

主动配电网中电池储能系统最优充放电策略

朱泽锋¹, 赵晋泉¹, 魏文辉², 林昌年², 余一平¹

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏省南京市 210098; 2. 北京科东电力控制系统有限责任公司, 北京市 110179)

摘要: 储能系统参与主动配电网的调度计划, 对提高分布式能源的利用效率和配电网运行经济性意义重大。提出了一种主动配电网中电池储能系统(BESS)的运行优化模型。考虑分时电价和售购电价差异, 实现了分布式电源波动功率的消纳, 最小化配电网向主网的购电成本; 通过计算 BESS 中电池循环寿命, 计及 BESS 的等效运行成本, 实现了 BESS 的经济运行。采用分支定界-原对偶内点法进行求解, 以分支定界法考虑离散变量和时段间耦合约束, 将问题转化成一系列仅含连续变量的单时段优化问题进行求解。通过对含分布式电源和 BESS 的 IEEE 33 节点算例进行测试, 验证了所提模型及算法的有效性和可行性。

关键词: 主动配电网; 电池储能系统; 最优充放电策略; 等效运行成本; 分支定界-原对偶内点法

0 引言

主动配电网是未来配电网的一种主要模式, 具有高分布式电源(DG)渗透率及高控制要求的特点^[1-3]。但是 DG 的大量接入, 其波动性给配电网的运行、控制带来广泛影响。随着储能系统(ESS)技术的发展, 造价的逐渐降低, 其用于提高 DG 的消纳以及配电网运行经济性而备受关注^[4-6]。

根据 ESS 充放电时间响应特性可以将其分为: ①功率型 ESS, 如超级电容器、飞轮储能等, 主要用于平滑可再生能源的输出波动; ②能量型 ESS, 如各种介质的电池储能系统(BESS), 主要用于实现削峰填谷以及计划发电^[7]。本文以 BESS 为对象, 重点研究主动配电网中 BESS 的优化运行问题, 突出强调 BESS 在主动配电网优化运行中的作用以及本文所提出的优化模型与算法对 ESS 充放电策略的优化效果, 未考虑可控 DG、需求侧响应对其产生的影响。

文献[8]以峰谷电价下风电出力最大化和网络损耗最小化为目标, 建立了含风机和 BESS 的配电网有功/无功最优潮流(OPF)模型。该文基于峰-谷电价单次切换的特点设定每天 BESS 只进行一次固定时刻的充放电切换。BESS 模型中存储电量采用充电效率乘有功功率的一阶差分方程表示, 省略了时间量, 只适用于时间间隔恰好为 1 h 的情况。

由于每天风力发电变化大, 文献[8]中 BESS 充放电时刻固定的方式并不能最大程度发挥 BESS 作用, 在仍设定每天一次切换基础上, 文献[9]提出 BESS 充放电切换时刻通过构造一个上层优化问题求解得到。

文献[10]在文献[8-9]的基础上, 计及有功、无功功率的不同电价, 以购电成本最小为目标, 提出一种允许配电网向主网反送电的有功/无功 OPF 模型。文献[11]采用电池荷电状态(SOC)来描述 ESS 能量变化情况。对多并网点配电网, 以最小化配电网购电为目标, 构建了一个包含固定和不固定出力的 DG、需求侧响应、ESS 等元素的主动配电网动态 OPF 模型。对比于文献[8]中对于存储能量的一阶差分方程, 该文的 SOC 表示方法更严谨且简洁。上述文献均未精确计及 ESS 中电池成本与放电深度之间的关系。文献[12-13]通过采用雨流计数法计算电池放电深度, 根据电池放电深度与循环寿命的对应关系, 得出电池的等效循环寿命, 在考虑电池成本的基础上以 ESS 年均最小成本为目标进行优化配置。

本文提出一种主动配电网中 BESS 充放电优化模型。采用 SOC 描述 BESS 能量存储状态, 以整个配电侧为利益整体, 考虑分时电价^[8]和售购电价差异, 通过计算 BESS 的循环寿命计及 BESS 等效运行成本对经济性的影响, 以配电网购电成本和运行过程中 BESS 等效成本之和最小为目标进行优化。上述问题是一个特殊的非线性动态混合整数规划问题。为处理离散变量以及时段间耦合约束, 采用分

收稿日期: 2016-04-17; 修回日期: 2016-06-29。

上网日期: 2016-09-02。

国家自然科学基金资助项目(51577049)。

支定界-原对偶内点法^[14-16]求解,该方法结合了分支定界法准确有效处理离散变量和原对偶内点法^[17]高效求解非线性规划的优点,具有很好的鲁棒性和收敛性。并通过广度优先和最优优先相结合的搜索策略提高计算效率。通过对 IEEE 33 节点算例进行仿真,验证了所提模型和求解方法的有效性和可行性。

1 BESS 的模型

BESS 中功率调节系统在充电时作为整流器而放电时作为逆变器工作,可快速、独立地调节 BESS 的有功和无功出力^[8]。

图 1 为 BESS 充放电模型。图中: P_{rated} 为 BESS 额定有功功率; η_{in} 和 η_{out} 分别为 BESS 充、放电效率; P_{BESS} 为 BESS 的有功出力; S_{SOCmax} 和 S_{SOCmin} 分别为 BESS 的 SOC 最大值和最小值。

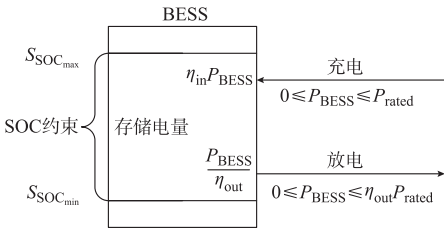


图 1 BESS 充放电模型

Fig.1 Charging and discharging model of BESS

受限于功率调节系统的物理特性,BESS 充放电速率限制可表示为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{BESS}^t \leq P_{rated} & I' = -1 \\ 0 \leq P_{BESS}^t \leq \eta_{out} P_{rated} & I' = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_{BESS}^t 为 t 时刻 BESS 的有功出力, $P_{BESS}^t \geq 0$; I' 表示 t 时刻 BESS 充放电状态(等于 1 时表示放电,等于 -1 时表示充电)。

图 2 为 BESS 有功和无功容量图^[8]。图中: S_{BESS}^t 为 t 时刻 BESS 的视在功率; Q_{BESS}^t 为 t 时刻 BESS 的无功出力; $S_{BESS,max}$ 为 BESS 最大视在功率。有功功率为正时 BESS 为放电状态,为负时 BESS 为充电状态。

从图中可以看出,BESS 无功输出的范围受限于 BESS 实际的有功功率及其额定的视在功率,而 BESS 视在功率的限制可表示为:

$$(P_{BESS}^t)^2 + (Q_{BESS}^t)^2 \leq S_{BESS,max}^2 \quad (2)$$

用电池 SOC 表示 BESS 的能量水平。对于 Δt 时间内的能量变化可以表示为^[13]:

$$\Delta S_{SOC}^t = \begin{cases} \frac{\Delta t}{W_{rated}} \eta_{in} I' P_{BESS}^t & I' = -1 \\ \frac{\Delta t}{W_{rated}} \frac{1}{\eta_{out}} I' P_{BESS}^t & I' = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: ΔS_{SOC}^t 为 t 至 $t+1$ 时刻 BESS 的 SOC 变化量; W_{rated} 为 BESS 的额定容量。

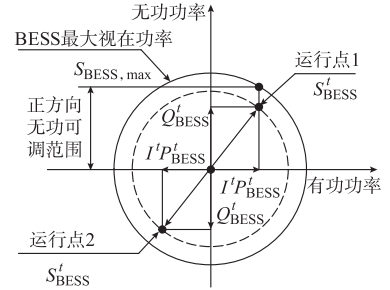


图 2 BESS 有功和无功容量图

Fig.2 Active and reactive power capability diagram of BESS

时刻 t 的 S_{SOC}^t 可表示为:

$$S_{SOC}^t = S_{SOC}^0 - \sum_{h=1}^{t-1} \Delta S_{SOC}^h \quad (4)$$

式中: S_{SOC}^0 为 BESS 初始的 SOC 值。

2 计及等效运行成本的配电网 BESS 优化运行模型

2.1 BESS 等效运行成本模型

储能设备的寿命不仅与温度、峰值电流等因素有关,还与其运行过程中的放电深度密切相关。一般情况下,放电深度越大,储能设备的循环寿命越短。附录 A 图 A1 给出了 BESS 放电深度 D_{oD} 与循环寿命 N_{ctf} 之间的拟合曲线示意图^[12]。

为得到放电深度与循环寿命之间的函数关系,可选择不同的函数对其进行拟合,如多项式函数法、幂函数法等。本文以多项式函数为例, D_{oD} 与 N_{ctf} 之间的函数关系为:

$$N_{ctf}(D_{oD}) = \sum_{i=0}^N a_i D_{oD}^i \quad (5)$$

式中: a_i 为 i 次项对应的系数; N 为多项式阶数。

由于式(5)中的 D_{oD} 是一个与电池充放电状态和有功功率之间存在非线性关系的变量,即 $D_{oD} = f(I', P_{BESS}^t)$,但其无法给出显式的数学表达式,一般采用雨流计数法计算^[12-13]。

电池的成本一般包括固定投资成本和运行维护成本两部分。由于运行维护成本仅与电池的额定功率、额定容量以及运行时间有关^[13,18],而与具体的 BESS 运行情况无关,若计及则为一常数。本文考虑投资成本与循环寿命的关系。设电池的投资成本可以均摊到每一次循环充放电,定义第 k 号电池第 m 次循环周期的放电深度为 $D_{oD,k,m}$,则其单次循环的等效运行成本为:

$$C_{e,k,m}(D_{oD,k,m}) = \frac{C_P P_{\text{rated}} + C_W W_{\text{rated}}}{N_{\text{ctf}}(D_{oD,k,m})} \quad (6)$$

式中: C_P 和 C_W 分别为 BESS 单位功率投资成本和单位容量投资成本。

2.2 目标函数

世界各国鼓励 DG 在满足自己负荷需求的基础上,将剩余电能卖给电网公司,为电网提供有偿服务。而主动配电网的出现为 DG 更好地参与配电网市场提供了现实条件^[19]。因此,基于以上背景,本文考虑以整个配电侧为一个市场参与者与主网进行电能市场交易。当配电网出现 DG 出力过剩时,可向主网反送电能。此外,国内现行分时电价包括峰谷电价和丰枯电价两种形式。峰谷分时电价是一种通过电价信号来引导用户采取合理的用电结构和用电方式的有效的应对措施,应用广泛^[20]。而分时电价下,BESS 不仅用于提高配电网 DG 的消纳,在 DG 出力大于负荷时充电、小于负荷时放电;同时也可以在主网电价低时进行购电存储,从而降低向主网购电的成本。

基于上述两种情形,本文考虑配电网从主网购电电价高于配电网向主网售电的电价以及购电电价为分时电价的情形。为全面考虑配电网侧经济效益,除配电网侧购电成本外,还考虑了 BESS 等效运行成本。目标函数可写为:

$$\min \left(\sum_{t=1}^T C^t P_S^t \Delta t + \sum_{k=1}^{N_B} \sum_{m=1}^{M_k} C_{e,k,m}(D_{oD,k,m}) \right) \quad (7)$$

$$C^t = \begin{cases} C_+ & P_S^t \geq 0 \\ C_- & P_S^t < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: C_+ 和 C_- 分别为 t 时段的配电网购电电价和售电电价,且 $C_+ > C_-$; P_S^t 为 t 时刻主网向配电网输送的有功功率; N_B 为 BESS 数目; M_k 为 k 号 BESS 调度周期内总循环周期数; T 为调度周期的总时段数。

分时电价模型见附录 A 图 A2,将全天 24 时段分为 T_1, T_2, T_3 时段, T_1 和 T_3 时段对应低电价 $C_{+,1}, T_2$ 时段对应高电价 $C_{+,h}$ 。

2.3 约束条件

1) 节点潮流平衡方程约束

$$P_{DG,i}^t + P_{S,i}^t + I_i P_{\text{BESS},i}^t - P_{d,i}^t - V_i^t \sum_{j=1}^n V_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) = 0 \quad (9)$$

$$Q_{DG,i}^t + Q_{S,i}^t + Q_{\text{BESS},i}^t - Q_{d,i}^t - V_i^t \sum_{j=1}^n V_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t - B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) = 0 \quad (10)$$

式中: $P_{DG,i}^t$ 和 $Q_{DG,i}^t$ 分别为 t 时刻节点 i 处的 DG 有

功和无功出力; $P_{S,i}^t$ 和 $Q_{S,i}^t$ 分别为 t 时刻配电网根节点处的有功和无功功率; $P_{\text{BESS},i}^t$ 和 $Q_{\text{BESS},i}^t$ 分别为 t 时刻节点 i 处 BESS 的充放电有功和无功出力; $P_{d,i}^t$ 和 $Q_{d,i}^t$ 分别为 t 时刻节点 i 处的有功和无功负荷; n 为节点数目; V_i^t 和 V_j^t 分别为 t 时刻节点 i 和 j 的电压幅值; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点 i 和 j 之间互导纳的实部和虚部; $\theta_{ij}^t = \theta_i^t - \theta_j^t$, 为 t 时刻 i, j 两节点电压的相角差。

2) 运行约束

$$V_{i,\min} < V_i^t < V_{i,\max} \quad (11)$$

$$S_l^t \leq S_{l,\max} \quad (12)$$

$$S_{\text{SOC},i,\min} < S_{\text{SOC},i}^t < S_{\text{SOC},i,\max} \quad (13)$$

式中: $V_{i,\min}$ 和 $V_{i,\max}$ 分别为节点 i 电压允许的最小、最大值; S_l^t 为 t 时刻支路 l 的视在功率; $S_{l,\max}$ 为支路 l 的视在功率最大值; $S_{\text{SOC},i,\max}$ 和 $S_{\text{SOC},i,\min}$ 分别为节点 i 处 BESS 的 SOC 最大和最小值

3) 控制变量约束

其包括第 1 节中与 BESS 有关的充放电有功功率约束(式(1))、视在功率约束(式(2))。

考虑到目前大部分以风电光伏为例的 DG 都通过逆变器并网或者均配有无功补偿设备,因此可向电网提供一定程度的无功支持^[21]。本文将 DG 的无功出力设为控制变量,其上下限为:

$$Q_{DG,i,\min} \leq Q_{DG,i}^t \leq Q_{DG,i,\max} \quad (14)$$

式中: $Q_{DG,i,\max}$ 和 $Q_{DG,i,\min}$ 分别为节点 i 处对应 DG 无功出力的最大、最小值。

4) 时段间耦合约束

其包括第 1 节中 BESS 能量与功率之间的关系式以及能量平衡方程(式(3)、式(4))。

一般情况下,BESS 在调度周期最后时刻剩余的电量应该与初始时刻相同:

$$S_{\text{SOC}}^T = S_{\text{SOC}}^0 \quad (15)$$

3 基于分支定界-原对偶内点法的算法

上述优化问题为一个非线性动态混合整数规划问题,并且考虑到采用雨流计数法计算电池放电深度的特殊性,本文采用分支定界-原对偶内点法求解。分支过程的目标函数为配电网购电成本。本文按时段分支,通过分支定界法,确定各单时段的 BESS 充放电状态,将原问题分解为一系列仅含连续变量的单时段 OPF 子问题进行求解,并且可通过 BESS 充放电状态的变化确定 SOC 曲线的峰谷点。

3.1 单时段 OPF 子问题

单时段 OPF 子问题可描述如下:

$$\begin{cases} \min CP_s \Delta t \\ \text{s.t. } \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \\ 0 \leq P_{\text{BESS},i} \leq \eta_{\text{out}} P_{\text{rated},i} & i = 1, 2, \dots, N_B \\ P_{\text{BESS},i}^2 + Q_{\text{BESS},i}^2 \leq S_{\text{BESS},i,\text{max}}^2 & i = 1, 2, \dots, N_B \\ V_{i,\text{min}} < V_i < V_{i,\text{max}} & i = 1, 2, \dots, n \\ Q_{\text{DG},i,\text{min}} \leq Q_{\text{DG},i} \leq Q_{\text{DG},i,\text{max}} & i = 1, 2, \dots, N_{\text{DG}} \\ S_l \leq S_{l,\text{max}} & l = 1, 2, \dots, N_l \end{cases} \quad (16)$$

式中： C 为当前时段的购电和售电电价； $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 为潮流约束(式(11)和式(12))； N_{DG} 为 DG 数目； N_l 为支路数； $S_{\text{BESS},i,\text{max}}$ 为节点 i 处 BESS 的最大视在功率。

η_{out} 只有当 BESS 处于放电状态时才有。单时段 OPF 子问题仅含连续变量，采用原对偶内点法^[17]求解。

3.2 BESS 放电深度的计算

如前所述，本文采用雨流计数法计算 BESS 放电深度，具体流程见文献[12-13]，在此不再赘述。

3.3 分支定界法要点

1) 分支过程。本文按时段分支，分支前需判断松弛子问题与其父问题是否属于同一时段。常用的搜索策略主要有深度优先搜索、广度优先搜索和最优优先搜索三种^[15]。为尽可能提高搜索效率和可行解质量，本文采用广度优先和最优优先相结合的搜索策略。

2) 定界过程。本时段的上下界都是由上一时段的上下界加上本时段的最大、最小目标值形成。

3) 剪支过程。本文的剪支准则有 4 条：①该子问题无可行解；②所有离散变量均已取得整数解；③子问题目标值大于或等于上界；④SOC 不满足上下限约束。值得注意的是，由于在未确定所有时段 BESS 调度策略时无法计及 BESS 等效运行成本，因此，剪支过程中目标值不包含 BESS 的等效运行成本。其中，第 3 条剪支准则采用图 3 所示方法进行判断。

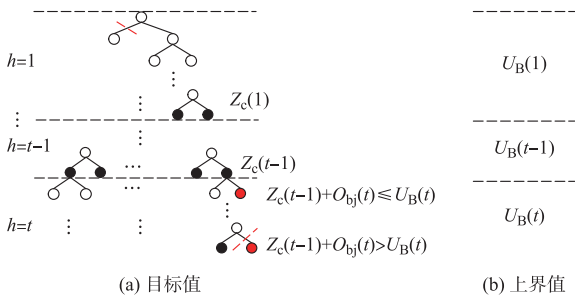


图 3 目标值和上界值的比较示意图
Fig.3 Schematic diagram of comparison between objective value and upper value

图中，黑色圆点为当前时段所有离散变量已取得整数解的子问题， $Z_c(t)$ 为 1 至 t 时段目标值之和， $U_B(t)$ 为对应上界，红色圆点为待判断的子问题， $O_{bj}(t)$ 为其目标值。按照下式进行剪支判断：

$$Z_c(t-1) + O_{bj}(t) - U_B(t) > 0 \quad (17)$$

若满足，则进行剪支；若不满足，则将其加入待分支队列(记为 RP)。

3.4 本文算法流程

本文基于分支定界-原对偶内点法的含 BESS 的主动配电网有功优化调度算法流程如下。

步骤 1: 根据 DG 出力和负荷的预测结果，得到各时段目标值上界及能量缺额。

步骤 2: 置时段 $t = 1$ ，求解松弛后的第 t 时段 OPF 问题，判断离散变量结果是否为整数，若是，保存结果，转步骤 5；否则，将该松弛问题及其目标函数值加入 RP，同时将该目标函数作为该时段的下界。

步骤 3: 依次对 RP 中的子问题进行分支，采用原对偶内点法求解各松弛子问题，并将其加入下次待分支队列(记为 RRP)中。

步骤 4: 针对子问题所得解，判断该时段所有离散变量是否均取得整数解，若是，则记 $t = t + 1$ ；若不是，则继续该时段的计算。

步骤 5: 当某一时段结束后，根据前述剪支准则对 RRP 中所有子问题进行剪支，并更新 RP。

步骤 6: 判断 t 是否大于其上限 T ，若是，则结束分支过程计算，转步骤 8；若否，则继续。

步骤 7: 判断待分支队列 RP 是否为空，若是，求解出错；若否，则转步骤 4。

步骤 8: 对所有满足约束条件的调度方式进行放电深度的计算，然后得到等效运行成本，并加到每种调度方式的目标函数值中，并从中取出目标函数值最小的解作为最优解。

4 算例分析

为验证本文所提模型及算法的有效性，对修改后的 IEEE 33 节点系统(见图 4)进行仿真分析。本程序采用 MATLAB R2013b 编写，在 Pentium R 3.0 GHz 的 CPU，4 GB 内存的计算机上运行。

图 4 中 0 号节点为配电网与主网的连接点，分别在节点 10, 16, 23, 31 上加装 DG，在节点 10 和 16 处分别装 1 号和 2 号铅酸电池 ESS，系统其他参数不变。

综合文献[13]和文献[18]，设置相关参数如附录 A 表 A1 所示。该型号铅酸电池在不同放电深度下对应的循环寿命见附录 A 表 A2^[12]，算例中根据

放电深度与循环寿命对应关系的特点选用 4 阶函数进行拟合。

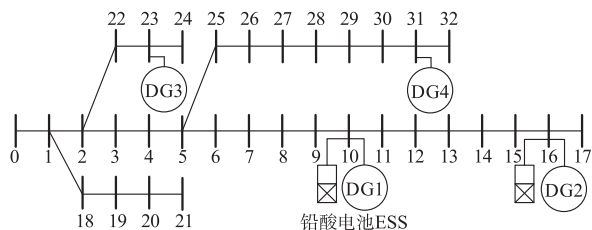


图 4 修改后的 IEEE 33 节点系统
Fig.4 Modified IEEE 33-bus system

选取某日为例,次日 24 h 负荷及 DG 有功出力预测曲线如图 5 所示。可看出,该地区日 DG 出力波动及负荷变化均较大。本文认为 BESS 从充电到放电再到充电为一次完整的切换。假设 24 h 负荷的功率因数均为 0.85。

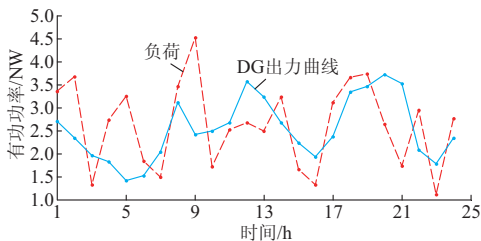


图 5 日负荷和 DG 出力曲线
Fig.5 Curves of daily load and output of DG

为展现是否考虑分时电价下 BESS 的不同充放电策略,以及是否考虑 BESS 等效运行成本对经济

性的影响,本文设计了以下 4 种情形进行对比,均采用分支定界-原对偶内点法进行求解:①情形 1,不考虑分时电价和 BESS 等效运行成本;②情形 2,不考虑分时电价,考虑 BESS 等效运行成本;③情形 3,考虑分时电价,不考虑 BESS 等效运行成本;④情形 4,考虑分时电价和 BESS 等效运行成本。对于情形 1 和 2,购电电价统一设为元/(kW·h)。情形 1 和 2 的 BESS 的 SOC 曲线如图 6 所示,成本对比如表 1 所示。

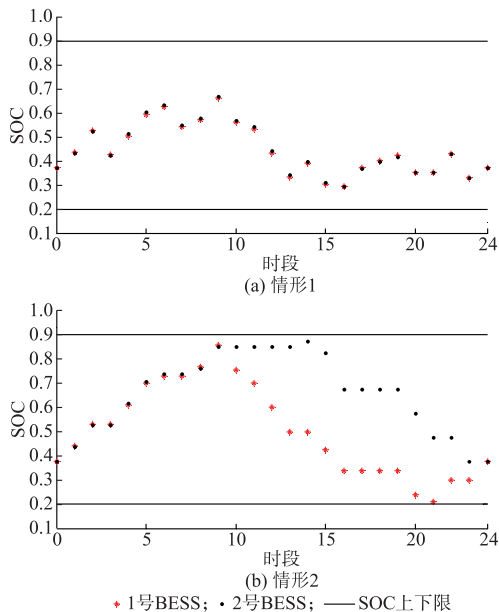


图 6 情形 1 和 2 的 BESS 的 SOC 曲线
Fig.6 SOC curves of BESS of case 1 and 2

表 1 4 种情形结果对比
Table 1 Results comparison of four cases

情形	购电量/(kW·h)		售电量/(kW·h)	购电成本/元	售电收益/元	等效运行成本/元	总成本/元
	高电价时段	低电价时段					
1	4 380.79		2 287.24	4 380.79	686.17		3 694.62
2	5 646.48		3 748.36	5 646.48	1 124.51	6 855.41	11 377.38
3	2 635.80	1 840.00	2 287.24	3 555.80	686.17		2 869.63
4	3 359.58	2 375.38	3 745.56	4 547.27	1 123.67	7 043.69	10 467.29

从图 6 中可以看出,情形 1 中 BESS 均为同时充电或者同时放电,而情形 2 中的调度策略并非全部是这种方式。这是由于某些时刻只需要一台 BESS 进行充电或者放电就可以平衡 DG 出力与负荷需求之差,因此不是同时充放电的调度模式,特别的,当两个 BESS 系统充放电状态不统一时,一个进行正常的充电或放电,另一个处于不充不放的临界状态:如时段 10 至 13,1 号 BESS 放电,2 号 BESS 则为临界状态;时段 14 和 23,2 号 BESS 进行放电,1 号 BESS 则为临界状态。

情形 1 中的最优解为 BESS 全天共需要进行

6 次充放电切换,配电网共需要向主网购电 4 380.79 kW·h,总成本为 3 694.62 元。而在考虑 BESS 等效运行成本后,情形 2 的最优解为 BESS 全天共需要进行一次充放电切换,配电网共需要向主网购电 5 646.48 kW·h,同时会向主网反送 3 748.36 kW·h 的电能,购售电的总成本为 4 521.97 元。相比而言,情形 1 中 BESS 的调度更灵活,可以消纳更多的 DG 出力以及更充分发挥 BESS 的作用,而情形 2 的调度策略在考虑 BESS 的等效运行成本之后,为了使得总成本最小,在某些时刻需要通过主网与配电网的连接点供电,增加了线

路上的损耗,因此情形 2 中总的购电量要多余情形 1。

之所以等效运行成本的计及会产生这种影响是由于 BESS 的等效运行成本相对于购电成本来说要高很多。以本文算例中所选铅酸电池为例,一台 0.4 MW/4 MW·h 的 BESS 造价高达 460 万元,即使当放电深度仅仅为 0.1 时,平均到这一次切换的等效运行成本也要 754.1 元左右,占了购电成本的 15% 多。

对于情形 1 和 2 来说,BESS 在其中主要起到了 DG 出力多时,尽可能多地存储多余的 DG 出力;DG 出力少时,平衡负荷与 DG 出力差额的作用,以此来提高主动配电网运行的经济性。而在情形 3 和 4 中,BESS 还可以通过在电价低的时候进行购电存储,电价高且负荷大于 DG 出力的时候进行放电以提高主动配电网的运行经济性。

对于情形 3 和 4 则采用分时电价模型,情形 3 和 4 下的最优调度策略成本对比如表 1 所示。情形 3 下全天 24 时段储能设备充放电切换 4 次,共需要向主网购电 4 475.8 kW·h,其中低电价时段购电 1 840 kW·h,高电价时段购电 2 635.8 kW·h,购售电成本共 2 869.63 元。该策略很好地利用了 BESS 消纳 DG 的作用。情形 4 下 BESS 共需进行一次充放电切换,共需向主网购电 5 734.96 kW·h,其中低电价时段购电 2 375.38 kW·h,高电价时段购电 3 359.58 kW·h,总购售电成本之和为 3 393.57 元。与情形 1 和 2 不同,由于时段 1 至 5 及时段 23,24 电价较低,所以情形 3 和 4 在这些时段内配电网向主网尽可能购电,通过 BESS 进行存储,而在电价高且 DG 出力不够的情况下进行放电。

为分析 BESS 等效运行成本对配电网运行成本的影响,以情形 3 和情形 4 为例,情形 3 中购电量及反送电量远低于情形 4,购售电成本之和减少了 523.94 元,这是由于 BESS 调度灵活,通过其不断的充放电,尽可能将多余 DG 存储下来并在负荷高的时候进行释放。但情形 3 中每台 BESS 有 4 个循环周期,放电深度分别为 0.55,0.06,0.13,0.08,等效运行成本为 11 111.23 元,总成本为 13 980.86 元。而情形 4 中每台 BESS 只有一个循环周期,其放电深度为 0.6,等效运行成本为 7 043.69 元,总成本为 10 467.29 元。对比发现,在计及 BESS 等效运行成本之后,实际上的总成本降低了 3 513.57 元。

综合上述 4 种情形,在不考虑分时电价和 BESS 等效运行成本的情况下,可充分发挥 BESS 灵

活的充放电特性,更有效地提高主动配电网的经济效益;而在考虑两者且储能设备造价并不低的情况下,算例结果表明不一定 BESS 越灵活调度,其带来的经济效益会越好;由于情形 2 和 4 中的调度方式计及了 BESS 等效运行成本,虽然购电成本上分别多于情形 1 和 3,但若是对情形 1 和 3 中 BESS 等效运行成本进行计算,其结果分别为 15 804.55 元和 13 980.86 元,由此可发现情形 2 和 4 的总成本反而更低,验证了计及等效运行成本的必要性。

5 结语

本文在对 BESS 进行精细化建模的基础上,提出了一种主动配电网中 BESS 充放电优化模型。考虑购电电价高于售电电价以及购电电价为分时电价的情况,通过计算 BESS 的循环寿命计及 BESS 等效运行成本对经济性的影响,以配电网侧总成本最小为目标对 BESS 进行充放电优化。采用分支定界-原对偶内点法进行求解。通过对含 DG 和 BESS 的 IEEE 33 节点算例进行测试,考虑 DG 出力与负荷波动不同程度的情形,并通过与遗传算法的对比,验证了本文所提模型及算法的有效性。算例结果表明,BESS 能在 DG 出力大于负荷时充电、小于负荷时放电;在主网电价低时购电存储,电价高时放电平衡负荷,具备削峰填谷及提高运行经济性的能力。同时也验证了计及 BESS 等效运行成本的必要性。

本文主要侧重于 BESS 在主动配电网优化运行中所起到的作用,后续研究的重点是,考虑将网络重构、可控 DG、需求侧响应等更多主动配电网中可调度资源囊括在优化模型之中,也可研究如何在计及 DG 出力以及负荷随机性的基础上,对 BESS 进行优化调度。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 尤毅,刘东,于文鹏,等.主动配电网技术及其进展[J].电力系统自动化,2012,36(18):10-16.
YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.
- [2] HIDALGO R, ABBEY C, JOOS G. A review of active distribution networks enabling technologies[C]// Proceedings of 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Minnesota, USA: 9p.
- [3] WANG J, ZOBBA A F, HUANG C, et al. Day-ahead allocation

- of operation reserve in composite power systems with large-scale centralized wind farms[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2016, 4(2): 238-247.
- [4] 郑乐,胡伟,陆秋瑜,等.储能系统用于提高风电接入的规划和运行综合优化模型[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(16): 2533-2543.
ZHENG Le, HU Wei, LU Qiuyu, et al. Research on planning and operation model for energy storage system to optimize wind power integration[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(16): 2533-2543.
- [5] 尤毅,刘东,钟清,等.主动配电网储能系统的多目标优化配置[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(18): 46-52. DOI: 10.7500/AEPS20130722009.
YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Multi-objective optimal placement of energy storage system in an active distribution network [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(18): 46-52. DOI: 10.7500/AEPS20130722009.
- [6] OUREILIDIS K O, BAKIRTZIS E A, DEMOULIAS C S. Frequency-based control of islanded microgrid with renewable energy sources and energy storage[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2016, 4(1): 54-62.
- [7] 丁明,林根德,陈自年,等.一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(7): 1-6.
DING Ming, LIN Gende, CHEN Zinian, et al. A control strategy for hybrid energy storage systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(7): 1-6.
- [8] GABASH A, PU Li. Active-reactive optimal power flow in distribution networks with embedded generation and battery storage[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2012, 27(4): 2026-2035.
- [9] GABASH A, PU Li. Flexible optimal operation of battery storage systems for energy supply networks[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2013, 28(3): 2788-2797.
- [10] GABASH A, PU Li. Reverse active-reactive optimal power flow in ADNs: technical and economical aspects [C]// *Proceedings of 2014 IEEE Energy Conference*, May 13-16, 2014, Cavtat, Croatia: 1115-1120.
- [11] GILL S, KOCKAR I, AULT G W. Dynamic optimal power flow for active distribution networks[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2014, 29(1): 121-131.
- [12] SCHALTZ E, KHALIGH A, RASMUSSEN P O. Influence of battery/ultracapacitor energy-storage sizing on battery lifetime in a fuel cell hybrid electric vehicle [J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2009, 58(8): 3882-3891.
- [13] 韩晓娟,程成,籍天明,等.计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(34): 91-97.
HAN Xiaojuan, CHENG Cheng, JI Tianming, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(34): 91-97.
- [14] 赵晋泉,居俐洁,戴则梅,等.基于分支定界-原对偶内点法的日
前无功优化[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(15): 55-60. DOI: 10.7500/AEPS20141013010.
ZHAO Jinqun, JU Lijie, DAI Zemei, et al. Day-head reactive power optimization based on branch and bound-interior point method[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(15): 55-60. DOI: 10.7500/AEPS20141013010.
- [15] 谢毓广,江晓东.储能系统对含风电的机组组合问题影响分析[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(5): 19-24.
XIE Yuguang, CHIANG Hsiaocong. Impact of energy storage system on the unit commitment problem with volatile wind power [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(5): 19-24.
- [16] 张丽华.基于内点-分支定界法的最优机组投入研究[D].南宁: 广西大学, 2006.
- [17] GRANVILLE S. Optimal reactive dispatch through interior point methods [J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 1994, 9(1): 136-146.
- [18] 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.
- [19] 艾欣,陈炜.考虑容量管理的主动配电网市场化实时竞价运营模式[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(22): 3743-3749.
AI Xin, CHEN Wei. Marketization real-time bidding operation mode of the active distribution network with consideration of capacity management [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(22): 3743-3749.
- [20] 黄弦超,张粒子,陶文斌.上网侧分时电价设计[J]. *电网技术*, 2013, 37(5): 1317-1322.
HUANG Xianchao, ZHANG Lizi, TAO Wenbin. Design of time-of-use generation price [J]. *Power System Technology*, 2013, 37(5): 1317-1322.
- [21] 申洪,王伟胜,戴慧珠.变速恒频风力发电机组的无功功率极限[J]. *电网技术*, 2003, 27(11): 60-63.
SHEN Hong, WANG Weisheng, DAI Huizhu. Reactive power limit of variable-speed constant-frequency wind turbine [J]. *Power System Technology*, 2003, 27(11): 60-63.

朱泽锋(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向:电力系统优化运行。E-mail: zhuzefeng_hhu@163.com

赵晋泉(1972—),男,通信作者,博士,教授,主要研究方向:电力系统优化运行、电压稳定分析与控制和电力市场。E-mail: jqzhao2@tom.com.

魏文辉(1976—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:电力系统仿真与优化。

(编辑 万志超)

(下转第 99 页 continued on page 99)

Optimal Charging and Discharging Scheme of Battery Energy Storage System in Active Distribution Network

ZHU Zefeng¹, ZHAO Jinquan¹, WEI Wenhui², LIN Changnian², YU Yiping¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Beijing Kedong Electrical Control System Co. Ltd., Beijing 110179, China)

Abstract: Energy storage system (ESS) participation in day-ahead scheduling of the active distribution network (ADN) is of great significance for its improvement of utilization efficiency of distributed generation (DG) and operating economy in distribution networks. A new operating optimization model is proposed for battery energy storage system (BESS) in an active distribution network with DG. Both time-of-use price and the price difference between sale and purchase are considered to realize cost minimization of ADN. It has improved the accommodation capability of DG and minimized the cost of purchasing electricity from the main grid. In order to improve the operation economy, the equivalent operating cost of BESS is considered according to calculation of the cyclic life of BESS. The branch and bound-interior point method is used to consider discrete variables and inter-temporal constraints so as to decompose the problem into a series of static active power optimization problems with only continuous variables. Numerical tests via the modified IEEE 33-bus system with DG and BESS show that the proposed model and method are effective and feasible.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577049).

Key words: active distribution network; battery energy storage system; optimal charging and discharging scheme; equivalent operation costs; branch and bound-interior point method