

# 基于风光互补的沿海分布式风力发电系统稳定性研究

蒋凌峰

广西北港电力有限公司，广西防城港市，538001；

**摘要：**随着新能源技术的快速发展，风光互补分布式发电系统在我国沿海地区的推广应用日益广泛。风能和太阳能具有良好的互补性，能够提升系统的发电效率与运行稳定性，特别适用于资源波动性强的沿海地区。然而，风光互补系统在分布式应用中面临着功率波动、控制复杂和并网稳定性不足等挑战。本文从系统结构、控制策略与稳定性分析三方面，研究了沿海风光互补分布式发电系统的运行特点及其对系统稳定性的影响，并提出了相应的优化建议，以及为相关系统的设计与运行提供理论支持和技术指导。

**关键词：**风光互补；分布式发电；系统稳定性；沿海地区；控制策略

**DOI：**10.69979/3041-0673.25.11.027

## 引言

在能源结构革新与碳中和目标的背景范畴，作为绿色清洁能源代表的风能与太阳能，逐步成为我国能源发展的核心组成。尤其在沿海地带，由于地理环境独具特色且资源丰沛，分布式风光互补系统成为促进区域能源清洁化的关键途径。风光互补发电系统凭借风能和光伏的互补属性，改善单一能源供应不稳定情形。与此同时提升发电效率，利于缓解电网压力，提高电能质量，受制于资源呈现随机性，且分布式系统规模不大、控制复杂等情形，风光互补系统在运行时存在一定的稳定性难题。本文着力对基于风光互补的沿海分布式风力发电系统稳定性关键技术问题开展系统分析，且给出针对性强的优化思路。

## 1 沿海分布式风光互补系统结构与运行特点

### 1.1 系统构成与能量流动机制

一种复合型能源系统——风光互补分布式系统，集成了风力发电、光伏发电、储能系统和并网接口，展现结构灵动、运行模式多样等特性。风力发电单元借由海风资源实施动能转换，光伏发电单元依靠太阳辐射开展能量采集工作，两者携手构成了主要的可再生能源源头。储能装置充当着调节的核心角色，在风光资源波动或是负荷需求不稳定的时候，实施能量的贮存与释放，保证系统供电稳定连贯。针对运行模式，风光互补系统既可以以孤岛模式开展独立供电，适应特定区域及设备的能源需求，还能连入电网，进行能量互补及双向传输。尤其是在沿海地带，风能资源受气候变化的影响极为明显，呈现大幅的起伏波动；季节、日照时长等因素对光伏发电的影响不容小觑。储能系统可借助智能控制策略，完

成能量的合理调配与管控，在保障电力供应安全时，促进可再生能源的利用效果与系统的整体运行效率。

### 1.2 运行环境与资源特性

由于沿海区域存在地理特点，较高的风速伴有显著的昼夜变化，这让风力发电于该地区成为关键的能源获取途径。风速表现出较大的波动倾向，尤其当季节交替、气候条件出现变化时，风能的供应稳定性欠佳，短时间中可能会出现较大幅度波动。日照资源呈现出突出的日周期属性，白昼时分太阳辐射强度偏高，可夜间则急剧减弱，这种日照的起伏对光伏发电的稳定与持续发展提出了挑战<sup>[1]</sup>。时空分布的不均匀性让风光资源直接引发能源供应波动，这为整个能源系统的稳定性及可靠性带来了较大压力。为应对该棘手挑战，系统必须具备强有力的动力响应能力，能实时依照风光资源的变动对输出功率加以调整。系统也须具备较强的稳定性，可在风力或光照急剧突变时实现平稳运行，防止出现供电中断或频繁起伏的状况，应对风光资源不稳定局面，智能调度、储能装置以及灵活控制策略起到了至关紧要的作用。

### 1.3 分布式布局与接入形式

在沿海地区，风光互补系统一般采用用户自用、小型微电网、村镇级并网等方式接入配电网。这些系统的显著特点是节点分布广，涵盖的地域范畴较大，且接入方式呈现多样化。风力与光伏发电单元分布在多个不同的位置，各节点的资源状况、负荷要求与电网环境皆存在差异。这种分布式结构让系统的管理与调度变得更为复杂，也要求系统拥有较强的自适应以及动态协调能力。

自适应能力呈现在系统能依据不同节点的风光资源变化、负荷需求还有外部环境条件，实时调节发电、

储能及调度相关策略。动态协调能力是指系统有能力在不同节点间高效实现信息的共享与协同调度，维持各节点发电与负荷的平衡关系，防止局部地域发生能源过剩或短缺的现象<sup>[2]</sup>。若处于并网运行状态，系统尚需顾及电网的稳定性及电能质量，保障分布式能源与配电网实现有序整合。风光互补系统需要借助智能控制、自动化调度与数据分析等技术手段，增强其整体运转效率与处理突发状况的能力。

## 2 系统稳定性影响因素分析

### 2.1 风光出力波动性对系统频率稳定性的影响

风速和太阳辐射自带的自然波动性，成了风光互补系统的常见挑战。风速的变动杂乱无章，受季节、气候和地理状况的影响甚巨，造成风力发电输出功率频繁地起伏波动。太阳辐射强度也呈现出明显的时间变化特性，白天跟夜间的差异、天气状况的变化等要素会影响光伏发电的稳定性。由于这些不确定性，风光互补系统的输出功率在短时间内发生明显变动，危及系统的供电稳定性。

在分布式系统这一情境，尤其是风光互补的微电网这类，由于缺少传统大型发电厂那种具备大惯性及调节能力的发电装置，系统的频率调节效能欠佳。传统发电系统凭借旋转的发电机组达成惯性支持，可在负荷变化、发电波动的情况下迅速响应，维持系统频率稳定。分布式风光互补系统中，发电设备是小规模的风力涡轮和光伏模块，它们所具备的惯性不足以应对频率波动，频率的波动可能会进一步加剧，甚至引致电网稳定性方面不足的难题。可以借助先进的储能设施、智能调度系统以及精准控制算法来实现系统频率的动态调节与稳定。

### 2.2 储能与电能质量控制能力的匹配问题

储能系统对风光互补系统而言起着极为关键的作用，其关键任务是管控风能和太阳能的波动性，缓解发电与负荷的差异矛盾。若储能系统的容量不足，无法满足需求波动的调节需求，或者其控制策略设计缺乏合理性，可能会引发一系列电能质量问题。面对风光资源的大幅波动，储能设备不能有效吸收多余电能，也无法释放充足电量，由此造成电压出现波动。该种电压波动不仅会对用户设备产生不良后果，也有概率造成电网频繁地波动，不利于系统整体的稳定维持。

储能系统调节能力不达标或控制策略不合理，可能会引起谐波数量增加。谐波是由不恰当的电力电子设备或非线性负荷引起，它们会扰乱电力系统的正常运行模式，造成电能质量的波动，甚至可能会对电网保护器具、

设备的使用时长以及运行的效率造成不利后果。为实现风光互补系统稳定地运行，应对储能系统的容量和控制策略精准设计优化，以此实现电压的平衡、对谐波的抑制以及稳定的电能输送。

### 2.3 多源并网运行中的电压稳定性挑战

风电、光伏和储能的多源协同并网为电力系统增添了更多可再生能源选项，同样带来了一些新的挑战。在电网电压稳定性方面，风能与太阳能的波动状态造成发电功率不断更迭，当负荷出现突变或者光伏发电量大幅增长时，可能会致使电压出现剧烈的波动<sup>[3]</sup>。阳光充足时，光伏发电的功率会迅速提高，而阴云挡住光线或日照状况突然改变可能会使发电量猛然减少，这类波动会冲击电网电压的稳定性。若风电或者光伏发电量急剧上升时，可能会引起电压升高；若发电量呈现急剧下降时，电压也许会降低，尤其是当储能系统无法迅速调节电能的时候，这种电压波动会愈发明显。

## 3 优化策略与稳定性提升方法

### 3.1 采用多时间尺度的协调控制策略

在风光互补系统这个环境中，风能和太阳能所具有的波动性是影响系统稳定运行的主因。风力与光伏发电存在显著的间歇性和不稳定性，尤其在气候与环境不稳定的条件之下，电力输出可能会有大幅的起落，给电力系统的调度造成极大的难题。为合理应对这些波动性难题，需将长周期的能量管理策略跟短周期快速功率平衡控制组合，增强风光互补系统针对资源波动的响应能力，实现系统在动态调节及长期优化方面的均衡。

短周期的快速功率平衡控制聚焦于瞬时与小时级别的范围，实时调控系统功率的输出数值。该策略主要借助可迅速响应的调节资源，如储能系统、可中断的负荷需求、调频辅助物件等，利用精准预判与实时调配，及时调控风光系统的输出量值，保证在短时间内迅速平衡风能、光伏发电与负荷需求的落差。这种迅速调节可有效应对风光发电的起伏，降低对电网稳定状态的干扰，为系统快速恢复提供后盾。

长周期的能量管理策略是着重从全局及长期层面来优化风光互补系统的运行方式，促使系统高效地对资源加以利用。依靠对日内、日常乃至月度的发电量进行预估，合理安排储能装置的充放电计划，弥合风光互补系统发电与消纳之间的落差，杜绝因长时间资源波动导致系统能量产生过度浪费或不够的状况<sup>[4]</sup>。长期的优化策略还需对电力市场价格的起伏变化、设备生命周期、运营成本等综合考量，给系统长期运行赋予经济性与可

持续性的支持。把短周期的快速功率平衡调控同长周期能量管理策略相结合，风光互补系统在保证即时调节呈现灵活与响应状态的同时，增进资源长期配置及利用功效。此策略可有效强化系统的稳定性及可持续性，同时充分挖掘新能源的消纳能力，推动电力系统朝更绿色、低碳的路径前行。

### 3.2 加强储能系统的配置与智能控制

沿海之处凭借自身独特的风光资源好处，存在大量可再生能源挖掘潜力。尤其是风能与太阳能这两类资源，这些能源的输出呈现间歇性与波动现象，对电力系统稳定运转形成一定挑战。合理安排电化学储能系统的容量，以适应风能跟太阳能的实时变化，成为增强系统稳定及可靠性的有效手段。在电化学储能系统内，储能设备把过剩电能收集储存，在需求高峰时段或可再生能源输出不充足时释放，起到了缓冲功效。合理配置储能系统容量，需按照风光资源波动特点以及系统负荷需求的变动；做精准化设计，配置储能容量时，需综合考量风光资源预测数据、历史负荷走向以及储能设备充放电效率，保障储能系统在高峰时段可以有效填补电力亏空，同时杜绝过度储能造成的资源无谓消耗。

为使电化学储能系统调节效率及响应速度改善，实施基于预测的储能管理算法极为关键。在不确定性较高的环境，模糊控制算法能依靠对多个输入变量（如风速、光照强度、电池状态之类）的模糊推理，精准调节储能设备的充放电活动，实现功率输出的平稳过渡。模型预测控制（MPC）借助对未来某段时间中风光资源和负荷的预估，提升储能系统调度策略的合理性，与此同时满足电力的需求，减少储能系统的额外损耗。以这些先进的储能管理算法为基础，可以有效提升储能系统的缓冲能力跟响应速度，进一步强化电力系统对风光资源波动的适应水平。

### 3.3 建立局部电压支持机制与动态无功补偿装置

在现代电力系统这个环境中，尤其是在大规模接入风能和太阳能等可再生能源的情形下，电网电压稳定性以及抗扰性正面临极大挑战。由于风光资源具备波动及间歇性情况，风力或者光伏发电的输出功率也许会骤然改变，造成电网电压震荡，甚至引发电压失稳崩溃。在系统接入点配置动态无功补偿器，如静态无功发生器（SVG）或静态同步补偿器（STATCOM）等，成为有效强化系统电压调节能力的关键手段。作为先进的电力电子设备，有SVG和STATCOM，以快速调节无功功率的手段稳定电网电压。它们可按照电网即时的实际需求，精准调

节其输出水平，不管是风光出力意外突变，还是负荷出现起伏时，均能迅速响应波动，给出必要的无功功率支撑力。依靠这些设备实施动态补偿，能有效舒缓电网因风光资源波动而出现的电压波动，维持电压处于稳定的范围以内，进而防止电压超出界限引发的设备损坏、停运等不良状况。

SVG和STATCOM优点体现于它们的快速响应能力，可以在毫秒的级别中调节好电压，大幅超越传统无功补偿装置（像同步电动机或电容器）的响应速率<sup>[5]</sup>。这让它们在风力或光伏发电功率急剧变化时，快速给予所需的无功功率，缓冲电压的急速突变，提高系统稳定性及抵抗干扰的能力。动态无功补偿设备可辅助对系统运行效率进行优化，减少电能的流失，进而增强电力传输的水平。基于风光发电大规模接入电网的背景，安装SVG、STATCOM的设备，可高效应对电压稳定方面状况，并且可强化配网遇到外部扰动时的稳定性与灵活性，保证电力系统实现高效安全运行。

## 4 总结

沿海地区借助风光互补分布式发电系统获得绿色、高效的能源解决方式，有着极具潜力的应用前景。但此运行稳定性被资源波动剧烈、控制协调操作难等问题限制。本文从系统结构、稳定性相关影响因素及优化策略三个角度深入分析，说明系统在运行时可能碰到的关键挑战点，继而给出了相应的应对方法。未来进一步加强智能控制技术跟先进储能技术的融合运用，推动风光互补分布式系统迈向更高、更安全、更稳定的境界。

## 参考文献

- [1] 师明,刘晓晓,黄仁泷,等.利用风力发电机组塔筒壁安装CIGS光伏柔性组件实现“风光互补”的方案研究[J].电工技术,2024(12):50-53.
- [2] 李丽晶,王小建.分布式风光互补并网逆变器的控制系统设计与切换策略研究[J].通信电源技术,2023,40(16):47-49.
- [3] 高翔.风光互补发电装置制作的高速公路防远光护栏设计[J].现代工业经济和信息化,2023,13(5):139-141.
- [4] 邓振宇,周家辉,徐钢,等.并/离网风光互补制氢合成氨系统容量-调度优化分析[J].热力发电,2024,53(9):136-146.
- [5] 刘鹏.风光互补系统在光伏电站中的应用研究[J].电力设备管理,2024(4):74-76.