

先进绝热压缩空气储能发电系统参与调频 辅助服务控制优化方法

冯庭勇^{1,3}, 钟晶亮², 文贤馗², 杨大慧^{1,3}, 邓彤天²

(1. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550002;

3. 贵州电网有限责任公司研究生工作站, 贵州 贵阳 550002)

[摘要] 为实现先进绝热压缩空气储能(AA-CAES)系统在宽负荷段参与AGC调频,且调节速率不超过《广东调频辅助服务市场交易规则》规定(避免产生考核电量),提出一种多级分段设置PID控制器参数参与机组自动发电控制(AGC)调频的控制策略。通过APROS仿真平台分别对10 MW AA-CAES机组采用单套与3套PID控制器响应AGC控制指令进行仿真。结果表明:AA-CAES发电系统机组采用1套PID控制器在宽负荷段响应AGC控制指令,调频性能指标 K_1 大于5,给储能电站增加考核电量而造成经济损失;机组采用3套不同参数PID控制器能够优化调频性能指标,使调频性能指标 K_1 在要求范围内,从而避免产生考核电量,有效提高AA-CAES发电系统参与辅助调频服务的经济效益。

[关键词] 先进绝热压缩空气储能;调频辅助服务;PID控制器;AGC性能考核

[中图分类号] TM92 [文献标识码] A [DOI编号] 10.19666/j.rlf.202111233

[引用本文格式] 冯庭勇,钟晶亮,文贤馗,等.先进绝热压缩空气储能发电系统参与调频辅助服务控制优化方法[J].热力发电,2022,51(5):136-141. FENG Tingyong, ZHONG Jingliang, WEN Xiankui, et al. Optimization method of AA-CAES power generation system participating in frequency modulation auxiliary service control[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(5): 136-141.

Optimization method of AA-CAES power generation system participating in frequency modulation auxiliary service control

FENG Tingyong^{1,3}, ZHONG Jingliang², WEN Xiankui², YANG Dahui^{1,3}, DENG Tongtian²

(1. The Electrical Engineering College, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China;

3. Postgraduate Workstation of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: In order to realize the advanced adiabatic compressed air energy storage (AA-CAES) system participates in AGC frequency regulation in wide load range, and ensure the regulation rate does not exceed the *Guangdong Frequency Regulation Auxiliary Service Market Transaction Rules* (to avoid generating checking energy), a control strategy with multi-level segmented parameter setting PID controller participating in the frequency regulation of unit automatic generation control (AGC) is proposed. Through APROS simulation platform, the response of 10 MW AA-CAES unit to AGC control instructions is simulated by using a single set of PID controllers and three sets of PID controllers. The research results show that, when the AA-CAES power generation system unit adopts one set of PID controller to respond to the AGC control instructions in wide load section range, the frequency modulation performance index K_1 is greater than 5, which increases the assessment power of the energy storage power station and causes economic losses. When the unit adopts three sets of PID controllers with different parameters to optimize the frequency modulation performance index, the frequency modulation performance index K_1 is within the required

收稿日期: 2021-11-09

基金项目: 贵州省科技厅科技支撑计划资助项目(黔科合支撑(2020)2Y064); 国家重点研发计划项目(2017YFB0903600)

Supported by: Science and Technology Supporting Program of Guizhou Province ((2020) 2Y064); National Key Research and Development Program (2017YFB0903600)

第一作者简介: 冯庭勇(1997), 硕士研究生, 主要研究方向为压缩空气储能系统配电网源-网耦合, 897320932@qq.com.

通信作者简介: 钟晶亮(1975), 高级工程师, 主要研究方向为压缩空气储能技术, 13985469075@139.com.

range, thereby the possibility of generating electricity for assessment is avoided and the economic benefits of the AA-CAES power generation system participating in auxiliary frequency modulation service is effectively improved. **Key words:** advanced adiabatic compressed air energy storage; frequency regulation auxiliary service; PID controller; AGC performance evaluation

先进绝热压缩空气储能 (advanced adiabatic compressed air energy storage, AA-CAES) 系统作为最有潜力的储能技术之一, 具有效率高、容量大、存储时间长、成本相对低廉等优点^[1-4]。国内外学者已针对 AA-CAES 系统优化和机组参与电力系统优化等方面开展了相关研究: 文献[5]提出一种 S-CAES 电站调相运行模式和热量优化方法; 文献[6]提出了将多个喷射器和单个喷射器应用到绝热压缩空气储能系统的储能过程; 文献[7]针对先进蓄热式压缩空气储能系统服务于执行峰谷分时电价的电力系统运行情景进行了热经济学分析; 文献[8]研究了微型压缩空气储能系统的工作特性; 文献[9]通过优化多个运行参数, 提高了压缩空气储能系统的储能效率; 文献[10]针对先进蓄热式压缩空气储能系统服务于执行峰谷分时电价的电力系统运行情景进行了热经济分析; 文献[11]提出一种含压缩空气的复合储能系统在交直流混合微网中的主动控制策略; 文献[12]提出了一种考虑压缩空气储能和基于滑动时间窗的电热综合响应需求的综合能源系统滚动优化规划框架和模型; 文献[13]提出了含 CAES 电站的源荷储协同调度策略; 文献[14]提出了含 AA-CAES 电站、常规机组和风电机组的电力系统实时优化调度策略。

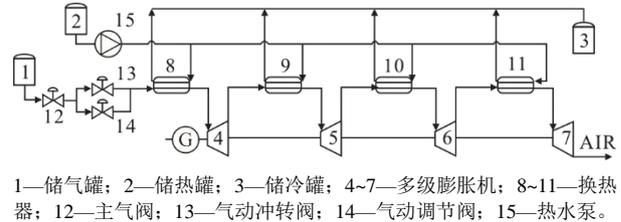
然而, 目前国内相关研究均未对 AA-CAES 机组参与调频辅助服务性能指标进行计算与分析, 同时缺乏相应的控制策略。本文基于模块化建模思想及 APROS 仿真支撑系统, 建立了 AA-CAES 系统模型, 设计了使用多套不同参数 PID 控制器的控制策略, 并基于现行《广东调频辅助服务市场交易规则》^[15]相关要求对所提控制方法进行测试。

1 先进绝热压缩空气储能系统

1.1 系统介绍

AA-CAES 系统具有容量大、工作时间长、经济性能好、充放电循环次数多等特点, 其不仅节约了其他能源投入且系统发电过程零污染。AA-CAES 系统释能阶段基本结构如图 1 所示。当电网电量紧缺时, 储气罐中的高压空气经过主气阀、气动调节阀进入膨胀机进行膨胀释能, 带动发电机发电。系

统采用级间换热, 释能阶段储热罐中的加压水经过膨胀机的级间换热器, 加热膨胀机入口空气。



1—储气罐; 2—储热罐; 3—储冷罐; 4~7—多级膨胀机; 8~11—换热器; 12—主气阀; 13—气动冲转阀; 14—气动调节阀; 15—热水泵。

图 1 AA-CAES 系统释能阶段基本结构
Fig.1 Basic structure of the AA-CAES system during energy release stage

1.2 数学模型

1.2.1 储气罐

储气罐用于储存高压空气。采用质量平衡方程和能量平衡方程（定容条件）建立储气罐的动力学模型^[16]:

$$\frac{dM_{st}}{dt} = m_{st,in} - m_{st,out} \quad (1)$$

$$\frac{d(M_{st}U_{st})}{dt} = m_{st,in}h_{st,in} - m_{st,out}h_{st,out} - K_{en,st}A_{st}(T_{st} - T_{en}) \quad (2)$$

式中: M_{st} 为储气罐内气体质量, kg; $m_{st,in}$ 为进入储气罐的气体流量, kg/s; $m_{st,out}$ 为流出储气罐的气体流量, kg/s; U_{st} 为气体单位质量内能, kJ; $h_{st,in}$ 为进入储气罐的气体焓值, kJ/kg; $h_{st,out}$ 为流出储气罐的气体焓值, kJ/kg; $K_{en,st}$ 为储气罐和环境的传热系数, W/(m²·K); A_{st} 为储气罐和环境换热的表面积, m²; T_{st} 、 T_{en} 分别为储气罐温度和环境温度, K。

1.2.2 膨胀机

空气进入膨胀机膨胀释能, 膨胀机输出功率计算式为^[16]:

$$W_e = m_e(h_{e,in} - h_{e,out}) \quad (3)$$

式中: W_e 为膨胀机输出功率, MW; m_e 为空气质量流量, kg/s; $h_{e,in}$ 为膨胀机入口气体焓值, kJ/kg; $h_{e,out}$ 为膨胀机出口气体焓值, kJ/kg。

等熵效率为^[17]:

$$\eta_e = \frac{h_{e,in} - h_{e,out}}{h_{e,in} - h_{s,e,out}} \quad (4)$$

式中: $h_{s,e,out}$ 为膨胀机以等熵过程膨胀到相同出口压力时的出口比焓, kJ/kg。

1.2.3 换热器

空气与管壁换热量为:

$$Q_h = A_h \frac{(T_h - T_w)}{\frac{\delta}{2K_w} + \frac{1}{\alpha_h}} \quad (5)$$

换热介质与管壁换热量为:

$$Q_c = A_c \frac{(T_c - T_w)}{\frac{\delta}{2K_w} + \frac{1}{\alpha_c}} \quad (6)$$

式中: δ 为管壁厚度, m; T_c 、 T_w 、 T_h 分别为换热介质平均温度、管壁平均温度、管壁内空气温度, K; K_w 为管壁导热系数, W/(m²·K); α_c 、 α_h 分别为内、外管壁换热系数, W/(m²·K); A_c 、 A_h 分别为内、外管壁面积, m²。

1.2.4 阀门

摩擦阻力和流动阻力共同构成了阀门压降, 计算公式为^[16]:

$$\zeta = \left(\frac{\pi^2}{8} \right) \cdot \left(\frac{D^4}{m^2} \right) \cdot \rho \cdot \Delta p \quad (7)$$

式中: ζ 为阀门流动阻力系数; D 为阀门直径, m; ρ 为流体密度, kg/m³; m 为阀门空气质量流量, kg/s; Δp 为阀门压力损失, MPa。

1.3 数学模型

10 MW 级 AA-CAES 系统 (设计释能功率为 10 MW) 基本设计参数见表 1。

表 1 10 MW 级 AA-CAES 系统基本设计参数

Tab.1 Basic design parameters of 10 MW-level AA-CAES system

项目	数值
释能功率/MW	10
释能压力/MPa	7
储能最高压力/MPa	10
储气罐体积/m ³	6 000
环境压力/MPa	0.1
环境温度/K	298
10 MW 释能时间/s	6 550
蓄热罐温度/K	403
蓄热罐压力/MPa	0.4
蓄冷罐温度/K	298
蓄冷罐压力/MPa	0.1

经仿真, 系统释能阶段各级膨胀机额定工况运行参数见表 2, 膨胀机输出功率总和为 10.41 MW, 发电机端输出功率为 9.99 MW, 与设计值偏差为 0.1%, 在工程允许范围内, 模型准确。

表 2 各级膨胀机额定工况运行参数

Tab.2 Operating parameters of various expanders under rated operating conditions

膨胀机级数	1	2	3	4
入口压力/MPa	7	2.461	0.854	0.283
出口压力/MPa	2.481	0.874	0.303	0.100
入口温度/°C	82	82	82	82
出口温度/°C	14.4	7.6	10.0	18.4
换热器压损/MPa	0.02	0.02	0.02	0.02
压缩空气质量流量/(kg·s ⁻¹)	36.98	36.98	36.98	36.98
膨胀比	2.82	2.82	2.82	2.82
等熵效率	0.88	0.88	0.88	0.88
输出功率/MW	2.516 8	2.759 0	2.672 8	2.456 4
转速/(r·min ⁻¹)	3 000	3 000	3 000	3 000

2 南方区域发电单元调频辅助服务指标分析

根据《广东调频辅助服务市场交易规则》^[15], 发电单元每次响应 AGC 调节指令时, 主要从调节速率、响应时间、调节精度 3 个方面对响应 AGC 指令后的动作情况进行评价衡量。综合调频性能指标 K 指发电单元响应 AGC 调节指令的综合性能表现, 计算公式为:

$$K = 0.25 \times (2 \times K_1 + K_2 + K_3) \quad (8)$$

式中: K_1 、 K_2 和 K_3 分别为发电单元响应 AGC 控制指令的速率、时间延迟和精准度。

以 1 个交易周期为例, 调频里程补偿收益等于调频里程、综合调节性能、市场出清价格的乘积。在相同的 AGC 调节范围下, 调频里程补偿收益正比于综合调节性能指标。由发电机组参与调频辅助服务的考核与补偿规则可知, 调节速率 K_1 权重最大, 占 50%。因此, 着力提高调节速率是提升 AA-CAES 辅助服务竞争力的重要手段。但是, 为避免机组发电单元响应 AGC 控制指令时过调节或超调节, 《广东调频辅助服务市场交易规则》规定调节速率 K_1 最大不超过 5, 否则调节速率合格率减少 50%, 会产生考核电量, 给电站造成经济损失。因此, 在不产生考核电量情况下, 综合调节性能指标 K 越大, 调频里程补偿收益也越大。

3 AA-CAES 参与调频辅助服务过程

3.1 参与调频辅助服务传统方法

目前, AA-CAES 机组响应 AGC 控制指令的方法一般是采用 1 套 PID 控制器进行阀门开度控制, 从而调节机组出力。PID 控制器比例作用能使机组快速响应, 比例系数 k_p 增大时, 调节速率 K_1 得到提升, 但是系统稳定性下降, 且比例环节无法消除系统原有的静态误差; 积分作用可以消除静态误

差, 当减小积分系数 k_i , 系统误差消除效果得到提升, 但是调节速率 K_1 降低。通过比例作用与积分作用相互配合, 发挥各自优势, 以满足《广东调频辅助服务市场交易规则》对调频性能指标的要求。

本文研究对象为 10 MW AA-CAES 系统, 机组常运行负荷段为额定负荷的 80%~110%, AGC 指令波动范围一般为机组实测负荷上、下调节 0.5 MW。常运行负荷段 PID 控制器参与 AGC 调频运算控制过程逻辑如图 2 所示。通过测试模块得到机组实时功率, 机组协调控制系统接收 AGC 控制指令, 实测功率与 AGC 控制指令的差值进入 AGC-PID 控制器进行运算, 该输出作用于气动调节阀。

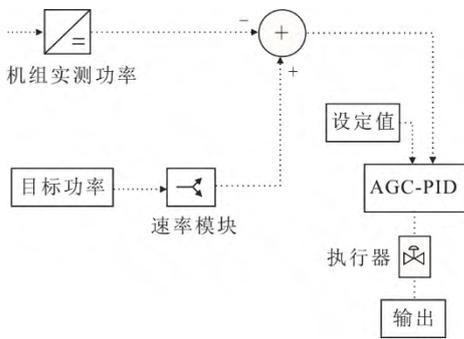


图 2 常运行负荷段 PID 控制器参与 AGC 调频运算控制过程逻辑

Fig.2 The control logic of PID controller participating AGC frequency modulation during normal load operation

通过测试发现, AA-CAES 机组在常运行负荷段参与 AGC 调频, 选择 $k_p=56 \times 10^{-6}$ 、 $k_i=6$ 作为 PID 控制器参数, 可使机组在不产生考核电量情况下综合调节性能指标 K 达到最大。

3.2 宽负荷段参与调频辅助服务

为了提高 AA-CAES 的适用范围, 机组应该具备在宽负荷段参与调频的能力。但是, 通过测试, 1 套 PID 参数在不同负荷段控制效果不同, 甚至不能满足要求。在机组功率分别为 5.0、6.0、7.0、8.0、9.0 MW 时, 利用 AGC 控制指令将机组输出功率向上调节 0.5 MW 进行测试, 结果见表 3。

表 3 宽负荷段调频性能指标 (1 套 PID 控制器)

Tab.3 Frequency modulation performance indexes for wide load range (a set of PID controller)

测试指标	测试区间/MW				
	5.0~5.5	6.0~6.5	7.0~7.5	8.0~8.5	9.0~9.5
K_1	6.124	5.356	5.144	5.038	4.272
K_2	0.990	0.988	0.989	0.988	0.987
K_3	0.987	0.987	0.973	0.973	0.967
K	3.556	3.172	3.063	3.009	2.624
是否产生考核电量	是	是	是	是	否

从表 3 可以看出: 使用 1 套 PID 控制器的机组在表 3 所示的 5 组不同负荷段响应 AGC 控制指令, 只有机组负荷从 9.0 MW 调至 9.5 MW 时, 调频速率 K_1 不大于 5, 满足《广东调频辅助服务市场交易规则》要求; 而其余 4 组测试区间辅助调频, 调频速率 K_1 均大于 5, 会因超出规定而产生考核电量。

4 多套 PID 控制器的设计和运用

4.1 控制回路结构

为解决上述问题, 本文提出多级分段设置 PID 控制器参数的控制策略。为避免采用功率指令信号或差值信号带来的排列组合多、分段多、不易实现问题, 该策略使用机组功率实测信号进行判断。将机组运行负荷段分为 3 段, 每段运用不同参数的 PID 控制器。该策略下 PID 控制器流程如图 3 所示。

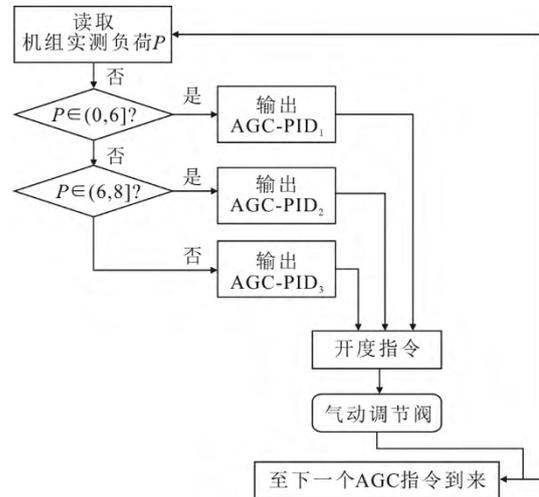


图 3 PID 控制器选择流程

Fig.3 Selection process of PID controller

发电机组接收到新 AGC 控制指令时, 立即将其锁定, 并进行判断: 如实测功率大于 8 MW, 则使用 AGC-PID₁ 作为输出; 如实测功率大于 6 MW 且小于 8 MW, 则选用 AGC-PID₂ 作为输出; 如实测功率小于 6 MW, 则选用 AGC-PID₃ 作为输出。此选择在调频过程中不发生改变, 直至下一个 AGC 指令到来。机组每接收到新 AGC 指令, 即进行 PID 控制器选择的判断。

考虑机组在运行过程中因 PID 控制器切换而产生功率波动问题, 设计了 PID 控制器追踪判断模块。将气动调节阀开度信号作为 PID 控制器追踪信号, 机组实测负荷锁定值作为判断条件, 负荷锁定值对应的 PID 控制器不进行阀门信号追踪, 其余 2 套

PID 控制器追踪阀门开度信号。三级分段设置 PID 运算控制过程逻辑如图 4 所示。将 AGC 控制指令与机组实时功率进行偏差计算，并输入多个不同参

数 PID 控制器进行运算，但最终执行器只接收与机组实测功率相对应 PID 控制器的运算结果，并作用于气动调节阀，实现对 AA-CAES 机组的出力控制。

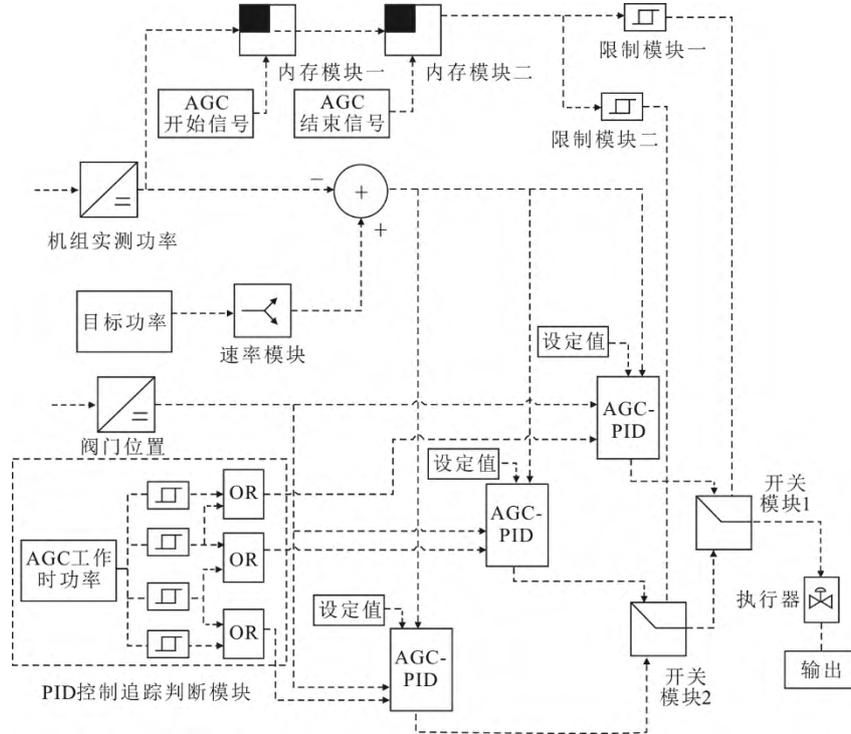


图 4 3 套 PID 控制器运算控制过程逻辑

Fig.4 Logic diagram of operational control process of three PID controllers

4.2 测试分析

通过大量仿真测试，选择 AGC-PID₁、AGC-PID₂、AGC-PID₃ 控制器 k_p 为 56×10^{-6} 、 49×10^{-6} 、 46×10^{-6} ， k_i 均为 6。对上述不满足《广东调频辅助服务市场交易规则》要求的测试区间进行测试，调频性能指标见表 4。从表 4 可以看出，所有测试区间调节速率 K_1 最大均不超过 5，符合《广东调频辅助服务市场交易规则》要求。

表 4 宽负荷段调频性能指标（3 套 PID 控制器）

Tab.4 Frequency regulation performance index of wide load section (three PID controllers)

测试指标	测试区间/MW			
	5.0~5.5	6.0~6.5	7.0~7.5	8.0~8.5
K_1	4.923	4.299	4.372	4.308
K_2	0.987	0.985	0.986	0.986
K_3	0.987	0.987	0.973	0.973
K	2.955	2.642	2.676	2.644

使用不同套数 PID 控制对调频性能关键指标的影响如图 5 所示。从图 5 可以看出，与使用 1 套 PID 控制器相比，使用 3 套 PID 控制器参与 AGC 调频，综合调频性能指标略有降低，但调节速率 K_1 均不大于 5，避免了考核电量的产生。

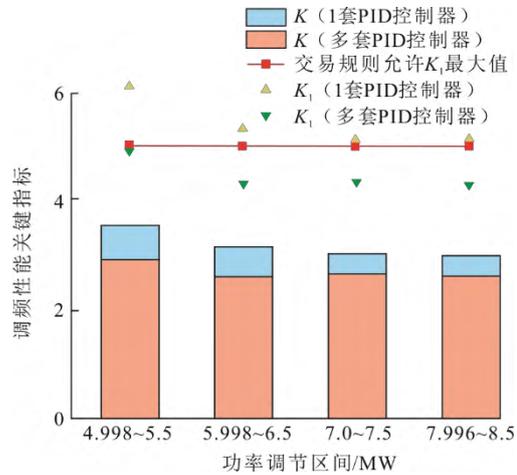


图 5 不同套数 PID 控制器对调频性能指标的影响

Fig.5 The influence of different sets of PID controller on frequency modulation performance index

5 结 论

1) 使用 1 套 PID 控制器无法实现机组在宽负荷段参与 AGC 调频。机组在非常运行负荷段参与调频，会因调节速率 K_1 不满足要求而产生考核电量，造成经济损失；采用多级分段设置 PID 控制器参数的控制策略，可使机组在宽负荷段参与调频性能指标满足要求，不产生考核电量。

2) 选用功率实测信号作为判断信号,可以避免采用 AGC 指令信号带来的排列组合多、分段多、不易实现的问题。通过设置非实测功率对应 PID 控制器追踪阀门信号,可降低不同 PID 控制器切换带来的功率扰动。

3) 采用多级分段设置 PID 控制器参数的控制策略解决了使用单套 PID 控制器在宽负荷段调频过程产生的考核电量问题,多套 PID 控制器参与 AGC 调频在 AA-CAES 系统电站中具有一定的推广价值。

【参考文献】

- [1] 梅生伟,李瑞,陈来军,等.先进绝热压缩空气储能技术研究进展及展望[J].中国电机工程学报,2018,38(10):2893-2907.
MEI Shengwei, LI Rui, CHEN Laijun, et al. An overview and outlook on advanced adiabatic compressed air energy storage technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2893-2907.
- [2] 何青,贾明祥,康浩强,等.绝热压缩空气储能系统 Aspen Plus 软件自定义蓄热器模块设计及应用[J].热力发电,2018,47(2):114-119.
HE Qing, JIA Mingxiang, KANG Haoqiang, et al. Design and application of custom regenerator module in Aspen for adiabatic compressed air energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 114-119.
- [3] 文贤旭,张世海,王锁斌.压缩空气储能技术及示范工程综述[J].应用能源技术,2018(3):43-48.
WEN Xiankui, ZHANG Shihai, WANG Suobin. Summary of compressed air energy storage technology and demonstration projects[J]. Applied Energy Technology, 2018(3): 43-48.
- [4] 张新敬,陈海生,刘金超,等.压缩空气储能技术研究进展[J].储能科学与技术,2012,1(1):26-40.
ZHANG Xinjing, CHEN Haisheng, LIU Jinchao, et al. Research progress in compressed air energy storage system: a review[J]. Energy Storage Science and Technology, 2012, 1(1): 26-40.
- [5] 李广阔,王国华,薛小代,等.金坛盐穴压缩空气储能电站调相模式设计与分析[J].电力系统自动化,2021,45(19):91-99.
LI Guangkuo, WANG Guohua, XUE Xiaodai, et al. Design and analysis of condenser mode for jintan salt cavern compressed air energy storage plant of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 91-99.
- [6] 周升辉,何阳,陈海生,等.喷射器强化压缩空气储能充电过程[J].储能科学与技术,2021,10(5):1503-1513.
ZHOU Shenhui, HE Yang, CHEN Haisheng, et al. Using an ejector to intensify the charging process of a compressed air energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1503-1513.
- [7] 胡珊,刘畅,徐玉杰,等.基于峰谷分时电价的压缩空气储能系统热经济性分析[J].储能科学与技术,2021,10(5):1607-1613.
HU Shan, LIU Chang, XU Yujie, et al. Thermo-economic analysis of compressed air energy storage under peak load shaving condition[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1607-1613.
- [8] 魏军英,王鹏,王吉岱,等.微型压缩空气储能系统工

- 作特性研究[J].热力发电,2019,48(3):28-34.
WEI Junying, WANG Peng, WANG Jidai, et al. Working characteristics of micro compressed air energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(3): 28-34.
- [9] 姜萍,赵振家,常然.压缩空气储能系统储气室多变量反馈线性化控制[J].热力发电,2015,44(8):79-83.
JIANG Ping, ZHAO Zhenjia, CHANG Ranran, et al. Multivariable feedback linearization control for gas storage chamber in compressed air energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(8): 79-83.
- [10] 宋洁,侯继彪.基于压缩空气储能系统的直流配电网调压控制方法[J].电力建设,2019,40(6):49-56.
SONG Jie, HOU Jibiao. Voltage regulation using compressed-air energy storage system in dc distribution network[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(6): 49-56.
- [11] 严毅,张承慧,李珂,等.含压缩空气的微网复合储能系统主动控制策略[J].电工技术学报,2017,32(20):231-240.
YAN Yi, ZHANG Chenghui, LI Ke, et al. An active control strategy for composited energy storage with compressed air energy storage in micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 231-240.
- [12] YANG D C, WANG M, YANG R Q, et al. Optimal dispatching of an energy system with integrated compressed air energy storage and demand response[J]. Energy, 2021(19): 121232.
- [13] GHALELOU A N, FAKHRI A P, NOJAVAN S, et al. A stochastic self-scheduling program for compressed air energy storage (CAES) of renewable energy sources (RESs) based on a demand response mechanism[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 120: 388-396.
- [14] 李姚旺,苗世洪,尹斌鑫,等.含先进绝热压缩空气储能电站的电力系统实时调度模型[J].电工技术学报,2019,34(2):387-397.
LI Yaowang, MIAO Shihong, YIN Binxin, et al. Real-time dispatch model for power system with advanced adiabatic compressed air energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(2): 387-397.
- [15] 国家能源局南方监管局.广东调频辅助服务市场交易规则(试行):南方监能市场(2018)272号[A/OL].(2018-08-02)[2020-04-08].http://120.31.132.37:8085/SCSERC_OUTER/temp/examples/upfileatrch/71620229_wz_towaiwang.pdf.
South China Energy Regulatory Office of National Energy Administration. Guangdong frequency regulation auxiliary service market transaction rules (trial): NFJNSC (2018) No.272[A/OL]. (2018-08-02)[2020-04-08]. http://120.31.132.37:8085/SCSERC_O-UTER/temp/examples/upfi-leafatrch/71620229_wz_towaiwang.pdf.
- [16] 李盼,杨晨,陈雯,等.压缩空气储能系统动态特性及其调节系统[J].中国电机工程学报,2020,40(7):2295-2305.
LI Pan, YANG Chen, CHEN Wen, et al. Dynamic characteristics of compressed air energy storage system and the regulation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2295-2305.
- [17] 郭欢,徐玉杰,张新敬,等.蓄热式压缩空气储能系统变工况特性[J].中国电机工程学报,2019,39(5):1366-1377.
GUO Huan, XU Yujie, ZHANG Xinjing, et al. Off-design performance of compressed air energy storage system with thermal storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1366-1377.

(责任编辑 李园)