

大规模风力发电等值仿真技术研究

阳同光^{1,3}, 吴世丹^{2,3}

(1.湖南城市学院 机械与电气工程学院, 湖南 益阳 413000; 2.南华大学 电气工程学院, 湖南 衡阳 421001; 3.智慧城市能源感知与边缘计算湖南省重点实验室, 湖南 益阳 413000)

摘要: 随着电网系统风电渗透率的提高,对所在地区电网的电能质量以及电能调度产生重大影响。为研究风电场在大扰动下的宏观动态响应特性,对风电场进行动态等值建模非常重要。针对风电场的动态等值建模研究,文章首先对现今主流的风机类型及其模型结构进行了简要介绍;然后对等值建模方法中的降阶法、单机等值法以及多机等值法做了比较和详细阐述,并对等值参数计算和集电网络等值进行了概述;最后总结了风电场动态等值建模尚存在的挑战,并对未来的研究方向进行了展望。

关键词: 风电渗透率; 动态等值; 等值参数计算; 集电网络等值

中图分类号: TK81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)09-1226-11

0 引言

随着风电渗透率不断提高,风电场的规模不断扩大,使得电网的安全稳定运行受到极大考验。由于风电场的功率输出产生间歇性以及波动性^[1],并网后输出功率的波动将对电网产生诸如电压波动、电压闪变以及“削谷填峰”的反调峰等不利影响;同时,电网发生故障时,也会影响风电场中电力电子等器件的正常运行。而大容量风电场并不能轻易脱网运行,这便要求风电场具备一定的故障穿越能力。为准确分析和评价大型风电场和电力系统之间的相互作用和影响,研究并建立合适的风电场等值模型很有必要^[2]。

在风电场的等值建模中,通常包括稳态等值模型及动态等值模型。其中,稳态等值模型主要用于风电场的稳态潮流计算,而动态等值模型主要用于研究风速波动以及电网故障时风电场的动态行为。在动态等值建模中,以保持风电场主要动态特性基本不变为基础,进行大幅的网络规模简化,既降低了模型复杂程度,又提高了仿真速度^[3]。动态等值模型可以分为基于聚合法的等值模型和基于降阶法的等值模型两大类,其中基于聚合法的等值模型又分为单机等值模型和多机等值模型。

本文将围绕风电场动态等值建模的研究进展及成果展开综述,首先对风电场的风机类型及模

型结构进行了简单介绍;然后对风电场动态等值方法中的降阶法、单机等值法和多机等值法进行了比较与叙述,并对等值参数计算以及集电网络等值进行了概括;最后对未来风电场的动态等值研究进行了展望。

1 风机类型及模型结构

风电场主要由风电机群、集电系统、升压变电站以及厂用电系统组成,如图 1 所示。

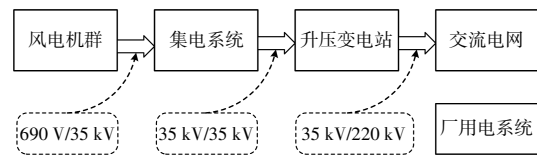


图 1 风电场组成结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of wind farm structure

风电机群包含成百上千台风电机组,发电机输出电压经机组机侧变压器升压至 10 kV 或 35 kV 后,再由集电线路收集并送至升压变电站,升压至 110 kV 或 220 kV 后输送到交流电网。目前用于商业用途的主流风力发电机大体分为直驱式永磁同步发电机(Direct-drive Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG)和双馈式感应发电机(Doubly-Fed Induction Generator, DFIG)^[4]。风电机组结构通常由风力机、传动链、发电机、变流器、机侧变压器以及风电机组监测与控制系统等部件构成^[5],其中变流器分为转子侧变流器(Rotor Side

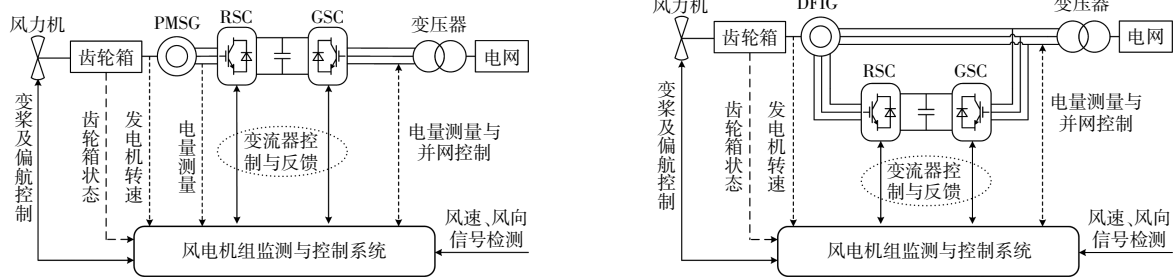
收稿日期: 2023-07-29。

基金项目: 国家自然科学基金(52377181);湖南省科技厅项目(2021GK2020);湖南省自然科学基金委项目(2021JJ30079)。

作者简介: 阳同光(1974-),男,博士,教授,研究方向为新能源控制、状态监测、故障诊断。E-mail: yangtongguang1@163.com

Converter, RSC)及网侧变流器(Grid Side Converter, GSC),实现发电机与电网之间功率的流动,同时

对发电机的控制及并网电流的逆变起着重要作用。风电机组的系统结构如图2所示。



(a)直驱式永磁同步发电机组的结构框架图 (b)双馈式感应发电机组的结构框架图

图2 风力发电机组系统结构
Fig.2 Wind turbine system structure

2 风电场动态等值建模方法

大型风电场通常包含成百台风电机组^[6,7]。实际中,电网更关注风电场整体对电网的动态稳定性的影响,从而采用动态等值建模的方法,建立一

个能准确反映风电场整体动态特性的风电场模型。常用的风电场动态等值建模方法有降阶法以及基于聚合等值的单机等值法和多机等值法3种,见表1。其中多机等值法使用最多。

表1 风电场动态等值法的比较

Table 1 Comparison of collector network equivalent methods

动态等值方法	优点	缺点	文献
降阶法	降低了风电场模型的阶数,明显减少了暂态时域仿真时间。	降阶法的等值风机基本失去原风机模型结构且计算量过大。	[8-15]
单机等值法	方法直观、计算简单。	对于机组运行点相差较大的风电场,单机等值模型误差一般较大,无法满足等值精度需求。	[16-30]
多机等值法	能更准确地反映风电场整体的动态特性,等值精度更高。	依赖合理有效的分群结果,且计算量更大。	[31-38]

2.1 降阶法

降阶法主要以降低风电场模型阶数,减少暂态时域仿真时间为目的,通常采用系统理论以及数学方法对风电场的微分方程模型进行降阶、化简处理^[8]。目前,基于降阶法的风电场等值建模研究主要对风电机组模型本身进行降阶分析^[9-15]。

2.2 单机等值法

单机等值法通常是将一个风电场的所有风力发电机等效为一台风力发电机,现代风力发电常用的是基于容量加权的单机等值法和基于参数辨识的单机等值法,单机等值示意图如图3所示。

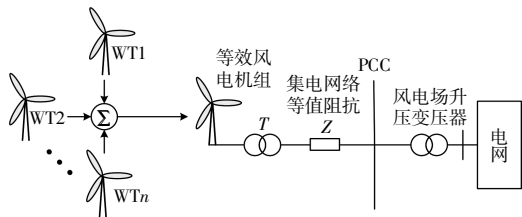


图3 单机等值示意图

Fig.3 Equivalent diagram of single machine

2.2.1 基于容量加权

基于容量加权的单机等值法以各机组自身额定容量与风电机组总容量之比作为权值系数,对风电机组各参数进行加权求和^[16],具有计算量小、应用简单的优点。文献[17]介绍两种常用容量加权等值方法,并给出了等值参数计算式,见图4。

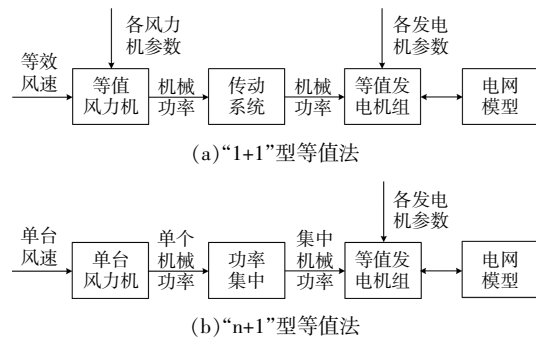


图4 基于容量加权单机等值方法

Fig.4 Equivalent method based on capacity-weighted stand-alone

2.2.2 基于参数辨识

基于参数辨识的单机等值法是以等值前后风电场输出特性的误差为优化目标,通过将实际风

电场的各输入输出数据与初步建立的“等价”模型进行拟合,并在此基础上不断修改模型,最终确定相关等值参数,使建立的模型具有较高的精确度,其辨识原理如图 5 所示。

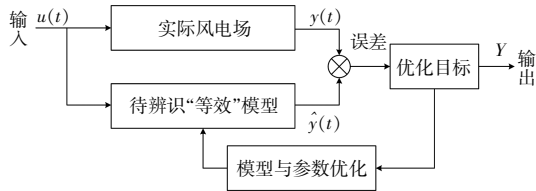


图 5 参数辨识基本原理

Fig.5 Basic principle of parameter identification

虽然单机等值法构建的模型结构更简单,但仅适用于风电机型相同、风速差异不大的风电场。随着风电场大规模化发展、风电机组型号的增加以及风速等状态量的差异,单机等值法并不能适用,具有一定局限性,模拟精度较详细建模差异较大,相比之下多机等值法更为适用。

2.3 多机等值法

随着风电规模的扩大,针对单机等值法易出现较大误差的情况,借鉴电力系统动态等值中的同调等值法思想,将具有相似运行点的机组划分为同一群,再对同群机组进行聚合等值,从而发展出了风电场的多机等值建模方法^[31,32],其等值示意图如图 6 所示。

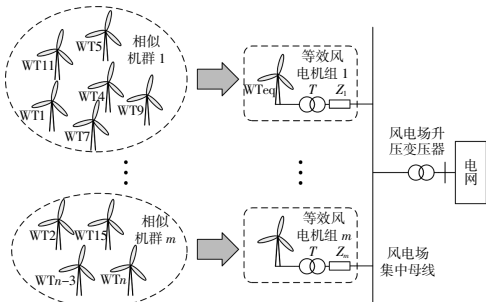


图 6 多机等值示意图

Fig.6 Schematic diagram of multi-machine equivalent

风电场多机等值建模通常在考虑风速、风向、网络损耗、系统故障以及尾流效应等的影响下^[33-36],对风电机组进行分群指标的选取、风电场机组的聚类分群、同群机组的等值、集电网络的等值以及参数的优化,其建模流程如图 7 所示。

目前,风电场的多机等值研究主要集中在两个方面,一是分群指标的选取;二是分群方法的选择。通过将风电场中运行状态接近的机组聚类为同群机组,然后聚合等值为一台机组,使整个风电

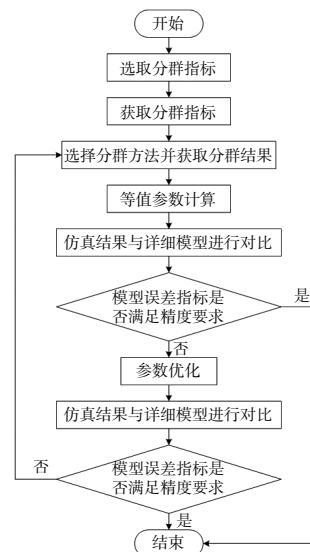


图 7 风电场多机等值建模流程

Fig.7 Multi-machine equivalent modeling process of wind farm

场等值为若干台风电机组并联的形式,提高模型精度。

2.3.1 分群指标的选取

分群指标的意义在于给出分群方式以及分群目标的量化指标^[37],重点是通过对比风电机组主要运行特性进行量化、提取,从而获取合理的分群判据,是聚类分群的前提,且直接影响着等值模型建立的精确程度^[38]。对于分群指标,通常选取能表征风电机组运行状态、故障扰动等的特征量,可分为空间特性类指标、机械特性类指标和电气特性类指标,其中:空间特性类指标主要为地理位置、机组排列位置以及尾流效应等对机组运行状态的影响,并由此对机组进行分区;机械特性类指标主要有风速、转子转速、桨距角动作状态以及机械转矩等;电气特性类指标有定、转子电压电流、有功功率、无功功率、电磁转矩等。在指标的选取时,针对不同研究问题,选择不同的分群指标,可以是一个也可以是多个指标^[39],但若指标的选取太少,将难以实现机群的合理划分;相反,分群指标过多则会增加计算过程,降低分群效率^[40]。

2.3.2 风电机组的分群

在风电场的风电机组的聚类分群及聚合等值中,研究最多的是风电机组的分群,总结可分为 3 类:①基于聚类算法的机组分群;②基于机组运行状态的机组分群;③基于多阶段分群的机组分群。如图 8 所示。

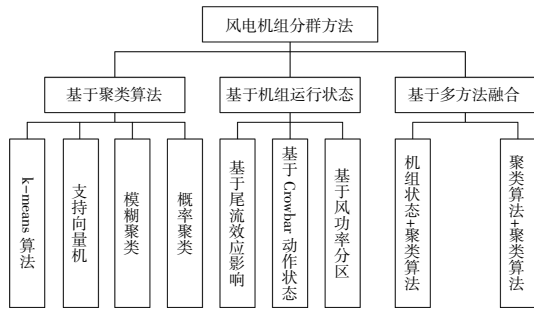


图 8 风电机组分群方法分类
Fig.8 Classification of wind turbine groups by grouping method

2.3.2.1 基于聚类算法的机组分群

聚类是一种常用的数据划分方法,通过选定的某个标准将数据集分割成不同的类,使得同一类中的各数据点之间相似性尽可能大,类与类间的数据点的相似性尽可能小。经过聚类算法,风电机组分为若干个彼此相似性较小的机群,再对同群机组进行等值建模,从而提高了风电场的等值建模精度。在众多的聚类算法中,常用的有 k-means 算法、支持向量机、模糊聚类以及概率聚类,常用的聚类算法的优缺点如表 2 所示。

表 2 聚类算法的比较

Table 2 Comparison of clustering algorithms

聚类算法	优点	缺点	文献
k-means 算法	简单直观,易于理解,且聚类速度快。	对初始 k 值及异常数据敏感,且容易陷入局部最优解。	[41-49]
支持向量机	数学形式简单直观,无需提前指定聚类数,且参数少,并能对噪声进行有效处理。	依赖训练样本来构建最优超平面,而适用性好及精度高的训练样本较难获得。	[50-53]
模糊聚类	克服了“非此即彼”的聚类缺点,样本点可以以一定的隶属度隶属于某类别。	对初始聚类中心及噪声数据敏感,并不能保证聚类结果收敛到全局最优解。	[54-60]
概率聚类	分群结果考虑了风电的不确定性因素。	需要对大量运行数据进行统计分析,分群结果依赖于数据的处理及数据量的大小。	[61-64]

综上所述,由于聚类算法自身的局限性,对分群结果均会产生影响。如何对聚类算法进行改进以及提炼出更具标志性分界点的分群指标,使得聚类过程中克服初始值、样本数据、噪声数据等的影响,并避免算法陷入局部最优,减少计算耗时的同时,提升分群精度,值得进一步研究。

2.3.2.2 基于机组运行状态的机组分群

基于风电机组运行状态的机组分群,通常是根据机组的运行状态,将风电机组划分为若干个具有相同运行状态的机群。机组运行状态的区分通常可利用尾流效应影响、Crowbar 动作状态及风功率分区来进行区分,由此产生了基于尾流效应影响的机组分群、基于 Crowbar 动作状态的机组分群和基于风功率分区的机组分群。

①基于尾流效应影响的机组分群

相比于传统的单风电机组,风电场中的机组由于尾流效应的存在,下风向机组的输入风速低于上风向机组的风速,且机组距离越近,尾流效应的影响越大,难以实现风电场整体的输出功率最大^[65]。为提高风电场的输出功率,可通过偏航装置使风机对准来风方向,降低尾流效应影响,捕获更多的风能。由于尾流效应对风电机组的影响,将

造成机组运行状态的变化,可根据影响效果对机组进行分群。

在考虑尾流效应影响的基础上,文献[65]通过计算风电场内风机在不同风速与风向下的输入风速,将相同或相近的机组划分为同一组。文献[36]建立“尾流影响因子”以表征各机组受其他机组的影响程度,将影响程度相同的机组划分为同一机群。文献[66-68]加上对其他地理位置等因素的考量,确定机组之间的相关性再进行分群。

②基于 Crowbar 动作状态的机组分群

在电网发生严重故障时,为了实现低电压穿越(LVRT),双馈风电机组一般加装有 Crowbar 保护电路^[69],如图 9 所示。当双馈风电机组出现短路故障时,Crowbar 保护电路的动作状态对双馈风电机组的暂态响应特性具有明显的影响。因而 Crowbar 电路的动作状态是一个良好的分群指标,可将风电机组分为 Crowbar 电路动作与不动

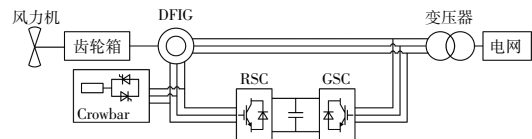


图 9 含 Crowbar 保护电路的 DFIG 风电机组
Fig.9 DFIG wind turbine with Crowbar protection circuit

作的两个机群,最后再对同群机组进行聚合等值。

在文献[70-75]中,均根据 Crowbar 电路的动作情况进行机组分群,提出了 DFIG 风电场的两机等效方法。其中,文献[70]阐述了 Crowbar 保护电路使 DFIG 风电场实现低电压穿越的工作原理以及 Crowbar 电路的投切策略;然后通过对 Crowbar 电路的动作特性进行分析,判断各风电机组的 Crowbar 在电压跌落期间的动作情况。文献[73]通过提前进行故障仿真,以获得使 Crowbar 电路动作的机端电压跌落临界值,并作为 Crowbar 动作的判据。文献[74]根据故障发生后的定子磁链的暂态过程,计算转子所需去磁电流,并作为 Crowbar 是否投切的判据。文献 [75] 在对 Crowbar 的作用条件进行研究后,得到了 Crowbar 作用区域的曲线,并以此对 Crowbar 电路是否被触发进行判断。然而计及故障穿越时,缺乏对于故障清除后功率恢复过程的考虑。

③基于风功率分区的机组分群

由于风电机组本身的机械强度和电气特性的局限以及风速等原因,机组在运行过程中将会受到功率及风轮转速的限制^[76],在风机的最佳功率曲线图上可以看到风速、风机转速和风机输出功率是一一对应的^[77],根据风速-风功率曲线的3段特性,可将风机运行划分为三个区域^[78],如图10所示。分别为恒桨距角变转速变功率区域($0 < v < v_n$)、恒桨距角恒转速变功率区域($v_n < v < v_m$)和恒转速恒功率变桨距角区域($v > v_m$)。因此可用风电机组运行的分区特性作为分群依据。

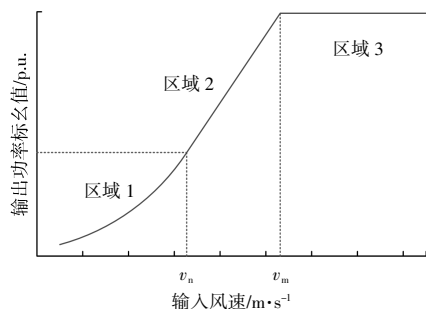


图 10 风速-风功率曲线

Fig.10 Wind speed-wind power curve

文献[76, 78]虽然分别以风速和能能反映直驱式风电机组运行特性的综合指标来对风电场进行分群,但其分群指标均根据直驱式风机输出功率的三段特性提取,可看做基于风电机组运行分区的分群。文献[79]基于大量实测数据提出将有

功响应作为分群指标的机组分群方法,经仿真分析表明,运行在不同区域的风电机组有各自标志性的有功响应特性,可以作为分段性特征进行分群。在风功率曲线分区思想的基础上,文献[80]选取高斯密度距离聚类算法对 DFIG 风电场的风速功率曲线进行更精确的划分。文献[81]根据风功率曲线的分区并结合改进等效误差对风电机组进行分群,最终建立了 DFIG 风电场的4机等值模型。

2.3.2.3 基于多阶段分群的机组分群

基于多阶段的风电机组分群方法,通常是先选取较为简单的特征量将具有明显相似性的机组聚类为同群机组后,再选用更深层次也更复杂的特征量作为分群指标进行二次分群或者借助优化算法对等值参数进行寻优,使得分群更完善,以便达到更好的等值效果^[72]。

文献[82]以机组运行状态对风电场进行多次分群,首先利用 SVM 根据 Crowbar 状态对风电场进行初步分群;然后再根据风电机组功率特性曲线上的风速分区进一步分群。文献[83]中以算法对风电场进行多次分群,提出以风电机组的转速向量作为分群指标,利用 two-step 分类法对机组进行分群,再在众多的分群结果中,以概率最大的机群作为划分结果,建立风电场概率等值模型。在文献[84-88]中,通过机组运行状态和聚类算法对风电场进行多次分群。其中,文献[84]首先将电压跌落故障期间 PMSG 卸荷电路导通的机组划分为一个群,然后再对不导通的机组运用改进 D-K 聚类算法以 PMSG 故障期间的机端电压为指标,将剩余机组划分为 k 个机群,共形成“ $k+1$ ”个机群分组。文献[85]使用“ $N-1$ VS One”聚合模型和二进制搜索算法来判断有多少台风机将进入 LVRT 模式,将机群聚类为两组,然后根据风电机组功率特性曲线上的风速位置进一步对风电机组进行聚类,最终实现风电场的完全分群。文献[86]先根据 Crowbar 动作状态进行初步分群,再用基于密度的峰值聚类算法(DPCA)对风电场进一步分群。文献[87]先以故障前风速作为指标,利用改进遗传 k -means 聚类算法进行分群,形成“ N ”个机群,再根据 Crowbar 动作状态将动作的机组提取出来形成一个机群,从而分成“ $N+1$ ”个机群。

3 等值参数计算

当完成机组分群后,便是同群机组的聚合,通

常沿用单机等值法的思路进行聚合等值,即对同群机组进行单机等值。在这一阶段需要对各类等值参数进行计算,一般包括风速的等值计算和等值机组参数的计算两类。

3.1 风速的等值计算

由于风速具有随机性及波动性的特点,当风速波动时将直接影响到风电机组的动态特性。对于风速的等值,通常以等值前后风电机组的输出功率一致为目的。一般在考虑尾流影响的基础上进行等效风速计算。当考虑尾流效应时,可取平均风速作为等效风速^[36,88]。

$$v_{eq} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m v_i \quad (1)$$

式中: m 为机群机组数; v_i 为第*i*台风电机组的输入风速; v_{eq} 为等效风速;下标eq表示等值机组。

或者基于风功率曲线求取等效风速^[82,88,89]。

$$v_{eq} = f^{-1} \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P_i \right) \quad (2)$$

式中: f 为风功率曲线的拟合函数; P_i 为第*i*台风电机组的输出。

当不考虑尾流效应时,可取等效风速与单机风速相同。

$$v_{eq} = v \quad (3)$$

3.2 等值机组的参数计算

在等值机组的发电机参数、轴系参数、变压器参数等参数计算中,主要有容量加权法和参数辨识法,其核心思想与前文中的容量加权法及参数辨识法相同,其中容量加权法最为常用。

3.2.1 容量加权法

基于容量加权的等值参数计算,以倍乘的思想将同群机组中各机组的参数进行累加,从而得到等值参数,其精度难以保证,实际中可能存在较大误差。假设有*n*台同型号的风电机组,其中有*m*台等值为1台机组,基于容量加权法的等值参数计算如下。

3.2.1.1 发电机参数

$$\begin{cases} S_{eq} = \sum_{i=1}^m S_i = mS, P_{eq} = \sum_{i=1}^m P_i = mP, Q_{eq} = \sum_{i=1}^m Q_i = mQ \\ x_{eq} = \frac{x_m}{m}, r_{eq} = \frac{r_m}{m} \end{cases} \quad (5)$$

式中: S, P, Q 分别为发电机容量、机组有功功率和无功功率; m 为风电机组台数; x, r 分别为机组的

电抗和阻抗参数。

3.2.1.2 轴系参数

$$\begin{cases} H_{g,eq} = \sum_{i=1}^m H_{g_i} = mH_g \\ H_{t,eq} = \sum_{i=1}^m H_{t_i} = mH_t \\ K_{s,eq} = \sum_{i=1}^m K_{s_i} = mK_s \\ D_{s,eq} = \sum_{i=1}^m D_{s_i} = mD_s \end{cases} \quad (6)$$

式中: H_g 和 H_t 分别为发电机和风力机的惯性时间常数; K_s 和 D_s 分别为风力机的轴系刚度系数和风力机的转子阻尼系数。

3.2.1.3 变压器参数

$$\begin{cases} S_{T,eq} = mS_T \\ Z_{T,eq} = \frac{Z_T}{m} \end{cases} \quad (7)$$

式中: S_T 和 Z_T 分别为变压器容量和变压器阻抗。

3.2.2 参数辨识法

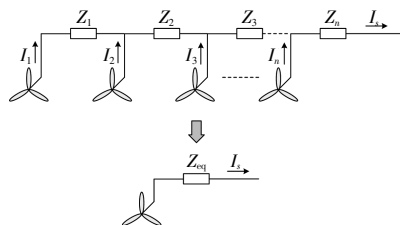
基于参数辨识的等值参数计算,常以各种人工智能优化算法对等值机组的参数进行辨识,虽然等值精度比基于容量加权法所得参数的精度高,但由于参数的辨识过程中需要足够的数据支持,以及不同算法的复杂程度,增加了参数求解的计算量,使得参数的辨识过程需要耗费大量时间,而且容易陷入局部最优解。且风电机组的参数众多,为了减少辨识过程的计算负担,仅辨识对风电机组运行影响较大的关键参数,其余非关键参数可以取典型值或者通过容量加权法进行确定。文献[90]首先依据风力机型号分群后建立等值模型,然后根据模型中各参数对风电机组运行特性的影响特点,确定关键参数定子电感、气隙电感、转子侧变流器的最大允许电流和等值摩擦损耗系数,再以自适应变异粒子群(AMPSO)算法进行关键参数寻优。文献[91]提出了一种基于启发式算法的三级分层参数识别方法,利用相量测量单元的数据,以改进的遗传算法(IGA)结合改进的粒子群优化(IPSO)对关键参数进行辨识,包括定子电阻、转子电阻和励磁电抗,虽然可以实现更高精度,但使得参数辨识的过程更加复杂。文献[92]为解决基于容量加权法建立的等值模型的不足之处,对基

于容量加权法的等值模型的电气参数及控制器参数进行轨迹灵敏度分析,确定了共 31 个关键参数,然后利用改进的多粒子群优化算法(MMPSO)对关键参数进行辨识。文献[93]先对直驱风机风电场等值模型参数的轨迹灵敏度进行分析,选择出永磁体磁链 ψ_{PM} 、GSC 控制器比例与积分放大倍数 $K_{P2}, K_{I2}, K_{P3}, K_{I3}$ 共 5 个关键参数,再以改进的基因学习粒子群(GLPSO)混合算法对所选关键参数进行辨识。

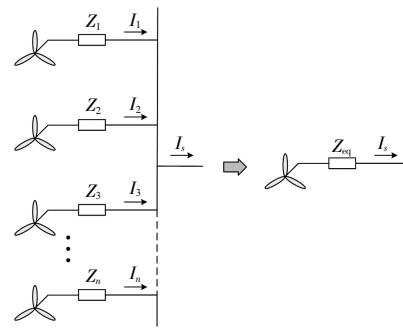
4 集电网络等值

风电场的集电网络主要指将场内各风电机组连接到风电场升压站低压侧公共母线上的所有线路,常见的集电网络接线分为干线式接线和链式接线两种,其等值示意图如图 11 所示。

由于风能的不确定性及地理空间等因素的影响,



(a) 干线式集电网络及其等值



(b) 链式集电网络及其等值

图 11 集电网络类型及其等值

Fig.11 Types of collector networks and their equivalents

响,风电场内的风机排列并不规则,机组间距离也远近不一,且随着风电机组单机容量不断增大、风电场规模日益扩大以及大型海上风电场的发展,使得风电场集电网络更加复杂^[94,95],同时增加了集电网络的损耗,其等值精度将直接影响风电并网系统的稳定性分析^[96],因此集电网络的等值在风电场的等值建模中不应忽视。现常用的集电网络等值方法大致可分为等值功率损耗法^[18,38,46,83,96,97]和加权平均电压差法^[31,56,88,91],其中等值功率损耗法使用最多。如表 3 所示,前者基于等值前后集电网络损耗相等进行等效阻抗计算,一般需要将串

表 3 集电网络等值法的比较

Table 3 Comparison of collector network equivalent methods

集电网络等值法	优点	缺点
等值功率损耗法	与实际风电场的功率损耗、平均电压特性基本一致,实际应用价值较高。	需要在强假设条件下进行,计算较复杂,且风电场规模过大时,易引起较大误差。
加权平均电压差法	计算简单。	集电网络复杂时,存在较多近似,误差较大。

并联混合的集电网络拓扑结构转变为纯并联结构;后者以网络变换后等值机组与并网点之间电压差等于并网前风电机组的加权平均电压差为原则,并以有功出力为权重进行等效阻抗计算。

5 结论

风电场的动态等值建模对于研究风电场与电力系统之间的相互作用和影响具有重要意义。虽然目前风电场的等值建模研究已经非常多,但大多集中在分群指标的提取以及分群方法的选取上;对于等值参数的计算多以容量加权法进行计算,等值精度依赖于分群的精确程度,实际中可能存在较大误差;在计及故障穿越时,缺乏研究适用于故障穿越前后全过程的等值仿真模型;且在集电网络的等值研究中,其参数计算过于理想化,无

法兼顾计算量和等值精度。针对等值建模研究中仍然存在的一些问题,未来可以从以下几个方面展开深入研究。

①在对分群指标的提取及分群方法的选择中,虽然能反映机组运行状态的变量以及分群的聚类算法都很多,但在实际中由于部分变量难以获取或者存在强相关性,以及聚类算法自身的局限性,对分群结果均会产生影响。如何选取较少的变量提取分群指标,并避免算法陷入局部最优,在减少计算量的同时提升分群精度,值得进一步讨论与研究。

②在系统的等值参数计算中,容量加权法由于计算简单而被广泛使用,但在实际研究中应考虑等值精度对所研究问题的影响,当需要等值精

度高时,可采用参数辨识法,或在容量加权法的基础上采用适当的优化算法进行参数辨识。

③当计及故障穿越时,缺乏对于故障清除后功率恢复过程的考虑,故障穿越前后等值模型是否适用有待商榷。研究适用于故障穿越前后全过程的等值仿真模型具有重要意义。

④目前集电网络的等值研究中,由于参数计算过于理想化,等值精度存在较大误差,且在多机等值建模中,未考虑集电网络在各等值机组之间的精确分摊,未来应加强集电网络等值方法的研究。

参考文献:

[1] 蒋程,刘文霞,张建华,等.含风电接入的输电系统风险评估[J].电工技术学报,2014,29(2):260-270.

[2] 李辉,王荷生,史旭阳,等.基于遗传算法的风电场等值模型的研究 [J]. 电力系统保护与控制,2011,39(11):1-8.

[3] 方力,陆宇焯.基于聚类分析的直驱永磁风电场动态等值研究[J].智慧电力,2019,47(2):29-36.

[4] 郑兴.海上风电接入及运行控制技术研究[D].南京:东南大学,2021.

[5] 蔡旭,李征.风电机组与风电场的动态建模[M].北京:科学出版社,2016.

[6] 陈武晖,王龙,谭伦农,等.WECC 风力发电机组/场通用动态模型研究进展[J].中国电机工程学报,2017,37(3):738-751.

[7] 白雁翔,王德林,马宁宁,等.大型风电场的动态等值方法研究[J].电工技术,2018(13):46-49.

[8] 万文阁.多源协调的风电场集群无功控制策略研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2019.

[9] 古庭贇,赵阳羊,杨骥嘉,等.基于选择模态分析法的风力机组等效模型 [J]. 南方电网技术,2019,13(5):58-65.

[10] Pulgar-Painemal H A, Sauer P W. Reduced-order model of type-c wind turbine generators [J]. Electric Power Systems Research,2011,81(4):840-845.

[11] Pulgar-Painemal H A, Sauer P W. Towards a wind farm reduced-order model [J]. Electric Power Systems Research,2011,81(8):1688-1695.

[12] Luna A,Lima F K A,Santos D,et al.Simplified modeling of a DFIG for transient studies in wind power applications [J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2010,58(1):9-20.

[13] Ghosh S, Senroy N. Balanced truncation based reduced

order modeling of wind farm [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2013,53:649-655.

[14] 饶日晟,张亚丽,叶林.直驱式永磁同步风电机组的风电场降阶等值模型[J].广东电力,2019,32(6):9-17.

[15] 韩平平,方佳维,丁明,等.利用特征值分析法的双馈风电机组模型降阶 [J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(8):8-14.

[16] 赵凯,侯玉强.基于自组织映射神经网络 K-means 聚类算法的风电场多机等值建模[J].浙江电力,2019,38(8):30-36.

[17] 苏勋文,米增强,王毅.风电场常用等值方法的适用性及其改进研究[J].电网技术,2010,34(6):175-180.

[18] 米增强,苏勋文,杨奇逊,等.风电场动态等值模型的多机表征方法 [J]. 电工技术学报,2010,25(5):162-169.

[19] 葛江北,周明,李庚银.大型风电场建模综述[J].电力系统保护与控制,2013,41(17):146-153.

[20] 苏勋文,徐殿国,卜树坡.风速波动下风电场变参数等值建模方法[J].电工技术学报,2013,28(3):277-284.

[21] 张新宇,赵义松,苑经纬,等.考虑网络损耗的直流近区风电场集电参数等值建模 [J]. 电力科学与技术学报,2020,35(6):117-123.

[22] 胡庆林,付盼.考虑电网故障后转子转速的风电场等值建模[J].高压电器,2018,54(6):216-222.

[23] 徐玉琴,张林浩,王娜.计及尾流效应的双馈机组风电场等值建模研究 [J]. 电力系统保护与控制,2014,42(1):70-76.

[24] 孙瑶.双馈风电场并网稳定性研究[D].北京:华北电力大学(北京),2021.

[25] 颜湘武,李君岩.直驱式永磁同步风电机组的风电场等值建模 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2019,46(5):1-7.

[26] 魏旭辉.基于双馈风电场的故障暂态等值方法研究[D].北京:华北电力大学(北京),2017.

[27] 郭志.基于 IGKM 聚类算法的双馈机组风电场等值建模研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2017.

[28] 王雁凌,马洪宇,成一平,等.基于支持向量回归和 K 均值聚类的降温负荷组合测算模型 [J]. 现代电力,2019,36(3):51-57.

[29] 陈树勇,王聪,申洪,等.基于聚类算法的风电场动态等值[J].中国电机工程学报,2012,32(4):11-19.

[30] 吴红斌,何叶,赵波,等.基于改进 K-means 聚类算法的风电场动态等值 [J]. 太阳能学报,2018,39(11):3232-3238.

[31] Li L, Wang X, Chen Q, et al. Dynamic equivalence method of wind farm considering the wind power

- forecast uncertainty [A].2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies –Asia (ISGT Asia) [C].Chengdu: IEEE,2019.1677–1682.
- [32] Mehrjoo M, Jozani M J, Pawlak M, et al. A multilevel modeling approach towards wind farm aggregated power curve [J].IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021,12(4):2230–2237.
- [33] Fang R, Shang R, Wu M, et al. Application of gray relational analysis to k-means clustering for dynamic equivalent modeling of wind farm [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2017,42 (31):20154 – 20163.
- [34] 苏柯文,张永明.基于改进鸟群算法优化聚类的风电场等值建模[J].计算机应用与软件,2021,38(1):266–271.
- [35] Wang Xiaohui,Yu Hao,Lin Yong,et al.Dynamic equivalent modeling for wind farms with DFIGs using the artificial bee colony with K-means algorithm [J]. IEEE Access,2020(8):173723–173731.
- [36] 汪海燕,黎建辉,杨风雷.支持向量机理论及算法研究综述[J].计算机应用研究,2014,31(5):1281–1286.
- [37] 丁世飞,齐丙娟,谭红艳.支持向量机理论与算法研究综述[J].电子科技大学学报,2011,40(1):2–10.
- [38] 米增强,苏勋文,余洋,等.双馈机组风电场动态等效模型研究[J].电力系统自动化,2010,34(17):72–77.
- [39] 詹仲强,陈洁,黄净,等.基于运行数据和支持向量机的风电场动态建模 [J]. 可再生能源,2015,33(11): 1640–1645.
- [40] Teng W, Wang X, Meng Y, et al. An improved support vector clustering approach to dynamic aggregation of large wind farms [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems,2019,5(2):215–223.
- [41] 蒙晓航,叶林,赵永宁.永磁直驱同步风电场多机动态等值模型[J].电力系统保护与控制,2013,41(14):25–32.
- [42] Fabrizio De Caro,Alfredo Vaccaro,Domenico Villacci. Adaptive wind generation modeling by fuzzy clustering of experimental data[J]. Electronics,2018,7(4):1–47.
- [43] Zou J, Peng C, Xu H, et al.A fuzzy clustering algorithm-based dynamic equivalent modeling method for wind farm with DFIG [J].IEEE Transactions on Energy Conversion,2015,30(4):1329–1337.
- [44] Ji Han,Shihong Miao,Yaowang Li, et al. A multi-view and multi-scale transfer learning based wind farm equivalent method [J].International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2020,117:1–13.
- [45] Yuan-Kang Wu et al. Development of an equivalent wind farm model for frequency regulation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2020,56 (3): 2360–2374.
- [46] 苏剑涛,郑书婷,严干贵,等.基于改进FCM聚类算法的风电场等值建模研究[J].智慧电力,2021,49(10): 68–74.
- [47] Li M, Wang Y, Sun Q, et al. Research of ASW-FCM-based algorithm for clustered wind turbine group equivalent modeling [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology,2020,15(4):1555–1566.
- [48] Zhou H, Ju P, Xue Y, et al. Probabilistic equivalent model of DFIG-based wind farms and its application in stability analysis [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2016,4(2):248–255.
- [49] 刘一童,李本新.计及风电相关性的电-气综合能源系统概率能量流分析[J].东北电力大学学报,2023,43 (2):39–47.
- [50] Ali M, Ilie I S, Milanovic J V, et al. Wind farm model aggregation using probabilistic clustering [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2012,28(1):309–316.
- [51] Wang P, Zhang Z, Huang Q, et al. Wind farm dynamic equivalent modeling method for power system probabilistic stability assessment [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2020,56(3):2273–2280.
- [52] 曹娜,于群.风速波动情况下并网风电场内风电机组分组方法[J].电力系统自动化,2012,36(2):42–46.
- [53] 刘畅,刘天琪,何川.考虑空间相关性的风电场等值方法[J].高压电器,2016,52(5):141–147.
- [54] Shaokang Ma et al. Clustering-based optimisation for maximum wind energy extracting of large scale wind farm [J].The Journal of Engineering,2017,13:1988 – 1992.
- [55] 郑文哲,卜京,张宁宇,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.
- [56] 朱晓东,石磊,陈宁,等.考虑Crowbar阻值和退出时间的双馈风电机组低电压穿越 [J]. 电力系统自动化, 2010,34(18):84–89.
- [57] 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.
- [58] Chao P, Li W,Liang X,et al.An analytical two-machine equivalent method of DFIG-based wind power plants considering complete FRT processes [J].IEEE Transactions on Power Systems,2021,36(4):3657–3667.

- [59] 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.
- [60] 丁明,朱乾龙,韩平平,等.计及 Crowbar 保护的双馈风电场等值建模研究 [J]. 太阳能学报,2016,37(9):2209-2216.
- [61] 陆飞,刘其辉,赵亚男,等.基于低电压穿越去磁控制的风电场内部故障等值建模方法 [J]. 电力系统自动化,2016,40(10):24-30.
- [62] Yan Hong Yuan, Feng Wu. Short-circuit current analysis for DFIG wind farm considering the action of a crowbar [J]. Energies, 2018, 11(2):21-33.
- [63] 高峰,赵东来,周孝信,等.直驱式风电机组风电场动态等值[J].电网技术,2012,36(12):222-227.
- [64] 王星华.变速恒频同步直驱风力发电机控制系统研究 [D].上海:上海交通大学,2007.
- [65] 孟昭军,王海波,许晓彤.直驱式风电场并网动态等值研究[J].电网与清洁能源,2015,31(1):86-91.
- [66] 晁璞璞,李卫星,金小明,等.基于有功响应的双馈型风电场实用化等值方法 [J]. 中国电机工程学报,2018,38(6):1639-1646.
- [67] Yuhao Zhou et al. A dynamic weighted aggregation equivalent modeling approach for the DFIG wind farm considering the weibull distribution for fault analysis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6):5514-5523.
- [68] Li W, Chao P, Liang X, et al. A practical equivalent method for DFIG wind farms [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 9(2):610-620.
- [69] 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.
- [70] 朱乾龙,韩平平,丁明,等.基于聚类-判别分析的风电场概率等值建模研究[J].中国电机工程学报,2014,34(28):4770-4780.
- [71] 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.
- [72] 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, 2019, 35(1):508-519.
- [73] Mingyang Liu et al. A dynamic equivalent model for DFIG-based wind farms. [J]. IEEE Access, 2019(7):74931-74940.
- [74] 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.
- [75] 徐玉琴,刘丹丹.基于两步分群法的双馈机组风电场等值建模[J].电力系统保护与控制,2017,45(6):108-114.
- [76] 苏柯文,张永明,胡维飞.基于参数测量的风力发电场等值建模方法研究[J].电测与仪表,2020,57(18):29-35.
- [77] 栗然,唐凡,刘英培,等.基于自适应变异粒子群算法的双馈风电机组等值建模 [J]. 电力系统自动化,2012,36(4):22-27.
- [78] Zhou Y, Zhao L, Hsieh T Y, et al. A multistage dynamic equivalent modeling of a wind farm for the smart grid development [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(5):4451-4461.
- [79] 刘立群,曹娜,史文秀.基于 MMPSO 算法的风电场多机等值模型参数辨识 [J]. 可再生能源,2019,37(4):605-611.
- [80] 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.
- [81] 孙承祥,宋玮,李本瑜,等.考虑集电网络的风电场建模研究[J].可再生能源,2015,33(5):678-683.
- [82] 刘汉江,潘文霞,张程程,等.计及风电场集电网络等值模型的仿真研究[J].电测与仪表,2015,52(13):31-34.
- [83] 韩平平,王欢,王希,等.基于指标降维及集电系统辨识的双馈风电场次同步振荡等值[J].中国电机工程学报,2022,42(23):8465-8474.
- [84] 晁璞璞,李卫星,金小明.关于双馈风电场动态等值的认识和探讨[J].电力系统自动化,2016,40(12):194-199.
- [85] 石军,吴建辉,管保安,等.提高复杂拓扑风电场动态等值水平的增广路径标号算法 [J]. 电测与仪表,2018,55(17):82-87.
- [86] 杨茂,于欣楠.考虑风电场功率爬坡的超短期组合预测[J].东北电力大学学报,2022,42(1):63-70.
- [87] 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.
- [88] 徐玉琴,刘丹丹.基于两步分群法的双馈机组风电场等值建模[J].电力系统保护与控制,2017,45(6):108-114.
- [89] 苏柯文,张永明,胡维飞.基于参数测量的风力发电场等值建模方法研究[J].电测与仪表,2020,57(18):29-

- 35.
- [90] 栗然,唐凡,刘英培,等.基于自适应变异粒子群算法的双馈风电机组等值建模 [J]. 电力系统自动化, 2012,36(4):22-27.
- [91] Zhou Y,Zhao L,Hsieh T Y,et al. A multistage dynamic equivalent modeling of a wind farm for the smart grid development [J].IEEE Transactions on Industry Applications,2019,55(5):4451-4461.
- [92] 杜燕军,冯长青.风电场代表年风速计算方法的分析 [J].可再生能源,2010,28:(1):105-108.
- [93] 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.
- [94] 孙承祥,宋玮,李本瑜,等.考虑集电网络的风电场建模研究[J].可再生能源,2015,33(5):678-683.
- [95] 刘汉江,潘文霞,张程程,等.计及风电场集电网络等值模型的仿真研究[J].电测与仪表,2015,52(13):31-34.
- [96] 王丽馨,沙东鹤,高晗.基于 O3KID-DMD 方法的机电振荡参数在线辨识 [J]. 东北电力大学学报,2023,43(2):93-100.
- [97] 晁璞璞,李卫星,金小明.关于双馈风电场动态等值的认识和探讨[J].电力系统自动化,2016,40(12):194-199.

Research on equivalent simulation technology of large-scale wind power generation

Yang Tongguang^{1,3}, Wu Shidan^{2,3}

(1.School Electrical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China;2.Hunan City University School of Mechanical and Electrical Engineering, Yiyang 413000, China; 3.Hunan Provincial Key Laboratory of Smart City Energy Perception and Edge Computing, Yiyang 413000, China, Hengyang 421001, China)

Abstract: With the increase in the penetration rate of grid-connected wind power and the continuous expansion of the scale of wind farms, the integration of wind power into the grid will have a significant impact on the power quality and power dispatching of the regional power grids. In order to study the macroscopic dynamic response characteristics of wind farms under large disturbances, it is very important to carry out dynamic equivalent modeling of wind farms. Aiming at the research on dynamic equivalent modeling of wind farms, this paper briefly introduces the current mainstream wind turbine types and their model structures. Then, the reduced-order method, the single-machine equivalent method and the multi-machine equivalent method of the equivalent modeling methods are compared and elaborated, and the calculation of equivalent parameters and the equivalent value of the collector network are summarized. Finally, the existing challenges in equivalent modeling of wind farms are summarized, and the future research directions are prospected.

Keywords: wind power penetration rate; dynamic equivalence; equivalent parameter calculation; collector network equivalent