

三菱 M701F4 一拖一双轴机组抽凝/纯凝双工况汽轮机运行特性与经济性分析

王亚宁

大唐惠州热电有限责任公司 广东 惠州 516123

【摘要】：三菱 M701F4 一拖一双轴联合循环机组使用的是抽凝纯凝双工况汽轮机，既可以满足电网供电要求也可以满足区域供热需求，具有运行模式灵活、负荷适应性好等特点。本文以某电厂实际运行数据为依托，对机组纯凝、抽凝两种工况的热力特性、负荷响应、能耗指标、运行短板进行分析，量化的比较出不同工况的经济收益和能耗差异，梳理出工况切换过程中的运行风险点，给出相应的优化措施。结果表明纯凝工况适合于高峰供电，发电效率稳定，抽凝工况可以实现热能梯级利用，综合能源利用率大大提高。优化运行方式之后，机组的能耗损耗降低，供热供电稳定性大大提高，可以给同类型双工况机组的高效经济运行提供借鉴。

【关键词】：M701F4；一拖一双轴机组；双工况汽轮机；运行特性；经济性分析

DOI:10.12417/2705-0998.26.11.049

引言

新型燃气蒸汽联合循环机组由于启停快、污染排放低、能源利用率高而被广泛用于城市热电联产和电网调峰。三菱 M701F4 型机器是主流 F 级燃气轮机设备，一拖一双轴配置采用燃机和汽轮机分开布置、联合运行的方式，配套双工况汽轮机可以在纯凝发电和抽汽供热之间自由转换，可以满足电网负荷变化和冬季集中供热、工业供汽两种需求。双工况运行模式大大拓展了机组的应用范围，但是不同工况的热力参数、负荷特性、能耗水平存在着较大的差别，工况切换时容易产生参数波动、效率降低等问题。目前对于该型号机双工况精细化运行的量化分析资料很少，现场运行缺少准确的数据支持。因此，本文以电厂实际运行工况为依托，对双工况运行特性及经济性进行系统的分析，目的在于挖掘机组的节能潜力，改善运行控制方式。

1 机组设备概况

该电厂 M701F4 一拖一双轴联合循环机组由燃气轮机、余热锅炉、双工况汽轮机和配套辅机组成。燃机和汽轮机各自独立设置轴系，没有刚性连接，通过余热锅炉回收燃机排烟热量产生蒸汽，推动汽轮机做功发电。汽轮机为高压中间再热双缸双排汽结构，装有抽汽调节机构和离合装置，可以实现纯凝满发、抽凝供热两种稳定的运行方式。机组主要设计参数为燃机额定出力 470MW、排烟温度 620℃左右、余热锅炉产出高温高压蒸汽、主蒸汽压力 10.5MPa、主蒸汽温度 540℃。汽轮机纯凝工况额定出力为 220MW，最大抽汽供汽量为 220t/h，抽汽压力为 1.2MPa，可以满足周边工业供汽和城区采暖供热的需要。机组装有自动化调节系统，可以实现负荷自动调节和工况一键切换，具有良好的调峰、供热匹配性。

2 双工况汽轮机运行特性分析

2.1 纯凝工况运行特性

纯凝工况为机组的基础发电模式，汽轮机抽汽机构完全关闭，余热锅炉产生的全部蒸汽进入汽轮机逐级做功，做完功的乏汽进入凝汽器冷凝循环，无对外供热输出。该工况下机组的主要目标就是提高发电效率，在电网高峰负荷、日间用电高峰等纯发电场景中使用。负荷响应特性上，纯凝工况机组的运行稳定性好，蒸汽参数变化小，升负荷速度一致。机组温态、热态启动升负荷响应快，负荷调整线性度好，可以准确地响应电网 AGC 负荷指令，调峰性能好。热力特性上，全蒸汽做功模式下机组热力循环完整，各级缸体做功均匀，蒸汽能量利用率稳定，低负荷区只存在常规凝汽散热损耗，没有额外抽汽能量损耗。纯凝工况的运行短板主要表现在低负荷运行区间，机组负荷小于 50%额定负荷的时候，蒸汽流量减少，汽轮机低压缸鼓风摩擦损耗增大，机组发电单耗明显提高，循环热效率急剧降低，长时间低负荷纯凝运行会造成能源浪费。

2.2 抽凝工况运行特性

抽凝工况为热电联产运行方式，汽轮机中低压缸连通管抽汽机构打开，部分中压做功后的蒸汽抽出对外供热，其余蒸汽继续进入低压缸做功发电，实现热能梯级利用。该工况主要用在冬季采暖、工业持续供汽的场合，可以同时完成供电和供热的任务。热力特性上，抽汽工况改变了汽轮机原来的蒸汽流量分配，抽汽量增加时，低压缸的蒸汽流量减小，发电功率也随之降低，但是机组的综合能源利用率大大提高。与纯凝工况全部乏汽热量被冷却水带走不同，抽凝工况把高品质蒸汽的热量对外供出给用户，大大减小了冷凝端的能量损耗。负荷适应性，抽凝工况具有热电耦合性，热负荷越高，机组最小电负荷限制值越大。当高供热负荷的时候，机组不能长时间地低负荷运行，

电网调峰能力受到限制。在工况切换的过程中，抽汽阀门开度的改变容易引起蒸汽参数的瞬间波动，必须准确地配合燃机的负荷以及抽汽量来保证机组的正常运转。

2.3 双工况运行参数对比

选取机组额定工况、75%负荷、50%负荷三种典型的运行状态，统计出纯凝和抽凝工况的运行参数，得到实测数据统计表，清楚地体现出双工况运行的不同。

表 1 双工况运行参数对比

运行 工况	机组负 荷率	发电功率 /MW	供汽量 /(t/h)	发电单耗 /(kJ/kWh)	综合热效 率/%
纯凝	100%	220.0	0	7850	58.2
纯凝	75%	165.2	0	8120	56.5
纯凝	50%	110.5	0	8680	53.1
抽凝	100%	198.6	220	8010	64.8
抽凝	75%	148.3	165	8260	63.2
抽凝	50%	97.8	110	8790	60.5

从表中数据可知，在同样的负荷率下，抽凝工况的发电单耗比纯凝工况低，但是综合热效率却比纯凝工况高得多。满负荷运行时抽凝工况的综合热效率比纯凝工况高 6.6%，能源利用的优势十分明显。低负荷工况下两种模式能耗都明显增加，运行经济性也随之降低。

3 双工况经济性对比分析

3.1 能耗经济性分析

纯凝工况以发电为主，没有供热收益，能源损耗主要是凝汽器散热损耗。高负荷区的机组热力循环效率高，发电能耗稳定，经济性好。低负荷运行时，散热损耗所占比例增大，发电单耗提高，经济运行区为 75%~100% 负荷。抽凝工况依靠回收蒸汽供热来抵消发电单耗增加所造成的经济上的损失，从而达到能源梯级利用的目的。满负荷抽凝运行时，虽然发电功率有所下降，但是大量的余热被转化成了供热收益，综合能耗利用率大大提高。冬季连续供热期间，机组一直处在抽凝工况下运行，能较好地减少整个系统的能源浪费，提高机组的总体盈利能力。但是在低负荷小抽汽量工况下，热电匹配度差、能耗损耗大，经济效益不明显。

3.2 运营收益分析

根据当地电价、热价标准来量化工序两种情况下的单位小时运行收益。上网电价为 0.42 元/kWh，供热单价为 35 元/GJ，不考虑厂用电的微小波动，得到的结果如表所示。纯凝满负荷工况小时发电收益为 9.24 万元，无供热收益，综合收益为 9.24 万元。抽凝满负荷工况下发电收益为 8.34 万元，供热收益为 2.86 万元，综合收益为 11.2 万元，比纯凝工况每小时多收入近 2 万元。非供热季时纯凝高负荷运行可以最大程度上提高发电效益，符合电网调峰的要求。供热季以抽凝工况为主，兼顾供电和供热，经济效益最好。供热季盲目低负荷纯凝运行，不但能源利用率低，还会造成供热收益的损失。

3.3 工况切换损耗分析

机组纯凝和抽凝工况频繁转换的时候，会引发短时间内的参数波动及能耗损耗，这是造成机组总体经济运行的薄弱环节。工况切换时，抽汽阀门的调节、蒸汽流量重新分配都会造成短时间内的热效率降低，辅助调节系统的能耗也会小幅增加。频繁地转换会增大阀门、缸体等设备的磨损，加大设备的维护费用。工况切换属于热力系统动态扰动过程，蒸汽压力、温度、流量的瞬时失衡会造成汽轮机缸体温差小幅变化，引起局部换热损失增大，每次完整的工况切换都会产生一定的能耗增量。抽汽调节阀频繁动作容易造成密封面磨损、调节精度偏移，长期高频切换会使得阀门内漏、调节滞后等设备缺陷更加严重，从而加大运行能耗损耗和设备检修成本。另外，在工况切换的时候，机组的自动调节系统会不断修正参数，使燃机的负荷出现波动，余热锅炉的换热状态变得不稳定，从而导致联合循环系统整体热效率降低，造成能源的浪费。

4 机组经济运行优化策略

4.1 工况精准匹配管控

根据季节气候、外网供热负荷、电网调度需求，制定出机组分时段、分季节的差异化精准运行管控方案，从运行模式、负荷区间、参数匹配三个方面来达到精细化控制的目的。非供热季无对外供热需求，机组一直处在纯凝运行工况，根据电网负荷的峰谷变化情况，尽可能保持在 75%到 100%的高负荷运行区间内，绝不允许进入 50%额定负荷以下的低效运行区间。高负荷工况下机组蒸汽通流效率高、热力循环损耗小，可以最大程度地提高发电效率和供电收益，准确地满足日间电网用电高峰负荷的需求。冬季供热结束后，机组一直保持在抽凝热电联产工况，根据外网供热负荷实时监测数据，对汽轮机抽汽阀门开度进行动态微调，以达到抽汽量和热用户需求的精准匹配，同时联动调整燃气轮机出力，使燃机负荷、蒸汽产量、抽汽供热量三者达到最佳匹配状态，彻底避免了高供热低电负荷、低供热高电负荷的不合理运行工况，从运行策略上保证机组热电运行的稳定性和经济性。

4.2 低负荷运行优化

针对三菱 M701F4 机组双工况低负荷运行能耗高、热效率急剧下降的行业共性问题,从机组轴系结构和通流特性入手,对机组调峰运行模式和低负荷参数控制策略进行优化。机组长时间处于低于 50%额定负荷的运行状态时,汽轮机蒸汽流量不足,低压缸叶片处在非设计工况下工作,鼓风摩擦损耗和端部泄漏损耗明显增大,同时余热锅炉换热温差变小、换热效率下降,整个能耗指标明显变坏。为了改善该问题,在电网常规调峰情况下,优先使用机组启停调峰、多机组负荷联动分摊的方式代替单组长时间低负荷稳燃运行,从根本上减少低效工况运行时间。如果电网调度有要求,机组必须保持低负荷运行的时候,通过调节机组的主辅参数,微调主蒸汽压力、温度和循环水温度,适应低负荷时汽轮机通流特性的变化,改善低压缸进汽分配,减小鼓风摩擦能量损耗。同时对余热锅炉烟气侧的调节参数进行优化,保证低负荷时锅炉的换热效率,从各个方面提高机组低负荷工况的运行经济性和稳定性。

4.3 工况切换标准化管控

根据机组双工况切换运行特点及设备结构,制定出一套标准化、规范化工况切换操作规程,对切换过程中参数波动和能耗损耗进行全方位控制。机组纯凝和抽凝工况的转换属于热力系统动态调整的过程,抽汽阀门的开关、蒸汽流量的重新分配、缸体压力的变化都会引起机组热力参数短时间失衡,造成热效率降低、负荷波动等现象。为此需要确定工况切换操作梯度,严格控制抽汽调节阀开度和关闭速度,同时控制燃机负荷升降和蒸汽参数调整的速度,防止由于某一个参数突然变化造成机组振动、参数超限等隐患。日常运行中严格控制工况切换频次,在季节变换、供热负荷突变、电网调度重大调整的时候才进行工况切换,杜绝无意义的频繁切换操作。同时建立定期设备校验制度,每月对抽汽调节机构、流量监测装置、压力温度变送器等主要设备进行校验,及时消除阀门卡涩、监测偏差等

缺陷,保证工况切换过程平稳可控,最大限度减少切换过程中能耗损耗和设备磨损。

4.4 设备状态优化维护

设备状态是保证机组双工况高效经济运行的基础,常态化精细化运维可以有效地减少设备的损耗,保持机组热力参数稳定,提高运行的经济性。余热锅炉是机组能量转换的核心设备,长期运行后换热管束容易积灰结垢,大大降低了烟气换热效率,造成主蒸汽参数低、燃料利用率低。需要建立季度清灰、年度检修清垢制度,针对锅炉高低压换热面积灰结垢进行清理,保证烟气和介质充分换热,稳定主蒸汽温度、压力参数。对汽轮机设备进行定期的通流部件、汽封、密封装置专项检查,及时修复磨损、老化部件,减少蒸汽内漏、外漏造成的能量损耗,提高汽轮机做功效率。另外对循环水系统的运维及运行参数进行改进,根据环境温度改变循环水泵的运行方式,精确调节凝汽器真空度和端差,减小纯凝工况下凝汽器冷凝散热损耗。依靠全系统、常态化的设备维护保养来消除设备缺陷所造成的能耗增加,不断巩固机组双工况高效运行的状况。

5 结论

三菱 M701F4 一拖一双轴双工况汽轮机运行灵活、适应性好,纯凝工况与抽凝工况各有优势。纯凝工况发电稳定、调峰能力强,适合非供热季电网供电需求,高负荷区间发电经济性好。抽凝工况可以实现热能梯级利用,综合能源利用率大大提高,供热季综合收益比纯凝工况高很多,是热电联产场景下的最佳运行方式。机组运行的不足表现在低负荷工况能耗大、工况转换损耗大、抽凝工况热电耦合限制调峰能力等几个方面。根据准确的运行工况进行匹配,对低负荷运行模式进行改进,对标准化工况切换过程加以规范,加强设备运维管理,从而提高机组双工况运行的稳定性和经济性。本次所得到的数据和优化措施,可以给同类型 F 级一拖一双轴机组双工况精细化运行、节能降耗、经济调度提供可靠的技术依据。

参考文献:

- [1] 肖权森.基于三菱 M701F4 型高效一拖一双轴联合循环发电机组的热电联产系统优化与创新设计[J].造纸装备及材料,2024,53(8):20-22+71.
- [2] 王亚平.M701F4 二拖一机组解汽过程运行炉主汽温波动分析[J].神华科技,2019,17(12):17-19.
- [3] 王雨田.M701F4 型二拖一机组增效负荷偏置自动判定研究[J].价值工程,2019,38(35):170-171.
- [4] 程伟,闫计栋.分散度监控在 M701F4 二拖一联合循环机组上的应用[J].神华科技,2018,16(3):54-57.