

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240595

考虑 LVRT 功率特性的直驱永磁风电场多机聚合辨识 等值建模方法

左佳鑫¹, 杨秀¹, 赵晓莉¹, 熊雪君², 张雅君², 冯煜尧²

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437)

摘要: 针对故障情景下风电场等值模型精度偏低的问题, 提出了一种考虑低压穿越(low voltage ride through, LVRT)功率特性的风电场多机聚合辨识等值建模方法。首先, 基于风电机组 LVRT 期间有功功率动态特性的典型差异对风电场进行初次分群。其次, 采用基于动态时间规整(dynamic time warping, DTW)度量的多路谱聚类(Ng-Jordan-Weiss, NJW)算法实现机群的二次划分, 得到最终两阶段分群结果。然后, 针对聚合所得的风电场多机等值模型, 采用参数灵敏度分析方法来确定需要优化的重点参数, 以各参数聚合值为初值, 同时结合单机分步辨识、多机依次辨识以及等值阻抗辨识 3 种策略, 实现风电场整体等值参数的优化。最后, 对比了不同方法的拟合曲线及等值误差, 结果表明所提方法有效提高了等值模型的精确性与适应性。

关键词: 直驱永磁风电场; 低压穿越; 分群聚类; 多机等值; 参数辨识

Equivalence modeling method for multi-machine aggregation identification of direct-drive permanent magnet wind farm considering LVRT power characteristics

ZUO Jiaxin¹, YANG Xiu¹, ZHAO Xiaoli¹, XIONG Xuejun², ZHANG Yajun², FENG Yuyao²

(1. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China)

Abstract: Aiming at the problem of low accuracy of wind farm equivalent models under fault scenarios, a multi-machine aggregation identification equivalence modeling method for wind farm considering low voltage ride through (LVRT) power characteristics is proposed. Firstly, the wind farm is initially grouped based on the typical differences in active power dynamic characteristics during LVRT of wind turbines. Secondly, the Ng-Jordan-Weiss (NJW) algorithm based on dynamic time warping (DTW) metric is used to realize the secondary division of the cluster, and the final two-stage clustering results are obtained. Then, for the aggregated multi-machine equivalent model of the wind farm, parameter sensitivity analysis is used to determine the key parameters to be optimized. The aggregated values of each parameter are taken as the initial values, and the overall equivalent parameters of the wind farm are optimized using the three strategies of single-machine step-by-step identification, multi-machine sequential identification, and equivalent impedance identification. Finally, the fitting curves and equivalent errors of different methods are compared, and the results show that the proposed method effectively improves the accuracy and adaptability of the equivalent model.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177098).

Key words: direct-drive permanent magnet wind farm; LVRT; grouping and clustering; multi-machine equivalence; parameter identification

0 引言

为实现“双碳”目标, 我国提出要加快构建以

新能源为主体的新型电力系统^[1]。风电作为我国能源转型期间大力推广的新能源之一, 并网规模正不断扩大^[2]。为分析大量风电接入对电网安全稳定运行的影响, 亟需建立能够拟合风电场故障期间动态特性的高精度等值模型^[3-5]。风电场等值可分为静态

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177098)

等值和动态等值, 其中静态等值重点关注稳态条件下的特性, 主要用于风电场潮流计算分析, 而动态等值能够反映风电场在风速变化、故障扰动等动态过程中的运行特性, 是当前等值建模领域研究的重点^[6]。风电场动态等值包括单机等值法与多机等值法。由于风电场规模较大, 各风电机组在同一时段内的运行状态不尽相同, 因此单机等值法已无法准确描述风电场整体的动态特性, 当前研究多聚焦于多机等值法^[7]。

多机等值主要包括分群聚类与等值参数计算两个步骤。针对分群方法的研究, 文献[8-9]提出按照风速、尾流效应影响因子等实现机群的划分, 分群指标较为单一, 难以精确划分风电机组运行状态。文献[10]以有功、无功、电压及电流的多尺度熵作为分群指标, 进一步结合多视角迁移模糊 C 均值算法实现分群, 但其分群过程需要大量风机运行数据辅助进行, 实际中往往难以实现。文献[11]提出将采用主成分分析法降维后的风机运行状态变量作为分群指标, 虽可有效减小计算量, 但难以捕捉风机动态特性的相似性。文献[12-13]从风电机组动态响应轨迹相似性入手进行分群, 分别以短路电流包络线轨迹、有功功率时间序列数据作为分群指标。然而, 为保证风机在电网电压跌落时仍能继续运行, 风电机组通常具备低压穿越(low voltage ride through, LVRT)能力, 上述文献在分群时均未考虑其对风机动态特性的影响。也有文献考虑了低压穿越环节的影响, 针对双馈风机, 文献[14-15]仅以撬棒(Crowbar)保护是否动作作为分群指标, 所得两机等值模型精度不高。文献[16]在考虑 Crowbar 保护动作的基础上结合风速完成机群划分, 等值精度相对有所提高。文献[17]根据风速区间进行初次分群, 然后采用生成对抗网络和深度信念网络增强对保护电路状态的识别以实现二次分群。但在某些故障不严重的场合, 各机组保护电路可能均不动作, 以上分群方法有效性将难以保证。文献[18-19]根据风机 LVRT 相关特性进行初次分群, 但当故障导致电压跌落变化较大时, 分群方法将失效。针对直驱风机, 文献[20]以卸荷电路导通情况和故障机端电压为指标, 结合改进 D-K 聚类算法实现分群, 但在各风机出口侧电压跌落相差不大的情况下, 该分群指标将不再适用。文献[21-22]提出根据初始风速和故障机端电压跌落程度进行快速分群的预想故障分析方法, 但其仅根据故障特性划分机群, 未考虑同一类别故障特性中是否仍存在差异。综上, 现有直驱永磁风电场的分群方法缺乏在不同复杂运行情景下针对 LVRT 功率特性的研究, 难以实现风电场的精确

分群, 因此有必要从风电机组的控制策略出发, 深入探究考虑 LVRT 功率特性影响的分群方法。

在等值参数计算方面, 现有研究常采用容量加权法^[23]。考虑到风机场站组成复杂, 运行情况多变, 一些情况下采用常规聚合方法获取的参数未必准确。为此, 有必要进一步结合参数辨识方法优化等值参数, 文献[24]采用改进基因学习粒子群混合算法对直驱风电场单机等值模型进行参数辨识, 其等值效果不如多机模型经参数优化后精确。文献[25]针对含不同控制策略的双馈风电场模型, 提出分类与重点辨识策略, 但辨识过程中认为等值机组在采用相同控制方式时的参数一致, 所得模型精确性仍有待提高。文献[26]从提升算法性能入手, 基于改进混沌布谷鸟算法实现双馈风电场整体参数的优化。但上述文献所采用的风电机组模型均未计及 LVRT 模块, 若在辨识过程中考虑逆变器限幅环节、无功支撑策略, 可与实际风电场更为接近。此外, 当前研究在辨识策略的设计方面有待改进, 若按照参数灵敏度对各个等值机参数按序进行辨识, 可进一步提升等值参数的精确性。

针对上述问题, 本文首先分析 LVRT 环节的机理, 提出一种根据直驱风机 LVRT 期间有功功率动态特性对风电场进行初次分群的方法, 然后通过仿真进一步分析初次分群后同一类动态特性的机组内部是否仍存在差异, 针对受扰轨迹仍存在差异的机组, 采用基于动态时间规整(dynamic time warping, DTW)度量的多路谱聚类(Ng-Jordan-Weiss, NJW)算法进行二次划分, 得出最终分群结果。针对聚合后的含 LVRT 控制策略的风电场模型, 进一步考虑逆变器限幅环节涉及参数的影响, 采用轨迹灵敏度分析方法确定待优化的参数, 并提出单机分步辨识、多机依次辨识以及等值阻抗辨识三者相结合的策略, 最终实现风电场整体等值参数的优化。

1 含 LVRT 的直驱永磁风机模型

本文采用的直驱永磁风机(direct-drive permanent magnet synchronous generator, D-PMSG)整体模型结构如图 1 所示, 其主要包括风力机、永磁同步电机、全功率变流器、卸荷电路、滤波电路以及相应控制环节。为实现低压穿越功能, 风机直流侧通常需要配备卸荷电路(Chopper), 并在故障时改变网侧逆变器的控制策略, 下文重点针对 LVRT 部分模型进行介绍, 其余各部分数学模型可参见文献[27]。

1.1 卸荷电路

当风电场外部发生故障时, 网侧电压跌落会使逆变器输出的功率降低, 此时多余的功率将累积在直

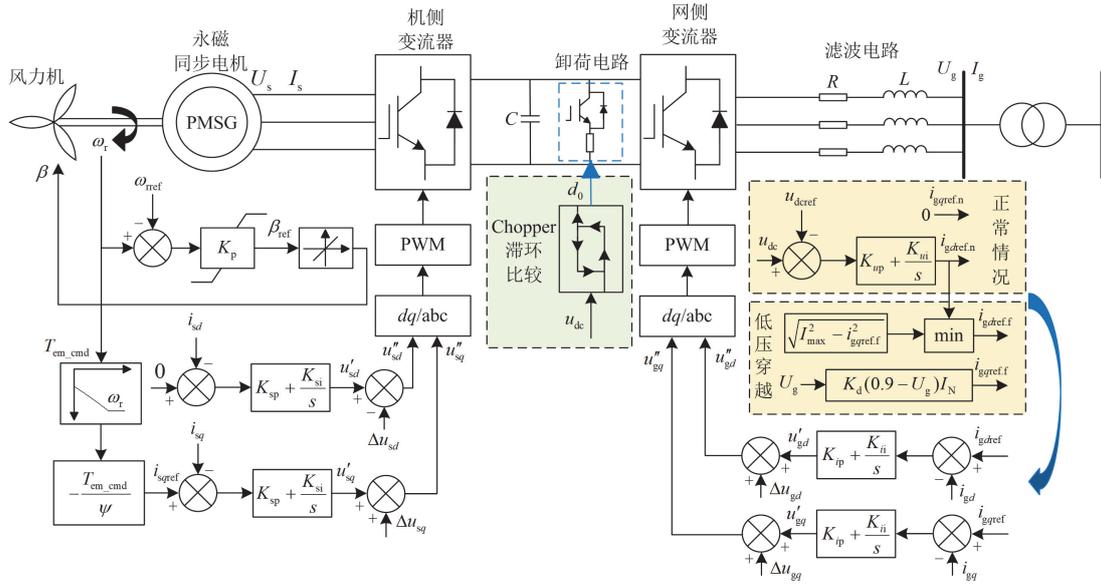


图 1 直驱永磁风机模型结构图
Fig. 1 Model structure of D-PMSG

流电容上，导致直流电压 u_{dc} 不断升高。为保护直流电容不受损，当 u_{dc} 升高到卸荷电路开启阈值(1500 V)时，投入卸荷电阻以消耗多余能量；当 u_{dc} 下降到关断阈值(1300 V)时，切出卸荷电阻。故障期间直流侧功率平衡关系如式(1)^[20]所示。

$$\begin{cases} u_{dc}C \frac{du_{dc}}{dt} = P_s - P_g - P_R \\ P_R = \frac{d_0^2 u_{dc}^2}{R} \end{cases} \quad (1)$$

式中： C 为直流电容； P_s 为机侧变流器输出功率； P_g 为网侧变流器的输入功率； P_R 为卸荷电阻消耗的功率； d_0 为调制占空比； R 为卸荷电阻。

1.2 网侧逆变器控制策略

正常情况下，网侧逆变器外环采用直流电压控制，且给定无功电流参考值为 0，机组不输出无功功率。故障情况下，根据风机并网导则，机组需具备一定的无功支撑能力，当故障电压为 0.2~0.9 p.u. 时，网侧切换至 LVRT 控制策略以优先满足无功需求，无功电流参考值应满足式(2)^[28]。

$$\begin{cases} i_{gqref.f} \geq K_d(0.9 - U_g)I_N \\ 0.2 \text{ p.u.} \leq U_g \leq 0.9 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $i_{gqref.f}$ 为 LVRT 期间无功电流参考值，计算时将不等号取作等号； K_d 为无功支撑系数，本文取 1.5； U_g 为机端电压值； I_N 为机组额定电流。

有功电流参考值受逆变器容量限制^[29]，可表示为

$$\begin{cases} i_{gdref.f} = \min \{ i_{gdref.n}, I_{dmax} \} \\ I_{dmax} = \sqrt{I_{max}^2 - i_{gqref.f}^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $i_{gdref.f}$ 为 LVRT 期间有功电流参考值； $i_{gdref.n}$ 为正常直流电压控制时有功电流参考值； I_{dmax} 为 d 轴电流上限值； I_{max} 为逆变器电流上限值。

2 风电场两阶段分群方法

风电场多机等值建模的核心是将运行特性最为相似的机组划分为同一机群，以保证等值前后机组输出功率的一致性。本文从机组 LVRT 有功及无功功率特性出发，提出适用于直驱永磁风电场的两阶段分群方法。

2.1 基于 LVRT 有功动态特性差异的初次分群

低压穿越期间，根据 LVRT 控制策略所设置的 $i_{gqref.f}$ 值可求得故障时输出的无功功率 Q_f 为

$$Q_f = U_g K_d (0.9 - U_g) I_N \quad (4)$$

由式(4)可知，无功支撑系数和机组额定电流一定，故障期间输出的无功功率值仅与机端电压跌落值有关。对于场内风机地理位置相对集中的风电场，集电线路引起的损耗相差不大，因此故障时各机端电压跌落情况相近，各风机无功动态特性基本一致，难以将其应用于风电场分群。考虑到受尾流效应影响，各风机输入风速通常不同，因此可从有功特性差异入手寻找分群方法，计算得到故障稳态期间输出的有功功率 P_f 为

$$P_f = \min \left\{ P_{s0}, u_{gd} \sqrt{I_{\max}^2 - i_{gref}^2} \right\} \quad (5)$$

式中: u_{gd} 为电网电压 d 轴分量(由于网侧逆变器采用电网电压定向矢量控制, u_{gd} 即等于 U_g); P_{s0} 为故障前稳态情况下输出的有功功率值。

由式(5)可知, 不同运行条件下 LVRT 期间机组输出的有功功率存在两种情况, 即故障期间有功功率能否恢复到故障前的稳态值, 因此可针对这一明显差异对机群进行初次划分。从控制原理层面分析, 二者的区别在于故障期间网侧 d 轴电流是否被限幅。当其未被限幅时, 故障期间输出有功可恢复至故障前值, 反之则不然。为验证上述分析, 针对单机模型设置 0.1~0.25 s 内 PCC 点电压跌落至 0.5 p.u., 风速设置在 [7.2, 9.3] m/s 以及 [10, 12.1] m/s 两区间内, 每隔 0.175 m/s 仿真一次, 可得两类机组有功功率动态特性曲线, 如图 2 所示。

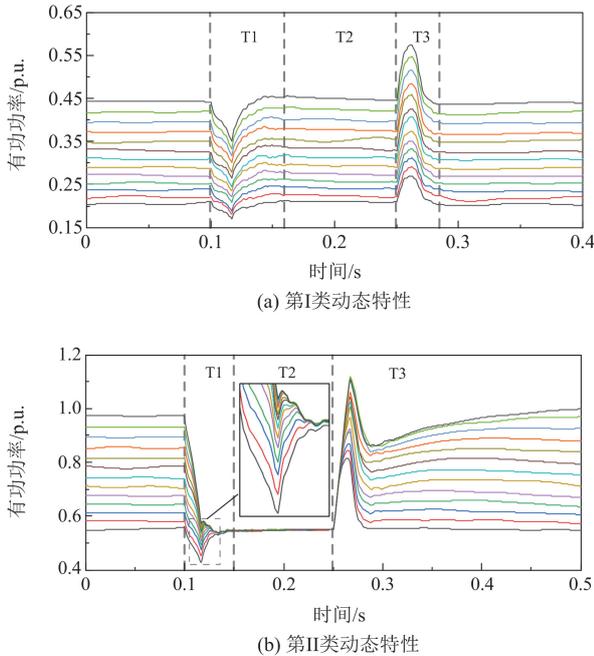


图 2 两类机组有功功率动态特性曲线

Fig. 2 Dynamic characteristic curves of active power for two types of wind turbines

由图 2 可知, 第 I 类机组故障期间输出功率等于故障前功率, 各机组有功在故障发生时均经过相似的暂态过程(T1 时段)过渡到故障稳态(T2 时段), 在故障切除后又经过相似的暂态过程(T3 时段)恢复到稳定运行状态, 因此第 I 类机组之间动态特性的相似性较高, 可直接划分为一群。对于第 II 类机组, 故障期间输出功率低于故障前功率, 由局部放大图可知, 不同风速下在故障发生的短时暂态过程(T1

时段)中有功波形存在差异, 且各机组故障切除后恢复至稳态所需时间不同, 导致 T3 时段的受扰波形仍有所差异, 为进一步提高等值精度, 有必要对其进行二次分群。

2.2 基于 DTW-NJW 算法的风电场二次分群

考虑到 DTW 距离可以衡量时间序列的相似性^[30], 因此针对第 II 类机组, 以有功功率时间序列为指标, 采用 DTW-NJW 聚类算法对其作进一步划分, 具体步骤如下。

1) 输入第 II 类中各风机有功时间序列数据, 采用 DTW 方法计算各样本之间的距离, 构造 DTW 距离矩阵 A_{DTW} 。

$$A_{DTW} = \begin{bmatrix} a_{(1,1)} & a_{(1,2)} & \cdots & a_{(1,y)} & \cdots & a_{(1,n)} \\ a_{(2,1)} & a_{(2,2)} & \cdots & a_{(2,y)} & \cdots & a_{(2,n)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{(x,1)} & a_{(x,2)} & \cdots & a_{(x,y)} & \cdots & a_{(x,n)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{(n,1)} & a_{(n,2)} & \cdots & a_{(n,y)} & \cdots & a_{(n,n)} \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (6)$$

式中: n 为第 II 类动态特性对应的风机总数; $a_{(x,y)}$ 为第 x 台风机与第 y 台风机对应有功时间序列之间的 DTW 距离, 其中 $x, y \in \{1, 2, \dots, n\}$ 。

2) 采用高斯相似函数构造样本间的相似度矩阵 W , 矩阵中各元素为

$$w_{(x,y)} = \exp \left[-\frac{a_{(x,y)}^2}{2\sigma^2} \right] \quad (7)$$

式中: $w_{(x,y)}$ 为第 x 台风机与第 y 台风机对应有功时间序列之间的相似度; σ 为高斯核参数。

3) 对相似度矩阵 W 的每行元素求和, 得出样本点的度 b_x , 并构造度矩阵 B 。

$$b_x = \sum_{y=1}^n w_{(x,y)} \quad (8)$$

$$B = \text{diag}(b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (9)$$

4) 构造标准化的拉普拉斯(Laplacian)矩阵 L_{norm} 。

$$L_{\text{norm}} = B^{-\frac{1}{2}} (B - W) B^{-\frac{1}{2}} \quad (10)$$

5) 设置 k 为聚类数, 取 L_{norm} 的 k 个较小特征值对应的特征向量组成矩阵 V , 并进一步将其按行标准化, 得到矩阵 U 。

6) 对矩阵 U 采用 K-means++ 算法聚为 k 类, 并将轮廓系数(silhouette coefficient, SC)与戴维森堡丁指数(davies-bouldin index, DBI)作为聚类评价指标, 取 SC 最大、DBI 最小的聚类数为最优聚类数。

2.3 两阶段分群流程

综上, 直驱风机受风速和电压跌落影响, 导致

有功功率呈现两类存在明显差异的动态特性, 可将其作为初步分群指标, 将属于第 I 类动态特性的机组划分为一个机群, 对于第 II 类动态特性机组进一步采用 DTW-NJW 算法作进一步划分。风电场两阶段分群流程如图 3 所示。

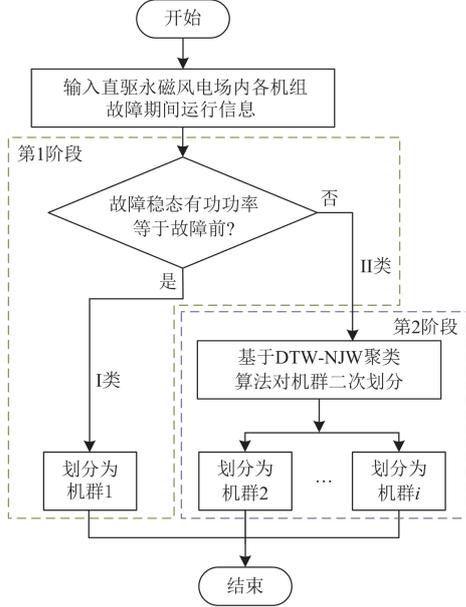


图 3 风电场两阶段分群流程

Fig. 3 Two-stage clustering process for wind farm

3 风电场等值参数计算

等值风速、等值风电机组参数及等值变压器参数的计算方法可参考文献[31]。

等值机变流器控制参数计算方式为

$$\begin{cases} K_{p_eq} = \sum_{j=1}^m \frac{S_j}{S_{eq}} K_{p_j} \\ K_{i_eq} = \sum_{j=1}^m \frac{S_j}{S_{eq}} K_{i_j} \end{cases} \quad (11)$$

式中: m 为该等值机群包含的风机总数; S_j 、 S_{eq} 分别为第 j 台风机及等值机的额定容量; K_{p_j} 、 K_{p_eq} 分别为第 j 台风机及等值机的比例系数; K_{i_j} 、 K_{i_eq} 分别为第 j 台风机及等值机的积分系数。

等值机变流器电流限幅值 I_{max_eq} 为

$$I_{max_eq} = \sum_{j=1}^m \frac{S_j}{S_{eq}} I_{max_j} \quad (12)$$

式中, I_{max_j} 为第 j 台风机的电流限幅值。

集电线路参数按照等值前后功率和电流不变的原则计算, 其中等值阻抗计算方法参考文献[32]。此外, 考虑到线路对地电容的影响, 为使等值前后

其引起的无功损耗不变, 采用式(13)计算等值机的等值电容 C_{eq} 。

$$C_{eq} = \frac{\sum_{j=1}^m (C_j \cdot |U_j|^2 + C_j \cdot |U_{j+1}|^2)}{|U_{eq}|^2 + |U_{pcc}|^2} \quad (13)$$

式中: C_j 为第 j 台风机对应线路的电容; U_j 、 U_{j+1} 分别为第 j 和 $j+1$ 台风机的出口侧电压; U_{eq} 为该机群风机等值后的出口侧电压; U_{pcc} 为并网点电压。

4 风电场等值模型参数辨识方法

针对多个机组聚合时等值参数的计算问题, 现有文献常采用容量加权等解析方法。为提高等值精度, 减小等值模型与原机群详细模型动态特性之间的误差, 有必要对解析方法所获得的等值参数作进一步优化。本文针对分群聚合后的模型, 将各参数聚合值作为初值, 以等值模型与系统详细模型 PCC 点功率动态特性之间的误差最小为优化目标, 提出合理的参数辨识方案优化等值模型参数。

4.1 参数灵敏度分析

由于风电机组涉及参数众多, 为保证有效性需采用灵敏度分析方法确定具体参数辨识方案。针对电机部分, 考虑到其作为旋转设备经长期运行后, 定子电阻以及 dq 轴电感可能与出厂值存在差异, 因此将其选为待分析参数。针对控制部分, 由于风机各控制环节涉及的参数对于系统遭受扰动期间的动态行为起着关键作用, 因此将机侧与网侧控制环节对应参数及网侧电流限幅值均列为待分析参数。

各参数有功平均灵敏度 \bar{S}_p 和无功平均灵敏度 \bar{S}_Q 的计算方法为^[33]

$$\bar{S}_p = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left| \frac{P'(t) - P(t)}{5\%P(t)} \right| \quad (14)$$

$$\bar{S}_Q = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left| \frac{Q'(t) - Q(t)}{5\%Q(t)} \right| \quad (15)$$

式中: N 为采样点数; $P(t)$ 、 $Q(t)$ 分别为模型采用原始参数时第 t 个采样点对应有功和无功功率的动态响应值; $P'(t)$ 、 $Q'(t)$ 分别为当待分析参数在原始参数基础上增加 5% 时第 t 个采样点对应有功和无功功率的动态响应值。

考虑到模型聚合时受限环节影响有功功率动态特性被分为两类, 显然两种情况下各参数灵敏度存在差异, 故针对单等值机模型, 在 0.05~0.2 s 设置 PCC 点电压跌落至 0.48 p.u., 分别计算风速在 9 m/s (第 I 类动态特性) 和 11 m/s (第 II 类动态特性)

两种情况下的参数灵敏度, 如表 1、表 2、图 4、图 5 所示。

由表 1 可知, L_{dq} 及 K_{sp} 、 K_{si} 的有功和无功灵

表 1 第 I 类动态特性对应参数平均灵敏度

Table 1 Average sensitivity of parameters corresponding to dynamic characteristics of Class I

参数	有功灵敏度	无功灵敏度
定子电阻 R_s	0.0516	0.0022
定子 dq 轴电感 L_{dq}	0	0
机侧控制器比例系数 K_{sp}	0	0
机侧控制器积分系数 K_{si}	0	0
网侧电压控制器比例系数 K_{vp}	0.0477	0.0022
网侧电压控制器积分系数 K_{vi}	0.0380	0.0024
网侧电流控制器比例系数 K_{ip}	0.0471	0.0023
网侧电流控制器积分系数 K_{ii}	0.0375	0.0021
无功支撑系数 K_d	0.0574	0.0551
逆变器电流上限值 I_{max}	0	0

表 2 第 II 类动态特性对应参数平均灵敏度

Table 2 Average sensitivity of parameters corresponding to dynamic characteristics of Class II

参数	有功灵敏度	无功灵敏度
定子电阻 R_s	0.0343	0.0016
定子 dq 轴电感 L_{dq}	0	0
机侧控制器比例系数 K_{sp}	0	0
机侧控制器积分系数 K_{si}	0	0
网侧电压控制器比例系数 K_{vp}	0.0331	0.0020
网侧电压控制器积分系数 K_{vi}	0.0234	0.0014
网侧电流控制器比例系数 K_{ip}	0.0337	0.0020
网侧电流控制器积分系数 K_{ii}	0.0325	0.0015
无功支撑系数 K_d	0.1096	0.0518
逆变器电流上限值 I_{max}	0.2177	0.0145

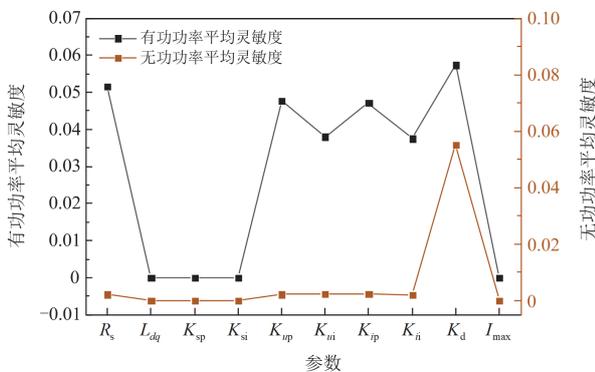


图 4 第 I 类动态特性对应参数平均灵敏度

Fig. 4 Average sensitivity of parameters corresponding to dynamic characteristics of Class I

敏度均为 0, 且此时网侧 d 轴电流未达限幅值, I_{max} 灵敏度也为 0, 因此上述参数均不参与辨识, 取聚合值即可。由于 K_d 的有功和无功灵敏度均较大, 且其余参数的无功灵敏度几乎为 0, K_d 与其余参数难以同时辨识, 因此可优先对 K_d 进行优化, 固定 K_d 后再对其余 5 个参数进行优化。

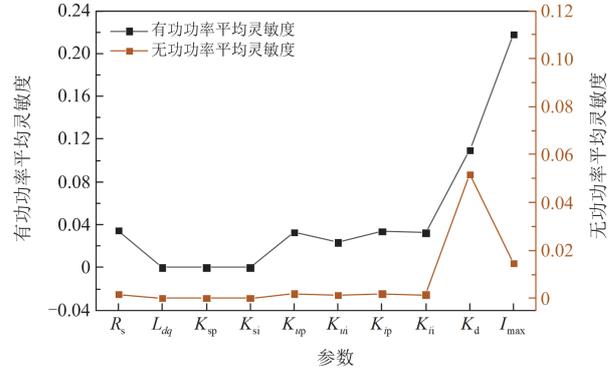


图 5 第 II 类动态特性对应参数平均灵敏度

Fig. 5 Average sensitivity of parameters corresponding to dynamic characteristics of Class II

由表 2 可知, L_{dq} 、 K_{sp} 、 K_{si} 灵敏度仍为 0, 故不参与辨识。此时由于网侧电流被限幅, 除 K_d 和 I_{max} 外, 其余参数灵敏度均有一定程度下降, 可行的辨识方案是优先对 K_d 和 I_{max} 进行优化, 固定二者值后再优化其余参数。

4.2 等值模型参数辨识方案

由于风电场聚合模型通常含两台或更多台等值机, 若同时对所有机组进行辨识, 存在参数多、参数之间交互影响的问题, 为获得理想的结果, 本文提出整体参数辨识方案具体如下。

1) 单机分步辨识。对于单等值机模型, 灵敏度为 0 的参数不参与辨识, 剩余参数中优先辨识高灵敏度参数, 再辨识其余参数。

2) 多机依次辨识。等值容量较大的机组参数灵敏度通常较高, 因此对每个等值机按照容量由大到小依次进行辨识。当等值机容量相同时, 选取等值阻抗较小的机组优先辨识^[25]。此时目标函数 f_1 为

$$f_1 = \min \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [(P_{eq}(t) - P_{real}(t))^2 + (Q_{eq}(t) - Q_{real}(t))^2]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

式中: $P_{eq}(t)$ 、 $Q_{eq}(t)$ 分别为等值机基于参数辨识值仿真时输出的第 t 个采样点对应的有功和无功功率; $P_{real}(t)$ 、 $Q_{real}(t)$ 分别为同群内各机组详细模型输出的第 t 个采样点对应的有功之和、无功之和。

3) 等值阻抗辨识。由于等值阻抗也会影响输出功

率, 为保证等值模型与详细模型在 PCC 点的功率一致, 需对等值阻抗进行辨识优化, 此时目标函数 f_2 为

$$f_2 = \min \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [(P_{eq_PCC}(t) - P_{real_PCC}(t))^2 + (Q_{eq_PCC}(t) - Q_{real_PCC}(t))^2]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

式中: $P_{eq_PCC}(t)$ 、 $Q_{eq_PCC}(t)$ 分别为基于等值模型仿真时 PCC 点输出的第 t 个采样点对应的有功和无功功率; $P_{real_PCC}(t)$ 、 $Q_{real_PCC}(t)$ 分别为详细模型 PCC 点输出的第 t 个采样点对应的有功和无功功率。

5 仿真算例

为验证所提分群聚合方法与参数辨识方案的有效性, 在 Matlab/Simulink 软件中搭建由 24 台容量为 1.5 MW 的 D-PMSG 组成的风电场详细模型, 同一馈线上风机间距为 0.5 km, 各馈线均经过 1.2 km 的集电线路汇集到 PCC 点, 风电场风速设置如图 6 所示, 风电场详细模型结构如图 7 所示。

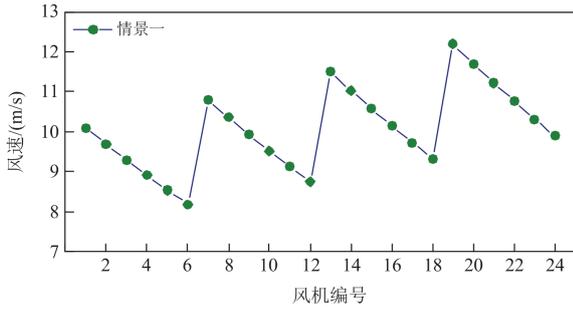


图 6 情景一各机组风速分布

Fig. 6 Wind speed distribution of wind turbines in Scenario 1

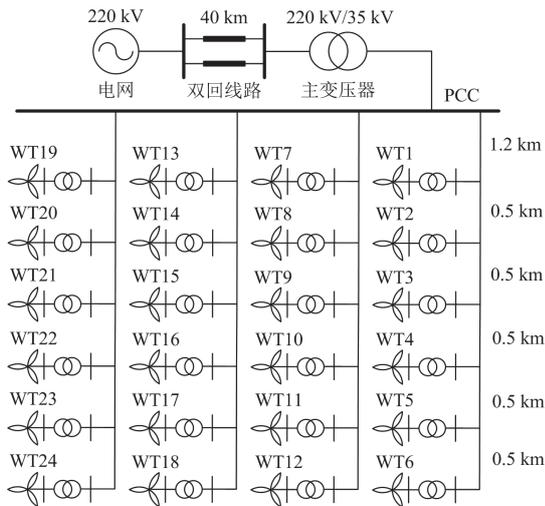


图 7 风电场详细模型结构图

Fig. 7 Detailed model structure of wind farm

5.1 分群聚合

设置无穷大电源在 0.05~0.2 s 发生理想电压跌落, 使 PCC 点电压在此期间跌落至 0.456 p.u.(情景一), 提取各风机有功功率动态轨迹时间序列数据, 根据故障期间有功功率的明显差异, 将属于第 I 类动态特性的机组 WT3—WT6、WT10—WT12 和 WT18 划分为一群, 对于其余 16 台机组, 采用 DTW 方法计算其有功时间序列之间的距离, 并进一步采用 NJW 算法进行聚合, 计算各分类数对应 SC 系数与 DBI 指数, 如图 8 所示。

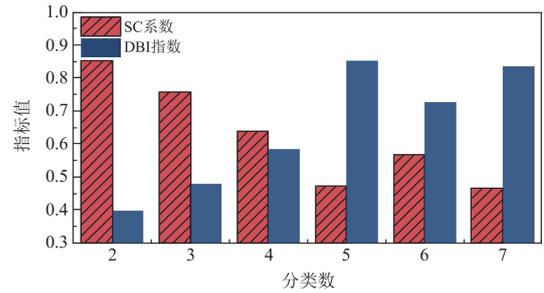


图 8 各分类数对应 SC 系数与 DBI 指数

Fig. 8 Corresponding SC coefficient and DBI index for each classification number

由图 8 可知, 当分类数为 2 时对应 SC 系数最大、DBI 指数最小, 因此最优聚类数为 2。综合两次分群结果可得, 24 台风机最终分群结果如表 3 所示。

表 3 最终分群结果

Table 3 Final clustering results

等值机编号	风机编号	容量/MW
WT _{eq,1}	WT3—WT6, WT10—WT12, WT18	12
WT _{eq,2}	WT1—WT2, WT7—WT9, WT15—WT17, WT22—WT24	16.5
WT _{eq,3}	WT13—WT14, WT19—WT21	7.5

5.2 参数辨识

根据分群结果对模型参数进行聚合, 按照各等值机组容量由大到小确定参数辨识顺序为 WT_{eq,2}、WT_{eq,1}、WT_{eq,3}, 以参数的聚合值为初值, 采用自适应螺旋飞行麻雀搜索算法对各参数进行优化^[34], 设置算法中种群规模为 30, 最大迭代次数为 30, 各参数搜索范围如表 4 所示。最终等值风电场参数辨识结果如表 5 所示。

为进一步对比, 除本文方法外, 采用两阶段分群及常规等值参数计算方法(等值参数未经优化)针对该情景进行等值计算, 将其作为等值方法 1, 并将根据机端故障稳态电压与初始风速进行分群的方法^[21]作为等值方法 2, 仍采用常规方法计算其等值

参数。3 种方法等值前后有功、无功功率动态特性及电压、电流拟合结果如图 9 所示。

表 4 参数搜索范围

Table 4 Search range of parameters

参数	搜索范围/%
K_d	96~104
I_{max}	95~105
R_s	50~150
K_{up} 、 K_{in}	50~150
K_{ip} 、 K_{ii}	50~150
R_{eq} 、 X_{eq}	80~120

表 5 等值风电场参数辨识结果

Table 5 Parameters identification results of equivalent wind farm

参数	WT _{eq,1}	WT _{eq,2}	WT _{eq,3}
K_d	1.4889	1.4785	1.4765
$I_{max}/p.u.$	1.2000	1.2093	1.2104
$R_s/p.u.$	0.0363	0.0218	0.0251
K_{up}	2.4640	2.4503	3.5403
K_{in}	22.3235	13.5000	39.9913
K_{ip}	2.9259	2.4738	2.3910
K_{ii}	13.9399	6.3485	5.1106
$R_{eq} + jX_{eq}/\Omega$	0.3213+j0.6708	0.1341+j0.3452	0.2440+j0.4754

由图 9 可知, 本文的辨识方法针对功率、电压和电流的拟合效果最好, 等值方法 1 次之, 其原因是本文方法在合理分群的基础上进一步对等值参数进行优化, 使等值结果更精确。另外, 由于等值方法 2 为仅根据故障特性进行分群, 所得等值模型在故障期间的等值效果相对于经两阶段分群所得等值模型效果较差, 进一步验证了本文所提方法对提高等值模型拟合精度的有效性。

5.3 等值方法精度分析与误差评价

为进一步验证本文辨识方法在不同风速和电压跌落情景下的等值精度, 设置情景二、三的风速分布如图 10 所示, 对应 PCC 点电压跌落分别为 0.6 p.u.、0.3 p.u., 同样采用上述 3 种方法进行等值计算, 分群结果如表 6 所示。

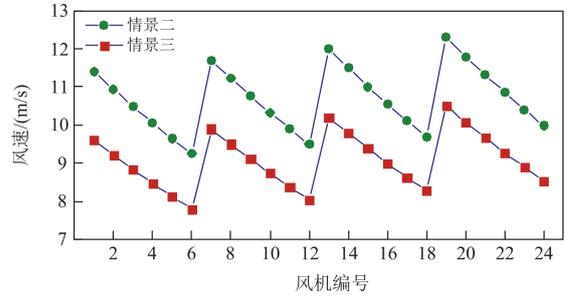


图 10 情景二、三各机组风速分布

Fig. 10 Wind speed distribution of wind turbines in Scenario 2 and 3

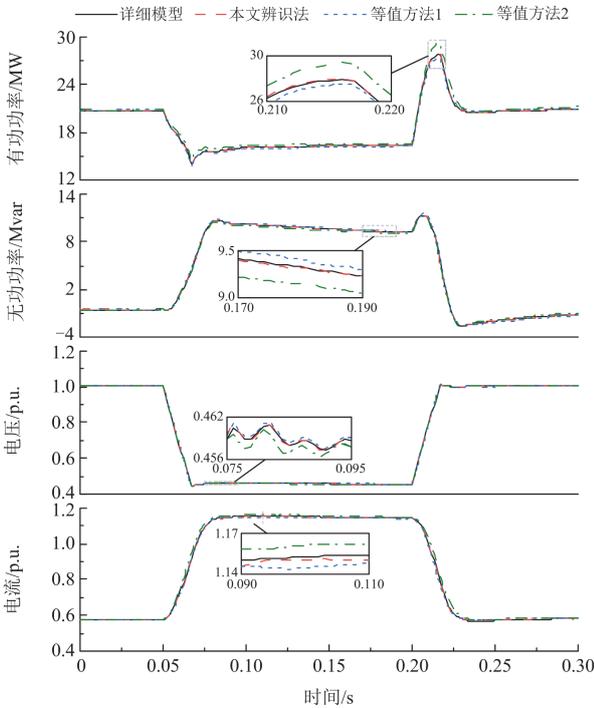


图 9 等值前后风电场 PCC 点功率响应及电压、电流曲线
Fig. 9 Power response, voltage and current curves at the PCC of wind farm before and after equivalence

表 6 情景二、三分群结果

Table 6 Clustering results of Scenario 2 and 3

情景	等值机编号	风机编号	容量/MW
情景二	WT _{eq,1}	WT3—WT6, WT10—WT12, WT16—WT18, WT23, WT24	18
	WT _{eq,2}	WT1, WT7, WT13, WT14, WT19, WT20	9
	WT _{eq,3}	WT2, WT8, WT9, WT15, WT21, WT22	9
情景三	WT _{eq,1}	WT1, WT7, WT8, WT13—WT15, WT19—WT22	15
	WT _{eq,2}	WT2—WT5, WT9—WT12, WT16—WT18, WT23, WT24	19.5
	WT _{eq,3}	WT6	1.5

对于情景二, 由于等值机 WT_{eq,2} 与 WT_{eq,3} 的容量相同, WT_{eq,2}、WT_{eq,3} 对应等值阻抗分别为 $0.1244 + j0.3684 \Omega$ 、 $0.2121 + j0.8185 \Omega$, 因此优先辨识等值阻抗较小的等值机 WT_{eq,2}, 情景二等值机参数整体辨识顺序为 WT_{eq,1}、WT_{eq,2}、WT_{eq,3}。对于情景三, 由于等值机 WT_{eq,3} 仅含 WT6 一个机组, 因此其参数直接取原参数即可, 无需辨识, 其余两

机组辨识顺序为 WT_{eq_2} 、 WT_{eq_1} 。辨识结果与曲线拟合情况如表 7、表 8、图 11、图 12 所示。

表 7 情景二参数辨识结果

Table 7 Parameters identification results in Scenario 2

参数	WT_{eq_1}	WT_{eq_2}	WT_{eq_3}
K_d	1.5063	1.4976	1.4974
$I_{max}/p.u.$	1.2000	1.1973	1.1959
$R_s/p.u.$	0.0291	0.0396	0.0288
K_{ap}	2.3453	2.7256	2.9296
K_{ai}	22.6782	38.4389	24.7380
K_{ip}	2.0758	1.9811	1.4703
K_{fi}	11.4918	11.4274	13.1053
$R_{eq} + jX_{eq}/\Omega$	0.1198+j0.5801	0.0995+j0.3352	0.2359+j0.9187

表 8 情景三参数辨识结果

Table 8 Parameters identification results in Scenario 3

参数	WT_{eq_1}	WT_{eq_2}	WT_{eq_3}
K_d	1.5100	1.5031	1.5000
$I_{max}/p.u.$	1.2018	1.1923	1.2000
$R_s/p.u.$	0.0391	0.0408	0.0272
K_{ap}	2.4329	2.4985	2.5000
K_{ai}	22.6145	22.4403	27.0000
K_{ip}	4.0000	2.5268	2.0000
K_{fi}	11.9276	7.2907	10.0000
$R_{eq} + jX_{eq}/\Omega$	0.0669+j0.2577	0.1407+j0.4487	2.4966+j6.4511

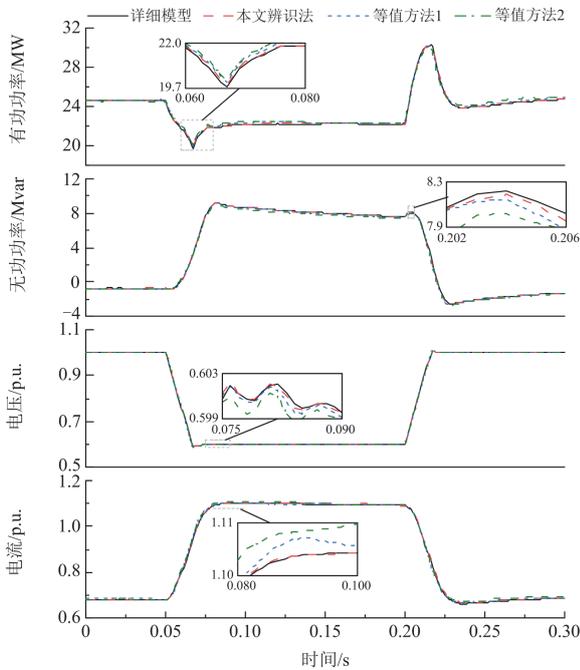


图 11 情景二等值前后 PCC 点功率响应及电压、电流曲线
Fig. 11 Power response, voltage and current curves at the PCC of wind farm before and after equivalence in Scenario 2

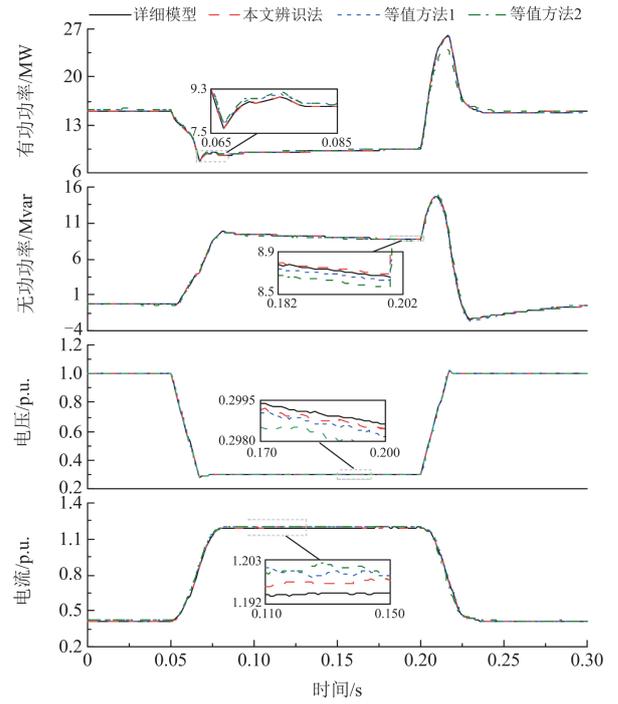


图 12 情景三等值前后 PCC 点功率响应及电压、电流曲线
Fig. 12 Power response, voltage and current curves at the PCC of wind farm before and after equivalence in Scenario 3

为量化等值模型与详细模型之间的误差，进一步引入均方根误差 E_{RMSE} 和平均相对误差 E_{MRE} 两个指标，其计算方法为

$$E_{RMSE} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \sqrt{(Y_{eq}(t) - Y_{real}(t))^2} \quad (18)$$

$$E_{MRE} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left| \frac{Y_{eq}(t) - Y_{real}(t)}{Y_{real}(t)} \right| \quad (19)$$

式中： $Y_{eq}(t)$ 为等值模型在第 t 个采样点对应的输出物理量值； $Y_{real}(t)$ 为详细模型在第 t 个采样点对应的输出物理量值。

根据式(18)和式(19)计算不同等值方法在 3 种情景下的功率、电压和电流的全过程等值误差，如表 9 所示。由表 9 可知，不同风速和电压跌落情况下各模型误差存在一定差异，但各情景下采用辨识方法所得模型误差均最小，其中有功功率的最大 E_{RMSE} 和 E_{MRE} 分别为 0.0010、0.0026，说明本文方法等值精度相对较高。此外，等值方法 1 所得模型由于等值参数为聚合值，未经优化，误差相对增大，等值方法 2 在各情景下相对于前两种方法误差均较大，等值效果不佳。

由于本文辨识法在有功功率的等值精度方面相对其余方法有显著提升，为进一步评价所提方法的

等值效果, 从有功功率动态特性出发分别计算其在故障稳态与暂态过程中的等值误差, 如表 10 所示。由表 10 可知, 在故障稳态阶段, 本文辨识法的最大 E_{RMSE} 为 7.1159×10^{-4} , 相对等值方法 1 和 2 的最大 E_{RMSE} 分别降低了 79.67%、87.06%; 在故障暂态阶

段, 本文辨识法的最大 E_{RMSE} 为 0.0039, 相对等值方法 1 和 2 的最大 E_{RMSE} 分别降低了 63.21%、85.50%。因此, 所提方法在故障稳态与暂态过程中均维持较低的误差水平, 具备更好的等值效果。

表 9 不同情景下各等值方法的全过程等值误差

Table 9 Full process equivalence error of each equivalence method under different scenarios

情景	方法	有功误差		无功误差		电压误差		电流误差	
		E_{RMSE}	E_{MRE}	E_{RMSE}	E_{MRE}	E_{RMSE}	E_{MRE}	E_{RMSE}	E_{MRE}
情景一	本文辨识法	9.5422×10^{-4}	0.0019	9.1312×10^{-4}	0.0316	1.8508×10^{-4}	2.4053×10^{-4}	0.0025	0.0034
	等值方法 1	0.0037	0.0072	0.0031	0.0557	3.4249×10^{-4}	5.7730×10^{-4}	0.0042	0.0053
	等值方法 2	0.0077	0.0144	0.0040	0.0685	5.2025×10^{-4}	9.1496×10^{-4}	0.0083	0.0102
情景二	本文辨识法	0.0010	0.0015	7.6894×10^{-4}	0.0262	1.3475×10^{-4}	1.7126×10^{-4}	0.0028	0.0034
	等值方法 1	0.0032	0.0051	0.0010	0.0317	2.2020×10^{-4}	3.0957×10^{-4}	0.0031	0.0039
	等值方法 2	0.0056	0.0086	0.0042	0.0622	4.0297×10^{-4}	6.1432×10^{-4}	0.0056	0.0067
情景三	本文辨识法	0.0010	0.0026	5.6246×10^{-4}	0.0135	1.4824×10^{-4}	3.4057×10^{-4}	0.0024	0.0039
	等值方法 1	0.0034	0.0098	0.0016	0.0574	2.6199×10^{-4}	6.1952×10^{-4}	0.0045	0.0058
	等值方法 2	0.0070	0.0171	0.0030	0.1071	5.8701×10^{-4}	0.0014	0.0075	0.0113

表 10 不同情景下各等值方法在故障稳态与暂态过程中的有功功率误差

Table 10 Active power errors of various equivalent methods in steady-state and transient fault processes under different scenarios

情景	方法	故障稳态		故障暂态	
		E_{RMSE}	E_{MRE}	E_{RMSE}	E_{MRE}
情景一	本文辨识法	6.0863×10^{-4}	0.0013	0.0034	0.0066
	等值方法 1	0.0035	0.0077	0.0106	0.0198
	等值方法 2	0.0055	0.0123	0.0269	0.0473
情景二	本文辨识法	7.1159×10^{-4}	0.0012	0.0034	0.0052
	等值方法 1	0.0035	0.0056	0.0075	0.0118
	等值方法 2	0.0046	0.0074	0.0133	0.0204
情景三	本文辨识法	4.9833×10^{-4}	0.0019	0.0039	0.0087
	等值方法 1	0.0022	0.0085	0.0059	0.0179
	等值方法 2	0.0030	0.0117	0.0226	0.0471

5.4 等值模型适应性分析

为验证采用辨识方法所获模型的适应性, 以情景二(电压跌落为 0.6 p.u., 故障持续时间为 0.15 s)等值模型为对象, 设置实验一、二为 PCC 点电压跌落由 0.6 p.u.变为 0.4 p.u.、0.2 p.u.; 设置实验三为故障持续时间由 0.15 s 变为 0.25 s; 同时, 为验证模型针对不对称短路故障的适应情况, 设置实验四、五分别为双回线路处发生单相接地故障和两相接地故障。上述各实验对应的等值模型误差如表 11 所示, 由表 11 可知, 因为辨识方法针对等值模型参数进行了优化, 所以模型在不同电压跌落情景和故障持续时间下的等值误差均小于等值方法 1, 且能够适应不对称短路的情况。

表 11 各等值方法在不同实验中的全过程等值误差

Table 11 Equivalent error of each equivalence method in different experiments throughout the entire process

实验	方法	有功误差		无功误差		电压误差		电流误差	
		E_{RMSE}	E_{MRE}	E_{RMSE}	E_{MRE}	E_{RMSE}	E_{MRE}	E_{RMSE}	E_{MRE}
实验一	本文辨识法	0.0027	0.0046	0.0014	0.0284	1.6551×10^{-4}	2.7457×10^{-4}	0.0019	0.0022
	等值方法 1	0.0047	0.0087	0.0030	0.0459	2.8033×10^{-4}	5.3031×10^{-4}	0.0051	0.0056
实验二	本文辨识法	0.0017	0.0033	0.0017	0.0295	2.1745×10^{-4}	6.4989×10^{-4}	0.0025	0.0031
	等值方法 1	0.0031	0.0090	0.0026	0.0407	3.3696×10^{-4}	0.0012	0.0044	0.0055
实验三	本文辨识法	0.0012	0.0018	9.8264×10^{-4}	0.0297	1.2619×10^{-4}	1.6669×10^{-4}	0.0015	0.0018
	等值方法 1	0.0026	0.0039	0.0028	0.0443	2.0368×10^{-4}	3.0072×10^{-4}	0.0034	0.0041
实验四	本文辨识法	0.0019	0.0029	0.0018	0.1771	1.0072×10^{-4}	1.1538×10^{-4}	0.0019	0.0023
	等值方法 1	0.0040	0.0060	0.0035	0.2329	1.6721×10^{-4}	2.0863×10^{-4}	0.0049	0.0059
实验五	本文辨识法	0.0018	0.0026	0.0031	1.6841	1.3454×10^{-4}	1.7910×10^{-4}	0.0019	0.0025
	等值方法 1	0.0036	0.0056	0.0050	1.7049	3.4105×10^{-4}	4.8798×10^{-4}	0.0035	0.0043

6 结论

本文提出了一种考虑 LVRT 的直驱永磁风电场多机聚合辨识等值建模方法。首先根据两阶段分群方法得到风电机组分群结果, 然后利用容量加权法初步计算相应等值机组的参数, 最后以等值模型与详细模型在 PCC 点的功率动态特性误差最小为优化目标, 采用参数辨识策略对等值模型参数作进一步优化, 最终得到如下结论。

1) 本文所提两阶段分群方法在考虑风电机组 LVRT 期间动态特性差异的基础上进一步采用聚类算法实现二次分群, 所得模型各参数最大误差相对于仅根据故障特性分群降低 26%~56%。

2) 针对多机等值模型参数优化问题, 采用单机分步辨识、多机依次辨识以及等值阻抗辨识三者相结合的策略, 可有效解决等值模型涉及参数多、各参数之间存在交互影响的问题。

3) 在不同风速和电压跌落情况下, 风电场经两阶段分群及参数优化后所得模型等值精度均有所提高, 其中有功功率的最大均方根误差和平均相对误差相较参数优化前分别降低了 82.14%、73.47%。

4) 在某一运行情况下采用本文方法所得等值模型, 在发生不同类型短路故障、电压跌落变化以及故障持续时间变化等情景下仍具备一定的适应性, 且相对于参数未经优化的等值模型适应性更好。

在后续研究中, 将深入探究含不同 LVRT 策略的直驱永磁风电场等值参数辨识方法, 并进一步提高等值模型在多情景下的适应性。

参考文献

- [1] 国家发展和改革委员会. 中共中央、国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见 [EB/OL]. [2024-11-18]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
- [2] 陈国平, 董昱, 梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5493-5506.
CHEN Guoping, DONG Yu, LIANG Zhifeng. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5506.
- [3] 吴磊, 晁璞璞, 李甘, 等. 数据-模型混合驱动的风电场聚合等值建模方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 66-74.
WU Lei, CHAO Pupu, LI Gan, et al. Hybrid data-model driven aggregation equivalent modeling method for wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 66-74.
- [4] 古庭贇, 杨骥嘉, 林呈辉, 等. 基于单机等值与选择模态分析的风电场等值建模方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 102-111.
GU Tingyun, YANG Qijia, LIN Chenghui, et al. A wind farm equivalent modeling method based on single-machine equivalent modeling and selection modal analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 102-111.
- [5] 王晗玥, 许建中. 风电场站单机聚合模型倍乘元件阻抗参数设计[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 146-157.
WANG Hanyue, XU Jianzhong. Design of impedance parameters of a multiplier element in an aggregation model of a single wind turbine of a wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 146-157.
- [6] 张元, 郝丽丽, 戴嘉祺. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 138-146.
ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi. Overview of the equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.
- [7] 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.
- [8] ALI M, ILIE I, MILANOVIC J V, et al. Wind farm model aggregation using probabilistic clustering[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 309-316.
- [9] 余浩, 黎灿兵, 叶志亮, 等. 计及尾流效应的风电场短路故障动态等值建模[J]. 上海交通大学学报, 2024, 58(6): 798-805.
YU Hao, LI Canbing, YE Zhiliang, et al. Dynamic equivalence modeling of short-circuit faults in wind farms considering wake effect[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2024, 58(6): 798-805.
- [10] 韩佳, 苗世洪, 李力行, 等. 基于多视角迁移学习的风场内机群划分及等值风场参数综合优化[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4866-4881.
HAN Ji, MIAO Shihong, LI Lixing, et al. Wind turbines clustering in wind farm based on multi-view transfer learning and synthetic optimization of parameters in equivalent wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4866-4881.
- [11] 颜湘武, 李君岩. 基于主成分分析法的直驱式风电场分群方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 127-133.
YAN Xiangwu, LI Junyan. Grouping method of direct drive wind farm based on principal component analysis[J].

- Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 127-133.
- [12] 欧阳金鑫, 刁艳波, 郑迪, 等. 基于电流轨迹相似度的双馈风电机组电磁暂态同调分群方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2896-2904.
- OUYANG Jinxin, DIAO Yanbo, ZHENG Di, et al. A clustering method of coherent generators during electromagnetic transient process based on similar degrees of current trajectories for doubly fed wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2896-2904.
- [13] 李龙源. 直驱风电场动态等值建模方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- LI Longyuan. Study of dynamic equivalent modeling methods of wind farm with DDPMSGs[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [14] ZHU Q L, DING M, HAN P Q. Equivalent modeling of DFIG-based wind power plant considering crowbar protection[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016: 8426492.
- [15] 高远, 金宇清, 鞠平, 等. 考虑 Crowbar 动作特性的 DFIG 风电场动态等值研究[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 628-633.
- GAO Yuan, JIN Yuqing, JU Ping, et al. Dynamic equivalence of wind farm composed of double fed induction generators considering operation characteristic of Crowbar[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 628-633.
- [16] 吴志鹏, 曹铭凯, 李银红. 计及 Crowbar 状态改进识别的双馈风电场等值建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 603-614.
- WU Zhipeng, CAO Mingkai, LI Yinhong. An equivalent modeling method of DFIG-based wind farm considering improved identification of Crowbar status[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 603-614.
- [17] 蒋昊, 许立雄, 崔晓丹, 等. 基于保护电路运行状态增强识别的双馈风电场等值建模[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(22): 129-142.
- JIANG Hao, XU Lixiong, CUI Xiaodan, et al. Equivalent modeling of a DFIG farm based on enhanced recognition of protection circuit operating state[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(22): 129-142.
- [18] 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 equivalence method for doubly fed wind farms based on low voltage ride through power characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 95-103.
- [19] JIN Y, WU D, JU P, et al. Modeling of wind speeds inside a wind farm with application to wind farm aggregate modeling considering LVRT characteristic[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(1): 508-519.
- [20] 王磊, 盖春阳, 王恒. 基于改进 D-K 聚类算法的直驱型风电场动态等值建模[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3): 48-55.
- WANG Lei, GAI Chunyang, WANG Heng. Dynamic equivalence method of PMSG wind farms based on improved D-K clustering algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(3): 48-55.
- [21] 李东晟, 沈沉, 吴林林, 等. 考虑初始风速与机端故障稳态电压跌落程度的直驱风机故障响应特性分类及其判别方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1247-1260.
- LI Dongsheng, SHEN Chen, WU Linlin, et al. Study on fault response characteristics classification and discriminant method of PMSG considering initial wind speed and drop degree of terminal fault steady-state voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1247-1260.
- [22] LI D, SHEN C, LIU Y, et al. A dynamic equivalent method for PMSG-WTG based wind farms considering wind speeds and fault severities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(2): 3738-3751.
- [23] 孙华东, 李佳豪, 李文锋, 等. 大规模电力系统仿真用新能源场站模型结构及建模方法研究(二): 机电暂态模型[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2190-2202.
- SUN Huadong, LI Jiahao, LI Wenfeng, et al. Research on model structures and modeling methods of renewable energy station for large-scale power system simulation (II): electromechanical transient model[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2190-2202.
- [24] 张剑, 何怡刚. 基于轨迹灵敏度分析的永磁直驱风电场等值模型参数辨识[J]. 电工技术学报, 2020, 35(15): 3303-3313.
- ZHANG Jian, HE Yigang. Parameters identification of equivalent model of permanent magnet synchronous generator wind farm based on analysis of trajectory sensitivity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(15): 3303-3313.
- [25] 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.
- [26] 陈磊, 郑燊聪, 蒋禹齐, 等. 基于改进混沌布谷鸟算法的风电场多机等值参数辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 99-106.
CHEN Lei, ZHENG Shencong, JIANG Yuqi, et al. Identifying multi-machine equivalent parameters of wind farms based on an improved chaotic cuckoo search algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 99-106.
- [27] 杨旻才, 余建峰, 欧阳金鑫, 等. 电网故障下永磁直驱风电机组机电暂态全过程等值建模方法[J]. 电工电能新技术, 2021, 40(5): 22-33.
YANG Mincai, YU Jianfeng, OUYANG Jinxin, et al. Equivalent modeling method of whole electromechanical transient state of permanent magnet direct-drive wind turbine under grid fault[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(5): 22-33.
- [28] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [29] 齐金玲, 李卫星, 晁璞璞, 等. 直驱风电场实用化等值方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(12): 50-57.
QI Jinling, LI Weixing, CHAO Pupu, et al. Practical equivalent method for direct-driven wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 50-57.
- [30] 陶洋, 李鹏亮, 沈敬红, 等. 基于 DTW 的时间序列流相似性搜索方法[J]. 计算机工程与设计, 2017, 38(12): 3291-3297.
TAO Yang, LI Pengliang, SHEN Jinghong, et al. Similarity search of time series based on dynamic time warping[J]. Computer Engineering and Design, 2017, 38(12): 3291-3297.
- [31] 盖春阳. 基于低电压穿越控制的直驱风电场等值建模研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
GAI Chunyang. Research on PMSG wind farm equivalent modeling based on low voltage ride through control[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [32] 邓俊, 张阳, 李怡然, 等. 基于高斯混合模型聚类的双馈风电场动态等值建模方法[J]. 太阳能学报, 2024, 45(1): 342-350.
DENG Jun, ZHANG Yang, LI Yiran, et al. Dynamic equivalence modeling of doubly-fed wind farm based on Gaussian mixture model clustering algorithm[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(1): 342-350.
- [33] CARI E P T, ALBERTO L F C, ERLICH I. Assessment of model parameters to identify an equivalent wind power plant[C] // 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, June 29, 2015, Eindhoven, Netherlands: 1-5.
- [34] 邱亚娴. 麻雀搜索算法的改进研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2023.
QIU Yaxian. Research on the improvement of sparrow search algorithm[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2023.

收稿日期: 2024-05-14; 修回日期: 2024-11-28

作者简介:

左佳鑫(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为新能源机组等值建模; E-mail: zjx20010327@163.com

杨秀(1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为分布式发电与微电网的运行与仿真; E-mail: yangxiu721102@126.com

赵晓莉(1979—), 女, 通信作者, 硕士, 讲师, 研究方向为电力系统规划与稳定控制, 新能源接入电力系统的运行分析. E-mail: zhaoxiaoli@shiep.edu.cn

(编辑 许威)