

引用格式: 吴炜, 刘玉飞, 孙炎平, 等. 海上风电弱电网并网稳定性分析及关键技术综述 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(6): 53-68. WU Wei, LIU Yufei, SUN Yanping, et al. A review of analysis methods and key technologies for grid connection stability of offshore wind power in weak grids [J]. Southern energy construction, 2025, 12(6): 53-68. DOI: 10.16516/j.ceec.2025-179.

海上风电弱电网并网稳定性分析方法 及关键技术综述

吴炜¹, 刘玉飞^{2,✉}, 孙炎平³, 张勇军²

(1. 华润电力投资有限公司华南分公司, 广东 广州 510000;

2. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640;

3. 金风科技股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830026)

摘要: [目的]在全球能源转型进程不断推进的背景下, 海上风电大规模接入电网导致电网连接强度变弱, 进而引发了一系列电网稳定性方面的挑战。[方法]针对海上风电弱电网环境下并网的稳定性问题, 文章首先剖析弱电网环境下的海上风电并网稳定性特征与挑战, 接着总结了主流的5种电力系统稳定性的分析方法, 然后概述了海上风电并网稳定性的关键技术。[结果]研究发现, 海上风电弱电网并网存在同步失稳、宽频振荡、暂态电压波动等稳定性问题核心源于电力电子设备的低惯量特性及弱电网的高阻抗特性; 各种并网稳定性分析方法都有各自的优势和局限性, 阻抗模型法适用于高频谐振等问题, 但建模复杂, 特征值分析法可精准定位振荡模式, 但仅适用于小扰动, 时域仿真法直观, 但计算效率低, 数据驱动建模法适应性强, 但泛化能力有限; 海上风电中的关键技术在于并网稳定性中发挥着重要作用, 柔性直流输电技术可实现有功无功解耦控制, 无功补偿与电压控制技术通过优化补偿装置配置维持电压稳定, 故障穿越能力提升确保风电场在电网故障时稳定运行, 宽频带振荡监测与抑制技术通过传感器与控制策略优化降低振荡风险。[结论]未来海上风电并网稳定性提升方向包括智能监测与数据分析技术融合、多源互补综合能源系统构建、基于人工智能的自适应控制技术以及海上风电并网国际标准统一制定与规范, 这些技术与规范将推动海上风电并网稳定性提升, 助力全球能源转型与碳中和目标实现。

关键词: 海上风电; 弱电网; 并网稳定性; 柔性直流输电; 无功补偿; 人工智能

DOI: 10.16516/j.ceec.2025-179

文章编号: 2095-8676(2025)06-0053-16

CSTR: 32391.14.j.ceec.2025-179

中图分类号: TK89; TM712



论文二维码

A Review of Analysis Methods and Key Technologies for Grid Connection Stability of Offshore Wind Power in Weak Grids

WU Wei¹, LIU Yufei^{2,✉}, SUN Yanping³, ZHANG Yongjun²

(1. China Resources Power Investment Co., Ltd. South China Branch, Guangzhou 510000, Guangdong, China;

2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China;

3. Goldwind Science & Technology Co., Ltd., Urumqi 830026, Xinjiang, China)

Abstract: [Objective] In the context of the current global energy transition, large-scale access to offshore wind power has weakened grid connection strength, triggering a series of grid stability challenges. [Method] To address the stability of the offshore wind power grid in a weak grid environment, this paper first analyzed the characteristics and challenges of the stability of the offshore wind power grid in a weak grid environment. Then, it summarized five mainstream methods for analyzing the stability of power systems. Finally, it outlined the key technologies for ensuring the stability of the offshore wind power grid. [Result] The core of stability problems, such as

收稿日期: 2025-06-24 修回日期: 2025-08-09 网络首发日期: 2025-09-10

基金项目: 国家重点研发计划项目“大型风电机组六自由度全功率智能测试平台”(2024YFB3411000)

synchronous instability, broadband oscillation and transient voltage fluctuation are found in offshore wind power, weak grid integration originates from the low inertia characteristics of power electronic equipment and the high impedance characteristics of the weak grid. The various grid integration stability analysis methods have their own advantages and limitations. The impedance model method is applicable to problems such as high-frequency resonance, but modeling is complicated. The eigenvalue analysis method can accurately locate oscillatory modes, but it is only applicable to small disturbances. The time-domain simulation method is intuitive, but has low computational efficiency. The data-driven modeling method is adaptable, but has limited generalization ability. Key technologies in offshore wind power play an important role in grid stability. Flexible DC transmission technology realizes active-reactive decoupling control. Reactive power compensation technology maintains voltage stability by optimizing the configuration of compensation devices. The enhancement of fault ride-through capability ensures the stable operation of wind farms in the event of grid faults. Wide-band oscillation monitoring and suppression technology reduces the risk of oscillation by optimizing sensors and control strategies. [Conclusion] The future direction for improving the stability of offshore wind power grids includes integrating intelligent monitoring and data analysis technologies, constructing multi-source complementary integrated energy systems, and developing adaptive control technologies based on artificial intelligence. These technologies and norms will promote grid stability and help achieve carbon neutrality and the global energy transition.

Key words: offshore wind power; weak grid; grid stability; flexible DC transmission; reactive power compensation; artificial intelligence
2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

在全球能源转型与应对气候变化的大背景下,大力发展可再生能源、推进能源生产清洁化转型,是实现能源可持续发展的关键路径。海上风电技术凭借其资源丰富、风速稳定、不占用陆地空间等显著优势^[1-3],成为可再生能源领域的研究重点和发展重点。近年来,海上风电场不断向深远海区域拓展,这些地区的电网通常呈现短路容量较小、线路阻抗较大等特点,属于典型的弱电网。海上风电大规模接入弱电网,会改变原有电网的潮流分布和系统阻尼特性,给电力系统的稳定性带来新的问题和挑战^[4-6]。

近年来,国内外风电系统频发宽频振荡事故,其核心特征与电网强度、控制耦合及拓扑结构密切相关。2014年,德国 Borwin1 工程因 250~350 Hz 高频振荡导致设备烧毁^[7];2015年,新疆哈密直驱风电场出现 10~40 Hz 次同步振荡与 65~90 Hz 超同步振荡耦合^[8],振荡波传导至 300 km 外火电机组引发跳机;2019年,英国“8·9”大停电事故中,风机功率骤变诱发弱电网电压崩溃,无功功率 10 Hz 振荡触发过流保护^[9],造成百万人断电;2020年,张北柔直工程多次发生宽频振荡,多次迫使风电场停运^[10]。因此,亟需阐明并网稳定性的作用机理,以保障海上风电系统安全稳定运行。

风电自身具有间歇性、波动性大的固有特点,

这意味着其发电功率会随着自然条件的变化而大幅波动。当大规模的海上风电接入弱电网后,这种特性对电网稳定性的影响愈发凸显,尤其是在频率和电压稳定性方面。具体而言,频繁的功率波动可能导致电网电压出现明显的波动和闪变现象^[11-13]。在某些极端情况下,甚至可能引发电网故障,严重影响电力供应的可靠性。

从频率稳定性角度来看,海上风电通过变流器实现并网,这一方式使得其缺乏传统同步发电机所具备的旋转惯量。旋转惯量在电力系统中起着至关重要的作用,它能够帮助电网抵御频率波动。而海上风电的这一特性,导致弱电网对频率波动的调节能力大幅下降,一旦出现功率不平衡的情况,就极易引发频率失稳问题,影响电力系统的正常运行。

在电压稳定性方面,弱电网本身短路容量较低,这使得其对功率变化的承受能力有限。海上风电出力的波动,例如风速突然发生剧烈变化,会引发电压的闪变甚至崩溃。这种现象在孤岛运行模式下表现得更为明显。在孤岛运行模式中,由于缺乏外部电网的支撑,弱电网更容易受到海上风电功率波动的冲击,电压稳定性面临更大的挑战。

除了上述问题,在弱连接的海上风电系统中,还存在一个潜在的严重威胁——次同步振荡。当系统遭受大扰动后,次同步振荡就有可能发生。这种振荡通常出现在次同步频段,一般为 46.2~47.0 Hz

范围内, 其显著特征是呈现持续的等幅振荡^[14]。次同步振荡一旦发生, 会对电力系统的稳定性产生极大的破坏作用, 严重时甚至可能导致电力设备损坏, 直接危及电网的安全稳定运行。另外, 风机在运行过程中还会产生谐波。这些谐波如果得不到有效的治理, 将会混入电网, 导致电网的电能质量显著下降。这不仅会影响其他用户用电设备的正常运行, 缩短设备使用寿命, 还可能引发一系列连锁反应, 进一步扰乱电力系统的稳定运行^[15-17]。深入研究海上风电在弱电网环境下的并网稳定性问题, 无论是从理论层面完善电力系统稳定性研究体系, 还是从工程应用角度保障海上风电机组的可靠运行以及电网的安全稳定供电, 都具有不可忽视的重要意义。

首先, 对弱电网环境下海上风电并网稳定性的影响因素展开了深入地剖析, 涵盖了宽频振荡、控制策略、无功补偿与电压控制以及故障穿越等关键问题。这些影响因素相互交织, 给海上风电并网的稳定性带来了诸多挑战。接着, 对目前广泛应用的海上风电并网稳定性分析方法进行了全面且系统地综述。这些经过实践检验的方法各具特色, 包括阻抗模型法、特征值分析法、时域仿真法以及广域测量与智能分析法数据驱动建模法。它们在不同的分析场景和需求下, 发挥着各自的优势, 同时也存在一些局限性, 为后续的研究方向提供了宝贵的参考。

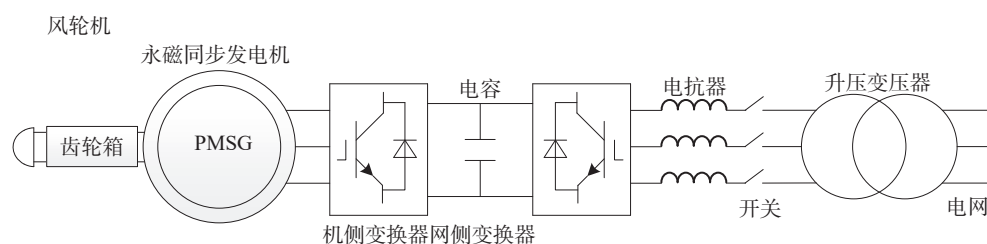


图1 永磁半直驱式风电机组并网结构图

Fig. 1 Grid-connected structure of half-direct driven permanent magnet wind turbine

在弱电网环境下, 该系统因变流器的低惯量特性, 对频率波动的抑制能力显著下降, 同时高阻抗电网会放大功率波动对电压的影响, 增加了并网稳定性风险。当电网发生功率波动时, 由于变流器低惯量, 无法快速响应调节, 导致频率偏差迅速增大, 可能在短时间内超出允许范围。而高阻抗的弱电网使得风电机组输出功率变化时, 电压降明显增大, 进一步影响并网稳定性。因此, 海上风电机组并网系统的运行机理是分析其在弱电网环境下稳定性问题

在深入分析现有方法的基础上, 文章进一步聚焦于提升海上风电并网稳定性的关键技术。这些技术涵盖了柔性直流输电技术、无功补偿与电压控制技术、故障穿越能力的提升、宽频带振荡的监测与抑制, 以及基于大数据和机器学习的稳定性评估方法的应用。通过这些技术的发展和实际应用, 为增强海上风电并网稳定性提供了切实可行的解决方案, 有力地推动了海上风电产业的高质量发展。最后, 文章对关键内容进行了精炼地总结, 并对未来海上风电并网稳定性分析方法的研究方向进行了前瞻性展望。

1 弱电网下海上风电并网稳定性特征与挑战

1.1 海上风电并网系统及弱电网对其稳定性的影响

典型的永磁半直驱式风电机组并网结构主要由风轮机、齿轮箱、永磁同步发电机、定转子侧变流器以及控制系统组成, 如图1所示。当风轮叶片捕获到风力并开始旋转时, 它会通过机械连接直接驱动电机。风轮的转速接近电机的理想同步转速, 这使得电机能够高效地利用风能来产生电力。永磁同步电机则通过磁场与电流的相互作用, 产生电磁力矩, 使转子和定能够同步旋转, 进而实现电能的转换。而控制系统则负责持续监测和调整电机的工作状态, 以确保其始终在最佳状态下运行。

的基础, 与后续探讨的稳定性特征和挑战紧密相关。

1.2 弱电网的定义与特征

在海上风电日益发展的进程中, 弱电网环境下的海上风电并网稳定性问题愈发凸显, 成为电力领域研究的重点。在弱电网环境下, 海上风电并网的稳定性问题呈现出同步失稳、宽频振荡、暂态电压波动等一系列典型特征。这些问题的核心挑战源于电力电子设备的低惯量特性以及弱电网本身的高阻抗特性。

1.2.1 弱电网的定义

当电网的短路容量比所接入的电源容量比较小时, 或者电网的电气距离较远、线路阻抗较大, 导致电网对功率变化的调节能力较弱, 这类电网可被视为弱电网^[18-19]。在海上风电并网的情境中, 远离陆地的海上风电场周边的电网往往因输电线路长、电网结构相对薄弱等因素, 呈现出弱电网特性。

1.2.2 弱电网的特征及引发的稳定性问题

弱电网具有较低的短路容量、较高的等效阻抗以及较弱的电压和频率支撑能力。在海上风电并网场景中, 由于输电距离长、线路参数大, 并网点的强度较低, 故容易受到海上风电输出功率波动的影响。弱电网海上风电的主要特征及引发的稳定性问题如下:

1) 线路阻抗大与暂态电压波动

海上风电场远离陆地, 与陆上电网的连接线路长, 导致电网的等效阻抗显著增大。当海上风电场附近发生短路故障, 产生故障电流时, 由于线路阻抗大, 从风电场到并网点之间的电压降会急剧增加, 可能导致并网点的电压大幅下降, 引发暂态电压波动^[20-21]。严重影响电网的正常运行, 甚至可能引发连锁反应, 影响到更多区域的电力供应。

2) 无功功率特性突出与电压稳定性问题

远距离铺设的海底电缆具有较大的电容效应, 在稳态运行过程中, 这种电容效应会产生容性无功功率, 过大的容性无功功率容易引发工频过电压现象。而当风电场输出功率发生变化时, 为了维持电网电压的稳定, 又需要大量的无功功率进行调节。海上风电输出功率的变化往往具有随机性和快速性, 要求无功功率补偿装置能够迅速做出响应。但实际情况是, 弱电网下的无功功率补偿设备在响应速度、调节范围等方面存在一定局限性, 这大大增加了无功功率补偿和调节的难度, 进而影响电压稳定性^[22]。

3) 谐波特性复杂与电能质量问题

海上风电系统中广泛应用了众多电力电子设备, 如变流器、柔性直流输电设备等。这些设备在实现电能转换和传输的过程中会产生一系列的谐波电流。在弱电网条件下, 电网自身的抗干扰能力较弱, 谐波电流容易引发电网谐波畸变, 影响电能质量^[23]。谐波畸变会使电气设备损耗增加、缩短设备使用寿命, 还可能干扰通信系统, 影响其正常运行。不仅

如此, 谐波电流在电网中传播时, 还可能会与其他电气设备产生谐振, 进一步放大谐波危害, 严重威胁电网的安全稳定运行。

4) 惯量和阻尼特性不足与振荡失稳

在电力系统中, 惯量主要用于抑制频率变化。海上风电功率出现波动性和间歇性变化时, 由于弱电网的有效惯量小, 难以抑制这种频率变化。同时, 弱电网的阻尼转矩较小, 使得系统在受到扰动后, 容易引发低频振荡等同步失稳问题。当海上风电功率突然发生较大变化时, 弱电网无法迅速有效地抑制由此产生的频率波动, 可能导致系统频率在一定范围内持续振荡, 甚至引发系统崩溃^[24]。

1.3 面临的挑战

在弱电网环境下, 海上风电并网面临着涉及多个关键领域的一系列严峻挑战, 严重制约着海上风电的可持续发展。

1) 并网稳定性挑战

海上风电的间歇性和波动性使得并网功率极不稳定, 随时可能引发弱电网的一系列问题。一方面, 当海上风电功率突然增大或减小时, 电网中的无功功率分布会发生变化, 进而引起电压波动。另一方面, 由于弱电网的调节能力有限, 难以快速平衡功率变化, 容易导致系统频率偏离额定值。更为严重的是, 功角失稳问题可能会出现。功角失稳意味着发电机之间的同步运行遭到破坏, 可能引发大面积停电事故, 对社会经济造成巨大损失。在海风突然增强或减弱的时段, 风电机组的输出功率会迅速变化, 这对弱电网的电压、频率和功角稳定性都构成了极大的威胁。

2) 控制策略挑战

当海上风电系统呈现弱电网状态时, 传统控制策略面临着巨大的挑战。传统的功率控制策略可能无法快速适应海上风电功率的剧烈变化, 导致电网电压和频率出现较大波动。因此, 为了确保海上风电系统在弱电网环境下能够稳定运行, 迫切需要对控制策略进行优化和改进。这就需要科研人员深入研究弱电网的特性, 结合先进的控制理论和技术, 开发出更加智能、灵活的控制策略, 以适应弱电网的特殊需求。

3) 无功补偿与电压控制挑战

在弱电网环境下, 无功功率的传输和分配受到

诸多限制, 在无功功率平衡方面面临着巨大的困难。同时, 电压控制难度也极大, 微小的功率变化都可能导致电压出现较大幅度的波动。海上风电系统虽然具备一定的无功功率调节能力, 但无法应对弱电网大量且复杂的无功需求。为了维持电压稳定, 必须采取有效的无功补偿措施。例如, 需要合理配置静止无功补偿器 (SVC)、静止同步补偿器 (STATCOM) 等无功补偿装置, 并精确控制它们的投入和退出时机。另外, 在实际应用中, 这些无功补偿装置的性能和调节效果受到多种因素的影响, 如装置的响应速度、调节范围以及与电网的兼容性等。因此, 如何优化无功补偿方案, 提高电压控制的精度和可靠性, 是当前面临的一个重要问题。

4) 故障穿越挑战

在弱电网环境下, 电网故障时的电压暂降或暂升现象比在强电网中更为严重。这是由于弱电网的电压支撑能力较弱, 在故障发生时, 无法迅速有效地维持电压稳定。这种大幅电压变化对海上风电机组的故障穿越能力提出了更高的要求。海上风电机组在电网故障时, 不仅要能够保持与电网的连接, 不脱网运行, 还要能够在故障消除后迅速恢复到正常运行状态, 继续稳定地向电网输送电能。当电网发生短路故障时, 电压可能会瞬间大幅下降, 风电机组需要具备足够的低电压穿越能力, 通过合理的控制策略调整自身运行状态, 避免因电压过低而跳闸。同时, 在故障恢复过程中, 也要能够快速适应电压的回升, 确保系统的稳定运行。这需要风电机组制造商不断改进技术, 提高风电机组的故障穿越性能, 以满足弱电网环境下的严格要求。

2 弱电网下海上风电并网稳定性分析方法

2.1 阻抗模型法

阻抗模型法是将海上风电系统及其并网设备视为电路元件, 建立其阻抗模型, 通过分析阻抗的频率特性、幅值和相位等来判断系统的稳定性^[25-27]。该方法源自电路理论, 通过定义电压与电流的复数比值 ($Z=U/I$) 描述系统对外部激励的响应特性。这一基本概念为阻抗模型法奠定了坚实的理论基石^[28-30]。随着电力系统的不断发展与变革, 尤其是电力电子设备在其中的广泛应用, 该方法在电力系统领域得到了深度拓展。目前已发展成用于分析电

力电子设备与电网交互稳定性的专门工具。

根据所采用坐标系的不同, 阻抗模型又可进一步细分为两种类型, 一种是旋转坐标系下用于动态分析的 $d-q$ 阻抗模型, 这种模型在处理系统动态变化过程中展现出独特的优势; 另一种则是静止坐标系下基于对称分量分析的序阻抗模型, 它在某些特定场景下能够更清晰地揭示系统的内在特性。

对于海上风电并网系统, 阻抗建模方法将并网逆变器与交流电网视为两个相互独立的子系统。基于各自的控制策略与参数特性, 分别建立相应的阻抗模型。在获取阻抗模型后, 用线性网络表示该交互系统的等效电路, 如图 2 所示。

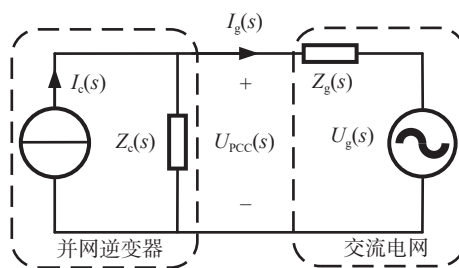


图 2 逆变器并网等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of grid-connected converter

图 2 中, $I_c(s)$ 和 $Z_c(s)$ 分别为并网逆变器理想电流源和等效阻抗, $Z_g(s)$ 和 $U_g(s)$ 分别为交流电网等效阻抗和理想电压源, $U_{PCC}(s)$ 为并网电压, $I_g(s)$ 为并网电流, 并网电流 $I_g(s)$ 的表达式如下所示:

$$I_g(s) = \left[I_c(s) - \frac{U_g(s)}{Z_c(s)} \right] \cdot \frac{1}{1 + Z_g(s)/Z_c(s)} \quad (1)$$

其中, $Z_c(s)$ 反映了逆变器对外部电路呈现的动态阻抗特性, 而 $Z_g(s)$ 则表征了电网对电流变化的阻碍能力。两者的比值 $Z_g(s)/Z_c(s)$ 构建了系统的开环传递函数, 其在复平面上的零极点分布特性直接决定了系统闭环后的稳定性。根据控制理论中的 Nyquist 稳定判据, 系统闭环稳定性可通过分析开环传递函数的频率响应特性来判断。

阻抗模型法通过频域阻抗特性直接计算稳定裕度, 适用于复杂电力电子系统的多场景分析。可定位负电阻贡献源, 明确控制参数对稳定性的影响规律。适合分析高频谐振、次同步振荡等问题, 能清晰呈现各元件阻抗特性对系统稳定性的影响。但对于多端系统和多种控制策略耦合的情况, 建模和分析较为复杂, 且可能忽略部分动态特性。文献 [31]

考虑到设备间频率交互效应这一因素，建立了海上风电系统的阻抗网络模型。通过对聚合阻抗频率特性的深入分析，能够准确判断次/超同步振荡风险。在研究过程中，研究人员还分析了机组数量与电网强度等因素对振荡的具体影响，为进一步理解和解决此类问题提供了宝贵的参考依据。文献 [32] 针对模块化多电平换流器（MMC）复杂的动态特性，采用谐波状态空间（HSS）理论，经过推导得出了计及频率耦合的等效阻抗模型，提升了在高频段分析的准确性，为解决相关高频问题提供了更为有效的手段。这些研究成果不仅丰富了阻抗模型法在海上风电领域的应用案例，也为后续研究提供了重要的借鉴和启示。

2.2 特征值分析法

特征值分析法是一种基于系统状态空间模型的小信号稳定性分析方法，通过求解系统动态方程的特征值及其参与因子，识别主导振荡模式并评估阻尼特性。该方法以线性化后的微分-代数方程组为基础，将系统动态行为转化为状态矩阵的特征值问题。每个特征值对应一个振荡模式，其实部反映阻尼特性（正值为发散，负值为收敛），虚部对应振荡频率。通过参与因子分析可定位主导振荡模式对应的物理设备或控制环节，为稳定性优化提供依据^[33]。特征值分析法通过参与因子可明确各状态变量对振荡模式的贡献度，并对比控制器投入前后的特征值变化（如阻尼比提升），量化控制效果。而且能覆盖次同步、超同步、低频振荡全频段分析，适应海上风电多样化并网方式（交流、柔直、混合）。但仅适用于小扰动分析，无法捕捉大扰动暂态过程，且计算复杂高维矩阵时易出现数值稳定性问题。

在弱电网运行工况下，针对海上风电并网系统的稳定性分析，可通过状态空间理论体系构建其对应的数学模型。该系统满足如下状态空间表达式：

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中， $\mathbf{x}(t)$ 为 n 维状态变量向量，涵盖电容电压、电感电流、控制环节状态变量等关键参数； $\mathbf{u}(t)$ 为 m 维输入变量向量，包括风机机械转矩激励、电网电压波动等外部扰动因素等； $\mathbf{y}(t)$ 为 p 维输出变量向量，如并网点电压幅值相位、注入电网电流矢量等关键监测变量。 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{D} 分别为对应维

数的系数矩阵，其元素通过考虑弱电网的低短路比特性、海上风电变流器的控制策略以及线路参数等因素确定。根据线性系统理论，系统的稳定性由矩阵 \mathbf{A} 的特征值决定，对该状态空间方程进行拉普拉斯变换后，通过求解特征方程 $|\lambda\mathbf{I} - \mathbf{A}| = 0$ ，得到的 λ 即为系统特征值。这些特征值的实部和虚部分别反映系统的阻尼特性和振荡频率，是评估系统稳定性的关键指标。

在相关研究中，许多学者针对不同的海上风电并网系统，运用特征值分析法取得了一系列有价值的成果。文献 [34] 聚焦于风电经柔直并网系统展开研究。通过特征值分析法，成功识别出风场-柔直-柔直-交流系统等主导振荡模式。在 VSC-HVDC 系统中，研究人员发现风电机组与换流器控制之间的交互作用会引发次同步振荡（SSO）。为了深入了解这一现象并寻求解决方案，研究人员进一步通过根轨迹分析关键参数对电气阻尼的影响，为解决此类振荡问题提供了理论依据。文献 [35] 揭示了海上风电系统中存在的跨频段耦合现象。研究发现，高频振荡（>100 Hz）与海缆参数密切相关，而中低频振荡则主要受变流器控制的影响。基于此，研究人员提出需要建立多尺度联合分析框架，以便更全面、深入地研究和解决海上风电系统的稳定性问题。这些研究成果不仅丰富了特征值分析法在海上风电领域的应用案例，也为后续研究指明了方向。

2.3 时域仿真法

在海上风电并网稳定性研究的众多方法中，时域仿真法占据着不可或缺的重要地位。与频域分析法不同，时域仿真法是一种通过建立包含风力发电机组、电力电子装置及电网元件的等值模型，在电磁暂态仿真软件中采用数值积分方法求解并网系统动态特性微分方程组的技术。通过一系列的建模仿真计算，该方法能够获取系统中变量随时间变化的响应曲线，为我们分析系统动态特性提供了更直观的信息。尤其是在研究次同步振荡（SSO）这类复杂的暂态过程时，时域仿真法展现出了独特的优势^[36-40]。

时域仿真法具有诸多显著优点。首先，它支持非线性设备暂态过程的模拟。可以深入分析不同强度扰动下的次同步振荡特性，并且能够精确计算次同步等效电抗、复转矩系数等关键的参数。其次，

该方法具有高精度与直观性的特点。它能够直接输出时域波形,直观反映系统参量变化轨迹,适用于验证其他分析方法(如频域分析)的结论,为研究结果的准确性提供了有力保障。此外,时域仿真法还能够复现实际故障与控制过程,如短路比变化、SVG(静止无功发生器)动态补偿等情况对系统稳定性的影响。然而,时域仿真法也并非完美。一方面,该方法在机理分析方面存在一定不足。它虽然能够呈现系统的动态变化过程,但难以直接揭示振荡模式、阻尼特性以及这些现象背后的产生机理。因此,在实际研究中,往往需要结合频域分析等其他手段,以获得更全面深入的理解。另一方面,时域仿真法的计算效率相对较低。在面对大规模风电场的全模型仿真时,由于计算机内存和计算时间的限制,仿真过程可能会变得十分耗时费力。为了克服这一问题,通常需要依赖等值简化方法,但这在一定程度上可能会影响结果的准确性。此外,时域仿真法结果的准确性高度依赖模型构建的质量。如果模型参数存在误差或者采用了不合理的简化假设,都可能对最终结论的可靠性产生不利影响。

时域仿真法在海上风电并网领域取得了丰硕的成果,在研究次/超同步振荡问题时,文献[41]巧妙地将时域仿真与状态空间模型相结合,通过深入分析,清晰地揭示了SVG控制参数、风电机组电流环增益对振荡模式的具体影响,为进一步优化控制策略提供了重要依据。文献[42]则聚焦于MMC-HVDC并网系统,利用时域仿真法验证了零序环流控制器参数优化方案的有效性。该文献还深入分析了次同步电流传播机制,为解决此类并网系统中的稳定性问题提供了宝贵的见解。这些研究成果充分展示了时域仿真法在海上风电并网稳定性研究中的重要价值,也为后续研究提供了有益的参考和借鉴。

2.4 数据驱动建模法

在当前并网稳定性的研究领域中,数据驱动建模法作为一股新力量,为该领域带来了全新的思路与方法。它摒弃了传统依赖物理建模的常规路径,建立了一条基于实际运行数据开展研究的技术路线。其核心是通过挖掘风电场运行中的动态特性与电网参数之间的非线性关系,建立反映系统稳定边界的数学模型。相比传统基于物理方程的建模方法,数据驱动法在应对复杂多变的海上环境、多设备耦合

特性及控制策略差异等问题时具有显著优势。

海上风电并网系统的运行环境和工况极为复杂,不同时段、不同季节的风况和海况等都各有差异。而数据驱动建模法具有适应性强,灵活性高的特点,能够从容应对这一复杂局面。它能够依据不同时期、不同工况下收集到的数据进行针对性的训练与建模。通过这种方式,数据驱动建模法能够迅速适应系统的动态变化,及时更新模型,精准呈现系统的最新特性,从而完美契合不同场景下稳定性分析的多样化需求。

数据驱动建模法还具备良好的实时性,在海上风电并网系统持续运行的过程中,源源不断地会有新数据产生,数据驱动建模法能够在短时间内对这些新采集的数据进行高效处理与分析,并快速给出稳定性评估结果。借助及时的评估结果,运维人员可以敏锐察觉潜在的稳定性问题,并迅速制定相应的控制措施,确保系统始终稳定运行。另外,采用数据驱动建模法能够便捷地整合来自不同传感器、监测设备以及历史记录等多渠道的丰富数据资源。无论是安装在风机叶片上的风速传感器所采集的数据,还是电网监测设备记录的电压、电流数据,亦或是长期积累的历史运行记录,都能被充分利用起来。通过对这些多元数据的综合运用,极大地提高了建模的准确性和全面性,进而显著提升了稳定性分析的可靠性,为海上风电并网系统的稳定运行提供了坚实的数据支撑。

但数据驱动建模法的实际效果在很大程度上受制于数据的质量和数量。如果数据存在缺失、噪声、异常值等问题,就无法全面覆盖海上风电并网系统的各种运行工况和状态。而且,该方法的泛化能力有限,当并网系统出现超出训练数据范围的工况时,基于历史数据训练得到的数据驱动模型可能无法准确预测系统的稳定性。

文献[43]将动态参数等效与数据驱动模型相结合,首先运用动态参数等效方法,将多风电场电力系统线性化模型转化为单机聚合系统,解决参数未知情况下的模型降阶问题。随后利用机器学习方法建立了振荡稳定性评估的数据驱动模型。最后结合联合分布适应算法进行离线训练,将模型的在线计算任务转移到离线训练。通过这种方式,不仅减轻了模型在线运行时的计算负担,还大大提高了模

型的泛化能力和适应性,使其能够更好地应对复杂多变的实际情况。文献 [44] 应用了混合驱动方法,在数据驱动法的基础上引入物理模型,由于数据驱动模型有时会呈现出“黑箱”特性,导致结果存在一定的不确定性。该文献通过引入物理模型,修正数据“黑箱”结果,提高预测的准确性和可靠性。具体而言,采用基于数据和模型驱动融合的方法,通过量化极限学习机 (ELM) 方法输出的不可靠水平,再使用 P - δ 拟合方法对不可靠结果进行纠正,提高在线预测的准确性。海上风电并网稳定性问题的各种分析方法的优劣及局限性对比如表 1 所示。

3 弱电网下海上风电并网稳定性的关键技术

3.1 柔性直流输电技术

柔性直流输电技术是一种基于电压源型换流器 (VSC) 的新型高压直流输电方式,其基本原理是通过全控型电力电子器件 (如 IGBT 或 IGCT) 实现

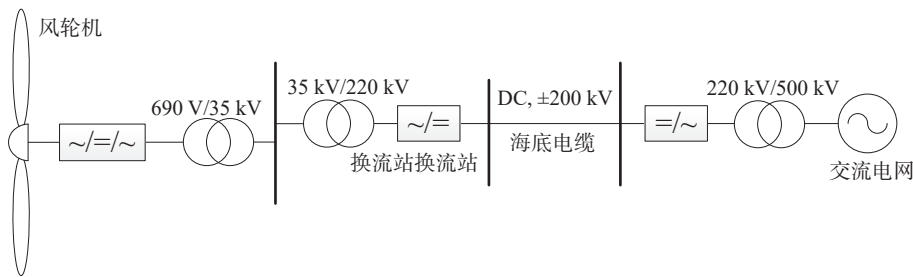


图 3 海上风电柔性直流输电系统

Fig. 3 Offshore wind power flexible DC transmission system

柔性直流输电系统能够实现有功和无功功率的独立解耦控制,无需像传统交流输电那样依赖交流电网来提供无功支持。这种独立性使得柔性直流输电系统在新能源并网方面表现出色。海上风电场通常远离陆地负荷中心,接入电网面临诸多挑战。而柔性直流输电系统凭借其有功和无功功率的独立控制能力,能够高效、稳定地将海上风电输送到陆地电网,大大提高了新能源的消纳效率。这使得其在新能源并网、孤岛供电及多端系统中具有显著优势。在长距离输电方面,柔性直流输电系统也展现出了巨大的潜力。传统的交流输电过程中存在着容性电流和感性电流,这些电流会导致电能传输过程中产生较大的损耗。而柔性直流输电系统则不存在这一问题,由于直流输电的特性,其在长距离输电中

表 1 海上风电并网稳定性问题的分析方法对比

Tab. 1 Comparison of analytical methods for offshore wind grid stability problems

域	方法	优势	局限性
频域	阻抗模型法	快速稳定性判别; 机理明确	无法直接揭示振荡机理; 难以处理高频非线性效应
	特征值分析法	精准定位; 多场景适用; 振荡模式分析	仅适用于小扰动分析; 高维矩阵计算复杂
	时域仿真法	适用性广; 高精度, 直观; 复杂场景模拟	机理分析不足; 计算效率低; 高度依赖模型
	数据驱动建模法	高效处理复杂数据关系; 适应性强, 灵活性高; 实时性好; 易于集成多源数据	数据质量和数量要求高; 泛化能力有限; 模型开发和维护成本高

对电压、电流和功率的精确控制,从而灵活调节输电系统的有功和无功功率^[45-46]。海上风电柔性直流输电系统如图 3 所示。在现代电力传输领域,柔性直流输电系统以其独特的技术优势和卓越性能,逐渐成为推动电力行业发展的关键力量。

损耗更低。这一特性使得它特别适合于远距离、大容量的电力传输项目。

柔性直流输电系统还具备快速响应能力,它能够在短时间内精准调节功率输出,迅速适应电网需求的动态变化。当电网某一区域出现用电高峰时,柔性直流输电系统可以快速增加输送功率,确保该区域的电力供应稳定;而在用电低谷期,又能及时减少功率输出,避免能源浪费。另外,柔性直流输电系统在谐波控制方面也有着出色的表现^[47]。由于该系统采用了高开关频率的全控型器件和先进的脉宽调制技术,其产生的谐波含量极低。这意味着在实际应用中,滤波装置的容量可以大大减小,甚至在某些情况下,根据具体的系统要求和运行环境,可不配置滤波器。这不仅降低了系统的建设成本和

维护难度, 还减少了占地面积, 提高了系统的整体经济性和实用性。

文献 [48] 基于现有直流换流器控制架构, 提出控制自由度的概念, 构建模块化多电平换流器的多自由度控制体系, 系统地揭示了现有 MMC 换流器的各种控制策略之间的关联性。文献 [49] 通过谐波状态空间法建立了 MMC 的频域小信号阻抗模型, 然后, 利用交流电网的等效阻抗与换流器等值阻抗特性曲线对交直流系统的宽频振荡机理和系统稳定性进行了分析, 并提出了交直流系统稳定性改善的措施。柔性直流输电系统凭借其在功率控制、长距离输电、快速响应、供电适应性以及谐波控制等多方面的优势, 为现代电力系统的发展注入了新的活力, 在未来的能源格局中将发挥越来越重要的作用。

3.2 无功补偿与电压控制技术

海上风电并网稳定性中, 无功补偿技术的核心目标在于通过精准调节风电场的无功功率输出, 全力维持并网点电压的稳定性以及整个电网的稳定运行。在风电场的发电进程中, 无功功率的流动是一个不可忽视的现象。风电场会根据自身运行状态吸收或输出无功功率, 这种无功功率的动态变化看似无形, 却对电网产生着深刻的影响。无功功率的流动会不可避免地导致电压偏移现象的出现, 从而影响电网的稳定性和效率。

风电机组自身通常具备一定的无功调节能力, 这为维持电网的稳定提供了第一道防线。然而, 仅依靠风电机组自身的调节能力往往是不够的。为了更有效地满足并网点电压的严格要求, 风电场还会安装一系列无功补偿装置, 通过吸收或发出无功功率, 巧妙地减少系统内的无功流动, 减少无功流动能够显著降低网损, 提高供电效率, 让电力资源得到更充分、更有效的利用。表 2 整理了现有的主流无功补偿装置, 并总结了各自的优缺点。

为了实现最优的无功补偿效果, 风电场需要根据实际运行状态和电网的实时需求, 动态调整无功补偿装置的容量和运行模式。在这个过程中, 仿真模型发挥着重要的辅助作用。通过构建精确的仿真模型, 风电场可以深入分析不同运行条件下的无功需求情况。基于仿真分析的结果, 风电场能够科学地优化补偿装置的配置, 确保每个装置都能在最合适的位置、以最恰当的方式发挥作用。此外, 充分

表 2 无功补偿装置性能对比

Tab. 2 Comparison of reactive power compensation device performance

无功补偿装置	优点	缺点
并联电容器	结构简单、安装方便、成本较低, 适用于补偿感性无功功率	响应速度慢, 容易产生谐振和过补偿问题
静止无功补偿器	响应速度快 (40~60 ms), 调节范围广, 适用于动态无功补偿, 成本低, 可靠性高	损耗较大, 谐波较多, 占地面积较大
静止同步补偿器	响应速度快 (<5 ms), 动态补偿精度高, 谐波污染少, 适用于电压质量要求高的场合	初期投资成本较高, 单位容量成本高于 SVC
静止无功发生器	响应速度快, 动态调节能力强, 适用于快速变化的负载条件, 模块化设计支持灵活扩容	初期投资较高, 维护成本相对较高
有源滤波器	能够实时滤除谐波, 补偿范围广, 动态响应时间 ≤ 10 ms	成本较高, 适用于特定谐波治理场景
同步调相机	平滑调节电压, 适用于大容量集中无功补偿	运行维护复杂, 有功损耗较大

结合风电机组自身的无功调节能力也是一个重要策略。这样不仅可以提高无功补偿的整体效果, 还能在一定程度上减少对传统补偿装置的依赖, 降低运营成本。

传统固定权重多, 目标无功优化无法应对新型电力系统复杂多变工况的问题, 文献 [50] 提出了一种自适应多目标无功优化控制的策略, 该策略可以动态调整权重系数, 在电压越限时优先稳压, 安全范围内优先降损, 优化效果优于固定权重策略。文献 [51] 提出了一种用于大规模海上风电并网时电压源换流器型多端直流 (VSC-MTDC) 输电系统的协调控制策略, 改进直流电压-有功功率调节特性, 实现多端直流系统的功率分配与故障穿越。

3.3 故障穿越能力提升

故障穿越能力是海上风电机组在电网电压或频率异常时保持并网运行并主动支撑电网恢复的关键能力, 包括低电压穿越、高电压穿越和频率穿越。通常要求当并网点电压跌落至 20% 标称电压时, 机组需保持并网至少 625 ms; 在电压恢复阶段 (3 s 内恢复至 90% 额定电压) 需维持稳定运行^[52]。故障穿越能力是海上风电接入电网的“准入门槛”, 能够防止因设备脱网引发的电网崩溃, 是电网安全的“防火墙”。

近年来, 海上风电故障穿越能力的提升主要集

中在发电机和变流器的硬件技术改进以及软件控制策略优化。文献 [53] 提出一种多频率三端口模块化多电平换流器, 新型拓扑如三端口 MMC (M3C) 通过优化子模块电容电压控制, 无需额外卸荷电路即可实现故障穿越, 同时支持多频率输电场景。文献 [54] 针对高盐雾环境导致的桥臂故障, 采用容错型模型预测控制策略, 通过功率预测和无功补偿扩展可控区域, 提升低电压穿越能力。文献 [55] 针对大规模风电场经柔性直流输电并网系统的直流线路故障工况, 提出利用风场现有分散储能实现风电柔直并网直流故障穿越协调控制, 利用风电场内分散配置的储能系统, 该策略能够保持系统在故障期间并网运行且不出现闭锁、过载等问题, 提升系统的稳定性。文献 [56] 提出一种基于模型预测控制的风电场故障穿越有功无功优化控制策略, 基于实时电压波动预测, 优化有功/无功功率输出, 有效抑制了端电压波动, 提升了风电场的故障穿越能力。

通过故障穿越能力, 风电机组不仅能够避免大规模脱网, 还能在故障期间为电网提供支撑, 帮助电网快速恢复。随着风电渗透率的提高, 故障穿越能力成为确保大规模风电并网稳定运行的关键技术。

3.4 宽频带振荡监测与抑制

宽频带振荡监测与抑制技术是解决新能源发电系统中宽频带振荡问题的重要手段, 其核心目标是通过传感器、数据采集系统、信号处理模块等测量技术检测识别定位到系统中发生振荡的信号, 并通过优化控制策略、算法以及设备参数来削弱或消除系统的负阻尼特性, 从而降低宽频带振荡风险。

宽频带振荡监测与抑制技术是保障海上风电大规模、安全并网的关键技术。该技术能够精确地捕捉和分析振荡信号, 快速识别振荡的频率、幅值和相位等特征, 为及时采取抑制措施提供依据。部分抑制技术, 能够根据系统的实时运行状态和振荡特征自动调整控制参数, 适应宽频振荡的幅频时变和多模态特征, 提高抑制效果的可靠性和有效性。抑制技术涵盖了附加控制环节、改变控制器结构、附加装置等多种方式, 可针对不同的海上风电并网场景、振荡类型和系统条件灵活选择和应用, 同时也可多种技术相结合, 实现更好地抑制。

基于阻抗的频域分析是当前主流方法。通过建

立风电机组、换流器及电网的阻抗模型, 可量化系统在不同频段的稳定性裕度。文献 [57] 提出利用变流器控制环路的动态特性构建阻抗模型, 并结合奈奎斯特判据评估系统稳定性。实际工程中, 高频谐波阻抗测量装置已应用于白鹤滩—江苏特高压直流工程, 用于实时监测电网阻抗特性。基于人工智能的优化方法解决电力系统的宽频振荡问题也是当前的研究热点, 利用人工智能算法 (如 MFO、PSO、Q-learning 等) 优化电网模型中的参数, 从而调整控制信号以抑制宽频振荡。文献 [58] 和文献 [59] 探讨了人工智能技术在宽频振荡的辨识、振荡源定位与抑制方法 3 个研究领域面临的样本完整性、方法可迁移性和鲁棒性、广域互联系统中的算法收敛性等方面挑战。

4 未来展望

1) 智能监测与数据分析技术的深度融合

随着智能传感器技术、大数据分析技术以及人工智能算法的不断发展, 将其深度融合应用于海上风电并网稳定性监测与分析将成为未来的发展趋势。通过在海上风电场部署大量的智能传感器, 实时采集风电机组、变流器、电网等设备的运行数据。利用大数据分析平台对海量数据进行存储、清洗、挖掘和分析, 结合机器学习算法 (如深度学习、支持向量机等) 构建海上风电并网稳定性的智能评估模型^[60]。这些模型能够自动识别系统运行状态的异常变化, 提前预警潜在的稳定性问题, 并为控制策略的优化调整提供数据支持。

2) 多源互补与综合能源系统的构建

未来海上风电将与太阳能发电、海洋能发电等多种可再生能源形式以及储能系统深度融合, 构建多源互补的综合能源系统^[61]。通过优化不同能源之间的出力协调控制, 平抑可再生能源的间歇性和波动性特性, 提高综合能源系统的并网稳定性。在弱电网条件下, 综合能源系统能够更好地适应电网的动态变化, 实现能源的高效利用和稳定供应。此外, 综合能源系统还能够通过灵活的能源转换和存储环节, 为电网提供多种辅助服务 (如调频、调压等), 增强电网的稳定性和可靠性。

3) 基于人工智能的自适应控制技术

人工智能技术在海上风电并网稳定性控制领域

将发挥越来越重要的作用。研究基于强化学习、深度强化学习等人工智能算法的自适应控制技术,使海上风电并网控制系统能够根据实时运行环境和系统状态自动学习和调整控制策略^[62-63]。例如,利用强化学习算法训练智能控制器,使其在面对弱电网的复杂变化时,能够自主决策最优的控制动作,实现对并网电压、功率的精准控制和稳定调节。这种自适应控制技术将大大提高海上风电并网系统的智能化水平和稳定性性能。

4) 海上风电并网的国际标准与规范制定

随着海上风电产业的全球化发展,制定统一的海上风电并网国际标准与规范显得日益重要。国际电工委员会(IEC)、国际标准化组织(ISO)等国际组织以及各国政府和行业协会将加强合作,共同推动海上风电并网标准的制定工作。这些标准将涵盖海上风电系统的建模、控制、测试、故障穿越等方面的技术要求,为海上风电并网设备的研发、生产、安装和运行提供统一的指导准则。通过遵循国际标准与规范,能够提高海上风电并网系统的兼容性和互操作性,促进海上风电产业的健康、可持续发展。

5 结论

在全球能源转型与“碳中和”目标驱动下,海上风电作为关键的可再生能源形式,其在弱电网环境下的并网稳定性问题已成为制约其大规模发展的核心瓶颈。本文通过系统梳理与深入剖析,归纳了当前主流的稳定性分析方法与关键技术,旨在为应对同步失稳、宽频振荡、电压波动等挑战提供理论依据和实践指导。

本文首先对比分析了弱电网下并网稳定性的分析方法及其解决的问题,明确了所探讨的4类分析方法各有适用场景:阻抗模型法通过频域特性解析,能够精准定位高频谐振与次/超同步振荡的根源,为控制器参数优化提供量化依据;特征值分析法聚焦小扰动稳定性,可识别多并网方式下的主导振荡模式,为系统拓扑设计提供支撑;时域仿真法擅长复现大扰动下的非线性暂态过程,为故障穿越策略验证提供了直观工具;数据驱动建模法则通过挖掘运行数据规律,实现稳定性的实时监测与预警,弥补了传统方法在复杂系统中的局限性。这4类方法

协同应用,形成了覆盖不同扰动规模、不同分析维度的完整技术体系。然后,针对弱电网带来的支撑能力不足、电压波动、故障冲击等挑战,本文阐述的关键技术形成了系统性解决方案:柔性直流输电技术通过功率解耦控制,突破了远海风电大容量外送瓶颈,缓解了弱电网的电压支撑压力;无功补偿与电压控制技术通过机网协同策略,平抑了功率波动与长海缆电容效应引发的电压波动,提升了系统电压稳定性;故障穿越技术通过硬软协同设计,实现了风电场从“被动适应”到“主动支撑”的转变,保障了电网故障时的连续运行;宽频带振荡抑制技术通过实时监测与自适应控制,有效应对了高比例电力电子设备接入引发的新型振荡风险。最后,给出应用策略和优化建议。在实际应用中,应遵循“场景适配、技术协同”原则:规划阶段采用特征值分析法与阻抗模型法组合,识别潜在风险并优化系统架构;运行阶段结合时域仿真与数据驱动方法,实现动态监测与控制决策。技术选型上,远海大型风场优先采用柔性直流输电技术,并配套动态无功补偿装置;近海风场可侧重提升风电机组自身无功调节能力与故障穿越性能。未来需重点推进3个方面优化:(1)构建多方法融合的智能分析平台,提升复杂场景下的问题诊断效率;(2)开发基于数字孪生的虚实交互验证系统,加速技术迭代;(3)完善跨区域并网标准体系,推动技术规模化应用。

弱电网下海上风电并网的稳定性是一个多维度、多技术的系统性工程。通过对分析方法的综合运用和关键技术的协同优化,可以有效应对当前面临的挑战。展望未来,随着智能监测、人工智能、综合能源系统以及国际标准的不断发展与深度融合,海上风电并网的稳定性与可靠性将得到持续提升,为构建清洁低碳、安全高效的全球能源体系提供坚实的技术支撑,在全球能源转型和实现“碳中和”目标的征程中贡献关键力量。

参考文献:

- [1] 卢睿,熊小伏,陈红州.考虑台风时空特性的海上风电场群协同紧急防御策略[J].电力系统保护与控制,2024,52(12):13-24. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231428.
LU R, XIONG X F, CHEN H Z. Collaborative emergency defense strategy for offshore wind farm clusters considering

- thespatial-temporal characteristics of a typhoon [J]. *Power system protection and control*, 2024, 52(12): 13-24. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231428.
- [2] 金子儿, 王子缘, 李亚杰, 等. 我国海上风电制氢产业发展现状、问题与展望 [J]. *南方能源建设*, 2025, 12(3): 33-41. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-231.
- JIN Z E, WANG Z Y, LI Y J, et al. Development status, problems and prospects of offshore wind hydrogen production industry in China [J]. *Southern energy construction*, 2025, 12(3): 33-41. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-231.
- [3] 成润婷, 张勇军, 李立涅, 等. 面向高比例可再生能源消纳的电力市场建设及研究进展 [J]. *中国工程科学*, 2023, 25(2): 89-99. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2023.02.011.
- CHENG R T, ZHANG Y J, LI L C, et al. Construction and research progress of electricity market for high-proportion renewable energy consumption [J]. *Strategic study of CAE*, 2023, 25(2): 89-99. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2023.02.011.
- [4] 刘中建, 周明, 李昭辉, 等. 高比例新能源电力系统的惯量控制技术研究与需求评估综述 [J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(12): 1-11, 53. DOI: 10.16081/j.epae.202107030.
- LIU Z J, ZHOU M, LI Z H, et al. Review of inertia control technology and requirement evaluation in renewable-dominant power system [J]. *Electric power automation equipment*, 2021, 41(12): 1-11, 53. DOI: 10.16081/j.epae.202107030.
- [5] 郭贤珊, 刘斌, 梅红明, 等. 渝鄂直流背靠背联网工程交直流系统谐振分析与抑制 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(20): 157-164. DOI: 10.7500/AEPS20200211008.
- GUO X S, LIU B, MEI H M, et al. Analysis and suppression of resonance between AC and DC systems in Chongqing-Hubei back-to-back HVDC project of China [J]. *Automation of electric power systems*, 2020, 44(20): 157-164. DOI: 10.7500/AEPS20200211008.
- [6] 刘乃皓, 高厚磊, 徐彬, 等. 基于电流变化量相似性的海上风电场交流送出线路纵联保护 [J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(9): 65-75. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221055.
- LIU N H, GAO H L, XU B, et al. Pilot protection for an AC transmission line of an offshore wind farm based on similarity of current variation [J]. *Power system protection and control*, 2023, 51(9): 65-75. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221055.
- [7] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(9): 2366-2372. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2016.09.007.
- XIE X R, LIU H K, HE J B, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(9): 2366-2372. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2016.09.007.
- [8] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示 [J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(21): 6183-6191. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.191632.
- SUN H D, XU T, GUO Q, et al. Analysis on blackout in great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(21): 6183-6191. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.191632.
- [9] 杜镇宇, 阳岳希, 季柯, 等. 张北柔直工程高频谐波振荡机理与抑制方法研究 [J]. *电网技术*, 2022, 46(8): 3066-3075. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1832.
- DU Z Y, YANG Y X, JI K, et al. High frequency harmonic resonance and suppression in Zhangbei project [J]. *Power system technology*, 2022, 46(8): 3066-3075. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1832.
- [10] 李逸欣, 吴伟杰, 张伊宁, 等. 大规模新能源接入的电力系统惯量缺失机理及惯量水平评估 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(5): 132-139. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.5.14.
- LI Y X, WU W J, ZHANG Y N, et al. Mechanism of inertia loss and evaluation of inertia level in power systems with large scale new energy access [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(5): 132-139. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.5.14.
- [11] 林建熙, 刘必成, 肖晃庆, 等. 大规模海上风电接入的受端电网频率特性 [J]. *广东电力*, 2023, 36(3): 23-31. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2023.03.003.
- LIN J X, LIU B C, XIAO H Q, et al. Frequency characteristics of receiving end power grid for large-scale offshore wind power access [J]. *Guangdong electric power*, 2023, 36(3): 23-31. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2023.03.003.
- [12] 肖红燕, 钟康骅, 樊玮, 等. 海上风电场并网点无功趋优控制区间整定 [J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(10): 23-32. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240917.
- XIAO H Y, ZHONG K H, FAN W, et al. Reactive power optimization control interval setting for offshore wind farm grid connection points [J]. *Power system protection and control*, 2025, 53(10): 23-32. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240917.
- [13] 孙均磊, 贾科, 李再男, 等. 基于故障分量时频突变特征的海上风电直流升压送出线路纵联保护 [J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(18): 1-11. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231531.
- SUN J L, JIA K, LI Z N, et al. Pilot protection for offshore wind power DC transmission lines based on the time-frequency mutation characteristics of fault components [J]. *Power system protection and control*, 2024, 52(18): 1-11. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231531.
- [14] 周党生, 陈佳明, 张东来, 等. 风电变流器在弱电网下的畸变问题和应对策略 [J]. *电力电子技术*, 2023, 57(12): 94-97, 108. DOI: 10.3969/j.issn.1000-100X.2023.12.024.
- ZHOU D S, CHEN J M, ZHANG D L, et al. Distortion problem in wind power converters under weak grid and corresponding strategy [J]. *Power electronics*, 2023, 57(12): 94-97, 108. DOI: 10.3969/j.issn.1000-100X.2023.12.024.

- [15] 汪云涛,张哲,汤皓环,等.海上直驱风电场弱连接时 LVRT 引发的次同步振荡机理与特性分析 [J]. *电网技术*, 2024, 48(7): 2902-2909. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0959](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0959).
WANG Y T, ZHANG Z, TANG H H, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by LVRT in offshore direct drive wind farm with weak connection [J]. *Power system technology*, 2024, 48(7): 2902-2909. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0959](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0959).
- [16] 樊昂,李录平,刘瑞,等.不同风速对单桩式海上风电机组塔筒动态特性的影响 [J]. *发电技术*, 2024, 45(2): 312-322. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.22153](https://doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.22153).
FAN A, LI L P, LIU R, et al. Research on dynamic characteristics of monopile offshore wind turbine tower under different wind speed conditions [J]. *Power generation technology*, 2024, 45(2): 312-322. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.22153](https://doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.22153).
- [17] 李志川,杨季平,孙兆恒,等.计及风电接入的海上油气田能源系统分层调控 [J]. *电力建设*, 2024, 45(3): 69-77. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2024.03.006](https://doi.org/10.12204/j.issn.1000-7229.2024.03.006).
LI Z C, YANG J P, SUN Z H, et al. Hierarchical control of offshore oil and gas platform energy system considering the integration of offshore wind power [J]. *Electric power construction*, 2024, 45(3): 69-77. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2024.03.006](https://doi.org/10.12204/j.issn.1000-7229.2024.03.006).
- [18] 孙华东,徐式蕴,许涛,等.新能源多场站短路比定义及指标 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(2): 497-505. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.202112](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.202112).
SUN H D, XU S Y, XU T, et al. Definition and index of short circuit ratio for multiple renewable energy stations [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(2): 497-505. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.202112](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.202112).
- [19] 李玉东,侯岩,李佩峰,等.弱电网下单相 LCL 并网逆变器改进电流控制策略 [J]. *电气工程学报*, 2025, 20(1): 119-130. DOI: [10.11985/2025.01.012](https://doi.org/10.11985/2025.01.012).
LI Y D, HOU Y, LI P F, et al. Improved current control strategy for single-phase LCL grid-connected inverter under weak grid [J]. *Journal of electrical engineering*, 2025, 20(1): 119-130. DOI: [10.11985/2025.01.012](https://doi.org/10.11985/2025.01.012).
- [20] 李光辉,王伟胜,刘纯,等.直驱风电场接入弱电网宽频带振荡机理与抑制方法(一):宽频带阻抗特性与振荡机理分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(22): 6547-6561. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.191064](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.191064).
LI G H, WANG W S, LIU C, et al. Mechanism analysis and suppression method of wideband oscillation of PMSG wind farms connected to weak grid (Part I): analysis of wideband impedance characteristics and oscillation mechanism [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(22): 6547-6561. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.191064](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.191064).
- [21] 赵君宇,高山,徐路,等.考虑台风影响的海上风电机组双层检修策略 [J]. *电力建设*, 2023, 44(7): 121-130. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2023.07.013](https://doi.org/10.12204/j.issn.1000-7229.2023.07.013).
ZHAO J Y, GAO S, XU L, et al. Double-layer maintenance strategy for offshore wind turbines considering impact of typhoon [J]. *Electric power construction*, 2023, 44(7): 121-130. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2023.07.013](https://doi.org/10.12204/j.issn.1000-7229.2023.07.013).
- [22] 杨铭,曹武,赵剑锋,等.受控电压/电流源型变流器混合多机暂态电压支撑策略 [J]. *电工技术学报*, 2023, 38(19): 5207-5223, 5240. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.220669](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.220669).
YANG M, CAO W, ZHAO J F, et al. Transient voltage support strategy for hybrid multi-converter of controlled voltage/current source converter [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2023, 38(19): 5207-5223, 5240. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.220669](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.220669).
- [23] 周识远.弱电网下光伏并网逆变器电能质量控制策略研究 [J]. *东北电力技术*, 2021, 42(5): 6-9. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7913.2021.05.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7913.2021.05.002).
ZHOU S Y. Research on power quality control strategy of photovoltaic grid-connected inverters under weak grid access [J]. *Northeast electric power technology*, 2021, 42(5): 6-9. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7913.2021.05.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7913.2021.05.002).
- [24] 张梓钦,朱东海,马玉梅,等.弱电网故障下新能源并网逆变器的奇异摄动模型与暂态稳定性分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(2): 454-465. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.221088](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.221088).
ZHANG Z Q, ZHU D H, MA Y M, et al. Singular perturbation model and transient stability analysis of grid-connected converter under weak grid faults [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(2): 454-465. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.221088](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.221088).
- [25] 宁联辉,吴再驰,王锡凡,等.基于模块化多电平矩阵式换流器的分频输电系统低频侧阻建模及稳定性判别 [J]. *电网技术*, 2022, 46(10): 3720-3729. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1264](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1264).
NING L H, WU Z C, WANG X F, et al. Low-frequency side impedance modeling and stability discrimination of fractional frequency transmission system based on modular multilevel matrix converter [J]. *Power system technology*, 2022, 46(10): 3720-3729. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1264](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1264).
- [26] 杨舒婷,陈新,黄通,等.考虑 MMC 环流控制的海上风电经柔直送出系统阻抗塑造方法 [J]. *中国电力*, 2023, 56(4): 38-45. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.202207084](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.202207084).
YANG S T, CHEN X, HUANG T, et al. Impedance modeling method of offshore wind farm integration through MMC-HVDC with MMC circulation control [J]. *Electric power*, 2023, 56(4): 38-45. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.202207084](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.202207084).
- [27] WANG J J, CHEN W, LIU Y K, et al. High-frequency resonance analysis and impedance reshaping control of MMC-HVDC system based on frequency coupling impedance model [J]. *Journal of modern power systems and clean energy*, 2024, 12(2): 646-657. DOI: [10.35833/MPCE.2022.000702](https://doi.org/10.35833/MPCE.2022.000702).

- [28] 李萌, 年珩, 胡彬, 等. 应用于新能源发电设备阻抗测量的扰动信号类型综述 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(17): 6296-6315. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.211467](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.211467).
LI M, NIAN H, HU B, et al. Review of perturbation signals applied to impedance measurement of renewable generator [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(17): 6296-6315. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.211467](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.211467).
- [29] BERG M, ALENIUS H, ROINILA T. Rapid multivariable identification of grid impedance in DQ domain considering impedance coupling [J]. *IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics*, 2022, 10(3): 2710-2721. DOI: [10.1109/JESTPE.2020.3041446](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2020.3041446).
- [30] YANG J Q, LI Z, LIU B, et al. Impedance model and stability analysis of offshore wind farm via AC submarine cable [C]//IEEE. 2022 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Austin, TX, USA, May 27 - June 1, 2022. New York: IEEE, 2022: 2197-2201. DOI: [10.1109/ISCAS48785.2022.9937562](https://doi.org/10.1109/ISCAS48785.2022.9937562).
- [31] 王红星, 余超耘, 谢志文, 等. 基于频率耦合阻抗模型的海上风电并网系统振荡稳定性分析 [J]. *广东电力*, 2021, 34(5): 11-18. DOI: [10.3969/j.issn.1007-290X.2021.005.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-290X.2021.005.002).
WANG H X, YU C Y, XIE Z W, et al. Analysis on oscillatory stability of offshore wind power grid-connected system based on frequency-coupled impedance model [J]. *Guangdong electric power*, 2021, 34(5): 11-18. DOI: [10.3969/j.issn.1007-290X.2021.005.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-290X.2021.005.002).
- [32] 徐海亮, 高铭琨, 吴瀚, 等. 海上风电场-MMC 互联系统频率耦合建模及稳定性分析 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(21): 92-102. DOI: [10.7500/AEPS20210530001](https://doi.org/10.7500/AEPS20210530001).
XU H L, GAO M K, WU H, et al. Frequency-coupling modeling and stability analysis of offshore wind farm-modular multilevel converter interconnection system [J]. *Automation of electric power systems*, 2021, 45(21): 92-102. DOI: [10.7500/AEPS20210530001](https://doi.org/10.7500/AEPS20210530001).
- [33] 李海盼, 年珩, 胡彬, 等. 风电并网系统宽频振荡分析与抑制方法综述 [J]. *新型电力系统*, 2023, 1(3): 237-255. DOI: [10.20121/j.2097-2784.ntps.230043](https://doi.org/10.20121/j.2097-2784.ntps.230043).
LI H P, NIAN H, HU B, et al. Review of analysis and suppression methods for wide-band oscillation in wind power grid-connected systems [J]. *New type power systems*, 2023, 1(3): 237-255. DOI: [10.20121/j.2097-2784.ntps.230043](https://doi.org/10.20121/j.2097-2784.ntps.230043).
- [34] 边晓燕, 丁炆, 买坤, 等. 海上风电场经 VSC-HVDC 并网的次同步振荡与抑制 [J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(17): 25-33. DOI: [10.7500/AEPS20170703003](https://doi.org/10.7500/AEPS20170703003).
BIAN X Y, DING Y, MAI K, et al. Subsynchronous oscillation caused by grid-connection of offshore wind farm through VSC-HVDC and its mitigation [J]. *Automation of electric power systems*, 2018, 42(17): 25-33. DOI: [10.7500/AEPS20170703003](https://doi.org/10.7500/AEPS20170703003).
- [35] 刘荣顺. 海上风电场经 MMC-HVDC 并网的宽频振荡特性及抑制研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022. DOI: [10.27381/d.cnki.gwlg.2022.001112](https://doi.org/10.27381/d.cnki.gwlg.2022.001112).
LIU R S. Research on the wide-band oscillations characteristics and suppression of offshore wind farm with MMC-HVDC system [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2022. DOI: [10.27381/d.cnki.gwlg.2022.001112](https://doi.org/10.27381/d.cnki.gwlg.2022.001112).
- [36] 高本锋, 张学伟, 李忍. 大规模风电送出系统的次同步振荡问题研究综述 [J]. *电气工程学报*, 2015, 10(7): 1-10.
GAO B F, ZHANG X W, LI R. Studies of sub-synchronous oscillation in system with large-scale wind power transmission [J]. *Journal of electrical engineering*, 2015, 10(7): 1-10.
- [37] 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. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2017.0069](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2017.0069).
WANG W S, ZHANG C, HE G Q, et al. Overview of research on subsynchronous oscillations in large-scale wind farm integrated system [J]. *Power system technology*, 2017, 41(4): 1050-1060. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2017.0069](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2017.0069).
- [38] 张天翼, 王海风. 风电并入弱交流系统引发次同步振荡的研究方法综述 [J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(16): 177-187. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.210776](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.210776).
ZHANG T Y, WANG H F. Research methods for subsynchronous oscillation induced by wind power under weak AC system: a review [J]. *Power system protection and control*, 2021, 49(16): 177-187. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.210776](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.210776).
- [39] 徐衍会, 高天初, 滕先浩. 基于盖尔原理的逆变器并网系统稳定性判据 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(21): 89-96. DOI: [10.7500/AEPS20210615003](https://doi.org/10.7500/AEPS20210615003).
XU Y H, GAO T C, TENG X H. Stability criterion for grid-connected inverter system based on Gershgorin principle [J]. *Automation of electric power systems*, 2022, 46(21): 89-96. DOI: [10.7500/AEPS20210615003](https://doi.org/10.7500/AEPS20210615003).
- [40] 黄云峰, 肖晃庆, 黄莹, 等. 具备故障限流和快速故障清除能力的多端口直流断路器拓扑与控制策略 [J]. *高电压技术*, 2024, 50(5): 2128-2145. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20232238](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20232238).
HUANG Y F, XIAO H Q, HUANG Y, et al. Topology and control strategies of a multiport DC circuit breaker integrating current-limiting and fast fault clearing capabilities [J]. *High voltage engineering*, 2024, 50(5): 2128-2145. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20232238](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20232238).
- [41] 张志强, 李秋彤, 余浩, 等. 海上直驱风电经柔直并网系统的次超同步振荡特性分析 [J]. *上海交通大学学报*, 2022, 56(12): 1572-1583. DOI: [10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.434](https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.434).
ZHANG Z Q, LI Q T, YU H, et al. Analysis of sub/super-synchronous oscillation of direct-drive offshore wind power grid-connected system via VSC-HVDC [J]. *Journal of Shanghai Jiao tong University*, 2022, 56(12): 1572-1583. DOI: [10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.434](https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.434).
- [42] 刘凯, 姚骏, 汪军, 等. 基于零序环流控制器的海上风电 MMC-

- HVDC 并网系统小干扰稳定分析与优化控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(12): 4068-4080. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.201759](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201759).
- LIU K, YAO J, WANG J, et al. Small signal stability analysis and optimization control of offshore wind power generation MMC-HVDC grid-connected system based on zero-sequence circulating current controller [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(12): 4068-4080. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.201759](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201759).
- [43] 陈剑, 杜文娟, 王海风. 基于动态参数等效的风电场并网系统振荡稳定性评估的数据驱动方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(19): 6958-6972. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.211514](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.211514).
- CHEN J, DU W J, WANG H F. A data-driven method for oscillation stability assessment of grid-connected wind farm based on dynamic parameters equivalent [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(19): 6958-6972. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.211514](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.211514).
- [44] YI J, LIN W F, HU J X, et al. An integrated model-driven and data-driven method for on-line prediction of transient stability of power system with wind power generation [J]. *IEEE access*, 2020, 8: 83472-83482. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.2991534](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991534).
- [45] 饶宏, 周月宾, 李巍巍, 等. 柔性直流输电技术的工程应用和发展展望 [J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(1): 1-11. DOI: [10.7500/AEPS20220330004](https://doi.org/10.7500/AEPS20220330004).
- RAO H, ZHOU Y B, LI W W, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology [J]. *Automation of electric power systems*, 2023, 47(1): 1-11. DOI: [10.7500/AEPS20220330004](https://doi.org/10.7500/AEPS20220330004).
- [46] LI Q H, ZHANG Y J, JI T Y, et al. Volt/var control for power grids with connections of large-scale wind farms: a review [J]. *IEEE access*, 2018, 6: 26675-26692. DOI: [10.1109/ACCESS.2018.2832175](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2832175).
- [47] 罗魁, 郭剑波, 马士聪, 等. 海上风电并网可靠性分析及提升关键技术综述 [J]. *电网技术*, 2022, 46(10): 3691-3702. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1496](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1496).
- LUO K, GUO J B, MA S C, et al. Review of key technologies of reliability analysis and improvement for offshore wind power grid integration [J]. *Power system technology*, 2022, 46(10): 3691-3702. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1496](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1496).
- [48] 文劲宇, 张浩博, 向往, 等. 面向新型电力系统的柔性直流换流器统一控制架构 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(18): 7068-7083. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.240817](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.240817).
- WEN J Y, ZHANG H B, XIANG W, et al. Unified high voltage direct current converter control dedicated for new power systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(18): 7068-7083. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.240817](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.240817).
- [49] 李清, 张连升, 毛焱祖, 等. MMC-HVDC 系统小信号阻抗建模及稳定性分析 [J]. *南方电网技术*, 2021, 15(7): 1-10. DOI: [10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2021.07.001](https://doi.org/10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2021.07.001).
- LI Q, ZHANG L S, MAO C Z, et al. Small signal impedance modeling and stability analysis of MMC-HVDC system [J]. *Southern power system technology*, 2021, 15(7): 1-10. DOI: [10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2021.07.001](https://doi.org/10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2021.07.001).
- [50] 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. DOI: [10.12158/j.2096-3203.2024.03.013](https://doi.org/10.12158/j.2096-3203.2024.03.013).
- YANG D T, YU J Y, GE J, et al. Adaptive multi-objective reactive power optimization control strategy for offshore wind farms [J]. *Electric power engineering technology*, 2024, 43(3): 121-129. DOI: [10.12158/j.2096-3203.2024.03.013](https://doi.org/10.12158/j.2096-3203.2024.03.013).
- [51] 王国英, 贾一凡, 邓娜, 等. 应用于海上风电接入的 VSC-HVDC 系统主网侧交流故障穿越方案 [J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(2): 146-154. DOI: [10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2019.02.005](https://doi.org/10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2019.02.005).
- WANG G Y, JIA Y F, DENG N, et al. Grid side fault ride through solution for offshore wind connection with VSC-HVDC [J]. *Journal of global energy interconnection*, 2019, 2(2): 146-154. DOI: [10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2019.02.005](https://doi.org/10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2019.02.005).
- [52] 许彬, 高冲, 张静. 应用于海上风电接入的 VSC-HVDC 系统主网侧交流故障穿越的新型直流耗能装置拓扑 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(1): 88-97. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.191984](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.191984).
- XU B, GAO C, ZHANG J. A novel DC chopper topology for grid side fault ride through in VSC-HVDC based offshore wind power connection [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(1): 88-97. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.191984](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.191984).
- [53] 闫书豪, 孟永庆, 段子越, 等. 新型多频率三端口模块化多电平换流器拓扑及其控制策略 [J]. *高电压技术*, 2024, 50(8): 3693-3704. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20230036](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230036).
- YAN S H, MENG Y Q, DUAN Z Y, et al. Novel multi-frequency triple-port modular multilevel converter topology and its control strategy [J]. *High voltage engineering*, 2024, 50(8): 3693-3704. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20230036](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230036).
- [54] 贾众祺, 赵晋斌, 沈溟, 等. 海上风电变流器故障容错低电压穿越控制 [J]. *电力电子技术*, 2024, 58(7): 92-95. DOI: [10.3969/j.issn.1000-100X.2024.07.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-100X.2024.07.022).
- JIA Z Q, ZHAO J B, SHEN H, et al. Low-voltage ride-through control for offshore wind turbine converters under fault tolerance [J]. *Power electronics*, 2024, 58(7): 92-95. DOI: [10.3969/j.issn.1000-100X.2024.07.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-100X.2024.07.022).
- [55] 孙银锋, 刘宇晗, 郭宇航, 等. 基于分散式储能的风电柔直并网直流故障穿越协调控制 [J]. *工程科学与技术*, 2023, 55(1): 35-47. DOI: [10.15961/j.jsuese.202200496](https://doi.org/10.15961/j.jsuese.202200496).
- SUN Y F, LIU Y H, GUO Y H, et al. DC fault ride through coordinated control of wind power flexible direct grid connection based on decentralized energy storage [J]. *Advanced engineering sciences*, 2023, 55(1): 35-47. DOI: [10.15961/j.jsuese.202200496](https://doi.org/10.15961/j.jsuese.202200496).
- [56] 崔挺, 李雪萍, 颜畅, 等. 基于模型预测控制的风电场故障穿越

- 有功无功优化控制策略 [J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(2): 12-20. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.210479](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.210479).
- CUI T, LI X P, YAN C, et al. Active and reactive power optimization control strategy for wind farm fault ride-through based on model predictive control [J]. *Power system protection and control*, 2022, 50(2): 12-20. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.210479](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.210479).
- [57] 张东辉, 陈新. 基于阻抗视角的新能源发电系统宽频振荡抑制技术综述 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(24): 9672-9690. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.231365](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231365).
- ZHANG D H, CHEN X. Overview of broadband oscillation mitigation of new energy generation power system based on impedance perspective [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(24): 9672-9690. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.231365](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231365).
- [58] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(15): 4720-4731. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.191968](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.191968).
- MA N N, XIE X R, HE J B, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(15): 4720-4731. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.191968](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.191968).
- [59] 廖雪超, 陈才圣, 伍杰平. 基于 CNN-LSTM 及深度学习的风电场时空组合预测模型 [J]. *信息与控制*, 2022, 51(4): 498-512. DOI: [10.13976/j.cnki.xk.2022.1280](https://doi.org/10.13976/j.cnki.xk.2022.1280).
- LIAO X C, CHEN C S, WU J P. Combined spatiotemporal wind farm prediction model based on CNN-LSTM and deep learning [J]. *Information and control*, 2022, 51(4): 498-512. DOI: [10.13976/j.cnki.xk.2022.1280](https://doi.org/10.13976/j.cnki.xk.2022.1280).
- [60] 张旭东, 汪繁荣. 基于改进蜣螂优化算法和融合注意力机制的风电功率预测 [J]. *广东电力*, 2025, 38(1): 32-40. DOI: [10.3969/j.issn.1007-290X.2025.01.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-290X.2025.01.004).
- ZHANG X D, WANG F R. Wind power prediction based on a multi-strategy enhanced dung beetle optimization algorithm and integrated attention mechanism [J]. *Guangdong electric power*, 2025, 38(1): 32-40. DOI: [10.3969/j.issn.1007-290X.2025.01.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-290X.2025.01.004).
- [61] 阳杰, 张建华, 马兆荣, 等. 海上风电与海洋牧场融合发展趋势与技术挑战 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(2): 1-16. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.2.01](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.2.01).
- YANG J, ZHANG J H, MA Z R, et al. Development trend and technical challenges of the integration of offshore wind turbine with marine ranch [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(2): 1-16. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.2.01](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.2.01).
- [62] 廖美英, 胡列豪, 张勇军, 等. 人工智能技术在发电厂智能化建设中的应用与挑战 [J]. *广东电力*, 2024, 37(11): 109-119. DOI: [10.3969/j.issn.1007-290X.2024.11.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-290X.2024.11.013).
- LIAO M Y, HU L H, ZHANG Y J, et al. Applications and challenges of AI technology in power plant intelligent construction [J]. *Guangdong electric power*, 2024, 37(11): 109-119. DOI: [10.3969/j.issn.1007-290X.2024.11.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-290X.2024.11.013).
- [63] 贾科, 董学正, 李俊涛, 等. 一种适用于海上风电经 MMC-MTDC 并网的电网侧故障穿越方法 [J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(21): 76-85. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.230551](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.230551).
- JIA Ke, DONG Xuezheng, LI Juntao, et al. A grid-side fault ride-through method suitable for offshore wind farms connected with MMC-MTDC [J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(21): 76-85. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.230551](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.230551).

作者简介:



吴炜

吴炜 (第一作者)

1979-, 男, 工程师, 学士, 主要从事发电设备运行技术与生产运营管理工作 (e-mail) wuwei79@crpower.com.cn。



刘玉飞

刘玉飞 (通信作者)

1997-, 男, 博士, 主要从事高比例新能源电力系统稳定性分析与控制的工作 (e-mail) 2408165677@qq.com。

孙炎平

1992-, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事新能源发电技术的工作 (e-mail) sunyanping@goldwind.com。

张勇军

1973-, 男, 博士生导师, 博士, 主要从事智能电网与能源互联网的规划、运行与控制的工作 (e-mail) zhangjun@scut.edu.cn。

项目简介:

项目名称 大型风电机组六自由度全功率智能测试平台 (国家重点研发计划项目) (2024YFB3411000)

承担单位 华润新能源投资有限公司

项目概述 项目主要针对当前国内已成熟的考虑叶轮扭矩载荷的六自由度风电机组试验技术展开研究。但在大扭矩高弯矩等六自由度载荷下的试验技术未形成统一的标准规范, 机组在参与电网黑启动、系统振荡过程模拟等并网试验技术方面还缺乏深入研究。基于六自由度地面测试与风电机组实际运行的动力学差异及补偿机制的研究基础, 开展了基于六自由度测试平台的风电机组机械结构动力学特性试验方法和风电作为主导型电源的多场景风电机组并网性能测试方法的研究。

(责任编辑 孙舒)