

风电场等值建模研究综述

张元, 郝丽丽, 戴嘉祺

(南京工业大学自动化与电气工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要: 随着风电场规模的不断增大, 对风电场中每台风机建模将造成计算量过大, 不利于大型风电场的研究, 需要对风电场进行等值化简。对双馈感应风机和直驱永磁同步风机两种当前热门机型的建模进行概述, 同时介绍了潮流计算中风电场的处理方法, 并对风电系统的等值进行了综述, 包括风速的等值、风电场的分群、同群风机的等值方法、常用的参数优化算法及其对等值的影响。最后综述了含单一主流机型风电场通常采用的等值方法, 并指出随着不同机型并存的大型混合风电场的增多, 混合风电场等值建模研究的必要性及研究趋势。

关键词: 风电场等值; 静态等值; 动态等值; 参数优化; 混合风电场; 双馈感应风机; 直驱永磁同步风机

Overview of the equivalent model research for wind farms

ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi

(School of Automation & Electrical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: With the scale of wind farm increasing, modeling for each turbine in wind farm will lead to excessive computing, which is not conducive to the research of large-scale wind farms. Wind farms need to be simplified. Firstly, the modeling of doubly fed induction generator and direct-drive permanent magnet synchronous generator which are frequently used currently is summarized. Meanwhile, the methods of dealing with the wind farm in load flow calculation are introduced. Then the aspects of wind power system equivalence are described which include wind speed equivalence, clustering of wind farms, equivalent method of the same group of wind turbines, widely used parameter optimization algorithms and the effect of those optimization algorithms on equivalence. Finally, the commonly used equivalent methods of wind farms composed of single mainstream wind turbine type are reviewed, and the research necessity and trend of the mixed wind farm equivalent modeling with the increasing of amount of the large wind farms composed of different types of wind turbines are pointed out.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307078).

Key words: wind farm equivalent; static equivalent; dynamic equivalent; parameter optimization; mixed wind farms; DFIG; PMSG

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)06-0138-09

0 引言

风力发电是实现风能大规模开发利用的重要途径, 是实现低碳电力的重要选择。不断扩大的风电场规模, 使得风电在电网中所占的比例不断提高。日益成熟的风力发电技术使得越来越多的大规模风电场实现了并网运行^[1], 风电场将成为电力系统的重要组成部分^[2]。随着风力发电机组数量的增多, 建模过程中如果把每台风机都用详细模型表示, 将导致电力系统“维数灾”的发生^[3]。因此, 作为

后续研究风电场的基础, 为准确评估大容量风电场和电力系统之间的相互影响, 开展对风电场等值建模的研究就显得尤为必要。

本文对当前热门机型双馈感应风机和直驱永磁同步风机的模型及等值方法进行研究分析, 评述了近年来风电场常用静态和动态等值方法, 同时介绍了多种优化算法以提高等值模型的精度, 讨论了混合风电场等值的研究情况。

1 风机类型及其模型结构

当前的主流风机类型大体可分为双馈感应风机和直驱永磁同步风机两种。

1.1 双馈感应风机建模

双馈感应风机能与电网柔性连接,实现有功和无功功率的控制,还可跟随风速变化捕获最大风能,成本低^[4],其模型由转子模型、网侧模型、传动系模型、定子模型及直流连接电容器模型几部分组成^[5]。文献[6]构建了具有变速恒频风电机组特性的小型风电场整体详细动态数学模型,包含风速模型、风力机及传动部分模型、双馈发电机模型、桨距角、变频器及电气控制模型。文献[7]提及的双馈风力发电机小信号动态等值建模方法,涵盖16个状态变量,具有一定代表性。

1.2 直驱永磁同步风机建模

通过永磁体励磁,中间直流环节切断了发电机和电力系统的无功能量交换。同步发电机随风能变化,通过变速恒频优化控制系统输出功率,功率因数由网侧变流器改善,并在一定范围内调节输出电压。采用变速功率调节,风电机组在控制系统作用下,工作在恒功率因数模式^[8]。直驱永磁同步发电机虽略去齿轮箱却需要功能更强大的电磁功率转换器和更昂贵的发电机^[9]。直驱永磁同步风机的通用化建模包括风速模型、风力机模型、传动模型、发电机模型以及变频器模型^[10]。

这样的机理建模,需对风机各部分单独建模,再组合成完整风机的模型,工作量大,不适于大型风电场研究。

2 风电系统潮流计算

风电场的潮流计算主要用于风电场的静态等值模型。经过潮流计算可将风电机组并网后对电网的影响状况进行有效评估^[11]。在对含有风电场的电力系统进行潮流计算时,需考虑风电机组运行方式和机组类型的差异,不能将风电场节点简单视为PQ或PV节点。如在对由双馈异步风力发电机组组成的风电场进行潮流计算时就要考虑风力发电机转速控制规律^[12]。

2.1 风电系统常规潮流计算

常规的风电场静态等值有PQ、PV简化模型法和RX模型法两种。PQ简化模型法认为风电场及其单台风电机组的功率因数均相等^[13],根据给定风速和功率因数,算出风电机组的有功及无功功率,将风电场等值为PQ节点,物理概念清晰,计算简便,但未计及风电场内部集电系统影响易导致等值精度不高,不适用大型风电场。为此,文献[14]指出了考虑风电场集电系统的变PQ迭代法,即保留集电线路(主要指架空线路),当风电场计算所得有功与设定值相等时将风电场视为PQ节点处理。传统风电场系

统潮流计算首先建立常规PQ模型再假设功率因数恒定,文献[15]结合常规PQ模型构建风电场稳态分析模型,采用异步发电机等值电路计算滑差和无功功率的方法,在相同风速下有效减小总体无功功率和节点电压。定速风电机组和最优滑差风电机组均采用恒功率因数控制,风电场可等值为PQ节点。工作在恒电压控制模式的双馈感应风机和永磁直驱风力机组成的风电场也可由具有一定无功限制的PV节点表示。

文献[16]的RX模型法将风力发电机作为阻抗型负荷,将异步电机的滑差用有功功率和机端电压的函数表示,给出滑差和风速的初始值,把风力发电机的电磁功率和由风速等计算得出的机械功率的差值用于修正滑差,多次迭代使得风机机械功率和发电机电磁功率保持平衡。由于完全考虑了风力发电机的输出特性,是当前较为完善的静态等值模型,但因其迭代次数增加,导致仿真时间过长,应用性不佳。

2.2 风电系统随机潮流计算

随机潮流计算不仅计及发电机随机停运和负荷随机波动,同时还考虑了线路随机故障,能更全面地反映风电场对电力系统运行的影响。文献[17]提及的随机潮流算法适于各随机因素相互独立的情况。采用半不变量法分别计算离散随机因素和连续随机因素共同作用下支路功率和节点电压等待求量的半不变量,用Gram-Charlier级数展开式和Von Mises方法分别求解待求量连续部分和离散部分的概率分布,卷积两部分求出待求变量的概率分布,在计算精度和速率方面均有所提高。文献[18]指出当研究风电场受风速影响的情况,可采用蒙特卡罗模拟并忽略负荷和发电机出力及线路故障等随机影响因素,根据重复抽样结果获得状态电压的概率描述。

2.3 风电系统概率潮流计算

概率潮流计算能反映电力系统中各因素的随机变化对系统运行的影响,能分析考虑由风速波动引起风电出力的随机性,给出系统节点电压和支路潮流的概率统计特性,其实质是求解含有随机参数的潮流方程。目前,概率潮流计算方法主要包括卷积法、半不变量法、点估计法和蒙特卡罗仿真法。其中,卷积法计算量大,点估计法输出随机变量的误差较大^[19]。在只有风电场实测输出功率样本数据的情况下,采用点估计和Gram-Charlier展开相结合的含风电概率潮流实用算法便可较为准确地估计输出随机变量的全部信息^[20]。相比蒙特卡罗仿真法,计算效率更高,结果更准确。文献[21]提及的基于三

阶多项式正态变化和半不变量法结合的概率潮流算法具有广泛的适用性,输入量可为电力系统任一随机变量,变量也可以服从任一概率分布,只要已知其累积分布函数就能处理其相关性,得到相互独立的变量,适用基于半不变量法的概率潮流计算。文献[22]提到一种可处理输入随机变量相关性的基于拉丁超立方采样的蒙特卡罗概率潮流算法,能给出输出随机变量的全面信息,处理输入随机变量的相关性,且不受输入随机变量概率分布类型的约束。

3 风电场系统的等值

风电场的动态等值就是在保证风电场对研究系统动态影响不变的条件下,对风电场进行简化的过程。

3.1 风速等值方法

当遭遇同种风影响时可用等值风速驱动风机^[23]。最常用的风速等值根据切入风速整合风机,明确划分切入风速的标准,通常有平均风速法和风速-功率曲线法。当风速差异较小可对风速进行线性平均,忽略风速及风功率间的非线性关系。三次均方根风速等值法不计及风功率利用系数对等值的影响,可提高等值准确性。如风速差异较大,常采用风功率曲线求取等值风速^[24],能减小等值模型阶数及仿真时间^[25]。文献[26]依据风电场平均风速作为整体等效风速建立了风电场“等效风速-输出功率”等值模型。因风速、风向间的马尔可夫性,利用一阶自回归简化模型对风向量时间序列建模,利用马尔可夫链调制的风速时间序列形成合成风速,建立计及风向影响的风速模型^[27]。文献[28]针对脉动风速,利用 Von Karman 连续谱密度函数和自回归模型,建立基于谱密度分析的风速模型,并在此基础上构建虚拟风电场,较好处理了模拟过程的非连续性和模拟时间的局限性,为今后等值风速的研究提供基础。

3.2 风电场的分群原则

对于风电机组数量多、占地广、运行点不同、场内风速分布不均的大型风电场不适宜将其简单等值为单台风机^[29]。为此,风电场的合理分群必不可少,且分群的优劣直接影响等值的效果。

按输入风速不同对风电场分群较为常见,但大型风电场风速差异大、机组间风速变化有连续性易导致分组过多,分组指标不明显。依据风电场遭受较大干扰或故障时风电机组的动态特性,对风电场输出特性起主导作用的因素除了风速还有风向。文献[30]提及了一种由风电机组、风速和风向构成的三维相关系数矩阵对风电机组进行分群的方法,能根据不同风速、风向快捷分群,适用风速风向均波

动的风电场。针对双馈式风电场,利用风速、转速差异作为特征变量对风电场进行动态分群,可提高分群精度^[31]。依据风电场内各双馈发电机受系统故障影响程度不同识别出电压动态响应相近的风力发电机组是基于双馈风力发电机暂态电压特性的聚类分群方法^[32]。文献[33]指出,在双馈风机无穷大系统中,可将主导状态变量作为风电机组的分群指标。而对于直驱式风电机组的分群,因转速和功率的限制,可找寻由变速控制区、恒转速变功率区和恒功率变桨距区描述的分群指标下空间距离相近的同群机组^[34]。以风电机组具有相同或相近运行点^[35]为机组分群原则,应用扩散映射理论的谱聚类算法对风电场各机组的实测运行数据分析,找到风电机组间动态运行过程的相似性,实现对风电场内部风电机组的聚类划分^[36]。根据尾流效应影响程度对风电场分群也是一种方法。文献[37]通过定义尾流影响因子作为风电机组的分组指标,把其值相同的风电机组划为同群。

针对同型风机风电场,机群划分与风电场内风机布局及风电场所处地形密切相关。对于地形复杂、布局不规则的风电场,按风电机组运行点相近原则划分较按地理位置简单划分的结果往往更准确。

3.3 风电场常用等值方法

早期常用聚合法将整个风电场简单等值为单台风机,往往忽略尾流效应的影响,等值误差较大。或将具有相同风速的风机等值为一台,每台风机再驱动同等容量的等值异步发电机,这样的多机等值模型能有效降低风电场的复杂性^[38-41]。

3.3.1 容量加权单机等值法

容量加权单机等值法通常忽略连接风电场内相邻风力机组电缆线路阻抗的影响,当风力发电机组通过出口变压器接于同一母线时以发电机容量为权值确定等值发电机的参数。

3.3.2 改进容量加权单机等值法

改进容量加权单机等值法改进了容量权值系数,较前者提高了等值精度,对于单机等值更能体现大容量风力发电机组的动、暂态特性。

3.3.3 基于同调等值的加权等值法

该法的使用前提是风电机组类型、机端电压、转子转速均需相同,并假设所有机组并联于同一母线上且不考虑风速差异的影响^[42]。基于发电机转子同摆的同调等值法包括相关机群识别、网络化简和相关机群参数聚合,能在简化参数聚合程序的基础上满足精度要求并节省仿真时间^[43]。

3.3.4 参数变换单机等值法

参数变换单机等值法通过引入虚拟阻抗进行参

数计算和反变换,最终将多台风力发电机组等值为单台风机,可在风力发电机组参数不同的情况下获得最高的等值精度,能更精确地表示风电机组的参数等值和内部连接情况^[44]。

3.3.5 单机表征法

单机表征法把风电场等值成一台风机和一台发电机,其输入为平均风速,等效容量为整个风电场所有风机容量代数和,适用风电机组间风速差异较小的情况。针对风速差异较大的风电场则保留所有风速模型和风力发电机,叠加风力机的机械转矩为等值发电机的输入,将风电场等值为一台发电机,但仍存在无功误差^[45]。故文献[46]指出在风速波动较大时,采用一种定速风电机组风电场变参数电容补偿等值建模法能有效减小此类误差。其中,按补偿方式又可分为机端固定和机端分组投切电容器补偿。此外,在故障条件下,采用以上常用等值方法和分类方法相结合的等值法能有效提高风电场动态等值精度。

3.3.6 变尺度降阶多机等值法

变尺度降阶多机等值法是在均匀布置的矩形风电场中,假设每一排风机具有相同风速及它们运行在相同运行点后^[47]将参数完全一致的每行(列)风力机组等效为一台风力发电机的方法^[48],等值风机的容量和有功功率即每行(列)风机的代数和。如计及尾流效应,需将运行状态相近的风电机组进行等值^[49-51]。

3.3.7 输出特性等值法

现有的等值方法中等值参数主要是根据电机结构并联计算或对特定故障进行曲线拟合求得,并没有利用风电场输出特性进行校正。为此文献[52]将风电场输出特性引入,求解笼型风电场的等值参数,称为风电场输出特性等值法。风电场的输出特性包含风电场并网端口电压、功率、电流等信息,可以通过两种方法获取。对于已投运的风电场,通过实测记录风电场在不同风速下的输出信息,所有风速下风电场并网端口运行信息的集合即可作为风电场输出特性参与计算。若无法实测,可以通过理论计算近似求取风电场端口特性。只要已知风电场连接方式和机组参数,理论上风电场的输出特性就可以计算,适合各种条件下求取风电场的输出特性,能对笼型异步发电机组成的风电场进行等值建模,准确求取等值机同步电抗、暂态电抗和转子惯性时间常数等参数。

3.3.8 主成分分析等值法

文献[53]指出了一种采用运行数据构建风电场

等值模型的新方法,使用统计学理论对大型并网风电场实时运行数据进行分析,利用主成分分析法找到最能表征风电场运行行为的因子,对风电场降阶处理并利用支持向量机法搭建整体风电场模型,考虑了风电场的规模大小、地貌地形、机组布置、机组类型及风电场内风速分布等因素,较全面地对风电场进行了多机等值建模。

3.4 参数优化算法

结合参数优化算法的风电场等值方法具有更高的模型精度,并能相应减小等值误差。对双馈风电机组有功和无功控制进行简化等值建模后通过增加变异操作方式的自适应粒子群算法,扩大转子电流的种群数量,在大范围转子电流种群中更好择优,找寻合适的转子电流有功分量值,有效提高双馈风机等值建模的准确性^[54]。将单机等值模型的参数进行实数编码形成染色体,再经过“双亲四子”的交叉操作和自适应变异操作,去粗取精,获得最合适的有功功率数值^[55]。遗传算法在多次迭代后产生的最优结果,缩小偏差,但迭代次数过多。文献[56]中的k-means聚类算法,对原始风速矩阵和13个状态变量组成的矩阵分别聚类,合理有效地对风电机组进行等值。文献[57]中给出了基于BP网络风电场稳态建模和基于Elman神经网络风电场动态建模两种方法。对于后者的样本做了归一化处理,避免了机理建模的麻烦。随着专家系统、模糊神经网络及基于Agent等算法的加入,风电场等值模型的精度也会随之提高^[58]。

4 混合风电场动态等值

对于相同机型风电场等值的研究已有很多,文献[59]根据三阶DFIG简化风力发电机的动力模型提及一种基于戴维南电路的双馈风电场等值法,将具有相似动态特性的双馈感应发电机归为同群,适于波动的情况。而针对直驱永磁风电机组等值简化模型进行风速分群,按机组位置聚类,采用传递函数和电流控制电流源及利用等效电流源完成同群机组的等值处理等原则可降低直驱式风电场模型的复杂性^[60-63],文献[64]的动态等值建模法可在风速波动下使用,但低电压穿越控制或低电压穿越由超级电容控制的直驱永磁风电场除外。

然而针对混合风电场等值研究却鲜有文章。国外已经建成了由鼠笼异步风机和双馈感应风机组成的混合风电场,采用聚合法进行等值是当前的普遍做法^[65]。一些适用于相同机型风电场的等值方法在一定条件下同样可应用于混合风电场的等值研究。

随着风电场的不断扩容,混合风电场的经济效益日益突显^[66],开展由鼠笼异步风机、双馈感应风机及直驱永磁同步风机组成的混合风电场等值方法的研究具有一定现实意义。

5 结束语

本文对当前主流风机类型双馈感应风机和直驱永磁同步风机的建模做了简介,同时概述了风电场常规潮流、随机潮流和概率潮流计算。从风速的等值、风电场的分群及风电场常用等值方法三方面重点评述了风电场的等值,此外,结合专家系统和模糊神经网络等优化算法能有效提高风电场等值模型的精度。然而,随着风电场规模的进一步扩大,对混合风电场等值建模方法开展研究将会是今后的趋势。

参考文献

- [1] 徐天赐, 吴峰, 金宇清, 等. 基于非电气参数的风电场等效建模方法对比研究[J]. 可再生能源, 2013, 31(3): 40-45.
XU Tianci, WU Feng, JIN Yuqing, et al. Comparative studies on equivalent modeling methods for wind farms based on non-electric parameters[J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(3): 40-45.
- [2] 倪林, 袁荣湘, 张宗包, 等. 大型风电场接入系统的控制方式和动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 11-17.
NI Lin, YUAN Rongxiang, ZHANG Zongbao, et al. Research on control method and dynamic characteristic of large wind farm integration[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 11-17.
- [3] 赵艳军, 曾沅. 基于双馈式风电机组的风电场实用动态等值模型研究[J]. 广东电力, 2012, 25(4): 53-58.
ZHAO Yanjun, ZENG Yuan. Research on applied dynamic equivalence model for wind farm based on double-fed wind power generating units[J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(4): 53-58.
- [4] 李智才, 李凤婷. 双馈风电机组的建模仿真及其等值方法研究[J]. 可再生能源, 2013, 31(3): 31-35.
LI Zhicai, LI Fengting. Modeling and simulation of DFIG and a research on its equivalent method[J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(3): 31-35.
- [5] ZAMANIFAR M, FANI B, GOLSHAN M E H, et al. Dynamic modeling and optimal control of DFIG wind energy systems using DFT and NSGA-II[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 108: 50-58.
- [6] 李晶, 宋家骅, 王伟胜. 大型变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 100-105.
LI Jing, SONG Jiahua, WANG Weisheng. Modeling and dynamic simulation of variable speed wind turbines with large capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 100-105.
- [7] 张子泳, 胡志坚, 李勇汇, 等. 大型双馈风力发电系统小信号动态建模及附加阻尼控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 127-133.
ZHANG Ziyong, HU Zhijian, LI Yonghui, et al. Small signal dynamic modeling and additional damping controller designing for large wind generation system based on DFIG[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 127-133.
- [8] 李建林, 许洪华. 风力发电系统低电压运行技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [9] SLOOTWEG J G, KLING W L. Modeling of large wind farms in power system simulations[C] // Power Engineering Society Summer Meeting, 2002, 1: 503-508.
- [10] 张涛, 胡立锦, 张新燕. 风力发电机通用化建模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 1-6.
ZHANG Tao, HU Lijin, ZHANG Xinyan, et al. Research on universal modeling of wind turbines[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 1-6.
- [11] 刘世鹏, 郭力萍, 张雷琼, 等. 并网风力发电场的潮流分析[C] // 内蒙古自治区第六届自然科学学术年会, 2011: 550-554.
LIU Shipeng, GUO Liping, ZHANG Leiqiong, et al. Load flow analysis of grid wind farm[C] // The Sixth Natural Science Academic Annual Meeting of Inner Mongolia, 2011: 550-554.
- [12] 胡卫红, 王玮, 王英林, 等. 电力系统潮流计算中风电场节点的处理方法[J]. 华北电力技术, 2006(10): 12-15.
HU Weihong, WANG Wei, WANG Yinglin, et al. Power flow analysis in electrical power system including wind farms[J]. North China Electric Power, 2006(10): 12-15.
- [13] 曹娜, 赵海翔, 陈默子, 等. 潮流计算中风电场的等值[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 53-56.
CAO Na, ZHAO Haixiang, CHEN Mozi, et al. Equivalence method of wind farm in steady-state load flow calculation[J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 53-56.
- [14] 刘曼序, 韩伟, 钱叶牛, 等. 计及集电线路的风电场潮流计算变PQ迭代法及应用[J]. 吉林电力, 2010, 38(6): 15-18.

- LIU Minxu, HAN Wei, QIAN Yeniu, et al. Variable PQ iterative method for power flow calculation of wind farm including collection lines[J]. *Jilin Electric Power*, 2010, 38(6): 15-18.
- [15] 饶成诚, 王海云, 吴寒, 等. 基于 PSASP 的并网风电场潮流分析[J]. *水力发电*, 2013, 39(4): 80-82.
- RAO Chengcheng, WANG Haiyun, WU Han, et al. PSASP-based flow analysis of wind farm in power system[J]. *Water Power*, 2013, 39(4): 80-82.
- [16] 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.
- SUN Yong, LI Haifeng, HOU Junxian. Static equivalence and applied research of wind farm[J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2012, 31(4): 52-54.
- [17] 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.
- BIE Chaohong, LIU Hui, LI Gan, et al. Voltage fluctuation of a power system with wind farms integrated by probabilistic load flow[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(12): 1500-1505.
- [18] 郑睿敏, 李建华, 李作红, 等. 考虑尾流效应的风电场建模及其随机潮流计算[J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42(12): 1515-1520.
- ZHENG Ruimin, LI Jianhua, LI Zuohong, et al. Modeling of large scale wind farms in the probabilistic power flow analysis considering wake effects[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(12): 1515-1520.
- [19] 蔡德福, 石东源, 李高望, 等. 基于输入随机变量离散数据的概率潮流计算方法[J]. *电网技术*, 2013, 37(9): 2474-2479.
- CAI Defu, SHI Dongyuan, LI Gaowang, et al. A probabilistic load flow calculation method based on discrete data of input random variable[J]. *Power System Technology*, 2013, 37(9): 2474-2479.
- [20] 艾小猛, 文劲宇, 吴桐, 等. 基于点估计和 Gram-Charlier 展开的含风电电力系统概率潮流实用算法[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(16): 16-22.
- AI Xiaomeng, WEN Jinyu, WU Tong, et al. A practical algorithm based on point estimate method and gram-charlier expansion for probabilistic load flow calculation of power system incorporating wind power[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(16): 16-22.
- [21] 刘小团, 赵晋泉, 罗卫华, 等. 基于 TPNT 和半不变量法的考虑输入量相关性概率潮流算法 [J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(22): 13-18.
- LIU Xiaotuan, ZHAO Jinqian, LUO Weihua, et al. A TPNT and cumulants based probabilistic load flow approach considering the correlation variables[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(22): 13-18.
- [22] 陈雁, 文劲宇, 程时杰. 考虑输入变量相关性的概率潮流计算方法[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(22): 80-87.
- CHEN Yan, WEN Jinyu, CHENG Shijie. Probabilistic load flow analysis considering dependencies among input random variables[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(22): 80-87.
- [23] 李环平, 杨金明. 基于 PSCAD_EMTDC 的大型并网风电场建模与仿真[J]. *电力系统保护与控制*, 2009, 37(21): 62-66.
- LI Huanping, YANG Jinming. Model and simulation of large grid connected wind farm based on PSCAD_EMTDC[J]. *Power System Protection and Control*, 2009, 37(21): 62-66.
- [24] MENG Z J. An improved equivalent wind method for the aggregation of DFIG wind turbines[C] // 2010 International Conference on Power System Technology: 1-6.
- [25] FERNÁNDEZ L M, GARCÍA C A, SAENZ J R, et al. Equivalent models of wind farms by using aggregated wind turbines and equivalent winds[J]. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50(3): 691-704.
- [26] 严干贵, 李鸿博, 穆刚, 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.
- YAN Gangui, LI Hongbo, MU Gang, et al. Equivalent model of wind farm by using the equivalent wind speed[J]. *Journal of Northeast Dianli University*, 2011, 31(3): 13-19.
- [27] 曹娜, 于群, 戴慧珠. 考虑风向影响的风速随机模型研究[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(12): 1785-1790.
- CAO Na, YU Qun, DAI Huizhu. Stochastic model of wind speed affected by wind direction[J]. *Acta Energiac Solaris Sinica*, 2011, 32(12): 1785-1790.
- [28] 窦真兰, 王晗, 张秋琼. 虚拟风场和风力机模拟系统的实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(20): 127-135.
- DOU Zhenlan, WANG Han, ZHANG Qiuqiong. Experimental research on virtual wind farm and wind Turbine emulator system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(20): 127-135.
- [29] 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.
XU Yuqin, ZHANG Linhao, WANG Na. Study on equivalent model of wind farm with DFIG considering wake effects[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 70-76.
- [30] 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.
CAO Na, YU Qun. A grouping method for wind turbines in a grid connected wind farm during wind speed fluctuation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 42-46.
- [31] 付蓉, 谢俊, 王保云, 等. 风速波动下双馈机组风电场动态等值[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 1-6.
FU Rong, XIE Jun, WANG Baoyun. Study on dynamic equivalence model of wind farms with DFIG under wind turbulence[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 1-6.
- [32] 范国英, 史坤鹏, 郑太一, 等. 风电场集群接入系统后的聚类分析[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 62-66.
FAN Guoying, SHI Kunpeng, ZHENG Taiyi, et al. Cluster analysis of grid-connected large scale wind farms [J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 62-66.
- [33] 黄伟, 张小珍. 基于特征分析的大规模风电场等值建模[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2271-2277.
HUANG Wei, ZHANG Xiaozhen. Feature analysis based equivalent modeling for large-scale wind farms[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2271-2277.
- [34] 高峰, 周孝信, 朱宁辉, 等. 直驱式风电机组机电暂态建模及仿真[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 29-34.
GAO Feng, ZHOU Xiaoxin, ZHU Ninghui, et al. Electromechanical transient modeling and simulation of direct-drive wind turbine system with permanent magnet synchronous generator[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 29-34.
- [35] 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.
MI Zengqiang, SU Xunwen, YANG Qixun, et al. Multi-machine representation method for dynamic equivalent model of wind farms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 162-169.
- [36] 林俐, 陈迎. 基于扩散映射理论的谱聚类算法的风电场机群划分[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6): 113-118.
LIN Li, CHEN Ying. Wind turbine grouping with spectral clustering algorithm based on diffusion mapping theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 113-118.
- [37] 徐玉琴, 王娜. 基于聚类分析的双馈机组风电场动态等值模型的研究[J]. 华北电力大学学报, 2013, 40(3): 1-5.
XU Yuqin, WANG Na. Study on dynamic equivalence of wind farms with DFIG based on clustering analysis[J]. Journal of North China Electric Power University, 2013, 40(3): 1-5.
- [38] AKHMATOV V, KNUDSEN H. An aggregate model of a grid-connected, large scale, offshore wind farms for power stability investigation importance of windmill mechanical system[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24(9): 709-717.
- [39] FERNANDEZ L M, SAENZ J R, JURADO F. Dynamic models of wind farms with fixed speed wind turbines[J]. Renewable Energy, 2006, 31(8): 1203-1230.
- [40] SALMAN S K, TEO A L J. Windmill modeling consideration and factors influencing the stability of a grid-connected wind power-based embedded generator[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 763-802.
- [41] LEDESMA P, USAOLA J, RODRIGUEZ L. Transient stability of fixed speed wind farm[J]. Renewable Energy, 2003, 28(9): 1341-1355.
- [42] 许剑冰, 薛禹胜, 张启平. 电力系统同调动态等值的述评[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 91-95.
XU Jianbing, XUE Yusheng, ZHANG Qiping. A critical review on coherency-based dynamic equivalences[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14): 91-95.
- [43] HAO Sipeng, ZHANG Yangfei, LI Xianyun, et al. Equivalent wind speed model in wind farm dynamic analysis[C] // Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011: 1751-1755.
- [44] 李辉, 王荷生, 赵斌, 等. 风电场不同等值模型的仿真研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(7): 1005-1012.
LI Hui, WANG Hesheng, ZHAO Bin, et al. Simulation analysis of a wind farm with different aggregated models[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2011, 32(7): 1005-1012.
- [45] 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.
SU Xunwen, MI Zengqiang, WANG Yi. Applicability and improvement of common-used equivalent methods for wind farms[J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 175-180.

- [46] 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.
SU Xunwen, XU Dianguo, BU Shupo. Variable parameter equivalent modeling method of wind farms under wind speed fluctuations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 277-284.
- [47] 袁贵川, 倪林, 陈颖. 大型风电场等值建模与仿真分析[J]. 广东电力, 2010, 23(11): 6-9.
YUAN Guichuan, NI Lin, CHEN Ying. Equivalent modeling and simulation analysis of large wind farm[J]. Guangdong Electric Power, 2010, 23(11): 6-9.
- [48] 李先允, 陈小虎, 唐国庆. 大型风力发电场等值建模研究综述[J]. 华北电力大学学报, 2006, 33(1): 42-46.
LI Xianyun, CHEN Xiaohu, TANG Guoqing. Review on equivalent modeling for large-scale wind power field[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33(1): 42-46.
- [49] 丁明, 马彪, 韩平平. 用P-V分析法比较几种风电场静态等值建模[J]. 中国电力, 2013, 46(1): 26-29.
DING Ming, MA Biao, HAN Pingping. Comparison of static equivalent models of wind farm with P-V analysis[J]. Electric Power, 2013, 46(1): 26-29.
- [50] SHAFIU A, ANAYA-LARA O, BATHURST G, et al. Aggregated wind turbine models for power system dynamic studies[J]. Wind Engineering, 2006, 30(3): 171-186.
- [51] 何桂雄, 晁勤, 田易之, 等. 风电场恒速发电机动态等值参数聚合研究[J]. 可再生能源, 2009, 27(1): 14-22.
HE Guixiong, CHAO Qin, TIAN Yizhi, et al. Research on the dynamic equivalent parameter aggregation of fixed-speed wind turbines in wind farm[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(1): 14-22.
- [52] 乔嘉庚, 鲁宗相, 闵勇, 等. 风电场并网的新型实用等效方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 209-213.
QIAO Jiageng, LU Zongxiang, MIN Yong, et al. New dynamic equivalence method for grid-connected wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 209-213.
- [53] 余洋, 米增强, 刘兴杰, 等. 基于运行数据的大型风电场建模方法研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(10): 1543-1547.
YU Yang, MI Zengqiang, LIU Xingjie, et al. Modeling method of large scale wind farm based on operating data[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2011, 32(10): 1543-1547.
- [54] 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): 22-26.
LI Ran, TANG Fan, LIU Yingpei, et al. Equivalent model of doubly-fed wind turbine generator systems based on auto mutation particle swarm optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 22-26.
- [55] 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.
CHEN Shuyong, WANG Cong, SHEN Hong, et al. Dynamic equivalence for wind farms based on clustering algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 11-19.
- [56] 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.
LI Hui, WANG Hesheng, SHI Xuyang, et al. Study on equivalent model of wind farms based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 1-8.
- [57] 马幼捷, 杨海珊, 周雪松, 等. 基于人工神经网络的风电场建模[J]. 中国电力, 2010, 43(9): 79-82.
MA Youjie, YANG Haishan, ZHOU Xuesong, et al. Modeling of wind farms based on artificial neural networks[J]. Electric Power, 2010, 43(9): 79-82.
- [58] 曹张洁, 向荣, 谭谨, 等. 大规模并网型风电场等值建模研究现状[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(2): 56-60.
CAO Zhangjie, XIANG Rong, TAN Jin, et al. Review of current research on equivalent modeling of large-scale grid connected wind farm[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(2): 56-60.
- [59] 周海强, 张明山, 薛禹胜, 等. 基于戴维南电路的双馈风电场动态等值方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 42-47.
ZHOU Haiqiang, ZHANG Mingshan, XUE Yusheng, et al. A dynamic equivalent method for doubly-fed induction generator wind farm based on the Thevenin equivalent circuit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 42-47.
- [60] CONROY J, WATSON R. Aggregate modeling of wind farms containing full converter wind turbine generators with permanent magnet synchronous machines: transient stability studies[J]. Renewable Power Generation, 2009, 3(1): 39-52.
- [61] 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.

- GAO Feng, ZHAO Donglai, ZHOU Xiaoxin, et al. Dynamic equivalent algorithm for wind farm composed of direct-drive wind turbines[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 222-227.
- [62] 李立成, 叶林. 永磁直驱风电机组的风电场动态等效方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 204-210.
- LI Licheng, YE Lin. Dynamic equivalencing method for wind farms with permanent magnet direct-drive wind turbines[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 204-210.
- [63] 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.
- MENG Xiaohang, YE Lin, ZHAO Yongning. Dynamic multi-machine equivalent model of direct drive permanent magnet synchronous generators of wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 25-32.
- [64] 苏勋文, 徐殿国, 高长征. 直驱永磁机组风电场的动态等值建模方法[C] // 中国电源学会第十九届学术年会论文集, 2011: 79-81.
- SU Xunwen, XU Dianguo, GAO Changzheng. Direct-drive permanent magnet wind farms dynamic equivalent modeling method[C] // CPSSC, 2011: 79-81.
- [65] LI H, YANG C, ZHAO B, et al. Aggregated models and transient performances of a mixed wind farm with different wind turbine generator systems[J]. Electric Power Systems Research, 2012, 92: 1-10.
- [66] MULJADI E, PASUPULATI S, ELLIS A, et al. Method of equivalencing for a large wind power plant with multiple turbine representation[C] // Power and Energy Society General Meeting, 2008: 1-9.
-
- 收稿日期: 2014-06-20; 修回日期: 2014-08-14
- 作者简介:
- 张元(1987-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: 18761683230@163.com
- 郝丽丽(1979-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统安全稳定与控制;
- 戴嘉祺(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统负荷模型自适应优化研究。
- (编辑 周金梅)