

用于快速响应负荷需求的两段式斜坡重力储能系统放电功率调节方法

李明¹, 亚夏尔·吐尔洪¹, 查鲲鹏², 郭高朋², 郝梓琳³, 赵海森^{3*}

(1. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 中电普瑞电力工程有限公司, 北京 102299;

3. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

Discharging Power Adjustment of Two-Stage Ramp-Type Gravity Energy Storage System for Fast Response to Load Demand

LI Ming¹, YAXIAER·Tuereong¹, CHA Kunpeng², GUO Gaopeng²,

HAO Zilin³, ZHAO Haisen^{3*}

(1. China State Grid Xinjiang Electric Power Corporation, Urumqi 830000, China;

2. China EPRI Electric Power Engineering Co., Ltd., Beijing 102299, China;

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

Abstract: Generally, discharging conditions of ramp-type gravity energy storage system (GESS) can be realized by transporting heavy blocks from the upper stacking yard to the lower one. However, the number of heavy blocks may not be adjusted timely when load demand fluctuates during discharging process, which may cause the delayed response and additional energy loss of GESS. By configuring auxiliary heavy blocks stacking yards on both sides of the ramp rail and dividing the traditional ramp into two segments, precise control on discharging power and fast response to load demand can be realized by controlling the releasing heavy blocks quantity on the top stacking yard, the releasing height of the ramp stacking yard and the grab position of heavy blocks on the ramp stacking yard. With Matlab/Simulink, the simulated model of two-stage ramp-type GESS is established, and the correctness and effectiveness of the presented method are verified. The achievement can provide an important reference for the discharging power adjustment and precise control of ramp-type GESS.

Key words: gravity energy storage system; discharging power adjustment; load demand; fast response

基金项目: 国家电网公司科技项目(5419-202240053A-1-1-ZN)

State Grid Corporation of China for Science and Technology Projects (5419-202240053A-1-1-ZN)

摘要: 斜坡式重力储能系统(GESS)放电时通常将上堆场重物块运送至下堆场。然而,当放电过程中系统负荷需求出现波动时,现有方案难以通过及时调整重物块数量来调节输出功率,导致重力储能系统响应不及时并造成额外能量损耗。通过在斜坡两侧增加辅助堆场并将斜坡分为两段,通过控制顶部堆场重物块释放数量、斜坡堆场释放高度以及斜坡堆场重物块抓取位置,实现了重力储能系统输出功率的精确控制与负荷需求的快速响应。基于 Matlab/Simulink 平台搭建了两段式斜坡重力储能系统仿真模型,验证了所提方法的正确性与有效性。研究成果为斜坡式重力储能系统放电功率的快速调节与精确控制提供了重要参考。

关键词: 重力储能系统; 放电功率调节; 负荷需求; 快速响应

0 引言

社会经济发展导致电力需求大幅增长,加上“双碳目标”的提出,新能源发电占比逐年提高^[1]。新能源发电为电网提供大量电能的同时,也带来了一系列不稳定因素,包括间歇性、波动性以及系统惯量降低等突出问题^[2-3],配置长时大容量储能系统可有效解决这些问题^[4-6]。重力储能作为一种新型机械储能,相比电化学储能技术,不

会造成环境污染和安全隐患,被广泛应用于风光新能源消纳、负荷调节等多个领域^[7-8],是近年备受关注的新型储能技术之一。

重力储能作为一种新兴的储能技术,目前大部分处于理论研究阶段。Yangyang 等基于山地重力储能系统的能量转化过程,对重力储能系统容量进行了优化^[9];刘智洋等通过分析重力储能的充放电特点,并基于日负荷曲线提出了一种容量优化模型的规划方法,即通过重力储能辅助风电消纳的同时,兼顾发电系统的经济性与可靠性^[10];英国的 Gravitricity 公司提出了一种基于废弃矿井的地下重力储能系统;瑞士的 Energy Vault 公司提出了一种以工业废料为材料的重力塔储能系统^[11];中科院电工研究所提出了基于山体斜坡的多重物爬坡储能方案^[12]。王祖凡等针对重力储能系统现有抓取装置时效性不足的问题,提出了一种基于深度神经网络的质量块抓取装置控制方法^[13]。但上述重力储能系统,仅能通过改变最上层堆场释放重物块数量来调节发出的能量,面对系统中负荷需求发生变化时,改变自身输出功率的灵活性较差。并且由于重力储能系统体积庞大,特别是斜坡式重力储能系统,建设单条长斜坡的地形需求较高,往往会造成建设成本过大的问题,并且单条斜坡过长也会使重物块在斜坡上下落时间变长,导致系统的反应速度变慢,难以对储能系统输出的功率进行及时调整,造成能量损失。

本文对斜坡式重力储能系统的斜坡结构进行改进,提出了一种中间含有连接平台的两段式斜坡轨道,可有效减少重物块在单条斜坡上的输送时间,从而提高了系统的响应速度。同时,在斜坡两侧建设多个辅助堆场,并采取相应的控制策略,在提高储能系统地形适应能力的同时,进一步提高了系统对输出功率的控制精度。

1 斜坡式重力储能系统模型

1.1 斜坡式重力储能系统工作原理

斜坡式重力储能通过改变重物块的重力势能实现重力储能系统 (Gravity Energy Storage System, GESS) 电能与机械能之间的转化,结构如图 1 所示。当重力储能系统工作在放电状态时,将置于顶部堆场的重物块放置在轨道上,重物块在重力的作用下沿着斜坡下落,同时拖动发电机

发出电能,将重力势能转化为电能回馈至电网^[14]。当重力储能系统工作在充电状态时,将置于底部堆场的重物块放置在轨道上,随着重物块沿斜坡上升至顶部堆场,重物块势能逐渐增加,把电能转换为重力势能储存在系统中^[15-16]。考虑到地形条件、建筑高度、系统容量和使用场景等因素,可以通过调整重物块单体重量和适当的形状,以实现额定功率输出和较高的机电转化效率^[17-20]。

斜坡式重力储能系统各项指标与影响因素的关系如表 1 所示,表中“NO”、“PC”和“NC”分别表示“不相关”、“正相关”和“负相关”。

表 1 斜坡式重力储能系统指标与影响因素的关系
Tab. 1 Relationship between the system index of ramp-type GESS and influencing factors

影响因素	系统指标			
	功率	容量	响应时间	效率
高度	NO	PC	NC	PC
单个重物质量	PC	PC	NO	NO
在线重物数量	PC	PC	NO	NO
斜坡传送速度	PC	NO	PC	PC
重物抓取时间	NO	NO	PC	NO

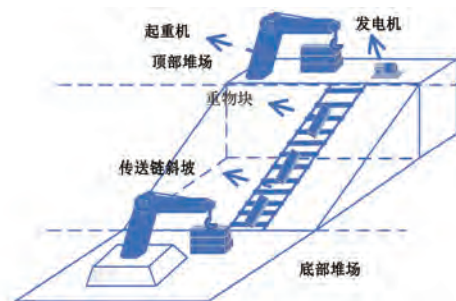


图 1 斜坡式重力储能系统结构

Fig. 1 Structure of ramp-type GESS

1.2 斜坡辅助型重力储能系统

为了实现斜坡式重力储能系统对输出能量的精确控制,本文提出了一种配备辅助堆场的斜坡式重力储能系统,即在斜坡两侧配置了多个相同的斜坡堆场。斜坡辅助型重力储能系统主要包括传送链、顶部堆场、底部堆场、斜坡堆场、重物块、行吊和吊爪等部分。

其中顶部堆场位于斜坡顶部,用于在储能阶段存放大量沿斜坡输送上来的重物块,并在释能阶段释放重物块,担任重力储能系统发出能量的主体,满足大部分电网负荷的需求。顶部堆场可

以根据释放重物块的数量来调节重力储能系统发出能量的多少,实现对电网负荷功率的初步跟踪。斜坡堆场是一种位于斜坡辅助型重力储能系统中斜坡两侧的重物块码放堆场,在同一个斜坡辅助型重力储能系统中可以存在多个斜坡堆场,斜坡堆场按照高度,依次排列在斜坡两侧。在储能阶段,当顶部堆场中的重物块码放完毕后,其余重物块会均匀码放在每个斜坡堆场中;释能阶段,通过调整不同高度斜坡堆场以及堆场内重物块的抓取位置来辅助重力储能系统调节输出功率,同时弥补顶部堆场输出功率与负荷需求间的差额。通过添加斜坡堆场,可有效缓解顶部堆场释放重物块的压力,并增强重力储能系统功率输出的灵活性。

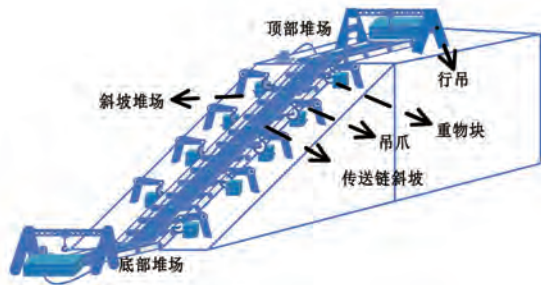


图2 斜坡辅助型重力储能系统结构
Fig. 2 Structure of ramp-assisted GESS

2 斜坡分段控制策略

2.1 两段斜坡辅助型重力储能系统控制策略

由于重力储能系统功率响应速度和输出功率控制精度受到重物块下落时间的影响,单个重物块从抓取到下落的时间越长,重力储能系统的响应速度和输出功率控制精度越差。为了减少重物块的下落时间,将斜坡式重力储能系统中的斜坡均等的分为两段,通过减少重物块单次输送距离来减少重物块的下落时间,从而提高系统功率响应速度和输出功率的控制精度。

将斜坡辅助型重力储能系统的斜坡均等地分为两段。其中,位于上半部分与顶部堆场相连的为上半斜坡,位于下半部分与底部堆场相连的斜坡为下半斜坡,两段斜坡的长度和斜坡角度完全相同。在上半斜坡和下半斜坡之间建立一个连接堆场,连接堆场的作用为存储上半斜坡运输下来的重物块和提供下半斜坡运输所

需的重物块。按照此方法将斜坡辅助型重力储能系统分为两段式斜坡辅助型重力储能系统,其结构如图3所示。

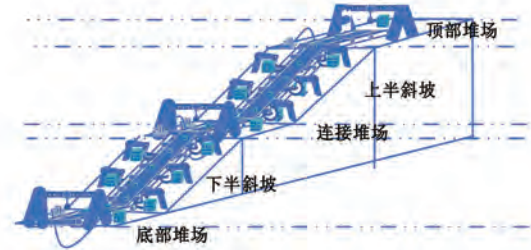


图3 两段式斜坡辅助型重力储能系统结构
Fig. 3 Structure of two-stage ramp-assisted GESS

2.2 两段斜坡主体发电控制策略

在两段式斜坡重力储能结构中,可以将整个系统分为两部分,上半部分由顶部堆场、上半斜坡和连接堆场组成;下半部分由连接堆场、下半斜坡和底部堆场组成。考虑到顶部堆场和连接堆场分别位于上半斜坡和下半斜坡的顶部,由这两个堆场释放的单个重物块在单段斜坡下落过程中转化的电能最多,故将顶部堆场和连接堆场向下释放的重物块所发出的功率定义为主发电量。

通过计算重物块沿上半斜坡和下半斜坡下落时发出的瞬时功率 P_{F1} 与 P_{F2} ,如式(1)所示,可得出上下斜坡同时下落重物块时发出的瞬时机械功率之和 P_S ,如式(2)所示:

$$P_{F1} = P_{F2} = mgV_0 \sin \theta \quad (1)$$

$$P_S = P_{F1} + P_{F2} \quad (2)$$

式中: θ 为斜坡角度; m 为重物块质量; g 为重力加速度; V_0 为重物块沿斜坡运输的速度; P_S 为相同的重物块同时在上半斜坡和下半斜坡下落时发出的机械功率之和。

由于重物块在下落时斜坡速度需保持恒定,根据式(1)所示单个重物块在斜坡上发出的瞬时机械功率也为恒定值。所以在斜坡运行过程中只能通过改变斜坡上的重物块的个数来调节输出功率。为了减少重力储能系统因发出过多能量造成的能量损耗,用于满足主发电量所释放重物块发出的瞬时功率应满足式(3)的约束:

$$X \times P_S \leq P_l \leq (X + 1) \times P_S \quad (3)$$

式中: X 为用于满足主发电量所释放重物块的个数; P_l 为负荷功率需求。

由于单个重物块下落过程中会持续发出功

率,为了应对负荷波动,需要顶部堆场与连接堆场每间隔 s_n 秒进行一次重物块释放判定,通过比较斜坡上 s_n 秒内满足主发电量所释放的重物块发出的能量与负荷消耗的电能判断是否继续释放重物块和调整重物块数量,如式(4)和式(5)所示:

$$W_l = \int_0^{s_n} P_l dt \quad (4)$$

$$W_F = (P_{F1} + P_{F2}) \times s_n \quad (5)$$

式中: W_l 为 s_n 秒内电网中所需的电能; W_F 为上半堆场和下半堆场分别释放单个重物块在 s_n 秒内能够发出的电能之和。

斜坡上满足主发电量所释放的重物块个数 X 应满足式(6)的约束:

$$X \times W_F \leq W_l \leq (X + 1) \times W_F \quad (6)$$

当斜坡上存在 N 个用于满足主发电量所释放的重物块时,则本次需要顶部堆场或连接堆场所释放重物块数量如式(7)所示:

$$C = X - N \quad (7)$$

式中: C 为满足主发电量所需要释放重物块的数量。当 $C \leq 0$ 时,不进行重物块的释放;当 $C > 0$ 时,释放 C 个重物块。

2.3 斜坡堆场高度选择方法

在斜坡式重力储能装置中斜坡堆场起着辅助调节重力储能系统功率输出的作用,通过选择不同高度的斜坡堆场释放重物块来弥补主发电量与负荷需求之间的差额,同时避免系统发出过多的电能。

相邻两层斜坡堆场之间间隔高度相同,斜坡堆场按照高度均等的分布在斜坡两侧,每层斜坡堆场之间的高度 Δh 如式(8)所示,斜坡高度为 H 时,可得每个斜坡堆场能够发出能量的方程如式(9)和式(10)所示:

$$\Delta h = \frac{H}{2N} \quad (8)$$

$$\Delta W = mg \times \Delta h \quad (9)$$

$$W_n = n \times \Delta W \quad (10)$$

式中: ΔW 为每升高一层能够多发出的电能; W_n 为上半斜坡或下半斜坡堆场内第 n 层斜坡堆场释放重物块能够发出的能量; N 为上半斜坡与下半斜坡内的斜坡堆场个数; n 为上半斜坡与下半斜坡堆场内斜坡堆场层数。

同一时间内,斜坡上只允许存在一个由斜坡

堆场释放的重物块。选取释放重物块的斜坡堆场层数 n 应满足式(11)的约束:

$$W_{n-1} < W_l - C \times (P_{F1} + P_{F2}) \leq W_n \quad (11)$$

式中:当 $n < 1$ 时, n 取 1。

2.4 斜坡堆场内重物块抓取位置控制方法

斜坡堆场结构如图 4 所示,斜坡堆场内吊爪抓取重物块的位置影响重物块抓取时间,需要根据负荷波动的剧烈程度,确定适合的抓取时间,从而提高系统的响应速度。

重物块为大小形状相同的正方体,通过建立 xyz 轴三维坐标系,将重物块的边长定为坐标系的单位长度(忽略重物块之间的间隔),确定斜坡堆场在坐标系中的边界最大值($x_{max}, y_{max}, z_{max}$)。将重物块排列在三维坐标系中,取原点坐标为(0,0,0),每块重物块中心坐标为(x, y, z)。

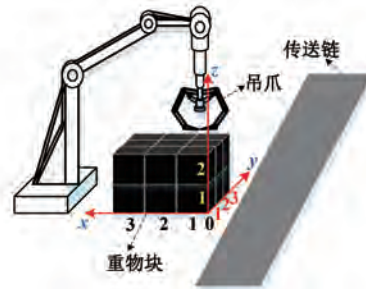


图 4 斜坡堆场重物块码放三维坐标

Fig. 4 Three-dimensional coordinate of heavy blocks stacking in ramp yard

抓取重物块的吊爪垂直于 $x0y$ 平面、平行于 $x0z$ 平面和 $y0z$ 平面,吊爪抓取重物块后释放至斜坡的位置为(0,0,0),且每次吊爪释放重物块后会回升至原本高度(0,0, Z_0)。吊爪水平移动速度为 V_1 ,吊爪垂直移动速度为 V_2 ,取抓取重物块的坐标为(x, y, z),则吊爪在堆场内需要移动的水平距离 L_{xy} 如式(12)所示:

$$L_{xy} = 2 \times (x + y) \quad (12)$$

且 x, y 满足式(13)的约束:

$$\begin{cases} x \leq x_{max} \\ y \leq y_{max} \end{cases} \quad (13)$$

吊爪抓取重物块并释放需要垂直移动的距离 L_z 如式(14)所示:

$$L_z = 2 \times (Z_0 - z) \quad (14)$$

且 z 满足式(15)的约束:

$$z \leq Z_0 \leq z_{max} \quad (15)$$

抓取所需时间 t_{xyz} 如式(16)所示:

$$t_{xyz} = L_{xy} \div V_1 + L_z \div V_2 \quad (16)$$

对功率变化曲线 P 关于时间求导得到曲线 f 如式(17)所示,将曲线 f 按照单位时间 Δt 分段后得到 D_i 如式(18)所示:

$$f = \frac{dP}{dt} \quad (17)$$

$$D_i = \frac{\left| \int_i^{i+\Delta t} f dt \right|}{\Delta t} \quad (18)$$

取 D_i 的最大值为 D_{tmax} , 最小值为 D_{tmin} 。将 D_{tmax} 与 D_{tmin} 之间等分为 $x+y$ 个区间 (x, y 分别为重物块沿 x 轴、 y 轴的最大堆放个数), D_i 越大, 功率在单位时间内变化速度越快。为了满足快速响应的需求, 在满足约束条件的情况下, 斜坡堆场重物块的抓取时间 t 应与功率随时间的变化率成反比, 即不同区间内的功率随时间的变化率曲线的平均值与重物块所需的移动距离成反比, 如式(19)所示:

$$t = \frac{x+y}{D_i} \quad (19)$$

且 t 满足式(20)~式(22)的约束:

$$t_{min} = \frac{x+y}{D_{tmax}} \quad (20)$$

$$t_{max} = \frac{x+y}{D_{tmin}} \quad (21)$$

$$t_{min} \leq t \leq t_{max} \quad (22)$$

式中: t_{min} 与 t_{max} 分别为吊爪抓取重物块所需时间的最小值与最大值。

3 仿真分析

通过模拟重物块释放的数量和选取释放重物块的斜坡堆场高度与斜坡堆场内重物块抓取位置, 可以搭建对应的 Simulink 仿真模型, 如图 5 所示。通过模拟, 可以验证主发电量是否能够满足负荷的大部分需求, 并且顶部堆场释放重物块时发出功率不大于负荷需求。其次, 通过对斜坡堆场释放重物块的过程进行仿真验证, 可以确保斜坡堆场在能够弥补顶部堆场剩余的负荷需求的同时减少因发出过多电能造成的能量损耗。

本文中所采用的斜坡辅助型重力储能系统的参数如表 2 所示。

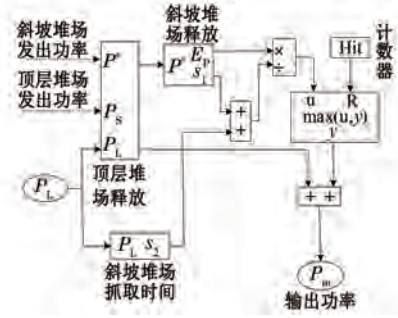


图 5 斜坡辅助型重力储能系统模拟框图

Fig. 5 Block diagram of ramp-assisted GESS

表 2 重力储能系统主要参数

Tab. 2 Main parameters of GESS

参数名称	参数值
高度落差/m	20
斜坡角度/(°)	30
斜坡堆场每层升高/m	2
斜坡长度/m	40
重物在斜坡上的运动速度/(m·s ⁻¹)	5
重物块质量/t	0.1
斜坡堆场层数/层	9
等效垂直提升/(m·s ⁻¹)	2.5
吊爪移动速度/(m·s ⁻¹)	0.5
重物块总数量/个	8

3.1 两段式重力储能系统仿真结果

本文以某地区工业负荷需求为例, 两段式斜坡重力储能系统与斜坡辅助型重力储能系统的斜坡堆场所发出的功率如图 6 所示, 在二者主体输出功率相同的情况下, 添加斜坡堆场的输出功率后可以得到储能系统总体输出功率, 如图 7 所示。可以看出两段式斜坡重力储能系统在输出能量精度上对于斜坡辅助型重力储能系统具有显著改善, 两段式斜坡重力储能系统的输出功率能够更加精确地追踪负荷需求曲线。

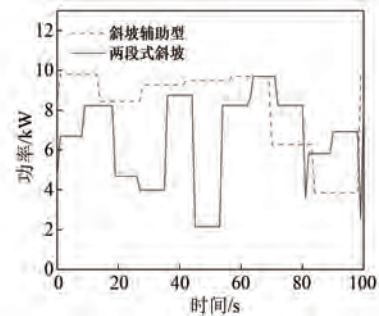


图 6 斜坡堆场输出结果对比

Fig. 6 Output power comparison of ramp yard

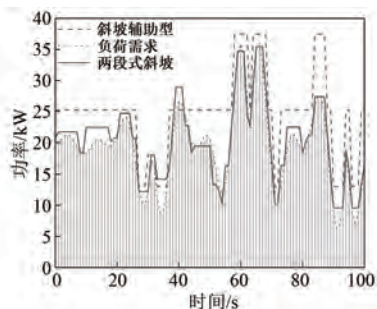


图 7 重力储能系统输出功率对比

Fig. 7 Comparison of output power of GESS

图 8 为重物块下落时间仿真结果图。可以看出,随着负荷功率的变化,将斜坡分段后能够显著的减少重物块的下落时间,从而使得响应速度提高。换言之,当负荷需求变化时,两段式斜坡重力储能系统可以更快地抓取重物块并释放储存的能量以满足需求。这种控制方法能够提高斜坡辅助型重力储能系统的效率和响应速度,同时保证系统运行的稳定性和可靠性。这些仿真数据进一步验证了新控制方法的执行可行性与优越性,为今后斜坡式重力储能系统的研究和应用提供了又一重要参考。

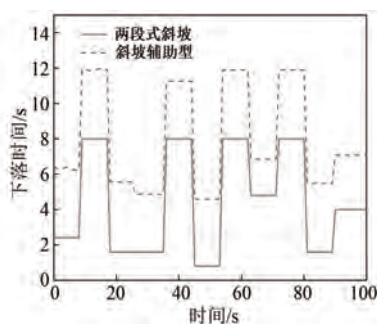


图 8 重物块下落时间对比

Fig. 8 Comparison of the fall time of heavy block

4 结语

根据斜坡式重力储能的运行特点,对斜坡辅助型重力储能系统的结构进行改进,通过对斜坡进行分段的方式,进一步提高了斜坡式重力储能系统的响应速度和输出功率的控制精度,实现对斜坡式重力储能系统的能效优化。最后通过建立 Simulink 仿真模型进行验证。结果表明,该控制方法在实现系统快速响应和提高输出功率的同时,能够使重力储能系统发出的功率更加贴合负荷需求,减少了斜坡式重力储能系统因发出过多

电能造成的能量损失。

本文仅讨论了单机组与单个斜坡的情况,未来可以通过多机组多斜坡共同运行的方式,实现更高精度、更快速度及更少浪费的负荷追踪。该方法的提出,为斜坡式重力储能系统的提升和发展提供了一种新的思路。

参考文献

- [1] ZAKERI B, SYRI S. Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42: 569-596.
- [2] DEGHANI-SANIJ A R, THARUMALINGAM E, DUSSEAU M B, et al. Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 104: 192-208.
- [3] BEWBERRY D. Shifting demand and supply over time and space to manage intermittent generation: The economics of electrical storage [J]. *Energy Policy*, 2018, 113: 711-720.
- [4] BERRADA A, LOUDIYI K, ZORKANI I, et al. Valuation of energy storage in energy and regulation markets [J]. *Energy*, 2016, 115 (Part 1): 1109-1118.
- [5] BERRADA A, LOUDIYI K, ZORKANI I, et al. Sizing and economic analysis of gravity storage [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2016, 8(2): 024101.
- [6] KIM E S, KIM Y S, MOON S I. Frequency and voltage control strategy of standalone microgrids with high penetration of intermittent renewable generation systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, A Publication of the Power Engineering Society, 2016, 31(1): 718-728.
- [7] HUNT D J, ZAKERI B, FALCHETTA G, et al. Mountain gravity energy storage: A new solution for closing the gap between existing short- and long-term storage technologies [J]. *Energy*, 2020, 190: 116419.
- [8] LOUDIYI K, BERRADA A. Experimental validation of gravity energy storage hydraulic modeling [J]. *Energy Procedia*, 2017, 134(10): 845-854.
- [9] CHEN Y Y, HUI H, TAO X, et al. A new gravity energy storage operation mode to accommodate

- renewable energy [C] // 2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Macao, 2019.
- [10] 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.
- [11] O'GRADY C. Gravity powers batteries for renewable energy [J]. Science, 2021, 372(6541): 446-446.
- [12] 肖立业, 史黎明, 韦统振, 等. 铁路轨道运载车辆储能系统[P]. 中国: CN201810190323. X, 2018-08-24.
XIAO L Y, SHI L M, WEI T Z, et al. Railway track vehicle energy storage system [P]. China: CN201810190323. X, 2018-08-24.
- [13] 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.
- [14] 刘智洋, 宋杭选, 韩冰, 等. 基于重力储能的电网无功优化及电压控制研究[J]. 黑龙江电力, 2023, 45(2): 112-117.
LIU Z Y, SONG H X, HAN B, et al. Research on reactive power optimization and voltage control of power grid based on gravity energy storage technology [J]. Heilongjiang Electric Power, 2023, 45(2): 112-117.
- [15] BERRADA A, LOUDIYI K, GARDE R. Dynamic modeling of gravity energy storage coupled with a PV energy plant [J]. Energy, 2017, 134: 323-335.
- [16] ELSAYED M E A, ABDO S, ATTIA A A A, et al. Parametric optimisation for the design of gravity energy storage system using Taguchi method [J]. Scientific Reports, 2022, 12: 19648.
- [17] BOTHA C D, KAMPER M J. Capability study of dry gravity energy storage [J]. Journal of Energy Storage, 2019, 23: 159-174.
- [18] BERRADA A, LOUDIYI K, ZORKANI I. Dynamic modeling and design considerations for gravity energy storage [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 159: 336-345.
- [19] HE W, KING M, LOU X, et al. Technologies and economics of electric energy storages in power systems: Review and perspective [J]. Advances in Applied Energy, 2021, 4(10): 100-106.
- [20] ANISA E, ASMAE B, MOHAMED B. Optimal sizing and deployment of gravity energy storage system in hybrid PV-Wind power plant [J]. Renewable Energy, 2022, 183: 12-27.

收稿日期:2023-10-18

收到修改稿日期:2024-01-09

作者简介:

李明(1990-),男,硕士,工程师,研究方向为新能源及储能并网运行与检测技术研究,hanfenliming07@163.com;

*通信作者:赵海森(1982-),男,博士,教授,研究方向为电能转换与高效利用、新能源电力系统分析与控制, zhaohisen@163.com。

Discharging Power Adjustment of Two-Stage Ramp-Type Gravity Energy Storage System for Fast Response to Load Demand

LI Ming¹, YAXIAER·Tuereong¹, CHA Kunpeng², GUO Gaopeng²,
HAO Zilin³, ZHAO Haisen^{*}

(1. China State Grid Xinjiang Electric Power Corporation, Urumqi 830000, China;

2. China EPRI Electric Power Engineering Co., Ltd., Beijing 102299, China;

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

Key words: gravity energy storage system; discharging power adjustment; load demand; fast response

With the significant increase in power demand brought about by economic development and the proposal of carbon peaking and carbon neutrality goals, the proportion of new energy power generation has been increasing year by year, and more new energy power generation provides a large amount of electricity for the power grid at the same time, but also brings a series of unstable factors, including intermittent power supply, system inertia reduction and other security risks. Previous studies show that the construction of large-capacity long-duration energy storage is the key to solving these hidden problems. As a new type of mechanical energy storage technology, gravity energy storage system (GESS) has the characteristics of long-time and large-capacity. Comparing with electrochemical energy storage technology, it may not cause environmental pollution and safety hazards, which is regarded as one of the competitive energy storage technology for the development of new power system.

Most ramp-type GESS is one-stage design pattern, as shown in Fig. 1, the construction conditions are more strict and more land area are needed if the ramp is connected directly from the top to the bottom of the stacking yard. At the same time, it also leads to the higher construction cost. Therefore, there is a requirement of novel construction methods for the better terrain adaptability of GESS.

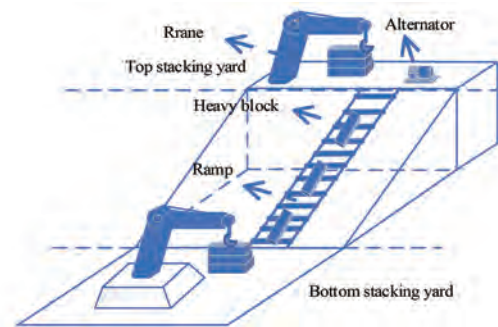


Fig. 1 Structure of one-stage ramp-assisted GESS

In this paper, according to the characteristics of the ramp-assisted GESS, a two-stage ramp-assisted GESS is designed, as shown in Fig.2. By configuring auxiliary heavy blocks stacking yards on both sides of the ramp rail and dividing the traditional ramp into two segments, precise control on discharging power and fast response to load demand can be realized. With Matlab/Simulink, the simulated model of two-stage ramp-type GESS is established, and the correctness and effectiveness of the presented method are verified.

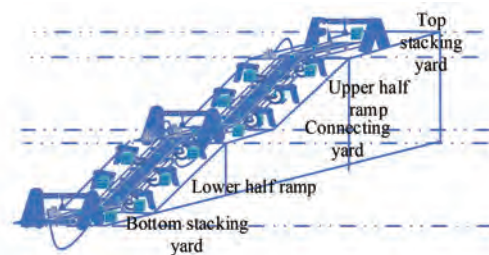


Fig. 2 Structure of two-stage ramp-assisted GESS