

DOI: 10.7667/PSPC160636

考虑实际运行的配电网电池储能系统的优化配置研究

李秀磊, 耿光飞, 季玉琦, 陆凌芝

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 储能具有削峰填谷、改善电压质量等作用, 在配电网中具有极其重要的地位。研究制定蓄电池储能系统运行策略, 并用其指导配电网中储能配置问题。以综合经济效益最大为上层规划目标函数, 储能配置容量为控制变量, 考虑了储能投资成本、运行维护成本、节约电能损耗收入和储能低储高放套利收入等因素。采用启发式数学方法, 以分布式电源出力与电网负荷叠加后的等效负荷曲线为基础, 根据一定指标提出一种考虑分时电价的蓄电池储能系统充放电策略, 并作为下层规划部分, 建立二层规划模型。利用嵌入启发式方法的遗传算法对该模型进行求解。用修改的 IEEE33 节点系统进行分析, 验证了所建模型的有效性, 并将提出的储能充放电策略与现有的典型充放电策略对比, 说明了所提策略的优越性。

关键词: 配电网; 储能系统; 运行策略; 优化配置; 启发式方法

Study on optimal allocation of battery energy storage in distribution network considering the actual operation

LI Xiulei, GENG Guangfei, JI Yuqi, LU Lingzhi

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The energy storage has the functions of reducing peak and filling valley, improving voltage quality, etc. It plays a great role in the power distribution network. This paper studies and formulates the operation strategy of battery energy storage system, then uses it to guide the distribution network storage allocation problem. By maximizing the comprehensive economic benefits as the upper planning objective, the storage capacity is controlled variable, considering the factors such as the investment cost, operation maintenance cost, saving energy loss, saving cost of energy low price charging high price discharge and so on. According to certain index a battery charge-discharge strategy is proposed by heuristic method. This strategy is based on the equivalent load curve that distributed generation output and daily load overlay and considers the sub time electricity price, the strategy formulation as the lower part of the planning, thus two-layer planning model is established. A genetic algorithm with embedded heuristic method is used to solve the model. An improved IEEE 33-bus system is analyzed to verify the effectiveness of the proposed model, and the proposed charging-discharging strategy is compared with the existing typical charging-discharging strategy, which shows the superiority of the strategy in this paper.

Key words: distribution network; energy storage system; operation strategy; optimization allocation; heuristic method

0 引言

随着资源和环境问题的日益突出, 利用清洁能源发电的分布式电源(Distributed Generation, DG)不断接入配电网, DG 出力的波动性和间歇性势必会对配电网造成不利影响^[1-2]。蓄电池储能系统(Battery Energy Storage System, BESS)具有平滑间歇式能源功率波动、削峰填谷、改善电压质量等作用^[3-5], 因此, 在配电网中引入 BESS 具有极其重要的意义。

近几年, 很多学者针对 BESS 配置及运行问题展开了广泛研究。其中, 微电网中 BESS 的研究发展较快, 文献[6-8]在微电网中分别从风/光/柴/储的组合、超级电容器和蓄电池混合储能、储能系统平滑微电网联络线功率波动的角度进行了研究。文献[9]研究了混合储能在风光互补微电网中的控制策略。配电网中 BESS 的研究相对微电网较成熟, 但接入配电网的 DG 对 BESS 的研究提出了新的要求, 配电网中 BESS 的研究又逐渐受到学者关注。文献[10]

基于全寿命周期成本考虑了储能运行策略研究配电网中 BESS 的优化配置, 但其简化了运行策略, 没能充分利用 BESS, 只是将日周期按负荷峰谷简单地分成一充、一放的两个时间段, 然后确定各时段 BESS 充放电功率大小。文献[11]考虑了网损, 采用双层规划方法研究制定配电网中 BESS 充放电策略, 上层是充放电状态的优化, 下层是充放电功率的优化, 能得到较优运行策略, 但没考虑 BESS 的容量配置问题。文献[12]面向供电能力提升, 针对含 DG 的配电网储能功率进行了多级多目标动态优化, 但也没有考虑 BESS 的容量配置问题。文献[13]分别以负荷方差最小化和负荷变化平方量最小化两种极端情况为目标函数研究 BESS 的配置问题, 虽然对 BESS 的配置有一定的参考价值, 但不能实现 BESS 经济效益的最大化。

本文以综合经济效益最大化为上层规划目标, BESS 的配置容量为变量; 采用启发式方法制定出比较符合实际情况的 BESS 充放电策略, 并作为下层规划, 建立双层规划模型进行求解。最后通过算例仿真验证所建模型的有效性, 并将本文提出的充放电策略制定方法与现有文献中方法进行对比。

1 蓄电池储能系统的数学模型

本文不考虑储能装置的电路过程, 借鉴文献[6]中储能电池模型, 从荷电状态(State Of Charge, SOC)和充放电功率等方面对其进行数学建模。

1) 充电过程

$$SOC(t) = (1 - \varepsilon) \cdot SOC(t-1) + \frac{P_{\text{bat,c}}(t) \cdot \Delta t \cdot \alpha}{E_c} \quad (1)$$

2) 放电过程

$$SOC(t) = (1 - \varepsilon) \cdot SOC(t-1) - \frac{P_{\text{bat,dis}}(t) \cdot \Delta t}{E_c \cdot \beta} \quad (2)$$

式中: $SOC(t)$ 表示第 t 个采样间隔处 BESS 的荷电状态; ε 表示储能系统剩余电量每小时的损失率, 简称自放电率, 单位为%/h; $P_{\text{bat,c}}(t)$, $P_{\text{bat,dis}}(t)$ 分别表示储能系统充、放电功率大小; α 和 β 分别表示储能系统充、放电效率; E_c 为储能系统的额定容量; Δt 为采样间隔, 可适当取值, 本文取 1 h。

为避免电池过充过放, SOC 有一定范围限制, 蓄电池不能将电量全部放完也不能完全充满。

$$SOC_{\min} < SOC(t) < SOC_{\max} \quad (3)$$

$$-P_{\text{bat,c,max}} < P_{\text{bat}}(t) < P_{\text{bat,dis,max}} \quad (4)$$

式中: SOC_{\min} , SOC_{\max} 分别为电池最小荷电状态和最大荷电状态; $P_{\text{bat,c,max}}$, $P_{\text{bat,dis,max}}$ 分别表示电池最大

允许充电功率和最大允许放电功率; “-”表示电池充电。该约束是蓄电池寿命对其运行的要求。

2 储能系统的优化配置模型

2.1 总体思路

本文对配电网中 BESS 配置时, 打破了规划与运行之间的隔阂, 在规划模型中嵌入运行过程, 以获得更符合实际的方案。规划 BESS 容量时要用到网损值和储能套利值, 而网损值和储能套利值需要得到储能系统 24 h 出力后才能计算; 并且运行时 BESS 出力的确定又需要以规划的容量为前提, 所以本文研究需要二者互相迭代才能计算, 与二层规划模型相匹配。

在二层规划模型中, 上层规划结果作用于下层目标函数和约束条件, 下层规划以最优值反馈到上层, 实现上下层之间的相互作用。一般的二层规划数学模型可表示为

$$\begin{cases} \min F = F(x, w) \\ \text{s.t. } G(x) \leq 0 \\ \min w = f(x, y) \\ \text{s.t. } g(x, y) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $F(x, w)$ 为上层的目标函数; $G(x)$ 为上层约束条件; $f(x, y)$ 为下层的目标函数; w 为下层目标值; $g(x, y)$ 为下层约束条件; x 为上层决策变量; y 为下层决策变量。

本文采用二层规划模型对 BESS 优化配置。上层规划以日综合经济效益最大为目标函数, 优化变量为储能容量。下层规划通过启发式方法, 以直观分析为依据, 根据一定的指标, 逐步迭代得到满足要求的 BESS 运行控制策略, 下层规划结果用于准确计算上层目标函数。本文采用的二层规划模型可简化为

$$\begin{cases} \min F = F(x, w) \\ \text{s.t. } G(x) \leq 0 \\ w = f(x) \\ \text{s.t. } g(x) \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

2.2 上层规划数学模型

1) 目标函数

优化的目标是在系统安全稳定的基础上实现综合经济效益最大化, 具体目标函数为

$$\max f(E) = (C_{\text{loss}} + C_s + C_{\text{kw}} + C_o - C_{\text{bat,in}} - C_{\text{bat,om}}) \quad (7)$$

式中: E 为配置储能的容量, 为决策变量; C_{loss} 为配置储能后配电网日节约电能损耗收入; C_s 为储能低储高放套利日收入; C_{kw} 为配置储能后延缓电网

升级改造的日收入； C_o 为减少停电损失的日收入； $C_{bat,in}$ 、 $C_{bat,om}$ 分别为 BESS 日投资成本和日运行维护成本。各分量计算如下所述。

$$C_{loss} = m_t \cdot \sum_{t=1}^{24} P_{loss}(t) \cdot \Delta t \quad (8)$$

$$C_s = C_{s,dis} - C_{s,c} \quad (9)$$

$$C_{s,dis} = \sum_{si=1}^N \sum_{t'=1}^{24} (m_{dis} \cdot P_{bat,si,dis}(t') \cdot \Delta t) \quad (10)$$

$$C_{s,c} = \sum_{si=1}^N \sum_{t=1}^{24} (m_{ch} \cdot P_{bat,si,c}(t) \cdot \Delta t) \quad (11)$$

$$C_{kw} = p_t \cdot \theta \cdot C_k \quad (12)$$

$$C_o = 0.5 \cdot E \cdot A_s \cdot R_{IEA} \quad (13)$$

$$C_{bat,in} = \sum_{si=1}^N \left(\frac{k_e \cdot E_{e,si} \cdot r \cdot (1+r)^l}{365((1+r)^l - 1)} + k_c \cdot P_{max,si} \right) \quad (14)$$

$$C_{bat,om} = \sum_{si=1}^N k_{om} \cdot E_{e,si} \quad (15)$$

式中： $P_{loss}(t)$ 为在第 t 个采样间隔内配电网的有功线损； m_t 为从大电网购电电价； si 表示不同的 BESS； N 为 BESS 的个数； $C_{s,dis}$ 、 $C_{s,c}$ 分别为 BESS 一天的放电收入费用和充电支出费用； m_{dis} 和 m_{ch} 分别为 BESS 放电电价和充电电价，为对应时段处的分时电价； $P_{bat,si,dis}(t')$ 和 $P_{bat,si,c}(t)$ 分别为 BESS 在 t' 时刻的放电功率和在 t 时刻的充电功率； p_t 为引入 BESS 后的削峰值(变电站可避免容量，本文只考虑在变电站需扩容情况下，延缓其改造的收入)； θ 为变电站单位容量的综合投资费用； C_k 为变电站资金等年值系数，其表达式如式(16)所示； R 、 H 分别为变电站的年贴现率和使用年限； $0.5 \cdot E$ 为储能剩余电量期望值，即发生停电时，储能剩余电量可以减少用户相应数量的电量不足期望值； A_s 为系统平均停电率； R_{IEA} 为用户停电损失评价率，可取单位电量的 GDP 产值； r 和 l 分别为 BESS 的贴现率和使用年限； $E_{e,si}$ 为第 si 个 BESS 的额定容量； k_e 为储能单位容量成本； k_c 为单位功率的储能变流器成本； $P_{max,si}$ 为第 si 个 BESS 的最大充放电功率； k_{om} 为储能单位容量运行维护成本。

$$C_k = \frac{R \cdot (1+R)^H}{(1+R)^H - 1} \quad (16)$$

2) 约束条件

(1) 电压合格率约束

$$V_{p,r,f} \leq V_{p,r,b} \quad (17)$$

式中， $V_{p,r,f}$ 、 $V_{p,r,b}$ 分别为配置 BESS 前后的电压合格

率。该约束是电能质量对储能配置的要求。

(2) 支路电流约束

$$I_i \leq I_{imax} \quad (i=1,2,3,\dots,d) \quad (18)$$

式中： I_{imax} 为第 i 条支路电流 I_i 的上限； d 为支路总数。该约束是系统安全稳定对储能配置的要求。

(3) 潮流方程约束

$$\begin{cases} P_{G,i} - P_{L,i} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{G,i} - Q_{L,i} = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (19)$$

式中： $P_{G,i}$ 、 $Q_{G,i}$ 分别为节点 i 处电源的有功和无功出力； $P_{L,i}$ 、 $Q_{L,i}$ 分别为节点 i 处的有功和无功负荷； U_i 、 U_j 分别为节点 i 和节点 j 的电压幅值； G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵元素的实部和虚部； θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 的电压相角差。

除以上约束外，还有 BESS 运行时的约束，如式(3)、式(4)。

2.3 下层规划启发式方法求解过程

本文以 DG 出力与负荷叠加后的等效日负荷曲线为基础，根据一定的指标制定 BESS 充放电策略。策略制定的第一步为充电时间 $T_{c,i}$ 和放电时间 $T_{dis,i'}$ 的划分， i 和 i' 分别表示不同的充电时间段和不同的放电时间段；第二步为确定 $T_{c,i}$ 和 $T_{dis,i'}$ 时间段的各采样间隔 Δt 内充放电功率的大小。

第一步：根据分时电价^[14]进行充放电时间段的划分，高电价时段为放电时间 $T_{dis,i'}$ ；低电价时段为充电时间 $T_{c,i}$ 。为提高 BESS 的利用率，对于平电价时段，若其前后时段都为高电价时段，则为充电时间 $T_{c,i}$ ；若其前后时段都为低电价时段，则为放电时间 $T_{dis,i'}$ ；其余情况电池为空闲状态或看作以零功率充放电。

设定分时电价，高峰时段：9:00~15:00 和 19:00~22:00 为高电价时段；低谷时段：1:00~7:00 为低电价时段；其余时段为平电价时段。以某地 DG 出力与负荷叠加后的等效负荷曲线为例，充放电时间段划分的结果如图 1 所示。

第二步：BESS 充放电方式可分为恒功率充放电和变功率充放电，本策略采用变功率充放电方式。当有多个 BESS 时，多个 BESS 相互协调配合确定各自的充放电功率大小。确定单个 BESS 在 $T_{c,i}$ 时间段的各采样间隔 Δt 内充电功率大小的过程如下。

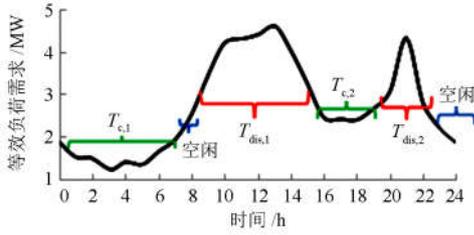


图1 充放电时间段划分结果

Fig. 1 Results of the charge and discharge time division

1) Δt 内等效负荷越小, 使得等效负荷曲线的峰谷差越大, 越需要储能充电, 对 $T_{c,1}$ 时间段的各采样间隔 Δt 内等效负荷值排序, 按从小到大的顺序, 分别确定等效负荷相对应的 Δt 内储能充电功率大小。

2) 为了使 BESS 充电后的等效负荷曲线峰谷差尽量小, 曲线波动也尽可能平滑, 除等效负荷最小的 Δt 内 BESS 按最大功率充电外, 其他 Δt 内按小于最大功率的变功率充电, 具体功率计算方法如式(20)。

$$P_{\text{bat,c}}(t) = \begin{cases} \gamma \cdot (P_{C,\text{max}} + P_{L,\text{min}} - P_L(t)), & P_L(t) < (P_{C,\text{max}} + P_{L,\text{min}}) \\ P_{c,c}, & P_L(t) \geq (P_{C,\text{max}} + P_{L,\text{min}}) \end{cases} \quad (20)$$

式中: $P_L(t)$ 为 $T_{c,1}$ 内第 t 个采样间隔处的等效负荷值; $P_{C,\text{max}}$, $P_{c,c}$ 分别为 BESS 最大充电功率和额定充电功率; $P_{L,\text{min}}$ 为 $T_{c,1}$ 的所有采样间隔内最小的等效负荷值; γ 为第 si 个 BESS 的充电功率权重, 大小值如式(18)所示。 $P_{C,\text{max}} + P_{L,\text{min}}$ 为储能充电后应达到的指标, 若充电前已达到该指标, 则以最佳状态额定功率充电。

$$\gamma = E_{si} / \sum_{si=1}^N E_{si} \quad (21)$$

式中, E_{si} 为第 si 个 BESS 的容量。

3) 按 1)、2) 中方法依次确定 $T_{c,1}$ 时间段的各采样间隔 Δt 内充电功率大小, 每当确定一个 Δt 内的充电功率, SOC 相应地增加 $P_{\text{bat,c}}(t) \cdot \Delta t \cdot \alpha / E_c$, 若 SOC 越限, 则转步骤 4), 此时未确定功率的采样间隔 Δt 内可看作 BESS 以零功率进行充电。

4) 输出 BESS 在 $T_{c,1}$ 时间段的各采样间隔 Δt 内充电功率的大小。

确定单个 BESS 在 $T_{\text{dis},1}$ 时间段的各采样间隔 Δt 内放电功率大小的过程与上述过程类似, 不同点如下: Δt 内等效负荷越大, 使得等效负荷峰谷差越大, 越需要储能放电, 按等效负荷从大到小的顺序, 确定其相对应的 Δt 内 BESS 放电功率的大小。除等效负荷最大的 Δt 内 BESS 按最大功率放电外, 其他 Δt 内按小于最大功率的变功率放电, 具体功率计算方

法如式(22)。

$$P_{\text{bat,dis}}(t') = \begin{cases} \eta \cdot (P_L'(t') - (P_{L,\text{max}} - P_{\text{dis,max}})), & P_L'(t') > (P_{L,\text{max}} - P_{\text{dis,max}}) \\ P_{e,\text{dis}}, & P_L'(t') \leq (P_{L,\text{max}} - P_{\text{dis,max}}) \end{cases} \quad (22)$$

式中: $P_L'(t')$ 为 $T_{\text{dis},1}$ 内第 t' 个采样间隔处的等效负荷值; $P_{\text{dis,max}}$, $P_{e,\text{dis}}$ 分别为 BESS 最大放电功率和额定放电功率; $P_{L,\text{max}}$ 为 $T_{\text{dis},1}$ 的所有采样间隔内最大的等效负荷值; η 为放电功率权重, 大小与 γ 相同。每当确定一个 Δt 内的放电功率, SOC 相应地减小 $P_{\text{bat,dis}}(t') \cdot \Delta t / (E_c \cdot \beta)$ 。 $P_{L,\text{max}} - P_{\text{dis,max}}$ 为储能放电后应达到的指标, 若放电前已达到该指标, 则以最佳状态额定功率放电。

同理, 按上述方法可分别确定 $T_{c,2}$ 和 $T_{\text{dis},2}$ 时间段的各采样间隔 Δt 内充放电功率的大小, 最后得到 BESS 在日调度周期内的充放电策略。

3 求解方法

本文采用每代中嵌入启发式方法的遗传算法求解模型, 其中通过启发式方法(2.3 节)确定下层规划中 BESS 的运行情况, 通过遗传算法求解上层规划中容量配置结果。具体求解过程如下:

1) 输入网络原始数据, 包括所有 DG 各时刻出力和所有节点负荷各时刻需求, 对控制变量储能容量进行染色体编码。

2) 随机产生初始种群。

3) 将种群中个体(储能容量)看作常量, 根据 2.3 节中启发式方法制定储能的充放电策略, 并计算目标函数。

4) 进行选择、交叉、遗传变异操作。

5) 进行终止条件判断, 若遗传代数大于最大遗传代数, 计算结束, 输出结果; 否则, 转步骤 3)。

4 算例分析

4.1 算例描述

为验证本文提出的数学模型的有效性, 以 IEEE33 节点配电系统^[15]作为算例, 并在节点 15、21 和 28 上分别增加了 300 kW 风电 DG、400 kW 光伏 DG 和 400 kW 风电 DG, 节点 13、23 和 29 分别增加了 0.9 Mvar、0.8 Mvar 和 0.8 Mvar 的电容器, 系统结构如图 2 所示, 对该配电网进行储能配置。算例系统中 DG 和电容器的位置及容量都参照已有文献中的数据进行确定。某地典型日的风力发电出力和典型日负荷曲线如图 3 所示。单个蓄电池储能单元(单位容量)相关参数如表 1 所示。

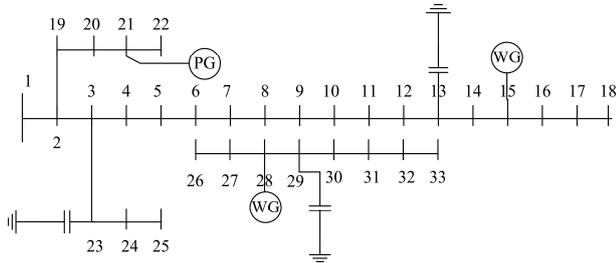


图 2 配电网储能优化配置算例系统

Fig. 2 System of the study case for optimal allocation of energy storage system in distribution network

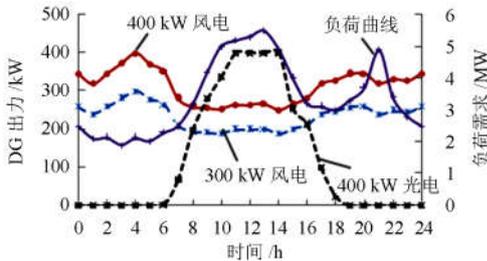


图 3 负荷曲线和 DG 出力曲线的对比

Fig. 3 Comparison of load curves and DG output curves

表 1 单个蓄电池储能单元相关参数

Table 1 Parameters about a single battery energy storage unit

参数	数值	参数	数值
额定容量/Wh	1000	投资成本/元	2500
额定功率/W	250	运行维护成本/(元/年)	17
最大充放电功率/W	500	使用年限/年	7
最小荷电状态	0.1	贴现率	0.1
最大荷电状态	0.9	剩余电量损失率(%)	0.1
充放电效率(%)	95	初始量 SOC(0)	0.1
—	—	储能变流器成本/元	250

设定分时电价, 高峰时段: 9:00~15:00 和 19:00~22:00, 高电价为 1.1 元/kWh; 低谷时段: 1:00~7:00, 低电价为 0.35 元/kWh; 其余时段的平电价为 0.5 元/kWh。支路电流上限取配置储能前支路电流的 1.5 倍, 单个 BESS 的最大安装容量为 1 MW。将日周期分为 24 个小时段进行计算。遗传算法中设置 50 代 30 个体。参数 m_1 为 0.65 元/kWh, θ 为 400 元/kWh, R , H 分别为 0.1 和 20, A_s 为 0.3%, R_{IEA} 为 1.88 元/kWh, k_c 为 0.5 元/W。

本文对储能安装位置不做过多考虑, 设其与风电 DG 位置相同。因为风电出力具有逆负荷特性, 储能可在负荷低谷时段充电可存储风力发电能量, 并在负荷高峰时段(风电出力较小时段)放电, 所以储能安装位置在风电 DG 处比较理想。

4.2 计算结果与分析

算例中有两个风电 DG, 相应地配置两个 BESS,

求解过程中日经济效益随储能配置容量变化而变化的情况如图 4 所示。

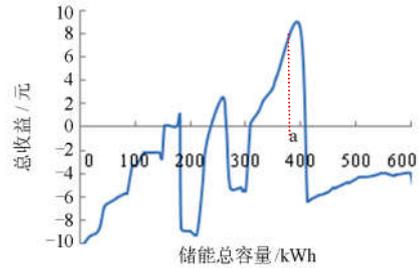


图 4 收益随储能配置容量变化而变化的情况

Fig. 4 Economic benefits vary with the change of energy storage capacity

由图 4 可以看出, 随着储能配置容量的逐渐增大, 经济效益总体上也是呈增大趋势, 但当储能配置容量增加到一定程度时经济效益会变为负值, 并稳定在负值区域, 这是因为储能投资到一定程度时峰谷差已有了一定的缩小, 不再需要太多的储能投资去降低峰谷差, 而储能的投资成本又较高, 所以继续增加储能投资经济效益会降低。经济效益上升过程中有较大的波动, 这是因为平电价充电时段较短, 会有储能充电量没有达到最大值的情况发生, 而随着储能容量的增大, 充电功率也不断增大, 且增速更快, 储能存储容量会逐渐接近最大值, 经济效益也逐渐增大。本算例计算的最优配置容量为图 4 中 a 点处 390.8 kWh, 此时, 节点 15, 28 处储能配置的容量分别为 138.7 kWh 和 252.1 kWh, 由式(14)、式(15)得日投资成本 622.6 元, 由式(8)、式(9)、式(12)、式(13)得日收入 630.5 元, 日经济效益约为 7.9 元。

4.3 与现有典型储能充放电策略对比

将 4.2 节中得到的储能配置容量看作常量, 按文献[10]中提出的储能充放电策略制定思路, 根据负荷峰谷变化情况将日周期简单分为两段, 白天充电、晚上放电, 各小时段储能充放电功率作为决策变量, 以节约电能损耗收入与储能低储高放套利收入之和最大为目标函数, 求解充放电策略, 与按本文方法得到的充放电策略对比。两策略下的日收入情况如表 2 所示。图 5 为两策略下的等效负荷曲线与配置储能前的等效负荷曲线对比情况。

表 2 配置储能后的收入情况

Table 2 Income after configuration of energy storage

策略	节约能 耗/元	储能套 利/元	延缓电网升 级改造/元	减少停电 损失/元
本文策略	80.5	527.6	21.4	1.1
文献[10]策略	52.4	293.1	21.4	1.1

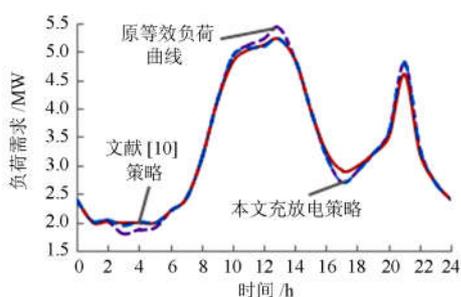


图5 储能运行前后的等效负荷曲线对比

Fig. 5 Comparison of the equivalent load curves before and after energy storage operation

由表2可以看出,两策略下的延缓电网升级改造和减少停电损失的收入都相同,但本文策略下的节能收入、套利收入都比文献[10]策略下的高;由图5可以直观地看出,两种充放电策略下BESS都有削峰填谷的效果,但本文策略的削峰填谷效果更好一些,14点前两策略运行效果基本相同,但14点后文献[10]策略基本不起作用,而本文策略仍有一定的削峰填谷作用。这是因为文献[10]中将各小时段的储能充放功率作为决策变量求解,该方法对周期内储能连续一充一放的情况较适用,虽能得到BESS充放电策略,但储能的利用率较低。而日周期内储能多充多放的情况更符合工程实际,也更能发挥其作用,本文策略在制定中以等效负荷变化情况为基础划分了多个充放电时段,并根据一定指标尽可能地缩小峰谷差,储能利用率较高。

5 结论

1) 在BESS优化配置中考虑其实际运行情况,增加了目标函数计算的准确性,获得的配置方案更符合实际。

2) 以等效负荷曲线为基础,根据一定指标提出一种考虑分时电价的BESS充放电策略,与现有典型充放电策略相比,此策略能有效提高BESS的经济效益和削峰填谷能力。

3) 对于储能的安装位置,文中只是根据风电的逆负荷特性进行简单分析,确定风电接入点为安装位置。由于文章篇幅有限,本文没有更深一步地去研究如何在含多个分布式光伏、风力发电单元的配电网中确定储能安装位置,在本文的基础上下一步将继续研究分析储能规划中最优安装位置问题。

参考文献

[1] 李善颖, 吴涛, 任彬, 等. 基于模块化多电平变换器的储能系统综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 139-146.

LI Shanying, WU Tao, REN Bin, et al. Review of energy storage system based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 139-146.

[2] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.

LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.

[3] 廖怀庆, 刘东, 黄玉辉, 等. 考虑新能源发电与储能装置接入的智能电网转供能力分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 9-16.

LIAO Huaiqing, LIU Dong, HUANG Yuhui, et al. Smart grid power transfer capability analysis considering integrated renewable energy resources and energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 9-16.

[4] ZHAO Haoran, WU Qiuwei, WANG Chengshan, et al. Fuzzy logic based coordinated control of battery energy storage system and dispatchable distributed generation for microgrid[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(3): 422-428.

[5] XU Guoyi, XU Lie, YAO Liangzhong. Wind turbines output power smoothing using embedded energy storage systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013, 1(1): 49-57.

[6] 丁明, 王波, 赵波, 等. 独立风光柴储微网系统容量优化配置[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 575-581.

DING Ming, WANG Bo, ZHAO Bo, et al. Configuration optimization of capacity of standalone PV-wind-diesel-battery hybrid microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 575-581.

[7] 李成, 杨秀, 张美霞, 等. 基于成本分析的超级电容器和蓄电池混合储能优化配置方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 20-24.

LI Cheng, YANG Xiu, ZHANG Meixia, et al. Based on cost analysis of the super capacitor and battery hybrid energy storage optimization configuration scheme[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18): 20-24.

[8] 王成山, 于波, 肖峻, 等. 平滑微电网联络线功率波动的储能系统容量优化方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 12-17.

WANG Chengshan, YU Bo, XIAO Jun, et al. An energy storage system capacity optimization method for microgrid tie-line power flow stabilization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 12-17.

- [9] 张蕴昕, 孙运全. 混合储能风光互补微网中的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 93-98.
ZHANG Wenxin, SUN Yunquan. Control strategy of a hybrid energy storage in wind-solar hybrid generation micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 93-98.
- [10] 向育鹏, 卫志农, 孙国强, 等. 基于全寿命周期成本的配电网蓄电池储能系统的优化配置[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 264-270.
XIANG Yupeng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Life cycle cost based optimal configuration of battery energy storage system in distribution network[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 264-270.
- [11] 章美丹, 宋晓喆, 辛焕海, 等. 计及网损的配电网蓄电池储能站优化运行策略[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2123-2128.
ZHANG Meidan, SONG Xiaozhe, XIN Huanhai, et al. Optimal operation strategy of battery energy storage system in distribution networks with consideration of power losses[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2123-2128.
- [12] 国宗, 韦钢, 郭运城, 等. 面向供电能力提升的配电网储能功率动态优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 1-8.
GUO Zong, WEI Gang, GUO Yuncheng, et al. Dynamic optimization of energy storage power in distribution network based on power supply capacity[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 1-8.
- [13] 杨玉青, 牛利勇, 田立亭, 等. 考虑负荷优化控制的区域配电网储能配置[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1019-1025.
YANG Yuqing, NIU Liyong, TIAN Liting, et al. Configuration of energy storage devices in regional distribution network considering optimal load control[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1019-1025.
- [14] 刘小聪, 王蓓蓓, 李扬, 等. 智能电网下计及用户侧互动的发电日前调度计划模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 30-38.
LIU Xiaochong, WANG Beibei, LI Yang, et al. Day-ahead generation scheduling model considering demand side interaction under smart grid paradigm[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 30-38.
- [15] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 196-202.

收稿日期: 2016-05-05; 修回日期: 2016-06-24

作者简介:

李秀磊(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划; E-mail: 1532866112@qq.com

耿光飞(1970-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统优化规划等; E-mail: guangfei@cau.edu.cn

季玉琦(1989-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统无功优化等. E-mail: jiyuqi1989@163.com

(编辑 魏小丽)

