

水泥厂余热发电与光伏协同供电孤网运行优化策略研究

吴生栋 杨巩鑫 赵宜永
苏州中材建设有限公司 江苏 苏州 215300

摘要：本文围绕水泥厂余热发电与光伏协同供电的孤网运行展开，深入剖析余热发电、光伏发电系统特性，论证二者协同供电的可行性。同时，指出孤网运行在系统稳定性、功率平衡及储能系统配置控制等方面面临的难题。进而从能量管理、储能配置控制、负荷调度、功率预测以及系统保护故障处理等多维度提出优化策略，以保障孤网稳定，提升能效、降本减负。

关键词：水泥厂；余热发电；光伏发电；协同供电；孤网运行；优化策略

引言

在能源转型与可持续发展的大趋势下，水泥厂积极探索节能降耗新路径，余热发电与光伏协同供电模式应运而生，备受行业瞩目。但当此系统以孤网形式运行时，因失去大电网支撑，系统稳定性、功率平衡以及储能系统配置控制等难题凸显。这些问题若得不到妥善解决，将影响水泥厂正常生产。因此，深入研究孤网运行优化策略迫在眉睫。

1 水泥厂余热发电与光伏发电系统特性分析

1.1 水泥厂余热发电系统特性

水泥厂余热发电主要利用水泥生产过程中窑头、窑尾等环节产生的废气余热。余热发电系统的输出功率与水泥生产负荷、废气温度和流量等因素密切相关。一般来说，水泥生产负荷越高，废气温度和流量越大，余热发电系统的输出功率就越高。但余热发电系统的启动和停机过程相对较慢，响应速度有限。

1.2 光伏发电系统特性

光伏发电系统将太阳能转化为电能，其输出功率主要受光照强度、环境温度和光伏组件性能等因素的影响。光照强度和温度具有明显的日变化和季节变化规律，导致光伏发电系统的输出功率也呈现出波动性和不确定性。此外，光伏发电系统的输出功率在阴天、雨天等恶劣天气条件下会大幅下降。

1.3 协同供电可行性分析

水泥厂余热发电和光伏发电在时间和功率特性上具有一定的互补性。在白天，光照充足时，光伏发电系统可以提供大量的电能；而在夜间或光照不足时，余热发电系统可以继续发电，满足水泥厂的部分用电需求。通过合理的能量管理和控制策略，可以实现两者的协同供电，提高能源利用效率^[1]。

2 孤网运行面临的关键问题

2.1 系统稳定性问题

在孤网运行状态下，水泥厂余热发电与光伏协同供电系统脱离大电网保障，频率和电压稳定性面临巨大挑战。大电网能凭借自身优势维持稳定，而孤网系统全靠自身发电与负荷协调运行。水泥厂负荷变化多样且不确定，不同生产环节用电需求差异大，如水泥磨机启停瞬间负荷波动大，生产任务变化也会使整体负荷改变。同时，余热发电受生产工艺和设备状态影响，光伏发电依赖光照，二者输出功率不稳定。一旦发电功率与负荷功率不匹配，系统频率就会偏移，影响用电设备运行，电压也会不稳定，严重时甚至会导致系统崩溃。

2.2 功率平衡问题

余热发电和光伏发电的输出功率存在显著的不确定性。余热发电的功率取决于水泥生产过程中产生的余热，而余热量又受到多种因素影响，如原料性质、生产工艺参数等。光伏发电则受光照强度、温度等自然条件制约，这些因素难以精确预测和控制。水泥厂的负荷需求同样处于不断变化之中，生产计划的调整、设备的启停、生产规模的扩大或缩小等，都会使负荷需求发生改变。要实现发电功率与负荷功率的实时平衡，难度极大。一旦出现功率不平衡，孤网系统将面临运行风险，影响水泥厂的正常生产。

2.3 储能系统配置与控制问题

为应对发电功率和负荷功率的不平衡，配置储能系统是必要的举措。然而，储能系统的容量、类型和控制策略的选择至关重要，直接关系到孤网运行的稳定性和经济性。储能系统容量过小，无法有效缓冲功率波动，难以满足系统稳定运行的需求；容量过大，则会造成资源浪费，增加建设成本。不同类型的储能系统，如电池储能、超级电容储能等，具有各自的特点和适用场景，

需要根据孤网系统的实际情况进行合理选择。此外,控制策略的优劣也会影响储能系统的性能。不合理的控制策略可能导致储能系统无法及时响应功率变化,无法充分发挥其调节作用,进而影响孤网系统的稳定运行^[2]。

3 孤网运行优化策略

3.1 能量管理策略

(1) 发电成本是水泥厂在能源利用过程中必须关注的重要指标。不同发电方式的成本构成有所差异,余热发电主要涉及设备折旧、维护费用以及余热收集过程中的少量成本;光伏发电则包括光伏组件购置、安装、维护以及土地占用等成本。能量管理系统应通过对发电设备的合理调度,优先使用成本较低的发电方式,在满足负荷需求的前提下,尽可能降低发电成本。例如,在光照充足且余热发电出力较低时,增加光伏发电的占比;而在夜间或光照不足但余热资源丰富时,提高余热发电的利用率。(2) 供电可靠性直接关系到水泥厂的生产连续性和稳定性。一旦供电中断,水泥生产设备将停止运行,可能导致产品质量下降、设备损坏以及生产延误等问题。能量管理系统需要根据负荷的重要程度和波动情况,制定合理的发电计划。对于重要负荷,应确保有稳定的电源供应,可通过设置备用发电设备或预留一定的发电容量来提高供电可靠性。同时,根据负荷的实时变化,动态调整发电设备的出力,避免出现发电功率与负荷功率不匹配的情况。(3) 环境效益也是能量管理系统需要考虑的重要因素。余热发电和光伏发电都属于清洁能源利用方式,相比传统化石能源发电,能够显著减少二氧化碳、二氧化硫等污染物的排放。能量管理系统应优先安排清洁能源发电,提高清洁能源在总发电量中的占比,从而降低水泥厂对环境的影响。(4) 为了实现上述目标,能量管理系统需要根据余热发电和光伏发电的预测功率以及负荷需求,动态调整发电设备的出力。通过对历史数据的分析和实时监测,准确预测不同时间段的发电功率和负荷需求,提前制定发电计划。在实际运行过程中,根据实时数据与预测值的偏差,及时调整发电设备的出力,确保发电功率与负荷功率的实时平衡,实现能源的高效利用。

3.2 储能系统配置与控制策略

(1) 合理配置储能系统的容量和类型是关键。首先需要分析孤网系统的功率波动特性。通过对余热发电和光伏发电的功率数据以及负荷需求数据的长期监测和分析,确定系统在不同时间段内的功率波动范围和规律。例如,在白天光伏发电高峰期,可能会出现发电功率大于负荷功率的情况;而在夜间或光照不足时,发电功率

可能无法满足负荷需求。根据这些波动特性,结合水泥厂的生产计划和负荷需求,确定储能系统的容量。容量过小,无法有效缓冲功率波动;容量过大,则会造成资源浪费和成本增加。(2) 常见的储能系统包括蓄电池储能、超级电容器储能等。不同类型的储能系统具有各自的特点和适用场景。蓄电池储能具有能量密度高、存储时间长等优点,适合用于平衡日负荷曲线和长期能量存储;超级电容器储能则具有充放电速度快、功率密度高、循环寿命长等特点,适合用于快速响应系统的功率波动。在实际应用中,需要根据孤网系统的具体需求,合理选择储能系统的类型。也可以考虑采用混合储能系统,将蓄电池和超级电容器结合起来,充分发挥两者的优势,提高储能系统的性能。(3) 采用分层控制策略是提高储能系统运行效率的有效方法。将储能系统分为功率调节层和能量调节层。功率调节层主要用于快速响应系统的功率波动,维持系统的频率和电压稳定。当系统出现瞬时功率不平衡时,功率调节层能够迅速进行充放电操作,补偿功率差额,使系统频率和电压尽快恢复到正常范围。能量调节层则主要用于平衡系统的日负荷曲线,提高能源利用效率。通过对一天内不同时间段的负荷需求和发电功率进行分析,制定合理的充放电策略。在发电功率大于负荷功率时,能量调节层将多余的电能存储起来;在发电功率不足时,将存储的电能释放出来,满足负荷需求^[3]。

3.3 负荷优化调度策略

(1) 可中断负荷是指在不影响水泥厂正常生产和产品质量的前提下,可以在一定时间内切断供电的负荷。例如,一些辅助生产设备的用电负荷,如照明、通风设备等,在必要时可以暂时切断供电,以缓解发电功率不足的压力。(2) 可调节负荷是指用电量可以根据发电功率和储能系统状态进行调节的负荷。例如,水泥磨机的用电负荷可以通过调整磨机的转速、进料量等方式进行调节。在发电功率充足时,可以适当提高磨机的运行功率,增加生产效率;在发电功率不足时,降低磨机的运行功率,减少用电量。(3) 不可中断负荷是指对水泥厂生产过程至关重要,必须保证连续供电的负荷。例如,窑炉的控制系统、关键生产设备的驱动电机等,一旦中断供电,可能会导致生产中断、设备损坏甚至安全事故。(4) 根据发电功率和储能系统的状态,制定合理的负荷调度方案。在发电功率不足时,优先切断可中断负荷,以减少总负荷需求。同时,根据储能系统的剩余电量和充放电能力,调节可调节负荷的用电量。例如,当储能系统电量充足时,可以适当增加可调节负荷的用

电量；当储能系统电量不足时，减少可调节负荷的用电量，以保证重要负荷的供电可靠性。

3.4 发电功率预测策略

(1) 对于余热发电功率预测，需要收集水泥厂的生产数据，包括原料成分、生产负荷、设备运行参数等，以及对应时间段的余热发电功率数据。通过分析这些数据，找出余热发电功率与生产参数之间的关联规律，建立预测模型。同时，考虑水泥生产工艺的调整和设备维护等因素对余热发电功率的影响，对预测模型进行修正。(2) 对于光伏发电功率预测，气象信息是关键因素。收集光照强度、温度、云量等气象数据，以及对应时间段的光伏发电功率数据。利用统计分析方法，找出光伏发电功率与气象因素之间的关系，建立预测模型。由于气象条件具有不确定性，需要不断更新气象数据，对预测模型进行实时调整，提高预测准确性。(3) 采用神经网络、支持向量机等智能算法可以提高功率预测的准确性。神经网络具有强大的非线性映射能力，能够处理复杂的数据关系；支持向量机则在小样本情况下具有较好的泛化能力。通过对历史数据进行训练，优化算法参数，使预测模型能够更准确地预测发电功率。(4) 准确的功率预测可以为能量管理系统提供决策依据。能量管理系统根据预测的发电功率和负荷需求，提前制定发电计划和储能系统的充放电策略。例如，当预测到未来一段时间内光伏发电功率将大幅下降时，能量管理系统可以提前增加余热发电的出力或从储能系统放电，以满足负荷需求，保证系统的稳定运行。

3.5 系统保护与故障处理策略

(1) 过流保护用于防止线路和设备因电流过大而损坏。当系统中的电流超过设定值时，过流保护装置能够迅速切断电路，保护设备和线路的安全。过压保护和欠压保护则用于维持系统电压的稳定。当电压过高或过低

时，相应的保护装置会动作，避免设备因电压异常而受损。频率保护用于保证系统频率在正常范围内。当系统频率发生偏移时，频率保护装置能够及时采取措施，如调整发电设备的出力或切除部分负荷，使系统频率恢复到正常值。(2) 当系统发生故障时，保护装置能够快速准确地切除故障部分，防止故障扩大，保证系统的安全运行。例如，当某条线路发生短路故障时，过流保护装置会迅速切断该线路，避免故障影响其他正常运行的设备和线路。(3) 制定故障处理预案是确保系统在故障发生后能够迅速恢复供电的关键。故障处理预案应包括故障诊断、故障隔离、系统恢复等步骤。在故障发生后，通过故障诊断系统快速确定故障位置和原因，然后隔离故障部分，将正常部分重新组网运行。在恢复供电过程中，根据系统的实际情况，逐步启动发电设备和负荷，避免因启动电流过大而再次引发故障。通过完善的系统保护和故障处理策略，提高孤网系统的可靠性和稳定性。

结语

本文全面研究了水泥厂余热发电与光伏协同供电孤网运行优化策略。通过分析系统特性与关键问题，提出多方面优化策略。能量管理策略实现经济、可靠、环保目标；储能系统合理配置与控制提高运行效率；负荷优化调度缓解功率矛盾；发电功率预测助力系统稳定；系统保护与故障处理保障安全。这些策略为孤网系统稳定运行提供支撑，推动水泥厂能源利用可持续发展。

参考文献

- [1]邓澜,王婷婷,兰挺进.水泥厂余热发电励磁系统的保护与限制[J].水泥工程,2020(6):49-51.
- [2]王鹏,董伟.水泥窑余热发电综合效能提升改造措施[J].水泥,2023(06):50-52.
- [3]王刚,贾超,张增刚.水泥窑余热发电开机优化[J].水泥,2023(04):70-71.