

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.01.010

# 集群化发展模式下风电场预测、规划及控制关键技术综述

陶思钰, 江福庆

(南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 211106)

**摘要:**随着我国风电行业的快速发展,规模化发展风电对能源转型的推进至关重要。然而,由于风电场所处的复杂环境和高昂的建设运营成本等因素,集群化发展模式下的风电场面临着一系列技术难点和挑战。因此,文中针对集群化发展模式下风电场的建设和运营,重点总结了相关的预测、规划及控制关键技术。文中围绕风电场集群的关键技术与研究思路进行了归纳总结;针对风电场集群的特点,包括风资源量化表征与预测技术、多风电场协同优化规划技术以及多风电场控制与运行技术进行了详细探讨,对于每个技术领域,分析了当前的研究现状和取得的成果;最后,阐明了风电场集群建设和运营关键技术领域的发展趋势,并指出了待解决的技术难点,通过总结这些技术的研究成果为我国风电的规模化、集群化开发提供参考。

**关键词:**风电场集群;风电机组;组合预测;协同规划;协调控制;人工智能(AI)

**中图分类号:** TM76; TK89

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2024)01-0086-14

## 0 引言

近年来,基于全球碳减排的紧迫需求及中国能源转型工作的不断推进,风电产业快速发展。我国幅员辽阔,风资源丰富,可开发的陆地风资源达 253 GW,海上风资源更是达到了陆地风资源的 3 倍<sup>[1]</sup>。

随着风电场规模的逐步扩大和风电技术的不断提升,为了提高风电场的经济效益和稳定性,集中建设规模化的风电场已经成为趋势。根据建设位置的地理环境大致可以将风电场分为陆上风电场和海上风电场<sup>[2-3]</sup>,集中建设在风资源富集的陆地上的称为陆上风电场集群,建设在海上风资源丰富、风速稳定、且紧邻用电负荷中心的则称为海上风电场集群。二者在环境条件、安装和运维成本、电网接入等方面存在明显差异。

与单个风电场相比,大规模风电场集群接入存在其独特的特点和挑战。首先,单个风电场相对独立,其风速、功率等参数变化对整个系统影响较小,而在风电场集群中,风电场之间的相互作用和协调性变得更加重要,出力特性也更加平滑<sup>[4-5]</sup>。其次,风电场集群的规模更大,涉及到更复杂的风电场规划<sup>[6]</sup>、电网能量管理和调度等问题。此外,风电场集群的运行和控制<sup>[7]</sup>须考虑到多个风电场之间的协同工作,以实现整体的优化效益。

目前,针对单个风电场的相关技术研究已较为成熟<sup>[8-10]</sup>,但对于风电场集群关键技术的总结与分析却鲜有报道。鉴于现有综述研究的不足和国家

战略发展的技术需求,文中围绕风电场集群的功率预测、优化规划和运行控制这 3 个关键技术进行综述。这些技术在实现我国碳达峰和碳中和目标的过程中具有重要作用,能够提高风电场集群的发电效率、经济效益和稳定性,促进清洁能源的可持续发展,是风电场集群发展中的核心关键技术。

## 1 风电场集群关键技术与研究思路

风电场集群中的各风电场地理位置邻近,各风电场间存在相互影响,主要表现为:(1) 风电场输出功率的时空耦合性;(2) 上风位置处的风电场的尾流影响下风位置处的风电场,致使后者输出功率下降;(3) 集群内各风电场共享部分输电线路。因此,不能直接采取传统技术手段对风电场集群中的每个单独风电场进行设计和运行。

由于涉及风电场集群的相关技术众多,文中选择风电场集群在开发和运营过程中应用的核心关键技术进行研究和分析,主要包括:风电场集群组合预测技术、风电场集群协同优化规划技术以及风电场集群协调控制运行技术,具体见图 1。

上述关键技术紧密关联,互为依托。风电场集群的超短期预测为风电场集群的控制提供风速及功率的预测数据,中长期预测为风电场集群的优化规划提供相关的风速、风向统计数据。通过风电场集群的规划,可以得到风电机组的布局,即各个风电机组的坐标,从而在给定风速、风向数据的条件下,根据尾流模拟的结果,推算出风电场的输出功率,为风电场集群的预测和控制运行提供风电场的输出功率数据。

收稿日期:2023-08-15;修回日期:2023-10-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52207111)

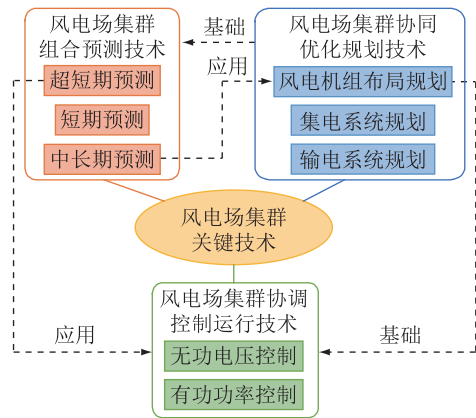


图1 风电场集群关键技术及关系

Fig.1 Key technologies and their relationships of wind farm cluster

## 2 风电场集群风资源数据预测

风电场集群风资源数据预测技术通过分析历史风速、气象数据以及其他相关因素,利用数学模型和统计方法预测未来一段时间内风电场集群的风能情况。其主要目的是为风电场的运营管理、发电能力评估、风电场布局规划等提供准确可靠的风能预测结果。文献[11]中针对英国泰晤士河口风电场集群的研究表明,风电场集群功率的剧变会导致电力系统运营商在全国范围内维持供需平衡面临巨大挑战,而准确预测和评估风功率剧变特性,能够帮助电力系统运营商采取相应措施保障电力系统的稳定运行和电力供应的可靠性。根据风速数据和风电场的装机容量,能够获得合理的风电机组布局;根据预测功率和当地电网运行情况,可以更好地对风电场集群的发电量进行调度管理<sup>[12]</sup>,减小弃风率。以规划和控制为导向,文中将根据目前风电场集群化建设的趋势,按照时间尺度划分,介绍有关风资源评估和风功率预测的方法。

### 2.1 风电场集群预测的特点与挑战

在风资源丰富的区域,风电场集群化建设可以提高风资源的利用率。风电场聚集在一定区域内,对风速和功率的预测工作提出了更高的要求。集群预测的特点和难点主要体现在:

(1) 由于地理和气象因素,同一片区域的风速有显著的时空相关性,须对其充分挖掘才可以有效提高预测精度<sup>[13]</sup>。

(2) 风电场集群预测的重要目的之一是为电网调度和集群控制提供数据参考,此部分以超短期、短期预测为主;对于风电场规划,则以中长期预测为主。

(3) 在风电场集群中,通常须监测多个地区的

气象数据,数据处理的难度较大。

(4) 风电场集群的空间跨度大,各个风电场的环境差异性较强。一方面会加剧功率波动的叠加效应,增加预测风险;另一方面会导致部分风电场数据缺失的情况频发。

(5) 风资源具有高随机性和波动性,在并网时会严重危害电网的稳定性。集群因为装机容量大,出力强,对电网的影响远远高于单一风电场。因此常规点估计法不能适应集群预测的精度要求。

集群预测主要有2个难点:(1) 集群的不确定性高于单一风电场,而针对单一风电场的点预测方法只能得到未来风电功率的一个可能值,不适用于集群预测。因此,须采用概率预测的方法对预测结果进行评估,从而定量描述风资源的不确定性<sup>[14]</sup>。(2) 集群内的风速具有时空相关性,数据维度高,数据结构复杂,求解难度极高。人工智能(artificial intelligence, AI)技术擅长处理大数据和非线性模型,在风速和功率预测方面具有天然的优势<sup>[15]</sup>,研究思路如图2所示。

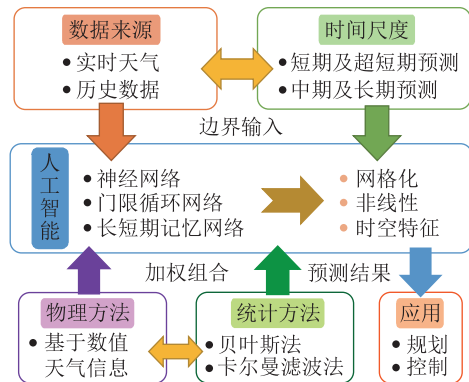


图2 AI技术在风电场集群功率预测中的应用

Fig.2 Application of AI technology in wind farm cluster power prediction

风电场集群预测的重要特点为网格化、非线性和时空特征,这些特点在AI模型中得到很好的体现。将AI与传统的物理和统计方法适当结合后,能够得到较高的预测精度。

鉴于此,文中将基于AI技术及相关组合算法,总结归纳超短期、短期、中长期的风电场集群预测技术。

### 2.2 风电场集群超短期预测

超短期集群功率预测的范围为未来0~4 h的风电场集群输出功率,主要用于解决风电机组的动态实时控制、静态稳定分析等问题<sup>[14]</sup>。集群的超短期预测对场群内尾流控制、解决电网的实时调度和调频问题都有重要意义。

传统功率预测技术为了简化模型,仅考虑数据

之间的时间自相关性。这种方法在对单一风电场进行预测时有良好的经济性和精度,但不适用于空间跨度大的集群预测。为了提高预测精度,须考虑不同风电场之间的时空相关性,关系如图3所示。

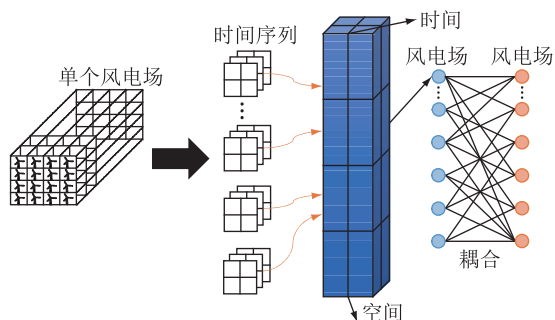


图3 风电场间的时空相关性

Fig.3 Spatiotemporal correlation among wind farms

可知,求解集群的时空相关性须处理大量数据,早期集群预测方法,如叠加法<sup>[16]</sup>、外推法<sup>[17]</sup>、升尺度法<sup>[18]</sup>等,为平衡计算成本和预测精度,通常采用降低数据维度或简化数学模型的方法,不适用于对预测精度要求较高的超短期预测。文献[19]针对前人研究的不足,提出一种基于动态R藤Copula模型的预测方法,采用高维Copula模型,有效保留数据中时间-空间相关性的耦合特征,提高预测精度;文献[20]设计一种胶囊网络模型,用于封装数据的时空特征,通过动态路由机制和双层迭代训练法进行学习,提高预测精度和收敛速度;文献[21]指出将对风电出力有重大影响的物理变量纳入AI技术也是提高预测精度的重要途径;文献[22]基于数值天气预报信息,通过BIRCH(balanced iterative reducing and clustering using hierarchies)聚类算法和门控循环单元模型完成对功率的精准预测。

对于集群的超短期预测仍集中在数值天气预报信息输入环节和模型改进环节两个方向上。随着对风电出力研究的深入,未来可通过对预测结果进行校正来提高预测精度。

### 2.3 风电场集群短期预测

短期集群功率预测的范围为未来3d的风电场集群输出功率,主要用于解决风电消纳、日前电力市场报价优化等问题<sup>[14]</sup>。短期预测和超短期预测的区别在于:采用概率预测方法对风资源的不确定性建模时,短期预测的概率区间宽度大于超短期的区间宽度,即短期预测的精度要求比超短期预测低。

功率预测中应用最广泛的AI技术为长短期记忆神经网络模型。文献[23]借鉴双向长短期记忆(bidirectional long short-term memory, BLSTM)神经网络在语音识别等领域的应用,提出一种基于集群

动态规划和BLSTM神经网络的预测模型,相较传统统计升尺度法,该模型在4h、24h和96h的预测中精度均有提高。针对以往模型提取时空关联特征能力不足的问题,文献[24]提出一种基于时空多重聚类、卷积神经网络和BLSTM神经网络的模型,以应用为导向,基于长期日功率曲线相似度对风电场进行聚类,增强了时空特征的识别能力。海上风资源丰富,但气候复杂多变,导致风速序列的时序特征复杂,风速预测面临极大挑战,文献[25]针对该问题,提出一种时空相关图神经网络,利用拉普拉斯变换和长短期记忆神经网络挖掘时空相关性,经验证,该方法适合预测未来1~7d的功率。此外,文献[26]基于时空预测法,提出一种估算短期预测缺失风速数据的方法,为偏远或天气恶劣地区的风速预测提供了一种经济可行的方案。

在针对单个风电场的短期功率预测中,现有文献已经提出了基于精确度以及鲁棒性的双目标优化模型<sup>[27]</sup>,该类研究方法在集群预测中尚无应用。根据集群预测在空间相关性、风速和功率波动、资源分配与优化以及不确定性和风险管理等指标上高复杂性、高要求的特点,基于多目标优化模型的集群预测技术有望成为未来的研究热点。

### 2.4 风电场集群中长期预测

对未来3d以上风功率的预测均被纳入中长期风电场集群功率预测的范围,此类预测通常被用作风电场建成前的选址工作以及建成后的检修工作的评估环节,因此也称风功率评估。

物理方法在中长期预测中表现优异,以数值天气预报系统为主导技术,但其存在计算复杂、耗时长、对基本物理量要求高等缺陷,所以在其他尺度的预测中应用不多<sup>[28]</sup>。中长期预测因时间跨度长,预测结果往往和现实情况差异较大,文献[29]针对这一情况,提出一种结合风速垂直外推和风频分布模型参数预测的长期风资源不确定性评估方法,在估算出风速长期变化趋势后,结合计及多环节的不确定性模型,较为准确地描述出未来数年风资源的分布情况。根据风能的汇聚效应理论,文献[30]定义了风速序列间的波动相关性来衡量各个测风点之间风速波动趋势的相关性程度,以此为权重系数,对多个站点地的数据进行预处理,有效提高了预测精度。由于风速分布的理论知识尚不完善,许多模型的理想效果和实际效果有偏差,这点在中长期预测中尤其值得注意。文献[31]提出一种基于二维威布尔分布(bivariate Weibull, BW)模型的测量站预测方法,当使用观测站模拟的理想风数据进行预



测时,BW方法在所有测量周期中均优于传统的线性回归模型,但应用于观测风数据时,线性回归模型更优<sup>[31]</sup>。

目前,中长期预测大多采用物理方法和改进评估标准来提高预测精度,AI技术在其中的应用并不广泛。

### 3 风电场集群多风电场协同规划

风电场集群多风电场协同规划技术是指通过对多个风电场之间的相互作用和协同效应进行分析和优化,以实现整个风电场集群的最佳规划和运行。该技术的目标是提高风电场集群的发电效率、减少系统成本、提高可靠性和可持续性。从国内外工程实践可知,风电场的不合理规划会造成巨大的电能损失和额外的维修成本,增加风电场的建设和运营成本,风电场的经济效益在很大程度上取决于风电机组的微观选址和电缆连接布局。文献[32]中宁夏相邻风电场之间尾流影响说明风电场集群的规划不同于单个风电场的规划,不仅要考虑风电场内部的布局规划,还要考虑已修建的风电场和后期可能建设的相邻风电场在输出功率、经济效益等方面博弈的情况。风电场集群规划总体框架如图4所示,文中将从风电场集群中风电机组布局规划和电气系统拓扑结构优化两方面进行总结分析。

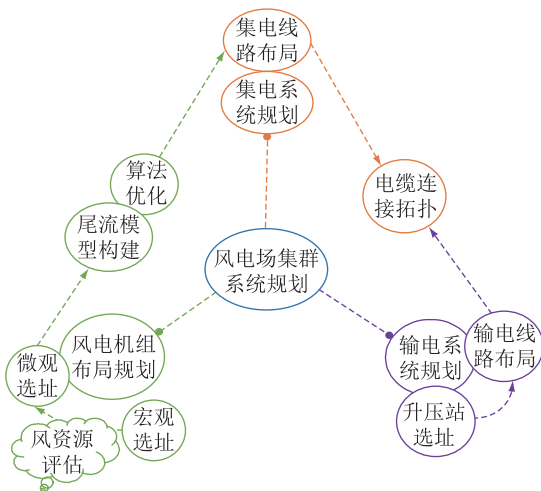


图4 风电场集群规划框架

Fig.4 Wind farm cluster planning scheme

#### 3.1 风电机组布局规划

在风电场集群的建设过程中,首先考虑的是风电场的选址,场址的选择对风能利用率和经济性至关重要。风电场集群选址分为宏观选址和微观选址,宏观选址的原则是根据风能资源评估与长期预测的结果,选择风能资源较为丰富的区域,以求增大风电机组的输出。微观选址即风电机组的选址和

排布,这直接关系到空间的利用率、发电量的提高以及风电场之间的相互影响。通过优化风电机组的排布,可以减少由风场环境变化及风机自身所引发的尾流效应对功率的影响,使整个风电场的效益最大化。

风电场的尾流效应是影响微观选址的重要因素之一。尾流是指当风通过风机旋转的叶片时,会形成一个旋转的气流区域,这种气流区域会在下风方向上减少风速,并且产生湍流,降低下风方向上的风能利用率。因此,在微观选址中,须考虑风电机组之间的相互影响,采用合适的尾流模型对尾流效应进行建模,以优化风电机组的排布。

目前,国内外对风电场微观选址的研究主要聚焦于两个方面,一是建立更加精准的尾流模型,二是高效率的优化求解算法。自1983年Jensen提出尾流解析模型<sup>[33]</sup>以来,众多研究人员对尾流模型展开了研究,越来越多的尾流模型被相继运用于微观选址中,如Larsen模型<sup>[34]</sup>、Frandsen模型<sup>[35]</sup>等一维尾流模型以及Jensen-Gaussian模型<sup>[36-37]</sup>、Frandsen-Gaussian模型<sup>[38]</sup>、Park-Gauss模型<sup>[39]</sup>等二维尾流模型。一维模型计算量少,运用广泛,二维模型则更加精准,但计算量大。针对不同的应用场景,可以选择合适的尾流模型进行微观选址研究。除了尾流效应外,复杂地形也会对微观选址产生影响。在复杂地形条件下,地形变化会引起风速和风向的变化,从而影响风电机组的输出功率。因此,在微观选址中须考虑复杂地形的影响,并采用相应方法进行建模和分析。针对这一问题,研究人员提出多种基于计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)方法的尾流模拟模型,如基于大涡模拟(large eddy simulation, LES)方法的模型<sup>[40]</sup>、基于雷诺平均纳维-斯托克斯方程(Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, RANS)方法的模型<sup>[41]</sup>等。这些模型能够更加准确地模拟尾流的复杂行为,为微观选址提供更加精细的工具。

在微观选址的优化求解算法方面,1994年, Mosetti首次提出将遗传算法运用到风电机组微观选址中<sup>[42]</sup>。此后,研究人员又相继提出了其他用于求解微观选址问题的优化算法,如蚁群算法<sup>[43]</sup>、网格法<sup>[44]</sup>、粒子群优化算法<sup>[45]</sup>等。这些算法的运用使风电机组的布局更加合理,但是这些研究都是将风电机组布局看作单纯的数学问题,忽略了实际的工程约束。文献[46]根据实际工程的需要提出了在几何约束条件下风电场智能布局优化的方法,提高了实际工程中风电场的发电量。随着尾流模型的

不断完善和优化算法的改进,风电机组的布局更加合理,风电场的经济效益得到较大提高。

为了分析相邻风电场的尾流的影响,文献[47]使用长距离多普勒光探测与测距(light detection and ranging, LIDAR)和卫星合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)测量不同大气稳定性下的风团,并使用监督控制和数据采集(supervisory control and data acquisition, SCADA)对功率数据进行分析,发现上游风电场尾流效应会导致下游风电场的发电量明显下降。文献[48]则通过实际观察相邻风电场的尾流损耗和风电场集群能源生产之间的关系进行了研究,研究结果显示,风电场集群的尾流恢复速度明显慢于单个风电场,上游风电场引起的湍流会使下游风电场的尾流距离增加一倍,导致下游相邻风电场输出功率损失加大,平均相对损失增加5.8%。同时,上游风电场产生的尾流还会加快下游风电场风电机组叶片的旋转,导致风电设备磨损加重。这些研究都表明,在风电场集群的微观选址中,想要提高集群的整体收益除了考虑风电机组之间的尾流效应外,还必须对风电场之间的尾流干扰进行评估。

针对相邻风电场的尾流效应对目标风电场造成的影响,文献[49]通过实际案例分析,提出遗传算法优化四参数的方法对风电机组进行边界适应优化,优化后的布局大大提高了风电场集群的风能利用率,风电场年净发电量提升1.04%。若风电场集群中的各风电场分属于不同开发商,各开发商都希望将自己的利益最大化,这将形成一种非合作的竞争关系。对此,文献[50]基于博弈论提出一种非合作博弈协同进化方法,该方法结合遗传算法的协同进化,通过博弈论分析最佳设计选项,实现目标风电场和待建相邻风电场之间的影响最小化,实现风电场共同最大化的经济效益。当集群内各风电场具备达成合作的条件时,可以建立合作博弈模型,各风电场作为参与者通过协商合作来调整自身资源,使整个集群的收益最大化,最后再根据各参与者的对集群收益增加的贡献值分配额外增加的收益。合作博弈的方式不仅能够让整个集群内各风电场的经济收益增加,同时也保证了整个集群的运行稳定。但是目前运用合作博弈分析集群风电机组规划的研究还较少,在未来的研究中合作博弈有可能成为解决风电场集群风电机组规划设计问题的有效手段。

### 3.2 电气系统拓扑结构规划

风电场集群中的各风电场分散在不同区域,且

风电场内部风电机组之间为了降低尾流的影响也保持着较长的距离,需要大量的电缆将其连接起来。因此,电气系统的布局也会影响风电场集群的投资成本,合理的规划将提高风电场的经济效益,确保风电场能源供应的安全性和可靠性。

风电场集群的电气系统包括集电系统和输电系统,集电系统是风电场内部的电气系统,输电系统是连接升压站和集控站的高压电气网络。集电系统常见的拓扑结构可分为链形、单边环形、双边环形、复合环形及树形,如图5所示。5种拓扑结构在风电场规划设计中均有使用,其中链形结构使用范围最广。为了优化风电场集电系统的拓扑结构,文献[51]将生成树法与模拟退火算法相结合,对链形拓扑结构进行了优化。近年来,随着AI技术的发展,文献[52]将AI运用到链形拓扑结构优化中,更加高效地求解了风电机组选址和电缆布局问题。为了最小化风电机组之间的海底电缆长度,以减少电缆铺设成本和电力损耗,文献[53-54]利用图论领域的旅行商问题(traveling salesman problem, TSP)模型优化电缆连接布局,并且文献[54]提出了一种改进蝙蝠算法,对电缆连接布局进行优化。为避免在求得的集电线路布局中出现电缆交叉的情形,文献[55]提出运用离散粒子群优化算法对集电线路布局进行优化,再使用Prim算法对单支路风电机组设计进行复核,从而避免电缆之间相互交叉。

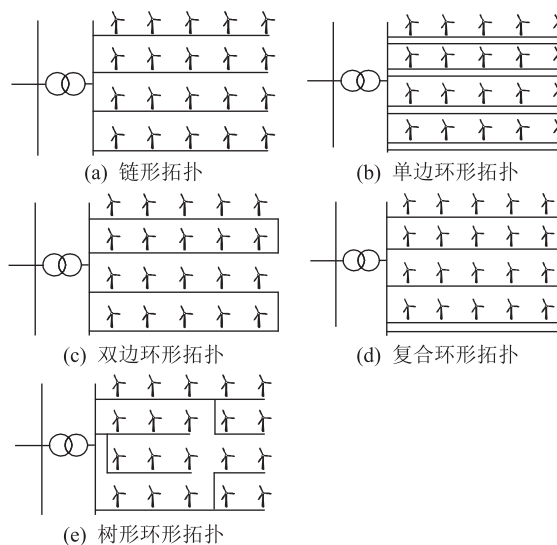


图5 常见风电场集电系统拓扑

Fig.5 Common topologies of wind farm collector system

风电场集群电气系统的规划不仅包含风电场内部集电系统拓扑的设计,更重要的是多个风电场共用的输电系统的设计。未来海上风电场发展逐步迈向深海,随着输电距离的增加,传统高压交流(high voltage alternating current, HVAC)输电方式的

电能损耗越来越大,相对而言,在距离海岸超过 200 km 的海域建设风电场时,高压直流(high voltage direct current, HVDC)输电的投资更少、能量传输损耗更低<sup>[56]</sup>。HVDC 输电在长距离深海风电场的应用已经代替 HVAC 成为最佳选项。对于地处远离电网和负荷中心的偏远地区的陆上风电场, HVDC 也被广泛应用于远距离电力输送。而随着电力电子技术的发展,柔性 HVDC 相比传统 HVDC 能够更加稳定、高效地将电能传至电网中,其中基于电压源换流器的 HVDC (voltage source converter based HVDC, VSC-HVDC) 输电采用了新型的换流器拓扑结构,通过绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)、集成门极换流晶闸管(integrated gate commutated thyristor, IGCT)、脉宽调制(pulse width modulation, PWM)技术对电流和电压进行控制,可以实现更快速的电压调节、无功控制和更高的可靠性,具有更加灵活的输电能力<sup>[57-58]</sup>。直流输电的拓扑结构可以分为点对点式、放射状和环状拓扑。其中环状拓扑灵活性强,但是投资成本高,难以在工程上应用,目前工程上使用最多的结构是放射状拓扑<sup>[59]</sup>。为优化输电系统的拓扑结构,使得 HVDC 电缆在满足运行要求的情况下投资最少,文献[60]提出一种新的基于平均连接凝聚层次聚类算法的最优输电网络布局方法,并将其运用于风电场集群输电系统拓扑优化。对于升压站和集控中心位置不确定的情况,为了实现海底电缆长度最短的优化目标,文献[61]先运用深度优先搜索法和最短路径法计算出初始最优结构,然后通过基于 Dijkstra 算法的改进遗传算法对输电网络拓扑进行优化。在大规模海上风电场集群中,输电海缆路径很可能受风电场布局限制导致海缆随意穿越风电场区域,造成安全隐患。为了解决这个问题,文献[62]建立考虑海缆可行路径约束的风电场集群输电系统的经济性模型,通过改进蚁群算法对该优化问题进行求解。该算法明显提高了迭代速度,所求得的成本最优值也大幅下降,可广泛应用于风电集群打捆送出的输电系统拓扑优化问题的求解。

风电场集群微观选址和电气系统的协同规划能够最大化风能利用、降低电网建设成本、提高电网稳定性和可靠性并优化维护和运营管理。目前对于风电场集群布局优化的研究,绝大多数是将风电机组的微观选址和电气系统的布局分别进行设计。分解设计任务能降低布局优化工作的难度和复杂度,但极易造成求得的解仅为局部最优。风电场集群的风电机组微观选址和电气系统的布局是

相互关联的,未来风电场集群规划的趋势是将两者结合起来进行联合优化与综合评估,具体可基于博弈论建立一个主从博弈模型,集群内风电场为领导者,输电线路设计团队为跟随者,优化目标分别为集群输出功率最大和输电线路投资最小。两个团队都希望将自己的收益最大化,在主从博弈的框架下进行协商和互动,通过调整各自的策略,达到最优的集群整体规划,实现更高效、更经济的能源输送。

## 4 风电场集群多风电场协调控制

风电场集群多风电场协调控制技术是指对多个风电场之间的相互作用和协同效应进行分析和优化,以实现整个风电场集群的协调控制和优化运行。该技术的目标是提高风电场集群的发电效率、降低系统成本、提高可靠性和可持续性。由于风电场有功发电的间歇性,大规模风电的集成可能会导致电网电压波动、传输功率超过设定限值、系统瞬态稳定性变化等一系列问题<sup>[63]</sup>。随着风电场规模与数量的不断扩增,电网对并网风电场的输出特性有了更高的要求,需要对集群中的各风电场进行协调控制,使风电场在一定程度上参与系统调度,以输出更多清洁能源,减轻系统调峰压力。

对于风电场集群的控制,就是将所处地域毗邻、特性上相关且拥有共同接入点的多个风电场进行一体化整合、集中协调控制,平抑出力的波动性和间歇性,使其具备灵活响应电网调度与控制的能力<sup>[64]</sup>。

### 4.1 集群控制系统

风电场集群控制系统的研究多从并网角度展开。文献[65]从 3 个层次对风电场集群进行控制,即确定风电场出力的调度中心,选定执行自动功率控制(automatic generation control, AGC)风电机组的风电场调度层,执行输出限制控制、平滑控制等功能的风电机组控制层。风电场集群控制一般分为 3 个模块<sup>[65]</sup>。

(1) 集群控制模块:一方面,与风电机组的监控装置、功率预测装置、升压站和无功补偿设备,如静止无功发生器(static var generator, SVG)、静止无功补偿器(static var compensator, SVC)和静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)连接,将采集到的数据上传至调度主站;另一方面,响应调度主站自动电压控制(automatic voltage control, AVC)系统控制指令,对风电场并网电压实施闭环控制。



(2) 风电场功率控制策略确定模块:采用空气动力模式分析得到风电场内单台风电机组的风能裕度,结合调度主站功率需求,确定风电场有功和无功功率控制策略,把优化后的下一周期功率参考值下发到各台风电机组等设备。

(3) 风电机组有功调节能力确定模块:根据风电机组当前状态以及超短期风能裕度,执行场站级控制模块下达的指令。确定风电机组 AGC 有功调节能力值,并将有功输出状态上传至 AGC 主站。

依据上述模型,风电场集群控制系统结构如图 6 所示。

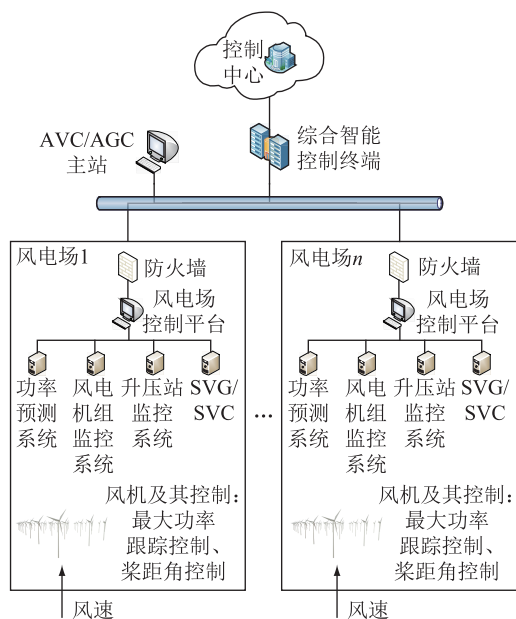


图 6 风电场集群控制系统

Fig.6 Wind farm cluster control system

站间通信是集群协控的基础环节,通过建立网络连接各个风电场,实现信息交换和指令传递。常用通信方式包括有线通信(如光纤)和无线通信(如无线传感器网络),确保各个风电场之间的实时数据共享和通信。风电场集群控制系统中的通信方式多采用总线控制,但总线通信方式因受技术瓶颈限制,不适用于多从站、大数据量的风电场集群控制系统,而多控制器分布式控制的方式会增加经济成本和设备复杂度,也不适用于集群控制。鉴于此,文献[66]提出一种通信控制系统以解决上述问题,该系统采用实时子系统与风电场中的设备通信,将控制信息发送至对应的控制设备;非实时子系统与风电场中的设备通信,将实时和非实时数据同时存储至本地数据库和云端数据库。

此外,风电场集群多风电场协调控制过程中须对每个风电场进行状态监测,以获取关键参数和运行数据。监测内容包括风机运行状态、发电功率、

风速和风向等信息。通过采集和比较每个风电场的状态数据,可以了解整个集群的运行状况,及时发现问题并采取相应措施。同时,须对整个风电场集群的稳定性进行评估,包括对集群内部的功率平衡、电压稳定性和频率稳定性进行分析和控制。通过合理分配功率、协同调节电压和频率等措施,确保集群的稳定运行,提高集群的可靠性和效益。

#### 4.2 无功电压控制

从研究层次上看,目前针对风电场集群无功电压控制的研究主要集中在 3 个方面,即风电机组层、风电场层和风电场集群层。

恒速恒频的风电机组需要并联电容器组进行无功补偿。直驱式风电机组和双馈型风电机组均具备一定的无功调节能力。利用直驱式风电机组自身的调节能力对风电场无功电压进行控制,有助于减少无功补偿装置的投资<sup>[67]</sup>。但风电机组受全功率变流器物理特性的影响,功率输出必须满足变流器的约束,因此,有功功率和无功功率会相互影响。文献[68-71]推演了风电机组  $P-Q$  容量曲线,建立动态无功支撑系统,在充分发挥风电机组无功调节能力的同时,又可以避免发生机端电压越线的情况。风电场的无功控制主要通过协调风电机组和无功补偿装置的无功调节能力来实现。在无功补偿容量的分配过程中,可以用智能优化算法求解风电场并网运行的无功优化和电压稳定等问题,如遗传算法和神经网络算法等<sup>[72]</sup>。

风电场集群的无功电压控制策略可分为分散式控制、集中优化控制和分布式/分层控制。当风电场集群规模较大时,中央控制器的计算负担较大,相对于集中优化控制,分布式/分层控制能够更好地提高计算效率。文献[73]采用具有交替方向乘子法的双层控制结构,以分布式/分层控制的方式解决了此优化问题。多目标优化模型同样可以用于求解无功电压控制问题。文献[74-76]运用风电功率波动特性信息,将电压稳定性和经济性作为目标函数,以寻求风电场集群内各风电场无功出力的最优分配方案。随着风电场大规模接入电网,AVC 也随之改进,三级式风电 AVC 将风电汇集站作为中间协调层,形成“AVC 主站-风电汇集站-AVC 子站”的 3 层协调控制模式,在协调层进行控制决策,采用罚函数处理以及改进和声搜索算法得到无功的最优解<sup>[77]</sup>。由于风电场集群接入一般为区域电网中大规模风电并网,运行控制与当地电网耦合紧密,文献[78]通过研究湛江电网大规模风电并网特性,提出一种二级电压控制策略,通过控制子站

和控制执行站之间的协调配合实现湛江电网的无功电压调节,保证了电能的质量,但没有考虑各风电场之间的无功补偿的分配情况。分配各风电场之间无功补偿量的控制方法主要包括数学规划算法、比例分配算法和基于预测的一般优化算法。此外,在风电场和风电场集群的无功协调过程中,还可以将储能装置等设备加入无功补偿系统中,以改善系统的电能质量<sup>[72]</sup>。

### 4.3 有功功率控制

风电场集群功率的控制不等同于各个子风电场功率控制的简单叠加,须依据风功率预测、风电机组及风电场出力的概率分布和波动特性,才能实现这一复杂的系统工程。

风电机组的有功功率控制是指接受来自风电场场站级的功率参考值,通过单机控制来执行相应的输出,分为升功率控制模式和限功率控制模式。升功率控制是指使风电机组功率输出提高的控制,在额定风速以下时通过最大功率点追踪控制(maximum power point tracking, MPPT)实现,在额定风速以上时通过变桨控制实现。限功率控制是指使风电机组输出功率减少的控制,主要通过变速变桨进行控制<sup>[79]</sup>。

风电场场站级控制是指结合上级电网调度中心的指令和风电机组当前运行状态等相关信息,把优化后的下一周期功率参考值下发到各台风电机组。有功控制策略包括比例分配算法和多目标优化法。在不同风速下,风电机组动态特性差异较大,文献[80-81]通过分析不同风速下风电机组桨距角和转速,提出采用模糊评价算法确定权重分配,以完成一次调频的风电场有功功率分配。这种方法能够得到较平滑的功率输出,减小风电机组转速和桨距角的变化频率。

风电场集群的有功功率控制包括4种模式:输出计划跟踪、峰值负载调节、频率调节和紧急有功功率支持<sup>[63]</sup>。输出计划跟踪是指对各个风电场输出计划的跟踪,以达到内部优化、协调和执行调度中心发布的输出计划的目的。峰值负载调节是指在电网安全裕度比较高的条件下,风电场集群将根据最大输出能力运行。否则,应在限功率并网状态下运行。频率调节是指当系统频率超过预设死区时,风电场应参与一次和二次频率调节。紧急有功功率支持是指当传输系统过载时,应激活紧急控制以减少有功输出。风电场集群多采用有功功率分级控制,分配各风电场有功输出的方法主要包括:加权算法、计划排队法和数学规划法等。文献[82]

根据有功功率分层控制思想,建立了“中央调度站-风电场集群主控站-风电场执行站”三级有功功率控制方案,并提出在正常运行条件和应急运行条件下,风电场集群的实时有功功率控制策略。为了实现复杂的实时调度和快速控制,文献[83-86]基于分层主动协调控制策略,将优化控制问题分解为可并行求解的小规模优化问题,依据预测模型结果,对风电场集群不同运行模式下的有功功率进行协调控制,以优化各风电场的有功输出,保证电力系统的安全和稳定。

风电场集群的功率控制属于群体控制,由多个被控对象组成,即多个风电场,每个风电场有不同的出力和波动特性,且风电机组之间的波动特性存在较大差异。因此在提高输出功率的同时应关注协调风电场及风电机组之间差异化动态特性的问题。此外,若风电场未采用集群控制系统并网,可选择利润最大化的方案。若风电场并网采用集群控制系统,就要首先选择使电网安全稳定运行的方案。服从电网分配必然会造成风电场之间赢利不均的现象,因此,须建立并完善与风电场收益相关的调度补偿机制,从综合考虑风电场侧和电网侧效益的角度研究集群控制系统,实现风电场集群的经济运行。

## 5 主要存在问题

目前风电场集群组合预测技术、风电场集群协同优化规划技术和风电场集群协调控制运行技术的应用虽然已经有效地提高了风电场集群的整体效益,但是想要进一步提高集群的收益,仍然存在一些问题需要解决。

风电场集群组合预测技术方面。(1) 计算复杂性:集群预测需要处理大量数据和求解时空相关性,耗费大量计算资源和时间。(2) 数据维度和模型简化:为平衡计算成本和预测精度,部分方法降低数据维度或简化数学模型,忽略了不同风电场间的时空相关性。

风电场集群多风电场协同规划技术方面。(1) 孤立的规划方法:微观选址和电气系统布局往往独立进行,缺乏整体协同考虑,导致规划结果局限于某一方面的优化。(2) 多目标优化挑战:涉及多个优化目标,目标之间存在冲突和权衡,需要找到最佳平衡点。

风电场集群多风电场协调控制技术方面。(1) 多变量优化问题:涉及多个变量的优化,具有高度复杂性和非线性特征,增加了问题的难度和计算负



荷。(2) 资源分配不均:不同风电场间资源分配可能不均衡,导致一些风电场过载,而其他风电场资源闲置,降低整体效率和经济性。(3) 控制决策时延:分布式控制系统的时延可能导致控制响应不及时,影响对集群动态变化的实时调整,降低系统的灵活性和鲁棒性。(4) 经济效益衡量问题:功率分配和无功补偿可能影响风电场的收益,需要建立合理的调度补偿机制,综合考虑风电场侧和电网侧的经济效益。

以上述问题为出发点,进一步研究和改进这些技术,有助于提高预测准确性、规划效率和控制性能,实现风电场集群的高效、稳定和可靠运行。

## 6 总结与展望

规模化开发风能资源是实现双碳目标的重要举措之一,也是助力我国成为风电强国的必由之路。文中总结了风电场集群预测、规划与控制的关键技术,主要结论如下:

风电场集群功率预测方面,目前的研究方向主要集中在风电场集群功率预测模型的改进和数据特征提取上,其中 AI 算法和时空相关性模型是研究的热点和难点。为了提高预测精度,研究者们致力于通过对预测结果进行误差修正、优化预测结果的评价指标等手段来进一步完善模型。此外,一些双目标模型在单个风电场的预测中已经证明效果不错,未来也可将其应用到集群预测中。

在风电场集群规划的研究中,除了降低风电机组微观选址过程中相邻风电场尾流效应的影响或优化电气系统拓扑结构外,当前研究还关注如何优化风电场的经济效益和运行稳定性。因此,未来的风电场集群规划需要将微观选址和电气系统综合考虑,并采用博弈论相关理论建立博弈模型,以整体规划为目标,实现风电场集群的最优布局。除此之外,在深海或偏远地区建设风电场时,HVDC 输电技术也是一种重要的考虑因素。

风电场集群控制系统主要分为无功电压控制环和有功功率控制环,以实现风电场的协调控制。在安全裕度较高时,风电场可以最大化发电量,但在电网要求风电场参与协调控制时,风电场需要按上级参考功率发电以满足电网需求。同时,为了平衡风电场之间的利益分配,须建立完善的风电场输出功率协调补偿机制。

文中比较全面地介绍了风电场集群化发展模式下相关的预测、规划和控制关键技术,为研究该领域的学者和从业人员提供了较好的参考和指导。

对于风电场集群未来的展望和发展趋势,可以主要考虑以下几个方面:

(1) 技术创新与集成优化。随着技术的不断进步,可以预见到风电场集群预测、规划和控制技术将进一步得到改进和优化。例如,结合 AI、大数据分析和机器学习等技术,可以提高预测精度和准确性,进一步优化风电场集群的布局 and 配置。同时,通过优化电气系统布局和控制策略,可以提高风电场集群的经济效益和运行稳定性。

(2) 跨区域协同与智能电网融合。随着风电场集群的规模化发展,跨区域协同和智能电网的概念将成为关注的焦点。在未来,可以预期风电场集群将与其他可再生能源资源进行协同发展,以实现更高效的能源利用和供需平衡。同时,智能电网技术的应用将促进风电场集群的灵活性和可调度性,提高电网对风电的接纳能力。

(3) 深海和偏远地区开发。随着陆地风电资源的逐渐饱和,深海和偏远地区的风能资源成为新的开发热点。未来的发展趋势将涉及深海风电场集群的建设和运营,同时需要解决海上输电和电网接入等技术挑战。HVDC 输电技术和海上风电场布局优化将成为关键研究领域。

(4) 电力市场和政策环境。风电场集群的规模化发展离不开健全的电力市场和政策环境的支持。未来的发展趋势将涉及更加市场化和灵活的电力交易机制,以及更加清洁和低碳的政策支持。同时,加强国际合作和经验共享,推动全球风电场集群的发展和合作,也将成为未来的发展趋势之一。

总体而言,未来风电场集群的发展将面临多个方面的挑战和机遇,包括技术创新、协同发展、跨区域融合、深海开发和政策支持等。通过不断加强研究和创新,风电场集群必将实现可靠性、高效性和可持续性发展,为推动我国能源转型和实现双碳目标作出重要贡献。

### 致谢

本文得到江苏省卓越博士后计划(2022ZB2-00),中国博士后科学基金(2023T160311),可再生能源并网全国重点实验室开放基金项目(NYB5120-2301636)资助,谨此致谢!

### 参考文献:

- [1] 吕金鹏. 风力发电的发展状况与发展趋势[J]. 决策探索(中),2018(1):80-81.  
LYU Jinpeng. Development status and trend of wind power generation[J]. Policy Research & Exploration,2018(1):80-81.
- [2] 崔东岭,摆念宗. 海上风电与陆上风电差异性分析(上)[J]. 风能,2019(5):74-76.

- CUI Dongling, BAI Nianzong. Analysis of the differences between offshore wind power and onshore wind power (part I) [J]. *Wind Energy*, 2019(5):74-76.
- [3] 崔东岭, 摆念宗. 海上风电与陆上风电差异性分析(下)[J]. *风能*, 2019(6):60-62.
- CUI Dongling, BAI Nianzong. Analysis of the differences between offshore wind power and onshore wind power (part II) [J]. *Wind Energy*, 2019(6):60-62.
- [4] 陈雷, 卢斯煜. 风电场出力特性与集群效应分析方法研究[J]. *南方能源建设*, 2017, 4(1):31-37.
- CHEN Lei, LU Siyu. Research on the analysis method for wind power generating output characteristic and cluster effects [J]. *Southern Energy Construction*, 2017, 4(1):31-37.
- [5] 苏广锦. 榆林地区风光电场出力特性研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2021.
- SU Guangjin. Study on output characteristics of wind and solar power in Yulin area[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021.
- [6] 崔冬林, 沙伟, 刘树洁, 等. 海上相邻风电场间的“尾流效应”实例分析[J]. *南方能源建设*, 2023, 10(1):21-28.
- CUI Donglin, SHA Wei, LIU Shujie, et al. Case study of "wake effect" of adjacent offshore wind farms [J]. *Southern Energy Construction*, 2023, 10(1):21-28.
- [7] 张占奎, 石文辉, 屈姬贤, 等. 大规模海上风电并网送出策略研究[J]. *中国工程科学*, 2021, 23(4):182-190.
- ZHANG Zhankui, SHI Wenhui, QU Jixian, et al. Grid connection and transmission scheme of large-scale offshore wind power [J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(4):182-190.
- [8] 孙荣富, 张涛, 和青, 等. 风电功率预测关键技术及应用综述[J]. *高电压技术*, 2021, 47(4):1129-1143.
- SUN Rongfu, ZHANG Tao, HE Qing, et al. Review on key technologies and applications in wind power forecasting [J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(4):1129-1143.
- [9] 樊肖杰, 迟永宁, 马士聪, 等. 大规模海上风电接入电网关键技术与技术标准的研究及应用[J]. *电网技术*, 2022, 46(8):2859-2870.
- FAN Xiaojie, CHI Yongning, MA Shicong, et al. Research and application of key technologies and technical standards for large-scale offshore wind farms connecting to power grid [J]. *Power System Technology*, 2022, 46(8):2859-2870.
- [10] 葛畅, 阎洁, 刘永前, 等. 海上风电场运行控制维护关键技术综述[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(12):4278-4292.
- GE Chang, YAN Jie, LIU Yongqian, et al. Review of key technologies for operation control and maintenance of offshore wind farm [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(12):4278-4292.
- [11] DREW D R, CANNON D J, BARLOW J F, et al. The importance of forecasting regional wind power ramping: a case study for the UK [J]. *Renewable Energy*, 2017, 114:1201-1208.
- [12] BARCONS J, AVILA M, FOLCH A. Diurnal cycle RANS simulations applied to wind resource assessment [J]. *Wind Energy*, 2019, 22(2):269-282.
- [13] CAI H S, JIA X D, FENG J S, et al. Gaussian process regression for numerical wind speed prediction enhancement [J]. *Renewable Energy*, 2020, 146:2112-2123.
- [14] 吴问足, 乔颖, 鲁宗相, 等. 风电功率概率预测方法及展望[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(18):167-175.
- WU Wenzu, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. Methods and prospects for probabilistic forecasting of wind power [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(18):167-175.
- [15] WANG H Z, LEI Z X, ZHANG X, et al. A review of deep learning for renewable energy forecasting [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 198:111799.
- [16] 姜兆宇, 贾庆山, 管晓宏. 多时空尺度的风力发电预测方法综述[J]. *自动化学报*, 2019, 45(1):51-71.
- JIANG Zhaoyu, JIA Qingshan, GUAN Xiaohong. A review of multi-temporal-and-spatial-scale wind power forecasting method [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(1):51-71.
- [17] LOBO M G, SANCHEZ I. Regional wind power forecasting based on smoothing techniques, with application to the Spanish peninsular system [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(4):1990-1997.
- [18] 陈颖, 孙荣富, 吴志坚, 等. 基于统计升尺度方法的区域风电场功率预测[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(7):1-5.
- CHEN Ying, SUN Rongfu, WU Zhijian, et al. A regional wind power forecasting method based on statistical upscaling approach [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(7):1-5.
- [19] 涂青宇, 苗世洪, 林毓军, 等. 基于动态 R 藤 Copula 模型的区域风电集群超短期功率区间预测方法[J]. *高电压技术*, 2022, 48(2):456-470.
- TU Qingyu, MIAO Shihong, LIN Yujun, et al. Ultra-short-term interval forecasting method for regional wind farms based on dynamic R-vine copula model [J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(2):456-470.
- [20] ZHENG L, ZHOU B, OR S W, et al. Spatio-temporal wind speed prediction of multiple wind farms using capsule network [J]. *Renewable Energy*, 2021, 175:718-730.
- [21] GUO N Z, SHI K Z, LI B, et al. A physics-inspired neural network model for short-term wind power prediction considering wake effects [J]. *Energy*, 2022, 261:125208.
- [22] 杨茂, 彭天, 苏欣. 基于预测信息二维坐标动态划分的风电集群功率超短期预测[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(24):8854-8864.
- YANG Mao, PENG Tian, SU Xin. Ultra-short term wind power prediction based on two-dimensional coordinate dynamic division of prediction information [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(24):8854-8864.
- [23] 杨子民, 彭小圣, 郎建勋, 等. 基于集群动态划分与 BLSTM 深度学习的风电集群短期功率预测[J]. *高电压技术*, 2021, 47(4):1195-1203.
- YANG Zimin, PENG Xiaosheng, LANG Jianxun, et al. Short-term wind power prediction based on dynamic cluster division and BLSTM deep learning method [J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(4):1195-1203.

- [24] YU G Z, LIU C Q, TANG B, et al. Short term wind power prediction for regional wind farms based on spatial-temporal characteristic distribution[J]. *Renewable Energy*, 2022, 199: 599-612.
- [25] GENG X L, XU L Y, HE X Y, et al. Graph optimization neural network with spatio-temporal correlation learning for multi-node offshore wind speed forecasting[J]. *Renewable Energy*, 2021, 180: 1014-1025.
- [26] SUN C, CHEN Y Y, CHENG C. Imputation of missing data from offshore wind farms using spatio-temporal correlation and feature correlation[J]. *Energy*, 2021, 229: 120777.
- [27] 马伟, 乔颖, 谢丽蓉, 等. 考虑气象特征波动划分阈值的双目标短期风功率预测[J]. *高电压技术*, 2022, 48(10): 4154-4162.
- MA Wei, QIAO Ying, XIE Lirong, et al. Short-term wind power prediction with dual targets considering the threshold of meteorological characteristic fluctuation partition[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(10): 4154-4162.
- [28] SUN W, GAO Q. Short-term wind speed prediction based on variational mode decomposition and linear-nonlinear combination optimization model[J]. *Energies*, 2019, 12(12): 2322.
- [29] 宋彦辛. 计及多环节不确定性的长期风资源评估研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- SONG Yanxin. Research on long-term wind resource assessment considering of multi-stage uncertainty[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [30] 叶林, 饶日晟, 杨丹萍, 等. 基于波动互相关系数的风能资源评估组合模型[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(3): 712-720.
- YE Lin, RAO Risheng, YANG Danping, et al. A combined wind resource assessment model based on fluctuation cross-correlation coefficient[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(3): 712-720.
- [31] WEEKES S M, TOMLIN A S. Comparison between the bivariate Weibull probability approach and linear regression for assessment of the long-term wind energy resource using MCP[J]. *Renewable Energy*, 2014, 68: 529-539.
- [32] 罗芳. 探析风电场群间尾流效应对于发电量的影响[J]. *电力系统装备*, 2020(24): 41-42.
- LUO Fang. Preliminary study on the influence of wake effect between wind farms on power generation[J]. *Electric Power System Equipment*, 2020(24): 41-42.
- [33] JENSEN N O. A note on wind generator interaction[M]. Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory, 1983.
- [34] LARSEN G C. A simple wake calculation procedure[M]. Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory, 1988.
- [35] 陈晨, 许昌, 李林敏, 等. 基于2D Frandsen模型的风力机尾流数值模拟[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(5): 121-128.
- CHEN Chen, XU Chang, LI Linmin, et al. Wake numerical simulation of wind turbine based on 2D-Frandsen model[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2020, 41(5): 121-128.
- [36] PARADA L, HERRERA C, FLORES P, et al. Wind farm layout optimization using a Gaussian-based wake model[J]. *Renewable Energy*, 2017, 107: 531-541.
- [37] WANG L Y, ZHOU Y K, XU J A. Optimal irregular wind farm design for continuous placement of wind turbines with a two-dimensional jensen-gaussian wake model[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(12): 2660.
- [38] TAO S Y, KUENZEL S, XU Q S, et al. Optimal micro-siting of wind turbines in an offshore wind farm using frandsen-gaussian wake model[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(6): 4944-4954.
- [39] 杨祥生, 赵宁, 田琳琳, 等. 基于 Park-Gauss 模型考虑大气稳定性对布局优化的影响[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(3): 43-47.
- YANG Xiangsheng, ZHAO Ning, TIAN Linlin, et al. Influence of atmospheric stability on layout optimization based on park-gauss model[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2021, 42(3): 43-47.
- [40] 胡晓兵, 杨易. 基于 NSRFG 方法的标准地貌风场大涡模拟研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(9): 112-122.
- HU Xiaobing, YANG Yi. Research on NSRFG-based les simulation for standard wind terrains[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(9): 112-122.
- [41] 姜婷婷, 叶杭冶, 申新贺, 等. 基于风轮面等效风速的风电场发电量评估方法研究[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(9): 244-249.
- JIANG Tingting, YE Hangye, SHEN Xinhe, et al. Research on wind farm power generation assessment based on rotor equivalent wind speed[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2021, 42(9): 244-249.
- [42] MOSETTI G, POLONI C, DIVIACCO B. Optimization of wind turbine positioning in large windfarms by means of a genetic algorithm[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1994, 51(1): 105-116.
- [43] KATRE G, SHAHA R. Comparative analysis of optimization techniques in wind farm layout optimization[J]. *International Journal for Modern Trends in Science and Technology*, 2022, 8(2): 159-167.
- [44] TAYLOR P, YUE H, CAMPOS-GAONA D, et al. Turbine layout optimisation for large-scale offshore wind farms-a grid-based method[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2021, 15(16): 3806-3822.
- [45] ÇELİK K, YILDIZ C, ŞEKKEK M. Wind power plant layout optimization using particle swarm optimization[J]. *Turkish Journal of Engineering*, 2021, 5(2): 89-94.
- [46] 张子良, 郭乃志, 易侃, 等. 几何约束条件下海上风电场布局优化方法研究[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(2): 116-122.
- ZHANG Ziliang, GUO Naizhi, YI Kan, et al. Investigation of offshore-wind-farm layout optimization under geometrical constraints[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2023, 44(2): 116-122.
- [47] SCHNEEMANN J, ROTT A, DÖRENKÄMPER M, et al. Cluster wakes impact on a far-distant offshore wind farm's power



- [J]. *Wind Energy Science*, 2020, 5(1): 29-49.
- [48] NYGAARD N G, HANSEN S D. Wake effects between two neighbouring wind farms [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 753: 032020.
- [49] 王凯, 许昌, 韩星星, 等. 基于边界适应和风电场间影响的海上风电场微观选址优化研究 [J]. *可再生能源*, 2022, 40(4): 481-486.  
WANG Kai, XU Chang, HAN Xingxing, et al. Micro-siting optimization of offshore wind farms based on boundary adaptation and inter-wind farm impacts [J]. *Renewable Energy Resources*, 2022, 40(4): 481-486.
- [50] SERRANO GONZÁLEZ J, BURGOS PAYÁN M, RIQUELME SANTOS J M. Optimal design of neighbouring offshore wind farms: a co-evolutionary approach [J]. *Applied Energy*, 2018, 209: 140-152.
- [51] 王辉, 付凌云, 孙世民. 海上风电场海缆布局优化设计方法 [J]. *高压电器*, 2022, 58(1): 46-52.  
WANG Hui, FU Lingyun, SUN Shimin. Optimization design method for submarine cable layout of offshore wind farm [J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(1): 46-52.
- [52] WU Y K, LEE C Y, CHEN C R, et al. Optimization of the wind turbine layout and transmission system planning for a large-scale offshore wind farm by AI technology [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2014, 50(3): 2071-2080.
- [53] SRIKAKULAPU R, VINATHA U. Optimized design of collector topology for offshore wind farm based on ant colony optimization with multiple travelling salesman problem [J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2018, 6(6): 1181-1192.
- [54] QI Y H, HOU P, YANG L A, et al. Simultaneous optimisation of cable connection schemes and capacity for offshore wind farms via a modified bat algorithm [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(2): 265.
- [55] 余德启. 大规模风电场集电线路路径优化与数字地图显示 [J]. *风能*, 2022(3): 62-65.  
YU Deqi. Path optimization and digital map display of collector lines in large-scale wind farms [J]. *Wind Energy*, 2022(3): 62-65.
- [56] LI Z X, SONG Q A, AN F, et al. Review on DC transmission systems for integrating large-scale offshore wind farms [J]. *Energy Conversion and Economics*, 2021, 2(1): 1-14.
- [57] YEN N T H, CHEN H K, GIANG L N. Study on VSC-HVDC grid topology of offshore wind farms [J]. *Cluster Computing*, 2019, 22(6): 14803-14810.
- [58] MITRA B, CHOWDHURY B, MANJREKAR M. HVDC transmission for access to off-shore renewable energy: a review of technology and fault detection techniques [J]. *IET Renewable Power Generation*, 2018, 12(13): 1563-1571.
- [59] LI J K, YIN J Y, GUAN Y G, et al. A review on topology, operating and control methods of HVDC transmission system for offshore wind farms [J]. *E3S Web of Conferences*, 2020, 165: 06012.
- [60] PAUL S, RATHER Z H. A novel approach for optimal cabling and determination of suitable topology of MTDC connected offshore wind farm cluster [J]. *Electric Power Systems Research*, 2022, 208: 107877.
- [61] 王长虹, 刘天琪, 李保宏. 多个海上风电场输电组网拓扑研究 [J]. *现代电力*, 2018, 35(5): 56-61.  
WANG Changhong, LIU Tianqi, LI Baohong. Research on topology of transmission network with multiple offshore wind farms [J]. *Modern Electric Power*, 2018, 35(5): 56-61.
- [62] 汤亮亮, 任华, 乔颖, 等. 基于改进蚁群算法的海上风电集群输电系统拓扑优化 [J]. *可再生能源*, 2018, 36(12): 1826-1832.  
TANG Liangliang, REN Hua, QIAO Ying, et al. Topology optimization on transmission system of the offshore wind farm cluster [J]. *Renewable Energy Resources*, 2018, 36(12): 1826-1832.
- [63] WU Q W, SUN Y Z. Modeling and modern control of wind power [M]. United Kingdom: Wiley-IEEE Press, 2017: 193-213.
- [64] 冯力鸿. 风电场集群控制系统研究综述 [J]. *中国电机(技术版)*, 2012(9): 64-66.  
FENG Lihong. Reviews on cluster control system of wind farm [J]. *China Electric Power (Technology Edition)*, 2012(9): 64-66.
- [65] 杨银国, 刘洋, 于珍, 等. 一种一次调频的风电集群控制系统、方法及装置: CN114696370A [P]. 2022-07-01.  
YANG Yinguo, LIU Yang, YU Zhen, et al. A wind power cluster control system, method and device with primary frequency regulation; CN114696370A [P]. 2022-07-01.
- [66] 平立发, 黄晓芳, 韩则胤. 风电场集群控制系统、方法、控制设备及存储介质: CN110657064A [P]. 2020-06-30.  
PING Lifa, HUANG Xiaofang, HAN Zeyin. Wind farm cluster control system, method, control equipment and storage medium; CN110657064A [P]. 2020-06-30.
- [67] 高峰, 周孝信, 赵东来, 等. 直驱式风电场功率协调控制策略 [J]. *电网技术*, 2012, 36(4): 33-38.  
GAO Feng, ZHOU Xiaoxin, ZHAO Donglai, et al. Coordinated control of reactive and active power for direct-drive wind farm [J]. *Power System Technology*, 2012, 36(4): 33-38.
- [68] 黄弘扬, 王波, 黄晓明, 等. 基于双馈风电机组的分布式动态无功支撑系统 [J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(24): 140-147.  
HUANG Hongyang, WANG Bo, HUANG Xiaoming, et al. Distributed dynamic reactive power support system based on doubly fed induction generator [J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(24): 140-147.
- [69] 韩平平, 张海天, 张炎, 等. 考虑风电场无功调节能力的无功电压控制分区方法研究 [J]. *太阳能学报*, 2019, 40(2): 363-369.  
HAN Pingping, ZHANG Haitian, ZHANG Yan, et al. Research on reactive power/voltage control partitioning of power system with dfig wind farm considering q capability of wind farm [J].

- Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(2): 363-369.
- [70] 崔森, 颜湘武, 李锐博. 提高双馈风电机组动态无功协调控制能力的实验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 117-129.  
CUI Sen, YAN Xiangwu, LI RuiBo. Experimental research on improving the dynamic reactive power coordinated control capability of doubly-fed induction wind turbine [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 117-129.
- [71] 任鑫, 王华, 王忠超, 等. 基于聚类分区的风电场无功电压优化控制策略[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(34): 15154-15162.  
REN Xin, WANG Hua, WANG Zhongchao, et al. Optimal control strategy for reactive power and voltage of wind farms based on clustering features[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(34): 15154-15162.
- [72] 林俊杰. 大规模风电并网对湛江电网运行特性影响分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.  
LIN Junjie. Analysis of the influence of large-scale wind power integration on the operation characteristics of Zhanjiang power grid [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [73] 李军徽, 毕江林, 严干贵, 等. 大规模风电并网无功调控技术综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(10): 42-48.  
LI Junhui, BI Jianglin, YAN Gangui, et al. Review on reactive power regulation techniques of large-scale wind power integration[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2018, 30(10): 42-48.
- [74] HUANG S, GONG Y S, WU Q W, et al. Two-tier combined active and reactive power controls for VSC-HVDC-connected large-scale wind farm cluster based on ADMM [J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(8): 1379-1386.
- [75] EBRAHIMI F M, KHAYATIYAN A, FARJAH E. A novel optimizing power control strategy for centralized wind farm control system [J]. Renewable Energy, 2016, 86: 399-408.
- [76] 杨硕, 王伟胜, 刘纯, 等. 计及风电功率波动影响的风电场集群无功电压协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4761-4769.  
YANG Shuo, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Coordinative strategy for reactive power and voltage control of wind farms cluster considering wind power fluctuation [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4761-4769.
- [77] 崔杨, 彭龙, 仲悟之, 等. 双馈型风电场群无功分层协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4300-4307.  
CUI Yang, PENG Long, ZHONG Wuzhi, et al. Coordination strategy of reactive power control on wind farms based doubly fed induction generator [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4300-4307.
- [78] 陈逸琿, 林令淇, 田鑫, 等. 三级式风电 AVC 协调控制策略[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(4): 20-27.  
CHEN Yihui, LIN Lingqi, TIAN Xin, et al. Three-level wind power AVC coordinated control strategy [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(4): 20-27.
- [79] 樊新东, 杨秀媛, 金鑫城. 风电场有功功率控制综述[J]. 发电技术, 2018, 39(3): 268-276.  
FAN Xindong, YANG Xiuyuan, JIN Xincheng. An overview of active power control in wind farms [J]. Power Generation Technology, 2018, 39(3): 268-276.
- [80] 刘军, 张彬彬, 赵晨聪. 基于数据驱动的风电场有功功率分配算法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 125-131.  
LIU Jun, ZHANG Binbin, ZHAO Chencong. Data-driven based active power distribution algorithm in wind farm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 125-131.
- [81] 张彬彬. 风电场有功功率优化分配及其控制[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.  
ZHANG Binbin. Wind farm active power optimizing dispatch and control [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [82] LIN L, LI D, ZHU C C, et al. An active power control application in a utility wind farm cluster [C]//2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition. National Harbor, MD, USA. IEEE, 2014: 1-5.
- [83] ZHU Y, ZHANG Y N, WEI Z N. Hierarchical cluster coordination control strategy for large-scale wind power based on model predictive control and improved multi-time-scale active power dispatching [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(3): 827-839.
- [84] YE L, ZHANG C H, TANG Y, et al. Hierarchical model predictive control strategy based on dynamic active power dispatch for wind power cluster integration [C]//IEEE Transactions on Power Systems. IEEE, 2019: 4617-4629.
- [85] 刘洪波, 彭晓宇, 张崇, 等. 风电参与电力系统调频控制策略综述[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 81-92.  
LIU Hongbo, PENG Xiaoyu, ZHANG Chong, et al. Overview of wind power participating in frequency regulation control strategy for power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 81-92.
- [86] 薛帅, 高厚磊, 郭一飞, 等. 大规模海上风电场的双层分布式有功控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 1-9.  
XUE Shuai, GAO Houlei, GUO Yifei, et al. Bi-level distributed active power control for a large-scale wind farm [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 1-9.

作者简介:



陶思钰

陶思钰(1991),女,博士,讲师,研究方向为新能源风力发电技术(E-mail: taosiyu@nuaa.edu.cn);

江福庆(1998),男,硕士在读,研究方向为新能源风力发电技术。

## Review of the key technologies of wind farm cluster prediction, planning and control

TAO Siyu, JIANG Fuqing

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** With the rapid development of wind industry in China, it plays an important role for the promotion of energy transition to exploit wind energy in a large-scale format. However, due to the complicated environment and high construction and operation cost, it faces a series of technical difficulties and challenges to develop the wind farms in the format of a cluster. In view of this, the prediction, planning, and control technologies related to the construction and operation of wind farm cluster are summarized in this paper. Specifically, the key technologies and research route of the wind farm cluster are summarized in this paper. According to the characteristics of the wind farm cluster, the quantitative characterization and prediction of wind resources, the coordinate optimal planning of multiple wind farms, and the control and operation of multiple wind farms are discussed in detail. The current research status and achievements in each technology field are analyzed in this paper. Lastly, the development trend of the construction and operation of wind farm cluster is illustrated and the technical difficulties to be addressed are pointed out in this paper. The summary of these technical research achievements can provide reference for the large-scale and clustered development of wind power in China.

**Keywords:** wind farm cluster; wind turbine; combined prediction; joint planning; coordinated control; artificial intelligence (AI)

(编辑 方晶)

(上接第 85 页)

## Intelligent analysis method for dynamic response of receiving system with embedded HVDC

WANG Zhiwei<sup>1</sup>, HUANG Junhui<sup>2</sup>, SUN Wentao<sup>2</sup>, SUN Fangyuan<sup>3</sup>, LAN Tu<sup>3</sup>, DIAO Ruisheng<sup>3</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;

2. Institute of Economics and Technology, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210008, China;

3. Zhejiang University-University of Illinois at Urbana-Champaign Institute, Haining 314400, China)

**Abstract:** High-voltage direct current system embedded in large-scale AC power systems will further increase the impact of commutation failure, DC blocking and other faults on system security and stability. The interaction between AC system and DC system will make the system dynamics more complex. In this paper, an intelligent analysis method based on electromechanical-electromagnetic hybrid simulation and machine learning is proposed to analyze the complex dynamic response characteristics of power system after large disturbances under different operation modes. A two-stage clustering model based on principal components analysis (PCA) dimensionality reduction, density-based spatial clustering of applications with noise (DBSCAN), K-means and other algorithms is built in this method, which can automatically cluster a large number of hybrid simulation dynamic curves in high-dimensional space, give corresponding identification and severity, and extract typical dynamic patterns of AC-DC systems under different faults. The leading security and stability problems in each mode are labeled and identified. The effectiveness of the proposed method has been verified in the planning model of East China Power Grid in 2025. The results show that the proposed method can effectively extract the system dynamic mode under different faults and support the dynamic mechanism analysis of AC/DC system under subsequent complex faults.

**Keywords:** embedded high voltage direct current transmission; AC/DC hybrid power system; electromechanical-electromagnetic hybrid simulation; unsupervised learning; clustering; artificial intelligence

(编辑 钱悦)