

MW 级固体重力储能系统设计及多机协同运行策略

史沁鹏¹, 曾小超¹, 李建文², 郭茹¹, 翟腾龙², 姜健宁¹, 张楠¹

(1. 中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京 100120; 2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

摘要: 大容量、中长时间尺度重力储能技术是新能源消纳和电力系统调峰的重要手段。根据 MW 级固体重力储能系统的运行特性要求及多重物切换导致功率间歇波动的问题, 设计了固体重力储能系统并提出多机协同系统运行策略。首先分析了竖井式重力储能系统的结构、运行特性和储能特性, 确定主要电气设备及负载类型, 并建立其数学模型; 在此基础上, 构建重力储能电机并网仿真系统, 提出了变频电辅助与变负载的机械辅助的两种软起动方式, 并提出了发电电动机控制及线性变频调速多机协同运行策略。最后基于 MATLAB/Simulink 平台仿真验证了所设计 MW 级重力储能系统及运行控制策略的可行性和有效性。

关键词: MW 级重力储能; 运行特性; 系统设计; 多机协同; 建模仿真

Multi-Machine Coordinated Control Strategy for MW-Level Solid Gravity Energy Storage

SHI Qinpeng¹, ZENG Xiaochao¹, LI Jianwen², GUO Ru¹, ZHAI Tenglong², JIANG Jianning¹, ZHANG Nan¹

(1. North China Power Engineering Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China; 2. State Key Laboratory of New Energy Power System (North China Electric Power University), Baoding, Hebei 071003, China)

Abstract: Large capacity, medium and long time scale gravity energy storage technology is an important means of new energy consumption and power system peak shaving. According to the operation characteristics of MW-level solid gravity energy storage system and the problem of intermittent power fluctuation caused by multi-weight switching, a solid gravity energy storage system is designed and a multi-machine coordinated system operation strategy is proposed. Firstly, the structure, operation characteristics and energy storage characteristics of the shaft-type gravity energy storage system are analyzed, the main electrical equipment and load types are determined, and its mathematical model is established. On this basis, the grid-connected simulation system of gravity energy storage motor is constructed, and two soft start modes of variable frequency electric auxiliary and variable load mechanical auxiliary are proposed. The single-machine control of power generation electric and the multi-machine coordinated operation strategy of linear variable frequency speed regulation are proposed. Finally, based on MATLAB / Simulink platform simulation, the feasibility and effectiveness of the designed MW-level gravity energy storage system and operation control strategy are verified.

Key words: MW-level gravity energy storage; operating characteristics; system design; multi-machine collaboration; modeling and simulation

0 引言

随着以风电、光伏等新能源为主体的新型电力系统的发展,其新能源具有的随机性、波动性和间歇性特征对电网的安全稳定运行带来巨大挑战^[1-3]。大规模储能装置可以提高电网调峰能力,平滑新能源发电输出,更好地进行“削峰填谷”,实现“源-网-荷-储”的动态平衡。

目前可大规模应用的长时储能技术包括抽水蓄能、电化学储能、压缩空气储能等。抽水蓄能建设周期长、成本高、受地理条件和水资源限制。电化学储能大规模应用时控制系统复杂,热失控现象导致的安全问题且较高成本。压缩空气储能效率较低、损耗较大。重力储能(gravity energy storage, GES)因其具备环境友好、布置灵活、寿命长、无自放电、安全可靠等突出优势,具有广阔的应用前景^[4]。但目前对MW级固体式重力储能电气设备选型、参数设置鲜有研究,未见整体方案。同时重力储能装置因其工作特性存在重载起动性能差、储能发电存在时间间歇、单次充放电功率有限、需要频繁起停以实现长时间工作、起停调速导致功率波动等问题,将造成输出功率受限和电能的浪费,降低了GES系统的效率,不利于电网的稳定运行。

目前,国内外针对重力储能理论方案与柔性功率控制方法进行了一定的理论研究。文献[5]总结了8种类型的GES技术路线的优势和不足;文献[6]针对GES在配电网和输电网两种应用场景下的结构、控制策略和容量配置方案展开了详细分析;文献[7]利用超级电容补偿GES加速和制动所需动能,再利用控制系统吸收重物下降时产生的功率浪涌;文献[8-9]提出了重力储能和液流电池等结合的分时分段控制策略;文献[10-11]提出重力/飞轮综合储能系统,平滑多重物切换导致功率的间歇和波动。上述文献多采用不同类型的储能技术互补,提高系统的灵活性和适应性,但同时也增加了系统的复杂性,包括结构设计、匹配控制、监测维护、安全性和可靠性等方面,增大了系统成本和维护难度,不利于GES技术大规模投入建设运行。

基于上述情况,本文提出MW级重力储能系统设计方案与多机运行实现协同控制策略,根据电网调功需求和储能装置状态,动态调整各个机组的运行状态,使得它们能够相互补偿,以满足大规模储

能应用,实现功率的平滑输出。

1 重力储能特性

重力储能通过固体或液体介质的势能差实现能量的储存与释放,发展迅速且技术型式多样,包括塔吊式、竖井式、悬重式、活塞式、斜坡轨道式、缆车式等^[12]。其中竖井重力储能(vertical gravity energy storage, VGES)选址灵活、占地小、效率高、且不受天气和自然环境的影响,相对于其他重力储能型式更适合MW级大规模应用,具有更广泛的适应性^[13]。

1.1 VGES系统的工作原理

VGES系统主要包括重物块、载重车辆、轿厢、竖井、巷道、地面平台和井底平台、上下层轨道、支撑架、滑轮、电机等部件。载重车辆作为水平转移载体,依托上下层轨道实现重物块数量的自由调节,通过轿厢实现重物块在高低平台间的升降,实现储释能过程,并通过电机完成机械能和电能之间的相互转化。可以通过调整重物块的数量和运行速度灵活调节储能系统的容量和响应速度。其典型结构如图1(a)所示。

系统运行过程分为储能阶段和释能阶段。储能模式运行时,由新能源电站或上级电网提供电能,地面平台的电动机与滑轮系统连接,驱动重物块匀速提升,将电能以重力势能的形式存储;当有供电缺额时,发电模式运行,地面平台下放重物块,自身重力作用下带动电机发电,将重力势能转换为幅值、频率都随重物速度变化的交流电,并通过双向变流器及控制系统实现并网。其工作原理如图1(b)所示。

1.2 VGES系统运行特性

VGES系统存储和释放的能量 E 与重物提升/降落的高度 H 、重物质量 m 和储能时间 t 有关;而能够存储和释放的功率 P 与重物提升/降落的速度 v 和重物质量 m 有关。下面对重物储能充电与释能放电过程展开分析。

VGES充电特性:重物块在储能过程中由电动机提供的驱动力实时克服自身重力、空气阻力和摩擦力做功。重物提升过程主要经历3个阶段,储能过程如图2所示。

OA段为充电启动阶段($0 \sim t_1$),重物速度从0加速到额定工作速度 v_d ,加速启动高度 h_1 ;

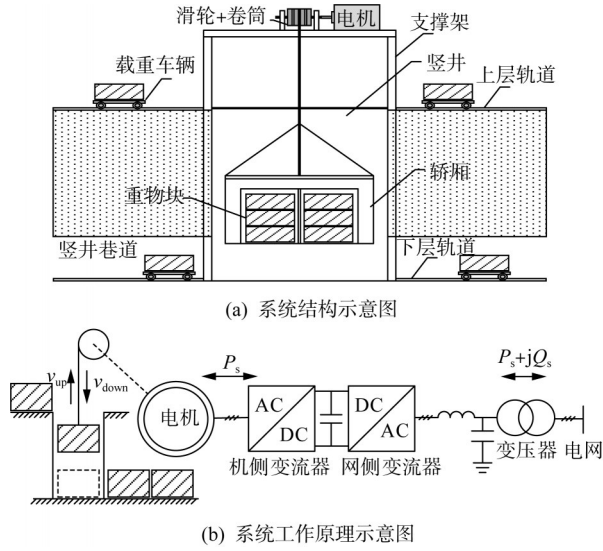


图1 VGES系统示意图

Fig. 1 VGES system schematic diagram

AB段为匀速储能阶段($t_1 \sim t_2$),电动机达到额定工作转速,输出额定工作扭矩,重物块受力平衡,保持匀速上升,匀速储能高度为 h_2 ,此过程重物受力平衡方程表示为:

$$F_d = mg + F_w + F_f \quad (1)$$

式中: F_d 为竖井储能电动机提升牵引力; F_w 为空气阻力; F_f 为滑轮系统摩擦力; m 为重物质量; g 为重力加速度。

式(1)中电动机牵引力的一般表达式为:

$$F_d = \frac{T_e}{R} i_G \eta_T \quad (2)$$

式中: T_e 为电机输出扭矩; i_G 为传动系统传动比(直驱系统 $i_G=1$); η_T 为传动系统机械效率; R 为作用半径。

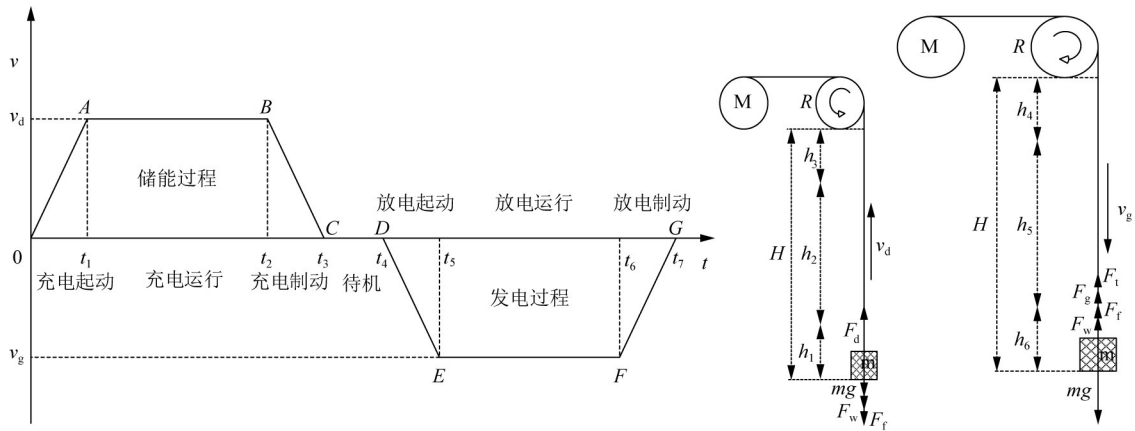


图2 VGES系统储能和发电运行过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the energy storage and power generation operation process of the VGES system

BC段为充电制动阶段($t_2 \sim t_3$),重物被提升到预定储能高度后,速度从 v_d 减小至0,进入CD静止待机状态,减速制动高度为 h_3 。

VGES放电特性:储能块在释能过程中由自身重力实时克服空气阻力、摩擦力、发电机牵引力做功。重物下落过程也主要经历3个阶段,发电过程如图2所示。

DE段为加速起动阶段($t_4 \sim t_5$),重物在初始位置进行释放,发电机出力不稳定,容易造成电网波动,一般不进行并网。

EF阶段为匀速发电阶段($t_5 \sim t_6$),重物下落 h_4 高度后达到的最大速度即并网速度 v_g ,此时重物匀速下落,开始进行并网,重物受力平衡方程表示为:

$$mg = F_g + F_w + F_f = F_g + \frac{1}{2} C \rho S v_g^2 + F_f \quad (3)$$

式中: F_g 为VGES发电机牵引力; C 为空气阻力系数; ρ 为空气密度,与环境条件有关,正常干燥空气可取 1.293 g/L ; S 为物体迎风面积。

FG段为减速制动阶段($t_6 \sim t_7$),速度减小至0,进入静止待机状态。

1.3 重力储能系统性能特征分析

由式(4)~(8)可知,重力储能系统功率与通道中单次运行重物的质量、升降速度和落差路径的环境条件有关;系统容量与重物的总质量、升降高度、运行时间和环境条件有关。因此单套重力储能系统的功率/容量受到竖井尺寸、垂直高度、重物块质量、场地空间的限制,但可通过多机协调运行满足不同规模的能量存储和功率需求。

相对电化学系统,重力储能的功率/能量密度

比较低,一般情况下,重力储能系统的功率密度通常在 $8\sim 10\text{ W}/(\text{kg}\cdot\text{m/s})$ 之间,而能量密度则在 $5\sim 20\text{ kWh}/(\text{kg}\cdot 100\text{ m})$ 之间^[14]。应用兆瓦级甚至百兆瓦级工程项目时,一方面需要对基于大能量密度、大落差构建途径、大型机电设备的型式、性能、安全性、经济性等关键技术及工程集成进行深入研究,另一方面通过多机协同控制解决其离散化的物理场景和电力系统连续性系统需求、机械系统不确定性及分钟级时间尺度与电力系统确定性及毫秒级时间尺度不对应等问题。

重力储能平均寿命可达到 40 a 以上,目前发展阶段下 6 h 系统初始建设成本约 1.8 元/Wh,储能时长更长情况下可以实现更低的单位容量成本。全寿命周期的度电成本约为 0.5 元/kWh,略高于抽水蓄能和压缩空气储能,优于锂电系统。

以中国能建华北院在张家口计划建设的新建竖井式重力储能电站为例,在 1 000 m 深的新建竖井中升降 1 000 余块 100 t 左右的重物,单机功率实现 1~16 MW 按调度要求可调,时长达 6 h,系统效率最高可达 82 %。可实现秒级的充放电反应,使用寿命达 50 a。

2 VGES 主设备选型及控制策略

从系统结构组成来看,VGES 系统模型主要由部件模型与控制策略模型组成,部件模型包括电机模型、重物负载模型和变流器模型,控制策略模型包括重物速度控制模型、电机控制模型以及网侧变流器控制模型。为降低模型复杂程度,以功能验证为主,忽略重物在平台上的转载过程;缆绳、滑轮、轿厢考虑为刚体;忽略电机铁芯损耗、磁滞及涡流损耗以及电气传输线路损耗影响。

2.1 电机选型

电机可分为同步电机(包括电励磁同步电机和永磁同步电机)和异步电机(鼠笼式和绕线式)。考虑电机输出的负载大小、方向和变化等因素对其性能和损耗的影响,评估电机在不同工况下的动态响应,如起停调速、负载变化等情况下的响应速度和稳定性。VGES 系统所用电机不仅需要具备四象限运行、低速大扭矩、调速范围宽、高效率特点,还要能够快速响应负载,适应不同的工作环境需要。16~18 MW 的 VGES 系统所用电机额定电压为 3~3.5 kV,就结构和功率电压等级而言,永磁同步电

机结构简单、无需额外励磁、功率密度高、过载能力强,适合重载起动加速和正常调速运行需要^[15]。

根据电机与负载之间是否通过传动系统连接,可分为直驱式(负载与电机转子直接耦合)和非直驱式(负载通过齿轮箱或皮带等传动装置与电机连接)。其中直驱 VGES 系统减少了传动装置损耗,低速效率更高(电机额定转速 50 r/min),响应更快,占地更小,在实际应用中更具竞争力。

2.2 变流器选型

VGES 系统可通过电力电子变换器—背靠背的变频变流器并网,通过频率与功率控制,实现重力势能和电能的灵活双向转换^[16-17]。根据电机额定电压,可选的变频变流变流器拓扑包含二极管钳位式三电平结构、飞跨电容式三电平式结构、级联 H 桥结构等。考虑 VGES 低频工况的特点,变流器的设计需要具备良好的低频特性和动态响应特性,能够快速调节电压和电流输出,以应对工作条件的动态变化,同时满足 MW 级系统匹配中压中频的特点,本文采用二极管钳位式三电平拓扑变流器^[18],其在降低谐波、减小电压脉动、降低电机损耗、提高系统效率、扩展适用范围方面具有一定优势,具有更广泛的适用性。

2.3 重物负载模型

将式(2)—(3)代入式(1)整理得到 VGES 系统重物负载的数学模型如下。

$$\begin{cases} T_{\text{Ld}} = \left(\rho_{\text{m}} Vg + \frac{1}{2} C_{\rho} S v^2 + F_{\text{f}} \right) \cdot R \\ T_{\text{Lg}} = \left(\rho_{\text{m}} Vg - \frac{1}{2} C_{\rho} S v^2 - F_{\text{f}} \right) \cdot R \end{cases} \quad (4)$$

式中: T_{Ld} 为 VGES 系统储能状态负载转矩; T_{Lg} 为发电状态下负载转矩; ρ_{m} 为重物块密度。

由式(4)可知,重物在升降过程中受到阻力和摩擦的大小、方向随储/释能状态的切换而改变。

结合 VGES 运行特性,永磁直驱电机在重载起停时存在起动困难、起动时间长、能效低的问题,甚至可能造成电机反转或滑落^[19]。因此本文从电机和负载的角度提出低速大扭矩永磁同步电机变频电辅助与变负载的机械辅助的两种软起动方式。

变频电辅助软起动使用变频器改变电机输入频率的幅度和时间,使电机转速按预先设定的速度曲线调节,从而实现平滑调速。根据给定转速曲线加速度变化的不同对常用的线性加速曲线、三角加速

度曲线、正弦加速度曲线以及复合加速曲线进行分析,得到以电机目标转速、起动时间为变量的给定加速度曲线波形如图3所示。

另外,变负载的机械辅助软起动采用启动离合器或减速器等辅助机械,逐步增加负载,使电机起动转矩逐渐增大至匹配负载转矩,实现负载平稳起动。

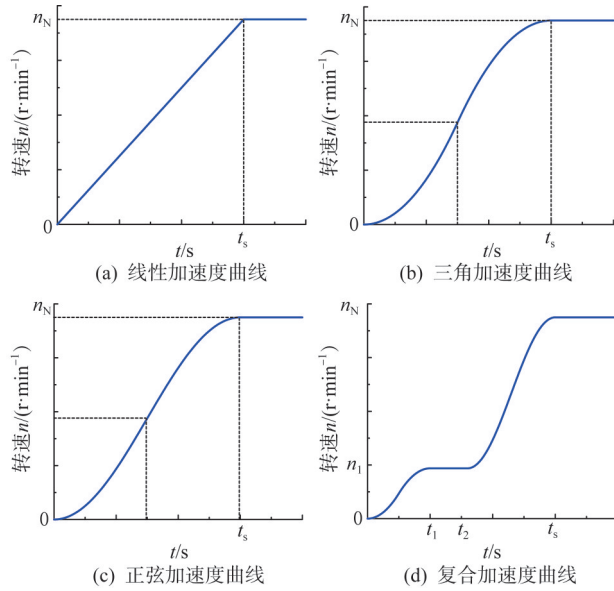


图3 变频加速曲线

Fig. 3 Frequency conversion acceleration curves

2.4 VGES系统整体控制策略

矢量控制技术(field-oriented control, FOC)采用励磁电流与转矩电流的解耦控制,从而使磁场控

制与转矩控制得到了兼顾,提高系统的响应速度和控制精度;直接转矩控制技术(direct torque control, DTC)直接控制电机的转矩和磁通,转矩动态响应速度快,但低频时转矩波动较大。VGES系统控制重物在低速范围内运行,在宽频调速时提供稳定的转矩控制。从调速和转矩控制的角度来看,FOC更适合重力储能系统要求^[20]。VGES系统整体控制策略框图如图4所示。

网侧换流器采用基于直流母线电压定向的电压、电流双闭环矢量控制策略,控制直流侧电压,实现输出有功、无功功率的解耦控制。机侧变流器采用基于转子磁链定向的转速、电流双闭环矢量控制策略,选用 $i_d=0$ 的矢量控制方法,此时定子电流全部用来产生电磁转矩,调节定子 q 轴电流 i_q 即可控制发电机的转矩,从而控制转速,实现转速跟踪。

2.5 VGES系统多机协同调功控制

VGES系统存储容量受竖井尺寸和重物质量的限制,当单个机组容量不足以满足储能或发电量需求时,可以通过多台机组联合控制,实现系统容量的提升。设计多机协同方案如图5所示。

以两台机组为例,对联合运行的过程展开分析。多机协调运行控制过程如图6所示。

联合储能运行过程如图6(a)所示,分为3个阶段,第一阶段,1号重物块加速并稳定提升储能,2号重物块待机;第二阶段,1号重物块到达减速区

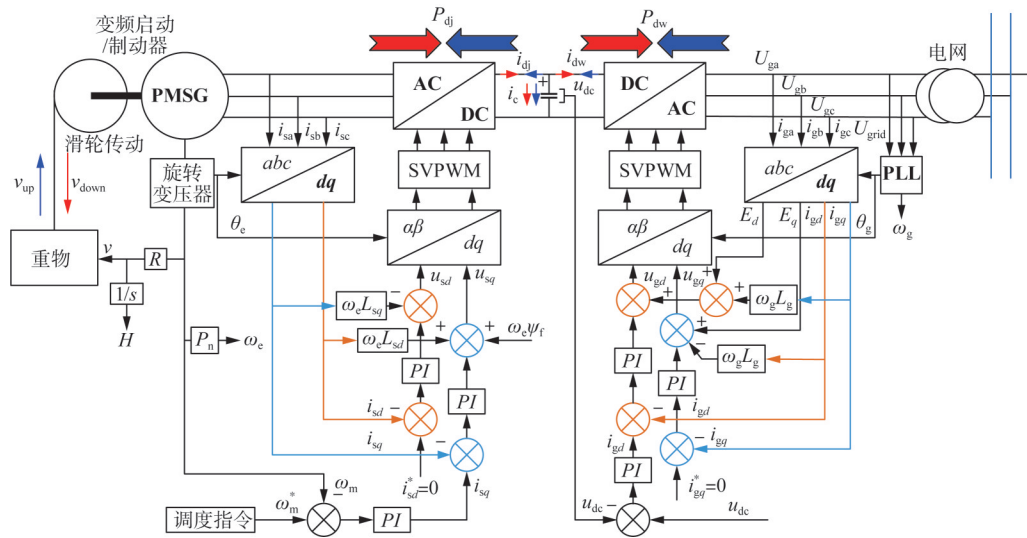


图4 固体式重力储能系统控制策略框图

Fig. 4 Block diagram of the control strategy of the solid-type gravity energy storage system

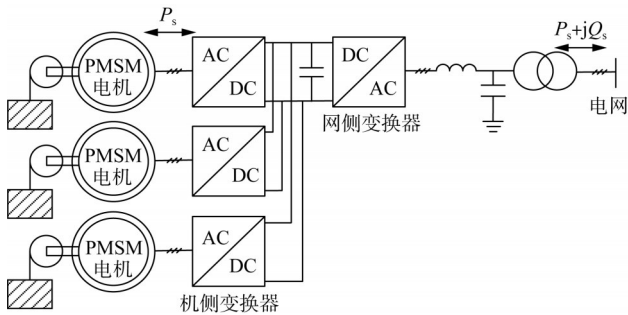


图5 多机协同基本结构示意图
Fig. 5 A Schematic diagram of the basic structure of multi-machine collaboration

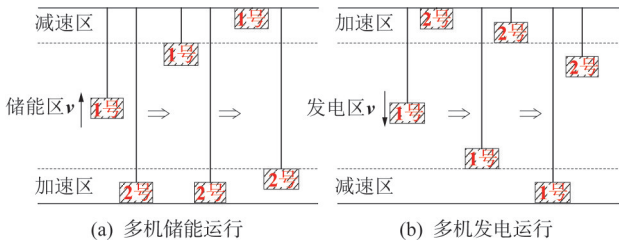


图6 重力储能多机协调运行过程示意图
Fig. 6 Schematic diagram of the coordinated operation process of gravity energy storage machine

开始减速，2号重物块接到指令开始加速；第三阶段，1号重物块减速结束待机，2号重物块加速至给定速度，进入匀速储能阶段。两个重物块通过时序配合、容量和速度匹配，储能容量增大且功率平滑。

联合发电运行过程如图6(b)所示，分为3个阶段，第一阶段，1号重物块加速下落至额定速度，稳定发电并网，2号重物块待机；第二阶段，1号重物块下降到减速区准备离网，2号重物块加速到额定速度开始准备并网；第三阶段，1号重物块减速停止，2号重物块稳定发电并网，以此类推，保证并网功率平滑。

从控制的角度，VGES系统每台电机对应一组重物负载和一套控制器，电机之间不存在耦合，控制结构简单，多机协同调功，重点在于发电/电动模式切换的时刻、起停调速时间、储能单元间容量的匹配、多机运行时序的配合，调功需求和机组调功范围的协调等。

为了方便处理，简化控制过程，设定电机、负载和变流器型号完全相同，各控制器的控制策略、起动方法等也相同，每个重力储能单元储能/发电容量一致。电机转速的调节范围决定了输出功率的

大小，通过协调控制各电机在高效运行区间的转速，可实现多机储能单元容量和功率在较宽范围内的连续调节，从而在兼顾系统效率的前提下，满足从较低功率水平到满额功率的灵活调节需求。

3 VGES系统仿真分析

在MATLAB/Simulink中搭建VGES系统并网仿真模型，表1给出了设计的16 MW级竖井式重力储能系统样机参数^[21]。拟选址高度为1 000 m，单个重物块质量为104 t，通过半径为3 m的定滑轮与电机直接连接，设定质量块运行速度为15.7 m/s。

本文重在研究控制策略的可行性，仿真中缩短了整体的仿真时间，对系统的重载起动效果、储能发电切换功能实现、多机协同调功控制策略进行仿真。

表1 MW级VGES系统参数
Tab. 1 MW-level VGES system parameters

参数	数值	参数	数值
电机额定功率/MW	16	单重物质量/t	104
电机额定电压/kV	3	重物个数	1
电机极对数	30	滑轮半径/m	3
电源频率/Hz	25	运行高度/m	1 000
电机额定转矩/MN·m	3	运行速度/(m·s ⁻¹)	15.7
电机额定转速/(r·min ⁻¹)	50	运行加速度/(m·s ⁻²)	1.5
变流器容量/MW	16	加减速时间/s	10.67

3.1 重物起动方式仿真

根据重物考虑实际损耗的负载动态模型，在Simulink中搭建变负载起动转矩模型，仿真模拟常用的斜坡型、抛物线型、S型、正弦型起动负载转矩。同时在储能/放电状态切换、是否考虑阻力、起动方式方面都做了可选项，可以根据具体工况条件灵活地设置不同的负载情况。

为解决重载起动时负载惯性大、转速响应慢的问题，针对4种变负载转矩起动的同时选择不同变频起动曲线，对应的电机转速波形如图7所示。

如图7(a)所示，斜坡型起动转矩只有与线性加速曲线配合时，才不出现反转，而且转速平滑提升至额定转速，同样地，由图7(c)和(d)可以看到，当S型起动转矩与S型加速曲线，正弦型起动转矩与正弦型加速曲线相配合时，转速响应特性、跟随性能才更好。而斜坡线性起动升速最快，跟踪性能

更好; S型启动初始阶段最平缓; 正弦启动介于二者之间, 比斜坡线性启动平缓, 比S型启动升速快。因此采用线性变频调速加斜坡负载软启动方式。

3.2 启动-储能-调速运行过程仿真

重物块启动、储能、调速过程运行特性波形如图8所示。重力储能单元接收到电网储能指令后, 启动VGES系统, 永磁同步电机拖动重物块开始变频调速启动, 电机工作在电动机模式, 同时启动机械辅助装置, 逐步增加负载。图8(a)为储能阶段重物速度波形图, 可以看到, 从0~5 s加速到工作转速, 5 s后进入匀速储能状态, 重物平滑启动, 验证了启动方法的有效性。

在22.5 s时, 电网要求增大储能功率, 控制中心向储能系统发出增速指令, 速度给定增加, 转速快速跟随并到达给定值, 2.5 s后重物速度由0.5 p.u. 升至1 p.u., 储能系统具有良好的动态和稳态特性。实际转速对于给定速度的跟随性很好, 图8(b)为定子电流波形图, 可以看出25 s后电机频率增大了一倍, 电机速度随之增加一倍。

图8(c)和(d)为储能过程负载转矩和电磁转矩波形图, 从图中可以看出电机频率变化后, 随着重物速度的变化, 空气阻力损耗、摩擦损耗等使重物块的负载转矩波动, 且随重物速度的提高愈加明

显, 同时电机输出电磁转矩能及时快速跟踪转矩变化, 保证电机转速和重物速度到达新的稳态运行。

图8(e)为直流母线电压波形图, 匀速储能阶段电压恒定, 电机转速调节时, 直流母线电压能快速回到恒定值, 验证了网侧矢量控制策略的有效性; 图8(f)为网侧有功、无功功率波形图, 电机工作在电动机模式时, 从电网吸收有功功率, 因此有功功率为负值, 且随转速的增大而增大。

发电过程是储能过程的逆过程, 不再赘述。

3.3 储能-发电运行切换过程仿真

调整电机的转速方向即可将电机在电动机/发电机两种工作状态之间切换。重物储能发电切换过程波形如图9所示。可以看出: 图9(a)中重物速度波形完全符合图2 VGES系统运行特性, 在0~5 s重物平滑启动至稳定储能状态, 17.5 s开始减速至20 s时, 储能过程结束, 进入待机状态等待调控指令。此过程重物提升时受到摩擦、阻力作用, 负载转矩略微增大, 电机工作在电动机模式, 网侧变流器工作于可控整流状态, 机侧变流器工作于逆变状态。

在27.5 s时VGES系统接收发电指令, 电机转速反向, 从电动机模式转为发电机模式, 定子电流相序发生变化, 网侧和机侧变流器的工作状态也相反, 由于电磁转矩与负载转矩平衡, 发电启动和制动转速呈线性规律变化, 发电过程结束后系统关

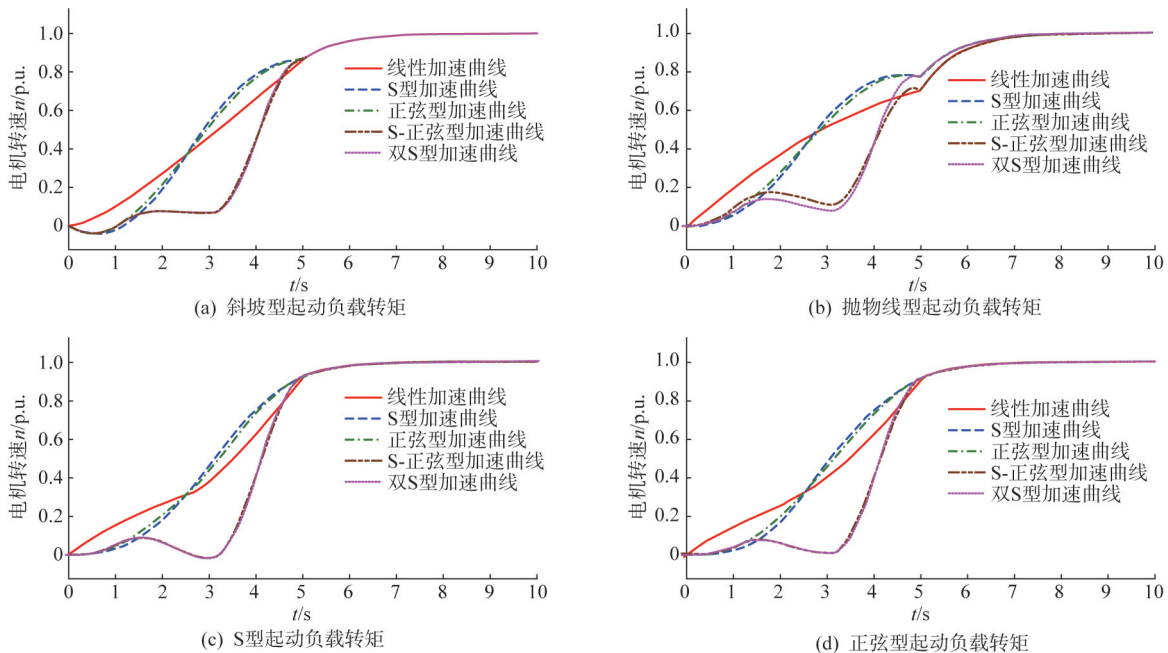


图7 不同启动负载转矩下变频软启动电机转速波形对比

Fig. 7 Wave form graph of downfrequency conversion soft starting speed under different starting load torques

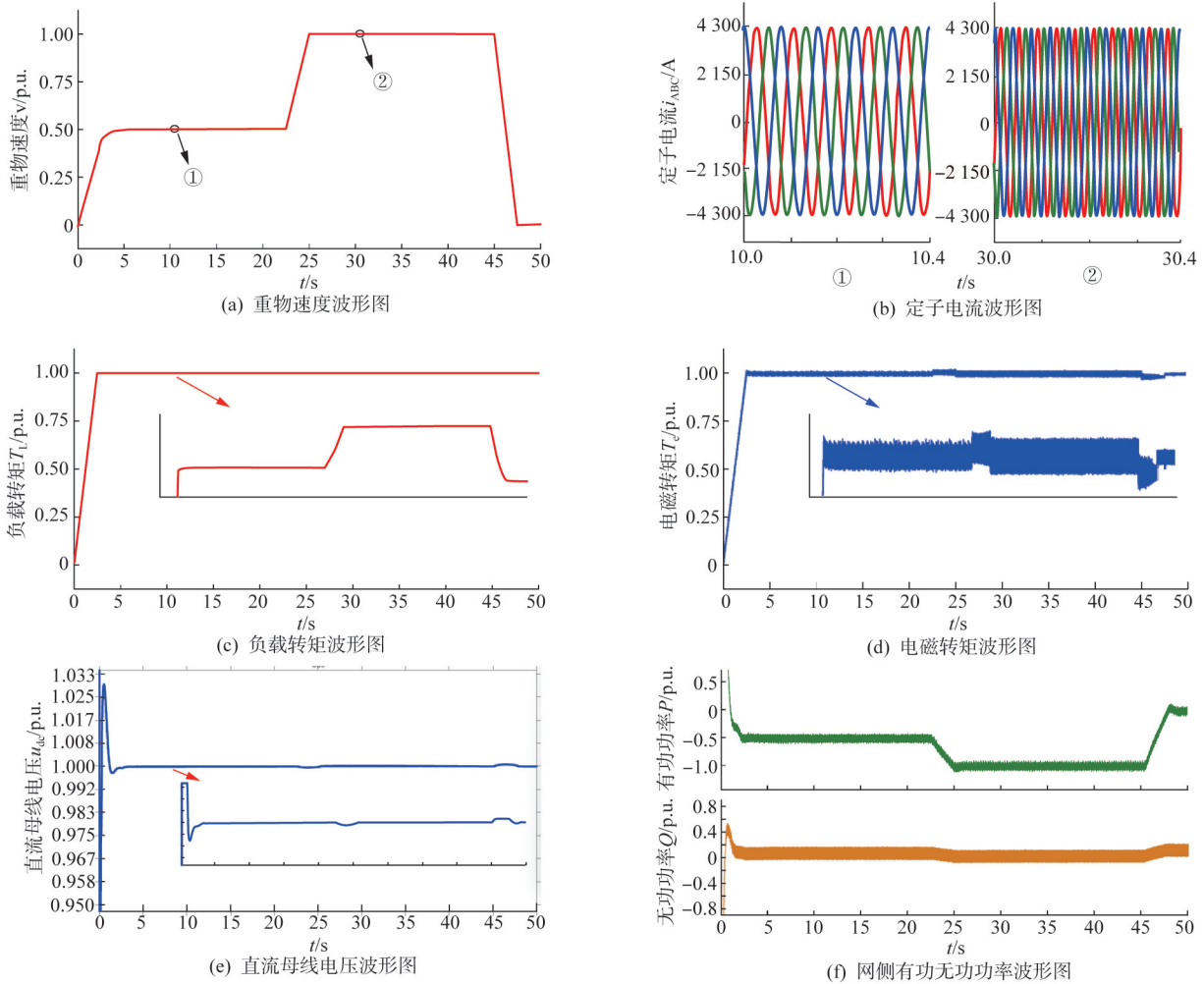


图 8 起动-储能-调速过程波形图

Fig. 8 Start-energy storage-speed regulation process waveform diagram

机。此过程重物下落时受到摩擦、阻力作用，负载转矩略微减小。

由图 9(e)可知，储能和发电切换过程，电机转速调节时直流母线电压能够快速回到恒定值。由图 9(f)知，VGES 系统储能模式时从电网吸收有功功率，有功功率为负值，发电时有功功率为正值，基本实现 VGES 系统充放电运行功能。

3.4 多机协同储能/发电过程仿真

根据 4.1 节线性变频调速加斜坡负载软起动特点，提出线性变频调速多机协同控制策略，通过精准控制多机的运行时序，实现了调功需求与机组输出功率的协调。以 3 台竖井式重力储能装置为例，在 MATLAB/Simulink 中搭建重力储能系统多机协同调功控制仿真模型，多机协同储能/发电过程 3 台电机转速和网侧有功、无功功率波形如图 10 和图

11 所示。当一台 VGES 机组储能/发电时，其余机组待机准备，通过每台机组线性制动过程与下一台线性起动过程的时序配合，实现功率互补和平滑稳定，延长系统可持续时间，因此增大了系统的储能容量；并且通过调节单台机组输出功率以及多台机组同时工作，可实现功率由 0 到电网调功需求的协调，具有更灵活和更宽的调功范围^[22]。

4 结论

本文通过详细分析 MW 级固体重力储能系统起动、运行与制动特性，选取永磁同步发电机、二极管钳位式三电平变频变流器等主要电气设备，设计了 MW 级固体重力储能系统，针对重力储能系统带重载起动困难的问题，提出了变频电辅助与变负载的机械辅助的两种软起动方式，并对比分析 4 种变

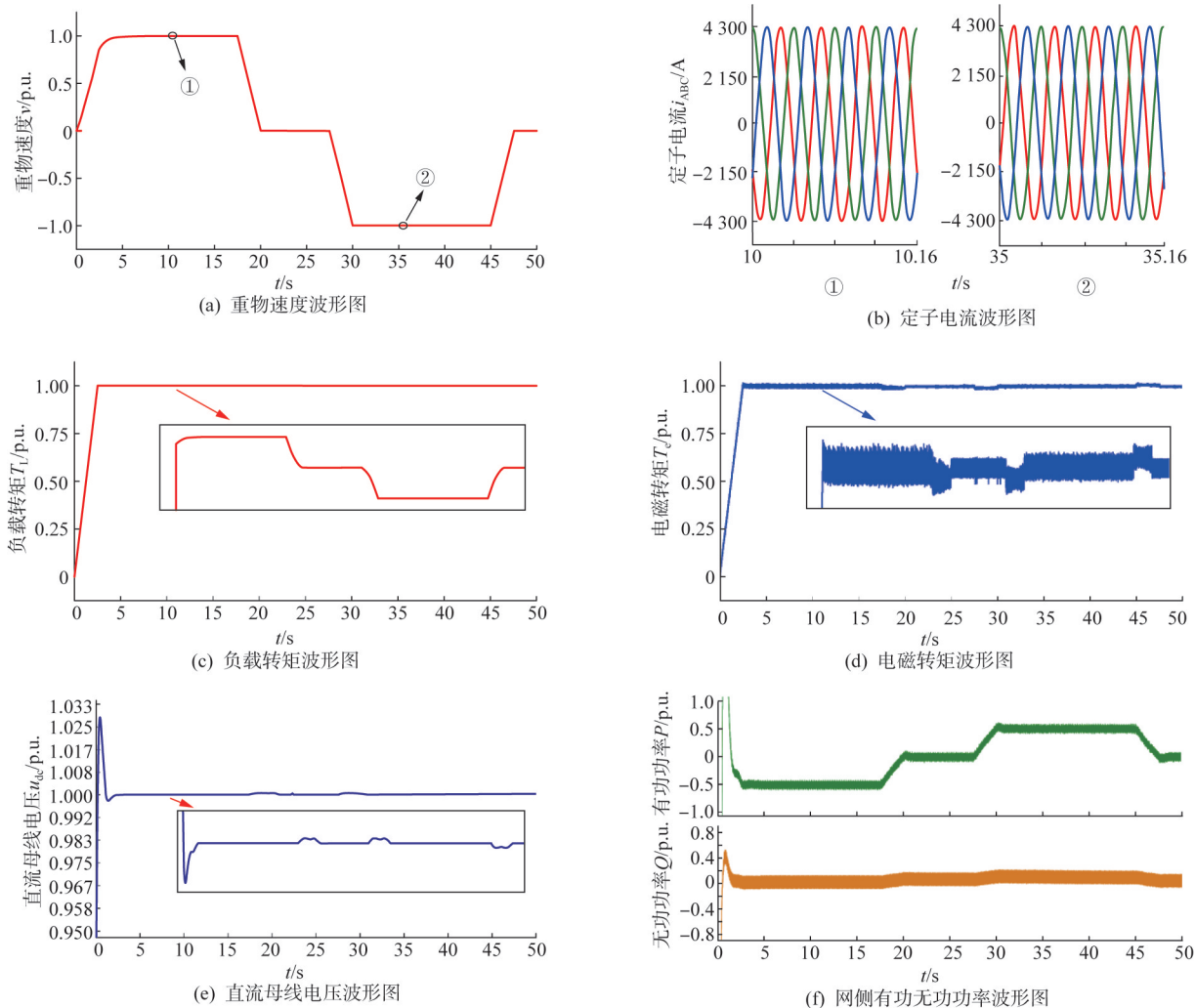


图9 起动-待机-发电过程波形图

Fig. 9 Start-standby-power generation process kymograph

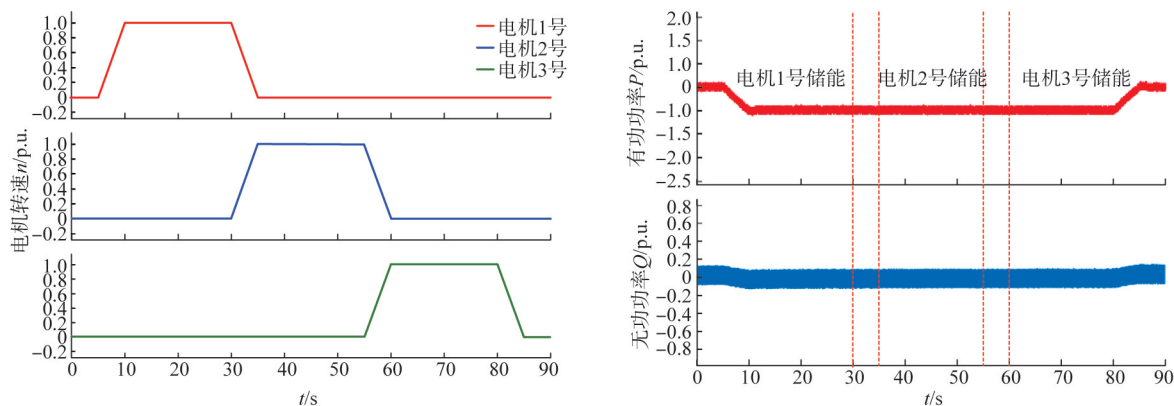


图10 多机协同储能过程3台电机转速和有功、无功功率波形

Fig. 10 Multi-machine cooperative energy storage process of three motor speed and active and reactive power waveform

负载转矩起动采用不同变频起动曲线的起动效果,为使得电机不出现反转,转速平滑提升至额定转速,提出采用线性变频调速加斜坡负载软起动方

式,最后为解决多重物切换导致功率间歇波动的问题,提出了单机矢量控制变频调速与多机线性变频起停运行协同运行策略,仿真验证了所提出系统结

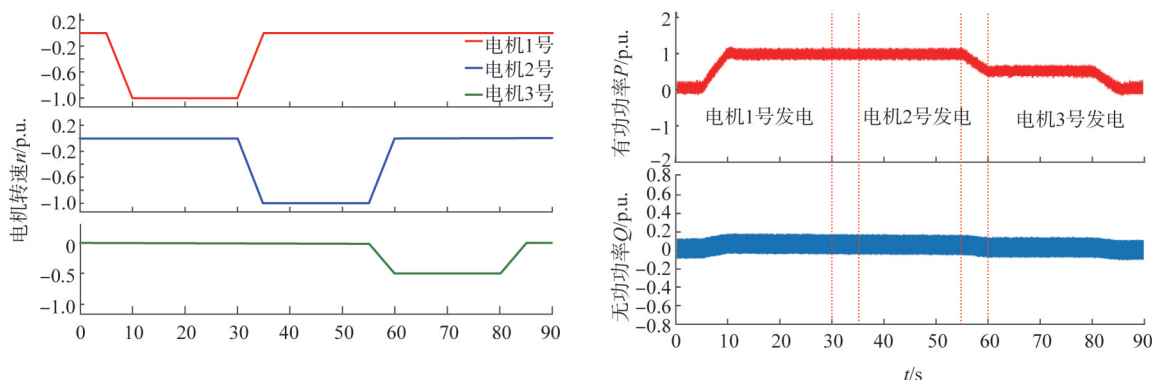


图 11 多机协同发电过程 3 台电机转速和有功、无功功率波形

Fig. 11 Speed and active power waveform of three electric motors

构、控制策略和多机协同控制方案的可行性,与单个重力储能系统相比,实现了增大储能容量、平滑输出功率以及更宽的调功范围。研究不足在于仿真模型简化了机械传动损耗,需结合实验平台验证;多机协同控制仅验证 3 台机组场景,未来需研究更大规模集群群的分布式优化策略。本文的研究结果对后续大规模重力储能系统协同运行技术落地具有重要的意义,后续将开展原型机试验与多能互补系统研究。

参考文献

- [1] 马会萌,李相俊,吴荣宇,等.兼顾新能源消纳和主动支撑电网能力提升的多类型储能容量优化配置[J].电力建设,2024,45(6):111-119.
MA Huimeng, LI Xiangjun, WU Rongyu, et al. Optimal capacity configuration method for multi-type energy storage systems enhancing new energy consumption and actively supporting the grid [J]. Electric Power Construction, 2024, 45 (6): 111 - 119.
- [2] 谭玲玲,张文龙,康志豪,等.计及惯量响应与一次调频参数优化的新能源基地构网型储能规划[J].中国电力,2025,58(7):147-161.
TAN Lingling, ZHANG Wenlong, KANG Zhihao, et al. Grid-forming storage planning for renewable energy bases considering the co-optimization of inertia response and primary frequency regulation parameters [J]. Electric Power, 2025, 58 (7): 147 - 161.
- [3] 杨一鸣,张丽玮,刘韧,等.基于改进A*算法的含新能源电网黑启动路径优化策略[J].南方电网技术,2025,19(9):162-173.
YANG Yiming, ZHANG Liwei, LIU Ren, et al. Optimization strategy for black start path of new energy power grid based on improved A* algorithm [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(9): 162 - 173.
- [4] TONG W, LU Z, CHEN W, et al. Solid gravity energy storage: A review [J]. Journal of Energy Storage, 2022 (53): 105226.
- [5] 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 Yunliang, LIU Min, FAN Jiayi, et al. Present situation, technology conceptualization and key problem for gravity energy storage [J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54 (1): 97 - 105.
- [6] TONG W, LU Z, ZHAO H, et al. The structure and control strategies of hybrid solid gravity energy storage system [J]. Journal of Energy Storage, 2023(67): 107570.
- [7] RUFER A. Design and control of a KE (Kinetic Energy) - compensated gravitational energy storage system [C]//2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe), September 07 - 11, 2020, Lyon France. New York: IEEE, 2020: 1 - 11.
- [8] CHEN Y, HOU H, XU T, et al. A new gravity energy storage operation mode to accommodate renewable energy [C]//2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), December 01 - 04, 2019, Macao, China. New York: IEEE, 2019: 1 - 5.
- [9] 薛志恒,赵杰,王伟峰,等.一种新能源发电结合电池及重力储能的系统及方法[P].陕西省:CN202110636103.7,2021-06-08.
- [10] 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 Yongming, QIU Qingquan, NIE Zipan, 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.
- [11] 张庆麟,侯澍旻,蒋丹,等.一种带飞轮的重力储能系统及其控制方法[P].江苏省:CN20231121028.7,2023-09-20.
- [12] 李震,陈巨龙,朱永清,等.基于效益分析的重力储能系统能流路径选择方法[J].南方电网技术,2025,19(8):163-171.
LI Zhen, CHEN Julong, ZHU Yongqing, et al. Energy flow path selection method for gravity energy storage system based on benefit analysis [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(8): 163 - 171.
- [13] 邱清泉,罗晓悦,林玉鑫,等.垂直式重力储能系统的研究进展和关键技术[J].储能科学与技术,2024,13(3):934-945.
QIU Qingquan, LUO Xiaoyue, LIN Yuxin, et al. Research progress and key technologies of vertical gravity energy storage system [J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13

- (3): 934 – 945.
- [14] 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 Su, XIAO Liye, TANG Wenbing, et al. Review of new gravity energy storage [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(5): 1575 – 1582.
- [15] 纪秉男. 低速大转矩永磁同步电机速度控制策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [16] 刘文军, 唐西胜, 周龙, 等. 基于背靠背双PWM变流器的飞轮储能系统并网控制方法研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 120 – 128.
LIU Wenjun, TANG Xisheng, ZHOU Long, et al. Research on grid-connected control method for FESS based on back-to-back converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 120 – 128.
- [17] 陈智刚. 双PWM变频技术研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2010.
- [18] 任康乐. 中压三电平全功率风电变流器关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [19] 喻恒凝, 姚良忠, 程帆, 等. 重力储能在新型电力系统中应用: 前景及挑战[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(18): 7177 – 7193.
YU Hengning, YAO Liangzhong, CHENG Fan, et al. Prospects and challenges of gravity energy storage applications in new type power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(18): 7177 – 7193.
- [20] 梁琼文. 永磁同步电机低速平稳控制的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [21] 杨振清, 吕钰卓, 卢贝施, 等. 一种实验室重力储能装置的设计与研制[J]. 大学物理实验, 2023, 36(5): 61 – 65.
YANG Zhenqing, LÜ Yuzhuo, LU Beini, et al. The design and fabrication of the self-made laboratory gravity energy storage device [J]. Physical Experiment of College, 2023, 36(5): 61 – 65.
- [22] TRIEBEL C, REINCKE-COLLON C, BERNINGER U, et al. Method and apparatus for operating an electrical energy storagesystem: US11025063[P]. 2021 – 06 – 01.

收稿日期: 2024-09-27; 网络首发日期: 2025-06-24

作者简介:

史沁鹏(1979), 男, 高级工程师(教授级), 硕士, 研究方向为重力储能应用;

曾小超(1970), 男, 高级工程师(教授级), 学士, 研究方向为重力储能技术研究与应用;

李建文(1983), 女, 通信作者, 副教授, 博士, 研究方向为重力储能技术及应用, ljw_ncepu@163.com。

(上接第66页 Continued from Page 66)

- [19] 何云, 申敏, 王蕊, 等. 无蜂窝毫米波大规模MIMO系统基于深度强化学习的节能睡眠策略[J]. 电子学报, 2023, 51(10): 2831 – 2843.
HE Yun, SHEN Min, WANG Rui, et al. Energy-efficient sleep-mode based on deep reinforcement learning for cell-free mmWave massive MIMO systems [J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(10): 2831 – 2843.
- [20] PEI Z, CHEN W, DU L. MAC Contention protocol based on reinforcement learning for IoV communication environments [C]//2021 IEEE 6th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS), April 23 – 26, 2021, Chengdu, China. New York: IEEE, 2021: 546 – 552.
- [21] YU Y, LIEW S C, WANG T. Non-uniform time-step deep q-network for carrier-sense multiple access in heterogeneous wireless network [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021, 20(9): 2848 – 2861.
- [22] YE X, YU Y, FU L. Deep reinforcement learning based MAC protocol for underwater acoustic networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2022, 21(5): 1625 – 1638.
- [23] 贺文晨, 郭少勇, 邱雪松, 等. 基于DRL的联邦学习节点选择方法[J]. 通信学报, 2021, 42(6): 62 – 71.
HE Wenchen, GUO Shaoyong, QIU Xuesong, et al. Node selection method in federated learning based on deep reinforcement learning [J]. Journal on Communications, 2021, 42(6): 62 – 71.
- [24] VLACHOU C, BANCHS A, SALVADOR P, et al. Analysis and enhancement of CSMA/CA with deferral in power-line communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(7): 1978 – 1991.
- [25] CHEN Z, ZHI L, CHEN P, et al. An MAC layer algorithm based on power line-wireless dual media channels and multiplexing [J]. China Communications, 2022, 19(10): 78 – 91.
- [26] 刘颖, 杨鹏飞, 张立军, 等. 前馈神经网络和循环神经网络的鲁棒性验证综述[J]. 软件学报, 2023, 34(7): 3134 – 3166.
LIU Yin, YANG Pengfei, ZHANG Lijun, et al. Survey on robustness verification of feedforward neural networks and recurrent neural networks [J]. Journal of Software, 2023, 34(7): 3134 – 3166.

收稿日期: 2024-09-11; 网络首发日期: 2025-02-12

作者简介:

冯俊豪(1994), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统通信技术、电力物联网, fengjh@csg.cn;

詹学滋(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力线通信和无线通信, 15659630390@163.com;

陈智雄(1983), 男, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 博士, 研究方向为电力物联网、电力线通信, zxchen@ncepu.edu.cn。