

考虑配电网脆弱性与经济性的储能优化配置

李红¹, 王浩¹, 董海鹰^{1,2}, 马永泽¹

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 兰州 730070; 2. 兰州交通大学新能源与动力工程学院, 兰州 730070)

摘要: 储能系统的安装能解决大量分布式光伏接入配电网所导致的脆弱性加剧现象, 建立完善的配电网脆弱性评估体系能有效提升储能接入效益。计及光伏接入以及电压与负荷波动对配电网运行脆弱性进行了评估, 建立了配电网综合脆弱性指标。以脆弱性指标、经济性指标以及有功功率网损技术指标为目标函数建立了配电网储能优化配置模型。通过 K-means 聚类算法处理光伏、负荷不确定性, 使用改进多目标差分进化算法(improved multiple objective differential evolution algorithm, IMODE)对模型进行求解。通过混沌序列初始化种群, 提出了自适应变异、交叉因子, 并对变异算子策略进行优化。以甘肃省某县配电网实例进行仿真验证, 所提策略在考虑经济性的前提下能有效保证配电网的安全运行, 使配电网脆弱性降低了 18.9%, 有功功率网损降低了 23.9%。所提脆弱性指标与模型能有效量化配电网的脆弱性并反映储能接入后对脆弱性的改善效果, 可以为储能系统的安装与运行提供技术参考。

关键词: 配电网; 脆弱性指标; 储能系统; 优化配置; 多目标差分进化算法

Optimal Allocation of Energy Storage Considering Distribution Network Vulnerability and Economics

LI Hong¹, WANG Hao¹, DONG Haiying^{1,2}, MA Yongze¹

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. School of New Energy and Power Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The installation of energy storage systems can mitigate the intensified vulnerability caused by the integration of large-scale distributed photovoltaic (PV) systems into the distribution network. Establishing a comprehensive distribution network vulnerability assessment system can effectively enhance the benefits of energy storage integration. The operational vulnerability of the distribution network is evaluated by considering PV integration and fluctuations in voltage and load, a comprehensive vulnerability index for the distribution network is established. A distribution network energy storage optimal allocation model is developed with vulnerability indicators, economic indicators and active power losses indicators as objective functions. The PV and load uncertainties are addressed using the K-means clustering algorithm, and the model is solved with an improved multiple objective differential evolution algorithm (IMODE). By initializing the population with chaotic sequences, adaptive mutation and crossover factors are introduced, along with optimizations to the mutation operator strategy. Simulation verification is conducted on a distribution network case in a county of Gansu Province. The proposed strategy effectively ensures the safe operation of the distribution network while considering economic factors, reducing network vulnerability by 18.9% and active power loss by 23.9%. The proposed vulnerability indexes and model can quantitatively assess distribution network vulnerability and reflect the improvement effects of energy storage integration, providing technical references for the installation and operation of energy storage systems.

Key words: distribution network; vulnerability indicators; energy storage system; optimal allocation; multiple objective differential evolution algorithm

0 引言

随着“双碳”目标的提出,光伏发电装置的数量持续增加,未来的电力系统必将呈现出高比例分布式光伏的新态势^[1-2]。然而,由于光伏发电装置具有波动性和不确定性等特点^[3-6],其渗透率的不断提升将对电力系统构成重大挑战。

储能系统的灵活性与可靠性使其在电力系统中发挥着至关重要的作用^[7-8]。然而,如何以最优方案配置储能已成为近年来众多学者研究的热点议题。文献[9]基于混合储能的全生命周期理论,综合考虑配电网运行的可靠性、储能投资的经济性以及负荷的稳定性构建了配电网储能优化配置模型。文献[10]则以配电网的灵活性及无功需求为基础建立了运行安全性评价体系,并综合考量灵活性、电压波动及经济性指标实现了储能-无功优化的双层配置。文献[11]在风电场混合储能优化配置模型中纳入了碳交易与售电收益以及储能投资成本等因素,并采用混沌粒子群算法对该模型进行求解。

上述文献分别从配电网运行的可靠性、灵活性、经济性等方面对储能进行优化配置研究,但并未考虑负荷与光伏出力的不确定性和周期性,仅以典型日作为代表。此外,目前关于储能接入配电网后对脆弱性改善的相关研究较为匮乏。文献[12]以节点电压偏移值作为脆弱性指标,采用基尼系数构建脆弱性均衡度指标通过加权相加得出综合脆弱性指标。文献[13]从配电网运行角度出发建立了电网脆弱性衡量指标,并使用改进的多目标粒子群算法求解所建模型。文献[14]综合考虑电压波动与负荷均衡度构建了电网综合脆弱性指标,同时兼顾经济性与脆弱性实现了储能优化配置。尽管上述文献从配电网运行角度出发考虑了电压和负荷因素来建立脆弱性指标,但配电网的拓扑结构作为其本质特征之一^[15-16],仍有必要兼顾结构与运行两方面以建立更为全面的综合脆弱性指标。

进而,本文提出了一个基于配电网脆弱性与经济性的储能优化配置模型。首先综合考虑配电网的结构与运行特点构建了综合脆弱性指标;其次兼顾储能投资的经济性及配电网运行过程中的有功功率网损,实现了3个目标之间的最优权衡。同时采用改进的K-均值聚类算法对西北某地区全年的光伏与负荷数据进行处理,以更精准地模拟实际电网情

况。在模型求解方面运用改进的多目标差分进化算法(improved multiple objective differential evolution algorithm, IMODE),针对传统算法收敛性差、易陷入局部最优等问题引入Tent混沌映射进行种群初始化,并提出自适应变异、差分因子及改进的变异策略。最后,以甘肃省定西市某县配电网拓扑为算例进行分析,验证了本文方法的有效性。

1 配电网脆弱性指标构建

1.1 结构脆弱性指标

配电网结构脆弱性评估主要理论依据为复杂网络理论^[17],常见的拓扑参数包括度数、介数以及凝聚度等,在配电网中还要考虑节点的注入功率以及光伏接入造成的影响,因此本文提出以下指标。

1) 改进节点度数

配电网结构呈辐射状,相较于输电网更加稀疏,会导致多数节点的度差别不大甚至相同,因此传统适用于输电网的节点度数并不适用于配电网,首先引入网络效益指标,定义节点*i*的网络效益指标为:

$$G_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{1}{d_{ij}} \quad (1)$$

式中: G_i 为节点*i*的网络效益; N 为节点数量; d_{ij} 为节点*i*、*j*间的电气距离。

网络效益指标从全局考虑根据节点的重要程度衡量该节点与其他节点的综合距离, G_i 越大表明节点*i*与其他节点的联系越紧密,其重要程度越大。

基于网络效益指标并融入凝聚度思想考虑相邻节点的度数,定义改进节点度数为:

$$D_{i1} = G_i \cdot \frac{D_i}{\bar{D}} \sum_{j \in V_{ap}} D_j \quad (2)$$

式中: D_{i1} 为改进节点度数; D_i 为与节点*i*相连的边数; $\bar{D}$ 为节点平均度数; V_{ap} 为与节点*i*相邻节点*j*的集合。

2) 改进节点介数

传统节点介数指的是网络拓扑中经过该节点最短路径的数量,未考虑配电网中的潮流分布以及光伏接入影响,定义改进节点介数为:

$$D_{i2} = \frac{1}{S_b} \sum_{m \in V_1; n \in V_2} \sqrt{S_m S_n} R_{mn}(i) \quad (3)$$

式中: D_{i2} 为改进节点介数; S_b 为基准容量; V_1 、 V_2 分别为电源与负荷节点的集合; S_m 、 S_n 分别为电源节点*m*发出的功率与负荷节点*n*消耗的功率;

$R_{mn}(i)$ 为判断函数, 若 m 与 n 节点间的最短路径经过节点 i 则为 1, 反之为 0。

3) 节点注入功率比

分布式光伏的接入直接影响配电网中潮流与功率分布, 节点注入功率比能直观体现出各节点的变化, 定义节点注入功率比为:

$$D_{i3} = P_i / S_b \quad (4)$$

式中: D_{i3} 为节点注入功率比; P_i 为注入节点 i 的有功功率。

综上, 可以得到归一化后的配电网结构脆弱性指标 $D(i)$ 。

$$D(i) = \alpha_1 D_{i1} + \alpha_2 D_{i2} + \alpha_3 D_{i3} \quad (5)$$

$$D'(i) = \frac{D(i) - D(i_{\min})}{D(i_{\max}) - D(i_{\min})} \quad (6)$$

式中: α_1 、 α_2 、 α_3 为各指标具体权值; $D(i)$ 为节点 i 的结构脆弱性指标; $D(i_{\max})$ 、 $D(i_{\min})$ 分别为所有节点结构脆弱性指标最大、最小值。

1.2 运行脆弱性指标

稳定的节点电压与均衡的负荷分布对配电网的安全运行有着重要意义, 储能接入电网侧后会对电能质量与负荷波动产生有效改善^[18], 因此有必要计及电压与负荷从配电网运行方面构建脆弱性指标。

1) 电压脆弱性指标

以节点电压偏移标准值作为电压脆弱性指标能直观反映该节点电压稳定性, 电压偏移越大, 该节点脆弱性越高。电压脆弱性指标构建如下。

$$v(i, t) = \left| \frac{U_{i,t} - U_{i,0}}{0.07} \right| \quad (7)$$

$$V(i, t) = \frac{v(i, t) - v(i_{\min}, t)}{v(i_{\max}, t) - v(i_{\min}, t)} \quad (8)$$

式中: $v(i, t)$ 为 t 时刻节点 i 的电压偏移值; $U_{i,t}$ 、 $U_{i,0}$ 分别为 t 时刻节点 i 的实际电压与额定电压; $V(i, t)$ 为归一化后的电压偏移值; $v(i_{\max}, t)$ 、 $v(i_{\min}, t)$ 分别为 t 时刻所有节点电压偏移最大、最小值。

定义 t 时刻配电网电压脆弱性指标 $B_1(t)$ 为:

$$B_1(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V(i, t) \quad (9)$$

2) 负荷均衡度指标

配电网节点负荷均衡分布对于确保电网稳定运行、提高供电质量具有重要意义^[19]。均衡的负荷分布能够降低系统的瞬时负荷波动、提高供电质量。负荷均衡度指标构建如下。

$$l(i, t) = \left| \frac{P_{i,t} - P_{i,av}}{P_{i,av}} \right| \quad (10)$$

$$L(i, t) = \frac{l(i, t) - l(i_{\min}, t)}{l(i_{\max}, t) - l(i_{\min}, t)} \quad (11)$$

式中: $l(i, t)$ 为 t 时刻节点 i 的负荷偏移值; $P_{i,t}$ 、 $P_{i,av}$ 分别为 t 时刻节点 i 的实际功率与节点 i 的平均功率; $L(i, t)$ 为归一化的电压偏移值; $l(i_{\max}, t)$ 、 $l(i_{\min}, t)$ 分别为 t 时刻所有负荷偏移最大、最小值。

均衡指数法能准确地反映数据的均衡程度, t 时刻的负荷均衡度 $B_2(t)$ 如式 (12) 所示, 其数值越大代表该时刻负荷的分布越不均衡。

$$\left\{ \begin{aligned} B_2(t) &= 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N R(i, t) \log_2 \left(\frac{1}{R(i, t)} \right)}{\log_2 N} \right]^{2\pi} \\ R(i, t) &= \frac{L(i, t)}{\sum_{i=1}^N L(i, t)} \end{aligned} \right. \quad (12)$$

式中 $R(i, t)$ 为标准化下的负荷波动。

1.3 综合脆弱性指标

使用结构脆弱性指标修正运行脆弱性指标, 通过赋权相加 (权重系数取 $\mu_1 = \mu_2 = 0.5$), 得到综合脆弱性指标如式 (13) — (15) 所示。

$$B'_1(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D'(i) \cdot V(i, t) \quad (13)$$

$$B'_2(t) = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N D'(i) \cdot R(i, t) \log_2 \left(\frac{1}{R(i, t)} \right)}{\log_2 N} \right]^{2\pi} \quad (14)$$

$$I_{cv} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (\mu_1 B'_1(t) + \mu_2 B'_2(t)) \quad (15)$$

式中: $B'_1(t)$ 、 $B'_2(t)$ 分别为修正后的运行脆弱性指标; $D'(i)$ 为归一化之后的结构脆弱性指标; I_{cv} 为配电网综合脆弱性指标; μ_1 、 μ_2 均为权重系数; T 为统计时间周期, 本文设定为 24 h。

2 配电网储能优化配置模型

2.1 目标函数

储能接入配电网的规划属于多目标优化问题。合理的储能规划能够最大化储能的作用, 有效提高电能质量、降低有功功率网损, 提高配电网的经济性^[20-21]。但储能的安装运维成本较高, 也要考虑其

成本因素。本文综合上述因素, 建立以下目标函数。

1) 综合脆弱性指标

将第 1 节提出的配电网综合脆弱性指标 F_1 作为储能优化配置模型的目标函数之一。

$$F_1 = I_{CV} \quad (16)$$

2) 经济性指标

储能接入配电网同样要考虑其经济性, 本文建立的经济性指标 F_2 表达式如下。

$$F_2 = C_{es}^{in} + C_{es}^{om} + C_{pur} \quad (17)$$

$$\begin{cases} C_{es}^{in} = \sum_{i=1}^N \frac{\rho_{es,i}}{365} c_{es,i} E_{es,i}, \quad \rho_{es,i} = \frac{k(1+k)^y}{(1+k)^y - 1} \\ C_{es}^{om} = c_{om} \sum_{t=1}^T |P_{es,i}(t)| \\ C_{pur} = \lambda_{price}(t) \sum_{t=1}^T P_{grid}(t) \end{cases} \quad (18)$$

式中: C_{es}^{in} 、 C_{es}^{om} 、 C_{pur} 分别为储能配置、储能运维以及主网购电成本; $\rho_{es,i}$ 为等年值投资转换系数; k 为贴现率; y 为储能实际寿命; $c_{es,i}$ 为接入节点 i 的储能单位容量投资成本; $E_{es,i}$ 为节点 i 处储能容量; c_{om} 为储能单位功率运维成本; $P_{es,i}(t)$ 为 t 时刻节点 i 处储能功率; $\lambda_{price}(t)$ 为 t 时刻电网分时电价; $P_{grid}(t)$ 为 t 时刻主网注入有功功率。

3) 有功功率网损

储能的接入能减少配电网有功网损从而提高经济性^[22]。配电网有功功率网损表达式如下。

$$F_3 = \sum_{t=1}^{24} \sum_{i,j \in M_b} [G_{ij}(U_{i,t}^2 + U_{j,t}^2 - 2U_{i,t}U_{j,t}\cos\delta_{ij,t})] \quad (19)$$

式中: i 、 j 为节点; t 为时刻; M_b 为配网中各支路的集合; G_{ij} 为两节点间电导; $U_{i,t}$ 、 $U_{j,t}$ 分别为 t 时刻 i 、 j 节点的电压; $\delta_{ij,t}$ 为 t 时刻 i 、 j 节点间相角差。

综合上述指标, 本文所提储能多目标优化配置模型 $\min F$ 为:

$$\min F = \min \{ F_1, F_2, F_3 \} \quad (20)$$

2.2 约束条件

考虑配电网系统以及储能系统的运行约束, 建立如下约束条件。

1) 配电网潮流约束

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (21)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为节点 i 有功、无功功率; U_i 、

U_j 分别为节点 i 和 j 的电压幅值; B_{ij} 为电纳; 为节点 i 和 j 间的相角差。

2) 节点电压约束

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (22)$$

式中 $U_{i\max}$ 、 $U_{i\min}$ 分别为节点 i 电压最大、最小值。

3) 储能运行约束

$$\begin{cases} |P_{es,i}| \leq P_{es,i}^{\max} \\ W_{i,\min} \leq W_i \leq W_{i,\max} \\ S_{\min}^{\text{SOC}} \leq S_j(t) \leq S_{\max}^{\text{SOC}} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $P_{es,i}^{\max}$ 为储能充放电最大功率; $W_{i,\max}$ 、 $W_{i,\min}$ 分别为储能容量上、下限; $S_j(t)$ 为节点 j 在 t 时刻的荷电状态; $S_{\max}^{\text{SOC}}$ 、 $S_{\min}^{\text{SOC}}$ 分别为储能荷电状态最大、最小值。

3 改进 MODE 算法

多目标差分进化算法 (multiple objective differential evolution algorithm, MODE) 在多目标优化算法中以寻优速度快, 参数设置简单而被广泛应用^[23]。但传统 MODE 存在容易陷入局部最优、Pareto 解集多样性较差等问题^[21]。因此本文作出以下改进。

1) Tent 混沌映射初始化种群

Tent 映射能产生具有良好随机性和遍历性的混沌序列^[24], 有助于在初始化种群时覆盖更广泛的搜索空间, 提高种群多样性, 从而提高收敛效率, 同时也能使算法更好地探索解空间, 避免过早收敛到局部最优。混沌序列表达式如下。

$$Z_{k+1}^n = \begin{cases} \frac{Z_k^n}{u}, & 0 \leq Z_k^n \leq u \\ \frac{1 - Z_k^n}{1 - u}, & u \leq Z_k^n \leq 1 \end{cases} \quad (26)$$

式中: Z_{k+1}^n 、 Z_k^n 分别为第 n 个种群在第 $k+1$ 次、第 k 次迭代产生的混沌值; n 为种群数量; u 为 $[0, 1]$ 的随机数。

个体初始位置序列 X_k^n 可表示为:

$$X_k^n = X_{k,\min}^n + Z_k^n (X_{k,\max}^n - X_{k,\min}^n) \quad (27)$$

式中 $X_{k,\max}^n$ 、 $X_{k,\min}^n$ 分别为 X_k^n 序列的最大值与最小值。

2) 自适应变异、交叉因子

研究表明, MODE 算法的交叉、变异因子会对收敛速度与精度产生较大影响^[25], 较大的变异因子 F 与交叉因子 C^R 有助于增强算法的探索能力, 但也会减缓算法的收敛速度; 较小的变异、交叉因子则相反, 从而导致算法过早收敛到陷入局部最优。因此, 本文提出随迭代次数变化的自适应交叉、变异

因子,具体公式如下。

$$\begin{cases} F = F_{\min} + (F_{\max} - F_{\min}) \cdot \left(\frac{G_{\max} - G + 1}{G_{\max}} \right)^2 \\ C^R = C_{\min}^R + (C_{\max}^R - C_{\min}^R) \cdot \left(\frac{G_{\max} - G + 1}{G_{\max}} \right)^2 \end{cases} \quad (28)$$

式中: $F_{\max}$ 、 $F_{\min}$ 分别为变异因子最大、最小值; $C_{\max}^R$ 、 $C_{\min}^R$ 分别为交叉因子最大、最小值; G 为当前迭代次数; $G_{\max}$ 为最大迭代数量。

3) 变异算子优化策略

传统 MODE 算法中变异算子的基项取自种群中的随机个体,但并不是所有个体都分布在最优解附近,这可能会导致变异算子远离最优解,降低算法收敛效率。MODE 所建立的外部档案为变异算子的优化提供了有利条件,由于外部档案中储存的均为非支配解,因此将变异算子的基项优化为从外部档案中选取,该方法融入贪心策略思想,有助于加快算法收敛速度,优化后的变异算子表达式如下。

$$V_{i,G+1} = x_{rs,G} + F \cdot (x_{r1,G} - x_{r2,G}) \quad (29)$$

式中: $V_{i,G+1}$ 为第 i 个个体在第 $G+1$ 代的变异向量; $x_{rs,G}$ 为外部档案中的非支配个体; $x_{r1,G}$ 、 $x_{r2,G}$ 分别为非外部档案中不相同的两个个体;下标 rs 表示随机选取的索引,用于从对应集合中选取非支配个体。

得到 Pareto 非支配解集后本文采用基于信息熵的 TOPSIS 法选取最优解^[26]。

综上,本文所提考虑配电网脆弱性与经济性的配网储能优化配置流程如图 1 所示。

4 算例分析

本文通过选用甘肃省定西市某县配电网系统拓扑图进行仿真与分析,在节点 5、21、24、29、30 接入光伏,如图 2 所示。

仿真中,储能接入数量设置为 2,由于 1 节点为平衡节点,将储能允许接入位置设置为节点 2—31,仿真中涉及到的参数如表 1 所示。

4.1 典型场景生成

本文采用改进 K-均值聚类算法对甘肃省某县全年光-荷数据进行处理^[27],根据手肘法设置聚类数量为 3,如图 3—4 所示,各场景概率如表 2 所示。

4.2 优化配置结果

为了验证本文所提储能优化配置模型以及算法有效性,设定如下 3 个方案进行对比。

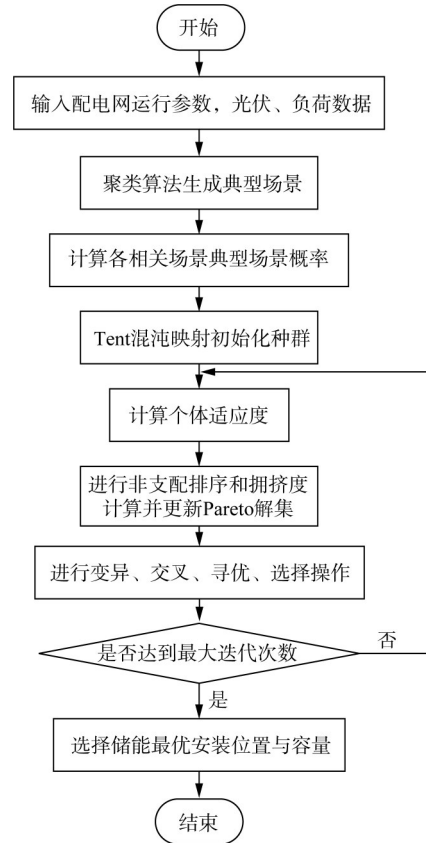


图 1 储能优化配置流程图

Fig. 1 Flowchart for optimal allocation of energy storage system

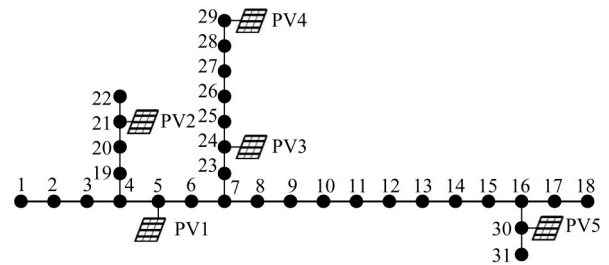


图 2 甘肃省某县配电网系统

Fig. 2 Distribution network system of a county in Gansu province

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	取值	参数	取值
K_0	3	种群数量	50
$N_{\min}$	140	$G_{\max}$	100
$S_{\max}^{\text{SOC}}$	0.9	$F_{\max}$	0.8
$S_{\min}^{\text{SOC}}$	0.2	$F_{\min}$	0.3
η_c	0.8	$S_{\max}^R$	0.8
η_d	0.8	$S_{\min}^R$	0.2

注: K_0 、 $N_{\min}$ 、 η_c 、 η_d 分别为聚类数量、聚类算法迭代次数、储能充、放电效率系数。

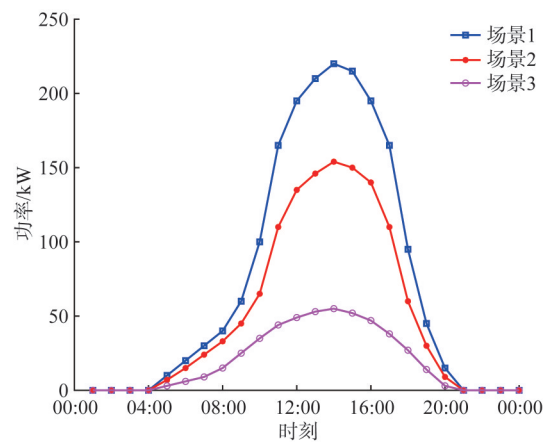


图3 典型光伏场景
Fig. 3 Typical PV scenarios

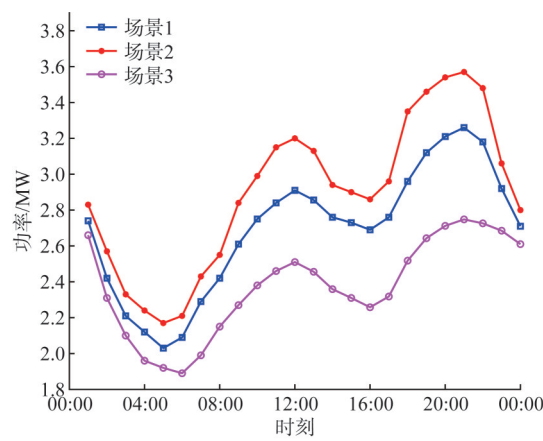


图4 典型负荷场景
Fig. 4 Typical load scenarios

表 2 典型场景出现概率
Tab. 2 probabilities of occurrence of typical scenarios

场景	概率
1	0.57
2	0.31
3	0.12

方案 1: 不接入储能。
方案 2: 采用传统 MODE 算法求解模型。
方案 3: 采用 IMODE 算法求解模型。
3 种场景下的仿真结果如表 3 所示, 脆弱性指标与有功功率网损变化如图 5—6 所示。

由图 5 可以看出, 在光伏配电网中, 未安装储能时, 凌晨(23:00—04:00), 光伏不出力, 同时负荷需求不大, 因此脆弱性较小; 上午(05:00—12:00), 光伏出力开始增大, 负荷需求逐步增加, 节点电压的偏移与负荷的分布不均使得脆弱性有一定增大;

表 3 储能优化配置结果
Tab. 3 Results of optimal allocation of energy storage

方案	接入位置	容量/MWh	F_1	F_2 /万元			F_3 /MW
				C_{es}^{in}	C_{es}^{om}	C_{pur}	
1			0.496	0	0	3.264	4.587
2	17	0.872	0.422	0.315	0.022	2.836	3.968
	24	0.795					
3	7	0.849	0.402	0.309	0.021	2.794	3.488
	15	0.808					

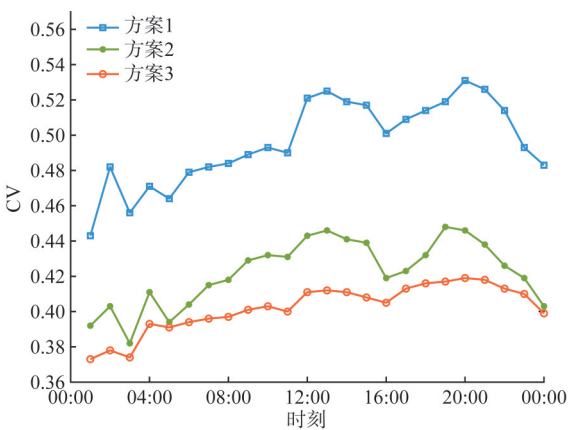


图5 不同方案下的脆弱性指标变化曲线
Fig. 5 Vulnerability indicators variation curves for different schemes

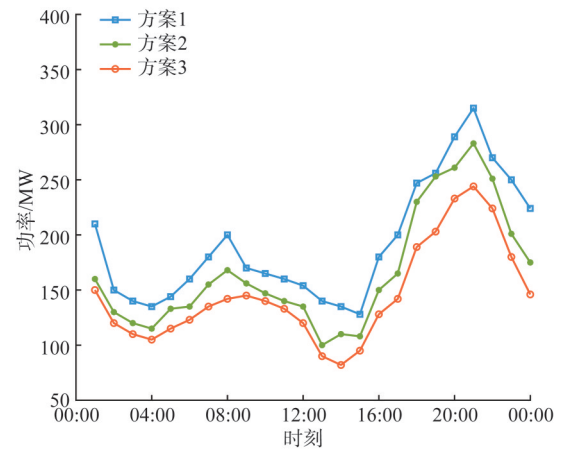


图6 不同方案下的配电网有功功率网损变化曲线
Fig. 6 Variation curves of active network losses in distribution networks under different schemes

中午(12:00—15:00), 光伏出力逐步达到最大值, 导致节点电压偏移值进一步增大, 从而脆弱性显著增大; 下午(16:00—18:00), 光伏出力开始降低而负荷需求先降低后逐渐升高, 脆弱性同样表现为先减小而后开始增大; 晚间(19:00—22:00), 负荷需求不断增加, 光伏出力减小至 0, 线路上供电压力

增大,导致脆弱性明显上升。

由表3可以看出,方案1未接入储能时的脆弱性指标与有功网损高于其他方案,而经济性指标中虽然不含储能投资费用,但主网购电成本最高,导致总指标高于其他方案;方案2中储能接入后通过合理的充放电策略有效地降低了配电网脆弱性以及有功功率网损,提高了配电网运行安全性与经济性;方案2与方案3所得储能接入位置比较相近,均在配电网节点末端或光伏支路交汇处,而节点7—15之间以及两节点周围的其他节点更容易出现电压越限问题,在这两节点接入储能具有更高的收益,相较于方案2,方案3的储能投资费用更少,两种方案下配电网脆弱性分别降低14.9%以及18.9%,有功功率网损降低了13.6%以及23.9%,因此方案3所得储能规划方案更加合理,可以看出,本文改进算法所得的储能优化配置方案在降低脆弱性和网损上更有优势。

以下分析不同方案下配电网的节点电压变化情况,以14:00为例,该时刻光伏出力较高,用户负荷需求较低,配电网中易出现电压越限。如图7所示,配置储能有效提升了系统的电压质量,配电网末端节点18与节点31的欠电压以及2节点与19节点的过电压情况都得到了极大改善,本文改进算法所得方案改善电压越限的效果更加明显。

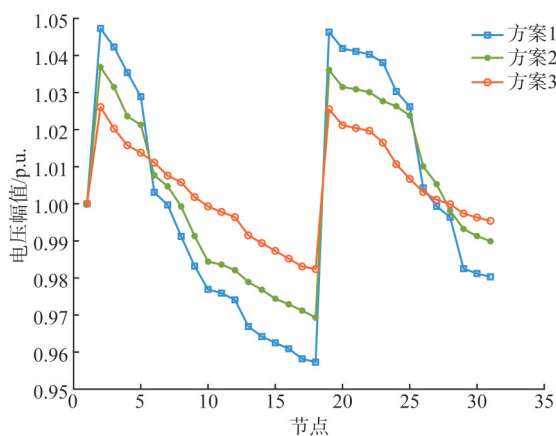


图7 不同方案下的节点电压变化曲线

Fig. 7 Node voltage variation curves for different schemes

为验证本文所提IMODE算法的有效性,分别采用MODE、MOPSO、MOGWO^[28]3种方法进行求解,以经济性指标的收敛值为对比,如图8所示。

从图8中可以看出,MODE、MOPSO、MOGWO算法均存在不同程度的早熟导致陷入局部最优,初始化种群不均匀降低算法收敛速度。本文

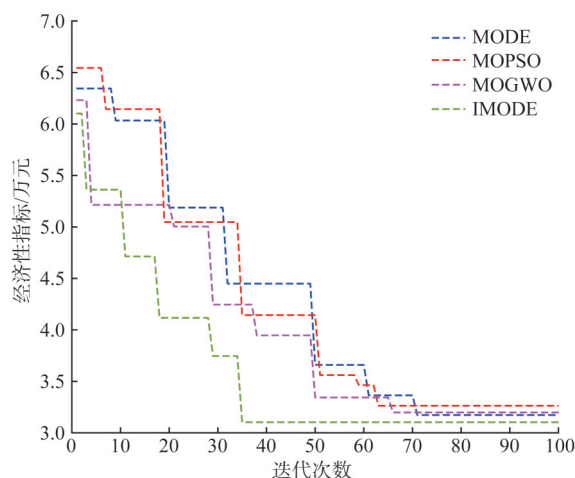


图8 算法改进前后收敛曲线

Fig. 8 Convergence curves before and after algorithm improvement

所提IMODE算法增强了初始化种群的多样性,在迭代过程的早期搜索范围大、后期收敛速度快,提出的变异算子优化策略使得算法能够快速找到更优解,从而提高了算法的寻优能力与计算效率。

4.3 储能容量比例灵敏性分析

以方案3得到的储能安装容量为基准,储能安装节点与数量不变,由120%依次减少储能容量比例,得到的脆弱性指标与经济性指标如图9所示。

根据图9可以看出,随着2个节点储能接入容量的不断增加配电网的脆弱性指标会随着减小,这是由于储能通过合理的充放电策略有效降低了配电网节点电压越限情况,均衡了负荷分布,但当储能接入容量达到120%时脆弱性指标减小的幅度明显降低,说明储能接入的容量产生了冗余;经济性指标随着储能接入容量在40%之后才开始减小,在60%之后才开始盈利,说明储能接入的容量需要达到一定水平才会产生经济效益,经济性指标在储能接入容量为100%时达到最优,验证了本文方案的合理性,当接入容量为120%时经济性指标大幅上升,这是由于储能的冗余容量产生了额外的经济损耗。

5 结论

本文从储能接入配电网后对脆弱性的改善角度出发建立了储能优化配置的模型,采用IMODE算法求解得到了储能最优规划策略。通过多方案的对比试验得到如下结论。

1) 使用改进K-means聚类算法处理全年光伏、

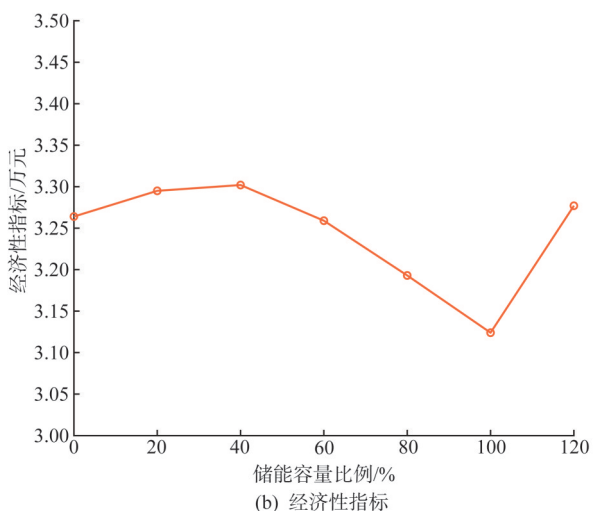
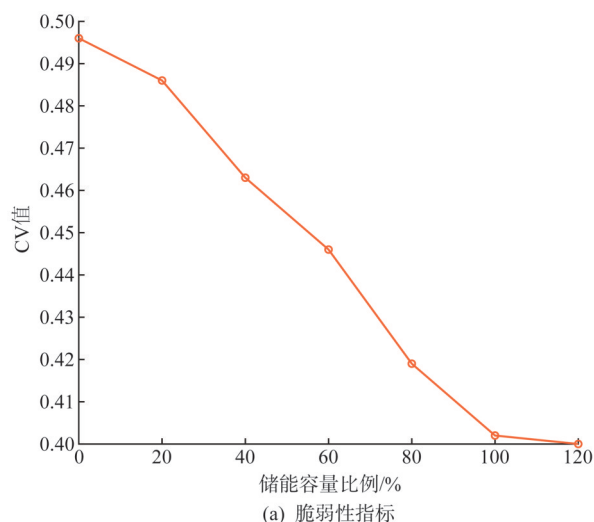


图9 储能比例灵敏性分析

Fig. 9 Sensitivity analysis of energy storage proportion

负荷数据得到3种典型场景,有效反映了光伏与负荷在全年的不确定性。

2) 从配电网结构与运行两个角度构建综合脆弱性指标,基于该指标并考虑经济性与有功网损建立储能优化配置模型,有效量化了储能接入配电网后对脆弱性的改善效果,在实现储能最优规划的同时提高了配电网运行安全性与可靠性。

3) 将 Tent 混沌映射引入 MODE 初始化种群、设计自适应变异、交叉因子并优化变异算子,提高了算法的寻优能力与收敛速度,得到的储能优化配置结果均优于传统 MODE,使配电网脆弱性降低了 18.9%,有功功率网损降低了 23.9%,显著改善了节点电压越限情况。

参考文献

- [1] 李建林, 姜冶蓉, 马速良, 等. 新型电力系统下分布式储能应用场景与优化配置[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 30–41.
LI Jianlin, JIANG Yerong, MA Suliang, et al. Application scenarios and optimal configuration of distributed energy storage under the new power system[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 30–41.
- [2] ABD EL-KAREEM A H, ABD ELHAMEED M, ELKHOLY M M. Effective damping of local low frequency oscillations in power systems integrated with bulk PV generation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(4): 1–13.
- [3] 李更丰, 孙少华, 别朝红, 等. 面向新型电力系统弹性提升的储能优化配置与灵活调度研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4084–4095.
LI Gengfeng, SUN Shaohua, BIE Zhaohong, et al. Review on optimal configuration and flexible scheduling research of energy storage for resilience improvement of new power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4084–4095.
- [4] LI J, CHEN S, WU Y, et al. How to make better use of intermittent and variable energy? a review of wind and photovoltaic power consumption in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021 (137): 110626.1–110626.10.
- [5] JIANG Y, KANG L, LIU Y. Optimal configuration of battery energy storage system with multiple types of batteries based on supply-demand characteristics[J]. Energy, 2020 (206): 118093.1–118093.9.
- [6] 卢有飞, 邹时容, 刘璐豪, 等. 基于知识共享的高比例可再生能源系统发电控制[J]. 高压电器, 2024, 60(10): 33–45.
LU Youfei, ZOU Shirong, LIU Luhao, et al. Generation control of high percentage renewable energy systems based on knowledge sharing[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(10): 33–45.
- [7] 徐君威, 李爱魁, 李武峰, 等. 基于灵活性调节资源动态演变的储能容量预测[J]. 太阳能学报, 2024, 45(8): 17–26.
XU Junwei, LI Aikui, LI Wufeng, et al. Prediction of energy storage capacity based on flexible regulation of resource dynamic evolution[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(8): 17–26.
- [8] 王凯亮, 孔慧超, 李俊辉, 等. 考虑配电网可靠性的储能系统选址定容优化[J]. 南方电网技术, 2022, 16(4): 21–29.
WANG Kailiang, KONG Huichao, LI Junhui, et al. Optimization of energy storage system location and capacity considering the reliability of distribution network[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(4): 21–29.
- [9] 李嘉乐, 杨博, 胡袁炜骥, 等. 考虑需求侧响应的电-氢混合储能系统选址定容[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3698–3714.
LI Jiale, YANG Bo, HU Yuanweiji, et al. Location and capacity planning of electricity hydrogen hybrid energy storage system considering demand response[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3698–3714.
- [10] 江友华, 刘弘毅, 叶尚兴, 等. 考虑电压质量及灵活性的高比例新能源配电网储能-无功优化配置[J]. 电力建设, 2023, 44(9): 68–79.
JIANG Youhua, LIU Hongyi, YE Shangxing, et al. Energy-storage and reactive-power optimization of a high-proportional new energy distribution network considering voltage quality

- and flexibility[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 68 – 79.
- [11] 陈崇德, 郭强, 宋子秋, 等. 计及碳收益的风电场混合储能容量优化配置[J]. 中国电力, 2022, 55(12): 22 – 33.
CHEN Chongde, GUO Qiang, SONG Ziqiu, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage capacity for wind farms considering carbon trading revenue[J]. Electric Power, 2022, 55(12): 22 – 33.
- [12] 李仁杰, 罗萍萍, 林济铿. 考虑有源配电网可靠性和脆弱性的储能多目标规划[J]. 南方电网技术, 2024, 18(8): 39 – 50.
LI Renjie, LUO Pingping, LIN Jikeng. Multi-objective planning of energy storage considering reliability and vulnerability of active distribution network[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(8): 39 – 50.
- [13] 闫群民, 董新洲, 穆佳豪, 等. 基于改进多目标粒子群算法的有源配电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 11 – 19.
YAN Qunmin, DONG Xinzhou, MU Jiahao, et al. Optimal configuration of energy storage in an active distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 11 – 19.
- [14] 胡伟, 杨硕. 考虑配电网脆弱性的储能双层优化配置模型[J]. 智慧电力, 2024, 52(6): 1 – 8.
HU Wei, YANG Shuo. Dual-tiered optimization configuration model for energy storage considering distribution network vulnerability[J]. Smart Power, 2024, 52(6): 1 – 8.
- [15] 王子欣, 苗世洪, 郭舒毓, 等. 考虑分布式电源出力随机特性的配电网节点脆弱性评估[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 33 – 40.
WANG Zixin, MIAO Shihong, GUO Shuyu, et al. Node vulnerability evaluation of distribution network considering randomness characteristic of distributed generation output[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 33 – 40.
- [16] 吴辉, 彭敏放, 张海艳, 等. 基于复杂网络理论的配电网节点脆弱度评估[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2017, 14(1): 38 – 45.
WU Hui, PENG Minfang, ZHANG Haiyan, et al. Node vulnerability assessment for distribution network based on complex network theory[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2017, 14(1): 38 – 45.
- [17] 史文超, 李晓明, 王孝琳, 等. 配电网脆弱性评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(12): 125 – 131.
SHI Wenchao, LI Xiaoming, WANG Xiaolin, et al. Vulnerability assessment method for distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2018, 30(12): 125 – 131.
- [18] HAN S, ZHANG L, LIU Y, et al. Quantitative evaluation method for the complementarity of wind-solar-hydro power and optimization of wind-solar ratio[J]. Applied Energy, 2019 (236): 973 – 984.
- [19] 安东, 杨德宇, 武文丽, 等. 基于改进多目标蜉蝣算法的配电网储能系统最优选址定容[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10): 31 – 39.
AN Dong, YANG Deyu, WU Wenli, et al. Optimal location and sizing of battery energy storage systems in a distribution network based on a modified multi-objective mayfly algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10): 31 – 39.
- [20] 王一飞, 董新伟, 杨飞, 等. 基于配电网电压质量的分布式储能系统优化配置研究[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 126 – 133.
WANG Yifei, DONG Xinwei, YANG Fei, et al. Optimal configuration of distributed energy storage system based on voltage quality of distribution network[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 126 – 133.
- [21] 李建林, 邸文峰, 李雅欣, 等. 长时储能技术及典型案例分析[J]. 热力发电, 2023, 52(11): 85 – 94.
LI Jianlin, DI Wenfeng, LI Yaxin, et al. Analysis of long-term energy storage technologies and typical case studies[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(11): 85 – 94.
- [22] 杜鹏, 米增强, 贾雨龙, 等. 基于网损灵敏度方差的配电网分布式储能位置与容量优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 103 – 109.
DU Peng, MI Zengqiang, JIA Yulong, et al. Optimal placement and capacity of distributed energy storage in distribution system based on the sensitivity variance of network loss[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 103 – 109.
- [23] 马理胜. 舰船电网重构的多目标差分进化算法研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2019.
- [24] 赵超, 王斌, 孙志新, 等. 基于改进灰狼算法的独立微电网容量优化配置[J]. 太阳能学报, 2022, 43(1): 256 – 262.
ZHAO Chao, WANG Bin, SUN Zhixin, et al. Optimal configuration optimization of islanded microgrid using improved grey wolf optimizer algorithm[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2022, 43(1): 256 – 262.
- [25] 陈昊, 李琳, 王亚琦, 等. 多目标差分进化算法改进与电工钢片磁致伸缩模型参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(5): 2047 – 2058.
CHEN Hao, LI Lin, WANG Yaqi, et al. Improvement of multi-objective differential evolution algorithm and parameters identification of magnetostriction model of electrical steel sheet[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(5): 2047 – 2058.
- [26] 陆立民, 褚国伟, 张涛, 等. 基于改进多目标粒子群算法的微电网储能优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 116 – 124.
LU Limin, CHU Guowei, ZHANG Tao, et al. Optimal configuration of energy storage in a microgrid based on improved multi-objective particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 116 – 124.
- [27] 宋学伟, 刘玉瑶. 基于改进 K-means 聚类的风光发电场景划分[J]. 发电技术, 2020, 41(6): 625 – 630.
SONG Xuewei, LIU Yuyao. Wind and photovoltaic generation Scene division based on improved K-means clustering[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(6): 625 – 630.
- [28] 毛志宇, 蒋叶, 李培强, 等. 基于改进灰狼算法的配电网储能优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(6): 1 – 8.
MAO Zhiyu, JIANG Ye, LI Peiqiang, et al. Optimal configuration of energy storage in distribution network based on improved gray wolf algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2022, 34(6): 1 – 8.

收稿日期: 2024-11-19; 网络首发日期: 2025-03-27

作者简介:

李红(1984), 女, 通信作者, 博士研究生, 副教授, 研究方向为分布式电源的协调优化与控制, hong_0927@163.com;

王浩(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网储能系统优化配置, 1306755452@qq.com;

董海鹰(1966), 男, 博士生导师, 教授, 博士, 研究方向为电力系统自动化、新能源发电优化控制, hydong@mail.lzjtu.cn。