

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.256113

重力储能并网系统的建模仿真技术研究

乔健¹, 陈林旭¹, 李建文¹, 尹昕², 王义凯¹, 尹项根³

(1. 新能源电力系统全国重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003; 2. 武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070; 3. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对重力储能并网系统物理机理不清晰、建模仿真技术不成熟等问题, 提出了一种包含重力储能机械部分、永磁同步电机及并网变流器的建模仿真方法。首先, 基于重力势能与电能的转换原理, 构建重力储能的能量流动模型、运动学及功率模型, 量化充电与放电状态下的能量损耗与功率动态特性。然后, 建立永磁同步电机在 dq 坐标系下的数学模型, 针对机侧变流器设计零 d 轴电流控制方案, 针对网侧变流器设计电网电压定向矢量控制方案, 实现电机转矩和并网功率的精准调控。最后, 利用 MATLAB/Simulink 平台搭建重力储能并网系统仿真模型。仿真结果表明重力储能系统输出功率能够准确跟踪电网需求功率的变化, 并网电压电流波形正弦度高, 电机转速和转矩响应快速, 验证了所提重力储能并网系统建模仿真技术的有效性。

关键词: 重力储能; 永磁同步电机; 并网变流器; 动态建模

Research on modeling and simulation techniques for grid-connected gravity energy storage systems

QIAO Jian¹, CHEN Linxu¹, LI Jianwen¹, YIN Xin², WANG Yikai¹, YIN Xianggen³

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Resources (North China Electric Power University), Baoding 071003, China; 2. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at the problems of unclear physical mechanism and immature modeling and simulation techniques for grid-connected gravity energy storage systems, a comprehensive modeling and simulation method incorporating the mechanical subsystem of gravity energy storage, a permanent magnet synchronous motor (PMSM), and a grid-connected converter is proposed. First, based on the energy conversion principles of gravitational potential energy and electric energy, the energy flow, kinematics and power models of gravity energy storage are established to quantify energy losses and dynamic power characteristics under charging and discharging conditions. Then, the mathematical model of the PMSM in the $d-q$ reference frame is developed. A zero d -axis current control scheme is designed for the machine-side converter, while the grid voltage-oriented vector control scheme is designed for the grid-side converter, to realize precise control of motor torque and grid-connected power. Finally, a simulation model of the grid-connected gravity energy storage system is built on the MATLAB/Simulink platform. Simulation results show that the output power of the gravity energy storage system can accurately track variations in required grid power, with highly sinusoidal voltage and current waveforms, fast responses of motor speed and torque, thereby verifying the effectiveness of the proposed modeling and simulation techniques for grid-connected gravity energy storage systems.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52507099).

Key words: gravity energy storage; permanent magnet synchronous motor; grid-connected converter; dynamic modeling

0 引言

随着全球能源转型的加速推进, 储能技术在电

力系统中的重要性日益凸显^[1-4]。重力储能作为一种新兴的物理储能方式, 凭借其原理简单、储能容量大、使用寿命长等优势, 在近年来得以快速发展^[5]。重力储能不仅能够有效平抑可再生能源发电的功率波动, 提升电力供应可靠性, 还可以在增强电力系统稳定性方面发挥关键作用^[6]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52507099); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2025MS105, 2024JY002)

近年来，有少量学者针对重力储能技术开展了初步研究，主要集中在储能装置的优化设计和能量转换效率提升方面^[7]。例如，文献[8]针对以风电光伏为主体的新型电力系统存在随机性、波动性和间歇性，对电网安全稳定运行带来挑战的问题，提出了以永磁同步电机、三电平变频变流器为核心设备的兆瓦级重力储能系统设计方法。文献[9]对垂直式重力储能系统的机械环节和电气环节进行能效分析，并搭建垂直式重力储能样机，验证了该模型的准确性。文献[10]聚焦于铁轨重力储能系统的充放电效率影响因素展开研究，分析储能与释能过程中各部件能量损耗，探究关键因素对系统效率的影响规律，还确定了设计工况下系统的运行性能，为铁轨重力储能系统的工程应用提供理论指导。此外，文献[11]针对含齿轮变速与链式传动机构的斜坡重力储能系统，建立了能效分析模型，推导了各环节损耗表达式，并通过实验进行了验证。

目前，大容量重力储能工程尚处于起步阶段，国内外已有一些代表性工程开始探索这一技术的应用。例如，中国如东的 100 MWh 重力储能示范项目，作为全球首个大规模重力储能工程，旨在验证重力储能在电网调峰、调频和可再生能源消纳等方面的潜力^[12]。此外，瑞士的 Energy Vault 公司也开发了基于混凝土块的重力储能系统，通过提升和下降重物来实现能量的存储与释放^[13]。这些工程将为重力储能技术的商业化应用提供宝贵的实践经验。然而，重力储能技术在机理分析、保护控制、运行调度等多个方面仍面临诸多挑战。首先，在机理分析方面，重力储能系统的能量转换效率、机械损耗、材料疲劳等问题有待深入研究，以确保系统的长期稳定运行^[14]。其次，在保护与控制方面，如何设计可靠的保护与控制策略，在电网波动、负载变化等复杂工况下保障储能装备安全稳定运行，是亟待解决的关键问题^[15]。最后，重力储能系统在电网中的运行与调度策略也应关注，以实现与新能源发电的协同运行，提升电网的整体稳定性和经济性^[16]。

需要强调的是，建模仿真技术是开展上述理论研究的基础和前提。通过建立精确的数学模型和仿真平台，可以模拟重力储能系统在不同工况下的动态响应，评估其性能指标，优化系统设计。此外，建模仿真技术不仅能够为机理分析奠定基础，还能够为保护与控制策略的研发、运行调度优化方案的制定提供支撑。所以，需要研究重力储能并网系统的高精度建模与仿真技术。

为此，本文围绕重力储能并网系统的建模仿真技术开展研究。首先，构建系统能量流动模型、运

动力学和功率模型以及永磁同步电机数学模型。在此基础上，研究变流器的机侧和网侧控制策略，机侧采用零 d 轴电流控制策略，可降低电机的铜耗，提高电机效率，精确调节电机转矩；网侧采用电网电压定向矢量控制策略，可实现有功功率和无功功率的解耦控制，保证重力储能并网功率的稳定传输。最后，利用 MATLAB/Simulink 建立重力储能并网系统仿真平台，验证了所提建模仿真技术的有效性。本文研究有助于深入理解重力储能系统的动态特性，可为后续保护与控制方法研究提供支撑。

1 系统建模

重力储能并网一次系统主要由重力储能机械部分、永磁同步电机、背靠背式变流器、变压器等组成^[17]。本文主要针对垂直式重力储能系统进行研究，其具体并网方案如图 1 所示。

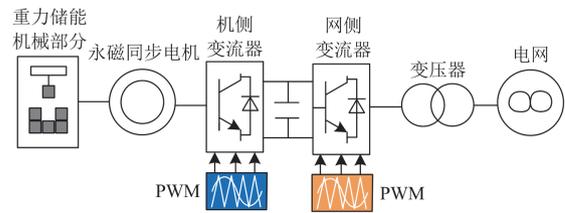


图 1 重力储能并网方案

Fig. 1 Gravity energy storage grid-connected scheme

1.1 重力储能系统建模

1.1.1 重力储能运行原理

重力储能发电的基本原理与抽水蓄能类似，如图 2 所示，其本质是重力势能与电能的相互转换。

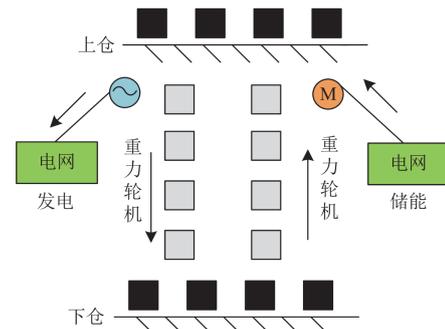


图 2 重力储能运行原理图

Fig. 2 Principle diagram of gravity energy storage operation

在电价处于低谷或者电网电能供应较为充裕时，系统启动储能流程。此时，电网输出电能，为牵引电机提供动力。牵引电机凭借电力驱动，借助配套的机械装置，将位于下仓的大质量重物逐步提升至上仓，并有序堆叠存放。在这一过程中，电能持续转化为重物的重力势能，实现能量的储存。而

当电价攀升至高位, 或者电网面临电能短缺的状况时, 系统则进入发电模式。上仓的重物在机械结构的控制下, 开始向下仓降落。重物降落过程中产生的机械能, 驱动与之相连的发电机运转, 进而将机械能转化为电能, 最终所产生的电能被输送回电网, 完成整个重力储能系统的发电与供电过程。

在加载或卸载重物块方面, 以江苏如东重力储能工程为例, 其结构为一座配有重物垂直运动空间的高楼, 通过升降装置、电机及曳引装置将重物块提升或下放, 如图3所示。该项目采用“就近卸载+协同控制”的智能化卸载方案。通过实时监测电网需求变化, 优先选择距离当前运行位置最近的层数进行卸载操作, 此方法既能减少重物块移动的时间损耗, 也能大幅提升功率调节响应速度。而且, 引入了多电机协同控制算法, 通过主从式控制架构实现多个驱动单元的运行配合, 确保卸载过程中的功率平滑过渡, 避免了功率突变对电网的冲击。

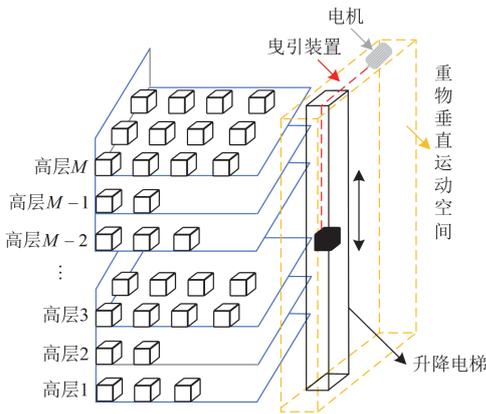


图3 江苏如东重力储能项目结构图

Fig. 3 Structure diagram of Jiangsu Rudong gravity energy storage project

1.1.2 重力储能能量流动及效率模型

重力储能系统的重力势能、动能、电能的能量流动情况如图4所示^[18]。

重力储能系统的能量转换过程可描述为

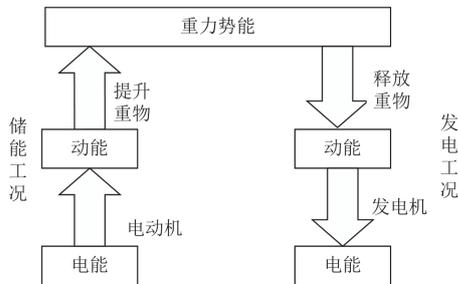


图4 重力储能能量转换图

Fig. 4 Gravity energy storage energy conversion diagram

$$E_p = mgh \quad (1)$$

式中: E_p 为重力势能; m 为重物的质量; g 为重力加速度(通常取 9.81 m/s^2); h 为重物的提升高度。

在储能工况, 电网富余电能驱动电机提升重物, 输入电能 E_i 需克服由系统效率 η_c 带来的损耗(含电机损耗、机械摩擦等)。

$$E_i = \frac{mgh}{\eta_c} \quad (2)$$

在发电工况, 重物下落释放势能, 发电效率 η_d (含变流器损耗、机械损耗等)同样会限制实际可输出的电能 E_o 。

$$E_o = \eta_d \cdot mgh \quad (3)$$

1.1.3 重力储能运动学及功率模型

1) 储能工况

在储能过程中, 电机需提供足够的牵引力 F_m 以克服重力、摩擦力、空气阻力, 运动方程为

$$F_u = m \frac{dv_u}{dt} = F_m - mg - F_f - F_{air} \quad (4)$$

式中: F_u 为储能工程中重物块所受合力; v_u 为重物块上升运行速度; F_f 为运行过程中所受摩擦力; F_{air} 为空气阻力。

此运动方程中, 重物块所受合力既决定其加速、匀速、减速各运行阶段的加速度特性, 同时也表征其运行过程中的受力状态, 如式(5)所示。

$$F_u = \begin{cases} > 0, \text{加速阶段} \\ = 0, \text{匀速阶段} \\ < 0, \text{减速阶段} \end{cases} \quad (5)$$

而要改变重物块所受合力只需通过控制电机转矩即可直接影响重物所受牵引力, 以控制重物块的加速、匀速与减速, 这样可实现重物块的短暂中途停止。进而避免重物块抵达目标高度时, 因残余速度(动能)导致无法安全转移与存储的问题。

根据功率与力的关系, 可以写出其动能功率为

$$P_k = F_u v_u = m v_u a_u = m v_u \left(\frac{F_m - F_f - F_{air}}{m} - g \right) \quad (6)$$

式中: P_k 为储能过程中重物块的动能功率; a_u 为重物块沿上升方向的加速度。

在储能过程中, 功率流动机理为从电网吸收电磁功率, 用于提升重物, 最终功率转化为重物块的势能功率、动能功率与整个过程中的损耗功率 P_{loss} , 可由式(7)表示。

$$P_{eu} = mgv_u + m v_u a_u + P_{loss} \quad (7)$$

式中: P_{eu} 为储能过程中从电网吸收的电磁功率; mgv_u 为重物块的势能功率; $m v_u a_u$ 为重物块的动能功率。

2) 发电工况

在发电过程中,重物块主导运动,电机转为发电机模式,根据以上思路进行分析,可以得到其运动方程为

$$F_d = m \frac{dv_d}{dt} = mg - F_g - F_f - F_{air} \quad (8)$$

式中: F_d 为发电过程中重物块所受合力; v_d 为重物块下降运行速度; F_g 为发电过程中电机牵引力。

动能功率 P_k 为

$$P_k = F_d \cdot v_d = mv_d a_d = mv_d \left(g - \frac{F_g + F_f + F_{air}}{m} \right) \quad (9)$$

式中: a_d 为重物块沿下降方向的加速度。

功率平衡方程为

$$mv_d a_d + mgv_d = P_{ed} + P_{loss} \quad (10)$$

式中: P_{ed} 为发电过程中输送到电网的电磁功率。

其中,空气阻力主要与重物块形状、运行速度有关,其表达式为

$$F_{air} = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 \quad (11)$$

式中: ρ_0 为空气密度; C_d 为阻力系数; A 、 v 分别为重物块上升或下降的迎风面积和速度。

损耗功率 P_{loss} 包括电机损耗、变流器损耗、齿轮箱及曳引装置损耗和重力储能本身的损耗等。其中,电机损耗与电机转速和电流相关,包括铜损、铁损、机械损耗和杂散损耗 4 种类型;变流器损耗与功率和电压有关,主要取决于开关元件的开关及关断损耗;齿轮箱及曳引装置在工作过程中,因部件间的相对运动可能引发材料碰撞与弹性变形,由此产生弹性损耗和摩擦损耗;重力储能本身的损耗包括摩擦损耗和风电损耗等,在 t 时段内其表达式如式(12)所示,可用瞬时损耗功率在 t 时段内的积分来表示^[19]。

$$E_G = \int_0^t F_f \cdot v dt + \int_0^t \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot C_d \cdot A \cdot v^3 dt \quad (12)$$

式中: E_G 为重力储能本身损耗。

1.2 永磁同步电机建模

永磁同步电机具有高效节能、低速大扭矩、控制电路简单等优点。在理想情况下,根据永磁同步电机的工作原理,可以写出其数学模型。

电压平衡方程为

$$\begin{cases} u_A = R_s i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \\ u_B = R_s i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \\ u_C = R_s i_C + \frac{d\psi_C}{dt} \end{cases} \quad (13)$$

式中: u_A 、 u_B 、 u_C 为三相定子绕组的相电压; R_s 为定子绕组的单相电阻; i_A 、 i_B 、 i_C 为通过三相定子绕组的相电流; ψ_A 、 ψ_B 、 ψ_C 为三相定子绕组的磁链。

磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_A = L_{AA} i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + \psi_{fA} \\ \psi_B = M_{BA} i_A + L_{BB} i_B + M_{BC} i_C + \psi_{fB} \\ \psi_C = M_{CA} i_A + M_{CB} i_B + L_{CC} i_C + \psi_{fC} \end{cases} \quad (14)$$

式中: L_{AA} 、 L_{BB} 、 L_{CC} 为三相定子绕组的自感; M_{AB} 、 M_{AC} 、 M_{BA} 、 M_{BC} 、 M_{CA} 、 M_{CB} 为三相定子绕组相与相之间的互感; ψ_{fA} 、 ψ_{fB} 、 ψ_{fC} 为转子永磁体在三相定子绕组产生的磁链。

式(13)和式(14)存在多个变量,且互相之间耦合严重。因此,对其进行 Clark 变换和 Park 变换进行解耦,可得永磁同步电机 d - q 坐标系下的数学模型。

dq 坐标系下的电压平衡方程^[20]如式(15)所示。

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_f \end{cases} \quad (15)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为定子三相绕组在两相旋转坐标下的直轴电压、交轴电压; i_d 、 i_q 分别为定子三相绕组电流在两相旋转坐标系下的直轴分量、交轴分量; L_d 、 L_q 分别为定子三相绕组在两相旋转坐标下的直轴电感、交轴电感; ψ_d 、 ψ_q 分别为转子永磁体在两相旋转坐标系下的直轴磁链、交轴磁链; ω_r 为发电机定子的电角速度; ψ_f 为转子永磁体磁链。

d - q 坐标系下的磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (16)$$

电机的电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} P_n i_q [\psi_f + (L_d - L_q) i_d] \quad (17)$$

机械运动方程为

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - T_m - B_m \omega_r \quad (18)$$

式中: T_e 为永磁同步电机的机械转矩; P_n 为电机极对数; J 为机组的转动惯量; T_m 为输入的机械转矩; B_m 为粘滞摩擦系数。

2 变流器控制系统

2.1 机侧变流器控制

机侧变流器的控制目标是实现永磁同步电机的

高效运行, 由式(17)可知, 电机的电磁转矩直接与定子 d 、 q 轴电流分量有关, 基于零 d 轴电流控制策略, 可以有效降低电机的铜损, 提高系统效率^[21]。令 $i_d = 0$, 则电机的电磁转矩方程变为

$$T_e = \frac{3}{2} P_n i_q \psi_f \quad (19)$$

通过调节 q 轴电流来控制电机的电磁转矩, 从而实现重力块的提升和下落, 控制框图如图 5 所示。PWM 调制方式采用空间矢量脉宽调制(space vector

pulse width modulation, SVPWM)方法, 其具有高效控制、快速响应、低谐波损耗、高动态性能等优点。通过功率外环和电流内环的双闭环控制, 功率外环的主要作用是根据系统的功率需求 P_{m_ref} 调整实际功率 P_m , 从而达到调节电机转速或转矩的目标, 其输出结果即为电流内环的 q 轴参考电流 i_{q_ref} , d 轴参考电流 i_{d_ref} 设为 0。电流调节器使电机的电流快速跟随参考电流变化, 从而实现对电机转矩的精确控制。

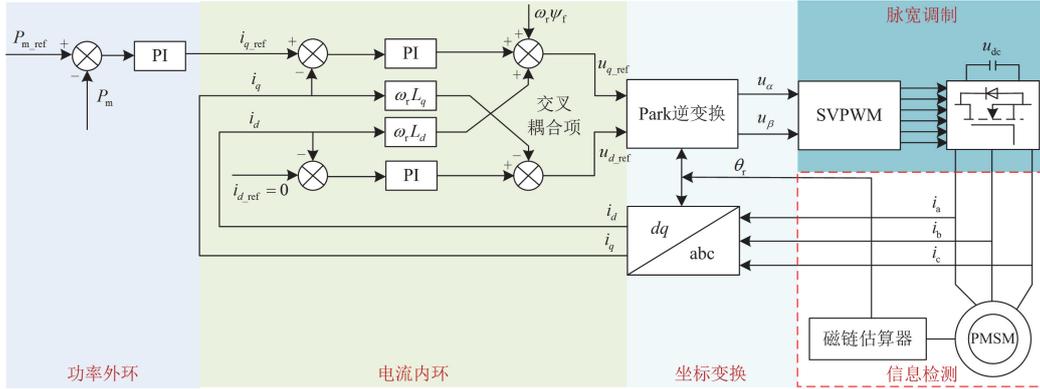


图 5 机侧变流器控制框图

Fig. 5 Block diagram of machine side converter control

2.2 网侧变流器控制

网侧变流器是重力储能系统通过背靠背式变流器实现并网的重要组成部分, 其主要作用是维持直流侧并网电压稳定和控制并网功率。

经过公式推导及坐标变换, 可以得到网侧变流器在 dq 坐标系下的电压状态方程为

$$\begin{cases} u_{gd} = R_g i_{gd} + L_g \frac{di_{gd}}{dt} - \omega_g L_g i_{gq} + e_d \\ u_{gq} = R_g i_{gq} + L_g \frac{di_{gq}}{dt} - \omega_g L_g i_{gd} + e_q \end{cases} \quad (20)$$

式中: u_{gd} 、 u_{gq} 分别为网侧变流器输出电压的 d 、 q 轴分量; R_g 为并网线路单相电阻; i_{gd} 、 i_{gq} 分别为网侧变流器输出电流的 d 、 q 轴分量; L_g 为并网线路单相电感; ω_g 为电网电压角频率; e_d 、 e_q 分别为电网电压的 d 、 q 轴分量。

根据瞬时功率理论, 电网的瞬时有功功率 P 和无功功率 Q 分别为^[22-23]

$$\begin{cases} P = e_d i_{gd} + e_q i_{gq} \\ Q = -e_d i_{gq} + e_q i_{gd} \end{cases} \quad (21)$$

本文采用基于电网电压定向的矢量控制策略, 在该策略下, 将电网电压矢量定向在 d 轴上, 使

$e_q = 0$, 从而简化控制过程, 则式(21)改写为

$$\begin{cases} P = e_d i_{gd} \\ Q = -e_d i_{gq} \end{cases} \quad (22)$$

由式(22)可知, 分别控制电流分量即可控制网侧变流器的有功功率和无功功率。而系统并网通常运行在单位功率因数状态, 因此可通过设定并网无功功率参考值 $Q_{ref} = 0$ 来实现对系统无功功率的解耦控制。

网侧变流器的控制框图如图 6 所示。采用电压/功率外环和电流内环的控制方法, 直流侧电压外环根据给定电压 u_{dc_ref} 调整实际电压 u_{dc} , 其输出作为网侧变流器 d 轴参考电流 i_{gd_ref} , 用于维持直流侧电压稳定; q 轴参考电流 i_{gq_ref} 根据电网功率因数要求进行设定, 通常为 0, 以实现单位功率因数运行。电流调节器根据实际电流与参考电流的偏差生成控制信号, 控制网侧变流器的开关动作, 实现与电网的稳定并网和功率调节。

3 仿真结果

为验证重力储能并网系统模型和控制策略的有效性, 在 MATLAB/Simulink 环境下搭建仿真模型, 仿真参数见表 1。

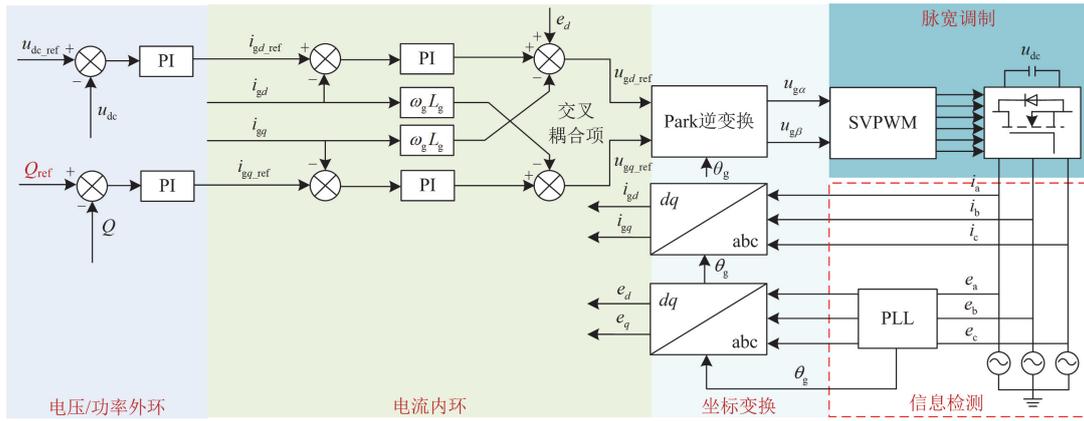


图 6 网侧变流器的控制框图

Fig. 6 Block diagram of grid-side converter control

表 1 重力储能并网仿真参数

Table 1 Simulation parameters of gravity energy storage grid connection

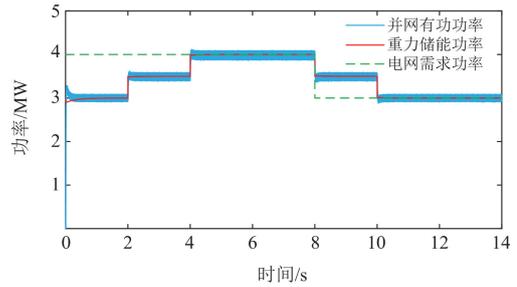
模块	参数	数值
永磁同步电机	定子相电阻/ Ω	0.08
	磁链/Wb	18.093
	d, q 轴电感/mH	5.6
	转动惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	371
	极对数	10
变流器	直流侧电压/V	8000
	网侧频率/Hz	50
储能块	一枚重物块质量/t	3
	额定输出功率/MW	0.5

本文分别对发电工况和储能工况进行了仿真分析，仿真总时长为 14 s，每一枚重物块输出额定功率为 0.5 MW，视为最小独立可控单元，即每间隔 2 s 投切一枚重物块。在发电工况，初始条件为 6 枚重物块，并网功率期望值在 8 s 由 4 MW 变为 3 MW；在储能工况，初始条件为 6 枚重物块，并网功率期望值在 8 s 由 -4 MW 变为 -3 MW。

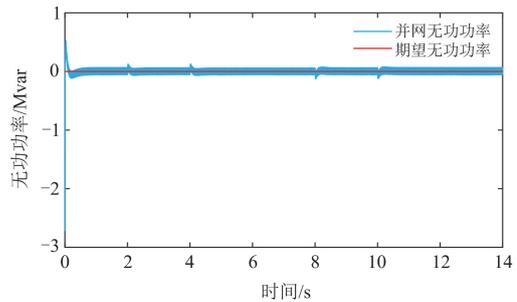
电网需求变化下的并网有功和无功功率波形如图 7 所示。从图 7(a)、图 7(b)可知，在整个并网过程中，无论是发电工况还是储能工况，并网有功功率和重力储能功率波形的变化趋势保持一致，并且在数值上能够准确匹配。此外，在电网需求功率变化的条件下，重力储能系统通过投切重物块产生阶梯性变化的功率，以达到电网所需功率。这一现象表明在不同工况及电网所需功率变化条件下，系统都能够稳定地实现重力势能与电能之间的转换，确保功率传输的一致性，达到并网需求。

由图 7(c)、图 7(d)可知，并网无功功率在不同工况下始终维持在 0 var。即便在投入重物块或减少

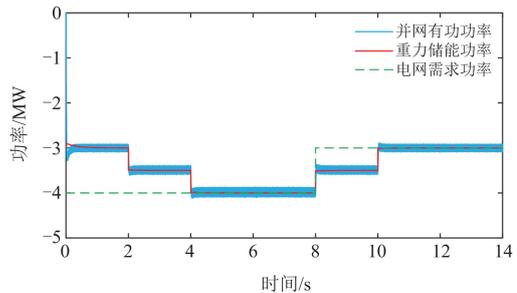
重物块的动态操作之后，无功功率依然能够快速恢复至 0 var。该表现验证了零无功功率控制策略在仿真运行中的有效性，确保系统在各种工况下都能以最优的功率因数运行。



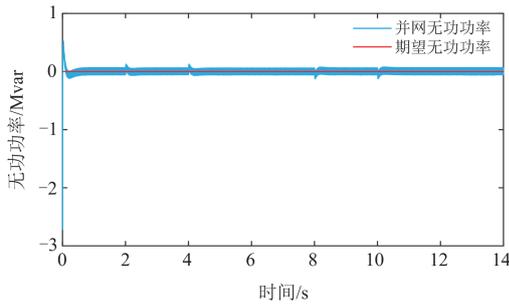
(a) 发电工况有功功率



(b) 发电工况无功功率



(c) 储能工况有功功率

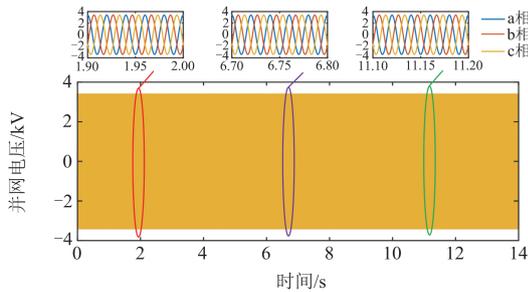


(d) 储能工况无功功率

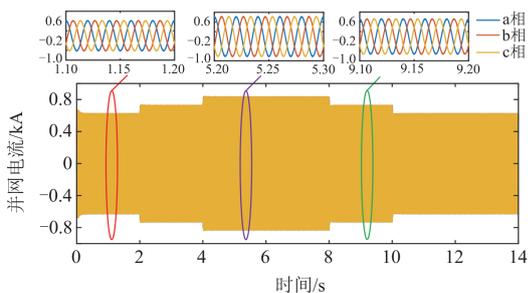
图 7 电网需求变化下的并网有功、无功功率波形

Fig. 7 Grid-connected active and reactive power waveforms under changing grid demand

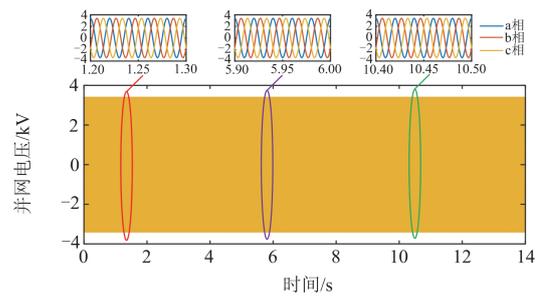
经验证, 两种工况下的并网电压电流波形如图 8 所示, 可知并网电压波形与电流波形均表现为典型的正弦波。就三相电压而言, 其幅值基本处于同一水平线上, 而且相位彼此之间依次相差 120° , 符合三相对称性特征。进一步对其展开谐波分析, 能够得出并网三相电压和电流的谐波含量处于较低水平。在发电工况下, 三相电压始终稳固地维持在稳定状态, 电压波形的 THD 值仅为 0.1%。当投切重物块后, 系统状态发生变化, 三相电流随之迅速增大或减小, 此时测得的电流波形的 THD 值为 1.06%。在储能工况下, 三相电压同样保持着稳定不变的状态, 电压波形的 THD 值同样为 0.1%。在投切重物块之后, 三相电流相应地做出变化, 此时电流波形的 THD 值为 1.28%。可见, 并网电压电流波形正弦度高且谐波含量低。



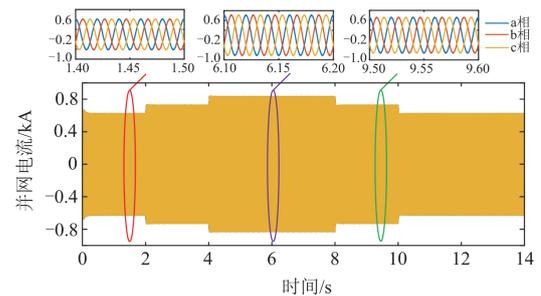
(a) 发电工况并网电压



(b) 发电工况并网电流



(c) 储能工况并网电压

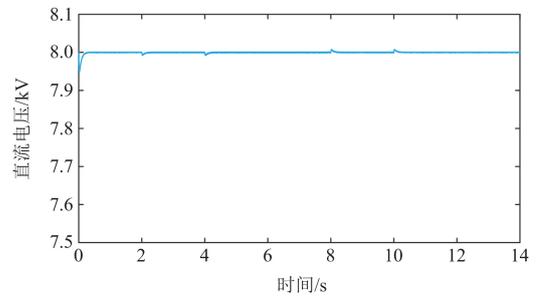


(d) 储能工况并网电流

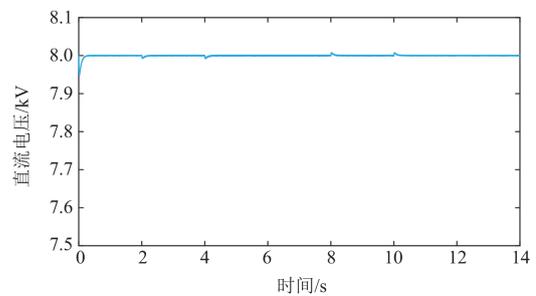
图 8 并网电压、电流波形

Fig. 8 Grid-connected voltage and current waveform

两种工况下的直流侧电压波形如图 9 所示。可见系统在稳态运行和动态切换过程中均表现出较好的电压控制特性。直流侧电压始终稳定维持在设定值 8 kV 附近, 当系统因投切重物块而产生功率波



(a) 发电工况



(b) 储能工况

图 9 直流侧电压波形图

Fig. 9 DC side voltage waveform

动时,控制回路能够迅速响应并有效维持电压稳定。这一结果证明了所设计的网侧变流器直流电压外环控制策略具有良好的动态性能,能够在各种工况下维持直流侧电压的稳定。

电磁转矩和负载转矩波形如图 10 所示。重力储能系统的功率输出特性由重物块数量的整数倍投切决定,这种基于物理结构的储能方式因此具有显著的高散性特征。此外,该系统的负载转矩变化也呈现出阶梯特性。在负载转矩的驱动下,电机开始工作,电磁转矩紧密跟随负载转矩的变化而变化。在电机控制策略的作用下,电磁转矩虽然会出现小幅波动,但总体来说较为平稳,并且与负载转矩基本保持平衡。这一现象表明电机控制策略能够准确地匹配负载特性,能够在不同负载条件下稳定运行,实现高效的能量转换。

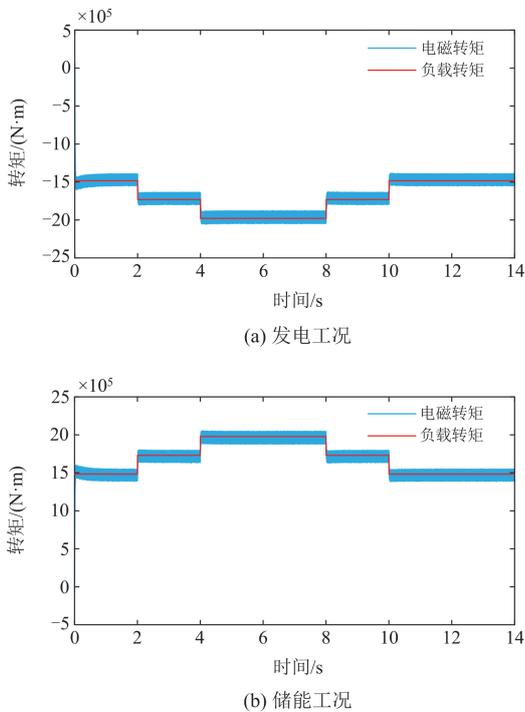


图 10 电磁转矩和负载转矩波形图

Fig. 10 Electromagnetic torque and load torque waveform

4 结论

本文围绕重力储能并网系统开展了建模与仿真技术研究。构建了包含重力储能机械部分、永磁同步电机等关键部分的精确系统模型,并针对该系统设计了相应的变流器机侧和网侧控制策略。通过 MATLAB/Simulink 仿真平台进行模型搭建,仿真结果表明,重力储能系统能够实现输出功率与并网功率的精准匹配,且在不同工况下均展现出良好的控制性能,具有阶梯性响应并网需求变化的特性。并

网电压、电流波形质量较高,谐波污染小,可有效保障电网的电能质量。直流侧电压稳定可靠,在各种工况变化下能够快速响应且波动极小。电磁转矩能够紧随负载转矩变化而变化,保障储能系统的稳定运行。此外,本文所提重力储能并网系统建模仿真技术,可为后续重力储能电站保护与控制技术研究奠定基础。

参考文献

- [1] 翟常营, 顾秋斌, 马红星, 等. 新型电力系统下核电机组涉网运行风险评估综述[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(12): 173-187.
ZHAI Changying, GU Qiubin, MA Hongxing, et al. Review of grid-connected operation risk assessment for nuclear power units in the context of new power systems[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(12): 173-187.
- [2] 贺悝, 郭罗权, 谭庄熙, 等. 高比例新能源电网中储能调频死区优化设定控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(18): 65-75.
HE Li, GUO Luoquan, TAN Zhuangxi, et al. Improved dead zone setting of a frequency regulation strategy for energy storage with high penetration of RESs[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 65-75.
- [3] LIU D, YANG Q, CHEN Y, et al. Optimal parameters and placement of hybrid energy storage systems for frequency stability improvement[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2025, 10(2): 40-53.
- [4] 冯弋舟, 吴志, 李新煜, 等. 光-蓄-储混合储能系统灵活性提升与容量规划[J]. 电力工程技术, 2024, 43(5): 27-36.
FENG Yizhou, WU Zhi, LI Xinyu, et al. Capacity optimization and flexibility enhancement of photovoltaic-battery-pumped hybrid storage system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(5): 27-36.
- [5] 刘荣峰, 张敏, 储毅, 等. 新型储能技术路线分析及展望[J]. 新能源科技, 2023, 4(3): 44-51.
LIU Rongfeng, ZHANG Min, CHU Yi, et al. Analysis and prospect of new energy storage technology routes[J]. New Energy Science and Technology, 2023, 4(3): 44-51.
- [6] 童家麟, 洪庆, 吕洪坤, 等. 电源侧储能技术发展现状及应用前景综述[J]. 华电技术, 2021, 43(7): 17-23.
TONG Jialin, HONG Qing, LÜ Hongkun, et al. Development status and application prospect of power side energy storage technology[J]. Huadian Technology, 2021, 43(7): 17-23.
- [7] 张陵, 南东亮, 赵启, 等. 基于重力储能的混合储能系统容量优化配置[J]. 计算机仿真, 2024, 41(1): 103-110.
ZHANG Ling, NAN Dongliang, ZHAO Qi, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage system capacity based on gravity energy storage battery[J]. Computer Simulation, 2024, 41(1): 103-110.
- [8] 曾小超, 郭海斌, 李建文, 等. MW 级重力储能系统设计及仿真实验[J]. 实验技术与管理, 2025, 42(3): 137-145.
ZENG Xiaochao, GUO Haibin, LI Jianwen, et al. Design and simulation of an MW-level gravitational energy storage

- system[J]. *Experimental Technology and Management*, 2025, 42(3): 137-145.
- [9] 王青山, 李妍, 张群, 等. 基于带传动的垂直式重力储能系统能效分析模型与实验验证[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(3): 1141-1149.
WANG Qingshan, LI Yan, ZHANG Qun, et al. Energy efficiency analysis model and experimental verification of vertical gravity energy storage system based on belt drive[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(3): 1141-1149.
- [10] 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 Tingting, ZHOU Xuezhi, GUO Dingzhang, et al. Study on factors influencing rail gravity energy storage system efficiency[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(3): 835-845.
- [11] 高天, 王祖凡, 方舒扬, 等. 含齿轮变速与链式传动机构的斜坡重力储能系统能效分析模型与实验验证[J]. *储能科学与技术*, 2025, 14(2): 688-698.
GAO Tian, WANG Zufan, FANG Shuyang, et al. Energy efficiency analysis model and experimental verification of gravity energy storage system with gear box and chain transmission mechanisms[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2025, 14(2): 688-698.
- [12] 陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2023年中国储能技术研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(5): 1359-1397.
CHEN Haisheng, LI Hong, XU Yujie, et al. Research progress on energy storage technologies of China in 2023[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(5): 1359-1397.
- [13] 夏焱, 万继方, 李景翠, 等. 重力储能技术研究进展[J]. *新能源进展*, 2022, 10(3): 258-264.
XIA Yan, WAN Jifang, LI Jingcui, et al. Research progress of gravity energy storage technology[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2022, 10(3): 258-264.
- [14] 王玉莹, 杨晓斌, 陈君青, 等. 新型重力储能的原理效率及其选材选址分析[J]. *工程研究(跨学科视野中的工程)*, 2023, 15(3): 193-203.
WANG Yuying, YANG Xiaobin, CHEN Junqing, et al. The principle efficiency of the new gravity energy storage and its site selection analysis[J]. *Journal of Engineering Studies*, 2023, 15(3): 193-203.
- [15] 杨川, 郝正航, 陈巨龙. 斜坡式重力储能系统的并网控制研究[J]. *中外能源*, 2024, 29(6): 26-32.
YANG Chuan, HAO Zhenghang, CHEN Julong. Research on grid connection control of slope gravity energy storage system[J]. *Sino-Global Energy*, 2024, 29(6): 26-32.
- [16] 王辉, 董宇成, 夏玉琦, 等. 考虑阶梯碳-绿证互认与重力储能的矿区综合能源系统优化调度[J]. *中国电力*, 2025, 58(7): 54-67.
WANG Hui, DONG Yucheng, XIA Yuqi, et al. Optimal scheduling of coal mine integrated energy systems considering stepped carbon-green certificate mutual recognition and gravity energy storage[J]. *Electric Power*, 2025, 58(7): 54-67.
- [17] 翟文超, 姚良忠, 喻恒凝, 等. 面向并联环流最小化的垂直式矩阵型重力储能系统多机协调控制[J]. *全球能源互联网*, 2024, 7(2): 155-165.
ZHAI Wenchao, YAO Liangzhong, YU Hengning, et al. Multimachine coordinated control for vertical matrix gravity energy storage system considering parallel power circulation minimization[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2024, 7(2): 155-165.
- [18] 侯慧, 徐焱, 肖振锋, 等. 基于重力储能的风光储联合发电系统容量规划与评价[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(17): 74-84.
HOU Hui, XU Tao, XIAO Zhenfeng, et al. Optimal capacity planning and evaluation of a wind-photovoltaic-storage hybrid power system based on gravity energy storage[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(17): 74-84.
- [19] 付媛, 韦嘉晖, 张祥宇, 等. 含混合虚拟储能新型微电网的能量管理技术[J]. *电测与仪表*, 2025, 62(6): 67-80.
FU Yuan, WEI Jiahui, ZHANG Xiangyu, et al. Energy management technology of new microgrid with hybrid virtual energy storage[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2025, 62(6): 67-80.
- [20] 吕玉映, 赵凯辉, 游鑫, 等. 基于双扰动观测器的永磁同步电机双惯量系统无模型递归终端滑模控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(21): 129-139.
LÜ Yuying, ZHAO Kaihui, YOU Xin, et al. Model-free recursive terminal sliding mode control for a permanent magnet synchronous motor dual inertia system based on a double disturbance observer[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(21): 129-139.
- [21] 李少朋, 谢源, 张凯, 等. 基于自抗扰控制器的永磁同步电机直接转矩控制[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(1): 195-200.
LI Shaopeng, XIE Yuan, ZHANG Kai, et al. Direct torque control of permanent magnet synchronous motor based on active disturbance rejection controller[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(1): 195-200.
- [22] 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.
- [23] 吴卓, 李自成, 刘江, 等. 基于VSG的储能变流器JDL协调控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(7): 112-122.
WU Zhuo, LI Zicheng, LIU Jiang, et al. VSG-based coordinated JDL control strategy for energy storage converters[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(7): 112-122.

收稿日期: 2025-02-21; 修回日期: 2025-05-21

作者简介:

乔健(1997—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: qiaojian@ncepu.edu.cn

陈林旭(2003—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为重力储能系统保护与控制技术。E-mail: 15176903628@163.com

(编辑 张颖)