

10-30-2023

Electromagnetic Transient Equivalent Modeling Method for Wind Power Clusters Adapted to Expected Faults

Dongsheng Li

Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China,
lids19@mails.tsinghua.edu.cn

Ye Liu

Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Yankan Song

Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610042, China

Chen Shen

Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China,
shenchen@mail.tsinghua.edu.cn

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Electromagnetic Transient Equivalent Modeling Method for Wind Power Clusters Adapted to Expected Faults

Abstract

Abstract: Based on an existing equivalent modeling method for individual wind farm, an iterative simulation-based equivalent modeling method for wind power clusters is proposed and a software development for equivalent modeling of wind power clusters is completed by using CloudPSS-XStudio suite. The system integrates expected fault selection, equivalent parameter calculation and result analysis, which provides support for dynamic security assessment of power systems with large-scale wind power clusters. The equivalent method takes the average wind speed of each wind farm and the expected faults as input, and obtains the cluster index of each wind turbine based on the iterative simulation of the equivalent model. Moreover, the clustering equivalent model is formed based on the cluster index. The correctness of the method is verified based on the example of IEEE 39-node system integrated with wind power cluster.

Keywords

direct-driven permanent magnet synchronous generator(PMSG) -based wind farm, dynamic equivalent method, dynamic security assessment, power systems, CloudPSS platform

Recommended Citation

Li Dongsheng, Liu Ye, Song Yankan, et al. Electromagnetic Transient Equivalent Modeling Method for Wind Power Clusters Adapted to Expected Faults[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(10): 2101-2112.

针对预想故障的风电集群电磁暂态等值建模方法

李东晟¹, 刘晔¹, 宋炎侃², 沈沉^{1*}

(1. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 2. 清华大学 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610042)

摘要: 基于现有针对单个风电场的等值建模方法, 提出一种适用于风电集群的等值建模方法, 利用 CloudPSS-XStudio 套件完成了风电集群等值建模系统开发, 该系统将预想故障选择、等值参数计算和结果分析进行了集成, 为含大规模风电集群的电力系统的动态安全分析提供了支撑。以各风电场平均风速以及预想故障作为输入, 基于等值模型的迭代仿真得到各个风电机组的分群指标, 并完成对风电集群的分群等值建模。以某实际风电集群拓扑接入 IEEE 39 节点系统作为测试算例, 验证了所提方法的正确性。

关键词: 直驱风电场; 动态等值建模; 动态安全评估; 电力系统; CloudPSS 平台

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)10-2101-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-FZ0791

引用格式: 李东晟, 刘晔, 宋炎侃, 等. 针对预想故障的风电集群电磁暂态等值建模方法[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(10): 2101-2112.

Reference format: Li Dongsheng, Liu Ye, Song Yankan, et al. Electromagnetic Transient Equivalent Modeling Method for Wind Power Clusters Adapted to Expected Faults[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(10): 2101-2112.

Electromagnetic Transient Equivalent Modeling Method for Wind Power Clusters Adapted to Expected Faults

Li Dongsheng¹, Liu Ye¹, Song Yankan², Shen Chen^{1*}

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610042, China)

Abstract: Based on an existing equivalent modeling method for individual wind farm, an iterative simulation-based equivalent modeling method for wind power clusters is proposed and a software development for equivalent modeling of wind power clusters is completed by using CloudPSS-XStudio suite. The system integrates expected fault selection, equivalent parameter calculation and result analysis, which provides support for dynamic security assessment of power systems with large-scale wind power clusters. The equivalent method takes the average wind speed of each wind farm and the expected faults as input, and obtains the cluster index of each wind turbine based on the iterative simulation of the equivalent model. Moreover, the clustering equivalent model is formed based on the cluster index. The correctness of the method is verified based on the example of IEEE 39-node system integrated with a wind power cluster.

Keywords: direct-driven permanent magnet synchronous generator(PMSG)-based wind farm; dynamic equivalent method; dynamic security assessment; power systems; CloudPSS platform

收稿日期: 2023-06-30 修回日期: 2023-07-25

基金项目: 国家电网公司科技项目(4000-202214067A-1-1-ZN)

第一作者: 李东晟(1997-), 男, 博士生, 研究方向为风电场等值建模与控制。E-mail: lids19@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 沈沉(1970-), 男, 教授, 博士, 研究方向为电力系统分析与控制。E-mail: shenchen@mail.tsinghua.edu.cn

0 引言

风力发电以其安全、清洁和高效的特点, 已经被广泛应用于电力系统^[1]。然而, 由于风电的随机性和波动性, 大规模风电并网对电力系统的稳定运行有很大影响^[2]。为了保证供电可靠性, 有必要对含大规模风电并网的电力系统进行动态安全评估(dynamic security assessment, DSA)。一个大型风电场一般由几十台或几百台风电机组组成, 若对每台风电机组都进行详细建模, 将会使仿真计算的规模和复杂度大大增加, 甚至出现“维数灾”^[3]问题。因此, 为对含大规模风电接入的电力系统进行动态安全分析, 对风电场建立适用于预想故障的等值模型具有重要意义。

目前, 国内外针对风电场的动态等值建模方法主要分为 2 种: ①将整个风电场等值为一台风机, 称为单机等值法; ②将具有相同运行特性的风电机组进行聚类 and 分群, 并将同一机群的风电机组等值为一个发电单元, 称为多机等值法。

在单机等值法中, 通常利用各风电机组的运行风速及风功率曲线得到各个风电机组的有功功率, 再利用平均功率以及风功率曲线反算得到等值机组的等效风速^[4-5]。单机模型的其他参数可以用容量加权法求得, 单机等值法适用于风电场内机组风速差异不大的情况。然而, 随着风电场规模的不断增大, 风电场内风电机组的运行风速差异较大, 响应特性也有所差异, 单机等值法难以准确描述整个风电场的外特性。此时就需要利用多机等值法, 以反映机组间运行状态的差异。

在多机等值法中, 具有相似运行特性的风电机组被划分为一群, 再进一步利用一台等值机来描述该类风电机组的特性。这类方法通常选择能够表征风电机组运行状态的一个或一组特征量作为分群指标。例如, 文献[6]根据风电机组初始风速及故障后转子电流同调性进行分群; 文献[7]选取了故障期间有功、无功等有明显可辨识性的参

数时间序列作为多视图聚类的指标, 提出了一种多视角增量转移模糊 C 均值的聚类算法, 提高了风电场聚类的稳定性和准确性; 文献[8]将故障期间风电机组出口处的无功功率作为故障特征影响因素, 利用改进 BP 算法对风电机组进行分群。上述方法均用到了故障实际发生后的系统信息, 然而在 DSA 过程中, 故障并未实际发生, 以上文献中所提的方法难以获取分群指标, 也就难以应用于 DSA 中。也有多机等值法仅利用故障发生前的信息对风电机组进行分群, 例如, 文献[9]依据运行风速的差异对各风电机组进行分群; 文献[10]以短路故障前瞬间的风电机组转子转速作为双馈异步风力发电机(doubly fed induction generator, DFIG)分群的指标, 并采用 K-means 算法将具有相近指标的机组分到同一机群中。这些方法仅用到了故障前的机组信息, 可以用于预想故障的分析, 但风电机组的响应特性不仅与故障前的运行状态有关, 还与故障严重程度有关, 仅利用故障前的机组信息难以将具有相同响应特性的风电机组进行正确的分群。文献[11-12]提出了适用于预想故障分析的风电场分群等值建模方法, 该方法同时考虑风电机组的运行状态以及故障严重程度对风电机组响应特性的影响, 对于具有斜坡恢复特性的风电机组能够更准确地描述整个风电场在故障恢复期间的响应特性。

本文在文献[12]的基础上进一步研究其在风电集群层面的适用性, 本文方法可用于含多个风电场的风电集群, 并且当集群内含有其他有源设备时仍然适用。本文主要对永磁直驱风电机组(direct-driven permanent magnet synchronous generator, PMSG)进行研究。将某实际风电集群拓扑接入 IEEE 39 节点系统, 与详细模型以及已有等值方法进行对比, 验证了本文方法在风电集群层面的适用性。并进一步依托 CloudPSS 平台开发了适用于预想故障分析的风电场集群等值模型自动生成软件。

1 直驱风电机组仿真模型构建

1.1 直驱风电机组结构

本文采用的 PMSG 结构及主要控制如图 1 所示, 其中, 叶轮、传动系统及永磁同步发电机数学模型与常规模型一致, 具体可参考文献[13]。机侧变流器采用不可控整流桥和 Boost 升压斩波电路的结构, 用于实现风电机组的最大功率跟踪控制; 网侧变流器为三相全桥逆变电路, 用于实现风电机组网侧输出功率的解耦控制。

1.2 直驱风电机组控制策略

直驱风电机组的控制主要包括机侧变流器控制和网侧变流器控制两部分。

1.2.1 机侧变流器控制策略

为了使叶轮尽可能多地捕获风能, 机侧变流器采用最大功率跟踪控制策略, 通过调节 Boost 环节的占空比来控制直流侧的电流, 进而控制电磁转矩以及发电机的转速, 使叶轮始终运行在最优叶尖速比的状态, 从而达到最大功率跟踪的目的。最优发电机转子转速计算式为

$$\omega_{opt} = \lambda_{opt} v_w / r \tag{1}$$

式中: ω_{opt} 为最大功率跟踪控制下的发电机转子转速参考值; λ_{opt} 为最优叶尖速比, 在最大功率跟踪控制下为常数; v_w 为风速; r 为叶轮叶片半径。

通过对发电机转子转速的 PI 控制可以得到直

流侧电流的参考值, 再通过对直流侧电流的 PI 控制, 得到对 Boost 电路的控制信号, 实现机侧变流器的最大功率跟踪控制。

1.2.2 网侧变流器控制策略

网侧变流器的控制策略可以分为稳态控制、故障控制以及故障恢复控制 3 个部分。

(1) 稳态控制: 风电机组正常运行时, 网侧变流器按照最大功率跟踪控制输出有功功率, 风速高于额定值时, 桨距角控制会将有功功率维持在额定值来保护机械和电路系统。另外, 稳态时为实现单位功率因数运行, 无功参考值一般为 0。

(2) 故障控制: 在故障期间, 网侧变流器采用无功优先的控制策略, 在机端电压发生跌落时, 风电机组按国标要求输出指定的无功电流^[14]:

$$I_{qref} = 1.5 \times (0.9 - U_T) I_N, 0.2 \leq U_T \leq 0.9 \tag{2}$$

式中: I_{qref} 为无功电流参考值; U_T 为机端电压标幺值; I_N 为风电机组额定电流。

有功功率的参考值为

$$I_{dref} = \min \{ I_{dref1}, I_{dmax} \} \tag{3}$$

$$I_{dmax} = \sqrt{I_{max}^2 - I_{qref}^2}$$

式中: I_{dref} 为故障期间有功电流参考值; I_{dref1} 为定直流侧电压控制得到的有功电流参考值; I_{dmax} 为变流器允许的电流最大值。式(3)意味着在故障期间, 风电机组输出国标要求的无功电流后, 变流器的剩余容量用于发出有功功率。

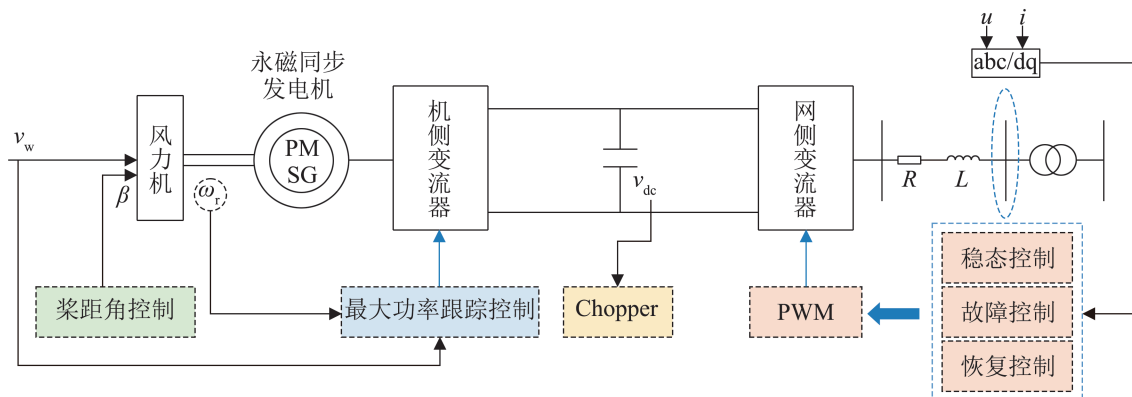


图 1 PMSG 结构及控制策略
Fig. 1 Structure and control strategy of PMSG

(3) 故障恢复控制: 在故障结束后, 若有有功功率没有恢复到故障前的值, 一般通过限制有功电流的恢复速率, 来使风电机组的有功功率以某一固定斜率恢复至正常值^[15-16], 以此来减少机械应力对发电机的影响。如图 2 所示, 在故障持续期间有功电流的参考值为 I_{dref} , 故障结束后有功电流的参考值为 I_{dref1} , 通过斜率限幅环节来限制有功电流参考值的恢复速率, 进而限制有功功率的恢复速率。

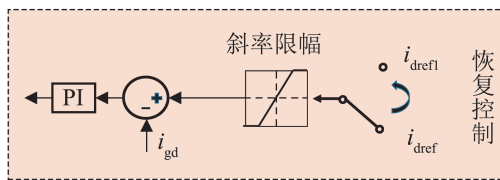


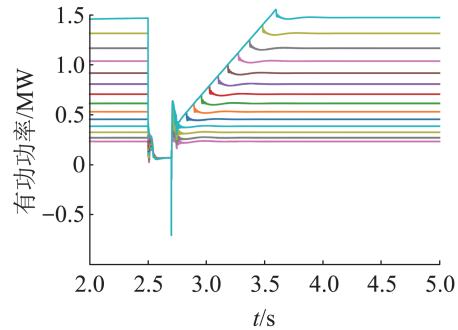
图 2 故障恢复控制
Fig. 2 Fault recovery control

1.2.3 直驱风电机组响应特性测试

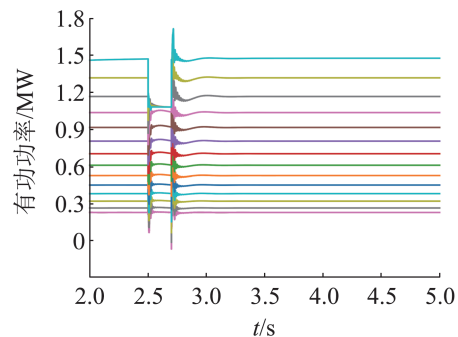
CloudPSS 平台为大规模电力系统和多场景仿真研究提供了高效、灵活、经济的解决方案^[17]。为了对所提直驱风电机组模型的特性进行验证, 本文基于 CloudPSS 平台中的 Simstudio 仿真工具建立直驱风电机组的详细模型, 并利用 CloudPSS SDK 对单台直驱风电机组进行批量仿真, 以此来验证控制策略的有效性。

将单台直驱风电机组与无穷大电网相连, 在 2.5 s 时电网发生电压跌落, 在 2.7 s 时恢复, 以电压跌落至 0.2 p.u. 以及 0.7 p.u. 为例, 对该算例进行 5 s 的仿真。设置运行风速从切入风速 3.5 m/s, 以 0.4 m/s 为间隔增加至额定风速 11.1 m/s, 当运行风速在额定风速以上时, 由于桨距角控制的存在, 风电机组的输出功率与额定情况基本一致。各个风速下风电机组的响应特性如图 3 所示。从图 3(a)可以看出, 当电压跌落较深时, 故障期间变流器容量大部分用于输出无功功率, 能够输出的有功功率较少, 在故障结束后各风电机组的有功功率均按照指定斜率恢复至指定值。当电压跌落较浅时, 如图 3 (b)所示, 部分风电机组在故障期间就能够发出与

正常工作时相同的有功功率, 故障结束后各风电机组有功功率均能瞬间恢复至正常值, 证明了所搭建直驱风电机组模型控制策略的有效性。



(a) 电压跌落至 0.2 p.u.



(b) 电压跌落至 0.7 p.u.

图 3 风电机组在不同工况下有功暂态响应曲线
Fig. 3 Active power transient response curves under different working conditions

2 风电集群等值建模方法

2.1 风电场分群等值建模方法

文献[12]在对单台风电机组的控制策略进行分析后, 发现直驱风电机组在不同运行状态及不同故障程度下可能出现 3 种不同的响应特性, 因此, 可以依据风电机组的响应特性将风电机组分为对应的 3 个分群。而风电机组的响应特性同时由风速和故障严重程度决定, 因此, 分群指标包括运行风速以及故障结束瞬间的机端电压。该方法中, 单个风电场最终被等值为最多 3 台风电机组, 并且能够更准确地描述风电场在故障恢复期间的特性, 本文将基于该方法, 进一步对风电场集群进行等值建模。

2.2 风电场集群等值建模方法

本文在中国某实际风电场集群拓扑的基础上进行研究, 基于单一风电场等值建模方法, 进一步对风电场集群进行等值建模。风电场集群拓扑如图 4 所示, 每一个风电场内都包含 100 台额定容量为 1.5 MW 的直驱风电机组, 各风电场公共连接点(point of common coupling, PCC)到汇集点以及汇集点之间的距离均设为 5 km。单个风电场的拓扑如图 5 所示。

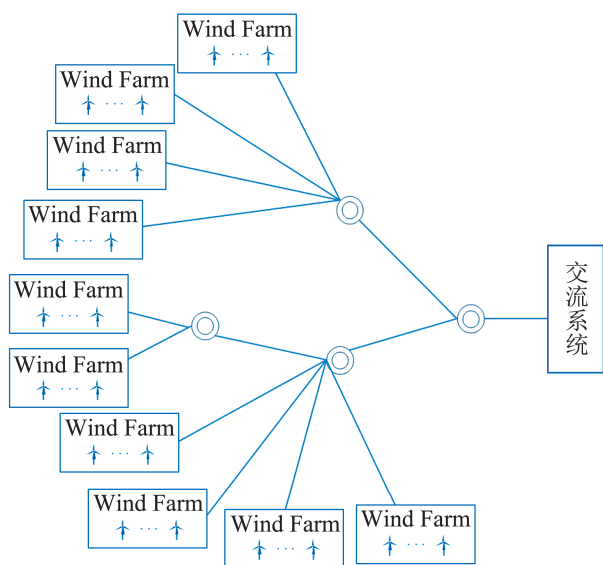


图 4 风电集群拓扑

Fig. 4 Topology of wind power cluster

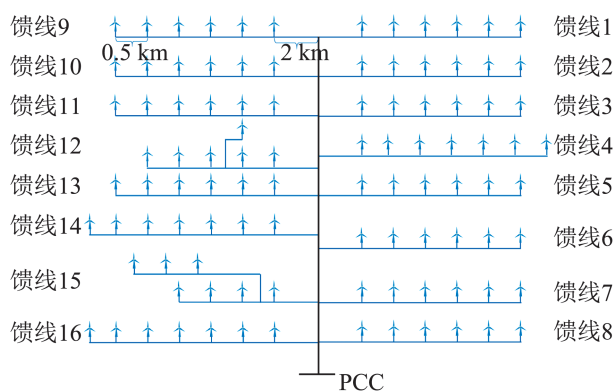


图 5 风电场拓扑

Fig. 5 Topology of wind farm

对于图 4 中的风电集群, 先利用单风电场的等值方法在正常运行状态下对各个风电场进行三

机等值建模, 再基于等值模型对交流系统中发生的预想故障进行仿真分析。利用仿真得到的 PCC 点电压对各个风电场的等值模型进行参数更新, 进一步利用更新后的等值模型继续对预想故障进行仿真分析, 直到各个风电场 PCC 点电压均收敛到允许的误差精度以内, 即可认为已通过迭代仿真得到了各个风电场准确的 PCC 点电压以及最终的等值模型, 该迭代过程如图 6~7 所示。

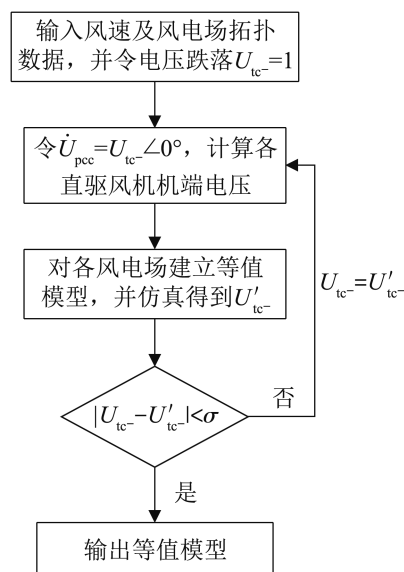


图 6 迭代仿真流程图

Fig. 6 Flow chart of iterative simulation

在上述迭代过程完成后, 每个风电场都被等值为 3 台等值机, 原来含有 1 000 台风电机组的风电集群被等值为 30 台风电机组。由于上述迭代过程均是利用等值模型完成, 而且在实际分析时发现一般经过 1~2 次迭代各风电场 PCC 点电压就会收敛, 因此, 该等值方法大大降低了对含大规模风电集群电力系统进行安全分析的仿真复杂度。

2.3 集电线路等值方法

本文以等值前后平均电压跌落相同为原则对集电线路进行等值。在上文所提方法中, 对风电集群进行等值时各个风电机组机端电压跌落均为已知量, 各风电机组输出的有功、无功功率与机端电压跌落的关系为

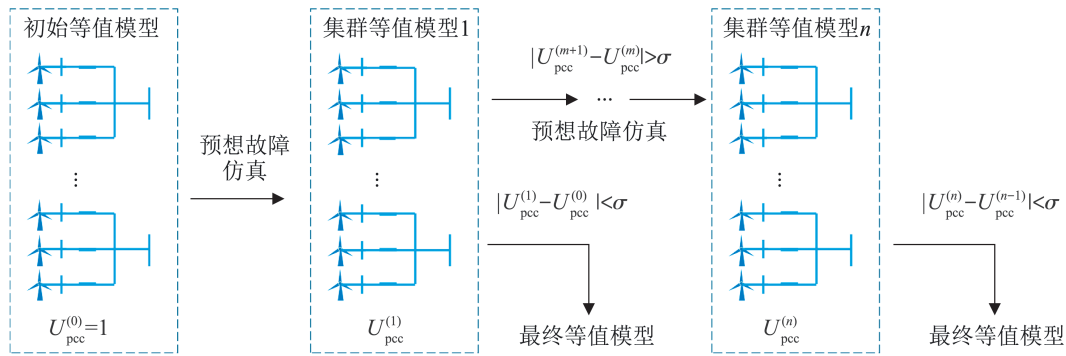


图 7 风电集群迭代仿真等值方法

Fig. 7 Iterative simulation equivalent method for wind power cluster

$$P = \frac{3}{2} I_{\text{dref}} |\dot{U}_{\text{dip}}| \quad (4)$$

$$Q = \frac{3}{2} I_{\text{qref}} |\dot{U}_{\text{dip}}|$$

式中： P 、 Q 分别为电压跌落期间风电机组输出的有功和无功功率； \dot{U}_{dip} 为风电机组机端电压跌落。结合式(2)、(3)即可计算各风电机组输出的有功和无功功率。

各个风电机组输出的电流为

$$\dot{I}_z = ((P + jQ) / \dot{U}_{\text{dip}})^* \quad (5)$$

则各等值机的等值线路为

$$Z_{\text{eq}} = \left(\sum_{i=1}^N \dot{U}_{\text{dip}_i} / N - \dot{U}_{\text{pcc}} \right) / \sum_{i=1}^N \dot{I}_{z_i} \quad (6)$$

式中： \dot{U}_{dip_i} 为第*i*台风电机组的机端电压跌落； N 为该分群中风电机组数量； $\sum_{i=1}^N \dot{U}_{\text{dip}_i} / N$ 为该分群中风电机组的平均电压跌落； \dot{U}_{pcc} 为风电场PCC点电压跌落； \dot{I}_{z_i} 为第*i*台风电机组的输出电流。结合式(4)~(6)即可计算等值集电线路参数。

3 算例验证

基于CloudPSS仿真平台，将图4所示风电集群接入IEEE 39节点系统的30号节点来代替原有的发电机，如图8所示。设计了2个具体故障来验证所提风电集群等值建模方法的正确性，第1个为在风电集群出口处30号节点发生三相对称短路故障，该故障下风电集群电压跌落较深；第2个

为在风电场远处的24号节点发生三相对称短路故障，该故障下风电集群电压跌落较浅。

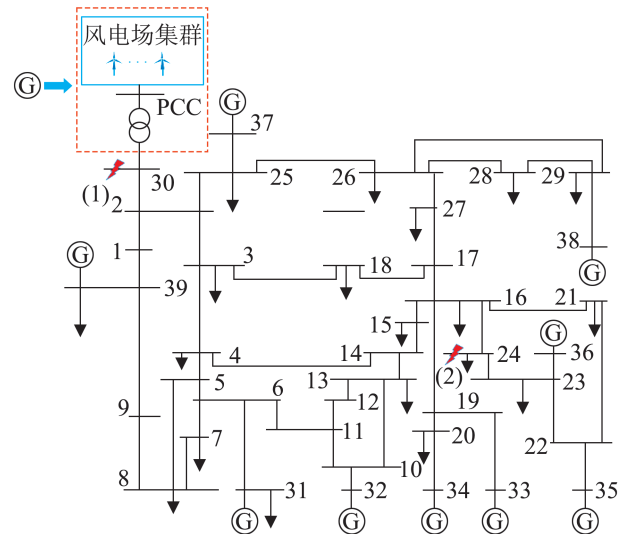


图 8 风电集群接入 IEEE 39 节点系统

Fig. 8 IEEE 39-bus system with a wind farm cluster integrated

各风电机组风速通过风电场输入风速以及Jensen模型计算，即

$$v_{wi} = v_{w0} dec^{i-1} \quad (7)$$

$$dec = 1 - (1 - (1 - C_t)^{1/2}) \left(\frac{r}{r + kd} \right)^2$$

式中： v_{w0} 为风电场输入风速； v_{wi} 为馈线上第*i*台风电机组的风速； dec 为衰减系数； C_t 为推力系数； k 为尾流衰减常数； d 为相邻风电机组之间的距离。在本文所用算例中，各风电场的输入风速为9~11 m/s之间的正态分布，推力系数取0.2，尾

流衰减常数取 0.04。

3.1 风电集群出口故障

在 $t=3$ s 时设置 30 号节点发生三相对称短路故障, 且在 3.1 s 时故障被切除, 同样对算例进行 5 s 的仿真。利用第 2 节所提风电场集群等值方法对等值模型参数进行求解, 各风电场 PCC 点电压在 2 次迭代后即满足收敛精度, 迭代仿真过程中的各风电场 PCC 点电压如表 1 所示。

表 1 PCC 点电压迭代过程

Table 1 PCC voltage iteration process

风电场编号	第 1 次迭代	第 2 次迭代
1	0.102 9	0.102 8
2	0.102 9	0.102 8
3	0.102 9	0.102 8
4	0.102 9	0.102 8
5	0.106 8	0.106 7
6	0.106 8	0.106 7
7	0.102 9	0.102 8
8	0.104 9	0.104 8
9	0.104 9	0.104 8
10	0.104 9	0.104 7

由于电压跌落较深, 所有风机均属于同一分群, 此处不具体介绍分群结果。在 10 个风电场的公共汇集点将详细模型、所提等值模型以及简单的单机等值模型^[18]的功率输出结果进行对比, 如图 9~10 所示。

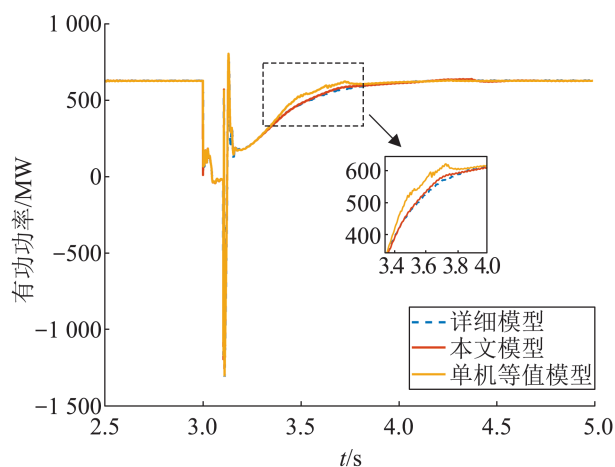


图 9 风电集群有功功率输出

Fig. 9 Output active power of wind power cluster

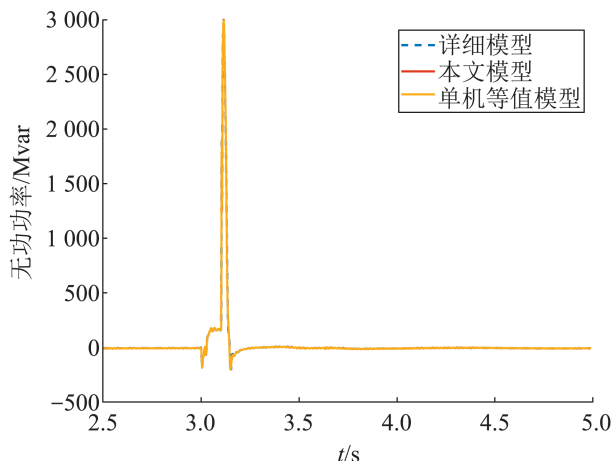


图 10 风电集群无功功率输出

Fig. 10 Output reactive power of wind power cluster

风电集群出口发生三相短路故障时, 各风电场 PCC 点电压跌落较深, 各风电机组故障期间发出的有功功率较少, 故障恢复期间存在斜坡恢复过程。因此, 本文所提风电集群等值方法与传统单机等值方法相比, 在故障持续期间差异不大, 在故障恢复期间本文所提方法能够更准确地描述风电集群有功恢复过程的特性。在无功功率输出特性方面, 各模型差异不大。

3.2 风电集群远端故障

在 $t=3$ s 时设置 24 号节点发生三相对称短路故障, 且在 3.1 s 时故障被切除。以风电场 1 为例具体介绍分群等值过程, 将馈线 1 上最接近 PCC 点的风电机组编为 1 号, 该馈线上其他风电机组分别编号为 2~6 号, 基于此规则对各馈线上节点进行编号, 其中, 馈线 16 末端风机为第 100 号风机, 各风电机组的运行风速如图 11 所示。

基于各风电机组机端电压求解方法, 可以得到风电场 1 内各风电机组的机端电压, 如图 12 所示。

利用文献[11]所提的基于风电机组机端电压以及运行风速进行分群的方法, 将风电场 1 内的各风电机组分 3 群, 结果如表 2 所示。

同样将所提方法与单机等值模型以及详细模型进行对比, 风电集群在公共汇集点输出的功率特性如图 13~14 所示。

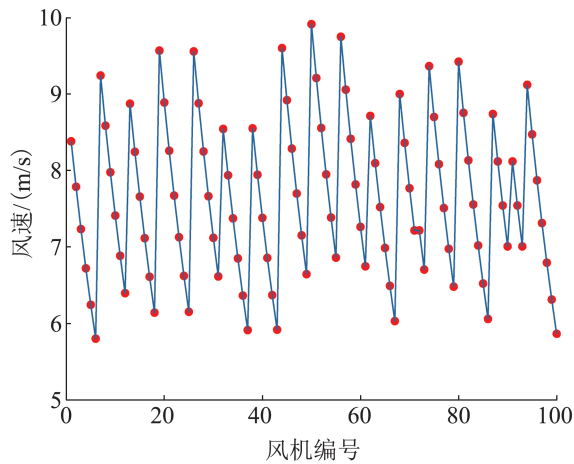


图 11 风机运行风速
Fig. 11 Wind speeds of PMSGs

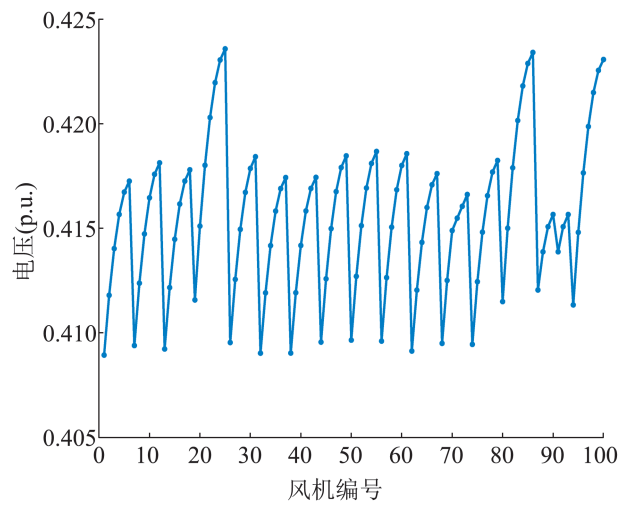


图 12 风机机端电压
Fig. 12 Terminal voltages of PMSGs

表 2 分群结果
Table 2 Clustering results

分群	风机编号
1	-
2	1, 2, 7, 8, 9, 13, 14, 19, 20, 21, 26, 27, 28, 32, 33, 38, 39, 44, 45, 46, 50, 51, 52, 53, 56, 57, 58, 59, 62, 63, 68, 69, 70, 74, 75, 76, 80, 81, 82, 87, 88, 91, 94, 95, 96
3	3, 4, 5, 6, 10, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 22, 23, 24, 25, 29, 30, 31, 34, 35, 36, 37, 40, 41, 42, 43, 47, 48, 49, 54, 55, 60, 61, 64, 65, 66, 67, 71, 72, 73, 77, 78, 79, 83, 84, 85, 86, 89, 90, 92, 93, 97, 98, 99, 100

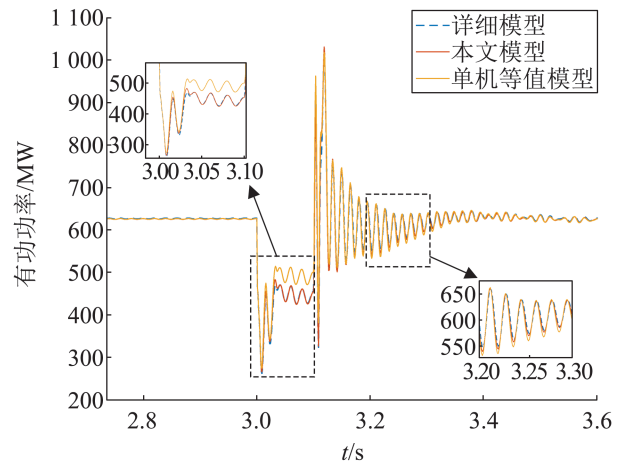


图 13 风电集群有功功率输出
Fig. 13 Output active power of wind power cluster

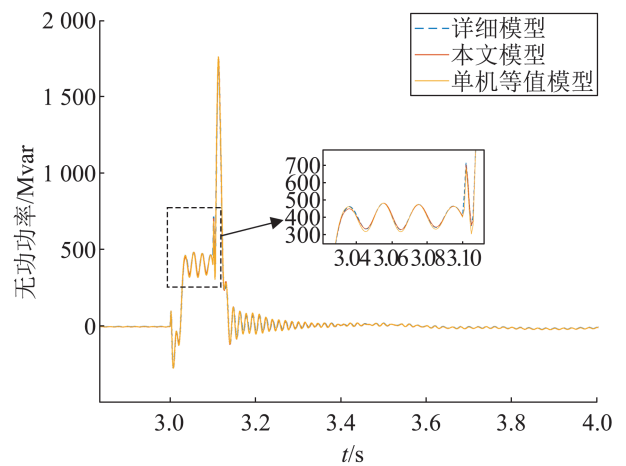


图 14 风电集群无功功率输出
Fig. 14 Output reactive power of wind power cluster

风电集群远端发生三相短路故障时，各风电场 PCC 点电压跌落相对较浅，各风电机组故障期间发出的有功功率有所差异，因此，所提方法相较于对单个风电场进行单机等值的方法在故障持续期间更准确。在该算例中，对等值模型进行 3 次迭代仿真后各风电场 PCC 点电压才能满足收敛精度，因此，相较于算例 1 所需时间更长，各模型仿真所需时间以及准确度可参考表 3，其中，等值误差利用的是与详细模型相比时各模型的有功功率均方根误差。

表 3 模型仿真时间及精度
Table 3 Simulation time and accuracy of models

算例编号	主要参数	详细模型	本文模型	单机等值模型
1	仿真时间/s	4 632	18.30	10.50
	等值误差/%	-	1.67	5.85
2	仿真时间/s	4 430	22.10	9.70
	等值误差/%	-	1.31	5.53

4 适用于预想故障分析的风电集群等值建模软件开发

CloudPSS-XStudio 是 CloudPSS 平台的重要组成部分, 使得 CloudpSS 从最初的仿真软件发展为一个高级应用软件开发平台和运行环境, 具备了实现各种电力系统高级应用的能力。XStudio 包含 3 个套件, 分别为 SimStudio 模型工坊、FuncStudio 函数工坊、AppStudio 应用工坊。其中, Simstudio 提供电力系统建模、仿真等功能; FuncStudio 提供第三方开发的程序模块接入、调试和管理等功能; AppStudio 提供人机交互界面构建以及应用发布等功能, Xstudio 的具体构架及功能可参考文献[19]。本节基于 CloudPSS-XStudio 实现了适用于预想故障分析的风电集群等值建模软件的开发。

该风电集群等值建模软件基于 CloudPSS 的电磁仿真内核, 可用于生成在给定预想故障下风电集群的等值模型, 并基于等值模型输出各汇集点的功率特性。其构建过程主要包含 4 个步骤。

步骤 1: 在 CloudPSS Simstudio 中构建待研究的电力系统模型, 并形成预想故障集。

步骤 2: 利用 CloudPSS FuncStudio 调用等值模型参数计算函数; 利用 CloudPSS SDK 将参数输入至 SimStudio 的模型中进行仿真分析, 迭代至各风电场 PCC 点电压收敛即可得到最终等值模型。

步骤 3: 在 CloudPSS AppStudio 中设计软件的用户界面, 展示 FuncStudio 中等值模型计算参数以及功率输出等结果。

步骤 4: 进行软件的调试、运行及发布。

图 15 为该软件的运行步骤。流程图中各功能分别在不同的套件中实现, 其中, 黄色模块代表 Simstudio、蓝色代表 FuncStudio、绿色代表 AppStudio。表 4 进一步给出了各模块的功能。

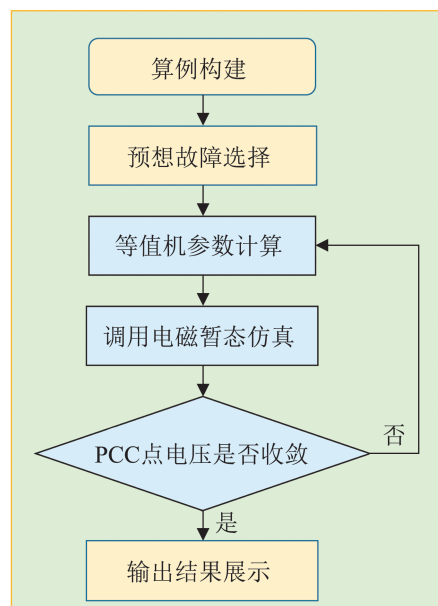


图 15 风电集群等值建模软件运行步骤
Fig. 15 Operation steps of wind power cluster modeling software

表 4 模块功能
Table 4 Functions of modules

步骤	调用模块	功能
1	算例管理模块	指定研究的原始算例及预想故障集合
2	参数计算模块	在给定 PCC 电压跌落情况下计算等值机参数
3	仿真调用模块	调用电磁暂态仿真对预想故障进行仿真分析
4	结果展示模块	输出等值机参数及功率特性

利用算例管理模块搭建本文系统以及风电场集群的仿真模型, 并指定要研究的预想故障集合; 利用等值模型参数计算模块来计算等值模型参数; 利用仿真调用模块将等值模型参数输入至仿真模型中, 并对预想故障进行电磁暂态仿真, 得到各风电场 PCC 点电压后判断各 PCC 点电压是否收敛, 若已收敛至允许的误差范围, 则利用结果展

示模块输出等值模型参数及各指定点的功率特性；若电压未收敛，则继续调用参数计算模块和仿真调用模块更新等值参数，直至各风电场 PCC 点电压收敛。用户可基于该等值模型对所构建的电力系统进行动态安全分析。

该等值建模软件界面如图 16 所示，其中，第 3 步中的结果对比部分已在算例验证部分给出。系统可以展示等值机参数、PCC 点电压迭代过程以及各指定点输出的功率特性等结果。



图 16 风电集群等值建模软件界面

Fig. 16 Graphical interface of wind power cluster modeling software

5 结论

基于现有针对单个风电场的等值建模方法, 提出了一种基于迭代仿真的风电集群等值建模方法, 该方法对于任意工况以及预想故障均能够高效地形成风电集群的等值模型。由于考虑了故障严重程度的影响, 所提方法相比于传统方法能够更准确地描述风电集群在故障期间以及在恢复过程中的功率特性, 相较于详细模型也大大降低了仿真复杂度。

本文基于 CloudPSS-XStudio 套件完成了适用于预想故障分析的风电集群等值建模软件开发, 用户可以自行搭建电力系统网络, 并根据需求构建预想故障集合, 最后在等值计算平台中输入风电场的运行风速并选择待分析的故障, 平台即可在简单的人机交互界面下快速地形成风电集群的等值模型, 提高仿真效率, 可服务于含大规模风电集群电力系统的动态安全分析。

参考文献:

- [1] Mahela O P, Shaik A G. Comprehensive Overview of Grid Interfaced Wind Energy Generation Systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 57: 260-281.
- [2] Wang Yun, Hu Qinghua, Li Linhao, et al. Approaches to Wind Power Curve Modeling: a Review and Discussion [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 116: 109422.
- [3] Zou Jianxiao, Peng Chao, Yan Yan, et al. A Survey of Dynamic Equivalent Modeling for Wind Farm[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 40: 956-963.
- [4] Brochu J, Larose C, Gagnon R. Validation of Single-and Multiple-machine Equivalents for Modeling Wind Power Plants[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, 26(2): 532-541.
- [5] Qi Jinling, Chao Pupu, Jin Xiaoming, et al. Dynamic Equivalent Modeling of Direct-drive PMSG Wind Farms Based on the Transient Active Power Response Characteristics[C]//2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMCECCE Asia). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 2925-2930.
- [6] 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.
- [7] Han Ji, Miao Shihong, Chen Zhe, et al. A Novel Wind Farm Equivalent Model for High Voltage Ride Through Analysis Based on Multi-view Incremental Transfer Clustering[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 135: 107527.
- [8] 王增平, 杨国生, 汤涌, 等. 基于特征影响因子和改进BP算法的直驱风机风电场建模方法[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(9): 2604-2614.
Wang Zengping, Yang Guosheng, Tang Yong, et al. Modeling Method of Direct-driven Wind Generators Wind Farm Based on Feature Influence Factors and Improved BP Algorithm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(9): 2604-2614.
- [9] 叶林, 饶日晟, 郎燕生, 等. 考虑有向功率特性的风电场功率输出模型[J]. *电网技术*, 2016, 40(12): 3775-3783.
Ye Lin, Rao Risheng, Lang Yansheng, et al. Power Output Model of Wind Farms Considering Directional Power Characteristics[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(12): 3775-3783.
- [10] 张保会, 李光辉, 王进, 等. 风电接入对继电保护的影响(二)-双馈式风电场电磁暂态等值建模研究[J]. *电力自动化设备*, 2013, 33(2): 1-7.
Zhang Baohui, Li Guanghui, Wang Jin, et al. Impact of Wind Farm Integration on Relay Protection(2): DFIG-based Wind Farm Electromagnetic Transient Equivalent Model[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2013, 33(2): 1-7.
- [11] 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/OL]. *中国电机工程学报*. (2023-01-13) [2023-04-15]. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1211>.
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/OL]. *Proceedings of the CSEE*. (2023-01-13) [2023-04-15]. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1211>.
- [12] Li Dongsheng, Shen Chen, Liu Ye, et al. A Dynamic Equivalent Method for PMSG-WTG Based Wind Farms Considering Wind Speeds and Fault Severities[J/OL]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2023. (2023-05-24) [2023-04-14]. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2023.3279497>.

- [13] 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, 2019.
Gai Chunyang. Research on PMSG Wind Farm Equivalent Modeling Based on Low Voltage Ride through Control[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [14] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 风力发电机组故障电压穿越能力测试规程: GB/T 36995-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019: 1-20.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Wind Turbines-test procedure of Voltage Fault Ride Through Capability: GB/T 36995-2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019: 1-20.
- [15] Lorenzo-Bonache A, Honrubia-Escribano A, Fortmann J, et al. Generic Type 3 WT Models: Comparison Between IEC and WECC Approaches[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(7): 1168-1178.
- [16] 孙大卫, 吴林林, 刘辉, 等. 弱电网直驱风机低电压穿越特性及其对机端暂态电压的影响[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4777-4786.
Sun Dawei, Wu Linlin, Liu Hui, et al. Effect of the Low Voltage Ride Through Characteristics on PMSG Terminal Transient Voltage in Weakly-synchronized Grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4777-4786.
- [17] Song Yankan, Chen Ying, Yu Zhitong, et al. CloudPSS: A High-performance Power System Simulator Based on Cloud Computing[J]. Energy Reports, 2020, 6, Supplement 9: 1611-1618.
- [18] Mercado-Vargas M J, D Gómez-Lorente, Rabaza O, et al. Aggregated Models of Permanent Magnet Synchronous Generators Wind Farms[J]. Renewable Energy, 2015, 83: 1287-1298.
- [19] 沈沉, 陈颖, 黄少伟, 等. 新型电力系统仿真应用软件设计理念与发展路径[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 75-86.
Shen Chen, Chen Ying, Huang Shaowei, et al. Design Idea and Development Path of Simulation Application Software for New Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 75-86.