

风电场建模研究综述

林 俐¹, 赵会龙¹, 陈 迎^{1,2}, 李 丹¹

(1. 新能源电力系统国家重点实验室 (华北电力大学), 北京 102206; 2. 安徽省电力局公司检修公司, 安徽合肥 230000)

Research Summary of Wind Farm Modeling

LIN Li¹, ZHAO Huilong¹, CHEN Ying^{1,2}, LI Dan¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. Maintenance Company of Anhui Electric Power Corporation, Hefei 230000, China)

摘 要: 概括分析了风电场等值建模的国内外研究现状。首先, 总结了风电场风速-功率特性建模的研究情况, 进而从不同类型风电场静态建模、含风电电力系统的潮流计算两个方面对风电场静态等值建模研究现状作了概括; 随后对风电场动态等值的集总参数建模和同调等值建模方法以及风电场内部集电系统的等值化简做了简单分析, 另外从加权求和法、频域聚合法、时域聚合法 3 个方面对风电场机群参数的聚合方法作了总结归纳; 最后, 展望了风电场等值建模的需求以及研究趋势。

关键词: 风电场; 静态模型; 动态模型; 研究现状; 研究趋势

Abstract: In this paper, the present situation of wind farm steady-state equivalent modeling and dynamic equivalent modeling at home and abroad is briefly introduced. The researches on the modeling of wind speed-power output characteristics for wind farm are summarized firstly. Then the research on steady-state equivalent modeling of wind farm modeling is discussed from two aspects, the steady-state modeling of wind farms with different types of wind turbines and the power flow calculation of power system with wind farms. In addition, such aspects as the lumped parameter modeling method and the homology equivalent modeling method of dynamic equivalence of wind farm, and the equivalent simplification of the collection system within the wind farm, are briefly analyzed. In other hand, the polymerization methods of wind farm cluster parameters are concluded from such aspects as the weighted sum method, the aggregation method in the frequency domain and the polymerization method in the time domain. In the end, the prospect of the research trends of equivalent modeling for wind farm is envisioned.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51190103); 国家科技支撑计划项目 (2013BAA02B01)

Keywords: wind farm; steady-state model; dynamic model; research status; research trends

0 引 言

近年来国内风电场数目和装机容量持续增大, 千万千瓦风电基地陆续建成, 风电已成为电力系统的重要电源之一。随着风电渗透率的进一步提高, 风电将会对电力系统的安全、稳定和经济运行带来不可忽视的影响。而风电电源与传统电源存在明显不同: ①风电场模型本身结构与同步电源不同, 与单一风电机组模型也不同; ②风能的随机波动使风电功率呈现随机波动和不可控性。另外风电场的并网运行改变了电力系统的单一同步电源结构, 进而改变了电网原有结构, 系统由负荷随机的单随机系统变成了电源和负荷都随机变化的双随机系统。因此研究建立能表征风电机组和风电场动、静态特性的模型, 是解决含风电电力系统分析与控制不可跨越的课题。

目前, 风电机组的建模比较成功, 市场上的主流机型如定速风电机组 (Fixed Speed Induction Generator, FSIG)、最优滑差风电机组 (Optimal Slip Wind Turbines, OptiSlip-WT)、双馈感应风电机组 (Doubly Fed Induction Generator, DFIG)、永磁同步风电机组 (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG) 都有较为详细的数学模型, 在理论研究和实际分析中得到了广泛的应用; 而风电场的等值建模研究则相对滞后, 所用方法和思路也没有形成统一, 相关研究需要更多的投入。

本文主要分析风电场的动、静态建模, 并分 3 个部分对风电场动、静态建模的研究现状做一总

结。一是风电场风速-功率特性建模,主要归纳基本的建模方法和步骤;二是风电场的静态建模,主要从以下两个方面总结:①不同类型风电场的静态建模;②含风电电力系统的潮流计算,主要分析常规潮流计算中风电场节点的处理方法和含风电电力系统的随机潮流计算。三是风电场的动态建模,主要从以下3个方面概括:①风电场动态建模的基本方法,主要总结风电场动态等值的集总参数建模和同调等值建模;②风电场集电系统的等值化简;③风电场机群参数的聚合。

1 风电场风速-功率特性建模

1.1 传统的风电场风速-功率特性建模

传统的风电场风速功率模型通常根据厂家给定或现场实测的单台风电机组风速-功率曲线,然后乘以场内风电机组的台数 n 得到整个风电场的输出功率。但随着风电场规模的不断扩大,风电场内的风速分布、地形地貌、机组排列方式、机组风能转换特性等诸多因素对整个风电场的输出功率产生了不可忽视的影响,场内各个机组甚至相同型号的机组之间,其风况及输出功率都可能存在较大差异,风电场作为一个整体往往表现出与单个风电机组不同的特性^[1]。因此简单地通过单台风电机组功率乘以场内机组台数来表示整个风电场的功率输出与实际工作情况存在较大差异,不能真实反映风电场的实际工作状态。

因此,风电场的风速-功率特性建模不仅需要考虑到风电场内的风速分布、地形地貌、机组排列方式及风电机组的尾流效应,还需考虑风电场内不同类型风电机组的差异。另外,与常规电厂不同,风电场内机组可达几十台甚至上百台,虽然对每台风电机组进行建模能够准确表达风电场的实际工作状态,但却使电力系统的计算量急剧增大、仿真时间变长、潮流不易收敛,另外详细模型的有效性、数据的修正还需要进一步研究。可见,对风电场进行详细地建模没有必要,也不具操作性。所以需要研究既考虑场内机组工况差异性,又可实际操作的风电场风速-功率特性建模方法。

1.2 计及机组工况的风电场风速-功率特性建模

风电场内机组的排列方式、场内地形差异、机组间尾流效应及风的时滞效应等使机组的工况出现差异。为计及尾流效应,文献[2]以3参数的

Weibull分布作为随机风速的模型,并采用可进行参数估计的变量变换法确定了Weibull分布的位置参数、形状参数以及尺度参数,继而利用风电机组的风速-功率近似关系得到了机组的输出功率,同时结合能够较好模拟平坦地形尾流效应的Jensen模型和能较好模拟有损耗非均匀风电场的Lissaman模型,得到较为准确的机组风速-功率特性,从而得到不同位置处风电机组的风速-功率特性,继而通过机组功率叠加得到整个风电场的功率输出。

计及机组工况的风电场风速-功率特性建模能够较为准确的反映场内机组的真实工况,但需要考虑尾流效应和地形因素,而计及两者需要大量计算且精度受诸多模型参数影响,且随着计算精度的提高,还需要量化考虑风向、气温等对风速的影响。因此该方法不宜用在大型风电场的分析计算中,也不适用于含多个风电场电力系统的研究分析中。

1.3 基于统计方法的风电场风速-功率特性建模

在风电场风速-功率特性建模方面,更多学者提出基于风电场外特性的建模方法,该方法不再考虑尾流效应等诸多复杂的、难以用数学模型准确表达的因素,而以风电场实测风速、功率等运行数据为依据研究风电场风速和输出功率之间的关系,主要有两条思路:①利用实测风电机组功率曲线外推得到等效风电场风速-功率模型;②以风电场实测数据为依据,结合数学统计的方法获取整个风电场的风速-功率模型。

思路1通过对风电机组长期运行数据的统计分析,研究机组风速与功率之间的统计规律,据此构建风电机组实际的“风速-功率”模型,然后线性外推得到风电场的等效风速-功率模型。文献[3]采用在风电场内选几台具有代表性的机组,分别求取各自的实测风速-功率曲线,然后求平均值,得到场内风电机组的平均风速-功率曲线,并乘以场内机组台数得到风电场风速-功率特性。针对场内各机组间实际风速-功率特性差异明显的情况,文献[4]运用数理统计的方法对风电机组一段时间内的风速-功率数据进行分析,找到每个功率对应的概率最大的风速值,从而得到一条概率最大风速-功率曲线,并通过对此曲线的3次样条插值处理,得到对应风电机组的风速-功率曲线,进而得到风电场的风速-功率特性。文献[5]以实测数据为基础,认为风速-功率特性相同或相近的风电机

组同属一类，并利用支持向量聚类(Support Vector Clustering, SVC)算法进行机群划分，取同类机组风速、功率平均值作为该类的风速-功率特性，进而建立风电场的风速-功率特性。

思路 2 将风电场整体作为研究对象，通过对风电场长期运行数据的统计分析，研究风电场整体等效风速与输出功率之间的规律，据此构建风电场“等效风速-输出功率”模型。文献 [6] 提出了一种能克服线性插值、平方插值及立方插值缺陷的非线性插值方法，并在此基础上利用风电场实测数据构建了风电场的风速-功率模型。文献 [7] 以风电场各机组实测风速和有功数据为基础，利用统计学的决定系数法，提出基于输出功率最大相关性原则的风电场等效风速求取方法、以及表征风电场整体风能捕获特性的等效风能利用系数计算方法，继而构建整个风电场的风速-功率模型。

1.4 基于智能算法的风电场风速-功率特性建模

基于统计方法的风电场风速-功率特性建模，并没有将风电场完全看为黑箱，对风电机组本身的风速-功率特性依然有较大依赖。基于智能算法的风电场风速-功率特性建模则完全将风电场视为“黑箱”，以风电场实测数据为基础，通过大量的样本训练或多次的迭代修正来获取风电场风速-功率特性。

风电场风速-功率特性本质上是非线性输入与非线性输出之间的关系。据此，很多学者提出了利用 BP 神经网络、Elman 神经网络等智能算法并根据风电场实测数据进行辨识，进而获取风电场风速-功率特性的思路。文献 [8] 以风速和风向作为神经网络的输入量，经过实测数据的样本训练，建立风电场风速-功率模型。文献 [9] 指出风机捕获功率的大小既与风速有关，又与桨矩角有关，因此文中选取实测风速和桨矩角作为 BP 神经网络的输入量，以风电场输出功率为输出量进行样本训练，最终得到风电场风速-功率模型。文献 [10] 指出 BP 网络建立的模型由输入输出历史数据作为神经网络的训练样本，具有局限性，所建立模型只能作为静态模型使用，而风电场具有动态变化的特点，为此文中提出了能够适应时变特性的 Elman 神经网络来构建风电场的风速-功率模型。

风电场输出功率受众多因素影响，虽然计及机组工况的风电场风速-功率建模能较好地考虑到场内各机组工况的差异性，但场内机组数量大，完全

计及所有机组工况并不现实，也不具有操作性；另外尾流效应和时滞效应受气温、风向等因素影响，建模困难、量化计算难度大。采用统计方法和智能方法的风电场风速-功率建模是以实测数据分析为基础的，两者有效地规避了上述问题，但实测数据只能表征风电场在某一时间区间、某一运行方式下的特性，尽管可通过大量的数据分析消除时间因素对所构建模型的影响，但得到的模型不能囊括风电场的所有运行方式；而且风电场输出功率不仅与当前风速有关，还与风速过程有关，因此进一步研究还需深入展开。

2 风电场的静态建模研究

2.1 不同类型风电场的静态建模

2.1.1 基于恒速恒频机组的风电场静态建模

恒速恒频风电机组采用异步发电机，机组本身没有励磁装置，没有电压调节能力；另外，不同于变速恒频机组通过电力电子器件与电网相连，恒速恒频机组与电网直接相连，机网间耦合紧密，加之恒速恒频风电机组的发电机转速运行点相对比较靠近。因而由恒速恒频风电机组构成的风电场(简称恒速型风电场)多使用聚合法进行等值，具体有两种处理方式：一是将风电场等值为“1 台风力机+1 台发电机”，其中等值风电机组的容量等于所有风电机组的代数和，输入为平均风速；另一种方式则将风电场等值为“多台风力机+1 台发电机”，在建模时先将风电场分群，并用几台等效的风力机来体现整个风电场的机械功率，进一步地，叠加这些风力机的机械转矩并将其作为等值发电机的输入，从而建立风电场的静态等值模型。

当风机间风速差异较大时，“1 台风力机+1 台发电机”建模会出现明显的有功和无功功率的误差，而“多台风力机+1 台发电机”建模只出现无功功率的误差；当风机间风速差异较小时，两种方法效果都较好。因此对于大型恒速型风电场，由于其占地面积大，机组间工况差异较大，应采用前者进行建模以减小可能带来的误差。

2.1.2 基于变速恒频机组的风电场静态建模

一般地，基于变速恒频风电机组的风电场(简称变速型风电场)静态建模常采用“一台风力机+一台发电机”、“多台风力机+一台发电机”或“多台风力机+多台发电机”形式进行建模。

变速恒频风电机组以DFIG机组和PMSG机组为代表,风电机组本身有桨距及功率控制能力,因此场内机组排列、地形差异、尾流效应及时滞效应对发电机输出功率的影响相对较小,因而采用“多台风力机+1台发电机”模型可以达到较好的效果。

目前,风电场静态建模时往往忽略风电场的内部损耗,且常假设风电场内所有机组的机端电压等于风电场并网母线电压,这增大了风电场静态模型的误差。文献[11]通过仿真指出对恒速型风电场进行静态建模时,忽略场内损耗对潮流计算结果影响不大,但对DFIG风电场进行静态建模时,不可忽略集电系统产生的功率损耗和电压降,一旦忽略容易带来较大的误差。因此,变速型风电场静态等值既要计及机组的工况差异,又需考虑集电系统的功率损耗和电压降落。特别是对于占地面积大、位于电网末端的风电场,集电系统的不同等值会给仿真结果带来明显的影响。为了在风电场静态等值时计及集电系统的功率损耗和电压降落,文献[12]给出了DFIG机组恒功率运行方式下,计及集电变压器损耗时风电场节点有功和无功的计算方法;文献[13]则给出了3种结构集电线路的简化等值计算方法,对建立计及集电系统功率损耗和电压降落的DFIG风电场静态模型具有一定的指导意义。

2.2 含风电电力系统的潮流计算

2.2.1 风电场节点在常规潮流计算中的处理方法

潮流计算中常常将节点划分为3大类:PV、PQ和平衡节点。DFIG机组和PMSG机组拥有交流励磁能力,能够在一定范围内控制风电场的无功出力,因而将此类风电场视为功率因数恒定的PQ节点或无功有一定限制的PV节点在工程上是可以接受的。一般情况下,对基于DFIG机组或PMSG机组的风电场,当风电场工作在恒功率控制模式时,视风电场为PQ节点;当工作在恒电压控制时,视风电场为PV节点,如果迭代过程中节点电压越限,则将风电场视为PQ节点;对基于FSIG机组或OptiSlip机组的风电场,由于机组没有电压调节能力,因而这类风电场在潮流计算中通常视为PQ节点。

由上可知,风电场的潮流模型与风电机组的类型及控制模式有关,具体可总结为表1。

在潮流计算中将风电场简单处理为PQ或PV节点的前提是假设风电场与风电机组的功率因数相

表1 风电场的潮流模型

风电场内机组类型	控制模式	风电场潮流模型
FSIG风电机组	恒功率因数控制	PQ节点,Q为常数
OptiSlip风电机组	恒功率因数控制	PQ节点,Q为常数
DFIG风电机组	恒功率因数控制	PQ节点,Q为常数
	恒电压控制	PV节点,无功有限制
PMSG风电机组	恒功率因数控制	PQ节点,Q为常数
	恒电压控制	PV节点,无功有限制

等,但实际中两者的功率因数并不相等,有些时候甚至相差较大。因此,当风电场规模较大或计算精度要求较高时,这种简单处理存在较大误差。

风电机组吸收或发出的无功功率随机端电压的变化而变化,为体现这种无功功率的变化,常将异步电机的等值电路加入到潮流分析模型中,即把异步电机的滑差表示成机端电压和有功功率的函数,并将发电机视为阻抗型负荷加入潮流程序从而得到风力发电机的电磁功率;另外通过风速信息计算出风力机的机械功率,然后根据两个功率的差值修正滑差,反复迭代直到风电机组的机械功率和电磁功率相平衡^[14]。

文献[15]面对含风电电力系统潮流计算的问题提出了两种RX模型,并证明了所提模型的正确性。虽然RX模型充分考虑了风电机组的风速-功率特性,但此模型的迭代分两步完成:常规潮流迭代计算和异步发电机滑差迭代计算,总迭代次数多,收敛速度慢,实用性较差^[16]。为解决这一问题,文献[17]根据异步发电机等值电路推导出风电场无功功率与节点电压、有功功率以及滑差之间的关系,在此基础上提出了含风电电力系统潮流求解的联合迭代方法,即通过修正雅可比矩阵中风电场节点无功增量对电压的偏导来简化迭代过程,以节约计算时间,提高收敛速度。另外,文献[18]对RX模型也进行了改进,在雅可比矩阵中引入风电机组电磁功率与机械功率之差和滑差修正量,相应地对雅可比矩阵加以修改,在潮流迭代过程中获取滑差修正量,进行滑差修正,从而减少了迭代次数。

从研究结果看,风电场采用RX模型可以提高含风电电力系统潮流计算结果的准确性。但需要指出的是,常规潮流计算反映电力系统某一时间断面的系统状态,而实际的风电功率随风速实时变化,

风电对系统的影响呈现为持续性的不间断过程，即任意时刻断面间的风电场输出功率不尽相同，风电场对系统潮流分布的影响也不同。因此研究能够反映风能随机波动对系统潮流分布影响的计算方法，才能全面地反映风电场对系统稳定运行的影响。

2.2.2 含风电电力系统的随机潮流

随机潮流计算可得到含风电电力系统的节点电压概率分布和支路功率概率分布，能够更全面、更准确地反映风电场对电力系统运行的影响。

文献 [2] 利用蒙特卡罗模拟法计算了含风电电力系统的随机潮流，即结合风电场输出功率的随机抽样和常规牛顿-拉夫逊法潮流计算，得到具有概率描述的电压状态，最终得到风电场输出功率和电网各节点电压的概率分布。文献 [19] 使用无轨迹变换(Unscented Transformation, UT)算法进行含风电电力系统的随机潮流，并与通过蒙特卡罗法得到的结果进行了对比，指出使用 UT 算法得到的随机潮流解更精确。文献 [20] 使用马尔科夫模型计算了含风电电力系统的随机潮流分布。

风电场的有功、无功功率和并网点电压并非独立变量，据此文献 [21-22] 提出了半不变量法随机潮流方法计算含风电电力系统的潮流分布。其中文献 [21] 首先用风速分布模型和发电机模型得到场内风电机组输出功率的概率分布，继而用半不变量法计算含风电电力系统的节点电压、支路功率等待求量，再用 Gram-Charlier 级数展开式求取得待求量连续部分的概率分布，并用 Von Mises 方法求得离散部分的概率分布，最后将两部分卷积求得待求变量的概率分布。文献 [22] 进一步考虑风电场出力波动、负荷变化以及发电机停运等随机因素，对文献 [21] 提出的半不变量随机潮流计算方法进行了完善。

随机潮流能较全面地反映了含风电电力系统的潮流分布，其实质是随机性风电出力与确定性潮流计算的结合，是通过大量的计算获得具有概率意义的潮流分布结果。要使潮流概率分布更加合理，就需要在计算量和计算时间方面付出代价。要获得既满足计算精度，又满足速度要求的随机潮流结果，还需要在算法上有更深入的研究。

3 风电场动态建模研究

3.1 风电场动态建模的基本方法

风电场的动态模型依然采用“1 台风力机+1

台发电机”、“多台风力机+1 台发电机”或“多台风力机+多台发电机”的形式^[23]，但更关注机组本身的参数，其关键在于风速扰动或故障扰动下风电场动态特性的正确表征。风电场动态建模的方法很多，落实到本质主要分为两类：集总参数建模和同调等值建模。

3.1.1 风电场动态等值的集总参数建模

一般情况下，风电场动态集总参数建模多用“1 台风力机+1 台发电机”和“多台风力机+1 台发电机”的形式。其中，前者既对风力机进行集总等值又对发电机进行集总等值，从而将整个风电场等值为 1 台风电机组，其实质是将场内各机组的参数、容量、有功功率和机械功率简单相加，分别作为等值机组的参数、容量、有功功率及机械功率，从而聚合成 1 台风电机组来代替整个风电场^[24-25]。

由于“1 台风力机+1 台发电机”风电场动态等值建模比较简单，且容易实现，从而成为早期研究和近似等值最常用的方法。采用这种等值方法文献 [26-27] 研究了定速型风电场的并网暂态特性和暂态稳定机理，文献 [28] 研究了双馈型风电场的小信号稳定性，文献 [29] 研究了 DFIG 风电场的暂态稳定机理。进一步地，文献 [30] 对比分析了对称及不对称故障下风电场单机等值模型和基于实测数据聚合模型的优劣，分析指出 5 阶异步发电机和 2 阶转轴模型的单机等值模型有足够的准确度，能够表征故障时小容量恒速型风电场的动态特性。

由于场内地形、时滞效应和尾流效应等因素影响，场内各机组风况并不相同，因而风力机机械转矩不同、机械功率不同，用 1 台风力机等值整个风电场的机械功率部分存在较大差异，在大型风电场和风电基地等值时误差将更加明显^[31]。“多台风力机+1 台发电机”模型考虑了这些因素，其按场内地理位置、机组排列方式等将风电场划分为几个区域，并认为各区域内风电机组风况基本相同或相近，然后将区域内所有机组的机械功率用 1 台等值风力机表示，同时考虑到定速风电机组异步发电机间转速的差异较小，因而用 1 台发电机来等值，此时等值机的输入功率为几台风力机机械功率之和。

明显，“1 台风力机+1 台发电机”模型更适用于小型恒速型风电场动态建模，“多台风力机+1 台发电机”模型考虑了场内各机组风况的差异，适用于大型恒速型风电场或恒速型风电基地。但当前新建或扩建的风电场大多采用变速型风电机组，其

中 DFIG 风电机组因其性能稳定、价格相对合理而被广泛使用,而这种风电机组与电网部分解耦,风速扰动或电网扰动情况下,场内各机组发电机转速差异较大,此时整个风电场的电气部分用 1 台发电机等值必然存在较大误差,因而对于变速型风电场需要使用新的动态等值方法进行动态建模。

3.1.2 基于同调等值的风电场动态建模

对于变速型风电场,除机组风况存在差异外,当风电场遭遇风速或电网扰动时,场内各机组发电机转速将出现较大差异,因此在变速型风电场动态建模时,应当采用“多台风力机+多台发电机”等值思路对风电场进行等值。由于这种模型既考虑了风力机间的风速差异,又考虑了发电机间的转速差异,因此既适用于大型恒速型风电场建模,也适用于变速型风电场建模^[32-33]。在采用这种思路对风电场进行动态等值建模时,研究者多借助常规机组“同调等值”的思想将风电场同调等值动态建模分为 3 部分:风电机组相关机群划分、风电场集电系统等值化简和相关机群参数聚合。

机群划分是指通过合适的机群划分指标和算法,将具有相同或相近运行点的机组归为同一机群,然后用 1 台等值机组代替同一个机群中的所有机组的过程。一般情况下划分指标和算法应能较好地反映机组运行状态,且必须容易获取和求解。由于风能的随机性和不可控性,风电机组通常工作在不断地被动调整和变化中,因此用于传统电力系统同调等值法中的机群划分指标并不适用于风电场。

关于风电机组机群划分的原则,由于不同类型和容量的机组性能差别较大,因而要首先考虑按风电机组的机型和容量划分机群。当风电场地势平坦、机组排列规则时,可按风电机组类型和地理位置进行划分^[3],如文献[34]根据场内风电机组的连接位置关系来进行机群的划分,如水平机群(机组水平排列)、垂直机群(机组垂直或成对角线排列)和混合机群(机组排列比较混乱)。文献[35]根据风电机组输入风速和风功率曲线的相似性来进行风电场机群的划分。文献[36]则对使用机组输入风速来进行场内机群划分的方法作了进一步的验证。

针对地形复杂、机组分布不规则的风电场,仅依靠风机位置、风速情况进行机群划分是不够的。文献[37-38]基于场内各机组实测数据,构建了能表征机组数据相似性的加权图,并以此构建

马尔可夫转移矩阵,并对其进行谱分解和特征降维,在此基础上定义扩散距离(Diffusion Distance)作为数据点之间接近度的度量,最后通过比较数据点间的扩散距离,将每个数据聚类到相应群,进而确定各个群具体包含哪些数据点,从而把每台风电机组划分到相应的群,实现了场内机群的划分。文献[39]指出异步发电机机械暂态方程的特征根决定异步电机发生小扰动时的动态特性,因而可将该特征值作为机群划分的指标,将特征值相近的异步发电机划分为同一个机群。文献[40]利用风电机组实测的有功数据,构造能够反映风电机组运行特性的马尔科夫转移概率矩阵,提出了基于马尔科夫链的统计学同调机群划分方法。

此外一些学者还将目光投向了智能归类算法,如 K-means 聚类算法、支持向量机(Support Vector Machine, SVM)分类算法。文献[41]以风速、有功功率和机型作为风电场机群划分的特征量,并利用支持向量机分类器对机群进行划分。文献[42]以故障初始时刻机组的标么值功率作为 FSIG 风机分群的指标,并使用 K-means 算法实现机组的分群。文献[43]指出恒速型风电机组在故障切除时转速的大小能反映轴系中积累的能量和故障持续的时间,从而能反映故障后风电机组的运行点,因此文中以恒速风电机组的转速作为风电机组机群划分的依据,并以 K-means 聚类算法实现机群的动态划分,且通过仿真证明以故障时发电机转速为机群划分指标优于以风速为指标所进行的机群划分。

针对基于 DFIG 机组的风电场。文献[33]以 DFIG 机组桨距角动作情况作为机群划分的依据,并把能够反映桨距角动作的风速、有功功率和机端电压构成特征向量作为 SVM 分类器的输入,从而实现 DFIG 风电场的机群划分。文献[44]以故障前瞬间风机转子转速作为 DFIG 风机分群的指标,并采用 K-means 算法实现机组的分群。文献[45]将反映 DFIG 机组状态的滑差、桨距角、电磁及机械转矩、以及定转子电流电压等 13 个状态变量构成状态矩阵,在此基础上利用样本数据,通过 K-means 聚类算法对风电场进行了机群划分。针对基于直驱式风电机组的风电场。文献[46]采用能表征直驱式风电机组运行特性的指标(转速、叶尖速比、桨距角),利用 K-means 聚类算法对相应风电场进行机群划分。

另外,文献 [47-48] 指出依据风速和风向实现场内机群划分后,若风速和风向变化则整个风电场需要重新进行机群划分,既费时又繁琐,因此文中提出了一种概率性机群划分方法,即首先利用 SVC 算法进行机群划分,并取一年中出现概率最大的机群划分结果作为最终结果,进而建立风电场模型。

可见,表征风电机组动态特性的特征量没有形成统一,风电场机群划分的特征量选择比较困难,特征量选择太少不能实现机群的合理划分,选择过多又增加计算负担,因此机群划分时选用的指标不尽相同,机群划分的方法也并不唯一。由于风的强随机波动性,机群划分结果具有其局限性。因此,在应用中要面向研究目的,在满足仿真精度要求的情况下,尽可能选择可观测特征量以及较为简单的机群划分依据和划分方法。从笔者的当前研究看利用大量的可观测运行数据,采用智能聚类算法进行机群划分可以获得更具普遍性的等值模型。

3.2 风电场集电系统的等值化简

风电场内含有几十甚至上百台机组,机组往往成排分布并通过地理电缆连接到汇集母线,再经由风电场升压变压器并入电网,这不同于常规发电机直接经由升压变压器并入电网的情况;另外风电场内部接线相对复杂,涉及大量的电缆线路,由于电缆线路电抗小、电纳大,对风电场的无功功率分布、电压特性存在显著影响,当仿真精度要求较高或当研究风电集群地区的电压特性时,需要计及风电场的集电系统。

为计及风电场集电系统对机组机端电压的影响,文献 [33] 指出了风电场电缆系统的简化原则:等值风电场接入点电压等于等值前所有机组接入点电压的加权平均值,权重为机组输出功率;同时文献 [33] 以上述原则为基础,给出了放射式结构等效电缆的化简过程,从而等值了风电场的集电系统,并且通过对比仿真证明了所建立集电系统等值模型的正确性。文献 [43] 为计及风电场电缆线路充电电容对风电场无功功率的影响,推导了干线式集电系统等效电缆阻抗的等值公式。文献 [49-50] 在考虑风电场布局、所使用并联装置类型及容量、以及所使用连接线路类型对场内集电系统影响的基础上,提出了一种基于场内功率损耗等效的风电场集电系统等值化简方法,并建立了干线式接线风电场集电系统的等值模型。

风电场集电系统的任意一条线路流过的功率都不尽相同,要准确计及需要建立详细复杂的模型,而且所建模型要根据场内机组的投入情况和连接关系的改变实时做出调整。但当前研究对集电系统的等值化简都只是针对特定情形的建模,研究能够根据风电场实际情况灵活实现修正的集电系统等值化简方法对建立风电场动态模型有重要意义。

3.3 风电场机群参数的聚合

机群参数聚合是指对相关机群构造等值发电机并求取其等值机参数,使得它在暂态稳定分析中能较好地模拟该机群中发电机及其调节系统的综合动态响应的过程。根据研究问题的侧重点不同,等值发电机所需要具体等值的参数不尽相同,所用的方法也略有差异。常用的等值参数聚合方法有:

3.3.1 加权求和法

用容量加权求和法求取集总模型参数是一种常用方法,在风电场集总模型参数计算中也常用到^[27,51-52]。加权求和法所用等值机组模型均为实际系统元件模型,可直接用于系统暂态稳定分析;同时该方法简单、计算量小,在实际中得到了广泛应用。

不同于 FSIG 机组,变速风电机组的有功功率变换器及各控制环节,采用该方法很难准确计算控制环节参数,因此用于基于 DFIG 机组或 PMSG 机组的风电场等值模型参数聚合可能带来较大的误差。

3.3.2 频域聚合法

频域聚合法根据实际元件中各个单元的特性来确定等值模型的特性,参数聚合中以各单元传递函数为基础,实现传递函数的聚合,最终得到等值模型的参数。文献 [53-54] 借鉴常规机组同调等值中频域聚合法的思想,提出基于传递函数概念的多台异步发电机的等值参数辨识方法。文献 [53] 应用此方法得到了风力发电机组的惯性时间常数、阻抗及滑差,并在转子绕组时间常数和异步机电抗的计算中使用最小二乘法对整个风电场总传递函数的频率响应进行了拟合,从而得到对应于实际响应的最佳等值参数。文献 [54] 则将异步发电机看作同步发电机的特例,假定励磁电压为零,d、q 轴参数相等,转速为非同步转速;并根据同步发电机电磁回路聚合时所采用的四阶实用模型推导出异步发电机电磁回路的四阶模型,从而得到等值异步发电机的传递函数,然后采用最小二乘法的 Gauss-Newton 型算法对等值发电机传递函数的频率响应进行拟合,计算出对应于时间响应曲线最佳拟合点

的转子时间常数、同步电抗和暂态电抗,实现对多台异步发电机参数的辨识。频域聚合法在理论上比较严谨,物理透明度高,但聚合算法较复杂,等值时间长,对于大型风电场和风电基地的参数聚合则需要更长的等值时间。

3.3.3 时域聚合法

时域聚合法就是通过特定的算法调节模型参数,使风电场等值模型的动态特性与风电场的实际特性在相同扰动(激励)下尽可能相同。文献[55-57]提出基于遗传算法的参数优化模型,利用整个风电场风速的波动、风电机组参数的差异及机组间不同运行工况等信息来优化风电场等值模型的参数,以提高等值模型的精度;算法采用等值前后输出有功、无功、电压率偏差的平方和作为优化目标函数,利用遗传算法在整个解空间上进行变异、交叉、选择操作,按随机概率意义寻找满足优化目标函数的风电场最优等值模型参数。时域聚合法从一定程度上规避了复杂的理论分析,但该方法对结构复杂、阶数较高模型的参数聚合的适应性较差,另外聚合算法需要大量的实测数据,而有些重要数据的获取比较困难,甚至在实际中根本无法得到。

无论采用频域聚合法还是时域聚合法,都必须借助一定的算法来实现,同时必须面对等值模型主导参数的识别问题、所采集数据典型性和代表性的判别问题以及防止算法陷入局部最优解等问题,因而相应的研究也有待进一步深入。

4 结束语

本文首先总结了风电场风速-功率特性建模的研究情况;紧接着对不同类型风电场的静态建模研究现状及常规潮流中风电场节点的处理方法和含风电电力系统随机潮流计算的研究现状作了概括;最后从风电场动态建模的基本方法、风电场集电系统的等值化简及风电场机群参数聚合3个方面对风电场动态等值建模的研究现状进行了归纳。

综上所述,目前风电场等值建模,特别是动态等值模型的研究工作仍处于理论研究阶段,还没有公认模型,模型的验证、模型的标准化、模型评价指标等方面还有很多工作需要完成。未来,随着并网风电规模的进一步增大,风电对电力系统的影响更加严重,风电场等值模型的研究工作需要更多的研究成果。作者认为:①“同调”机组划分是风

电场等值简化的关键,用于大规模风电场或风电基地风电机组机群划分的指标、特征量以及划分算法将是研究的一个热点,或许以实测数据为基础结合SVM、K-means等智能算法的机群划分方法会成为一个新的途径;②实现“离线聚合在线匹配”的风电场建模策略,即先依据历史数据对常见工况下的风电场进行离线建模,并建立风电场模型库,然后依据风电场实际工况从风电场模型库中选择最佳的匹配模型用以含风电场电力系统的分析及计算;③风电功率的随机波动对系统的稳定运行造成了严重影响,研究风功率波动的空间分布特性和时间延续特性,并建立风功率波动模型对相关研究具有重要意义;④考虑风功率随机波动性的风电场静态模型及考虑随机性的用于机电暂态仿真的风电场模型研究也非常重要,需要更多的支撑。

参 考 文 献

- [1] 娄素华,李志恒,高苏杰,等. 风电场模型及其对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(s2): 330-334.
- [2] 郑睿敏,李建华,李作红,等. 考虑尾流效应的风电场建模以及随机潮流计算[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(12): 1515-1520.
- [3] 陈迎. 基于运行数据的风电场等效建模研究[D]. 北京:华北电力大学, 2012.
- [4] 郎斌斌,穆钢,严干贵,等. 联网风电机组风速-功率特性曲线的研究[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 70-74.
- [5] HAYES B P, Ilie I, Porpodas A, et al. Equivalent power curve model of a wind farm based on field measurement data[C]. 2011 IEEE Trondheim PowerTech, 2011: 1-7.
- [6] LIU X. An Improved Interpolation Method for Wind Power Curves[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(3): 528-534.
- [7] 严干贵,李鸿博,穆钢,等. 基于等效风速的风电场等值建模[J]. 东北电力大学学报, 2011, 31(3): 13-19.
- [8] LI S, WUNSH D C, O'HAIR E A, GIESSEL-MANN M G. Using neural networks to estimate wind turbine power generation[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2001, 16(3): 276-282.
- [9] 马幼捷,杨海珊,周雪松,等. 基于神经网络的风电场建模[J]. 中国电力, 2010, 43(9): 79-82.
- [10] 马幼捷,刘玥,周雪松,等. 基于现场数据的风电

- 场建模辨识 [J]. 华东电力, 2011, 39 (11): 1893-1896.
- [11] LIN Li, CHEN Ying, WANG Ning-bo. Clustering Wind Turbines for a Large Wind Farm Using Spectral Clustering Approach Based on Diffusion Mapping Theory [C]. 2012 PowerCon, 2012.
- [12] 陆以军, 高厚磊, 侯梅毅, 等. 基于双馈机组的风电场潮流计算模型研究 [J]. 电气自动化, 2009, 31(4): 21-23.
- [13] MULIADI E, BUTTERFIELD C P, ELLIS A. E-equivalencing the collector system of a large wind power plant [J]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006.
- [14] 孙勇, 李海峰, 侯俊贤. 风电场静态等值及应用研究 [J]. 江苏电机工程, 2012, 31(4): 52-54.
- [15] WANG Li, LIN Yuhung, CHEN Yiting. Load-Flow Analysis of a Wind Farm Containing Multiple Wind-Driven Wound-Rotor Induction Generators With Dynamic Slip Control Using RX Models [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2 (3): 256-264.
- [16] 刘燕妮, 王玮, 王英男. 电力系统潮流计算中风电场模型研究 [J]. 华东电力, 2008, 36(4): 58-61.
- [17] 王海超, 周双喜, 鲁宗相, 等. 含风电场的电力系统潮流计算的联合迭代方法及应用 [J]. 电网技术, 2005, 29(18): 59-62.
- [18] 吴义纯, 丁明, 张立军. 含风电场的电力系统潮流计算 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (4): 36-39.
- [19] AIEN M, FOTUHI-FIRUZABAD M, AMINIFAR F. Probabilistic Load Flow in Correlated Uncertain Environment Using Unscented Transformation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27 (4): 2233-2241.
- [20] MUR-AMADA-J, BAYOD-RUJULAA. Wind power variability model Part II-Probabilistic power flow [J]. 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation(EPQU 2007), 2007: 1-6.
- [21] 别朝红, 刘辉, 李甘, 等. 含风电场电力系统电压波动的随机潮流计算与分析 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(12): 1500-1505.
- [22] LI G, ZHANG X P. Stochastic optimal power flow approach considering correlated probabilistic load and wind farm generation [J]. IET Conference on Reliability of Transmission and Distribution Networks (RTDN 2011), 2011: 1-7.
- [23] CONROY J, WATSON R. Aggregate modelling of wind farms containing full-converter wind turbine generators with permanent magnet synchronous machines: transient stability studies [J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(1): 39-52.
- [24] SLOOTWEG J, KLING W. Aggregated modelling of wind parks in power system dynamics simulations [C]. IEEE Power Tech Conf. Proc, 2003, 3: 1-6.
- [25] VLADISLAV A, HANS K. An aggregate model of a grid-connected, large-scale, offshore wind farm for power stability investigations-importance of windmill mechanical system [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24(9): 709-717.
- [26] 钱少锋, 林俐, 沈辉, 等. 基于 PSS/E Wind 大型风电场并入输电网的动态特性研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(6): 11-16.
- [27] 林俐, 杨以涵. 基于绕线式异步发电机的风电场并网暂态稳定机理分析 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 102-106.
- [28] TABESH A, IRAVANI R. Small-signal model and dynamic analysis of variable speed induction machine wind farms [J]. IET Renewable Power Generation, 2008, 2(4): 215-227.
- [29] 林俐, 杨以涵. 基于扩展等面积定则的含大规模风电场电力系统暂态稳定性分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 105-110, 115.
- [30] ABRAM P, SANNA U-J, Ola C, et al. Comparison of an aggregated model of a wind farm consisting of fixed-speed wind turbines with field measurement [J]. Wind Energy, 2008, 11(1): 13-27.
- [31] ZHAO S, NAIR N-K C. Assessment of wind farm models from a transmission system operator perspective using field measurements [J]. IET Renewable Power Generation, 2011, 5(6): 455-464.
- [32] SLOOTWEG J G. Wind Power Modeling and Impact on Power System Dynamics [D]. Technische Universiteit Delft, 2003.
- [33] 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.
- [34] BNANKAR H, TECKOOI B. Clustering of Wind Farms and its Sizing Impact [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(4): 935-942.
- [35] FERNANDEZ L M, FRANCISCO J, JOSE R S. Aggregated dynamic model for wind farms with doubly fed induction generator wind turbines [J]. Renewable Energy, 2008, 33: 129-140.
- [36] MENG Z J, XUE F. An investigation of the equiv-

- alent wind method for the aggregation of DFIG wind Turbines [C]. 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2010.
- [37] MA Y, RUNOLFSSON T, JIANG J N. Cluster analysis of wind turbines of large wind farm with diffusion distance method [J]. IET Renewable Power Generation, 2011, 5(2): 109 - 116.
- [38] YONG Ma, JIANG J N, RUNOLFSSON T. Cluster analysis of wind turbines of large wind farm [C]. IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition 2009(PSCE '09), 2009: 1 - 7.
- [39] 闫广新, 晁勤, 刘新刚, 等. 含变速双馈风电机组风电场的等值问题 [J]. 可再生能源, 2008, 26(1): 21 - 23.
- [40] 张坤. 用于电力系统仿真的风电场等值模型研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [41] 王鑫. 风电场动态等值模型研究 [D]. 河北: 华北电力大学, 2008.
- [42] 张保会, 李光辉, 王进, 等. 风电接入对继电保护的影响(一)——鼠笼式风电场电磁暂态等值建模 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(1): 1 - 6.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] ALI M, ILIE I-S, MILANOVIC J V, et al. Probabilistic clustering of wind generators [C]. 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010: 1 - 6.
- [48] ALI M, ILIE I-S, MILANOVIC J V, et al. Wind Farm Model Aggregation Using Probabilistic Clustering [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, PP(99): 1 - 8.
- [49] MULJADI E, BUTTERFIELD C P, Ellis A, et al. Equivalencing the collector system of a large wind power plant [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting 2006, 2006.
- [50] MULJADI E, PASUPULATI S, ELLIS A, et al. Method of Equivalencing for a Large Wind Power Plant with Multiple Turbine Representation [C]. 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008: 1 - 9.
- [51] 谭娟. 含大规模风电场的电网等值研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [52] 何桂雄, 晁勤, 等. 风电场恒速发电机动态等值参数聚合的研究 [J]. 可再生能源, 2009, 27(1): 14 - 22.
- [53] 孙建锋, 焦连伟, 吴俊岭, 等. 风电场发电机动态等值问题的研究 [J]. 电网技术, 2004, 28(7): 58 - 61.
- [54] 包能胜, 徐军平, 倪维斗, 等. 大型风电场失速型机组等值建模的研究 [J]. 太阳能学报, 2007, 28(11): 1284 - 1289.
- [55] 吴学光. 风电场并网运行的数学建模及遗传算法模型优化研究 [D]. 武汉: 武汉水利电力大学, 2000.
- [56] RAIE A, RASHTCHI V. Accurate identification of parameters, in winding function model of induction motor, using genetic algorithm [C]. SICE 2002 Proceedings of the 41st SICE Annual Conference, 2002, 4: 2430 - 2434.
- [57] 李辉, 王荷生, 史旭刚, 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.

收稿日期: 2013-05-16

作者简介:

林俐(1968—), 女, 博士, 副教授, 主要从事电力系统分析与控制、风电并网及其系统分析方面的研究工作, E-mail: linli@ncepu.edu.cn;

赵会龙(1988—), 男, 硕士研究生, 从事风电并网及其系统分析方面的研究, E-mail: axldzhl@163.com;

陈迎(1987—), 女, 硕士研究生, 从事新能源及风电并网技术研究工作;

李丹(1989—), 女, 硕士研究生, 从事风电并网及其系统分析方面的研究。

(责任编辑: 林海文)