

基于瞬时功率镜像补偿的斜坡式重力储能系统 功率平滑控制策略

李震¹, 王斌¹, 牟雪鹏¹, 陈巨龙¹, 汪玉翔¹, 罗晨¹, 王祖凡^{2*},
董琳琳², 高天²

(1. 贵州电网有限责任公司 电网规划研究中心, 贵州 贵阳 550002;

2. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

Power Smoothing Control Strategy for Slope Gravity Energy Storage System Based on Instantaneous Power Mirror Compensation

LI Zhen¹, WANG Bin¹, MOU Xuepeng¹, CHEN Julong¹, WANG Yuxiang¹, LUO Chen¹,
WANG Zufan^{2*}, DONG Linlin², GAO Tian²

(1. Power Grid Planning and Research Center, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,
Beijing 102206, China)

Abstract: To solve the problem of output power fluctuation in gravity energy storage systems due to discrete mass block switching, a power smoothing control strategy based on instantaneous power mirror compensation is proposed. Firstly, the working principle of the slope gravity energy storage system is introduced to analyze the causes of power fluctuation of the system. Secondly, the system structure for suppressing power fluctuation as well as the power smoothing control strategy are designed, and the theoretical calculation of the system structure parameters is carried out by taking the example of a 11 kW slope gravity energy storage system. Finally, a simulation model for slope gravity energy storage system is established, and the transient fluctuation characteristics of the system during the mass block alternation process are analyzed. The results show that by applying the proposed method, the mass block can provide continuous and stable mechanical power during the alternating process, which can better smooth the output power of the gravity energy storage system, verifies the effectiveness of the method.

Key words: slope gravity energy storage system; power fluctuation; instantaneous power mirror compensation; power smoothing control

摘要: 针对重力储能系统因离散质量块切换引起的输出功率波动问题,提出了一种基于瞬时功率镜像补偿的功率平滑控制策略。首先介绍了斜坡式重力储能系统的工作原理,分析引起系统功率波动的原因;然后设计了抑制功率波动的系统结构以及功率平滑控制策略,并以11 kW的斜坡式重力储能系统为例,对系统结构参数进行理论计算;最后构建斜坡式重力储能系统仿真模型,分析了系统在质量块交替过程中的暂态波动特性。结果表明,应用所提方法,质量块在交替过程中可提供连续稳定的机械功率,较好地平滑重力储能系统的输出功率,验证了该方法的有效性。

关键词: 斜坡式重力储能系统; 功率波动; 瞬时功率镜像补偿; 功率平滑控制

0 引言

近年来为改善能源结构、重塑能源格局,世界各国正努力推动新一轮能源技术革命,“十四五”期间,储能领域将以应用为导向,突破现有技术的发展瓶颈,以高安全、长寿命、高效率、低成本、大规模及可持续发展等衡量指标来评价储能技术的先进性与适用性。在此背景下,储能技术快速发展,许多技术已进入商业示范阶段,并在一些领域展现出一定的经济性^[1-4]。目前新型电力系统需要更多的惯性支撑能力^[5],而基于离散固体介质

基金项目: 南方电网有限责任公司重点科技项目
(GZKJXM20220033)

Key Science and Technology Project of China Southern Power
Grid Co., Ltd. (GZKJXM20220033)

的重力储能技术在电力系统中可以充分发挥“稳定器”、“调节器”和“平衡器”的作用,从而改善电力系统的运行特性,提升大电网的综合防御能力,保障电网的安全稳定运行,为实现无碳电力系统提供技术支撑,为实现“碳达峰、碳中和”目标以及能源转型作出贡献^[6-7]。

目前,国内外对重力储能系统(Gravity Energy Storage System, GESS)的研究已有了一定的成果,现有 GESS 根据储能质量块在充放电过程中的运行轨迹可分为两类,分别是斜坡式重力储能系统(Slope Gravity Energy Storage System, SGESS)和垂直式重力储能系统(Vertical Gravity Energy Storage System, VGESS)。SGEES 主要有美国 ARES 公司的轨道车辆储能系统^[8-9];中科院电工研究所及中电普瑞电力工程有限公司也分别结合铁路轨道运载车辆和传送链提出了不同方案^[10-11];陈巨龙等^[12]针对斜坡式重力储能系统中机械环节提出了结构设计方案以及质量块抓取装置控制方法。VGEES 主要有 Energy Vault 公司提出的塔式储能系统;苏格兰 Gravitricity 公司的地下竖井式储能系统;葛洲坝中科储能技术公司及徐州中矿大公司也提出了各自的结构方案。SGEES 和 VGEES 实现的技术方案多种多样^[13-15],但综合来看,由于使用离散质量块作为动力源驱动电机旋转,在质量块切换过程中,其提供给电机的机械功率会发生突变,进而导致电机输出电功率的波动,这是重力储能系统使用离散质量块作为动力源不可避免的问题。

对于如何平滑 GESS 由于质量块切换导致的发电功率间歇性和波动性的问题,有学者提出了以重力储能为主、飞轮储能为辅的综合物理储能系统设计和控制策略^[16],即通过飞轮储能实时弥补重力储能系统因离散质量块运行至高低势能码放区导致的功率缺失;也有学者将重力储能与超级电容器组结合起来平抑质量块切换过程的功率波动。但目前对于如何从重力储能系统本体上解决功率波动的问题还没有相关研究。

由于引起 SGEES 和 VGEES 输出功率波动的原因类似,本文以 SGEES 为分析对象,提出基于瞬时功率镜像补偿的 SGEES 功率平滑控制策略。首先介绍 SGEES 的工作原理,并分析引起 SGEES 功率波动的原因;然后对抑制功率波动的系统结

构的各部分参数进行理论计算;最后建立 SGEES 仿真模型,研究系统在质量块交替过程中的运行特性,验证所提控制策略的可行性。

1 基本原理与功率波动特性

1.1 基本原理

对于斜坡式重力储能,虽然不同结构方案在实现形式上存在差异,但基本原理均是利用储能质量块在高低位之间的势能差来存储、释放电能^[17],简易结构如图 1 所示,假设系统使用的电机类型为同步发电电动机(Synchronous Generator Motor, SGM)。

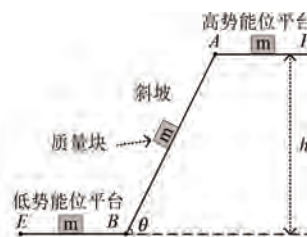


图 1 SGEES 结构

Fig. 1 Structure of SGEES

重力储能系统运行过程中,重力势能和电能通过 SGM 进行相互转化。在充电时,SGM 运行于电动工况,将质量块从低势能位平台沿斜坡拖至高势能位平台,电能转化为质量块的重力势能储存在高势能位平台;放电时,SGM 运行于发电工况,位于高势能位平台的质量块将沿斜坡下落,拖动 SGM 转子旋转发电,随着质量块的下落,其重力势能逐渐转化为电能补偿给电力系统^[18-19]。

1.2 功率波动特性

放电过程中,当重力储能系统的 SGM 在额定功率下运行时,假设有 n 个质量块沿着斜坡以恒定速度下行,此时质量块为 SGM 提供的机械功率可表示为

$$P_m = n \times mg \sin \theta \times V_1 \quad (1)$$

式中: P_m 为质量块运行提供的机械功率; n 为运行在斜坡上的质量块总数量; m 为单个质量块的质量; θ 为斜坡与水平面的夹角; V_1 为质量块沿斜坡匀速下滑的速度。

当质量块沿斜坡以恒定的速度稳定运行时,机械传动系统存在机械损耗,SGM 本身存在电磁损耗^[20],综合考虑整个重力储能系统的各部分损

耗后,可认为重力储能系统单向工作效率为 η ,则SGM发出的电功率可表示为

$$P_e = \eta P_m \quad (2)$$

式中: P_e 为SGM发出的有功功率; η 为系统的效率。

当质量块离开斜坡段,到达低势能位码放区时,质量块脱离传动装置,该质量块不再通过传动装置向SGM转子轴提供力的作用,此时运行于斜坡上的质量块数量为 $(n-1)$,SGM的输入机械功率可表示为

$$P_{m1} = (n-1) \times mgsin\theta \times V_1 \quad (3)$$

式中: P_{m1} 为 $(n-1)$ 个质量块提供的机械功率。

SGM输入机械功率的减少将导致其输出的电功率降低,即:

$$P_{e1} = \eta P_{m1} \quad (4)$$

式中: P_{e1} 为 $(n-1)$ 个质量块运行时SGM输出的电功率。

SGM输出电功率的变化量 ΔP_{e1} 为

$$\Delta P_{e1} = P_e - P_{e1} \quad (5)$$

当位于高势能位的下一质量块经过 t 时间间隔运行至斜坡,连接至传动装置继续向SGM提供力的作用,此时斜坡上质量块的数量恢复为 n 块,SGM的输入机械功率由 P_{m1} 恢复至 P_m ,输出功率也将由 P_{e1} 恢复至 P_e 。从整体运行区间来看,SGM输出的有功功率将周期性地存在 ΔP_{e1} 的波动量。

由于重力储能系统的机械结构特点,在发电过程中,可由多个质量块同时连接至传动系统,带动SGM转子旋转发电,质量块的离散性是重力储能系统运行过程中出现周期性功率波动的根本原因。因此如何实现离散介质的连续储能充放电,是本文要解决的重点问题。

2 斜坡式重力储能系统功率平滑控制方法

2.1 功率平滑约束条件

根据式(5),若要实现斜坡式重力储能系统输出功率平滑,即需要使波动量 ΔP_{e1} 尽可能小,当 ΔP_{e1} 等于零时为完全平滑。 ΔP_{e1} 反映的是重力储能系统输出功率的波动量,而电功率波动量的大小由运行在斜坡上质量块的机械功率 P_m 来决定。由式(1)可知, P_m 的影响因素主要有斜

坡上质量块的个数 n 、质量块的质量 m 、斜坡的角度 θ 以及质量块运行速度 V_1 。对于一个固定的斜坡式重力储能系统, m 和 θ 为定值,当电力系统对重力储能系统功率需求一定时,运行于斜坡上的质量块数量 n 不变,本文提到的斜坡式重力储能系统使用同步发电电动机,故当不改变机械传动系统的传动比时,质量块运行的速度 V_1 也是定值。

定义下方质量块由斜坡运行至低势能位平台,上方质量块由高势能位平台运行至斜坡的过程为质量块交替过程。在此过程中,将引起斜坡上质量块数量 n 以及运行速度 V_1 的短时波动进而导致斜坡上质量块的机械功率 P_m 发生短时波动。故若要实现重力储能系统输出功率变化量最小,则需要满足的约束条件为

- 1) 质量块数量 n 不变;
- 2) 质量块运行速度 V_1 不变。

2.2 基于对称路径的功率平滑实现途径

斜坡式重力储能系统的高、低势能位平台为水平方向,斜坡与水平方向有固定的夹角。在质量块交替过程中,为保证质量块由平台平稳过渡到斜坡,一般在平台与斜坡之间设置圆弧形缓冲段,如图2中的 \widehat{AC} 和 \widehat{BD} 。

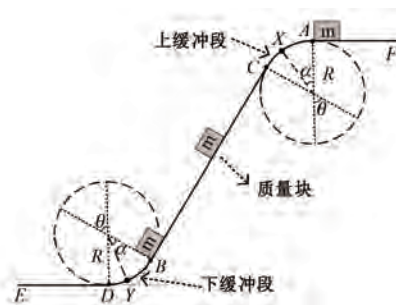


图2 配置缓冲段的SGESS结构

Fig. 2 Structure of SGESS with buffer section

为满足质量块交替过程中功率平滑的约束条件,当下方质量块经过 B 点进入下缓冲段,上方质量块恰好由 A 点进入上缓冲段且与传动系统相连;当下方质量块经过 D 点离开下缓冲段,此时下方质量块与传动系统断开连接,上方质量块由 C 点进入斜坡段,可认为质量块数量在交替过程中近似不变。同时还要保证上下质量块经过 A 、 B 两点时速度相同。

基于图2所示的结构,计算质量块交替过程

中的功率波动 ΔP_1 。为便于表示,当上下质量块分别运行在上下缓冲段时,用 $X、Y$ 两点表示其各自的运行位置,在上方质量块由 A 点运行至 C 点的过程中,由于在 A 点已经与传动系统相连,随着其运行轨迹与水平方向的夹角逐渐增大,上方质量块的重力沿着轨迹方向的分量增加。假设运行至 X 点,则其提供的机械功率 P_{mX} 为

$$P_{mX} = mgsin\alpha \times V_1 \quad (6)$$

式中: α 为 \widehat{AX} 的圆心角。

上方质量块为系统增加的机械功率为

$$\Delta P_{mu} = P_{mX} \quad (7)$$

该机械功率转化至 SGM 增加的输出电功率为

$$\Delta P_{eu} = \eta \Delta P_{mu} \quad (8)$$

在下方质量块由 B 点运行至 D 点过程中,随着其运行轨迹与水平方向的夹角逐渐减小,下方质量块的重力沿着轨迹方向的分量减小。假设运行至 Y 点,则其提供的机械功率 P_{mY} 为

$$P_{mY} = mgsin(\theta - \alpha) \times V_1 \quad (9)$$

式中: θ 为缓冲段 \widehat{BD} 的圆心角。

质量块稳定运行于斜坡段提供的机械功率为

$$P_{ms} = mgsin\theta \times V_1 \quad (10)$$

下方质量块为系统提供的机械功率减小量为

$$\Delta P_{md} = P_{ms} - P_{mY} \quad (11)$$

该机械功率转化至 SGM 减小的输出电功率为

$$\Delta P_{ed} = \eta \Delta P_{md} \quad (12)$$

则在质量块交替过程中,根据式(6)~式(12),SGM 的输出功率变化为

$$\Delta P_e = mg[\sin\theta \times (1 - \cos\alpha) + \sin\alpha \times (\cos\theta - 1)] \times V_1 \quad (13)$$

式(13)中,当 $\alpha < \theta$ 时, $\Delta P_e < 0$ 恒成立。故将上下缓冲段同时设置为镜像对称的圆弧无法在质量块交替过程中维持 SGM 输出功率平滑。

2.3 基于镜像功率补偿的功率平滑控制方法

由于仅通过构建对称路径无法完全实现斜坡式重力储能系统的功率平滑。因此,本小节在此基础上,结合质量块释放策略,以实现质量块交替过程中的功率镜像补偿,使得输出功率变化量最小。

为实现斜坡式重力储能系统输出功率的镜像

补偿,基于所构建的上下缓冲段对称路径,在下缓冲段入口前的 N 点安装位置传感器,同时将上方质量块的运行起始点移至上缓冲段的 M 点,设置加速段 \widehat{MC} ,如图 3 所示。

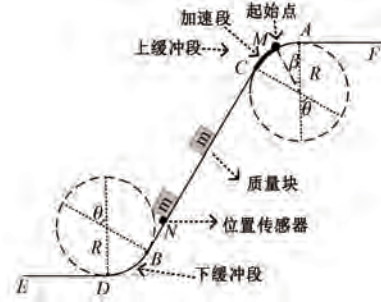


图 3 SGM 结构改进示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the structural improvement of SGM

当下方质量块到达 N 点时,传感器动作,向高势能位码放区发出释放下一质量块的信号,位于 M 点的上方质量块由静止状态在加速段自由加速,待加速运行至 C 点,下方质量块恰好运行至 B 点,此时上方质量块连接至传动系统,下方质量块脱离传动系统,完成质量块的交替。

图 3 所示结构中,起始点 M 和传感器安装位置点 N 的约束条件如下:

- 1) 上方质量块由 M 点自由加速至 C 点时,其运行速度需要与下方质量块一致;
- 2) 下方质量块到达 N 点时,上方质量块从 M 点开始加速运行,当上方质量块到达 C 点时,下方质量块应恰好到达 B 点。

根据 M 和 N 的约束条件及式(10)可知,在质量块交替过程瞬间,若上下质量块均在斜坡段且速度相同,则上下质量块为系统提供的机械功率相同,从而保证 SGM 输出电功率的平滑。

根据 M 和 N 的约束条件,起始点 M 的位置由式(14)确定:

$$\begin{cases} mgh_c - \Delta W_f = \frac{1}{2}mV_c^2 \\ V_c = V_1 \\ h_c = R(\cos\beta - \cos\theta) \end{cases} \quad (14)$$

式中: h_c 为 M 点与 C 点在垂直方向上的高度差; V_c 为上方质量块自由加速到 C 点的速度; β 为 \widehat{MA} 的圆心角。

根据式(14)求得的 β 即可确定起始点 M 的位置。

传感器位置 N 可根据式(15)确定:

$$\begin{cases} mgh = \frac{1}{2}mV^2 \\ h = R \times [\cos(\beta + \varphi) - \cos\theta] \\ V = \omega R \\ t_c = \int_0^{\theta-\beta} \frac{1}{\omega} d\varphi \\ X_N = V_1 \times t_c \end{cases} \quad (15)$$

式中: h 为上方质量块运行过程中与 C 点在垂直方向上的高度差; V 为上方质量块的实时速度; φ 为上方质量块自 M 点运行轨迹的圆心角; ω 为上方质量块的角速度; t_c 为上方质量块在加速段的运行时间; X_N 为下方质量块的运行距离。

根据式(15)可求得 X_N ,即传感器安装点 N 距 B 点的距离。结合所提的基于镜像功率补偿的功率平滑控制方法,系统的控制流程如图4所示。

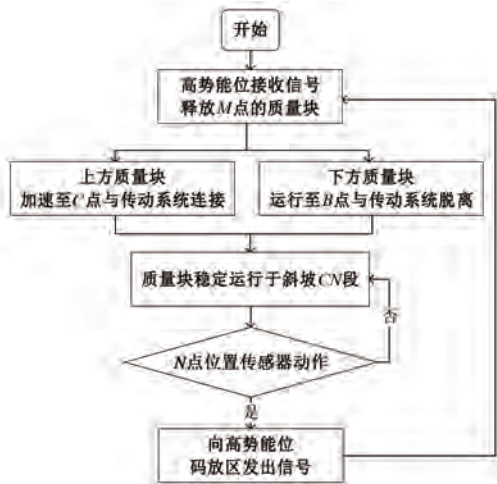


图4 SGEES 控制流程图

Fig. 4 Control flow chart of SGEES

3 仿真分析

3.1 重力储能系统参数及仿真说明

本文介绍的斜坡式重力储能系统,国内目前尚无建成的示范工程,故系统参数采用原理样机的设计参数,如表1所示。

图5为斜坡式重力储能系统的仿真结构。仿真系统由质量块模块、SGM模块和电网模块三部分组成。质量块通过传动系统给予SGM机械功

率,SGM的电磁转矩作为反馈量回馈给质量块。

表1 SGEES 原理样机的结构参数

Tab. 1 Structural parameters of prototype of SGEES

参数名称	参数值
斜坡长度 L/m	100
斜坡角度 $\theta/(\circ)$	30
上下缓冲段圆弧半径 R/m	10
单个质量块质量 m/kg	3 000
质量块运行速度 $V_1/(m \cdot s^{-1})$	0
系统额定功率 P/kW	11
系统效率 $\eta/\%$	80

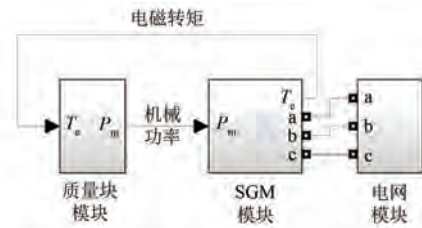


图5 SGEES 仿真结构图

Fig. 5 Simulation structure diagram of SGEES

需要说明的是,在实际重力储能工程中,质量块在与传动系统连接或脱离过程中,将引起机械波动,但此机械波动与重力储能机械设计方案以及加工工艺有较大关联。同时本文研究的重点是质量块的瞬时功率镜像补偿策略对重力储能系统输出功率的影响,故本文假设机械方面理想,在后续仿真分析中,忽略此机械波动引起的输出功率波动。

3.2 重力储能系统运行特性仿真分析

根据表1,搭建仿真模型,SGM直接与无穷大电网相连。仿真中缩短了整体的仿真时间,质量块的运行时间缩短为2 s。对系统的加减载及质量块的切换工况进行仿真,研究质量块切换过程中重力储能系统的运行特性。

重力储能系统中的质量块通过传动系统与SGM转子相连,在质量块下滑过程中,带动转子加速,可近似等效为质量块提供给SGM转子一个恒定的机械功率,如图6所示。假设斜坡上有1个质量块平稳下滑,根据式(1)计算得到质量块的机械功率 P_m 为14.7 kW。

由于质量块的离散性,故机械功率的波形为矩形波。假设质量块切换的时间间隔为1 s,根据

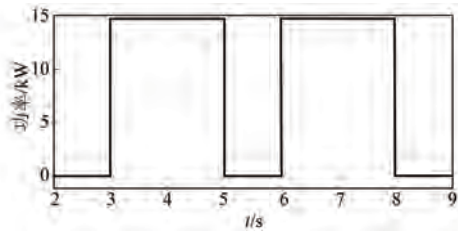


图 6 质量块提供的机械功率

Fig. 6 Mechanical power provided by mass block

图 2 所示结构,简要描述仿真中重力储能系统的工作过程如下:在 3 s 时质量块运行至斜坡,带动 SGM 发电;5 s 时运行至低势能位码放区,此时因机械系统的延迟,斜坡上短时没有质量块连接至传动系统,重力储能系统的输入机械功率短暂缺失;6 s 时下一质量块运行至斜坡并与传动系统相连,继续为重力储能系统提供机械功率。

在质量块交替过程中,SGM 转子转速及电磁转矩变化如图 7 和图 8 所示。

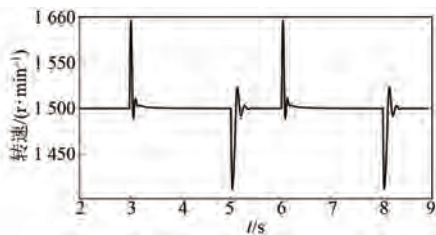


图 7 SGM 转子转速

Fig. 7 Rotor speed of SGM

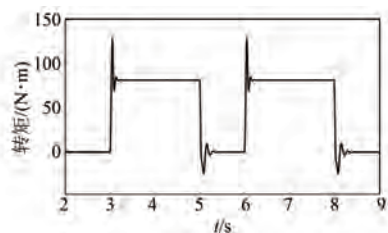


图 8 SGM 电磁转矩

Fig. 8 Electromagnetic torque of SGM

根据图 7,假设质量块以额定速度运行至斜坡,即在 3 s 时质量块与传动系统无冲击连接,此时 SGM 处于空载状态,其电磁转矩小于质量块作用在转子轴上的机械转矩。因此 SGM 在 3 s 时开始加速,SGM 功角增大,进而旋转磁场强度增大,导致 SGM 转子受到的制动力变大,表现为 SGM 转子受到的电磁转矩增大,如图 8 所示。

在 3 s 时刻质量块运行到斜坡之后,根据上述分析,SGM 制动性质的电磁转矩逐渐增大,作

用到 SGM 转子上的电磁转矩与机械转矩相等,质量块在斜坡上匀速运行,带动 SGM 稳定发电,其输出的有功功率如图 9 所示。

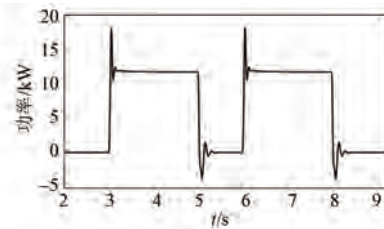


图 9 SGM 有功功率输出

Fig. 9 SGM active power output

3.3 重力储能系统的功率平滑输出

由于重力储能系统的输出功率波动主要由质量块提供给 SGM 转子的机械功率波动引起,下面采用图 3 所示的改进结构及图 4 所示的控制流程来解决此问题。

根据式(14)、式(15)以及表 1 中的数据,计算可得 β 为 8.71° , X_N 为 1.3 m,即上缓冲段的圆心角为 21.29° ,传感器安装位置 N 点应距离下缓冲段入口 B 点 1.3 m。

当下质量块沿斜坡运行至 N 点时,传感器发出信号,上缓冲段 M 点的质量块被释放加速,下方质量块继续沿斜坡稳定运行。待下方质量块到达 N 点时,与传动装置脱离,重力储能系统输出功率的缺额 ΔP_1 为 11.7 kW。此时,由 M 点释放的质量块运行至斜坡入口 C 点,其运动速度恰好达到 1 m/s,并与传动装置连接,进入斜坡段,其给重力储能系统输出功率带来的增量 ΔP_2 也为 11.7 kW,功率变化量 ΔP_1 和 ΔP_2 相等,即完成了瞬时功率镜像补偿,维持斜坡式重力储能系统的发电功率稳定。

应用本文提出的功率平滑控制方法后,质量块提供给 SGM 的机械功率以及系统输出的有功功率如图 10 所示。可以看出,采用所提方法后,质量块提供的机械功率可以维持恒定,从而使斜坡式重力储能系统输出的有功功率维持稳定,不会因质量块的交替发生较大波动。

4 结语

本文介绍了斜坡式重力储能系统的工作原理,并从本质上分析了引起系统功率波动的原因。根据斜坡式重力储能系统的特点,通过设置上下

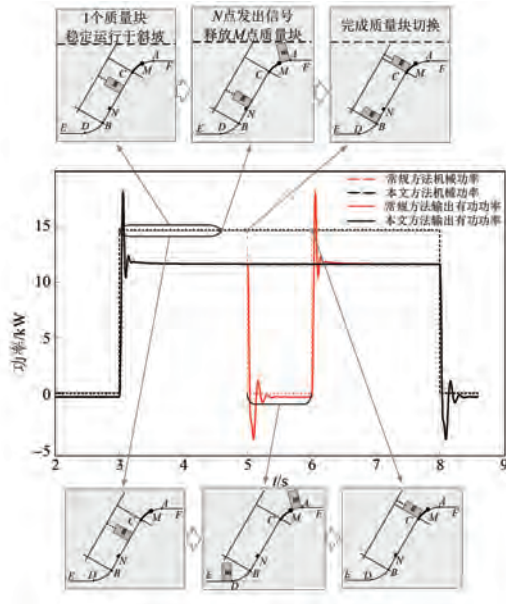


图 10 机械功率与输出电功率

Fig. 10 Mechanical power and output power

缓冲段,结合质量块释放策略,从系统本身解决了离散质量块在上下平台交替时引起的系统输出功率波动问题。构建 11 kW 的斜坡式重力储能系统的仿真模型。对比了未采用功率平滑控制和采用功率平滑控制策略下的输出功率波动情况,结果表明应用所提方法后,质量块在交替过程中能够提供连续稳定的机械功率,较好地平滑重力储能系统的输出功率,验证了所提方法的有效性。

参考文献

- [1] LETCHER T. Storing Energy [M]. Amsterdam: Elsevier, 2016.
- [2] SAGAR S, SONDHI S, SAGAR J. Gravity battery: Storing electrical energy in the form of gravitational potential energy [C] // 2020 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies, Greater Noida, 2020.
- [3] 梁志宏, 刘吉臻, 洪烽, 等. 电力级大功率飞轮储能系统耦合火电机组调频技术研究及工程应用 [J/OL]. 中国电机工程学报, 2023-12-08. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231472>. LIANG Z H, LIU J Z, HONG F, et al. Research and engineering application of frequency modulation technology of power-level high-power flywheel energy storage system coupled with thermal power unit [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2023-12-08. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231472>.
- [4] 李更丰, 孙少华, 别朝红, 等. 面向新型电力系统弹性提升的储能优化配置与灵活调度研究综述 [J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4084-4095. LI G F, SUN S H, BIE C H, et al. Review on optimal configuration and flexible scheduling research of energy storage for resilience improvement of new power system [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4084-4095.
- [5] 付文启, 杨鑫, 管飞, 等. 光伏减载驱动新能源同步机参与电力系统调频的研究 [J]. 电机与控制应用, 2021, 48(5): 79-85. FU W Q, YANG X, GUAN F, et al. Research on photovoltaic driving motor-generator pair to participate in frequency regulation under load shedding control [J]. Electrical Machines & Control Application, 2021, 48(5): 79-85.
- [6] 徐潇源, 王晗, 严正, 等. 能源转型背景下电力系统不确定性及应对方法综述 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 2-13. XU X Y, WANG H, YAN Z, et al. Overview of power system uncertainty and its solutions under energy transition [J]. Power System Automation, 2021, 45(16): 2-13.
- [7] 王晓涛. 新型储能“十四五”规模骤增核心技术坚持自主可控 [N]. 中国经济导报, 2021-8-3. WANG X T. New energy storage ‘14th Five-Year’ scale surge core technology adheres to self-control [N]. China Economic Review, 2021-8-3.
- [8] FRANCESCA C, JAMES K, WILLIAM P, et al. Storing Energy with Special Reference to Renewable Energy Sources [M]. Amsterdam: Elsevier, 2016.
- [9] GREGORY B, KENAN H, YOGENDRA P. Advanced rail energy and storage: Analysis of potential implementations for the state of West Virginia [C] // 2018 North American Power Symposium, Fargo, 2018.
- [10] 肖立业, 史黎明, 韦统振, 等. 铁路轨道运载车辆储能系统: CN201810190323. X [P]. 中国, 2018-08-24.
- [11] 郭高朋, 查鲲鹏, 周亮, 等. 一种基于传送链的高效重力储能系统: CN202010736009.4 [P]. 中国, 2020-07-28.
- [12] 陈巨龙, 李震, 朱永清, 等. 基于深度神经网络的斜坡式重力储能系统质量块抓取装置控制方法 [J]. 电机与控制应用, 2023, 50(11): 37-45.

- CHEN J L, LI Z, ZHU Y Q, et al. Control method of mass block grasping device of slope gravity energy storage system based on deep neural network [J]. *Electrical Machines & Control Application*, 2023, 50 (11): 37-45.
- [13] WALLER T M D, WARD L J. Gravitational energy storage device: US17449318 [P]. USA, 2022-05-26.
- [14] TONG W X, LU Z G, CHEN W J, et al. Solid gravity energy storage: A review [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 53(7): 105226.
- [15] 王粟, 肖立业, 唐文冰, 等. 新型重力储能研究综述[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(5): 1575-1582.
- WANG S, XIAO L Y, TANG W B, et al. Review of new gravity energy storage [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(5): 1575-1582.
- [16] 赵永明, 邱清泉, 聂子攀, 等. 重力/飞轮综合储能电机变流并网系统设计及运行特性[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(12): 3895-3905.
- ZHAO Y M, QIU Q Q, NIE Z P, et al. Design and operating characteristics of a grid-connected motor-converting system for gravity/flywheel integrated energy storage [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(12): 3895-3905.
- [17] YANG Q G, LIU Q J, FU Q, et al. Smart microgrid construction in abandoned mines based on gravity energy storage [J]. *Heliyon*, 2023, 9(11): e21481.
- [18] 刘智洋, 宋杭选, 方宽, 等. 依托重力储能的高寒地区风-储联合发电系统容量优化[J]. *黑龙江电力*, 2023, 45(1): 30-35.
- LIU Z Y, SONG H X, FANG K, et al. Capacity optimization of wind-storage combined power generation system in alpine region based on gravity energy storage [J]. *Heilongjiang Electric Power*, 2023, 45(1): 30-35.
- [19] 陈云良, 刘旻, 凡家异, 等. 重力储能发电现状、技术构想及关键问题[J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(1): 97-105.
- CHEN Y L, LIU M, FAN J Y, et al. Present situation, technology conceptualization and key problem for gravity energy storage [J]. *Engineering Science and Technology*, 2022, 54(1): 97-105.
- [20] 秦婷婷, 周学志, 郭丁彰, 等. 铁轨重力储能系统效率影响因素研究[J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(3): 835-845.
- QIN T T, ZHOU X Z, GUO D Z, et al. Study on factors influencing rail gravity energy storage system efficiency [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(3): 835-845.

收稿日期:2023-12-14

收到修改稿日期:2024-02-01

作者简介:

李震(1995-),男,硕士,助理工程师,研究方向为电力市场、储能及需求侧响应,mzyczl@163.com;

*通信作者:王祖凡(1998-),男,博士研究生,研究方向为电能转换与高效利用、重力储能技术等,wzf_0206@163.com。

Power Smoothing Control Strategy for Slope Gravity Energy Storage System Based on Instantaneous Power Mirror Compensation

LI Zhen¹, WANG Bin¹, MOU Xuepeng¹, CHEN Julong¹, WANG Yuxiang¹,
LUO Chen¹, WANG Zufan^{2*}, DONG Linlin², GAO Tian²

(1. Power Grid Planning and Research Center, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,
Beijing 102206, China)

Key words: slope gravity energy storage system; power fluctuation; instantaneous power mirror compensation; power smoothing control

In recent years, in order to improve the energy structure and reshape the energy pattern, countries around the world are working hard to promote a new round of energy technology revolution. During the 14th Five-Year Plan period, the energy storage field will be application-oriented and break through the bottlenecks of existing technology development. In this context, energy storage technology continues to develop, and many technologies have entered the commercial demonstration stage and have shown certain economics in some fields. At present, new power systems require more inertial support capabilities, and gravity energy storage technology based on discrete solid media can effectively improve the operating characteristics of power systems, enhance the comprehensive defense capabilities of large power grids, and ensure the safe and stable operation of power grids. It can provide technical support for the realization of a carbon-free power system and contribute to the achievement of carbon peaking and carbon neutrality goals and the energy transition.

Since gravity energy storage uses discrete mass blocks as the power source to drive the motor to rotate, during the mass block switching process, the mechanical power provided to the motor will undergo a sudden change, which will lead to fluctuations in

the electrical output power of the motor. This is an inevitable problem when gravity energy storage systems use discrete mass blocks as power sources.

In order to smooth the output power fluctuation caused by the switching of the mass block during the operation of gravity energy storage system, a power smoothing control strategy based on instantaneous power mirror compensation is proposed.

Firstly, the working principle of the slope gravity energy storage system is introduced to analyze the causes of power fluctuation of the system. Secondly, the system structure for suppressing power fluctuation as well as the power smoothing control strategy are designed, and the theoretical calculation of the system structure parameters is carried out by taking the example of a 11 kW slope gravity energy storage system. Finally, a simulation model for slope gravity energy storage system is established, the mechanical power and output power with and without power smoothing control strategy are compared.

The results show that by applying the proposed method, the mass block can provide continuous and stable mechanical power during the alternating process, which can better smooth the output power of the gravity energy storage system, verifies the effectiveness of the proposed method.