

面向次同步振荡分析的直驱 风电场动态等值

严干贵, 郭剑宇, 王玉鹏

(现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林省吉林市 132012)

摘 要:【目的】针对大规模直驱风电场详细电磁暂态建模面临“维数灾”导致计算负担过重,以及传统单机等值模型难以精确反映次同步振荡特性的问题,提出了一种高精度、高效率的风电场动态等值建模方法,以有效支撑风电并网系统次同步振荡特性分析,并揭示整个风电场振荡特性与关键振源机群特性之间的内在关联。【方法】基于风电并网系统的特征值分析计算主导特征值参与因子,辨识影响次同步振荡特性的关键因素,并基于 K -means 聚类算法,提出将运行工况、集电线路与系统状态变量稳态初值三者作为聚类指标的风电场分群动态等值建模方法,推导并给出了相应的分群等值参数计算方法。【结果】搭建 30 台直驱风机联网系统的电磁暂态仿真算例,从特征值、时域仿真结果对比,多角度验证了用于次同步振荡分析的分群聚合等值模型的有效性。【结论】所提出的基于主导特征值参与因子指导、融合运行工况、集电线路及状态变量初值三指标聚类的风电场多机分群等值建模方法,可显著提高次同步振荡分析的精度和效率,突破了单机等值局限,能够精准捕捉并分离风电场内部不同集群(特别是振源机群)对次同步振荡的贡献,可为大型直驱风电场并网系统的次同步振荡机理研究、稳定性评估及抑制策略制定提供可靠的建模工具。

关键词:直驱风电场;等值模型; K -means 聚类;次同步振荡(SSO)

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2025)10-0122-10

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2025.10.011

Dynamic Equivalence of Direct-Drive Wind Farms for Sub-synchronous Oscillation Characterization

YAN Gangui, GUO Jianyu, WANG Yupeng

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Contronal & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, Jilin Province, China)

ABSTRACT: [Objective] A high-precision and high-efficiency dynamic equivalent modeling method for wind farms is proposed to address the heavy computational burden caused by the curse of dimensionality in detailed electromagnetic transient modeling of large-scale direct-drive wind farms and to overcome the limitations of traditional single-machine equivalent models in accurately reflecting sub-synchronous oscillation characteristics. The method enables effective analysis of sub-synchronous oscillations in grid-connected wind power systems and reveals the inherent relationship between the oscillation behavior of the entire wind farm and that of key vibration source groups. [Methods] Based on an eigenvalue analysis of wind power grid-connected systems, the dominant eigenvalue participation factors were calculated to identify the key factors affecting the sub-synchronous oscillation characteristics. Based on the K -Means clustering algorithm, a dynamic equivalent modeling method for wind farm clustering is proposed, which uses the operating conditions, collection lines, and steady-state initial values of the system-state variables as clustering indicators. The corresponding clustering equivalent parameter calculation method was derived and presented. [Results] An electromagnetic transient simulation example was built for a networked system of 30 direct-drive wind turbines. The effectiveness of the clustering and aggregation equivalent model used for the sub-synchronous oscillation (SSO) analysis was verified from multiple perspectives by comparing the characteristic values and time-domain simulation results. [Conclusions] The proposed multimachine clustering equivalent modeling method for wind farms based on dominant eigenvalue participation factor guidance, fusion of operating conditions, collection lines, and initial values of state variables can significantly improve the accuracy and efficiency of SSO analysis,

overcome the limitations of single-machine equivalence, and accurately capture and separate the contributions of different clusters (particularly vibration source clusters) within the wind farm to sub synchronous oscillations. This can provide a reliable modeling tool for the study of sub-synchronous oscillation mechanisms, stability evaluation, and suppression strategy formulation for large-scale direct-drive wind farm grid-connected systems.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China Key Program (No. 52337004).

KEYWORDS: direct-drive wind farms; equivalent modeling; K-means clustering; sub-synchronous oscillation (SSO)

0 引言

构建以新能源为主体的新型电力系统是实现国家“双碳”目标的战略部署^[1-2],以风电为代表的新能源将成为未来主体电源,2025—2030年我国风电年均新增装机容量不低于 60 GW,2030 年末风电总装机将达 800 GW,2060 年将达 3000 GW^[3]。高比例风电接入将给电力系统安全运行带来诸多挑战^[4-5],如次同步振荡(sub-synchronous oscillation, SSO)^[6-9],构建有效的风电场模型是应对新型电力系统次同步振荡问题的基础。

风电场通常包含几十至数百台风电机组,构建详细模型将面临“维数灾”问题^[10-16],过度追求精度可能导致仿真效率低下,甚至难以实现。

现有研究大多是基于单机倍乘或容量加权的风电场等值模型^[13-16],文献[13-14]用单机等值线性化模型搭建了永磁直驱(permanent magnet synchronous generator, PMSG)风电场,分析了电网强度、电流环控制参数等因素对 SSO 的影响。由于各机组运行工况差异大,单机等值模型无法精确反映风电场内各风机的实际运行状态和空间分布特性,忽略了风电场内风机间的相互作用和地形影响,导致模型在分析风电场的动态响应和稳定性时存在一定的局限性^[15-17]。

为了克服风电场单机等值模型的局限性,有文献提出了风电场多机等值模型^[18-21]的概念,以桨距角^[22]和风速^[23]作为分群指标进行多机分群等值建模。在多机等值建模中,合理分群风电机组至关重要,例如,文献[24]通过动态同调分群方法并考虑地形因素和集电网络连接阻抗差异进行建模;文献[25]使用神经网络聚类算法,以影响风电场次同步振荡的主导参量作为分群指标。

为了进一步提升模型的准确性,有文献提出了多种分群指标的风电场等值建模方法^[26-29]。早期研究主要依据风电机组的机械特性进行分群,如风向和尾流效应导致的风速差异^[26]、风能利用系数^[27]和桨距角的动作状态^[28]。近年来,相关研究逐渐考虑其电气特性,如文献[29]将定子电压、发电机转速和

定子 q 轴电流等作为分群依据。

风电场分群等值方法虽然在简化计算和提高效率方面具有显著优势,但在针对风电场特定问题时选择等值模型分群指标时仍然缺乏充分的科学依据,导致分群结果存在一定的主观性和不确定性,从而影响了等值结果的可信度和说服力,有待进一步提升。

针对上述问题,本文提出了一种适用于次同步振荡分析的风电场分群等值建模方法。基于风电并网系统次同步振荡主导模态参与因子分析,筛选出对系统振荡特性影响较大的三类因子作为风电场分群建模的指标,并采用 K-means 聚类算法,将风速、集电线路与系统状态变量稳态初值三者作为聚类指标,实现了风电场的分群等值建模。从特征值、时域仿真等角度对比验证了用于次同步振荡分析的分群聚合等值模型的有效性,特别是能够反映整个风电场振荡特性与振源机群振荡特性的内在关联性。

1 直驱风电场数学模型

1.1 网侧变流器数学模型

风电场是由多台风电机组经集电线路汇聚而成,通过公共连接点接入电网,PMSG 风电场拓扑如图 1 所示。本文将风力机和机侧变流器等效成受控电流源,只考虑网侧变流器(grid-side converter, GSC)与电网交互作用。

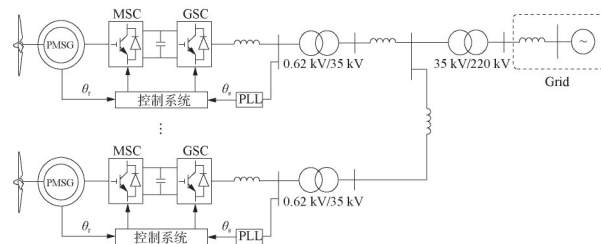


图 1 PMSG 风电场拓扑结构图

Fig. 1 PMSG wind farm structure

图 1 中电网强度往往用短路比(short-circuit ratio, SCR)来表征,即电网短路容量与设备容量之比,其表达式如式(1)所示。

$$L_{SCR} = \frac{S_{ac}}{S_N} = \frac{U_N^2}{ZS_N} \quad (1)$$

式中: L_{SCR} 为风电场并网短路比; S_{ac} 为风电场短路容量; S_N 为风电场并网容量; U_N 为电网电压额定值; Z 为电网阻抗。

全功率四象限变流器通过调节电力电子开关通断状态, 控制输出电压幅值、频率与相位, 实现与交流系统功率双向传输、交换以及交流异步运行。

网侧变流器状态方程如式(2)~(3)所示。

$$L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_g & -\omega_s L_f \\ \omega_s L_f & R_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$u_{dc} C \frac{du_{dc}}{dt} = I_{in0} u_{dc} - u_d i_d - u_q i_q \quad (3)$$

式中: L_f 、 R_g 分别为网侧变流器滤波电感和电阻; ω_s 为电网角频率; u_d 、 u_q 分别为直驱风电机组网侧变流器输出电压 d 轴分量、 q 轴分量; v_d 、 v_q 分别为并网点电压 d 轴分量、 q 轴分量; i_d 、 i_q 分别为直驱风电机组网侧变流器输出电流 d 轴分量、 q 轴分量; C 为直流电容; u_{dc} 为直流电容电压; I_{in0} 为机侧变流器注入电流。

变流器相当于受控电压源, 通过控制变流器开关状态改变输出基波电压的幅值和相位, 进而实现与交流系统之间的功率传输。基于电压矢量定向, 通过控制 dq 轴电流分量, 可实现变流器与交流系统之间有功、无功功率解耦控制, 四象限变流器输出功率应等于输入功率以维持直流环节电压恒定, 在满足变流器容量约束下, 两侧变流器可独立与交流系统进行无功功率交换, 可有效改善风电机组间的系统稳定性。变流器控制框图如图2所示。

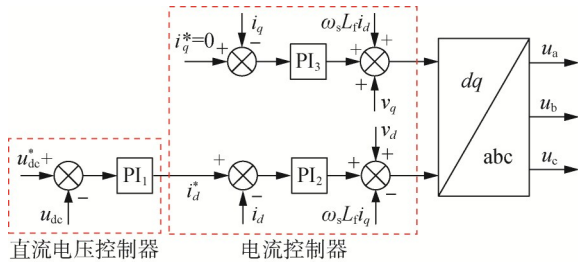


图2 GSC控制系统框图

Fig. 2 Block diagram of GSC control system

GSC 控制策略数学模型如式(4)所示。

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = u_{dc}^* - u_{dc} \\ \frac{dx_2}{dt} = K_{p1}(u_{dc}^* - u_{dc}) + K_{i1}x_1 - i_d \\ \frac{dx_3}{dt} = i_q^* - i_q \\ u_d = K_{p2}K_{p1}(u_{dc}^* - u_{dc}) + K_{p2}K_{i1}x_1 - K_{p2}i_d + K_{i2}x_2 + v_d - \omega_s L_f i_q \\ u_q = K_{p3}(i_q^* - i_q) + K_{i3}x_3 + v_q + \omega_s L_f i_d \end{cases} \quad (4)$$

式中: x_1 、 x_2 、 x_3 为 PI 控制器的状态变量; i_q^* 表示 GSC 输出电流 q 轴分量的参考值; K_{p1} 、 K_{i1} 、 K_{p2} 、 K_{i2} 、 K_{p3} 、 K_{i3} 分别为直流电压外环和电流内环 d 、 q 轴的比例增益、积分增益。

1.2 锁相环模型

锁相环(phase-locked loop, PLL)控制原理如图3所示, 其表达式如式(5)所示。

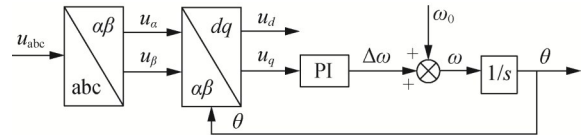


图3 PLL控制原理图

Fig. 3 PLL control schematic

$$\begin{cases} \frac{dx_{PLL}}{dt} = u_q \\ \frac{d\theta_{PLL}}{dt} = \omega_s + \omega_0 \\ \omega_s = K_{iPLL}x_{PLL} + K_{pPLL}u_q \end{cases} \quad (5)$$

式中: x_{PLL} 和 θ_{PLL} 为锁相环状态变量; ω_0 为基准角速度; K_{pPLL} 、 K_{iPLL} 分别为 PLL 比例、积分增益。

2 直驱风电场分群指标选取

基于风电场模型, 分析风电机组联网系统的特征值及参与因子, 来揭示影响风电场动态特性的关键因素, 以此为风电场分群指标的选取提供理论依据。

2.1 机组动态特性主导参数的识别

由直驱风电机组的状态空间方程, 求得特征值如表1所示。由表1可知, 系统存在1对不稳定的次同步振荡模态 $\lambda_{13,14} = 1.24 \pm j218$, 且其实部大于0, 系统在电网强度较弱场景下发生SSO, 其振荡频率为34.71 Hz。

表1 系统状态矩阵特征值

Table 1 Eigenvalues of the system state matrix

模态	特征值	阻尼比	振荡频率/Hz
$\lambda_{1,2}$	-909	1.000	0
λ_3	-467	1.000	0
$\lambda_{4,5}$	-442±j688	0.541	109.60
$\lambda_{6,7}$	-135±j554	0.237	88.22
$\lambda_{8,9}$	-114±j1203	0.095	191.60
λ_{10}	-61.2	1.000	0
$\lambda_{11,12}$	-42.3±j69.7	0.518	11.10
$\lambda_{13,14}$	1.24±j218	-0.006	34.71

对于直驱风电并网系统主导次同步振荡模态 $\lambda_{13,14}$, 其参与因子见图4。观察可以发现, 该模式的

主要参与变量为 i_d 、 x_2 (控制器状态变量)、 x_{id} (经滤波输入到控制回路的 d 轴电流信号), 主要受电流内环控制的影响。 i_{gd} (直驱风机在并网点注入 d 轴电流)、 i_{gq} (直驱风机在并网点注入 q 轴电流)、 v_d 、 v_q 、 x_{iq} (经滤波输入到控制回路的 q 轴电压信号)、 x_{ud} (经滤波输入到控制回路的 d 轴电压信号)、 x_{uq} (经滤波输入到控制回路的 q 轴电压信号) 对该模式影响较小。除此之外, 交流电网强度、机组运行工况等因素对次同步振荡特性也有重要影响, 下面将分析电流内环比例系数、交流电网强度、机组运行工况这三方面对次同步振荡特性影响趋势。

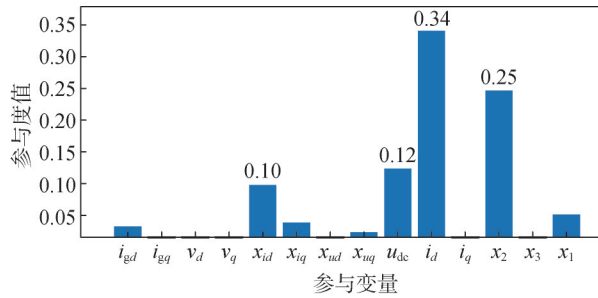


图 4 主导特征值参与因子分析

Fig. 4 Participation factor analysis of dominant eigenvalue

通过摄动电网强度、电流内环比例系数及运行工况, 得到其对直驱风电并网系统主导次同步振荡模式的影响, 如图 5 所示。由图可知, 当电网强度降低 (由 3.5 降至 1.5)、电流内环比例系数减小 (由 0.30 减至 0.18)、风速降低 (由 8 m/s 降至 4 m/s), 主导特征根向右半平面迁移, 系统进入不稳定区域, 发生 SSO。降低电网强度、降低风速、减小电流内环比例系数将会削弱系统稳定性。

主导特征值根轨迹分析验证了上述参数是引起次同步振荡模式所对应的特征根发生显著变化的主导参数, 这一过程确保了所选指标能够准确反映风电场的动态特性和振荡行为。

2.2 分群指标选取

当风电场风速发生变化时, 直接影响风机的功率输出, 从而影响发电机的电气输出和整个风电场的运行点, 选取风速有助于精确分析和预测风电场的整体性能; 在实际风电场中, 各风力发电机到升压站电气距离不同, 集电线路长度会影响风电场的电网强度, 影响风电机端电压水平, 从而影响风电场的初始运行点, 因此有必要考虑集电线路的差异性; 结合机组次同步振荡特性, d 轴输出电流是控制直驱风机内部磁链的关键变量, 影响电机的电磁转矩和输出功率, 所以选择 d

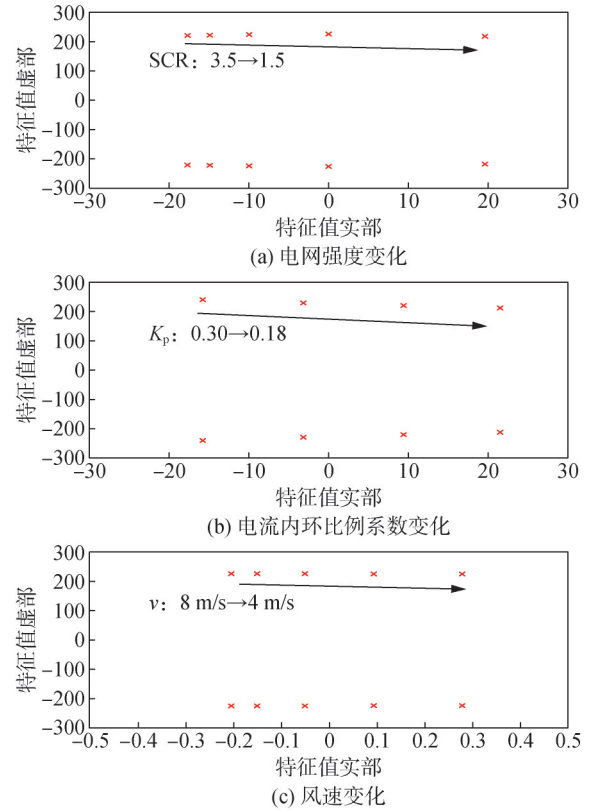


图 5 主导特征值变化轨迹

Fig. 5 Dominant eigenvalue change trajectories

轴电流作为分群指标, 更能反映风电场的振荡模态。

因此这 3 个状态变量的初值可以描述直驱风电场的初始运行点。故本文结合机组的 SSO 特性, 全面考虑了风电场的动态特性, 故选取风速、集电线路长度、直驱风机 d 轴输出电流三个变量的初值作为分群指标。

3 风电场聚合模型

3.1 聚类算法

本文采用 K-means 聚类算法^[9], 根据风机动态响应相似度进行分群, 其中各群内的风机具有相似的动态行为特性, 以此建立风电场等值模型。相似度计算如式 (6) 所示。

$$d_{12} = \sqrt{\sum_{k=1}^n |x_{1k} - x_{2k}|^p} \quad (6)$$

其中: p 取值为 2; x_{1k} 、 x_{2k} 分别为计算相似度的两个向量 $\mathbf{A}(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n})$ 和 $\mathbf{B}(x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n})$ 的元素。

采用肘部法 (elbow method) 确定聚类分群数量, 以群内误差平方和为基础来决定群的最优个数。

$$D = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^n f_{\text{dist}}(x, c_i)^2 \quad (7)$$

式中: D 为簇内误差平方和; K 为簇数量; x 为群中样本点; c_i 为群的质心; $f_{\text{dist}}(\cdot)$ 为距离计算函数。

图6是 K 从2到6时类群指标的变化曲线。由此可以看出, 随着聚类数 K 值递增, 样本数据分群会更加精确, 各个群的相似度会变得更髙, 误差平方和也会逐渐减小。当 K 值大于3时, 肘部开始平缓, 聚类偏差趋于稳定, 即所有的样本点被分为了不同的群, 即将此拐点作为最优聚类数。

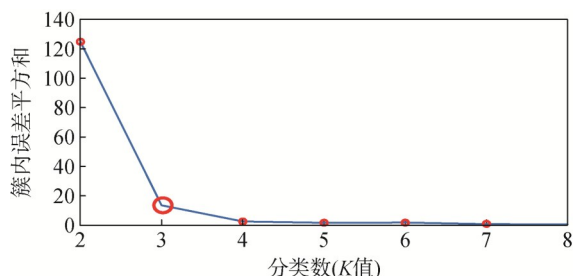


图6 类群指标变化曲线

Fig. 6 Change curves for taxa indicators

K -means 聚类算法具体步骤如下:

- 1) 从采集的所有数据中随机选取 K 个数据, 并将其作为一个最初的聚类中心;
- 2) 计算各采样点与各群中心之间的间距, 并将被测物体按间距最小群进行分组;
- 3) 在全部数据被分组之后, 再次计算出 K 个聚类中心;
- 4) 将上次计算出的 K 个聚类中心进行对比, 若聚类中心改变, 则进入步骤2), 若没有改变, 则进入下一步;
- 5) 在聚类中心不发生改变的情况下, 停止分群并输出聚类结果。

3.2 等值参数计算

对于含有 m 台 PMSG 的风电场, 采用本文方法分类后得到 K 群机组。通过等值处理后, 同一群内机组电气参数可以通过对每台风力发电机参数加权平均得到; 每一群内输入功率应与等值模型的输入功率相等, 由此计算出等值的风速值, 从而确定了等效电流源的数值^[30-31]。

1) 电气等值。同一群内机群等值模型须满足等值前后容量不变, 额定功率不变。

$$\begin{cases} S_{\text{eq}} = \sum_{i=1}^n S_i \\ P_{\text{eq}} = \sum_{i=1}^n P_i \end{cases} \quad (8)$$

式中: S_{eq} 、 S_i 分别为机群等效容量和机群第 i 台机组额

定容量; P_{eq} 、 P_i 分别为机群等效有功功率和机群第 i 台机组有功功率。

$$\begin{cases} r_{\text{seq}} = r_s/n \\ r_{\text{req}} = r_r/n \\ L_{\text{seq}} = L_s/n \\ L_{\text{req}} = L_r/n \\ L_{\text{meq}} = L_m/n \end{cases} \quad (9)$$

式中: r_s 、 r_r 分别为定子和转子电阻; L_s 、 L_r 、 L_m 分别为定子、转子和励磁电抗; r_{seq} 、 r_{req} 分别为等效机组定子和转子电阻; L_{seq} 、 L_{req} 、 L_{meq} 分别为等效机组定子、转子和励磁电抗。

2) 风速等值。

$$v_{\text{eq}} = \sqrt[3]{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^3} \quad (10)$$

式中: v_{eq} 、 v_i 分别为机群等效风速和机群第 i 台机组风速。

3) 集电线路等值。根据输出功率等效原则, 等值前后风机接入点电压应通过加权平均计算得到, 其权重为风机输出功率, 由此可以得到等值后的阻抗, 如式(11)所示。

$$Z_{\text{eq}} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i^2 Z_i)}{P_{\text{eq}}^2} \quad (11)$$

式中: Z_i 为第 i 台机组线路阻抗; Z_{eq} 为等值阻抗。

3.3 风电场聚合等值建模步骤

本文基于 K -means 算法建立了适用于次同步振荡研究的直驱风电场分群聚合等值模型, 分群等值模型的详细结构可见图7。具体步骤如图8所示。

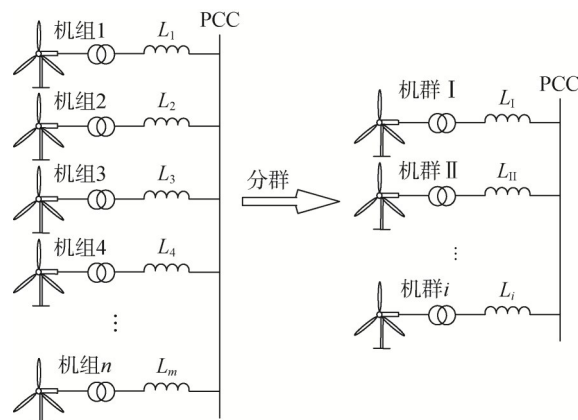


图7 风电场聚合模型结构

Fig. 7 Wind farm aggregation model structure

4 算例仿真

本文基于 30×1.5 MW 的 PMSG 风电场联网算

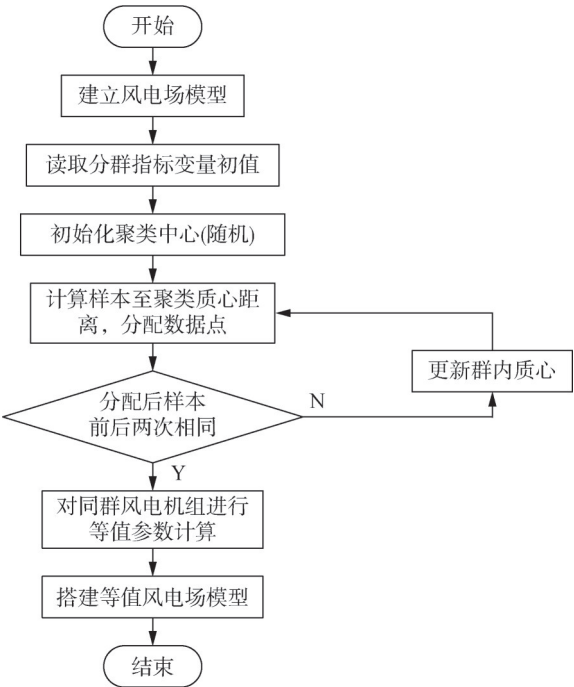


图8 风电场聚合等值建模流程

Fig. 8 Wind farm aggregation equivalence modeling steps

例系统,仿真验证所提出分群等值方法的有效性。风机风速在 4.5~8.5 m/s 内变化,风机到风电场并网点集电线路长度在 400~1200 m 内变化,各风机运行状态参数如表 2 所示。在 PSCAD/EMTDC 仿真平台中搭建如图 1 所示的风电场模型,设置仿真时间为 10 s,仿真系统主要参数见表 3。

本文采用了 K -means 聚类算法对风电场中的风机进行分组,通过肘部法确定最佳聚类数目为 3,即将风电场划分为 3 个群组。具体的分群结果见表 4。

现有的方法仅使用风速作为分群指标,其结果分别为 13 台、11 台和 6 台机组。而本文所提方法的分群结果显示,每个群组分别包含 9 台、14 台和 7 台机组。

为了直观展示本文所提方法的聚类效果,图 9 中展示了对应的三维图。图中不同的机群分别用黄色、绿色和蓝色表示,而每个机群的等效中心则以红色圆圈标示。

表 5、6 分别为 $K_{p2} = 0.21$ 、 0.17 时详细模型与单机聚合模型、风速分群多机聚合模型、本文所提多机聚合模型系统的次同步振荡模态对比及其相对误差。在弱电网强度下,对比表中特征值结果可知,单机聚合模型主导特征值的相对误差较大,本文所提多机聚合模型主导特征值的相对误差最小。由此可见,本文所提聚合模型在特征值准确性方面优于单机模型以及风速分群多机聚合模型,特别是在阻尼

表 2 风机机组运行状态参数

Table 2 Fan unit operating status parameters

编号	风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	集电线路长度/m	i_{d0}/kA
1	6.6	688	0.481
2	7.1	763	0.615
3	8.3	709	1.016
4	7.4	1020	0.705
5	6.1	987	0.367
6	7.9	744	0.870
7	5.0	955	0.182
8	4.7	1156	0.147
9	4.8	1027	0.158
10	5.1	964	0.195
11	5.8	487	0.307
12	5.7	712	0.289
13	4.5	873	0.128
14	6.7	768	0.507
15	4.8	440	0.158
16	5.1	583	0.195
17	7.0	1067	0.587
18	8.0	413	0.905
19	8.4	1091	1.054
20	6.8	462	0.533
21	8.5	935	1.093
22	6.7	800	0.507
23	6.6	574	0.481
24	5.8	857	0.307
25	6.2	498	0.388
26	6.5	937	0.457
27	4.7	880	0.147
28	8.1	445	0.941
29	4.7	445	0.147
30	6.2	522	0.388

表 3 仿真系统主要参数

Table 3 Main parameters of the system

参数	数值
风电机组额定功率 P/MW	1.5
风电机组额定电压 U/kV	0.62
直流电容电压 U_{dc}/kV	1.15
直流电容 C/F	0.09
变流器滤波电感 L_g/mH	1.5
直流电压外环(K_{p1}, K_{i1})	(10, 1000)
变流器 d 轴电流环(K_{p2}, K_{i2})	(0.2, 50)
变流器 q 轴电流环(K_{p3}, K_{i3})	(0.9, 50)

表 4 不同方法风电场分群等值结果
Table 4 Equivalent results of different methods for wind farm subgroups

方法	机群序号	聚类结果
风速分群多机聚合模型	I	2、7、8、9、10、11、12、13、15、16、24、27、29
	II	1、4、5、14、17、20、22、23、25、26、30
	III	3、6、18、19、21、28
本文所提模型	I	7、8、9、10、13、15、16、27、29
	II	1、2、5、11、12、14、17、20、22、23、24、25、26、30
	III	3、4、6、18、19、21、28

比误差上更为精确。

本文采用弗朗明歇距离(Frechet distance) X_{fd} 衡量不同模型下功率曲线的相似度。图 10 为系统稳定状态($K_{p2} = 0.21$)、失稳状态($K_{p2} = 0.17$)下详细模型与单机聚合模型、风速分群多机聚合模型以及本文所提多机聚合模型系统的输出功率曲线。由图 10 可见:系统稳定状态下本文所提多机聚合模型与详细模型系统功率曲线间的弗朗明歇距离 X_{fd} 为 0.006,而单机聚合模型、风速分群多机聚合模型与详细模型系统功率曲线之间 X_{fd} 分别为 0.376、0.197;系统失稳状态下本文所提多机聚合模型与

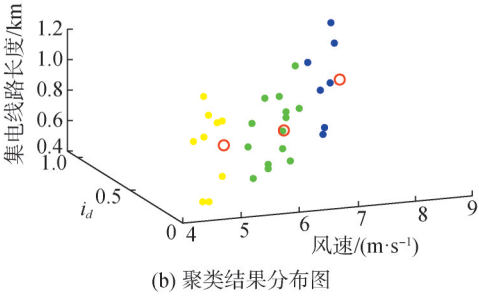
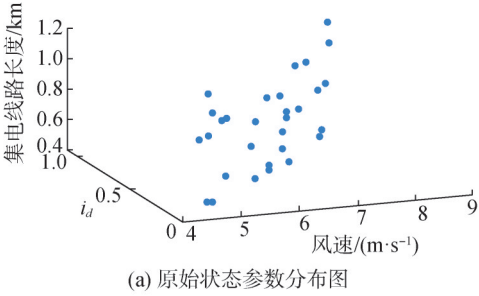


图 9 风电场聚类结果分布图

Fig. 9 Distribution of wind farm clustering results

详细模型系统功率曲线之间 X_{fd} 为 0.802,而单机模型、风速分群多机聚合模型与详细模型系统功率曲线之间 X_{fd} 分别为 1.115、0.956。这表明,本文所提多机聚合模型在稳定和失稳状态下更接近详细模型,相比于风速分群多机聚合模型表现出较好的模拟精度,更能够准确反映风电场的SSO特性。

在 Intel Core i5 处理器、16 GB RAM 和 128 GB

表 5 详细模型与三种等值模型次同步振荡模态对比及相对误差($K_{p2} = 0.21$)
Table 5 Comparison of dominant eigenvalues of three equivalent models($K_{p2} = 0.21$)

SCR	详细模型			单机聚合模型			风速分群多机聚合模型			本文所提多机聚合模型		
	特征值	阻尼比	频率/Hz	特征值	阻尼比	频率/Hz	特征值	阻尼比	频率/Hz	特征值	阻尼比	频率/Hz
1.5	11.4±j228	-0.049 9	36.31	10.8±j231	-0.046 7 (-6.4%)	36.76 (1.2%)	11.0±j229	-0.047 9 (-4%)	36.47 (0.4%)	11.2±j229	-0.049 1 (-1.6%)	36.47 (0.4%)
2.0	-15.6±j238	0.065 4	37.90	-16.2±j240	0.067 3 (2.9%)	38.22 (1.2%)	-15.9±j240	0.066 1 (1.1%)	38.22 (1.2%)	-15.7±j239	0.065 5 (0.2%)	38.06 (0.4%)
2.5	-30.1±j235	0.127 0	37.42	-30.7±j238	0.127 9 (0.7%)	37.88 (1.2%)	-30.2±j238	0.125 8 (-0.9%)	37.88 (1.2%)	-30.2±j236	0.126 9 (0.1%)	37.58 (0.4%)

注:括号()中数值表示不同聚合方法相较于详细模型的相对误差。

表 6 三种等值模型主导特征值对比($K_{p2} = 0.17$)
Table 6 Comparison of dominant eigenvalues of three equivalent models($K_{p2} = 0.17$)

SCR	详细模型			单机聚合模型			风速分群多机聚合模型			本文所提多机聚合模型		
	特征值	阻尼比	频率/Hz	特征值	阻尼比	频率/Hz	特征值	阻尼比	频率/Hz	特征值	阻尼比	频率/Hz
1.5	27.7±j210	-0.130 7	33.44	26.9±j212	-0.125 9 (-3.7%)	33.76 (1.0%)	27.2±j211	-0.127 9 (-2.1%)	33.60 (0.5%)	27.4±j211	-0.128 8 (-1.5%)	33.60 (0.5%)
2	12.8±j216	-0.059 1	34.40	12.2±j218	-0.055 9 (-5.4%)	34.71 (0.9%)	12.3±j218	-0.056 3 (-4.7%)	34.71 (0.9%)	12.5±j217	-0.057 5 (-2.7%)	34.55 (0.4%)
2.5	5.19±j217	-0.024 0	34.39	4.57±j219	-0.020 9 (-12.9%)	34.87 (1.4%)	4.65±j219	-0.021 2 (-11.7%)	34.87 (1.4%)	4.99±j218	-0.022 9 (-4.6%)	34.71 (0.9%)

注:括号()中数值表示不同聚合方法相较于详细模型的相对误差。

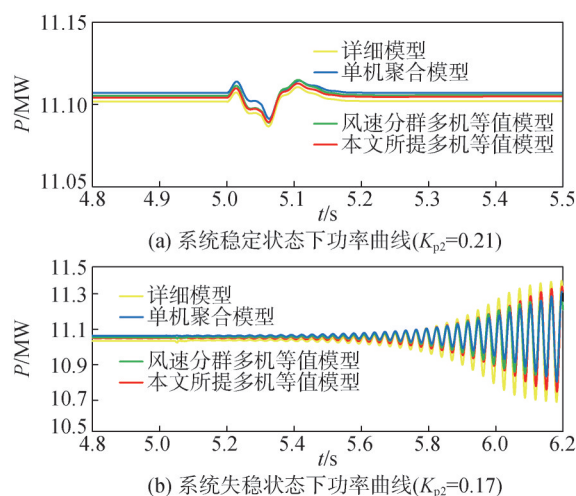


图 10 四种等值模型输出功率曲线

Fig. 10 Output power curves of four equivalent models

固态硬盘的电脑环境下(仿真时间 10 s),聚合模型仿真耗时 906 s,仅为详细模型仿真耗时(2284 s)的 40%,可见聚合模型在计算效率方面具有显著优势。

图 11 为风电场及各分群输出功率曲线。由图可知,总功率振荡幅度为 2.066 9 MW,机群 I 功率振荡高达 2.066 0 MW,机群 II、III 的振幅分别为 0.005 0、0.004 0 MW,这表明整个风电场振荡强度由机群 I 来主导。通过把运行工况、集电线路与系统状态变量稳态初值三种影响风电场次同步振荡特性的关键因素作为聚类指标,可以将风电场中主导次同步振荡特性的机组聚合在一起,并最终影响整体风电场次同步振荡特性。

图 12 为机群 II 诱发失稳风电场/机群输出功率曲线。观察各振荡幅度可得,整个风电场振荡强度由机群 II 来主导。

5 结 论

本文研究了适用于 SSO 分析的并网风电场多机聚合等值模型,主要结论如下:

1) 主导特征值参与因子计算结果表明风电场集电线路、机组工况、机组 d 轴输出电流对风电场联系统次同步振荡特性影响显著,据此可以作为风电场分群指标选取依据。

2) 构建了基于 K -means 聚类算法风电场多机聚合等值模型,相较于单机聚合模型以及风速分群多机聚合模型,本文所提多机聚合模型的系统功率曲线与详细模型更为接近,主导次同步振荡模态精度更高。

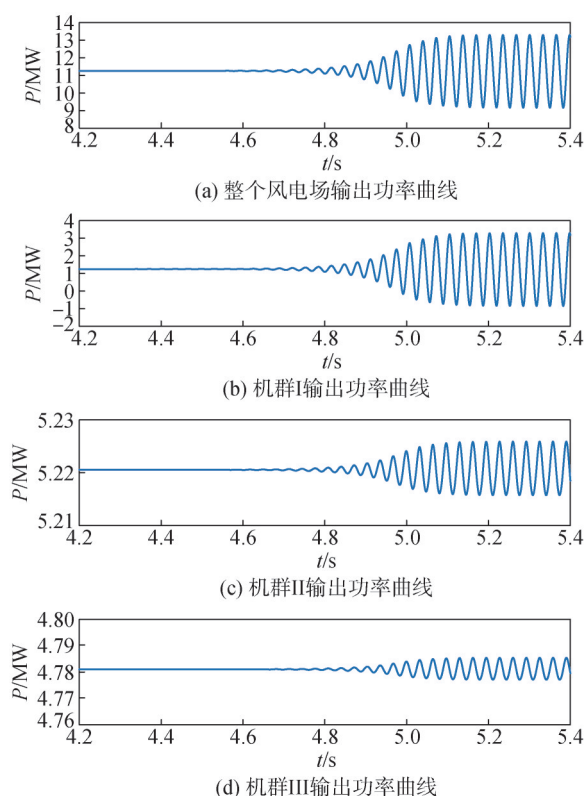


图 11 机群 I 诱发失稳风电场/机群输出功率曲线

Fig. 11 Cluster I induced destabilization wind farm/cluster output power curves

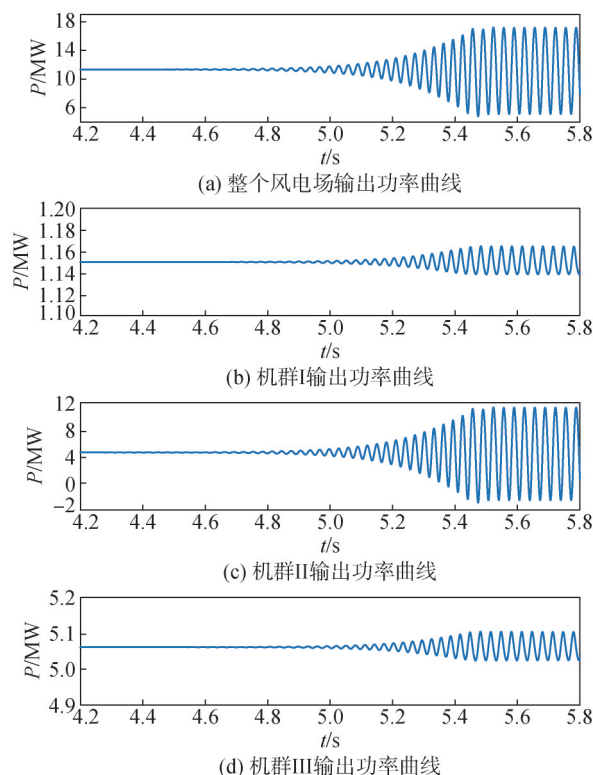


图 12 机群 II 诱发失稳风电场/机群输出功率曲线

Fig. 12 Cluster II induced instability wind farm/cluster output power curves

3) 通过把影响风电场次同步振荡特性的关键因素作为聚类指标可以将风电场中主导次同

步振荡特性的机组聚合在一起,并最终影响整体风电场次同步振荡特性,这为深入剖析风电场联网内部振荡特性提供了一种有效模型。

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):

严干贵提出研究方向,郭剑宇实施研究过程,王玉鹏设计研究思路。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

6 参考文献

- [1] 陈心宜, 胡秦然, 石庆鑫, 等. 新型电力系统居民分布式资源管理综述[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(5): 157-175.
CHEN Xinyi, HU Qinran, SHI Qingxin, et al. Review on residential distributed energy resource management in new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(5): 157-175.
- [2] LIU H K, XIE X R, HE J B, et al. Subsynchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4708-4720.
- [3] DU W J, WANG Y J, WANG H F, et al. Small-disturbance stability limit of a grid-connected wind farm with PMSGs in the timescale of DC voltage dynamics[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2366-2379.
- [4] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [5] 陈国平, 李明节, 许涛, 等. 我国电网支撑可再生能源发展的实践与挑战[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3095-3103.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Practice and challenge of renewable energy development based on interconnected power grids[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3095-3103.
- [6] 高本锋, 符章棋, 王刚, 等. 适用于次同步振荡分析的直驱风电场平衡降阶方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 112-120.
GAO Benfeng, FU Zhangqi, WANG Gang, et al. Balanced reduction method of direct-drive wind farm for subsynchronous oscillation analysis[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 112-120.
- [7] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4720-4732.
MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4732.
- [8] 王伟胜, 张冲, 何国庆, 等. 大规模风电场并网系统次同步振荡研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1050-1060.
WANG Weisheng, ZHANG Chong, HE Guoqing, et al. Overview of research on subsynchronous oscillations in large-scale wind farm integrated system[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1050-1060.
- [9] 王玉鹏, 严干贵, 穆钢, 等. 交流电流控制尺度下的并网VSC聚合建模研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2900-2910.
WANG Yupeng, YAN Gangui, MU Gang, et al. Research on aggregation modeling of grid connected VSC under AC current control scale[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2900-2910.
- [10] 贾科, 孔繁哲, 张旸, 等. 基于改进K-均值算法的双馈风场故障等值建模方法[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4161-4173.
JIA Ke, KONG Fanzhe, ZHANG Yang, et al. Fault equivalent modeling of doubly fed wind farm based on improved K-means algorithm[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4161-4173.
- [11] 张鑫宇, 薛峰, 李碧君, 等. 双馈风场串补系统次同步振荡紧急控制策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 108-116.
ZHANG Xinyu, XUE Feng, LI Bijun, et al. Emergency control strategy for subsynchronous oscillation of DFIG-based wind farms with a series-compensated line[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 108-116.
- [12] 王玉鹏, 严干贵, 杨成, 等. 风电并网系统次同步等幅振荡机理与特性分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(7): 45-51.
WANG Yupeng, YAN Gangui, YANG Cheng, et al. Mechanism and characteristics analysis of sub-synchronous constant amplitude oscillation in wind power grid connected systems[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(7): 45-51.
- [13] HUANG B Y, SUN H S, LIU Y M, et al. Study on subsynchronous oscillation in D-PMSGs-based wind farm integrated to power system[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(1): 16-26.
- [14] 韩平平, 王希, 王欢, 等. 基于移相变压器的直驱风机次同步振荡抑制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(4): 126-134.
HAN Pingping, WANG Xi, WANG Huan, et al. Subsynchronous oscillation mitigation of permanent magnet synchronous generator based on phase shifting transformer[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(4): 126-134.
- [15] LI W X, CHAO P P, LIANG X D, et al. An improved single-machine equivalent method of wind power plants by calibrating power recovery behaviors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4371-4381.
- [16] 潘学萍, 张弛, 鞠平, 等. 风电场同调动态等值研究[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 621-627.
PAN Xueping, ZHANG Chi, JU Ping, et al. Coherency-based dynamic equivalence of wind farm composed of doubly fed induction generators[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 621-627.
- [17] 程东, 夏世威, 李庚银, 等. 含SVG的直驱风电场高频振荡分析及抑制策略[J]. 电力建设, 2023, 44(12): 115-124.
CHENG Dong, XIA Shiwei, LI Gengyin, et al. Analysis and suppression strategy of high frequency oscillation in PMSG based wind farm with SVG[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 115-124.
- [18] 陈洁, 郭志, 付翰翔, 等. 基于撬棒控制策略的DFIG风电场动态等值建模研究[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 190-196.
CHEN Jie, GUO Zhi, FU Hanxiang, et al. Research on dynamic equivalence modeling of wind farm composed of double fed induction generators based on crowbar control strategy[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 190-196.

- [19] 胡文波, 贾祺, 刘侃, 等. 面向次同步振荡分析的直驱风电机组建模[J]. 太阳能学报, 2022, 43(2): 424-435.
HU Wenbo, JIA Qi, LIU Kan, et al. Modeling of direct drive pmsg facing subsynchronous oscillation analysis [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(2): 424-435.
- [20] 吴志鹏, 裴建华, 李银红. 基于低电压穿越功率特性的双馈风电场多机等值方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(19): 95-103.
WU Zhipeng, PEI Jianhua, LI Yinhong. Multi-machine equivalent method for DFIG-based wind farm based on power characteristic of low voltage ride-through [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 95-103.
- [21] 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.
- [22] 付盼, 胡庆林. 基于聚类分析的风电场多机等效建模方法研究[J]. 高压电器, 2019, 55(4): 198-204.
FU Pan, HU Qinglin. Research on multi-machine equivalent modeling method of wind farm based on cluster analysis [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 198-204.
- [23] WU T H, JIANG Q R, SHAIR J, et al. Inclusion of current limiter nonlinearity in the characteristic analysis of sustained subsynchronous oscillations in grid-connected PMSGs [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 2416-2426.
- [24] 郑文哲, 卜京, 张宇宇, 等. 考虑地形因素的风电场动态同调分群方法研究[J]. 可再生能源, 2019, 37(7): 1049-1054.
ZHENG Wenzhe, BU Jing, ZHANG Ningyu, et al. Coherency-based dynamic clustering method for wind farms considering factors of complex topography [J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(7): 1049-1054.
- [25] 王雨欣, 王思怡, 杨黎晖, 等. 超级电容储能和卸荷电路协调控制的永磁同步风电机组低电压穿越策略[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 177-185.
WANG Yuxin, WANG Siyi, YANG Lihui, et al. Low-voltage ride-through control strategy of permanent magnetic synchronous wind turbine with coordination of super capacitor energy storage and chopper circuit [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 177-185.
- [26] 杨本星, 王伟, 杨明轩, 等. 辅助风电并网的构网型储能控制策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 56-64.
YANG Benxing, WANG Wei, YANG Mingxuan, et al. Research on grid-forming energy storage control strategy for auxiliary wind power grid-connection [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 56-64.
- [27] 袁慧涛, 袁文涛, 王文敬, 等. 基于阻抗分析法的双馈风电机组经串补线路并网系统的次同步振荡特性研究[J]. 山东电力技术, 2024, 51(11): 48-60.
YUAN Huitao, YUAN Wentao, WANG Wenjing, et al. Research on subsynchronous oscillation of doubly-fed wind turbines connected by series compensating lines based on impedance analysis method [J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(11): 48-60.
- [28] 陈平, 杜文娟. 基于新能源下混合风电场不同类型风机动态特性相似环节引起的振荡风险研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(12): 114-124.
CHEN Ping, DU Wenjuan. Study on the oscillation risk caused by similar dynamic characteristics of different types of wind turbines in hybrid wind farms based on new energy [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(12): 114-124.
- [29] 梅耀丹, 梁新坤, 刘泳含, 等. 基于分频段辨识的永磁直驱风电场小信号等值方法[J]. 广东电力, 2023, 36(10): 77-83.
MEI Yaodan, LIANG Xinkun, LIU Yonghan, et al. Small signal equivalence method for PMSG wind farm based on frequency division identification [J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(10): 77-83.
- [30] 袁庆伟, 吴扣林, 谢晔源, 等. 不平衡电网下风电并网逆变器直接正负序功率控制[J]. 供用电, 2023, 40(1): 88-96, 104.
YUAN Qingwei, WU Koulin, XIE Yeyuan, et al. Direct positive/negative sequence power control of wind power grid-connected inverter under unbalanced grid condition [J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(1): 88-96, 104.
- [31] 李博浩, 郭昆丽, 吕家君, 等. 次同步电流双通道附加阻尼抑制次同步振荡策略及阻抗模型分析[J]. 分布式能源, 2023, 8(6): 1-10.
LI Bohao, GUO Kunli, LYU Jiajun, et al. Subsynchronous current dual channel additional damping suppression subsynchronous oscillation strategy and impedance model analysis [J]. Distributed Energy, 2023, 8(6): 1-10.

收稿日期: 2024-11-10 修回日期: 2025-07-07

作者简介:

严干贵(1971),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为新能源发电技术,E-mail:yangg@neepu.edu.cn;

郭剑宇(1998),男,硕士研究生,主要研究方向为新能源联网运行控制与稳定性分析,E-mail:guoguoju0212@163.com;

王玉鹏(1991),男,博士,讲师,硕士生导师,通信作者,主要研究方向为新能源并网发电控制,E-mail:20172753@neepu.edu.cn。

(编辑 魏希辉)