

基于反调节补偿的抽水蓄能与电化学储能协同优化运行特性分析

李浩良^{1,2},孙逊^{1,2},周聪¹,刘琛祺⁴,叶滨^{1,3},顾天威⁴,陈珂⁴,李明宇⁴

(1. 国网新源集团有限公司,北京 100052; 2. 国网新源控股有限公司华东开发建设分公司,浙江省杭州 310000; 3. 国网新源控股有限公司抽水蓄能技术经济研究院,北京 100053; 4. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司,北京 100083)

摘要:【目的】抽水蓄能机组的一次调频能力是新型电力系统的关键支撑。本文提出利用电化学储能补偿抽水蓄能反调节特性的协同优化运行方案,有效地提升了抽水蓄能机组的一次调频能力。【方法】首先,结合水泵水轮机全特性曲线,构建考虑伺服系统饱和特性的抽水蓄能机组水轮机工况一次调频模型;其次,建立电化学储能模型,提出利用电化学储能补偿抽水蓄能反调节特性的协同优化运行策略;最后,结合实际电站数据进行了仿真验证。【结果】结果表明:在 PID 参数不变的情况下,相较于独立运行,联合系统所在电网的频率最大跌落深度减少 31.3%,且流量与水头波动显著抑制;PID 参数进一步优化后,联合系统所在电网的频率跌落深度减少 75%。【结论】该策略以较小容量的电化学储能,使一次调频的调节品质和鲁棒性得到显著提升。

关键词:抽水蓄能; 电化学储能; 协同运行; 一次调频; 反调节

中图分类号:TM71

文献标识码:A

文章编号:

随着新型电力系统的快速发展,新能源逐渐成为电力系统的主要组成部分,然而其出力的波动性及不确定性给电网的稳定运行带来了巨大挑战[1-2]。为了增强系统的稳定性,储能逐渐进入大众视野,成为现阶段应对大规模新能源对电网造成波动的有效解决方案[3]。抽水蓄能具有调峰、调频、调相、储能、系统备用以及黑启动六大功能[4],容量大、可靠性高、经济性好等经济优势,现已成为促进新能源消纳、保障电网安全的经济性最优、规模性最大的清洁灵活性调节电源[5-6]。

大型抽水蓄能电站长期以来主要依赖定速机组[7],其在发电工况下的功率调节范围相对有限,且因为水击造成的反调节特性导致调节速率较慢;在抽水工况下,其功率通常无法调节,难以应对高比例新能源接入电网后带来的大规模、快速功率波动挑战[8-9]。其中,反调节特性主要由水机效应引起:当导叶开度快速变化时,压力管道中水流惯性导致水压剧烈波动,进而引起流量或水头的反向变化,对机组功率输出产生不利影响,制约其一次调频性能。

收稿日期/Received: 2025-09-01

电化学储能系统具有毫秒至秒级的快速响应能力,能够迅速平抑电网的频率和电压波动,及时补充功率缺额,为电网提供灵活的调节能力[10-11]。因此,将抽水蓄能与电化学储能相结合,可以充分发挥前者规模大、持续时间长、经济性好,以及后者响应速度快、配置灵活的优势,形成互补,提升综合调节效果。

在协同运行方面,抽水蓄能电站与电化学储能的联合运行已被探讨,文献[12-13]表明抽水蓄能与电化学储能协同运行有助于新能源消纳及系统安全稳定运行;文献[14]利用电化学储能解决了水电调频快速性与稳定性之间的矛盾,提高电站的调节性能。尽管这些研究从电站调度和机组稳定性的角度出发,得到了有益的结论,但未能深入揭示抽水蓄能机组内部的水力-机械动态特性,特别是水机效应导致的反调节问题,因而所配置的电化学的配置容量往往比较大,经济性有待优化。为此,针对反调节这一核心问题,文献[15]提出了基于反调节补偿技术的水电机组与电化学储能协同优化控制策略,

修回日期/Received: 2025-

基金项目:国网新源集团有限公司科技项目(SGXYKJ-2024-074)。

第一作者:李浩良(1969—),男,硕士研究生,正高级工程师,从事抽水蓄能机组运行与管理方向。

E-mail:840237099@qq.com

通信作者:刘琛祺(1987—),男,高级工程师,从事新能源、新型储能、抽水蓄能业务工作方向。E-mail: liucq@bjy.powerchina.cn

初步证实了利用小容量储能有效提高机组的性能,为本研究提供了重要的方向性启示。然而,该研究主要针对传统水电机组,且模型采用线性模型,难以精确刻画抽水蓄能机组复杂的非线性动态特性及影响。

综上所述,本文对基于反调节补偿技术的抽水蓄能与电化学储能协同优化运行特性进行分析,首先,构建考虑伺服系统、引水系统、水泵水轮机非线性的抽水蓄能机组一次调频模型;然后,构建电化学储能模型,并建立基于反调节补偿技术的抽水蓄能与电化学储能协同优化方案;最后,进行仿真分析,量化控制参数优化前后联合系统的运行特性及对一次调频的影响,重点在于阐明,通过构建精准模型并实施与水力动态精准匹配的补偿控制,能够以较小的电化学储能容量,高效抑制反调节现象,并显著提升系统的整体调频性能。这一发现为破解抽水蓄能机组调频困境提供了一条高性价比的新思路。

1 抽水蓄能机组建模

定速抽水蓄能机组水泵工况入力仅与扬程相关,不可调节。因此,本节仅对抽水蓄能机组调节系统的水轮机工况进行建模,水轮机工况结构与常规水电机组相同,主要包括 PID(比例-积分-微分控制器)控制、伺服系统、水泵水轮机及引水系统、发电机及负荷[16]等,其一次调频结构框图如图 1 所示。图中: P_{ref} 为参考功给定值, f_{ref} 为系统频率给定值, P 为水电机组功率, f 为系统频率, Y_{PID} 为 PID 的输出, α 为开度, e_p 为调差系数。

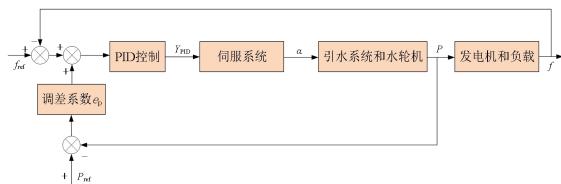


图 1 一次调频结构框图

Fig.1 Block diagram of Primary Frequency Regulation

1.1 控制系统

PID 控制系统的结构框图如图 2 所示。图中: Δf 为频率偏差, Δp 为功率偏差。

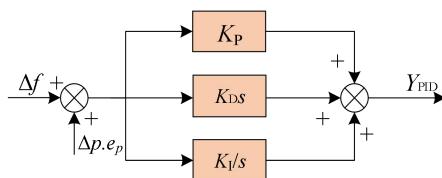


图 2 PID 控制结构框图

Fig.2 Block diagram of PID control

该系统的传递函数 G_{PID} 可表示为:

$$G_{\text{PID}}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (1)$$

式中 K_p 、 K_i 、 K_d 分别代表调速器比例、积分、微分增益; s 为拉普拉斯算子。

1.2 伺服系统

伺服系统采用伺服系统的非线性模型,其非线性因素主要包括调速器位置饱和限制、接力器速度限制及位置限制,如图 3 所示[17]。图中 δ_{max} 、 δ_{min} 为配压阀行程上限、下限; y_{max} 、 y_{min} 为接力器行程上限、下限; δ 为配压阀行程。

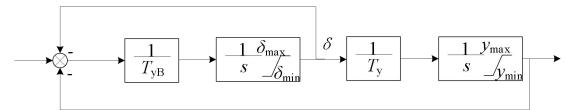


图 3 非线性伺服系统模型

Fig.3 Nonlinear Servo System Model

其对应的传递函数 $G_y(s)$ 可表示为:

$$G_y(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{(1+T_{yB}s)T_y s + 1} \quad (2)$$

式中: T_{yB} 为辅助接力器响应时间常数; T_y 为接力器响应时间常数。

1.3 水泵水轮机

水泵水轮机模型采用基于全特性曲线的非线性模型[18],如式(3)所示:

$$\begin{cases} M_t = M_t(\alpha, n, H) \\ Q = Q(\alpha, n, H) \end{cases} \quad (3)$$

式中: n 为水泵水轮机的转速; Q 为水泵水轮机的流量; α 为水泵水轮机的导叶开度; M_t 为水泵水轮机的力矩; H 为水头。

在一次调频过程中,转速变化小,可近似认为机组的功率 P 等于水泵水轮机的力矩 M_t 。

1.4 引水系统

引水系统模型可采用近似弹性水击模型,其传递函数 $G_t(s)$ 可表示为:

$$G_t(s) = \frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{-T_w s}{0.125 T_r^2 s^2 + f T_r s + 1} \quad (4)$$

式中: $H(s)$ 和 $Q(s)$ 分别为水头的拉普拉斯变换和流量的拉普拉斯变换; T_w 为水流惯性时间常数; T_r 为水锤压力波反射时间常数; f 为水头损失系数。

1.5 发电机及负载

发电机及负载可看作一阶惯性系统,其传递函数 $G_g(s)$ 可表示为:

$$G_g(s) = \frac{1}{T_a s + e_n} \quad (5)$$

式中: T_a 为机组惯性时间常数; e_n 为水电机组综合自调系数。

2 电化学储能建模

电化学储能的优势主要体现在其能量和功率配置灵活性强,受环境条件限制较小,易于实现大规模部署与应用[19]。

由于电池模型的电路元件均为常用的电路简单单元器件,因此,在仿真软件中实现起来简单,基于基尔霍夫定律,对电池模型建立数学方程,根据数学方程方便对电池模型进行仿真分析与实验验证。根据电路的基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's Current Law,KCL),得到关于电流的数学关系方程如下:

$$\begin{cases} I = \frac{V_1}{R_1} + C_1 \frac{dV_1}{dt} \\ I = \frac{V_2}{R_2} + C_2 \frac{dV_2}{dt} \end{cases} \quad (6)$$

式中: I 为流过电池的充放电电流; R_1, C_1 为第一组极化电阻与电容(反映短时动态过程); R_2, C_2 为第二组极化电阻与电容(反映长时动态过程); V_1 为极化电阻 R_1 和极化电容 C_1 两端的电压; V_2 为极化电阻 R_2 和极化电容 C_2 两端的电压。

根据电路的基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's Voltage Law,KVL),获得关于电压 V 的数学表达式为:

$$V = EMF(SOC) + V_h(SOC) - R_0 \cdot I - V_1 - V_2 \quad (7)$$

式中: SOC 为电池的剩余电量; EMF 为电池的平衡电势; V_h 为电池的滞回电压; R_0 为欧姆电阻。

将式(6)中的电流表达式变形得出适合用于电路仿真的数学表达式,方便在仿真模型里用加减运算和积分运算来实现:

$$\begin{cases} V_1 = \int \frac{I - \frac{V_1}{R_1}}{C_1} dt \\ V_2 = \int \frac{I - \frac{V_2}{R_2}}{C_2} dt \end{cases} \quad (8)$$

3 抽水蓄能+电化学储能协同运行策略

基于已建立的抽水蓄能和电化学储能模型,本节基于反调节补偿技术,提出一种抽水蓄能与电化学储能协同运行策略,并进行分析。

3.1 基于反调节补偿技术的抽水蓄能+电化学储能控制策略

定速抽水蓄能机组因其自身的反调节特性及功率响应慢等问题,对电网的稳定带来一定的影响[20]。该反调节特性是由水击效应引起的,而水击是水流的固有属性,难以根本消除,故而需从控制系统角度寻求解决方案[15]。本文构建了如图 4 所示的“抽水蓄能+电化学储能”联合系统运行框图。该系统通过电化学储能控制系统,依据水轮机导叶开度生成控制信号,进而调节电化学储能的直流功率输出。图中显示,该直流电能经逆变器转换为交流后,与水电机组的输出功率相叠加,共同构成联合系统的总功率输出。电化学储能控制系统所采用的具体控制策略由式(9)所描述的传递函数实现。

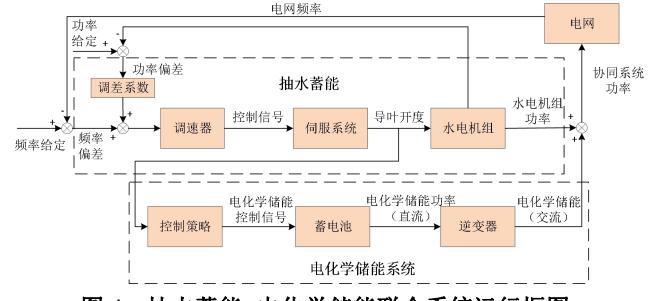


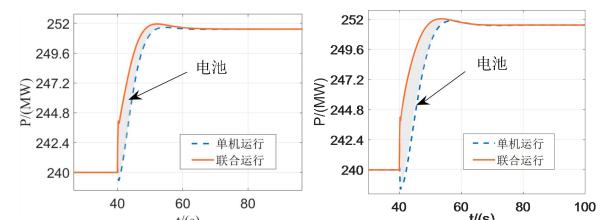
图 4 抽水蓄能+电化学储能联合系统运行框图

Fig.4 Operational Block Diagram of Pumped Hydro Storage and Electrochemical Energy Storage Hybrid System

$$G_x = \frac{T_w s}{1 + 0.5T_w s} \quad (9)$$

3.2 反调节补偿特性分析

水流惯性时间常数 T_w 是决定引水系统动态特性的核心参数,其大小直接影响水击效应的强弱和机组的反调节程度。为分析抽水蓄能与电化学储能联合运行在抑制反调节方面的优势,本小节在不同水流惯性时间常数下,对单机系统和联合系统进行仿真分析,仿真结果如图 5 所示。



(a) $T_w=1.8$ 时的对比图 (b) $T_w=3$ 时的对比图

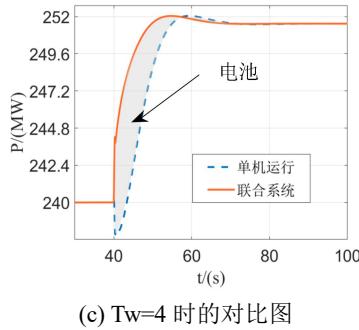


图 5 不同水流惯性常数下机组运行特性分析图

Fig.5 Analysis Diagram of Unit Operation Characteristics Under Different Water Flow Inertia Constants

如图 5 所示,在不同水流惯性时间常数($T_w=1.8$ 、3、4),水电机组均表现出明显的反调节现象,在 40 s 时反调节峰值分别达到了-0.0027MW、-0.0065MW、-0.0085MW。由此可以看出,反调节强度随 T_w 增大而显著增强,说明水流惯性是影响反调节特性的关键因素。相比之下,抽水蓄能与电化学储能联合系统在整个过程中均未出现反调节,表现出良好的响应平稳性。因此,联合系统可有效抑制反调节现象,提升系统运行的稳定性。

4 抽水蓄能机组与电化学储能协同优化特性分析

借鉴国内某抽水蓄能电站水泵水轮机的数据进行分析。该电站水泵水轮机的主要性能指标包括:发电机容量为 300 MW; 水泵水轮机的额定出力 P_{tr} 为 306.1 MW, 额定转速 n_r 为 428.6 r/min, 标称直径 D 为 4.1576 m, 水轮机工况的额定水头 H_r 为 430 m, 水泵水轮机的全特性曲线如图 4 所示。在仿真中,水流惯性时间常数 T_w 取 1.8 s^{-1} ; 水锤压力波反射时间常数 T_r 取 1 s ; 水头损失系数 f 取 0.8, 辅助接力器响应时间常数 T_{yB} 取 0.02; 为接力器响应时间常数 T_y 取 0.1。

4.1 联合系统运行特性分析

本节针对抽水蓄能机组单独运行和“抽水蓄能+电化学储能”联合运行系统的运行特性进行对比分析,机组的水头为 430 m, 仿真工况为负荷阶跃 0.05 pu, 同时,为了说明抽水蓄能与电化学储能联合运行的优势,本节控制单一变量,即两个系统采用相同的 PID 参数。该 PID 参数采用遗传算法(Genetic Algorithm,GA),以频率波动的时间乘绝对误差积分准则(Integral of Absolute Error Criterion,IAE)为基础,综合考虑频率的跌落深度和振荡次数,针对抽水蓄能机组单独运行情况进行整定,其目标函数如式

(10)所示。整定后的 PID 参数为 $K_p=4, K_i=0.8, K_d=2$ 。

$$J = w_1 \int_0^\infty (t |e(t)|) dt + w_2 \max(|e(t)|) + w_3 v_{\text{cout}} \quad (10)$$

式中: J 为目标函数; t 为时间; $e(t)$ 为频率误差; v_{cout} 为振荡次数; w_1 、 w_2 、 w_3 为权重系数, 分别取 1、1 000、0.3。

在 40 s 时系统增加 0.05 pu 负荷阶跃, 电网频率变化对比如图 6 所示, 联合系统功率输出如图 7 所示, 图 7 中阴影部分为电化学储能补充的能量。

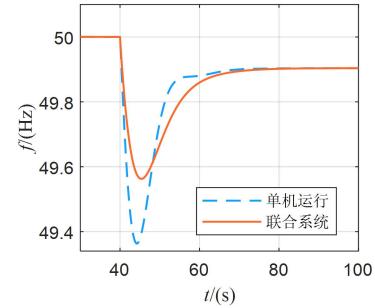


图 6 电网频率变化对比(PID 参数优化前)

Fig.6 Comparison of Power Grid Frequency Variation (Before PID Parameter Optimization)

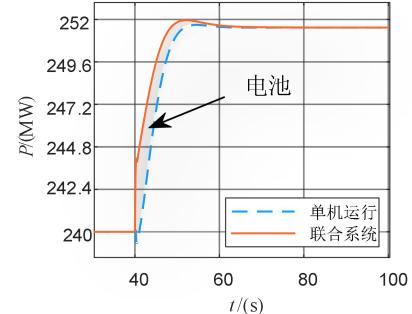


图 7 联合系统功率输出(PID 参数优化前)

Fig.7 Power Output (Before PID Parameter Optimization)

如图 6 所示, 抽水蓄能机组单独运行时, 系统频率的最大跌落深度为 0.64 Hz; 加入电化学储能组成联合系统后, 电网频率的最大跌落深度为 0.44 Hz, 相较于未加入电化学储能, 其最大跌落深度减少了 0.2 Hz(31.3%), 电站的调节性能明显提高。

如图 7 所示, 抽水蓄能机组在 40.4 秒时出现反调节, 达到 239.35 MW, 电化学储能不仅很好地补充了机组的反调节, 而且也提升其他时间的支撑能力, 进而联合系统拥有更好的调节性能, 抑制系统的频率波动。值得注意的是, 在这个过程中, 电化学储能消耗的容量仅为 0.01 MWh, 最大功率输出仅为 5.91 MW。由此可见, 采用容量较小的电化学储能系统, 既可有效抑制抽水蓄能机组的反调节特性, 又能提高机组的调节性能, 这也证明反调节策略的有效性。

抽水蓄能机组运行特性对比如图 8 所示, 其中

图(a)为流量变化对比,图(b)为水头变化对比,图(c)为开度变化对比。

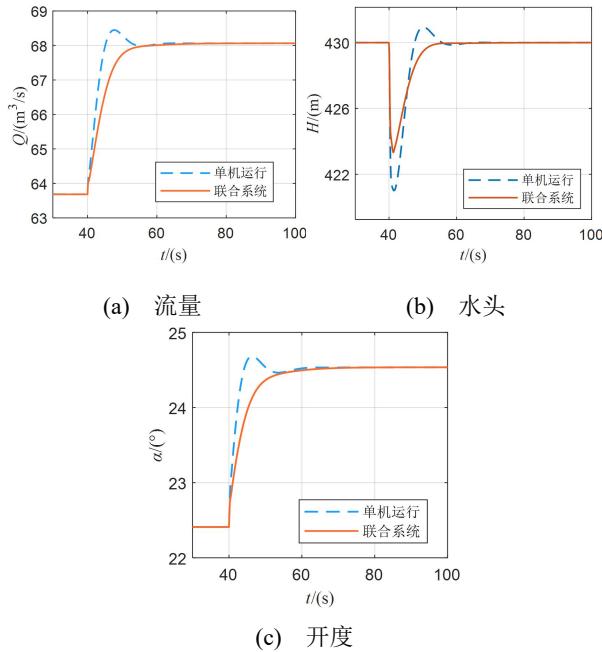


图8 抽水蓄能机组运行特性对比(PID 参数优化前)

Fig.8 Comparison of Operational Characteristics of Pumped Storage Units (Before PID Parameter Optimization)

如图 8(a)所示,抽水蓄能机组单机运行时流量出现超调,超调量为 0.6%,联合系统中抽水蓄能机组的流量并未出现超调,机组流量变化更平稳;如图 8(b)所示,抽水蓄能机组单机运行时水头变化曲线的最大波动为 8.6 m,超调量为 0.2%,联合系统中抽水蓄能机组水头并未出现超调,其最波动仅为 4.3 m,同样优于抽水蓄能机组单机运行;如图 8(c)所示,抽水蓄能机组单机运行时开度出现超调,超调量为 0.6%,联合系统中抽水蓄能机组的开度并未出现超调,机组开度变化更平稳。综上所述,在相同 PID 参数时,抽水蓄能与电化学储能系统运行同样改善了抽水蓄能机组的运行状态。

4.2 PID 优化后的联合系统运行特性分析

为进一步挖掘联合系统的调节能力,本节同样利用(GA)算法,以频率波动的时间乘绝对误差积分准则(ITAE)为基础,综合考虑频率的跌落深度和振荡次数,针对抽水蓄能机组与电化学储能联合运行情况进行整定。整定后的 PID 参数为 $K_P=10, K_I=5, K_D=1.32$ 。

在 40 s 时系统增加 0.05 pu 负荷阶跃,系统频率变化对比如图 9 所示,功率输出对比如图 10 所示,图 10 中阴影部分为电化学储能补充的能量。

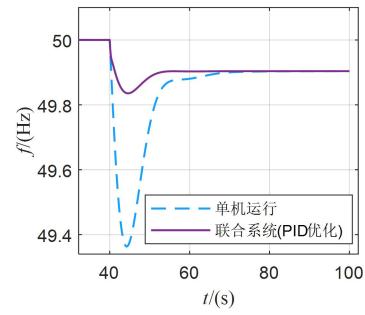


图9 电网频率变化对比(PID 参数优化后)

Fig.9 Comparison of Power Grid Frequency Variation (After PID Parameter Optimization)

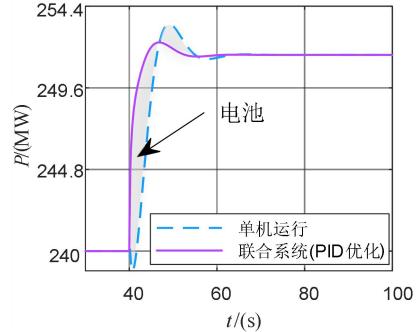
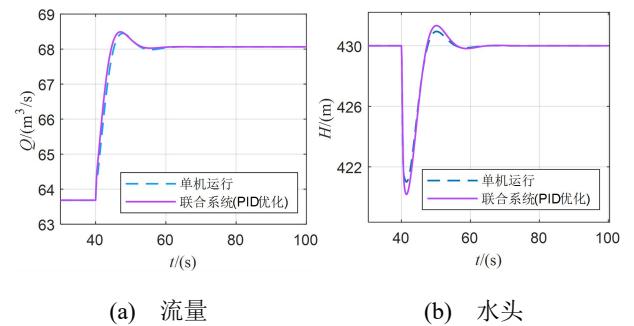


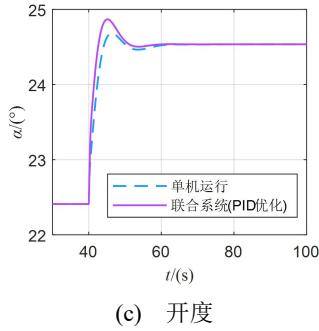
图10 功率输出对比(PID 参数优化后)

Fig.10 Comparison of Power Output (After PID Parameter Optimization)

由图 9 可知,PID 参数优化后,电网的频率最大跌落深度仅为 0.16 Hz,与抽水蓄能机组单独运行对比,下降了 75%,联合系统的效果更加显著。同时,根据图 10,PID 优化后,由于调节参数增大,抽水蓄能机组单机运行时反调节特性更加明显,反调节峰值出现在 40.8 s 处,其值达到 238.85 MW,电化学储能仍能够有效提高机组的调节性能。在这个过程中,电化学储能消化的容量仅为 0.01 MWh,最大功率输出仅为 11.85 MW。

抽水蓄能机组运行特性对比如图 11 所示,其中图(a)为流量变化对比,图(b)为水头变化对比,图(c)为开度变化对比。





(c) 开度

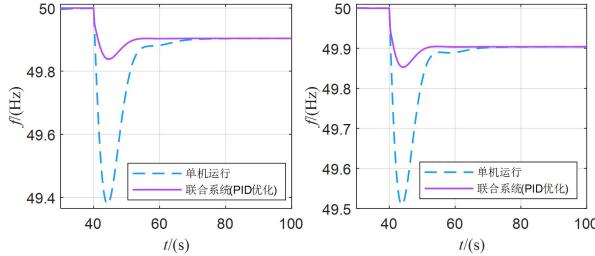
图11 抽水蓄能机组运行特性对比(PID参数优化后)

Fig.11 Comparison of Operational Characteristics of Pumped Storage Units (After PID Parameter Optimization)

如图 11(a)所示,PID 参数优化后,联合系统的流量出现超调,超调量为 0.61%,与抽水蓄能机组单机运行特性基本一致; 如图 11(b)所示,PID 参数优化后的联合系统水头的波动值为 10.32 m,略大于抽水蓄能机组单机运行特性; 如图 11(c)所示,PID 参数优化后,联合系统的开度出现超调,超调量为 1.35%,与抽水蓄能机组单机运行特性基本一致。综上所述,以频率跌落最大值、振动次数、ITAE 准则为目标进行 PID 参数优化后,联合系统中抽水蓄能机组的运行特性和抽水蓄能机组运行特性在相差不大,但抽水蓄能电站的调节性能得到了显著提升。

4.3 鲁棒性分析

为了验证该方法的鲁棒性,本文首先在不同水头下(420 m 和 440 m)进行了仿真试验,试验结果如图 12 所示,其中图(a)为水头 $H=420$ m 时电网频率变化对比,图(b)为 $H=440$ m 时电网频率变化对比。



(a) $H=420$ m 时的对比图 (b) $H=440$ m 时的对比图

图 12 不同水头下机组运行特性分析图

Fig.12 Analysis Diagram of Unit Operating Characteristics Under Different Heads

如图 12 所示,在 420 m 水头时,联合系统所在电网的频率最大跌落深度为 0.16 Hz,相较于单独运行减少了 74.6%; 在 440 m 水头时,联合系统所在电网的频率最大跌落深度为 0.15 Hz,相较于单独运行减少了 69.4%。可以看出在不同水头下,基于反调节补偿技术的抽水蓄能与电化学储能协同优化运行策略均具有良好的效果。

本文在不同负荷阶跃的情况下进行了仿真试

验,结果如图 13 所示,其中图(a)为负荷阶跃为-0.05 时电网频率变化对比,图(b)为负荷阶跃为 0.1 时电网频率变化对比,图(c)为负荷阶跃为-0.1 时电网频率变化对比。

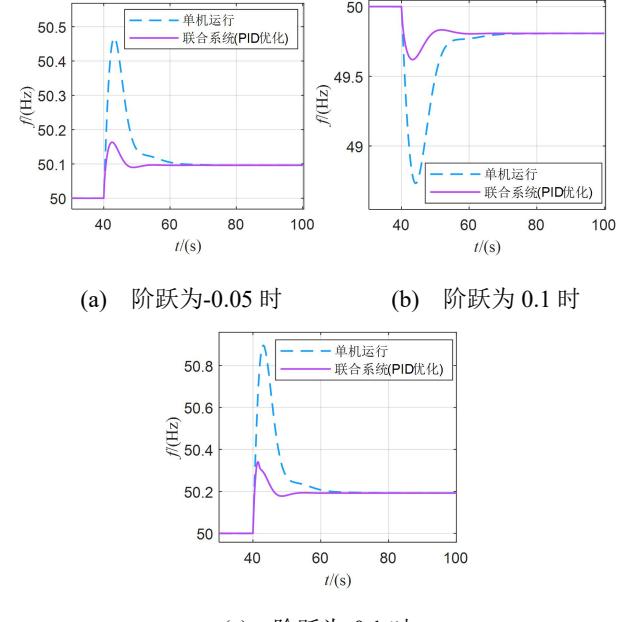


图 13 不同负荷阶跃下机组运行特性分析图

Fig.13 Analysis Diagram of Unit Operating Characteristics Under Different Load Step

如图 13 所示,在阶跃为-0.05 时,联合系统所在电网的频率最大跌落深度为 0.16 Hz,相较于单独运行减少了 65.1%; 在阶跃为 0.1 时,联合系统所在电网的频率最大跌落深度为 0.38 Hz,相较于单独运行减少了 69.9%; 在阶跃为-0.1 时,联合系统所在电网的频率最大跌落深度为 0.34 Hz,相较于单独运行减少了 61.9%。可以看出在不同水头下,基于反调节补偿技术的抽水蓄能与电化学储能协同优化运行策略均具有良好的效果。

5 结论

本文针对基于反调节补偿技术的抽水蓄能与电化学储能协同优化运行特性进行分析,结果表明:

1)在 PID 参数不变的情况下,相较于抽水蓄能单机运行,加入电化学储能组成联合系统协同运行后,仅需 0.01 MWh 容量的电化学储能,即可有效抑制抽水蓄能机组的反调节,提高机组的调节性能,联合系统的电网频率最大跌落深度减少了 31.3%,抽水蓄能机组的水头波动减少了 50%,且流量未出现超调。

2)以频率跌落最大值、振动次数、IAE 准则为目标进行 PID 参数优化后,在抽水蓄能机组运行特性无明显差别的情况下,同样仅需 0.01 MWh 容量

的电化学储能,联合运行所在的电网频率最大跌落值减少了75%,电网稳定性得到大幅提升。该小容量配置方案展现出卓越的经济性:其初始投资在电站总投资中占比极小,系统结构简单,运维成本低;性能的提升则直接转化为经济收益,使其在调频辅助服务市场中有望获得更高的性能系数与更优的补偿价格。此外,联合系统通过抑制水头和流量波动,有效降低了主设备的机械应力与疲劳损耗,有助于延长设备服役寿命,减少全生命周期内的维护成本,实现了运行性能与经济性的协同优化。

3)基于反调节补偿技术的抽水蓄能与电化学储能协同优化运行策略均有很好的鲁棒性,在不同水头和不同负荷阶跃下均能提高电站的调节性能,相较于单机运行,在水头为420 m时,电网频率最大跌落深度减少了74.6%,在水头440 m时,电网频率最大跌落深度减少了69.4%;在阶跃为-0.05时,电网频率最大跌落深度减少了65.1%,在阶跃为0.1时,电网频率最大跌落深度减少了69.9%,在阶跃为-0.1时,电网频率最大跌落深度减少了61.9%。

参 考 文 献

- [1] 贾宏杰,韩一德,徐宪东,等.双碳目标下高载能工业用户灵活互动发展趋势与技术挑战[J/OL].电力系统自动化,2025,1-1 [2025-08-27].<https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20250702.1511.003>.[JIA H J,HAN Y D,XU X D,et al .T he Development Trends and Technical Challenges of Flexible Interaction for Energy-Intensive Industrial Users under the Dual-Carbon Goals[J/OL] .A utomation of Electric Power Systems,2025, 1-1 [2025-08-27].[https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20250702.1511.003.\]](https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20250702.1511.003)
- [2] 王筱,李高青,姬生才,等.计及风光不确定性的互补发电系统容量优化配置研究[J].动力工程学报,2024,44(11):1750-1759.[WANG X,LI G Q,JI S C,et al.Research on Optimal Capacity configuration of Complementary Power Generation Systems Considering Wind-Solar Uncertainty[J] .Journal of Chinese Society of Power Engineering,2024,44(11):1750-1759.]
- [3] XU L C,ZHANG Y Q,XU J H,et al.Towards the integration of new-type power systems:Hydraulic stability analysis of pumped storage units in the S-characteristic region based on experimental and CFD studies[J].Energy, 2025, 329:136755.
- [4] 吴强.抽水蓄能电站现场重大技术问题处理[J].水电与抽水蓄能,2025, 11(03) :4 -5.[WU Q .O n-site handling of major technical issues in pumped-storage power station s [J] .H ydropower and Pumped Storage,2025,11(03):4-5.]
- [5] 抽水蓄能发电技术[J]. 电力工程技术,2024,43(02) :2 .[Pumped-Storage Power Generation Technolog y [J] .E lectric Power Engineering Technology,2024, 43(02):2.]
- [6] ZHAO K L,WANG J,QIU L C.Approval and progress analysis of pumped storage power stations in Central China during the 14th five-year plan period[J].Journal of Energy Storage,2024,102:114104.
- [7] 陈帝伊,刘公成,梁潇,等.定-变速抽水蓄能机组调相发电过渡过程动态特性研究[J].水利学报,2023, 54(01):105-116.[CHEN D Y,LIU G C,LIANG X,et al .S tudy on dynamic characteristics of phase modulation - g eneration transition process of fixed-speed and variable-speed pumped-storage units[J].Shuili Xue Bao,2023,54(01):105-116.]
- [8] 高春阳.双馈变速抽水蓄能机组的优化控制及稳定性分析[D].西安理工大学,2022.[GAO C Y.Optimal Control and Stability Analysis of Doubly-Fed Variable Speed Pumped Storage Units [D] .X i'an University of Technology,2022.]
- [9] GUO L,XU C,ZHANG F,et al.Variable speed pumped storage units in China :C urrent status and development[J].Energy Reports, 2025, 13:2815-2828.
- [10] 李欣然,崔曦文,黄际元,等.电池储能电源参与电网一次调频的自适应控制策略[J]. 电工技术学报,2019,34(18):3897-3908.[LI X R,CUI X W,HUANG J Y, et al .T he Self-Adaption Control Strategy of Energy Storage Batteries Participating in the Primary Frequency Regulation[J].Transactions of China Electr otechnical Society,2019 , 34(18):3897-3908.]
- [11] 马智慧,李欣然,谭庄熙,等.考虑储能调频死区的一次调频控制方法[J]. 电工技术学报,2019,34(10):2102-2115.[MA Z H,LI X R,TAN Z X,et al.Integrated Control of Primary Frequency Regulation Considering Dead Band of Energy Storage[J]. Transactions of China Electr otechnical Society 2019,34 (10):2102-2115.]
- [12] 佟曦,陈衡,苟凯杰,等.考虑阶梯式碳交易机制的电化学储能与抽水蓄能协同调度优化[J].动力工程学报,2024,44(03):430-438.[TONG X,CHEN H,GOU K

- J,et al.Collaborative Dispatching Optimization of Electrochemical energy storage and pumped storage considering a stepped carbon trading mechanism[J].Journal of Chinese Society of Power Engineering,2024,44(03):430-438.]
- [13] 张智,霍超,郭尊,等.新型电力系统下抽水蓄能集群规划与运营关键问题综述及研究展望[J].中国电机工程学报,2025,45(15):5810-5832.[ZHANG Z,HUO C,GUO Z,et al.Overview and Research Prospects of Key Issues in Pumped Storage Cluster Planning and Operation Under the New Type Power Systems[J].Proceedings of The Csee,2025,45 (15):5810-5832.]
- [14] LIAO Y W,YANG W J,Wang Z C,et al.Mechanism of Primary Frequency Regulation for Battery Hybridization in Hydropower Plant[J].Csee Journal of Power and Energy Systems,2024,10:2127-2137.
- [15] 孟新怡.利用蓄电池克服水电机组反调节特性的研究[D].西安理工大学,2024.[MENG X Y,Research on Using Batteries to Overcome the Reverse Regulation Characteristics of Hydroelectric Units [D].Xi'an University of Technology, 2024.]
- [16] 程远楚,张江滨.水轮机自动调节[M].中国水利水电出版社 :2 010.[CHENG Y C , Z HANG J B , A utomatic Regulation of Hydraulic Turbine s [M].Beijing:China Water & Power Press,2010.]
- [17] 王棒,李跃松,张贻哲.电液位置伺服系统的 RBF-ADRC 控制 仿真 分析 [J]. 机 床 与 液 压,2024,52(20):168-174.[WANG B, LI Y S, ZHANG Y Z.Simulation analysis of RBF-ADRC control for electro—hydraulic position servo system[J].Machine Tool & Hydraulics,2024,52(20) :168-174.]
- [18] 冯陈,刘朝爽,吴春旺,等.抽水蓄能机组新型变工况自适应模糊控制策略 [J]. 电 网 技 术,2024,48(07):2815-2822.[FENG C,LIU C S,WU C W,et al.Innovative Adaptive Fuzzy Control Strategy for Pumped Storage Units Under Variable Operating Conditions[J].Power System Technology,2024,48(07):2815-2822.]
- [19] 朱晟,彭怡婷,闵宇霖,等.电化学储能材料及储能技术 研 究 进 展 [J]. 化 工 进 展,2021,40(09):4837-4852.[ZHU S, PENG Y T, MIN Y L,et al.Research progress on materials and technologies for electrochemical energy storage[J].Chemical Industry and Engineering Progress,2021,40(09):4837-4852.]
- [20] 刘德旭,杨迎,黄宏旭,等.新型电力系统大规模抽水蓄能调度运行与控制综述及展望[J].中国电机工程学报 ,2025,45(01):80-98.[LIU D X,YANG Y,HUANG H X,et al .A n Overview and Outlook of the Operation and Control of Large-scale Pumped Hydro Storages in Modern Power Systems[J].Proceedings of The Csee,2025, 45 (01):80 -98.]

Analysis of Collaborative Optimization Operation Characteristics of Pumped Storage and Electrochemical Energy Storage Based on Anti-Regulation Suppression

LI Haoliang^{1,2}, SUN Xun^{1,2}, ZHOU Cong¹, LIU Shenqi⁴, YE Bin^{1,3}, GU Tianwei⁴, CHEN Ke⁴, LI Mingyu⁴

(1.State Grid Xinyuan Group Co, Ltd, Beijing 100052, China; 2.East China Development & Construction Branch, State Grid Xinyuan Co, Ltd, Hangzhou 310000, Zhejiang Province, China; 3.Pumped-Storage Technology and Economics Research Institute, State Grid Xinyuan Co, Ltd., Beijing 100053, China; 4.Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100083, China.)

Abstract: 【Objective】 To improve the primary frequency regulation capability of pumped storage units and strengthen their support for the new power system, this paper proposes a coordinated optimal operation scheme for pumped storage and electrochemical energy storage based on anti-regulation suppression technology, and analyzes its operating characteristics. **【Methods】** First, incorporating the complete characteristic curves of the pump-turbine, a primary frequency regulation model for the turbine operation mode of pumped storage units is established, which considers the saturation characteristics of the servo system; then, an electrochemical energy storage model is established, and a coordinated optimal operation strategy for pumped storage and electrochemical energy storage is proposed in combination with anti-regulation suppression technology; finally, a simulation analysis is carried out on the operating characteristics of the combined system. **【Results】** The results show that with unchanged PID parameters, compared with independent operation, the maximum frequency drop depth of the power grid where the combined system is located is reduced by 31.3%, and the fluctuations in flow and water head are significantly suppressed; after further optimization of the PID parameters, the frequency drop depth of the power grid with the combined system is reduced by 75%. **【Conclusion】** meanwhile, this strategy has strong robustness, and the combined system exhibits excellent regulating performance under different water heads.

Keywords:pumped storage; electrochemical energy storage; coordinated operation; primary frequency regulation; anti-regulation