

文章编号:0254-0096(2020)07-0158-07

太阳能电梯的研究与开发

徐政¹, 李旭¹, 李博¹, Makimattila Simo²

(1. 清华大学深圳国际研究生院电力系统国家重点实验室深圳研究室, 深圳 518055; 2. 通力电梯有限公司, 昆山 215300)

摘要: 针对老楼加装电梯改造工程中面临的配电线路可能短时超载、建设与运行费用分摊协调困难等问题, 研究光伏+储能的太阳能电梯系统方案, 开发对原电梯控制系统无任何影响的太阳能电梯控制器, 实现光伏优先、电网补充的双电源供电模式。光伏阵列对配套的蓄电池充电, 提供电梯运行所需的电能; 在电梯运行过程中, 蓄电池既能及时提供大功率驱动电能消除对配电线路的冲击, 又能高效吸收回馈电能降低系统的能耗, 并且保证停电时电梯的正常运行。实验结果表明, 光伏发电效率高, 电机驱动与能量回馈动态特性良好, 电梯运行平稳。

关键词: 太阳能发电; 电梯; 变频器; 电池管理系统; 节能

中图分类号: TM615

文献标志码: A

0 引言

21世纪中国已进入老龄化社会, 为方便老年人出行, 北京和上海等地既有多层住宅增设电梯的需求逐渐凸显, 政府也相继出台了相关的财政补贴政策, 但多重因素导致项目实施并不顺利^[1-2]: 1) 居住不同楼层的业主对加装电梯的态度不一, 难以满足必须获得全体业主同意的立项条件; 2) 尽管能够享受到政府高达40%的补贴, 仍需要业主按楼层分级分摊高达数十万元的出资以及日后的运行与维修费用; 3) 电梯的运行功率大, 可能导致居民区配电线路过载或不稳定, 需要对配电网进行改造, 牵涉面更广。针对上述问题, 除了需要制订和落实相关的政策及做好协调工作, 还应在技术与产品上有所创新, 太阳能电梯就是一个值得探讨的解决方案。

关于太阳能电梯的研究近几年刚起步, 仅有为数不多的文献^[3-5]和实用新型专利申请^[6-8], 关注点均局限于太阳能利用与节能, 且大都停留在基本概念构思和系统结构设计, 缺少具体控制装置和方法的研究报告, 也没有具有参考价值的工程案例与运行数据介绍。现有的太阳能电梯系统结构方案大同小异, 即利用光伏发电向蓄电池充电, 再由蓄电池向电梯驱动变频器的直流母线注入所需的驱动电能或吸收回馈能量, 是最简单高效的

系统方案。电梯上下移动时功率大, 但大部分时间处于静止等待状态, 平均能耗较低, 所以所需光伏阵列的配套容量并不大, 而蓄电池作为中间缓冲环节, 能够有效抑制功率波动对配电线路的影响。另一方面, 电梯对可靠性、稳定性和安全性要求很高, 所以太阳能电梯的设计应当尽量减少对电梯原有控制系统的影响。

作为校企合作项目, 本团队基于通用小型电梯的规格参数和运行特性, 设计光伏+储能的太阳能电梯系统方案, 并开发集光伏发电、智能充电、动态供电与能量回馈于一体的控制器原理样机, 搭建系统运行状态的远程监控平台, 并在电梯试验塔进行长期实机运行实验。本文主要介绍系统方案设计、控制器软硬件开发和实验结果, 分析和总结下一步产品样机开发中需解决的问题, 以为太阳能电梯的推广应用提供参考依据。

1 太阳能电梯设计方案

1.1 电梯的基本运行特性

在老楼改造增设电梯工程中, 以中小型低速曳引式电梯为主, 其结构由轿厢、曳引机、对重、钢丝绳和滑轮等组成, 如图1所示。钢丝绳两端分别固定在轿厢和对重上, 由变频器驱动电机, 带动曳引轮转动, 利用曳引轮与钢丝绳之间的摩擦力带动轿厢运动。电梯的能耗分曳引机驱动与电气控制(包括轿厢、门、制动器等)两部

收稿日期: 2018-01-18

通信作者: 徐政(1960—), 男, 博士、副教授, 主要从事电力电子技术、光伏发电技术研究和产品开发方面的研究。

xuz@sz.tsinghua.edu.cn

分。当轿厢与对重中较重的一端向上运动时,曳引机处于电动机运行状态,消耗电能;反之,则处于发电机运行状态,产生电能,导致变频器直流母线电压升高。为抑制直流母线电压上升,大型电梯使用能量回馈电路将这部分电能回送至电网,同时达到节能的目的。而中小型电梯(额定载荷 13 人/1000 kg 以下)考虑到性价比,通常用制动电阻消耗这部分电能。

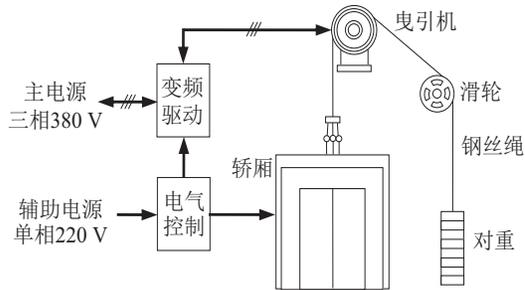


图1 曳引式电梯的结构

Fig. 1 Configuration of a traction elevator

对一台额定载荷为 6 人/450 kg、驱动变频器额定功率为 10 kW 的电梯进行运行特性测试,试验塔设 3 层平台。从空载依次增加 75 kg 砝码直至满载,上下运行,监测曳引机和辅助设备功耗、直流母线电压等。电梯上行或下行 1 层(6 m)和 2 层(12 m)的实测耗时分别约为 7 s 和 14 s,图 2 为电梯上下运动两层时的功率与直流电压变化曲线,表 1 为基于功率曲线计算得到的不同运行状态下曳引机的能耗。

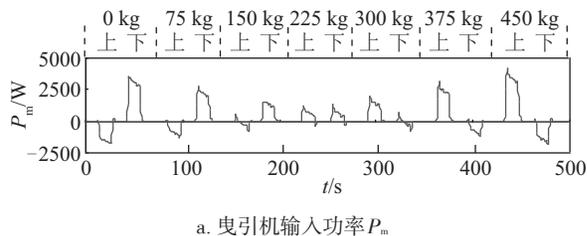
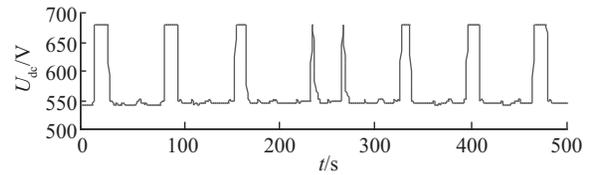
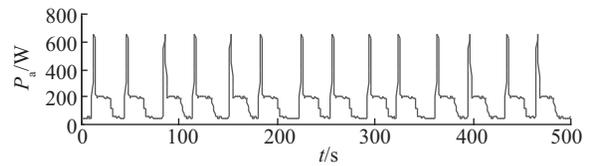
a. 曳引机输入功率 P_m b. 直流母线电压 U_{dc} c. 辅助设备功率 P_a

图2 电梯运行特性

Fig. 2 Operating characteristics of an elevator

图 2 和表 1 所示结果表明:

1) 曳引机的输入功率随载荷的大小而变。轿厢空载上升时,输入功率为负,峰值约 -1.8 kW,处于发电机运行状态;空载下降时,处于电动机运行状态,峰值功率约 3.6 kW。当处于半载状态时,轿厢与对重的重量基本相等,输入功率小。轿厢满载上升时,峰值功率高达 3.8 kW;满载下降时,处于发电机工作状态,峰值功率约 -1.9 kW。

2) 当曳引机处于静止等待或电动机运行状态时,变频器直流母线电压由电网输入支撑,稳定在约 540 V。当曳引机处于发电机运行状态时,回馈电能导致直流母线电压上升,用制动电阻消耗多余的电能,直流母线电压被控制在 680 V。

3) 电气控制系统等的辅助设备用电功率随运行状态而变。静止时,仅有轿厢(无配套空调)内的通风照明等设备用电,功率约 45 W。当上下运动时,首先要松开制动器,触发功率约 650 W,持续 3 s;此后保持功率约 200 W,直至轿厢停稳。

表1 曳引机能耗

Table 1 Energy consumption of traction machine

载荷量/kg	能耗/Wh					
	单层上行	单层下行	单层循环	双层上行	双层下行	双层循环
0	-2.20	6.02	6.02	-5.91	11.92	11.92
75	-1.09	3.63	3.63	-3.32	8.68	8.68
150	-0.46	3.10	3.10	-0.62	5.12	5.12
225	0.72	0.74	1.46	2.52	2.32	4.84
300	1.35	0.35	1.70	5.64	-0.48	5.64
375	2.79	-0.92	2.79	8.86	-2.73	8.86
450	5.28	-2.19	5.28	13.71	-5.20	13.71

4)作为老楼居民用电梯,使用频度相对较低。假定电梯每天运行 18 h,每小时上下 15 个来回,且各种载荷与楼层的次数基本相等,则根据表 1 的能耗数据,计及变频器 95%的转换效率,可知曳引机的全天能耗约为 1.7 kWh。加上辅助设备的用电量约 1 kWh,电梯 1 天(24 h)的总用电量约为 2.7 kWh,全年用电量 985 kWh。

1.2 太阳能电梯的结构设计

太阳能电梯是在原有电梯系统中增加光伏发电和储能设备,实现电网与光伏相结合的双电源供电结构。光伏阵列与蓄电池均输出直流电压,故电梯控制系统中的直流环节是光伏与储能的最佳接入点。图 3 为本文设计的太阳能电梯系统构成,底部一排为原有电梯控制系统,上方两排为新增的光伏+储能系统。光伏阵列通过充电控制器向蓄电池充电;当蓄电池的荷电量比较充足时,DC 升降压控制器中的升压电路将电能注入到变频器的直流母线,通过将直流母线电压抬高至 590 V,实现对曳引机的优先供电;当曳引机处于发电机运行状态,DC 升降压控制器中的降压电路将电能馈入蓄电池,并保持直流母线电压稳定。

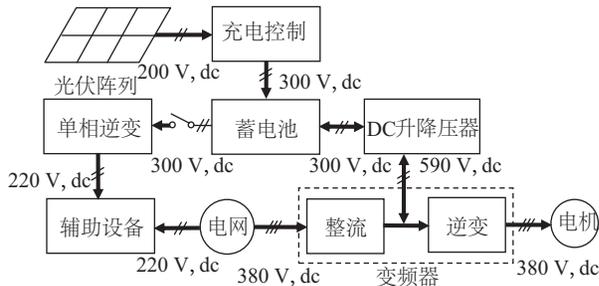


图 3 太阳能电梯的结构

Fig. 3 Configuration of a solar elevator

电气控制等的辅助设备需要单相 220 V 供电,可选择两种不同的方式。一种是正常时由电网供电、断电时由蓄电池通过单相逆变器供电,另一种方式是全时由蓄电池逆变供电。

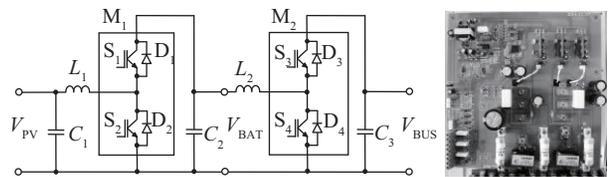
根据被试电梯的实测结果,最大瞬时功率约为 4 kW,全天用电量约为 2.7 kWh,则蓄电池可选用 300 V/5 kWh 的锂电池,最大充放电电流小于 1 C,在无电网和光伏供电的状态下能够保证电梯全天正常运行。较高的电压有利于提高控制器的转换效率,为了保证连续阴雨天气条件下的光伏供电量,配套光伏阵列的峰值功率选为 2 kW,全年发电能力约 2000 kWh,高于电梯用电量。

基于上述系统配置,无论配电网正常与否,太阳能电梯都能利用光伏发电和蓄电池的储能,保证持续可靠、高效节能运行。

2 光伏供电控制器的开发

2.1 硬件电路设计

根据图 3 所示的太阳能电梯结构,控制器主电路由 3 个变换器组成:升压充电、升压馈电与降压回馈。升压和降压分别采用 Boost 和 Buck 电路。鉴于升压馈电与降压回馈电路不会同时工作,故选用两单元串联封装的 IGBT 模块,上下 2 个 IGBT 分别作为 Buck 电路和 Boost 电路的开关器件,而反向并联的二极管又分别作为 Boost 电路的逆止二极管和 Buck 电路的续流二极管。主电路拓扑如图 4a 所示,3 组端口分别接光伏阵列、蓄电池和变频器直流母线,模块 M1 用于升压充电控制,其中 S_1 被闭锁, D_1 作为逆止二极管, S_2 实施 PWM 控制。模块 M2 用于馈电与回馈控制,升压馈电时 S_3 被闭锁、 S_4 实施 PWM 控制;降压回馈时 S_3 实施 PWM 控制、 S_4 被闭锁。电容 C_1 的作用是抑制光伏阵列输出电流的纹波,以提高最大功率点跟踪(MPPT)控制精度, C_2 用于抑制开关动作与寄生电感产生的尖峰电压, C_3 能够防止控制器与变频器直流母线之间的电压振荡。控制电路采用 32 位精简指令集单片机,内置多个 PWM 控制模块,通过专用光耦隔离模块进行 IGBT 的驱动与保护。图 4b 为电路板成品,外形尺寸 310 mm×285 mm,集驱动、电源、控制、采样和保护功能于一体。



a. 主电路拓扑

b. 电路板

图 4 太阳能电梯控制器

Fig. 4 Controller for solar elevator

2.2 控制程序设计

借助于蓄电池的支撑作用,实现光伏与馈电/回馈相互独立的控制。设定蓄电池的正常工作电压范围为 280~330 V。光伏发电控制根据光伏阵列与蓄电池的输出电压切换控制模式,如图 5a 所示。当光照不足,光伏阵列的输出电压 V_{pv} 低于 150 V 时,保持待机模式;随

着光照的增强, V_{PV} 高于 150 V, 且蓄电池未充满电, 其输出电压 V_{BAT} 低于 330 V 时, 进入 MPPT 充电模式; 当 V_{BAT} 高于 330 V 时, 切换至恒压充电模式。馈电/回馈控制则根据直流母线与蓄电池电压切换控制模式, 如图 5b 所示。当蓄电池荷电量低、 V_{BAT} 低于 280 V 时, 不向直流母线馈电, 利用电梯回馈电能和电网输入, 对蓄电池进行降压充电控制。当 $280 \text{ V} < V_{BAT} < 330 \text{ V}$, 根据直流母线电压 V_{BUS} 切换升压馈电和降压回馈控制模式: 三相全波整流的 V_{BUS} 约为 540 V, 曳引机处于静止或电动机运行状态时控制器作升压馈电控制, 将 V_{BUS} 提升至 590 V, 实现光伏优先供电; 若曳引机处于发电机运行状态, 回馈电能使 V_{BUS} 升高, 当 V_{BUS} 升至 620 V 时控制器切换至降压回馈控制模式, 将多余电能充入蓄电池, 并将 V_{BUS} 控制在 620 V 以内, 直至回落到 590 V。若蓄电池充满电、 $V_{BAT} > 330 \text{ V}$, 不作降压回馈控制, V_{BUS} 继续升至 680 V 时, 由制动电阻消耗多余的电能。

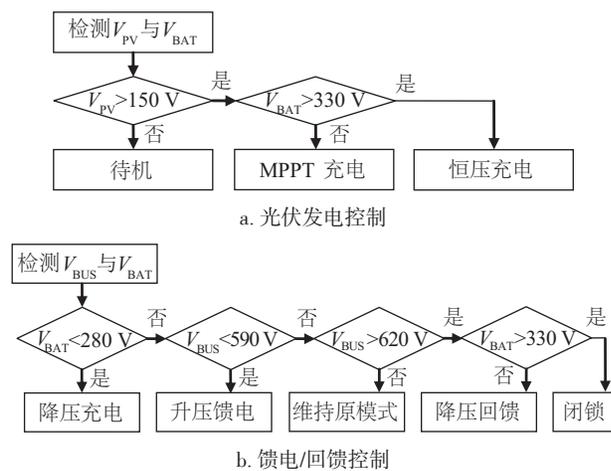


图5 控制程序框图

Fig. 5 Block diagram of control program

3 实验结果

新开发的控制器的功能与性能测试在实验室中进行, 用动力电源、光伏模拟直流电源、蓄电池、通用变频器及电机负载设备搭建一个与电梯相似的实验系统, 检验控制器的稳态特性(MPPT 精度、电压控制精度、转换效率、保护功能等)和动态特性(负载变化响应速度、模式切换等)。实验结果表明, 控制器各项功能正常, 性能指标满足设计要求。

现场实验地点设在昆山, 在通力电梯公司的电梯试验塔的顶部铺设光伏阵列(如图 6 所示), 采用 14 块多晶硅光伏组件(300 W/30.9 V), 可满足 13 人/1000 kg 电

梯的试验需要, 正南朝向分前后 2 排, 每排 7 块串联, 倾角与当地纬度保持一致, 本实验使用其中一排。在顶层机房内安装太阳能电梯控制器和锂电池(2 套锂电池的容量分别为 307 V/38 Ah 和 300 V/17 Ah), 与前述被试电梯的变频控制器相连。用数字功率计、示波器与智能电表检测和记录运行状态, 并开发远程监控系统, 以实现异地对电梯运行的异地监控。

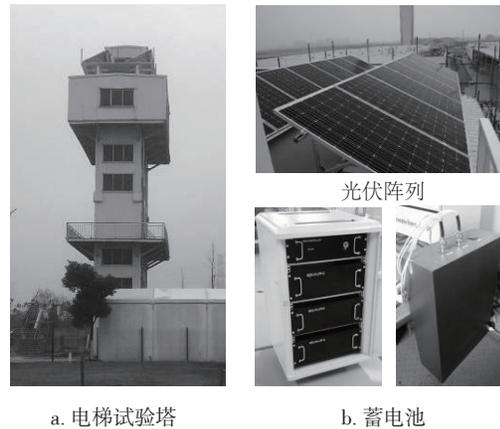


图6 现场实验系统

Fig. 6 Field-testing system

图 7 为不同载荷条件下电梯上下运动两层时的功率与直流电压变化曲线, 表 2 为基于功率曲线计算得到的蓄电池的输出电能。

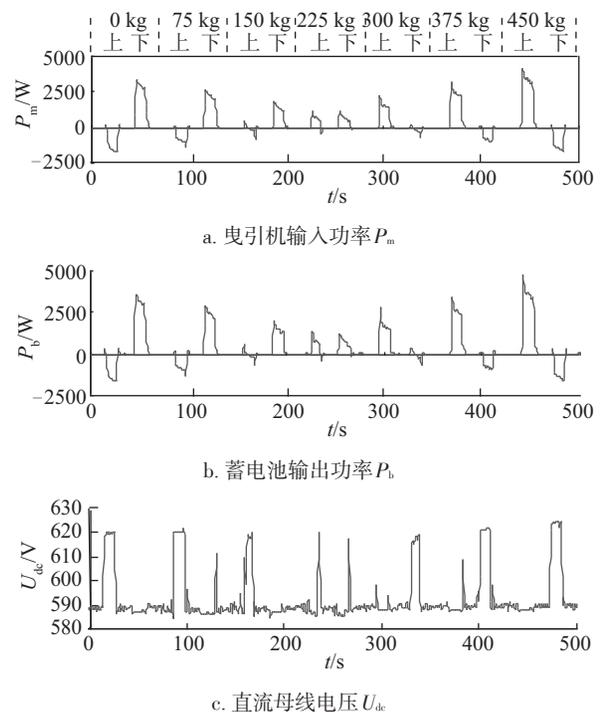


图7 太阳能电梯运行特性

Fig. 7 Operating characteristics of solar elevator

表2 蓄电池输出电能
Table 2 Battery output energy

载荷量/kg	蓄电池输出电能/Wh					
	单层上行	单层下行	单层循环	双层上行	双层下行	双层循环
0	-1.89	6.57	4.68	-5.27	12.31	7.04
75	-0.81	3.97	3.16	-2.90	9.42	6.52
150	-0.25	3.47	3.22	-0.15	5.25	5.10
225	0.96	0.93	1.89	2.37	2.90	5.27
300	1.56	0.52	2.08	6.14	-0.25	5.89
375	3.15	-0.69	2.46	9.31	-2.38	6.93
450	5.80	-1.84	3.96	14.18	-4.56	9.62

由图7和表2可见:

1) 蓄电池输出功率曲线与曳引机输入功率曲线保持高度一致,表明控制器的动态响应迅速。结合表1和表2可知,经变频器逆变电路和控制器馈电/回馈电路的两级变换,约有7%的电能损失。

2) 直流母线电压控制精准,馈电和回馈控制时分别稳定在590和620V。

3) 根据表2的实测能耗数据,按照与前述相同的使用频度计算,全天由蓄电池提供的驱动电能约为1.3kWh。加上辅助设备的用电量约1kWh,电梯一天的总用电量约为2.3kWh,全年用电量840kWh,能量回馈充电控制产生全年145kWh的节能效益。

当蓄电池充满电时,光伏发电系统进入恒压充电模式,仅在曳引机处于电动机运行状态期间,才能实施MPPT控制,故光伏发电量受蓄电池容量大小的影响。为确认光伏阵列不受限制的发电能力,首先使用2.1kW的光伏阵列和大容量蓄电池(10kWh),实测不同天气条件下全天的光伏发电量,结果为晴天10kWh、多云天6kWh、阴雨天2kWh。

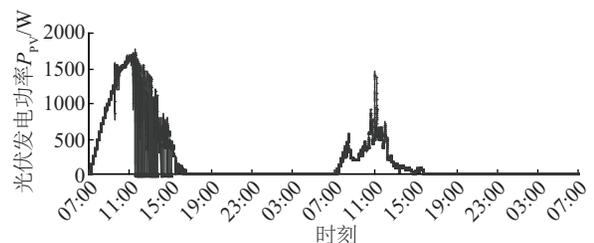
为验证太阳能电梯长期运行的可靠性、光伏阵列与蓄电池容量配置的合理性,将电梯设为自动运行模式,轿厢保持空载,约每分钟随机选择上行或下行1层或2层,光伏(2.1kW)与蓄电池(5kWh)仅向曳引机供电,并暂时关闭降压充电模式。图8所示为2017年12月上旬连续运行48h的实测结果,全面展现了图5所示的各种控制模式。每天(24h)运行统计次数1550次(单层985次,双层665次),电能表显示日耗电量5.55kWh。

第1天为晴天,全天由光伏与蓄电池向曳引机供电。07:00~12:00时段:光伏发电功率随太阳辐照度平滑增大,持续为蓄电池充电, V_{BAT} 逐渐上升;伴随馈电与回馈运行模式的切换, V_{BUS} 在590~620V内变化。12:00~17:00时段:蓄电池已充满电, V_{BAT} 升至330V,

仅在曳引机处于电动机运行状态时,光伏发电才能实施短时MPPT控制,输出功率跳变;因不作能量回馈控制, V_{BUS} 最高上升至由制动电阻控制的680V。17:00~次日07:00时段:光伏发电系统停止运行,全天最大光伏发电功率为1.77kW,总发电量达6.28kWh。由蓄电池继续向曳引机供电, V_{BAT} 不断下降, V_{BUS} 在590~620V内变化。

第2天为阴天,光伏与蓄电池仅能在白天向曳引机供电。07:00~16:00时段:光伏发电功率随太阳辐照度先增大后减小,为蓄电池充电,但由于光伏发电量有限, V_{BAT} 也呈先上升后下降的变化趋势,由光伏和蓄电池向曳引机供电, V_{BUS} 在590~620V内变化。16:00~17:00时段:光伏发电系统停止运行,全天最大光伏发电功率为1.45kW,总发电量仅2.23kWh。由蓄电池继续向曳引机供电, V_{BAT} 不断下降, V_{BUS} 在590~620V内变化。17:00~次日07:00时段:蓄电池荷电量低, V_{BAT} 低于280V,不能向曳引机供电,故由电网供电, V_{BUS} 跌至540V。当曳引机处于发电机运行状态,回馈控制将多余电能充入蓄电池, V_{BUS} 被稳定在620V以内, V_{BAT} 缓慢回升。

由于实验中轿厢空载时曳引机的能耗大,而且每天自动运行1550次,导致阴雨天条件下光伏与蓄电池不能提供足够的电能。但是,实际应用中电梯的运行频度与载荷状态远低于上述实验设定,所以光伏阵列与蓄电池的容量配置能够满足电梯运行需求。



a. 光伏发电功率

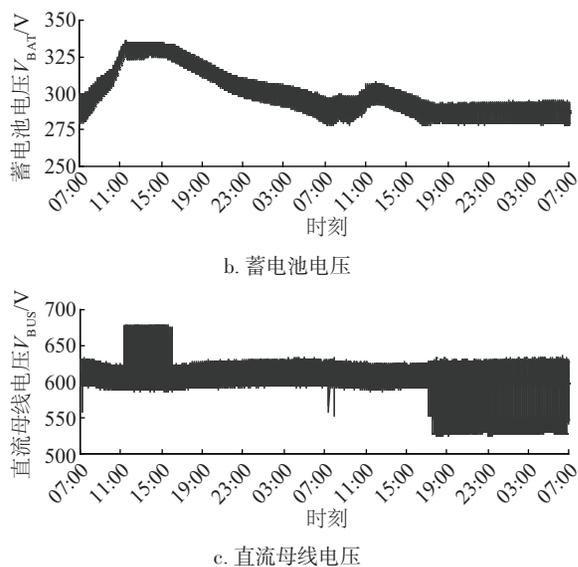


图8 连续运行实验结果(48 h)

Fig. 8 Experimental results of continuous operation (48 h)

4 结 论

本文针对老楼加装电梯的需求,研究太阳能电梯系统方案,开发控制器设备,并通过实验验证,得到以下主要结论:

1) 光伏+储能变频器直流母线注入电能的太阳能系统,一举解决了短时大功率负载对配电网的影响、回馈能量的高效回收及太阳能的高效利用这3个问题。

2) 控制方法简单可靠,对电梯原有控制系统的运行与特性没有任何影响,形成了电网与光伏无缝对接的双电源供电系统。

3) 光伏阵列与蓄电池的配套容量并不大,所需安装空间小,适宜与老楼建筑结构相结合。

4) 加装太阳能电梯的投资比普通电梯约增加10%,主要是因为目前锂电池的价格高,还需通过降低电池成本和优化容量配置两条途径逐步提高系统的性价比。

[参考文献]

[1] 张骏华. 上海市既有多层住宅增设电梯探索[J]. 住宅科技, 2013, 33(4): 43-46

ZHANG J H. Probe into addition of elevators of existing multi-storey residences in Shanghai [J]. Housing science, 2013, 33(4): 43-46.

[2] 杨叶, 孙明, 龚联, 等. 北京市既有多层住宅增设电梯相关问题探讨[J]. 建筑与文化, 2017(1): 137-138.

YANG Y, SUN M, GONG L, et al. The discussion on adding elevators in Beijing existing multi-storey residential buildings [J]. Architecture & culture, 2017 (1): 137-138.

[3] 陈洁. 基于混合拖动的电梯节能装置的研发[J]. 机电技术, 2014(5): 131—134

CHEN J. Research and development of elevator energy saving device based on hybrid drag [J]. Mechanical & electrical technology, 2014(5): 131-134.

[4] 周敏杰, 史旺旺, 冯均永. 支持新能源接入的直驱式电梯控制系统的研究[J]. 电气传动, 2015, 45(6): 10-15.

ZHOU M J, SHI W W, FENG J Y. Research for new energy powered solar direct-drive elevator control system [J]. Electrical drive, 2015, 45(6): 10-15.

[5] GAICEANU M, NICHITA C, STATESCU S. Photovoltaic power conversion system as a reserve power source to a modern elevator [C]//3rd International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials (ENEFM), Oludeniz, Turkey, 19-23 October 2015: 37-46.

[6] 王泽和, 郑召信, 周家存, 等. 太阳能电梯: CN201406245[P]. 2010-02-17.

WANG Z H, ZHENG Z X, ZHOU J C, et al. Solar elevator: CN201406245[P]. 2010-02-17.

[7] 朱晟, 石慧秋, 卢海斌, 等. 能量回馈型太阳能电梯: CN203199848U[P]. 2013-09-18.

ZHU S, SHI H Q, LU H B, et al. Energy feedback solar elevator: CN203199848U[P]. 2013-09-18.

[8] 何琼, 肖春华, 李明仕. 一种太阳能电梯控制系统: CN204721028U[P]. 2015-10-21.

HE Q, XIAO C H, LI M S. A solar elevator control system: CN204721028U[P]. 2015-10-21.

RESEARCH AND DEVELOPMENT ON SOLAR ELEVATOR

Xu Zheng¹, Li Xu¹, Li Bo¹, Makimattila Simo²

(1. *National Key Laboratory of Power Systems in Shenzhen, Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China*; 2. *KONE Elevators Co., Ltd., Kunshan 215300, China*)

Abstract: In view of the possible overloading of distribution power line in a short time and the difficulty of allocating and coordinating the construction and operation costs in the project of elevator renovation for the old building, a solar elevator system scheme consisting of photovoltaic (PV) array and energy storage device is studied elaborately in this paper. A solar elevator controller without causing any influence on the original control system is developed to implement a kind of dual-power-supply mode that the PV generation is preferred and the conventional power supply is as the supplement during operation. The PV array aims to charge the matching battery so as to provide the power required by the elevator. On the other hand, during the operation process of the elevator, the battery not only can provide the high-power driving energy in time to eliminate the power shock on the distribution power line, but also can absorb the feedback energy efficiently to reduce system energy consumption whilst keeping the normal operation of elevator during power outage. The experimental results demonstrate that there is a high efficiency of PV generation, and the dynamic characteristics in the motor-driven and energy feedback parts perform well. All in all, the whole solar elevator system operates smoothly.

Keywords: solar power generation; elevators; electric inverters; battery management systems; energy conservation