

DOI: 10.7667/PSPC170493

基于储能成本收益评估的小型光储系统实时经济运行方法

吕晨旭

(国网山西省电力公司忻州供电公司, 山西 忻州 034000)

摘要: 随着分布式家庭光伏系统等小型光储系统应用越来越广泛, 其经济运行成为一项重要课题。针对家庭等小型光储联合系统的优化运行问题, 提出了一种实时经济调度方法。该方法以对当前时段的储能制定充放电策略为基础, 首先建立了模型对当前时段储能的充电成本和下一时段初储能放电收益进行评估, 其次依据经济学中边际成本等于边际收益时综合效益最大的原理制定实时经济调度方案。该方法能够在满足家庭光储调度实时性的同时最大程度上追求经济性, 从而较好地消除传统实时经济调度方案中储能充放电行为制定的主观性, 提升了实时经济调度的优势。最后通过算例验证了所提方法的有效性。

关键词: 小型家庭光储系统; 实时经济调度; 成本收益评估; 储能策略

Real time economic scheduling method for photovoltaic/battery system based on the evaluation of energy storage charging cost and discharge yield

LÜ Chenxu

(Xinzhou Power Supply Company, State Grid Shanxi Electric Power Company, Xinzhou 034000, China)

Abstract: With the application of photovoltaic/battery system such as family photovoltaic/battery system more and more widely, its economic dispatch becomes an important issue. In order to solve the problem of the optimal operation of the family photovoltaic-storage system, a real-time economic dispatch method is proposed, which is based on the charging and discharging strategy of energy storage. In this paper, firstly a model is established to evaluate the energy storage charging cost of the current period and the discharge yield at the beginning of the next period, secondly a real-time economic dispatch method is constructed according to a principle in economics that, when the marginal cost equals the marginal benefit, the comprehensive benefit is the largest. This method can meet the requirement of the real time scheduling of the family photovoltaic-storage system, and at the same time maximize the economic efficiency, therefore the proposed method can maximize the elimination of subjectivity when formulate the behavior strategy of storage in real-time economic dispatch energy storage, so as to enhance the advantages of real-time economic dispatch. Finally, a numerical example is given to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: photovoltaic-storage system; real time economic scheduling; evaluation of cost and benefit; energy storage strategy

0 引言

近年来,随着光伏电池(Photovoltaic, PV)的生产制造成本不断降低以及国家对于分布式新能源并网发电扶持力度的不断加大,光伏发电逐渐走入寻常百姓家^[1-6]。不论是由政府主导的建筑光电一体化工程,还是民众自发地安装光伏发电系统,无不体现着分布式光伏发电良好的发展势头和广阔的发展前景。

针对含光伏发电系统的经济调度问题,目前已有一些文献做了相关研究。文献[7]针对峰谷分时电价和阶梯电价两种主流购电政策,计及用户卖电收益、买电成本和政府补贴等因素建立了经济调度模型。针对光伏出力的不确定性,可以通过建立光伏调度的模糊优化方法来应对^[8]。一般情况下,光伏发电与储能系统组成一个联合系统,从而利用储能充放电行为使得光伏发电得到更好的利用,因此文献[9]提出了一种针对大规模蓄电池储能系统的优化调度与经济性评价方法。此外,还有一些文献着

重研究光伏发电的相关政策^[10]以及光伏发电系统的设计方法^[11]。

本文针对家庭光储系统制定实时经济调度策略,使得该策略在能够适用于实际应用的前提下,充分追求调度结果的经济性。目前对包括光伏在内的分布式发电出力功率的预测还存在一定的误差,不足以完全满足家庭光储系统日前调度计划的制定,因此实时经济调度因其能够应对实时情况而成为更好的选择。

然而,由于实时经济调度模型缺少全局观而使得在实际应用中容易失去经济性。这种全局性的缺失可以通过全时段经济调度很好地弥补,因此通过全局性得到的经济性和实时性之间是一对很难调和的矛盾。现有文献对这个问题的解决也并不是很有效,这主要是因为实时经济调度中对储能充放电行为策略的制定比较带有主观性,这种主观性导致了很大程度上损失了经济性。

本文建立的模型可以说较好地解决了这个矛盾。在经济学中,边际成本指的是每一单位新增生产的产品(或者购买的产品)带来的总成本的增量,而边际收益是指增加一单位产品的销售所增加的收益,当存在边际成本递增和边际效益递减时,那么边际成本等于边际收益时效益最大。本文所建立的家庭光储联合系统的实时经济调度策略便基于此。无论是在微网实时经济调度模型中,还是在家庭光储系统实时经济调度中,储能的行为一直是核心,因此该经济调度策略通过决策当前时段储能充放电行为来制定实时经济调度方案。而储能行为方案的制定又是基于对当前时段储能充电成本评估以及下一时段初储能放电收益评估来实现的。在这个过程中,储能的充电成本具有边际成本递增效应,而储能放电收益具有边际收益递减效应,根据经济学原理便可以指定最佳的储能充放电策略。

首先针对小型家庭光储量联合系统的优化运行问题,建立了实时经济调度模型,能够充分应对实时情况;其次,针对储能充放电行为策略的制定,通过构建储能中电量的成本收益模型来作为其策略制定的基础,即采用客观的方式制定储能行为策略,从而也能较好地保证经济性。

1 小型家庭光储系统基本调度模型

1.1 调度策略概述

在家庭光储系统中,光伏发电功率既可以直接向负荷供电,也可以用于对储能进行充电,还能直接上网从而为用户获得收益。对负荷供电的功率也可以有不同来源,可以是按外网分时电价直接向外

网购买,也可以直接来源于光伏或者来源于储能放电。本文制定实时经济调度策略的步骤如下:

1) 以一天为调度时间范围,将一天分为 T 个较小的调度时段;假设现在是当前 t 时段的初始时刻,预测未来少数 D 个时段光伏出力水平和负荷水平。

2) 评估 t 时段末时储能电量收益,计算 t 时段末时储能收益—电量评估函数。

3) 评估在 t 时段对储能进行充电的成本情况,计算 t 时段对储能进行充电的成本—电量函数。

4) 综合分析 t 时段末时储能收益—电量评估函数和 t 时段对储能进行充电的成本—电量函数,随着 t 时段末储能电量的增加,那么当边际充电收益等于边际充电成本时,此时的 t 时段末储能电量是最优的;根据这点对 t 时段末储能电量进行求解。

5) 根据求解所得的 t 时段末储能电量制定当前时段的储能充放电功率,以此为基础构建当前时段实时经济调度的目标函数和约束条件,据此制定当前时段向外网购售电功率。

以上过程采用滚动进行的方式,每个时段初均进行一次,并且根据上一时段的储能充放电功率不断更新储能电量。

需要说明的是,虽然建模中在 t 时段内评估的是储能充电成本,但是 t 时段也可能是储能放电状态,这时可以理解为储能充电电量为负,而充电成本也为负,即存在收益,这种方式只是通过规定一个“正方向”而方便建模,后续模型中会详细分析。

1.2 光伏出力模型

光伏发电是将太阳光照辐射能转化成电能。假设当光伏组件的功率输出一般以标准测试条件(太阳辐照强度为 1000 W/m^2 ,电池温度为 25°C)下的系统出力为标准进行修正^[12],具体可表示为

$$P_{\text{PV}} = P_{\text{STC}} \frac{G_{\text{ING}}}{G_{\text{STC}}} [1 + k_{\text{PV}}(T_c - T_r)] \quad (1)$$

式中: P_{PV} 是光伏组件的实际输出功率; G_{ING} 是太阳的实际辐射强度; G_{STC} 是标准测试条件下太阳辐射强度; P_{STC} 是标准条件下光伏电池组件的最大输出功率; k_{PV} 是功率温度系数; T_c 是电池温度; T_r 是外界温度。

1.3 储能模型

在本文储能充电成本和储能放电收益的建模中,需要考虑到储能剩余电量和储能充放电功率之间的关系^[13],如式(2)所示。

$$S_{\text{SB}}^{t+1} = S_{\text{SB}}^t + \mu_{\text{ch}} P_{\text{SB}}^{\text{cha},t} \eta_{\text{ch}} \Delta t - \mu_{\text{dis}} \frac{P_{\text{SB}}^{\text{dis},t}}{\eta_{\text{dis}}} \Delta t - \Delta t D_{\text{SB}} Q_{\text{SB}} \quad (2)$$

式中: S_{SB}^{t+1} 表示 $t+1$ 时段末储能的剩余电量状态; Δt 为每个调度时段的时长; μ_{ch} 和 μ_{dis} 共同表示储能的充放电状态, 当储能充电时 μ_{ch} 为 1 且 μ_{dis} 为 0, 放电时 μ_{ch} 为 0 且 μ_{dis} 为 1; $P_{SB}^{cha,t}$ 和 $P_{SB}^{dis,t}$ 分别表示储能在 t 时段充、放电功率, 该功率针对的是储能充电时外端向储能输出的功率和储能放电时外端从储能接收到的功率, 因此在本文以下模型中需要描述储能与外界的输出关系时, 只需采用该功率即可, 无需再计及充放电效率, 而在求解时则需要考虑到; η_{ch} 和 η_{dis} 分别为储能的充电效率和放电效率; D_{SB} 为储能自放电系数, 该系数描述了无论储能处于充电状态还是放电状态都必然存在的电量损耗; Q_{SB} 为储能容量。

2 实时经济调度方法

2.1 储能充电成本模型

假设当前时刻为 t 时段初, 储能电量为 S_{SB}^t , 所需要进行的实时经济调度时段为 t 时段, 需要在 $t+1$ 时段初达到的储能电量水平为 S_{SB}^{t+1} 。假定实时经济调度的时段足够小, 因此在该时段内储能一直处于充电状态或者放电状态。在 t 时段光伏出力水平可能大于负荷水平, 也可能小于负荷水平, 当光伏出力水平大于负荷水平时, 储能充电成本函数为

$$c_1(P_{SB}^{cha}) = \begin{cases} 0, & 0 \leq P_{SB}^{cha} \leq P_{PV}^t - P_L^t \\ (q' + \gamma_{SB}) P_{SB}^{cha}, & P_{SB}^{cha} \geq P_{PV}^t - P_L^t \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{SB}^{cha} 为自变量储能充电功率; P_{PV}^t 为 t 时段光伏出力水平; P_L^t 为 t 时段负荷水平; q' 为 t 时段外网分时电价水平; γ_{SB} 为储能运行维护成本系数。

当光伏出力水平小于负荷水平时, 储能充电成本函数为

$$c_2(P_{SB}^{cha}) = q' P_{SB}^{cha}, \quad P_{SB}^{cha} \geq 0 \quad (4)$$

综上, t 时段储能充电成本函数为

$$c(P_{SB}^{cha}) = u(P_{PV}^t - P_L^t) c_1(P_{SB}^{cha}) + u(P_L^t - P_{PV}^t) c_2(P_{SB}^{cha}) \quad (5)$$

式中, $u()$ 为单位阶跃函数。

根据该函数, 可以得到 t 时段储能边际充电成本函数为 $\partial c(P_{SB}^{cha}) / \partial P_{SB}^{cha}$, 该函数描述了在当前储能充电功率的情况下, 每增加一部分储能充电功率需要增加的充电成本。

2.2 储能放电收益模型

当前 t 时段储能的充放电行为不仅受到当前时段储能充电成本的影响, 更受到下一个 $t+1$ 时段初时刻储能电量的放电收益函数影响。本文对该收益是通过 $t+1$ 时段到 $t+D$ 时段中每个时段的家庭光

储系统运行的成本—负荷功率曲线受到储能出力调节的收益来进行评估的。

首先定义不考虑储能充放电时的 d 时段成本—负荷功率函数 $c^d(P_L^d)$ 如式(6)所示, 该函数描述了当不考虑家庭光储联合系统中储能的作用时, 各个时段光储系统的运行成本和运行负荷之间的关系。

$$c^d(P_L^d) = \begin{cases} 0, & 0 \leq P_L^d \leq P_{PV}^d \\ q^d P_L^d, & P_L^d \geq P_{PV}^d \end{cases} \quad (6)$$

式中, $d = t+1, \dots, t+D$, 即本文评估储能电量的放电收益只考虑当前时段后的这些时段, 滚动进行。

若 $t+1$ 时段初储能电量为 S_{SB}^{t+1} , 那么储能可以有 $S_{SB}^{t+1} - S_{SB}^{\min}$ 的电量可以用于对这些时段的成本—负荷功率曲线进行调节, 其中 S_{SB}^{\min} 为储能最小允许电量。整个调节过程为, 某一个时段原来运行在该时段成本—负荷功率曲线上某一点, 对应纵坐标上的某一个成本, 而当储能在当前时段出力后, 那么该时段光储联合系统的运行点便表现为在曲线上沿着横坐标负方向移动, 对应纵坐标和相应下降, 即成本降低, 这部分降低的成本便可理解为储能在该时段放电产生的收益。那么储能电量 S_{SB}^{t+1} 若在 $d = t+1, \dots, t+D$ 时段内按合理的方式分配出力, 能够产生的最大调节收益便可理解为储能电量 S_{SB}^{t+1} 的收益, 其为以下规划的解, 该规划的目标函数为

$$\min F = \sum_{d=t+1}^{t+D} [c^d(P_L^d) - c^d(P_L^d - P_{dis}^d \Delta t)] \quad (7)$$

式中: $[c^d(P_L^d) - c^d(P_L^d - P_{dis}^d \Delta t)]$ 表示 d 时段储能参与调节下的家庭光储系统运行成本; $c^d(P_L^d)$ 表示 d 时段储能未参与调节时的家庭光储系统运行成本; P_{dis}^d 为储能电量分配到 d 时段的放电功率; Δt 为时段长。

该规划的约束条件包含储能放电功率上限约束和储能电量约束, 如式(8)所示。

$$\begin{cases} \text{s.t.} & 0 \leq P_{dis}^d \leq P_{dis}^{\max} \\ & S_{SB}^{t+1} - S_{SB}^{\min} = \sum_{d=t+1}^{t+D} [P_{dis}^d - (D-T)\Delta t D_{SB} Q_{SB}] \end{cases} \quad (8)$$

式中, P_{dis}^{\max} 为储能放电功率上限。

2.3 实时经济调度模型

针对以上优化模型, 将 $t+1$ 时段初储能电量为 S_{SB}^{t+1} 视作自变量, 则 F 为应变量, 因此写作函数关系式 $F = F(S_{SB}^{t+1})$, 该函数即为储能放电收益函数。

根据模型 $S_{SB}^{t+1} = S_{SB}^t + P_{SB}^{cha} \Delta t$, 因此有

$$F = F(S_{SB}^t + P_{SB}^{cha} \Delta t) \quad (9)$$

事实上,可以看出,所有时段的家庭光储系统运行的成本—负荷功率曲线具有这样的特性,综合上随着横坐标方向斜率增大,主要表现为斜率从零增加为外网分时电价水平。因此,当储能电量较小,其可以充分在成本—负荷功率曲线斜率较高部分调节,调节收益大,当储能电量足够大时,高斜率部分的调节空间没有之后,只能在低斜率部分调节,调节收益小。所以综合上储能放电收益曲线为一个上凸形状,即随着储能电量的增加,边际放电收益降低。

储能能在 t 时段的放电功率 P_{SB}^{cha} 是以下方程的解,需要指出的是,式中 P_{SB}^{cha} 允许为负,为负时表示实际上储能处于放电状态。

$$\frac{\partial c(P_{SB}^{cha})}{\partial P_{SB}^{cha}} = \frac{\partial F(S_{SB}^t + P_{SB}^{cha} \Delta t)}{\partial P_{SB}^{cha}} \quad (10)$$

式中:左项表示当前时段储能边际充电成本;右项表示当前时段储能边际放电收益。事实上,储能充电成本要么为零,要么为外网分时电价水平,而储能边际放电收益随着当前时段储能充电功率的增加而减少,直至等于储能边际充电成本。

当储能边际放电收益已经很低,低于储能边际充电成本,则意味着当前时段向储能充电不仅没有收益,而且充电量越多,则储能边际放电收益会进一步降低,导致更大的损失。此时应该让储能放电,让储能放电收益曲线上的运行点向横坐标负方向移动,直到储能边际放电收益增加到储能边际充电成本为止,此时若进一步移动则会出现部分储能电量的充电成本大于放电收益的情况而得不偿失。

在这种模型下,储能的充放电行为已经按照效益最优原则制定出,优化模型的控制变量只剩下了和外网交换功率,实时经济调度的目标只有购售电成本(效益)。综上所述,当前 t 时段家庭光储联合系统的实时经济调度的目标函数为

$$\min q^t P_{Grid}^t \quad (11)$$

式中, P_{Grid}^t 为家庭光储系统向外网购电功率。

需要满足的约束条件包含功率平衡约束,向外网购电最大功率约束,储能充放电功率上下限约束如式(12)所示。

$$\begin{cases} \text{s.t. } P_{Grid}^t + P_{SB}^{cha} + P_{PV}^t = P_L^t \\ 0 \leq P_{Grid}^t \leq P_{Grid}^{max} \\ P_{SB}^{min} \leq P_{SB}^{cha} \leq P_{SB}^{max} \end{cases} \quad (12)$$

式中: P_{Grid}^t 为 t 时段向外网购电功率; P_{SB}^{min} 为负,其绝对值表示储能充电功率上限;约束中 P_{SB}^{cha} 为通过储能成本收益模型求解得到的储能充放电功率,

但是如果其超出的储能充放电限制约束,则需要对其取限值。

3 小型光储系统能量管理系统

综上所述,在采用本文所提光储系统实时经济运行方法下,系统结构以及能量管理系统框架如图1所示。图中主要描述了系统运行中各设备之间的能量关系和信息关系。

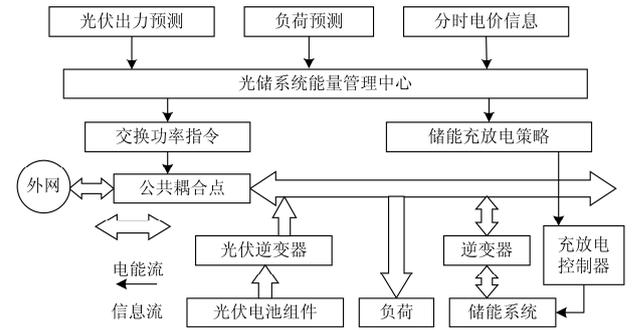


图1 小型光储系统能量管理系统控制回路

Fig. 1 Control loop of photovoltaic/battery system on EMS

图1所示为本文所研究的小型光储系统能量管理系统控制回路,图中标明了能量流和信息流在系统中的传递情况。光伏电池组件通过DC/DC、DC/AC并网光伏逆变器与交流母线相连,由于小型光储系统允许光伏电能上网,且由于容量较小对外网几乎没有影响,所有功率都能得到利用,因此光伏逆变器采用最大功率跟踪控制(Maximum Power Point Tracking, MPPT)。储能系统采用目前比较成熟的蓄电池技术,通过DC/DC、DC/AC并网逆变器组与交流母线相连,同时通过充放电控制器来调控储能充放电功率,可实现双向功率变换。系统通过公共耦合点(Point of Common Coupling, PCC)与外网相连,通过能量管理中心给出的交换功率指令来对外网进行购售电活动。能量管理中心接受和发送信息的过程采用WiFi和电力线载波PLC相结合的通信技术来监控光伏电池组件、蓄电池组、用电负荷的状态,对所监测的数据采用本文所提出模型的方法进行处理,然后将小型光储系统调度指令发送到相应的设备。以上设备技术为实时调度的可行性提供了基础。

整个实时能量管理的原理为:首先按最大功率跟踪模式接受全部光伏功率,然后依据模型控制储能充放电功率,最后控制公共耦合点处与外网交换功率保证整个系统平衡。通过系统化的实时能量管理分配能量路径,在保证实时性的同时充分追求经济性。本文方法通过能量管理系统中编程实现,整

个过程通过系统设备的软硬件设备自动进行，用户也可通过智能终端对系统状态进行查看或者配置。

4 算例分析

4.1 算例设置

本文以某一典型家庭光伏储能联合系统作为研究例子，制定其经济调度方案。该系统的储能配置容量为 20 kWh，光伏装机容量为 7 kW，储能的最大充放电功率均为 4 kW。为了最大程度提升储能的经济效益，并且为了利于光伏发电最大程度的利用，允许家庭光储系统的电量上网，与外网的购售电功率上限均为 4 kW。外网采取分时电价政策，具体的各时段分时电价水平如图 2 所示。

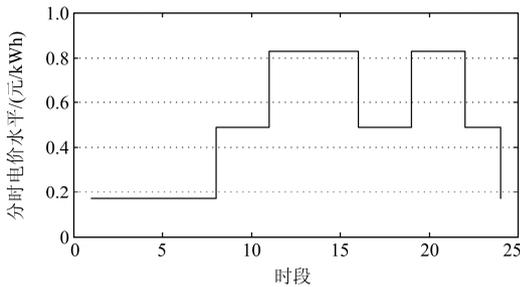


图 2 外网分时电价曲线

Fig. 2 Curve of the TOU power price of the grid

在任一时段所做的实时经济调度只需考虑接下来 D 个时段内的负荷和光伏出力情况。光伏出力的预测误差服从贝塔分布^[14]。文献[15]指出，短期风、光、荷预测误差与预测时长存在一定的关系，在算例中实时经济调度所依据的光伏数据是根据该结论对光伏出力进行模拟得到的。假设小时级光伏出力预测误差为4%。该典型家庭光储系统的某一典型日用电负荷曲线以及模拟出的某次光伏出力实际曲线如图 3 所示。可见该家庭的日用电负荷曲线大概有两个负荷高峰时段，分别为一天中间时段和一天较末尾时段。而光伏发电高峰主要集中在一天中间时段，并且此时家庭负荷还并不能完全消纳光伏发电，这便给储能发挥经济效益提供了空间。

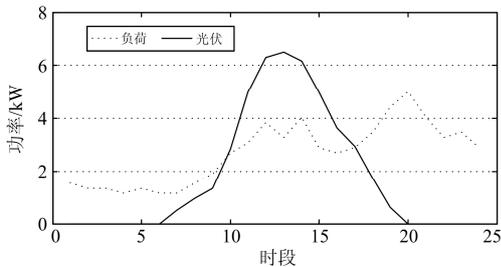


图 3 负荷曲线和光伏发电曲线

Fig. 3 Power curves of load and PV output

将一天分为 24 个时段，每个时段为 1 h。实时经济调度在每个时段初进行。储能放电效益评估模型中 D 取为 5，整个算例模拟 10 次分别进行计算。以某一次结果为例进行分析。

4.2 算例结果

经过模型求解可以得到系统运行方案如图 4 所示。系统运行方案包括储能充放电功率曲线以及与外网交换功率曲线。同时可以得到储能一天电量变化曲线如图 5 所示。

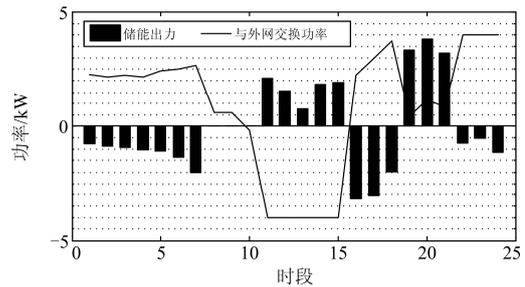


图 4 实时经济调度策略下的系统运行方案

Fig. 4 System operation status under the real-time economic dispatch strategy

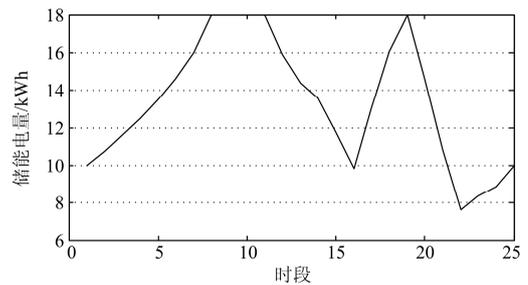


图 5 储能一天电量曲线

Fig. 5 Energy storage curve in a day

结合图 4 和图 5 可以看出，储能的充放电行为主要经历了 4 个阶段。在一天开始的第 1 到第 9 时段，外网分时电价水平较低，同时没有光伏出力，此时储能处于充电状态，为削峰填谷做好准备，储能所充的电能来自于较廉价的外网，在这一阶段储能电量处于持续上升的状态。在一天中间时段第 10 到 15 时段，外网分时电价水平较高，此时向外网售电具有较好的收益，因此家庭光储系统向外网售电，所售的电能既来自于储能也来自于光伏，储能放电和光伏发电在向外网售电的同时，也保证了负荷的供电，在这一阶段储能电量持续下降。在第 16 到 18 时段，外网分时电价水平降低，使得向外网售电不存在收益，同时在上一阶段由于储能的持续放电，使得储能电量较低，难以以为继接下来的削峰填谷行为，因此一方面储能和负荷共同实现对负荷消纳的

同时, 还从外网购电。在接下来的阶段第 19 到第 21 时段, 系统处于负荷高峰期, 外网分时电价水平也处于峰时段, 储能充分放电并伴随少量向外网购电以保证负荷供电, 储能中的电量主要来自于之前阶段谷时段成本较低的充电行为, 因此这时其放电行为相比于购电效益更好。

本文所制定的实时经济调度方案是依据储能充电成本和储能放电收益评估而制定的。以第 1 时段为例, 此时根据模型有储能当前时段充电成本曲线以及下一时段初储能放电收益曲线如图 6 所示。

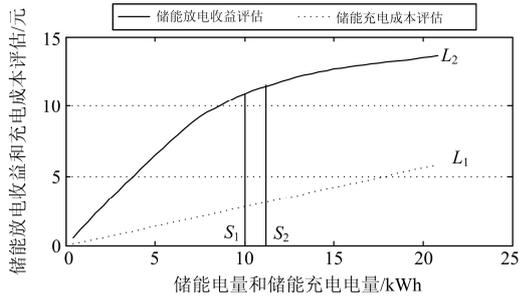


图 6 第 1 时段储能充电成本和放电收益评估曲线

Fig. 6 Energy storage charging evaluation cost curve and discharge evaluation yield curve in the first period

由图 6 中可以看出, 在第 1 时段, 由于没有光伏出力, 根据模型储能充电成本曲线为一条过原点的直线 L_1 , 其斜率为第 1 时段内的外网分时电价水平 0.17 元/kWh, 储能在下一时段的放电收益曲线如图中 L_2 所示。储能当前电量为初始设置的 S_1 , 即储能容量的一半(10 kWh), 于此横坐标所对应的的储能放电收益曲线的斜率大于充电成本曲线斜率, 这意味着此时储能充电收益大于储能充电成本, 储能应该充电。随着储能电量的上升, 储能放电收益曲线的斜率逐渐下降, 事实上, 储能电量等于 S_2 时储能放电收益曲线的斜率刚好等于储能充电成本曲线斜率。因此 S_2 和 S_1 之差即为储能在第 1 时段应该充电的电量, 折算为储能充电功率即为所求的第 1 时段储能充电功率。

第 1 时段为典型储能充电时段, 下面取一储能典型放电时段作分析。以第 11 时段为例, 该时段储能当前时段充电成本曲线以及下一时段初储能放电收益曲线如图 7 所示。

由图 7 中可以看出, 在第 11 时段, 由于存在光伏出力并且大于该时段负荷水平, 根据模型储能充电成本曲线为一条过 x 轴的直线 L_1 , 横截距为光伏出力与负荷水平之差, 其斜率为第 11 时段内的外网分时电价水平 0.83 元/kWh, 储能在下一时段的放电收益曲线如图中 L_2 所示。储能当前电量为滚动进行

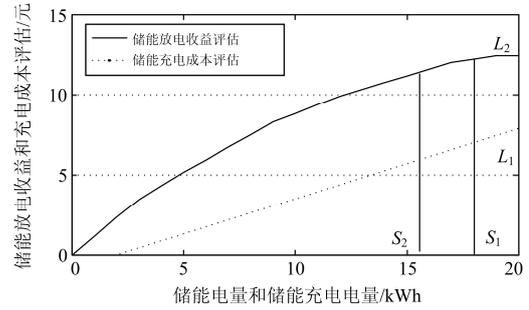


图 7 第 11 时段储能充电成本和放电收益评估曲线

Fig. 7 Energy storage charging evaluation cost curve and discharge evaluation yield curve in the eleventh period

的实时经济调度运行到第 10 时段末的电量 S_1 , 于此横坐标所对应的储能放电收益曲线的斜率小于充电成本曲线斜率, 这意味着此时储能充电收益小于储能充电成本, 储能应该充电。随着储能电量的下降, 储能放电收益曲线的斜率逐渐上升, 事实上, 储能电量等于 S_2 时储能放电收益曲线的斜率刚好等于储能充电成本曲线斜率。因此 S_2 和 S_1 之差即为储能在第 11 时段应该放电的电量, 折算为储能充电功率即为所求的第 11 时段储能放电功率。

综上所述, 每一个时段的实时经济调度过程同理可得。本文实时经济调度方法下家庭光储系统平均每天收益为 12.65 元, 其中与外网购售电收益为 13.82 元, 储能运维成本为 1.27 元。

传统文献采用的实时经济调度策略中储能充放电行为的制定非常主观, 比如文献[16]实施基于蓄电池三段式充放电的实时调度策略安排各可控型微源及蓄电池出力, 而文献[17]对储能充放电策略的处理则是将储能装置的能量状态划分为 4 个区间, 在每个区间分别采用事先制定的策略, 在实现实时性的同时很大程度上牺牲了经济性。因此为了验证所提出的实时经济调度方法的有效性, 本文还根据传统的研究实时经济调度的文献中的思路制定完全相同情况下的家庭光储系统实时经济调度方案, 分别运算 10 次并且计算其每天平均收益与本文结果比较如表 1 所示。

表 1 本文方法与传统方法指标对比

Table 1 Comparison between the proposed method and the traditional method

实时经济调度方法	日平均收益/元
传统方法	8.23
本文方法	12.65

可见, 由于本文建立的模型较好地评估了储能充放电成本收益, 使得储能充放电行为的制定在满足实时性的同时更加符合经济性, 提升了家庭光储

系统综合社会效益。本文所提方法具有较好的商业推广价值。在目前,包括家庭光储系统、微网型光储系统在内的各种小型光储系统采用的能量优化策略较为简单,这些策略或者侧重追求实时性而牺牲了较大的经济性,或者追求调度时长内的全局经济性而增大了保证实时性的成本,而本文方法基本上克服了这个实时性和经济性之间的矛盾。本文方法在实际应用中只需在原有的小型光储系统能量管理软件中重新编程即可,在原有方法的基础上具有较好的扩展性,具有较好的商业推广价值。

5 结论与展望

随着家庭光伏等小型分布式系统的应用越来越广泛,其经济调度模型的研究成为一个重要课题。本文首先建立了模型对当前时段储能充电成本和下一时段初储能放电收益进行评估,其次依据经济学中边际成本等于边际收益时综合效益最大的原理制定实时经济调度方案。该方法能够在满足家庭光储调度实时性的同时最大程度上追求经济性,从而弥补了传统实时经济调度方案中储能充放电行为制定较为主观的不足,提升了实时经济调度的优势。在当前阶段,储能的投资成本还较高,如何制定更好的储能充放电策略,从而最大程度上发挥储能的社会经济效益是一个重要课题,而本文方法中对储能的处理方式或许可以借鉴到其他应用方面中实时经济调度策略的制定。

参考文献

- [1] PARK J, WU L, CHOI J, et al. A probabilistic reliability evaluation of a power system including solar/photovoltaic cell generator[C] // Power and Energy Society General Meeting, Calgary: IEEE, 2009: 1-6.
- [2] COLLINS E, DVORACK M, MAHN J, et al. Reliability and availability analysis of a fielded photovoltaic system [C] // Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Philadelphia, PA: IEEE, 2009: 2316-2321.
- [3] 崔红芬, 汪春, 叶季蕾, 等. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 91-97.
CUI Hongfen, WANG Chun, YE Jilei, et al. Research of interaction of distributed PV system with multiple access points and distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 91-97.
- [4] 王以笑, 崔丽艳, 雷振锋, 等. 分布式光伏电站区域智能调控系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 118-122.
WANG Yixiao, CUI Liyan, LEI Zhenfeng, et al. Research on the regional intelligent regulating system of distributed PV station[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 118-122.
- [5] 施泉生, 于文姝, 谢品杰. 能源互联网背景下分布式光伏发电的经济效益研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(1): 100-106.
SHI Quansheng, YU Wenshu, XIE Pinjie. Economic benefit analysis of distributed photovoltaic under the energy internet background[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(1): 100-106.
- [6] 邓健, 王壮壮, 袁在忍, 等. 基于物元可拓模型的光伏发电综合效益评价研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(11): 117-125.
DENG Jian, WANG Zhuangzhuang, YUAN Zairen, et al. Comprehensive benefit evaluation of photovoltaic power generation based on matter element extension model[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(11): 117-125.
- [7] 马霖, 张世荣. 分时电价/阶梯电价下家庭并网光伏发电系统运行优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 819-824.
MA Lin, ZHANG Shirong. Optimal operation scheduling of family grid-connected photovoltaic systems under time-of-use and ladder tariffs[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 819-824.
- [8] MICHAEL U, LI Z Y. A fuzzy optimization approach to PV/battery scheduling with uncertainty in PV generation[C] // 38th Annual North American Power Symposium, Carbon-dale, USA, 2006: 561-566.
- [9] OKA Y, YOKOYAMA A. Optimal operation scheduling and economical evaluation method of battery energy storage system in power system with a large penetration of photovoltaic generation[C] // IEEE Grenoble Power Tech Conference, Grenoble, France, 2013.
- [10] 邵汉桥, 张籍, 张维. 分布式光伏发电经济性及其政策分析[J]. 电力建设, 2014, 35(7): 51-57.
SHAO Hanqiao, ZHANG Ji, ZHANG Wei. Economy and policy analysis of distributed photovoltaic generation[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(7): 51-57.
- [11] 韩学栋, 王海华, 李剑锋. 小型分布式光伏发电系统设计[J]. 电力建设, 2014, 35(1): 104-108.
HAN Xuedong, WANG Haihua, LI Jianfeng. Design of

- small distributed photovoltaic generation system[J]. *Electric Power Construction*, 2014, 35(1): 104-108.
- [12] KALDELLIS J, ZAFIRAKIS D, KONDILI E. Optimum sizing of photovoltaic-energy storage systems for autonomous small islands[J]. *Int J Electr Power Energy Syst*, 2010, 32(1): 24-36.
- [13] 李保恩, 李献伟, 毋炳鑫. 基于储能 SOC 状态的微电网能量优化调度策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(11): 108-114.
- LI Baoen, LI Xianwei, WU Bingxin. Research on energy optimal dispatching strategy for microgrid based on battery SOC[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(11): 108-114.
- [14] 赵波, 薛美东, 陈荣柱, 等. 高可再生能源渗透率下考虑预测误差的微电网经济调度模型[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(7): 1-8.
- ZHAO Bo, XUE Meidong, CHEN Rongzhu, et al. An economic dispatch model for microgrid with high renewable energy resource penetration considering forecast errors[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(7): 1-8.
- [15] AMJADY N, KEYNIA F, ZAREIPOUR H. Short-term load forecast of microgrids by a new bilevel prediction strategy[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2010, 1(3): 286-294.
- [16] 杨明玉, 韩旭. 基于需求侧响应的微网孤网运行实时调度策略研究[J]. *现代电力*, 2015, 15(4): 12-18.
- YANG Mingyu, HAN Xu. Research on real-time scheduling strategy for microgrid operation in island mode based on the demand side response[J]. *Modern Electric Power*, 2015, 15(4): 12-18.
- [17] 石庆均, 耿光超, 江全元. 独立运行模式下的微网实时能量优化调度[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(16): 26-35.
- SHI Qingjun, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan. Real-time optimal energy dispatch of standalone microgrid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(16): 26-35.

收稿日期: 2017-04-07; 修回日期: 2017-06-22

作者简介:

吕晨旭(1973—), 男, 通信作者, 高级工程师, 主要从事电力系统运行检修、电力系统及其自动化工作。E-mail: xzgd_lcx@163.com

(编辑 周金梅)