

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20230421002

文章编号: 1672-9331(2023)04-0153-14

引用格式: 鲍海艳, 张梓婕, 付亮, 等. 多能互补下水电站有功功率协调控制特性研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(4): 153-166.

Citation: BAO Haiyan, ZHANG Zijie, FU Liang, et al. Research on the active power coordination control characteristic of hydropower station under multi-energy complementation [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(4): 153-166.

多能互补下水电站有功功率协调控制特性研究

鲍海艳^{1,2}, 张梓婕^{1,2}, 付亮³, 黄运彪^{1,2}

(1. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙理工大学 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114; 3. 湖南五凌电力科技有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘要:【目的】研究多能互补运行方式下水电站有功功率协调控制特性。【方法】构建多能互补调节模式下水电站有功功率控制模型, 用电网考核标准评估响应能力, 分析不同水头、各调节参数对水电站协调控制特性的影响, 并用遗传算法对各参数进行优化。【结果】水电站在低水头下调节性能较好, 在高水头下易发生出力振荡, 调节性能变差; 脉冲周期越大越容易发生出力振荡; 最大脉宽越小水电站调节特性越好; 最小脉宽影响调节精度; 脉宽计算参数与调速器积分时间常数越小调节越快, 但易振荡, 其越大调节越稳定但跟踪能力差; 用遗传算法得出的最优参数, 实时出力跟踪好, 且满足电网考核。【结论】水电站在高水头工况下有功功率协调控制能力较差, 且调节易产生超调和振荡; 机组调节参数对水电站协调控制能力影响较大, 若取值不当则会导致调节性能变差; 利用遗传算法对调节参数优化能有效提高多能互补系统功率调节品质。

关键词: 水电站; 多能互补; 有功功率协调控制; 数值仿真; 参数优化

中图分类号: TV734

文献标志码: A

0 引言

在“双碳”目标的引领下, 未来我国将建成以新能源为主的新型电力系统。然而, 新能源的实时功率受制于瞬息万变的天气条件, 具有随机性、间歇性、反调峰性及功率波动大等特点^[1], 这必将给电网安全运行和清洁能源消纳带来重大挑战。利用水电等灵活性调节电源平抑间歇性风光发电是解决新能源规模化并网消纳的重要途径^[2]。水电在电网中的功能定位将从以发电为主转变为以调节为主、发电为辅, 这对水电的调节能力提出了更高要求^[3]。

为更好支撑新能源消纳, 国内已尝试开展风光一体化基地的建设及技术研究, 如青海龙羊

峡水光互补基地、四川小金川梯级水光蓄互补联合发电系统^[4-6], 在多能互补领域开展了一定的探索。水电机组有功功率调节具有非线性、非最小相位、参数时变等特征^[7], 在多能互补系统中水电机组需根据新能源负荷的变化进行实时调节。为确保良好的调节品质, 满足电网需求, 需进一步建立基于水电与新能源互补调节模式的数学模型, 开展水电站有功功率协调控制特性研究, 优化控制参数, 提升多能互补系统的调节品质。

李欢欢等^[8]建立风-水联合发电模型, 利用水电稳定调节能力来有效地抑制风力发电的波动性。孙艺轩^[9]构建了水风光电源互补性评价方法体系, 进行了水风光短期互补协调优化调度研究。谭乔凤等^[10]、梁艺缤等^[11]研究了大规模风光加入下梯级水电站的优化调度方式, 以及考虑水光协

收稿日期: 2023-04-21; 修回日期: 2023-04-23; 接受日期: 2023-04-23

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2022JJ30591)

通信作者: 鲍海艳(1982—)(ORCID: 0009-0006-0770-0992), 女, 副教授, 主要从事水电站过渡过程与控制方面的研究。E-mail: bhy@csust.edu.cn

调性与经济性的水电站优化调度方法。刘哲源等^[12]利用集合卡尔曼滤波方法进行水风光互补的适应性调度研究。以上研究主要侧重水电与新能源的联合调度,未涉及水风光多能互补系统的实时协调控制。

CHENNA等^[13]开展了抽水蓄能机组与新能源的协调控制建模研究,但其水电机组及输水系统数学模型过于简单,忽略了水轮机及输水系统的非线性特性。陈道君等^[14]建立了忽略水电机组有功功率调节动态特性的抽水蓄能-风电协调控制数学模型,该数学模型主要侧重于电网,无法准确仿真水电站的协调控制特性。孙华东等^[15]也建立了新能源与水电协调控制数学模型,该模型中水电机组有功功率输出采用负荷曲线替代,未考虑水电机组有功功率动态性能。ZHANG等^[16]提出了一种考虑动态频率响应的风-太阳能-水力-热协调发电系统的短期最优调度模型。WANG等^[17]提出了一种协调水电及周边风电、光伏设施运行的双层模型,研究发现水电可以用来平滑包括风能和太阳能在内的电力系统的产出波动。WANG等^[18]考虑水锤和导叶工作速度对功率振荡和反向功率调节的影响,提出了一种基于S形曲线加减速控制算法的新控制策略来改进功率调节。目前,水电与新能源实时协调控制研究成果多集中于电网侧,且水电机组调节系统模型考虑得十分简单,常采用固定的负荷曲线替代,未考虑其动态响应特性。

水电机组有功功率调节主要有监控系统功率闭环模式和调速器功率闭环模式两种,目前,各水电站主要还是以监控系统功率闭环模式为主。付亮等^[19]首次开展了水电机组监控系统功率调节的仿真研究,在给定功率阶跃扰动的前提下分析了各个参数的影响。李莹等^[20]将水电机组监控系统功率调节模型引入电力系统稳定分析中,分析监控系统有功控制对电网稳定的影响,由于将水轮机及输水系统模型进行了较大简化,所以该研究无法准确仿真水电机组有功功率调节特性。

在水轮机控制参数优化方面,黄光斌等^[21]分析了多种智能优化算法在水轮机参数辨识优化中的优缺点。王眺等^[22]进行了长距离输水系统停泵水锤防护的多目标优化研究。方红庆等^[23]在对水轮机调速器参数优化后提出粒子群优化(particle

swarm optimization, PSO)算法,该算法对于非线性系统控制参数的优化设计是一种有效的方法,但该算法易陷入局部最优解。XU^[24]提出了一种考虑一次调频性能和小波动稳定性的调速器孤网模式下的参数整定方法。以上研究主要集中在水轮机调速器频率控制及一次调频模式下的参数优化上,没有涉及机组在并网下的有功功率控制参数的优化,在该模式下机组控制环节和控制参数更多,比如,涉及监控系统和调速器,需要联合监控系统和调速器数学模型进行统一优化。本文拟引入相关优化算法对水电机组功率控制下的监控系统和调速器参数进行同步优化,提升水电站有功功率协调控制性能。

综上所述,目前在水风光互补运行方面的研究主要集中在联合调度、协调控制等方面,未准确考虑水电站有功功率控制模型,也未针对水电机组有功功率控制开展参数优化。对于水电站常用的监控系统功率控制的研究成果较少,这些研究没有对不同工况下水电机组有功功率协调控制特性进行深入分析,均是在给定功率阶跃扰动下进行的。风光水电多能互补下水电站需要实时根据风光出力的波动调节水电站有功功率输出,多能互补系统给水电站下达的功率调节指令是实时连续的,指令信号是一个类斜坡信号,单次功率调节幅度小,调节频次多,与目前接收电网调度下的水电机组有功功率控制过程存在区别。

本文结合多能互补控制模式,建立水电站有功功率协调控制非线性模型,该模型考虑了水轮机非线性特性和水电机组复杂输水系统特性,分析不同工况下水电与新能源协调控制特性,以及不同参数的影响机理,引入遗传优化算法对水电站有功功率控制下的监控系统和调速器参数进行优化,以提升水电站有功功率协调控制性能。

1 水电站功率协调控制数学模型

电网调度根据风电、光电负荷曲线和电网负荷曲线,按两者负荷偏差的允许值实时向水电站厂站级监控系统下发负荷调节指令。水电站监控系统接收到负荷调节指令后,根据各台机组实时负荷值,将负荷调节指令分配至各台机组现地控

制单元(local control unit, LCU)。若机组在监控系统功率控制模式下运行,则机组 LCU 采用脉宽调制(pulse width modulation, PWM)方法进行有功功率调节^[19],当实际有功功率与功率目标值偏差的绝对值大于所设定的有功功率调节死区时,LCU 实时向调速器发送功率“增/减”脉冲信号,直到有功功率偏差进入死区后停止下发指令。

1.1 水轮机非线性模型

一般来说,水轮机模型的建立会选择相似模型综合特性曲线进行过渡过程计算。考虑到水电机组功率调节仿真中仅涉及水轮机正常运行工作范围,为避免模型中出现代数环,本文采用水轮机运转特性曲线模拟水轮机的非线性特性。在水轮机模型中将以水轮机水头作为输入,水轮机流量和出力作为输出,在输水系统中采用积分形式的水击方程,以水轮机水头作为输入,水轮机流量作为输出,使得计算更加稳定。

水轮机运转特性曲线描述了真机水头、流量、出力和导叶开度的关系,公式如下:

$$Q = f(\alpha, H) \quad (1)$$

$$P = g(\alpha, H) \quad (2)$$

式中: Q 为水轮机流量, m^3/s ; P 为水轮机出力, MW ; α 为导叶开度, mm ; H 为水轮机工作水头, m 。

1.2 输水系统数学模型

以贵州三板溪水电站两机一洞带尾水调压室水电站为例,其输水系统示意图如图1所示。

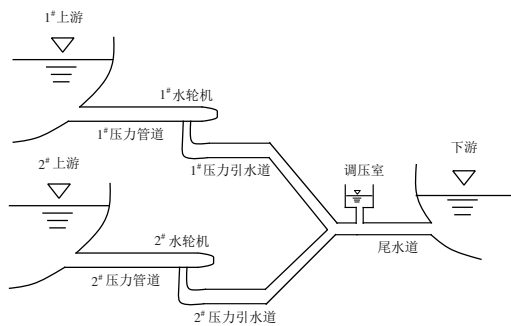


图1 两机一洞带尾水调压室输水系统示意图

Fig. 1 The schematic diagram of water conveyance system with the 'Two-Machine One-Hole' tailrace surge chamber

根据文献[25-26]的研究成果,对于混流式机组,只有在高惯性比率和长引水系统水电站中弹性水击模型与刚性水击模型计算结果差异较大。三板溪水电站引水系统不长,且机组惯性比率较小,因此可采用刚性水击模型。1#压力引水道、2#

压力引水道的运动方程分别为^[27]:

$$\frac{dq_1}{dt} = -\frac{1}{T_{w1}} (h_1 + z) \quad (3)$$

$$\frac{dq_2}{dt} = -\frac{1}{T_{w2}} (h_2 + z) \quad (4)$$

式中: h_1 、 h_2 分别为1#水轮机和2#水轮机的工作水头变化相对值; q_1 、 q_2 分别为1#压力引水道、2#压力引水道的流量变化相对值; z 为调压室水位变化相对值; T_{w1} 、 T_{w2} 分别为1#压力引水道、2#压力引水道的水流惯性时间常数; t 为时间。

取水流流进调压室为正,则调压室连续性方程为:

$$q_1 + q_2 - q_p = T_F \frac{dz}{dt} \quad (5)$$

式中: q_p 为尾水道流量变化相对值; T_F 为调压室时间常数。

尾水道运动方程为^[27]:

$$T_{wp} \frac{dq_p}{dt} + \frac{2h_{p0}}{H_0} q_p = z \quad (6)$$

式中: h_{p0} 为尾水道水头损失, m ; T_{wp} 为尾水道水流惯性时间常数; H_0 为初始水头, m 。

1.3 监控系统模型

采用文献[19]提出的PWM控制器数学模型,监控系统输出至调速器的信号为 $u(t)$,计算式如下:

$$u(t) = m(\Delta P) = \begin{cases} M \text{sign}(\Delta P), & t \in [kT, kT + T_k] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中: M 为监控系统输出幅值, MW ; T 为脉冲周期, s ; ΔP 为实际水轮机有功功率和功率调节目标值的差值, MW ; sign 为符号函数; T_k 为监控系统输出的脉冲宽度, s , 其中 $k=0, 1, 2, \dots, n$ 。 $\text{sign}(\sigma)$ 、 T_k 的计算式如下:

$$\text{sign}(\sigma) = \begin{cases} 1, & \sigma > 0 \\ 0, & \sigma = 0 \\ -1, & \sigma < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$T_k = \begin{cases} 0, & T_k \leq T_{k, \min} \\ \frac{T|\Delta P|}{\beta}, & T_{k, \min} < T_k < T_{k, \max} \\ T_{k, \max}, & T_k \geq T_{k, \max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: β 为脉宽计算参数; β_1 为增负荷脉宽计算参数; β_2 为减负荷脉宽计算参数; $T_{k, \max}$ 为最大脉宽, s ; $T_{k, \min}$ 为最小脉宽, s ; σ 为符号参数。

1.4 调速器数学模型

监控系统输出至调速器的信号为 u , 调速器

速器积分时间常数 $T_{iy}=12.5$ 、监控系统参数 $T=1.10$ s、 $T_{k,max}=1.00$ s、 $T_{k,min}=0.01$ s、 $\beta_1=0.05$ 、 $\beta_2=0.19$, 计算额定水头为 128 m 条件下三板溪两个水力单元四台机组参与水风光互补运行下协调控制过程, 计算结果如图 4 所示。

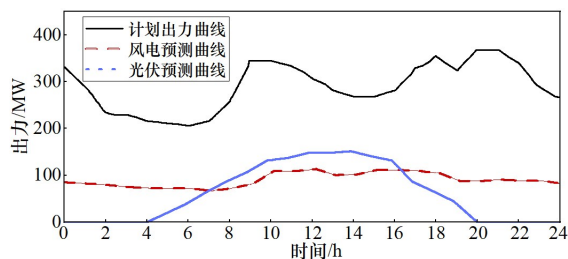
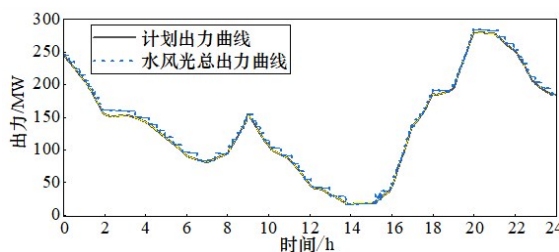
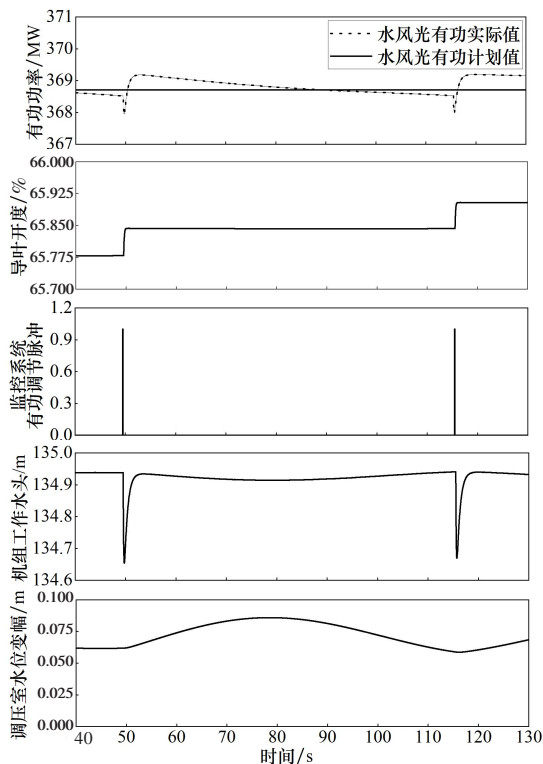


图3 电网 24 h 计划出力曲线及风电、光伏预测曲线

Fig. 3 24 h New energy load curve and grid load command curve of the power grid



(a) 24 h 水风光总出力及计划出力曲线



(b) 90 s 时间范围内水电站调节过程细部

图4 水风光互补运行下协调控制过程

Fig. 4 Coordinated control process under the water-wind-solar complementary operation

图 4(a) 为 24 h 水风光总出力曲线及电网下达的计划出力曲线(采样时间间隔为 5 min); 图 4(b) 为选取的 20:00 时水电站 90 s 时间范围内调节过程中的有功功率、导叶开度、监控系统脉冲、机组水头及调压室水位变化细部图(采样时间间隔为 0.01 s)。通过计算结果可以看出, 在当前工况下水电机组调节性能较好, 能够满足水风光互补协调控制的要求, 水风光总出力曲线与电网下达的计划出力曲线较吻合; 在当前调节模式下, 水轮机调速器根据监控系统下达的脉冲来调节导叶开度, 受到“水锤效应”的影响, 水电机组有功功率响应出现明显的功率反调, 调节过程中尾水调压室出现明显的低频水位波动, 也对有功功率调节过程有影响。

2.3 多能互补水电站有功功率的响应能力评估

根据 2020 年国家能源局华中监管局发布的“两个细则”中的规定^[29], 要求并网发电厂应严格按日发电计划曲线发电, 评估标准为: 每 5 min 整点计算的 actual 出力允许偏差应在日发电调度计划曲线 $\pm 2\%$ 以内, 即当日发电计划小于 100 MW 时, 允许偏差为 2 MW。按式(11)计算, 若不满足要求则按式(12)进行电量考核。

$$|P_s - P_m| - \max\{P_m \times 2\%, 2\} > 0 \quad (11)$$

$$W_{考核} = 2 \times (|P_s - P_m| - \max\{P_m \times 2\%, 2\}) \times 5/60 \quad (12)$$

式中: $W_{考核}$ 为考核电量, MW·h; P_s 为水风光实际总出力, MW; P_m 为电网计划负荷指令, MW; $\max\{P_m \times 2\%, 2\}$ 代表日发电调度计划的 2% 与 2 MW 相比取大值。

在分析中, 参考“两个细则”中考核电量计算方法来评价水电站协调控制的响应能力, 考核电量越多, 响应能力越差, 考核电量为零, 则响应能力最好。

2.4 水头对水电站协调控制特性的影响

为研究水头对水电站协调控制特性的影响, 选取该电站中最小水头 105 m, 额定水头 128 m, 最大水头 155 m 及中间水头 135、145 m 进行水风光协调控制过程的仿真模拟。计算分析中保持其他参数不变, 取值与 2.1 节的一致。

计算得到的不同水头下水风光实际出力曲线如图 5 所示, 不同水头下的考核电量 $W_{考核}$ 见表 1。

分析计算结果可知:在当前调节参数下,低水头下的协调控制效果更好,水风光发电实际出力曲线与电网计划出力曲线更加吻合,调节更平稳,均未超出指令曲线 $\pm 2\%$ 带宽;随着水头的增高,出现出力振荡,水头越高出力振荡的幅值越大、频次越高,且超出允许带宽(图6),电网考核电量也逐渐增加。

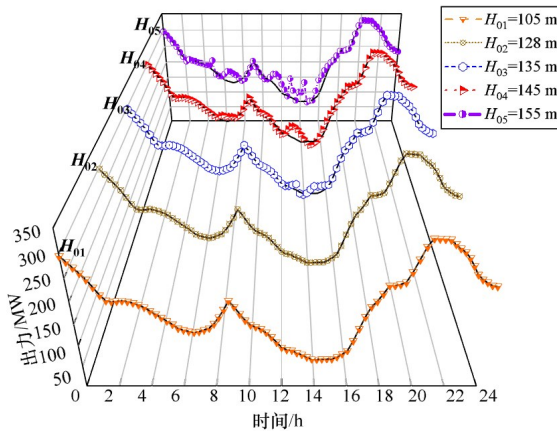


图5 不同工作水头下水风光实际总出力曲线

Fig. 5 The actual total hydro-, wind, and photovoltaic power outputs under different working heads

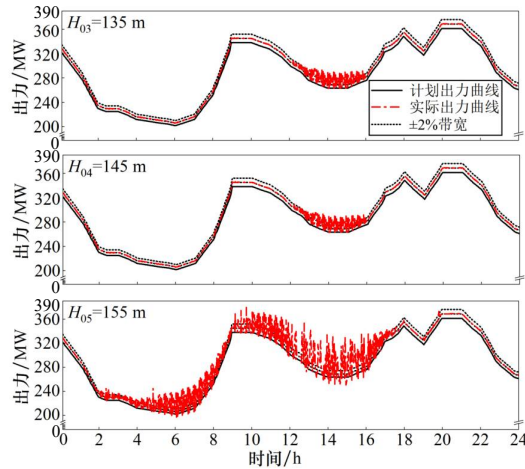


图6 高水头下水风光实际总出力与计划出力曲线对比

Fig. 6 Comparison of the actual and planned total hydro-, wind, and photovoltaic power outputs under high water head conditions

表1 不同水头下电网考核电量计算结果

Table 1 The calculated power grid assessment electricity under different water heads

水头/m	$W_{考核}/(\text{MW} \cdot \text{h})$	水头/m	$W_{考核}/(\text{MW} \cdot \text{h})$
105	0.00	145	138.00
128	0.00	155	301.62
135	29.74		

2.5 监控系统参数对水电站协调控制特性的影响

由监控系统PWM控制器数学模型可知,监控系统的输出主要受脉冲周期 T 、最大脉宽 $T_{k,max}$ 和最小脉宽 $T_{k,min}$ 、脉宽计算系数 β_1 和 β_2 的影响。本节在额定水头 $H_0=128\text{ m}$ 工况下,调速器积分时间常数 T_{iy} 取12.5时,分析监控系统各参数对水电站协调控制特性的影响。

2.5.1 脉冲周期 T

当 $T_{k,max}=1.00\text{ s}$ 、 $T_{k,min}=0.01\text{ s}$ 、 $\beta_1=0.05$ 、 $\beta_2=0.19$ 时,不同脉冲周期 T 对有功功率协调控制影响的计算结果见表2和图7。分析计算结果可知,脉冲周期 T 为1.1~1.7 s时,随着脉冲周期 T 的增大,水风光实际出力波动也逐渐增大,考核电量增多,脉冲周期 T 取2.0 s时虽然出力波动小,但是实际出力与计划出力偏差更大,考核电量最多。其主要原因在于:本次模拟的日计划出力曲线及新能源出力曲线中出力的变化是连续、缓慢的过程,而非阶跃变化,单次调节的目标值较小, T 越大,调节幅度越大,不利于很好地跟踪目标值,导致调节性能变差。

表2 不同脉冲周期下电网考核电量计算结果

Table 2 The calculated of power grid assessment electricity under different pulse periods

周期/s	$W_{考核}/(\text{MW} \cdot \text{h})$	周期/s	$W_{考核}/(\text{MW} \cdot \text{h})$
1.1	0.00	1.7	686.61
1.2	0.00	2.0	1 179.21
1.5	490.33		

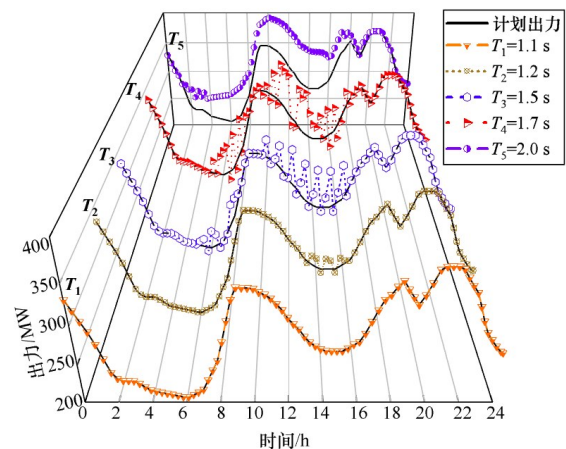


图7 不同脉冲周期下水风光实际总出力曲线

Fig. 7 The actual total hydro-, wind, and photovoltaic power outputs under different pulse periods

2.5.2 最大脉宽 $T_{k,max}$ 和最小脉宽 $T_{k,min}$

分析监控系统参数 $T=1.20\text{ s}$ 、 $T_{k,min}=0.01\text{ s}$ 、 $\beta_1=0.05$ 、 $\beta_2=0.19$ 时,最大脉宽对功率协调控制特性的影响,以及监控系统参数 $T=1.10\text{ s}$ 、 $T_{k,max}=1.00\text{ s}$ 、 $\beta_1=0.05$ 、 $\beta_2=0.19$ 时,最小脉宽对功率协调控制特性的影响。计算结果如表3所列和图8、图9所示。

表3 不同脉宽下电网考核电量计算结果

Table 3 The calculated power grid assessment electricity under different pulse widths

最大脉宽/s	$W_{考核}/(\text{MW}\cdot\text{h})$	最小脉宽/s	$W_{考核}/(\text{MW}\cdot\text{h})$
0.10	0.03	0.05	0.00
0.50	55.92	0.10	4.07
0.80	55.92	0.20	79.27
1.00	55.92	0.40	299.07
1.20	55.92	0.80	838.49

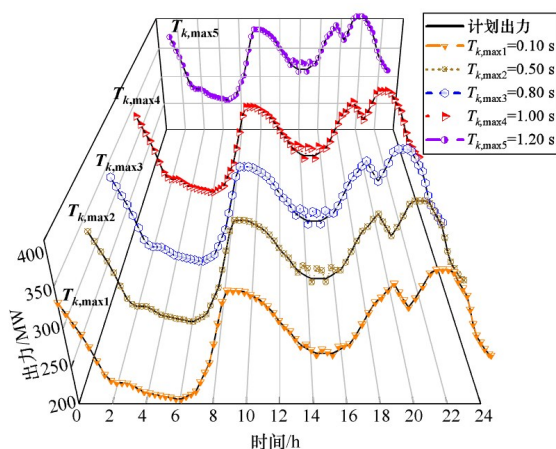


图8 不同最大脉宽下水风光实际总出力曲线

Fig. 8 The actual total hydro-, wind, and photovoltaic power outputs under different maximum pulse widths

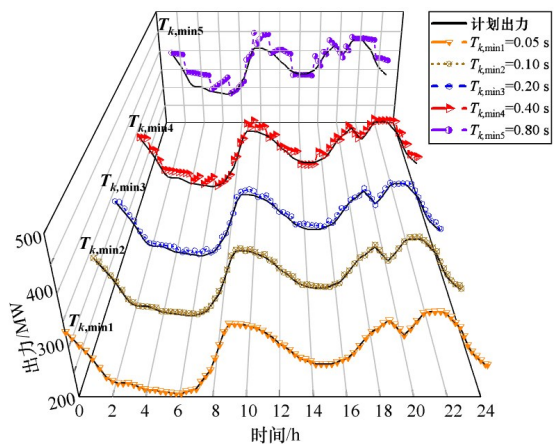


图9 不同最小脉宽下水风光实际总出力曲线

Fig. 9 The actual total hydro-, wind, and photovoltaic power outputs under different minimum pulse widths

分析表3及图8可知, $T_{k,max}$ 取值越小, 功率调节特性越好, 主要原因是: 本次模拟的日计划出力曲线及新能源出力曲线中出力的变化是连续、缓慢的过程, 而非阶跃变化, 单次调节的目标值较小, 因此小的最大脉宽反而能够更好地跟踪计划出力。当 $T_{k,max} \geq 0.5\text{ s}$ 时, 随着 $T_{k,max}$ 的增大, 考核电量不变, 出力变化波形也不变, 其原因是: 最大脉宽 $T_{k,max}$ 是脉宽 T_k 的上限值, 若 $T_{k,max}$ 较大, 则脉宽 T_k 始终小于 $T_{k,max}$, 此时脉宽 T_k 的值取决于式(9)的计算结果, 因此 $T_{k,max}$ 对功率协调特性无影响。

分析表3及图9可知, $T_{k,min}$ 主要影响调节精度, 通过计算结果可以看出, 随着 $T_{k,min}$ 的增加, 实际总出力与计划出力偏差增大, 调节精度降低, 考核电量增大, 因此 $T_{k,min}$ 取值不宜过大。但若取值太小则会造成调节次数增多, 对水电厂设备长期安全运行不利, 因此 $T_{k,min}$ 在满足电网不考核的前提下尽量取大值。

分析 $T=1.10\text{ s}$ 、 $T_{k,max}=1.00\text{ s}$ 、 $T_{k,min}=0.10\text{ s}$ 时, 增负荷脉宽计算参数 β_1 、减负荷脉宽参数 β_2 对有功功率调节的影响, β_1 、 β_2 的计算结果如表4所列和图10、图11所示。

表4 不同脉宽参数下电网考核电量计算结果

Table 4 The calculated of power grid assessment electricity under different pulse width coefficients

脉宽参数 β_1	$W_{考核}/(\text{MW}\cdot\text{h})$	脉宽参数 β_2	$W_{考核}/(\text{MW}\cdot\text{h})$
0.01	853.00	0.008	1 919.00
0.05	4.07	0.19	4.07
0.10	3.56	0.50	241.88
0.50	95.09	0.80	594.00
1.00	319.90	1.00	811.39

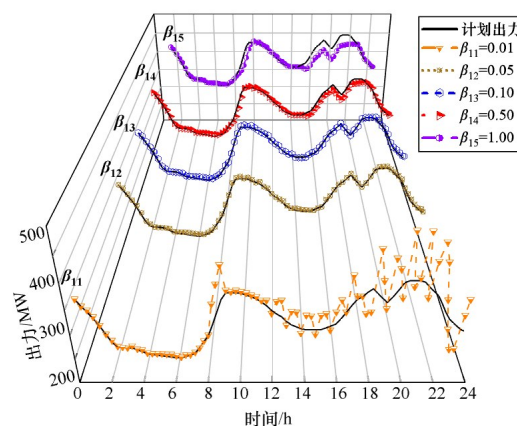


图10 不同增负荷脉宽参数下水风光实际总出力曲线

Fig. 10 The actual total hydro-, wind, and photovoltaic power outputs under different load pulse width coefficients

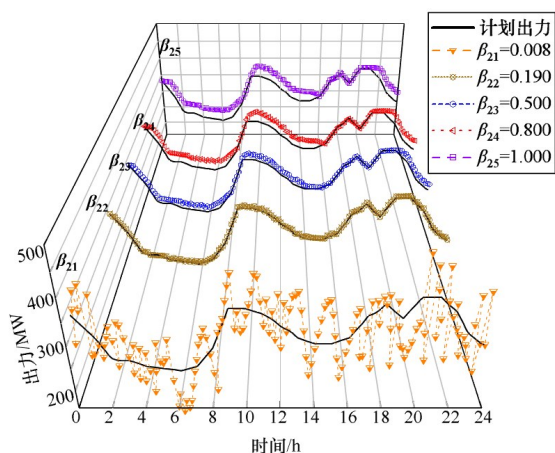


图 11 不同减负荷脉宽参数下水风光实际总出力曲线

Fig. 11 The actual total hydro-, wind, and photovoltaic power outputs under different load reduction pulse width coefficients

分析计算结果可知, β_1 和 β_2 对功率协调控制特性的影响规律相同, 均是其取值在一定范围内时协调控制特性较好。在一定范围外取小值时则会出现出力振荡, 考核电量增大; 取大值时虽然出力调节平稳但是调节速度慢, 水风光实际总出力偏离计划出力较远, 考核电量也会随之增大。因此两参数均存在一个最优的取值范围。

2.6 调速器参数对水电站协调控制特性的影响

当 LCU 下发增/减负荷的脉冲信号后, 调速器根据所接受的脉冲信号发出导叶开度给定值增/减阶跃, 导叶开度给定值增/减阶跃经过一个开度给定积分器计算得到导叶开度计算值, 对于一个阶跃信号的输入, 积分环节的输出为一个斜坡响应, 斜坡响应的变化速率由开度给定积分器中时间常数 T_{iy} 所决定。

分析水轮机初始水头 $H_0=128$ m, 监控系统参数 $T=1.10$ s、 $T_{k,\max}=1.00$ s、 $T_{k,\min}=0.01$ s、 $\beta_1=0.05$ 、 $\beta_2=0.19$ 时, 调速器参数 T_{iy} 对有功功率的影响特性。不同调速器积分时间常数下水风光实际总出力计算结果如图 12 所示, 考核电量见表 5。

表 5 不同调速器积分时间常数下电网考核电量计算结果

Table 5 The calculated power grid assessment electricity under different governor integral time constants

调速器积分时间常数	$W_{考核}/(MW \cdot h)$	调速器积分时间常数	$W_{考核}/(MW \cdot h)$
10	100.84	40	74.77
20	41.68	50	92.38
30	62.27		

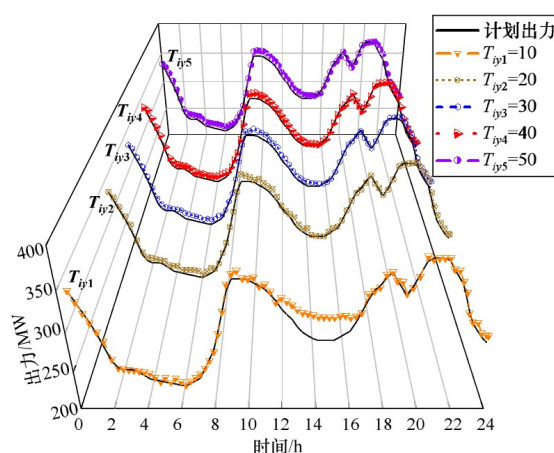


图 12 不同调速器积分时间常数下水风光实际总出力曲线

Fig. 12 The actual total hydro-, wind, and photovoltaic power outputs under different integral time constants of governors

分析计算结果可知, T_{iy} 对有功功率调节的影响呈非线性, T_{iy} 越小响应越快, 但易发生振荡; T_{iy} 越大, 虽然出力调节越平稳但是调节速度较慢, 无法很好地跟踪目标出力。在当前监控系统参数下 T_{iy} 的最优取值为 10~40。

3 多能互补下水电站协调控制参数优化

通过对影响因素的分析, 发现水轮机工作水头、监控系统参数及调速器参数对协调控制特性的影响是相互关联的, 并不完全独立, 需通过试算多种参数组合才能找到适应于某一水头的控制参数。本文运用遗传算法^[30]对多能互补下水电站协调控制参数进行优化, 然后在不同水头下进行仿真验证, 不断优选控制参数, 从而快速找到适用于不同水头的最优控制参数。

3.1 优化工况的选取及优化目标

本节选取最小水头、额定水头及最高水头三个工况分别进行参数优化。根据“两个细则”中电量考核办法, 确定优化的目标是通过脉冲周期 T 、最大脉宽 $T_{k,\max}$ 、最小脉宽 $T_{k,\min}$ 、增负荷脉宽参数 β_1 、减负荷脉宽参数 β_2 、调速器积分时间常数 T_{iy} 合理取值, 确保实际出力与计划出力偏差的绝对值积分最小, 即

$$\min \left\{ \int_0^t \left| P_s(T, T_{k,\max}, T_{k,\min}, \beta_1, \beta_2, T_{iy}, t) - P_m(t) \right| dt \right\} \quad (13)$$

根据监控系统的数学模型公式(7)~(9)可知,优化过程的约束条件为: $T_{k,\min}<T\leq T_{k,\max}$ 。

3.2 优化结果分析

设置算法中的种群数量为 50,最大迭代次数为 5,交叉比例为 0.8,变异概率为 0.05,在最小水头 $H_{01}=105\text{ m}$ 、额定水头 $H_{02}=128\text{ m}$ 及最高水头 $H_{03}=155\text{ m}$ 三个工况下进行参数寻优,优化结果见表 6。

表 6 不同工况下监控系统参数及调速器参数优化结果
Table 6 Optimization results of monitor and governor parameters under different working conditions

工况	T	β_1	β_2	$T_{k,\max}$	$T_{k,\min}$	T_{iy}
最小水头	7.0	0.10	0.15	3.800	0.050	65
额定水头	6.2	0.20	0.25	0.400	0.095	84
最大水头	4.9	0.10	0.15	0.400	0.050	86

由表 6 可知,由于不同水头下水轮机的特性不同,因此不同工况下优化出的监控系统参数及调

速器参数也不同,即每个工况下都对应其最优参数。以最大水头为例,对参数优化前后水风光协调控制过程进行对比分析,如图 13 所示。

由图 13 可以看出,参数优化前水风光实际总出力在 4:00~18:00 出现了出力振荡,振幅超出 $\pm 2\%$ 带宽,不满足电网要求;采用优化后的参数后,水风光实时出力能够很好地跟踪计划出力,出力无振荡,且均未超出 $\pm 2\%$ 带宽。由此可见,采用该优化方法能够得到最大水头下的一组最优参数,使得水电站功率协调控制特性满足电网要求。

分别将最大水头、最小水头优化后的参数代入数学模型,进行其他水头工况下控制过程模拟,模拟结果分别如图 14、图 15 所示。图 14 是利用最大水头工况下优化的参数进行最小水头 $H_{01}=105\text{ m}$ 、额定水头 $H_{02}=128\text{ m}$ 、最大水头 $H_{03}=155\text{ m}$ 三种工况下水风光协调控制过程模拟。由计算结果可知,这三种工况下的水风光实际总出力均能够很

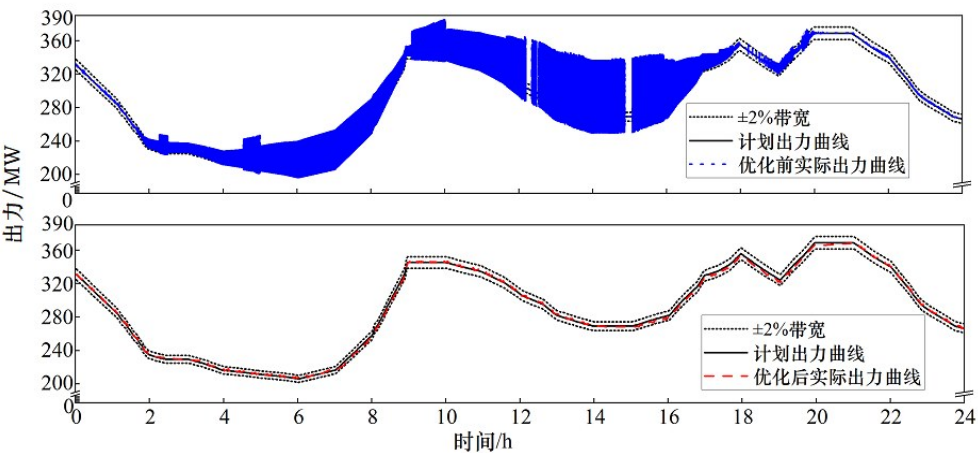


图 13 最大水头下参数优化前后水风光实际总出力曲线对比

Fig. 13 Comparison of actual total hydro-, wind, and photovoltaic power outputs before and after the operating parameter optimization under the maximum water head condition

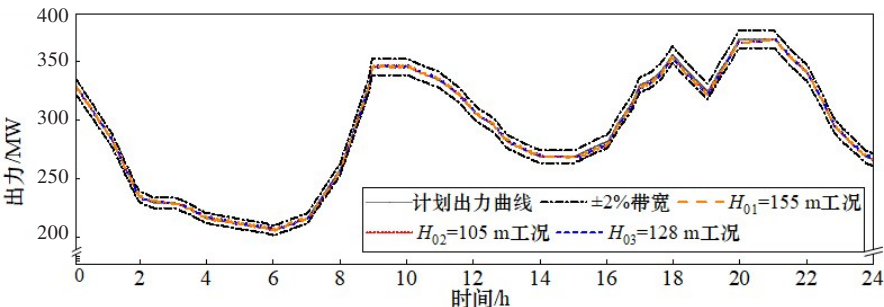


图 14 用最大水头工况优化参数计算不同水头下水风光实际总出力曲线

Fig. 14 The actual total hydro-, wind, and photovoltaic power outputs under different water heads were calculated by optimizing the operating parameters under the maximum water head condition

好地跟踪计划出力曲线,实际总出力无振荡,且均未超出 $\pm 2\%$ 带宽,满足“两个细则”的考核要求。经2.4节分析可知,最大水头为最不利工况,因此,在最大水头下利用遗传算法进行多能互补水电站功率协调控制参数优化,能够保证全水头范围协调控制的稳定性及调节品质。图15是利用最小

水头工况下优化的参数进行最小水头 $H_{01}=105\text{ m}$ 、额定水头 $H_{02}=128\text{ m}$ 、最大水头 $H_{03}=155\text{ m}$ 三种工况下水风光协调控制过程模拟。由计算结果可知,此组参数只对最小水头工况最优,不能适用于其他水头工况。

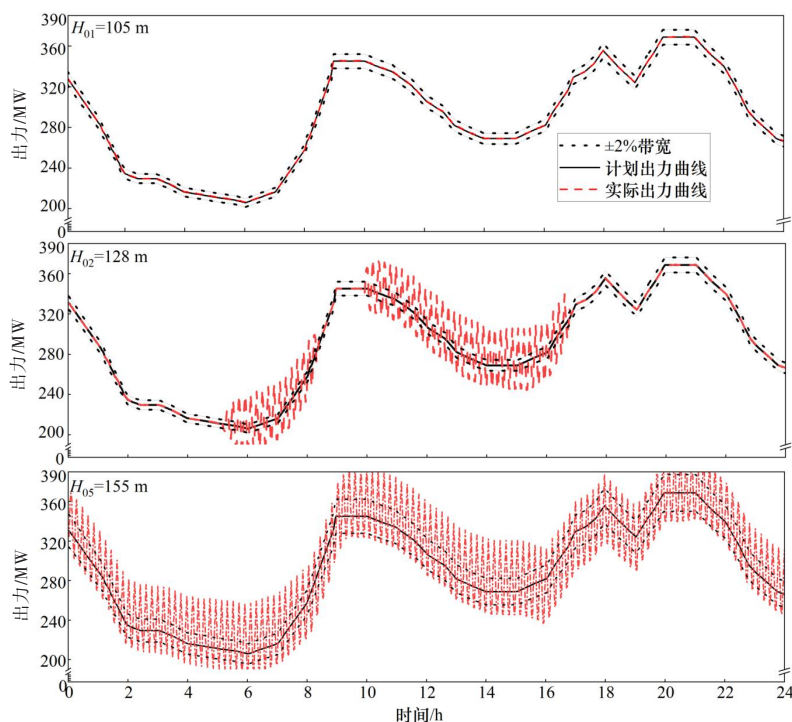


图15 用最小水头工况优化参数计算不同水头下水风光实际总出力曲线

Fig. 15 The actual total hydro-, wind, and photovoltaic power outputs under different water heads were calculated by optimizing the operating parameters under the minimum water head condition

4 结论

本文建立了多能互补调节模式下水电站有功功率协调控制模型,模型中详细考虑了水轮机非线性特性、水电机组输水系统特性,对多能互补调节模式下的水电站实时协调控制特性进行了分析,并以“两个细则”规定的考核电量作为评价指标,分析了不同水头、不同监控系统参数、不同调速器参数下的水电站有功功率协调控制特性,采用遗传算法对调节参数进行了优化。通过研究得到以下结论:

1) 不同水头下水电站有功功率协调控制过程差异较大,算例中低水头下有功功率调节效果更好,水风光实际总出力与计划出力更加吻合,调节更平稳。本文算例中随着水头的增高,将会出现

出力振荡,随水头增高出力振荡的幅值增大、频次增多,电网考核电量也逐渐增加。

2) 本文算例中脉冲周期 T 为1.1~1.7 s时,随着脉冲周期 T 的增大,水风光实际出力波动也逐渐增大,考核电量增多。当脉冲周期 $T=2.0\text{ s}$ 时,虽然出力波动小,但是实际总出力与计划出力偏差更大,考核电量最多;最大脉宽 $T_{k,\max}$ 取小值时,调节特性较好,当 $T_{k,\max} \geq 0.5\text{ s}$ 时, $T_{k,\max}$ 的增大对调节特性无影响;最小脉度 $T_{k,\min}$ 主要影响调节精度,取值越小实际总出力与计划出力的偏差越小;脉宽计算参数 β_1 、 β_2 及调速器积分时间常数 T_{iy} 对协调控制特性的影响规律相同,均是取值越小,出力响应越快,但易发生振荡,取值越大,出力调节越平稳但是调节速度较慢,无法很好地跟踪计划出力,因此, β_1 、 β_2 、 T_{iy} 均存在一个最优的取值范围。

3) 本文以实际总出力与计划出力偏差的绝对

值积分最小为目标函数,利用遗传算法优化多能互补水电站功率协调控制参数,并进行不同水头下的仿真验证。验证结果显示,在最大水头下优化后的参数能够保证全水头范围内多能互补系统协调控制的稳定性及调节品质。

本文对水风光多能互补水电站有功功率协调控制特性进行了研究,相比目前对水电与新能源协调控制建模与仿真的研究,本文详细考虑了水机组水力-机械特性及输水系统特性。本文研究的局限性如下:

1) 模型中没有考虑水轮机振动区对有功功率协调控制的影响。由于水轮机固有特性的影响,为了保证运行安全,实际水机组运行中均设置有一定的振动区,有功功率调节时均要避开振动区运行。

2) 本文针对一种新能源负荷曲线进行了水电站有功功率协调控制特性研究,还需深入研究不同新能源负荷曲线下水电协调控制特性。今后需要进一步深化数学模型的研究,考虑水轮机实际避振运行的要求,同时还需要结合水风光一体化基地的建设,开展现场真机实测,将仿真结果与实测结果进行对比分析,优化仿真模型。

【参考文献】

- [1] 姜枫,鲍峰,姬联涛,等.考虑抽蓄-风-光-火联合系统运行经济效益的日前优化调度研究[J].水力发电, 2022, 48(1): 99-105, 111. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2022.01.018.
JIANG Feng, BAO Feng, JI Liantao, et al. Research on optimization of day-ahead dispatching of pumped storage-wind power-photovoltaic-thermal power hybrid system considering operating economic benefit [J]. Water Power, 2022, 48(1): 99-105, 111. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2022.01.018.
- [2] 申建建,王月,程春田,等.水风光多能互补发电调度问题研究现状及展望[J].中国电机工程学报, 2022, 42(11): 3871-3885. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211765.
SHEN Jianjian, WANG Yue, CHENG Chuntian, et al. Research status and prospect of generation scheduling for hydropower-wind-solar energy complementary system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 3871-3885. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211765.
- [3] 程春田.碳中和下的水电角色重塑及其关键问题[J].电力系统自动化, 2021, 45(16): 29-36. DOI: 10.7500/AEPS20201220003.
CHENG Chuntian. Function remodeling of hydropower systems for carbon neutral and its key problems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 29-36. DOI: 10.7500/AEPS20201220003.
- [4] 张婷,杨婷.龙羊峡水光互补运行机制的研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版), 2015, 36(3): 76-81. DOI: 10.3969/j.issn.1002-5634.2015.03.018.
ZHANG Ping, YANG Ting. Research on Longyangxia hydro-photovoltaic complementary operation mechanism [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2015, 36(3): 76-81. DOI: 10.3969/j.issn.1002-5634.2015.03.018.
- [5] 单鹏珠,阎应飞,王雁,等.梯级水光蓄协调优化控制技术研究[J].西华大学学报(自然科学版), 2021, 40(1): 63-68.
SHAN Pengzhu, YAN Yingfei, WANG Yan, et al. Research on cascade hydro-PV-pump storage system coordinated optimization control technology [J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2021, 40(1): 63-68.
- [6] 温正楠,刘继春.风光水互补发电系统与需求侧数据中心联动的优化调度方法[J].电网技术, 2019, 43(7): 2449-2460. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1142.
WEN Zhengnan, LIU Jichun. A optimal scheduling method for hybrid wind-solar-hydro power generation system with data center in demand side [J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2449-2460. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1142.
- [7] ZHAO X X, REN Y, SHA Y B, et al. Research on the impact of hydro-PV complementary system operation on power grid based on new energy consumption [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022: 1-11. DOI: 10.1155/2022/8459948.
- [8] 李欢欢,陈帝伊,许贝贝.水力发电灵活性对混合电力系统的调节影响[J].排灌机械工程学报, 2022, 40(2): 157-163. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.20.0160.
LI Huanhuan, CHEN Diyi, XU Beibei. Hydro flexibility in regulating power fluctuation of hybrid system [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(2): 157-163. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.20.0160.
- [9] 孙艺轩.基于多能互补特性的水风光短期优化调度[D].大连:大连理工大学, 2020. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2020.001377.
SUN Yixuan. Short term optimal scheduling of wind-solar-hydro power based on multi-energy complementary characteristics [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. DOI: 10.26991/d.cnki.

- gdllu.2020.001377.
- [10] 谭乔凤, 聂状, 闻昕, 等. 大规模风光接入下梯级水电站调度方式研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(9): 44-55. DOI: 10.11660/slfdxb.20220905.
- TAN Qiaofeng, NIE Zhuang, WEN Xin, et al. Operation modes of cascade hydropower stations considering large-scale integration of wind and photovoltaic power [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(9): 44-55. DOI: 10.11660/slfdxb.20220905.
- [11] 梁艺斌, 畅建霞, 郭爱军, 等. 考虑水光协调性与经济性的水电站优化调度[J]. 水力发电学报, 2022, 41(6): 22-33.
- LIANG Yibin, CHANG Jianxia, GUO Aijun, et al. Optimal operation of hydropower stations considering hydro-photovoltaic coordination and economy [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(6): 22-33.
- [12] 刘哲源, 刘攀, 李赫. 水风光互补适应性调度的集合卡尔曼滤波方法[J]. 水力发电学报, 2022, 41(8): 42-53. DOI: 10.11660/slfdxb.20220805.
- LIU Zheyuan, LIU Pan, LI He. An ensemble Kalman filter method for adaptive operation of hydro-wind-solar hybrid power systems [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(8): 42-53. DOI: 10.11660/slfdxb.20220805.
- [13] CHENNA A, AOUZELLAG D, GHEDAMSI K. Study and control of a pumped storage hydropower system dedicated to renewable energy resources [J]. Journal Européen des Systèmes Automatisés, 2020, 53(1): 95-102. DOI: 10.18280/jesa.530112.
- [14] 陈道君, 王璇, 左剑, 等. 计及风电出力不确定性的抽水蓄能-风电联合优化调度方法[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(8): 110-116. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3814.2016.08.020.
- CHEN Daojun, WANG Xuan, ZUO Jian, et al. A joint optimal dispatching method for pumped storage power station and wind power considering wind power uncertainties [J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(8): 110-116. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3814.2016.08.020.
- [15] 孙华东, 李佳豪, 李文锋, 等. 大规模电力系统仿真用新能源场站模型结构及建模方法研究(一): 模型结构[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1378-1389. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.213034.
- SUN Huadong, LI Jiahao, LI Wenfeng, et al. Research on model structures and modeling methods of renewable energy station for large-scale power system simulation (part I): model structure [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1378-1389. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.213034.
- [16] ZHANG Q Y, XIE J, PAN X P, et al. A short-term optimal scheduling model for wind-solar-hydro-thermal complementary generation system considering dynamic frequency response [J]. IEEE Access, 2021, 9: 142768-142781. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3119924.
- [17] WANG X X, VIRGUEZ E, XIAO W H, et al. Clustering and dispatching hydro, wind, and photovoltaic power resources with multiobjective optimization of power generation fluctuations: a case study in southwestern China [J]. Energy, 2019, 189: 116250. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116250.
- [18] WANG C, WANG D K, ZHANG J M. Experimental study on the optimal strategy for power regulation of governing system of hydropower station [J]. Water, 2021, 13(4): 421. DOI: 10.3390/w13040421.
- [19] 付亮, 鲍海艳, 黄波. 水电机组监控系统有功功率调节仿真研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(1): 62-71. DOI: 10.11660/slfdxb.20200107.
- FU Liang, BAO Haiyan, HUANG Bo. Study on active power regulation of hydropower unit monitoring system [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(1): 62-71. DOI: 10.11660/slfdxb.20200107.
- [20] 李莹, 王官宏, 艾东平, 等. 考虑LCU的水电机组有功联合控制对频率稳定的影响[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(增刊1): 167-177. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211378.
- LI Ying, WANG Guanhong, AI Dongping, et al. Influence of combined active power control of hydro turbine on frequency stability consider the effect of LCU [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(sup 1): 167-177. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211378.
- [21] 黄光斌, 刘冬, 刘东, 等. 多种智能优化算法在水轮机调节系统参数辨识中的对比研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(6): 193-198, 204.
- HUANG Guangbin, LIU Dong, LIU Dong, et al. A comparative study of various intelligent optimization algorithms in parameter identification of hydraulic turbine governing system [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(6): 193-198, 204.
- [22] 王眺, 詹航, 万五一. 长距离输水系统停泵水锤防护多目标优化研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(12): 90-99. DOI: 10.11660/slfdxb.20221210.
- WANG Tiao, ZHAN Hang, WAN Wuyi. Multi-objective optimization method for water hammer protection against pump failure in long-distance water transfer systems [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(12): 90-99. DOI: 10.11660/slfdxb.20221210.
- [23] 方红庆, 陈龙, 李训铭. 基于线性与非线性模型的水轮机调速器PID参数优化比较[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(5): 100-106. DOI: 10.13334/j.0258-

- 8013.pcsee.2010.05.016.
- FANG Hongqing, CHEN Long, LI Xunming. Comparisons of optimal tuning hydro turbine governor PID gains based on linear and nonlinear mathematical models[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(5): 100-106. DOI: 10.13334/j. 0258-8013.pcsee.2010.05.016.
- [24] XU Z H. Tuning method for governor control parameters of hydropower generator in isolated grid considering primary frequency performance and small-signal stability[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1(5): 568-575. DOI: 10.14171/j.2096-5117.gei.2018.05.006.
- [25] 杨帅, 徐永, 李湧博, 等. 刚性和弹性水锤模型对水轮机调节系统计算的影响[J]. 人民长江, 2022, 53(3): 136-143. DOI: 10.16232/j. cnki. 1001-4179.2022.03.021.
- YANG Shuai, XU Yong, LI Yongbo, et al. Influence of rigid and elastic water hammer models on calculation of hydraulic turbine governing system[J]. Yangtze River, 2022, 53(3): 136-143. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.03.021.
- [26] MAZIJ J, BERGANT A. Practical experiences with water hammer control in Slovenian hydropower plants [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 240: 052033. DOI: 10.1088/1755-1315/240/5/052033.
- [27] 孔昭年, 田忠禄, 陈卓, 等. 具有长引水系统的转桨式水轮机过渡过程计算[J]. 水利学报, 2021, 52(10): 1204-1216. DOI: 10.13243/j. cnki. slxb.20210182.
- KONG Zhaonian, TIAN Zhonglu, CHEN Zhuo, et al. Calculation of transient process of Kaplan turbine with long diversion system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(10): 1204-1216. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20210182.
- [28] 韩柳, 庄博, 吴耀武, 等. 风光水火联合运行电网的电源出力特性及相关性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 91-98. DOI: 10.7667/PSPC150876.
- HAN Liu, ZHUANG Bo, WU Yaowu, et al. Power source's output characteristics and relevance in wind-solar-hydro-thermal power system [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 91-98. DOI: 10.7667/PSPC150876.
- [29] 国家能源局华中监管局. 国家能源局华中监管局关于印发《华中区域并网发电厂辅助服务管理实施细则》和《华中区域发电厂并网运行管理实施细则》的通知[Z]. 武汉: 国家能源局华中监管局, 2020.
- Central China Energy Regulatory Bureau of National Energy Administration of the People's Republic of China. The Notice of the Central China Energy Regulatory Bureau of National Energy Administration of the People's Republic of China on Printing and Issuing the Implementation Rules for the Management of Auxiliary Services of Grid-connected Power Plants in Central China and the Implementation Rules for the Management of Grid-connected Operation of Power Plants in Central China [Z]. Wuhan: Central China Energy Regulatory Bureau of National Energy Administration of the People's Republic of China, 2020.
- [30] DEB K, AGRAWAL S, PRATAP A, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II [C]//Parallel Problem Solving from Nature PPSN VI. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000: 849-858. DOI: 10.1007/3-540-45356-3_83.

Research on the active power coordination control characteristic of hydropower station under multi-energy complementation

BAO Haiyan^{1,2}, ZHANG Zijie^{1,2}, FU Liang³, HUANG Yunbiao^{1,2}

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Hunan Wuling Power Technology Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: [Purposes] To study the active power coordination control characteristics of a hydropower station under a multi-energy complementary operation mode. [Methods] The active power control model of a hydropower station under a multi-energy complementary regulation mode is constructed, and the response ability is evaluated by the power-grid assessment standard. The influence of different water heads and regulation

parameters on the coordinated control characteristics of the hydropower station is analyzed, and the parameters are optimized by a genetic algorithm. **[Findings]** The regulation performance of the hydropower station is better under low water heads, and it is easy to produce output oscillation and poor regulation under high water heads. The larger the pulse period is, the easier the output oscillation occurs. The smaller the maximum pulse width, the better the regulation characteristics of the hydropower station. The minimum pulse width affects the adjustment accuracy; the smaller the pulse width calculation parameter and the governor integration time constant are, the faster the adjustment is, but it is easy to oscillate. The larger the parameter is, the more stable the adjustment is, but the tracking ability is poor. The optimal parameters obtained by the genetic algorithm have good real-time output tracking and meet the grid assessment. **[Conclusions]** Under high water heads, the coordinated control ability of regulating active power of the hydropower station is poor, and the regulation is easy to produce overshoot and oscillation. The adjustment parameters of the unit have a great influence on the coordinated control ability of the hydropower station. If the value is improper, it will lead to poor regulation performance. Using genetic algorithms to optimize the adjustment parameters can effectively improve the power regulation quality of multi-energy complementary system.

Key words: hydropower station; multi-energy complementary; active power coordinated control; numerical simulation; parameter optimization

Manuscript received: 2023-04-21; **revised:** 2023-04-23; **accepted:** 2023-04-23

Foundation item: Project (2022JJ30591) supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province

Corresponding author: BAO Haiyan (1982—) (ORCID: 0009-0006-0770-0992), female, associate professor, research interest: transition process and control of hydropower station. E-mail: bhy@csust.edu.cn

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:江静怡)