

风电和光伏联合并网对电网负荷波动的影响研究

李国强

辽宁大唐国际新能源有限公司, 辽宁 沈阳 110000

DOI:10.61369/EPTSM.2025120007

摘要 : 为有效降低风光联合并网下的电网负荷波动, 确保供电质量和安全。本文结合风光联合并网基本情况, 分析其对电网负荷波动的影响, 包括电网频率波动、电压波动闪变、谐波污染叠加等。并提出针对性控制策略, 以供后续风光联合并网负荷波动控制参考。

关键词 : 风光联合并网; 电网负荷波动; 频率波动; 电压波动; 谐波污染

Study on the Effect of Wind Power and Photovoltaic Combined Grid on Load Fluctuation of Power Grid

Li Guoqiang

Liaoning Datang International New Energy Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110000

Abstract : In order to effectively reduce wind and light combined grid load fluctuations, to ensure power supply quality and safety. Combined with the basic situation of wind and light combined grid, this paper analyzes its impact on load fluctuation, including frequency fluctuation, voltage flicker and harmonic pollution. Finally, the control strategy is put forward for reference to the control of load fluctuation of combined wind and optical power grids.

Keywords : wind and light combined grid; load fluctuation; frequency fluctuation; voltage fluctuation; harmonic pollution

前言

在“双碳”背景下, 风电和光伏联合并网已成为电网主要发展趋势。风能特征呈间歇性、随机性, 光能特征呈周期性、随机性, 因此两者联合并网可达到资源互补效果, 是目前主流的新能源消纳模式。但在该消纳模式下, 多元波动叠加易引发电网负荷波动, 降低电网运行可靠性。为有效应对此类影响, 电力单位应根据风光联合并网特点, 分析其对电网负荷波动的影响, 制定针对性控制策略。

一、风电与光伏联合并网介绍

风光联合并网是基于协同控制技术, 整合风力发电机组和光伏阵列输出功率, 将其接入传统电网, 用清洁能源替代部分不可再生能源, 并使风光两种能源特性互补, 达到功率平抑效果。该模式主要特征有三个, 第一是能源互补, 在日间, 光伏出力峰值和风电低谷互补; 在夜间, 风电出力提高和光伏停运缺口互补, 使功率波动合理降低。第二是出力波动, 在风速变化和阳光遮挡等影响下, 风光联合系统出力存在短时间波动情况。第三是控制复杂, 风电机组、光伏阵列与并网设备众多, 只有确保多设备协调效果, 才可使功率输出平滑, 并与电网达到适应性调节作用。在上述特征共同作用下, 风光联合并网对电网负荷具有特殊影响, 其负荷波动也较单一新能源并网波动更加复杂, 电力单位需从多个维度展开综合分析。

二、风电与光伏联合并网对电网负荷波动的影响

(一) 电网频率波动

电网频率波动主要受有功功率实时平衡效果影响, 如发电功率不能动态匹配负荷功率, 电网频率便会发生波动。在风光联合并网后, 整体系统出力波动将此种平衡直接打破, 电网频率显著偏离额定值^[1]。其中, 风力发电出力和风速三次方存在近似正比关系, 如风速发生突变, 风机在短时间内将出现出力剧变情况; 光伏出力取决于光照强度, 如阳光被云层快速遮挡, 光伏功率可在短时间内骤降。两者功率波动叠加后, 将对电网负荷造成较大冲击, 使电网频率明显波动。基于电网频率特点, 频率偏移量和有功功率波动量关系满足以下公式:

$$\Delta f = \frac{\Delta P}{K} \quad (1)$$

式中, Δf 代表电网频率偏移量; ΔP 代表风光联合并网系统有功功率波动量; K 代表电网单位可调节功率。根据该公式可知, 如电网单位调节功率固定, 风光联合并网系统有功功率波动量越大, 电网频率偏移量越大。偏移量过大时, 电网将出现低频减载或高频切机保护情况, 使部分负荷停电, 甚至导致电网崩溃。与单一新能源并网模式相比, 在风光联合并网模式下, 风电与光伏互补作用可使电网频率偏移量最大值降低, 从而降低频率波动幅度。但其互补效应易受季节、气候、地理条件等因素影响, 如风速不稳定且无光照条件同时出现, 电网频率波动风险将高于并网前。

(二) 电压波动闪变

电压波动即电网节点电压在短时间内出现有效值偏离额定值的现象, 如波动范围过大, 将使用电端灯光亮度出现人眼可见的闪烁感, 即电压闪变。在风光联合并网模式下, 无功功率波动和输出阻抗变化是电压波动闪变的重要影响因素。并网时, 风电机组和光伏组件需利用逆变器与电网连接, 因此逆变器本身无功调节能力将对并网节点电压产生直接影响。在风光联合系统出现出力波动时, 为使输出功率保持稳定, 对应并网节点逆变器将实时调整自身无功输出, 从而打破节点处的无功功率平衡。基于有功、无功功率波动量和并网线路基本情况, 并网节点电压变化量可通过以下公式计算:

$$\Delta U = \frac{\Delta P \cdot R + \Delta Q \cdot X}{U_e} \quad (2)$$

式中, ΔU 代表风光联合并网节点电压变化量; ΔP 代表有功功率波动量; ΔQ 代表无功功率波动量; R 代表并网线路电阻值; X 代表并网线路电抗值; U_e 代表节点电压额定值。在高压配网中, 电抗值远高于电阻值, 因此可进一步将公式简化为:

$$\Delta U = \frac{\Delta Q \cdot X}{U_e} \quad (3)$$

可见无功功率波动将对高压电网电压产生更大影响。而在低压配网中, 电抗值与电阻值接近, 无论有功功率发生波动, 或无功功率发生波动, 电网电压都将发生明显改变。风电机组运行中, 风速变化可导致有功出力变化, 也可改变风机叶片角, 被动引起无功功率波动; 光伏机组运行中, 光照强度变化会改变光伏电池输出电压, 若逆变器不能及时调整无功补偿量, 电网也将受到无功功率冲击。在两者叠加作用下, 并网节点电压易出现周期性或随机性波动, 严重时可导致电压闪变。表1为某地区110kV电网风光并网节点不同并网模式电压波动闪变程度:

表1-某地区110kV电网风光并网节点不同并网模式电压波动闪变程度

序号	并网模式	典型工况	有功功率波动量 (MW)	无功功率波动量 (Mvar)	电压闪变值 (Pst)
1	单一风电	短时风速 8-12m/s	15-35	3-8	1.28
2	单一光伏	短时多云 遮挡光照	10-30	2-6	1.15
3	风光联合	1、2工况 叠加	12-32	2-7	0.82

由此可见, 与单一风电或光伏并网相比, 在风光联合并网模式下, 通过功率互补作用, 可有效降低有功和无功功率波动幅度, 改善电压闪变情况。但联合并网依然存在电压波动问题, 尤其在极端天气条件下, 联合并网模式将面临更大电压调节压力。

(三) 谐波污染增加

谐波是电网电流或电压中, 频率为基波频率整倍数的分量, 该污染可降低电能质量, 引起继电保护误动或电机发热等问题。在风光联合并网模式下, 谐波主要来源于电子电力装置^[2]。与单一新能源并网模式相比, 联合并网系统多台逆变器协同作用易导致谐波叠加, 增加谐波污染。风电变流器和光伏逆变器均通过脉冲宽度调制法实现直交流转换, 调制时会伴随特征谐波产生, 其频率计算公式如下:

$$f_h = k \cdot f_s \pm f_1 \quad (4)$$

式中, f_h 代表特征谐波频率; k_1 代表调制脉冲次数; f_s 代表开关频率; f_1 代表基波频率。如风光联合系统多台逆变器开关频率接近或存在倍数关系, 产生的谐波将相互叠加, 从而使某频次谐波含量骤增。对于谐波污染严重程度, 一般可通过电压总谐波畸变率衡量, 其公式如下:

$$THD_U = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \times 100\% \quad (5)$$

式中, THD_U 代表总谐波畸变率; U_1 代表基波电压有效值; U_2, U_3, \dots, U_n 代表2-n次谐波电压有效值。在风光联合并网系统中, 投入逆变器越多, 出力波动将越大, 对应的电压总谐波也将越高。同时, 电网自身阻抗特性也将对谐波传输产生影响, 若风光联合系统谐波输出频率接近电网局部谐振频率, 将出现串联或并联谐波情况, 进一步放大谐波, 加剧谐波污染。

三、风电与光伏联合并网下的电网负荷波动控制策略

(一) 基于功率预测的源网协同控制

在风光联合并网系统运行中, 为有效降低出力波动, 确保电网频率稳定性, 电力单位可通过功率预测法, 对未来一段时间内风光联合系统出力变化情况进行精准预测, 根据预测结果提前制定针对性源网协同调度计划, 使电网发电与电网负荷保持动态平衡, 从而实现电网频率波动的有效抑制^[3]。此项控制应基于预测和控制两个环节实现, 通过两环节紧密衔接, 基于功率预测实施源网协同控制。

将天气预报系统与基于机器学习的预测模型设置在预测层, 由天气预报系统利用地面气象站、卫星遥感等精准获取未来风速、光照、云层等关键气象参数, 为系统出力预测提供数据支持。根据近年来风光联合系统设备运行状态数据、出力历史数据等, 利用长短期记忆网络模型建立非线性映射关系, 确保预测精度。将云计算作为支持技术, 在控制层构建源网协同调度平台, 由该平台实时采集气象和风光联合系统运行数据, 与预测出力数据整合后, 通过混合整数规划算法计算调度需求, 实时制定动态

化调度决策,并向并网调度系统实时下达指令。

调度过程中,调度平台会根据不同出力波动场景开展差异化调度。如预测未来一段时间后系统出力大幅度提升,平台会优先控制储能系统快速充电,并通过需求响应平台将用电量提升指令下达给可调节负荷,引导负荷及时提升,就地消纳有功功率,以免功率过剩导致电网频率骤升。如预测未来一段时间后系统出力大幅度降低,平台会立即将备用电源启动,并通过智能电表将负荷衰减信号下发商业用户,合理降低非核心负荷用电量,使有功功率缺口得到快速补偿,以免功率不足导致电网频率骤降。同时,电力单位还应将风光机组主动调节机制引入调度环节,基于预测结果提前对风机偏航角度和光伏组件倾角进行调整,使机组出力保持在最优区间,降低出力突变停机次数,延长机组设备使用寿命。

(二) 基于储能系统的电压波动控制

针对风光联合并网导致的电压波动情况,具体控制时,电力单位可将储能系统合理引入,根据电网电压等级和波动特性差异,通过集中储能与分布储能结合分层配置储能模式。通过锂电池和全钒液流储能电池设置集中式储能系统,前者能量密度高,响应速度快,在功率调节中适用;后者安全性高,循环寿命长,在能量调节中适用。将两者接入高压并网节点,根据风光联合系统容量合理设置总容量,确保分钟级电压波动平抑效果。通过锂电池和超级电容设置分布式储能系统,后者功率密度高,充放电速率快,适用于用户侧。将两者直接接入低压配网,可对秒级甚至毫秒级电压闪变做到有效抑制^[4]。

具体控制时,电力单位可引入电压闭环与前馈补偿复合式调节机制,精准控制电网电压。先利用高精度电压传感器实时采集并网节点电压参数,利用卡尔曼滤波算法去除测量噪声后,将校正值与额定电压参数实时对比,精准确定电压偏差^[5]。根据电压偏差大小及变化趋势,通过自适应神经网络控制算法,对储能系

统无功功率输出值进行动态调节^[6]。如发现电网电压过高,储能系统将迅速吸收无功功率;如发现电网电压过低,储能系统将迅速释放无功功率,使电网有功和无功功率始终保持平衡,确保电压稳定。同时,电力单位也应将前馈补偿环节引入,根据风光联合系统出力变化率提前生成无功补偿功率调节指令,使电网电压波动得到及时预测和有效调节^[7]。

(三) 基于逆变器优化法的谐波控制

在风光联合并网模式下,为有效控制谐波污染,电力单位可对并网逆变器进行合理优化。首先是逆变器拓扑优化,用多电平逆变器替代传统两电平逆变器,增加电压输出级数,使输出波形与正弦波接近,从而显著降低电网低次谐波含量^[8]。其次是逆变器调制策略优化,通过空间矢量脉冲宽度调制法替代传统正弦脉冲宽度调制法,使电压空间矢量与电网实际供电需求匹配,提高电网电压利用率,减少谐波和开关损耗^[9]。最后是谐波补偿优化,将谐波检测和补偿模块加入逆变器控制回路,基于瞬时无功理论实时检测电网谐波分量值,根据检测结果实时生成电流补偿指令,在逆变器有功功率输出过程中,同步输出与谐波电流相同幅值、相反相位的补偿电流,有效抵消电网谐波^[10]。

四、结束语

综上所述,在风光联合并网模式下,由于风电和光伏机组出力存在波动,电网负荷平衡受多维度因素不利影响,易发生频率波动、电压波动、谐波污染等情况,对电网安全稳定运行不利。针对上述情况,电力单位可采取合理的方法控制电网负荷波动,如基于功率预测的源网协同控制、基于储能系统的电压波动控制、基于逆变器优化法的谐波控制等。从而使电网保持稳定状态,最大化降低负荷波动不良影响,确保电网绿色化发展效果,提升供电服务水平。

参考文献

- [1] 田浩,王可庆,俞斌,等.考虑多类型负荷及风光不确定性的配电网优化规划[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(9):144-150.
- [2] 颜香梅.适应多元化负荷、电源接入的配电网典型供电方案研究[J].电器工业,2022(10):41-44.
- [3] 朱自伟,黄彪,袁昕月,等.基于平抑风光出力波动的主动配电网优化调度[J].太阳能学报,2022,43(5):90-97.
- [4] 高小童,秦志龙,高新宇.含海上风电-光伏-储能的多能源发电系统可靠性评估[J].发电技术,2022,43(4):626-635.
- [5] 熊伟,马志程,张晓英,等.计及风、光消纳的风电-光伏-光热互补发电二层优化调度[J].太阳能学报,2022,43(7):39-48.
- [6] 白格平,李英俊,付宁,等.基于经验模式分解与纵横交叉算法的台区负荷预测[J].自动化仪表,2021,42(11):63-67,73.
- [7] 杨茂,王金鑫.考虑可再生能源出力不确定的孤岛型微电网优化调度[J].中国电机工程学报,2021,41(3):973-984,中插16.
- [8] 孙哲,谷训良,朱志军,等.基于信号同源的AGC负荷解耦控制和自动寻优研究[J].电力系统装备,2022(1):72-74.
- [9] 王舒宁.电池储能系统辅助火电机组调频技术研究[D].华北电力大学,华北电力大学(保定),2023.
- [10] 郑云平,亚夏尔·吐尔洪.基于VSG技术的风-光-储系统自适应调频控制策略研究[J].高压电器,2023,59(7):12-19.