

计及光荷场景差异的储能优化配置

曾庆彬^{1,2}, 梁伟强¹, 黄焯辉¹, 江浩侠¹, 何奉禄¹, 羿应棋²

(1. 广州市奔流电力科技有限公司, 广州 510635; 2. 华南理工大学电力学院, 广州 510640)

摘要: 针对储能配置中忽略源荷功率匹配与调控需求差异导致配置不合理、影响效能及损害利益的问题, 提出一种考虑光荷场景差异性的储能优化配置方法。首先, 从光荷功率差异、匹配以及分布角度, 分析了不同典型场景对储能配置运行的需求差异。其次, 根据系统各场景储能调控需求差异, 修正各场景原概率系数, 增添需求侧重性。然后, 基于各场景新概率系数, 建立储能优化配置模型, 以储能提升运行效益和折损成本最优为目标, 并采用多种方法凸化模型中的非线性项。最后, 基于改进的 IEEE 33 节点配电网为例, 采用 Gurobi 求解器得到储能配置方案, 验证所提配置方法有效性。

关键词: 配电网; 储能; 优化配置; 场景差异; 概率系数; 折损成本

Optimal Configuration of Energy Storage Considering Scenario Differences in Photovoltaic Load

ZENG Qingbin^{1,2}, LIANG Weiqiang¹, HUANG Zhuohui¹, JIANG Haoxia¹, HE Fenglu¹, YI Yingqi²

(1. Guangzhou Power Electrical Technology Co., Ltd., Guangzhou 510635, China; 2. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To address the problem of unreasonable energy storage configurations caused by ignoring the differences in source-load power matching and control demands, which impacts efficiency and harms stakeholders' interests, an optimized energy storage configuration method is proposed considering the variations in photovoltaic-load scenarios. Firstly, from the perspectives of photocharge power differences, matching and distribution, the differences in demand for energy storage configuration operation in different typical scenarios are analyzed. Secondly, according to the differences in energy storage control demand of each scenario, the original probability coefficients of each scenario are corrected to add demand focus. Then, based on the new probability coefficients of each scenario, an energy storage optimization configuration model is established, with the goal of improving operating efficiency and optimal loss cost of energy storage, and a variety of methods are used to convexize the nonlinear terms in the model. Finally, based on the improved IEEE 33-node distribution network, a Gurobi solver is used to obtain the energy storage configuration scheme and verify the effectiveness of the proposed configuration method.

Key words: distribution network; energy storage; optimization configuration; scenario differences; probability coefficient; discounted costs

0 引言

近年来, 随着光伏(photovoltaic, PV)装机容量不断扩大、并网渗透率逐步增加以及储能技术稳定提升, “PV+储能”模式得到了推广应用。然而, 受光荷功率特性差异影响, 各场景对储能的需求程

度截然不同。在储能配置优化目标设定上, 单纯依赖各场景出现概率体现各场景的储能适配情况, 已难以满足科学性要求。这种方式并未对不同场景的储能实际应用需求加以区分, 极有可能致使储能配置方案在调控难度较大的场景中无法满足需求, 而在调控相对简易的场景中却出现过度配置的情况, 使储能实际应用效果不佳。因此, 考虑各场景光荷功率差异特性, 均衡各场景的储能配置利益, 使储能配置更适应于各场景需求具有重要意义。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62173148)。

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62173148).

目前,国内外已有许多学者针对光储配置问题或含光伏的系统配储问题展开研究,优化目标主要以调控电压质量与平移负荷波动为主,但大多针对单一运行场景,未考虑多种运行场景。比如,文献[1-2]分别以电压调控和PV消纳作为优化目标,研究光储接入优化配置,但目标函数都较为单一。文献[3-5]主要集中以以储能成本、负载调控质量为目标函数,研究含光伏并网下的储能优化配置,却少考虑系统运行质量。

在储能循环寿命的研究领域,雨流计数法是计算储能寿命的常用方法^[6],但该方法无直接的数学解析式表示储能寿命,计算依赖于极值点的识别,也难以合并到优化配置中以及适配线性求解器进行求解。其中,文献[7]通过近似拟合历史数据,能表示储能循环寿命与充放电行为之间的关系,但这种方法误差较大。文献[8-9]基于雨流计数法和储能充放电模型,经过固化与线性化手段,构建了能在优化模型中实时更新的储能寿命模型。

在考虑光荷典型场景的储能配置运行研究中,绝大多数研究在构建优化模型时,仅考虑了场景出现概率或频率,未考虑各场景源荷功率匹配与储能调控配置需求的差异。比如,文献[10-11]基于一段时期或四季为典型运行场景,完成配电网储能规划,场景划分较为粗糙。文献[12]在四季为代表场景的基础上,扩充了极端运行情况的极端日。文献[13-14]分别基于改进的K-means方法将历史场景聚类削减为典型场景,构建考虑多运行场景的配置模型,是当前最为典型的方法。

综上分析,本文对计及光荷场景差异特性的储能优化配置问题进行研究,并在储能优化模型中考虑储能的循环寿命。首先,基于具有典型区别度的场景分析储能调控配置需求,主要包含光荷顺特性、逆特性、恒特性以及常特性等场景;其次,根据各场景配置需求差异,重新得到凸显各场景需求度的概率系数;然后,基于新场景概率系数,以配置储能后日净收益最大为目标构建储能优化配置模型,通过M包络法、等价数学转化法以及大M法手段将储能循环寿命折损嵌入至模型一同优化;最后,基于改进的IEEE 33节点配电网验证本文协同优化方法的有效性。

1 储能调控配置需求分析

储能具有灵活的功率调节能力,能较好地配合

不同场景的功率调度需求^[15-17]。因此,本文主要基于光荷功率差异、匹配以及分布角度突显场景间的差异性,分析具有典型区别度的场景对储能调控配置的不同需求程度,主要包括光荷顺特性、逆特性、恒特性以及常特性等场景。

1) 顺特性

当PV出力和节点负荷的功率曲线变化趋势相似时,即在典型日时段中负荷功率主体呈随时间先增大后减小的趋势,最大负荷功率出现在正午时段左右,定义这类光荷运行场景为顺特性场景,如图1(a)所示。在这类场景下,光荷功率具有良好的一致性与匹配度,能较好地适应电网调度运行,对电网造成较小影响,其储能调控配置的需求度较小。

2) 逆特性

当PV出力和节点负荷的功率曲线变化趋势相反时,即在典型日时段中负荷功率主体呈随时间先减小后增大的趋势,最小负荷功率出现在正午时段左右,定义这类光荷运行场景为逆特性场景,如图1(b)所示。在这类场景下,光荷功率变化特性相反,在光伏出力高峰时段常有大量功率难以就地消纳的问题,加大了电网安全调度运行的难度,对储能调控配置的需求度上升。

3) 恒特性

当一负荷在各时段中的典型功率曲线变化范围较小、功率需求较为稳定时,定义这类光荷运行场景为恒特性场景,如图1(c)所示。这类场景其净负荷稳定呈现先减小后增大趋势,且当PV高峰出力都未超过负荷功率时,PV能实现全消纳,调控运行难度不高,储能配置需求主要取决于目标函数优化模型。

4) 常特性

在功率变化趋势上,该场景分别存在部分时段表现为顺逆特性或常特性,其出现先后顺序不定,可看为顺特性、逆特性以及恒特性功率曲线的混合,定义这类光荷运行场景为常特性场景,代表绝大多数光荷场景,如图1(d)所示。这类场景对储能配置的需求度主要取决于光荷间的功率差异度、匹配度以及电网调控需求度,储能配置需求度可高可低,以实际优化模型结果为准。

2 考虑储能调控配置需求的场景概率系数修正

在现有研究中各场景的概率系数主要由

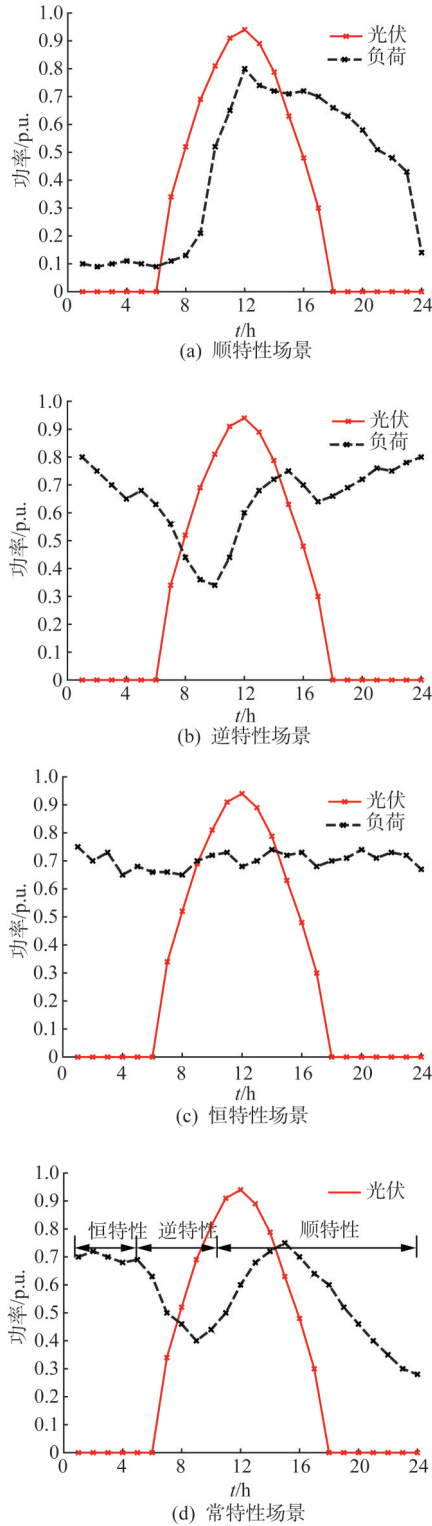


图 1 光荷典型运行场景分类

Fig. 1 Classification of typical operating scenarios of PV-load

K-means 方法聚类历史数据得到。在本文中不探讨典型场景的聚类方法, 设基于 K-means 方法下得到的光荷典型场景为 n 类, 场景概率矩阵为 $\mathbf{P} =$

$[p_{s,d}]_{1 \times n}$, 其概率分别为 $p_{s,1}$ 、 $p_{s,2}$ 、 $\dots$ 、 $p_{s,n}$ 。

由上节分析可知: 与其他场景相比, 光荷顺特性和逆特性场景对储能的调控需求存在明显的偏向性。因此, 本文为体现各场景对储能的偏向需求, 引入系数权重修正各场景对应的概率系数, 增添场景需求差异性。由于光荷恒或常特性场景对储能无明显的偏向需求, 本文主要针对顺或逆特性场景作权重修正, 其余场景概率在满足场景概率总和为 1 的约束条件下随之变动。

2.1 顺、逆特性场景概率系数修正

储能作为电网的重要调控手段可弥补场景缺陷, 使系统中的光储协同运行。本文主要通过光荷顺、逆特性场景下两者间的功率变化趋势的一致度与功率分布差异度对其概率系数进行修正, 突出对储能的调控需求度, 如式(1)所示。光荷功率间的变化趋势一致度反映对电网大体调控需求, 光荷功率分布差异度反映调控需求相对强弱。

$$\begin{cases} p'_{s,d} = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_l} \alpha_{d,i} (1 - \beta_{d,i})}{N_l} \right] p_{s,d}, & d \in P_a \\ p'_{s,d} = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_l} \alpha_{d,i} (1 + \beta_{d,i})}{N_l} \right] p_{s,d}, & d \in P_b \end{cases} \quad (1)$$

式中: $p'_{s,d}$ 和 $p_{s,d}$ 分别为场景 d 修正后的新概率系数和场景 d 原概率系数; P_a 和 P_b 分别为顺特性和逆特性场景集; N_l 为待配储光伏的节点数量; $\alpha_{d,i}$ 为场景 d 节点 i 的光荷功率变化趋势一致度; $\beta_{d,i}$ 为场景 d 节点 i 的光荷功率分布差异度。

其中, 光荷功率变化趋势一致度 $\alpha_{d,i}$ 与功率分布差异度 $\beta_{d,i}$ 模型分别如式(2)–(3)所示。

$$\alpha_{d,i} = \frac{\text{cov}(P_{v,i,d}, P_{a,i,d})}{\sigma(P_{v,i,d})\sigma(P_{a,i,d})} \quad (2)$$

$$\beta_{d,i} = \frac{\sum_{t=1}^{T_h} |P_{v,i,d,t} - P_{a,i,d,t}|}{\max(P_{v,i,d,\max}, P_{a,i,d,\max}) T_h} \quad (3)$$

式中: $P_{v,i,d}$ 和 $P_{a,i,d}$ 为场景 d 节点 i 的 PV 和负荷功率; $\text{cov}(P_{v,i,d}, P_{a,i,d})$ 为 $P_{v,i,d}$ 与 $P_{a,i,d}$ 的协方差; $\sigma(P_{v,i,d})$ 和 $\sigma(P_{a,i,d})$ 分别为变量 $P_{v,i,d}$ 和 $P_{a,i,d}$ 的标准差; $P_{v,i,d,t}$ 和 $P_{a,i,d,t}$ 为场景 d 时段 t 节点 i 的 PV 和负荷功率;

$P_{v,i,d,\max}$ 和 $P_{a,i,d,\max}$ 分别为场景 d 节点 i 的 PV 日最大功率和负荷日最大功率; T_b 为日运行时段数量。

2.2 各场景概率系数再修正

修正后得到的新场景概率系数不一定满足概率总和为 1 的约束条件。本文基于顺、逆特性场景新概率系数修正其余场景概率系数, 如式(4)所示。

$$p'_{s,d} = \frac{P_{s,d}}{p'_{s,a} + p'_{s,b} + p_{s,d}}, (a \in P_a, b \in P_b, d \in P_o) \quad (4)$$

式中: $p'_{s,a}$ 、 $p'_{s,b}$ 分别为修正后的顺特性和逆特性场景集; P_o 为顺特性与逆特性场景外的其余场景, 包括恒特性与常特性等场景。

为使各场景概率满足概率之和为 1 的约束条件, 对已得到的新场景概率作式(5)处理。

$$p''_{s,d} = \frac{p'_{s,d}}{\sum_{d=1}^{N_d} p'_{s,d}} \quad (5)$$

式中: N_d 为场景数量; $p''_{s,d}$ 为场景 d 再次修正后的概率系数。

3 考虑场景差异和循环寿命折损的储能优化配置模型

基于系统调度周期内各典型日场景, 考虑储能循环寿命折损, 以储能提升运行效益和储能折损成本最优为目标, 对各 PV 接入点进行储能容量和功率配置, 实现光储协同优化, 如式(6)所示。运行效益 O 包括负荷波动降低奖励与电压偏差降低奖励, 储能成本以储能日折损成本为体现。

$$\max O = \sum_{d=1}^{N_d} p''_{s,d} (E_{b,d} + E_{v,d} - C_{f,d}) \quad (6)$$

式中: $E_{b,d}$ 为场景 d 负荷波动降低奖励; $E_{v,d}$ 为场景 d 电压偏差降低奖励; $C_{f,d}$ 为场景 d 储能日折损成本。

3.1 目标函数模型

3.1.1 运行效益提升模型

各运行提升效益模型具体如式(7)所示, 负荷波动降低考虑整个系统功率变化, 电压偏差考虑对整个系统节点的提升。

$$\begin{cases} E_{b,d} = c_b \sum_{t=1}^{T_b} \Delta P_{bd,d,t} \\ E_{v,d} = c_v \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{t=1}^{T_b} \Delta V_{dvt,d,i,t} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $E_{b,d}$ 、 $E_{v,d}$ 分别为场景 d 下的负荷波动、电压

偏差降低奖励; c_b 、 c_v 分别为负荷波动降低、电压偏差降低单位奖励; $\Delta P_{bd,d,t}$ 为场景 d 时段 t 负荷波动降低功率; $\Delta V_{dvt,d,i,t}$ 为场景 d 时段 t 节点 i 电压偏差降低量; N_s 为系统节点数量。

3.1.2 储能成本模型

本文为考虑储能配置运行方案对其寿命的影响, 以储能日成本模型体现储能循环寿命折损, 可由储能投资成本与储能循环寿命时间相除得到。

$$\begin{cases} C_{f,d} = \frac{C_{om,d}}{\sum_{m=1}^{N_e} T_{cy,d,m}} = \frac{k_d C_E}{\sum_{m=1}^{N_e} T_{cl,d,m} / y} \\ C_E = \sum_{m=1}^{N_e} (c_r E_{N,m} + c_p P_{N,m}) \end{cases} \quad (8)$$

$$k_d = \frac{h(1+h)^y}{(1+h)^y - 1} \quad (9)$$

式中: N_e 为配置储能的节点数量; $C_{om,d}$ 为节点 m 的储能周期内停电维护的总成本; $T_{cy,d,m}$ 为场景 d 节点 m 的储能年实际有效运行日, 当不考虑储能循环寿命折损时, 其为年周期日 365 d; $T_{cl,d,m}$ 为场景 d 节点 m 的储能总循环寿命; c_r 和 c_p 分别为储能的单位容量和功率成本; $E_{N,m}$ 和 $P_{N,m}$ 分别为节点 m 的储能额定容量和功率; C_E 为储能投资成本; k_d 为储能的日投资折算系数; h 为折现值; y 为规划周期。

关于储能的循环寿命, 本文采用固化与线性化雨流计数法^[9]和储能充放电模型构建了储能准确的寿命变动模型。

基于雨流计数法拟合模型, 可先将循环次数统一至 100% 放电深度尺度, 进而计算出在典型场景日下储能的累积循环次数, 最后根据 100% 放电深度对应的最大充放电次数, 折算出典型场景下的储能循环寿命, 具体如式(10)所示。

$$\begin{cases} T_{cl,d,m} = \frac{L_{100,m,\max}}{l_{100,d,m,\text{day}}} \\ l_{100,d,m,\text{day}} = \sum_{t=1}^{T_b} [l_{100,d,m,t} - (1 - y_{d,m,t}) l_{100,d,m,t-1}] \\ l_{100,d,m,t} = l h_{d,m,t}^p \end{cases} \quad (10)$$

式中: $L_{100,m,\max}$ 为节点 m 的储能在 100% 放电深度下的最大充放电次数; $l_{100,d,m,\text{day}}$ 为场景 d 节点 m 的储能典型日累计总循环次数; $l_{100,d,m,t}$ 为场景 d 时段 t 节点 m 的储能在 100% 放电深度下的等效循环次数; $y_{d,m,t}$ 为场景 d 时段 t 节点 m 的储能充放电状态变化标志位, 状态发生改变取 1, 反之取 0, 可由式(11)

计算得到; $l_{100,d,m,t}$ 为场景 d 时段 t 节点 m 储能在 100 % 放电深度下的等效循环次数; l 为循环使用次数; $h_{d,m,t}$ 为场景 d 时段 t 节点 m 储能的放电深度, 可由式 (12) 计算得到; ρ 为拟合得到的常数, 取值受储能种类影响。

$$y_{d,m,t} = (\lambda_{ch,d,m,t} - \lambda_{ch,d,m,t-1})^2 \quad (11)$$

式中: $\lambda_{ch,d,m,t}$ 为场景 d 时段 t 节点 m 储能的充放电状态位, 充电取 1、放电取 0。

$$\begin{cases} h_{d,m,t} = \frac{S_{f,d,m,t}}{E_{N,m}} \\ S_{f,d,m,t} = (1 - y_{d,m,t})S_{f,d,m,t-1} + \left(\eta_{ess} P_{ch,d,m,t} + \frac{P_{dc,d,m,t}}{\eta_{ess}} \right) \Delta t \end{cases} \quad (12)$$

式中: $S_{f,d,m,t}$ 为场景 d 时段 t 节点 m 的储能一个持续完整的充放电行为后累计电量; η_{ess} 为储能充放电效率; $P_{ch,d,m,t}$ 和 $P_{dc,d,m,t}$ 分别为场景 d 时段 t 节点 m 的储能充电和放电功率; Δt 为单位时间。

3.2 模型凸化处理

上述式 (6) 建立的目标函数模型中, 储能折损成本模型包含着非线性项, 应采取合理的凸化模型, 使其能应用 Gurobi 求解。

其中, 式 (8) 中存在除式项, 令 $K_{cl,d,m} = 1/T_{cl,d,m}$, 并引入辅助变量 $M_{d,m} = E_{N,m} K_{cl,d,m}$ 、 $H_{d,m} = P_{N,m} K_{cl,d,m}$, 采用 M 包络法对其处理, 新增约束式 (13)~(14); 式 (11) 中存在二次项, 引入辅助变量 $F_{d,m,t} = \lambda_{ch,d,m,t} \lambda_{ch,d,m,t-1}$, 等价转化为式 (15) 约束; 式 (12) 中存在二进制变量和连续变量的乘积项, 引入辅助变量 $U_{d,m,t} = y_{d,m,t} S_{f,d,m,t-1}$, 采用大 M 法对其处理, 新增约束式 (16)。

$$\begin{cases} E_{N,m}^L K_{cl,d,m} + E_{N,m} K_{cl,d,m}^L - E_{N,m}^L K_{cl,d,m}^L - M_{d,m} \leq 0 \\ E_{N,m}^U K_{cl,d,m} + E_{N,m} K_{cl,d,m}^U - E_{N,m}^U K_{cl,d,m}^U - M_{d,m} \leq 0 \\ M_{d,m} - E_{N,m}^U K_{cl,d,m} - E_{N,m} K_{cl,d,m}^L + E_{N,m}^U K_{cl,d,m}^L \leq 0 \\ M_{d,m} - E_{N,m} K_{cl,d,m}^U - E_{N,m}^L K_{cl,d,m} + E_{N,m} K_{cl,d,m}^U \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} P_{N,m}^L K_{cl,d,m} + P_{N,m} K_{cl,d,m}^L - P_{N,m}^L K_{cl,d,m}^L - H_{d,m} \leq 0 \\ P_{N,m}^U K_{cl,d,m} + P_{N,m} K_{cl,d,m}^U - P_{N,m}^U K_{cl,d,m}^U - H_{d,m} \leq 0 \\ H_{d,m} - P_{N,m}^U K_{cl,d,m} - P_{N,m} K_{cl,d,m}^L + P_{N,m}^U K_{cl,d,m}^L \leq 0 \\ H_{d,m} - P_{N,m} K_{cl,d,m}^U - P_{N,m}^L K_{cl,d,m} + P_{N,m} K_{cl,d,m}^U \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中: $E_{N,m}^U$ 、 $E_{N,m}^L$ 分别为第 m 个节点能接受的储能容量上下限; $P_{N,m}^U$ 、 $P_{N,m}^L$ 分别为第 m 个节点能接受的储能功率上下限; $K_{cl,d,m}^U$ 、 $K_{cl,d,m}^L$ 分别为场景 d 节

点 m 的储能循环寿命倒数的上下限。

$$\begin{cases} y_{d,m,t} = (\lambda_{ch,d,m,t} - \lambda_{ch,d,m,t-1})^2 \\ = \lambda_{ch,d,m,t} + \lambda_{ch,d,m,t-1} - 2F_{d,m,t} \\ F_{d,m,t} \leq \lambda_{ch,d,m,t} \\ F_{d,m,t} \leq \lambda_{ch,d,m,t-1} \\ F_{d,m,t} \geq \lambda_{ch,d,m,t} + \lambda_{ch,d,m,t-1} - 1 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} -My_{d,m,t} \leq U_{d,m,t} \leq My_{d,m,t} \\ -M(1 - y_{d,m,t}) + S_{f,d,m,t-1} \leq U_{d,m,t} \\ \leq M(1 - y_{d,m,t}) + S_{f,d,m,t-1} \end{cases} \quad (16)$$

式中 M 为比 $S_{f,d,m,t-1}$ 大几个数量级的常数。

3.3 约束条件模型

本文约束条件主要考虑储能接入点容量与功率约束、系统电压约束、潮流约束、储能运行控制约束, 具体如下所示。

1) 储能接入点容量与功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq E_{N,m} \leq E_{N,m}^U \\ 0 \leq P_{N,m} \leq P_{N,m}^U \end{cases} \quad (17)$$

2) 系统电压约束

$$\bar{V}_i \leq V_{d,i,t} \leq \underline{V}_i \quad (18)$$

式中: $V_{d,i,t}$ 为场景 d 时段 t 节点 i 的电压幅值; $\bar{V}_i$ 和 $\underline{V}_i$ 分别为节点 i 的电压允许上限和下限值。

3) 潮流约束

本文为实现采用 Gurobi 商业求解器对优化模型进行求解, 将基本潮流模型进行松弛变化, 得到潮流的二阶锥标准模型^[18]。

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{d,ij,t} \\ 2Q_{d,ij,t} \\ I_{d,ij,t,2} - V_{d,j,t,2} \end{matrix} \right\| \leq I_{d,ij,t,2} + V_{d,j,t,2} \quad (19)$$

式中: $P_{d,ij,t}$ 和 $Q_{d,ij,t}$ 分别为场景 d 时段 t 支路 ij 的有功功率和无功功率; $I_{d,ij,t,2}$ 为场景 d 时段 t 支路 ij 的电流平方; $V_{d,j,t,2}$ 为场景 d 时段 t 节点 j 的电压幅值平方。

4) 储能运行控制约束

$$\begin{cases} S_{oc,d,m,t+1} = S_{oc,d,m,t} + \left(\eta_{ess} P_{ch,d,m,t} - \frac{P_{dc,d,m,t}}{\eta_{ess}} \right) \frac{\Delta t}{E_{N,m}} \\ S_{oc,m,min} \leq S_{oc,d,m,t+1} \leq S_{oc,m,max} \\ S_{oc,d,m,0} = S_{oc,d,m,T_h} \\ \sigma_{ch,d,m,t} + \sigma_{dc,d,m,t} \leq 1 \\ 0 \leq P_{ch,d,m,t} \leq \sigma_{ch,d,m,t} P_{N,m} \\ 0 \leq P_{dc,d,m,t} \leq \sigma_{dc,d,m,t} P_{N,m} \end{cases} \quad (20)$$

式中： $S_{oc\ d,m,t}$ 为场景 d 时段 t 节点 m 储能的荷电状态； $S_{oc\ m,\min}$ 和 $S_{oc\ m,\max}$ 为节点 m 储能的荷电状态下限和上限； $\sigma_{ch,d,m,t}$ 和 $\sigma_{dc,d,m,t}$ 为场景 d 时段 t 节点 m 储能的充电和放电标志位； $P_{N,m}$ 为节点 m 能安装的最大储能容量。

3.4 求解流程

本文的求解流程如图2所示。首先，导入系统负荷功率与线路相关数据、PV出力数据以及储能成本与性能数据。其次，采用K-means方法聚类得到光荷典型功率场景及其概率。然后，考虑储能调控配置需求，修正各场景概率系数，并将其引入优化模型，凸显各场景配储需求倾向。接着，构建考虑场景差异和储能循环寿命折损的光储协同优化模型，并对模型作凸化处理。最后，采用Gurobi求解器得到储能配置运行结果。

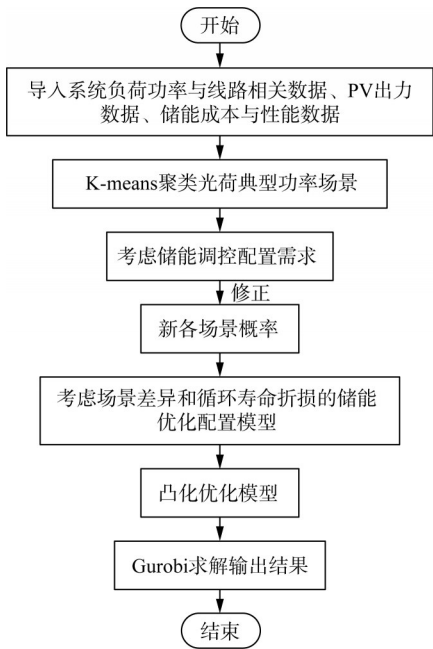


图2 求解流程

Fig. 2 Solve process

4 算例分析

4.1 仿真数据设置

如图3所示，本文采用改进的IEEE 33节点系统作为仿真验证算例，该系统包含32条支路、33个节点；在节点15、18分别接入额定容量为0.2、0.1 MW的PV电源。本文选取PV接入节点15进行储能配置，并分析配储后的优化运行效果。

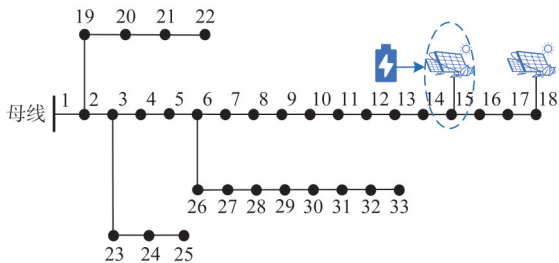


图3 仿真算例系统

Fig. 3 Simulation example system

参考各文献算例数据^[18-21]，将本文参数设置从设备类型上分为配网系统与储能两块，配网系统参数细分为基本参数与经济参数两部分，储能参数细分为投资运行参数与接入点约束参数两部分，具体如表1所示。通过K-means方法聚类，得到广东省某一地区的光荷场景典型日曲线，场景1—3分别代表着光荷顺特性、逆特性以及常特性场景，其原场景概率系数分别为0.70、0.10、0.20。

表1 仿真参数设置

Tab. 1 Simulation parameter settings

设备	参数类型	参数名	参数值
配网系统	基本参数	折现值/%	6
		节点电压范围/p. u.	[0.94, 1.06]
		日运行时段数量	24
	经济参数 ^[18-20]	年周期日	365
		负荷波动降低单位奖励/(元·kWh ⁻¹)	2.00
		电压偏差降低单位奖励/元	100
储能系统	投资运行参数 ^[18,21]	单位容量价格/(元·kWh ⁻¹)	2 250
		单位功率价格/(元·kW ⁻¹)	900
		充放电效率/%	90
	接入点约束参数	荷电状态范围	[0.10, 0.90]
		初始荷电状态	0.30
		容量上限/kW	300
		功率上限/kW	150

4.2 储能配置结果

为说明本文所提优化方法的有效性，设置了以下3种情景进行对比。情景1：不考虑储能场景需求差异与储能循环寿命折损(循环寿命恒定、与储能运行无关)；情景2：不考虑储能场景需求差异，考虑储能循环寿命折损；情景3：同时考虑储能场景需求差异与储能循环寿命折损。

利用本文所提的方法，考虑储能场景需求差异

后,场景概率系数的变化如表2所示。求解上述3种情景下的储能优化配置方案以及光储运行效益,其结果如表3所示。为对比修正场景系数的前后效益,还原在原有概率下的真实效益。基于情景3所得储能优化配置方案以及各场景下的运行效益,重新代入原始概率计算得到负荷波动总奖励和电压偏差总奖励。为进一步分析配置运行结果的差异,图4~5展示储能各场景下的功率出力与荷电状态变化。

如表2所示,场景1光荷功率曲线具有良好的功率匹配度,其对储能调控配置的需求度较小,将目标函数中的占比从0.7000降低为0.4415,更多重心考虑在场景2、场景3上。特别对于场景2这种光荷功率匹配度很差的情况,易加大电网调度运行难度,其储能调控需求高,占比从0.1000升高为0.2666。场景3这类一般情况的占比增减,主要取决于顺与逆特性场景的变化程度。

表2 场景概率系数变化结果
Tab. 2 Scenario probability coefficient change result

场景 d	$P_{s,d}$	$P'_{s,d}$	$P''_{s,d}$
1	0.700 0	0.376 4	0.441 5
2	0.100 0	0.227 3	0.266 6
3	0.200 0	0.248 8	0.291 9

如表3所示,相比较于配储前的系统运行状态,各情景下的负荷波动与电压偏差分别呈减小与增大,受两者奖励单位值大小影响,主要通过降低系统负荷波动来获取奖励,而一定程度牺牲了系统的电压质量。

表3 储能配置以及光储运行效益结果
Tab. 3 Energy storage configuration and the results of the operation efficiencies of solar storage

情景	$E_{N,15}$ /MWh	$P_{N,15}$ /MW	负荷波动总 奖励/元	电压偏差总 奖励/元	储能日折损 成本/元
1	0.29	0.14	1 090.93	-22.83	506.34
2	0.28	0.06	897.58	-1.18	811.90
3	0.23	0.13	840.48	-11.28	753.14

对比情景1与情景2,考虑储能充放电运行中出现循环寿命折损后,储能实际运行寿命缩短、日折损成本增加,储能的容量与功率优化结果均下降,储能调控功率幅度降低,对负荷波动与电压偏差的影响减小;若忽略储能循环寿命折损,简单地认为储能寿命始终为一常数,那么从表面上看,情

景2的日折损成本确实会小于情景1,但这显然无法真实反映储能的实际运行状况,从优化结果的角度分析,这种理想化的假设会导致对储能功率的调度增强,从而出现图4~5中场景1储能充放电功率、荷电变化程度更大的情况。进一步地,对比情景2与情景3,在充分考虑储能调控配置需求后,储能的功率配置结果上升,这是因为在光荷逆特性的极端场景下,需要储能更充分发挥削峰填谷的作用,而这也一定程度导致功率配置成本的增加。为了平衡储能的整体成本,采取了降低储能配置容量而增加功率的策略,这种方式很好地兼顾了对储能折损成本的控制以及对光荷场景需求侧重性的要求,更符合实际中对储能的合理配置需求,使得储能系统在不同场景下能够更高效、经济地运行。

此外,图4~5中各场景下的功率调配和荷电状态变化趋势虽有各自特点,但存在紧密关联性;其储能调控效益主要与储能容量与功率配置相关,配置数值越大平抑波动能力越强,电压质量受潮流分布影响更深。情景二相较于其他场景,平滑负荷能力较弱。这主要是因其未充分考虑逆特性下对储能调控需求度的增强,此时,该情景对储能配置成本更为敏感;而情景三很好地兼顾了储能配置成本和功率调控需求,在储能充放电尖峰时刻也与情景一功率相差不大,表明其在保障功率调控效果的同时,有效控制了成本投入。

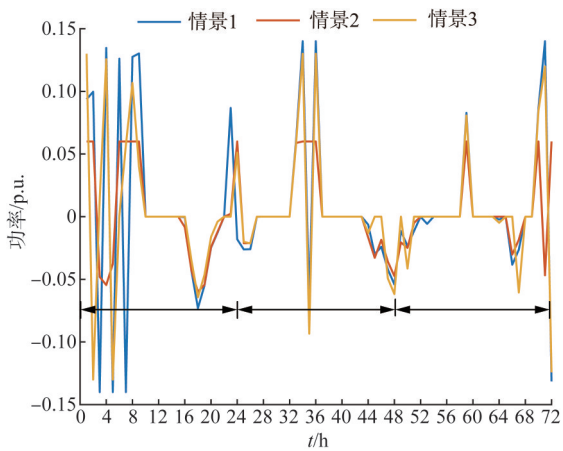


图4 储能充放电功率

Fig. 4 Charging and discharging powers of energy storage

5 结论

本文提出了一种计及光荷场景差异特性的储能

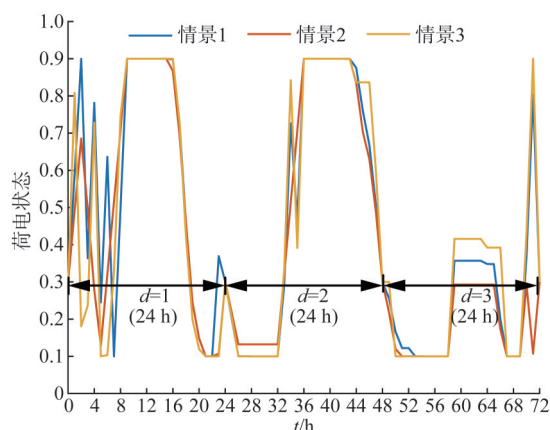


图5 储能荷电状态变化

Fig. 5 Variation in state of charge of energy storage

优化配置方法。基于不同光荷场景下的储能调控配置需求,构建了考虑场景差异的储能优化配置模型,并通过各类线性化方法,将储能循环寿命折损引入模型,利用Gurobi求解得到储能配置与运行方案。通过改进IEEE 33节点系统仿真分析,结论如下。

1)从光荷功率差异、匹配以及分布角度,总结归纳了光荷具有典型区别度的场景,分别为顺特性、逆特性、恒特性以及常特性等场景。

2)通过不同光荷场景的储能配置需求分析,在原有场景概率系数中增添考虑场景重要性,可更好地适应多场景需求,使规划结果更符合于实际配储需求。

3)基于雨流计数法和储能充放电模型,构建了储能准确的寿命变动模型,将其引入配储优化模型,所得储能规划运行结果更贴近于实际应用。

4)运用M包络法、等价数学转化法以及大M法,能有效凸化处理非线性优化模型,实现用线性工具包Gurobi完成求解。

参考文献

- [1] 翟世涛,刘泽槐,杨家豪,等.考虑多时段并网点电压控制的光储容量匹配及优化运行[J].电网技术,2017,41(6):1855-1865.
ZHAI Shitao, LIU Zehuai, YANG Jiaohao, et al. Capacity matching and optimal operation of photovoltaic-storage systems based on multi-period PCC voltage control[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1855-1865.
- [2] 叶琳浩,申展,许峰,等.考虑光伏不确定性和时序相关性的分布鲁棒光储协同优化配置方法[J].南方电网技术,2023,17(4):132-143.
YE Linhao, SHEN Zhan, XU Feng, et al. Distributionally

robust collaborative optimal allocation method of photovoltaic and energy storage considering photovoltaic uncertainty and temporal correlation[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(4): 132-143.

- [3] 何森,林舜江,李广凯.含光伏的低压配电网分布式储能多目标优化配置与运行[J].电工电能新技术,2019,38(3):18-27.
HE Sen, LIN Shunjiang, LI Guangkai. Multi-objective optimal allocation and operation of distributed energy storage in low-voltage distribution network with photovoltaic integration[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(3): 18-27.
- [4] 董清,董梁悦,卜劲勇,等.考虑光伏渗透率和时段划分的光储优化运行[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(5):120-128.
DONG Qing, DONG Liangyue, BU Jinyong, et al. Optimal Operation of Photovoltaic-energy storage considering penetration rate of photovoltaic and division of time periods[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(5): 120-128.
- [5] 刘杨华,杨悦荣,林舜江.含光伏配电网中储能和无功补偿装置协调的多目标凸优化配置方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(5):22-33.
LIU Yanghua, YANG Yuerong, LIN Shunjiang. A multi-object convex optimization method for the coordinated allocation of energy storage and reactive power compensation devices in distribution network integrated with photovoltaics[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(5): 22-33.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 王泽爽,陈嘉俊,朱建全,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):75-81.
WANG Zeshuang, CHEN Jiajun, ZHU Jianquan, et al. Optimal configuration and operation strategy of energy storage considering cycle life[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 75-81.
- [9] 吴晗,欧阳森,梁炜焜.计及储能循环寿命的柔性配电网优化运行及效益均衡策略[J].电力系统自动化,2023,47(17):99-109.
WU Han, OUYANG Sen, LAING Weikun. Optimal operation and benefit balance strategy for flexible distribution network considering cycle life of energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(17): 99-109.
- [10] 高红均,刘俊勇.考虑不同类型DG和负荷建模的主动配电网协同规划[J].中国电机工程学报,2016,36(18):4911-4922,5115.
GAO Hongjun, LIU Junyong. Coordinated planning considering different types of DG and load in active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4911-4922, 5115.
- [11] 王彦虹,邵能灵,嵇康.含大规模风光电源的配电网储能电池选址定容优化方案[J].电力科学与技术学报,2017,32(2):23-30.

- WANG Yanhong, TAI Nengling, JI Kang. Optimal battery storage allocation in distributed network with large-scale of wind and photovoltaic generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(2): 23 – 30.
- [12] 刘沅昆, 张维静, 张艳, 等. 面向新型电力系统的新能源与储能联合规划方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(10): 1 – 8.
- LIU Yuankun, ZHANG Weijing, ZHANG Yan, et al. Joint planning method of renewable energy and energy storage for new-type power system[J]. Smart Power, 2022, 50(10): 1 – 8.
- [13] 彭春华, 余愿, 孙惠娟. 基于源网荷协同优化的配电网光储联合系统规划[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3944 – 3951.
- PENG Chunhua, YU Yuan, SUN Huijuan. Planning of combined PV-ESS system for distribution network based on source-network-load collaborative optimization [J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3944 – 3951.
- [14] 南斌, 董树锋, 唐坤杰, 等. 考虑需求响应和源荷不确定性的光储微电网储能优化配置[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1340 – 1352.
- NAN Bin, DONG Shufeng, TANG Kunjie, et al. Optimal configuration of energy storage in PV-storage microgrid considering demand response and uncertainties in source and load [J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1340 – 1352.
- [15] 姜智霖, 郝峰杰, 袁志昌, 等. 考虑SOC优化设定的电-氢混合储能系统的运行优化[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 65 – 76.
- JIANG Zhilin, HAO Fengjie, YUAN Zhichang, et al. Optimal operation of an electro-hydrogen hybrid energy storage system considering SOC optimization setting[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 65 – 76.
- [16] 郑连华, 文中, 邱智武, 等. 计及光热电站和氢储能的综合能源系统低碳优化运行[J]. 电测与仪表, 2025, 62(2): 9 – 15, 34.
- ZHENG Lianhua, WEN Zhong, QIU Zhiwu, et al. Low-carbon optimized operation of integrated energy system considering solar thermal power plants and hydrogen storage [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(2): 9 – 15, 34.
- [17] 王颂, 汪隆君, 王钢, 等. 基于二阶一致性算法的电池储能系统SOC均衡及功率分配策略[J]. 广东电力, 2024, 37(4): 1 – 9.
- WANG Song, WANG Longjun, WANG Gang, et al. SOC balancing and power distribution strategies based on second-order consensus algorithm [J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(4): 1 – 9.
- [18] 张晋铭, 欧阳森, 吴晗, 等. 计及配电网可靠性和运行经济性的电网侧储能优化配置[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(7): 62 – 68, 85.
- ZHANG Jinming, OUYANG Sen, WU Han, et al. Optimal configuration of grid-side energy storage considering reliability and operation economy of distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 62 – 68, 85.
- [19] 刘晋源, 吕林, 高红均, 等. 计及分布式电源和电动汽车特性的主动配电网规划[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 41 – 48.
- LIU Jinyuan, LÜ Lin, GAO Hongjun, et al. Planning of active distribution network considering characteristics of distributed generator and electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 41 – 48.
- [20] 高红均, 刘俊勇. 考虑不同类型DG和负荷建模的主动配电网协同规划[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4911 – 4922, 5115.
- GAO Hongjun, LIU Junyong. Coordinated planning considering different types of DG and load in active distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4911 – 4922, 5115.
- [21] 曹林锋, 呼斯乐, 杨家强, 等. 计及灵活性和源荷不确定性的储能优化配置方法[J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 623 – 629.
- CAO Linfeng, HU Sile, YANG Jiaqiang, et al. Optimal configuration method of energy storage considering flexibility and source-load uncertainty [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(9): 623 – 629.

收稿日期: 2025-02-18; 网络首发日期: 2025-07-07

作者简介:

曾庆彬(1993), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为智能电网规划与运行控制, 407150808@qq.com;

梁伟强(1999), 男, 助理工程师, 学士, 研究方向为智能电网规划与运行控制, 996995844@qq.com;

羿应棋(1990), 男, 通信作者, 工程师, 博士, 研究方向为配用电大数据分析, 827019497@qq.com。