

引用格式:韩佶,邓钰婷,耿子越,等.大规模风电场协调控制架构及算法综述[J].电力科学与技术学报,2025,40(1):1-18.

Citation: HAN Ji, DENG Yuting, GENG Ziyue, et al. Review of coordinated control architectures and algorithms for large-scale wind farms[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 1-18.

大规模风电场协调控制架构及算法综述

韩佶¹, 邓钰婷¹, 耿子越¹, 吕文茜², 苗世洪^{3,4}

(1. 哈尔滨工业大学(威海) 新能源学院, 山东 威海 264200; 2. 国网浙江省电力有限公司杭州市临安区供电公司, 浙江 杭州 311300;

3. 华中科技大学电气与电子工程学院(强电磁工程与新技术国家重点实验室), 湖北 武汉 430074;

4. 华中科技大学电气与电子工程学院(电力安全与高效湖北省重点实验室), 湖北 武汉 430074)

摘要:随着风电并网规模的不断增长,电力系统稳定性面临更多挑战,迫切需要高效的风电集群协调控制技术。首先分析频率控制、功率平滑控制、电压控制、最大功率输出控制等风电集群协调场景的基本原理;在此基础上,分析分散式、集中式和分布式风电集群协调控制框架的性能,探讨新型控制框架的技术特点和优势;接下来,综述风电集群协调控制实现算法,包括模糊算法、一致性算法、模型预测控制、交替方向乘法、人工智能算法、群智能算法等,讨论不同算法的适用场景;最后,展望风电集群协调控制技术的发展趋势,指出跨学科融合的实现新思路。

关键词:风电场;协调控制;控制框架;算法;跨学科融合

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.01.001 中图分类号: TM863 文章编号: 1673-9140(2025)01-0001-18

Review of coordinated control architectures and algorithms for large-scale wind farms

HAN Ji¹, DENG Yuting¹, GENG Ziyue¹, LYU Wenxi², MIAO Shihong^{3,4}

(1. College of New Energy, Harbin Institute of Technology, Weihai 264200, China; 2. Lin'an Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric

Power Co., Ltd., Hangzhou 311300, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical

and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. Hubei Key Laboratory of Electric Power

Security and High Efficiency, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the growth of wind power grid-connected scale, power system stability is facing more challenges, necessitating efficient coordinated control techniques for wind power clusters. The basic principles of coordination in wind power cluster scenarios are analyzed, such as frequency control, power smoothing control, voltage control, and maximum power output control. On this basis, the coordinated control framework performance of decentralized, centralized, and distributed wind power clusters is analyzed, and the technical characteristics and advantages of new control frameworks are explored. Next, algorithms for coordinated control of wind power clusters are reviewed, including the fuzzy algorithm, consistency algorithm, model predictive control, alternating direction multiplier method, artificial intelligence algorithm, and swarm intelligence algorithm, and the applicable scenarios of different algorithms are discussed. Finally, the development trend of coordinated control techniques for wind power clusters is projected, and new insights into achieving interdisciplinary integration are provided.

Key words: wind farm; coordinated control; control framework; algorithm; interdisciplinary integration

为了应对气候变化、加快能源变革与转型,中国政府提出了“双碳”重大战略目标。在此目标的驱动下,大力推动新能源高质量发展势在必行。作

为新能源的代表,风力发电近年来发展迅猛^[1]。截至 2024 年 6 月,中国风电总装机容量已突破 4.67 亿千瓦,占有电源结构的约 14.96%。为实现与碳中

收稿日期:2024-11-06;修回日期:2025-01-01

基金项目:山东省自然科学基金青年基金(ZR2023QE315)

通信作者:韩佶(1993—),男,博士,副教授,主要从事新能源控制、电力系统运行、人工智能应用等方面的研究;E-mail:hanji@hit.edu.cn

和目标的有效衔接,在“十四五”期间,中国风电年均新增装机容量将在5 000万千瓦以上,2025年后,该数字将不低于6 000万千瓦。预计2030年,中国风电将至少达到8亿千瓦,2060年将达到30亿千瓦^[2]。

在风电的快速发展趋势下,电力系统安全稳定运行所面临的挑战显著增大^[3-8]。首先,大部分风机通过电力电子设备与电网连接,难以像传统发电机那样通过自身旋转动能的变化来直接响应频率变化,大规模风电并网容易造成系统惯性的下降,从而影响系统频率稳定性^[9]。其次,风电具有较强的波动性,会给系统的有功备用带来巨大的压力。早期研究一般通过增加备用容量来缓解系统的有功平衡,保证系统的稳定运行,但随着风电在系统中渗透率不断攀升,该方式在经济性与可行性方面均难以承受^[10]。此外,大规模风电场一般距离主网较远,外部电网可能无法为风力发电场提供有效的电压支撑^[11],风速的波动性容易导致风电场并网点电压波动甚至造成整个场站脱网^[12]。

为减少风电不利特性对电网的影响,国内外学者不断挖掘风机自身的调节潜力,并通过风电场内的风机协调实现整个场站的优化运行与对电网的主动支撑。在风机层面,机组变流器的灵活调制特性被充分发挥,通过模拟同步发电机特性实现对电网频率的惯性响应,并利用机组剩余容量调整无功的输出功率;此外,机组叶片角度和转速调整可实现风能捕获效率与尾流效应的改变^[13]。风电场层面的主动控制能力也被充分发掘,并受到了多项风电并网接入导则的严格要求,风电场不仅需要保证电能生产,通过减少不同风机之间的尾流影响以实现整个场站的最大功率输出,还需要为电网提供频率和电压支撑;此外,为缓解风速波动性的影响,风电场需对其整体出力进行平滑,以减少对电网的冲击^[14]。

风电场的规模正在向大型化发展,大型风电场可能包含数十甚至上百台风机。随着风电场规模的不断扩大,协调场内风机、保障风电场的安全经济性并使其参与电网优质运行面临重大挑战^[15]。首先,大规模风电场内部不同位置的风速存在显著差异,尾流效应在规模较大的风电场中影响范围更广,需要采用更精细的控制策略来优化各风机的运行,以减少能量损失^[16]。风速波动一般在秒级尺度,随着风机数量的增多,如何快速实现大规模风电集群的功率协调,以适应快速波动、维持风电场

自身与电网稳定运行,是亟待解决的难题。为此,国内外学者对大规模风电集群协调控制问题展开大量研究,极大发挥了风电场对电网的支撑作用^[17]。

本文从协调控制类型与原理、控制框架、实现算法角度出发,总结了近年来国内外的风电集群协调控制技术。此外,针对风电场协调控制面临的问题,并结合当前发展的人工智能技术、大语言模型、数学优化理论,对未来风电集群协调控制的研究方向进行展望。

1 风电控制的基本原理

1.1 频率控制

风电参与电网频率控制是指通过调整风电机组的输出功率,响应电网频率的变化。风电参与电网频率控制通常分为基于风机转子动能的控制和功率备用控制2种方式。基于风机转子动能的控制通过在风电机组的有功功率控制系统中引入与系统频率相关的控制环节,实现风机转子中蕴含的旋转动能与电磁功率的相互转换;功率备用控制通过超速或变桨减载运行,预留功率备用以支持电力系统调频。

转子动能控制包括短时功率超发控制、虚拟惯性控制、下垂控制以及综合惯性控制。短时功率超发控制的原理如图1所示,其在频率下降时增加额外有功信号,利用风机旋转动能短时提升输出功率;当转速下降到一定程度时,降低输出功率以恢复转速^[18]。

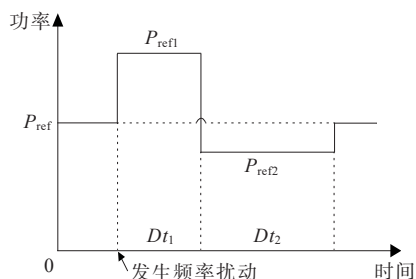


图1 短时功率超发控制原理

Figure 1 Control principle of short-time power increase

虚拟惯性控制原理如图2中点线方框所示。该方法通过在风机有功控制部分引入与频率变化率相关的控制环节,使风机出力响应频率变化。文献[19]首次定义了虚拟惯性的概念,通过虚拟控制实现风机转子动能释放以支持系统频率调整。文献[20]在虚拟惯性控制基础上增加转速保护模块,

防止转速越限,抑制频率二次跌落。下垂控制的原理如图 2 中短线方框所示。该方法根据频率偏差调节风机有功出力。文献[21]提出差异化整定下垂控制参数的方法,以提升风电机组的调频性能。文献[22]结合变下垂控制与减载控制策略,有效协调了风电机组在不同风速下参与系统调频的能力。

虚拟惯性控制在频率变化初期起主要作用,而下垂控制在频率偏差逐渐增大时发挥风机的调频作用。综合惯性控制结合了两者的优点,其原理如图 2 中粗线方框所示^[23]。

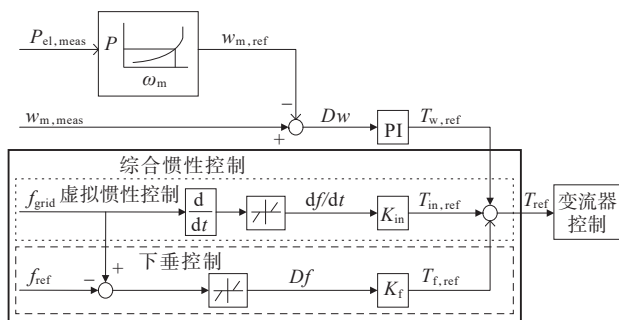


图 2 虚拟惯性控制、下垂控制与综合惯性控制原理

Figure 2 Principle of virtual inertial control, droop control, and integrated inertial control

以上 4 种控制方法本质上都是利用风机转子中蕴含的动能去弥补风机的频率响应能力。然而,风机转子中的动能有限,在恢复转速过程中,容易造成频率的二次跌落。为减轻频率二次跌落,通常对风机附加调频策略进行优化,或根据转速恢复控制策略进行改进。

在附加调频策略优化方面,文献[24-25]考虑风电出力约束,提出基于综合惯性控制的变参数调频策略;文献[26]以提升频率一次跌落最低点为目标,整定风机惯量下垂系数;文献[27]提出考虑风速和频率变化的自适应虚拟惯量变参数调频策略;文献[28]提出基于粒子群算法的下垂系数整定方法,能够调整不同风速区中风机的调频能力。文献[29]指出增大下垂系数虽然可以减缓频率一次跌落,但会带来较严重的频率二次跌落问题。文献[30]评估了频率一次、二次跌落最低点等频率特征,通过统一结构下的模型整定风电调频参数。

在风机转速恢复策略优化方面,文献[31]提出频率支撑阶段输出功率的恢复策略,提升了频率二次跌落最低点;文献[32]提出基于综合惯性控制和短时过载控制的改进控制器;文献[33]提出一种基于扭矩限制的频率支撑改进方法,加入低通滤波器

以消除频率的高频噪声干扰;文献[34]通过分段函数和 Logistic 函数设计风电机组转速恢复曲线,提出一种柔性频率响应策略;文献[35]考虑风机释放转子动能的极限,提出分组控制与有序转速恢复的调频策略。

功率备用控制方法包括变桨控制、超速控制、变桨与超速协调控制。变桨控制通过调整桨距角实现风机减载和调频,但响应速度受限于机械惯性,适用于中高速风况。文献[36]结合减载控制与下垂控制,提出实时桨距角控制方法,提高风机对频率变化的实时响应能力。超速控制通过增加风机转速使工作点沿功率—转速曲线变化,实现减载运行,从而在频率下降时通过降低转速增大输出功率,抑制系统频率降低。文献[37]结合超速控制与转子动能控制,有效提升了系统的惯性响应能力和一次调频能力。文献[38-39]提出一种结合超速控制与变桨控制的协调控制方法,根据风速灵活切换策略,以发挥各自优势并提升风电机组调频能力。

综上所述,转子动能控制依赖风机内部旋转动能的释放,其能够在短时间内快速响应频率波动,具有较高的灵活性和响应速度。然而,这类方法的局限在于动能有限,恢复过程中容易引发二次频率跌落。为此,研究人员提出了多种调频策略优化方案,如自适应虚拟惯量控制和下垂系数优化,以减缓频率跌落并提高系统的频率稳定性。

相比之下,功率备用控制通过变桨控制和超速控制等方法,为风机调频提供了更多的功率支持,特别是在风速较高时能够有效预留调频备用。然而,该类方法受制于机械惯性的影响,响应速度较慢。通过与动能控制的协调使用,可以弥补各自的不足,进一步增强风机的频率响应能力。

1.2 功率平滑控制

由于风电具有间歇性和随机性,受风速波动的影响较大,导致其输出功率容易出现大幅度的波动。为了应对这种波动性,一般采用惯性控制、变桨控制、储能系统等手段对风电功率进行平滑。功率平滑可提高风电的可预测性和可靠性,减少对电网的冲击,增强风电场的并网能力,从而提升电力系统的稳定性和安全性^[40]。

风电功率平滑中的惯性控制和变桨控制与频率调节中的方法类似。文献[41]提出了一种基于能量平衡和转子惯性的平滑功率算法,用于平滑风电机组的输出功率。文献[42-43]利用双馈感应发电机的转子惯性和转速控制技术,结合脉冲宽度调

制,实现风电机组输出功率的平滑。文献[44]提出了一种使用比例-积分控制的桨距角调节方法,以此实现风机功率平滑。

储能技术是实现功率平滑的关键手段^[45]。当风力发电过剩时,储能系统吸收多余电能;而当电力需求上升或风力发电不足时,则释放储存的电能,以此补偿输出波动。电池储能是风电功率平滑中的主要选择^[46]。文献[47-49]提出了基于模糊逻辑的风电功率平滑控制方法,通过调节电池储能的充放电来减少风电和光伏系统的输出功率波动。此外,超级电容器、超导磁储能、飞轮储能等储能系统也被用于风电功率平滑^[23,50-52]。

风电功率平滑技术的应用显著提升了风电的可预测性和电网适应性。惯性控制和变桨控制能够在短时间内平缓输出波动,但其调节能力有限,难以应对长时间或较大功率波动。储能系统则作为重要的辅助手段,能够有效吸收和释放电能,增强风电场在不同风况下的稳定输出能力。未来的研究应聚焦于多种控制手段的协同优化,尤其是在大规模储能与先进控制算法的结合下,进一步提升风电场的稳定性、可靠性及并网能力,确保电力系统的长期稳定运行。

1.3 电压控制

风机通常配备有变流器,能够灵活调节无功功率的注入或吸收,以响应电网电压的变化。然而,在实际运行中,风机有功输出直接关系到电网的平衡与稳定,因此一般优先执行有功调节或参与电网频率支撑,在有功调节完成或有余力时才进行无功调节。在电压控制方面,现有研究更多地侧重于如何量化与优化风机的无功调节潜力,以实现电网电压的有效支撑和电力系统整体运行的稳定性。这种研究有助于提高风电对电压波动的响应能力,增强其对电力系统的适应性和可靠性。

风力发电系统的无功调节能力与其设计类型紧密相关。永磁直驱风力发电机通过调节变流器的直流侧电压来控制发电机的电磁功率,从而稳定直流侧电压。双馈风机定子和网侧变换器均能够产生无功,文献[53-55]对双馈风机的功率特性进行了深入分析,其定子的无功功率极限值可表示为

$$\begin{cases} Q_{s,\max} = -\frac{3U_s^2}{X_s} + \sqrt{\left(\frac{3U_s X_m I_m}{X_s}\right)^2 - P_s^2} \\ Q_{s,\min} = -\frac{3U_s^2}{X_s} - \sqrt{\left(\frac{3U_s X_m I_m}{X_s}\right)^2 - P_s^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $Q_{s,\max}$ 、 $Q_{s,\min}$ 分别为定子无功功率的上限和下限; I_m 为励磁电流; U_s 为定子电压; X_s 、 X_m 分别为定子和励磁电抗; P_s 为定子的功率。

双馈风机网侧变换器的无功功率的极限为

$$\begin{cases} Q_{g,\max} = \sqrt{T_{g,\max}^2 - (sP_s)^2} \\ Q_{g,\min} = -\sqrt{T_{g,\max}^2 - (sP_s)^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中, s 为转差率; $Q_{g,\max}$ 、 $Q_{g,\min}$ 分别为网侧变换器无功功率的上限和下限; $T_{g,\max}$ 为网侧变换器的额定容量。

结合定子和网侧变换器的无功功率限制,双馈风机的无功功率的极限为

$$\begin{cases} Q_{\max} = \\ -\frac{3U_s^2}{X_s} + \sqrt{\left(\frac{3U_s X_m I_m}{X_s}\right)^2 - P_s^2} + \sqrt{T_{g,\max}^2 - (sP_s)^2} \\ Q_{\min} = \\ -\frac{3U_s^2}{X_s} - \sqrt{\left(\frac{3U_s X_m I_m}{X_s}\right)^2 - P_s^2} - \sqrt{T_{g,\max}^2 - (sP_s)^2} \end{cases} \quad (3)$$

结合以上推导,文献[56]通过选择最优的励磁电流组合,实现转子和定子电流的平衡分配,增强风机无功发电能力。文献[57]提出了一种风机内部无功分配策略,当系统所需无功功率不超过定子无功极限时,由定子提供无功,否则网侧变换器补充剩余无功。文献[58]同样关注风机内部无功分配,提出由定子优先提供无功,不足时网侧变换器和定子采用等比值分配方式共同承担。文献[59]总结了3种无功分配策略,并提出基于无功正负值的分配方法,即正无功由网侧变换器提供,负无功由定子提供。

通过优化无功功率的分配与调节,风力发电系统能够有效支撑电网电压的稳定性。永磁直驱风机和双馈风机各有优势,尤其是双馈风机通过定子与网侧变换器的协同作用,在无功功率的灵活调节上表现突出。现有研究多集中于提高无功分配策略的效率和可靠性,有效提升了风电场对电压波动的响应能力。未来的研究应着眼于更加智能化、动态化的无功调节方式,以进一步提高风电在电力系统中的电压支撑能力。

1.4 最大功率输出控制

尾流效应是指风轮机旋转时在其后方留下的低速气流区域影响后方风轮机的风速和功率产出,导致发电效率降低的现象,对风电场功率输出有显

著的负面影响,如图3所示。尾流效应能够使单个位于下游的风机功率降低至原来的40%,并导致整个风电场的功率产出减少54%^[60],还可能造成风电场20%到30%年度收益的损失。因此,最大功率输出控制通过适当的控制和优化策略,改善风电场内的尾流效应,从而提高风电场的整体输出功率。

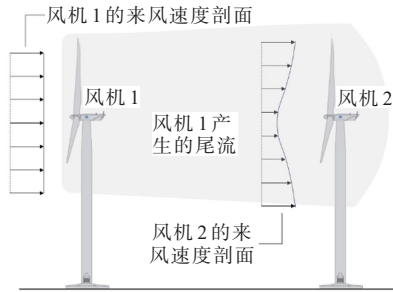


图3 两风机之间的空气动力学耦合现象

Figure 3 Aerodynamic coupling phenomena between two fans

为减少尾流效应导致的损失,可通过优化风电场内风机布局提高电能产量^[61-62],但该方法会受到电气连接成本、当地地形等条件的约束^[63]。此外,可通过桨距角调节、降低机械负荷等控制方式优化整个风电场的性能,减少尾流效应带来的经济损失^[64]。常用的控制方法包括轴向感应控制、基于偏航的尾流定向、风机重新定位及通过单独的叶片俯仰控制和机舱倾斜来实现尾流重定向。轴向感应控制也称为功率降低,通过减少上游风机的轴向感应因子来降低其功率输出,减少了尾流中的动量亏损,使得下游风机能够获得更高的风速^[65]。基于偏航的尾流重定向利用风轮机的偏航操作来改变尾流的下游路径,减少下游风机的尾流干扰,提升其风能捕获效率^[66]。风机重新定位技术通过动态改变海上风电场中浮动风机的位置,有效降低尾流的相互干扰,增加风电场的整体功率输出^[67]。叶片俯仰控制通过调整风机单个叶片的俯仰角度来改变尾流的分布,实现尾流的重定向^[68]。机舱倾斜控制通过机舱的倾斜来调整尾流的方向,在理论上能够显著提高风电场的功率输出^[69]。然而,由于现代风机设计普遍不包含机舱倾斜的功能,这种控制方法的实用性受到了一定限制。

尾流效应对风电场的发电效率具有显著负面影响。通过调整风机布局、桨距角控制以及偏航和叶片俯仰控制等方法,能够有效减轻尾流效应对下游风机的干扰,提升风能利用率。目前,各种控制方法在实际应用中面临成本、技术实现等多重限

制,尤其是对于复杂的风电场地形和浮动风机场景。未来的研究方向应结合先进的优化算法和实时监测技术,实现风电场功率输出的动态优化,进一步提高风电场的整体效率和经济收益。

2 风电集群协调控制框架

2.1 分散式控制框架

分散式控制框架如图4所示。在该控制中,每个控制器仅基于自身信息做出决策。分散式控制有效提升了系统的模块化和可扩展性,同时增强了容错性与对不确定性的适应程度。此外,分散式控制能有效应对大规模系统的复杂性和动态变化,实现快速响应,因此适用于如风电等机组分布空间广泛且运行环境多变的场景。

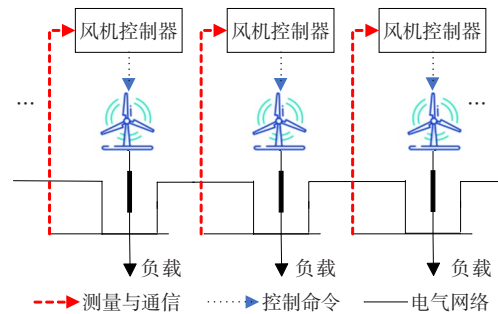


图4 分散式控制框架

Figure 4 Decentralized control framework

分散式控制的局限性在于:一方面,由于每个控制器仅基于自身信息做出决策,信息的局部性可能导致全局最优性难以实现,从而影响系统的整体性能;另一方面,分散式控制器之间的协调和同步可能存在挑战,尤其是在需要快速响应和高精度控制的场景。

文献[70-71]提出了适用于风电场的变下垂电压控制方法,该方法仅依赖风机自身信息进行控制,不存在与其他风机或风电场控制中心的信息交互,与传统固定增益下垂控制相比,该方法在减轻电压波动和提高电压调节能力方面更为有效。

2.2 集中式控制框架

集中式控制框架如图5所示。该控制方法通过中央处理单元对系统的所有进行协调控制和统筹管理。在风力发电场的集群协调控制研究中,集中式控制方法通过风电场控制中心对全部风机进行集中监控和数据分析,从而评估当前的功率产出与未来调整需求,保障风电场整体安全经济运行。

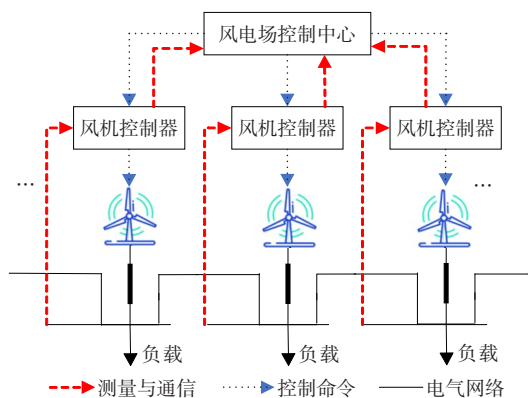


图5 集中式控制框架

Figure 5 Centralized control framework

尽管集中式控制在风电集群协调控制中具有全局决策的优势,但也存在一些局限性。首先,集中式控制高度依赖于中央控制单元的性能和可靠性,一旦中央控制单元发生故障,整个系统的运行可能受到严重影响。其次,集中式控制对通信网络的依赖较强,需要实时获取和处理大量数据,因此对通信带宽和数据处理能力要求较高。在大规模风电场中,通信延迟和数据丢失可能导致控制策略滞后,影响系统响应速度和控制精度。此外,集中式控制的决策过程较为复杂,可能需要耗费大量时间进行数据分析和优化计算,难以应对快速变化的运行环境和突发事件。在面对多变的风力资源和复杂的运行条件时,集中式控制可能难以实现及时调整,导致系统的灵活性和适应性不足。

文献[71]提出了一种风电集群集中式无功功率调度方法,旨在延长上游风力涡轮机电力转换器的寿命。文献[72]提出了基于集中式模型预测控制的协调电压控制策略,通过优化问题表征控制目标和操作约束,为大规模风电场的集中控制提供了有效的解决方案。文献[73]采用了一种基于分群协调的风电协调控制方法,通过将运行状态相近的风机进行整合,减少了优化变量的数目,显著降低了计算负担和优化问题的复杂性。文献[74]采用了粒子群优化算法,提出了一种集中式风电场的无功功率调度方法。

2.3 分布式控制框架

分布式控制框架如图6所示。在该框架中,每个控制器依据自身及邻近信息作出决策,共同实现系统级优化控制目标。由于不依赖于控制中心,分布式控制可有效提高系统的可扩展性,避免了中心化系统的单点故障问题。此外,分布式控制能有效应对大规模系统的复杂性和动态变化,实现快速

响应。

文献[75]通过优化风机无功功率利用率,提出了一种基于ADMM的风电集群分布式电压控制方法。文献[76]提出了一种风电场无功功率容量利用率最大化控制方法,该方法采用分布式控制方案,能够处理不确定性和非线性问题,有效提高了算法的鲁棒性。文献[77]将风机分为几个组,采用分布式一致性方法进行协调,以实现风电场无功功率管控。文献[78]将最优无功功率控制问题转化为最小化电压偏差和减缓风机无功输出波动的问题,并使用分布式ADMM对该问题进行求解。

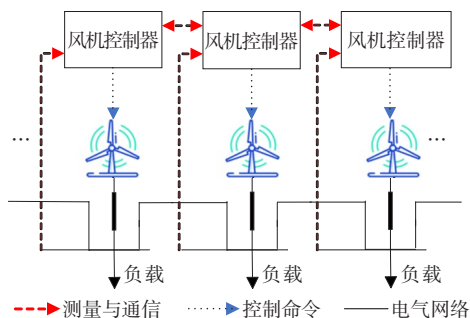


图6 分布式控制框架

Figure 6 Distributed control framework

2.4 性能对比及其他新型控制框架

从文2.1~2.3的分析可以看出,不同控制框架均已应用于风电集群协调控制并在不同方面取得了优异的性能。表1展示了分散式、集中式和分布式控制框架的性能对比。

表1 分散式、集中式和分布式控制框架的性能对比

Table 1 Performance of decentralized, centralized, and distributed control frameworks

检测框架	响应速度	控制准确性	经济性能	计算复杂性	通信负担	单点故障稳定性	可扩展性
集中式	差	优	中	优	优	差	中
分散式	优	差	差	差	差	优	优
分布式	中	良	良	差	良	中	中

为充分整合不同控制框架的优势,国内外学者提出了多种新型控制框架。文献[79]提出了一种基于ADMM的风电场双层分布式无功优化方法,上层求解以网损最小化为目标的风电场无功指令,下层对上层指令进行再分配,该方法在分层的基础上不需要一致性协议来解决优化问题。文献[80]提出了一种集中-分散混合式框架的风电场有功功率调度策略,上层采用MPC策略将风电场级的有功功率控制设定点分配到各个预先划分的风电集

群,下层采用传统的比例分配策略分配集群内风机的有功功率,该分层策略有效减少了优化问题规模,消除了动态跟踪误差,增强了动态调度的稳定性和鲁棒性。文献[81]提出了一种两阶段电压控制方法,用于分配储能系统和风电场功率,以在不需要任何集中计算和通信链路的情况下实现接近全局最优的性能。

3 风电集群协调控制实现算法

3.1 模糊算法

模糊算法,也称为模糊逻辑控制(fuzzy logic control, FLC),通过引入隶属度的概念,模糊算法扩展了传统集合和逻辑的边界,使得算法能够处理和推理不精确、不确定的信息。由于模糊算法的这种特性,它在风电集群协调控制中得到了广泛应用。

文献[82]提出了一种基于改进模糊层次分析法的风电场有功功率分配方法。文献[83]提出了一种考虑模糊多目标优化的风电场无功电压分区控制方法。文献[84-85]采用模糊控制技术实现了风电功率的平滑控制。文献[86]设计了模糊改进线性自抗扰控制器,并将其应用于永磁直驱风电系统的最大功率点跟踪。文献[87]提出了一种基于模糊控制的风电机变系数综合惯性控制策略。文献[88]利用模糊控制实现了风电机转子动能控制策略中的二阶滤波器参数的在线调整。文献[89]采用模糊控制实现永磁直驱风电系统的变桨增益控制。文献[90]提出了基于模糊控制的储能电站无功控制策略,在风电场电压波动时,调节储能电站的无功输出以支撑母线电压。文献[91]利用模糊控制设计和实现了风电场飞轮储能系统的控制策略。文献[92]利用模糊控制开发了一种振动抑制控制策略,用于应对风电机组在复杂工况下的振动问题。

3.2 一致性算法

一致性控制是指在多智能体系统中,依据算法进行信息交换并调节状态变量,逐步使全局的状态变量趋近并收敛于同一个稳定值。实现这一过程的算法称为一致性算法。对于由 n 个智能体构成的多智能体系统,状态变量 $x=[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$,其中 x_i 表示第 i 个节点的状态变量,则连续一致性算法可表示为

$$\dot{x}_i = - \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_i - x_j) \quad (4)$$

在一致性算法中,所有的节点依照相同的方法重复迭代计算,使得全局的状态变量收敛于共同

值,从而达成一致。连续一致性算法基本控制如图7所示。

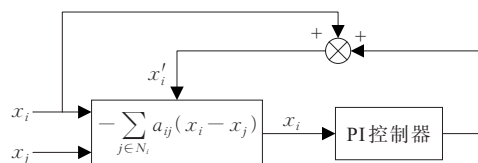


图7 连续一致性算法基本控制

Figure 7 Basic control block diagram of continuous consistency algorithm

一致性算法在风电集群协调控制中有着广泛的应用。文献[93]提出了一种新的分布式控制策略,通过比例一致性算法,对2种类型风机的有功功率输出进行协同优化,解决了传统分配策略的不足。文献[77]通过一致性算法对风机进行分组协调控制,并通过仿真和实时硬件在环仿真验证了所提方法的有效性和优越性。文献[94]采用一致性算法实现了风电场内各风机之间的分布式通信和协调。文献[95-96]均使用分布式的极值搜索控制技术,并结合动态平均一致性估计器,实现风电场功率输出最大化。文献[97]提出了一种非中心化协调优化策略,利用一致性算法确定风机的通信分组,实现了海上风电场发电量的最大化。文献[98]提出了一种双层分散式功率控制方案,其中上层采用一致性算法,在多个风电场之间实现功率共享。文献[75]提出了基于交替方向乘子法的一致性算法,实现了大规模风电场群的分布式电压控制。

风储协同运行在应对风电波动、改善电力系统运行和提高经济效益方面具有重要作用^[99],成为当前研究的热点之一。已有学者将一致性算法用于风电场与储能系统的协调控制。文献[100]利用一致性算法解决了大规模风电场和绝热压缩空气储能站在频率调节中的协调控制问题。文献[101]针对配备储能的风电场,提出了一种考虑通信延迟的分布式一致性控制方法,以维持风电系统的稳定功率输出。文献[102]提出了一种基于一致性算法的分布式控制方法,用于风电场中储能的实时控制。文献[103]提出了一种基于一致性协议的分布式风电-储能联合系统协同控制策略,实现了不同储能设备之间的实时功率共享。

3.3 模型预测控制

模型预测控制(model predictive control, MPC)是一种先进的控制策略,它通过建立系统的动态模型来预测未来的系统行为,并据此优化控制策略。

与传统最优控制的不同之处在于, MPC 仅考虑未来几个时间步而非在整个时间域上求解优化问题。MPC 的结构框图如图 8 所示。

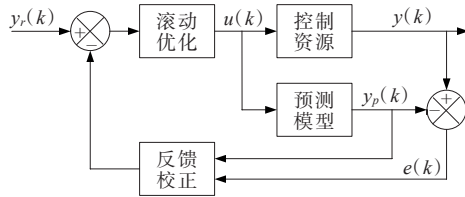


图 8 MPC 的结构框图

Figure 8 Block diagram of MPC structure

目前根据 MPC 控制结构的不同, 可以将其分为以下 3 种形式: 集中式 MPC (centralized MPC, CMPC), 分散式 MPC (decentralized MPC, DEMPC) 和分布式 MPC (distributed MPC, DMPC)。3 种 MPC 控制结构的对比如图 9 所示^[104]。集中式 MPC 结构仅配备了一个 MPC 控制器, 该控制器能够收集所有子系统的状态量信息并进行优化计算以获得控制量; 分散式 MPC 给每一个子系统均配备一个 MPC 控制器, 各子系统通过求解自身的代价函数获得最优的控制量, 并不与其他子系统通信; 分布式 MPC 与分散式 MPC 的结构基本相同, 唯一的区别是分布式 MPC 中各子系统 MPC 控制器在决策时需要相互交换控制量信息。

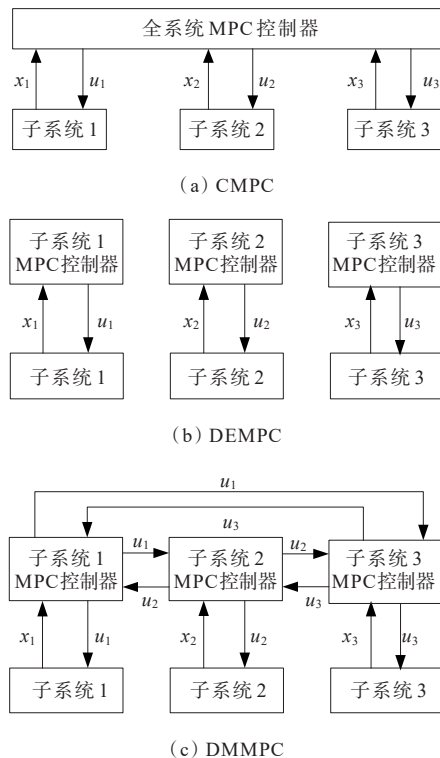


图 9 3 种 MPC 控制结构对比

Figure 9 Comparison of three MPC control structures

模型预测控制已被广泛应用于风电集群协调控制。文献[77]提出了一种基于 MPC 的大规模海上风电集群无功功率协调和公共耦合点电压调节方法。文献[105]探讨了基于 MPC 的风电场电压协调控制策略, 确保母线的电压维持在可行范围内, 同时最大化无功储备。文献[106]提出了一种基于 MPC 的海上风电场电压控制策略, 通过协调风力发电机和风电场侧的电压源换流器, 维持电压稳定并减少系统功率损耗。文献[80]提出了一种基于 MPC 的分层优化策略, 通过减少动态跟踪误差, 显著提升了风电场有功功率调度的鲁棒性。文献[107]将 MPC 控制器与风电预测/储能系统相结合, 不仅平滑了风电功率输出, 还优化了储能系统的使用效率。在风力机功率设定点分配方面, 文献[98]提出了一种风电场双层分散式有功和无功控制方法, 其中下层采用 MPC, 实现了对风机功率的精确调节。

近年来, 非线性模型预测控制 (nonlinear model predictive control, NMPC) 因其能够处理风机的非线性动态约束, 已被应用于风电集群协调控制。文献[108]提出了一种去中心化的 MPC 策略, 有效降低了尾流效应对功率损失的影响。文献[109]提出了一种分层非线性 MPC 方法, 将优化问题分解为耦合子问题和解耦子问题, 与集中式 MPC 相比, 所提方法可显著减轻集中控制器的计算负担。文献[110]提出了一种用于风电场配备储能系统的分层 MPC (Hierarchical MPC, HMPC) 策略, 用于高风电渗透率电力系统中风储系统在黑启动期间的频率调节。文献[111]提出了一种新型的经济非线性模型预测控制 (economic, nonlinear model predictive control, ENMPC) 策略, 可有效提高风电场能量捕获效率。文献[112]提出了一种优化协调下垂控制和自适应 MPC (adaptive MPC, AMPC) 的方法, 以增强大规模风电场在电网电压骤升事件中的故障穿越能力和事件后恢复性能。

3.4 交替方向乘法

交替向量乘法 (alternating direction method of multipliers, ADMM) 是一种用于解决分布式凸优化问题的求解算法, 其对增广拉格朗日对偶法进行改进, 在收敛性方面表现优异。ADMM 首先由 Gabay 等学者于 1976 年提出, 并自 2011 年起被广泛用于大型分布式系统优化^[113]。ADMM 主要用于解

决如下优化问题:

$$\begin{cases} \min_{x,u} f(x,u) = \min_{x,u} f_1(x) + f_2(u) \\ \text{s.t. } Ax + Bu = C \end{cases} \quad (5)$$

式中, f 为原始优化目标函数,为2个独立变量 x 和 u 的二元凸函数; f_1, f_2 分别为关于 x 和 u 的独立目标函数; A, B, C 为独立变量 x 和 u 遵守的约束等式系数。

为求解上述优化问题,构建拉格朗日函数,即

$$L(x, u, \lambda) = f_1(x) + f_2(u) + \lambda^T (Ax + Bu - C) + 0.5\rho \|Ax + Bu - C\|_2^2 \quad (6)$$

式中, λ 为等式约束条件对应的拉格朗日乘子; ρ 为等式约束条件对应的罚函数项因子

优化问题以迭代方式进行求解,优化变量 x 和 u 以及拉格朗日乘子 λ 的迭代规则为

$$\begin{cases} x^{k+1} = \arg \min_x L(x, u^k, \lambda^k) \\ u^{k+1} = \arg \min_u L(x^{k+1}, u, \lambda^k) \\ \lambda^{k+1} = \lambda^k + \rho(Ax^{k+1} + Bu^{k+1} - C) \end{cases} \quad (7)$$

ADMM算法在分布式问题上提供了一种高效、鲁棒且灵活的解决方案,尤其适合于大规模和复杂风电系统中的优化和控制问题。文献[75,77]提出了基于ADMM的高压直流送出风电场的分布式协调电压控制方案。文献[114]提出了一种基于ADMM的风电场分布式最优无功功率控制方案,用于最小化的风电场的总损失。文献[79]提出了一个基于ADMM的风电场两阶段分布式无功功率优化方法,实现了风电场的最优无功功率调度。文献[115]提出了一种基于ADMM的风电场分布式最优有功和无功功率控制策略,有效提高了系统的稳定性,并降低了通信成本。文献[116]提出了一种分层MPC策略,并以ADMM为分层解决方法,改善了风电场的高电压穿越能力和故障后电压恢复能力。

3.5 人工智能算法

人工智能算法通过模拟人类智能行为,能够执行如学习、推理、自我修正、感知、理解语言和识别模式等任务^[117]。目前,深度学习、强化学习、深度强化学习以及各种改进算法已被成功用于风电集群控制^[118]。

深度学习以人工神经网络为架构,通过多层的网络结构和非线性变换,深度学习将低层特征进行组合并形成抽象的、易于区分的高层表示,以发现数据的分布式特征。文献[119]采用基于径向基函

数的神经网络设计风机协调控制策略,以优化动态无功支撑并提高风电场低电压穿越性能。文献[120]提出了一种基于神经网络的风电集群预测控制方法。文献[121]提出了一种基于混合深度学习模型的风电功率预测方法,并研究了其在电力系统一次调频中的应用。

强化学习以试错的机制与环境进行交互,通过最大化累积奖赏来学习最优策略,在此过程中,智能体在当前状态根据策略选择动作,环境执行动作并转移到下一状态,同时向智能体反馈奖励。文献[122]提出了一种基于强化学习的风电场中的储能一次调频自适应控制策略。文献[123]针对风电运行的不确定环境,提出一种基于多智能体Q学习算法的海上风电系统电压调整与节能降损优化方法。

强化学习一般将知识存储于二维矩阵中,主要用于处理维度较低的离散性优化问题,若优化问题中存在连续属性变量,强化学习往往需要进行离散化处理,因而不利于提升求解精度;此外,当优化问题维度较高时,强化学习需要消耗大量的存储空间,难以实现算法收敛或求得最优解。针对上述问题,深度-强化学习采用深度学习网络拟合强化学习中的价值函数和策略函数,无需构建状态-动作之间彼此对应的知识矩阵,与强化学习相比有效降低了算法的复杂度、并提高了处理连续性与高维度优化问题的能力。

在基于深度强化学习的风电集群控制研究中,文献[124]将深度强化学习方法用于最大化风电场总发电量。文献[125]提出了一种基于多智能体深度强化学习算法的风电集群无功电压分层优化控制策略。文献[126]利用多智能体深度强化学习解决风电场频率控制问题。文献[127]提出了一种基于多智能体深度强化学习算法的最大化风力发电场总功率输出方案。近年来,各类改进深度强化学习算法被用于风电集群控制。文献[128]提出了一种无评价网络的深度强化学习算法,并结合风电场内机群划分,提出了一种风电场低电压穿越有功/无功功率联合控制策略。文献[129]充分利用深度确定性策略梯度算法、深度Q网络与多智能体算法的优势,提出了一种基于分层分布式混合深度强化学习的大规模风电场惯性控制方法。

3.6 群智能算法

群智能算法是一类模拟自然界中生物群体行为的算法,它们在解决优化问题时表现出了优秀的性能。常见的群智能算法包括粒子群算法、蚁群算法、遗传算法、麻雀搜索算法等。群智能算法在风电集群协调控制方面有着广泛的应用前景,能够有效提高风电系统的运行效率和电网的稳定性。

文献[130]采用变惯性权重粒子群优化算法求解无功功率,实现了对海上风电场各无功源输出的精准控制。文献[131]使用了一种改进的粒子群优化算法来解决风电场虚拟惯量的优化分配问题。文献[132]利用粒子群智能算法和多目标粒子群智能算法解决了风储电站主动参与电网调压控制的问题。文献[133]提出了一种改进型混合遗传算法(genetic algorithm, GA),并用于优化混合储能系统的输出功率。文献[134]使用改进的遗传粒子群融合算法求解了考虑系统备用约束的风电场功率优化控制模型。文献[135]提出了一种麻雀搜索算法并用于风电机组独立变桨控制,提高了风电机组在风况变化时的控制性能和稳定性。

3.7 方法对比

在风电集群协调控制的应用场景中,不同的算法具有各自的优点和适用场景。为了提升风电场的整体性能,优化控制策略的选择应基于风电场的规模、环境复杂度以及控制目标。

模糊算法适用于处理风电系统中存在的不确定性和模糊性信息,特别是风电功率调度。建议在风速变化较大或控制精度要求较高的场景下使用模糊控制,以增强系统的鲁棒性。例如,风机的有功功率分配、无功电压调节以及转子动能控制中的在线参数调整,均可以通过模糊算法提升系统的灵活性与响应速度。

一致性算法非常适合用于大规模风电集群的分布式协调控制。对于多机组协同优化和分布式电压控制等任务,一致性算法可以确保各风机或储能设备之间通过通信实现状态的一致性,从而提高集群的整体输出能力和系统稳定性。建议在大型风电场中使用一致性算法进行有功和无功功率的分布式优化,尤其是在海上风电场或复杂地形下风电集群的多机组协调控制中应用。

MPC通过实时预测和滚动优化,适应风电系统的动态变化,尤其在应对尾流效应、风电功率调度

和无功优化控制中表现出色。集中式MPC适合小规模风电场的集成控制,而分布式MPC则适合大规模、分散的风电场。建议在风电集群的有功、无功功率精确调度、尾流效应缓解、储能系统优化管理等方面使用MPC策略,以提升控制的精度和系统的鲁棒性。

ADMM可以用于分布式电压控制、功率优化以及风储协同运行等任务。例如,在大规模风电场的有功和无功功率优化调度中,ADMM能够在各子系统间高效分配功率,从而实现全局最优的控制效果。此外,在应对突发故障或电压波动时,ADMM通过分布式优化算法协同多个风机或储能系统,确保系统的电压稳定性和故障后的快速恢复。

人工智能算法适用于复杂且非线性的风电控制问题,能够通过自学习能力适应风电系统的多变环境。建议将人工智能算法应用于风电功率预测、尾流效应优化以及动态控制策略的自适应调整。通过与其他控制方法结合,人工智能算法可以进一步提高风电集群的智能化程度和控制精度。

群智能算法适合用于风电系统的全局优化,特别是在功率调度、储能管理和风电机组布局优化等复杂问题上具有显著优势。建议在风电场的长周期优化任务中使用群智能算法,其强大的搜索和优化能力可以应对复杂的非线性问题,适用于大规模风电场群的全局控制优化。

4 结语

本文针对风电集群协调控制技术,综述了风电控制的基本原理,包括频率控制、功率平滑、电压控制和最大功率输出控制;探讨了分散式、集中式和分布式等风电集群协调控制框架特点;详细介绍了实现风电集群协调控制的多种算法,包括模糊算法、一致性算法、模型预测控制、交替方向乘子法和人工智能算法等。在未来,风电集群协调控制将更趋向智能化和高效化,利用大数据和人工智能技术,不断提升风电场的运行效率和电网的稳定性。未来研究方向包括但不限于以下2个方面。

1) 多类型控制的协调。

目前的风电场控制研究多集中于单一控制场景,如频率控制或电压控制,旨在优化某一特定功能。然而,在实际应用中,风电机组的容量有限,各

种控制任务之间存在着复杂的相互制约关系。例如,在进行频率控制时,往往需要牺牲一定的功率输出;而在进行功率平滑控制时,可能会对电压稳定性产生不利影响。这种各自为政的控制策略在风电集群大规模接入电网的背景下,已经逐渐暴露出其局限性,难以全面满足电力系统稳定性和风电利用效率的双重要求。因此,未来的研究应当重点关注如何实现多种控制场景的联合优化,即在有限的风电机组容量下,协调处理频率控制、功率平滑、电压控制和最大功率输出等多项任务,从而显著提升风电集群的综合控制性能和电力系统的稳定性。

2) 大语言模型的应用。

目前的风电场协调控制技术依赖于预定义的规则和传统的控制算法,这些方法虽然在一定程度上能够满足风电集群的控制需求,但在处理复杂、多变的环境时存在局限性。人工智能方法虽然不依赖于风电场模型,但在面对海量的实时数据和风电场复杂的运行状态时,仍然可能难以实时应对各种突发情况。此外,现有方法的开发和调试过程通常需要大量的专家经验和反复试验,这不仅耗时费力,还可能导致系统反应滞后,无法充分发挥风电集群的潜在能力。在此背景下,大语言模型正在逐渐显现出其在风电场协调控制中的应用潜力。大语言模型具有强大的数据处理和分析能力,可以从大量的历史数据和实时输入中自动学习和提取有用的模式和规律,辅助优化风电场的控制策略。未来的研究应当探索如何将大语言模型应用于风电场的协调控制中,利用其在自然语言处理和复杂系统分析方面的优势,开发出更加智能化、自适应的控制算法,增强风电场在应对复杂运行工况和突发事件时的反应速度和稳定性。

参考文献:

- [1] 陈汝斯,李大虎,周泓宇,等.基于梯次启动与优化算法的多集群风机最优调频方法[J].电力建设,2023,44(11):54-63.
CHEN Rusi, LI Dahu, ZHOU Hongyu, et al. Optimal frequency regulation in multi-cluster wind turbines using a step start-up and optimization algorithm[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(11): 54-63.
- [2] 新华网.我国风电发展或将进入“倍速”阶段[EB/OL]. http://www.xinhuanet.com/energy/2020-10/26/c_1126656312.htm, 2020-10-26.
Xinhua News Agency. China's wind power development may enter a "high-speed" phase[EB/OL]. http://www.xinhuanet.com/energy/2020-10/26/c_1126656312.htm, 2020-10-26.
- [3] ATTYA A B, DOMINGUEZ-GARCIA J L, ANAYA-LARA O. A review on frequency support provision by wind power plants: Current and future challenges[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 2071-2087.
- [4] 年珩,程鹏,贺益康.故障电网下双馈风电系统运行技术研究综述[J].中国电机工程学报,2015,35(16):4184-4197.
NIAN Heng, CHENG Peng, HE Yikang. Review on operation techniques for DFIG-based wind energy conversion systems under network faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4184-4197.
- [5] 李辉,胡姚刚,李洋,等.大功率并网风电机组状态监测与故障诊断研究综述[J].电力自动化设备,2016,36(1):6-16.
LI Hui, HU Yaogang, LI Yang, et al. Overview of condition monitoring and fault diagnosis for grid-connected high-power wind turbine unit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 6-16.
- [6] 王伟胜,张冲,何国庆,等.大规模风电场并网系统次同步振荡研究综述[J].电网技术,2017,41(4):1050-1060.
WANG Weisheng, ZHANG Chong, HE Guoqing, et al. Overview of research on subsynchronous oscillations in large-scale wind farm integrated system[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1050-1060.
- [7] 艾斯卡尔,朱永利,唐斌伟.风力发电机组故障穿越问题综述[J].电力系统保护与控制,2013,41(19):147-153.
AI Sikaer, ZHU Yongli, TANG Binwei. Summarizing for fault ride through characteristics of wind turbines[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 147-153.
- [8] 徐晓宾,李凤婷.不对称故障下直驱永磁风电机组运行控制方式综述[J].电力电容器与无功补偿,2016,37(1):96-102.
XU Xiaobin, LI Fengting. Review on operation control mode for direct drive permanent magnet wind turbine under asymmetrical fault[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2016, 37(1): 96-102.
- [9] 李少林,王伟胜,张兴,等.风力发电对系统频率影响及虚拟惯量综合控制[J].电力系统自动化,2019,43(15):64-70.
LI Shaolin, WANG Weisheng, ZHANG Xing, et al. Impact of wind power on power system frequency and combined virtual inertia control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 64-70.
- [10] 竺炜,杨子琦,祁俊辉,等.大型风电腰荷接入的主网安全调度方法[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):1-8.

- ZHU Wei, YANG Ziqi, QI Junhui, et al. Secure scheduling method of main network for large-scale wind power waist-load access[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(2):1-8.
- [11] 池喜洋, 竺炜, 刘长富, 等. 含大型风电场的电网安全经济优化调度[J]. *电力科学与技术学报*, 2018, 33(1):125-131.
- CHI Xiyang, ZHU Wei, LIU Changfu, et al. Security and economic optimization dispatch for power grid integrating large-scale wind farm[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2018, 33(1):125-131.
- [12] 李自明, 姚秀萍, 王海云, 等. 不同风电机组并网对电力系统暂态电压稳定性的影响[J]. *电力科学与技术学报*, 2016, 31(2):16-21.
- LI Ziming, YAO Xiuping, WANG Haiyun, et al. Influence of different wind turbine generators integration to power system transient voltage stability[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2016, 31(2):16-21.
- [13] MOHAMMAD S N, DAS N K, ROY S. Power converters and control of wind energy conversion systems[C]//2013 International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT). Khulna. IEEE, 2014: 1-7.
- [14] AHMED S D, AL-ISMAIL F S M, SHAFIULLAH M, et al. Grid integration challenges of wind energy: a review [J]. *IEEE Access*, 2020, 8:10857-10878.
- [15] LIU Y H, CHI Y N, WANG W S, et al. Impacts of large scale wind power integration on power system[C]//2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). Weihai, China. IEEE, 2011:1301-1305.
- [16] VERMEER L J, SØRENSEN J N, CRESPO A. Wind turbine wake aerodynamics[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2003, 39(6/7):467-510.
- [17] 李从善, 甄子凯, 和萍, 等. 风电与多端柔性直流输电系统自适应分频协调控制策略研究[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(1):65-73+92.
- LI Congshan, ZHEN Zikai, HE Ping, et al. Research on adaptive frequency division coordinated control strategy for wind power and multi terminal flexible HVDC transmission system[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(1):65-73+92.
- [18] TARNOWSKI G C, KJÆR P C, DALSGAARD S, et al. Regulation and frequency response service capability of modern wind power plants[C]//IEEE PES General Meeting. Minneapolis, MN, USA. IEEE, 2010:1-8.
- [19] MORREN J, DE HAAN S W H, KLING W L, et al. Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, 21(1):433-434.
- [20] 丁磊, 尹善耀, 王同晓, 等. 考虑惯性调频的双馈风电机组主动转速保护控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(24):29-34+95.
- DING Lei, YIN Shanyao, WANG Tongxiao, et al. Active rotor speed protection strategy for DFIG-based wind turbines with inertia control[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(24):29-34+95.
- [21] 潘文霞, 全锐, 王飞. 基于双馈风电机组的变下垂系数控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(11):126-131+186.
- PAN Wenxia, QUAN Rui, WANG Fei. A variable droop control strategy for doubly-fed induction generators[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(11):126-131+186.
- [22] VIDYANANDAN K V, SENROY N. Primary frequency regulation by deloaded wind turbines using variable droop[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(2):837-846.
- [23] 侍乔明, 王刚, 马伟明, 等. 直驱永磁风电机组虚拟惯量控制的实验方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(8):2033-2042.
- SHI Qiaoming, WANG Gang, MA Weiming, et al. An experimental study method of D-PMSG with virtual inertia control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(8): 2033-2042.
- [24] 陈宇航, 王刚, 侍乔明, 等. 一种新型风电场虚拟惯量协同控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(5):27-33.
- CHEN Yuhang, WANG Gang, SHI Qiaoming, et al. A new coordinated virtual inertia control strategy for wind farms [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(5): 27-33.
- [25] LEE J, MULJADI E, SRENSSEN P, et al. Releasable kinetic energy-based inertial control of a DFIG wind power plant[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, 7(1):279-288.
- [26] 高晖胜, 瞿鹏, 黄林彬, 等. 能量约束下电力电子并网装备的最优频率控制[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(17):9-18.
- GAO Huisheng, ZI Peng, HUANG Linbin, et al. Optimal frequency control of grid-connected power electronic devices with energy constraints[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(17):9-18.
- [27] 边晓燕, 张菁娴, 丁炆, 等. 基于DFIG虚拟惯量的微电网双维自适应动态频率优化控制[J]. *高电压技术*, 2020, 46(5):1476-1485.
- BIAN Xiaoyan, ZHANG Jingxian, DING Yang, et al. Double layer adaptive dynamic frequency optimization control of microgrid based on DFIG virtual inertia[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(5):1476-1485.
- [28] ZHANG W, FANG K L. Controlling active power of wind farms to participate in load frequency control of

- power systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution,2017,11(9):2194-2203.
- [29] 乔颖,郭晓茜,鲁宗相,等.考虑系统频率二次跌落的风电机组辅助调频参数确定方法[J].电网技术,2020,44(3):807-815.
- QIAO Ying, GUO Xiaoqian, LU Zongxiang, et al. Parameter setting of auxiliary frequency regulation of wind turbines considering secondary frequency drop[J]. Power System Technology,2020,44(3):807-815.
- [30] 张雯欣,吴琛,黄伟,等.考虑频率二次跌落的系统频率特征评估及风电调频参数整定[J].电力系统自动化,2022,46(8):11-19.
- ZHANG Wenxin, WU Chen, HUANG Wei, et al. Evaluation of system frequency characteristic and parameter setting of frequency regulation for wind power considering secondary frequency drop[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(8):11-19.
- [31] 姚雅涵,姚伟,熊永新,等.经多端直流并网的海上风电场调频协同控制和风机转速恢复策略[J].高电压技术,2021,47(10):3537-3548.
- YAO Yahan, YAO Wei, XIONG Yongxin, et al. Coordinated frequency support and wind turbine preset restoration scheme of VSC-MTDC integrated offshore wind farms[J]. High Voltage Engineering,2021,47(10):3537-3548.
- [32] LIU K C, QU Y B, KIM H M, et al. Avoiding frequency second dip in power unreserved control during wind power rotational speed recovery[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(3):3097-3106.
- [33] 唐玉烽,杨苹,杨义.考虑频率二次跌落的风电机组频率响应控制策略[J].电力系统自动化,2023,47(9):166-174.
- TANG Yufeng, YANG Ping, YANG Yi. Frequency response control strategy of wind turbines considering frequency secondary drop[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(9):166-174.
- [34] 陶玉昆,杨飞飞,和萍,等.考虑频率二次跌落和转速恢复的风电机组柔性频率响应策略[J].电力系统自动化,2024,48(13):60-68.
- TAO Yukun, YANG Feifei, HE Ping, et al. Flexible frequency response strategy for wind turbines considering secondary frequency drop and rotational speed recovery[J]. Automation of Electric Power Systems,2024,48(13):60-68.
- [35] 劳焕景,张黎,赵彤,等.考虑分组控制和有序恢复的风电调频策略[J].电力系统自动化,2020,44(16):114-120.
- LAO Huanjing, ZHANG Li, ZHAO Tong, et al. Frequency regulation strategy for wind power considering grouping control and orderly recovery[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(16):114-120.
- [36] GHOSH S, KAMALASADAN S, SENROY N, et al. Doubly fed induction generator (DFIG)-based wind farm control framework for primary frequency and inertial response application[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2016,31(3):1861-1871.
- [37] 丁磊,尹善耀,王同晓,等.结合超速备用和模拟惯性的双馈风机频率控制策略[J].电网技术,2015,39(9):2385-2391.
- DING Lei, YIN Shanyao, WANG Tongxiao, et al. Integrated frequency control strategy of DFIGs based on virtual inertia and over-speed control[J]. Power System Technology,2015,39(9):2385-2391.
- [38] 张昭遂,孙元章,李国杰,等.超速与变桨协调的双馈风电机组频率控制[J].电力系统自动化,2011,35(17):20-25+43.
- ZHANG Zhaosui, SUN Yuanzhang, LI Guojie, et al. Frequency regulation by doubly fed induction generator wind turbines based on coordinated overspeed control and pitch control[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(17):20-25+43.
- [39] 范冠男,刘吉臻,孟洪民,等.电网限负荷条件下风电场一次调频策略[J].电网技术,2016,40(7):2030-2037.
- FAN Guannan, LIU Jizhen, MENG Hongmin, et al. Primary frequency control strategy for wind farms under output-restricted condition[J]. Power System Technology,2016,40(7):2030-2037.
- [40] 王鑫,李慧,叶林,等.考虑风速波动特性的VMD-GRU短期风电功率预测[J].电力科学与技术学报,2021,36(4):20-28.
- WANG Xin, LI Hui, YE Lin, et al. VMD-GRU based short-term wind power forecast considering wind speed fluctuation characteristics[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(4):20-28.
- [41] ABEDINI A, NASIRI A. Output power smoothing for wind turbine permanent magnet synchronous generators using rotor inertia[J]. Electric Power Components and Systems,2008,37(1):1-19.
- [42] LUU T, ABEDINI A, NASIRI A. Power smoothing of doubly fed induction generator wind turbines[C]//2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. Orlando, FL, USA. IEEE,2008:2365-2370.
- [43] ABEDINI A, LUU T, NASIRI A. A novel speed control algorithm for PMSG wind turbines aimed at output power smoothing[C]//2008 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Niagara Falls, ON, Canada. IEEE,2008:1597-1600.
- [44] STEINBUCH M. Dynamic modelling and robust control of a wind energy conversion system[D]. Delft: Delft University of Technology,1989.
- [45] 马瑞,李浩,吴震宇.考虑置信水平的混合储能平抑风电

- 波动[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(1):35-40.
- MA Rui, LI Hao, WU Zhenyu. Wind power fluctuations suppression with hybrid energy storage considering the confidence level[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(1):35-40.
- [46] 周年光,谢欣涛,马俊杰,等. 风电场配套储能的自适应虚拟惯性:阻尼控制[J]. 电力科学与技术学报,2024,39(3):150-158.
- ZHOU Nianguang, XIE Xintao, MA Junjie, et al. An adaptive virtual inertial damping control for wind farm integrated energy storage system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2024,39(3):150-158.
- [47] LI X J, LI N, JIA X C, et al. Fuzzy logic based smoothing control of wind/PV generation output fluctuations with battery energy storage system[C]//2011 International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing, China. IEEE,2011:1-5.
- [48] LI X J, HUI D, WU L, et al. Control strategy of battery state of charge for wind/battery hybrid power system[C]//2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Bari, Italy. IEEE,2010:2723-2726.
- [49] LI X J, HUI D, LAI X K, et al. Control strategy of wind power output by pitch angle control using fuzzy logic [C]//2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Bari, Italy. IEEE,2010:120-124.
- [50] ZHAO W C, WU S Y, WANG C L, et al. Hybrid energy storage control for smoothing wind power fluctuations considering energy storage output levels[C]//2024 3rd International Conference on Energy, Power and Electrical Technology (ICEPET). Chengdu, China. IEEE, 2024: 503-507.
- [51] LUO H R, ZHANG Q P, GAO B, et al. Coordinated control strategy and economic analysis of flywheel energy storage array for wind power suppression[C]//2023 IEEE 5th International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS). Shenyang, China. IEEE,2023:1012-1019.
- [52] QIN L, SUN N, DONG H Y. Adaptive double Kalman filter method for smoothing wind power in multi-type energy storage system[J]. Energies,2023,16(4):1856.
- [53] 刘皓明,唐俏俏,朱凌志,等. 双馈型风电场参与电压无功调节的分层控制方案[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(24):79-85.
- LIU Haoming, TANG Qiaoqiao, ZHU Lingzhi, et al. Hierarchical control strategy of voltage and reactive power for DFIG wind farm[J]. Power System Protection and Control,2014,42(24):79-85.
- [54] 邵龙,苏皓轩,王慧敏. 大规模风电并网时双馈风机无功出力研究[J]. 电力科学与工程,2013,29(9):18-23.
- SHAO Long, SU Haoxuan, WANG Huimin. Research of reactive power output of doubly-fed induction generator when large-scale wind power integration[J]. Electric Power Science and Engineering,2013,29(9):18-23.
- [55] 郎永强,张学广,徐殿国,等. 双馈电机风电场无功功率分析及控制策略[J]. 中国电机工程学报,2007,27(9):77-82.
- LANG Yongqiang, ZHANG Xueguang, XU Dianguo, et al. Reactive power analysis and control of doubly fed induction generator wind farm[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(9):77-82.
- [56] 贾俊川,刘晋,张一工. 双馈风力发电系统的新型无功优化控制策略[J]. 中国电机工程学报,2010,30(30):87-92.
- JIA Junchuan, LIU Jin, ZHANG Yigong. Novel reactive power optimization control strategy for doubly fed induction wind power generation system[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(30):87-92.
- [57] 王松,李庚银,周明. 双馈风力发电机组无功调节机理及无功控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2714-2720.
- WANG Song, LI Gengyin, ZHOU Ming. The reactive power adjusting mechanism & control strategy of doubly fed induction generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2014,34(16):2714-2720.
- [58] 高阳. 电网故障时双馈风力发电机无功电流分配及控制策略[J]. 电力科学与工程,2017,33(12):28-33.
- GAO Yang. Reactive current distribution and control strategy of doubly-fed induction generator in grid fault [J]. Electric Power Science and Engineering,2017,33(12):28-33.
- [59] 李丽霞,姚兴佳,王晓东,等. 双馈风电场新型无功优化分配策略研究[J]. 太阳能学报,2017,38(5):1397-1404.
- LI Lixia, YAO Xingjia, WANG Xiaodong, et al. An optimal reactive power dispatch strategy for interior-point method based wind farms[J]. Acta Energetica Sinica,2017,38(5):1397-1404.
- [60] NILSSON K, IVANELL S, HANSEN K S, et al. Large-eddy simulations of the Lillgrund wind farm[J]. Wind Energy,2015,18(3):449-467.
- [61] 肖石,吕应刚,唐浩,等. 面向海上油田平台用能低碳化的风电海缆路由优化方法[J]. 电力科学与技术学报,2024,39(6):184-193+202.
- XIAO Shi, LYU Yinggang, TANG Hao, et al. Optimization method for wind power submarine cable routing for low carbon energy consumption of offshore oilfield platforms [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024,39(6):184-193+202.
- [62] LISSAMAN P B S. Energy effectiveness of arbitrary arrays of wind turbines[J]. Journal of Energy,1979,3(6):323-328.
- [63] MANWELL J F, MCGOWAN J G, ROGERS A L. Wind Energy Explained[M]. New York: Wiley,2002.

- [64] 韩兵,马杰.基于模型参考自适应的大型风电机组独立变桨控制方法[J].分布式能源,2021,6(5):26-32.
HAN Bing,MA Jie.Individual pitch control of large wind turbine based on model reference adaptive[J].Distributed Energy,2021,6(5):26-32.
- [65] HOUCK D,COWEN E A.Power and flow analysis of axial induction control in an array of model-scale wind turbines[J].Energies,2022,15(15):5347.
- [66] ARCHER C L,VASEL-BE-HAGH A.Wake steering via yaw control in multi-turbine wind farms: Recommendations based on large-eddy simulation[J].Sustainable Energy Technologies and Assessments,2019,33:34-43.
- [67] YANG L,LIAO K P,MA Q W,et al.Investigation of wake characteristics of floating offshore wind turbine with control strategy using actuator curve embedding method [J].Renewable Energy,2023,218:119255.
- [68] 田尧,高超,刘亚.水平轴风力机偏航与俯仰尾流特性[J].空气动力学学报,2023,41(11):80-93.
TIAN Yao,GAO Chao,LIU Ya.Yaw and tilt wake characteristics of horizontal axis wind turbine[J].Acta Aerodynamica Sinica,2023,41(11):80-93.
- [69] SU K Y,BLISS D.A numerical study of tilt-based wake steering using a hybrid free-wake method[J].Wind Energy,2020,23(2):258-273.
- [70] LI Y J,XU Z,ZHANG J L,et al.Variable droop voltage control for wind farm[J].IEEE Transactions on Sustainable Energy,2018,9(1):491-493.
- [71] TIAN J,ZHOU D,SU C,et al.Reactive power dispatch method in wind farms to improve the lifetime of power converter considering wake effect[J].IEEE Transactions on Sustainable Energy,2017,8(2):477-487.
- [72] LIAO W,WU Q W,CUI H S,et al.Model predictive control based coordinated voltage control for offshore radial DC-connected wind farms[J].Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2023,11(1):280-289.
- [73] MA S K,GENG H,YANG G,et al.Clustering-based coordinated control of large-scale wind farm for power system frequency support[J].IEEE Transactions on Sustainable Energy,2018,9(4):1555-1564.
- [74] TAN H T,LI H,XIE X J,et al.Reactive-voltage coordinated control of offshore wind farm based on deep reinforcement learning[C]//2021 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES).Chengdu, China.IEEE,2021:407-412.
- [75] HUANG S,WU Q W,GUO Y F,et al.Distributed voltage control based on ADMM for large-scale wind farm cluster connected to VSC-HVDC[J].IEEE Transactions on Sustainable Energy,2020,11(2):584-594.
- [76] DONG Z,LI Z G,XU Y Q,et al.Surrogate-assisted cooperation control of network-connected doubly fed induction generator wind farm with maximized reactive power capacity[J].IEEE Transactions on Industrial Informatics,2022,18(1):197-206.
- [77] NGUYEN T T,KIM H M.Cluster-based predictive PCC voltage control of large-scale offshore wind farm[J].IEEE Access,2020,9:4630-4641.
- [78] GUO Y F,GAO H L,XING H,et al.Decentralized coordinated voltage control for VSC-HVDC connected wind farms based on ADMM[J].IEEE Transactions on Sustainable Energy,2019,10(2):800-810.
- [79] LI Z M,XU Z,XIE Y W,et al.Two-stage ADMM-based distributed optimal reactive power control method for wind farms considering wake effects[J].Global Energy Interconnection,2021,4(3):251-260.
- [80] LIN Z W,CHEN Z Y,QU C Z,et al.A hierarchical clustering-based optimization strategy for active power dispatch of large-scale wind farm[J].International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2020,121:106155.
- [81] PENG H Z,HUANG S,WEI J,et al.Two-stage decentralized optimal voltage control in wind farms with hybrid ESSs[J].IEEE Transactions on Power Systems, 2024,39(5):6552-6565.
- [82] 贾梦欣,张彬彬,陈超波,等.基于改进模糊 AHP 的风电场有功功率分配方法[J].能源与环保,2023,45(10):220-225+230.
JIA Mengxin,ZHANG Binbin,CHEN Chaobo,et al.Active power dispatching method for wind farm based on improved fuzzy AHP[J].China Energy and Environmental Protection,2023,45(10):220-225+230.
- [83] 王玮,杨健,任国瑞,等.考虑模糊多目标优化的风电场无功电压分区控制[J].动力工程学报,2024,44(1):99-108.
WANG Wei,YANG Jian,REN Guorui,et al.Zonal control of reactive power and voltage in wind farms considering fuzzy multi-objective optimization[J].Journal of Chinese Society of Power Engineering,2024,44(1):99-108.
- [84] 周丹,袁至,李骥,等.考虑平抑未来时刻风电波动的混合储能系统超前模糊控制策略[J].发电技术,2024,45(3):412-422.
ZHOU Dan,YUAN Zhi,LI Ji,et al.An advanced fuzzy control strategy for hybrid energy storage systems considering smoothing of wind power fluctuations at future moments[J].Power Generation Technology,2024, 45(3):412-422.
- [85] 纪坤华,王云,邓丽娜,等.提高双向调节能力的混合储能平滑风电控制策略[J].智慧电力,2024,52(3):55-62.
JI Kunhua,WANG Yun,DENG Lina,et al.Hybrid energy storage wind power smoothing control strategy for

- improving bidirectional regulation ability[J]. *Smart Power*,2024,52(3):55-62.
- [86] 冉华军,王新权,王灿,等.永磁直驱风电系统MPPT模糊改进线性自抗扰控制[J/OL].*电测与仪表*,1-9[2024-11-06].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20240724.1044.002.html>.
- RAN Huajun,WANG Xinquan,WANG Can,et al.MPPT control with fuzzy improved LADRC for permanent magnet direct drive wind power system [J/OL].*Electrical Measurement & Instrumentation*,1-9[2024-11-06].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20240724.1044.002.html>.
- [87] 王怡,张浩.基于模糊控制的风电机组变系数综合惯性控制策略[J].*上海电力大学学报*,2023,39(4):325-331.
- WANG Yi,ZHANG Hao.Variable coefficient integrated inertia control strategy of fan based on fuzzy control[J].*Journal of Shanghai University of Electric Power*,2023,39(4):325-331.
- [88] 朱瑛,王志聪,石琦,等.基于转子动能调节的风电输出功率平滑控制策略比较与改进[J].*电力系统自动化*,2023,47(22):157-165.
- ZHU Ying,WANG Zhicong,SHI Qi,et al.Comparison and improvement of power smoothing control strategies for wind power output based on kinetic energy adjustment for rotor[J].*Automation of Electric Power Systems*,2023,47(22):157-165.
- [89] 王海,吴劲芳,贾洪岩,等.基于模糊免疫算法和PLC的永磁直驱风电系统变桨增益控制方法[J].*水力发电*,2024,50(8):79-83.
- WANG Hai,WU Jinfang,JIA Hongyan,et al.A pitch gain control method for permanent magnet direct drive wind power system based on fuzzy immune algorithm and PLC[J].*Water Power*,2024,50(8):79-83.
- [90] 田刚领,武鸿鑫,李娟,等.风电场多功能储能电站功率分配策略[J].*中国电力*,2024,57(9):247-256.
- TIAN Gangling,WU Hongxin,LI Juan,et al.Power distribution strategy of multi-functional energy storage power station in wind farm[J].*Electric Power*,2024,57(9):247-256.
- [91] 王世奇,刘广忱,陈国伟,等.基于模糊卡尔曼滤波和改进滑模控制的风电场飞轮储能控制策略[J].*可再生能源*,2024,42(7):901-907.
- WANG Shiqi,LIU Guangchen,CHEN Guowei,et al.Control strategy of FESS in wind farms based on fuzzy Kalman filter and improved sliding mode control[J].*Renewable Energy Resources*,2024,42(7):901-907.
- [92] 蒋韬,刘红文,陆仕信,等.风电机组复杂工况下振动抑制模糊控制策略[J].*控制与信息技术*,2024(2):26-31.
- JIANG Tao,LIU Hongwen,LU Shixin,et al.Fuzzy control strategy for wind turbine vibration suppression under complicated operating conditions[J].*Control and Information Technology*,2024(2):26-31.
- [93] WANG L,WEN J,CAI M,et al.Distributed optimization control schemes applied on offshore wind farm active power regulation[J].*Energy Procedia*,2017,105:1192-1198.
- [94] DONG Z,LI Z G,DU L Y,et al.Coordination strategy of large-scale DFIG-based wind farm for voltage support with high converter capacity utilization[J].*IEEE Transactions on Sustainable Energy*,2021,12(2):1416-1425.
- [95] EBEGBULEM J,GUAY M.Distributed extremum seeking control for wind farm power maximization[J].*IFAC-PapersOnLine*,2017,50(1):147-152.
- [96] EBEGBULEM J,GUAY M.Power maximization of wind farms using discrete-time distributed extremum seeking control[J].*IFAC-PapersOnLine*,2018,51(18):339-344.
- [97] SHU T,SONG D R,JOO Y H.Non-centralised coordinated optimisation for maximising offshore wind farm power via a sparse communication architecture[J].*Applied Energy*,2022,324:119705.
- [98] HUANG S,WU Q W,GUO Y F,et al.Bi-level decentralized active power control for large-scale wind farm cluster[J].*International Journal of Electrical Power & Energy Systems*,2019,111:201-215.
- [99] 鲁鹏,田浩,武伟鸣,等.需求侧能量枢纽和储能协同提升风电消纳和平抑负荷峰谷模型[J].*电力科学与技术学报*,2021,36(1):42-51.
- LU Peng,TIAN Hao,WU Weiming,et al.Demand side energy hub and energy storage cooperate to smooth peak and valley and improve wind power consumption model [J].*Journal of Electric Power Science and Technology*,2021,36(1):42-51.
- [100] HAN J,MIAO S H,CHEN Z,et al.Multi-View clustering and discrete consensus based tri-level coordinated control of wind farm and adiabatic compressed air energy storage for providing frequency regulation service [J].*Applied Energy*,2021,304:117910.
- [101] KHAZAEI J,NGUYEN D H.Distributed consensus for output power regulation of DFIGs with on-site energy storage[J].*IEEE Transactions on Energy Conversion*,2019,34(2):1043-1051.
- [102] BAROS S,ILIĆ M D.A consensus approach to real-time distributed control of energy storage systems in wind farms[J].*IEEE Transactions on Smart Grid*,2019,10(1):613-625.
- [103] CHEN S Y,LIU D,YANG Q F,et al.Cooperative control strategy for distributed wind-storage combined system based on consensus protocol[J].*International Journal of Electrical Power & Energy Systems*,2021,127:106681.

- [104] NEGENBORN R R, MAESTRE J M. Distributed model predictive control: an overview and roadmap of future research opportunities[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2014, 34(4): 87-97.
- [105] ZHAO H R, WU Q W, GUO Q L, et al. Coordinated voltage control of a wind farm based on model predictive control[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(4): 1440-1451.
- [106] GUO Y F, GAO H L, WU Q W, et al. Enhanced voltage control of VSC-HVDC-connected offshore wind farms based on model predictive control[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(1): 474-487.
- [107] KHALID M, SAVKIN A V. A model predictive control approach to the problem of wind power smoothing with controlled battery storage[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(7): 1520-1526.
- [108] SINISCALCHI-MINNA S, BIANCHI F D, OCAMPO-MARTINEZ C, et al. A non-centralized predictive control strategy for wind farm active power control: a wake-based partitioning approach[J]. *Renewable Energy*, 2020, 150: 656-669.
- [109] LI G Q, YE H. Hierarchical nonlinear model predictive control for frequency support of wind farm[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 129: 106820.
- [110] LIU W P, LIU Y T. Hierarchical model predictive control of wind farm with energy storage system for frequency regulation during black-start[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 119: 105893.
- [111] PUSTINA L, BIRAL F, SERAFINI J. A novel Economic Nonlinear Model Predictive Controller for power maximisation on wind turbines[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 170: 112964.
- [112] WEI J, CAO Y J, WU Q W, et al. Coordinated droop control and adaptive model predictive control for enhancing HVRT and post-event recovery of large-scale wind farm[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(3): 1549-1560.
- [113] BOYD S. *Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers*[M]. Norwell: now Publishers Inc, 2010.
- [114] HUANG S, LI P Y, WU Q W, et al. ADMM-based distributed optimal reactive power control for loss minimization of DFIG-based wind farms[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 118: 105827.
- [115] LIAO W, LI P Y, WU Q W, et al. Distributed optimal active and reactive power control for wind farms based on ADMM[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 129: 106799.
- [116] WEI J, WU Q W, LI C B, et al. Hierarchical event-triggered MPC-based coordinated control for HVRT and voltage restoration of large-scale wind farm[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13(3): 1819-1829.
- [117] 彭桂喜, 袁思遥, 高梓寒, 等. 基于深度学习低图像要求的继电保护压板状态自动识别方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(2): 134-142.
- PENG Guixi, YUAN Siyao, GAO Zihan, et al. Automatic recognition method on pressing plate state of relay protection based on deep learning and low image requirements[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(2): 134-142.
- [118] 韩保军, 高强, 代飞, 等. 基于协同奖励函数多目标强化学习的智能频率控制策略研究[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(2): 18-29.
- HAN Baojun, GAO Qiang, DAI Fei, et al. Intelligent frequency control strategy based on multi-objective reinforcement learning of cooperative reward function[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2023, 38(2): 18-29.
- [119] 汪希玥, 柯德平, 徐箭, 等. 考虑动态无功支撑的双馈风电机组协调控制策略[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2024, 57(6): 728-737.
- WANG Xiyue, KE Deping, XU Jian, et al. Coordinated control strategy of doubly-fed induction generator considering dynamic reactive power support[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2024, 57(6): 728-737.
- [120] YIN X X, ZHAO X W. Deep neural learning based distributed predictive control for offshore wind farm using high-fidelity LES data[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 68(4): 3251-3261.
- [121] 侯倩, 郝晓光, 金飞, 等. 基于混合深度学习的风电功率预测及一次调频应用[J]. *热能动力工程*, 2023, 38(10): 167-175.
- HOU Qian, HAO Xiaoguang, JIN Fei, et al. Wind power prediction and primary frequency regulation application based on hybrid deep learning[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2023, 38(10): 167-175.
- [122] 孙冉, 王建波, 马彦钊, 等. 基于强化学习的新能源场站储能一次调频自适应控制策略[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(3): 858-869.
- SUN Ran, WANG Jianbo, MA Yanzhao, et al. Adaptive control strategy for primary frequency regulation for new energy storage stations based on reinforcement learning[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(3): 858-869.
- [123] 郑弘奇, 江岳文, 戴锦山. 不确定环境下基于多智能体Q学习的海上风电输电工程电压调整降损优化[J]. *中国*

- 电机工程学报,2024,44(20):7995-8009.
- ZHENG Hongqi, JIANG Yuewen, DAI Jinshan. Optimization of Voltage Regulation and Loss Reduction of Offshore Wind Power Transmission Based on Multi-agent Q-learning in Uncertain Environment [J]. Proceedings of the CSEE,2024,44(20):7995-8009.
- [124] XIE J J, DONG H Y, ZHAO X W, et al. Wind farm power generation control via double-network-based deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2022,18(4):2321-2330.
- [125] 高国栋,朱丹丹,周前,等.基于多智能体深度强化学习的风电集群无功电压分层优化控制策略[J/OL].高电压技术,1-14[2025-01-23].<https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.241472>.
- GAO Guodong, ZHU Dandan, ZHOU Qian, et al. Optimization control strategy for reactive power and voltage partitioning in wind power clusters based on multi-agent reinforcement learning[J/OL]. High Voltage Engineering, 1-14[2025-01-23].<https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.241472>.
- [126] LIANG Y C, ZHAO X W, SUN L. A multiagent reinforcement learning approach for wind farm frequency control[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2023,19(2):1725-1734.
- [127] DONG H Y, ZHAO X W. Data-driven wind farm control via multiplayer deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2023,31(3):1468-1475.
- [128] 韩佶,苗世洪,Martinez-Rico Jon,等.基于机群划分与深度强化学习的风电场低电压穿越有功/无功功率联合控制策略[J].中国电机工程学报,2023,43(11):4228-4244.
- HAN Ji, MIAO Shihong, JON M R, et al. Combined Re/active power control for wind farm under low voltage ride through based on wind turbines grouping and deep reinforcement learning[J]. Proceedings of the CSEE,2023, 43(11):4228-4244.
- [129] HAN J, CHEN Z. An inertial control method for large-scale wind farm based on hierarchical distributed hybrid deep-reinforcement learning[J]. Journal of Cleaner Production,2024,450:142034.
- [130] 杨铎炯,俞靖一,葛俊,等.海上风电场自适应多目标无功优化控制策略[J].电力工程技术,2024,43(3):121-129.
- YANG Duotong, YU Jingyi, GE Jun, et al. Adaptive multi-objective reactive power optimization control strategy for offshore wind farms[J]. Electric Power Engineering Technology,2024,43(3):121-129.
- [131] 李世春,苏凌杰,张志刚,等.基于改进粒子群算法的风电场虚拟惯量优化分配方法[J].智慧电力,2023,51(8):8-14+22.
- LI Shichun, SU Lingjie, ZHANG Zhigang, et al. Optimal allocation method of wind farm virtual inertia based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Smart Power,2023,51(8):8-14+22.
- [132] 刘瑶,周雨豪,郭泽宇,等.考虑风电不确定性的风储电站主动参与电网调压控制策略研究[J/OL].现代电力,1-10[2025-01-01].<https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0184>.
- LIU Yao, ZHOU Yuhao, GUO Zeyu, et al. Research on control strategy of wind storage power station's active participation in power grid voltage regulation considering wind power uncertainty [J/OL]. Modern Electric Power, 1-10[2025-01-01].<https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0184>.
- [133] 潘生雄,赵霞,罗映红,等.基于SMES/BESS混合储能抑制风电功率波动的控制策略[J].电测与仪表,2020,57(5):101-106.
- PAN Shengxiong, ZHAO Xia, LUO Yinghong, et al. Control strategy for suppressing wind power fluctuation based on SMES/BESS hybrid energy storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(5): 101-106.
- [134] 杜强.计及系统备用约束的风电场功率优化控制研究[J].电气自动化,2022,44(2):15-17.
- DU Qiang. Research on wind farm power optimal control considering system reserve constraints[J]. Electrical Automation,2022,44(2):15-17.
- [135] 孙欣宇,向东,丁伟,等.基于麻雀搜索算法的风电机组独立变桨控制研究[J].太阳能学报,2023,44(10):266-274.
- SUN Xinyu, XIANG Dong, DING Wei, et al. Research on individual pitch control of wind turbine based on sparrow search algorithm[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica,2023,44(10):266-274.