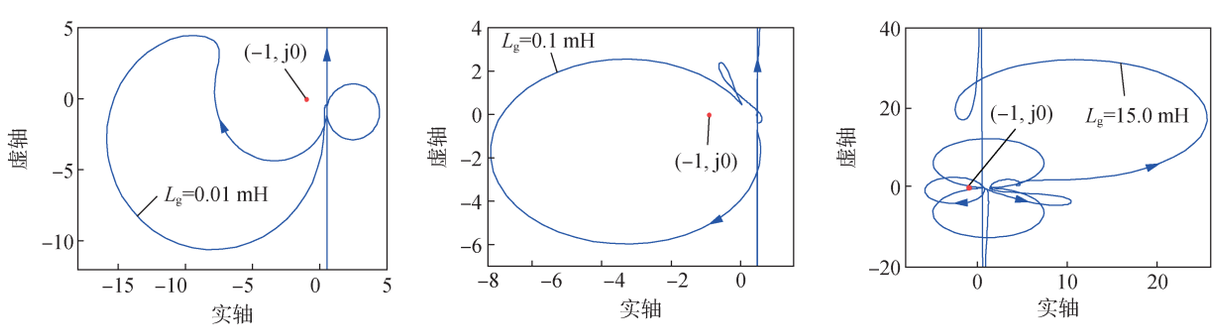
(b) $G_2(s)$的Nyquist图

图 9　不同 L_f 参数下 $G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 的 Nyquist 图

Fig. 9　Nyquist plots of $G_1(s)$ and $G_2(s)$ under different L_f parameters



(a) $G_1(s)$的Nyquist图



(b) $G_2(s)$的Nyquist图

图 10　不同 L_g 参数下 $G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 的 Nyquist 图

Fig. 10　Nyquist plots of $G_1(s)$ and $G_2(s)$ under different L_g parameters

综上，本章紧密围绕离网风电场黑启动顺利完成、热备用稳定维持的工程核心目标展开。从稳定性判定、关键参数优化选择等维度进行分析，所得结论如下：

1）黑启动阶段，明确了零起升压黑启动策略下，电压水平线性提升过程中，参数 L_f、L_g 在一定范围（0.1~15.0 mH）内变化时，系统不存在失稳问题。

2）离网运行阶段，明确了参数 L_f、L_g 改变与系统小干扰稳定性的关联关系，随 L_f、L_g 递增，系统存在“稳定→临界→失稳”的阶段特性，参数的临界值在 1.0 mH 附近。

该方法应用可有效解决偏远山区风电场离网后稳定性差、热备用难以实现、并网风能损失大等实际问题，实现参数配置从经验化向定量化转变。

4　仿真分析

为了验证上述理论分析的正确性，本文在Matlab/Simulink中按照表1参数搭建仿真模型，验证理论分析和仿真结果的正确性。

4.1　黑启动过程系统小干扰稳定性的仿真验证

在仿真验证环节，本文选取构网型风机机端电压、电流、输出有功/无功功率、无功补偿风机补偿有功/无功功率作为核心观测变量，通过其时域波形特征来表征离网系统的动态稳定特性。

黑启动过程离网系统小干扰稳定性仿真结果如图11所示，在黑启动全过程中，系统电压水平由0逐步抬升至额定值；伴随电压的动态提升，上述关键电气参数的波形均未出现发散、振荡增幅等失稳征兆，始终保持平稳运行状态。该仿真结果与3.1节基于Nyquist判据的理论分析结论一致，验证了黑启动阶段所提系统稳定性分析方法的有效性。

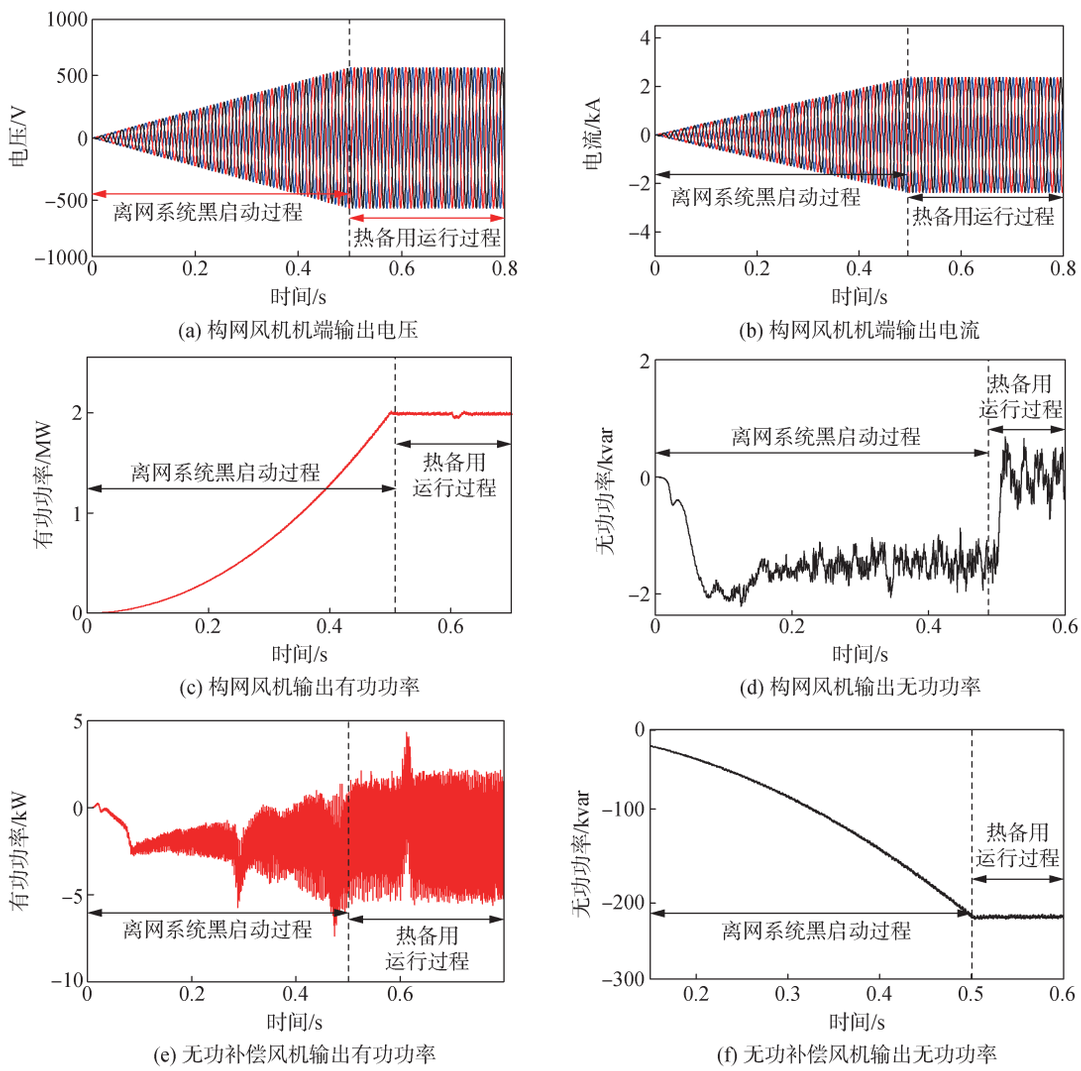


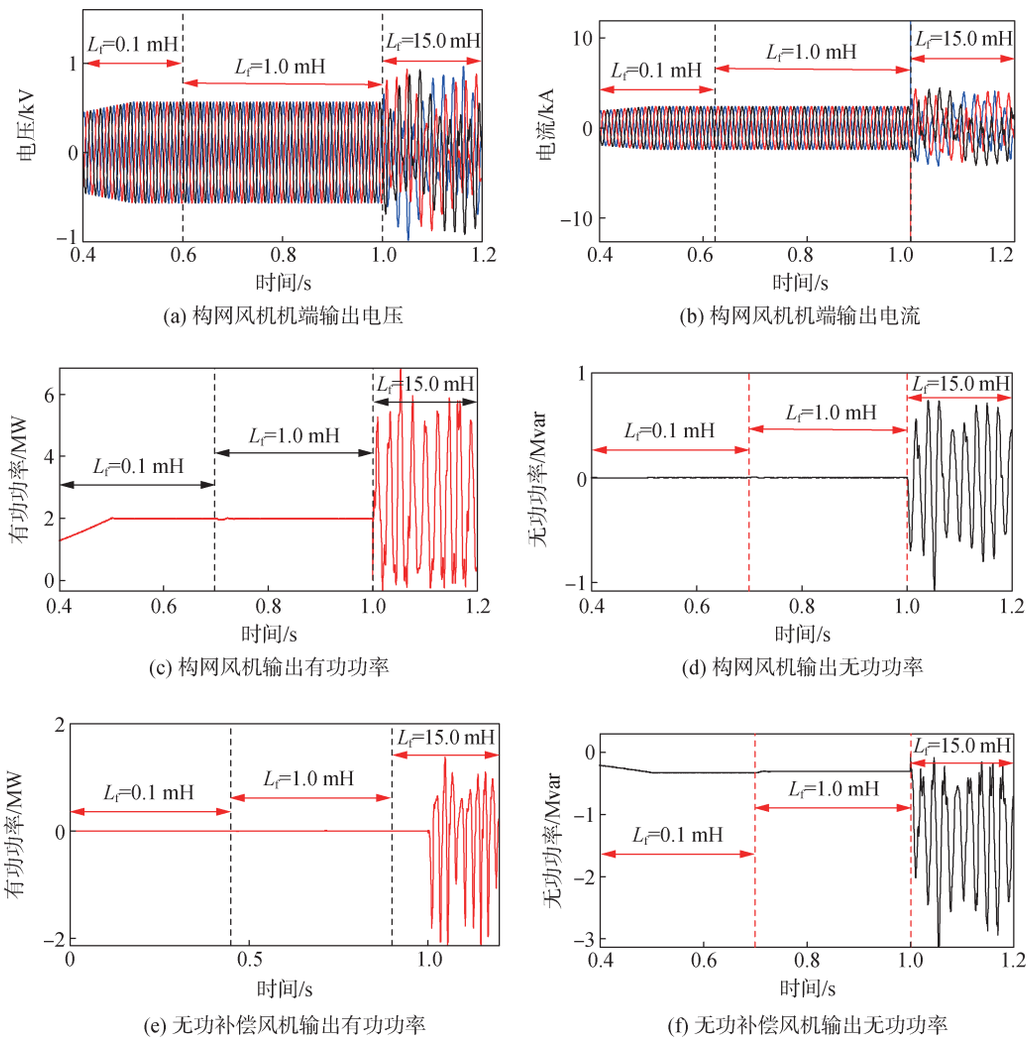
图11　黑启动过程离网系统小干扰稳定性仿真结果

Fig. 11　Simulation results of small-disturbance stability for the off-grid system during black-start

4.2　离网热备用运行阶段系统小干扰稳定性的仿真验证

联络线参数改变时离网系统小干扰稳定性仿真结果如图12所示。当滤波电感L_f由0.1 mH调整至1.0 mH时，构网型风机机端电压、电流及输出功率等关键电气参数仅经历短暂小幅波动后，即回归平稳运行状态，系统保持稳定；而当L_f进一步由1.0 mH增大至15.0 mH时，构网型与无功补偿型风机的机端电压、电流及输出功率均出现剧烈发散振荡，系统进入失稳状态。上述仿真结果与3.2节基于Nyquist判据的理论分析结论完全一致，验证了L_f对系统稳定性的阈值效应及所提稳定性分析方法的有效性。

此外，电网等效电感L_g变化的仿真结果与L_f呈现高度相似的稳定性演化规律，即随L_g增大，系统同样存在“稳定→临界→失稳”的阶段特性，为避免冗余，此处不再赘述。



(a) 构网风机机端输出电压　(b) 构网风机机端输出电流

(c) 构网风机输出有功功率　(d) 构网风机输出无功功率

(e) 无功补偿风机输出有功功率　(f) 无功补偿风机输出无功功率

图 12　联络线参数改变时离网系统小干扰稳定性仿真结果

Fig. 12　Simulation results of small-disturbance stability for the off-grid system under variation of tie-line parameters

5　结　论

本文针对偏远山区风电场离网系统“黑启动-离网热备用”小干扰稳定性分析需求，采用谐波线性化小信号建模方法建立关键设备等值序阻抗模型，搭建系统的整体等效阻抗网络，结合 Nyquist 稳定判据提出了分阶段的小干扰稳定性分析方法，揭示了电压、阻抗参数与稳定性的映射规律，为参数优化及稳定管控提供技术支撑。所得结论如下：

1）设备改造与建模分析。针对偏远山区风电离网系统主动支撑需求，对风机变流器实施差异化重构，分为构网型与无功补偿型 2 类风机。建立了 2 类风机的等值序阻抗模型，分析幅频、相频特性发现，构网型风机输出阻抗呈感性，与电网阻抗匹配，可提供电压与频率支撑；无功补偿型风机中高频段呈负阻尼特性，是诱发系统振荡失稳的主要原因。

2）离网系统小干扰稳定性分析与参数敏感性规律。基于系统拓扑整合各设备阻抗模型，搭建系统完整的序阻抗网络模型；利用叠加定理将系统解耦为构网型与无功补偿风机主导的子系统，结合 Nyquist 判据理论，分阶段揭示系统小干扰稳定特性：黑启动阶段，明确了零起升压黑启动策略下，电压水平线性提升过程中系统能够保持小干扰稳定；离网热备用运行阶段，厘清了联络线滤波电感 L_f、电网等效电感 L_g 等核心阻抗参数变化与系统小干扰稳定性的量化映射关系。L_f 增大将导致开环传递函数 Nyquist 轨迹包围临界稳定点且包围次数持续增加，L_g 增大则会引发开环传递函数正实部极点数量递增，二者增大均会使系统失稳风险显著加剧，明确了阻抗参数对系统稳定性的阈值效应及临界失稳范围。

3）方法验证与工程价值。仿真结果表明，本文所提方法可有效评估风电离网系统“黑启动-离网热备用”全阶段小干扰稳定性，为离网系统的参数优化整定与稳定边界评估提供了严谨可行的技术手段。

后续研究将围绕以下几个方面继续推进：一是针对多台无功补偿风机间的高频耦合机理，建立更

精准的交互阻抗模型，揭示其对系统高频振荡特性的影响；二是在阻抗参数稳定边界研究基础上，进一步开展虚拟惯量、阻尼系数、PI参数等控制参数的多目标优化整定，实现系统参数全域协同优化；三是将准稳态小信号分析拓展至电压快速跃升阶段的大信号暂态稳定分析，完善黑启动全周期稳定评估体系；四是将所提序阻抗建模与稳定性分析方法推广至含光伏、混合储能的多能互补离网系统，验证方法的通用性与工程适配性。

利益冲突声明（Conflict of Interests）：

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明（Authors' Contributions）：

籍宏震、王媛媛进行了研究内容分析，提出核心创新点；叶宇轩完成仿真并分析数据；屈俊辉、樊秋敏参与了论文写作和修订。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

6　参考文献

[1] 杨宏钧，刘俊良，涂银钢，等. 跟网/构网型直驱风场经MMC-HVDC送出系统的振荡分析与抑制策略研究[J/OL]. 电工技术学报，2026-01-08. https://doi. org/10. 19595/j. cnki. 1000-6753. tces. 251738.
Yang Hongjun, Liu Junliang, Tu Yingang, et al. Oscillation analysis and research of suppression strategy of grid-following/grid-forming PMSG-based wind farm transmitted system through MMC-HVDC [J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2026-01-08. https://doi. org/10. 19595/j. cnki. 1000-6753. tces. 251738.

[2] 孟刘威，王维庆，李笑竹. 基于DRU-HVDC送出系统的构网/跟网混合海上风电场黑启动策略[J]. 高压电器，2025，61(11)：138-148，174.
Meng Liuwei, Wang Weiqing, Li Xiaozhu. Black start strategy for hybrid grid-forming/grid-following offshore wind farms based on DRU-HVDC transmission systems [J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(11): 138-148, 174.

[3] 胡宇飞，田震，查晓明，等. 构网型与跟网型变流器主导孤岛微网阻抗稳定性分析及提升策略[J]. 电力系统自动化，2022，46(24)：121-131.
Hu Yufei, Tian Zhen, Zha Xiaoming, et al. Impedance stability analysis and promotion strategy of islanded microgrid dominated by grid-connected and grid-following converters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 121-131.

[4] 刘铖，周凌，李文彪，等. 基于网络能量的含跟网-构网型混合风机的电力系统次同步振荡特性解析研究[J]. 东北电力大学学报，2025，45(4)：9-17.
Liu Cheng, Zhou Ling, Li Wenbiao, et al. An analytical study of sub-synchronous oscillation characteristics of power system with GFL-GFM mixed wind turbine based on grid energy [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2025, 45(4): 9-17.

[5] 崔晓丹，吴家龙，薛峰，等. 基于主导特征辨识的双馈机组风电场次同步振荡等值建模方法[J]. 高压电器，2025，61(9)：184-192.
Cui Xiaodan, Wu Jialong, Xue Feng, et al. Equivalent modeling method of sub-synchronous oscillation in doubly-fed wind farm based on dominant characteristic identification [J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(9): 184-192.

[6] 王海宁. 电流/电压控制型直驱风电场频率耦合导纳建模与分析及振荡抑制[D]. 长沙：湖南大学，2023.
Wang Haining. Modeling and analysis of frequency-coupling admittance and the oscillation suppression for current/voltage-controlled direct drive wind farm[D]. Changsha: Hunan University, 2023.

[7] 朱东海，马玉梅，胡家兵. 电网故障下新能源并网系统多时间尺度暂态稳定问题与研究现状[J]. 中国电机工程学报，2026，46(1)：212-231.
Zhu Donghai, Ma Yumei, Hu Jiabing. Multi-timescale transient stability issues and research status of renewable energy grid-connected systems during grid faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(1): 212-231.

[8] 袁辉，辛焕海，王冠中，等. 含SVG的新能源多馈入系统振荡分析和广义短路比计算[J]. 电力系统自动化，2021，45(14)：38-46.
Yuan Hui, Xin Huanhai, Wang Guanzhong, et al. Analysis on oscillation of multi-infeed system with renewable energy and static var generator and calculation of its generalized short-circuit ratio [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(14): 38-46.

[9] 詹献文，甘德强. 基于序参数的多虚拟同步机系统暂态稳定机理分析[J]. 中国电机工程学报，2026，46(12)：4823-4838.
Zhan Xianwen, Gan Deqiang. Transient stability analysis of multiple VSGs system based on order parameter [J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(12): 4823-4838.

[10] 文曹，宋梁，高仕林，等. 弱电网下SVC引发次超同步交互作用分析及振荡抑制[J]. 电力建设，2025，46(5)：24-35.
Wen Cao, Song Liang, Gao Shilin, et al. Sub- and super-synchronous interaction caused by static var compensators in a weak AC grid analysis and oscillation suppression [J]. Electric Power Construction, 2025, 46(5): 24-35.

[11] 周涛，向永建，杜可可，等. 风机与储能参与电网调频协调控制技术综述[J]. 浙江电力，2024，43(7)：45-55.
Zhou Tao, Xiang Yongjian, Du Keke, et al. An overview of a coordinated control technique for wind turbines and energy storage participating grid frequency regulation [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(7): 45-55.

[12] 周年光，谢欣涛，马俊杰，等. 风电场配套储能的自适应虚拟惯性：阻尼控制[J]. 电力科学与技术学报，2024，39(3)：150-158.
Zhou Nianguang, Xie Xintao, Ma Junjie, et al. An adaptive virtual inertial damping control for wind farm integrated energy storage system [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 150-158.

[13] 王奕鑫，刘晓颖，汪莹，等. 基于广义短路比的LCC/VSC混合多馈入系统小干扰稳定分析[J]. 中国电机工程学报，2026，46

(10): 3981-3995.
Wang Yixin, Liu Xiaoying, Wang Ying, et al. Small signal stability analysis of LCC/VSC hybrid multi-infeed HVDC system based on generalized short circuit ratio [J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(10): 3981-3995.
[14] 李琳, 张晓楠, 李庚银, 等. 考虑内外环交互作用的VSG并网振荡特性[J]. 电力建设, 2024, 45(4): 66-76.
Li Lin, Zhang Xiaonan, Li Gengyin, et al. Characteristics of VSG grid-connected system oscillation considering the interaction between inner and outer loops [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(4): 66-76.
[15] 王家乾, 赵晋斌, 曾志伟, 等. 基于虚拟惯性控制的光伏直流微电网稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(4): 55-61, 95.
Wang Jiaqian, Zhao Jinbin, Zeng Zhiwei, et al. Stability analysis of photovoltaic DC microgrid based on virtual inertia control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(4): 55-61, 95.
[16] Cespedes M, Sun J. Impedance modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1254-1261.
[17] 伍文华, 陈燕东, 周乐明, 等. 虚拟同步发电机接入弱电网的序阻抗建模与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1560-1571, 1853.
Wu Wenhua, Chen Yandong, Zhou Leming, et al. Sequence impedance modeling and stability analysis for virtual synchronous generator connected to the weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1560-1571, 1853.
[18] 辛焕海, 李子恒, 董炜, 等. 三相变流器并网系统的广义阻抗及稳定判据[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1277-1292.
Xin Huanhai, Li Ziheng, Dong Wei, et al. Generalized-impedance and stability criterion for grid-connected converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1277-1292.
[19] 何松涛, 邵振国, 郑文迪, 等. 计及SVG动态调压策略的配电网双层不确定性无功规划配置[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 5158-5168.
He Songtao, Shao Zhenguo, Zheng Wendi, et al. Bi-level uncertain reactive power planning of distribution network considering SVG dynamic voltage regulation strategy [J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 5158-5168.
[20] 邢雅, 冯洋, 刘欣源, 等. 基于分布式调相机与SVC协同的新能源电站无功电压优化控制策略[J/OL]. 自动化技术与应用, 2025-09-02. https://link. cnki. net/urlid/23. 1474. tp. 20250902. 1033. 004.
Xing Ya, Feng Yang, Liu Xinyuan, et al. Reactive power and voltage optimization control strategy for new energy power plants based on distributed phase-shifting camera and SVC collaboration [J/OL]. Techniques of Automation and Applications, 2025-09-02. https://link. cnki. net/urlid/23. 1474. tp. 20250902. 1033. 004.
[21] 朱丽萍, 刘文颖, 邵冲, 等. 基于调相机与SVC协调的抑制高压直流送端风机脱网的控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 107-115.
Zhu Liping, Liu Wenying, Shao Chong, et al. Control strategy of suppressing wind turbine tripping based on coordination between synchronous condenser and SVC in sending-end network of HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 107-115.
[22] 曹武, 杨铭, 胡波, 等. 基于构网变流器的新能源场站暂态电压分散协同控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(14): 1-12.
Cao Wu, Yang Ming, Hu Bo, et al. Transient voltage decentralized cooperative control strategy of renewable energy station based on the grid forming converter[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(14): 1-12.
[23] 徐衍会, 任晋, 田鑫, 等. 综合提升新能源高占比受端电网小干扰和暂态电压稳定性的SVG优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(19): 119-130.
Xu Yanhui, Ren Jin, Tian Xin, et al. An SVG optimal configuration method for enhancing small disturbance and transient voltage stability in a receiving-end power grid with a high proportion of renewable energy [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 119-130.
[24] 邱硕, 庄可好, 汤波, 等. 基于直流电容自同步的构网型SVG暂态同步稳定分析与提升策略[J]. 电网技术, 2025, 49(9): 3633-3642.
Qiu Shuo, Zhuang Kehao, Tang Bo, et al. Transient synchronous stability analysis and enhancement strategy for DC capacitor self-synchronisation-based constructed grid type SVGs [J]. Power System Technology, 2025, 49(9): 3633-3642.
[25] 王赟程, 陈新, 陈杰, 等. 基于谐波线性化的三相LCL型并网逆变器正负序阻抗建模分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5890-5898, 6033.
Wang Yuncheng, Chen Xin, Chen Jie, et al. Analysis of positive-sequence and negative-sequence impedance modeling of three-phase LCL-type grid-connected inverters based on harmonic linearization[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5890-5898, 6033.
[26] 韩佶, 邓钰婷, 耿子越, 等. 大规模风电场协调控制架构及算法综述[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(1): 1-18.
Han Ji, Deng Yuting, Geng Ziyue, et al. Review of coordinated control architectures and algorithms for large-scale wind farms[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 1-18.
[27] 李乔, 王潇, 任怡娜, 等. 考虑PMSG动态特性差异时直驱风电场经柔直并网系统的小信号稳定性分析[J]. 高电压技术, 2025, 51(9): 4553-4564.
Li Qiao, Wang Xiao, Ren Yina, et al. Small-signal stability analysis of the PMSG-based wind farm via the VSC-HVDC system considering PMSG dynamic characteristics difference [J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(9): 4553-4564.
[28] 兰征, 王海晖, 何东, 等. 考虑电流环控制域差异的构网变流器序阻抗建模及电网适用性对比分析[J]. 电工技术学报, 2026, 41(3): 834-848.
Lan Zheng, Wang Haihui, He Dong, et al. Sequence impedance modeling of grid-forming converter considering the difference of current loop control domain and comparative analysis of power grid applicability [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2026, 41(3): 834-848.
[29] 周锦涛, 张慧, 谢杰, 等. 基于特征谐波线性相移PWM的并网

逆变器特定间谐波抑制方法[J]. 武汉大学学报(工学版)，2022，55(9)：947-957.
Zhou Jintao，Zhang Hui，Xie Jie，et al. Specific inter-harmonic suppression method for grid-connected inverters based on linear phase shift PWM of characteristic harmonic [J]. Engineering Journal of Wuhan University，2022，55(9)：947-957.

[30] 辛焕海，董炜，袁小明，等. 电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]. 中国电机工程学报，2016，36(22)：6013-6027.
Xin Huanhai，Dong Wei，Yuan Xiaoming，et al. Generalized short circuit ratio for multi power electronic based devices infeed to power systems [J]. Proceedings of the CSEE，2016，36(22)：6013-6027.

[31] 辛焕海，章枫，于洋，等. 多馈入直流系统广义短路比：定义与理论分析[J]. 中国电机工程学报，2016，36(3)：633-647.
Xin Huanhai，Zhang Feng，Yu Yang，et al. Generalized short circuit ratio for multi-infeed DC systems：definition and theoretical analysis[J]. Proceedings of the CSEE，2016，36(3)：633-647.

[32] Wang Z L，Chen Y D，Li X P，et al. Adaptive harmonic impedance reshaping control strategy based on a consensus algorithm for harmonic sharing and power quality improvement in microgrids with complex feeder networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2022，13(1)：47-57.

[33] 朱益华，李成翔，罗超，等. 风火打捆送出系统稳定特性研究和运行策略优化[J]. 南方电网技术，2024，18(3)：26-33.
Zhu Yihua，Li Chengxiang，Luo Chao，et al. Stability characteristics research and operation strategy optimization of wind-thermal bundled system [J]. Southern Power System Technology，2024，18(3)：26-33.

[34] 胡雪凯，孟良，李磊，等. 基于有源谐波电阻控制的下垂控制变流器振荡抑制策略[J]. 中国电力，2025，58(9)：44-53，67.
Hu Xuekai，Meng Liang，Li Lei，et al. Oscillation suppression strategy for droop control converter based on active harmonic resistance control[J]. Electric Power，2025，58(9)：44-53，67.

[35] Wang H N，Xie Z W，Chen Y D，et al. Admittance-based stability analysis of current-controlled VSG considering the frequency coupling characteristics [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics，2023，11(1)：1191-1202.

[36] 李成翔，杜艳丽，朱益华，等. 基于风电机组频率主动支撑的多时间尺度调频控制策略[J]. 南方电网技术，2024，18(3)：83-92.
Li Chengxiang，Du Yanli，Zhu Yihua，et al. Multi-time scale frequency regulation control strategy based on frequency active support of wind turbines [J]. Southern Power System Technology，2024，18(3)：83-92.

[37] Yang C R，Huang L B，Xin H H，et al. Placing grid-forming converters to enhance small signal stability of PLL-integrated power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2021，36(4)：3563-3573.

[38] 袁国富，杜文娟，王海风. 风机出力变化下直驱风电场小干扰稳定性分析[J]. 电力工程技术，2025，44(5)：35-45.
Yuan Guofu，Du Wenjuan，Wang Haifeng. Analysis of small signal stability in direct-drive wind farm under wind power generation variations [J]. Electric Power Engineering Technology，2025，44(5)：35-45.

[39] 黄伟，张清波，许昊，等. 电力系统小干扰稳定分析的最小特征轨迹法[J]. 电力自动化设备，2022，42(12)：151-156，164.
Huang Wei，Zhang Qingbo，Xu Hao，et al. Minimum characteristic loci method for power system small disturbance stability analysis [J]. Electric Power Automation Equipment，2022，42(12)：151-156，164.

[40] 许津铭，乔瑜，罗运虎，等. 开环同步型单相并网逆变器小干扰建模与弱电网下稳定性分析[J]. 中国电机工程学报，2024，44(15)：6136-6145.
Xu Jinming，Qiao Yu，Luo Yunhu，et al. Small-disturbance modeling and stability analysis of single-phase grid-tied inverter with open-loop synchronization under weak grid[J]. Proceedings of the CSEE，2024，44(15)：6136-6145.

收稿日期：2026-04-21　**修回日期**：2026-05-26


籍宏震

作者简介：

籍宏震(1999)，男，博士研究生，主要研究方向为新型电力系统继电保护与控制；

王媛媛(1980)，女，博士，教授，通信作者，主要研究方向为电力系统继电保护，E-mail：wyy_1202@163.com；

叶宇轩(1999)，男，硕士研究生，主要从事风机设计与故障检测工作；

屈俊辉(2001)，男，硕士研究生，主要从事风电场集电线路优化设计；

樊秋敏(1999)，男，硕士研究生，主要从事风电场集电线路优化设计。

（编辑　景贺峰）