

计及电压时序特性与储能循环寿命的电网侧储能配置

黄祎¹, 欧阳森¹, 辛曦¹, 吴晗², 张晋铭¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510640; 2. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广州 510630)

摘要: 针对配电网电压质量评价较粗糙、对电网侧储能提升系统电压质量缺乏考虑的问题, 提出一种兼顾配电网电压数据时序特性、线损以及运行经济性的电网侧储能优化配置方法。首先, 基于电压双向越限、波动特性与时序趋势 3 个维度建立了电压质量多属性综合评价指标体系。其次, 细化储能循环寿命计算方法, 进而提出计及线损和循环寿命的电网侧储能效益模型; 然后, 建立了储能优化配置双层模型, 上层最大化储能全寿命周期效益, 优化其功率及容量。以配储后网络电压质量综合评价价值最大与无功功率调节设备动作成本最小为目标, 建立储能下层运行策略优化模型; 最后设计算例验证了所提模型和方法的有效性。

关键词: 电压质量; 时序特性; 电网侧储能; 循环寿命; 优化配置

Configuration of Grid-Side Energy Storage Considering Voltage Timing Characteristics and Cycle Life

HUANG Yi¹, OUYANG Sen¹, XIN Xi¹, WU Han², ZHANG Jinming¹

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510630, China)

Abstract: Aiming at the problem of rough evaluation of voltage quality in distribution networks and the lack of consideration for improving system voltage quality and coordinating with reactive power compensation equipment through grid side energy storage, an optimized configuration method for grid-side energy storage is proposed that takes into account voltage timing characteristics, line loss, and operational economy of the distribution network. Firstly, the multi-attribute comprehensive evaluation index system of voltage quality is established based on the three dimensions of bidirectional voltage exceeding the limits, fluctuation characteristic and time series trend. Secondly, the calculation method of energy storage cycle life is refined, and then the energy storage benefit model of grid side is put forward considering line loss and cycle life. Then, a two-layer model of energy storage optimization configuration is established. The upper layer maximizes the life cycle benefit of energy storage and optimizes its power and capacity. Aiming at the maximum comprehensive evaluation value of network voltage quality and the minimum operation cost of reactive power regulation equipment after storage allocation, the optimization model of the operation strategy of the storage power layer is established. Finally, a numerical example is designed to verify the effectiveness of the proposed model and method.

Key words: voltage quality; timing characteristics; grid-side energy storage; cycle life; optimal configuration

0 引言

近年来在双碳政策激励下, 以新能源为主体的新型电力系统投入建设, 新能源快速发展^[1]。在大

规模分布式电源接入配电网背景下^[2], 交直流混合配电网在拓扑灵活性、潮流可控性、供电质量等方面优势显著^[3-4], 是我国配电网未来的发展趋势^[5]。负荷时序特性和分布式电源功率波动的矛盾使交直流配电网的电压质量面临巨大挑战^[6]。大规模储能系统凭借其灵活快速的功率调度能力, 在削峰填谷、平抑分布式电源功率波动以及改善电压质量等

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52177085)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52177085).

方面应用广泛^[7]。其中,电网侧储能的作用主要表现在延缓输电网建设投资^[8]、参与调峰^[9]及调频辅助服务市场^[10]、降低网损、改善电能质量等方面^[11-12]。

在配电网的电压质量评估研究方面,文献[13]基于现有国标规定评估体系,结合组合赋权法定权后进行电压去耦合处理得到综合评价;虽然考虑交直流耦合作用,但其电压质量指标仅沿用电压波动、电压偏差等侧重反映波动情况的指标。文献[14]采用全维聚合法对区域稳态电能质量数据降维,利用排序主曲线法求解评分值,获取各区域的稳态电能质量评估值;该流程可降低评估中主观因素的影响,但处理方法复杂且依赖于数据全面程度。文献[15]提出了一种综合反映配网电压稳定性和越限的电压质量在线评估指标,该指标可由配网相量测量单元数据直接计算。文献[16]考虑台区整体电压、节点电压越限、线损情况构建了台区电压特性评估指标体系,采用功效系数法统一化指标后由改进序关系法得到台区电压质量评估值。文献[15-16]计及了电压越限问题与波动特性,但未考虑电压监测数据发展趋势优劣,缺少对电压时序特性的分析评估。

电网侧储能在动态充放电过程中通过调整其输出的有功功率以及动态储能变流器输出的无功功率可实现对输配线路的电压调节,优化电压质量^[17]。但储能投资运维所需成本较高,需要兼顾网络电压优质性以及电网经济效益。

在储能改善网络电压质量、提高经济性的优化配置方面,国内外学者已开展大量研究。文献[18]提出的储能优化配置模型以降低线损、提高电压稳定性为目的。文献[19]采用改进粒子群法求解考虑电压和负荷波动的储能优化配置模型,以减小电压波动为优化目标,但未考虑系统的运行经济性。文献[20]提出以改善配网电压质量为主的储能优化配置模型,结合运行优化,提升系统电压质量且兼顾系统运行经济性。然而,上述文献根据经验值计算储能寿命,没有考虑储能循环寿命受放电深度、荷电状态等因素的综合影响。文献[21]提出了一种考虑多级配网运行效率提升价值的优化配置方法,计及储能充放电深度对储能寿命的影响,构建了电网侧储能双层优化配置模型。文献[22]考虑储能充放电过程的寿命损耗进而推导循环寿命测算的数学解

析式,提出储能配置运营的两阶段优化策略。

综上所述,目前综合考虑网络电压质量细化评价、电网侧储能投资效益与无功设备运行经济性的储能优化配置研究较少。故本文提出了一种兼顾配电网电压质量、线损和运行经济性的电网侧储能优化配置方法。首先,考虑网络电压双向越限、波动特性与时序趋势3个维度,构建了柔性配电网电压质量多属性综合评价指标体系;然后,在细化储能循环寿命计算方法基础上提出电网侧储能效益模型,进而建立储能优化配置双层模型:上层优化储能配置功率及容量,使储能全生命周期效益最大化;下层模型考虑网络电压质量综合评价与无功调节设备动作成本。最后,通过59节点柔性配电网算例分析电网侧储能优化配置方案验证了本文模型提升网络电压质量和储能经济效益的有效性。

1 电网电压质量多属性综合评价指标

为综合考量配电网电压质量情况,本节考虑电压双向越限、电压波动与时序趋势建立电压质量多属性综合评价指标体系:提出电压综合合格率指标考察电压双向越限情况;提出电压平均点线距与电压平均极差距反映电压波动特性;提出电压时序最优指数表征电压时序特性。进而得到电网电压质量多属性综合评价,为后续储能优化配置提供参考。

1.1 电压综合合格率

节点电压合格率指该节点在监测时段内电压数值合格的采样点数占总数之比,该指标可以有效反映电压数值落在合格区间的整体比例,侧面体现电压双向越限的情况。但各节点的负荷情况和重要程度各不相同,若仅以全体节点电压合格率均值为系统电压合格率,会忽略节点间的情况差异。故本文定义网络中第*i*个节点重要程度权重 r_i 为节点*i*的负荷量占网络总负荷的比例。结合节点重要程度权重加权计算,得到电压综合合格率如下。

$$r_i = E_i / \sum_{i=1}^N E_i \quad (1)$$

$$X_1 = \sum_{i=1}^N r_i \cdot \left(\frac{n_i}{n} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中: E_i 为第*i*个电压监测点的负荷量; N 为网络节点数量; n_i 为第*i*个电压监测点序列电压值合格数据数量; n 为监测时段内该序列数据数量。

1.2 电压波动特性指标

本文提出的电压波动特征指标旨在表征电压数据的波动走向与分散程度,包含集中趋势和离散波动两方面。电压集中趋势通过提取数据的代表值反映整体集中水平特征,表明电压值向某一中心值的趋向程度。电压离散波动则体现电压围绕中心值的分布特性,反映了电压数据点的分散程度。通过对数据离散波动的分析可进一步表征电压数据波动变化程度。故本文筛选设计电压平均值、电压平均点线距和电压平均极差距3个波动特性指标。

1) 电压平均值

算术平均值与所有电压数据密切相关且可靠性较高,表征了电压数据的整体集中质量水平。设第*i*条节点电压曲线的监测数据值序列为 $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}$,该组数据的平均值计算如下。

$$X_2 = \sum_{i=1}^N r_i \cdot (\sum_{j=1}^n x_{ij} / n) \quad (3)$$

式中 x_{ij} 为第*i*条节点电压曲线的第*j*个监测数据值。

2) 电压平均点线距

算术平均值是较为典型的集中趋势指标,但无法充分体现整体走向的波动状况,因此本文提出电压平均点线距指标。首先,计算电压数据的算术平均值,然后计算各数据点到均值线的距离,最终结合上述结果得到平均点线距。公式如下。

$$X_3 = \sum_{i=1}^N r_i \cdot (\sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 / n}) \quad (4)$$

式中 $\bar{x}_i$ 为第*i*个节点电压监测值序列的平均值。

3) 电压平均极差距

电压数据极差越大则整体离散程度越大,但实际运行中,电压数据存在极端异常值,极差易受其影响,难以准确反映数据离散波动状况。故提出电压平均极差距弥补该缺陷。分别提取占数据量10%的最大和最小的数据,根据式(5)计算。

$$X_4 = \sum_{i=1}^N r_i \cdot [\sum (x_{i\max_10\%} - x_{i\min_10\%}) / n_{10\%}] \quad (5)$$

式中: $x_{i\max_10\%}$ 和 $x_{i\min_10\%}$ 分别为节点*i*电压监测值序列中最大值、最小值前10%的数据序列; $n_{10\%}$ 为数据序列长度10%的值。

1.3 电压时序特征指标

网络电压数值在发生实时变化,在一定监测时间尺度下体现出电压水平的发展情况与规律。本文

提出的电压时序特征指标表征电压数据在一段时间内的总体变化规律与状态,蕴含了电压时序数据的趋势性、周期性等典型特征。

根据电网运行实际和电能质量相关导则规定,10 kV及以下的供电电压偏差不得超过网络标称电压的 $\pm 7\%$ ^[23]。当实际电压不等于标称电压,若下一阶段的电压值更接近1.0 p. u.,认为该阶段电压水平发展是向好的;反之,则认为是恶化趋差的。

1.3.1 基于改进线性表示的电压时序特征提取法

为科学评估电压数据水平的趋优程度,首先提取电压数据的时序特征,根据监测时段内的电压数据时序特征计算电压时序趋优指数。文献[24]采用改进分段线性表示方法(improved piecewise linear representation, IPLR)提取具有电压数据时序特征的关键点,在充分保留关键时序趋势特征的同时避免了曲线局部扰动点对整体趋势的影响。

传统PLR计算原始序列中相邻采样点数值的变化量,根据其是否超过阈值判断该点是否为具有典型时序特征的关键点;然后将筛选点顺次连接,得到原始序列降维后的曲线。但传统PLR法的关键点判断条件较宽松,仅根据相邻数据点变化量判断受局部扰动影响较大。IPLR法在相邻数据点变化量的基础上,针对采样数据点的间隔变化量增加约束,既能提高抗扰性,又减少了后续指标的运算量。

对于具有*m*个电压监测点的*n*维数据集 $U = [U_1, U_2, \dots, U_m]$,其中第*i*条电压数据序列 $U_i = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in}]$ 通过IPLR法进行关键点提取后的降维序列为 $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]$,对于第*i*个电压数据序列降维的具体实现流程如下。

1) S1: 提取原始数据序列 U_i 首末两端的数据点作为降维序列的首末端点,即 $u_{i1} = x_{i1}$, $u_{in} = x_{in}$;

2) S2: 计算相邻点差量阈值参数 λ_1 和 λ_2 和间隔点差量阈值参数 σ 和 ε 。通过 σ 可筛选间隔差量绝对值变化较大的关键点;通过 ε 进一步筛选前后间隔差量绝对值相近但数值较大的关键点。在数据集 U 中随机选取 $\sqrt{m}$ 条数据序列集,计算其相邻数据点和间隔数据点的平均变化量,进而计算上述4个参数如下。

$$\lambda_1 = \sum_{i=1}^{\sqrt{m}} \sum_{j=2}^{n-2} |k_1 + k_2| / [\sqrt{m} \times (n-2)] \quad (6)$$

$$\lambda_2 = \sum_{i=1}^{\sqrt{m}} \sum_{j=2}^{n-2} |k_1 - k_2| / [\sqrt{m} \times (n-2)] \quad (7)$$

$$\sigma = \sum_{i=1}^{\sqrt{m}} \sum_{j=2}^{n-2} ||k_3| - |k_4|| / [\sqrt{m} \times (n-2)] \quad (8)$$

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{\sqrt{m}} \sum_{j=2}^{n-2} |k_3 \times k_4| / [\sqrt{m} \times (n-2)] \quad (9)$$

3) S3: 计算数据点 j 的相邻差量 $k_1=x_{j+1}-x_j$ 、 $k_2=x_j-x_{j-1}$ 与间隔差量 $k_3=x_{j+2}-x_j$ 、 $k_4=x_{j+1}-x_{j-1}$, 其中 $2 \leq j \leq n-2$ 。

4) S4: 对于 u_{ij} , 判断是否有 $|k_1+k_2| > \lambda_1$ 或 $|k_1-k_2| > \lambda_2$; 若满足条件则进入S5, 否则 $j=j+1$ 并进入S6。

5) S5: 判断是否有 $||k_3| - |k_4|| > \sigma$ 或 $|k_3 k_4| > \varepsilon$; 若满足条件则提取该点后进入S6, 否则 $j=j+1$ 并进入S6。

6) S6: 当 $j=n-2$ 时输出降维后曲线; 否则进入S3。

以某电压监测点实测数值日曲线为例, 进行时序特征提取分析。该电压监测设备每 15 min 采集 1 个电压数据, 则一天共采集 96 个数据。IPLR 法提取电压曲线的时序特征结果如图 1 所示。降维曲线数据点数由 96 降至 48, 且大部分对整体时序趋势产生扰动的局部波动点被剔除。

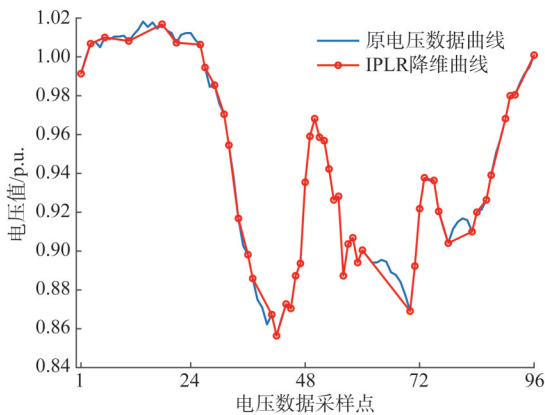


图 1 基于 IPLR 的电压数值日曲线时序特征提取示意图

Fig. 1 Schematic diagram for extracting sequential features of voltage data curves based on IPLR

1.3.2 电压时序趋优指数

根据 IPLR 法降维所得电压曲线可以较好地反映电压数据的时序特征, 在此基础上提出电压时序趋优指数对电压质量水平发展进行量化评价。对于 10 kV 网络, 定义优、良、差 3 个电压等级, 分别对应的电压数值(p. u.)区间为优: $0.97 \leq u \leq 1.03$;

良: $0.93 \leq u < 0.97$ 或 $1.03 < u \leq 1.07$; 差: $u < 0.93$ 或 $1.07 < u$ 。根据数据点趋优程度, 参考 5 分制为电压数据趋优程度赋分, 总体标准原则是电压数值趋近标准电压的程度越高, 变化趋势越明显, 则其获得的分数绝对值越大(趋优为正, 趋差为负)。具体设置量化评分见表 1。

表 1 电压数据时序趋势评分表

Tab. 1 Scoring table of voltage data time-series trend

相邻 u 值所属区间	u 的变化情况及判断	评分
u_t, u_{t+1} 均属于优区间	$ u_t - 1 > u_{t+1} - 1 $, 趋优	1
	$ u_t - 1 < u_{t+1} - 1 $, 趋差	-1
u_t, u_{t+1} 均属于良区间	$ u_t - 1 > u_{t+1} - 1 $, 趋优	2
	$ u_t - 1 < u_{t+1} - 1 $, 趋差	-2
u_t, u_{t+1} 均属于差区间	$ u_t - 1 > u_{t+1} - 1 $, 趋优	3
	$ u_t - 1 < u_{t+1} - 1 $, 趋差	-3
$u_t \in$ 差区间, $u_{t+1} \in$ 良区间	趋优	3
$u_t \in$ 良区间, $u_{t+1} \in$ 差区间	趋差	-3
$u_t \in$ 良区间, $u_{t+1} \in$ 优区间	趋优	4
$u_t \in$ 优区间, $u_{t+1} \in$ 良区间	趋差	-4
$u_t \in$ 差区间, $u_{t+1} \in$ 优区间	趋优	5
$u_t \in$ 优区间, $u_{t+1} \in$ 差区间	趋差	-5
u_t, u_{t+1} 同区间	$ u_t - 1 = u_{t+1} - 1 $, 不变	0

根据上表评价电压曲线的时序趋势, 计算曲线相邻数据点构成的趋势段得分, 取趋优总分平均值, 最后进行归一化处理至 $[0, 1]$ 区间以便后续评估计算, 即可得到该监测点的电压时序趋优指数。

$$X_s = \sum_{i=1}^N r_i \cdot \left(\sum_{j=1}^{n_{is}} \frac{s_{ij}}{n_{is}} \right) \quad (10)$$

式中: s_{ij} 为第 i 条降维节点电压曲线第 j 个趋势段的评分; n_{is} 为第 i 条降维后电压曲线的趋势段数量。

2 考虑电网线损和储能循环寿命周期的电网侧储能效益模型

储能系统的全寿命周期成本是指储能处于投资建设、运行维护和退役处置不同生命周期阶段的成本和, 通常包括初始投资和运维成本。现有储能配置研究大多将全寿命周期运维成本处理成固定年运维成本与年值转换式之积, 或采用固定储能单位容量运维成本系数, 按初始投资成本的比例近似估算。为细化考虑储能运行阶段的循环寿命损耗, 准确计算储能循环寿命周期运维成本, 本节基于循环寿命周期运维成本提出计及循环寿命损耗的储能全

寿命周期效益模型,后续将其纳入优化配置模型。

2.1 储能系统循环寿命周期运维成本

储能的循环寿命对网络运行维护有直接影响,进而影响成本;为细化储能成本及效益的考虑,将储能系统电池循环寿命作为储能配置及运行问题的约束优化求解,同时考虑循环寿命周期的运维成本。本节研究与循环寿命密切相关的电池放电深度及充放电次数等关键因素,首先根据雨流计数法确定储能循环放电深度,考虑日循环次数建立计算模型。

首先,根据表示储能充放电状态的二进制变量 x_t^{ch} ,引入包含两个相邻时段的二进制变量 y_t 作为储能荷电状态(state of charge, SOC)曲线上全体半循环的计数量,如式(11)所示。

$$y_t = (x_t^{\text{ch}} - x_{t-1}^{\text{ch}})^2 \quad (11)$$

当 $x_t^{\text{ch}}=1$ 时储能能在 t 时段为充电状态,否则为放电状态。

然后,计算在 y_t 维持不变的一个持续充电或放电状态内的积累电量 E_t^{acc} ,进而求得储能能在第 t 时段的放电深度 d_t ,计算公式如下。

$$E_t^{\text{acc}} = (1 - y_t)E_{t-1}^{\text{acc}} + (\eta_{\text{cha}} P_t^{\text{c}} + \eta_{\text{dis}}^{-1} P_t^{\text{d}}) \Delta t \quad (12)$$

$$d_t = E_t^{\text{acc}} / E_{\text{ESS}} \quad (13)$$

式中: P_t^{c} 和 P_t^{d} 分别为储能 t 时段的充放电功率; η_{cha} 、 η_{dis} 分别为充放电效率; E_{ESS} 为储能额定容量。

接着,将利用雨流计数法所测的储能放电深度与对应的循环次数的数据拟合,通常采用 N 阶函数法拟合储能循环次数 $l(d)$ 与其放电深度 d_t 的关系曲线,所得的三阶多项式关系式为:

$$l(d_t) = -2083 d_t^3 + 8750 d_t^2 - 13170 d_t + 11200 \quad (14)$$

为统计储能实际运行的不同放电深度对应的循环次数,需将 $l(d)$ 变更至 $d_t=100\%$ 的同一尺度,如式(15)所示。进而获得典型日的累计循环次数 l_{day}^{100} ,如式(16)所示。

$$l_t^{100} = l(d_t) d_t^{k_p} \quad (15)$$

$$l_{\text{day}}^{100} = \sum_{t=1}^T [l_t^{100} - (1 - y_t) l_{t-1}^{100}] \quad (16)$$

式中: l_t^{100} 为储能能在第 t 时段的放电深度 100% 时的等效循环次数; k_p 为拟合常数,取决于储能种类,可由厂家提供; T 为调度时段数量,取 24 h 。

最后,根据上式计算储能循环寿命 T^{cycle} 如式

(17)所示,循环寿命周期内的运维成本 f_{ope} 见式(18)。

$$T^{\text{cycle}} = L_{\text{max}}^{100} / l_{\text{day}}^{100} \quad (17)$$

$$f_{\text{ope}} = C_{\text{ope}} / T^{\text{cycle}} \quad (18)$$

式中: L_{max}^{100} 为储能能在 100% 放电深度时的充放电次数最大值; C_{ope} 为储能单次运维的总成本。

2.2 计及储能循环寿命的储能全寿命周期效益

1) 电网侧储能削峰填谷的效益

电网侧储能在电网中的一个重要应用场景即为电网移峰填谷。可充分利用储能因充放电特性而具备的电量的搬运能力缓解峰荷时段电网供电能力缺乏的问题。在分时电价机制下,电网侧储能在低电价的负荷谷期储能,在高电价的负荷峰期放电;在降低负荷峰谷差的同时利用分时电价差获得经济效益。储能全寿命周期的削峰填谷收益 E_{p1} 为:

$$E_{\text{p1}} = \sum_{i=1}^{T^{\text{cycle}}} \sum_{t=1}^{24} (\rho_{\text{e1}} P_{\text{ESS},t} + \rho_{\text{e2}} P_{\text{ESS},t} + \rho_{\text{e3}} P_{\text{ESS},t}) \Delta t \left(\frac{1 + i_r}{1 + d_r} \right)^i \quad (19)$$

式中: $P_{\text{ESS},t}$ 为 t 时刻储能输出有功功率; ρ_{e1} 、 ρ_{e2} 、 ρ_{e3} 分别为峰时、谷时和平时电价; Δt 为统计时间长度,本文取 1 h ; i_r 为通货膨胀率; d_r 为贴现率。

2) 延缓电网投资升级的效益

负荷增速过快时,配网中部分地区的变电站和线路会有过载风险。为保障系统运行的安全稳定,需对相应的变压器、线路等升级改造,但扩建升级的投入成本较高。电网侧储能的投入可以起到对地区负荷“削峰填谷”的作用,极大改善电网过载情况,延缓网络建设投资,由此带来的效益如下。

$$E_{\text{p2}} = \sum_{i=1}^L \rho_{\text{inf}} (P_{i,\text{max}} - P'_{i,\text{max}}) (1 - 1/e^{i_0 \Delta n}) \quad (20)$$

式中: L 为网络支路数量; ρ_{inf} 为输变电装置单位容量投资成本; $P_{i,\text{max}}$ 和 $P'_{i,\text{max}}$ 分别为接入储能系统前后流经第 i 条线路的最大功率; i_0 为预期收益率; Δn 为储能接入后电网升级可延缓年数,计算公式为:

$$\Delta n = \frac{\lg(1 + \gamma)}{\lg(1 + \lambda)} \quad (21)$$

式中: γ 为电网侧储能削峰率; λ 为负荷年增长率。

3) 减小系统线损的效益

电网侧储能“低充高发”可达到平滑日负荷曲线的效果。研究发现,在一定容量范围内储能接入产生的线损增量会低于其带来的线损减少量;考虑到

储能能在负荷高峰时期放电使线路电流大幅减小, 进而降低线损, 而且峰时电价较高; 故电网侧储能减小系统线损的收益较为可观, 表示如下。

$$E_{p3} = \sum_{i=1}^{T_{\text{cycle}}} \sum_{t=1}^{24} \rho (\Delta p^i - \Delta p^{i'}) \Delta t \left(\frac{1 + i_r}{1 + d_r} \right)^i \quad (22)$$

式中: ρ 为网损电价; Δp^i 和 $\Delta p^{i'}$ 分别为电网侧储能接入系统前后系统在 t 时刻的线损功率。

4) 储能系统初始投资成本

从储能系统的结构出发, 认为储能系统的初始投资成本由功率成本和容量成本构成, 表示为:

$$C_{\text{inv}, e} = c_{P, \text{ESS}} P_{\text{ESS}} + c_{E, \text{ESS}} E_{\text{ESS}} \quad (23)$$

式中: $c_{P, \text{ESS}}$ 与 $c_{E, \text{ESS}}$ 分别为储能单位功率成本和单位容量成本; P_{ESS} 与 E_{ESS} 分别为储能额定功率与额定容量。

5) 储能全寿命周期运维成本

根据 2.1 节的分析, 电网侧储能系统的全寿命周期运维成本如式(24)所示。

$$C_{\text{ope}, e} = C_{\text{ope}} / T^{\text{cycle}} = C_{\text{ope}} I_{\text{day}}^{100} / L_{\text{max}}^{100} \quad (24)$$

综上所述, 电网侧储能全寿命周期效益和成本主要包括了削峰填谷、延缓电网升级投资、减少系统网损的效益以及储能全寿命周期初始投资、运维成本; 电网侧储能全寿命周期效益模型构建如下。

$$E = E_{p1} + E_{p2} + E_{p3} - C_{\text{inv}, e} - C_{\text{ope}, e} \quad (25)$$

3 兼顾电压质量和线损的电网侧储能优化配置模型

本文提出的电网侧储能双层优化模型, 上层模型考虑储能全寿命周期效益与线损, 下层模型计及交直流互联配电网整体电压质量以及电压调节设备的动作成本。上层将储能的定容方案参数传递至下层, 下层则在上层规划优化方案的基础上求解得到储能的最优运行方案, 并返回至上层, 重复迭代循环过程, 最终得到电网侧储能优化配置方案。

3.1 上层规划模型

本文的分布式电源以分布式光伏为例, 储能系统的上层规划模型主要考虑其经济效益, 以计及电网线损和储能循环寿命的电网侧储能全寿命周期效益最大为目标, 优化电网侧储能配置。

3.1.1 目标函数

上层规划模型目标为追求系统经济效益最大化, 兼顾降低线损。2.2 节的分析中将线损值处理

成储能降损效益, 因此上层模型的目标函数为

$$\max f_{\text{up}} = E_{p1} + E_{p2} + E_{p3} - C_{\text{inv}, e} - C_{\text{ope}, e} \quad (26)$$

3.1.2 约束条件

1) 网络节点功率平衡约束

按照网络结构进行划分, 交直流互联配电网涉及的潮流约束主要在于交流侧、直流侧与电压源换流器(voltage source converter, VSC)侧。

(1) 交流潮流约束

$$\sum_{k \in \delta(j)} P_{jk, t}^{\text{AC}} - \sum_{i \in \pi(j)} (P_{ij, t}^{\text{AC}} - r_{ij} L_{ij, t}) = P_{j, t}^{\text{PV}} + P_{j, t}^{\text{cha}} - \quad (27)$$

$$P_{j, t}^{\text{dis}} - P_{j, t}^{\text{VSC, AC}} - P_{j, t}^{\text{L}}$$

$$\sum_{k \in \delta(j)} Q_{jk, t}^{\text{AC}} - \sum_{i \in \pi(j)} (Q_{ij, t}^{\text{AC}} - x_{ij} L_{ij, t}) = Q_{j, t}^{\text{cha}} + Q_{j, t}^{\text{CB}} - \quad (28)$$

$$Q_{j, t}^{\text{dis}} - Q_{j, t}^{\text{VSC, AC}} - Q_{j, t}^{\text{L}}$$

$$V_{j, t} = V_{i, t} - 2(P_{ij, t}^{\text{AC}} r_{ij} + Q_{ij, t}^{\text{AC}} x_{ij}) + L_{ij, t} (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \quad (29)$$

$$L_{ij, t} V_{j, t} = P_{ij, t}^2 + Q_{ij, t}^2 \quad (30)$$

式中: $P_{jk, t}^{\text{AC}}$ 、 $Q_{jk, t}^{\text{AC}}$ 分别为 t 时段通过支路 ij 的交流有功、无功功率; $P_{j, t}^{\text{PV}}$ 为 t 时段节点 j 处光伏电源的有功功率; $P_{j, t}^{\text{cha}}$ 、 $Q_{j, t}^{\text{cha}}$ 分别为 t 时段节点 j 处储能充电的有功、无功功率; $P_{j, t}^{\text{dis}}$ 、 $Q_{j, t}^{\text{dis}}$ 分别为 t 时段节点 j 处储能放电的有功、无功功率; $P_{j, t}^{\text{VSC, AC}}$ 、 $Q_{j, t}^{\text{VSC, AC}}$ 分别为 t 时段节点 j 处流经 VSC 的交流有功、无功功率; $P_{j, t}^{\text{L}}$ 、 $Q_{j, t}^{\text{L}}$ 分别为 t 时段在节点 j 处的负荷有功、无功功率; $Q_{j, t}^{\text{CB}}$ 为 t 时段在节点 j 处的无功补偿功率; $P_{ij, t}$ 、 $Q_{ij, t}$ 分别为 t 时段通过支路 ij 的有功、无功功率; $\delta(j)$ 为以 j 为首节点的支路的末节点集合; $\pi(j)$ 为以 j 为末节点的支路的首节点集合; r_{ij} 、 x_{ij} 分别为支路 ij 的阻抗; $L_{ij, t}$ 为 t 时段流经支路 ij 电流的平方值; $V_{j, t}$ 为 t 时段 j 节点电压的平方值。

(2) 直流潮流约束

$$\sum_{k \in \delta(j)} P_{jk, t}^{\text{DC}} - \sum_{i \in \pi(j)} (P_{ij, t}^{\text{DC}} - r_{ij} L_{ij, t}) = P_{j, t}^{\text{PV}} + \quad (31)$$

$$P_{j, t}^{\text{ESS}} - P_{j, t}^{\text{VSC, DC}} - P_{j, t}^{\text{L}}$$

$$U_{j, t} = U_{i, t} - I_{ij, t} r_{ij} \quad (32)$$

式中: $U_{j, t}$ 为 t 时段节点 j 的节点电压; $I_{ij, t}$ 为 t 时段流经支路 ij 的电流; 故 $V_{j, t} = U_{j, t}^2$ 、 $L_{ij, t} = I_{ij, t}^2$ 。

(3) VSC 潮流约束

为表述 VSC 所满足的潮流约束, 设 VSC 交流侧内部节点为 C , 等效电阻 r_c^{VSC} 和电抗 x_c^{VSC} 如图 2 所示。图中 $U_{i, t}^{\text{AC}}$ 与 $U_{j, t}^{\text{AC}}$ 分别为 VSC 交流侧节点 i 与直流侧节点 j 处电压, $P_{c, t}^{\text{VSC}}$ 为流经节点 C 处的有功功率。故 VSC 两侧交/直流电压和功率约束见式(33)–(34)。

$$U_{c,t}^{\text{VSC}} = K_{\text{VSC}} M_v U_{j,t}^{\text{DC}} \quad (33)$$

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\text{AC}} - L_{ic} r_c^{\text{VSC}} = P_{j,t}^{\text{DC}} \\ Q_{i,t}^{\text{AC}} - L_{ic} x_c^{\text{VSC}} = Q_{c,t}^{\text{VSC}} \end{cases} \quad (34)$$

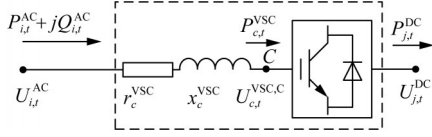


图2 VSC结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of VSC structure

式中: K_{VSC} 为 VSC 调制策略常数; M_v 为调制度; $U_{c,t}^{\text{VSC}}$ 为 t 时段 VSC 内部节点 C 处电压; $P_{i,t}^{\text{AC}}$ 、 $Q_{i,t}^{\text{AC}}$ 、 $P_{j,t}^{\text{DC}}$ 分别为 t 时段 VSC 交流/直流侧的传输功率。

(4) 有载调压变压器约束

同理, 设包含变压器的支路内部节点为 D , 由图3可得变压器两端电压关系如式(35)所示。

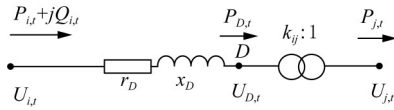


图3 OLTC结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of OLTC structure

$$\begin{cases} U_{D,t} = k_{ij} U_{j,t} \\ k_{ij} = k_{\text{base}} + T_{ij} \Delta k \end{cases} \quad (35)$$

式中: k_{ij} 为变压器变比; T_{ij} 为 k_{ij} 对应的优化调压档位, 为一整数变量; Δk 为分接头每档的步进量, 本文取 1%; k_{base} 为变压器基准变比, 取为 1。

2) 节点电压约束

大量光伏电源接入使网络电压具有一定概率特性, 故采用节点电压机会约束替代确定性约束:

$$\begin{cases} P(U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max}) \geq \delta \\ \Delta U_{\max} = \max(U_{i,\max} - U_{i,\min}) \leq \chi \end{cases} \quad (36)$$

式中: $U_{\max}$ 和 $U_{\min}$ 分别为网络电压上下限, 分别取 1.07 和 0.93(p.u.); δ 为置信水平; $U_{i,\max}$ 和 $U_{i,\min}$ 分别为 δ 下累积分布函数中对应概率值取得的节点 i 电压最大、最小值; χ 为节点电压波动范围限值。

3) 电网侧储能系统安装功率与容量约束

$$P_{\text{ESS},\min} \leq P_{\text{ESS}} \leq P_{\text{ESS},\max} \quad (37)$$

$$E_{\text{ESS},\min} \leq E_{\text{ESS}} \leq E_{\text{ESS},\max} \quad (38)$$

式中 $P_{\text{ESS},\max}$ 、 $P_{\text{ESS},\min}$ 和 $E_{\text{ESS},\max}$ 、 $E_{\text{ESS},\min}$ 分别为储能安装功率、容量的上、下限。

3.2 下层运行模型

经过上层模型优化储能额定功率、容量后, 进

一步优化运行策略。在中低压配电网中, 传统电压调节主要依赖变电站有载调压变压器 (on load tap changer, OLTC) 变换抽头档位和无功补偿两种手段, 忽略了储能对网络电压调节、支撑的作用。因此下层模型中考虑电网侧储能与 OLTC 和电容器组的协调配合, 优化储能充放电策略。

3.2.1 目标函数

下层运行模型的目标是保证电压优质性, 体现为电压质量综合指标值最优。同时, 考虑到运行阶段电网侧储能充放电功率与无功控制设备动作的协调配合, 下层目标函数应涵盖以下两个方面。

1) 网络电压质量综合评价

$$f_1 = \omega_1 X_1 + \omega_2 X_2 + \omega_3 X_3 + \omega_4 X_4 + \omega_5 X_5 \quad (39)$$

式中: X_1 — X_5 为归一化处理后的电压质量综合评价指标值; ω_1 — ω_5 分别为 X_1 — X_5 的权重值, 且有 $\sum \omega_i = 1$ 。

2) 无功调节设备动作代价归一化成本

为降低电容器组、OLTC 分接头日内频繁动作对设备寿命的影响, 需要限制其日动作次数; 从经济性角度约束 OLTC 分接头、电容器组的动作频次, 将设备日动作次数转化成设备调节代价成本 C_{equ} 。

$$C_{\text{equ}} = \sum_{i=1}^{24} \sum_{t=1}^m \alpha_1 |Q_{ci,t+1} - Q_{ci,t}| + \alpha_2 |T_{t+1} - T_t| \quad (40)$$

$$f_2 = \frac{C_{\text{equ}}}{C_{\max}} \quad (41)$$

式中: α_1 为无功设备单位容量调节代价; α_2 为 OLTC 分接头单次调节代价; $Q_{ci,t}$ 、 $Q_{ci,t+1}$ 和 T_t 、 T_{t+1} 分别为 t 、 $t+1$ 时段第 i 个电容器组的无功补偿容量与 OLTC 分接头位置; m 为电容器数量; f_2 为无功调节设备动作代价归一化成本; $C_{\max}$ 为最大成本值。

因此下层模型的目标函数可总结为

$$\max f_{\text{down}} = f_1 + \frac{1}{f_2} \quad (42)$$

3.2.2 约束条件

1) 储能系统充放电约束

$$-P_{\text{ESS}} \leq P_{\text{ESS},t} \leq P_{\text{ESS}} \quad (43)$$

2) 储能系统荷电状态(SOC)约束

$$S_{\text{soc},\min} \leq S_{\text{soc}}(t) \leq S_{\text{soc},\max} \quad (44)$$

$$S_{\text{soc}}(1) = S_{\text{soc}}(24) = 50\% S_{\text{soc},\max} \quad (45)$$

式中: $S_{\text{soc},\max}$ 和 $S_{\text{soc},\min}$ 分别为 ESS 荷电状态上下限; $S_{\text{soc}}(t)$ 为 t 时刻的荷电状态值; $S_{\text{soc}}(1)$ 和 $S_{\text{soc}}(24)$ 分

别为始末时刻的荷电状态值。

3) 储能系统充放电状态转换约束

$$\begin{cases} S_{\text{soc}}(t) = S_{\text{soc}}(t-1) + \eta_{\text{cha}} P_{\text{ESS},t} \Delta t / E_{\text{ESS}}, P_{\text{ESS},t} > 0 \\ S_{\text{soc}}(t) = S_{\text{soc}}(t-1) + P_{\text{ESS},t} \Delta t / E_{\text{ESS}} \eta_{\text{dis}}, P_{\text{ESS},t} < 0 \end{cases} \quad (46)$$

式中 ESS 不得同时充电和放电：放电时 $P_{\text{ESS},t}$ 为负，充电时 $P_{\text{ESS},t}$ 为正。

4) 储能系统循环寿命约束

根据 2.1 节，储能循环寿命约束如式 (11) — (17)。

5) 无功调节设备出力约束

$$Q_{ci,\min} \leq Q_{ci,t} \leq Q_{ci,\max} \quad (47)$$

$$T_{\min} \leq T_t \leq T_{\max} \quad (48)$$

式中 $Q_{ci,\max}$ 、 $Q_{ci,\min}$ 和 $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 分别为节点 i 处无功补偿设备容量和 OLTC 分接头位置的上下限。

4 模型优化流程

本文所提的储能优化配置模型是非线性、混合整数问题。上层模型中的决策变量均为连续变量，包括额定容量 E_{ESS} 、额定功率 P_{ESS} 。下层模型决策变量包含连续变量和整数变量：储能各时段的有功/无功功率、电容器组组数以及 OLTC 分接头位置。为求解上述混合非线性问题，本文基于 MATLAB 调用 GUROBI 求解器优化。通过上层优化配置所得的储能额定容量、功率输入下层优化运行模型，得到日内使网络综合电压质量最优以及无功设备动作成本最低的储能充放电策略，再将结果返至上层计算相关目标函数。具体优化具体流程见图 4 所示。

5 算例分析

为验证本文建立的电网侧储能优化配置模型的合理性，采用基于 IEEE-33 节点改造的 59 节点交流直流互联配电网算例系统进行分析。

5.1 算例数据说明

本文 59 节点交直流互联配电网拓扑如图 5 所示。基准电压为 12.66 kV，基准容量为 100 MVA，最高供电负荷为 (9.34+j2.03) MVA。参考配网实际建设情况，在节点 14、18 和 22 各配置 1 个额定功率 0.2 MW 的分布式光伏。基于广州市花都区某地年光照强度与供电负荷历史数据，得到典型日光

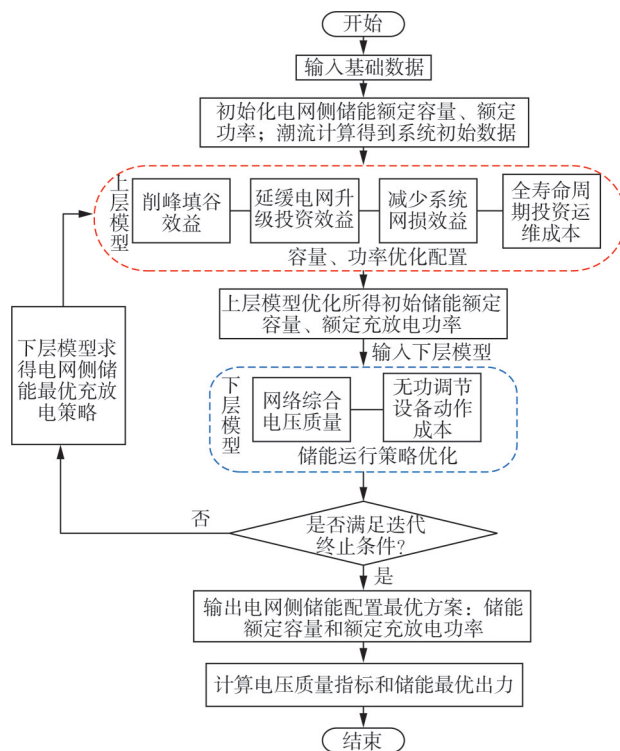


图 4 储能双层优化模型求解流程图

Fig. 4 Flow chart of solving the dual layer optimization configuration model of energy storage system

伏出力与负荷曲线如图 6 所示。储能装置的成本、运行效率及其他参数取值参考文献[7]，具体如表 2 所示。

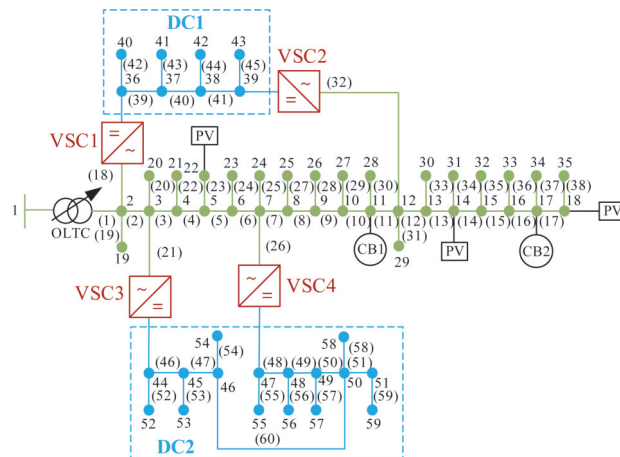


图 5 算例拓扑图

Fig. 5 Example topology diagram

用电高峰时段为 11—13 时、18—20 时，低谷时段为 0—7 时，平时段为 8—10 时、14—17 时、21—23 时。位于节点 1 的电网侧储能的最大允许安装功率为 5 MW，采用上述模型分析储能优化配置与

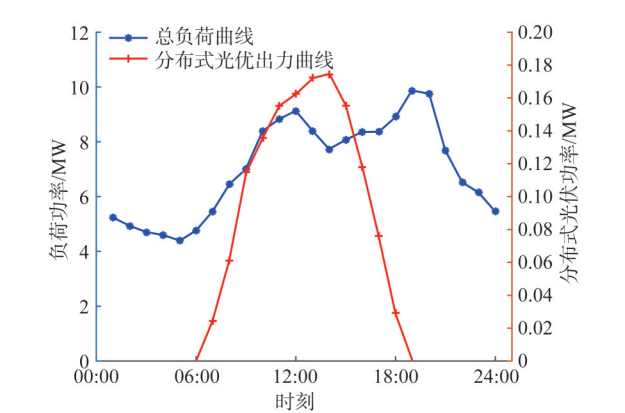


图6 负荷和分布式光伏出力曲线图

Fig. 6 Load and distributed photovoltaic output curves

表 2 系统配置相关参数	
Tab. 2 Parameters related to system configuration	
参数	取值
储能单位功率成本 $c_{p,ESS}/(\text{万元} \cdot \text{MW}^{-1})$	60
储能单位容量成本 $c_{e,ESS}/[\text{万元} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}]$	127
系统单位容量扩建成本 $\rho_{inf}/(\text{万元} \cdot \text{MW}^{-1})$	200
储能荷电状态限值/充放电效率 η	$[0.1, 0.9]/0.9$
预期收益率 $i_0/\%$	6.0
负荷增长率 $\lambda/\%$	1.5
网损电价 $\rho/[\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.6
峰/谷/平时电价 $\rho_{e1} \rho_{e2} \rho_{e3}/[\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$	0.8/0.4/0.6
OLTC分接头单次调节代价 $\alpha_1/(\text{kW}/\text{次})$	3
电容器单位容量调节代价 $\alpha_2/(\text{kW}/\text{次})$	2
OLTC变比/分接头档位数量	0.95~1.05(每档1%)/11
电容器组单组补偿功率/kvar	50
电容器组最大补偿组数	6
VSC调制策略常数 K_{VSC}	0.8

系统电压质量情况。

5.2 算例结果分析

为验证模型在降损和改善电压质量方面的优越性,基于上述参数值,设置以下3种场景比较分析。

- 1) 场景1: 接入光伏但不接入储能,仅通过OLTC和电容器组动作调节网络电压、改善线损;
- 2) 场景2: 接入光伏和储能,不考虑下层优化模型的储能运行策略,只根据网络负荷特性曲线,令储能在固定时段恒功率充放电;
- 3) 场景3: 接入光伏和储能,并采用本文储能双层优化配置模型,考虑储能循环寿命衰减以及无功补偿设备动作配合。

5.2.1 电网侧储能优化结果

在场景1中优化OLTC分接头位置与电容器组的动作策略,得到系统线损值与电压质量综合评价指标值;场景2、3对应的储能配置结果如表3所示;各场景线损值与电压质量综合评价指标值见表4。

表 3 场景2—3中的储能优化配置结果

Tab. 3 Energy storage system optimization configuration results in scenarios 2—3

序号	名称	场景2	场景3
1	额定功率/MW	2.481	3.896
2	额定容量/MWh	5.278	10.020
3	削峰填谷效益/万元	140.049 6	420.559 6
4	延缓电网投资升级效益/万元	488.632 5	905.227 9
5	减小系统线损效益/万元	453.872 7	524.457 7
6	储能投资运维成本/万元	944.498 4	1 736.763 9
7	储能全寿命周期效益/万元	87.956 4	113.481 3
8	循环寿命/d	3 852	2 647

表 4 各场景中系统线损与电压质量综合评价指标值

Tab. 4 System line loss and comprehensive evaluation index values of voltage quality in various scenarios

场景	线损 /MW	电压质量多属性综合评价指标				
		电压综合 合格率/%	电压平均 值/p. u.	电压平均 点线距	电压平均 极差距	电压趋优 指数
0	0.658 9	70.83	0.968 9	0.367 9	0.252 8	0.451 0
1	0.495 5	86.94	0.979 1	0.343 7	0.252 8	0.478 6
2	0.303 8	97.42	0.989 6	0.308 3	0.210 7	0.516 3
3	0.190 8	100	1.014 0	0.288 1	0.198 3	0.504 3

注:场景0指未优化时的情况。

在该算例系统中,场景2对应的储能优化配置结果为2.481 MW/5.278 MWh,其全寿命周期效益为87.956 4万元;场景3下配置的储能系统规模为3.896 MW/10.020 MWh,对应的全寿命周期效益为113.481 3万元。针对不同场景的经济效益、网络电压质量以及线损等情况进一步分析。

5.2.2 考虑储能运行策略与循环寿命的配置分析

本节根据前述场景优化结果,分析储能配置中运行策略与循环寿命衰减对优化配置结果的影响。

1) 线损情况

在线损方面,由表4中的数据可知在未经优化时系统的线损值达到0.658 9 MW;在场景1—3下,系统线损值分别下降了24.8%、53.89%和

71.04%。

场景 1 中只依靠少数节点的传统无功优化设备, 光伏电源无法提供足够的有功功率支撑, 在系统负荷高峰期的作用较小, 传统无功调节装置的整体降损效果有限; 场景 2、3 由于接入了储能装置, 其线损改善效果相比场景 1 有较高提升; 而本文模型优化的场景 3 因为考虑了储能实时功率优化出力, 故在负荷波动平抑方面表现更优, 降损效果更显著。故 3 种场景的优化策略均能降低系统线损值, 本文储能优化配置策略对应的降损效果最优。

2) 储能经济效益与循环寿命

在经济效益方面, 根据表 3 数据, 不考虑储能循环寿命衰减与运行策略所得储能效益均不同程度低于本文储能配置运行策略的各项效益, 储能投资和运维成本之和为场景 2>场景 3, 故最终储能全寿命周期效益为本文储能配置方案最高。

其中, 两种场景的削峰填谷效益的相对差距最大, 场景 3 的削峰填谷效益约为场景 2 的三倍。场景 2 中配置的储能仅根据分时电价定价导向与负荷峰谷大致分布情况, 按照固定的功率在特定时段充放电, 未根据实际负荷特性情况制定充放电策略;

场景 3 在储能下层运行优化模型中考虑了负荷实时变化, 设置下层运行约束优化储能充放电策略, 因此其削峰填谷作用远大于场景 2。

在延缓电网投资升级和降损方面, 由于场景 3 的储能额定功率/容量均大于场景 2, 在峰荷期可调用的储能功率更大, 对峰时配网传输功率降低程度也更大, 故延缓电网建设投资效益较高; 由前述分析, 场景 3 降损效果最显著, 故相应效益也最高。

分析储能初始投资与全寿命周期运维成本可得, 储能初始投资成本随配置额定功率/容量增加而增加; 故场景 3 的储能投资成本高于场景 2。而储能全寿命周期运维成本与循环寿命成反比, 且场景 3 的 T^{cycle} 小于场景 2, 故总体投资运维成本也更高。

另外, 储能循环寿命结果显示场景 2 的 $T^{\text{cycle}}=3\ 852\text{ d}$, 高于场景 3 的 $2\ 647\text{ d}$ 。这是因为场景 2 中储能采用固定时段恒功率充放电模式, 该模式下储能放电深度和充放电转换次数是固定的; 而场景 3 考虑负荷、电压调节的储能运行策略, 实际充放电状态转换更频繁, 放电深度变化也受负荷影响, 故寿命衰减程度更高。由此可知, 本文构建的 T^{cycle} 测

算模型更能真实准确地反映储能实际运行情况。

3) 储能削峰填谷效果

场景 2、3 配储后的负荷特性曲线见图 7。

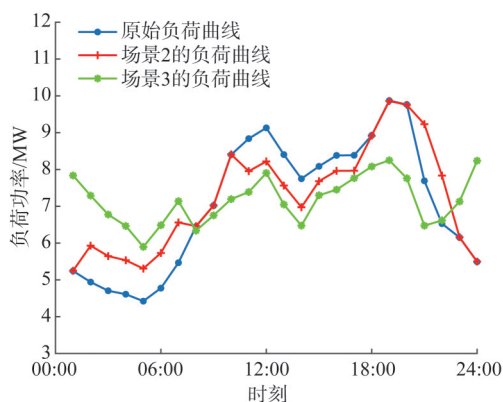


图 7 不同场景中的负荷特性曲线

Fig. 7 Load characteristic curves in different scenarios

由图 7 可知: 在负荷低谷 0—7 时段, 场景 3 考虑实时运行功率优化时储能吸收的电高于场景 2; 在平时段 8—10 光储共同作用使负荷与初始相比降低; 在负荷高峰 11—13、18—20 时段, 场景 3 的负荷曲线值与原负荷和场景 2 相比大幅下降。计算得原始负荷曲线波动率为 24.73%; 场景 2 优化后的负荷曲线波动率为 19.38%, 削峰率为 10.01%; 场景 3 对应的负荷波动率则为 9.85%, 削峰率为 16.42%。综上, 场景 3 在移峰填谷和平抑负荷波动方面比场景 2 的效果更佳, 体现了双层优化模型考虑储能功率实时优化在削峰填谷与降损等方面的优越性。

另外, 场景 3 中储能日内充放电功率与 SOC 情况如图 8 所示。

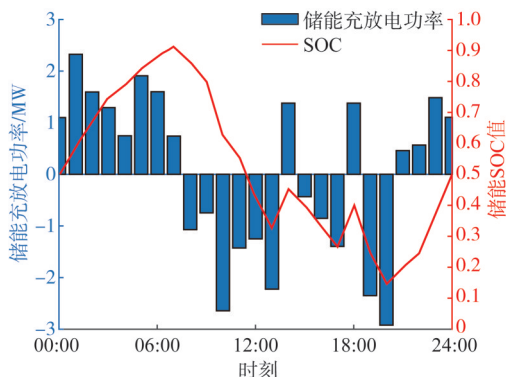


图 8 场景 3 中储能系统的充放电功率与 SOC 值情况

Fig. 8 Charging and discharging power and SOC values of the energy storage system in scenario 3

储能在谷时段0—8和平时段21—23充电, SOC随之递增;在负荷较重、电价较高的峰时段10—19时以放电为主, SOC趋于减小, 储能通过注入有功功率对负荷削峰填谷, 同时调节系统电压, 达到降低无功补偿装置动作频率的效果。储能SOC变化范围保持在 $[0.1, 0.9]$ 以避免过充/过放现象, 减少了储能循环寿命衰减。

5.2.3 电网侧储能改善网络电压质量情况分析

本节分析电网侧储能在网络电压质量调节方面的作用与影响, 关注电压质量多属性综合评价指标变化与无功补偿装置动作情况。

1) 系统电压质量多属性综合评价指标

场景1—3下高峰负荷时刻的系统交流侧、直流侧节点电压幅值曲线分别如图9—10所示。

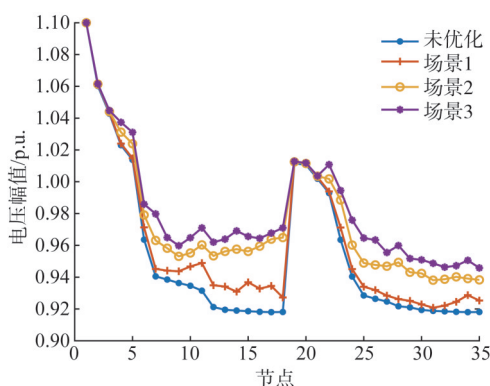


图9 各场景中交流侧节点电压幅值情况

Fig. 9 Voltage amplitude of AC-side nodes

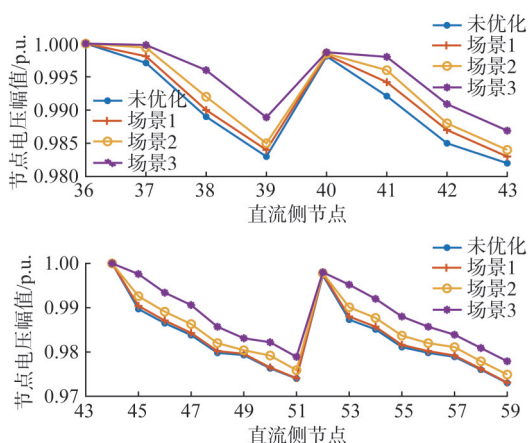


图10 各场景中直流侧节点电压幅值情况

Fig. 10 Voltage amplitude of DC-side nodes

根据图9—10, 在优化前负荷高峰时段的线路供电能力较弱, 系统整体的节点电压偏差大, 使电压质量下降; 而直流侧节点的电压幅值一直保持良

好水平, 电压偏差程度低。在场景1—3的策略下, 交流/直流侧节点的电压幅值与初始相比都得到不同程度的提升调整。直观上来看, 系统电压整体提升效果为场景3>场景2>场景1。未优化时, 系统节点电压偏差最高达12.46%; 场景1电压偏差最高为10.41%, 场景2策略进一步改善系统电压质量, 最高电压偏差为8.08%; 场景3中该值则降至6.13%。

以下具体分析表4电压质量综合评价指标。

(1) 在电压综合合格率方面, 未优化时系统整体电压合格率仅为70.83%。无功补偿装置以及电网侧储能的接入, 均能改善系统电压偏低的问题, 但调节效果存在差异: 场景1中少数光伏电源提供有功功率, 通过接入无功补偿装置虽能提升系统整体电压幅值, 但仍有不合格节点存在; 场景2的电压调节效果进一步加强, 对应系统电压综合合格率为97.4%; 场景3可达100%, 效果最优。

(2) 电压波动特性方面, 未优化时系统电压平均值为0.968 9, 场景1—3的策略分别将电压平均值提高了1.05%、2.14%和4.65%。未优化时电压平均点线距值为0.369 7, 场景1—3中电压平均点线距依次减小; 该结果表明场景1—3电压分布的集中程度递增, 同时由于场景1—3中电压均值依次增大, 其节点电压趋近的数字亦不断提升。

最后, 场景1中电压平均极差值与未优化时均为0.252 8, 说明接入无功功率优化装置主要改善接入点及其临近区域节点电压幅值, 对于电压极值节点不一定能起到调节作用。同时, 场景3该指标值低于场景2, 同样表明场景3中系统节点电压的集中趋势更为显著、电压波动程度低于前述场景。

(3) 电压时序趋势方面, 几类场景电压趋优指数大小排序为: 场景2>场景3>场景1>未优化场景, 即场景2中整体节点电压发展趋于额定电压的程度最高, 场景3次之。场景2电压趋优指数值0.516 3略高于场景3的0.504 3, 两种场景节点电压幅值数据趋近额定电压的趋优水平近似, 均高于其余场景。

2) 无功补偿设备动作情况

本文构建的双层优化配置模型在下层运行考虑了无功补偿设备的动作情况, 对比分析场景1、3种OLTC分接头和电容器动作方案见表5。

由表5可知, 场景1中OLTC分接头经过3次档位切换, 场景3中由于储能与无功补偿设备动作的协同配合, OLTC分接头挡位基本保持稳定, 在1

表5 场景1、3中主变分接头与电容器组的动作情况

Tab. 5 Action of the transformer tap and capacitor bank in scenarios 1 and 3

时刻	OLTC档位		CB1投入组数		CB2投入组数	
	场景1	场景3	场景1	场景3	场景1	场景3
1	6	7	4	3	3	2
2	6	7	4	3	2	2
3	6	7	3	3	2	2
4	6	7	3	3	3	2
5	6	7	3	3	3	2
6	6	7	3	3	3	3
7	6	7	3	3	3	3
8	6	7	4	3	3	3
9	6	7	4	3	3	3
10	6	7	4	3	3	3
11	8	9	4	3	3	3
12	8	9	4	3	3	3
13	8	9	4	3	4	3
14	8	9	4	3	4	3
15	8	9	4	3	4	3
16	8	9	4	3	4	3
17	9	9	5	4	3	3
18	9	9	5	4	3	3
19	9	9	5	4	3	3
20	8	9	5	4	3	3
21	8	9	5	4	3	3
22	8	9	5	4	3	3
23	8	9	5	4	3	3
24	8	9	5	4	3	3

—10时保持在+7档，仅在11时切换为+9档并持续至24时，减少了OLTC开关寿命折损。场景1中CB1、CB2日动作次数分别为4次、5次。场景3中CB1和CB2均只动作1次：CB1在1—16时保持为3组，在17时增加至4组持续到24时；CB2在1—5时保持为2组，在6—24时保持为3组。

储能能在削峰填谷、调节电压的同时，降低了无功补偿装置的动作频次。若仅考虑传统无功设备调节，则只有增加设备动作次数，才能较好地应对分布式电源波动和负荷等需求。故本文模型可有效降低无功补偿装置动作次数，延缓设备寿命衰减。

6 结论

本文兼顾交直流混合配电网运行电压质量与储能经济效益，建立了上层以储能全生命周期效益最

大化为目标、下层以电网电压质量综合评价价值最大化和无功优化设备动作成本最小化为目标的电网侧储能双层优化配置模型，得到结论如下。

1) 建立了涵盖电压越限、波动特性与时序趋势3个维度的配网电压质量多属性综合评价指标体系，算例验证了评价结果的有效性和合理性。

2) 提出了储能循环寿命测算模型，该模型计算结果可以更准确地反映储能的实际运行情况。进而提出了计及线损和储能循环寿命周期的电网侧储能效益模型，该模型从电网侧储能的效益与成本角度考虑储能配置的经济性。

3) 相比传统单层模型，本文构建的电网侧储能双层优化配置模型引入了对储能运行的优化，在改善系统电压质量、削峰填谷、降低线损以及减少无功优化设备动作频率方面效果更优。

参考文献

- [1] 张旭, 李阳, 刘晓, 等. 含高渗透率新能源的新型交直流储能系统的配电网规划[J]. 南方电网技术, 2022, 16(4): 60–67. ZHANG Xu, LI Yang, LIU Xiao, et al. Distribution network planning of new AC/DC energy storage system with high permeability new energy[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(4): 60–67.
- [2] 徐来峰, 张沈习, 叶琳浩, 等. 考虑动态重构和智能软开关接入的配电网源网荷储联合规划[J]. 南方电网技术, 2024, 18(4): 130–140. XU Laifeng, ZHANG Shenxi, YE Linhao, et al. Joint planning of source-network-load-storage in distribution network considering dynamic reconfiguration and intelligent soft open point[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(4): 130–140.
- [3] 刘洁, 赵晓君, 贾宇琛, 等. 基于改进烟花算法的含高比例新能源的交直流配电网动态重构[J]. 南方电网技术, 2024, 18(10): 64–72. LIU Jie, ZHAO Xiaojun, JIA Yuchen, et al. Dynamic reconstruction of AC/DC distribution network with high proportion of new energy based on improved fireworks algorithm[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(10): 64–72.
- [4] 付宇, 白浩, 李跃, 等. 面向高比例光伏消纳的低压交直流混合配电网时空协调优化方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(1): 84–93. FU Yu, BAI Hao, LI Yue, et al. Spatial-temporal coordinated optimization method of low voltage hybrid AC/DC distribution network for accommodation of high-proportion PVs[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(1): 84–93.
- [5] 宫建锋, 周宗川, 靳盘龙, 等. 考虑灵活性的交直流混合配电网储能双层规划[J]. 电力建设, 2022, 43(7): 48–56. GONG Jianfeng, ZHOU Zongchuan, JIN Panlong, et al. Bi-level planning of energy storage in AC/DC hybrid distribution network considering flexibility[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7): 48–56.
- [6] BARTON J P, INFELD D G. Energy storage and its use with

- intermittent renewable energy [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(2): 441–448.
- [7] 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.
- YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Multi-objective optimal configuration of energy storage system in active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 46–52.
- [8] MACRAE C A G, ERNST A T, OZLEN M. A Benders decomposition approach to transmission expansion planning considering energy storage[J]. Energy, 2016(112): 795–803.
- [9] 张志遥, 黄婧杰, 周年光, 等. 储能参与低碳灵活调峰的双层优化模型[J]. 南方电网技术, 2023, 17(4): 49–57.
- ZHANG Zhiyao, HUANG Jingjie, ZHOU Nianguang, et al. Bi-level optimization model of energy storage participating in low-carbon and flexible peak shaving [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(4): 49–57.
- [10] 李鲁阳, 陈龙翔, 陈磊, 等. 用于新能源一次调频的储能经济配置研究[J]. 中国电力, 2024, 57(7): 54–65.
- LI Luyang, CHEN Longxiang, CHEN Lei, et al. Research on economic configuration of energy storage for assisting new energy in primary frequency regulation [J]. Electric Power, 2024, 57(7): 54–65.
- [11] 郭威, 修晓青, 李文启, 等. 计及多属性综合指标与经济性的电网侧储能系统选址配置方法[J]. 电力建设, 2020, 41(4): 53–62.
- GUO Wei, XIU Xiaoqing, LI Wenqi, et al. Site selection and configuration method of grid-side energy storage system considering multi-attribute comprehensive index and economy [J]. Electric Power Construction, 2020, 41(4): 53–62.
- [12] 李建林, 李雅欣, 周喜超. 电网侧储能技术研究综述[J]. 电力建设, 2020, 41(6): 77–84.
- LI Jianlin, LI Yaxin, ZHOU Xichao. Review of grid-side energy storage technology [J]. Electric Power Construction, 2020, 41(6): 77–84.
- [13] 李志伟, 吴晓鸣, 向阳, 等. 考虑两侧耦合作用的交直流配电网电能质量综合评估方法[J]. 电气工程学报, 2024, 19(4): 275–286.
- LI Zhiwei, WU Xiaoming, XIANG Yang, et al. Comprehensive power quality evaluation method for AC/DC distribution network considering the coupling effect of both sides [J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 19(4): 275–286.
- [14] 谢宏, 张华赢, 梁家豪, 等. 基于排序主曲线的区域稳态电能质量综合评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(7): 83–88.
- XIE Hong, ZHANG Huaying, LIANG Jiahao, et al. Comprehensive evaluation method of regional steady-state power quality based on sorted master curve [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2023, 35(7): 83–88.
- [15] 罗旷, 王莉, 陈超, 等. 考虑电压稳定性与越限的配电网电压质量评估指标[J]. 南方电网技术, 2019, 13(4): 48–53, 72.
- LUO Kuang, WANG Li, CHEN Chao, et al. Voltage quality evaluation index of distribution network considering voltage stability and over-limit [J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(4): 48–53, 72.
- [16] 欧阳森, 苏为健. 考虑低压台区电压特性的中压母线电压调控与评价方法[J]. 现代电力, 2019, 36(4): 65–71.
- OUYANG Sen, SU Weijian. Voltage regulation and evaluation method of medium voltage bus considering voltage characteristics of low voltage station area [J]. Modern Electric Power, 2019, 36(4): 65–71.
- [17] 栗峰, 郝雨辰, 周昶, 等. 电网侧电化学储能调度运行及其关键技术[J]. 供用电, 2020, 37(6): 82–90.
- LI Feng, HAO Yuchen, ZHOU Chang, et al. Grid-side electrochemical energy storage scheduling operation and its key technologies [J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(6): 82–90.
- [18] HUNG D Q, MITHULANANTHAN N, BANSAL R C. Integration of PV and BES units in commercial distribution systems considering energy loss and voltage stability [J]. Applied Energy, 2014, 113(2): 1162–1170.
- [19] 吴小刚, 刘宗歧, 田立亭, 等. 基于改进多目标粒子群算法的配电网储能选址定容[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3405–3411.
- WU Xiaogang, LIU Zongqi, TIAN Liting, et al. Energy storage location and capacity of distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimization [J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3405–3411.
- [20] 陈厚合, 刘丽娜, 姜涛, 等. 提升配电网电压质量的分布式储能经济优化配置方法[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2127–2135.
- CHEN Houhe, LIU Lina, JIANG Tao, et al. Economic optimal allocation method of distributed energy storage for improving voltage quality of distribution network [J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2127–2135.
- [21] 白浩, 于力, 梁朔, 等. 计及多级配电网运行效率提升价值的电网侧储能优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(3): 7–13.
- BAI Hao, YU Li, LIANG Shuo, et al. Optimal configuration of grid-side energy storage considering the value of improving the operation efficiency of multi-stage distribution network [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2020, 32(3): 7–13.
- [22] 王泽爽, 陈嘉俊, 朱健全, 等. 计及循环寿命的储能优化配置与运营策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 75–82.
- WANG Zeshuang, CHEN Jiajun, ZHU Jianquan, et al. Optimal configuration and operation strategy of energy storage considering cycle life [J]. Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 75–82.
- [23] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电能质量供电电压偏差: GB/T 12325—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [24] 宋军英, 崔益伟, 李欣然, 等. 改进分段线性表示与动态时间弯曲相结合的负荷曲线聚类方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(2): 89–96.
- SONG Junying, CUI Yiwei, LI Xinran, et al. Improved load curve clustering method combining piecewise linear representation and dynamic time warping [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 89–96.

收稿日期: 2023-09-07; 网络首发日期: 2024-05-17

作者简介:

黄祎(2000), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划与运行, 425224680@qq.com;

欧阳森(1974), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为配电网规划与运行、电能质量分析控制, ouyangs@scut.edu.cn;

辛曦(2000), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划与运行, 1154467914@qq.com。