

基于效益分析的重力储能系统能流路径选择方法

李震¹, 陈巨龙¹, 朱永清¹, 王斌¹, 牟雪鹏¹, 高天², 张佑康², 方舒扬²

(1. 贵州电网有限责任公司电网规划研究中心, 贵阳 550002; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 重力储能系统(gravity energy storage system, GESS)在充电过程中可以从电网或新能源场站吸收电能。当新能源场站功率波动导致充电功率不足时, 可选择两条能流路径应对充电功率波动, 即调节质量块数量或直接从电网吸收能量, 但如何合理选择上述路径是工程应用中的难题。为解决上述难题, 提出了一种基于效益分析的重力储能系统能流路径选择方法, 实现新能源站功率波动下的充电效益最优。首先, 以斜坡式重力储能系统为例, 对其储能过程中两条能量流动路径进行了详细分析; 其次, 以效益最优为目标建立了效益分析模型, 并提出了上述能流路径下的功率缺额阈值计算方法; 最后, 以配置 250 kW 斜坡重力储能系统的 800 kW 光伏电站为例, 在新能源波动条件下对比分析了采用不同能流路径时的储能系统充电成本及效益, 对所提方法进行验证。结果表明, 所提方法能够及时调整重力储能系统充电功率, 有效解决新能源发电量不足问题, 同时系统充电效益可提高 44.95 %。

关键词: 功率波动; 新能源; 重力储能系统; 能流路径; 效益分析

Energy Flow Path Selection Method of Gravity Energy Storage System Based on Benefit Analysis

LI Zhen¹, CHEN Julong¹, ZHU Yongqing¹, WANG Bin¹, MOU Xuepeng¹, GAO Tian²,
ZHANG Youkang², FANG Shuyang²

(1. Power Grid Planning Research Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Gravity energy storage system (GESS) can absorb power from the power grid or the new energy station during charging process. When insufficient charging power happens due to power fluctuation of the new energy station, two energy power flow paths of GESS can be selected to respond to charging power fluctuation, which are adjusting the number of masses or absorbing energy from grid directly. However, how to select the above paths reasonably is still a problem in engineering application. To solve the above problems, an energy flow path selection method of GESS based on benefit analysis is proposed to realize the optimal charging benefit under power fluctuation of new energy station. Firstly, taking a slope GESS as an example, two energy flow paths in the energy storage process are analyzed in detail. Secondly, with the objective of the optimal benefit, the benefit analysis model is established and power shortage threshold calculation method applied in the above energy flow paths is also proposed. Finally, in the example of a 800 kW photovoltaic power station with 250 kW slope GESS, the charging cost and benefit of energy storage system with different energy flow paths are compared and analyzed to verify the proposed method under the fluctuation of renewable energy. The results show that GESS's charging power can be adjusted in time and power shortage of new energy power generation can also be effectively solved by using the proposed method. At the same time, power charging benefit of the system benefit can be improved by 44.95 %.

Key words: power fluctuation; new energy; gravity energy storage system (GESS); energy flow path; benefit analysis

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52177041); 中国南方电网有限责任公司重点科技项目(GZKJXM20220033)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52177041); the Key Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (GZKJXM20220033).

0 引言

在“碳达峰、碳中和”目标的指导下,我国正持续加快新型电力系统建设进程,但随着风电和光伏装机渗透率不断提升,电力系统面临的稳定性问题日益突出^[1]。在维持系统整体稳定性及实现高比例可再生能源消纳方面,储能技术提供了有效解决途径^[2-5]。

“十四五”期间,我国积极探索高质量、大规模的新型储能技术,其中,基于离散质量块的重力储能技术因其工作原理简单及储能效率较高的优点,得到了大力支持^[6]。2021年 Science 周刊发表论文称重力储能可作为一种替代电化学储能技术的有效方案^[7]。重力储能工作原理与抽水蓄能类似,将储能介质由抽水蓄能中的“水”换成离散的固体介质^[8],主要对标能量型储能,属于长时大容量储能,可以在电力系统中发挥电能昼夜转移和提高系统整体稳定性功能^[9-10]。

重力储能系统的优势包括其无地形/地质依赖性、安全环保无爆炸危险,可以利用各种地形条件建设大容量的储能系统。其次,重力储能在电网中的作用不仅仅是替代现有储能方案,尤其是在我国水资源匮乏但风光资源丰富的三北地区,它还为现有储能系统的增容扩容提供了更优、更便捷的解决途径^[11]。

目前国内外在重力储能技术方面已经展开了研究,在现有建设方案中,按照质量块的运行轨迹,重力储能系统可分为垂直式和斜坡式两种结构。垂直式重力储能系统主要有以下几类。文献[12]提到 Energy Vault(EV)公司利用混凝土块作为储能介质,并将其堆叠成塔实现储能。文献[13]中提到在 EV 公司的技术支持下,中国天楹于 2023 年 9 月完成 100 MWh 的矩阵式重力储能结构建设。文献[14]中 Morstyn 等提出了一种在废弃钻井平台利用绞盘吊钻机进行储能的系统。文献[15]中苏格兰 Gravitricity 公司提出了一种在废弃钻井平台采用绞盘吊钻机进行储能的机构。葛洲坝中科储能技术公司 2018 年提出了利用废弃矿井和缆绳提升重物的方案。斜坡式重力储能系统主要有以下几类。Advanced Rail Energy Storage(ARES)公司提出的轨道机车储能结构效率高达 80%,且系统寿命达 40 a 以上。文献[16]中天津大学提出斜坡轨道和码垛机

相结合的重力储能结构。中科院电工研究所提出了两种重载车辆爬坡储能方案,一种是采用永磁直线同步电机轮轨支撑结构,电动发电都通过直线电机完成,另一种是利用多个电动绞盘拉拽车辆,分段储能^[17]。除本体研究之外,文献[18]还对重力储能系统控制优化开展研究,针对斜坡式重力储能结构提出了基于深度神经网络的质量块抓取装置控制方法。文献[19]分析了斜坡式重力储能系统的各类影响因素。文献[20]提出了一种面向重力储能直流环节的多模式控制方法。上述文献多为重力储能系统本体结构及部分组成环节的优化,尚未针对新能源侧发电功率波动对重力储能系统充电功率调节方法展开研究。

本文以斜坡式重力储能系统为分析对象,首先研究了斜坡式重力储能系统的储能流程中的两种能流路径,即从电网或新能源场站吸收功率。其次由于不同能流路径在不同功率缺额下将引起较大的充电效益差异,故以系统效益为目标调整充电功率,依据基准电价与新能源电价的分析对比,建立了不同能流路径下的效益分析模型,得到能流路径切换的充电功率缺额阈值,最后以配置 250 kW 斜坡重力储能系统的 800 kW 光伏电站为例,验证了本文所提出方法的有效性,解决了新能源发电电量不足的问题,提高了重力储能系统充电效益。

1 重力储能系统

1.1 重力储能系统的工作原理

重力储能系统工作原理简单,主要利用质量块在高低势能位之间的势能差来存储、释电能。下面以斜坡式重力储能系统结构为例介绍其工作原理,如图 1 所示,当电网负荷较低,新能源供电能力充盈时,重力储能系统将质量块从低势能位的堆栈平台拖至高势能位的堆栈平台,将电能存储为质量块的重力势能。在电网负荷较大,需要储能系统调峰运行时,重力储能系统的质量块将从高势能位运行至低势能位,通过传动装置拖动发电机向电网反馈电能^[21]。

1.2 重力储能系统优势

重力储能系统依靠更长的运行寿命(长达 50 a)及低维护成本可实现较低的平准化度电成本(LCOS)。系统可适应高温、极寒等多种极端气候,同时实现 2~12 h 或更长的储能时长,综合储能效率

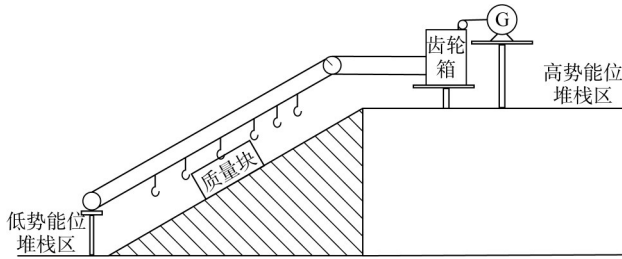


图1 斜坡式重力储能系统

Fig. 1 Slope gravity energy storage system

高达85%以上。

重力储能也能为电网提供转动惯量，转动惯量对于电网来说非常重要，能够保障电网的稳定运行。目前电网中大部分的转动惯量均由燃煤机组提供，随着新能源逐步代替燃煤机组并入电网，新型电力系统的转动惯量会越来越低，从而导致电力系统的稳定性更加脆弱，但是重力储能采用的是同步发电机，能够为系统提供相对而言比较高的转动惯量。

同时，重力储能系统建设过程中可采用100%本地化材料，还能够消纳大量的固体废弃物，其质量块可以选用建筑垃圾、流铁尾矿、钢渣等工业废料制造，并且重力储能系统运行时不会产生任何碳排放，更好地响应了我国的双碳目标政策^[22-23]。

1.3 重力储能系统充电功率调节方法

在忽略空气阻力的前提下，重力储能系统的充电功率 P_c 可以表示为^[24]：

$$P_c = \eta n m g \sin \theta v \quad (1)$$

式中： n 为在运行的质量块数量； m 为单块质量块的质量； θ 为质量块运行轨迹与水平面的夹角； v 为质量块沿运行轨迹的速度； η 为系统的能量转化率(包括机械环节和电气环节)，通常在0~1之间。

对于给定的重力储能系统，质量块的质量会根据系统机械设计参数、地势环境、建设成本等因素确定，不同的重力储能系统所采用的质量块质量不尽相同。本文采用一种配备标准化质量块的斜坡式重力储能技术方案，所有质量块为统一规格定制，单个质量块的质量 m 为定值。斜坡运行轨迹与水平面的夹角 θ 也为定值。当新能源发电功率与重力储能系统的充电功率不匹配时，可以通过调节质量块沿斜坡匀速下滑的速度 v 或者运行在斜坡上质量块的总数量 n ，来匹配二者的功率。

本文中，斜坡式重力储能系统采用的是同步电

机直接并网方式，系统稳定运行时，电机轴端的转速为定值，通过固定变速比的减速箱与质量块相连，即额定工况下，质量块沿斜坡匀速下滑的速度 v 为定值。因此，当新能源发电功率与重力储能系统的充电功率不匹配时，本文需要通过动态调节运行在斜坡上的质量块数量 n ，完成重力储能系统充电功率的调节。

2 重力储能系统能流路径选择方法

当重力储能系统充电时，主要有两种能流路径，即从电网或新能源场站吸收功率。对新能源发电系统而言，当新能源发电功率大于或者等于重力储能系统充电功率时，重力储能系统仍可在额定功率下持续正常运行，且新能源电价相对低廉时无需对系统运行状态进行调整。然而，当新能源发出功率小于重力储能系统额定充电功率时，重力储能系统实际充电功率降低，无法带动额定数量质量块运行。此时需要通过选择不同能流路径匹配新能源发电功率和重力储能充电功率。同时，由于新能源电价与电网基准电价存在较大价格差异，在能流路径选择过程中，还需综合考虑重力储能系统的充电效益，进而确定能流路径选择的判断依据。

2.1 充电工况能流路径

在重力储能系统充电工况下，新能源侧充当源端，当源端有功率波动时，整个过程无需对新能源侧(光伏等)的出力进行调节，而通过重力储能系统的能流路径选择，更好地匹配新能源发电功率与重力储能系统充电功率。

当新能源发电功率大于或者等于重力储能系统充电功率时，重力储能系统仍可在额定功率下持续正常运行，考虑新能源成本不高，额外的功率将不纳入储能系统，此时无需对质量块数量进行调整。

当新能源发出功率小于重力储能系统充电功率时，新能源发出的功率无法将重力储能系统额定功率对应数量的质量块拖动至高势能位，此时需要根据基准电价、平均新能源电价、单个质量块对应功率、新能源系统功率缺额、新能源系统功率波动时间、第一顺位的质量块距离入栈所需时间等参数来选择最合适的能流路径，此处的第一顺位质量块为距离上堆栈场最近的质量块。

充电工况下主要有两种能流路径，第一种为直接依靠电网补偿新能源功率波动缺额，第二种通过

卸载质量块的方式应对新能源功率波动,具体分析如下。

1)能流路径 1:当新能源发电功率小于重力储能系统充电功率时,发电功率已经满足不了斜坡式重力储能系统的额定充电功率,此时可利用电网提供重力储能系统的充电功率缺额,从而使额定数量的质量块稳定运行至高势能位堆栈处。

2)能流路径 2:与能流路径 1 场景相同,但该路径先利用电网提供这部分缺额的充电功率,将一定数量的质量块到达高势能位堆栈处,随后调整斜坡上运行的质量块数量,此时斜坡式重力储能系统的充电功率将略小于新能源侧的发电功率,完成二者的功率匹配。

上述两种能流路径在选择时,本文主要通过效益分析的方式进行,下一节将着重展开分析。

2.2 充电效益分析

当新能源发电功率波动,基于上述方法与重力储能系统充电功率匹配时,系统的充电效益定义为两种能流路径的充电成本差,下面分别对两种能流路径的充电成本进行分析。

依据能流路径 1 的调整方式,其充电成本为:

$$C_1 = A\Delta PT_1 \quad (2)$$

式中: C_1 为能流路径 1 所需的总充电成本; A 为电网基准电价; ΔP 为新能源发电功率缺额; T_1 为新能源功率波动时间。

当重力储能系统依据能流路径 2 进行调整时,主要分为两个过程:第一阶段利用电网提供这部分缺额的充电功率,第二阶段卸载部分运行的质量块,其充电成本表示如下。

$$\begin{cases} C_{2.1} = A\Delta PT_2 \\ C_{2.2} = B(P_0 - \Delta P)(T_1 - T_2) \\ C_2 = C_{2.1} + C_{2.2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $C_{2.1}$ 为能流路径 2 第一阶段所需的充电成本; T_2 为第一顺位质量块运行至上堆栈时间; $C_{2.2}$ 为能流路径 2 第二阶段所需的充电成本; T_1 为新能源系统功率波动时间; B 为新能源电价; P_0 为单个质量块对应功率; C_2 为能流路径 2 的总充电成本。

根据前文的定义,重力储能系统的充电效益为:

$$U = C_1 - C_2 \quad (4)$$

式中 U 为重力储能系统的充电效益。

当 $U \leq 0$ 时,选择或维持能流路径 1,当 $U > 0$

时,选择能流路径 2。

由于重力储能系统质量块的离散特性,一般只能基于单个质量块进行调整,为给出上述两种能流路径选择的判定界限,将新能源充电功率缺额与单个质量块对应功率的比值定义为功率缺额系数,表示为:

$$M = \frac{\Delta P}{P_0} \quad (5)$$

式中 M 为功率缺额系数。

功率缺额系数 M 存在一个阈值,可通过该阈值进行能流路径的选择,即当 M 小于等于阈值时,选择或维持能流路径 1,当 M 大于阈值时,选择能流路径 2。此处根据 M 与阈值的关系选择能流路径与结合重力储能系统的充电效益选择能流路径相互对应,即 U 为 0 时,对应功率缺额系数 M 的阈值点。

将式(2)、式(3)、式(5)代入式(4),并令 $U=0$,可得到阈值 M_0 为:

$$M_0 = \frac{A}{A+B} \quad (6)$$

根据上述分析,绘制重力储能系统充电工况的能流路径选择流程如图 2 所示。

3 案例分析

3.1 案例参数

3.1.1 额定充电功率

以贵州某地区屋顶分布式光伏电站为例,分析各季度光伏日出力功率,作为重力储能的充电功率选取依据,图 3 为不同季度的光伏日出力功率曲线,图 4 为含重力储能和新能源电站的系统结构图。

根据图 3 所示曲线,以 07:00—17:30 作为参考区间,以 30 min 为取值间隔,得到 20 个光伏发电功率参考点,将上述参数取平均值,得到光伏电站平均发电功率,此功率也作为重力储能系统的充电功率,即:

$$P = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} (P_i) = 267.01 \text{ kW} \quad (7)$$

式中 i 为参考点。

本文以表 1 所示的斜坡式重力储能系统结构参数为例进行计算。

根据表 1 参数及式(1)可得单个质量块对应的功率为:

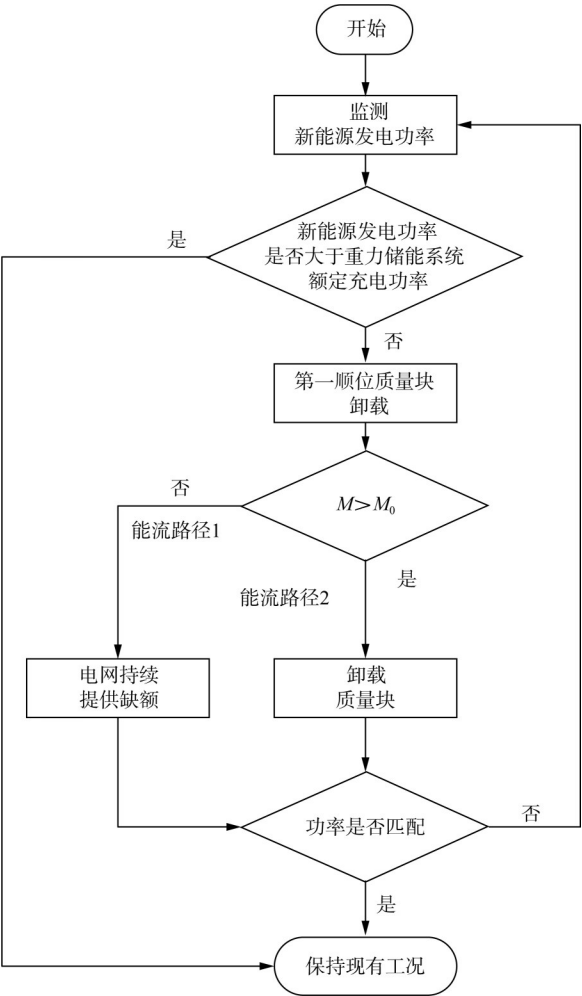


图2 能流路径选择流程

Fig. 2 Flowchart of energy flow path selection

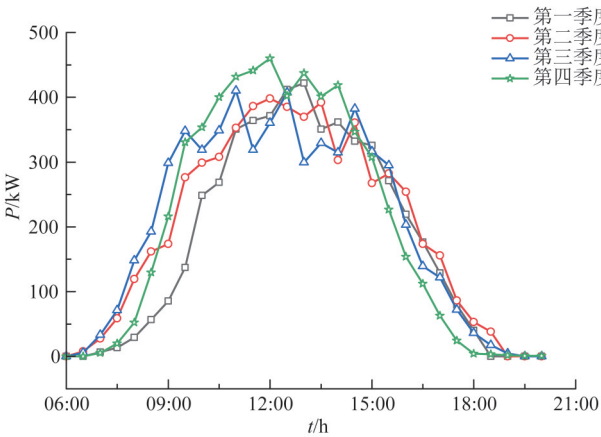


图3 不同季度的光伏日出力功率

Fig. 3 Photovoltaic daily output power in different quarters

$$P_0 = \eta n m g \sin \theta v = 25 \text{ kW} \tag{8}$$

根据式(7)—(8)可得斜坡式重力储能系统由光伏电站充电时, 系统在斜坡上运行的质量块数量可

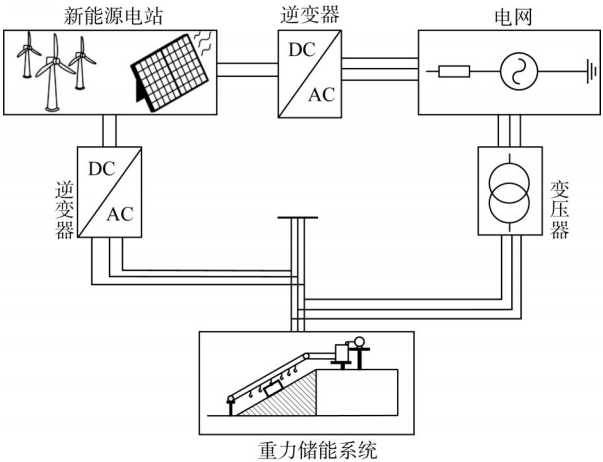


图4 含重力储能和新能源电站的系统结构图

Fig. 4 System structure diagram including gravity energy storage and new energy power station

表 1 斜坡式重力储能系统结构参数

Tab. 1 Structural parameters of slope gravity energy storage system

类别	数值
斜坡角度 $\theta/(^\circ)$	30
单个质量块质量 m/kg	3 000
质量块运行速度 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	2
能量转换效率 $\eta/\%$	85

表示为:

$$N = \left\lfloor \frac{P}{P_0} \right\rfloor = 10 \tag{9}$$

由于斜坡式重力储能系统充电功率的离散特性, 此处采用向下取整的计算方法, 以满足额定运行时, 光伏电站的发电功率能够满足系统的充电功率需求, 此时斜坡式重力储能系统的额定功率为 250 kW。

3.1.2 电价选取

传统电价主要由政府相关部门和电力公司按照市场供需关系、电力生产成本、行业政策等因素确定。而新能源电价一般由政府主导, 采用补贴或上网电价等形式支持和鼓励新能源发电。传统能源主要是以化石燃料为主要原料, 其生产成本相对较高。而新能源一般采用太阳能、风能、水能等自然资源作为原料, 其生产成本相对较低^[25]。这也是新能源电价相对较低的一个重要因素^[26]。

根据国家能源局于 2023 年发布的《2023 年再生能源电力上网电价表》, 2023 年全国大部分地区的光伏发电上网电价约为 0.3 元/kWh, 风电上网电价

约为 0.38 元/kWh, 水电上网电价约为 0.25 元/kWh^[27]。但是, 此处考虑到新能源为自产的溢出发电功率, 成本较低, 拟取 0.1 元/kWh。

对于传统电价, 选取了 2023 年我国部分地区的不同档位电价, 如图 5 所示。

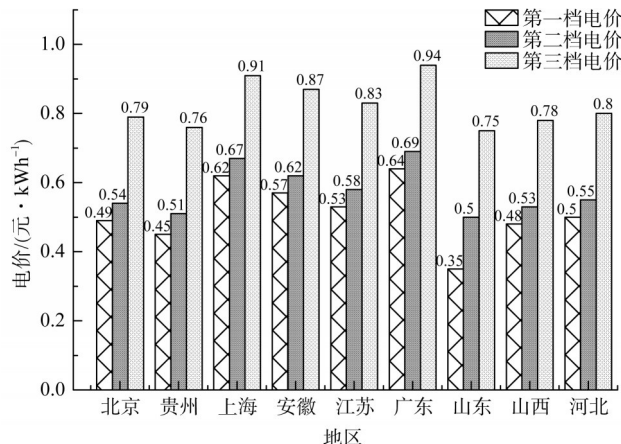


图 5 2023 年中国部分地区的不同档位电价统计

Fig. 5 Statistics of different levels of electricity prices in some regions of China in 2023

重力储能可在各档位的经济效益存在差异, 而本文的研究场景是充电工况, 电网侧的电价并不受重力储能系统充电成本的影响, 为保证传统电价选取的可靠性, 本文将不同地区不同档位电价取平均值作为依据, 拟取传统电价为 0.6 元/kWh。

3.1.3 功率波动缺额阈值计算

将 $A=0.6$, $B=0.1$ 代入式(5)得 $M_0=1/7$ 。因为单个质量块对应的功率为 25 kW, 由此可得 $\Delta P=25/7=3.57$ kW。

设功率波动时间大于第一顺位质量块入栈时间, 当功率缺额小于 3.57 kW 时采用依靠电网的方式即能流路径 1。当功率缺额大于 3.57 kW 时采用卸载质量块的方式, 即能流路径 2。

3.2 能流路径选择分析

对于本文配置了 250 kW 斜坡重力储能的 800 kW 光伏电站, 且功率波动阈值为 3.75 kW 的系统而言, 其阈值区域可分为 10 个区域, 如图 6 所示。

其中, 以 250 kW-246.5 kW-225 kW 区域为例, 分析能流路径的选择方法。在 09:11—09:19 与 15:41—15:51 时间段内, 新能源出力介于 9~10 块质量块对应功率之间, 且新能源出力与重力储能额定功率差值超出阈值, 故选择能流路径 2, 将运行

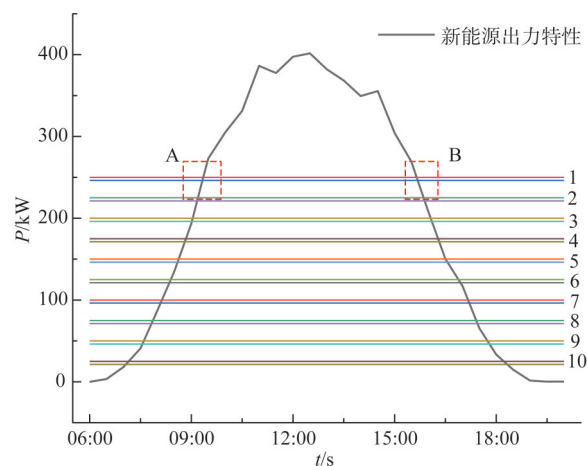


图 6 新能源出力特性曲线与阈值区域

Fig. 6 New energy output characteristic curve and threshold region

中的质量块数量调整为 9 块。在 09:19—9:21 与 15:39—15:41 时间段内, 新能源出力介于 9~10 块质量块对应功率之间, 但新能源出力与重力储能额定功率差值未超出阈值, 故选择能流路径 1, 依靠电网弥补功率缺额。相应调整区域如图 7—8 所示。

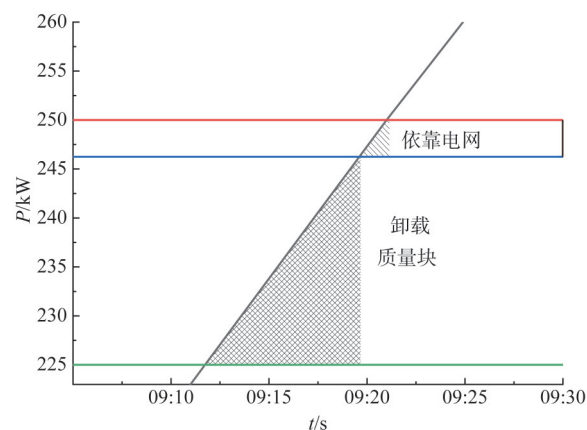


图 7 A 区域放大图

Fig. 7 Enlargement diagram of region A

按照本文所述方法选择能流路径, 可得在不同的新能源出力下, 重力储能系统中运行质量块数量变化曲线与平抑后的充电功率曲线, 如图 9 所示。

新能源出力与重力储能充电功率最优响应示意图及局部放大图, 如图 10—12 所示。

3.3 效益成本验证

根据上文中重力储能系统响应分析可知, 由于能流路径 1 中依靠电网能够动态地跟随功率缺额响

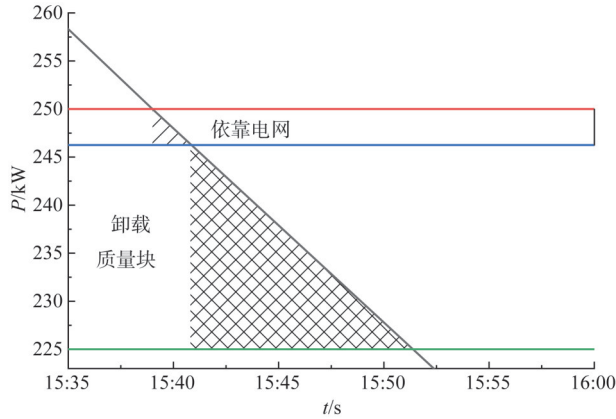


图 8 B 区域放大图

Fig. 8 Enlargement diagram region B

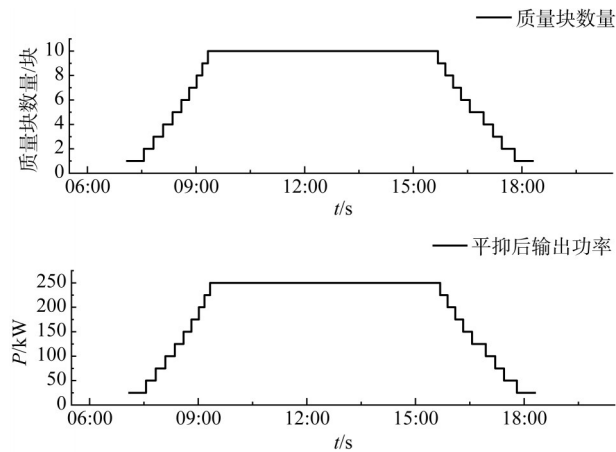


图 9 重力储能系统质量块数量与功率相应曲线

Fig. 9 Corresponding curve of the mass blocks numbers and power of the gravity energy storage system

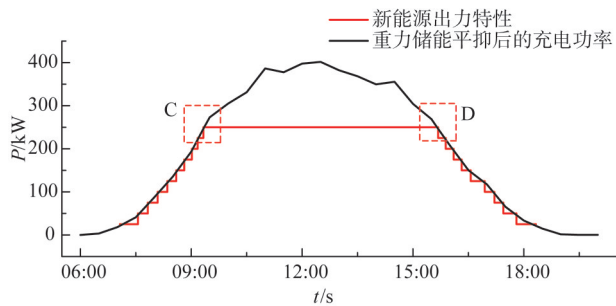


图 10 新能源出力与重力储能充电功率最优响应示意图

Fig. 10 Optimal response diagram of new energy outputs and gravity energy storage charging power

应, 而能流路径 2 中卸载质量块表现出阶跃的响应特性, 故能流路径 1 与能流路径 2 对应的功率波动参考值有所差异, 为了便于区分, 下文中分别用 ΔP_1 与 ΔP_2 代指能流路径 1 与能流路径 2 的功率波动额。

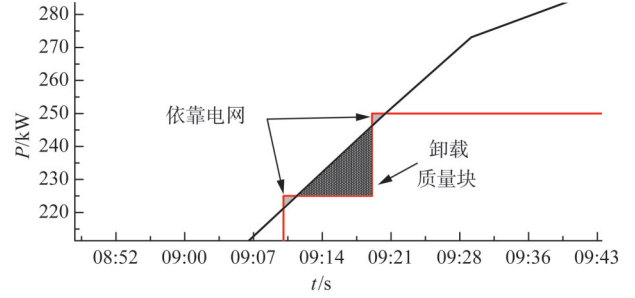


图 11 C 区域放大图

Fig. 11 Enlargement diagram region C

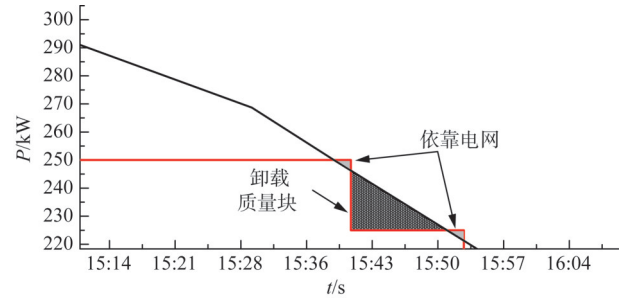


图 12 D 区域放大图

Fig. 12 Enlargement diagram region D

3.3.1 能流路径 1

当功率波动缺额小于 3.57 kW, 采用能流路径 1。

结合光伏日出力特性, 选择 07:00—17:30 作为重力储能系统充电工况的运行时段, 此区间同时也为重力储能充电功率可调整的时段, 根据重力储能系统额定功率与新能源发电功率之间的关系, 当新能源发电功率大于或者等于重力储能系统充电功率时, 无需对重力储能充电功率进行调整, 对应于 09:30—15:30; 而新能源发电功率小于重力储能系统充电功率时, 需要进行能流路径的选择, 即第一过程对应于 07:00—09:30, 第二过程对应于 15:30—17:30。如图 13 所示, 其中平均光伏日出力曲线由 4 个季度光伏日出力功率曲线取平均值得到。

$$C_1 = \int_7^{9.5} \Delta P_1 \times 0.6 + \int_{15.5}^{17.5} \Delta P_1 \times 0.6 = 288.12 \text{ 元} \quad (10)$$

其中, 成本分为两个积分过程, 第一过程对应于 07:00—09:30, 第二过程对应于 15:30—17:30。

3.3.2 能流路径 2

当功率缺额大于 3.57 kW 时, 采用能流路径 2 的方式。

由于能流路径 2 的调整过程并非连续, 质量块

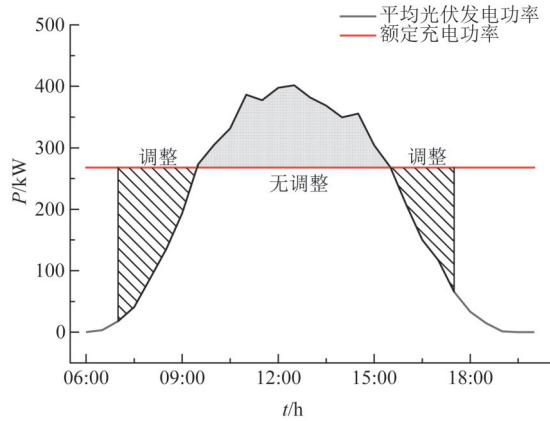


图 13 重力储能系统调整时段解析图

Fig. 13 Analysis diagram of gravity energy storage system adjustment stage

的卸载也表现出阶跃变化的特点,故整体成本采用离散化分析,将 07:00—09:30 以及 15:30—17:30 的平均发电功率作为参考值,与重力储能系统额定功率做比较,得到 ΔP_2 。其中,新能源发电功率波动幅度的不同,需要入栈的质量块数量也不同,将所需入栈质量块数量定义为裕量,再将整个过程中质量块入栈动作时间做统计化处理,得 t_1 和 t_2 。式(11)指依靠电网使裕量质量块入栈所消耗的成本,将该过程所需时间离散化统计求和,取调整时间为 1/6 h(每小时记 10 min)即 t_1 。式(12)指卸载质量块之后损失的新能源功率余量对应的成本,将该过程所需时间离散化统计求和,取调整时间为 5/6 h(每小时记 50 min),即 t_2 。

根据式(9)和式(10)得:

$$C_{2.1} = 0.6n\Delta P_2 t_1 = 86.61 \text{ 元} \quad (11)$$

式中: n 为功率波动次数,每小时经统计记一次; t_1 为能流路径 2 第一阶段离散化求和时间。

$$C_{2.2} = 0.1n\Delta P_2 t_2 = 72 \text{ 元} \quad (12)$$

式中 t_2 为能流路径 2 第二阶段离散化求和时间。

$$C_2 = C_{2.1} + C_{2.2} = 158.61 \text{ 元} \quad (13)$$

3.3.3 效益比较分析

依据上面的结果分析,可以得到两种能流路径的效益差异。

$$U = C_1 - C_2 = 129.51 \text{ 元} \quad (14)$$

$$\eta = \frac{U}{C_1} = 44.95 \% \quad (15)$$

对于容量为 275kW 的重力储能系统,经过能流路径的合理选择,在一天内的 07:00—17:30 时段,即可节省 129.51 元的成本,提升 44.95 % 的效益。

4 结语

本文为确定新能源站功率波动下的能量流动的最优路径,提出了一种基于效益分析的重力储能系统能流路径选择方法。根据储能过程中斜坡式重力储能系统的两条能量流动路径,以效益最优为目标,建立了效益分析模型,提出了上述能流路径下的功率波动缺额阈值计算方法,并在新能源波动条件下对比分析了采用不同能流路径时的储能系统充电成本及效益,最后以配置了 250 kW 斜坡重力储能的 800 kW 光伏电站为例进行分析,结果表明,采用本文所提方法能够及时调整重力储能系统的充电功率,有效解决新能源发电量不足问题,同时使系统整体效益提高了 44.95 %。

参考文献

- [1] 王斌,张裕,罗晨.高比例光伏接入的配电网分布式运行优化技术[J].南方电网技术,2024,18(6):121-130.
WANG Bin, ZHANG Yu, LUO Chen. Distributed operation optimization technology of distribution network with high proportion of photovoltaic access [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(6): 121-130.
- [2] 郭佩乾,郝峰杰,袁志昌,等.混合多类型储能的分布式能源系统运行优化方法[J].南方电网技术,2024,18(8):29-38.
GUO Peiqian, HAO Fengjie, YUAN Zhichang, et al. Operation optimization method of distributed energy system with hybrid multi-type energy storage [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(8): 29-38.
- [3] 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 Xiaoyuan, WANG Han, YAN Zheng, et al. Review of power system uncertainty and countermeasures under the background of energy transformation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 2-13.
- [4] 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(5).
- [5] TONG W X, LU Z G, CHEN W J, et al. Solid gravity energy storage: a review [J]. Journal of Energy Storage, 2022(53): 105226.
- [6] CHATURVEDI D K, YADAV S, SRIVASTAVA T, et al. Electricity storage system: a gravity battery [C]//2020 Fourth World Conference on Smart Trends in Systems, Security and Sustainability (WorldS4), August 13-15, 2020, London, UK. New York: IEEE, 2020: 412-416.
- [7] O'GRADY C. Gravity powers batteries for renewable energy [J]. Science, 2021, 372(6541): 446.
- [8] 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, technical conception and key problems of gravity energy

- storage power generation[J]. *Engineering Science and Technology*, 2022, 54(1): 97 – 105.
- [9] 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.
- [10] 崔文倩,魏军强,赵云灏,等. 双碳目标下含重力储能的配电网多目标运行优化[J]. *电力建设*, 2023, 44(4): 45 – 53.
CUI Wenqian, WEI Junqiang, ZHAO Yunhao, et al. Multi-objective operation optimization of distribution network with gravity energy storage under dual carbon objectives [J]. *Power Construction*, 2023, 44(4): 45 – 53.
- [11] 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]. *New Energy Progress*, 2022, 10(3): 258 – 264.
- [12] WU X, LI N, WANG X, et al. Day-ahead scheduling of a gravity energy storage system considering the uncertainty [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 12(2): 1020 – 1031.
- [13] 王柄根. 中国天楹: 推进首个重力储能项目建设[J]. *股市动态分析*, 2023 (16): 35.
WANG Binggen, China Tianying. Promote the construction of the first gravity energy storage project [J]. *Stock Market Dynamic Analysis*, 2023(16): 35.
- [14] MORSTYN T, CHILCOTT M, MCCULLOCH M D. Gravity energy storage with suspended weights for abandoned mine shafts[J]. *Applied Energy*, 2019(239): 201 – 206.
- [15] EMRANI A, BERRADA A, BAKHOUYA M. Optimal sizing and deployment of gravity energy storage system in hybrid PV-Wind power plant [J]. *Renewable Energy*, 2022(183): 12 – 27.
- [16] 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. Principle efficiency of new gravity energy storage and analysis of its material selection and site selection [J]. *Engineering Research-Engineering in an Interdisciplinary Perspective*, 2023, 15(3): 193 – 203.
- [17] 杨闯,朱曙荣,边技超,等. 新型物理储能技术路线分析[J]. *电站辅机*, 2023, 44(2): 10 – 15.
YANG Chuang, ZHU Shurong, BIAN Jichao, et al. Analysis of new physical energy storage technology route [J]. *Power Station Auxiliary*, 2023, 44(2): 10 – 15.
- [18] 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 Julong, LI Zhen, ZHU Yongqing, et al. Control method of mass grabbing device for slope gravity energy storage system based on deep neural network [J]. *Motor and Control Applications*, 2023, 50(11): 37 – 45.
- [19] 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 the influencing factors of the efficiency of rail gravity energy storage system [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(3): 835 – 845.
- [20] 韩嘉言,吕艳玲,周冲. 重力储能直流环节电池多模式控制方法研究[J]. *中国电力*, 2024, 57(7): 66 – 73.
HAN Jiayan, LÜ Yanling, ZHOU Chong. Research on multi-mode control method of battery in DC link of gravity energy storage [J]. *Electric Power*, 2024, 57(7): 66 – 73.
- [21] HUNT J D, 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.
- [22] EMRANI A, BERRADA A, AMEUR A, et al. Assessment of the round-trip efficiency of gravity energy storage system: Analytical and numerical analysis of energy loss mechanisms [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022(55): 105504.
- [23] BOTHA C D, KAMPER M J. Capability study of dry gravity energy storage [J]. *Journal of Energy Storage*, 2019(23): 159 – 174.
- [24] BERRADA A, LOUDIYI K, ZORKANI I. Dynamic modeling and design considerations for gravity energy storage [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017(159): 336 – 345.
- [25] 张佳辉,张洪福,牛玉广,等. 考虑新能源出力不确定性的风-光-柴-储系统调度策略[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(3): 20 – 25.
ZHANG Jiahui, ZHANG Hongfu, NIU Yuguang, et al. Dispatching strategy of wind-solar-diesel-battery hybrid power generation considering renewable energy output uncertainty [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(3): 20 – 25.
- [26] 张锋,李思儒,孙谊嫔,等. 新能源电站应用储能技术对电网公司购售电决策的影响[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2021, 42(6): 230 – 236.
ZHANG feng, LI Siru, SUN Yiqian, et al. Effect of energy storage technology on the decision-making of power grid companies in purchasing and selling electricity in new energy power stations [J]. *Power Capacitor and Reactive Power Compensation*, 2021, 42(6): 230 – 236.
- [27] 国家能源局. 2023年再生能源电力上网电价表[R]. 北京: 国家能源局, 2023.
- 收稿日期: 2024-01-17; 网络首发日期: 2024-06-17
- 作者简介:
李震(1995), 男, 助理工程师, 硕士, 研究方向为电力市场、储能、需求侧响应, mzyclz@163.com;
陈巨龙(1983), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电价、储能等, julongchen@qq.com;
高天(2000), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为重力储能能效特性分析以及提升策略, goghti0622@163.com。

征 稿 启 事

《南方电网技术》是由中国南方电网公司主管、南方电网科学研究院有限责任公司主办的电力技术类科技期刊,向国内外公开发行人。刊登电力系统的科研、规划、设计、工程、生产运行、设备和系统维护等方面的成果、经验和动态,尤其是科研创新方面的论文。设有特约专稿、高压直流输电、高电压与绝缘、系统分析与运行、控制与保护、调度与通信、输变电技术、电力技术经济、智能电网、分布式电源与微电网、低碳电力等栏目。热烈欢迎国内外的电力研究人员、工程技术人员、大专院校师生踊跃投稿。

1 文稿要求

1) 文稿应未在其他刊物上发表过,译文稿件须附上原作者的书面许可证明。内容要有科学性、创新性和实用性;论点明确、数据可靠、说理严谨、数学推导简明;语言流畅、文字简练、层次分明、重点突出。

2) 学术论文请按 GB 7713—1987《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》书写,篇幅以版面不超过 9 000 字(包括图表所占篇幅)为宜。同时请写明如下 a、b、c、d、e 五项:

a) 作者署名(不宜超过 7 位)、作者单位、地址、电话、email 信箱和邮政编码;

b) 论文题目和作者单位英译文,作者姓名的汉语拼音;

c) 作者的简历,包括姓名、出生年、性别、籍贯、职称、学位、当前从事的研究或工作等项;

d) 350 字左右的中文摘要,3~8 个关键词,以及摘要和关键词相应的英文文本。摘要采用第三人称写法,内容包括论文的目的、方法、结果和结论;

e) 若为国家基金资助项目或部、省级重大科研攻关项目,请提供项目名称及编号。

2 书写格式

1) 要求文稿正文字号为 5 号,汉字字体为宋体,英数字体为 Times New Roman,希腊字体为 Symbol。文稿须采用可编辑的电子文档形式。

2) 计量单位采用国家法定计量单位和符号,不能用“大气压”、“kgf/cm²”、“卡”、“ppm”等已废除的计量单位。

3) 文中和公式中容易混淆的字符请注明文种(希文、英文、罗马字等)、大小写、上下标及上下标字母含义,表示矢量及矩阵的字符用黑斜体表示或特别注明。

4) 文稿标题中不宜用缩略词(化学符号和公知公用者除外);摘要和正文中的缩略词在第一次出现时必须写出全称,后加括号附缩略词。

3 表格、插图及参考文献

1) 表格尽量采用“三线表”。表格的上方写表序和表名。表名应有自明性且中文、英文表名并列。表注放在表底,缩入 1 个汉字以“注:”起头排版。

2) 插图的下方面应有图序和图名。图名应有自明性且中英文图名并列。工程图、电气图和函数图采用 AutoCAD、

Adobe Illustrator 或 Corel DRAW 软件绘制,工程图和电气图要符合国家标准规定,函数图要标明曲线序号及其注释,坐标轴上要有标值、标目,注明物理量和单位;数码照片图具备 200 万总像素以上。

3) 图片和表格中的文字、变量、单位和数字要齐全、清晰。

4) 参考文献应选用公开发表的资料,按引用的先后次序列表于文后,以[1]、[2]…标识序号,且与正文中的指示序号一致。按《信息与文献 参考文献著录规则,GB/T 7714—2015》和《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范,CAJ-CD B/T 1—2006 修订版试行稿》的要求著录文后参考文献。中文参考文献后要并列其英文译文(如示例[6]所示)。

文献类型及其标识为:普通图书[M];会议论文[C];报纸文章[N];期刊文章[J];学位论文[D];报告[R];标准[S];专利[P];汇编[G];档案[B];古籍[O];参考工具[K];其他未说明的文献类型,例如可公开的政府行政部门编号文件、行业或大公司的技术规范或工作手册[Z]。网上期刊[J/OL];网上电子公告[EB/OL]。电子文献尚需在载体标记后加上发表或更新日期(加圆括号)、引用日期(加方括号)和电子文献网址。

4 投稿

1) 请登录《南方电网技术》编辑部网站 <https://nfdwjs.csg.cn>,选择“作者登录”,登录或注册登录后选择投稿并按提示操作,登录方面出现问题请致电 020-36625646 咨询。

2) 投稿时务必附上联系电话(手机为佳)。

3) 编辑部不保证留存稿件,请作者自留底稿。稿件评审进程和结论可在《南方电网技术》编辑部网站上即时查询。作者也可致电 020-36625642、36625643 或发送电子邮件到 nfdwjs@csg.cn 向编辑部了解审稿情况。

4) 文章一经发表,编辑部便取得作者的自动授权,可将文章收录入本刊网站,及与本刊有合作关系的数据库。

参考文献著录格式示例:

- [1] 刘国钧,陈绍业,王凤翥. 图书馆目录[M]. 北京:高等教育出版社,1957:15-18.
- [2] 钟文发. 非线性规划在可燃毒物配置中的应用[C]//赵玮. 运筹学的理论与应用——中国运筹学会第五届大会论文集. 西安:西安电子科技大学出版社,1996:468-471.
- [3] 冯西桥. 核反应堆压力管道与压力容器的 LBB 分析[R]. 北京:清华大学核能技术设计研究院,1997.
- [4] 中国国家标准化管理委员会. 信息与文献 参考文献著录规则:GB/T 7714—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [5] 邓一刚. 全智能节电器:200610171314.3[P]. 2006-12-13.
- [6] 陈祥. 无线技术在现代电网管理中的应用与展望[J]. 南方电网技术,2009,3(6):85-89.
CHEN Xiang. Development of wireless technology in modern power grid management and its perspective [J]. Southern Power System Technology, 2009,3(6):85-89.
- [7] 王明亮. 关于中国学术期刊标准化数据库系统工程的进展[EB/OL]. (1998-08-16) [1998-10-04]. <http://www.cajcd.edu.cn/pub/wml.txt/980810-2.html>.

《南方电网技术》编辑部