

直线电机在竖井式重力储能中的应用和研究

史沁鹏¹, 郭茹¹, 洪剑锋^{2,✉}, 姜健宁¹, 曾小超¹, 张楠¹, 曹君慈²

(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. 北京交通大学, 电气工程学院, 北京 100044)

摘要: [目的] 竖井式重力储能技术作为新型储能技术之一, 因其安全性高, 对环境友好等特点, 成为当前储能领域的研究热点。由于基于传统旋转电机的系统只能运输单个重物, 不能通过改变运输不同重物数量来满足电网各种功率等级需求, 而直线电机的应用恰好可以解决这一问题, 因此应用直线电机的竖井重力储能系统备受人们关注。[方法] 文章介绍了基于直线电机的竖井式重力储能系统的基本工作原理, 总结了目前的几种系统结构和系统中直线电机的设计。[结果] 研究表明, 由于竖井式重力储能装置长距离运动, 重物块质量大等特点, 需要推力大、磁体和线圈绕组安装在动子上的直线电机。目前的研究主要集中在连续机混合游标直线电机、磁通切换永磁直线电机和直线开关磁阻电机上。3 种电机都由于自身特点适合于竖井式重力储能系统, 各有其特点和优势。[结论] 可以看出, 与传统旋转电机系统相比, 采用直线电机的系统具有诸多优势, 会逐渐成为竖井式重力储能技术方案的主流; 由于竖井式重力储能系统的系统特性, 直线电机的选取至关重要, 如果针对竖井式储能系统对直线电机的结构进行专门的设计, 将可以更好的发挥储能系统的优良性能, 推动竖井式重力储能技术的广泛应用。

关键词: 重力储能; 竖井式重力储能; 直线电机; 电机结构; 多功率等级

中图分类号: TM756.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)

OA: <https://www.energychina.press/>

Application and Research of Linear Motors in Vertical Gravity Energy Storage

SHI Qinpeng¹, GUO Ru¹, HONG Jianfeng^{2,✉}, JIANG Jianning¹, ZENG Xiaochao¹, ZHANG Nan¹, CAO Junci²

(1. North China Power Engineering Co., Ltd of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China;

2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: [Introduction] As one of the new energy storage technologies, vertical gravity energy storage has become a research hotspot in the field of energy storage because of its high safety and environmental friendliness. Systems based on the traditional rotary motors can only transport a single heavy load and cannot meet the various power level requirements of the power grid by changing the number of different loads transported. The application of linear motors, however, can effectively address this issue. Therefore, the vertical gravity energy storage systems using linear motors have garnered significant attention. [Method] This paper introduced the basic working principle of vertical gravity energy storage systems using linear motors and summarized the current system structures and the design of linear motors within these systems. [Result] The results show that due to the long-distance movement of the vertical gravity energy storage device and the large mass of the load block, a linear motor with large thrust and magnet and coil windings mounted on the mover is required. Current research focuses on consequent-pole linear vernier hybrid machines, flux-switched permanent magnet linear motors, and linear switched reluctance motors. All three types of motors are suitable for vertical gravity energy storage systems due to their unique characteristics and advantages. [Conclusion] It is evident that compared with the traditional rotary motor systems, systems using linear motors offer numerous advantages, and will gradually become the mainstream solution for vertical gravity energy storage technology. Given the system characteristics of vertical gravity energy storage, the selection of linear motors is crucial. If the structure of linear motors is specifically designed for vertical energy storage systems, the excellent performance of the storage system will be better leveraged to promote the widespread application of vertical gravity energy storage technology.

Key words: gravity energy storage; vertical gravity energy storage; linear motors; motor structure; multiple power levels

收稿日期: 2024-07-22 修回日期: 2024-09-10

基金项目: 中国电力工程顾问集团有限公司科技项目“新型重力储能技术应用研究”(DG2-D01-2023)

0 引言

随着碳达峰目标的提出,风能和太阳能等可再生能源应用越来越广泛^[1]。然而,由于其发电的随机性对电网稳定性的影响,可再生能源仍然面临挑战^[2-6]。为了减轻这些不确定性的影响,积极推进储能技术至关重要。在众多储能技术中,抽水蓄能应用最广泛,但存在应用周期长,地理和水体条件限制等局限性;飞轮储能充放电时间快,循环次数高,比较适合持续时间较短的应用;压缩空气储能放电深度地,响应时间长。与其他储能技术相比,重力储能技术由于其选址灵活、安全性高、对环境污染小的特点成为目前储能领域研究的热点之一^[7-10]。

重力储能根据其系统结构的不同分为活塞式重力储能、竖井式重力储能、垂直式重力储能和斜坡式重力储能等基本类型。其中,竖井式重力储能由于其可以废弃矿井建造,符合我国目前大量废弃矿山和煤矿的现状,节约建设成本、安全性高,成为目前备受关注的重力储能方案^[11-15]。目前竖井式重力储能装置主要使用旋转电机,和滑轮组、钢丝绳的一体化传动装置来实现重物的抬升和下降,具有不能同时运行多个重物的局限性^[16-17]。基于直线电机的竖井式重力储能装置采用直线电机进行直线运动,可同时运输多个重物,满足不同的功率需求,具有更加良好的发展前景。近年来国内外学者对该系统的研究和关注主要集中在以下几个方面:

1)重力储能系统结构与方案分析:如文献[17-18]对竖井式重力储能系统的合理性和适应性进行了分析,得出了竖井式重力储能系统所具有的优点和发展前景。文献[19]对竖井式重力储能系统结构进行了研究,指出了传统旋转电机在系统中应用的弊端,分析了直线电机应用所带来的优势。

2)应用直线电机的竖井式重力储能系统结构设计:竖井式重力储能系统采用直线电机后,其结构型式也各有不同,且优势也不尽相同,如文献[20-21]提出的两种不同的多通道的竖井式重力储能结构,单通道的完整竖井式重力储能技术方案^[22]等。

3)直线电机的选取和结构要求:根据竖井式重力储能系统结构的需求,学者探究了不同直线电机结构在重力储能系统中的适用性和优劣性,如连续极混合游标直线电机^[23]、磁通切换永磁直线电机^[24]、

直线开关磁阻电机^[25]等。

文章主要基于直线电机的竖井式重力储能系统(Linear Electric Motor-Gravity Storage System, LEMGES)的工作原理,对国内外基于直线电机的竖井式重力储能系统的技术方案及相关研究进行了介绍,阐述了基于直线电机的竖井式重力储能系统的不同结构及直线电机的选取,最后对目前的研究结论进行总结,以期对基于直线电机的竖井式重力储能技术的发展提供参考。

1 工作原理及系统结构

重力储能的基本原理如图1所示,具体阐述为:利用大质量重物作为储能介质,通过牵引电机控制介质的提升与降落。电价较低或电能富余时,电网提供电能,将下仓重物介质提升至上仓并堆叠存储,电能转化为重力势能;电价较高或电能匮乏时,上仓重物介质通过机械结构降落至下仓并堆叠存储,降落过程驱动发电机发电,最终输送至电网。

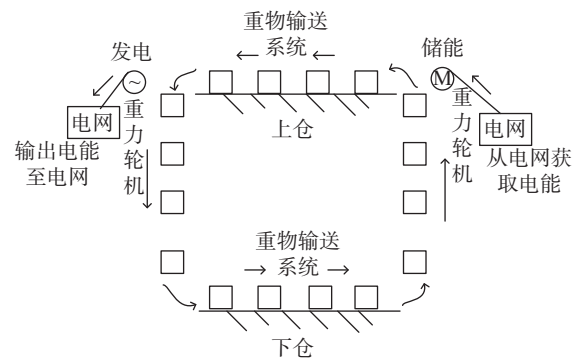


图1 重力储能原理图

Fig. 1 Schematic diagram of gravity energy storage

传统的竖井式重力储能装置由矿井、电力电子交流装置、钢丝绳和绞盘所组成的抬升系统及重物块所组成。装置使用旋转电机与牵引传动系统一体化装置,抬升和下降重物来实现能量的转换,这样的系统安全性高,但无法同时搭载多个重物,单给系统无法适应运行时满足不同功率水平的要求。另一方面传动牵引系统所带来的细绳和滑轮间的摩擦损耗会进一步降低系统的效率,牵引系统每次使用所带来对钢绳的磨损也会大大降低钢绳的使用寿命,造成安全隐患。

针对上述问题,直线电机具有无摩擦,损耗小、结构上去掉绳索后可以搭载多个重物等独特优势,

与竖井式重力储能系统十分契合。如图 2, 为国外由 Botha 等学者提出的 LEM-GES 系统^[18]。

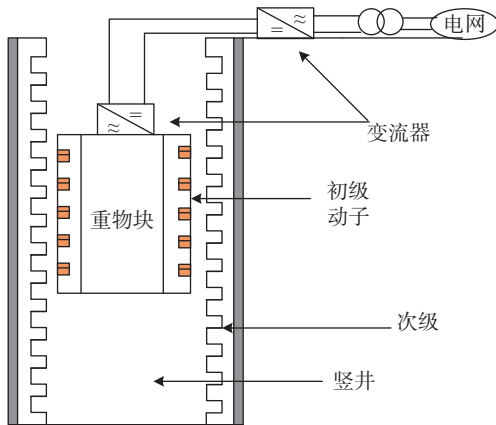


图 2 应用线性电机的重力储能装置截面图^[18]

Fig. 2 Profile of a gravity energy storage unit with linear motor

该系统通过悬挂 50 t 的重物将电能储存在地上或地下竖井中。直线电机竖井重力储能系统的横截面如图 2 所示, 为直线电机供电的变流器和直线电机初级安装在重物上形成动子, 竖井内部安装带有突出杆的定子。在充电期间, 重物通过直线电机提升到竖井顶部, 将电能存储为重力势能。放电时, 重物降低到竖井的底部, 存储的电能通过电力电子变流装置输送到电网中。

与旋转驱动系统相比, 线性直接驱动系统体积更小, 成本更低^[19]。使用线性机器进行竖井重力储能具有响应时间快、高系统效率等优点。如图 3^[18]所示, 与使用带有绳索的旋转驱动系统相比, LEM-GESS 装置能够在单个竖井中使用多个重物, 这点类似于无绳电梯, 而使用绳索的旋转驱动系统限制了像重力储能系统这样的系统中重物的数量, 单个系

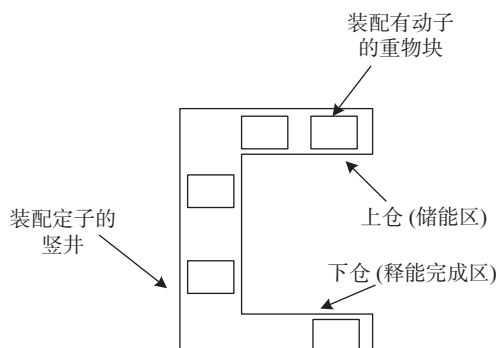


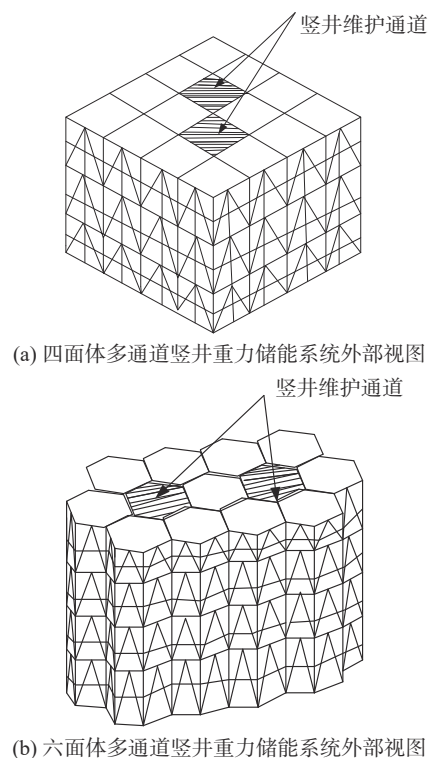
图 3 基于直线电机的竖井重力储能系统多重物抬升简图^[18]

Fig. 3 Sketch of lifting multiple loads in vertical gravity energy storage system based on linear motor

统的功率等级固定, 利用直线电机则可以实现产生不同功率等级需求的发电量。

2 LEM-GES 系统类型

由于直线电机与竖井式重力储能系统十分契合, 早在 2020 年, 国外 Botha 等学者基于竖井式重力储能系统, 提出了直线电机应用到竖井式重力储能系统中的想法, 并设计了由单个四面体竖井通道所组成的多通道竖井式重力储能系统, 如图 4(a)^[20]。而后于 2021 年提出了六面体结构的直线电机-竖井重力储能系统, 如图 4(b)^[21]。



(a) 四面体多通道竖井重力储能系统外部视图

(b) 六面体多通道竖井重力储能系统外部视图

图 4 两种 LEM-GES 结构的外部视图^[20-21]

Fig. 4 External views of two LEM-GES structures

图 4(a) 中是一个 100 m 的直线电机-竖井重力储能系统, 通过将竖井彼此相邻放置, 形成蜂巢状结构。阴影区域表示没有任何重物的竖井, 这些竖井主要用作日常维护接入点, 通过这些区域可以访问每个单独的竖井。该结构是高度模块化的, 具有高度的拓展性, 可以通过增加更多的竖井通道来增加储能容量。表 1 是该 LEM-GES 系统规格^[20]。

图 4(b) 中系统使用了六角形重物块, 重物块承载着直线电机所需电力电子转换器系统, 以及轴承、

表 1 LEM-GES 系统规格^[20]
Tab. 1 Specification of LEM-GES system

参数	100 m LEM-GES	1 000 m LEM-GES
竖井通道数	1 ~ 1 000	1 ~ 4
重物数量	10 ~ 10 000	1 ~ 1 000
能量等级	136 kWh ~ 136 MWh	

直线导轨和断路器系统,如图 5^[21]所示,重物块的质量为 50 t,在综合考虑材料密度和成本下,重物材料选择铁。

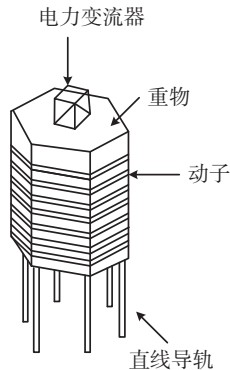


图 5 重物块示例^[21]

Fig. 5 Example of load block

图 5 中标示了四个直线导轨。直线导轨可以由机械部件组成,但会增加系统的维护成本,并由于轴承和导轨之间的接触引起的摩擦而降低整体效率。另一种选择是使用导磁板,利用磁力使得重物与内壁间没有摩擦。然而,使用这种导轨需要额外的电力电子设备来控制,从而增加了系统的复杂性和建设成本。

对于单通道的 LEM-GES 系统,中国矿业大学提出了基于直线电机和废弃矿井的重力储能系统一体化装置,如图 6^[22]所示,该系统包括储物系统、直线电机发电系统和能量输送系统。

该 LEM-GES 系统主要包括储物系统和直线发电系统连那个部分组成,上仓和下仓共同构成储物系统,储物系统包括地面储物室、井底储物室、堆放的重物块及推运机器人组成;储物室内均有重物 and 推运机器人,用于完成重物的储存、推运和取运工作。直线电机发电系统包括直线电机初级、直线电机次级、直线电机轨道和多个重物舱;直线电机发电系统有连通地面和井底的轨道,轨道之中有配备直线电机的重物舱,用于完成重物舱的运输工作和将重物

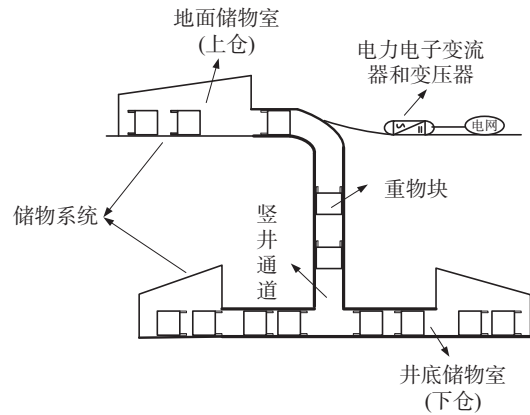


图 6 直线电机和废弃矿井的重力储能系统一体化装置^[22]
Fig. 6 Integrated gravity energy storage system with linear motor and abandoned shaft

舱的重力势能转化为电能。能量输送系统包括电网、变压器、电力电子变换器和储能设备;能量输送系统有与直线电机初级电连接的电力电子变换器,同时电力电子变换器电连接至储能设备或电网,用于完成电能的储存和输送工作。

LEM-GES 系统具有许多优点,由于是一种机电转换系统,因此可以在不损坏系统的情况下完全的充电和放电,且具有几乎无限的循环能力以及快速的响应时间。LEM-GES 还可以在任何地方建造,没有任何严格的场地限制。在定期维护的情况下,该系统还具有较长的使用寿命。由于该系统具有高度模块化的特性,因此可以在其整个生命周期内进行调整——无论是通过添加额外的竖井还是用更高效的新设计替换重物上的直线电机。同样,每个重物都可以独立于其他重物进行控制,因此,可以灵活调整控制策略。通过对电机设计和控制系统策略的改进,可以引入基于直线电机的重物变速操作,从而使系统放电时间可以根据需要在一定范围内改变,充电时间可以变得更快,进一步提高循环能力。

3 直线电机设计

直线电机技术直接将电能转换为线性运动,反之亦然,无需齿轮箱或钢丝绳等中间系统的参与。直线电机通常被用于波浪能转换器系统、磁悬浮(MAGLEV)列车和无绳电梯系统等。直线电机根据其结构形式可分为四种基本类型:圆柱形、扁平形、圆弧形和圆盘形。扁平形直线电机结构简单,成本和复杂度相对较低,对竖井式重力储能系统来说是

最合适的选择。

3.1 连续极混合游标直线电机

扁平形直线电机根据其工作原理和拓扑结构主要可分为直线直流电机、直线感应电机和永磁直线同步电机及直线开关磁阻电机等。直线电机与旋转电机类似,它的一侧带有电枢绕组,称为初级,另一侧称为次级,对应旋转电机中的定子和转子。对于像 LEM-GES 这样的系统,次级需要覆盖到整个竖井内壁上,因此,在整个竖井高度的内壁上放置铁磁材料和线圈绕组的成本非常高。因此,任何适合 LEM-GES 系统的直线电机拓扑都需要一个无源次级。根据这一特性,Botha 学者提出采用连续极混合游标直线电机(Consequent-Pole Linear Vernier Hybrid Machine, CP LVHM)应用在竖井式重力储能系统中^[21, 23]。该电机是基于磁齿轮效应的设计原理的复合型线性电机,具有高精度,高效率和高功率密度的特点,能够在高速和高效率下实现非常高的推力,且结构简单,制造方便^[26]。CP LVHM 在竖井式重力储能系统中的结构如图 7^[23]所示。

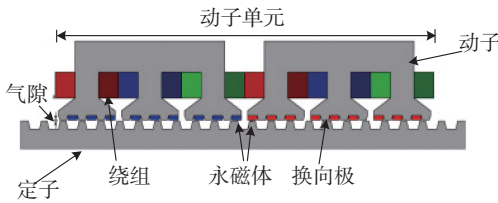


图 7 CP LVHM 的拓扑示例^[23]

Fig. 7 Example topology of CP LVHM

该电机的电驱绕组和永磁体放置在重物块上,形成初级动子。子单元由 2 个动子组成,每个动子有 3 个多极齿。电枢绕组和永磁体安装在动子单元上。动子上的每个齿由 6 个磁极组成,通过把 3 个动子齿彼此位移 120°来实现三相电机。竖井内壁覆盖次级长定子,构成导磁铁芯,采用该种电机大大降低了建设成本。表 2 为该种直线电机的关键设计参数^[23]。

直线电机在竖井式重力储能系统中的相关性能指标是平均推力 F_t 、力波动 F_r 、效率 η 和功率因数 PF, F_r 表示力的波动幅度,计算公式为:

$$F_r = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{F_t} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{P_{\text{in}} - P_{\text{cu}} - P_{\text{e}}}{P_{\text{in}}} \times 100\% \quad (2)$$

表 2 关键设计参数^[23]

Tab. 2 Key design parameters

参数	数值
相数	3
额定功率/kW	130
额定电压/V	250
每个重物的额定电流/A	376.8
额定速度/(m·s ⁻¹)	0.25
气隙长度/mm	1
定子齿高度/mm	32.9
定子齿距/mm	43.2
动子齿宽度/mm	129.6
永磁体宽度/mm	21.6
永磁体厚度/mm	9.1
动子单元长度/mm	864.3
每个动子单元的永磁体数量	18

式中:

P_{in} ——输入功率(kW), $P_{\text{in}} = F_t v$;

v ——电机速度(m/s);

P_{e} ——铁磁损耗(kW);

P_{cu} ——铜损(kW),其计算公式为:

$$P_{\text{cu}} = 3I_s^2 R_s \quad (3)$$

式中:

I_s ——每相电流(A);

R_s ——每相电阻(Ω)。

另一个重要指标是功率因数:

$$S_{\text{inv}} = \frac{P_t}{\text{PF}} \quad (4)$$

式中:

P_t ——每个重物运动产生的功率(kW);

S_{inv} ——每个重物所带逆变器的额定功率(kW)。

该方程说明了连续极混合游标直线电机的功率因数对系统成本的巨大影响, S_{inv} 用于确定电源转换器的成本。

3.2 磁通切换永磁直线电机

由于连续极混合游标直线电机在低功率因数下需求高额定功率的电力电子转换器,增加了竖井式重力储能系统的建设成本。因此,国外 Mogyema 学者新提出一种采用磁通切换直线永磁电机(Linear Permanent Magnet Flux Switching Machine, LPM-FSM)的竖井式重力储能系统^[24]。

磁通切换永磁直线电机 LPM-FSM 由磁极交替的磁铁组成,是一种双凸结构机器,其主动子由直流励磁绕组和电枢绕组组成。如图 8 所示^[24],环形直流励磁绕组和相邻的主动子齿形成主动子磁极。定子次级由层压的凸极制成,与后续极线性齿差混合机一样,价格昂贵的电枢绕组和永磁材料安装在较短的动子上,大大降低了材料成本。LPM-FSM 结构采用端部绕组长度短的非重叠绕组和紧凑的模块化结构,磁体的尺寸受重物宽度和长度的限制。

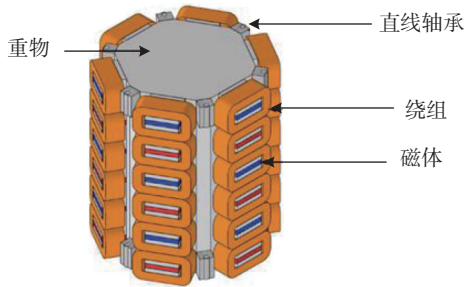


图 8 应用该种电机的竖井重力储能装置中的重物^[24]

Fig. 8 Load in vertical gravity energy storage system with this type of motor

磁通切换永磁直线电机的工作原理如图 9 所示^[27]。当次级与动子齿对齐时,沿着连接线圈的方向产生最大的磁通量,如图 9(a)所示。在图 9(b)中,次级极点与励磁线圈对齐,此时磁通链最小。当次级磁极再次与另一个动子齿对齐时,最大磁链再次以相反方向出现,如图 9(c)所示,磁链振幅和方向随次级极点位置的变化在线圈中感应出反电动势。

由于 LPM-FSM 的磁链振幅和极性的快速变化,该种电机在低速运行的状态下也能提供较高的推力,在竖井式重力储能系统中能够以低速推动质量较大的重物块,因此适合作为竖井式重力储能系统的不二选择。初级动子的速度和永磁体产生的关系如下:

$$v_{pm} = G_r v_t \quad (5)$$

式中:

v_{pm} ——初级动子的速度;

v_t ——磁场速度;

G_r ——电机的传动比,由极对数和定子齿数确定。该种电机的设计参数如表 3 所示。

3.3 直线开关磁阻电机

国内中矿大提出采用直线开关磁阻电机(Linear Switched Reluctance Motor, LSRM)应用于竖井式重

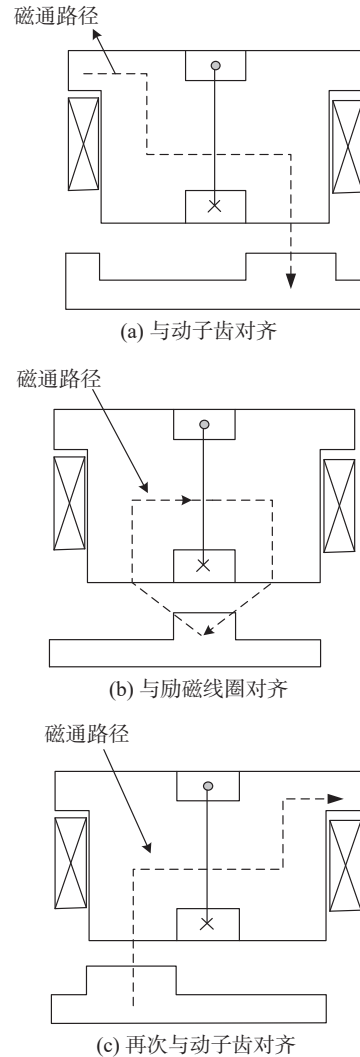


图 9 LPM-FSM 的工作原理^[27]

Fig. 9 Principle of LPM-FSM

力储能系统的技术方案^[25]。直线开关磁阻电机具有结构简单、成本效益高、系统可靠性强等诸多优势。根据其磁通方向,可分为纵向开关磁阻电机和横向直线开关磁阻电机。直线开关磁阻电机是根据传统旋转式开关磁阻电机改变而来,电机采用了双凸极结构,如图 10 所示^[28],永磁体和线圈接在相对较短的初级动子上,节约了建设成本。

与传统的直线电机相比,直线开关磁阻电机具有更强的电磁推力,适合应用于竖井式重力储能系统中,这得益于直线开关磁阻电机的结构。该电机的永磁体嵌入在动子齿和动子轭部之间,当线圈绕组通电后,永磁体产生磁场起到励磁作用,线圈绕组也产生励磁作用。两种磁场互相叠加增大了磁通量,因此具有更强的电磁推力。应用该直线开关磁阻电

表 3 电机关键设计参数^[27]
Tab. 3 Key design parameters

参数	数值
电流密度/(A·mm ⁻²)	4.2
每相串联匝数	75
气隙长度/mm	2
额定速度v/(m·s ⁻¹)	0.98
定子齿宽度/mm	26.7
定子槽宽度/mm	32.7
定子轭高度/mm	29.2
定子齿高度/mm	97.9
次级齿高度/mm	37.9
次级齿宽度/mm	28.8
永磁体宽度/mm	10.7
定子长度/mm	845.5
定子质量/kg	1 194.63
次级质量/kg	686.7
体积/m ³	0.34
频率/Hz	10.2

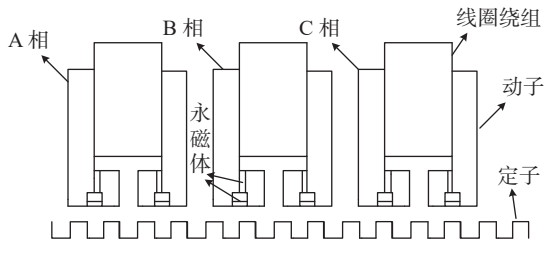


图 10 直线开关磁阻电机模型^[28]

Fig. 10 Model of linear switched reluctance motor

机的竖井式重力储能系统采用多储能块协同控制方法, 通过调整相同重量的储物块的速度来调节输出功率以满足不同功率水平下电网的需求^[29]。其主要思想是应用分布式协同算法, 实现多个分控制器之间的协同工作。在多储能块协同工作于发电模式时, 根据电网的功率需求, 总控制器分配好各重物块的运行速度, 在根据分配的速度指令下直线电机控制器调整好各重物块的运行速度, 系统输出所需的功率; 在多储能块协同工作于储能模式时, 总控制器根据直线电机从上到下的顺序分配速度指令, 直线电机将多余的电能转换为重力势能进行能量的存储。

3.4 电机性能对比

在基于直线电机的竖井式重力储能系统中, 直线电机推力的稳定性是一个重要的指标, 推力波纹

效应会降低机器的性能并引起振动, 影响竖井的结构强度。由于连续极混合游标直线电机和磁通切换直线永磁电机的磁阻较大, 对推力稳定性有很大的影响。根据相关的研究, 连续极混合游标电机推力波动最高, 为 14.7%, 磁通切换直线永磁电机推力波动为 8.4%^[30]。针对直线开关磁阻电机, 研究人员提出在每个动子上增加 2~3 个额外的齿槽的设计, 这种改动减小了初级和次级的宽度, 大幅减小了推力脉动^[31]。效率方面, 由于连续极混合游标直线电机电流密度较低, 铜面积较大, 所以有较低的铜损耗, 效率最高。功率因数方面, 连续极混合游标直线电机具有最低的功率因素, 这需求更大额定值的电力电子变换器, 从而带来成本增加的问题。推力方面, 三种直线电机由于其结构的特殊性, 都能产生较大的推力, 适合应用于竖井式重力储能系统。除了上述直线电机之外, 其他直线电机在目前的研究当中应用于竖井式重力储能系统中或多或少存在着缺陷。直线直流电机体积小、速度范围宽, 但主要适用于短距离应用, 对于长距离的竖井式重力储能系统需要对其进一步改进和研究; 双边形直线感应电机有较高的效率和较低的成本, 但其双边的并发运动需要较高的控制精度, 增加了系统的复杂性

4 结论

通过对基于直线电机的竖井式重力储能系统的工作原理、系统结构及直线电机应用的介绍, 得出以下结论:

1) 应用直线电机的竖井重力储能系统的独特优势: 采用直线电机可以运输多个重物, 满足电网的各种功率需求; 应用直线电机的竖井重力储能系统, 重物块的体积和竖井的宽度可以设计得更小, 在一定程度上能减小成本且具有更高的安全性; 没有齿轮箱和绳索的参与, 系统便于维护。

2) 目前应用直线电机的竖井式重力储能技术特点: 应用该项技术的重力储能系统结构众多, 多通道的该系统具有高度模块化的特性, 可以在生命周期内随时调整; 单通道的系统通过优化重物舱的运行参数可增加储能能量密度。系统中直线电机的研究主要集中在连续极混合游标直线电机、磁通切换永磁直线电机和直线开关磁阻电机。3 种电机都具有较大推力和短定子结构, 适合应用在竖井式重力储

能系统中。

3)未来针对竖井重力储能系统的长距离、推力需求大等特点对直线电机结构进行特殊设计,有望使直线电机竖井式重力储能技术成为重力储能领域的技术主流。

参考文献:

- [1] 周行,李少华,王慧,等. 光伏耦合电解水制氢系统的建模与仿真 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(3): 104-111. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.011](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.011).
ZHOU H, LI S H, WANG H, et al. Modelling and simulation of photovoltaic coupling water electrolysis hydrogen production system [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(3): 104-111. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.011](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.011).
- [2] 韦媚媚, 项定先. 储能技术应用与发展趋势 [J]. *工业安全与环保*, 2023, 49(增刊 1): 4-12. DOI: [10.3969/j.issn.1001-425X.2023.z1.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-425X.2023.z1.002).
WEI M M, XIANG D X. Application and development trend of energy storage [J]. *Industrial safety and environmental protection*, 2023, 49(Suppl.1): 4-12. DOI: [10.3969/j.issn.1001-425X.2023.z1.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-425X.2023.z1.002).
- [3] 汤匀, 岳芳, 王莉晓, 等. 全球新型储能技术发展态势分析 [J]. *全球能源互联网*, 2024, 7(2): 228-240. DOI: [10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2024.02.012](https://doi.org/10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2024.02.012).
TANG Y, YUE F, WANG L X, et al. International development trend analysis of new energy storage technologies [J]. *Journal of global energy interconnection*, 2024, 7(2): 228-240. DOI: [10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2024.02.012](https://doi.org/10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2024.02.012).
- [4] 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. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0441](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0441).
CHEN H S, LI H, XU Y J, et al. Research progress on energy storage technologies of China in 2023 [J]. *Energy storage science and technology*, 2024, 13(5): 1359-1397. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0441](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0441).
- [5] ANEKE M, WANG M H. Energy storage technologies and real life applications-A state of the art review [J]. *Applied energy*, 2016, 179: 350-377. DOI: [10.1016/j.apenergy.2016.06.097](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097).
- [6] RUOSO A C, CAETANO N R, ROCHA L A O. Storage gravitational energy for small scale industrial and residential applications [J]. *Inventions*, 2019, 4(4): 64. DOI: [10.3390/inventions4040064](https://doi.org/10.3390/inventions4040064).
- [7] MOORE S K. The ups and downs of gravity energy storage: startups are pioneering a radical new alternative to batteries for grid storage [J]. *IEEE spectrum*, 2021, 58(1): 38-39. DOI: [10.1109/MSPEC.2021.9311456](https://doi.org/10.1109/MSPEC.2021.9311456).
- [8] 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. DOI: [10.3969/j.issn.2095-560X.2022.03.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-560X.2022.03.010).
- XIA Y, WAN J F, LI J C, et al. Research progress of gravity energy storage technology [J]. *Advances in new and renewable energy*, 2022, 10(3): 258-264. DOI: [10.3969/j.issn.2095-560X.2022.03.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-560X.2022.03.010).
- [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. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0590](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0590).
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. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0590](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2021.0590).
- [10] 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. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0789](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0789).
QIU Q Q, LUO X Y, LIN Y X, et al. Research progress and key technologies in vertical gravity energy storage systems [J]. *Energy storage science and technology*, 2024, 13(3): 934-945. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0789](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0789).
- [11] 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. DOI: [10.1016/j.est.2022.105226](https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105226).
- [12] 修雅馨, 刘钦节, 付强, 等. 废弃矿井地下空间物理储能方式对比与优选 [J]. *绿色矿冶*, 2024, 40(2): 6-13. DOI: [10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.02.002](https://doi.org/10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.02.002).
XIU Y X, LIU Q J, FU Q, et al. Comparison and optimization of physical energy storage methods in underground space of abandoned mines [J]. *Sustainable mining and metallurgy*, 2024, 40(2): 6-13. DOI: [10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.02.002](https://doi.org/10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.02.002).
- [13] 张品, 姚丽英, 陈吉顺, 等. 废弃矿井重力储能现状分析及构想 [J]. *内蒙古煤炭经济*, 2024(3): 9-11. DOI: [10.3969/j.issn.1008-0155.2024.03.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-0155.2024.03.004).
ZHANG P, YAO L Y, CHEN J S, et al. Analysis and conception of gravity energy storage in abandoned mines [J]. *Inner Mongolia coal economy*, 2024(3): 9-11. DOI: [10.3969/j.issn.1008-0155.2024.03.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-0155.2024.03.004).
- [14] 刘志强, 宋朝阳. 闭坑矿井竖井筒开发再利用科学探索 [J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(1): 18-24. DOI: [10.13199/j.cnki.cst.2019.01.003](https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2019.01.003).
LIU Z Q, SONG Z Y. Scientific exploration of development and reutilization of vertical shafts in closed mines [J]. *Coal science and technology*, 2019, 47(1): 18-24. DOI: [10.13199/j.cnki.cst.2019.01.003](https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2019.01.003).
- [15] MORSTYN T, CHILCOTT M, MCCULLOCH M D. Gravity energy storage with suspended weights for abandoned mine shafts [J]. *Applied energy*, 2019, 239: 201-206. DOI: [10.1016/j.apenergy.2019.01.226](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.226).

- [16] 杨彦群, 刘钦节, 周京军, 等. 一种用于废弃煤矿重力储能系统及布置方法: 116207869A [P]. 2023-06-02.
YANG Y Q, LIU Q J, ZHOU J J, et al. Gravity energy storage system for abandoned coal mine and arrangement method: 116207869A [P]. 2023-06-02.
- [17] 宋立平, 董宝光, 王东军, 等. 一种基于矿井立井筒、提升、运输系统的重力储能系统: 209536772U [P]. 2019-10-25.
SONG L P, DONG B G, WANG D J, et al. Gravity energy storage system based on mine shaft erecting, lifting and transporting system: 209536772U [P]. 2019-10-25.
- [18] BOTH A C D, KAMPER M J. Capability study of dry gravity energy storage [J]. *Journal of energy storage*, 2019, 23: 159-174. DOI: [10.1016/j.est.2019.03.015](https://doi.org/10.1016/j.est.2019.03.015).
- [19] DU Y, CHENG M, CHAU K T, et al. Comparison of linear primary permanent magnet Vernier machine and linear Vernier hybrid machine [J]. *IEEE transactions on magnetics*, 2014, 50(11): 8202604. DOI: [10.1109/TMAG.2014.2317805](https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2317805).
- [20] BOTH A C D, KAMPER M J. Linear electric machine-based gravity energy storage for wind farm integration [C]// Proceedings of 2020 International SAUPEC/RobMech/PRASA Conference, Cape Town, South Africa, January 29-31, 2020. Cape Town: IEEE, 2020: 1-6. DOI: [10.1109/SAUPEC/RobMech/PRASA48453.2020.9041100](https://doi.org/10.1109/SAUPEC/RobMech/PRASA48453.2020.9041100).
- [21] BOTH A C D, KAMPER M J, WANG R J. Design optimisation and cost analysis of linear Vernier electric machine-based gravity energy storage systems [J]. *Journal of energy storage*, 2021, 44: 103397. DOI: [10.1016/j.est.2021.103397](https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103397).
- [22] 鲍久圣, 曹靖雨, 阴妍, 等. 一种基于直线电机和废旧矿井的重力储能系统: 117458724A [P]. 2024-01-26.
BAO J S, CAO J Y, YIN Y, et al. Gravity energy storage system based on linear motor and waste mine: 117458724A [P]. 2024-01-26.
- [23] MUGYEMA M, RABADIA M M, BOTH A C D, et al. Design and control of a linear electric machine based gravity energy storage system [C]//Proceedings of the 30th Southern African Universities Power Engineering Conference, Durban, South Africa, January 25-27, 2022. Durban: IEEE, 2022: 1-8. DOI: [10.1109/SAUPEC55179.2022.9730745](https://doi.org/10.1109/SAUPEC55179.2022.9730745).
- [24] MUGYEMA M, KAMPER M J, WANG R J. Design and evaluation of a linear permanent magnet flux switching machine for use in dry gravity energy storage [C]//Proceedings of 2023 IEEE International Magnetic Conference, Sendai, Japan, May 15-19, 2023. Sendai: IEEE, 2023: 1-5. DOI: [10.1109/INTERMAG50591.2023.10265013](https://doi.org/10.1109/INTERMAG50591.2023.10265013).
- [25] YAN W J, YANG H W, XIN J, et al. Linear motor topology study and prospect of abandoned mine-type/mountain gravity energy storage [C]//Proceedings of the 4th International Conference on Power Engineering, Macau, China, December 11-13, 2023. Macau: IEEE, 2023: 133-138. DOI: [10.1109/ICPE59729.2023.10468747](https://doi.org/10.1109/ICPE59729.2023.10468747).
- [26] ALMORAYA A A, BAKER N J, SMITH K J, et al. Development of a double-sided consequent pole linear Vernier hybrid permanent-magnet machine for wave energy converters [C]//Proceedings of 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, Miami, FL, USA, May 21-24, 2017. Miami: IEEE, 2017: 1-7. DOI: [10.1109/IEMDC.2017.8002157](https://doi.org/10.1109/IEMDC.2017.8002157).
- [27] MUGYEMA M, KAMPER M J, WANG R J. Design optimization of a linear wound field flux switching machine for dry gravity energy storage [C]//Proceedings of the 14th International Symposium on Linear Drivers for Industry Applications, Hannover, Germany, June 28-30, 2023. Hannover: IEEE, 2023: 1-5. DOI: [10.1109/LDIA59564.2023.10297529](https://doi.org/10.1109/LDIA59564.2023.10297529).
- [28] 孙海涛, 陈燕, 常晓敏, 等. 永磁式开关磁阻直线电机的设计及分析 [J]. *太原理工大学学报*, 2017, 48(2): 232-236. DOI: [10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2017.02.016](https://doi.org/10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2017.02.016).
SUN H T, CHEN Y, CHANG X M, et al. Design and analysis of a type of linear permanent magnet switch reluctance motor [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2017, 48(2): 232-236. DOI: [10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2017.02.016](https://doi.org/10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2017.02.016).
- [29] 闫文举, 杨宏伟, 孙芯竹, 等. 废旧矿井用直线电机重力储能装置及其多储能块协同控制方法: 117639015B [P]. 2024-06-21.
YAN W J, YANG H W, SUN X Z, et al. Linear motor gravity energy storage device for waste mine and multi-energy-storage-block cooperative control method of linear motor gravity energy storage device: 117639015B [P]. 2024-06-21.
- [30] MUGYEMA M, KAMPER M J, WANG R J, et al. Performance and cost comparison of drive technologies for a linear electric machine gravity energy storage system [J]. *IEEE access*, 2024, 12: 46953-46966. DOI: [10.1109/ACCESS.2024.3383161](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3383161).
- [31] PAN J F, CHEUNG N C, ZOU Y. An improved force distribution function for linear switched reluctance motor on force ripple minimization with nonlinear inductance modeling [J]. *IEEE transactions on magnetics*, 2012, 48(11): 3064-3067. DOI: [10.1109/TMAG.2012.2202376](https://doi.org/10.1109/TMAG.2012.2202376).

作者简介:



史沁鹏

郭茹

1973-, 女, 正高级工程师, 电力系统及其自动化专业学士, 长期

史沁鹏(第一作者)

1979-, 男, 正高级工程师, 电力系统及其自动化专业硕士, 长期从事储能技术研究工作 (e-mail) shiqp@ncpe.com.cn。

从事电厂电力设计工作(e-mail)guoru@ncpe.com.cn。



洪剑锋

洪剑锋(通信作者)

1988-, 男, 北京交通大学副教授, 清华大学电气工程博士, 主要从事新型储能系统技术、电气传动控制研究工作(e-mail)jfhong@bjtu.edu.cn。

姜健宁

1989-, 男, 高级工程师, 自动化专业学士, 长期从事储能技术研究工作(e-mail)jiangjn@ncpe.com.cn。

曾小超

1970-, 男, 正高级工程师, 电力系统及其自动化专业学士, 长期从事火电、新型储能等电力工程设计工作(e-mail)zengxc@ncpe.com.cn。

张楠

1980-, 女, 正高级工程师, 电气工程及其自动化专业学士, 长期

从事电气工程设计工作(e-mail)zhangnan@ncpe.com.cn。

曹君慈

1979-, 男, 教授, 电气工程博士, 长期从事新型储能技术、电气传动技术等研究工作(e-mail)jccao@bjtu.edu.cn。

项目简介:

项目名称 新型重力储能技术应用研究(DG2-D01-2023)

承担单位 中国电力工程顾问集团有限公司

项目概述 项目主要研究重力储能技术路线、结构布置方案、机电系统配置、大功率电动/发电机技术及其运行控制, 掌握应用于具体场景的重力储能电站成套技术方案。

主要创新点 (1)借鉴已有的重力储能结构, 提出新型重力储能系统结构;(2)运用多目标寻优算法, 得出最优系统运行参数;(3)对核心设备进行参数选取, 确定相关系统配置规划原则。

(编辑 徐嘉铖)