

四川地区大规模水电集群停机避峰 特征分析及管理系统设计

徐涛,杜成锐,王金龙,黄山松,王丽莉,王穹跃
(国网四川省电力公司,四川 成都 610041)

摘要:近年来,随着四川地区水电站数量和装机规模的急剧增加,大规模水电集群同时采取停机避峰措施对电网安全运行的影响日益突出。文中结合四川地区水电站运行、水电调度管理和电网运行实际情况,明确了引发水电站停机避峰的主要因素为流量、泥沙和杂质,分析了大规模集群径流式水电站停机避峰对电网调度的影响;从时间和空间(流域)2个维度研究了停机避峰发生的分布特征,提出了以流量和水质作为预测水电站是否发生停机避峰的可行判断方法;从预测方法、实时监测和系统架构等方面介绍大规模水电集群停机避峰管理系统设计思路。所设计的管理系统在四川电网的实际应用表明,该系统可以提高电网调度机构对实时停机避峰掌控能力,有助于辅助电网汛期安全稳定运行,可以为区域电网和水电站厂停机避峰管理提供参考。

关键词:停机避峰;径流式水电站;防洪;电网调度

中图分类号:TM 612 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)04-0001-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220401

Analysis of Shutdown and Peak Averting Characteristics and Design of Management System for Centralized Large-scale Hydropower Generator Group in Sichuan Area

XU Tao, DU Chengrui, WANG Jinlong, HUANG Shansong, WANG Lili, WANG Qiongyue
(State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: In recent years, with the rapid increase of the number and installed capacity of hydropower stations in Sichuan, the impact of simultaneous shutdown and peak averting measures of the centralized large-scale hydropower generator group on the safe operation of power grid has become increasingly prominent. Combined with the actual situation of hydropower station operation, hydropower dispatching management and power grid operation in Sichuan, it is defined that the main factors causing shutdown and peak averting in hydropower station are flow, sediment and impurities, and the impact of shutdown and peak averting of the centralized large-scale run-of-river hydropower stations on power grid dispatching is analyzed. The distribution characteristics of shutdown and peak averting is studied from two dimensions of time and space (watershed), and the flow and water quality are proposed as a feasible judgment method to predict whether the hydropower station will shut down and avoid peak load. Finally, the design idea for shutdown and peak averting management system of the centralized large-scale hydropower generator group is introduced from the aspects of prediction method, real-time monitoring and system architecture. The practical application of the management system in Sichuan power grid shows that the proposed system can improve the organization ability of power grid dispatching to control the real-time shutdown and peak averting, help to assist the safe and stable operation of power grid in flood season, and provide a reference for the shutdown and peak averting management of the regional power grid and hydropower plants.

Key words: shutdown and peak averting; run-of-river hydropower stations; flood control; power grid dispatching

0 引言

停机避峰是指径流式或调节能力弱的水电站由于河道洪水流量大、水质差,不满足安全发电要求,为避开洪峰采取闸门全开、机组停运的防洪措施。受季风气候影响,四川地区在汛期多持续性暴雨,易发生山洪、泥石流和洪水等灾害,导致无调节或日调节等调节能力弱的水电站经常采取停机避峰措施,造成电力系统出力减少。四川电网水电装机规模大、比例高,同一流域内水电站群水力电力联系密切,当遭遇全流域洪水时,将发生流域性停机避峰,系统出力大规模减少,造成电力系统电力供应失衡,威胁电网安全^[1-2]。

因此,分析水电站停机避峰发生条件,科学开展停机避峰预测预警,对实现电网安全调度具有重要意义。下面在研究停机避峰特性和发生条件的基础上,设计了大规模水电集群停机避峰管理系统,以期减轻停机避峰对四川电网的影响。

1 停机避峰原因及对电网的影响

1.1 停机避峰原因分析

强降雨对地表强烈的扰动,使汇入河道的水流中泥沙含量大幅增加。当暴雨形成洪水时,河道中裹挟的大量泥沙以及泥石流带来的大量推移质、悬移质、断枝和其他杂质,造成河道水质差^[3-4]。遇河道水质差时,径流式或日调节电站一般采用冲沙(库容蓄水水位达到一定高度后,提起对应冲沙闸门放水,利用泄流冲击进水闸门及库区内淤积的泥沙)、反冲(水库蓄水后全开闸门,利用泄流反向冲击取水口拦污栅淤塞物)和停机避峰等措施。相对于冲沙、反冲而言,停机避峰是一种被动的防御操作,可减少洪水、泥沙和水中杂质对电站的影响。

除洪水流量大影响水电站安全运行需泄洪外,洪水引发水电站停机避峰的原因一般可分为泥沙(悬移质、推移质)影响、杂质(断枝、垃圾等)影响和水头受阻。

1.1.1 泥沙引发停机避峰

泥沙的影响可以分为对机组磨蚀(悬移质)的影响、对建筑物冲蚀(悬移质、推移质共同作用)的影响以及对库区淤积(悬移质、推移质共同作用)的影响。

1) 机组磨蚀

机组磨蚀主要是指在汽蚀和泥沙磨损的共同影响下对水轮机过流部件的破坏^[5]。清水以汽蚀破坏为主;水质差时以泥沙磨蚀为主,特别是高速含沙水流,在冲击过流部件表面时,所生成的高温高压导致金属保护膜破坏,在进一步冲击下金属表面细微颗粒逐步脱落,形成沟槽、波纹及鱼鳞坑。磨蚀对水轮机的破坏与含沙浓度、成分、大小、硬度、形状、流速等有关,减少或消除泥沙可减轻破坏。

山区河流径流式水电站水轮机磨蚀更为严重。洪水时急剧增加的水中泥沙也会加剧水轮机及各过流断面的磨蚀。

2) 水工建筑物冲蚀

含沙洪水由于流速快加之推移质和悬移质对建筑物表面的碰撞、冲击,常增加水工建筑物过水表面的冲蚀破坏,特别是对护坦、取水口边墙、引水隧洞、闸墩、导墙的破坏尤为显著,常形成冲坑,造成露筋。

3) 库区淤积

含沙洪水在流经库区时,受闸门、闸墩等挡水建筑物的影响,流速相对减缓,造成水流中的悬移质、推移质在库区淤积,严重减少有效库容。

1.1.2 杂质引发停机避峰

洪水中裹挟的断枝、塑料袋等生活垃圾,常被水流冲击后卡在取水口拦污栅栅片内,造成过流不畅,流速减缓。推移质和悬移质在拦污栅前沉积,进一步加剧拦污栅淤塞,淤塞导致拦污栅两侧水位差(下面简称栅差)过大,取水困难,影响机组运行水头。所以在水中泥沙和杂质过多时,机组需停机甚至采取反冲措施来减少栅差。此类事件在岷江上游流域的水电站中较为常见。

1.1.3 水头受阻引发停机避峰

持续性暴雨引发的洪水整体抬高了河道水位,可能造成尾水水位过高。对于一些低水头径流式水电站,当上、下游水位差小于水轮机最小发电水头,即水头受阻时,水电站被迫停机。此类事件多见于嘉陵江流域的径流式水电站。

1.2 停机避峰对电网调度的影响

停机避峰主要由短时集中降雨引发,与降雨强度、降雨区域形成的洪水规模、水质情况等因素密切相关,具有明显的突发性和流域一致性。停机避峰会致短期内水电站群可调出力大幅下降,对电力系统运行稳定冲击较大,将直接影响电网的电力调

度计划执行,限制电站的供电能力,严重时将造成电网供电能力失衡。停机避峰对电网的影响主要体现在电力和电量两方面:

1) 对电力的影响

四川地区在汛期发生过停机避峰的电站约占四川电网统调水电站总数的 57%。以 2020 年为例,入汛后自 6 月下旬开始出现停机避峰,单日最大停机避峰容量出现在 8 月 18 日,约占当日四川地区最大负荷的 28%。停机避峰受降雨影响,但不同降雨强度、降雨区域形成的洪水规模、水质情况不尽相同,其发生呈突发性,最终是否造成水电站停机避峰的预测难度高。区域降雨多导致河流、支流规模性停机避峰。快速、大规模的水电站出力减少,对电力系统运行稳定冲击较大。

2) 对电量的影响

水电站停机避峰时长受洪水和水质变化影响,时间一般在 6~36 h,但短时可在 2 h 后恢复,长时也可持续 2~3 日。停机避峰直接造成水电站发电量减少,影响地区清洁能源消纳,例如,2020 年 8 月 18 日四川电网因停机避峰引起的电量损失高达 80 GWh。

2 四川地区水电站停机避峰分布特征及发生条件

停机避峰目的是为有效降低含沙洪水对径流式水电站的危害,因此停机避峰分布与区域降雨的时空分布关系密切。下面以四川地区 2020 年为例分析停机避峰分布特征。

2.1 时间分布特征

四川地区 2020 年主要降雨分布情况见表 1,单日电停机避峰容量如图 1 所示。

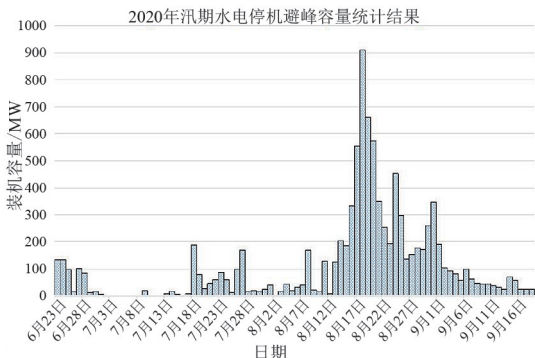


图 1 2020 年汛期单日电停机避峰容量

从时间尺度上看,停机避峰发生于主汛期 6 月

下旬至 9 月下旬,集中于 8 月中下旬,停机避峰时间与几次较大范围暴雨天气过程时间一致。受 7 月 14 日—16 日前期降雨影响,7 月 18 日四川电网停机避峰电站的数量出现一轮小高峰;8 月 13 日至 8 月末,接连 4 轮强降雨导致 8 月停机避峰电站的数量逐渐攀高,至 8 月 18 日达 101 座水电站。

表 1 2020 年主要降雨分布情况

日期	范围	最大日降雨量/mm
6月15日—17日	阿坝、巴中、达州等 16 市(州) 35 个水电站出现暴雨天气,其中 4 站大暴雨。	144.3(西昌市)
6月25日—27日	广元、巴中、广安等 9 市 26 个 水电站出现暴雨天气,其中 3 站大暴雨。	153.6(古蔺县)
7月9日—10日	宜宾、达州、甘孜等 11 市(州) 19 个水电站出现暴雨天气,其中 5 个水电站大暴雨。	161.7(苍溪县)
7月14日—16日	阿坝、达州、甘孜等 12 市(州) 39 个水电站出现暴雨天气,其中 8 个水电站大暴雨。	174.0(邻水县)
7月23日—26日	阿坝、巴中、达州等 16 市(州) 42 个水电站出现暴雨天气,其中 13 个水电站大暴雨。	163.9(盐亭县)
8月10日—13日	阿坝、成都、德阳等 15 市(州) 68 个水电站出现暴雨天气,其中 26 个水电站大暴雨,5 个水电站特大暴雨。	423.2(芦山县)
8月15日—18日	阿坝、巴中、成都等 17 市(州) 75 个水电站出现暴雨天气,其中 40 个水电站大暴雨,1 个水电站特大暴雨。	275.3(绵竹市)
8月22日—24日	阿坝、甘孜、德阳等 14 个市(州) 29 个水电站出现暴雨天气,其中 2 个水电站大暴雨。	115.0(峨眉山市)
8月28日—31日	阿坝、雅安、成都等 11 市(州) 39 个水电站出现暴雨天气,其中 12 个水电站大暴雨。	242.1(大邑县)

2.2 流域分布特征

2020 年四川省年降水量及暴雨天气最大日降水量分布如图 2 和图 3 所示。

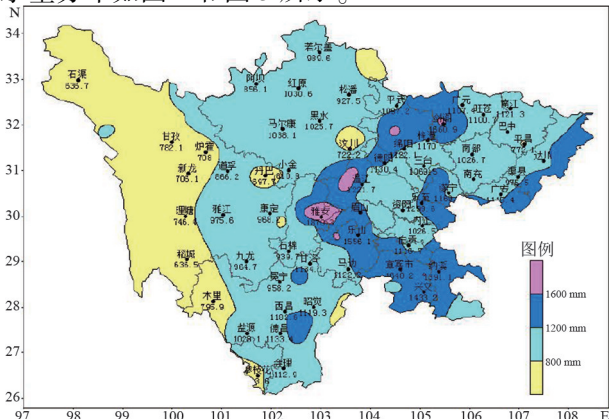


图 2 2020 年四川省年降水量分布 (来自四川省气象局)

从空间尺度上看,停机避峰主要发生在青衣江、岷江、嘉陵江、涪江和大渡河流域,最大日停机避峰装机容量超 1000 MW。雅砻江和金沙江流域的停机数量较少;岷江上游、青衣江、大渡河支流(磨西河、南桠河、尼日河)、嘉陵江干流及支流(白水河、涪江)等流域,其上下游径流式电站呈流域性、规模性的停机避峰状态。空间分布规律与 2020 年四川省降水量分布和暴雨最大日降水量分布较为接近。

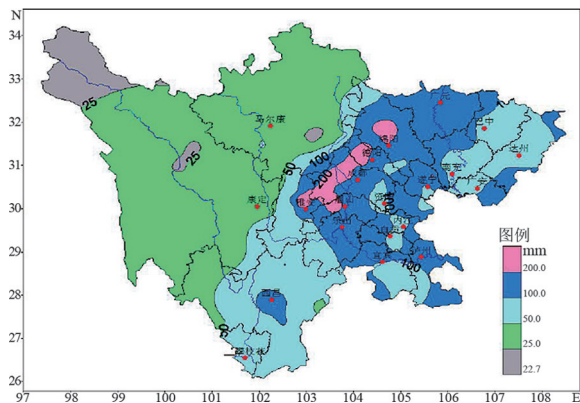


图 3 2020 年四川暴雨天气最大日降水量分布
(来自四川省气象局)

2.3 水电站特征

从易发生停机避峰的电站来看,主要存在以下特征:

- 1) 停机避峰为调节能力弱的水电站,多为日调节或无调节能力电站;其无调蓄能力或调蓄能力差。
- 2) 下游水头较低的水电站,如嘉陵江流域下游设计水头为 5~17 m,涨水后河道整体水位抬高或超过正常尾水位,水头降低后不满足发电要求。
- 3) 装机容量多小于 400 MW,为小 1 型、中型水电站;除东西关、凤仪、青居、上石盘、玉津等水电站,大部分水电站有效库容量小,大多小于 $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。
- 4) 正常蓄水位与死水位差值小于 16 m,大多为 3~5 m。
- 5) 水电站栅差多为 1~3 m。

2.4 停机避峰发生条件

分析清楚停机避峰的原因和分布特征后,可以找出水电站采取停机避峰的条件,来预测区域内电站是否会发生停机避峰,并研判停机避峰对电网的影响。根据电站防洪度汛设计及实际运行停机避峰经验,停机避峰发生条件大致可分为流量条件、水质条件、上下游运行条件、山洪及地质灾害等其他条件。

1) 流量条件即停机避峰流量限值,当达到或超过此限值,水电站将按照规程、防汛方案要求进行停

机避峰操作。流量限值主要由各水电站根据实际运行工程中河道来水避峰经验设定,或选用设计洪水流量值。四川电网统调水电站约 77% 的水电站有明确流量限值条件。量化的流量限值是判断水电站是否采取停机避峰最直接和准确的方法。水电站停机避峰流量限值大多为长期运行经验值,较为稳定;但受河床严重冲淤等因素影响,该流量限值为一个动态值,随时间推移会做出调整。部分典型流域停机避峰流量范围见表 2。有部分水电站会在流量达到限值时增加水质因素来共同判断。

2) 由于水中漂浮物、含沙石等严重影响水电站技术供水系统运行并造成转轮等过水部件磨蚀,所以除大型水库外,其他水电站运行时均对水质提出了要求。停机避峰的水质条件判断方式较多,分为非数值类判断条件和数值类判断条件,主要有河道水质差、水浑浊、漂浮物多以及拦污栅栅差(部分拦污栅栅差要求见表 2)、水质浊度、机组技术供水系统压力值、含沙量等。

表 2 部分典型流域停机避峰条件范围

序号	流域范围	停机避峰流量范围/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	栅差范围/m
1	岷江干流上游	800~1500	1.0
2	嘉陵江干流下游	2700~8280	1.0
3	涪江干流上游	300~500	
4	涪江干流下游	900~3500	
5	青衣江干流下游	3500~4000	1.0~1.5
6	南桠河	100	
7	白水河	120~210	1.0
8	磨西河	50~200	

含沙量及水质浊度是可直接量化的水质指标。但含沙量的数据采集需经专业水文站利用缆道分段取样、烘干、称重测量,流程较长、速度慢、时效性差,且多数水电站无专业水文站。水质浊度可直接由浊度仪测量获取实时数据,如文献[6]采取一种基于 90° 散射光测量原理的浊度仪,在映秀湾水电站建立了泥沙浓度在线监测系统。该系统通过泥沙浓度与浊度相关性率定后,可获得重复性好、准确度高、能较好反映水域泥沙浓度的变化趋势,能及时反映监测水域发电水体的泥沙变化情况,指导水电站发电和停机避峰工作;但浊度仪测量前需建立与含沙量的对应关系,且需经常保养维护以免测量数据误差过大。拦污栅栅差也可作为间接判断水质的数值方式,但也存在易受漂浮物等的影响,不能完整反映水质情况。

3) 受区域强降雨影响,停机避峰还存在流域性,即上游水电站出现停机避峰或冲沙、反冲等操作,能

间接反映水质情况还会直接影响河道水质,这时下游水电站会同时进行停机避峰或冲沙操作。因此将上游水电站停机避峰作为下游水电站停机避峰的一个条件。同时也可利用流域核心水电站停机避峰情况来判断其上下游水电站是否进行停机避峰操作。

4)各水电站具体环境不同,也会形成其他停机避峰条件,如区间强降雨,周边泥石流、滑坡、河道淤塞,尾水位异常升高等。水电站周边发生的山洪、泥石流也易造成取水口、尾水淤塞,直接影响水电站安全取水、用水。另外,水电站受灾导致长期停机不在讨论范围。

3 大规模水电集群停机避峰管理系统

停机避峰是一种被动的防御措施,其发生时间和持续时间不受人控制,主要受降雨和来水影响。而不同区域由于地形、河道、植被、冲沟、地面侵蚀程度等因素不同,形成洪水流量、水位、含沙量、杂质含量、历时都不同,造成的停机避峰范围和影响时间也不同,给停机避峰的预测和管理带来较大挑战^[7]。

提前掌握四川地区水电站停机避峰及恢复开机情况,做好预判、预测、预警,优化电力调度,加大水能消纳。减少因停机避峰产生弃水是停机避峰调度的主要目标。

为有效提升电网应急能力,加强短期停机避峰管理,为极端天气下电网安全评估提供技术支撑,建立了探索预测、跟踪和统计水电厂停机避峰清淤容量机制,设计了大规模水电集群停机避峰管理系统,实现对四川地区水电站停机避峰统一管理。

3.1 停机避峰预测方法

由于停机避峰受降雨及外部环境因素影响较多,且最终由各水电站独自研判并执行停机避峰操作,现阶段可行的预测方法是基于水电站自评估为基础的三维校验预测方法。该方法收集水电站上报未来三日预测停机避峰(或正常运行)状态以及平均流量,将上报流量先与各水电站停机避峰流量限值进行校核,再与上报的停机避峰(或正常运行)状态进行校核,同时可通过同一河流上下游的水力联系进行人工校核。

3.2 停机避峰实时监测

除预测外,当停机避峰发生时,快速准确地掌握停机避峰影响的装机容量及其所在的流域和送出断

面,对判断系统电力平衡、及时优化电力调度、安排备用容量有重要指导意义。

停机避峰实时监测根据停机避峰条件分析,主要基于监测到的实时流量和水质。流量包括测流断面流量、上游出库和区间流量、发电和出库反推流量。水质包括浊度、含沙量、栅差等可量化指标以及水质感官情况。此外降雨量的监测也可作用辅助依据。

目前,在实际工作中采用水电站实时停机避峰状态填报辅以水电站出力、入库流量的方式实现快速、综合判定停机避峰情况。

随着后期浊度、栅差等可量化、可获得数据源的丰富,基于大数据的积累,各水电站针对水质的判断指标将逐渐建立,有助于更加准确地指导停机避峰和对应影响装机容量规模的判断。

3.3 停机避峰分级预警

考虑到停机避峰的不同容量规模和可能的影响时长对电力系统的冲击也不同,结合电网、水电站防汛应急管理需求,应考虑对大规模停机避峰按照流域、送出断面对系统的影响及采取的措施进行分级、分层预警。

3.4 管理系统基本构架

所设计的大规模水电集群停机避峰管理系统功能如图 4 所示,包含实时监测、预测监测、统计分析、评价考核、水电站基础信息。



图 4 系统功能

1)实时监测功能,其核心功能是在分析引起停机避峰条件的基础上,对停机避峰后出力、水质、流量参数的变化进行识别,并进行综合判定,避免错报、漏报以及数据错误、遗漏等影响,该模块主要功能如图 5 所示。通过建立四川地区各大流域水电站

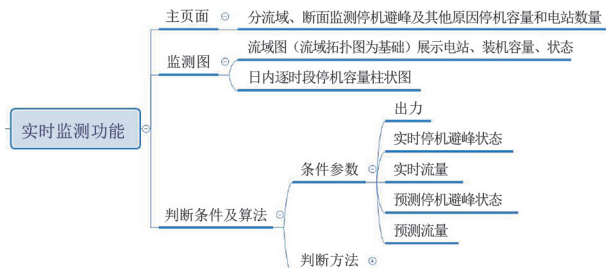


图 5 实时监测功能模块

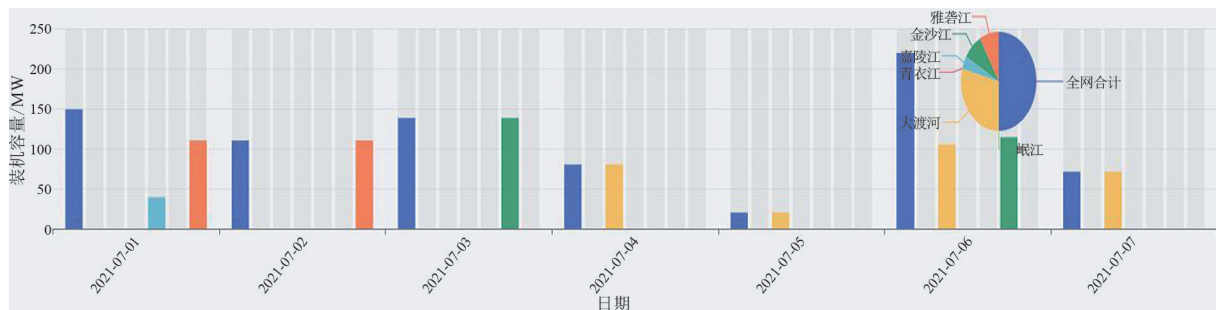


图 6 主要流域停机避峰实时监测

分布图(如图 6 所示),可直观显示停机避峰流域发生情况,便于准确掌握停机避峰情况,实时监测日内各时段停机避峰容量。

2) 预测监测功能,采集水电站上报未来三日停机避峰和流量预测情况。

3) 统计分析功能,可根据网架结构和区域管理需要,按主要输电断面和流域分别统计逐日停机避峰容量;也可提供各水电站出力、流量、状态、预测、开停机时间、流域断面等信息,为准确分析水电站停机避峰提供数据。

4) 评价考核功能,通过对比流量等综合研判结果与水电站上报实际状态,分析上报的及时性和准确性,督促各水电站按要求开展工作。

5) 水电站基础信息,包括水电站运维管理单位、所在流域、装机容量、设计洪水流量、停机避峰流量、水质条件以及上下游停机避峰条件等信息。

4 结 论

四川省作为水电大省,水电装机容量达 80 GW,水电站群水力电力联系密切。为减轻大规模水电站停机避峰对电网的影响,在分析了四川地区水电站停机避峰的主要原因及分布特征后,上面提出了停机避峰监测与预测可行方法,并设计了大规模水电集群停机避峰管理系统。在四川电网的实际应用表明,该系统提高了电网调度机构对停机避峰情况实时掌控能力,有力地保障了四川电网汛期安全稳定运行。

但受限于专用监测设备数量较少,缺乏对水质等数据的获取和积累,停机避峰预测主要停留在流量监测和人工判断阶段。此外,流量数据对水电站人工填报的依赖性较高,其可靠性有待加强。加强对降雨、流量、水质监测数据的获取与积累,建立更精准的预测模型进一步提高停机避峰预警的准确性

和预见性,将是未来电网应对大规模停机避峰的研究重点。

参考文献

- [1] 王亮,苗树敏,滕予非,等.基于运行数据的水电站 MILP 模型最优代表水头选取方法[J].四川电力技术,2020,43(4):1-4.
- [2] 苗树敏,滕予非,罗彬,等.计及风电不确定性的风-水短期联合优化调度方法[J].四川电力技术,2020,43(2):1-6.
- [3] 毕华兴,朱金兆,张学培.晋西黄土区小流域场暴雨径流泥沙模型研究[J].北京林业大学学报,1998,20(6):14-19.
- [4] 王正成,毛海涛,申纪伟,等.长江上游主要支流水沙特性及其影响因素分析[J].华东师范大学学报(自然科学版),2020(1):126-138.
- [5] 解建军,龙建明.中国水轮机磨蚀研究及防护、治理技术的进展[J].中国农村水利水电,2007(6):137-139.
- [6] 唐明亮,倪亮,张文渊,等.浊度仪在映秀湾水电站泥沙浓度监测中的应用[J].水力发电,2017,43(12):71-75.
- [7] 杨丹,宋英华,洪志坤,等.洪涝灾害数据可视化预警系统研究[J].中国安全科学学报,2016(5):158-163.

作者简介:

徐 涛(1987),男,硕士,工程师,从事水电运行管理工作;

杜成锐(1976),男,硕士,高级工程师,从事水电及新能源管理工作;

王金龙(1988),男,博士,高级工程师,从事水电运行管理工作;

黄山松(1985),男,工程师,从事水库调度系统运维管理;

王丽莉(1977),女,硕士,高级工程师,从事新能源与分布式电源调度管理工作;

王穹跃(1987),男,工程师,从事小水电及分布式电源管理工作。

(收稿日期:2021-11-15)