

考虑边际效益最优的含分布式光伏配电网储能双层优化配置

彭琦, 欧阳森, 谢运祥
(华南理工大学电力学院, 广州 510640)

摘要: 光伏配置储能是当前的发展趋势, 但储能投资价值直接影响到储能业主的利益以及实际上的市场行为, 因此有必要考虑储能收益与成本间的相互影响, 在传统的网侧多目标最优或储能经济效益最大化的基础上开展进一步的研究。为此, 提出了一种采用多目标粒子群算法的考虑边际效益最优的含分布式光伏配电网储能双层优化配置模型。首先, 提出了储能边际效益的概念, 建立了储能边际效益模型, 从储能业主的角度衡量储能效益。然后, 建立了双层优化模型, 外层优化以储能接入后带来的边际效益最大和电压偏差最小为目标, 并将网损率作为约束条件, 内层优化则以储能日收益最大为目标对储能出力进行优化计算。最后, 采用 IEEE 33 节点系统进行储能优化计算, 结果表明在传统全寿命周期净收益储能容量优化的基础上, 基于储能业主的边际效益最优再采用考虑边际效益与电压偏差的目标进行储能容量二次分配可使储能接入后净收益、线损率和电压偏差均有改善。

关键词: 多目标粒子群; 边际效益; 双层优化; 储能配置; 分布式光伏

Two-Layer Optimal Configuration of Distribution Network Energy Storage with Distributed Photovoltaic Considering Optimal Marginal Benefit

PENG Qi, OUYANG Sen, XIE Yunxiang

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Photovoltaic energy storage configuration is the current development trend, but the value of energy storage investment directly affects the interests of energy storage owners and the actual market behavior, it is necessary to consider the interaction between energy storage benefits and costs, and carry out further research on the basis of traditional multi-objective optimization of the grid side or the maximum economic benefit of energy storage. Therefore, a two-layer optimal configuration model of distribution network energy storage with distributed photovoltaic, which adopts multi-objective particle swarm optimization and considers the optimal marginal benefit. Firstly, the concept of marginal benefit of energy storage is put forward, the marginal benefit model of energy storage is established, and the benefit of energy storage is measured from the perspective of energy storage owners. Then, a two-layer optimization model is established. The outer layer optimization takes the maximum marginal benefit and the minimum voltage deviation after energy storage access as the target, and takes the network loss rate as the constraint condition. The inner layer optimization takes the maximum daily energy storage income as the target to optimize the energy storage output. Finally, the IEEE 33-node system is used for energy storage optimization calculation. The results show that on the basis of traditional energy storage capacity optimization with net income over the whole life cycle, based on the optimal marginal benefit of the energy storage owner, the secondary allocation of energy storage capacity with the goal of considering marginal benefit and voltage deviation can improve the net income, line loss rate and voltage deviation after energy storage access.

Key words: multi-target particle swarm; marginal benefit; two-layer optimization; energy storage configuration; distributed photovoltaic

0 引言

近年来,配电网系统中新能源装机容量不断扩大,然而分布式能源存在较大随机性、波动性与间歇性,分布式光伏大量并网使输出功率倒送,容易使配电网潮流分布发生改变、电压越上限等问题^[1-5],而储能系统具有能量响应及功率快速调节优点,能够起到平衡电量需求及供应、改善配电网系统线路损耗及电压偏差等作用。因此,在可再生能源中合理配置储能尤为重要^[6]。

目前已有不少关于储能经济效益与容量优化配置的研究,文献[7]建立以储能系统全生命周期成本最小为目标、考虑系统功率平衡、储能荷电状态等约束条件的储能容量优化模型,采用改进蝙蝠算法对储能容量进行优化配置。文献[8]以用户侧储能全寿命周期内净收益最大为目标配储储能容量,并约束用户充放电概率以达到削减储能配置成本的目标。文献[9]基于考虑风电消纳与用户用电双向需求的基础,建立以储能成本、弃风率与用户用电满意度三者最优为目标的储能容量优化模型,并以多目标粒子群算法对储能容量进行优化配置。文献[10]采用改进蝗虫优化算法实现以储能系统配置全寿命周期成本最小及风电并网功率平滑指数最小为目标储能容量优化。文献[11]在考虑波动平抑与电池储能寿命衰减的情况下,以储能系统年综合成本最小为目标对储能进行容量优化。文献[12]针对削峰填谷需求,采用量子遗传算法优化储能容量实现储能配置经济成本最优的目标。文献[13]结合实时电量、备用功率及环境效益等因素,以净收益最大为目标对储能容量进行优化配置。文献[14]针对储能使用寿命损耗特性建立储能使用寿命模型,并以年运行收益最优为目标对储能进行容量配置。文献[15]基于储能调峰机理建立以储能调峰日净收益最大为目标、综合考虑储能荷电状态等约束及考虑储能调峰效果的储能容量优化模型。文献[16]以削峰填谷、电压质量及功率调节三者为目标,并以带权极小模理想点法将该多目标优化问题转化为单目标优化问题,最后以粒子群算法进行储能容量及出力优化。文献[17]建立弃风率最小和储能投资成本最小的多目标储能容量优化模型,并根据两个目标间此消彼长的关系设置权重将多目标问题转化为单目标问题采用粒子群算法进行求解。文献[18]考虑区

域电网下的长周期源荷匹配特性,构建以日均规划成本最小及考虑弃电率等约束的区域电网风光储容量规划-运行联合优化模型。文献[19]面向分布式风电光伏,建立负荷峰谷差最小及储能配置成本最低的多目标储能容量优化模型,利用权重系数将多目标转化为单目标并采用蚁群算法进行优化。

以上对于储能容量优化的研究大多仅以储能经济性为目标进行优化,较少考虑储能技术性如电压质量等;且经济性仅单一考虑储能收益或储能配置成本,未考虑储能收益与成本间的相互影响。部分研究同时考虑多个目标但在优化时通过归一化及加权或其他方式将多目标问题转化为单目标问题进行求解,而多目标问题转化为单目标问题求解的方式往往存在一定主观性,容易忽略不同目标之间的差异性。为在提升配储后系统经济效益的同时进一步提升系统电压质量,即同时改善系统的经济性与技术性,可将经济目标与技术目标均设置为储能配置的优化目标,并采用多目标算法使二者在优化时互不影响。

基于此,本文提出了一种基于多目标粒子群算法且考虑边际效益最优的含分布式光伏配电网储能双层优化配置模型,同时兼顾考虑储能全寿命周期净收益及电压偏差。首先基于配电网总负荷及总分布式光伏接入量以全寿命周期净收益最大为目标,采用单目标粒子群算法配置储能最佳总安装容量;然后,引入经济学中边际效益的概念,综合考虑经济性目标与技术性目标,建立外层目标为储能分配在各节点后边际投资效益最大与电压偏差最小、内层目标为储能接入后日收益最大的双层储能容量优化配置模型。最后,基于该双层优化模型,外层采用多目标粒子群算法,内层采用有效集算法进行双层优化实现对各节点储能安装容量的分配。

1 储能投资效益优化模型构建

1.1 边际效益

在经济学^[20]中,边际效益指在其他条件保持不变的情况下边际成本所对应的边际收益。边际成本指新增某一单位物品下总成本的增量,边际收益则为新增该一单位物品时对应的收益增量。简化后边际效益则为投入某一单位成本物品所对应的收益,表达式如式(1)所示。

$$M = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{Y_t - Y_0}{X_t - X_0} \quad (1)$$

式中: M 为边际效益值; ΔY 为新增收益的变化量; Y_t 为 t 时刻的收益; Y_0 为初始阶段的收益; ΔX 为新投入的某元素成本的变化量; X_t 为 t 时刻的投入成本; t_0 为初始阶段的投入成本。

一般在边际效益中边际成本逐渐递增而边际收益为逐渐递减^[21-22], 即不断增加单位成本情况下元素的投入将逐渐使其带来的收益增量减少。借用该边际效益递减理论可合理分析产品投入与产出, 争取以最小的投入获取最大的产出回报, 以实现以最低成本尽可能获取最高收益的目标, 即利润最大化。

1.2 储能投资边际效益模型

由于储能一般成本较高, 所以配置时希望储能资源可以得到有效利用, 减少浪费。

将边际效益引入到储能优化配置中, 可以将其理解为在其他条件不变的情况下增加一单位储能投资成本能够带来储能收益的提升量。建立储能安装容量带来的边际效益模型如式(2)所示。

$$\ln R = b + a \ln C \quad (2)$$

式中: R 为储能在使用年限内带来的收益; C 为安装储能及后续运维所需成本; a 、 b 为常数, 且理论上储能投资收益与储能投资成本成正相关, 所以 a 为大于 0 的常数。

对式(2)求导可得储能边际投资利用效益 M , 如式(3)所示。

$$M = \frac{d(R)}{d(C)} = a \frac{R}{C} \quad (3)$$

对于式(3)中储能边际投资利用效益模型, 实际上主要需根据该模型得到边际效益 M 最大时对应的储能安装容量及安装功率等, 而参数 a 因大于 0, 对于 M 取最大值时对应的储能安装参数不产生影响。因此可取 $a = 1$, 对式(3)进行简化得到式(4)。

$$M = \frac{d(R)}{d(C)} = \frac{R}{C} \quad (4)$$

2 储能传统全寿命周期效益模型

2.1 目标函数

以储能全寿命周期净收益最大为目标, 优化储能最佳总安装容量, 全寿命周期净收益 E 如式(5)所示。

$$\max E = B_c - C \quad (5)$$

式中 B_c 为储能套利所得收益。

1) 收益

储能全寿命周期净收益中总收益为削峰填谷收益, 表达式如下。

$$B_c = \sum_{t=1}^T (B_{\text{ess},t} \cdot N_{\text{ess}} \cdot 365) \quad (6)$$

$$B_{\text{ess},t} = \begin{cases} P_{\text{ES},t}^d \cdot \lambda_t - P_{\text{ES},t}^c \cdot \lambda_t, & P_{\text{Load},t} > P_{\text{PV},t} \\ P_{\text{ES},t}^d \cdot \lambda - P_{\text{ES},t}^c \cdot \lambda, & P_{\text{Load},t} < P_{\text{PV},t} \end{cases} \quad (7)$$

$$\lambda_t = \begin{cases} \lambda_p, & t \in \Omega_p \\ \lambda_n, & t \in \Omega_n \\ \lambda_v, & t \in \Omega_v \end{cases} \quad (8)$$

式中: B_c 为总收益; $B_{\text{ess},t}$ 为 t 时刻削峰填谷收益; N_{ess} 为储能系统使用年限; T 为一天内的时段数; $P_{\text{ES},t}^d$ 为 t 时刻储能放电功率; $P_{\text{ES},t}^c$ 为 t 时刻储能充电功率; $P_{\text{Load},t}$ 为 t 时刻负荷值; $P_{\text{PV},t}$ 为 t 时刻光伏出力值; λ_t 为 t 时刻的购电电价; λ 为的售电电价; λ_p 、 λ_n 、 λ_v 分别为峰时电价、平时电价和谷时电价; Ω_p 、 Ω_n 和 Ω_v 分别为高峰时段、平时段和低谷时段。

2) 成本

计算储能年寿命周期投资成本(C)^[23]如式(9)所示。

$$C = C_e \quad (9)$$

式中 C_e 为储能电池安装运维成本。

储能电池安装运维成本由安装成本和运维成本两部分构成, 表达式如式(10)所示。

$$C_e = \sum_{k=1}^{r_0} \left[\left(\frac{1 + \beta_d}{1 + \beta} \right)^k \times (c_{e1} \cdot P_{\text{ES}} + (c_{e2} + c_{e3}) \cdot P_c) \right] \quad (10)$$

式中: β 为贴现率; β_d 为通货膨胀率; r_0 为储能使用年限; 上标 k 为第 k 个使用年份; c_{e1} 为储能的单位容量造价; c_{e2} 为储能的单位功率造价; c_{e3} 为储能的单位功率年维护成本; P_{ES} 为储能安装功率; P_c 为储能安装容量。

2.2 约束条件

1) 功率平衡约束^[24]

$$P_{\text{PV},t} + P_{\text{ES},t}^d + P_{\text{B},t}' = P_{\text{Load},t} + P_{\text{ES},t}^c \quad (11)$$

式中 $P_{\text{B},t}'$ 为 t 时刻储能系统所含电能。

2) 储能荷电状态约束

在一个电池充/放电周期内电池各时刻储能容量值应保持在一定的范围内。

$$S_{\text{SOC}, \min} \leq S_{\text{SOC}, t} \leq S_{\text{SOC}, \max} \quad (12)$$

式中: $S_{\text{SOC}, t}$ 为 t 时刻电池储能荷电状态; $S_{\text{SOC}, \max}$ 、 $S_{\text{SOC}, \min}$ 分别为电池储能可调度容量上下限制。

3) 储能荷电状态连续性约束

$$S_{\text{SOC}, t} = S_{\text{SOC}, t-1} + P_{\text{ES}, t}^c \cdot \Delta t \cdot \eta_c \quad (13)$$

$$S_{\text{SOC}, t} = S_{\text{SOC}, t-1} + P_{\text{ES}, t}^d \cdot \Delta t / \eta_d \quad (14)$$

式中: $S_{\text{SOC}, t-1}$ 为 $t-1$ 时刻储能系统的荷电状态; η_c 和 η_d 分别为对应电池储能充电效率和放电效率; Δt 为时间间隔 ($\Delta t = 1 \text{ h}$)。

4) 储能充/放电约束

电池储能在运行过程中应控制每次充/放电功率不超过其额定值, 总的放电功率不超过储能额定容量。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{ES}, t}^c \leq P_{\text{ES}, \max}^c \\ 0 \leq P_{\text{ES}, t}^d \leq P_{\text{ES}, \max}^d \end{cases} \quad (15)$$

式中 $P_{\text{ES}, \max}^c$ 、 $P_{\text{ES}, \max}^d$ 分别为储能系统最大充电功率和最大放电功率。

3 双层优化模型

在考虑配电网接入储能带来的成本和效益时既需要考虑储能的安装容量、充放电功率、充放电深度, 还需要考虑一天内储能的实际出力^[25] (即储能的充放电控制策略)。因此电网侧储能的优化对象应包括储能额定容量、储能充放电功率、储能充放电深度及储能实际出力 4 个优化对象, 而储能实际出力会受其他 3 个优化对象的影响。

故本文采用内外层结合的双层优化模型, 外层代表配电网对储能的投资行为, 通过配置储能额定容量、额定充放电功率及充放电深度来调整投资储能行为, 以实现包括储能投资边际收益、线损及电压质量的综合目标最优; 内层代表配电网对储能系统的调控行为, 通过调节一天内各时段储能出力, 以实现储能带来的日效益最大的目标。双层优化模型框图如图 1 所示, 首先通过外层优化模型得到储能最佳安装容量及安装功率; 然后将外层优化所得储能额定容量与额定功率传递给内层优化模型, 内层优化模型则基于该储能配置对储能日出力进行优化; 由此, 可通过内外层结合的双层优化模型得到储能系统的最优配置与运行策略。

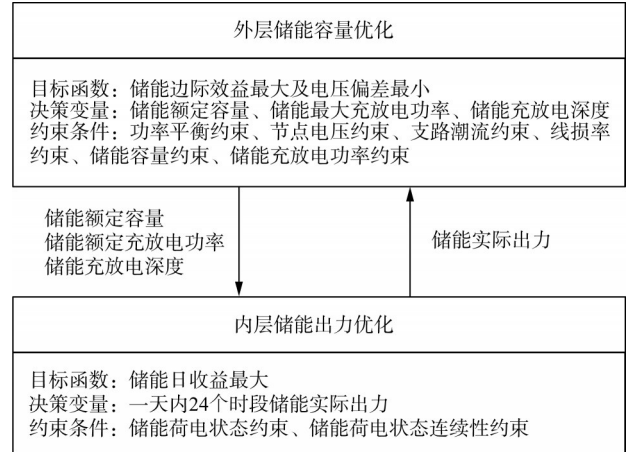


图 1 储能双层优化模型

Fig. 1 Two-layer optimization model of energy storage,

3.1 外层优化模型

3.1.1 目标函数

以储能运营边际效益最大及电压偏差最小为目标, 建立储能系统经济运行模型。目标函数表达式如式(16)所示。

$$\begin{cases} \max M \\ \min U_{\text{dev}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: M 为储能边际投资效益; U_{dev} 为电压偏差。

其中, 储能运营效益为削峰填谷收益, 其在使用年限内运营收益表达式如(17)~(18)所示。

$$R = B_c \quad (17)$$

$$\max M = \frac{R}{C} \quad (18)$$

式中 R 为储能系统运营削峰填谷收益。

以电压偏差最小 (电压质量最优) 为优化目标, 表达式如式(19)所示。

$$\min U_{\text{dev}} = \frac{1}{T \times N_{\text{node}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{node}}} \sum_{t=1}^T \left| 1 - \frac{U_{n,t}}{U_n} \right| \quad (19)$$

式中: U_{dev} 为电压偏差值; N_{node} 为配电网系统节点数量; $U_{n,t}$ 为节点 n 在 t 时刻的实际电压; U_n 为节点 n 的额定电压。

3.1.2 约束条件

1) 电力系统潮流约束

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^{N_i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^{N_i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (20)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为注入节点 i 的有功功率和无功功率; U_i 为节点 i 的电压幅值; N_i 为系统中所有与

节点 i 相连的节点数量; G_{ij} 为节点导纳矩阵的实部; B_{ij} 为节点导纳矩阵的虚部; θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的相角差。

2) 节点电压约束

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (21)$$

式中: $U_{\max}$ 为节点 i 的电压幅值上限; $U_{\min}$ 为节点 i 的电压幅值下限。

3) 支路潮流约束

$$P_L \leq P_{L, \max} \quad (22)$$

式中: P_L 为线路 L 的有功功率; $P_{L, \max}$ 为线路 L 允许通过的最大有功功率。

4) 线损率约束

$$\frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_{\text{branch}}} I_{i,t}^2 R_{i,t}}{S} \leq 5\% \quad (23)$$

式中: N_{branch} 为系统支路数量; $I_{i,t}$ 为储能接入前支路 i 在 t 时刻的电流大小; $R_{i,t}$ 为储能接入前支路 i 在 t 时刻的电阻大小; S 为配电网系统一天内总供电量。

5) 储能容量约束

储能容量在优化配置时不超过最大容量, 如式 (24) 所示。

$$0 \leq E_{\text{ess}} \leq E_{\text{ess, max}} \quad (24)$$

式中: E_{ess} 为储能容量; $E_{\text{ess, max}}$ 为储能系统可安装最大容量。

6) 储能充/放电功率约束

电池储能运行过程中应控制每次充/放电功率不超过其额定值, 如式 (25) 所示。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{ES}, t}^c \leq P_{\text{ES, max}}^c \\ 0 \leq P_{\text{ES}, t}^d \leq P_{\text{ES, max}}^d \end{cases} \quad (25)$$

式中: $P_{\text{ES, max}}^c$ 、 $P_{\text{ES, max}}^d$ 分别为储能系统最大充电功率和最大放电功率。

3.2 内层优化模型

3.2.1 目标函数

内层优化模型以储能所带来的日收益 F_{in} 最大为目标函数。

$$F_{\text{in}} = \sum_{t=1}^T (B_{\text{ess}, t}) \quad (26)$$

式中 $B_{\text{ess}, t}$ 为 t 时刻削峰填谷带来的收益。

3.2.2 约束条件

1) 储能荷电状态约束^[26]

在一个电池充/放电周期内, 电池各时刻储能容量值应保持在一定的范围内, 具体见式 (12)。

2) 储能荷电状态连续性约束

储能荷电状态连续性约束见式 (13)—(14)。

4 优化模型求解

4.1 双层优化算法

外层优化采用多目标粒子群算法 (multi-objective particle swarm optimization algorithm, MOPSO), 粒子群智能优化算法 (particle swarm optimization algorithm, PSO) 是由 Kennedy 和 Eberhart 根据鸟群觅食行为提出的一种以无质量的粒子模拟鸟类的群体智能算法^[27-28]。粒子仅具有速度和位置两个属性, 速度代表移动的快慢, 位置代表移动的方向。且每个粒子 i 在 N 维搜索空间均有一个速度特征和一个位置特征, 粒子可根据上一时刻的这两个特征及历史自身最佳位置与群体最佳位置调整当前最佳速度及最佳位置寻找个体最优值, 个体最优值记为当前个体极值, 以所有粒子的个体极值找到最优值作为当前全局最优解。

具体速度更新公式及位置更新公式如式 (30)—(31) 所示。

$$v_{ij}^{m+1} = wv_{ij}^m + c_1 r_1 (p_{ij}^m - x_{ij}^m) + c_2 r_2 (p_{gj}^m - x_{ij}^m) \quad (30)$$

$$x_{ij}^{m+1} = (1 - v_{ij}^{m+1}) x_{ij}^m + v_{ij}^{m+1} x_{ik}^m \quad (31)$$

式中: v_{ij} 为粒子的速度; x_{ij} 为粒子的位置, 即粒子 i 的节点 j 处的储能大小; x_{ik}^m 为第 m 次迭代时粒子 i 在节点 k 处的储能大小; m 为当前迭代次数; w 为惯性权重, 一般取 1; c_1 、 c_2 为学习因子, 一般取 $c_1 = c_2 = 1.54$; r_1 、 r_2 为均匀分布于 $[0, 1]$ 区间内的随机数; p_{ij} 为第 i 个个体在第 j 维的个体最优位置; p_{gj} 为所有粒子在第 j 处储能的群体最优位置。

粒子群算法大部分情况只能优化单目标问题, 然而在解决实际工程问题时, 多目标^[29]优化问题较为广泛。相较于单目标优化, 多目标优化最显著的特点则是使多个目标同时达到最优值, 本文为实现储能投资边际效益与配电网电压质量二者同时最优的目的, 外层采用多目标粒子群算法进行优化。

多目标粒子群算法在单目标粒子群算法的基础上, 首先比较当前粒子与上一次粒子中不同目标的适应度值以确定不同粒子间的支配关系从而得出当前个体历史最优值 p_{ij}^m , 再将当前个体历史最优值与历史非劣解集合并后比较各适应度值大小得到新的

非劣解集,然后在当前非劣解集中随机挑选任意值作为当前全局最优值 p_{gj}^m 。

多目标粒子群算法本质为同时对多个目标进行最优求解,以两个目标为例,只有某次迭代优化的两个目标值同时优于之前的解才会将之前的优化结果替代,若只有一个目标值优于之前的结果而另一个目标值劣于之前的结果则称该解为非劣解并保留,多目标优化一般会得到一个包含多个非劣解的非劣解集,该解集中的情况均为一个解相较于另一个解一个目标值更优而另一个目标值更劣,因此解集中的解要通过其他方法比较好坏。而本文中有一个目标较为特殊,在求解得到的各个解中该目标值大小相差在 10^{-6} 左右,相当于无差别,因此可在一众非劣解中比较另一个目标值选择最佳解。

内层优化为对储能出力进行调度,而有效集算法适合处理约束条件较多的二次规划问题,因此本文调用MATLAB中的fmincon函数进行优化,通过控制储能充放电使一天内储能带来的效益最大。

4.2 求解流程

具体求解流程图如图2所示。具体求解步骤如下。

1)步骤1:首先进行外层优化,设置粒子规模,并根据所要优化的配电网系统储能接入节点数及所需优化变量设置粒子维度;

2)步骤2:随机初始化各储能接入节点处每个粒子位置及其速度,粒子位置即为储能容量、功率及充放电深度值;

3)步骤3:进入内层优化,采用fmincon函数对储能一天内各时段的出力进行优化;

4)步骤4:回到外层优化,结合内层优化所得储能出力结果计算目标值,对目标值进行比较,更新粒子的个体最优值;

5)步骤5:合并粒子当前个体最优值与历史非劣解集,并比较得到当前非劣解集;

6)步骤6:在当前非劣解集随机选择任意值作为全局最优解;

7)步骤7:判断是否满足迭代条件,若满足,则结束运算,否则返回步骤3。

5 算例分析

5.1 基础参数设置

首先,采用单目标粒子群算法对配电网系统中

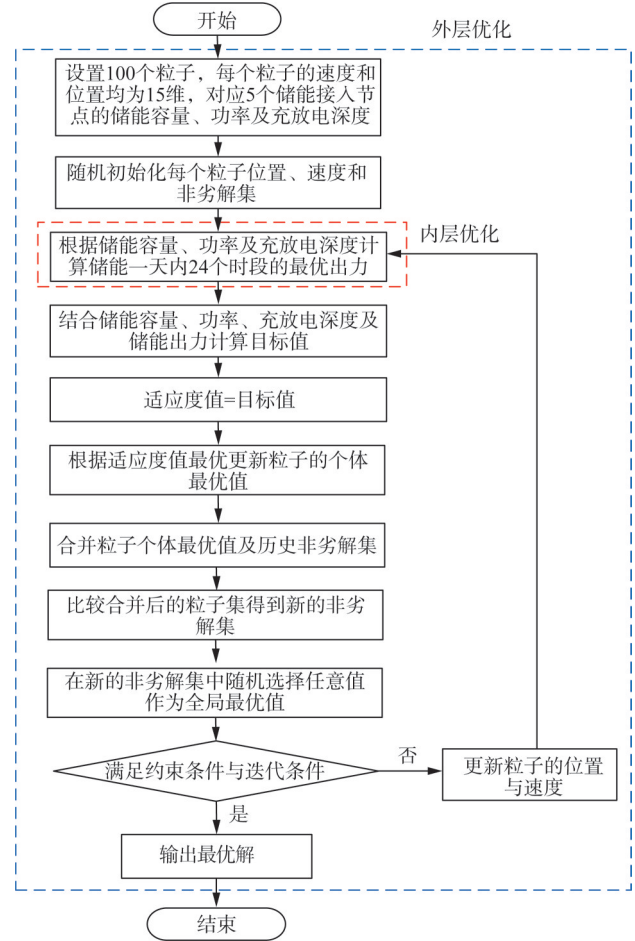


图2 储能双层优化流程图

Fig. 2 Flow chart of energy storage two-layer optimization

储能容量进行优化;然后,采用双层粒子群算法在总容量保持不变的情况下对各节点接入的储能容量再次优化。IEEE 33节点系统拓扑如图3所示,系统划分为10个负荷区域,并对其中有功功率和无功功率数据进行部分修改。其中光伏接入位置如图3所示为节点6、13、17、28、32,容量为120 kW;储能的接入位置也为节点6、13、17、28、32。安装储能系统以锂电池储能为例,具体参数如表1所示;储能分时电价及向电网售电价格表如表2所示;典型光伏出力曲线如图4所示,各负荷区域所对应的日负荷曲线如图5所示。

5.2 不同目标下储能优化结果对比

本文提出的储能优化配置为先基于配电网系统总负荷与总光伏接入量,同时考虑全寿命周期净收益最大配置储能总安装容量,再以边际效益最大及电压偏差最小为目标对各节点所需安装储能容量进行再分配;而传统储能优化大多考虑全寿命周期净

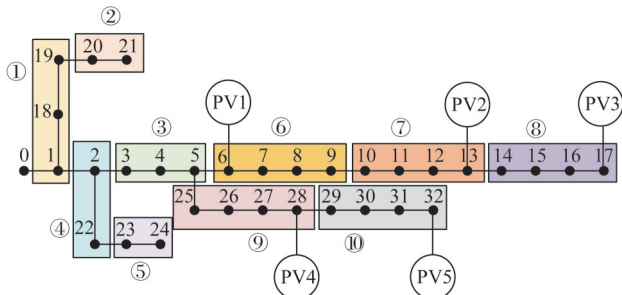


图3 IEEE 33节点系统拓扑图

Fig. 3 Topology of IEEE 33-node system

表 1 储能系统参数

Tab. 1 Energy storage system parameters

参数	数值
储能功率单位投资成本/功率	2 054. 36
储能容量单位投资成本/(元·kW ⁻¹)	1 075. 48
储能单位功率年运维成本/(元·kW ⁻¹ ·a ⁻¹)	83. 72
充放电效率	0. 9
储能一年有效工作天数/d	365
储能使用寿命/a	10
储能贴现率/%	8
储能通货膨胀率/%	2

表 2 分时电价及向电网售电价格表

Tab. 2 Time-of-use prices and price list of electricity sold to the grid

时段	价格/(元·kWh ⁻¹)
23:00–7:00	0. 414
07:00–08:00 和 11:00–18:00	0. 782
08:00–11:00 和 18:00–23:00	1. 149
售电价格	0. 550

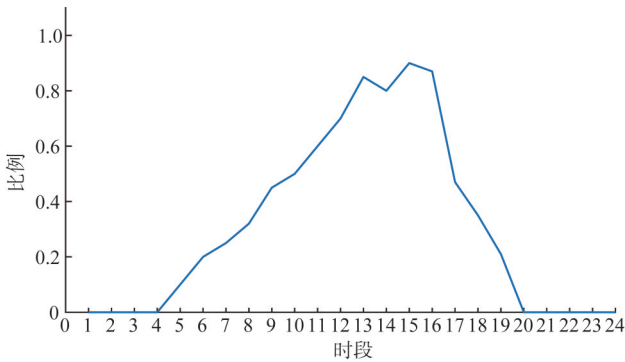


图4 光伏出力曲线

Fig. 4 Photovoltaic output curves

收益最大对各节点储能安装容量进行优化。为验证本文所提模型的优化效果，采用粒子群算法针对3种方案分别进行储能优化，其中方案1为在考虑储

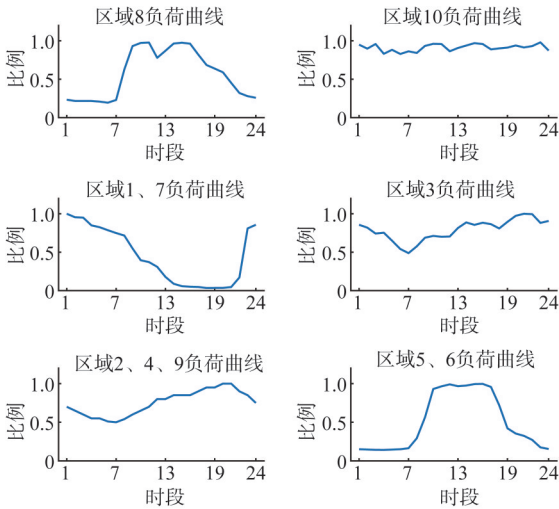


图5 日负荷变化比例

Fig. 5 Daily load variation ratio

能全寿命周期净收益的基础上采用本文所提模型进行储能再次优化，方案2为仅以储能全寿命周期净收益为目标的储能优化，方案3为同时以全寿命周期净收益和电压偏差为目标的储能优化。3种方案优化下储能安装总容量、储能净收益、配电网电压偏差及线损率优化结果如表3所示。

由表3可知，与仅考虑全寿命周期净收益的方案2相比，在先考虑全寿命周期净收益的基础上再

表 3 不同方案下储能优化结果

Tab. 3 Energy storage optimization results under different schemes

方案	安装节点	安装容量/kWh	总容量/kWh	净收益/万元	电压偏差率	线损率	边际效益
1	6	1 250. 92					
	13	282. 181					
	17	403. 853	2 454. 57	1 350. 7	0. 028 4	0. 034 6	1. 218
	28	338. 570					
2	32	179. 050					
	6	695. 703					
	13	422. 317					
	17	483. 257	2 461. 09	1 290. 0	0. 029 5	0. 036 1	1. 112
3	28	580. 433					
	32	279. 383					
	6	751. 978					
	13	250. 949					
	17	293. 831	2 468. 38	1 061. 4	0. 029 1	0. 035 2	1. 105
	28	809. 118					
	32	407. 508					

考虑边际效益及电压质量进行储能容量二次优化的方案1优化所得结果中储能净收益、电压偏差及线损率均有提升;而与同时考虑全寿命周期净收益与电压偏差的方案3相比,方案1的电压偏差与线损率相较于方案3虽提升不够明显,但方案1的储能净收益远高于方案3。即由储能优化结果可知,采用本文所提方案1对储能进行优化后所得结果在净收益上有较大的提高,在电压偏差与线损上相较于传统仅考虑储能全寿命周期净收益的优化方法也有所改善。

以储能1的接入节点6为例,图6为配置储能前日负荷曲线与接入3种方案下储能优化所得容量后的净负荷曲线对比图。由图6可知,在一天前6个时间段下,按方案1配置储能后的负荷填谷效果明显优于方案2与方案3下的填谷情况,而在第10—17个时间段的峰时段下,按照方案1配置储能后的负荷削峰效果也明显方案2与方案3的情况。采用本文所提方案1优化后所得削峰填谷效果较传统方案2与方案3效果更优,即带来的经济效益更好。

本文所提方案下以节点6为例优化所得储能24 h出力情况如图7所示。结合图4和图5的光伏出力曲线与负荷变化比例可知,在第0—5个时间段下,负荷需求量较低,且此时电价低,因此储能在该时间段进行电能储存,并在第10—17个时间段负荷需求较大且电价较高时释放能量;总体上储能实现在谷时存电、峰时放电,以达到提高削峰填谷收益的目的。

因采用本文所提方案还有改善电压质量的效果,为此画出节点电压图以直观体现本文所提方案

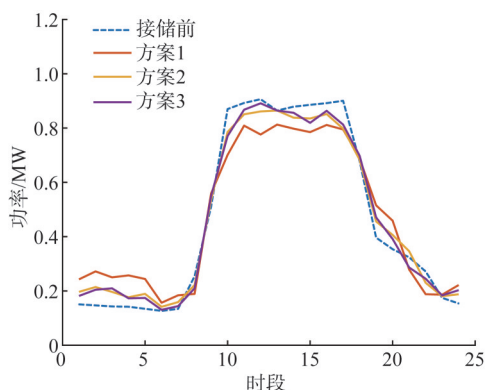


图6 储能配置前后负荷曲线图

Fig. 6 Load curves before and after energy storage configuration

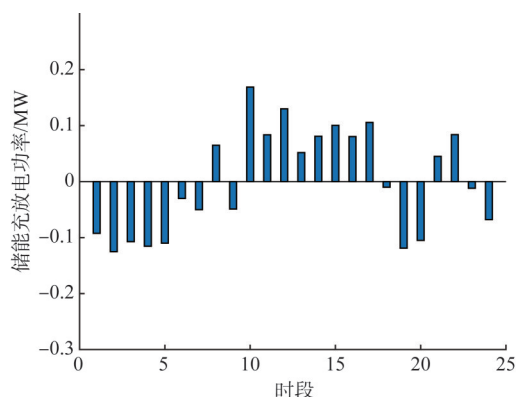


图7 储能出力图

Fig. 7 Energy storage outputs diagram

的改善电压效果。根据各区域日负荷变化比例图可知,第13时段为较多节点负荷处于高峰的时段,以该时段为例,如图8所示为按照本文所提方案接入储能后与接入储能前的电压幅值对比图,由图8可知,接储后原来幅值偏低的节点电压得到明显抬升,整体电压偏差明显降低。

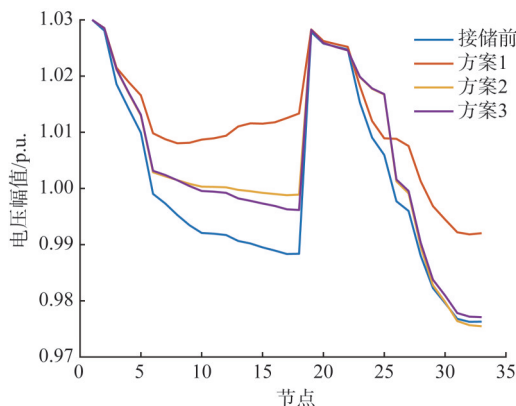


图8 储能配置前后节点电压图

Fig. 8 Node voltage diagram before and after energy storage configuration

图9为接储前后各时段下系统线损率对比图,由图9可知,采用本文所提方案进行储能优化后各时段系统线损率有所下降,且整体优于传统方案下的优化结果。

6 结语

本文提出一种考虑边际效益最优的含分布式光伏配电网储能双层优化配置方法,首先在配电网系统总负荷与总光伏接入量的基础上,采用传统储能全寿命周期净收益目标对储能进行总容量优化,然

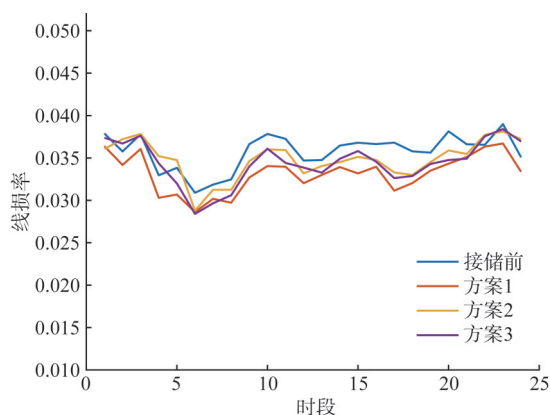


图9 储能配置前后系统线损率对比图

Fig. 9 Comparison of system line loss rates before and after energy storage configuration

后采用考虑边际效益与电压质量的优化模型对配电网系统中各节点所需接入储能容量进行二次分配的储能优化方法。最后将该方法优化后的结果与传统方法优化后的结果进行对比,结果表明本文所提方法可在传统方法的基础上改善经济收益,技术上也使配电网系统的线损率与电压偏差得到一定的改善。

参考文献

- [1] 谢仕伟, 胡志坚, 王珏莹, 等. 基于不确定随机网络理论的主动配电网多目标规划模型及其求解方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34 (5): 1038 - 1054.
XIE Shiwei, HU Zhijian, WANG Jueying, et al. A multi-objective planning model of active distribution network based on uncertain random network theory and its solution algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34 (5): 1038 - 1054.
- [2] 焦乾致. 基于改进多目标粒子群算法的混合储能容量优化配置研究[D]. 林芝: 西藏农牧学院, 2023.
- [3] 黄立滨, 蔡海青, 顾浩瀚, 等. 计及分布式光伏和储能主动支撑的配电网日前日内协调优化运行策略[J]. 南方电网技术, 2024, 18(8): 51 - 59.
HUANG Libin, CAI Haiqing, GU Haohan, et al. Coordinated optimal strategy of day-ahead and intra-day operation of distribution network considering the active support of distributed photovoltaic and energy storage system [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(8): 51 - 59.
- [4] 陈峰, 赵鹏. 基于可逆抽水储能的新能源配电网协调优化方法[J]. 中国电力, 2025, 58(8): 103 - 108.
CHEN Feng, ZHAO Peng. Coordination optimization method for new energy distribution network based on reversible pumped hydro-storage [J]. Electric Power, 2025, 58(8): 103 - 108.
- [5] 李响, 武海潮, 王文雪, 等. 考虑大规模新能源接入的电网性能评价指标体系[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(15): 178 - 187.
LI Xiang, WU Haichao, WANG Wenxue, et al. Performance evaluation index system of a power grid considering large-scale new energy [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52 (15): 178 - 187.
- [6] 陈建国, 郑拓, 郝俊毅, 等. 新能源发电接入下储能系统双层优化模型[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2024, 43 (2): 245 - 251.
CHEN Jianguo, ZHENG Tuo, HAO Junyi, et al. Bi-level optimization model of energy storage systems under new energy generation integration [J]. Journal of South-central Minzu University (Natural Science Edition), 2024, 43 (2): 245 - 251.
- [7] 曾志辉, 刘云鹏, 韦延方, 等. 基于改进蝙蝠算法的混合储能系统容量优化配置[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2023, 42 (5): 130 - 136.
ZENG Zhihui, LIU Yunpeng, WEI Yanfang, et al. Optimal capacity allocation of hybrid energy storage system based on improved bat algorithm [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2023, 42 (5): 130 - 136.
- [8] 陈寒阳, 刘洋, 许立雄, 等. 考虑容量削减的居民用户共享储能优化配置[J]. 电力建设, 2023, 44 (9): 43 - 57.
CHEN Hanyang, LIU Yang, XU Lixiong, et al. Optimal configuration of shared energy storage on residential user side considering capacity reduction [J]. Electric Power Construction, 2023, 44 (9): 43 - 57.
- [9] 孟贤, 郭启蒙, 李颖欢, 等. 考虑双向需求的混合储能容量多目标优化配置[J]. 太阳能学报, 2023, 44 (8): 45 - 53.
MENG Xian, GUO Qimeng, LI Yinghuan, et al. Multi-objective optimal configuration of hybrid energy storage capacity considering two-way demand [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2023, 44 (8): 45 - 53.
- [10] 王欣, 谭永怡, 秦斌. 基于改进MOGOA的风储容量优化配置研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(2): 159 - 169.
WANG Xin, TAN Yongyi, QIN Bin. Improved multi-objective grasshopper algorithm and its application in optimal configuration of wind farm energy storage capacity [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39 (2): 159 - 169.
- [11] 丁明, 吴杰, 张晶晶. 面向风电平抑的混合储能系统容量配置方法[J]. 太阳能学报, 2019, 40 (3): 593 - 599.
DING Ming, WU Jie, ZHANG Jingjing. Capacity optimization method of hybrid energy storage system for wind power smoothing [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2019, 40 (3): 593 - 599.
- [12] 夏新茂, 关洪浩, 丁鹏飞, 等. 基于改进型量子遗传算法的储能系统容量配置与优化策略[J]. 储能科学与技术, 2019, 8 (3): 551 - 558.
XIA Xinmao, GUAN Honghao, DING Pengfei, et al. Capacity allocation and optimization strategy of an energy storage system based on an improved quantum genetic algorithm [J]. Energy Storage Science and Technology, 2019, 8 (3): 551 - 558.
- [13] 汤杰, 李欣然, 黄际元, 等. 以净效益最大为目标的储能电池参与二次调频的容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34 (5): 963 - 972.
TANG Jie, LI Xinran, HUANG Jiyuan, et al. Capacity allocation of BESS in secondary frequency regulation with the goal of maximum net benefit [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34 (5): 963 - 972.

- [14] 禹海峰, 黄婧杰, 蒋诗谣, 等. 计及储能使用年寿命的风电场整体性储能配置[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37 (4): 152 - 160.
YU Haifeng, HUANG Jingjie, JIANG Shiyao, et al. The overall energy storage configuration of wind farms considering these rvice life of electric energy storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37 (4): 152 - 160.
- [15] 刘红. 基于改进粒子群算法的储能调峰容量优化配置研究[J]. 广东电力, 2023, 36 (1): 68 - 76.
LIU Hong. Research on optimal configuration of energy storage peak shaving capacity based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36 (1): 68 - 76.
- [16] 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 placement of energy storage systems in an active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38 (18): 46 - 52.
- [17] 麻常辉, 冯江霞, 张磊, 等. 基于 PSO 算法的风电场储能容量优化计算[J]. 山东科学, 2013, 26 (6): 35 - 39.
MA Changhui, FENG Jiangxia, ZHANG Lei, et al. PSO based model for the optimization calculation of wind farm energy storage capacity[J]. Shandong Science, 2013, 26 (6): 35 - 39.
- [18] 徐奇锋, 王激华, 乔松博, 等. 考虑源-荷匹配的区域电网风光储容量规划-运行联合优化方法[J]. 电力建设, 2024, 45 (8): 85 - 86.
XU Qifeng, WANG Jihua, QIAO Songbo, et al. Planning and operation joint optimization method for wind, solar and energy storage capacity in regional power grids considering source load matching[J]. Electric Power Construction, 2024, 45 (8): 85 - 86.
- [19] 段树勋. 面向分布式风电光伏的储能容量优化配置方法研究[J]. 自动化应用, 2023, 64 (19): 68 - 70.
DUAN Shuxun. Research on optimization configuration method of energy storage capacity for distributed wind power photovoltaics[J]. Automation Application, 2023, 64 (19): 68 - 70.
- [20] 曼昆. Principles of Economics[M]. 北京: 北京大学出版社, 2009: 56 - 58.
- [21] 盛泉源. 基于边际效益系数排序的梯级水电站发电调度方法及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [22] 王旭阳, 杨卫红, 崔文婷, 等. 基于规划角度的中压配电网可靠性提升边际效益分析[J]. 供用电, 2017, 34 (4): 52 - 58.
WANG Xuyang, YANG Weihong, CUI Wenting, et al. Marginal benefit analysis of reliability of medium voltage distribution network from plan point[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34 (4): 52 - 58.
- [23] 林森, 文书礼, 朱森, 等. 考虑碳交易机制的海港综合能源系统电-热混合储能优化配置[J]. 上海交通大学学报, 2024, 58 (9): 1344 - 1365.
LIN Sen, WEN Shuli, ZHU Miao, et al. Optimal allocation of electric-thermal hybrid energy storage for seaport integrated energy system considering carbon trading mechanism [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2024, 58 (9): 1344 - 1365.
- [24] 王骞, 易传卓, 张学广, 等. 兼顾捕碳强度与可再生能源消纳的储能容量配置优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (21): 8295 - 8309.
WANG Qian, YI Chuazhuo, ZHANG Xueguang, et al. Optimization of energy storage capacity sizing considering carbon capture intensity and renewable energy consumption[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43 (21): 8295 - 8309.
- [25] 王凤学, 欧阳森, 辛曦. 计及保供电交易模式和容量市场的用户侧储能优化配置[J]. 高电压技术, 2023, 49 (7): 2785 - 2795.
WANG Fengxue, OUYANG Sen, XIN Xi. Optimal configuration of user-side energy storage considering power supply transaction mode and capacity market [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49 (7): 2785 - 2795.
- [26] 刘旭民, 张彦, 刘晓波. 基于 ICEEMDAN 的微电网混合储能容量配置[J]. 南方电网技术, 2025, 19 (1): 140 - 149.
LIU Xumin, ZHANG Yan, LIU Xiaobo. Hybrid energy storage capacity configuration of microgrid based on ICEEMDAN [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19 (1): 140 - 149.
- [27] 李子健, 郭佩乾, 马宁宁, 等. 融合双重策略粒子群算法的分布式电源配网无功优化[J]. 南方电网技术, 2022, 16 (6): 14 - 22, 81.
LI Zijian, GUO Peiqian, MA Ningning, et al. Reactive power optimization for distribution system with DG by particle swarm optimization algorithm integrating dual strategies [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16 (6): 14 - 22, 81.
- [28] 王盼宝, 徐殿国, 谭岭玲, 等. 基于改进 MOPSO 的多能互补型微电网多元优化运行策略[J]. 南方电网技术, 2022, 16 (10): 130 - 140.
WANG Panbao, XU Dianguo, TAN Lingling, et al. Multivariate optimal operation strategy of multi-energy complementary microgrid based on improved MOPSO [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16 (10): 130 - 140.
- [29] 曾伟哲, 曾启林, 黎恒, 等. 基于 HPSOGA 的多目标电动汽车充电优化[J]. 南方电网技术, 2023, 17 (1): 94 - 102, 135.
ZENG Weizhe, ZENG Qilin, LI Heng, et al. Multi-objective electric vehicle charging optimization based on HPSOGA [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17 (1): 94 - 102, 135.

收稿日期: 2024-05-06; 网络首发日期: 2024-10-23

作者简介:

彭琦(2000), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划与运行, pqff14@163.com;

欧阳森(1974), 男, 通信作者, 副研究员, 博士, 研究方向为电力系统规划与运行, ouyangs@scut.edu.cn;

谢运祥(1965), 男, 教授, 博士, 研究方向为电力电子与电气传动, yxxie@scut.edu.cn。