

含储能健康运行域与电压安全约束的 配电网重构方法

方斯顿, 黄莘杰, 孔赖强, 牛涛*, 陈冠宏, 廖瑞金

(输配电装备技术全国重点实验室(重庆大学电气工程学院), 重庆市沙坪坝区 400044)

Distribution Network Reconfiguration Method With Health Operating Area of Energy Storage Life and Voltage Security Constraints

FANG Sidun, HUANG Xinjie, KONG Laiqiang, NIU Tao*, CHEN Guanhong, LIAO Ruijin

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology (School of Electrical Engineering, Chongqing University),
Shapingba District, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: With the integration of renewable energy and various demand response strategies into the distribution network, the voltage security of the distribution network will face unprecedented challenges, resulting in the problems such as bi-directional power flow, voltage limit violations, etc. This paper explores the operating flexibility of distribution network and energy storage devices, and proposes a network reconfiguration method combining with energy storage management to limit the voltage volatility index (VVI). At the same time, to reduce the lifetime degradation caused by frequent charging and discharging, this paper defines the life level set of energy storage based on the hyperspace projection of lifetime surface to represent the health operating area (HOA). Then, this paper proposes the convex approximation for the defined life level set to replace the nonlinear energy storage lifetime constraint, which can solve the reconstruction problem efficiently. Finally, the IEEE-33 node system is selected as an example system to analyze and verify the effectiveness and practicability of the proposed method.

KEY WORDS: energy storage life level sets; voltage security; voltage volatility index; health operating area; distribution network reconfiguration; hyperspace projection

摘要: 随着未来各类新能源及用户侧需求互动技术引入配电网, 配电网电压安全管理将面临更严峻挑战, 带来双向潮流、电压越限等运行问题。在此背景下, 该文挖掘网络侧及储能设备的运行灵活性, 以限制配电网节点电压波动指数 (voltage volatility index, VVI) 为目标, 提出融合储能能量管

理的配电网网络重构方法。同时, 为减小储能频繁充放引起的寿命损失, 该文基于储能寿命曲面的超空间投影定义储能寿命水平集表征储能健康运行域 (health operating area, HOA), 并提出水平集凸逼近方法替代非线性储能寿命约束, 可在保障储能寿命前提下实现网络重构问题的高效求解。最后, 选取 IEEE-33 节点系统进行分析, 验证所提方法的有效性与实用性。

关键词: 储能寿命水平集; 电压安全; 电压波动指数; 健康运行域; 配电网重构; 超空间投影

0 引言

可再生能源替代是实现“双碳”目标的重要举措, 但随着各类型新能源接入及用户侧互动的增加, 配电网可再生能源的渗透率急剧上升。当配电网负荷水平较低时, 若可再生能源的发电量高于配电网的负载需求, 多余电力将通过变电站母线, 反向输送到电网, 这可能导致双向潮流与过电压, 为配电网的安全运行带来风险^[1-2]。

网络重构是配电网的主要控制手段, 在不增加额外设备投资情况下, 便可对配电网进行优化调整, 具有改善电能质量、均衡负荷、消除过载、降低网损以及提高配电网运行经济性等作用。文献[3]利用改进支路交换法, 以网损最小和负荷均衡为目标进行配电网重构; 文献[4]从用户侧角度出发, 以节点电压偏差最小为目标, 利用生物地理学优化算法进行重构计算; 文献[5]以电压平衡指数最小为目标函数, 通过支持向量机对配电网负荷潮流和最优网络结构进行分类, 完成配电网拓扑重构, 实现

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (5108-202218280A-2-314-XG)。

Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5108-202218280A-2-314-XG).

电压优化;文献[6]提出一种新的模糊重构算法,在最小化网络损耗的同时,增强电压稳定性并改善电压曲线。配电网重构能提高网络侧的灵活性,但其使用具有次数限制,无法实现针对可再生能源出力不确定性的高频次调整,同时重构的调压效果有限,无法保证所有线路末端节点的电压安全。因此,还需引入额外设备进一步降低系统的节点电压波动水平。

众多研究表明,储能接入配电网能提高系统整体可调度性和灵活性。由于可再生能源具有间歇性和不稳定性,储能系统能够跟踪可再生能源出力,进而保证配电网安全。同时储能具有削峰填谷的作用,当配电网负荷低时,可再生能源向储能充电,当配电网负荷高时,储能进行放电。但储能系统对运行条件比较敏感,将直接影响储能在电力系统中应用的经济成本^[7]。因此,探究储能寿命在电网运行中的影响具有实际意义。目前将储能寿命考虑到能量管理中已有大量研究,文献[8]建立考虑储能寿命衰减的电气耦合能量系统模型,最大限度降低系统运行的经济成本;文献[9]提出一种基于荷电状态(state of charge, SoC)约束的储能系统动态控制策略,最终结果表明储能的不同工作状态将显著影响储能寿命,并最终影响系统的经济效益;文献[10]建立考虑充放电深度、循环放电次数的电池寿命估计模型,基于该模型进行储能容量配置,并平抑风电厂输出功率波动;文献[11]将电池寿命模型嵌入到储能技术经济分析框架中,分析不同电价机制下的系统经济性;文献[12]认为储能寿命损耗与充放电量成正比,将 $SoC=0.5$ 作为边界设置两种不同寿命损耗系数,在此基础上提出一种考虑电池寿命衰减的共享储能定价策略,保证整体经济性。

在储能运行问题的经济性分析中,储能系统寿命模型用于评估储能全寿命周期成本,但精确的寿命模型带来较大的计算压力,如何平衡准确度和模型复杂度是当前需解决的重点。现有研究对于储能寿命进行建模时,往往基于储能装置本身的寿命衰减机理,利用实验数据将储能寿命衰减模型表达为相关因素的函数关系式。文献[13]建立包含平均 $SoC(SoC_{mean})$ 、放电深度(depth of charge and discharge, DoD)和温度的损耗模型,但DoD的系数为复杂的指数形势;文献[14]提出以雨流计数法计算储能寿命折损的费用,非线性程度较高,仅适用于储能充放电曲线已知的场景;文献[15]建立储能

寿命与放电深度的四阶函数关系,并计算相应的储能寿命损耗;文献[16]通过建立损耗密度函数来计算电池单位储存能量变化导致的损耗成本,但该函数包含绝对值项,为优化求解带来巨大的复杂度;文献[17]利用储能充电功率的二次多项式拟合储能寿命的折损成本;文献[18]根据不同温度下的容量衰减实验和数据拟合,建立了具有指数表达形式的阿罗尼乌斯方程来描述寿命衰减;文献[19]将电池循环寿命与DoD的关系用5阶函数进行拟合,进而估算电池寿命的衰减状态;文献[20]对拟合出的指数型电池寿命损耗函数进行分段线性化,以此降低模型非线性程度,但不可避免的带来精度损失;文献[21-22]分别直接限制电池每天的循环次数和SoC范围来保证使用寿命,在一定程度上简化了计算,但无法从时间尺度上考虑约束条件的变化,且不能保证电池在能量管理中的最优运行。综上所述,现有储能寿命建模的非线性程度高,对能量管理模型得到最优解有极大的影响,在工程上应用十分困难。

针对上述研究的不足,为解决可再生能源接入配电网所带来的电压安全问题,本文提出一种融合储能能量管理的配电网重构方法。同时,为缓解储能系统在运行过程中的寿命损失,构建储能寿命水平集来直观反映储能寿命与 SoC_{mean} 和DoD的关系,并利用凸逼近方法替代非线性储能寿命约束,在保证储能寿命的前提下,实现配电网重构问题的高效求解。最后,基于IEEE-33节点系统验证所提方法的有效性与实用性。本文的主要贡献如下:

1) 充分挖掘配电网设备侧与网络侧运行灵活性,提出融合储能调度和网络重构的配电网电压安全管理方法。计及运行工况对储能寿命的影响,解决可再生能源接入与用户侧互动加剧带来的配电网电压安全问题。

2) 定义储能寿命水平集,替代非线性储能寿命约束。首先将电池的可用寿命曲面利用超平面投影的方式得到储能寿命健康运行域。随后,采用凸逼近的方式将该运行域凸化。进而建立储能寿命与健康运行域的直接关系,有效提高考虑储能寿命约束能量管理问题的求解精确性。

3) 对融合网络重构与储能调度的配电网能量管理方法进行经济性分析。基于不同储能健康运行域在配电网侧实施能量管理,平衡配电网运行经济性和储能寿命,挖掘储能寿命对配电网运行成本的

影响规律。

1 储能系统寿命模型

准确评估储能寿命值对配电网的优化运行有着重要的作用，由现有研究可知，储能系统的 SoC_{mean} 和 DoD 对其寿命有显著的影响。参照文献[23]，本文认为充电和放电对电池寿命影响相同，将充电事件中的 SoC 最大变化也纳入考虑。为此，提出构建不同储能寿命下 SoC_{mean} 和 DoD 可行域，进而研究在不同寿命下投入储能对配电网运行的影响。

本文根据采集到的电池健康状态 (state of health, SoH) 数据集，将其转换为等效充放电循环次数 (equivalent full cycles, EFC)，建立电池可用寿命模型，如式(1)所示。

$$E_{efc} = f(S_s, D_d) \quad (1)$$

式中 E_{efc} 、 S_s 和 D_d 分别表示 EFC 、 SoC_{mean} 及 DoD 的相应取值； f 为可用寿命函数。为说明以上模型，在任一温度下，本文建立 DoD 和 SoC_{mean} 影响的锂离子电池可用寿命曲面，如图 1 所示。

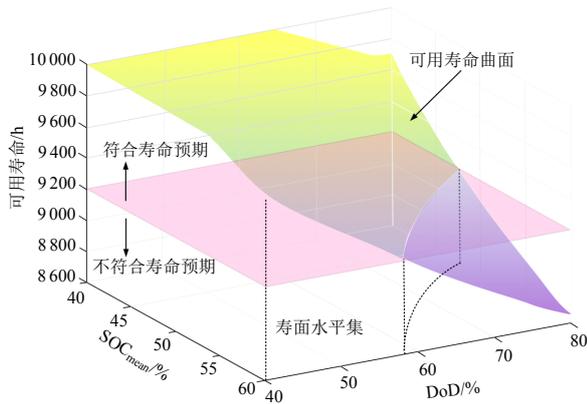


图 1 锂离子电池寿命曲面

Fig. 1 Lithium-ion battery available life curve

在图 1 中，将寿命预期平面与可用寿命曲线的截交线投影到 DoD 和 SoC_{mean} 构成的平面上形成临界寿命曲线。基于上述模型，本文采用美国马里兰大学的电池开放实验数据包进行研究 [24]，其 SoC_{mean} 、 DoD 和 EFC 的关系如图 2 所示。图 3 为不同 EFC 下的临界寿命曲线， EFC 区间为 [750, 5700] 次，以 550 次为间隔。

为建立储能全寿命周期成本和运行域之间的直接关系，本文将位于寿命预期平面上方的可用寿命曲面运用超空间投影的方法，得到影响因素平面上的超空间投影，如图 4 所示。

其中，影响因素 1 和影响因素 2 分别代表 DoD 和 SoC_{mean} ，临界寿命曲线将 DoD 和 SoC_{mean} 构成

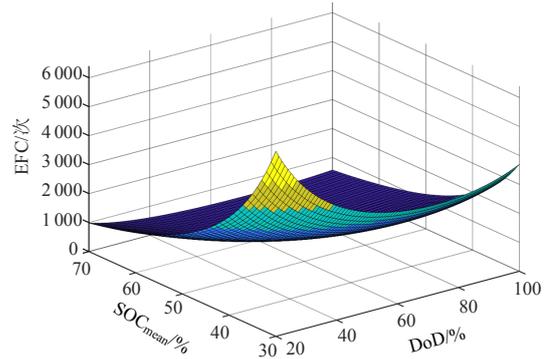


图 2 DoD、 SoC_{mean} 和 EFC 关系图

Fig. 2 Relationship diagram of DoD 、 SoC_{mean} and EFC

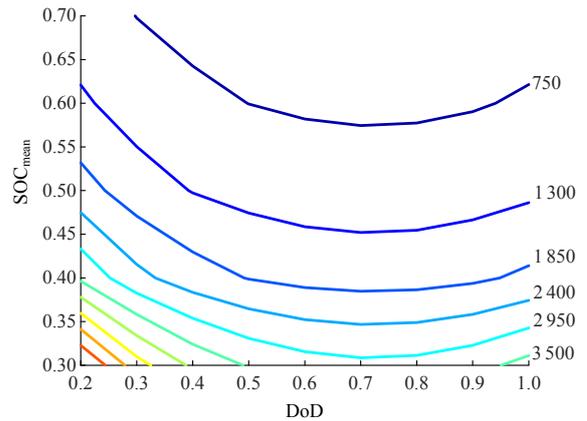


图 3 不同 EFC 下的临界寿命曲线

Fig. 3 Critical lifetime curves under different EFC

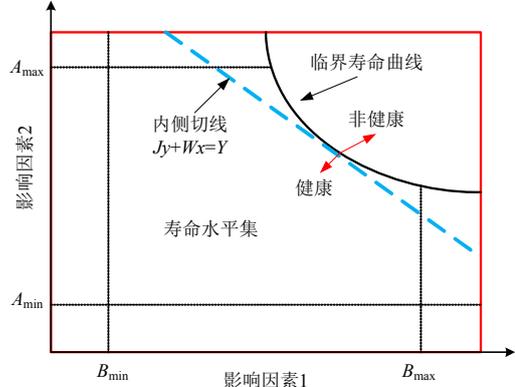


图 4 超空间投影

Fig. 4 Hyperspace projection

的可行域分为健康运行和非健康运行，本文“健康”是指设备的寿命大于预期。图 4 中的寿命水平集为储能寿命不低于预期的可行域集合，其物理意义为电池的 HOA，数学模型如式(2)所示。

$$X(n_p) = \{(D_d, S_s) | n \geq n_p\} \quad (2)$$

式中： X 代表寿命水平集； n 代表储能系统的实际可用寿命； n_p 代表预期寿命； $X(n_p)$ 表示储能系统的实际可用寿命不低于预期寿命的所有 DoD 和 SoC_{mean} 的组合。但 HOA 在实际运行过程中可能具有非凸性质，本文采用凸逼近方法，作临界寿命曲

面的内侧切线,将影响因素可行域进行凸化。最终所建立的储能寿命约束可由式(3)–(5)表示。

$$A_{\min} \leq S_s \leq A_{\max} \quad (3)$$

$$B_{\min} \leq D_d \leq B_{\max} \quad (4)$$

$$J \times S_s + W \times D_d \leq Y \quad (5)$$

式(3)和(4)表示 SoC_{mean} 和 DoD 的区间上下限,其中 SoC_{mean} 的下限为纵轴的最小值,上限为内侧切线与纵轴的交点,DoD 的上限为内侧切线与横轴的交点,若交点大于 1 则取 1,其下限取为 0,式(5)表示储能系统当前临界寿命曲线所对应的内侧切线方程, J 、 W 和 Y 为内侧切线方程的相关系数。式(4)–(5)中 D_d 取调度周期内电池最大 DoD (DoD_{max}),进而可根据式(3)–(5)精准估计不同储能寿命下,储能系统的运行性能及其对含分布式电源配电网的影响。本节提出的储能寿命建模形式能有效降低约束非线性程度,建立储能全寿命周期成本与健康运行域的显式关系,保证融合重构和储能能量管理模型高效求解。

2 能量管理模型。

2.1 配电网运行模型

本节根据 DisFlow 模型进行建模^[25],以配电网运行的总成本最低为目标函数,建立如下配电网运行模型。

1) 目标函数。

$$\min F = \sum_{t=1}^T a \max\{0, P_t\} \Delta t + \sum_{t=1}^T b \min\{0, P_t\} \Delta t + \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{t=1}^T c_k P_W^{k,t} \Delta t + \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{t=1}^T d_k (P_W^{k,t,\max} - P_W^{k,t}) \Delta t \quad (6)$$

式中: F 为系统总运行成本; P_t 为 t 时刻主网与配电网交互功率, P_t 为正代表配网从主网购电, P_t 为负代表配网向主网买电; a 为单位购电费用; b 为单位售电费用; T 为总时段数; Δt 为时段间隔; N_w 为风电场的数量; c_k 为第 k 座风电场的运行成本系数; $P_W^{k,t}$ 为第 k 座风电场 t 时刻的实际出力; d_k 为第 k 座风电场的弃风成本; $P_W^{k,t,\max}$ 为第 k 座风电场 t 时刻的预测出力上限。

目标函数第一项为配网从主网购电的费用;第二项为配网向主网售电的收益;第三项为风力发电机的运行成本;第四项为风力发电机的弃风惩罚费用。

2) 约束条件。

① Disflow 约束。

$$P_{ij,t} = -P_{j,t} + r_{ij} l_{ij,t} + \sum_{k \in ch(j)} P_{jk,t} \quad (7)$$

$$Q_{ij,t} = -Q_{j,t} + x_{ij} l_{ij,t} + \sum_{k \in ch(j)} Q_{jk,t} \quad (8)$$

$$V_{i,t}^2 - V_{j,t}^2 = 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) l_{ij,t} \quad (9)$$

$$l_{ij,t} V_{i,t}^2 = P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 \quad (10)$$

式中: $V_{i,t}$ 为母线 i 在 t 时刻的节点电压; $P_{j,t}$ 、 $Q_{j,t}$ 分别为节点 j 在 t 时刻的有功注入功率和无功注入功率; $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$ 分别为节点 i 到节点 j 在 t 时刻线路上流动的有功功率和无功功率; r_{ij} 、 x_{ij} 分别为节点 i 到节点 j 线路上电阻和电抗; $l_{ij,t}$ 为线路在 t 时刻电流的平方; $ch(j)$ 表示节点 j 的子节点。

② 配电网重构约束。

引入开关标志位 α_{ij} 进行配电网重构建模,其中 $\alpha_{ij}=0$,表示节点 i 和 j 之间的开关是断开的;当 $\alpha_{ij}=1$ 时,表示节点 i 和 j 之间的开关是闭合的。采用大 M 法对式(9)进行松弛得到式(11),其中 M 为足够大的数值。

$$\begin{cases} V_{i,t}^2 - V_{j,t}^2 \geq 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) l_{ij,t} - M(1 - \alpha_{ij}) \\ V_{i,t}^2 - V_{j,t}^2 \leq 2(r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}) - (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) l_{ij,t} + M(1 - \alpha_{ij}) \end{cases} \quad (11)$$

考虑到配电网中各非变电站母线有且仅有一条线路连接到变电站母线,为了保证配电网的辐射性考虑式(12)所示的约束^[26]:

$$\sum \alpha_{ij} = n - n_s \quad (12)$$

式中: n 为配电网的总节点数; n_s 为配电网中变电站的数量。为防止孤立节点存在,对于没有负荷的节点,添加一个极小的负荷量,用于加强配电网的径向性,同时对实际潮流的影响可以忽略不计。对于极小负荷的设置,若系统的节点负荷量在 100 kW 尺度下,则对于无负荷节点添加 1 W 左右的小负荷量。图 5、6 为标准 IEEE-33 系统中第 6 节点无负荷及添加 1 W 和 1 var 的负荷后所得到的线路有功损耗及对应差值。

由以上两图可知,在电网无负荷点加入极小负荷前后系统潮流分布变化甚微,对最终的能量管理结果无明显影响。

③ 支路功率约束。

$$\begin{cases} -\alpha_{ij} P_{ij}^{\max} \leq P_{ij,t} \leq \alpha_{ij} P_{ij}^{\max} \\ -\alpha_{ij} Q_{ij}^{\max} \leq Q_{ij,t} \leq \alpha_{ij} Q_{ij}^{\max} \end{cases} \quad (13)$$

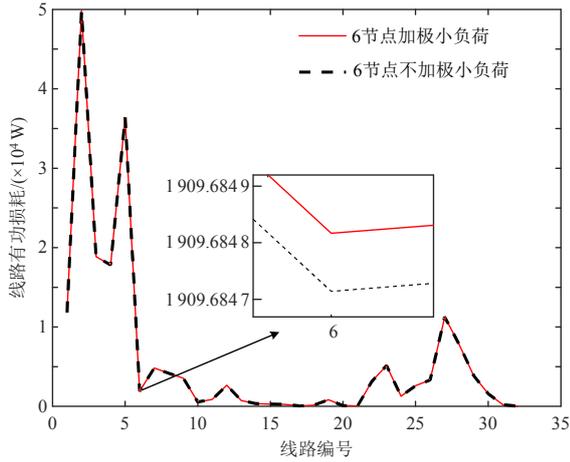


图 5 两种情境下的线路有功网损

Fig. 5 Active power loss of transmission lines in two scenarios

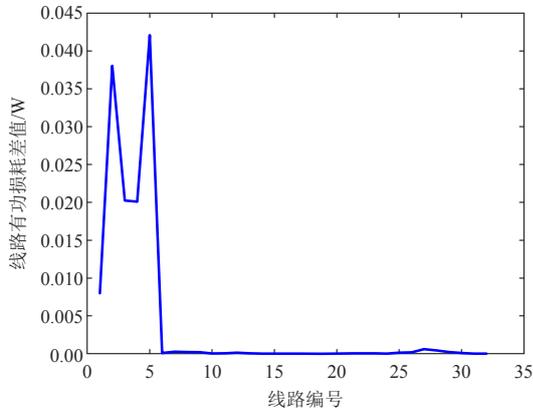


图 6 线路有功损耗差值

Fig. 6 Difference in active power loss of the line

式中 P_{ij}^{\max} 、 Q_{ij}^{\max} 代表支路上最大可传递的功率，当两节点间开关断开时，该两节点间的功率流动为 0。

④功率平衡约束。

$$P_t + \sum_{k=1}^{N_w} P_W^{k,t} - P_c^t + P_d^t = \sum_{i=1}^N P_{\text{load},i,t} \quad (14)$$

式中： N 为总的节点数； $P_{\text{load},i,t}$ 为节点 i 在 t 时刻的负荷量。

⑤风电功率约束。

$$0 \leq P_W^{k,t} \leq P_W^{k,t,\max} \quad (15)$$

式(15)表示风力发电机 t 时刻的实际出力不能超过当前时刻风力发电机预测出力的上限。

2.2 储能系统模型

本文所采用的储能系统模型如式(16)–(20)所示。

$$E_{\text{ess}}^t = E_{\text{ess}}^{t-1} + (P_c^{t-1} \eta_c - \frac{P_d^{t-1}}{\eta_d}) \Delta t \quad (16)$$

$$E_{\text{ess}}^{\min} \leq E_{\text{ess}}^t \leq E_{\text{ess}}^{\max} \quad (17)$$

$$0 \leq P_c^t \leq u_{c,t} P_{c,\max} \quad (18)$$

$$0 \leq P_d^t \leq u_{d,t} P_{d,\max} \quad (19)$$

$$u_{d,t} + u_{c,t} \leq 1 \quad (20)$$

式中： E_{ess}^t 为 t 时刻储能系统的电量； P_c^t 为 t 时刻储能系统的充电功率； P_d^t 为 t 时刻储能系统的放电功率； $P_{c,\max}$ 、 $P_{d,\max}$ 分别为储能系统的最大充放电功率； η_c 和 η_d 为充放电效率； $u_{d,t}$ 和 $u_{c,t}$ 为 0-1 变量，代表 t 时刻储能系统的充放电状态，当 $u_{c,t}$ 为 1 时，代表系统充电， $u_{d,t}$ 为 1 时，代表系统放电。储能系统在运行过程中，不能同时充放电，每一时刻只能处于充电、放电及静置中的一种状态，如式(20)所示，并且储能系统当前时刻的荷电状态由前一时刻的荷电状态决定，如式(16)所示。

2.3 电压波动指数模型

对于 2.1 节所建立的配电网运行模型，为了提升其安全运行的能力，本文引入了节点电压波动指数(voltage volatility index, VVI)模型，如式(21)–(23)所示^[27]：

$$V_{\text{VVI},i} = \sum_{u \in \text{DG}} (R_{iu} + X_{iu}) \quad (21)$$

$$R_{iu} = \begin{cases} \sum_{(k,l) \in \mathcal{H}_F^i} r_{kl}, & i = u \\ \sum_{(k,l) \in \mathcal{H}_F^i \cap \mathcal{H}_F^u} r_{kl}, & i \neq u \end{cases} \quad (22)$$

$$X_{iu} = \begin{cases} \sum_{(k,l) \in \mathcal{H}_F^i} x_{kl}, & i = u \\ \sum_{(k,l) \in \mathcal{H}_F^i \cap \mathcal{H}_F^u} x_{kl}, & i \neq u \end{cases} \quad (23)$$

式中： $V_{\text{VVI},i}$ 表示节点 i 的节点电压波动指数数值； \mathcal{H}_F^u 表示从节点 u 到变电站所包含的路径；节点 u 为可再生能源所接入的位置； r_{kl} 为节点 i 和节点 u 到变电站的公共路径中的线路电阻值； x_{kl} 为节点 i 和节点 u 到变电站的公共路径中的线路电抗值。当节点 i 的位置满足以下两个要求时，可再生能源对其节点电压影响较小：

- 1) 节点 i 的位置靠近变电站；
- 2) 可再生能源所接入的节点 u 与节点 i 返回到变电站的公共电气距离较短；

图 7(a)表示重构前 DG 的连接位置，DG 的高度波动性会直接影响到节点 i 和 j ，图 7(b)为重构后 DG 的连接位置，DG 直接与变电站相连，与周围节点无公共路径，DG 的波动对周围节点影响较小^[28]。

本文考虑限制 $V_{\text{VVI},i}$ 的上界，进而减少可再生能源接入对电压的影响，维护配电网安全运行：

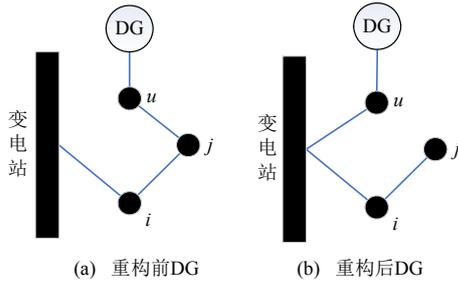


图7 重构前后 DG 接入位置

Fig. 7 Position of DG access after reconstruction

$$V_{VVI,i} \leq V_{VVI,max} \quad (24)$$

3 模型求解与分析

在配电网运行过程中线路损耗对线路潮流的影响不大可忽略不计,相应的近似如式(25)所示^[29]。

$$\begin{cases} r_{ij} \times I_{ij,t} \ll P_{ij,t} \\ x_{ij} \times I_{ij,t} \ll Q_{ij,t} \\ V_{i,t}^2 \approx 2 \times V_{j,t}^2 - 1 \end{cases} \quad (25)$$

因此式(7)—(11)可以简化为式(26)—(29),进而得到配电网的线性模型,加快求解速度。

$$P_{ij,t} = -P_{j,t} + \sum_{k \in ch(j)} P_{jk,t} \quad (26)$$

$$Q_{ij,t} = -Q_{j,t} + \sum_{k \in ch(j)} Q_{jk,t} \quad (27)$$

$$V_{i,t} - V_{j,t} = r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t} \quad (28)$$

$$\begin{cases} V_{i,t} - V_{j,t} \geq r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t} - M(1 - \alpha_{ij}) \\ V_{i,t} - V_{j,t} \leq r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t} + M(1 - \alpha_{ij}) \end{cases} \quad (29)$$

式(26)—(29)中相关变量含义同上文所述。综合以上模型,本文所提出的考虑储能系统寿命的配电网运行模型如下所示:

$$\begin{cases} \min(\sum_{t=1}^T a \max\{0, P_t\} \Delta t + \sum_{t=1}^T b \min\{0, P_t\} \Delta t + \\ \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{t=1}^T c_k P_W^{k,t} \Delta t + \sum_{k=1}^{N_w} \sum_{t=1}^T d_k (P_W^{k,t,max} - P_W^{k,t}) \Delta t) \\ \text{s.t.} \begin{cases} \text{式(3)-(5), (12)-(20)} \\ \text{式(24)} \\ \text{式(26), (27), (29)} \end{cases} \end{cases} \quad (30)$$

由于2.3节所提出的VVI模型与配电网的拓扑结构相关,因此本文将原模型分解为上下两层问题,采用Benders算法求解,如式(31)、(32)所示。

上层问题:

$$\begin{cases} \min F \\ \text{s.t.} \begin{cases} \text{式(3)-(5), (12)-(20)} \\ \text{式(26), (27), (29)} \end{cases} \end{cases} \quad (31)$$

下层问题:

$$\text{s.t. 式(24)} \quad (32)$$

综合上述分析,考虑储能寿命和重构的配电网运行优化调度方法如图8所示。

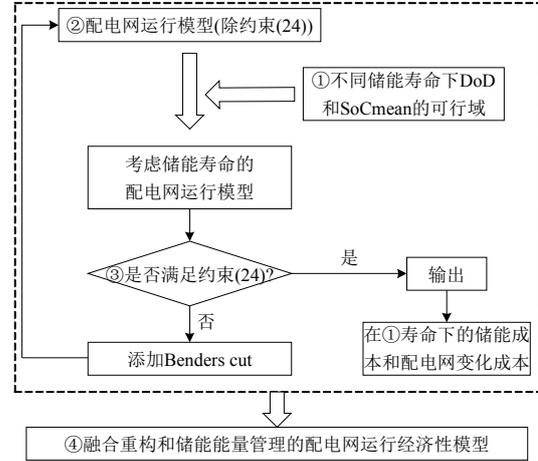


图8 考虑储能寿命和重构的配电网运行优化调度方法
Fig. 8 Distribution network optimal scheduling method considering energy storage lifetime and reconfiguration

其具体步骤如下: 1) 确定当前储能系统寿命所对应的健康运行域; 2) 在步骤的1)的条件下,求解除式(24)以外的优化模型,得到当前最优结果; 3) 根据步骤2)所得到的配电网拓扑结构,利用图论,找到 $V_{VVI,i}$ 最恶劣的节点,判断其是否满足约束(24); 4) 若满足,则输出步骤2)的优化结果,得到储能成本和配电网投入储能前后变化成本; 5) 若不满足,在步骤2)中添加限制VVI最恶劣路径的约束,以此循环,直到输出满足约束(24)的拓扑结构; 6) 通过以上流程,可得到融合储能能量管理和电压安全管理的配电网运行模型。

4 算例分析

4.1 算例系统描述

本文采用IEEE-33节点系统来验证所提方法的有效性和实用性。在原有IEEE-33系统的基础上,在节点编号为7、17及33处各加入一个风电厂,在节点编号为5和15处各加入一个储能,储能的容量为0.5 MW·h,充放电功率上限均为0.05 MW,充放电效率为0.95,节点电压幅值上下限分别设为1.05 pu和0.95 pu,变电站母线电压设为1 pu。根据文献[30]的参数设置,取电池的单价为2元/(W·h)。

本文中所有算例均在Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU @2.20 GHz、8GB RAM硬件环境下测试。目标函数中,取配网从主网购电的费用为

3 元/(kW·h)^[31]，配网向主网售电的费用为 0.3 元/(kW·h)^[32]，风力发电机的上网电价为 0.4 元/(kW·h)^[33]，弃风惩罚费用为 0.5 元/(kW·h)^[34]，基于 matlab2018a，利用商业软件 Gurobi 进行求解。图 9 为 IEEE-33 系统的原始拓扑结构。

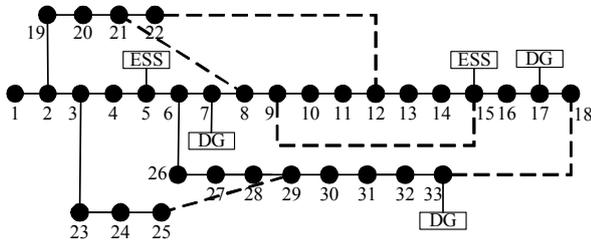


图 9 IEEE-33 原始拓扑结构

Fig. 9 IEEE-33 original topology

4.2 未计及重构含储能设备的配电网运行分析

设置储能的初始容量为 0.25 MW·h，为更好的循环利用储能，保证其在一个周期 T 内，初末容量相同。根据图 4 所获得的健康运行域，求解不同电池循环寿命下的储能成本，以及投入储能前后配电网运行的变化成本，二者关系如图 10 所示。

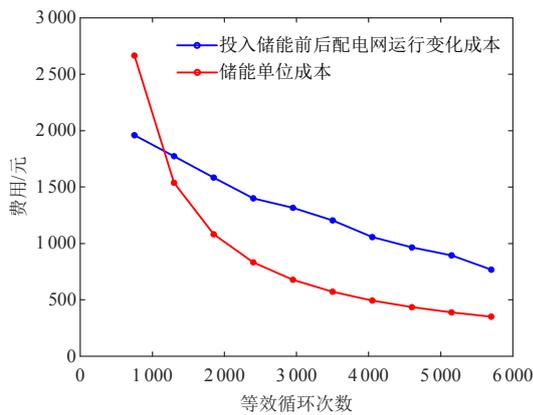


图 10 不同循环次数所对应的储能成本与投入储能前后配电网运行的成本变化图

Fig. 10 Cost of energy storage corresponding to different cycles and the change of distribution network cost

由图 10 可知，储能单位成本在循环次数小于 1200 次时高于投入储能所引起的配电网运行降低成本，即此时投入储能带来的收益不足以抵消其寿命损失成本。当循环次数高于 1200 次时，储能单位成本低于因投入储能带来的配电网成本变化，这时系统投入储能，将获得正经济效益。

为验证本文构建的储能寿命水平集的正确性以及非线性模型对于最优解的影响，将本文所采用的电池数据集按文献[35-36]的模型进行处理，并取储能电池 $E_{efc}=2950, 4050, 5700$ 次下的优化结果，以 5 节点电池为例，分别将优化后 SoC_{mean} 和

DoD_{max} 带入上述拟合模型和简化模型中，其结果如表 1 所示。

表 1 各类储能寿命模型的 EFC 结果

Table 1 EFC results of energy storage life models

$E_{efc}/次$	文献[35]	文献[35]泰勒	文献[36]	文献[36]分段
	拟合非线性模型/次	展开简化模型/次	拟合非线性模型/次	线性简化模型/次
2950	2927	4759	2967	2896
4050	3957	6623	4090	4154
5700	5743	7281	5800	5865

由表 1 可得，拟合模型得到的 EFC 与本文寿命水平集下的值相差不大，误差在 2% 左右，可见本文所提方法的合理性。而简化模型得到的 EFC 与对应的非线性拟合模型相比误差较大，对于非线性模型的简化，会造成精度的损失，对优化结果产生较大影响。

4.3 计及重构的含储能设备的配电网运行分析

为降低可再生能源的波动性对配电网节点电压的影响，保证配电网的安全运行，本文以限制 VVI 为目标。参照文献[27,37]，为将原始重构网络拓扑下的最大电压波动指数降低 15% 以上，本算例中 $V_{VVI,max}$ 取为 18.9，在电池循环次数约束为 750 次下运行，引入 VVI 前后的系统电压水平如图 11、12 所示。图 13、14 为引入 VVI 前后的 IEEE-33 系统拓扑结构图；图 15 为拓扑结构修正前后的各节点 $V_{VVI,i}$ 。

由图 15 可知，系统最大 VVI 由 22.2852 下降至 18.5569，减少了 16.72%，在可再生能源接入节点附近的节点电压波动指数均下降。引入 VVI 前后节点电压偏差均方根(root mean square, RMS)分别为 0.0164 和 0.0132 pu，与未考虑 VVI 相比，考虑后节点电压偏差 RMS 降低 19.5%，可见 VVI 能

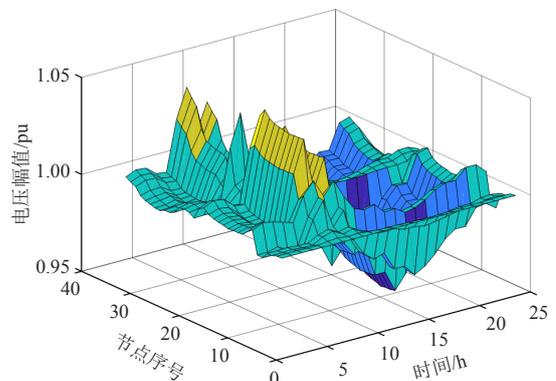


图 11 引入 VVI 前的系统电压图
Fig. 11 System voltage diagram before introduction of VVI

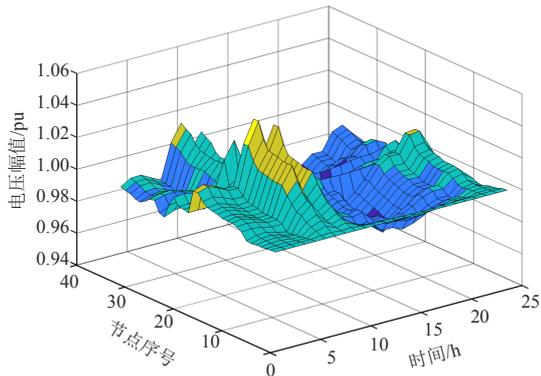


图 12 引入 VVI 后的系统电压图

Fig. 12 System voltage diagram after introduction of VVI

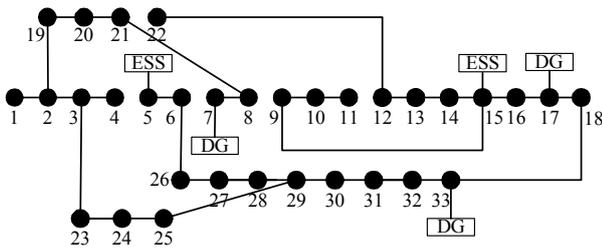


图 13 引入 VVI 前的系统拓扑结构图

Fig. 13 System topology before introduction of VVI

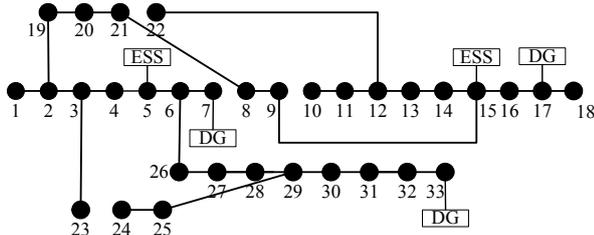


图 14 引入 VVI 后的系统拓扑结构图

Fig. 14 System topology after introduction of VVI

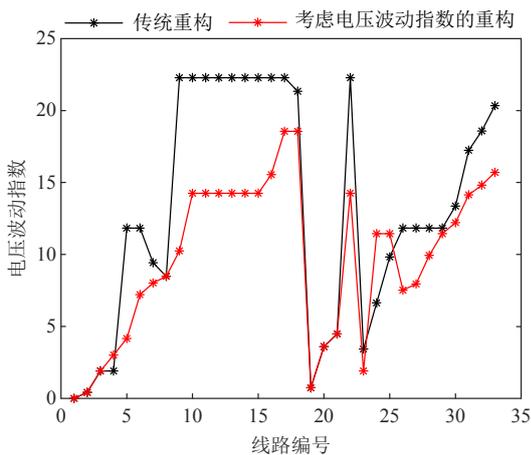


图 15 节点电压波动指数图

Fig. 15 Node voltage volatility index

有效限制可再生能源接入所引起的电压波动，有效提高配电网的安全运行能力。图 13、14 中展示引入 VVI 后降低了可再生能源接入节点与周围节点到变电站的公共电气距离。

引入重构后的配电网运行成本整体要低于不考虑重构的配电网运行成本，图 16 展示了考虑重构后对储能系统经济效益的影响，储能设备的初始容量为 0.25 MW·h。

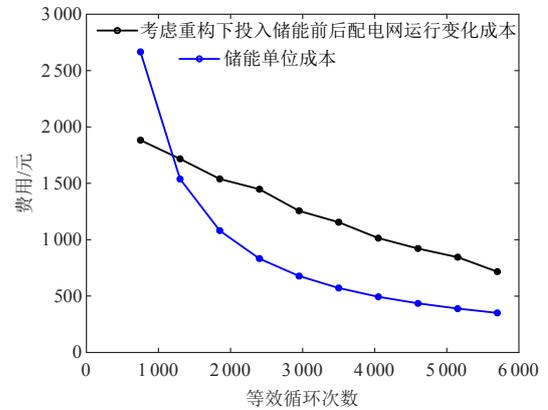


图 16 考虑重构下不同循环次数所对应的储能成本与投入储能前后配电网运行的成本变化图

Fig. 16 Cost of energy storage corresponding to different cycles and the change of distribution network cost under reconstruction

由图 16 可知，考虑重构后的配电网运行变化成本与储能单位成本同未考虑重构一样存在一个平衡点。

4.4 重构对储能设备寿命的影响

为探究重构对于储能寿命的影响，忽略储能健康运行域约束。本文比较了重构前后储能系统在配电网运行过程中的 SoC 变化如图 17 所示，两种情景下的 SoC_{mean} 以及 DoD_{max} 如表 2 所示。

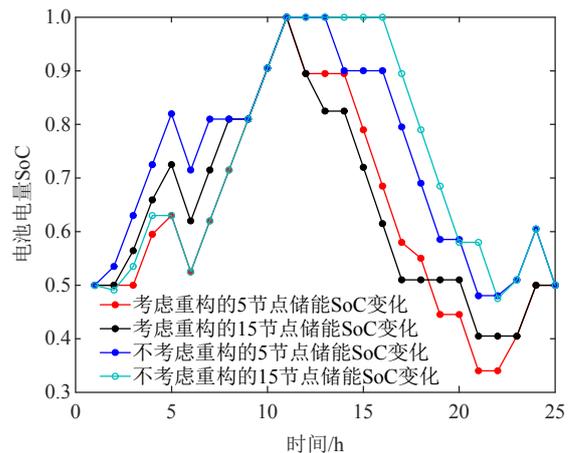


图 17 两种情景下的 SoC 变化图

Fig. 17 Comparison of SoC changes under two scenarios

由表 2 和图 17 可知，不计重构时，储能设备的 SoC_{mean} 均高于计及重构下的 SoC_{mean} ，图 18 为本文电池模型在 EFC 位于 460 次到 700 次区间的健康运行域模型。

图 18 中，A1 和 A2 分别代表未计及网络重构

表 2 引入重构前后储能系统 SoC_{mean} 以及 DoD_{max} 的比较

Table 2 Comparison of SoC_{mean} and DoD_{max} based on whether reconfiguration is considered

情景	$S_p/\%$	$D_d/\%$
不计重构(5 节点)	72.77	51.97
计及重构(5 节点)	62.27	65.97
不计重构(15 节点)	71.92	52.50
计及重构(15 节点)	63.77	59.50

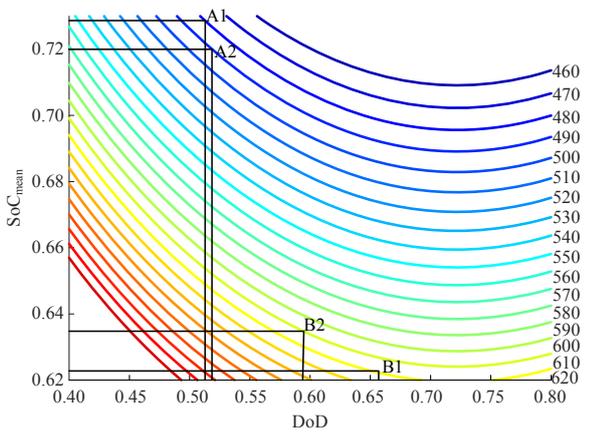


图 18 两种情境下的临界寿命曲线

Fig. 18 Critical life curve under two conditions

的 5 节点和 15 节点的储能状态，B1 和 B2 代表计及网络重构的 5 节点和 15 节点的储能状态，其中 5 节点储能系统在配电网考虑重构后的 EFC 要比不计及配电网重构的 EFC 多 140 次，15 节点储能系统在配电网考虑重构后的 EFC 要比不计及配电网重构的 EFC 多 120 次。

5 结论

随着储能技术的不断发展，储能在未来电力系统中将扮演更加重要的角色。针对可再生能源接入配电网带来的电压安全问题以及频繁充放引起的储能寿命损失问题，本文提出一种融合储能和网络重构的能量管理方法，IEEE-33 作为算例对所提方法进行验证，分析结果表明所提方法有效性，所得结论如下：

1) 储能单位成本曲线与投入储能前后配电网运行成本曲线在 EFC 等于 1200 次附近存在平衡点，EFC 高于该平衡点下投入储能具有经济性。

2) 考虑 VVI 可抑制配电网节点的电压波动，经计算得到，配电网 VVI 设为 18.9 后系统电压波动指数与节点电压偏差 RMS 分别减少 16.72%和 19.5%，有效提高了配电网运行的安全性。

3) 在计及配电网重构时投入储能可有效提高储能的运行寿命，与未计及重构相比，其 EFC 分别

增大 140 次和 120 次，代表不同灵活性资源间的协同会带来更高效益。

参考文献

- [1] YANG Jindong, LUO Junyuan, ZHANG Haitao. Fuzzy neural network based optimal and fair real power management for voltage security in distribution networks with high PV penetration[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2020, 15(6): 2471-2478.
- [2] 余昆, 唐修明, 陈星莺, 等. 高比例分布式光伏接入的配电网过电压责任分摊方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9535-9546.
YU Kun, TANG Xiuming, CHEN Xingying, et al. Allocation method of overvoltage responsibility in distribution network with high proportion distributed photovoltaic[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9535-9546(in Chinese).
- [3] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [4] ARUUL S, SANTHI R K. New reconfiguration method for improving voltage profile of distribution networks [J]. International Journal of Computer Applications, 2016, 135(7): 25-29.
- [5] 万苏磊. 分布式电源并网电压质量影响及优化方法研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
WAN Sulei. Research on voltage quality influence and optimizing method of distributed generation connected to grid[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019(in Chinese).
- [6] ARUN M, ARAVINDHABABU P. Fuzzy based reconfiguration algorithm for voltage stability enhancement of distribution systems[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(10): 6974-6978.
- [7] 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(in Chinese).
- [8] ZHANG Huizhi, DANG Weihong, JIA Rong, et al. Research on the economic optimization of an electric-gas integrated energy system considering energy storage life attenuation[J]. Applied Sciences, 2023, 13(2): 1080.

- [9] YI Tao, YE Handong, LI Qingxiu, et al. Energy storage capacity optimization of wind-energy storage hybrid power plant based on dynamic control strategy[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 55: 105372.
- [10] 李文英. 混合储能系统平抑风电场功率波动研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
LI Wenyong. Research on hybrid energy storage system to suppress the wind farm power fluctuations [D]. Changsha: Hunan University, 2015(in Chinese).
- [11] 田玉婷, 魏巍, 孙昕炜, 等. 考虑寿命衰减及电价机制的电池储能系统技术经济研究[J]. *四川电力技术*, 2022, 45(5): 1-5, 13.
TIAN Yuting, WEI Wei, SUN Xinwei, et al. Techno-economic analysis of battery energy storage system considering degradation and pricing mechanism [J]. *Sichuan Electric Power Technology*, 2022, 45(5): 1-5, 13(in Chinese).
- [12] 喻颖倩, 何川, 刘天琪, 等. 计及储能调频与寿命损耗的多套餐共享储能主从博弈分布鲁棒定价方法研究[J/OL]. *中国电机工程学报*, 2025[2025-01-03], <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231688>.
YU Yingqian, HE Chuan, LIU Tianqi, et al. Research on robust pricing method of shared energy storage multi-package master-slave game distributed robust considering energy storage frequency modulation and life loss[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 2025[2025-01-03], <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231688>. (in Chinese).
- [13] XU Bolun, OUDALOV A, ULBIG A, et al. Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(2): 1131-1140.
- [14] 栗然, 党磊, 周鸿鹤, 等. 基于费用效率法的风电场混合储能容量优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(24): 55-62.
LI Ran, DANG Lei, ZHOU Honghu, et al. Capacity optimization disposition of hybrid energy storage in wind field based on cost efficiency model[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(24): 55-62(in Chinese).
- [15] 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(in Chinese).
- [16] HAN S, HAN S, AKI H. A practical battery wear model for electric vehicle charging applications [J]. *Applied Energy*, 2014, 113: 1100-1108.
- [17] TAN Xiaoqi, QU Guannan, SUN Bo, et al. Optimal scheduling of battery charging station serving electric vehicles based on battery swapping[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(2): 1372-1384.
- [18] BLOOM I, COLE B W, SOHN J J, et al. An accelerated calendar and cycle life study of Li-ion cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2001, 101(2): 238-247.
- [19] 李相俊, 马锐, 王上行, 等. 考虑电池寿命的商业园区储能电站运行控制策略[J]. *高电压技术*, 2020, 46(1): 62-70.
LI Xiangjun, MA Rui, WANG Shanghang, et al. Operation control strategy for energy storage station after considering battery life in commercial park[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(1): 62-70(in Chinese).
- [20] 郑林烽, 缪源诚, 滕晓毕, 等. 考虑配储的火电机组灵活性改造模型与方法[J/OL]. *中国电机工程学报*, 2025[2025-01-03]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231566>.
ZHENG Linfeng, MIAO Yuancheng, TENG Xiaobi, et al. Model and method for flexible retrofit of thermal power units considering energy storage configuration [J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 2025[2025-01-03]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231566> (in Chinese).
- [21] MOHSENIAN-RAD H. Optimal bidding, scheduling, and deployment of battery systems in California day-ahead energy market[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(1): 442-453.
- [22] ABDELTAWAB H H, MOHAMED Y A R I. Mobile energy storage scheduling and operation in active distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(9): 6828-6840.
- [23] 方斯顿, 王鸿东, 张沈习, 等. 考虑蓄电池寿命损耗的最优船舶储能系统调度[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(23): 7566-7577.
FANG Sidun, WANG Hongdong, ZHANG Shenxi, et al. Optimal management of shipboard energy storage system considering battery lifetime degradation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(23): 7566-7577(in Chinese).
- [24] SAXENA S, HENDRICKS C, PECHT M. Cycle life testing and modeling of graphite/LiCoO₂ cells under different state of charge ranges[J]. *Journal of Power Sources*, 2016: 394-400.
- [25] TAYLOR J A, HOVER F S. Convex models of distribution system reconfiguration[J]. *IEEE Transactions*

- on Power Systems, 2012, 27(3): 1407-1413.
- [26] LAVORATO M, FRANCO J F, RIDER M J, et al. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 172-180.
- [27] SONG Yue, ZHENG Yu, LIU Tao, et al. A new formulation of distribution network reconfiguration for reducing the voltage volatility induced by distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(1): 496-507.
- [28] PARCHURE A, TYLER S J, PESKIN M A, et al. Investigating PV generation induced voltage volatility for customers sharing a distribution service transformer [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(1): 71-79.
- [29] GAN Lingwen, LOW S H. Convex relaxations and linear approximation for optimal power flow in multiphase radial networks[C]/2014 Power Systems Computation Conference. Wroclaw, Poland: IEEE, 2014: 1-9.
- [30] 墨柯, PILLOT C. 全球二次电池及锂离子电池市场研究分析[J]. 新材料产业, 2014(2): 37-43.
MO Ke, PILLOT C. Research and analysis of global secondary battery and lithium-ion battery market [J]. Advanced Materials Industry, 2014(2): 37-43(in Chinese).
- [31] 胡一伟. 中国电价水平高低之辩——基于电价调整后中外电价水平的比较[J]. 价格理论与实践, 2019(7): 69-72.
HU Yiwei. The debate on the level of China's electricity price—Comparison of Chinese and foreign electricity price levels after electricity price adjustment[J]. Price: Theory & Practice, 2019(7): 69-72(in Chinese).
- [32] 盛志军. 基于实时电价的主动配电网优化调度研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
SHENG Zhijun. Research on optimal scheduling of active distribution network based on real-time electricity price[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022(in Chinese).
- [33] 刘俊. 中国风电产业政策影响效应研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
LIU Jun. Research on the impact effect of China's wind power industry policy[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022(in Chinese).
- [34] 舒康安, 张昌, 艾小猛, 等. 基于分段电价的跨区风电消纳[J]. 电工技术学报, 2017, 32(S1): 39-49.
SHU Kang'an, ZHANG Chang, AI Xiaomeng, et al. Wind power accommodation based on block price [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1): 39-49(in Chinese).
- [35] FANG Sidun, GOU Bin, WANG Yu, et al. Optimal hierarchical management of shipboard multibattery energy storage system using a data-driven degradation model [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(4): 1306-1318.
- [36] FALLAHIFAR R, KALANTAR M. Optimal planning of lithium ion battery energy storage for microgrid applications: Considering capacity degradation[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 57: 106103.
- [37] 齐先军, 周沐聪, 张晶晶, 等. 高分辨率 DG 预测数据下基于节点拓扑相关度的配电网多目标重构[J]. 南方电网技术, 2021, 15(9): 16-23.
QI Xianjun, ZHOU Mucong, ZHANG Jingjing, et al. Multi-objective distribution network reconfiguration based on node topological correlation with high-resolution DG forecast data[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(9): 16-23(in Chinese).



方斯顿

在线出版日期: 2023-09-21。

收稿日期: 2023-04-27。

作者简介:

方斯顿(1991), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为综合能源系统、能源交通融合, fangston@cqu.edu.cn;

黄莘杰(1999), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为储能优化运行、配电网优化调度, hxj.cqu@foxmail.com;

孔赖强(1997), 男, 博士研究生, 主要研究方向为储能系统建模与多状态评估、光伏发电功率预测, konglaiqiang@163.com;

*通信作者: 牛涛(1992), 男, 博士, 特聘研究员, 主要研究方向为交直流混联大电网运行控制与优化, niutthu@qq.com;

陈冠宏(1994), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电网信息物理系统, 2313583813@sjtu.edu.cn.com;

廖瑞金(1963), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电气设备绝缘在线监测与故障诊断, rjliao@cqu.edu.cn。

(编辑 李泽荣, 李新洁)