

塔式光热电站提升综合运行能效的方向和措施

唐慧其

上海电气电站工程公司 上海 201100

摘要：塔式光热发电近年来正成为太阳能发电应用领域的一项热门技术，具有明显的技术特点和优势，正在受到我国以及世界各国的重视和发展。然而塔式光热发电性能仍然依靠气象环境因素，技术也尚不成熟，因此从已投运塔式机组的综合效率来看，其综合经济效益并不能达到预期，这也成为了该项先进技术进一步发展和获得应用的最大制约因素。作者希望通过对塔式光热系统能量传输过程的分解，并分析过程中能量损失及其原因，提出提升塔式光热机组综合能效的措施方向。

关键词：塔式光热发电；综合能效；能量转换效率

1 背景

塔式光热项目利用大量定日镜将低密度的太阳能集中吸收并储存，适合配置大规模储能，可作为基荷或调峰电站应用和推广。在双碳目标的推动下，我国的光热产业在国内和国际光热项目中都有亮眼表现。但是由于塔式光热技术尚不成熟，据统计已投运机组的年发电率普遍较低，综合转换能效约为12%~18%，国内塔式机组的发电效率更普遍低于国际同等容量机组。随着世界各国逐步退出对光热项目的激励政策，那么就要求机组运行达到更高能效水平，实现投资更早回本和更高回报。短期看塔式光热技术水平不可能大幅度提高，限制产业发展的技术、资金、政策等各种问题难以根本解决，塔式光热电站的建造成本仍将维持高位，因此当前唯有对塔式光热机组的转换能量分析，准确发现和减少能量损失，

提高塔式系统的综合能效水平，提高年发电率从而实现更大收益，才能提升塔式光热发电技术的发展竞争力。

2 塔式光热发电技术及其能量转换过程的分解和分析

2.1 塔式光热发电系统

塔式光热发电系统是一种聚光型太阳能热发电技术，利用大面积定日镜阵列将太阳光聚焦到塔顶吸热器上，将光能转化为热能，再通过热能驱动汽轮机发电，整个系统分为吸热系统、储能系统、动力系统和电气系统4个分系统，实现太阳能-热能-机械能-电能的能量转换过程，如图1塔式光电发电系统能量传递示意图所示。本文将论述系统在进行能量转换过程中的存在的能量损失，将能量损失控制在最低状态，以期达到太阳能与电能最终转换比的最大化。

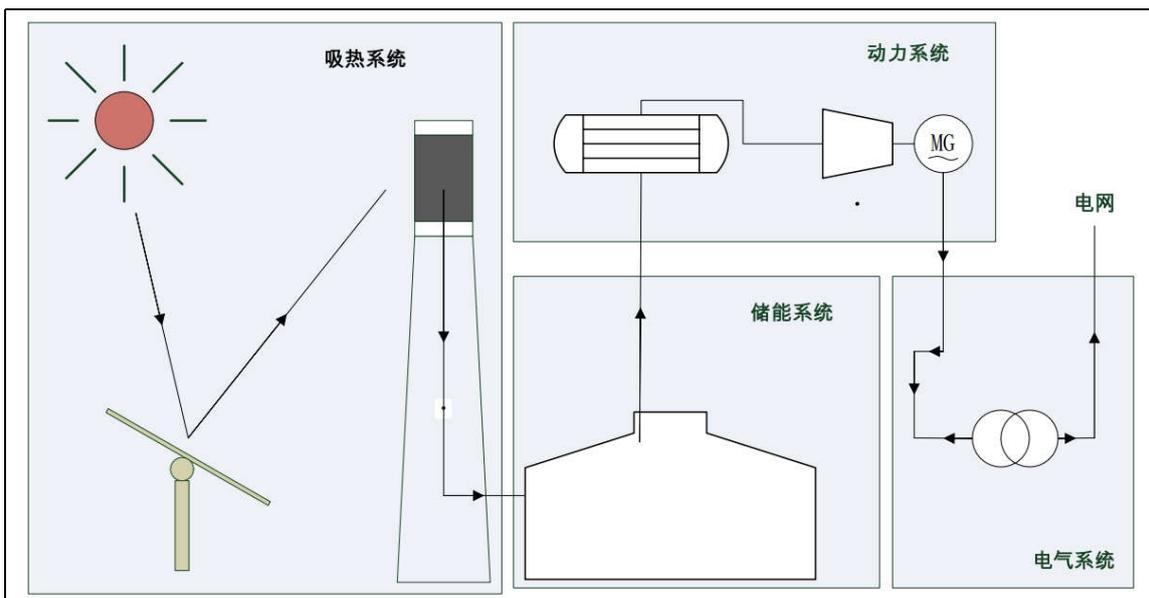


图1 塔式光电发电系统能量传递示意图

吸热系统主要有定日镜阵列和吸热塔组成。定日镜阵列实时跟踪太阳并将光线反射至塔顶吸热器。吸热器位于塔顶，接收定日镜阵列反射过来的太阳光高密度辐照，通过耐高温和吸热涂层管屏吸收热量传导至介质，多采用高热容比的二元熔融盐介质。

吸收到热能的熔盐介质存储在熔盐储罐，储罐容量决定了机组的储能时长，是吸热系统和动力系统之间的循环充、放热能的耦合单元，也是太阳能发电实现夜间运行和为电网调峰运行的关键设备，新建100MW塔式机组的储能能力大多可以达到12~16小时，从而实现太阳能夜间连续利用的能力。

动力系统是将热能转换为机械动能的单元，主要有蒸汽发生器（类似锅炉）和汽轮发电机组组成。蒸汽发生器将熔盐热能通过管式换热器传递给水 and 蒸汽，从而产生驱动汽轮发电机转动的高品质过热蒸汽。动力系统内，其他加热器、冷却器等辅助设备与火电机组相同，作用于形成汽水循环和能量传递。

电气系统是将发电机电磁感应产生的电能传送到电网，并为机组运行所需用电设备提供厂用电。

2.2 能量的传递过程和损失

塔式光热发电由“太阳能-热能-机械能-电能”的能量传递过程，与之伴随的是能量的损失过程，为了获得更高的综合能效，通过减少能量损失是短期内最直接和可行的解决方案。

表格1 某项目定日镜太阳能效率表

时 日	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Jan.1	0	23.63	52.58	62.87	66.29	67.48	67.82	67.06	65.39	61.44	50.68	20.8	0
Apr.1	20.86	52.49	63.86	68.08	70.14	71.17	71.25	70.66	69.05	66.65	61.37	46.84	7.07
Jul.1	41.99	59.45	65.76	68.76	70.31	71.33	71.45	70.91	69.52	67.59	64	55.61	33.78
Oct.1	19.73	52.37	63.74	67.84	69.86	70.61	70.56	69.72	67.79	64.5	55.98	31.04	0

在实际运行中，定日镜不可避免地出现故障和镜面损坏（包括部分镜面损坏），导致定日镜阵列不能达到设计反射面积而减少接收能量，通常使用定日镜可用率 F_A 来表示，其数值表征定日镜阵列的运行面积与设计总面积的比率。

定日镜随着年复一年地使用，在机组寿命周期内，受到沙尘磨损、镜面腐蚀、涂层变质等因素反射性能将不断下降，因此必须考虑定日镜生命周期内功能退化系数 F_D ，一般镜面产品设计要求按照每两年0.1%的退化比考虑。

定日镜镜面清洁度，是影响反射效率的重要因素，光热机组大多建设在沙漠、戈壁地域，沙尘天气较多导

2.2.1 镜场阵列接收太阳入射能量

聚光型太阳能系统一般采用直接辐照度（DNI，Direct Normal Irradiance）作为衡量太阳能输入强度的参数，直接辐照度是指垂直于太阳光方向的单位面积上接收到的直接太阳辐射能量，因此通过测量DNI值就可以计算出定日镜阵列接收的总太阳能，即为吸热系统的输入能量 Q_{sun} 。

如定日镜反射面积为 S （ m^2 ），定日镜数量为 n ，单位小时DNI测量值为 W （ W/m^2 ），定日镜接收能量即为：

$$Q_{sun} = W \cdot S \cdot n$$

由公式1可以发现，吸热系统的输入能量由天气因素决定，当日DNI值越到，镜场接收到的能量也应越高。

2.2.2 镜场阵列反射能量

定日镜接收到光能后按照预设角度将光能反射到吸热器，但在反射的过程中，由于定日镜太阳能效率、可用状态、镜面清洁度、反射功能退化等因素，能量在定日镜反射过程中有所损失。

定日镜太阳能效率是通过模型根据余弦影响、阴影遮挡、定日镜阻挡、瞄准和光斑溢出因素计算出每个定日镜一天中每个小时的太阳能小时加权平均值，可视为由镜场选址、定日镜布置、定日镜靶向设计等先天因素决定的能量损失，用 F_{Eff} 表示定日镜太阳能效率因素，如表格1为某项目镜场全年每季度首日7~19小时段的太阳能效率。

致镜面更容易积灰，将严重影响定日镜的太阳能反射性能，因此需要定期测量镜面清洁系数 F_C ，在定日镜控制系统和性能计算模型中进行修正。

综上所述，定日镜阵列反射的能量应为： $Q_{sr} = Q_{sun} \cdot F_{Eff} \cdot F_A \cdot F_D \cdot F_C$ 。

2.2.3 吸热器总潜在热能

吸热器总潜在热能 Q_{inc} 是指有定日镜阵列反射并传递至吸热器管屏表面的能量总量，定日镜位置地面方圆约2Km半径范围，而吸热器位于镜场中心约260m高度的塔上，从定日镜反射过来的太阳能需要经过 $> 2Km$ 的大气环境传输路径，由于大气中存在的气体分子、水汽凝结物及悬浮微粒对光线具有吸收和散射作用，因此镜场

反射光能将被大气吸收和散射，这一过程产生了能量衰减。通过利用图像处理技术可以测量镜场环境内大气透射率 F_{Trans} ，而从获得吸热器实际表面接收到的总潜在热能，即 $Q_{Inc} = Q_{sf} \cdot F_{Trans}$ 。

2.2.4 熔盐吸收能量

总潜在热能到达吸热器管屏后大部分能量会被管屏吸收并将与管屏内熔盐完成对流换热，但也有部分能量将被管屏反射消散在大气环境中，这部分被反射走的能量为吸热器反射损失能量 L_{Ref} 。吸热器在制造的时候，会选择热传导性能较好的管材，并在表面喷涂吸热涂层，以使吸热器趋向于“黑体”，但是实际不可能达到绝对黑体，且由于表面附着尘埃颗粒和吸热涂层材质损坏等原因，吸热器的反射能量损失将增大。被吸热器管屏吸收的能量为吸热器吸收能量 Q_{SR-Abs} ： $Q_{SR-Abs} = Q_{Inc} - L_{Ref}$ 。

吸热器吸收能量 Q_{SR-Abs} 并不能全部换热给熔盐介质，在进行换热的过程中，吸热器系统会发生不可避免的热量损失，以及因环境风速增加和系统保温不足等因素将扩大吸热器散热损失 L_{HL} 。

同时在运行工艺要求和限制，吸热器系统在正常运行过程中也会需要消耗一定的热能和丢弃部分热能。启动过程中，吸热器需要从冷态预热至备用状态，需要消耗热能，而如果因为设备故障和环境（如风速、雾霾）因素导致延后启动时间，则这样的启动损失 L_{SU} 将被扩大。吸热器生产过程中，也可能出现吸热器最大功率限制而限制镜场能量输入，或者因为熔盐储罐最大容量限制而不得不退出吸热器运行等操作行为会产生弃光损失 L_{Du} 。吸热器在停机时，需要维持一定太阳辐照，确保有足够的能量维持吸热器停机过程安全，这一过程将放弃一定的辐照能量而产生停机损失 L_{ST} ，过早的停机操作将会带来更大的停机损失。

因此，吸热器输出的熔盐所获得的实际能量 Q_{MS-Abs} 为熔盐吸收能量减去吸热器运行过程消耗和丢弃的能量，即为 $Q_{MS-Abs} = Q_{SR-Abs} - L_{HL} - L_{SU} - L_{Du} - L_{ST}$ 。实际性能计算时并不能准确地计算出 L_{HL} 、 L_{SU} 、 L_{Du} 、 L_{ST} 损失值，通过热盐罐液位和温度在时段内的变化计算出熔盐吸收热量 Q_{MS-Abs} ，复盘核算 L_{SU} 、 L_{Du} 、 L_{ST} 损失，从而推导出吸热器系统的散热损失。

2.2.5 储能

熔盐吸热后存储在热熔盐储罐，根据运行策略再输出放热，存储过程中热熔盐储罐将散失热能造成储能损失 L_{HMST} ，储罐保温性能是储能损失量的决定因素，当然还存在一些客观环境因素，比如环境温度、风速、降雨等影响。实际储能系统可向动力岛蒸汽发生器输送的热

能为 $Q_{SGS} = Q_{MS-Abs} - L_{HMST}$ 。

2.2.6 动力岛的能量转换

动力岛输入总能量 Q_{SGS} 经过“热能→机械能→电能”的热力循环过程后，获得发电机出口毛发电量 E_{Gross} ，转换效率 $\eta_{Power} = E_{Gross}/Q_{SGS}$ 。

动力岛效率与热力学限制、技术条件、设备性能以及运行环境等因素相关，转换效率大约在35%~45%之间。动力岛效率主要影响因素有：

a.使用空气冷却的情况下，高温、高湿环境使冷凝器介质冷却不到理想循环温度，导致热力循环效率偏低。

b.热损失

蒸汽发生器等换热设备、传输管道的热损失，汽轮机等设备机械摩擦的机械能损失，管道和阀门的蒸汽泄漏等，都会降低整体效率。

c.蒸汽品质

由于吸热器的运行受到天气和系统本身因素影响未必能够持续稳定生产额定温度的热熔盐，因此实际输入到蒸汽发生器的热熔盐温度低于额定参数，也就导致主蒸汽温度低于设计值，进而降低汽轮机运行效率。

d.低负荷运行

根据运行策略和检修工作的调整，动力岛运行在低负荷工况下，动力岛运行效率会降低。

e.设备故障或状态偏离设计

由于设备运行状态运行参数偏离设计值，比如仪表的准确，阀门内漏等问题，导致动力系统实际运行与设计热力平衡不一致，导致降低运行效率。

2.2.7 电气系统的能量传输

发电机出口毛发电量 E_{Gross} 除传输给电网外，还有一部分电能需要分配给厂用设备，厂用电消耗量 E_{Aux} 将直接消耗上网电量 E_{Net} 并影响机组电价收益，即： $E_{Net} = E_{Gross} - E_{Aux}$ 。

综上所述，吸热系统的能源转换效率为 $\eta_{Solar} = Q_{MS-Abs}/Q_{Sun} = F_{Eff} \cdot F_A \cdot F_D \cdot F_C \cdot F_{Trans} - (L_{Ref} + L_{HL} + L_{SU} + L_{Du} + L_{ST}) / (W \cdot \dots \cdot S \cdot n)$ （公式1），储能系统能源转换效率 $\eta_{TES} = Q_{SGS}/Q_{MS-Abs} = 1 - L_{HMST}/Q_{MS-Abs}$ （公式2），动力岛系统 $\eta_{Power} = E_{Gross}/Q_{SGS}$ （公式3），电气系统效率 $\eta_{Elec} = E_{Net}/E_{Gross} = 1 - E_{Aux}/E_{Gross}$ （公式4）。

3 性能提升的措施

由上述对发电系统能量传输的过程分解和能量损失分析可以知道，若想提高综合能效，需要分别提高吸热系统、储能系统、动力岛系统和电气系统的能源转换效率，机组综合效率 $\eta = \eta_{Solar} \eta_{TES} \eta_{Power} \eta_{Elec}$ ，进一步从公式1，公式2，公式3，公式4可知，性能提升措施应具体落实到：（1）提升定日镜阵列太阳能效率 F_{Eff} 、可用率 F_A 、退

化系数 F_D 、清洁系数 F_C 、大气透射率 F_{Trans} 和发电机出口毛发电量 E_{Gross} ，(2)降低吸热器反射损失 L_{Ref} 、散热损失 L_{HL} 、启动损失 L_{SU} 、弃光损失 L_{Du} 、停机损失 L_{ST} 、储能损失 L_{HMST} 和厂用电消耗 E_{Aux} 。

定日镜阵列太阳能效率 F_{Eff} 、退化系数 F_D 、大气透射率 F_{Trans} 属于由选址和设计决定的先天性因素，不作为运行性能提升措施考虑，但在项目可研和工程设计中应予以考虑。但在日常运行时，应准确测量获取这些参数，以获得正确的机组理论性能计算值，并用于对实际能效的跟踪和分析。

提高定日镜阵列可用率 F_A 、清洁系数 F_C ，降低吸热器反射损失 L_{Ref} 、散热损失 L_{HL} 、储能损失 L_{HMST} ，可以通过加强维护予以改善。加强定日镜检修力度，确保及时发现和修正故障定日镜，可有效提高可用率 F_A 。增加定日镜清洁频次，引进自动化清洗装备，可以有效保持和提升。吸热器管屏的吹扫和清洗相对困难，应按照设计频次和清洗方案，定期清洗管屏附着物，补刷吸热涂层，减小吸热器反射损失。检查保温和系统漏热情况，及时修复保温、电伴热、密封件，降低散热损失。

通过改进运行策略和优化控制逻辑，降低吸热器启动损失 L_{SU} 、弃光损失 L_{Du} 、停机损失 L_{ST} 和厂用电消耗 E_{Aux} ，提高毛发电量。比如通过优化控制工艺逻辑，加快吸热器启动速度，从备用状态到功率模式加快至25分钟内完成。通过优化储能放热运行窗口、降低盐罐最低液位、利用协调控制等措施，减少热盐罐满罐导致的吸热

器弃光损失。加强气象预测和实时监测，及时制定和调整运行策略，尽量延后停机时间至接近太阳落山，尽可能捕捉太阳能。

结论

塔式太阳能光热发电的综合性能提升还有很大的空间，本文针对塔式光热发电系统内能量传输和转换过程及其能量损耗进行了分解和分析，并提供了一定的综合效率提升措施实施方向，以期对工程执行和运行性能提升工作提供一些建议，后续仍可根据本文论述的综合性能提升方向，进行更加详细的定性和定量分析，细化改进措施和明确改进效果。

参考文献

- [1]何雅丽.太阳能光热发电特点及应用前景技术分析[J].中华建设科技,2016年10期.
- [2]徐有杰,曾季川,陈冬,肖刚.塔式太阳能熔盐吸热器运行特性与策略优化[J].太阳能学报,2022年2月:第43卷第2期.
- [3]王康.光热发电“十四五”:破局发展的关键期[J].《能源》,2020年2月.
- [4]罗凯,许涛,刘海明,刘刚浅.浅谈塔式太阳能光热发电站性能试验[J].湖北电力,2016年11月:第40卷第11期.
- [5]付鹏,王宁玲,乔加飞,李承周.塔式光热发电系统性能分析与评价[J].热力发电,2020年6月:第49卷第6期.
- [6]张耀明,邹宁宇.太阳能热发电技术[M].化学工业出版社,2019年10月.