计及循环寿命的储能优化配置与运营策略

王泽爽¹,陈嘉俊¹,朱建全^{1,2},叶汉芳¹ (1. 华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640; 2. 电力系统及大型发电设备安全控制和仿真国家重点实验室,北京 100084)

摘要:针对储能在寿命和经济性方面的不足,建立了一种新型储能循环寿命测算模型,并在此基础上提出了 计及循环寿命的储能配置与运营两阶段优化策略。第一阶段以投资额度为约束对储能的容量进行优化配 置;第二阶段充分模拟储能在寿命周期内参与能量市场与调频市场的运营情况,并嵌入所提的储能循环寿命 测算模型以考虑储能在每次充放电过程中的循环寿命折损。通过2个阶段的联合优化,实现储能配置与运 营效益综合最优。考虑到所提模型是一个两阶段的混合整数随机非线性规划问题,常规方法难以处理,采用 交替方向乘子法对其进行阶段解耦与迭代求解,降低了问题的求解难度。算例仿真结果验证了所提方法的 有效性。

DOI:10.16081/j.epae.202110033

0 引言

随着以新能源为主体的新型电力系统的构建, 储能在削峰填谷、平抑波动等方面的优势逐渐凸显。 但是储能成本偏高,寿命偏短,这在很大程度上限制 了储能的规模化应用。在这种情况下,如何充分考 虑储能的投资成本、运营收益及寿命折损情况,对电 网中的储能规划与运营问题进行协调优化成为当前 的一个研究热点。

目前,国内外学者已对储能的优化配置问题进 行了大量研究。文献[1]从连续供电、源荷平衡的角 度对储能的容量进行优化配置,但是考虑的时间尺 度相对较短,难以完整地反映储能在全寿命周期内 的成本及效益变化情况。为解决这个问题,文献[2] 以储能全寿命周期的净利润最大化为目标,综合考 虑了储能套利、政府电价补贴等因素,建立了储能系 统的优化配置模型。文献[3]进一步考虑了储能定 容与选址的相互关系,建立了储能容量和位置的双 层优化配置模型,外层优化微电网的净现值,内层对 潮流和运行状态进行优化决策,显著提高了储能的 经济效益,但并未考虑不确定性因素的影响。实际 上,储能的作用很大程度上体现在应对可再生能源 和负荷的不确定性方面,忽略这些不确定性因素可 能会使储能的配置及运营决策产生较大误差。针对

收稿日期:2021-06-17;修回日期:2021-09-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977081);电力系统 国家重点实验室资助课题(SKLD20M15);广东省自然科学基 金资助项目(2019A1515010877)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51977081), the State Key Laboratory of Power System (SKLD20M15) and the Natural Science Foundation of Guangdong Province(2019A1515010877) 这一问题,文献[4]采用两阶段联合优化方法对储能 容量进行优化配置。但上述研究均不涉及电力市场 环境下的储能优化配置问题。

随着电力市场改革的持续推进,储能参与电力 市场交易成为了一个新的研究热点。文献[5]考虑 可再生能源的波动性,建立了储能参与电力市场的 出清模型,但是并未考虑储能规划问题。文献[6]以 储能的收益和社会福利最大化为目标,研究了储能 容量配置和选址对储能成本及市场出清价格的影 响,显著提高了储能的综合效益。文献[7]进一步综 合考虑储能的投资成本与不同出清方式下的收益情 况,建立了储能规划与运营双层优化模型,但并未考 虑储能循环寿命的影响。实际上,储能寿命短是一 个公认的瓶颈问题,忽略储能的循环寿命可能会导 致决策与实际情况不符,因此有必要对储能的循环 寿命进行计算。

类雨流计数法是计算储能循环寿命的常用方 法^[8],其原理是通过统计储能充放电半周期来计算 其循环寿命,但是半周期的计算依赖于极值点的识 别,没有解析的数学表达式,不能直接集成在优化问 题中。为解决此问题,现有研究多数采用近似的方 式处理类雨流计数法^[9-12]。文献[9-10]忽略了半周 期的识别,直接使用每个控制间隔内的储能输出 功率近似计算放电深度及循环寿命。文献[11]直接 利用自动发电控制AGC(Automatic Generation Control)信号的半周期近似代替储能真实的半周期,避 免了极值点的识别。文献[12]对历史数据进行多项 式拟合,近似模拟了储能充放电量对循环寿命的影 响。上述文献对类雨流计数法的近似处理会带来较 大的误差,因此需要建立实时、准确的储能充放电半 周期递推公式,以提高储能循环寿命测算模型的准 确性。

76

已有文献对储能优化配置及运营模型的求解算 法的研究相对较少,一般是调用商业求解器直接进 行求解[1,46]。但是,在储能优化配置及运营策略中 考虑循环寿命将会引入整数变量,使该模型变为一 个混合整数非线性规划问题,一般的商业求解器难 以直接对其进行求解。为了解决这个问题,已有的 研究一般将模型简化为更易求解的混合整数线性规 划问题[13]或非线性规划问题[14]。但这些方法都是 针对单阶段的优化问题展开的,并不适用于储能优 化配置及运营这种两阶段问题的求解。针对两阶段 优化问题的求解算法,主要可以分为传统数学方 法^[15-16]和智能算法^[17-18]。文献[15-16]采用列与约束 生成算法将原问题分为主问题和子问题进行求解, 有效地减少了迭代次数,提高了求解的效率,但是该 方法在非线性规划问题中不能保证解的稳定性。文 献[17-18]分别利用混沌理论和头脑风暴优化算法 对传统的粒子群优化算法进行改进,并对两阶段问 题进行分阶段求解,克服了传统粒子群优化算法陷 入局部最优的缺陷,但存在求解效率低的问题。交替 方向乘子法 ADMM(Alternating Direction Multiplier Method)是当前研究常见的解耦算法,广泛应用于电 网优化调度、机组组合等领域,具有较快的收敛速 度、鲁棒性强等优点,可以有效地应对上述问题。

基于上述分析,本文提出了一种计及循环寿命的储能优化配置及运营策略。主要创新点和优势在 于:①基于类雨流计数法,推导出储能充放电半周期的等价递推公式,建立了可嵌入优化模型的实时循 环寿命测算模型;②利用 ADMM 对储能优化配置与 运营两阶段多场景问题进行求解,可有效地解决两 阶段耦合的混合整数非线性规划难题。

1 储能应用场景框架

本文将针对电化学储能作为快速调节的优质资 源参与电网侧调频辅助服务这一应用场景展开研 究。储能应用场景的基本框架如图1所示,其中,在 物理连接层面,储能与外部电网相联;在信息交流层 面,储能参与电力市场,向能量市场和调频市场分别 申报容量和申报调频容量。



图1 储能应用场景的基本框架



在此应用场景的基本框架下,本文将对储能的 优化配置与运营决策展开研究。在优化配置环节, 储能需要对其功率和容量进行优化配置;在运营决 策环节,储能需要决定其在电力市场的投标量,而后 按能量市场申报容量为功率基点运行,并根据申报 调频容量接受AGC指令,实时调整出力。

2 储能循环寿命测算模型

准确地测算储能的循环寿命是储能优化配置及 运营的基础。储能的循环寿命受其运行方式的影 响,为了准确地描述运营策略对储能循环寿命的影 响,本节基于文献[8]所提的类雨流计数法,建立可 嵌入储能优化配置及运营模型的储能循环寿命测算 模型。

2.1 储能循环寿命

储能循环寿命*T*^{eyele}与其充放电行为有关,具体 表达式如式(1)所示^[19]。

$$T^{\text{cycle}} = \frac{L^{\text{fail}}(d)}{l(d)} \tag{1}$$

式中:*d*为储能的放电深度;*L*^{fal}(*d*)为储能在放电深度*d*下的最大使用次数;*l*(*d*)为储能在放电深度*d*下的每日循环次数。

在储能的实际运行过程中,其放电深度是不断 变化的,需要变换到同一尺度进行统计。将*l*(*d*)等 效为100%放电深度下的循环次数,如式(2)所示。

$$l_{100}^{\rm eq} = l(d) d^{k_{\rm p}} \tag{2}$$

式中: l_{100}^{eq} 为100%放电深度下的等效循环次数; k_p 表示[0.8,2.1]范围内的某一常数^[19]。

2.2 储能循环次数

对于给定的充放电策略和调频信号,存在相应的储能荷电状态SOC(State Of Charge)变化曲线,其中每2个相邻的局部极值点之间可称为一个半循环。

循环次数的计算需要统计出SOC曲线上所有的 半循环,但这一半循环辨识问题难以直接嵌入储能 的优化决策模型中进行处理。已有的方法一般对其 进行简化,但这又会造成精度损失。为了解决这个 问题,本文提出一种新的循环寿命测算方法。

首先,引入二进制变量*g*_{*i*}表示连续2个时间间 隔内充放电事件的状态转换,如式(3)所示。

$$g_t = (u_t - u_{t-1})^2 \tag{3}$$

式中:u_i为第t时段储能的运行状态,u_i=1表示储能 处于充电状态,u_i=0表示储能处于放电状态。

为了便于得到每个半循环的大小,定义在充放 电状态转换前第t时段的累积电量*E*;如式(4)所示。

 储能的放电功率; η 为储能的充放电效率。此时,第 *t*时段储能的放电深度 d^{B} 如式(5)所示。

$$d_t^{\rm B} = \frac{E_t^{\rm a}}{E^{\rm rate}} \tag{5}$$

式中:Erate为储能的额定容量。

综合式(2)—(5),可以将每日储能的充放电行 为等效为其100%放电深度下的累计循环次数*l*^{lay}:

$$l^{\text{day}} = \sum_{t=1}^{T} \left[l^{\text{eq}}_{100,t} - (1 - g_t) l^{\text{eq}}_{100,t-1} \right]$$
(6)

式中:T为总调度时段数; $l_{100,t}^{eq}$ 为第 t 时段 100% 放电 深度下的等效循环次数。

3 考虑循环寿命的储能配置与运营模型

储能的容量配置与运营问题是相互关联的。为 了更全面地描述所配置的储能在应用过程中参与电 力市场及寿命折损情况,本文建立了考虑循环寿命 的储能优化配置与运营两阶段模型,其框架如图2 所示。其中,储能在第一阶段的等年值利润需要根 据第二阶段的日运营调度期望利润进行计算;而第 二阶段的日运营调度期望利润也依赖于第一阶段 的容量配置优化情况,因此需要进行整体建模与 决策。



图2 储能配置与运营两阶段模型框架

Fig.2 Framework of two-stage model of energy storage configuration and operation

3.1 第一阶段:储能配置模型

3.1.1 目标函数

第一阶段模型的优化目标为最大化储能的等年 值利润,如式(7)所示。

$$B^* = \max\left\{Wb^*(E^{\text{ess}}, P^{\text{ess}}) - C^{\text{om}}\right\}$$
(7)

式中:B^{*}为第一阶段模型目标函数的最优值;W为储 能的年运营天数;b^{*}为所配置储能的最优日运营调 度期望利润;E^{ess}为储能的配置容量;P^{ess}为储能的配 置功率;C^{em}为储能的年维护成本,其表达式如式(8) 所示。

$$C^{\rm om} = P^{\rm ess} \gamma^{\rm om} \tag{8}$$

式中: 7 ···· 为储能的运维成本系数。

3.1.2 约束条件

储能的优化配置和初始投资成本存在以下

约束:

$$0 \le E^{\text{ess}} \le E^{\text{max, ess}} \tag{9}$$

$$0 \leqslant P^{\text{ess}} \leqslant P^{\text{max, ess}} \tag{10}$$

$$0 \leqslant C^{\operatorname{cap}} \leqslant C^{\operatorname{Ini}} \tag{11}$$

式中: E^{max.ess}为储能配置容量的上限; P^{max.ess}为储能配置功率的上限; C^{lni}为投资资金上限; C^{cap}为储能投资成本,可通过式(12)进行计算^[11]。

$$C^{\text{cap}} = (1 + \mu) \left(\gamma^{\text{P}} P^{\text{ess}} + \gamma^{\text{E}} E^{\text{ess}} + \gamma^{\text{F}} \right)$$
(12)

式中:μ为设备零部件更换成本占初始投资的比例; γ^P为储能功率的成本系数;γ^E为储能容量的成本系数;γ^F为固定投资成本。

3.2 第二阶段:运营模型

3.2.1 目标函数

第二阶段模型的目标是最大化储能的日运营调 度期望利润,目标函数如式(13)所示。

$$b_n^* = \max\left\{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\sum_{t=1}^{T} (I_{n,t}^{eng} + I_{n,t}^{reg} - c_n^{loss})\right\}$$
(13)

式中:b^{*}_n为第二阶段模型目标函数的最优值;N为场 景数;I^{reg}_{n,t}为第n个场景下第t时段的能量市场购售 电收入;I^{reg}_{n,t}为第n个场景下第t时段的调频市场收 入;c^{loss}为第n个场景下储能的循环寿命折损成本。

1)能量市场购售电收入。

储能通过参与能量市场获得的收入 *I*^{eng} 如式 (14) 所示^[11]。

$$I_{n,t}^{\text{eng}} = p_{n,t}^{\text{eng}} R_{n,t}^{\text{eng}} \Delta t \tag{14}$$

式中:p^{eng}为第n个场景下第t时段的能量市场出清价格;R^{eng}为第n个场景下第t时段的能量市场申报功率。

2)调频市场收入。

根据 PJM 电力市场规则,储能为电网提供调频 服务后获得的调频市场收入 *I*^{reg}包括调频容量补偿 *I*^{reg}和调频里程补偿 *I*^{per},如式(15)—(17)所示^[12]。

$$I_{n,t}^{\text{reg}} = I_{n,t}^{\text{cap}} + I_{n,t}^{\text{perf}}$$
(15)

$$I_{n,t}^{\text{cap}} = p_{n,t}^{\text{reg, cap}} R_{n,t}^{\text{reg}} A^{\text{perf}} \Delta t$$
 (16)

$$I_{n,t}^{\text{perf}} = p_{n,t}^{\text{reg, perf}} R_{n,t}^{\text{reg}} A^{\text{perf}} \theta \Delta t \qquad (17)$$

式中: $p_{n,t}^{\text{reg,cep}}$ 为第n个场景下第t时段的调频容量价格; $p_{n,t}^{\text{reg,cef}}$ 为第n个场景下第t时段的调频里程价格; A^{pef} 为平均调频性能指标; θ 为平均调频里程。

3)储能循环寿命折损成本。

为实时地考虑储能投标决策对其寿命的影响, 将储能的循环寿命折损等效为投资成本的损失。基 于所提的寿命测算模型,每日累计放电过程中第 *n*个场景下储能的循环寿命折损成本*c*^{los}如式(18) 所示。

$$c_n^{\rm loss} = \frac{C^{\rm cap} \boldsymbol{\beta}^{\rm CR} l_n^{\rm day}}{L_{100}^{\rm fail}}$$
(18)

式中:L^{III} 为储能在100%放电深度下的最大使用次数;l^{III} 为第n个场景下储能在100%放电深度下的 累计循环次数;β^{CR} 为等年值系数,用于表示规划周 期内储能的初始投资成本等效价值,其表达式如式 (19)所示。

$$\beta^{CR} = \frac{r(1+r)^{Y^*}}{(1+r)^{Y^*} - 1}$$
(19)

式中:r为贴现率;Y^{*}为规划周期。 3.2.2 约束条件

1)功率平衡约束。

$$P_{n,t}^{\text{dis}} - P_{n,t}^{\text{cha}} = R_{n,t}^{\text{eng}} + R_{n,t}^{\text{reg}} S_{n,t}^{\text{reg}}$$
(20)

式中: $P_{n,t}^{cha}$ 为第n个场景下第t时段储能的充电功率; $P_{n,t}^{dis}$ 为第n个场景下第t时段储能的放电功率; $S_{n,t}^{reg}$ 为第n个场景下第t时段的调频容量指令。

2)投标功率约束。

储能投标功率之和、之差必须分别保持在其配 置功率的上、下限范围之内,如式(21)、(22)所示。

$$R_{n,t}^{\text{eng}} + R_{n,t}^{\text{reg}} \le P^{\max, \text{ess}}$$
(21)

$$R_{n,t}^{\text{eng}} - R_{n,t}^{\text{reg}} \ge -P^{\max, \text{ess}}$$
(22)

3)容量约束。

储能需要预留足够能量以提供辅助服务,响应 AGC 指令,如式(23)、(24)所示。

$$E_{n,t} - \underline{\sigma} E^{\text{ess}} \ge (R_{n,t}^{\text{eng}} + R_{n,t}^{\text{reg}}) \Delta t / \eta$$
(23)

$$E_{n,t} \leq \sigma E^{\text{ess}} + (R_{n,t}^{\text{ess}} - R_{n,t}^{\text{res}}) \Delta t \eta$$
(24)
式中: $E_{n,t}$ 为第 n 个场景下第 t 时段储能容量; $\bar{\sigma} \setminus \underline{\sigma}$ 分

别为储能SOC的上、下限。

4)运行约束。

储能要安全运行,需满足容量约束与功率约束, 如式(25)—(27)所示。

$$E_{n,t+1} = E_{n,t} + \eta P_{n,t}^{\text{cha}} \Delta t + \eta^{-1} P_{n,t}^{\text{dis}} \Delta t \qquad (25)$$

$$0 \leq P_{n,t}^{cha} \leq u_{n,t} P^{ess} \tag{26}$$

$$0 \leq P_{n,t}^{\text{dis}} \leq (1 - u_{n,t})P^{\text{ess}}$$

$$(27)$$

式中: $u_{n,t}$ 为第n个场景下第t时段储能的运行状态, $u_{n,t}=1$ 表示储能处于充电状态, $u_{n,t}=0$ 表示储能处于 放电状态。

在调度周期内,储能的始、末状态需满足式(28) 所示约束条件。

$$E_1 = E_T \tag{28}$$

式中: E1、E7分别为调度周期始、末的电量。

5)循环寿命约束。

储能的循环寿命约束由式(2)—(6)给出。

4 求解算法

传统的方法一般将两阶段问题转化为单阶段问题进行求解,但考虑到本文所提的储能优化配置与运营两阶段模型为混合整数非线性规划问题,直接转化的难度较大。为了解决这个问题,本文采用

ADMM 对所提的两阶段模型进行解耦求解。ADMM 是近年来兴起的一种分散优化算法,具有收敛性好、 鲁棒性强等优点,在电力系统多区域优化调度等领 域得到了较多的应用^[20],但在两阶段优化问题的求 解方面未见报道。

在本文所提的储能优化配置与运营两阶段模型中,第一阶段模型与第二阶段模型通过储能配置容量 E^{ess} 和功率 P^{ess} 相耦合。为了便于描述,令x表示耦合变量(E^{ess}, P^{ess}),并在第二阶段模型中引入相应的复制变量 $z_n = (E_n^{ess}, P_n^{ess})$ 。为了保持解耦前、后模型的等价性, z_n 需满足一致性约束,如式(29)所示。

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{z}_n \quad n = 1, 2, \cdots, N \tag{29}$$

此时,两阶段模型的表达式如式(30)所示。

$$\begin{cases} \max\left\{f(\mathbf{x}) + \sum_{n=1}^{N} g_{n}(\mathbf{y}_{n}, \mathbf{z}_{n})\right\} \\ \text{s.t.} \quad \mathbf{x} = \mathbf{z}_{n} \quad n = 1, 2, \cdots, N \\ \vec{\mathbf{x}} \quad (2) - (6) \ (9) - (12) \ (20) - (28) \end{cases}$$
(30)

式中: $f(\mathbf{x})$ 为第一阶段模型的目标函数; $g_n(\mathbf{y}_n, \mathbf{z}_n)$ 为 第二阶段模型中第n个场景下的目标函数, \mathbf{y}_n 为第二 阶段模型中第n个场景下除耦合变量以外的决策变 量,即 $\mathbf{y}_n = (P_{n,i}^{\text{dis}}, P_{n,i}^{\text{cha}}, R_{n,i}^{\text{reg}})_{\circ}$ 。

松弛一致性约束式(29),构造增广拉格朗日函数如式(31)所示。

$$L_{\rho}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{z}_{n}, \boldsymbol{y}_{n}) = f(\boldsymbol{x}) + \sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{g}_{i}(\boldsymbol{y}_{i}, \boldsymbol{z}_{i}) - \sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{\lambda}_{i} (\boldsymbol{x} - \boldsymbol{z}_{i})^{\mathrm{T}} + \frac{\boldsymbol{\rho}}{2} \sum_{i=1}^{N} \left\| \boldsymbol{x} - \boldsymbol{z}_{i} \right\|_{2}^{2}$$
(31)

式中: *ρ*>0为惩罚因子; *λ*_i为第*i*个场景下一致性约 束的拉格朗日乘子。

利用 ADMM 对解耦后的 2 个阶段的问题进行迭 代求解,其中第 *k*+1 次迭代计算可表示为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{x}^{(k+1)} = \underset{\boldsymbol{x}}{\operatorname{argmax}} L_{\rho}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{z}^{(k)}, \boldsymbol{y}^{(k)}) \\ \text{s.t.} \quad \overrightarrow{\mathrm{T}} (9) - (12) \end{cases}$$
(32)

$$\begin{cases} \boldsymbol{z}^{(k+1)} = \operatorname{argmax}_{\boldsymbol{z}} L_{\boldsymbol{\rho}} \left(\boldsymbol{x}^{(n+1)}, \boldsymbol{z}, \boldsymbol{y}^{(k)} \right) \\ \vdots \end{cases}$$
(33)

$$(s.t. \ \vec{x} \ (2) - (6), (20) - (28)$$

$$\lambda_n^{(\kappa+1)} = \lambda_n^{(\kappa)} + \rho(x^{(\kappa+1)} - z_n^{(\kappa+1)})$$
 n=1,2,...,N (34)
收敛判据为:

$$\left\|\boldsymbol{r}^{(k+1)}\right\|_{2} = \max_{n} \left\|\boldsymbol{x}^{(k+1)} - \boldsymbol{z}^{(k+1)}_{n}\right\|_{2} \leq \varepsilon$$
(35)

式中: $z=(z_1, \dots, z_n, \dots, z_N)$; $y=(y_1, \dots, y_n, \dots, y_N)$; $r^{(k+1)}$ 为第n个场景下第k+1次迭代后的原始残差; ε 为收敛精度。

注意到第二阶段的子问题式(33)中不同场景的 变量及约束没有耦合,因此可以将式(33)进一步解 耦为每个场景进行独立求解,如式(36)所示。

$$\boldsymbol{z}_{n}^{(k+1)} = \operatorname*{argmax}_{\boldsymbol{z}_{n}} \boldsymbol{g}_{n} (\boldsymbol{y}_{n}, \boldsymbol{z}_{n}) - \boldsymbol{\lambda}_{n}^{(k)} (\boldsymbol{x} - \boldsymbol{z}_{n})^{\mathrm{T}} + \frac{\boldsymbol{\rho}}{2} \sum_{i=1}^{N} \left\| \boldsymbol{x} - \boldsymbol{z}_{i} \right\|_{2}^{2}$$
$$n = 1, 2, \cdots, N$$
(36)

基于 ADMM 对本文所提的储能优化配置与运 营两阶段模型进行求解的计算流程见附录 A 图 A1。

5 算例分析

5.1 参数设置

本文的算例中,储能的电池类型采用电化学储 能中的钒液流电池,规划周期为10 a,贴现率为0.1, 每15 min响应一次调频指令。其他参数均来自于 PJM电力市场实际的历史数据,详见附录A表A1、 A2和图A2。为了模拟不同场景的随机特性,假设 能量出清价格、调频容量价格和调频里程价格误差 均服从均值为0、标准差为0.1的正态分布,基于蒙 特卡洛法进行100次抽样。ADMM的拉格朗日乘子 均设为1,惩罚因子 $\rho=10^5$,收敛精度 ε 设为0.001。

5.2 容量配置的影响分析

为了便于分析,将储能的功率固定为20 MW,计 算不同配置容量下储能的经济性指标及循环寿命, 结果如图3所示。图3(a)反映了储能的年投资收益 率随其配置容量的增大呈先上升后下降的趋势。当 配置容量增加到50 MW·h左右时,储能的总利润增 速与总成本增速相当,其年投资收益率达到最大值。 继续增加储能的配置容量虽可增大储能的总利润, 但其总利润的增速将小于总成本的增速,因此其年 投资收益率逐渐下降。图3(b)反映了储能的循环 寿命随着其配置容量的增大呈先下降后上升的趋 势,这与储能参与电力市场的充放电深度有关。综 上可知,储能的年投资收益率与循环寿命都会随其 配置容量的变化而变化。因此,合理的储能容量配 置有利于提高其收益和使用寿命。



Fig.3 Influence of configuration capacity of energy storage

5.3 对比算例分析

为说明本文所提方法的有效性,设置了以下3 种情景进行对比:情景1,考虑储能循环寿命折损; 情景2,不考虑储能循环寿命折损;情景3,储能只参 与能量市场。

求解上述3种情景下的储能优化配置与运营方 案,得到储能优化配置结果如表1所示。为了便于 对比分析情景1与情景2中是否考虑储能循环寿命 折损的情况,图4进一步展示了某个随机场景下2种 情景所对应的储能SOC变化曲线。

表1 储能优化配置与运营结果

Table 1 Optimal configuration and operation

results of energy storage 容量 / 功率/ 循环寿命 / 总利润 / 年投资收益 情景 (MW·h) MW 率 / % d \$ 2.490×107 29.672 11.144 1451 10.1 1 26.546 11.546 1141 1.570×107 6.3 2 3 20.551 12.327 4564 1.189×107 4.8



图4 储能 SOC 曲线

Fig.4 SOC curves of energy storage

从表1中可以看出,情景1中储能的循环寿命为 1451 d,相较于情景2的1141 d提升了27.2%,这与 储能的运行状态有关。观察图4可以看到,相较于 情景2,情景1的放电深度更浅,因而有利于延长储 能的循环寿命,延缓储能折损。此外,对比情景1与 情景2还可发现,考虑循环寿命折损后,储能的总利 润与年投资收益率均显著高于未考虑循环寿命折损 的情况,这说明了本文所提方法在考虑储能循环寿 命折损方面的有效性。

对比情景1与情景3发现,储能在不参与调频市 场的情况下具有更长的循环寿命,但这会造成储能 的收入大幅下降。本文所提方法能兼顾储能的循环 寿命和电力市场环境下的运营经济性,综合效益 更高。

5.4 关键影响因素分析

假定储能的功率成本系数 γ^{ℓ} 和容量成本系数 γ^{ϵ} 均按相同的比例进行变化(该比例系数设为 κ),分 析储能成本和储能循环寿命对储能总利润的影响, 结果如图5所示。由图可见,随着储能投资成本的 下降和循环寿命的提高,其总利润呈上升趋势。相 对而言,储能的投资成本对其总利润的影响更大,特 别是当 $\kappa < 1$ 时,储能的总利润随投资成本的降低而 快速增长。



图 5 不同成本系数和循环寿命下的总利润变化

Fig.5 Total profit change under different cost coefficients and cycle life values

当储能的投资成本较高时,储能的总利润受循 环寿命的影响较小,这是因为该种情况下储能的总 利润为负,储能参与电力市场的意愿不高(投标量较 小),无论储能的循环寿命如何变化,其折损均较小。 相反,当储能的投资成本较低时,储能在电力市场的 投标容量增大,因而其总利润受循环寿命的影响也 会显著增大。

6 结论

本文建立了考虑循环寿命折损的储能优化配置 与运营两阶段模型,并利用 ADMM 进行求解,得到 以下结论:

1)本文所提的储能循环寿命测算模型能嵌入储 能优化配置与运营两阶段模型,有利于更合理地配 置储能容量,延长储能循环寿命,进而获得更高的 收益;

2)储能同时参与能量市场和调频市场带来的收益显著高于储能单独参与能量市场的收益,有利于 实现储能的经济运营;

3)利用 ADMM 可以对两阶段耦合的非线性、离 散性、随机性问题进行解耦求解,得到合理的结果。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1]朱兰,严正,杨秀,等.风光储微网系统蓄电池容量优化配置方法研究[J].电网技术,2012,36(12):26-31.
 ZHU Lan, YAN Zheng, YANG Xiu, et al. Optimal configuration of battery capacity in microgrid composed of wind power and photovoltaic generation with energy storage[J]. Power System Technology,2012,36(12):26-31.
- [2] 薛金花,叶季蕾,陶琼,等. 基于多场景的商业园区源-储-荷系 统运营模式及投资决策研究[J]. 电力自动化设备,2019,39(2): 78-83,92.

XUE Jinhua, YE Jilei, TAO Qiong, et al. Multi-scenarios based operation mode and investment decision of source-storageload system in business park[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2):78-83,92.

[3] XIAO J, ZHANG Z Q, BAI L Q, et al. Determination of the optimal installation site and capacity of battery energy storage system in distribution network integrated with distributed generation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(3):601-607. [4] 雷金勇,郭祚刚,陈聪,等.考虑不确定性及电/热储能的综合 能源系统两阶段规划-运行联合优化方法[J].电力自动化设 备,2019,39(8):169-175.

LEI Jinyong, GUO Zuogang, CHEN Cong, et al. Two-stage planning-operation co-optimization of IES considering uncertainty and electrical / thermal energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8):169-175.

- [5] ZOU P, CHEN Q X, XIA Q, et al. Evaluating the contribution of energy storages to support large-scale renewable generation in joint energy and ancillary service markets [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016,7(2):808-818.
- [6] AWAD A S A, FULLER J D, EL-FOULY T H M, et al. Impact of energy storage systems on electricity market equilibrium[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(3): 875-885.
- [7] XU B L, WANG Y S, DVORKIN Y, et al. Scalable planning for energy storage in energy and reserve markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6):4515-4527.
- [8] MUSALLAM M, JOHNSON C M. An efficient implementation of the rainflow counting algorithm for life consumption estimation[J]. IEEE Transactions on Reliability,2012,61(4):978-986.
- [9] 贾兆昊,张峰,丁磊.考虑功率四象限输出的配电网储能优化 配置策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(2):105-113.
 JIA Zhaohao,ZHANG Feng,DING Lei. Optimal allocation stratery of energy storage in distribution network considering power four-quadrant ouput[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(2):105-113.
- [10] TRAN D, KHAMBADKONE A M. Energy management for lifetime extension of energy storage system in micro-grid applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3):1289-1296.
- [11] HE G N, CHEN Q X, KANG C Q, et al. Optimal bidding strategy of battery storage in power markets considering performance-based regulation and battery cycle life[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(5):2359-2367.
- [12] HE G N, CHEN Q X, KANG C Q, et al. Cooperation of wind power and battery storage to provide frequency regulation in power markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5):3559-3568.
- [13] 王丹,孟政吉,贾宏杰,等.基于配置-运行协同优化的分布 式能源站选型与定容规划[J].电力自动化设备,2019,39(8): 152-160.
 WANG Dan,MENG Zhengji,JIA Hongjie, et al. Siting and sizing planning for distributed energy station based on coordinated optimization of configuration and operation[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(8):152-160.
- [14] KAZEMI M, ZAREIPOUR H. Long-term scheduling of battery storage systems in energy and regulation markets considering battery's lifespan[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6):6840-6849.
- [15] 刘一欣,郭力,王成山. 微电网两阶段鲁棒优化经济调度方法
 [J]. 中国电机工程学报,2018,38(14):4013-4022,4307.
 LIU Yixin,GUO Li,WANG Chengshan. Economic dispatch of microgrid based on two stage robust optimization[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(14):4013-4022,4307.
- [16] 张刘冬,袁宇波,孙大雁,等. 基于两阶段鲁棒区间优化的风储联合运行调度模型[J]. 电力自动化设备,2018,38(12):59-66,93.

ZHANG Liudong, YUAN Yubo, SUN Dayan, et al. Joint operation model of wind-storage system based on two-stage robust interval optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(12):59-66,93.

- [17] 鞠立伟,于超,谭忠富. 计及需求响应的风电储能两阶段调度 优化模型及求解算法[J]. 电网技术,2015,39(5):1287-1293.
 JU Liwei,YU Chao,TAN Zhongfu. A two-stage scheduling optimization model and corresponding solving algorithm for power grid containing wind farm and energy storage system considering demand response[J]. Power System Technology,2015, 39(5):1287-1293.
- [18] 于壮状,曾鸣,刘英新,等.基于分层次DBSCAN-VBSO算法的 区域综合能源系统两阶段调度优化[J].电力自动化设备,2019, 39(12):63-72.
 YU Zhuangzhuang,ZENG Ming,LIU Yingxin, et al. Two-stage dispatching optimization of regional integrated energy system

based on hierarchical DBSCAN-VBSO algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12):63-72.

- [19] DUGGAL I, VENKATESH B. Short-term scheduling of thermal generators and battery storage with depth of discharge-based cost model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30 (4):2110-2118.
- [20] 赵波,倪筹帷,李志浩,等.基于自适应步长 ADMM 的电-气混 联系统多时间尺度优化调度[J].电力自动化设备,2019,39(8): 294-299.

ZHAO Bo,NI Chouwei,LI Zhihao, et al. Multi-time scale optimal scheduling of electricity-gas hybrid system based on adaptive step size ADMM[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(8):294-299.

作者简介:



王泽爽(1998—),男,湖北黄石人,硕士 研究生,主要研究方向为人工智能在电力系统 的应用及电力市场(E-mail:892093753@qq. com);

陈嘉俊(1996—),男,广东江门人,硕士 研究生,主要研究方向为人工智能在电力系统 的应用及电力市场(E-mail:550990770@qq. com);

王泽爽

朱建全(1982—),男,广西玉林人,副 教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电 力系统建模、分析与优化及电力市场等(E-mail:zhujianquan@ scut.edu.cn)。

(编辑 王欣竹)

Optimal configuration and operation strategy of energy storage considering cycle life

WANG Zeshuang¹, CHEN Jiajun¹, ZHU Jianquan^{1,2}, YE Hanfang¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. State Key Laboratory of Security Control and Simulation for Power System and

Large Power Generation Equipment, Beijing 100084, China)

Abstract: Aiming at the disadvantages of energy storage in life and economy, a novel cycle life calculation model of energy storage is established, and on this basis, a two-stage optimal strategy of energy storage configuration and operation considering cycle life is proposed. In the first stage, the capacity configuration of energy storage is optimized with the investment limit as the constraint. In the second stage, the operation condition of energy storage in energy market and frequency modulation market is fully simulated during the life-cycle, and the proposed cycle life calculation model is embedded to consider the cycle life loss of energy storage in each charging and discharging process. Through the joint optimization of these two stages, the comprehensive benefit of the configuration and operation of energy storage can be effectively improved. Considering that the proposed model is a two-stage mixed-integer stochastic nonlinear problem, which is difficult to deal with by conventional methods, the alternating direction multiplier method is used to decouple it into a series of subproblems, which makes it easier to solve. The case simulative results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: energy storage; optimal configuration; operation strategy; electricity market; cycle life; alternating direction multiplier method

附录 A



