

水力发电厂水轮发电机组运行效率优化研究

方 睿

重庆市渝能(集团)有限责任公司, 重庆 400000

[摘要]随着能源需求持续增长以及碳中和目标的提出,水力发电作为核心可再生能源,其机组运行效率的提升有着明显的经济与环境价值。此项研究着重关注水轮发电机组效率传递链,全面且细致地剖析诸如水头流量耦合波动、水轮机效率曲面、发电机综合损耗、调速动态响应以及振动空蚀等诸多维度的影响因素;并针对性地给出流道优化设计、工况点自适应追踪、导叶桨叶协同精确控制、冷却系统减损以及数字孪生智能运维等一系列提升策略;同时深入分析基于机组效率-负荷精细化建模、融合经济性稳定性效率的多目标优化框架、动态规划算法求解以及预测调度实时滚动优化的开机组合方法。

[关键词]水轮发电机组;运行效率;多目标优化

DOI: 10.33142/hst.v8i7.17078

中图分类号: TM312

文献标识码: A

Research on Optimization of Operating Efficiency of Hydroelectric Generating Units in Hydroelectric Power Plants

FANG Rui

Chongqing Yuneng (Group) Co., Ltd., Chongqing, 400000, China

Abstract: With the continuous growth of energy demand and the proposal of carbon neutrality goals, hydropower, as a core renewable energy source, has significant economic and environmental value in improving the operational efficiency of its units. This study focuses on the efficiency transmission chain of hydroelectric generating units, comprehensively and meticulously analyzing the influencing factors of various dimensions such as head flow coupling fluctuations, turbine efficiency surface, generator comprehensive losses, speed regulation dynamic response, and vibration cavitation; Provide a series of targeted improvement strategies such as channel optimization design, adaptive tracking of operating points, precise control of guide vane blade coordination, cooling system loss reduction, and digital twin intelligent operation and maintenance; At the same time, in-depth analysis is conducted on the start-up combination method based on unit efficiency load refinement modeling, multi-objective optimization framework integrating economic stability efficiency, dynamic programming algorithm solving, and real-time rolling optimization of predictive scheduling.

Keywords: hydroelectric generator set; operational efficiency; multi-objective optimization

引言

随着国家经济的快速增长,工业现代化、智能化的逐渐提升,对能源的需求也越来越大。水能作为一种可再生的能源被充分地开发、利用起来。水力发电的基本原理是通过利用水位落差,配合水轮发电机组产生电力,也就是将水的位能转为水轮的机械能,再以机械能推动发电机,而得到电力。目前国内建设完成的不同装机容量、水头、运行方式的水电站运行、管理模式成熟,但发电机的运行效率提升仍有空间。

1 水轮发电机组稳定运行主要影响因素

1.1 水头与流量波动特性

天然来水在时空分布方面并不均匀,并且电网负荷指令也经常进行调整,这使得电站实际运行时的水头即 H 以及流量即 Q 呈现出强耦合且动态波动的特点。这种波动会直接改变水轮机最优工况点的空间位置,还会让机组出现偏离高效区的非稳定运行状况。尤其是那些有特定设计水头的机组,当水头大幅度降低,超出 10 个百分点的时候,其高效运行带就会明显收缩,而且流量发生突变,容易引发剧烈的压力脉动以及效率骤降的情况^[1]。水利部

在 2024 年所作的流域调度评估报告显示,在汛期水位变幅相对较大的某大型电站,因为这类水头异常波动所造成的日均效率损失最高能够达到 4.7 个百分点。

1.2 水轮机本体效率特性曲线

水轮机自身所具备的能量转换能力,是由其效率特性曲面也就是 $\eta=f(H, Q, \alpha)$ 来精准描绘的,在这里,导叶开度 α 作为极为关键的核心调节变量,起到了十分重要的作用。此效率特性曲面呈现出较为明显的非线性特点,而且其高效的区域往往是很狭窄的,一旦运行点偏离了最优的工况状态,比如说处在低负荷或者超高水头这样的工况情况之下,那么因内部流态急速变差而引发的诸如涡带以及脱流等水力方面的损失就会猛然间增大起来,进而使得效率出现快速下滑的情况。尤其需要留意的是,混流式水轮机在部分负荷工况状况下,其效率下降的幅度是格外激烈的,转轮叶片表面出现脱流所形成的旋涡核心区,将会致使产生巨大的能量耗散的情况,这一规律已经在模型试验以及流场数值模拟等相关研究当中被多次证实了。

1.3 发电机电磁与机械损耗特性

发电机内部的能量损耗构成较为复杂,其中主要包含

了定转子绕组铜损、铁芯磁滞涡流铁损、通风摩擦损耗以及轴承机械损耗等诸多方面。这些损耗所占的比例会随着机组负荷率、运行温度以及冷却条件的变化而呈现出动态的改变情况。在处于低负荷工况的时候,尽管铜损有所降低,然而铁损占比却相对地出现了上升的情况,并且通风损耗也不是按照一定比例来减少的,如此一来,便使得发电机的综合效率有可能会呈现下滑的趋势。轴承损耗和润滑状态、对中精度有着极为密切的关系,一旦出现润滑不良或者轴系不对中的状况,那么机械摩擦损失将会显著增加,有时候机器甚至还会抖得十分厉害。

1.4 调速系统动态响应性能

调速系统作为机组功率调节的具体执行机构,它的动态响应品质,像响应速度、超调量以及稳定性等,会对负荷跟踪精度和过渡过程效率产生直接的影响。如果响应出现迟滞的情况,那么机组就没办法及时地去跟踪电网调度所发出的指令,或者没法很好地适应水头流量方面的变化,最终只能被迫处在并非最优的工况点上运行。而要是出现超调或者振荡这样的情况,那就会使得水力系统的压力脉动加剧,不但会额外增加能量的损耗,而且还会对机械结构的安全构成威胁。现代的电液调速系统尽管一直在不断地进行改进,可是当它在应对那种快速且频繁发生的小负荷扰动调节的时候,其动态过程中损耗累积所产生的效应依旧是不可以被忽视掉的。

1.5 机组振动与空蚀状态

异常机械振动以及过流部件出现空蚀的情况,这无疑给机组的安全且高效的运行带来了极为严重的威胁。其中,振动产生的根源往往在于水力方面存在不平衡状况、机械部分出现不对中的情况或者电磁力呈现出不平衡的状态。而一旦发生剧烈的振动,那么它既会直接耗费掉大量的能量,还会致使连接部件产生松动乃至出现疲劳的现象。空蚀则是在低压区域,当汽泡溃灭时会对材料表面造成猛烈的冲击,进而对过流部件原本的光滑度形成破坏,使得水轮机的水力型线发生显著的改变,最终导致水力损失不断增大,效率也随之降低。若长期处于空蚀的运行状态,那么转轮叶片的表面便会变得坑坑洼洼的,其效率特性也会出现永久性的劣化情况,而且修复起来所需的成本是非常高昂的。

1.6 综合效率传递链分析

水轮发电机组本质是一个串联能量转换系统,其整体运行效率 η_{total} 由水轮机效率 η_t 、发电机效率 η_g 及传动效率 η_{trans} 三者乘积构成,即 $\eta_{\text{total}} = \eta_t \times \eta_g \times \eta_{\text{trans}}$ 。如此一来,只要其中任何一个环节的效率出现劣化的情况,那么这种劣化就会因为乘数效应的作用而被明显地放大。所以,优化方面的工作一定要把目光聚焦在整个效率传递链之上,要精准地去识别出其中最为薄弱的那个环节,像老电站当中经常会出现的水轮机效率衰减或者发电机绝缘老化导致的增损这类现象,然后针对这些情况去采取相应的治理措施。与此还必须要十分关注各个环节之间存在的耦合影响机制,比如说水轮机一旦出现不稳定的流态状况,往往

会引发电动机气隙出现不均匀的现象,进而就会产生额外的损耗,这样一种跨越不同系统的相互作用情况,还会进一步使得整体的能量转换效能大打折扣。

2 提高水轮发电机组运行效率的主要方法

2.1 水轮机选型与流道优化设计

科学的选型是高效运行的基础,需要严格按照电站的实际水头(H)、流量(Q)以及变幅特性参数来精准地匹配最为合适的机型,像混流、轴流或者贯流式等,并且要确定与之对应的比转速(n_s)范围。对于正在服役的机组而言,流道优化改造是一种能够提升能量转换效率的方式,具体的做法有借助计算流体动力学技术来优化叶片的三维型线,以此来抑制二次流损失;重新构建蜗壳以及尾水管型线,改善压力恢复特性,同时降低脱流的风险;细致地打磨过流表面,减少水力粗糙度^[2]。在某电站于2024年所发布的技改报告当中显示,该电站在2023年实施了新型高效转轮替换工程之后,在同样的水头条件之下,其最优效率点明显提高了3.1个百分点。

2.2 运行工况点自适应调整策略

机组应当对当下水头状况之下的最优单位转速 n_{11} 以及单位流量 Q_{11} 组合予以动态追踪。这就得去构建精准的实时效率模型,或者去调用预先设定好的效率特性图谱,并且要根据实际所测得的水头、流量还有功率信号,凭借调速系统来实时地对导叶开度 α 或者桨叶角度 φ 做出调整,从而把实际的运行点拉回到高效区域当中。像梯度寻优法、模糊规则这类智能算法,在这一领域有着十分广阔的应用前景。

2.3 导叶/桨叶协联关系精确控制

对于转桨式水轮机而言,其导叶开度 α 和转轮叶片角度 φ 的最优协联关系乃是高效运行的关键所在。传统的静态协联曲线是依据设计工况点来拟合的,所以很难去适应那种复杂的变工况需求。现代的控制策略会依靠在线效率计算或者预存的高精度特性曲面,以此来达成 α 和 φ 的实时动态最优匹配,尽可能地将协联偏差所引发的水力损失给减少掉。凭借这一策略对导叶开度以及转轮叶片角度的匹配关系进行动态调整,能够相当有效地拓宽机组高效运行的区域范围。

2.4 冷却系统与轴承损耗优化

发电机冷却效能会对绕组温升以及绝缘寿命产生直接影响,进而对铜损以及允许出力造成影响,优化措施包含改进通风道设计、应用高效冷却介质、实施智能温控等,像运用变频驱动冷却风机或者水泵,轴承损耗优化重点在于选用高性能润滑油、保持油温油质稳定以及实现高精度对中,以此降低摩擦系数,轴承座冷却油循环系统的温度调控对于减少其机械摩擦损耗而言是十分重要的。

2.5 数字孪生驱动的智能运维

构建起机组物理实体的高保真数字孪生模型,并且将实时运行数据、机理模型以及历史知识加以集成。此模型能够在线开展仿真预测工作,从而预估机组处在不同工况

之下的性能状况以及效率情况,同时还能识别出效率出现劣化的趋势以及潜在存在的故障,像是空蚀刚开始萌芽的情况、轴承出现磨损的状况等。依据预测所得到的结果,便可以主动地去优化运行的方式,做到精准地预测性维护,进而有效避免非计划性的停运以及低效的运行情形,最终达成在整个生命周期当中效率达到最优的效果。数字孪生已然成为了水电智能运维方面的核心使能技术。

3 开机组合优化分析的主要方式

3.1 机组效率-负荷特性建模方法

精确刻画单台机组效率 η_i 随其出力 P_i 及当前水头 H 变化的函数关系 $\eta_i=f(P_i, H)$ 构成开机组合优化的基础。在构建该模型之时,需要将借助大数据驱动拟合的历史运行数据挖掘与依据物理机理的修正方式充分融合起来,像设备老化这类因素会对特性曲线产生偏移方面的影响就得纳入考量范围。并且,此模型务必要拥有在线动态更新的能力,从而能够适应设备状态逐渐发生改变的过程。在工程实践领域,通常会运用分段线性化的方式简化相关计算操作,或者采用多项式回归来达成解析表达的目的,亦或是借助神经网络去逼近高维的非线性关系等方法来完成这一特性的建模工作。

3.2 多目标优化模型构建

电站总开机组合的优化属于典型的多目标决策范畴,在这其中,最为关键的核心目标在于要将全厂总发电效率实现最大化,同时要把发电成本尽可能地予以最小化,并且还要让运行稳定性达到最大化程度。在这一过程中,需要去构建诸如机组启停状态 U_i 、各机组分配功率 P_i 、多目标函数以及诸多复杂约束等方面的数学模型,而这些约束条件就包括了电站流量需要保持平衡、机组出力存在着上下限的限制、爬坡率也有相应的限制规定以及要对振动禁区加以规避等情况^[3]。通常来讲,这些不同的目标之间往往会存在着一定的冲突,就好比说当一味地去追求最高的瞬时效率的时候,就极有可能会部分机组出现频繁启停这样的状况。

3.3 动态规划算法在机组组合中的应用

动态规划在应对有着时序特性的问题上颇为拿手,特别适合水电厂多个时段的情况,就好比 96 点的日计划机组组合优化这类问题。它的关键之处就在于把整个问题给分解成若干个时段,然后在每一个阶段都做出相应的决策,并且借助最优性原理来一步步地推演,进而求得全局的最优或者次优策略。动态规划能够很自然地吧启停成本和时间耦合约束这些因素都考虑进去,不过它也得去解决维数灾方面的难题,通常需要和启发式规则或者是状态约简策略相互结合起来才行。

3.4 基于预测调度的实时优化步骤

在实际运行期间,需要持续滚动地执行闭环优化流程。系统会获取未来 4~24h 的水头预测情况、负荷需求预测数据以及电价相关信息,将其作为预测输入的基本依据。接着,凭借这些预测数据,运用多目标动态规划等模型展

开日前或者日内的优化计算工作,以此来求得最优的开机机组数量、具体的机组组合方案以及各机组的计划出力曲线^[4]。之后便进入到实时滚动修正环节,在这个阶段,会依据未来 5~15min 的超短期高精度负荷和水头预报信息,同时紧密参照机组当下的实时运行状况,针对既定计划开展动态微调操作,具体举措包含细致调整机组之间的负荷分配,以便精准追踪电网总需求的波动情况,还主动避开已知的机组振动敏感区域等操作;此阶段一般会采用二次规划等计算效率相对更高的在线优化算法,以此确保响应的时效性。经过优化所生成的指令会被下发到机组去执行,并且收集实际运行过程中的关键数据反馈给预测模型与优化算法模块,用于不断更新模型参数,提高后续预测的精度,如此便形成了闭环优化机制并持续推动这一流程的开展。

4 结束语

提升水轮发电机组运行效率,这是一项贯穿设计选型、精确控制、智能运维以及优化调度整个链条的系统工程。它的价值并非仅仅在于能耗降低,而是和清洁能源的最大化利用、电站经济效益提升以及设备服役寿命延长有着极为密切的关联。本研究全面且细致地梳理了从水头流量耦合作用到综合效率传递链当中那些关键的影响因素,深入探讨了从流道优化、协联控制直至数字孪生运维的前沿提升策略,同时对融合多目标优化与动态规划的开机组合方法及其滚动实施步骤展开了详尽的剖析。国家能源转型战略清楚地指出要提效降耗,水电身为主力可再生能源,其机组效率追求极致,这既是向技术极限发起的挑战,也是践行绿色低碳发展责任的应有之义。在未来,需要进一步完善机组全工况域效率精准预测模型,积极探索人工智能在多目标决策方面的创新运用,强化状态检修与运行优化之间的协同配合,还要关注效率提升过程中对生态环境的友好性,唯有如此,才能够在守护江河脉搏之时,不断释放水电这种古老而又常新且颇具活力的能源形式所蕴含的充沛能量。

[参考文献]

- [1]刘君,刘国峰,范家瑞.500m 级水头段冲击式水轮发电机组现场效率试验研究[J].西北水电,2023(6):98-103.
- [2]彭志才.水轮发电机效率提升关键技术分析[Z]《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集(一).东芝水电设备(杭州)有限公司;,2025:99-100.
- [3]韩鸿武,魏永嘉.提高卧式水轮发电机组中心调整的效率[J].云南水力发电,2021,37(9):135-136.
- [4]黄培勤,李航.大型水轮发电机定子线棒并头块感应加热效率影响因素分析[J].云南水力发电,2023,39(11):246-248.

作者简介:方睿(1995.4—),男,毕业院校:华北电力大学,所学专业:电气工程及其自动化,当前就业单位:重庆市渝能(集团)有限责任公司,职务:运维班长,职称级别:助理。