

# 基于图形逻辑分析的光伏储能系统能量管理方法

钟倩文<sup>1</sup>, 孙以泽<sup>1</sup>, 陈玉洁<sup>1</sup>, 彭乐乐<sup>2</sup>

(1. 东华大学机械工程学院, 上海 201620; 2. 上海工程技术大学城市轨道交通学院, 上海 201620)

**摘 要:** 考虑现阶段市场普遍采用的峰谷分时阶梯电价机制, 该文给出一种基于图形逻辑分析方法, 以应用双向逆变器的光伏储能系统用户日用电消费最低为目的创新型能量管理方法。该方法通过分析每日用户用电量与光伏发电量, 储能系统状态, 结合现行电价与光伏补贴价格, 设计光伏储能系统电能的合理流动及控制算法。利用电力公司的用户用电量、光伏发电量数据及上海市实际电价, 验证该图形逻辑分析方法的有效性。计算表明在该方法控制下用户日用电消费明显降低; 运算速度在相同仿真计算平台下, 相比于普通寻优方法显著提高。

**关键词:** 能量管理; 能量存储; 光伏发电; 储能控制; 图形逻辑分析; 双向逆变

**中图分类号:** TK01<sup>18</sup>

**文献标志码:** A

## 0 引 言

光伏发电作为可再生能源发电的重要组成部分具有波动性、间歇性和不确定性的特点, 大规模光伏发电并网会给传统电力系统的规划、运行和控制带来挑战。因此, 储能系统作为实现电力系统动态供需平衡和提供调频调压辅助服务的一种有效技术, 在可再生能源发电接入电网技术中而备受关注<sup>[1-2]</sup>。伴随可再生能源应用技术及储能技术的发展, 双向逆变器技术越来越引起研究人员的关注。其除具有传统并网逆变技术外, 还包括储能技术和离网技术的 DC/AC 及 AC/DC 转换功能。该技术的发展进一步为光伏储能系统能量管理优化调度提供更多的可能性<sup>[3-4]</sup>。储能系统在提高稳定性, 改善电能质量, 节能经济运行等方面更具有巨大优势。但要更好的实现储能系统的上述优点, 就急需研究人员在综合考虑光伏储能系统各部分协同工作及电力市场的具体情况的基础上, 给出光伏储能系统的合理有效的优化控制策略<sup>[5-6]</sup>。

本文针对现行分时电价机制, 在不降低用户满意度的条件下, 提出一种创新型直观性的图形逻辑分析方法, 以达到光伏储能系统用户日用电消费最低的能源管理控制。该方法在运算速度与运算次数具有显著优势。利用光伏储能系统实际历史用电数据、光伏发电量数据及上海市实际电价验证本文提出的能源管理控制策略的有效性, 速度与普通寻优算法相比提高 800 倍以上。

## 1 方 法

### 1.1 光伏储能系统及相关参数定义

本文的研究对象为可并网/离网光伏储能系统, 一般包括光伏组件, 双向逆变器, 直流变压器, 储能设备(本文主要考虑储能电池, 但并不特指电池具体种类), 储能设备控制器等<sup>[7-8]</sup>。如图 1 所示, 光伏组件和电网可被看作电能来源, 其中光伏发电产生的能量流动用虚线表示, 电网来源的能量流动用实线表示。光伏组件产生的直流电能一方面可通过直流变压器直接给储能电池充电储存以备在用电高峰或电价高峰使用, 另一方面可通过光伏并网逆变器直接并入电网, 从而获得光伏并网收益。电网而来的电能一则可直接提供用户整个能量系统中的负载使用, 二则也可在较低电价时储存在储能电池中留备电价高峰时使用, 从而减少用户用电消费。

为进一步提高控制的有效性和精度, 光伏储能系统中各设备的效率也考虑在了整个控制策略中。如图 1 所示,  $\eta_{in}$  表示逆变过程的效率,  $\eta_{com}$  表示变压过程效率,  $\eta_c$ 、 $\eta_d$  分别表示储能电池的充电和放电效率。除此之外, 为了储能电池的安全可持续使用, 一般的生产制造商都会给定建议的电池最低放电电压或最大放电量, 从而避免电池完全放电造成损害或减少电池使用寿命。因此, 本文为简化电池的计算和排除电池种类不同的影响,  $B_{max}$  表示电池在正常工作下充满后的最大可用

收稿日期: 2017-09-15

基金项目: 东华大学博士学位论文创新基金(CUSF-DH-D-2013059)

通信作者: 孙以泽(1958—), 男, 硕士、教授、博士生导师, 主要从事光伏集成及逆变技术方面的研究。sunyz@dhu.edu.cn

电量,  $B_0$  表示电池每日在零时(24:00)的初始可用电量,  $B_t$  表示电池在  $t$  时的可用电量。

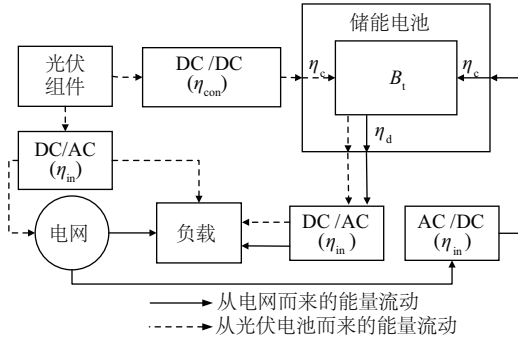


图1 光伏储能系统能量流动示意图<sup>[9]</sup>

Fig. 1 Schematic of energy flow in a PV-battery system<sup>[9]</sup>

## 1.2 图形逻辑分析方法

本文中的图形逻辑模型囊括了整个光伏储能系统的主要设备的随时间变化的变量值,包含光伏组件发电量、负载用电量、电价和光伏上网电价。通过把上述相关元素变量描绘在同一张图形中,分析给出以未来24 h中的用户用电消费最低为目的的合理的光伏储能系统能源管理控制策略<sup>[9]</sup>。

具体方法:所有相关变量绘制在同一坐标系统中,横坐标轴表示某日中的24个小时,纵坐标轴表示电价(如如图2、图3的横、纵坐标轴),电价及光伏上网电价绘制其中,电价的高低变化可把每天的24 h分割成不同的时段。在此基础上,未来1天预测光伏发电量与用户用电需求绘制于同一张图中,并使用副纵坐标轴表示电能,2种变量的相交点可以进一步把时间分割出几个条件不同的时段。图2中,光伏发电量与用户用电负荷之间的阴影面积表示未来一日的某个特定时间内的电能差。由此,结合具体电价及产能与需求的差异,逻辑分析在不同时间段内储能电池的控制方法及提前从经济角度控制储能电池充放电合理电能。

## 1.3 考虑效率影响

在适当时间使用何种设备的能量能最有效的降低用户的用电花费,及如何更合理的在低电价区间储备能量以便在电价处于高电价区间中使用,这2个问题均需要考虑光伏储能系统各设备的效率来比较计算<sup>[9]</sup>,如式(1)~式(9)所示:

$$x \cdot ReT_p \leq x / (\eta_{in} \cdot \eta_c \cdot \eta_d \cdot \eta_{in}) \cdot ReT_{op} \quad (1)$$

$$x / (\eta_{in} \cdot \eta_c \cdot \eta_d \cdot \eta_{in}) \cdot ReT_{op} \leq x \cdot ReT_p \quad (2)$$

$$y \cdot (\eta_{con} \cdot \eta_c \cdot \eta_d \cdot \eta_{in}) \cdot ReT_p \leq y \cdot \eta_{in} \cdot FiT \quad (3)$$

$$y \cdot (\eta_{con} \cdot \eta_c \cdot \eta_d \cdot \eta_{in}) \cdot ReT_{op} \leq y \cdot \eta_{in} \cdot FiT \leq y \cdot (\eta_{con} \cdot \eta_c \cdot \eta_d \cdot \eta_{in}) \cdot ReT_p \quad (4)$$

$$y \cdot \eta_{in} \cdot FiT \leq y \cdot (\eta_{con} \cdot \eta_c \cdot \eta_d \cdot \eta_{in}) \cdot ReT \quad (5)$$

式中,  $x$ ——用户需求电量, kWh;  $y$ ——光伏组件发电量, kWh;  $ReT$ ——零售电价 (retail tariff), ¥/kWh;  $FiT$ ——光伏发电上网电价 (feed-in tariff), ¥/kWh;  $T$ ——时段, 下标 op 为谷时段 (off-peak), p 为峰时段 (peak)。

式(1)不等号左侧表示使用电网电能直接供电的情况,即用电消费为在电价高峰时段直接从电网获取用户实时需求电量;不等号右侧表示在电价高峰时段使用储能电池在低谷时段储存电量供电的情况,用电消费为在电价低谷时段通过对储能电池充电耗电量及放电过程中所耗电量的消费总和。考虑各装置效率,为了满足电价高峰时段的用电量  $x$ , 电价低谷时从电网获取电量依次通过 AC/DC、储能电池充电控制、储能电池放电控制、DC/AC, 所以总电量为  $x / (\eta_{in} \cdot \eta_c \cdot \eta_d \cdot \eta_{in})$ 。

在满足式(1)情况下可明显看出,在电价高峰时段实时使用电网供电小于等于提前在电价低谷时段储能而后使用储能电池供电的用电花费,也就是说如果实际峰谷分时阶梯电价满足式(1),则无需使用储能电池提前预存电网电量;同理可知,满足式(2)条件时,在电价低谷时段提前使用电网给储能电池充电以备在电价高峰时段使用可以有效降低用户的用电消费;式(3)不等号左侧表示光伏发电首先被储存在储能电池中而后被使用情况下的电费值,不等号右侧表示光伏发电直接并入电网的用户收益。值得注意的是,光伏发电并入电网一定是在自用有余的条件下,即光伏发电量大于用电实时需求的情况下才会并入电网,产生收益。所以满足式(3)的情况下,光伏发电直接并入电网的收益大于等于先存储后使用的控制策略,故而光伏发电所能给用户提供的最大利益的方法就是直接并入电网;类似,式(4)表示光伏发电直接并网收益小于等于光伏发电先存储后在电价高峰时段使用的节省电费值,但是大于等于光伏发电先存储后在电价低谷时段使用的节省电费值。这种情况下,以降低用户花费为目标的最优控制策略就是把光伏发电存储在储能电池中留待电价高峰时段使用;式(5)表示光伏发电直接并网收益在任何时段均小于先存储后使用控制策略,故而在此种情况下应该尽量减少光伏发电量直接并网电量,增加自留存储光伏发电量以备后用。

## 2 能源管理控制算法

如表1所示,从实际电价考虑,当前上海市户用型光伏储能系统符合下述情况,以分档1为例,符合式(4)。

表1 上海市现阶段采用的分时电价<sup>[10]</sup>Table 1 Current ToU tariff of Shanghai<sup>[10]</sup>

电量水平/千瓦时·(户·年) <sup>-1</sup>		时段	电价/元·kWh <sup>-1</sup>	
			低压	10 kV
分档1档	(0, 3120]	06:00~22:00, 22:00~次日 06:00	0.617, 0.307	0.612, 0.306
分档2档	(3120, 4800]	06:00~22:00, 22:00~次日 06:00	0.677, 0.337	0.672, 0.336
分档3档	高于4800	06:00~22:00, 22:00~次日 06:00	0.977, 0.487	0.972, 0.486

如图2所示,光伏上网电价现阶段为0.42元/kWh,在这种情况下光伏上网电价比分时阶梯电价低价高,比分时阶梯电价高价低。也就是说光伏自用有余发电量只有被用在电价高位时才合理。对于是否应该把电价高位时的用电量向电价低位时转移,则应该再分析具体情况是否满足式(1)或者式(2),即满足式(1),则低价时段电量并不需要提前预存在储能电池中以备高价时段使用,因为并不会比实时使用从电网而来的高价时段电能消费低;相对而言,如果满足式(2),则需要控制策略继续合理利用电池转移低价电能至高价时段使用。本文这里仅针对后一种相对复杂的情况给出控制策略。图2中,光伏与负载电能的相交点(平衡点)可把24h分割成不同的时段,如 $t_1$ 和 $t_2$ ;电价的高低变化可进一步把每天的24h分割成不同的时段,如 $t_3$ 和 $t_4$ 。 $A_{1,1}$ 、 $A_{1,2}$ 分别代表0~ $t_3$ 时段负载与光伏发电电能差和 $t_3$ ~ $t_1$ 时段负载与光伏发电电能差; $A_{3,1}$ 、 $A_{3,2}$ 分别代表 $t_2$ ~ $t_4$

时段负载与光伏发电电能差和 $t_4$ ~第24时段负载与光伏发电电能差; $A_2$ 代表 $t_1$ ~ $t_2$ 时段光伏发电与负载点能差。

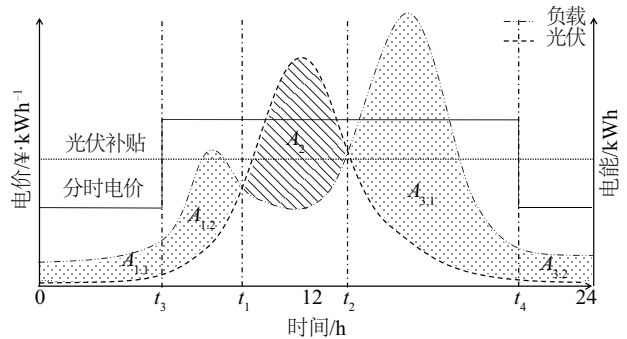


图2 光伏储能系统满足公式(4)条件示意图

Fig. 2 Scenario for a ToU and flat FiT under Eq.(4)

表2列出了在光伏上网电价比分时电价低价高,比分时电价高价低情况下并且系统满足式(2)时,光伏储能

表2 满足式(4)条件下的光伏储能系统未来24小时控制算法

Table 2 Control algorithm for PV-storage system under Eq.(4) of next 24 hours

时间	条件	控制策略	$B_t$
0~ $t_3$	$B_{\max} \cdot \eta_d \cdot \eta_{in} < A_{1,2} + A_{3,1}$	电网电能给电池充满 $(B_{\max} - B_0)/(\eta_{in} \cdot \eta_c)$ 从电网购电 $A_{1,1} + (B_{\max} - B_0)/(\eta_{in} \cdot \eta_c)$	$B_{t_3} = B_{\max}$
	$\begin{cases} B_0 \cdot \eta_d \cdot \eta_{in} < A_{1,2} + A_{3,1} \\ B_{\max} \cdot \eta_d \cdot \eta_{in} \geq A_{1,2} + A_{3,1} \end{cases}$	电网电能给电池充电 $((A_{1,2} + A_{3,1})/(\eta_d \cdot \eta_{in}) - B_0)/(\eta_{in} \cdot \eta_c)$ 从电网购电 $A_{1,1} + [(A_{1,2} + A_{3,1})/(\eta_d \cdot \eta_{in}) - B_0]/(\eta_{in} \cdot \eta_c)$	$B_{t_3} = (A_{1,2} + A_{3,1})/(\eta_d \cdot \eta_{in})$
	$B_0 \cdot \eta_d \cdot \eta_{in} \geq A_{1,2} + A_{3,1}$	停止使用电池,从电网购电 $A_{1,1}$	$B_{t_3} = B_0$
$t_3 \sim t_1$	$B_{t_3} > A_{1,2}/(\eta_d \cdot \eta_{in})$	电池放电 $A_{1,2}/(\eta_d \cdot \eta_{in})$ , 从电网购电量零	$B_{t_1} = B_{t_3} - A_{1,2}/(\eta_d \cdot \eta_{in})$
	$B_{t_3} \leq A_{1,2}/(\eta_d \cdot \eta_{in})$	电池放电 $B_{t_3}$ 至可用电量为零, 从电网购电 $A_{1,2} - B_{t_3} \cdot (\eta_d \cdot \eta_{in})$	$B_{t_1} = 0$
$t_1 \sim t_2$	$B_{t_1} < (A_{3,1} + A_{3,2})/(\eta_d \cdot \eta_{in})$	电网电能给电池充电 $(B_{\max} - B_{t_1})/(\eta_{in} \cdot \eta_c)$ , 光伏发电量剩余并网 $\eta_{in} \cdot [A_2 - (B_{\max} - B_{t_1})/(\eta_{in} \cdot \eta_c)]$	$B_{t_2} = B_{\max}$
	$B_{t_1} \geq (A_{3,1} + A_{3,2})/(\eta_d \cdot \eta_{in})$	停止使用电池,光伏发电量并网 $\eta_{in} \cdot A_2$	$B_{t_2} = B_{t_1}$
$t_2 \sim t_4$	$B_{t_2} > A_{3,1}/(\eta_d \cdot \eta_{in})$	电池放电 $A_{3,1}/(\eta_d \cdot \eta_{in})$ , 从电网购电量零	$B_{t_4} = B_{t_2} - A_{3,1}/(\eta_d \cdot \eta_{in})$
	$B_{t_2} \leq A_{3,1}/(\eta_d \cdot \eta_{in})$	电池放电 $B_{t_2}$ 至可用电量为零, 从电网购电 $A_{3,1} - B_{t_2} \cdot (\eta_d \cdot \eta_{in})$	$B_{t_4} = 0$
$t_4 \sim 24$ h	$B_{t_4} > A_{3,2}/(\eta_d \cdot \eta_{in})$	电池放电 $A_{3,2}/(\eta_d \cdot \eta_{in})$ , 从电网购电量零	$B_{24} = B_{t_4} - A_{3,2}/(\eta_d \cdot \eta_{in})$
	$B_{t_4} \leq A_{3,2}/(\eta_d \cdot \eta_{in})$	电池放电 $B_{t_4}$ 至可用电量为零, 从电网购电 $A_{3,2} - B_{t_4} \cdot (\eta_d \cdot \eta_{in})$	$B_{24} = 0$
	$B_{t_4} = 0$	停止使用电池,从电网购电 $A_{3,2}$	$B_{24} = 0$

系统未来一日控制策略。表 2 的第 1 列是未来一日的“时间”;第 2 列“条件”,列举了在未来一日各时间段起始时间所有可能发生的情况;第 3 列“控制策略”——对应了第 2 列所列出的可能发生情况下的控制操作;第 4 列“ $B_i$ ”给出了每一时间段通过相应控制操作下结束时电池的储能状态值,因为在这种情况下系统只需考虑 2 条原则:1)尽量减少使用电网高价时段电能;2)与光伏自用有余发电相比要更优先考虑使用电网低价时段电能。具体各时段控制策略详见表 2。

### 3 算例及结果分析

本节通过上海市现阶段实际电价来验证上述控制策略方法的有效性。上海市现采用的电价机制如表 1 所示。采用澳洲电力公司 Ausgrid 公开的 300 户用户 2010 年 7 月 1 日~2011 年 6 月 30 日为 1 年的用电量数据和光伏发电量数据,观察记录时间间隔为每 0.5 h。选取典型具有早晚用电高峰的用户(No.13),该用户装置 2.22 kW 光伏组件,平均日用电量 11.992 kWh。分时阶梯电价电量水平采用分档 1(详见表 1)的具体数据来进行计算如图 3 所示。运算中,根据文献[11-14],假定逆变过程的效率  $\eta_{in}$  取 0.95,变压过程效率  $\eta_{con}$  取 0.95,储能电池的充电效率  $\eta_c$ 、储能电池的放电效率  $\eta_d$  分别取为 0.85 和 0.90。

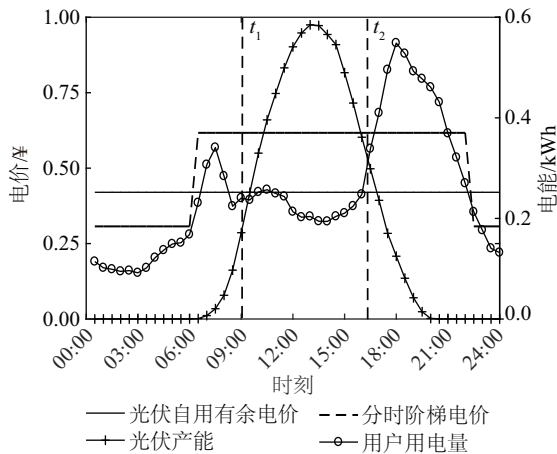


图3 户用型光伏储能系统实际算例<sup>[9]</sup>

Fig. 3 Real case of PV-battery system<sup>[9]</sup>

#### 3.1 改变电池容量的影响

首先,通过固定储能电池未来一日初始状态值,来观察改变电池容量对整个光伏储能系统的影响,如图 4 所示。从图 4 可明显看到除了本身处于充满状态下的  $B_{\max}=1$  kWh 外,其余电池容量电池均在进入电价高价时段前利用低电价电网电能充电从而达到

充满状态。

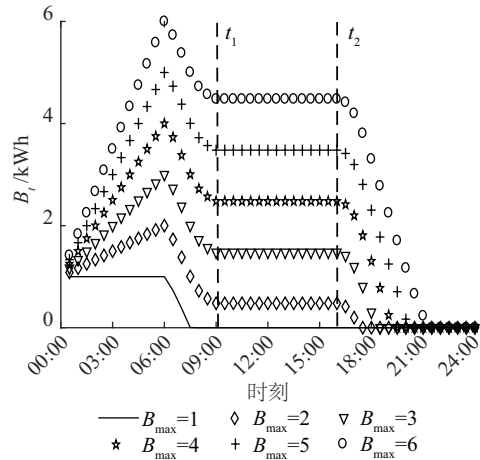


图4 初始可用电量  $B_0=1$  kWh 时,不同电池容量的电池能量变化图

Fig. 4 Storage energy change under different battery capacity when initial available power  $B_0=1$  kWh

随着电池容量的增加,在分时阶梯电价处于低价时段预充的电能就越多,也就是说电池在低价时段尽量多的利用电网电能充电,从而尽量减少在高电价时段直接使用电网电能,降低用电消费。从图 5 就可以明显看出使用储能电池在不考虑电池成本等因素条件下,可以有效降低用户的用电消费,且随着电池容量的增加,用电消费可以进一步降低。

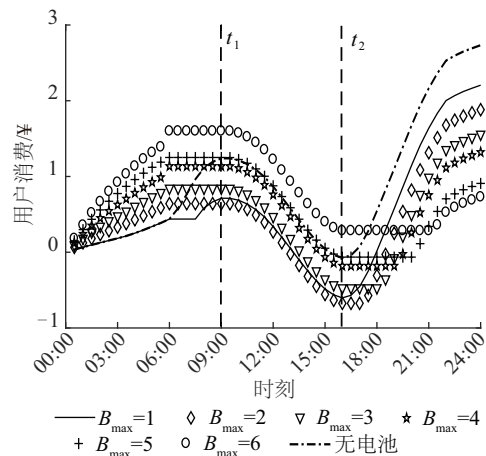


图5 初始可用电量  $B_0=1$  kWh 时,不同电池容量的用电消费对比图

Fig. 5 Customer's expense on electricity under different battery capacity when initial available power  $B_0=1$  kWh

应注意随着用户采用储能电池容量的增加,其相应的成本和维护费用也相对增加。因此系统设计人员在选择储能电池容量时应综合考虑电池本身的成本、维护

费用、使用年限及可为用户带来的相对收益。

### 3.2 改变电池初始值的影响

下文将电池容量设为固定值,即正常工作下充满后的最大可用电量  $B_{\max} = 6 \text{ kWh}$ ,然后改变电池每日的初始状态值,来观察电池在控制策略下的变化。从图 6a、图 6b 可看出在电价高位到来前,电池的控制策略就是充电直至充满。所以在电价高位开始后不同的电池状态初始值下的电池并无明显区别。但是这是由于上海市所采用的仍然是简单的 2 种价位的分时阶梯电价机制。国外,如澳大利亚,则采用拥有非高峰、肩部和高峰价格 3 种价位的分时电价阶梯机制,其情况相对更为复杂,不同的电池初始值的电池电量变化则可能明显不同。

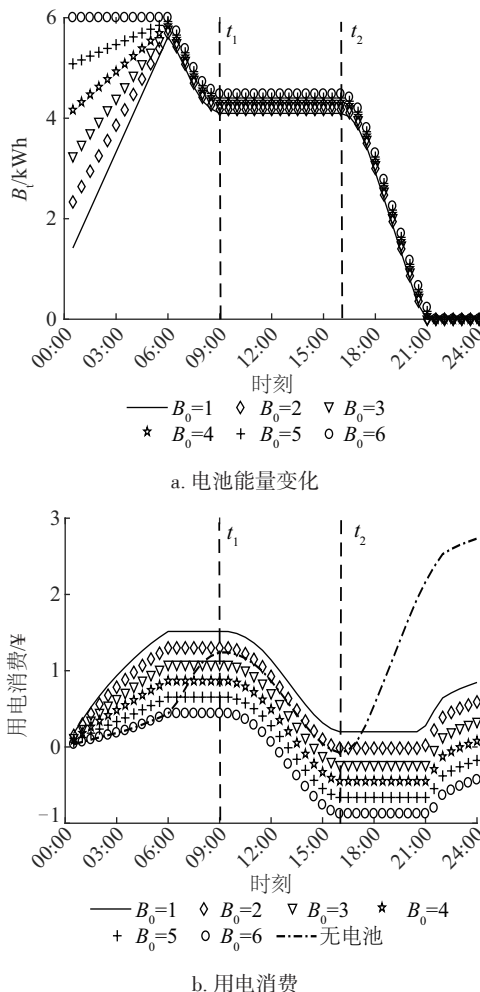


图6 最大可用电量  $B_{\max} = 6 \text{ kWh}$  时,不同电池初始状态值的电池能量变化和用电消费对比图

Fig. 6 Storage energy change and customer's expense on electricity under different battery capacity when maximum available power  $B_{\max} = 6 \text{ kWh}$

### 3.3 与常规优化算法对比

选取 Matlab 软件常用寻优算法 fminsearch 与图形逻辑分析控制方法在相同初始条件、相同目标函数下进行用户用电消费最小化优化运算。得到的用户用电消费对比图如图 8 所示,由图 8 可见 2 种优化控制方法获得的优化结果并无明显差异。Matlab-fminsearch 寻优方法从全年运算运行时间来看,需 1017.610 s,而本文介绍的图形逻辑分析控制方法仅需 1.170 s。由此可得到在获得结果相类似情况下,图形逻辑分析控制方法运算时间远远小于采用常规寻优方法。

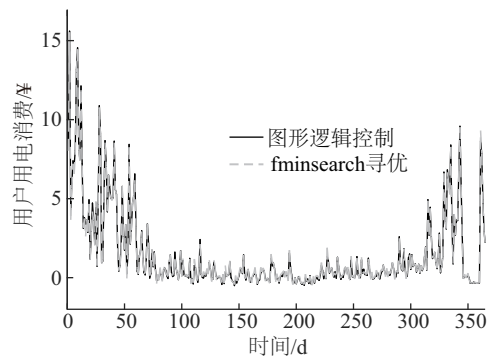


图7 图形逻辑控制与 Matlab-fminsearch 寻优法全年对比结果

Fig. 7 Comparison of customer yearly expense under geometrical-logical control and Matlab-fminsearch algorithm

## 4 结 论

考虑峰谷分时阶梯电价机制,本文给出一种在不降低用户满意度的条件下,基于图形逻辑分析方法,以光伏储能系统用户日用电消费最低为目的创新型能量管理控制策略。该方法通过分析光伏储能系统电能流动,设计针对每日光伏发电量及用户用电需求不同的各种情况下的光伏储能系统控制算法,从而使光伏储能系统用户每日获得最低用电消费。在模型及控制算法建立基础上,利用实际光伏储能系统用户历史用电数据、光伏发电量数据及上海市实际电价,并验证在该方法的有效合理控制下用户日消费可明显降低,且与采用普通寻优算法并无明显差别。此外,分析储能装置的日初始电量及额定容量对每日用户用电消费的影响,简述该方法在光伏储能系统储能装置设计方面的应用。本方法与现有大量复杂智能优化模型相比,明显具有运算快、运算次数少、直观性强、优化周期合理等优点,但对未来一日的光伏发电量及用电消耗量预测准确性依赖性较强。因此,未来工作会进一步集中于提高光伏日发电量及用户日用电量预测准确性方面。

## [参考文献]

- [1] 丁明, 陈忠, 苏建徽, 等. 可再生能源发电中的电池储能系统综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 19-25.  
DING M, CHEN Z, SU J H, et al. Review of battery energy storage system in renewable energy power generation[J]. Power system automation, 2013, 37(1): 19-25.
- [2] 唐西胜, 邓卫, 齐智平. 基于储能的微网并网/离网无缝切换技术[J]. 电工技术学报, 2011, 26(S1): 279-84.  
TANG X S, DENG W, QI Z P. Micogrid seamless switching between grid-connected and off-grid based on energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(S1): 279-84.
- [3] 潘耀杰, 贾树清, 李海山, 等. 风光储双模双向逆变器研发[J]. 中国科技成果, 2013, 17: 61-62.  
PAN Y J, JIA S Q, LI H S, et al. Research and development of dual mode bi-directional inverter for wind-solar energy storage[J]. Chinese scientific and technological achievements, 2013, 17: 61-62.
- [4] 郑魏, 李强, 骆德汉. 基于双向逆变器的太阳能供电系统[J]. 电源技术, 2016, 40(3): 631-632.  
ZHENG W, LI Q, LUO D H. Solar power supply system based on bidirectional inverter[J]. Power technology, 2016, 40(3): 631-632.
- [5] 贾科, 陈奕汝, 毕天姝, 等. 微网中储能系统的能量管控方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 2665-2673.  
JIA K, CHEN Y R, BI T S, et al. Energy control method of microgrid energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10): 2665-2673.
- [6] RU Y, KLEISSL J, MARTINEZ S. Storage size determination for grid-connected photovoltaic systems[J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2015, 4(1): 68-81.
- [7] SARAVANAN S, THANGAVEL S. Instantaneous reference current scheme based power management system for a solar/wind/fuel cell fed hybrid power supply[J]. International journal of electrical power & energy systems, 2014, 55(1): 55-70.
- [8] GITIZADEH M, FAKHARZADEGAN H. Battery capacity determination with respect to optimized energy dispatch schedule in grid-connected photovoltaic (PV) systems[J]. Energy, 2014, 65(6): 65-74.
- [9] ZHONG Q W, KHALILPOUR R, VASSALLO A, et al. A logic-based geometrical model for the next day operation of PV-battery systems[J]. Journal of energy storage, 2016, 7(1): 81-94.
- [10] 发改价格[2019]842号. 上海市发展和改革委员会关于第二批降低本市一般工商业电价有关事项的通知[EB/OL] <http://www.shanghai.gov.cn/nw2/nw2314/nw2319/nw12344/u26aw59208.html>.
- [11] AHMAD Z, SINGH S N. Comparative analysis of single phase transformerless inverter topologies for grid connected PV system[J]. Solar energy, 2017, 149: 245-271.
- [12] ZHAO S S, LI Q, LEE F C. High frequency transformer design for modular power conversion from medium voltage AC to 400V DC[C]//2017 Thirty Second Annual Ieee Applied Power Electronics Conference and Exposition (Apec), Tampa, FL, USA, 2017: 2894-2901.
- [13] ZHANG N, SUTANTO D, MUTTAQI K M. A review of topologies of three-port DC-DC converters for the integration of renewable energy and energy storage system[J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2016, 56: 388-401.
- [14] KANG J Q, YAN F W, ZHANG P, et al. Comparison of comprehensive properties of Ni-MH (nickel-metal hydride) and Li-ion (lithium-ion) batteries in terms of energy efficiency[J]. Energy, 2014, 70: 618-625.

## A NEW ENERGY MANAGEMENT METHOD FOR PV-STORAGE SYSTEM BASED ON GEOMETRICAL AND LOGICAL ANALYSIS METHODOLOGY

Zhong Qianwen<sup>1</sup>, Sun Yize<sup>1</sup>, Chen Yujie<sup>1</sup>, Peng Lele<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** Considering of popular time-of-use tariff at present market and based on geometrical and logical analysis methodology, a novel energy management method on PV-storage system with bi-directional inverter is proposed in this paper, which aims at obtaining lowest expense on daily electric power from the grid. By analyzing the daily electricity requirement, energy storage state, current electricity price and PV subsidized price, the reasonable floatation value and control method of electric power in the PV-storage system is designed. With electricity demand and PV generation data and real adopted tariffs in Shanghai, the effectiveness of the control strategy has been verified. The results show that customer daily expense electricity from grid obviously decreases which is very close to the minimum value from another complex intelligent algorithm. The computation speed is significantly improved compared with the common search algorithm under the same simulation platform.

**Keywords:** energy management; energy storage; photovoltaic generators (solar); storage control; geometrical and logical analysis; bi-directional inverter