

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221813

考虑电池储能老化和需求侧响应的交直流混合 配电网动态重构方法

廖小兵¹, 周自强¹, 乐健², 李自成¹, 龚超³

(1. 武汉工程大学电气信息学院, 湖北 武汉 430205; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072;
3. 国网冀北电力科学研究院(华北电力科学研究院有限责任公司), 北京 100045)

摘要: 现有的电池储能模型一方面认为电池的充放电功率和效率为固定不变的, 另一方面有关电池储能的充放电过程对循环老化的影响缺少考虑, 这与电池单元本体的非线性等效电路模型相违背。因此, 考虑电池储能的循环老化成本、需求侧响应, 提出了交直流混合配电网动态重构方法。通过对实际电池储能的充放电功率的运行区域进行采样, 在凸包络的采样点集合中将非理想状态下的电池储能模型重构为线性模型。在此基础上, 分别建立了基于累积吞吐电量和放电深度的循环老化成本模型, 构建了综合成本最小化的交直流混合配电网动态重构模型。并采用混合整数二阶锥规划方法求解。在改进的33节点算例上仿真验证了所提基于放电深度的循环老化成本模型的经济性, 分析了交直流混合配电网重构方法经济性的影响因素。

关键词: 电池储能; 非理想线性模型; 交直流混合配电网; 动态重构; 混合整数二阶锥规划

Dynamic reconfiguration of an AC/DC hybrid distribution network considering battery energy storage aging and demand response

LIAO Xiaobing¹, ZHOU Ziqiang¹, LE Jian², LI Zicheng¹, GONG Chao³

(1. School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. State Grid Hebei Electric Power Research Institute (North China Electric Power Research Institute Co., Ltd.), Beijing 100045, China)

Abstract: The existing battery energy storage model considers that the charging and discharging power and efficiency of the battery are fixed. On the other hand, the impact of the charging and discharging process on the cycle aging is not considered. This is contrary to the nonlinear equivalent circuit model of the battery cell body. Therefore, considering the cycle aging cost of the battery energy storage and demand response, this paper proposes a dynamic reconfiguration method of the AC/DC hybrid distribution network. By sampling the operational area of the actual battery energy storage charging and discharging power, a non-ideal battery energy storage model is reconstructed into a linear model in the convex envelope sampling point set. From this a cycle aging cost model based on the cumulative throughput and discharge depth is established, and the dynamic reconfiguration model of the AC/DC hybrid distribution network with minimum comprehensive cost is constructed. The mixed integer second-order cone programming method is used to solve the problem. The economics of the cycle aging cost model based on the depth of discharge proposed in this paper is verified by simulation on a modified 33-bus example, and the factors affecting the economics of the AC/DC hybrid distribution network reconfiguration method are analyzed.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52107122).

Key words: battery energy storage; non-ideal linear model; AC/DC hybrid distribution network; dynamic reconfiguration; mixed integer second order cone programming

0 引言

配电网重构是通过切换联络开关和分段开关的

状态来改变网络的拓扑结构, 从而实现降低网损、提高供电可靠性等目标^[1-3]。近年来, 随着分布式光伏、电池储能的大量并网, 交直流互联形态、负荷需求侧响应的快速发展, 交直流混合配电网的重构技术面临着不少挑战^[4-5]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52107122)

目前,为了考虑分布式电源、电池储能、负荷需求侧响应对交直流混合配电网重构的影响,已有的文献开展了大量的研究工作。文献[6]采用区间数对分布式电源和电动汽车出力建模,建立了基于区间的含电动汽车和分布式电源的配电网动态重构模型,并引入邻域搜索以及克隆选择算法求解。文献[7]利用仿射数对分布式电源出力建模,建立以综合成本最小为目标函数、网络安全运行为约束条件的配电网动态鲁棒重构模型,并采用列与约束生成算法求解。文献[8]以开关成本与网损成本之和最小为目标,构建了同时考虑分布式电源和储能的动态重构模型,并将模型转化为混合整数线性规划模型进行求解。随着分布式电源在交直流混合配电网中的渗透率越来越高,为了抑制分布式电源出力的波动性和间歇性,储能系统在交直流混合配电网的应用越来越多。文献[9]考虑储能充放电功率约束,建立了配电网重构的双层优化模型,并采用遗传算法求解。文献[10]为了降低网络损耗以及分布式电源的弃电量,建立了基于双层动态时段划分的含储能的配电网重构模型,并将其转化为混合整数二阶锥规划模型进行求解。文献[11]考虑需求侧响应,建立了高比例新能源接入的多时段配电网重构模型,采用 big-M 法和二阶锥松弛将配电网重构模型转化为混合整数二阶锥规划模型进行求解。文献[12]以网损成本、弃风弃光成本和开关操作惩罚成本的总成本最小为目标函数,建立了高比例清洁能源接入的含需求响应的配电网重构模型,同样采用二阶锥松弛将配电网重构模型转化为混合整数二阶锥规划模型进行求解。

综合上述交直流混合配电网重构的研究,虽然将分布式电源(源)、负荷需求侧响应(荷)和电池储能(储)三类模型嵌入到了交直流混合配电网重构模型中,但缺少同时考虑分布式电源(源)、负荷需求侧响应(荷)、电池储能(储)的交直流混合配电网重构研究;其次,交直流混合配电网重构模型采用的电池储能模型是一种理想状态下的运行模型,未考虑电池储能内在的电化学运行机理,并且未考虑循环老化成本^[13]。

现有的电池储能模型均是在理想状态下的运行模型,认为电池的充放电效率为固定值^[14],这与电池单元本体的非线性等效电路模型相违背,为此,文献[15]结合电池内部的充放电过程,建立了电池本体的非线性等效电路模型,并进行线性化得到电池储能的非理想状态模型。文献[16]将电池储能的非理想状态模型引入到微电网能量管理系统。文献[17]进一步考虑分布式光伏的不确定性,提出了微

电网随机调度方法。但几乎没有文献将电池储能的非理想状态模型考虑到交直流混合配电网重构研究中。

非理想状态下的电池储能模型本质上是基于样本测量的数据驱动建模,避免了理想状态下的电池模型的弊端,并且没有引入二进制变量表征充放电状态,减小了电池储能模型的复杂度,有利于嵌入到交直流配电网重构模型中。为此,本文进一步基于累积吞吐电量和放电深度来建立电池储能的循环老化成本模型,构建了考虑网损成本、开关动作成本、弃光成本、电池储能循环老化成本等综合成本最小化的交直流配电网重构目标,以交直流混合配电网潮流约束、网络安全约束、拓扑约束、基于电价激励型的负荷需求侧响应等为约束条件,并将交直流混合配电网重构模型转化为混合整数二阶锥规划模型进行求解。在改进的 33 节点算例上仿真验证了本文所提交直流混合配电网重构方法的有效性和经济性。

1 非理想状态下的电池储能模型

1.1 传统的电池储能模型

传统的电池储能模型是假设电池储能在每个时间段的储能状态线性依赖于前一时间段电量的累积量,并且认为充电/放电效率是固定不变的^[18],其模型可表示为

$$S_{i,t}^{\text{SOC}} = S_{i,t-1}^{\text{SOC}} + \eta_{i,\text{ch}} \frac{P_{i,t}^{\text{ch}} \Delta t}{E_{i,\text{max}}} - \frac{P_{i,t}^{\text{dis}} \Delta t}{\eta_{i,\text{dis}} E_{i,\text{max}}}, \forall t \in H \quad (1)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{i,t}^{\text{ch}} \leq P_{i,\text{max}}^{\text{ch}} D_{i,t}^{\text{ch}} \\ 0 \leq P_{i,t}^{\text{dis}} \leq P_{i,\text{max}}^{\text{dis}} D_{i,t}^{\text{dis}} \\ D_{i,t}^{\text{ch}} + D_{i,t}^{\text{dis}} \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$S_{i,\text{min}}^{\text{SOC}} \leq S_{i,t}^{\text{SOC}} \leq S_{i,\text{max}}^{\text{SOC}} \quad (3)$$

式中: $S_{i,t}^{\text{SOC}}$ 表示 t 时刻节点 i 处电池储能的荷电状态; $P_{i,t}^{\text{ch}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{dis}}$ 分别表示 t 时刻节点 i 处电池储能的充电功率和放电功率; $\eta_{i,\text{ch}}$ 和 $\eta_{i,\text{dis}}$ 分别表示节点 i 处电池储能的充放电效率; Δt 表示调度的时间间隔, H 表示电池充放电时间集合; $E_{i,\text{max}}$ 表示节点 i 处电池储能的容量; $P_{i,\text{max}}^{\text{ch}}$ 和 $P_{i,\text{max}}^{\text{dis}}$ 分别表示节点 i 处电池储能充放电功率的上限; $D_{i,t}^{\text{ch}}$ 和 $D_{i,t}^{\text{dis}}$ 为 0-1 变量,分别表示节点 i 处电池储能的充放电状态; $S_{i,\text{max}}^{\text{SOC}}$ 、 $S_{i,\text{min}}^{\text{SOC}}$ 分别表示节点 i 处电池储能荷电状态的上下限。

1.2 非理想状态下的电池储能线性化模型

传统的电池储能模型假设了充放电效率和功率极限是恒定的,并且与电能储能的充电状态无关。

事实上, 通过对电池储能的内部结构进行分析, 利用电路等效和电流极限推导出充放电功率极限、电池的充放电效率都不是一个固定值。因此, 认为电池的充放电功率是恒定不变的, 这会导致所估计的荷电状态 S^{SOC} 与实际的荷电状态不匹配, 因此, 本文在文献[15]的基础上, 建立了基于累积吞吐电量和放电深度的电池储能循环老化成本模型。与传统的电池储能模型不同, 非理想状态下的电池储能线性化模型是从电池内部的充放电过程中, 建立充放电功率的上下限与充放电电流、电池的输入功率 P^{in} 、电池的输出功率 P^{out} 的关系, 并通过充放电功率的运行区域进行采样, 在凸包络的采样点集合中将重构的电池模型转化为线性模型, 线性化的精度取决于采样点数, 通过多次仿真认为采样点数达到 15~20 时误差基本上接近 10^{-5} , 能够满足实际需求。由于基于测量的电池模型不引入二进制变量, 因此实现了高计算效率, 同时由于考虑到了电池储能的内部结构, 所得出的结果也更具有现实意义。下面具体阐述非理想状态下电池储能线性化模型的建模过程, 电池储能的运行区域, 如图 1 所示。

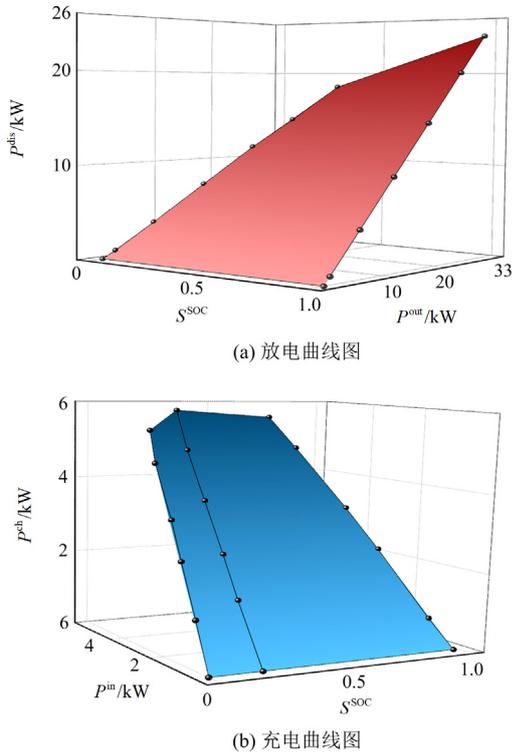


图 1 电池储能在 $[P^{\text{dis}}, S^{\text{SOC}}, P^{\text{out}}]$ 和 $[P^{\text{ch}}, S^{\text{SOC}}, P^{\text{in}}]$ 的运行区域

Fig. 1 Operating region of battery storage
 $[P^{\text{dis}}, S^{\text{SOC}}, P^{\text{out}}]$ and $[P^{\text{ch}}, S^{\text{SOC}}, P^{\text{in}}]$

首先, 由于 P^{out} 取决于电池的放电功率 P^{dis} 和 S^{SOC} , 因此可以根据 P^{dis} 和 S^{SOC} 获得 P^{out} , 同理,

也可以根据电池的充电功率 P^{ch} 和 S^{SOC} 获得 P^{in} 。

其次, P^{out} 可以通过采样点的线性组合来近似。因此, 本文通过采样 j 个样本来构建多面体包络线, 每一个样本组用 $[p_j^{\text{dis}}, s_j^{\text{SOC}}, p_j^{\text{out}}]$ 表示。 P^{dis} 、 S^{SOC} 和 P^{out} 的三维图如图 1(a)所示, 其中实心区域表示基于实际非线性方程的计算值。采样点 $j \in J$ 以黑点表示, 连接采样点的凸包络由采样点之间的连接线表示。类似地, 电池的输入功率 P^{in} 也可以通过采样点的线性组合来近似, 所以, 对于每一个元组 $[P^{\text{ch}}, S^{\text{SOC}}, P^{\text{in}}]$, 可以通过采样 k 个样本来构建多面体包络线, 每一个样本组用 $[p_k^{\text{ch}}, s_k^{\text{SOC}}, p_k^{\text{in}}]$ 表示。 P^{in} 、 S^{SOC} 和 P^{ch} 的三维图如图 1(b)所示。

最后, 通过建立电池的输入功率 P^{in} 、电池的输出功率 P^{out} 与充放电功率的关系, 得到非理想状态下的电池储能线性化模型, 即

$$S_{i,t}^{\text{SOC}} = S_{i,t-1}^{\text{SOC}} + \frac{P_{i,t}^{\text{in}} \Delta t}{E_{i,\text{max}}} - \frac{P_{i,t}^{\text{out}} \Delta t}{E_{i,\text{max}}}, \forall t \in H \quad (4)$$

$$P_{i,t}^{\text{out}} = \sum_{j \in J} p_j^{\text{out}} x_{j,t}, \forall t \in H \quad (5)$$

$$P_{i,t}^{\text{dis}} = \sum_{j \in J} p_j^{\text{dis}} x_{j,t}, \forall t \in H \quad (6)$$

$$P_{i,t}^{\text{in}} = \sum_{k \in K} p_k^{\text{in}} y_{k,t}, \forall t \in H \quad (7)$$

$$P_{i,t}^{\text{ch}} = \sum_{k \in K} p_k^{\text{ch}} y_{k,t}, \forall t \in H \quad (8)$$

$$S_{i,t}^{\text{SOC}} = \sum_{j \in J} s_j^{\text{SOC}} x_{j,t} + \sum_{k \in K} s_k^{\text{SOC}} y_{k,t}, \forall t \in H \quad (9)$$

$$\sum_j x_{j,t} = 1, 0 \leq x_{j,t} \leq 1, \forall t \in H \quad (10)$$

$$\sum_k y_{k,t} = 1, 0 \leq y_{k,t} \leq 1, \forall t \in H \quad (11)$$

式(4)中, $P_{i,t}^{\text{in}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{out}}$ 分别表示 t 时刻节点 i 处电池储能的输入和输出功率。式(5)—式(6)、式(9)—式(10)表示由放电样本数据 $[p_j^{\text{dis}}, s_j^{\text{SOC}}, p_j^{\text{out}}]$ 定义的放电期间变量 $[P_{i,t}^{\text{out}}, S_{i,t}^{\text{SOC}}, P_{i,t}^{\text{dis}}]$ 的可行域, 其中, J 表示放电样本数据的采样点集合。同样地, 式(7)—式(9)和式(11)表示由充电样本数据 $[p_k^{\text{ch}}, s_k^{\text{SOC}}, p_k^{\text{in}}]$ 定义的充电期间变量 $[P_{i,t}^{\text{ch}}, S_{i,t}^{\text{SOC}}, P_{i,t}^{\text{in}}]$ 的可行域, 其中, K 表示充电样本数据的采样点集合。换言之, 这些由充放电采样点所形成的凸包络定义了电池储能的运行区域, 因此, 变量 $(S_{i,t}^{\text{SOC}}, P_{i,t}^{\text{out}}, P_{i,t}^{\text{dis}}, P_{i,t}^{\text{in}}, P_{i,t}^{\text{ch}})$ 可以看成电池储能采样样本的线性组合。

式(9)为电池储能状态约束, 它是由电池充电状态样本与放电状态样本组合而成。若单独考虑式

(9), 则电池储能能在 t 时刻可以同时进行充电和放电, 这不符合电池储能运行要求。因此, 为了在不引入 0-1 变量识别电池储能的充放电状态的情况下, 引入一个附加条件: 每个采样集必须至少有两个采样点 $[0,0,0]$ 和 $[0,1,0]$, 分别代表电池未激活, 但已完全放电或完全充电的情况。

式(10)、式(11)为充放电关联约束, 其中, $x_{j,t}$ 和 $y_{k,t}$ 是与充放电样本数据相关联的变量。

1.3 电池储能循环老化成本模型

1) 基于累积吞吐电量的循环老化成本模型

基于累积吞吐电量的循环老化成本模型可表示为

$$q = B_1 e^{B_2 I_C} \sum_{t \in H} (P_{i,t}^{\text{out}} + P_{i,t}^{\text{in}}) \Delta t \quad (12)$$

式中: q 表示电池储能容量损失的百分数; B_1 和 B_2 为实验数据拟合得到的指数因子, 这里以锂电池为例, $B_1 = 0.0013$, $B_2 = 0.3534$; I_C 表示电池充电率即电池充放电时, 电流与电池容量的比率。

因此, 电池储能循环老化成本 C_{BESS} 可表示为

$$C_{\text{BESS}} = \frac{C^{\text{B},0} q}{1 - \eta} \quad (13)$$

式中: $C^{\text{B},0}$ 为电池储能的初始投资成本; η 为电池储能寿命终止时的容量百分比。

2) 基于放电深度的循环老化成本模型

对于给定放电深度的周期循环寿命, 循环老化成本模型可表示为

$$C_{\text{BESS}} = \sum_{t \in H} c_t^{\text{DOD}} \quad (14)$$

式中, c_t^{DOD} 为每个时间步长的循环老化成本, 其计算公式为

$$c_t^{\text{DOD}} = \max\{0, (\rho_t - \rho_{t-1}) C^{\text{B},0}\} \quad (15)$$

式中, ρ_t 表示在循环中特定放电深度所对应的寿命损失百分比, $\rho_t = 1/\Phi(D^{\text{DOD}})$, 其中 $\Phi(D^{\text{DOD}})$ 表示与 D^{DOD} 相关的函数。图 2 给出了放电深度 D^{DOD} 与寿命损失百分比 ρ_t 之间的拟合曲线。

在式(15)中, 只有当下一个时间步长电池储能放电时, ρ_t 才会大于 ρ_{t-1} 。因为当 D^{DOD} 增加时, 电池储能寿命的损失才会增加。因此, 每个放电半周期都会增加老化成本, 而在充电半周期的老化成本为 0。从式(14)、式(15)可以看出: 基于放电深度的循环老化成本函数是与每个周期刚开始的放电深度和结束时的放电深度有关, 与时间步长无关; 即使当两个周期的放电时间不同, 若它们起始与终止的放电深度相同, 也会有相同的循环老化成本。为了表述放电深度和寿命损失百分比的拟合函数, 本文采用 SOS2(a special order set (SOS) constraint of type 2)^[19]

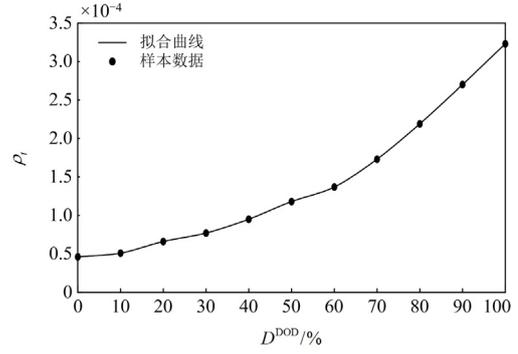


图 2 放电深度与寿命损失百分比的拟合曲线

Fig. 2 Fitted curve of depth of discharge and life loss percentage

进行分段线性化, 可表示为

$$D_t^{\text{DOD}} = \sum_{p \in P} d_p^{\text{dod}} \xi_{tp}, \forall t \in H \quad (16)$$

$$\rho_t = \sum_{p \in P} \hat{\rho}_p \xi_{tp}, \forall t \in H \quad (17)$$

$$\sum_p \xi_{tp} = 1, 0 \leq \xi_{tp} \leq 1 \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} \xi_{t1} \\ \xi_{t2} \\ \vdots \\ \xi_{tp} \end{bmatrix} \leq A \begin{bmatrix} b_{t1} \\ b_{t2} \\ \vdots \\ b_{tp-1} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\sum_p^{p-1} b_{tp} = 1 \quad (20)$$

式(16)一式(20)中: D_t^{DOD} 表示 t 时刻电池的放电深度; d_p^{dod} 和 $\hat{\rho}_p$ 分别表示与放电深度 D_t^{DOD} 和寿命损失百分比 ρ_t 有关的样本点; P 表示采样点集合; ξ_{tp} 表示与 D_t^{DOD} 和 ρ_t 有关的权重因子; A 为 SOS2 给出的邻接矩阵; b_{tp} 为保证 SOS2 属性的附加二进制变量。

2 交直流混合配电网动态重构模型

2.1 目标函数

本文考虑网损成本、开关动作成本、弃光成本和电池储能循环老化成本等综合成本最小化的交直流配电网重构目标, 即

$$\min C = \sum_{t=1}^T \sum_{ij \in L} c_{\text{loss}} (P_{ij,t} + P_{ji,t}) + \sum_{t=1}^T \sum_{l \in L} c_s (|\alpha_{l,t} - \alpha_{l,t-1}|) + \sum_{t=1}^T \sum_{i \in Q_{\text{PV}}^{\text{PV}}} c_{\text{PV}} (P_{i,t}^{\text{PV},f} - P_{i,t}^{\text{PV}}) \Delta t + C_{\text{BESS}} \quad (21)$$

式中: C 表示配电网重构的综合成本函数; L 表示配电网的所有支路集合; T 表示配电网重构的时间

集合; Ω_N^{PV} 表示分布式光伏接入的节点集合; $\alpha_{l,t}$ 为 0-1 变量, 表示交直流配电网中支路 l 在 t 时刻的开断状况, $\alpha_{l,t} = 0$ 表示断开, $\alpha_{l,t} = 1$ 表示闭合; $P_{ij,t}$ 、 $P_{ji,t}$ 分别表示配电网中支路 ij 在 t 时刻由节点 i 流向节点 j 的有功功率和由节点 j 流向节点 i 的有功功率; $P_{i,t}^{\text{PV},f}$ 表示节点 i 在 t 时刻分布式光伏的可利用功率; $P_{i,t}^{\text{PV}}$ 表示节点 i 在 t 时刻分布式光伏实际注入的有功功率; c_{loss} 、 c_s 和 c_{PV} 分别表示网损成本系数、开关动作成本系数和弃光成本系数。

2.2 约束条件

1) 二阶锥松弛的交流潮流约束

极坐标系下的二阶锥松弛潮流模型^[20]可表示为

$$P_{i,t}^{\text{sum}} - P_{i,t}^{\text{cur}} = \sum_{j \in N(i)} P_{ij,t} \quad (22)$$

$$Q_{i,t}^{\text{sum}} - Q_{i,t}^{\text{D}} = \sum_{j \in N(i)} Q_{ij,t} \quad (23)$$

$$P_{i,t}^{\text{sum}} = P_{i,t} + P_{i,t}^{\text{PV}} - P_{i,t}^{\text{ch}} + P_{i,t}^{\text{dis}} \quad (24)$$

$$Q_{i,t}^{\text{sum}} = Q_{i,t} + Q_{i,t}^{\text{CB}} \quad (25)$$

$$P_{ij,t} = \sqrt{2}g_l u_{i,t}^l - g_l R_{l,t} - b_l T_{l,t} \quad (26)$$

$$P_{ji,t} = \sqrt{2}g_l u_{j,t}^l - g_l R_{l,t} + b_l T_{l,t} \quad (27)$$

$$Q_{ij,t} = -\sqrt{2}b_l u_{i,t}^l + b_l R_{l,t} - g_l T_{l,t} \quad (28)$$

$$Q_{ji,t} = -\sqrt{2}b_l u_{j,t}^l + b_l R_{l,t} + g_l T_{l,t} \quad (29)$$

$$I_l^2 = \sqrt{2}(g_l^2 + b_l^2)(u_{i,t}^l + u_{j,t}^l - \sqrt{2}R_{l,t}) \quad (30)$$

$$\left\| \begin{array}{c} \sqrt{2}R_{l,t} \\ \sqrt{2}T_{l,t} \\ u_{i,t}^l - u_{j,t}^l \end{array} \right\| \leq u_{i,t}^l + u_{j,t}^l \quad (31)$$

式(22)—式(31)中: $P_{i,t}^{\text{sum}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{sum}}$ 分别表示节点 i 在 t 时刻注入的有功和无功功率; $P_{i,t}^{\text{cur}}$ 表示节点 i 在 t 时刻实施需求响应后的负荷量; $Q_{i,t}^{\text{D}}$ 表示节点 i 在 t 时刻的无功负荷; $Q_{ij,t}$ 表示配电网中支路 ij 在 t 时刻由节点 i 流向节点 j 的无功功率; $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 分别表示节点 i 在 t 时刻注入的关口有功功率、无功功率; $Q_{i,t}^{\text{CB}}$ 表示节点 i 在 t 时刻 CB 补偿的无功功率; $N(i)$ 表示与节点 i 相连的所有节点集合; g_l 、 b_l 表示支路 l 的电导和对地导纳; I_l 表示支路 l 的电流幅值。同时引入 $u_{i,t} = V_{i,t}^2 / \sqrt{2}$, $R_{l,t} = V_{i,t} V_{j,t} \cos \theta_{ij,t}$, $T_{l,t} = V_{i,t} V_{j,t} \sin \theta_{ij,t}$, 其中, $V_{i,t}$ 、 $V_{j,t}$ 分别表示节点 i 、 j 在 t 时刻的电压幅值; $\theta_{ij,t}$ 表示线路 ij 两端在 t 时刻的电压相位角。同时, 由于 $u_{i,t}$ 不含有支路开关变量

$\alpha_{l,t}$, 因此, 进一步引入含有支路开关变量 $u_{i,t}^l$ 来表示支路开关状态和支路端点电压共同决定的变量。

由于当支路 l 在 t 时刻断开时, $u_{i,t}^l$ 和 $u_{j,t}^l$ 均为 0, 而当支路 l 在 t 时刻闭合时, $u_{i,t}^l$ 和 $u_{j,t}^l$ 与相应的节点电压 $u_{i,t}$ 和 $u_{j,t}$ 相等。为了表述 $u_{i,t}^l$ 、 $u_{j,t}^l$ 和 $u_{i,t}$ 、 $u_{j,t}$ 之间的关系, 因此, 增加附加约束, 即

$$\begin{cases} 0 \leq u_{i,t}^l \leq \frac{(V_i^{\text{max}})^2}{\sqrt{2}} \alpha_{l,t} \\ 0 \leq u_{j,t}^l \leq \frac{(V_j^{\text{max}})^2}{\sqrt{2}} \alpha_{l,t} \\ 0 \leq u_{i,t} - u_{i,t}^l \leq \frac{(V_i^{\text{max}})^2}{\sqrt{2}} (1 - \alpha_{l,t}) \\ 0 \leq u_{j,t} - u_{j,t}^l \leq \frac{(V_j^{\text{max}})^2}{\sqrt{2}} (1 - \alpha_{l,t}) \end{cases} \quad (32)$$

式中, V_i^{max} 、 V_j^{max} 分别表示节点 i 、 j 的电压幅值最大值。同时, 节点电压和支路电流约束分别为

$$\frac{(V_i^{\text{min}})^2}{\sqrt{2}} \leq u_{i,t} \leq \frac{(V_i^{\text{max}})^2}{\sqrt{2}} \quad (33)$$

$$u_{i,t}^l + u_{j,t}^l - \sqrt{2}R_{l,t} \leq \frac{(I_l^{\text{max}})^2}{\sqrt{2}(g_l^2 + b_l^2)} \quad (34)$$

式中, I_l^{max} 表示支路 l 的电流幅值最大值。

2) 分布式光伏运行约束

分布式光伏运行约束为

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{PV}} \leq P_{i,t}^{\text{PV},f}, \forall i \in \Omega_N^{\text{PV}} \quad (35)$$

$$(P_{i,t}^{\text{PV}})^2 + (Q_{i,t}^{\text{PV}})^2 \leq (S_{i,t}^{\text{PV}})^2, \forall i \in \Omega_N^{\text{PV}} \quad (36)$$

式中, $Q_{i,t}^{\text{PV}}$ 、 $S_{i,t}^{\text{PV}}$ 分别表示 t 时刻在 i 节点上所连接的分布式光伏的无功功率和容量。

3) 有载调压变压器约束

含有载调压变压器的支路示意图如图 3 所示。

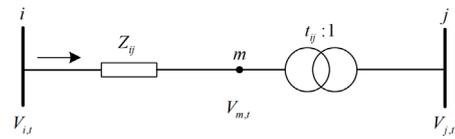


图 3 含有载调压变压器的支路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of branch with OLTC

变压器支路 ij 可以分为支路 im 和 mj 两部分, 其中支路 mj 只包含调压挡位, 其中变压器两端的电压关系可表示为

$$u_{m,t} = t_{ij}^2 u_{j,t} \quad (37)$$

$$t_{ij} = t_{ij}^{\text{min}} + T_{ij} \Delta t_{ij} \quad (38)$$

$$0 \leq T_{ij} \leq K_{ij} \quad (39)$$

$$\Delta t_{ij} = (t_{ij}^{\max} - t_{ij}^{\min}) / K_{ij} \quad (40)$$

式(37)—式(40)中: t_{ij} 表示支路 ij 上变压器的变比; T_{ij} 为变压器的优化挡位, 它是一个整数变量; Δt_{ij} 为变压器分接头每一挡的变化值; K_{ij} 为变压器分接头的挡位数量; t_{ij}^{\max} 、 t_{ij}^{\min} 分别为变压器变比的上下限值。其中, $u_{m,t} = (V_{m,t})^2 / \sqrt{2}$, $u_{j,t} = (V_{j,t})^2 / \sqrt{2}$, $u_{i,t} = (V_{i,t})^2 / \sqrt{2}$ 。

4) 交直流换流站约束

图 4 给出了交直流换流站的示意图。

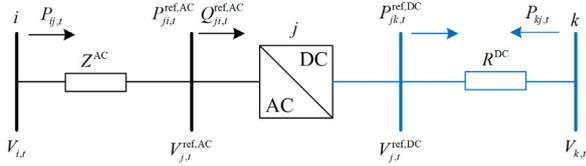


图 4 交直流换流站的示意图

Fig. 4 Schematic diagram of AC/DC converter station

换流器支路 ik 可以分为交流支路 ij 和直流支路 jk 。设变流器交流侧在 t 时刻的有功功率为 $P_{ji,t}^{\text{ref,AC}}$, 无功功率为 $Q_{ji,t}^{\text{ref,AC}}$, 参考点电压为 $V_{j,t}^{\text{ref,AC}}$; 直流侧在 t 时刻的有功功率为 $P_{jk,t}^{\text{ref,DC}}$, 参考点电压为 $V_{j,t}^{\text{ref,DC}}$, 同时引入 $u_{j,t}^{\text{ref,AC}} = (V_{j,t}^{\text{ref,AC}})^2 / \sqrt{2}$, $u_{j,t}^{\text{ref,DC}} = (V_{j,t}^{\text{ref,DC}})^2 / \sqrt{2}$ 。与极坐标系的交流潮流类似, 含交直流换流器的支路潮流方程可以写为

$$P_{ij,t} = \sqrt{2}g_l u_{i,t} - g_l R_{l,t} - b_l T_{l,t}, \forall l \in \Omega_L^{\text{ref}} \quad (41)$$

$$P_{ji,t}^{\text{ref,AC}} = -(\sqrt{2}g_l u_{j,t}^{\text{ref,AC}} - g_l R_{l,t} + b_l T_{l,t}), \forall l \in \Omega_L^{\text{ref}} \quad (42)$$

$$Q_{ij,t} = -\sqrt{2}b_l u_{i,t} + b_l R_{l,t} - g_l T_{l,t}, \forall l \in \Omega_L^{\text{ref}} \quad (43)$$

$$Q_{ji,t}^{\text{ref,AC}} = -(-\sqrt{2}b_l u_{j,t}^{\text{ref,AC}} + b_l R_{l,t} + g_l T_{l,t}), \forall l \in \Omega_L^{\text{ref}} \quad (44)$$

$$P_{jk,t}^{\text{ref,DC}} = \sqrt{2}g_l u_{j,t}^{\text{ref,DC}} - g_l R_{l,t}, \forall l \in \Omega_L^{\text{ref}} \quad (45)$$

$$P_{kj,t} = \sqrt{2}g_l u_{k,t} - g_l R_{l,t}, \forall l \in \Omega_L^{\text{ref}} \quad (46)$$

式(41)—式(46)中, Ω_L^{ref} 为换流器支路集合。

换流站交流侧与直流侧电压幅值关系为

$$V_{j,t}^{\text{ref,AC}} = K_c M_i V_{j,t}^{\text{ref,DC}} \quad (47)$$

式中: K_c 表示直流电压利用率; M_i 表示调制度。

换流站交流侧与直流侧有功功率的关系为

$$P_{ji,t}^{\text{ref,AC}} = \frac{P_{jk,t}^{\text{ref,DC}}}{\eta^{\text{Conv}}} \quad (48)$$

式中, η^{Conv} 表示转换效率。

5) 辐射状拓扑结构

本文采用 ST 约束来描述配电网的辐射状拓扑约束^[21], 如式(49)所示。

$$\begin{cases} \beta_{ij,t} + \beta_{ji,t} = \alpha_{i,t}, \forall i \in L \\ \sum_{j \in N(i)} \beta_{ij} = 0, \forall i \in N_s \\ \sum_{j \in N(i)} \beta_{ij} = 1, \forall i \in N/N_s \\ 0 \leq \alpha_{i,t} \leq 1, \beta_{ij,t}, \beta_{ji,t} \in \{0,1\}, \forall i \in L \end{cases} \quad (49)$$

通过式(49)引入 $\beta_{ij,t}$ 和 $\beta_{ji,t}$ 两个 0-1 变量来判断某支路的首末节点 i 和 j 为子节点还是父节点, 以确保所生成的拓扑结构具有连接到根节点的生成树, $\beta_{ij,t} = 1$ 表示节点 i 是节点 j 的父节点, $\beta_{ij,t} = 0$ 则不是; N 表示配电网所有节点集合; N_s 表示根节点集合。

6) 联络开关动作次数

$$\sum_{l=1}^m |\alpha_l - \alpha_{l0}| \leq n_{\text{SA}} \quad (50)$$

式中: α_{l0} 为支路 l 联络开关在重构前的初始状态; n_{SA} 表示系统中所有联络开关的动作次数最大允许值; m 为联络开关总数^[22]。

7) 分组投切电容器运行约束

$$\begin{cases} 0 \leq x_{i,t}^C \leq x_{i,\max}^C, i \in \Omega_N^{\text{CB}} \\ Q_{i,t}^{\text{CB}} = x_{i,t}^C C_{i,\text{step}}, i \in \Omega_N^{\text{CB}} \end{cases} \quad (51)$$

$$\sum_{t=1}^T |x_{i,t}^C - x_{i,t-1}^C| \leq \Delta_{\max}^{\text{CB}} \quad (52)$$

式(51)、式(52)中: $x_{i,t}^C$ 表示节点 i 在 t 时刻电容器组的投入组数; $x_{i,\max}^C$ 表示节点 i 电容器组投入组数的最大值; $C_{i,\text{step}}$ 表示节点 i 的单组电容器容量; Ω_N^{CB} 表示所有安装电容器组节点的集合; $\Delta_{\max}^{\text{CB}}$ 表示相邻时间段内电容器投入组数变化的最大值。

8) 基于电价弹性系数的需求侧响应模型

本文基于电力价格弹性系数对价格激励型负荷^[11]进行调控, 需求侧响应模型可表示为

$$-\zeta_{i,t} = \frac{\Delta P_{i,t}^D}{\Delta \rho_t} = \frac{P_{i,t}^{\text{cur}} - P_{i,t}^D}{\rho_t^{\text{cur}} - \rho_t^D} \quad (53)$$

$$\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{t=1}^T P_{i,t}^{\text{cur}} = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{t=1}^T P_{i,t}^D \quad (54)$$

$$\rho_t^{\text{cur,max}} \leq \rho_t^{\text{cur}} \leq \rho_t^{\text{cur,min}} \quad (55)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{t=1}^T P_{i,t}^{\text{cur}} \rho_t^{\text{cur}}}{\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{t=1}^T P_{i,t}^{\text{cur}}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{t=1}^T P_{i,t}^D \rho_t^D}{\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{t=1}^T P_{i,t}^D} \quad (56)$$

式(53)—式(56)中: $\xi_{i,t}$ 表示节点 i 在 t 时刻的电价弹性系数; $\Delta P_{i,t}^D$ 表示节点 i 在 t 时刻实施需求响应前后的用电需求变化量; $\Delta \rho_i$ 表示节点 i 在 t 时刻实施需求响应前后的电价变化量; ρ_i^0 、 ρ_i^{cur} 分别表示在 t 时刻实施需求响应前后的电价; $\rho_i^{cur,max}$ 、 $\rho_i^{cur,min}$ 分别表示实施需求响应后电价的上下限; $P_{i,t}^D$ 表示节点 i 在 t 时刻的有功负荷; N_i 表示进行需求侧响应的节点集合^[23]。

由于式(56)属于非线性约束, 因此, 需要将其转化为二阶锥形式, 即

$$\left\| \left[\dots \xi_{i,t}^2 \rho_i^{cur} - \frac{1}{2} \left(\rho_i^0 \xi_{i,t}^2 + P_{i,t}^D \xi_{i,t}^{-\frac{1}{2}} \right) \dots \right]^T \right\|_2 \leq \sqrt{\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{t=1}^T \left[\frac{1}{4} \left(\rho_i^0 \xi_{i,t}^2 + P_{i,t}^D \xi_{i,t}^{-\frac{1}{2}} \right)^2 - P_{i,t}^D \rho_i^0 \right]} \quad (57)$$

因此, 考虑电池储能和需求侧响应的交直流混合配电网动态重构模型可表示为

min C

- 储能运行模型: 式(1)—式(20)
- 潮流约束: 式(22)—式(34)
- 分布式光伏约束: 式(35)、式(36)
- 有载调压变压器约束: 式(37)—式(40)
- 交直流混合配电网潮流方程约束: 式(41)—式(48)
- 辐射状拓扑约束: 式(49)
- 联络开关动作次数约束: 式(50)
- 分组投切电容器运行约束: 式(51)、式(52)
- 基于电价弹性系数的需求侧响应模型: 式(53)—式(55)、式(57)

该模型是一个典型的混合整数二阶锥规划模型, 可以基于 Matlab 的工具箱 Yalmip 进行建模^[24], 并调用商业求解器 Cplex12.7^[25]求解。

3 仿真验证

为了验证本文所提出的交直流混合配电网动态重构方法的有效性, 本节通过改进的 IEEE33 节点系统进行算例分析。改进的 IEEE33 节点系统的接线示意图如图 5 所示, 表 1 给出了接入系统的 PV、BESS、CB 和 OLTC 的参数设置。系统的基准电压为 12.66 kV, 基准容量为 10 MVA。关口有功功率范围为 0~2000 kW, 无功功率范围为 0~2000 kvar, 支路电流幅值上限为 0.5 p.u., 节点电压幅值为 0.95~1.05 p.u.。图 6 给出了负荷和分布式光伏的期望曲线, 并假设两个分布式光伏的出力相同, 同时只对居民区和商业区的负荷进行需求侧响应。起始

时刻, 除联络开关线路断开所有线路均闭合, 开关成本为 1 元/次, 网损成本系数为 0.2 元/kWh, 弃光成本系数为 0.2 元/kWh。

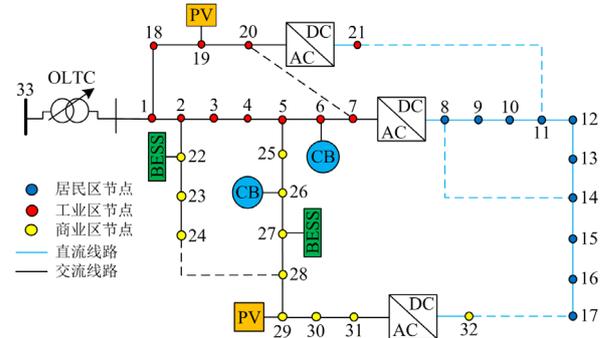


图 5 改进的 IEEE33 节点测试系统

Fig. 5 Modified IEEE33-bus test system

表 1 系统配置参数

Table 1 System configuration parameters

设备	接入节点	参数
PV	19, 29	容量: 1000 kVA 荷电状态: 5%~95%
BESS	22, 27	容量: 1.2 MW 投资成本: 100 万元 寿命终止时容量百分比: 5%
CB	6, 26	电池充电率: 0.5 单组补偿功率: 50 kvar 最大补偿组数: 6 一天内 CB 动作次数上限: 5
OLTC	33-1	变压器变比: 0.95~1.05 变压器分接头每一挡变化值: 0.01 变压器分接头挡位数量: 10

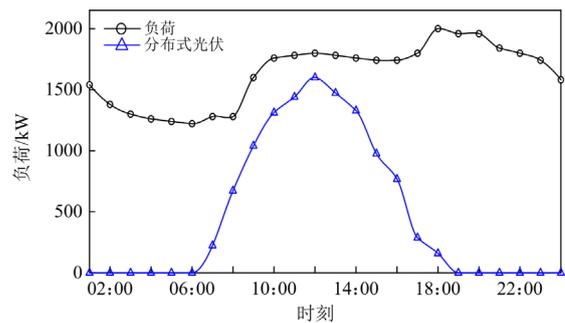


图 6 负荷和分布式光伏的期望曲线

Fig. 6 Expected curve of load and distributed PV

3.1 4 种策略的重构结果分析

为了分析本文所建立的非理想状态下的电池储能模型的有效性, 通过设置是否考虑电池储能的循环老化成本, 建立了 4 种策略。

策略 1: 不考虑储能循环老化成本, 传统的电池储能模型(式(1)—式(3));

策略2: 不考虑储能循环老化成本, 非理想状态下的电池储能模型(式(4)—式(11));

策略3: 基于累积吞吐电量的循环老化成本模型(式(4)—式(11), 式(12)—式(13));

策略4: 基于放电深度的循环老化成本模型(式(4)—式(11), 式(14)—式(20))。

4种策略的交直流混合配电网重构结果如表2所示, 其中策略3和策略4的储能投资成本为100万元。从表2中不难看出: 在网损成本方面, 策略1最小, 策略2、策略3和策略4基本上相等; 在弃光成本方面, 策略4<策略3<策略2<策略1, 弃光成本反映了交直流混合配电网重构对新能源的消纳能力, 弃光成本越小意味着消纳了更多的新能源, 因此, 采用策略4(基于放电深度来的循环老化成本模型)重构交直流配电网新能源消纳能力最好。在交直流混合配电网重构总成本方面, 虽然策略1和策略2没有考虑电池储能的循环老化成本, 但策略4<策略3<策略2<策略1, 因此, 本文所提出的基于累积吞吐电量的循环老化成本模型和基于放电深度的循环老化成本模型具有更好的经济性和有效性, 而基于放电深度的循环老化成本模型比基于累积吞吐电量的循环老化成本模型具有更好的经济性。

表 2 4种策略的交直流混合配电网重构各项成本

Table 2 Various costs of AC/DC hybrid distribution network reconfiguration under four strategies

各项成本	策略 1	策略 2	策略 3	策略 4
网损成本	113.32	121.02	119.5	120.0
弃光成本	1107.81	1098.15	1028.1	992.28
开关动作成本	10	8	8	8
电池储能循环老化成本	0	0	19.03	16.17
总成本	1231.13	1227.17	1175.43	1136.45

进一步地, 图7—图10给出了采用4种策略的电池储能充放电过程、节点电压分布、开关开断状态和负荷需求侧响应结果。对比4种策略的电池储能充放电过程可以看出: 策略3和策略4在考虑BESS循环老化成本后, 策略3和策略4的充放电过程与策略1和策略2相比较为平滑, 充放电深度较小, 这是为了避免频繁充放电而加速电池老化, 这也证明了本文所建立的基于累积吞吐电量的循环老化成本模型和基于放电深度的循环老化成本模型的有效性。对比4种策略电压幅值分布的热力学图可以看出: 4种策略的节点电压分布均设置在0.95~1.05 p.u.安全范围内, 直流节点8-17的电压幅

值偏大, 较为接近 1.05 p.u.; 而剩余的交流节点的节点电压幅值在 1.0 p.u.左右波动。策略2、策略3和策略4的开关重构次数为8次, 而策略1的开关重构次数为10次, 这体现了非理想状态下的电池储能模型能更好地减少开关动作次数, 降低总成本。对比4种策略实施需求侧响应前后的负荷曲线可以看出: 4种策略在分布式光伏出力时段均进行了不同程度的增加负荷需求, 但策略4增加的负荷需求明显大于策略3, 策略3大于策略2, 策略1最小, 因此, 策略4的弃光成本最小, 这与表1中的结果相呼应。

3.2 电池储能投资成本对重构结果的影响

表3和表4分别给出了采用策略3和策略4的电池储能投资成本下降趋势下交直流混合配电网重构的各项成本。从表3和表4中不难看出, 采用策略3和策略4的BESS循环老化成本随着BESS投资成本的下降而降低, 从BESS循环老化成本模

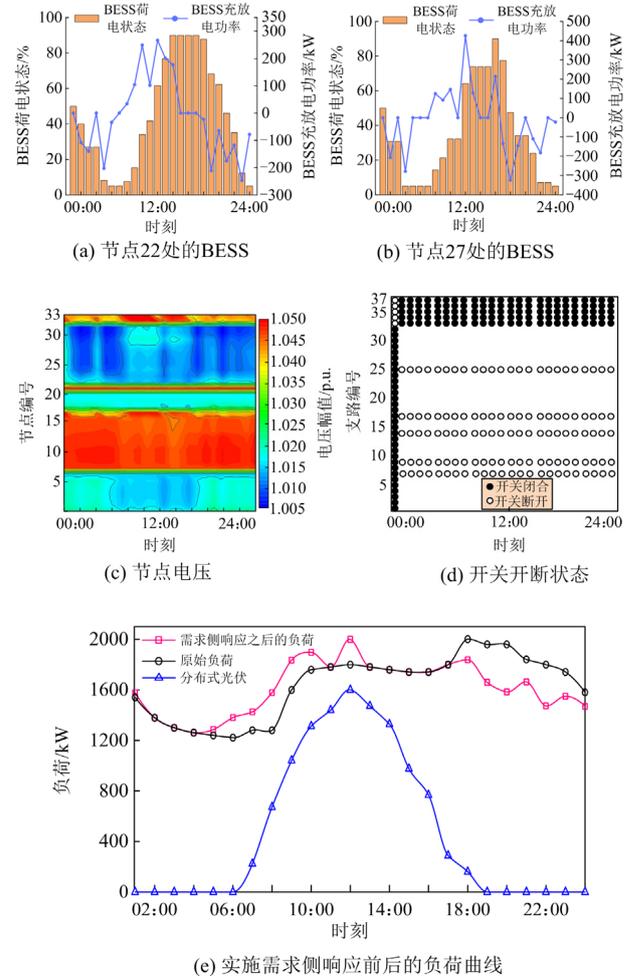


图7 策略1的交直流混合配电网重构结果

Fig. 7 AC/DC hybrid distribution network reconfiguration results of strategy 1

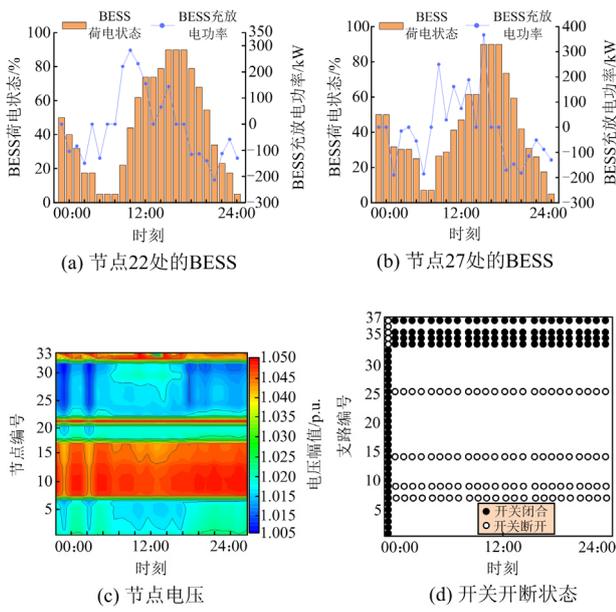


图8 策略2的交直流混合配电网重构结果

Fig. 8 AC/DC hybrid distribution network reconfiguration results of strategy 2

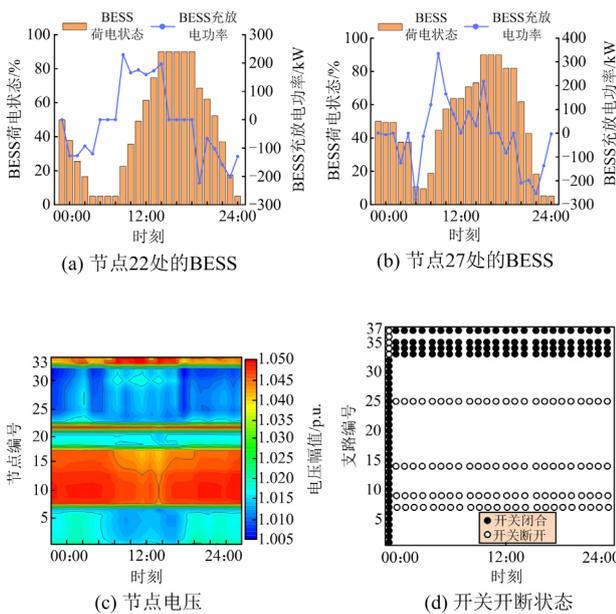


图9 策略3的交直流混合配电网重构结果

Fig. 9 AC/DC hybrid distribution network reconfiguration results of strategy 3

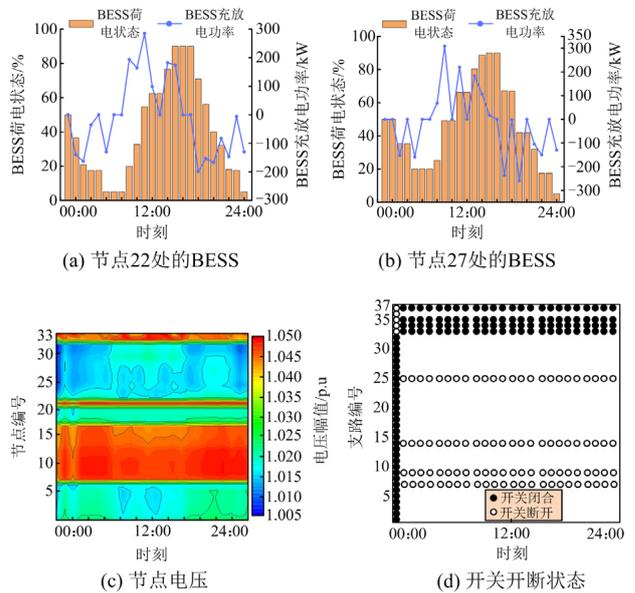
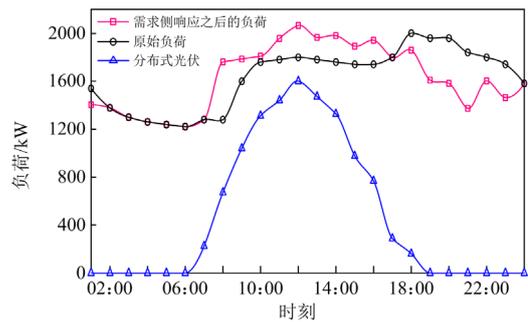
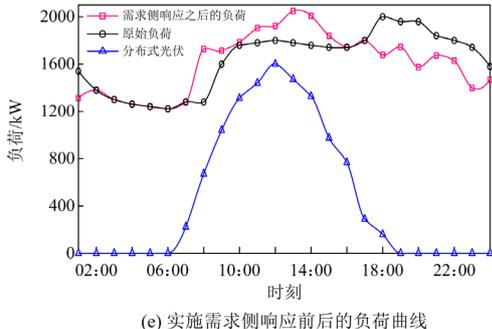
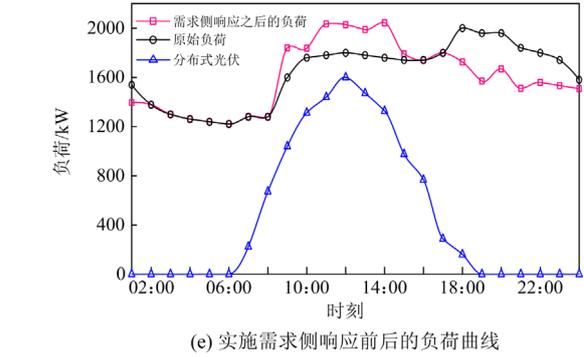


图10 策略4的交直流混合配电网重构结果

Fig. 10 AC/DC hybrid distribution network reconfiguration results of strategy 4



型公式可以直观得到, 网损成本和开关动作成本基本上与 BESS 投资成本关联性不大, 这是由于网损主要取决于系统的负荷分布和网络参数, 在开关动

作次数均为 8 或者 10 的情况下，负荷分布情况也一致，因此，网损成本和开关动作成本基本上维持不变。由于弃光成本占总成本的比例较大，而弃光成本无明显的规律性，因此，总成本也无明显的规律性。此外，对比表 3 和表 4 可以看出，采用策略 4 的弃光成本和总成本均比策略 3 低，这进一步论证了基于放电深度的循环老化成本模型比基于累积吞吐电量的循环老化成本模型具有更好的经济性。

表 3 不同电池储能投资成本下策略 3 的交直流混合配电网重构各项成本

Table 3 Various costs of AC/DC hybrid distribution network reconfiguration of strategy 3 under different BESS investment costs

投资成本/ 万元	网损成 本/元	BESS 循环 老化成本/元	弃光 成本/元	开关动作 成本/元	总成 本/元
$C^{B,0} = 100$	119.5	19.0	1028.9	8	1175.4
$C^{B,0} = 80$	117.3	15.2	1068.2	10	1210.7
$C^{B,0} = 60$	117.7	11.7	957.4	8	1094.8
$C^{B,0} = 40$	116.0	8.7	1040.4	10	1175.1
$C^{B,0} = 20$	115.0	3.9	1027.2	10	1156.1
$C^{B,0} = 10$	119.8	1.9	1005.1	10	1136.8

表 4 不同电池储能投资成本下策略 4 的交直流混合配电网重构各项成本

Table 4 Various costs of AC/DC hybrid distribution network reconfiguration of strategy 4 under different BESS investment costs

投资成本/ 万元	网损 成本/元	BESS 循环老 化成本/元	弃光 成本/元	开关动作 成本/元	总成 本/元
$C^{B,0} = 100$	120.0	16.2	992.3	8	1136.5
$C^{B,0} = 80$	118.2	13.7	996.8	8	1136.7
$C^{B,0} = 60$	118.0	10.5	937.9	8	1074.4
$C^{B,0} = 40$	117.6	7.0	1004.1	10	1138.7
$C^{B,0} = 20$	118.1	3.5	980.0	8	1109.6
$C^{B,0} = 10$	120.4	1.8	973.6	10	1105.8

3.3 需求侧响应对重构结果的影响

表 5 给出了需求侧响应施加前后 4 种策略的交直流混合配电网重构的各项成本。从表 5 可以看出，施加负荷需求侧响应后，弃光成本、BESS 循环老化成本、总成本均减小，尤其是弃光成本和总成本，这是因为负荷需求侧响应改变了负荷曲线，使得在分布式光伏大发时段 08:00—16:00 负荷需求增大，从而减小了弃光；由于弃光成本占总成本的比例较大，因此，当弃光成本下降时，总成本在实施负荷需求侧响应后下降。由于网损主要取决于系统的负

荷分布和网络参数，在开关动作次数均为 8 次或者 10 次的情况下，而负荷需求侧响应后分布情况也大概一致，因此，网损成本和开关动作成本需求侧响应实施前后基本上维持不变。

表 5 需求侧响应施加前后 4 种策略的交直流混合配电网重构各项成本

Table 5 Various costs of AC/DC hybrid distribution network reconfiguration of four strategies before and after applying demand response

各项 成本	策略 1		策略 2		策略 3		策略 4	
	前	后	前	后	前	后	前	后
网损 成本	121.2	113.3	124.1	121.0	122.8	119.5	124.1	120.0
弃光 成本	1463.8	1107.8	1682.1	1098.2	1340.5	1028.1	1361.5	992.28
开关动 作成本	8	10	10	8	8	8	10	8
BESS 循 环老化 成本	0	0	0	0	19.3	19.03	17.5	16.17
总成本	1593.0	1231.1	1816.2	1227.2	1490.6	1175.43	1513.1	1137.24

4 结论

本文在交直流混合配电网二阶锥潮流模型的基础上，考虑电池储能的循环老化成本、负荷需求侧响应，提出了交直流混合配电网动态重构方法，得到以下结论：

1) 本文所提出的基于累积吞吐电量的循环老化成本模型和基于放电深度的循环老化成本模型具有更好的经济性和有效性，而基于放电深度的循环老化成本模型比基于累积吞吐电量的循环老化成本模型具有更好的经济性。同时由于基于放电深度的循环老化成本模型与每个周期时刚开始的放电深度和结束时的放电深度有关，与时间步长无关。因此，配电网运行过程中可以适当减少电池储能的充放电频率来减缓老化，提高经济性。

2) 交直流混合配电网重构的 BESS 循环老化成本随着 BESS 投资成本的下降而降低，而网损成本和开关动作成本基本上与 BESS 投资成本无关，因此，配电网在运行过程开关重构结果基本上与 BESS 投资成本无关。

3) 施加负荷需求侧响应后改变了原始负荷曲线，使得在分布式光伏大发时段 08:00—16:00 负荷需求增大，从而减小了弃光，弃光成本和总成本减小。因此，配电网可以通过大发时段的需求侧响应来提高新能源利用率，从而提高配电网运行经济性。

参考文献

- [1] 潘本仁, 王和春, 张妍, 等. 含分布式电源的主动配电网重构策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 102-107.
PAN Benren, WANG Hechun, ZHANG Yan, et al. Study on an active distribution network reconstruction strategy with distributed power supply[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 102-107.
- [2] 张琳娜, 乐健, 李昊灵. 基于混合整数线性规划的含ZIP负荷有源配电网重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 25-32.
ZHANG Linna, LE Jian, LI Haojing. Reconfiguration method of an active distribution network with a ZIP load model based on mixed integer linear programming[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 25-32.
- [3] 陈钢, 黄国政, 邓瑞麒, 等. 结合网络重构的主动配电网日前无功电压双层优化[J]. 供用电, 2022, 39(5): 13-24.
CHEN Gang, HUANG Guozheng, DENG Ruiqi, et al. Bi-level optimization of day-ahead reactive-voltage in active distribution network with network reconfiguration[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(5): 13-24.
- [4] LI Chenchen, XI Yanna, LU Yufan, et al. Resilient outage recovery of a distribution system: co-optimizing mobile power sources with network structure[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(3): 459-471.
- [5] 刘迪, 张强, 吕干云. 量子粒子群算法在配电网重构中的改进和应用[J]. 电测与仪表, 2022, 59(3): 58-65.
LIU Di, ZHANG Qiang, LÜ Ganyun. Improvement and application of quantum-behaved particle swarm optimization in distribution network reconfiguration[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(3): 58-65.
- [6] 李扬, 韦钢, 马钰, 等. 含电动汽车和分布式电源的主动配电网动态重构[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(5): 102-110.
LI Yang, WEI Gang, MA Yu, et al. Dynamic reconfiguration of active distribution network considering electric vehicles and distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 102-110.
- [7] 徐俊俊, 吴在军, 周力, 等. 考虑分布式电源不确定性的配电网鲁棒动态重构[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4715-4725.
XU Junjun, WU Zaijun, ZHOU Li, et al. Robust dynamic reconfiguration for distribution networks considering uncertainty of distributed generations[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4715-4725.
- [8] 杨明, 翟鹤峰, 马嘉翼, 等. 计及分布式电源发电不平衡度约束的三相不对称配电网动态重构[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3486-3498.
YANG Ming, ZHAI Hefeng, MA Jiayi, et al. Dynamic reconfiguration of three-phase unbalanced distribution networks considering unbalanced operation constraint of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3486-3498.
- [9] 谢亮, 李远卓, 崔慧军, 等. 考虑蓄电池储能的配电网动态网络重构[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(3): 70-74.
XIE Liang, LI Yuanzhuo, CUI Huijun, et al. Dynamic network reconfiguration of distribution network considering battery energy storage[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(3): 70-74.
- [10] 傅长熠, 杨镜非, 顾家辉. 基于双层动态时段划分的配电网重构[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(6): 30-36, 52.
FU Changyi, YANG Jingfei, GU Jiahui. Reconfiguration of distribution network based on bi-level dynamic time division[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(6): 30-36, 52.
- [11] 章博, 刘晟源, 林振智, 等. 高比例新能源下考虑需求侧响应和智能软开关的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 86-94.
ZHANG Bo, LIU Shengyuan, LIN Zhenzhi, et al. Reconfiguration of distribution network with high proportion of renewable energy considering demand response and soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 86-94.
- [12] 黄鸣宇, 张庆平, 张沈习, 等. 高比例清洁能源接入下计及需求响应的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 116-123.
HUANG Mingyu, ZHANG Qingping, ZHANG Shenxi, et al. Distribution network reconfiguration considering demand-side response with high penetration of clean energy[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 116-123.
- [13] 贺鸿杰, 张宁, 杜尔顺, 等. 电网侧大规模电化学储能运行效率及寿命衰减建模方法综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 193-207.
HE Hongjie, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Review on modeling method for operation efficiency and lifespan decay of large-scale electrochemical energy storage on power grid side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 193-207.
- [14] GONZALEZ-CASTELLANOS A, POZO D, BISCHI A. Detailed li-ion battery characterization model for economic operation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 116: 105561-105561.
- [15] GONZALEZ-CASTELLANOS A, POZO D, BISCHI A.

- Non-ideal linear operation model for li-ion batteries[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 672-682.
- [16] ANTONIADOU-PLYTARIA K, STEEN D, TUAN L, et al. Market-based energy management model of a building microgrid considering battery degradation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1794-1804.
- [17] ANTONIADOU-PLYTARIA K, STEEN D, TUAN L, et al. Scenario-based stochastic optimization for energy and flexibility dispatch of a microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(5): 3328-3341.
- [18] 刘畅, 黄杨, 杨昕然, 等. 计及储能及负荷转供协同调度的城市电网弹性运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 56-66.
- LIU Chang, HUANG Yang, YANG Xinran, et al. Flexible operation strategy of an urban transmission network considering energy storage systems and load transfer characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 56-66.
- [19] 赵志鹏, 刘杰, 程春田, 等. 考虑回水顶托影响的梯级库群日前调峰 MILP 模型[J]. 水利学报, 2019, 50(1): 1-11.
- ZHAO Zhipeng, LIU Jie, CHENG Chuntian, et al. A MILP model for day-ahead peak operation of cascade hydropower stations considering backwater[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1): 1-11.
- [20] LEE C, LIU C, MEHROTRA S, et al. Robust distribution network reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 836-842.
- [21] 王颖, 许寅, 和敬涵, 等. 基于断线解环思想的配电网辐射状拓扑约束建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2395-2404.
- WANG Ying, XU Yin, HE Jinghan, et al. Radiality constraint modelling method in distribution network based on cutting-line and opening-loop idea[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7): 2395-2404.
- [22] 马倩, 苟亮, 张海峰, 等. 考虑开关动作次数的多时段配电网动态重构[J]. 电测与仪表, 2021, 58(3): 9-14.
- MA Qian, GOU Liang, ZHANG Haifeng, et al. Multi-period dynamic reconfiguration of distribution network considering switch action times[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(3): 9-14.
- [23] 章博, 刘晟源, 林振智, 等. 高比例新能源下考虑需求侧响应和智能软开关的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 86-94.
- ZHANG Bo, LIU Shengyuan, LIN Zhenzhi, et al. Distribution network reconfiguration considering demand-side response and intelligent soft switch under high proportion of new energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 86-94.
- [24] LOFEBRG J. YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in Matlab[C] // 2004 IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design, September 2-4, 2004, Taipei, China: 284-289.
- [25] 李晓明, 刘翔宇, 李安昌, 等. 配电网电压控制的分布式光伏无功仿射可调鲁棒优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 124-131.
- LI Xiaoming, LIU Xiangyu, LI Anchang, et al. Distributed photovoltaic reactive power affine adjustable robust optimization method for voltage control of a distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 124-131.

收稿日期: 2022-11-14; 修回日期: 2023-02-09

作者简介:

廖小兵(1989—), 男, 通信作者, 博士, 硕士生导师, 研究方向为电力系统不确定性分析、配电网优化、储能规划等; E-mail: lxbwhu@126.com

周自强(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网优化与运行;

乐健(1975—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为智能电网运行与控制技术研究。E-mail: lej01@tsinghua.org.cn

(编辑 许威)