DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.5.189 **中图分类号**：TM711 **文献标志码**：A

基于矩阵相似变换的多类型新能源汇集系统小信号等值建模方法

王 潇[1]，董文凯[2]，吴林林[1]，孙雅旻[1]，苏田宇[1]，谢小荣[2]
(1.华北电力科学研究院有限责任公司，北京 100045；2.新型电力系统运行与控制全国重点实验室(清华大学)，北京 100084)

摘要：新能源汇集系统机组数量庞大、网络拓扑复杂、工况组合多样，导致系统小干扰稳定分析效率低且等值建模难度大。为此，基于对新能源机组和电力网络传递函数矩阵的分块相似变换，提出了多类型新能源汇集系统小信号等值建模方法。首先，将新能源机组模型与电力网络模型联立，得到系统的详细模型；然后，考虑将系统划分为若干由动态特性相似机组构成的新能源机群，并基于对各机群传递函数矩阵的相似对角化变换和降维，建立了机群的单机等值模型，得到了系统的多机等值模型；最后，通过算例仿真验证了所提方法的有效性。所提方法可计及新能源机组动态特性差异和复杂网络拓扑的影响，且可有效降低大规模新能源汇集系统小干扰稳定分析的计算量。

关键词：新能源汇集系统；等值模型；小干扰稳定性

Small-signal Equivalent Modelling Method of a Multi-type Renewable Energy Collecting System Based on Matrix Partitioned Similarity Transformation

WANG Xiao[1], DONG Wenkai[2], WU Linlin[1], SUN Yamin[1], SU Tianyu[1], XIE Xiaorong[2]
(1. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100045, China; 2. State Key Laboratory of Power System Operation and Control (Tsinghua University), Beijing 100084, China)

Abstract: In a renewable power collecting system, the number of generators is large, the network topology is complex, and the combination of operating conditions is various, which makes the small-signal stability analysis of the system inefficient and the equivalent modelling difficult. Thus, a small-signal equivalent modelling method of the multi-type renewable energy collecting system is proposed based on partitioned similarity transformation of the transfer function matrix of the generators and the network. First, by combining the models of generators and the network equation of the system, a detailed model of the renewable power collecting system is obtained. Second, considering that the system can be divided into several groups in which dynamics of the generators are approximately the same, via the partitioned equivalent decoupling and order reduction, a single-machine equivalent model is established for each group and hence a multi-machine equivalent model for the system is obtained. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified via case studies. The method proposed can deal with the differences of dynamics of the generators and the complex network topology and also effectively reduce the computational burden of the small-signal stability analysis.

Keywords: Renewable power collecting system; equivalent model; small-signal stability

收稿日期：2024-04-02；**修回日期**：2024-05-29；**录用日期**：2024-06-18；**网络首发日期**：2024-07-15
基金项目：华北电力科学研究院有限责任公司科技资助项目(KJZ2022056)；国家杰出青年科学基金资助项目(51925701)
This work is supported by North China Electric Power Research Institute Co. Ltd. under the grant KJZ2022056; National Natural Science Foundation of China under the grant 51925701

新能源大规模并网在缓解能源和环境危机的同时，也给电力系统的安全稳定运行带来了诸多挑战[1]。其中，新能源场站宽频振荡事件近年来屡有

发生，成为制约新能源安全并网的瓶颈之一[2-3]，引发了广泛关注与深入研究。由于场站内机组数量庞大、模型维度高，新能源汇集系统振荡分析常面临计算量大和效率低的问题[4]，合理有效地对系统进行等值建模是化解这一挑战的关键途径。

新能源汇集系统宽频振荡的产生可看作给定平衡点附近的小干扰稳定问题[4-6]，振荡特征随运行工况的变化而改变。采用 1 台或几台机组代表 1 个新能源场站，是新能源汇集系统小信号等值的常用方法。文献[7-10]首先根据工况相似度对新能源机组进行聚类，然后通过容量加权平均法、参数辨识法建立各机群单机等值模型，或是以聚类中心作为单机等值模型参数，得到场站多机等值模型。文献[11-13]在新能源机组动态特性近似相同的条件下，通过数学推导将 N 机场站解耦为 N 个相互独立且由 1 台机组并网构成的子系统，据此得到场站单机等值模型。文献[14-15]建立了新能源汇集系统阻抗网络模型，并基于电路化简进行模型降维。以上研究为新能源汇集系统小信号等值和振荡分析提供了良好的基础。

然而，在实际中，新能源机组控制模型和参数通常未知，基于参数化模型的等值方法应用于实际工程时存在局限性。基于容量加权平均法的等值建模中未对变流器控制系统等值作深入讨论；参数辨识法需要新能源汇集系统小干扰响应特性数据支撑，在海量运行工况下此类数据通常难以完全获取[12]。通过等效解耦所得单机等值模型便于在工况变化时进行调整，但是仅适用于所有机组动态特性近似相同的情况；文献[16-17]中虽对该方法进行了改进，但所得等值模型的精度有待提高。当机组动态特性存在显著差异时，新能源汇集系统阻抗网络模型表示形式复杂，电路化简难度大。

综上，现有等值建模方法难以兼顾新能源机组动态差异、网络拓扑复杂和工况组合多样的影响。为此，本文计及机组模型差异，推导了多类型新能源汇集系统小信号等值表示形式，便于在机组数量和网络拓扑改变时代入得到系统等值模型。首先，建立了新能源汇集系统详细模型；然后，将系统划分为若干由动态特性相似机组构成的新能源机群，通过对各机群的等效解耦与模型降维，得到系统小信号等值表示形式；最后，通过算例仿真验证了所提方法的有效性。

1 新能源汇集系统及其小信号模型

针对图 1 所示的常见新能源汇集系统开展研究，其中风电或光伏机组小信号模型均可表示为[14-15]

$$\Delta \boldsymbol{I}_i = \boldsymbol{G}_i(s)\Delta \boldsymbol{V}_i \tag{1}$$

式中：下标 i 为系统中第 i 台机组，i=1, 2,⋯, N，N 为系统中的新能源机组总数；$G_i(s)$为第 i 台机组的导纳模型，s 为复频率；$\boldsymbol{I}_i$=[I_{ix} I_{iy}]$^{\mathrm{T}}$ 和 $\boldsymbol{V}_i$=[V_{ix} V_{iy}]$^{\mathrm{T}}$ 分别为交流电网公共 x-y 坐标系下第 i 台机组的输出电流和端电压列向量。

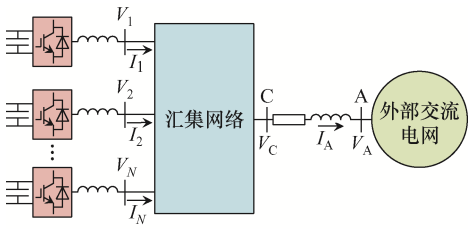


图 1 新能源汇集系统示意

Fig. 1 Schematic of renewable power collecting system

由式(1)可得所有新能源机组模型的形式为

$$\Delta \boldsymbol{I} = \mathrm{diag}\left[\boldsymbol{G}_i(s)\right]\Delta \boldsymbol{V} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{I}=[\boldsymbol{I}_1^{\mathrm{T}} \quad \boldsymbol{I}_2^{\mathrm{T}} \quad \boldsymbol{I}_N^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{V}=[\boldsymbol{V}_1^{\mathrm{T}} \quad \boldsymbol{V}_2^{\mathrm{T}} \cdots \boldsymbol{V}_N^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$；diag[$\boldsymbol{G}_i(s)$]为对角线元素为 $\boldsymbol{G}_i(s)$的分块对角阵，i=1, 2,⋯, N。

采用节点阻抗矩阵，汇集网络的网络方程为

$$\Delta \boldsymbol{V} = \boldsymbol{Z}_{\mathrm{net}}(s)\Delta \boldsymbol{I} + \Delta \boldsymbol{V}_{\mathrm{CM}} \tag{3}$$

式中：

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{net}}(s)=[z_{\mathrm{n}ij}(s)]_{\substack{i=1,2,\cdots,N\\ j=1,2,\cdots,N}}=\begin{bmatrix} z_{\mathrm{n}11}(s) & z_{\mathrm{n}12}(s) & \cdots & z_{\mathrm{n}1N}(s) \\ z_{\mathrm{n}21}(s) & z_{\mathrm{n}22}(s) & \cdots & z_{\mathrm{n}2N}(s) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{\mathrm{n}N1}(s) & z_{\mathrm{n}N2}(s) & \cdots & z_{\mathrm{n}NN}(s) \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{z}_{\mathrm{n}ij}(s)=\begin{bmatrix} r_{\mathrm{n}ij}+\dfrac{x_{\mathrm{n}ij}s}{\omega_0} & -x_{\mathrm{n}ij} \\ x_{\mathrm{n}ij} & r_{\mathrm{n}ij}+\dfrac{x_{\mathrm{n}ij}s}{\omega_0} \end{bmatrix}$$，$[\boldsymbol{z}_{\mathrm{n}ij}(s)]_{\substack{i=1,2,\cdots,N\\ j=1,2,\cdots,N}}$ 为第 i 行、第 j 列元素为 $\boldsymbol{z}_{\mathrm{n}ij}(s)$的分块矩阵，$r_{\mathrm{n}ii}$ 和 $x_{\mathrm{n}ii}$ 分别为第 i 台机组到母线 C 的自电阻和自电抗，$r_{\mathrm{n}ij}$ 和 $x_{\mathrm{n}ij}$ 分别为第 i、j 台机组间的互电阻和互电抗(i, j=1, 2,⋯, N, $i\neq j$，仅就汇集网络而言)；$\boldsymbol{V}_{\mathrm{CM}}$=[$\boldsymbol{V}_{\mathrm{C}}^{\mathrm{T}}$ $\boldsymbol{V}_{\mathrm{C}}^{\mathrm{T}}$ … $\boldsymbol{V}_{\mathrm{C}}^{\mathrm{T}}$]$^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{V}_{\mathrm{C}}$=[$V_{\mathrm{C}x}$ $V_{\mathrm{C}y}$]$^{\mathrm{T}}$ 为母线 C 电压列向量。

同理，外送线路的网络方程为

$$\Delta\boldsymbol{V}_{\mathrm{C}}=\boldsymbol{Z}_{\mathrm{L}}(s)\Delta\boldsymbol{I}_{\mathrm{A}}+\Delta\boldsymbol{V}_{\mathrm{A}} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{L}}(s)=\begin{bmatrix} r_{\mathrm{L}}+\dfrac{x_{\mathrm{L}}s}{\omega_0} & -x_{\mathrm{L}} \\ x_{\mathrm{L}} & r_{\mathrm{L}}+\dfrac{x_{\mathrm{L}}s}{\omega_0} \end{bmatrix}$，$r_{\mathrm{L}}$ 和 x_{L} 分别为外送线路的电阻和电抗；$\boldsymbol{V}_{\mathrm{A}}$=[$V_{\mathrm{a}x}$ $V_{\mathrm{a}y}$]$^{\mathrm{T}}$ 为母线 A 电压列向量；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{A}}$=[$I_{\mathrm{a}x}$ $I_{\mathrm{a}y}$]$^{\mathrm{T}}$ 为新能源汇集系统注入外部交流电网电流的列向量，$\boldsymbol{I}_{\mathrm{A}}=\sum_{i=1}^{N}\boldsymbol{I}_i$。

将式(3)和式(4)联立可得系统网络方程为

$$\Delta\boldsymbol{V}=\boldsymbol{Z}_{\mathrm{c}}(s)\Delta\boldsymbol{I}+\Delta\boldsymbol{V}_{\mathrm{AM}} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{c}}(s)=[\boldsymbol{z}_{cij}(s)]\big|_{\substack{i=1,2,\cdots,N\\ j=1,2,\cdots,N}}$，$\boldsymbol{z}_{cij}(s)=\boldsymbol{z}_{\mathrm{n}ij}(s)+\boldsymbol{Z}_{\mathrm{L}}(s)$；$\boldsymbol{V}_{\mathrm{AM}}=[\boldsymbol{V}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{T}}\ \ \boldsymbol{V}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{T}}\cdots\boldsymbol{V}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$。

由式(2)和式(5)可得新能源汇集系统小信号模型为

$$\Delta\boldsymbol{I}_{\mathrm{A}}=\boldsymbol{G}_{\mathrm{A}}(s)\Delta\boldsymbol{V}_{\mathrm{A}} \tag{6}$$

式中，$\boldsymbol{G}_{\mathrm{A}}(s)=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}\boldsymbol{m}_{ij}(s)$ 为系统导纳模型，$[\boldsymbol{m}_{ij}(s)]\big|_{\substack{i=1,2,\cdots,N\\ j=1,2,\cdots,N}}=\{\mathrm{diag}[\boldsymbol{G}_i^{-1}(s)]-\boldsymbol{Z}_{\mathrm{c}}(s)\}^{-1}$，$\boldsymbol{m}_{ij}(s)$ 为 2 阶多项式矩阵。

2　基于分块等效解耦的新能源汇集系统小信号等值模型构建方法

在新能源并网系统小干扰稳定分析中，通常需建立新能源汇集系统在并网点视入的导纳/阻抗模型。实际系统中新能源机组数量庞大，第 1 节所示建模过程涉及高阶矩阵的反复求逆，计算量大。为此，本节构建更高效的等值模型。首先对新能源机组进行分群，使得各个机群由来自同一厂家、同一型号且工况近似的机组构成，即各机群内部新能源机组小信号模型近似相同。若新能源汇集系统中所有机组共划分为 M 个机群，则机组模型可表示为

$$\Delta\boldsymbol{I}_{\mathrm{r}}=\mathrm{diag}[\boldsymbol{G}^{(j)}(s)]\Delta\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}} \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{G}^{(j)}(s)$=diag[$\boldsymbol{G}_k^{(j)}(s)$]为对角线元素为 $\boldsymbol{G}_k^{(j)}(s)$ 的分块对角阵，上标(j)表示第 j 个机群，j=1, 2,⋯, M；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{r}}$=[$\boldsymbol{I}^{(1)\mathrm{T}}$ $\boldsymbol{I}^{(2)\mathrm{T}}\cdots\boldsymbol{I}^{(M)\mathrm{T}}$]$^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{I}^{(j)}$=[$\boldsymbol{I}_1^{(j)\mathrm{T}}$ $\boldsymbol{I}_2^{(j)\mathrm{T}}$ … $\boldsymbol{I}_{N_j}^{(j)\mathrm{T}}$]$^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}$=[$\boldsymbol{V}^{(1)\mathrm{T}}$ $\boldsymbol{V}^{(2)\mathrm{T}}\cdots\boldsymbol{V}^{(M)\mathrm{T}}$]$^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{V}^{(j)}$=[$\boldsymbol{V}_1^{(j)\mathrm{T}}$ $\boldsymbol{V}_2^{(j)\mathrm{T}}$ … $\boldsymbol{V}_{N_j}^{(j)\mathrm{T}}$]$^{\mathrm{T}}$。$\boldsymbol{G}_k^{(j)}(s)$、$\boldsymbol{I}_k^{(j)}$=[$\boldsymbol{I}_{kx}^{(j)}$ $\boldsymbol{I}_{ky}^{(j)}$]$^{\mathrm{T}}$ 和 $\boldsymbol{V}_k^{(j)}$=[$\boldsymbol{V}_{kx}^{(j)}$ $\boldsymbol{V}_{ky}^{(j)}$]$^{\mathrm{T}}$ 分别表示第 j 个机群内第 k 台机组的导纳模型、输出电流列向量和端电压列向量，k=1, 2,⋯, N_j，N_j 为第 j 个机群内机组的数量。

与式(5)类似，以 $\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}$ 和 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{r}}$ 为输出和输入时，系统网络方程为

$$\Delta\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}=\boldsymbol{Z}_{\mathrm{r}}(s)\Delta\boldsymbol{I}_{\mathrm{r}}+\Delta\boldsymbol{V}_{\mathrm{AM}} \tag{8}$$

式中，$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{r}}(s)=[\boldsymbol{z}_{\mathrm{r}}^{(jh)}(s)]_{\substack{j=1,2,\cdots,M\\ h=1,2,\cdots,M}}$ 为第 j 行、第 h 列元素为 $\boldsymbol{z}_{\mathrm{r}}^{(jh)}(s)$的分块矩阵，$\boldsymbol{z}_{\mathrm{r}}^{(jh)}(s)$为 $2N_j\times 2N_h$ 的多项式矩阵，$\boldsymbol{z}_{\mathrm{r}}^{(jh)}(s)=\begin{bmatrix} \boldsymbol{z}_{\mathrm{r}11}^{(jh)}(s) & \boldsymbol{z}_{\mathrm{r}12}^{(jh)}(s) & \cdots & \boldsymbol{z}_{\mathrm{r}1N_h}^{(jh)}(s) \\ \boldsymbol{z}_{\mathrm{r}21}^{(jh)}(s) & \boldsymbol{z}_{\mathrm{r}22}^{(jh)}(s) & \cdots & \boldsymbol{z}_{\mathrm{r}2N_h}^{(jh)}(s) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{z}_{\mathrm{r}N_j1}^{(jh)}(s) & \boldsymbol{z}_{\mathrm{r}N_j2}^{(jh)}(s) & \cdots & \boldsymbol{z}_{\mathrm{r}N_jN_h}^{(jh)}(s) \end{bmatrix}$，$j$, h=1, 2,⋯, M，$\boldsymbol{z}_{\mathrm{r}ik}^{(jh)}(s)$为 2 阶多项式矩阵，$i$=1, 2,⋯, N_j，k=1, 2,⋯, N_h。

式(8)和式(5)反映了同一电网的动态特性，根据电路原理，节点阻抗矩阵 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{r}}(s)$与 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{c}}(s)$的构成元素相同，可通过对 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{c}}(s)$(或 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{r}}(s)$)进行初等行变换得到 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{r}}(s)$(或 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{c}}(s)$)。因此，结合式(3)和式(5)，对于 $\boldsymbol{z}_{\mathrm{r}}^{(jh)}(s)$中的元素 $\boldsymbol{z}_{\mathrm{r}ik}^{(jh)}(s)$同样有

$$\boldsymbol{z}_{\mathrm{r}ik}^{(jh)}(s)=\boldsymbol{z}_{\mathrm{rm}ik}^{(jh)}+\boldsymbol{Z}_{\mathrm{L}}(s) \tag{9}$$

式中：j, h=1, 2,⋯, M；i=1 , 2,⋯, N_j；k=1 , 2,⋯, N_h；$\boldsymbol{z}_{\mathrm{rm}ik}^{(jh)}(s)=\begin{bmatrix} r_{\mathrm{rm}ik}^{(jh)}+\dfrac{x_{\mathrm{rm}ik}^{(jh)}s}{\omega_0} & -x_{\mathrm{rm}ik}^{(jh)} \\ x_{\mathrm{rm}ik}^{(jh)} & r_{\mathrm{rm}ik}^{(jh)}+\dfrac{x_{\mathrm{rm}ik}^{(jh)}s}{\omega_0} \end{bmatrix}$。$j$=$h$ 时，若

$i=k$，则 $z_{\mathrm{rn}kk}^{(jj)}(s)$为第 j 个机群内第 k 台机组到母线 C 的自阻抗；若 $i\neq k$，则 $z_{\mathrm{rn}ik}^{(jj)}(s)$为第 j 个机群内第 i 台和第 k 台机组间的互阻抗(仅就汇集网络部分而言)。$j\neq h$ 时，$z_{\mathrm{rn}ik}^{(jh)}(s)$为第 j 个机群内的第 i 台机组和第 h 个机群内的第 k 台机组间的互阻抗。

忽略线路电阻影响，由式(9)可得

$$\boldsymbol{z}_{\mathrm{r}}^{(jh)}(s)=\boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}^{(jh)}\otimes\boldsymbol{E}(s) \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}^{(jh)}=\begin{bmatrix} x_{\mathrm{r}11}^{(jh)} & x_{\mathrm{r}12}^{(jh)} & \cdots & x_{\mathrm{r}1N_h}^{(jh)} \\ x_{\mathrm{r}21}^{(jh)} & x_{\mathrm{r}22}^{(jh)} & \cdots & x_{\mathrm{r}2N_h}^{(jh)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{\mathrm{r}N_j1}^{(jh)} & x_{\mathrm{r}N_j2}^{(jh)} & \cdots & x_{\mathrm{r}N_jN_h}^{(jh)} \end{bmatrix}$，$x_{\mathrm{r}ik}^{(jh)}=x_{\mathrm{rn}ik}^{(jh)}+x_{\mathrm{L}}$；$\boldsymbol{E}(s)=\begin{bmatrix} \dfrac{s}{\omega_0} & -1 \\ 1 & \dfrac{s}{\omega_0} \end{bmatrix}$；$\otimes$ 表示克罗内克乘积。

由节点阻抗矩阵的对称性可知，$\boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}^{(jj)}$为实对称矩阵($j=1,2,\cdots,M$)，从而有

$$\boldsymbol{U}^{(j)\mathrm{T}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}^{(jj)}\boldsymbol{U}^{(j)}=\mathrm{diag}[\lambda_k^{(j)}] \tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{U}^{(j)}=[\boldsymbol{u}_1^{(j)}\ \boldsymbol{u}_2^{(j)}\ \cdots\ \boldsymbol{u}_{N_j}^{(j)}]$；$\lambda_k^{(j)}$和 $\boldsymbol{u}_k^{(j)}$分别为矩阵 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}^{(jj)}$的特征值和相应的特征向量，$k=1,2,\cdots,N_j$。

基于式(11)，可引入变量变换，具体为

$$\begin{cases}\boldsymbol{I}^{(j)}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{y}}^{(j)}\boldsymbol{I}_{\mathrm{y}}^{(j)}\\ \boldsymbol{V}^{(j)}=\boldsymbol{U}_{\mathrm{y}}^{(j)}\boldsymbol{V}_{\mathrm{y}}^{(j)}\end{cases} \tag{12}$$

式中：$\boldsymbol{U}_{\mathrm{y}}^{(j)}=\boldsymbol{U}^{(j)}\otimes\boldsymbol{E}_2$，$E_2$ 为 2 阶单位阵；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{y}}^{(j)}=[\boldsymbol{I}_{\mathrm{y}1}^{(j)\mathrm{T}}\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{y}2}^{(j)\mathrm{T}}\ \cdots\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{y}N_j}^{(j)\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$ 和 $\boldsymbol{V}_{\mathrm{y}}^{(j)}=[\boldsymbol{V}_{\mathrm{y}1}^{(j)\mathrm{T}}\ \boldsymbol{V}_{\mathrm{y}2}^{(j)\mathrm{T}}\ \cdots\ \boldsymbol{V}_{\mathrm{y}N_j}^{(j)\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$ 为新引入描述系统动态的变量向量；$j=1,2,\cdots,M$。

考虑到各机群内机组动态特性近似相同，令 $\boldsymbol{G}_k^{(j)}(s)=\boldsymbol{G}_{\mathrm{o}}^{(j)}(s)$($j=1,2,\cdots,M$，$k=1,2,\cdots,N_j$)，即 $\boldsymbol{G}^{(j)}(s)=\mathrm{diag}[\boldsymbol{G}_{\mathrm{o}}^{(j)}(s)]$。进而，将式(12)代入式(7)有

$$\Delta\boldsymbol{I}_{\mathrm{Y}}=\mathrm{diag}[\boldsymbol{U}_{\mathrm{y}}^{(j)\mathrm{T}}]\mathrm{diag}\left[\boldsymbol{G}^{(j)}(s)\right]\mathrm{diag}\left[\boldsymbol{U}_{\mathrm{y}}^{(j)}\right]\Delta\boldsymbol{V}_{\mathrm{Y}}=\mathrm{diag}\left[\boldsymbol{G}^{(j)}(s)\right]\Delta\boldsymbol{V}_{\mathrm{Y}} \tag{13}$$

式中：$\boldsymbol{I}_{\mathrm{Y}}=[\boldsymbol{I}_{\mathrm{y}}^{(1)\mathrm{T}}\ \boldsymbol{I}_{\mathrm{y}}^{(2)\mathrm{T}}\cdots\boldsymbol{I}_{\mathrm{y}}^{(M)\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{V}_{\mathrm{Y}}=[\boldsymbol{V}_{\mathrm{y}}^{(1)\mathrm{T}}\ \boldsymbol{V}_{\mathrm{y}}^{(2)\mathrm{T}}\cdots\boldsymbol{V}_{\mathrm{y}}^{(M)\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$。

结合式(11)，将式(10)和式(12)代入式(8)有

$$\Delta\boldsymbol{V}_{\mathrm{Y}}=\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Y}}(s)\Delta\boldsymbol{I}_{\mathrm{Y}}+\Delta\boldsymbol{V}_{\mathrm{YAM}} \tag{14}$$

式中：$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Y}}(s)=\mathrm{diag}[\boldsymbol{U}_{\mathrm{y}}^{(j)\mathrm{T}}]\boldsymbol{Z}_{\mathrm{r}}(s)\mathrm{diag}[\boldsymbol{U}_{\mathrm{y}}^{(j)}]$；$\Delta\boldsymbol{V}_{\mathrm{YAM}}=\mathrm{diag}[\boldsymbol{U}_{\mathrm{y}}^{(j)\mathrm{T}}]\Delta\boldsymbol{V}_{\mathrm{AM}}$；$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Y}}(s)=\boldsymbol{X}_{\mathrm{Y}}\otimes\boldsymbol{E}(s)$，且有

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{Y}}=\mathrm{diag}[\boldsymbol{U}^{(j)\mathrm{T}}]\boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}\mathrm{diag}[\boldsymbol{U}^{(j)}]=\begin{bmatrix} \mathrm{diag}[\lambda_k^{(1)}] & \boldsymbol{U}^{(1)\mathrm{T}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}^{(12)}\boldsymbol{U}^{(2)} & \cdots & \boldsymbol{U}^{(1)\mathrm{T}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}^{(1M)}\boldsymbol{U}^{(M)} \\ \boldsymbol{U}^{(2)\mathrm{T}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}^{(21)}\boldsymbol{U}^{(1)} & \mathrm{diag}[\lambda_k^{(2)}] & \cdots & \boldsymbol{U}^{(2)\mathrm{T}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}^{(2M)}\boldsymbol{U}^{(M)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \boldsymbol{U}^{(M)\mathrm{T}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}^{(M1)}\boldsymbol{U}^{(1)} & \boldsymbol{U}^{(M)\mathrm{T}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}^{(M2)}\boldsymbol{U}^{(2)} & \cdots & \mathrm{diag}[\lambda_k^{(M)}] \end{bmatrix} \tag{15}$$

式(14)中$\Delta\boldsymbol{V}_{\mathrm{YAM}}$的具体形式为

$$\Delta\boldsymbol{V}_{\mathrm{YAM}}=[u_{\mathrm{s}1}^{(1)}\ u_{\mathrm{s}2}^{(1)}\ \cdots\ u_{\mathrm{s}N_1}^{(1)}\ u_{\mathrm{s}1}^{(2)}\ u_{\mathrm{s}2}^{(2)}\ \cdots\ u_{\mathrm{s}N_2}^{(2)}\ \cdots\ u_{\mathrm{s}N_M}^{(M)}]^{\mathrm{T}}\otimes\boldsymbol{V}_{\mathrm{A}} \tag{16}$$

式中，$u_{sk}^{(j)}=\sum_{i=1}^{N_j}u_{ik}^{(j)}$ 为特征向量 $\boldsymbol{u}_k^{(j)}$ 所有元素之和。

此外，结合式(12)，系统的输出电流可表示为

$$\Delta\boldsymbol{I}_{\mathrm{A}}=\sum_{j=1}^{M}\sum_{k=1}^{N_j}u_{sk}^{(j)}\Delta\boldsymbol{I}_{\mathrm{y}k}^{(j)} \tag{17}$$

由式(9)可得 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}^{(jh)}$ 可表示为

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}^{(jh)}=\boldsymbol{X}_{\mathrm{L}}^{(jh)}+\boldsymbol{X}_{\Delta\mathrm{r}}^{(jh)} \tag{18}$$

式中：$\boldsymbol{X}_{\mathrm{L}}^{(jh)}=x_{\mathrm{L}}1_{N_j\times N_h}\in R^{N_j\times N_h}$，$1_{N_j\times N_h}$ 为 $N_j\times N_h$ 的全 1 矩阵；$\boldsymbol{X}_{\Delta\mathrm{r}}^{(jh)}$ 为集电网络部分，且第 i 行第 k 列元素为 $x_{\mathrm{rn}ik}^{(jh)}$。

实际新能源场站或基地中，外送线路长度通常远大于内部汇集线路长度[12]，从而 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}^{(jh)}$ 可看作由 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{L}}^{(jh)}$ 主导。因此，根据全 1 矩阵特征向量的特点，对于矩阵 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}^{(jj)}$($j=1,2,\cdots,M$)的特征向量有

$$u_{sk}^{(j)}\approx 0,\ u_{sN_j}^{(j)}\approx\sqrt{N_j}\qquad k=1,2,\cdots,N_j-1 \tag{19}$$

由式(13)和式(15)可知，通过引入 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{y}}^{(j)}$和 $\boldsymbol{V}_{\mathrm{y}}^{(j)}$($j=1,2,\cdots,M$)，可将第 j 个机群在内部解耦为 N_j 个相互独立且由 1 台机组并网构成的等效子系统；但是各子系统仍通过复杂外部电网互联，此时新能源汇集系统仍为 N 机系统，仅小信号模型表示形式改变。在此基础上，由式(17)和式(19)可知，各机群整体动态响应特性可通过 1 台机组反映，且第 j 个机群内前 N_j-1 个等效子系统可以忽略，消去网络方程中与其对应的部分，可对式(14)所示网络方程进行化简，整理可得新能源汇集系统小干扰多机等值模

型为

$$\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{E}} = \boldsymbol{G}_{\mathrm{E}}(s)\Delta \boldsymbol{V}_{\mathrm{E}} \tag{20}$$

$$\Delta \boldsymbol{V}_{\mathrm{E}} = \boldsymbol{Z}_{\mathrm{Enet}}(s)\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{E}} + \Delta \boldsymbol{V}_{\mathrm{EAM}} \tag{21}$$

式中：$\boldsymbol{I}_{\mathrm{E}} = [u_{\mathrm{s}N_1}^{(1)}\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{y}N_1}^{(1)\mathrm{T}}\ \ u_{\mathrm{s}N_2}^{(2)}\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{y}N_2}^{(2)\mathrm{T}}\ \ \cdots\ u_{\mathrm{s}N_M}^{(M)}\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{y}N_M}^{(M)\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{V}_{\mathrm{E}} = [\boldsymbol{V}_{\mathrm{y}N_1}^{(1)\mathrm{T}}\ \ \boldsymbol{V}_{\mathrm{y}N_2}^{(2)\mathrm{T}}\ \ \cdots\ \boldsymbol{V}_{\mathrm{y}N_M}^{(M)\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{G}_{\mathrm{E}}(s)$为 $u_{\mathrm{s}Nj}^{(j)}\boldsymbol{G}_{\mathrm{o}}^{(j)}(s)$ 构成的分块对角阵，$\boldsymbol{G}_{\mathrm{E}}(s)=\mathrm{diag}[u_{\mathrm{s}Nj}^{(j)}\boldsymbol{G}_{\mathrm{o}}^{(j)}(s)]$；

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Enet}}(s) = \begin{bmatrix} \dfrac{\lambda_{N_1}^{(1)}}{u_{\mathrm{s}N_1}^{(1)}} & \dfrac{x_{\mathrm{yr}}^{(12)}}{u_{\mathrm{s}N_2}^{(2)}} & \cdots & \dfrac{x_{\mathrm{yr}}^{(1M)}}{u_{\mathrm{s}N_M}^{(M)}} \\ \dfrac{x_{\mathrm{yr}}^{(21)}}{u_{\mathrm{s}N_1}^{(1)}} & \dfrac{\lambda_{N_2}^{(2)}}{u_{\mathrm{s}N_2}^{(2)}} & \cdots & \dfrac{x_{\mathrm{yr}}^{(2M)}}{u_{\mathrm{s}N_M}^{(M)}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dfrac{x_{\mathrm{yr}}^{(M1)}}{u_{\mathrm{s}N_1}^{(1)}} & \dfrac{x_{\mathrm{yr}}^{(M2)}}{u_{\mathrm{s}N_2}^{(2)}} & \cdots & \dfrac{\lambda_{N_M}^{(M)}}{u_{\mathrm{s}N_M}^{(M)}} \end{bmatrix}$$

，$x_{\mathrm{yr}}^{(jh)}$为矩阵 $\boldsymbol{U}^{(j)\mathrm{T}}\boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}^{(jh)}\boldsymbol{U}^{(h)}$第 j 行第 h 列的元素，$\lambda_{N_j}^{(j)}$ 为矩阵 $\boldsymbol{X}_{\mathrm{r}}^{(jj)}$ 的最大特征值，二者中均计及了集电网络部分的影响，$j, h=1, 2, \cdots, M$；$\boldsymbol{V}_{\mathrm{EAM}} = [u_{\mathrm{s}N_1}^{(1)}\ \ u_{\mathrm{s}N_2}^{(2)}\ \ \cdots\ u_{\mathrm{s}N_M}^{(M)}]^{\mathrm{T}} \otimes \boldsymbol{V}_{\mathrm{A}}$。

将式(20)和式(21)联立可得

$$\Delta \boldsymbol{I}_{\mathrm{A}} = \boldsymbol{G}_{\mathrm{EA}}(s)\Delta \boldsymbol{V}_{\mathrm{A}} \tag{22}$$

式中，$\boldsymbol{G}_{\mathrm{EA}}(s) = \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{M}\boldsymbol{m}_{ij}(s)$ 为系统多机等值导纳模型，$[\boldsymbol{m}_{ij}(s)]_{\substack{i=1,2,\cdots,M \\ j=1,2,\cdots,M}} = [\boldsymbol{G}_{\mathrm{E}}^{-1}(s) - \boldsymbol{Z}_{\mathrm{Enet}}(s)]^{-1}$。

以上推导的核心在于引入了式(12)所示的变量变换，即对新能源汇集系统传递函数矩阵的相似变换(式(13)和式(14))；结果表明，各新能源机群动态响应特性可通过 1 台机组反映(式(17)和式(18))，由此得到系统小信号等值表示形式。对比式(6)和式(22)可知，若将 N 机系统划分为 M 个机群，则等值模型维度为详细模型的 M/N，从而新能源汇集系统端口导纳模型构建的计算量显著降低。需要说明的是，上述等值建模过程需在一定前提条件下实现：①系统内新能源机组可按照动态特性相似度划分为若干机群；②外送线路阻抗在系统网络方程中起主导作用。实际中新能源场站业主通常从同一厂家批量采购同一型号的机组，其动态特性具有一定的相似性。此外，新能源外送线路长度通常远大于场站内部集电线路长度。因此，对于新能源汇集系统，上述前提条件往往成立。同时，由于上述前提条件的存在，该等效解耦的方法并不适用于任意多机系统。

综上，新能源汇集系统多机等值模型构建流程如下。

(1)通过潮流计算得到各机组稳态运行点。

(2)对来自同一厂家且同一型号的新能源机组按工况相似程度分群，可参考文献[3]列举的聚类方法，本文不再赘述；分群指标可采用描述机组工况的变量，如有功和无功出力、端电压幅值和相角稳态值。

(3)对系统原节点阻抗矩阵进行初等行变换，得到式(8)所示网络方程；基于式(14)所示变换，将节点阻抗矩阵转换为式(15)所示形式，进而得到式(21)所示简化后的网络方程；同时 $u_{\mathrm{s}N_j}^{(j)}$ 可看作各机群单机等值模型的倍乘系数($j=1, 2, \cdots, M$)。

(4)实际中新能源机组控制模型和参数通常未知，可基于厂家提供的封装模型，通过测量和拟合得到机组在不同运行点下的导纳模型[18]；对于各新能源机群，其单机等值模型中机组稳态运行点可取群内所有机组稳态运行点的平均值，进而基于测量和拟合结果可得 $\boldsymbol{G}_{\mathrm{o}}^{(j)}(s)(j=1, 2, \cdots, M)$。

(5)将等值机组模型与化简后的电网模型联立，可得新能源汇集系统多机等值模型 $\boldsymbol{G}_{\mathrm{EA}}(s)$。

按照动态特性相似度对新能源机组分群，再建立各机群单机等值模型，是当前新能源汇集系统等值建模的常用思路。考虑到聚类指标与动态特性相似度之间的关系难以解析表征，为保证分析结果准确性，同时降低稳定分析计算量，可首先构建等值模型并开展小干扰稳定分析，确定系统潜在风险运行工况，然后基于详细模型进一步从中筛选存在小干扰稳定风险的运行工况，得到小干扰稳定分析结论。

上述方法的优点为：①结合对新能源机组的分群，基于分块等效解耦化解了机组动态差异给等值建模带来的困难；②可基于节点阻抗矩阵的分块和相似变换实现对复杂网络拓扑的化简；③所提方法无需新能源汇集系统小干扰响应特性数据支撑，为工况变化时等值模型重构提供了便利；④新能源机组导纳模型可通过测辨获得，所提方法适用于设备

黑/灰箱化的场景。在本文研究的基础上，若能够进一步建立新能源汇集系统端口导纳模型与运行工况间的映射关系，则可为等值模型的重构提供更大的便利，对此还有待未来深入研究。

需要说明的是，本文关注新能源汇集系统端口导纳/阻抗模型的高效构建，研究中重点考虑对各机群整体动态响应特性的表征而未详细分析群内各机组的具体动态特性；由于各新能源机群内机组动态特性近似相同，因此可通过 1 台机组反映相应机群整体的动态特性。

3 算例分析

针对图 2 所示典型风电并网系统开展小干扰稳定性分析，验证所提方法的有效性。风电场 1 由 40 台容量为 0.055 p.u.的双馈风机构成，风电场 2 中共有 55 台容量为 0.045 p.u.的直驱风机，风电场 3 中共有 60 台容量为 0.050 p.u.的直驱风机，功率基准值为 100 MV·A。此外，同一风电场内 50%的机组网侧变流器外环采用定无功控制，另外 50%的机组采用定电压控制，不同场站内或不同控制方式下机组控制参数设定不同，系统内共有 6 种不同型号的风电机组。

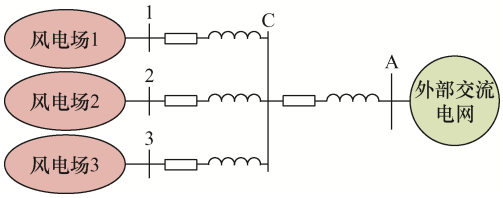


图 2 典型风电并网系统

Fig. 2 Typical grid-connected wind power system

对于实际新能源汇集系统，由于机组类型和装机容量已定，系统小干扰稳定问题主要由运行工况改变引发。据此，本节考虑如下 3 种不同运行工况，开展稳定性分析。

场景 1：所有风电机组满发，且功率因数为 1，即分析风电处于最大有功出力状态下时系统的小干扰稳定性。

场景 2：考虑风速空间分布差异，各风电场内第 1 台机组处于额定运行状态，功率因数为 0.98，其他机组出力在此基础上均匀降低，且出力最大变化范围为额定容量的 90%。

场景 3：所有风电机组出力在额定范围内随机设定，功率因数在 0.95~1.00 之间随机设定。

首先，依次在上述场景 1、2、3 下，基于式(22)建立图 2 中风电汇集系统的多机等值模型 $\boldsymbol{G}_{\mathrm{EA}}(s)$。采用广义 Nyquist 判据，分析风电并网系统稳定性，所得结果如图 3 的点划线所示。作为对比验证，基于式(6)建立风电汇集系统的详细模型并基于广义 Nyquist 判据分析系统稳定性，所得结果如图 3 的实线所示。可见，基于多机等值模型所得 Nyquist 曲线与由详细模型所得结果基本一致，验证了等值模型在小干扰稳定性分析中的有效性。此外，与场景 1 对应的 Nyquist 曲线逆时针包围(−1, 0)，表明该工况下系统存在小干扰失稳风险。3 种场景下，等值模型和全阶模型构建所需总时间分别为 102 s 和 2 718 s(Intel Core i5-7300HQ CPU @ 2.50GHz)。进而，基于所提等值建模方法可有效降低系统小干扰稳定分析计算量。需要说明的是，所提等值建模方法主要降低了由新能源机组模型和交流电网模型联立构建新能源汇集系统端口导纳模型的计算量，而等值模型和详细模型均为 2 阶传递函数矩阵，在频率范围和频率间隔相同的条件下，基于广义 Nyquist 判据的小干扰稳定分析计算量并无本质差别。

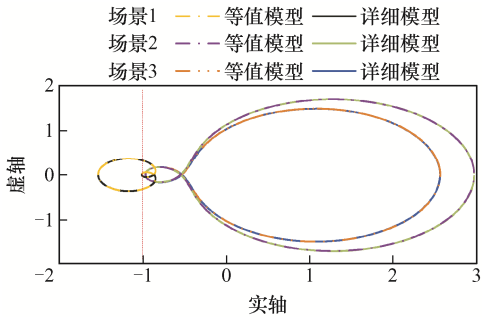
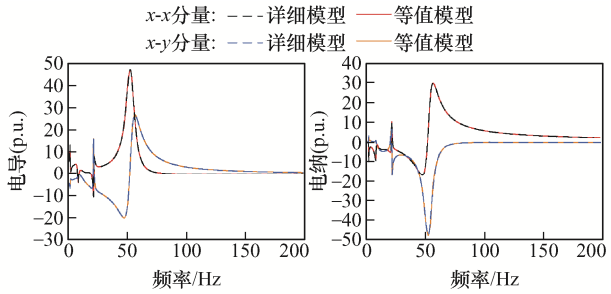


图 3 Nyquist 曲线

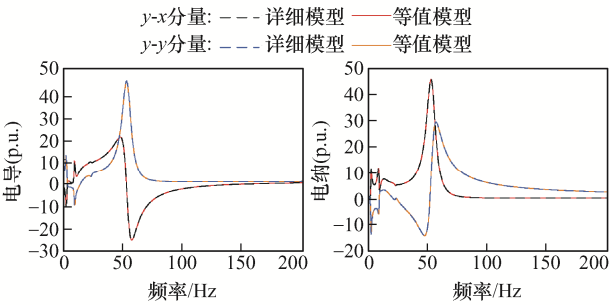
Fig. 3 Nyquist curves

然后，为进一步体现多机等值模型的有效性，分别基于所建立等值模型和详细模型绘制系统导纳-频率特性曲线，所得结果如图 4 所示。由于篇

幅限制，且为展示清晰，此处仅列出部分结果。可见，多机等值导纳模型与详细导纳模型频率特性曲线基本一致，等值模型可有效反映算例新能源汇集系统的阻抗/导纳特性。



(a) 场景1 *x*-*x*和*x*-*y*分量



(b) 场景3 *y*-*x*和*y*-*y*分量

图 4　导纳-频率特性曲线

Fig. 4 Admittance-frequency curves

最后，通过时域仿真对基于线性化模型所得分析结论的有效性进行验证。仿真中扰动为 0.5 s 时，由于局部风速变化，风电场 2 内 3 台机组的有功出力降低 10%，并于 0.6 s 时恢复，所得结果如图 5 所示。可见，场景 1 的风电场有功出力在扰动作用下产生发散振荡，而在场景 2 和场景 3 下系统稳定，与基于线性化模型所得的分析结论一致。由于篇幅限制，仅列出风电场 2 的有功出力曲线，其他风电场情况类似。

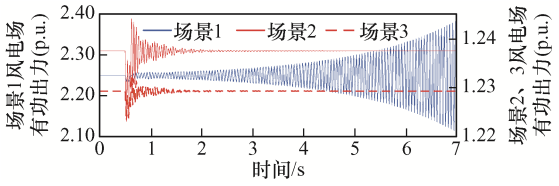


图 5　时域仿真结果(风电场 2 有功出力)

Fig. 5 Results of time-domain simulation (active power output of wind farm 2)

4　结论

针对多类型新能源汇集系统机组数量庞大和工况组合多样带来的模型维度高和稳定分析计算量大的难题，本文提出了基于传递函数矩阵分块相似变换的小信号等值建模方法，主要结论如下：

(1)将新能源汇集系统表示为若干由动态特性相似机组构成的机群，通过分块等效解耦和模型降维建立系统等值模型，所提方法既可考虑新能源机组小信号模型差异，又可处理复杂网络拓扑；

(2)通过算例仿真验证了等值模型的有效性，结果表明所提等值建模方法可有效反映原系统的小干扰稳定性，且若可将 N 机系统划分为 M 个机群，则等值模型维度约为详细模型的 M/N，计算量降低效果更为显著。

参考文献：

[1] 侯延琦, 刘崇茹, 王宇, 等. 柔性直流输电系统高频振荡抑制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11): 3741-3750.
Hou Yanqi, Liu Chongru, Wang Yu, et al. Research on the suppression strategy of high-frequency resonance for MMC-HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3741-3750. (in Chinese)

[2] 刘新元, 张谦, 程有深, 等. 风火打捆外送系统低频与次同步振荡的自抗扰附加阻尼控制[J]. 电源学报, 2026, 24(3): 190-202.
Liu Xinyuan, Zhang Qian, Cheng Youshen, et al. ADRC additional damping control for low-frequency and sub-synchronous oscillations in wind-thermal bundled outgoing system [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(3): 190-202. (in Chinese)

[3] 徐文林, 肖湘晨, 张璨辉, 等. 电力电子化电力系统电压功角动态稳定性建模分析方法[J]. 电源学报, 2025, 23(1): 173-180.
Xu Wenlin, Xiao Xiangchen, Zhang Canhui, et al. Mode-

ling and analysis method for voltage power angle dynamic stability of power electronic power system [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(1): 173-180. (in Chinese)

[4] 李龙源, 付瑞清, 吕晓琴, 等. 接入弱电网的同型机直驱风电场单机等值建模[J]. 电工技术学报, 2023, 38(3): 712-725.
Li Longyuan, Fu Ruiqing, Lü Xiaoqin, et al. Single machine equivalent modeling of weak grid connected wind farm with same type PMSGs [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(3): 712-725. (in Chinese)

[5] 郑乐, 吴晶, 徐衍会, 等. HVDC 送端系统振荡引发受端换相失败的机理分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(9): 2743-2754.
Zheng Le, Wu Jing, Xu Yanhui, et al. Mechanism analysis of receiving end commutation failure caused by sending end oscillation in HVDC transmission system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2743-2754. (in Chinese)

[6] 陈庆, 范栋琛, 王晨清, 等. 交直流配电网小信号模型和直流侧低频振荡分析[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 117-125, 200.
Chen Qing, Fan Dongchen, Wang Chenqing, et al. Small signal model and DC side low frequency oscillation analysis of AC/DC distribution network [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2022, 41(1): 117-125, 200. (in Chinese)

[7] 潘学萍, 戚相威, 梁伟, 等. 综合模型聚合和参数辨识的风电场多机等值及参数整体辨识[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(1): 124-132.
Pan Xueping, Qi Xiangwei, Liang Wei, et al. Multi-machine equivalence and global identification of wind farms by combining model aggregation and parameter estimation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 124-132. (in Chinese)

[8] 高明阳. 双馈风电机组参数辨识及风电场动态等值方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
Gao Mingyang. Research on parameter identification of doubly fed wind turbine and dynamic equivalent method of wind farm [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021. (in Chinese)

[9] Zhou Yuhao, Zhao Long, Lee W J. Robustness analysis of dynamic equivalent model of DFIG wind farm for stability study [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(6): 5682-5690.

[10] Wang Yinfeng, Lu Chao, Zhu Lipeng, et al. Comprehensive modeling and parameter identification of wind farms based on wide-area measurement systems [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(3): 383-393.

[11] 何君毅, 周瑀涵, 王康, 等. 主导模态保持的风电场站自适应等值方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 28-36.
He Junyi, Zhou Yuhan, Wang Kang, et al. Self-adaptive equivalence method for wind farm with maintained dominant mode [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 28-36. (in Chinese)

[12] Du Wenjuan, Dong Wenkai, Wang Haifeng, et al. Dynamic aggregation of same wind turbine generators in parallel connection for studying oscillation stability of a wind farm [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4694-4705.

[13] 周瑀涵, 王冠中, 王康, 等. 用于风电场小干扰稳定性分析的结构保持等值方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 133-140.
Zhou Yuhan, Wang Guanzhong, Wang Kang, et al. Structure-retained equivalent method for small signal stability analysis of wind farm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 133-140. (in Chinese)

[14] Zhang Chen, Molinas M, Rygg A, et al. Impedance-based analysis of interconnected power electronics systems: Impedance network modeling and comparative studies of stability criteria [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(3): 2520-2533.

[15] Liu Huakun, Xie Xiaorong, Liu Wei. An oscillatory stability criterion based on the unified *dq*-frame impedance network model for power systems with high-

penetration renewables [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3472-3485.

[16] Du Wenjuan, Dong Wenkai, Wang Haifeng. A method of reduced-order modal computation for planning grid connection of a large-scale wind farm [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1185-1198.

[17] Du Wenjuan, Wang Yijun, Wang H F, et al. Reduced-order method for detecting the risk and tracing the sources of small-signal oscillatory instability in a power system with a large number of wind farms [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(2): 1563-1582.

[18] 刘威, 谢小荣, 王衡, 等. 基于频率耦合阻抗模型的并网变流器全工况小信号稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7212-7220.
Liu Wei, Xie Xiaorong, Wang Heng, et al. Frequency-coupled impedance model-based small-signal stability analysis of grid-tied converters under all operating conditions [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2020, 40(22): 7212-7220. (in Chinese)



王潇

作者简介：

王潇(1987—)，男，博士，高级工程师。研究方向：电力系统实时仿真控制。E-mail：wangxiao2017@foxmail.com。

董文凯(1992—)，男，通信作者，博士，助理研究员。研究方向：电力系统稳定性分析与控制。E-mail：596167281@qq.com。

吴林林(1986—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：新能源调度运行与并网稳定技术。E-mail：wulin226@163.com。

孙雅旻(1992—)，男，硕士，工程师。研究方向：电力系统稳定性分析与电力电子控制。E-mail：sunyamin8888@163.com。

苏田宇(1989—)，男，博士，高级工程师。研究方向：新能源并网电力系统稳定性分析与控制。E-mail：395989578@qq.com。

谢小荣(1975—)，男，博士，教授。研究方向：电力系统振荡的分析与控制。E-mail：xiexr@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑：孙美菊)