

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230190

考虑风光的两阶段配电网动态重构方法

杨胡萍¹, 李晓馨², 曹正东¹, 李向军³, 熊宁⁴, 徐丕立¹

(1. 南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330006; 2. 国网江西省电力有限公司南昌供电分公司, 江西 南昌 330031;
3. 南昌大学软件学院, 江西 南昌 330006; 4. 国网江西省电力有限公司经济技术研究院, 江西 南昌 330096)

摘要: 由于传统的控制手段已不能抵抗高渗透率分布式电源对电网的冲击, 需要对含分布式电源的配电网动态重构问题展开研究。针对传统配网重构中考虑分布式电源不足、过程复杂耗时和实用性较低等问题, 提出了基于生物地理学算法的含分布式电源配电网动态重构两阶段优化策略, 建立了以全时段网损最小和开关操作总次数最少为目标的多目标优化模型。首先运用整数型环网编码方法以降低变量维数, 对配电网进行时段初步划分, 运用夹逼策略对优化区间进行“列举”操作, 得到初步优化方案。在此基础上, 考虑开关操作总次数约束, 对其进行时段的二次优化, 最终确定动态重构的开关动作时刻及组合。通过算例验证了该动态重构方法能够在保证操作次数较低的同时, 达到减少配电网有功损耗、提高节点电压稳定性的目的。

关键词: 生物地理学算法; 整数型环网编码; 配电网重构; 两阶段优化

A two-stage dynamic reconfiguration method for distribution networks considering wind and solar power

YANG Huping¹, LI Xiaoxin², CAO Zhengdong¹, LI Xiangjun³, XIONG Ning⁴, XU Pili¹

(1. School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330006, China; 2. Nanchang Power Supply Branch, State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330031, China; 3. School of Software, Nanchang University, Nanchang 330006, China; 4. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd. Economic and Technical Research Institute, Nanchang 330096, China)

Abstract: Because traditional control methods can no longer cope with the impact of high-permeability distributed generation on the power grid, the dynamic reconfiguration of a distribution network with distributed generation needs to be studied. There are problems of insufficient consideration of distributed generation, a complex and time-consuming process and low practicability in traditional reconfiguration. Therefore a two-stage optimization strategy for dynamic reconfiguration based on biogeography-based optimization is proposed, and a multi-objective optimization model is established to minimize both the power loss during the whole period and the total number of switching operations. First, an integer ring network coding method is used to reduce the dimension of variables, the distribution network is preliminarily divided into time periods, and the optimal interval is "enumerated" using the pinch strategy. All this can obtain a preliminary optimization scheme. The total number of switch operation constraints are considered. Then the secondary optimization of the time period is carried out, and the switch action timing and combination of dynamic reconfiguration are finally determined. An example shows that the dynamic reconfiguration method can reduce the active power loss of the distribution network, and improve the voltage stability of the nodes, while ensuring low operation times.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61862042).

Key words: biogeography-based optimization; integer ring network coding; distribution network reconfiguration; two-stage optimization

0 引言

随着分布式电源(distributed generation, DG)大

规模并网, 电力系统拓扑结构和运行状态也随之发生变化^[1], DG 的位置、容量及类型对配电网的潮流走向、电压稳定性和网损等参数都将产生一定影响^[2-6]。配电网的重构问题本质上是一类满足电力系统运行约束条件下的开关组合问题, 求解过程需要综合衡

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61862042)

量全周期内各种不稳定参数的变化情况, 并在此基础上对开关动作次数进行限制, 以达到提高系统对新能源的消纳能力、降低网损、提高电压质量、提高负荷均衡度等目的^[7-11]。网络重构技术的优势就是仅需要改变网架结构而无须增加其他附加设备就能一定程度上减少有功损耗、降低电压偏移峰谷差, 而通过合理的算法推算出最优重构方案能够最大程度降低后期的运维成本和设备投资, 经济效益显著。根据优化时段的不同, 配电网重构问题又分为静态重构与动态重构, 其中动态重构更加贴合实际运行。电力系统常用的调控手段, 如 DG 出力优化调度、静态重构只能处理单一时间断面的运行状况, 而 DG 出力的间断性、随机性以及配电网中负荷的差异性、时变性使配电网的运行控制变得极为复杂^[12], 因此需要对能够灵活应对负荷和 DG 时变性的配电网动态重构进行研究^[13]。

然而, 动态重构经常会改变网络拓扑结构, 以达到时段内最佳运行状态, 但频繁地投切开关会缩短其使用寿命, 增加电网运维成本和设备投资成本, 甚至影响系统的稳定运行, 因此一天内开关的可操作次数是有限的。如何合理地安排操作计划, 以最大限度地提高资源利用率, 是学者们研究的重点。

目前, 针对含 DG 的配电网重构问题, 国内外学者已对其进行了深入研究。文献[14]根据负荷的时变性将重构全时段划分成多个连续时段, 对各时段分别进行静态重构, 最终确定最优方案, 但未考虑开关操作次数等约束条件, 操作费用较大。文献[15]以全时段电能供应量最小为目标函数, 结合动态物理寻优策略进行动态重构, 有效地减少了运维成本。文献[16]建立基于混合整数二阶锥规划的有源配电网重构模型, 优化效率提高了 15%~30%, 具有较高的优化精度和效率。文献[17]提出采用最优模糊 C 均值聚类法进行时段划分, 从而将所求解的问题转化为多个静态重构问题。文献[18]根据负荷情况进行聚类, 以此实现时段的划分来求解动态重构问题。文献[19]通过引入区间数来处理 DG 和电动汽车的不确定性, 对各个时段进行静态重构后, 再通过比较降损情况对各个时段进行合并。文献[20]考虑配电网拓扑特性与算法的关系, 将两者深度结合, 提出了基于单环寻优策略的有源配网重构方法。文献[21]以网损成本、弃风弃光成本和开关操作惩罚成本的总成本最小为目标, 建立了高比例清洁能源接入的含需求响应的配电网重构模型, 采用二阶锥松弛将配电网重构模型转化为混合整数二阶锥规划模型进行求解。

上述文献虽然在加快重构速度、最大可能减少

网损等方面取得了可喜的进展, 但都或多或少地存在不足之处, 如所用算法虽均能获得最优解, 但是处理过程复杂、计算速度太慢, 而且全局搜索能力仍有不足, 其寻优结果精度不高。因此, 研究满足足够精度的切实可行的配电网动态重构方法具有重要理论意义和实际工程意义^[22-23]。

本文将在基于生物地理学算法的含 DG 配电网静态重构基础上, 将动态重构问题转化为多个静态重构问题, 并利用对静态重构后的相邻时段进行合并来实现动态重构, 采用多时段双步优化策略, 建立以重构全时段网损最小和开关操作总次数最少为目标的多目标优化模型, 对配电网进行动态重构。首先利用夹逼策略以网损最小为目标进行初步时段划分, 然后在此基础上以开关动作总次数最少为目标进行二次优化, 最终确定最优方案。通过算例验证了该方法的有效性和可行性。

1 配电网静态重构

1.1 整数型环网编码

配电网重构是一种大规模非线性优化组合, 在这个过程中需要多次对开关状态进行调整, 排列组合成不同的拓扑结构, 而编码的位数和译码的难易程度直接关系到算法的收敛性。传统的离散编码方法主要包括二进制编码和整数型编码两种^[24]。配电网重构中, 使用二进制编码中的 0 代表配电网各开关的断开状态, 1 代表闭合运行状态, 按这种定义方式, 粒子的维数就与网络中的开关总数相当。虽然原理清晰, 但必然会引起变量维数的突增, 搜索空间也随之剧增, 而且在重构过程中还会出现难以忽略的不可行解, 严重影响了寻优效率。因此本文采用整数型环网编码方案^[25]以降低变量维数。

以 IEEE33 节点系统为例, 如果采用二进制编码方式, 粒子维数为 32, 对应的搜索空间大小为 $2^{32} \approx 4.29 \times 10^9$ 个, 其中不可行解的比例高达 98.54%。如果采用整数型环网编码可使粒子维数降至 5, 解空间将大幅缩减, 共 $10 \times 7 \times 15 \times 21 \times 11 \approx 2.42 \times 10^5$ 个解, 不可行解的比例相比二进制编码下降 24.16%, 大大提高了计算效率。

1.2 生物地理学算法

生物地理学优化(biogeography-based optimization, BBO)算法是一种群智能优化算法, 通过设计“迁移算子”和“变异算子”分别模拟栖息地间的物种迁移和变异过程。

不同生物种群生活在不同的“栖息地”, 不同的栖息地的适宜度指数(habitat suitability index, HSI)千差万别, 其影响因素包括生物丰富度指数、地表

植被种类、污染指数、降雨量、地质构成类型等，这些影响因素被称为适宜度向量(suitable index vector, SIV)，HSI 作为一种生境评价指标用来量化物种对栖息地偏好与栖息地 SIV 之间的关系。

HSI 的变化是造成栖息地种群聚集和迁移的主要因素，通常使用迁入率和迁出率两项指标来反映 HSI 对种群迁移分布的影响。HSI 指数较高的栖息地中部分种群便会开始向其他 HSI 指数低的栖息地迁徙。而 HSI 指数较低的栖息地随着新种群的迁入，若该栖息地的 HSI 仍然得不到提升，种群或选择下一次集体迁徙。同样，这种分配机制方法也可以应用于实际工程中，BBO 算法的求解方式主要包括以下三点^[26]：

(1) 使用模型中的特征向量 SIV 替代优化问题的解，栖息地的特征向量 SIV 中包含的各种自然特征则是对所求解的影响因素。

(2) 利用物种的迁入和迁出现象实现数据的传输与反馈。HSI 指数高的栖息地物种会将信息共享给低 HSI 的其他物种，这些物种再利用接收到的新特征来提高解决方案的质量。

(3) 利用栖息地种群数量概率计算相应的突变率，保留栖息地的最佳种群密度，对种群数量概率低的特征变量进行突变操作，增强模型的自适应能力。

1) 迁移操作

图 1 所示为某栖息地的物种丰富度模型。 S_{max} 代表生境种群最大容量， I 表示迁入率函数最大值， E 表示迁出率函数最大值， S_0 为平衡点(迁出率 μ 和迁入率 λ 相等)。当栖息地中没有物种时，迁出率 μ 为 0，迁入率 λ 为最大值 I 。随着种群数量的增加， μ 逐渐增大， λ 逐渐减小，直到栖息地中物种数目达到最大值 S_{max} 时，进入饱和状态，这时 μ 为最大值 E ， λ 为 0。

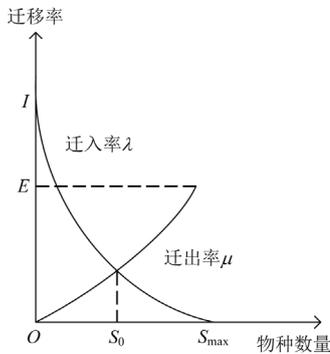


图 1 物种丰富度模型

Fig. 1 Species richness model

当栖息地的种群数目为 S 时，迁入率 λ_s 和迁出率 μ_s 计算式如式(1)。

$$\begin{cases} \lambda_s = I(1 - S/S_{max}) \\ \mu_s = ES/S_{max} \end{cases} \quad (1)$$

2) 突变操作

突发性的灾难事件会使栖息地的生存环境发生扭转，相应的适宜度也会因此急剧改变。BBO 算法对这类突发事件进行模拟，再根据栖息地 t 时刻能够拥有 S 个物种数量的概率，对物种数量概率低的栖息地进行突变操作。

设栖息地在 t 时刻恰好包含 S 个物种的概率为 P_s ，即 $x_t = S$ ，则 $t + \Delta t$ 时刻的物种概率为

$$P_s(t + \Delta t) = P_s(t)(1 - \lambda_s \Delta t - \mu_s \Delta t) + P_{s-1}(t)\lambda_{s-1} \Delta t + P_{s+1}(t)\mu_{s+1} \Delta t \quad (2)$$

要使栖息地在 $t + \Delta t$ 时刻同样包含 S 个物种，即 $x_{t+\Delta t} = S$ 。当 $x_t = S \pm n$ 时，表示 Δt 时间间隔内有 n 个物种迁出(入)，当 $n = 0$ 时，表示 Δt 时间间隔内无物种迁入和迁出，或迁入与迁出的物种数量一致。

假设 $n = 10$ 时，由式(2)可得各种群数量对应的概率分布如图 2 所示。图中栖息地物种数量概率曲线是一条类似于正态分布的曲线，当物种数量过多或过少时物种数量概率都相对较低，而当物种数量接近于最佳物种数量时物种数量概率相对稳定。因此栖息地的突变概率与物种数量概率之间的关系如式(3)所示。

$$M_s = M_{max} (1 - \frac{P_s}{P_{max}}) \quad (3)$$

式中： M_s 为栖息地中物种数量为 S 时对应的突变概率； M_{max} 为突变率的最大值； P_s 为栖息地中物种数量为 S 时对应的概率； P_{max} 为 P_s 的最大值。

通过式(3)得出，处于平衡点附近的解应尽量避免发生突变，而以较大概率使 HSI 低的解发生突变，为其创造更多机会搜索目标。

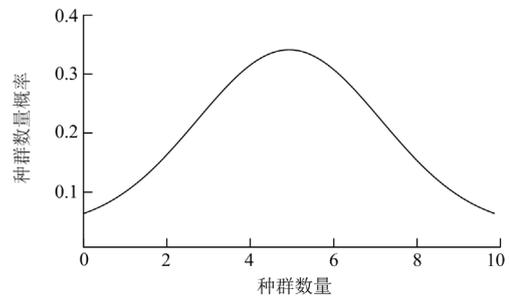


图 2 $n = 10$ 时各种群数量对应的概率

Fig. 2 Probability corresponding to the number of various groups when $n = 10$

3) 排重操作

在搜索过程中, 有可能发生初始生成的 SIV 和经过一代迭代后的 SIV 重复的情况, 即不同栖息地的 SIV 完全一致, 对栖息地的多样性产生影响。

1.3 配电网静态重构步骤

基于 BBO 算法的含 DG 配电网静态网络重构具体步骤如下。

1) 输入配电网的原始参数, 包括支路阻抗、各节点的负荷和 DG 出力、可操作的开关位置等, 并对配电网进行整数型环网编码。

2) 设置 BBO 算法参数, 计算栖息地的物种数量概率。

3) 求解每个栖息地的适宜度向量, 其中每个向量对应于一个可能的解决方案。

4) 排重操作。逐一排查 SIV 相同的解, 当发现 $x_h = x_j$, 则重新进行初始化栖息地 SIV, 输出一个新的适宜度向量 x_k 替换 x_j 。这步操作可以筛选掉部分重复的适宜度向量, 降低后续操作难度。

5) 计算栖息地的适宜度指数 HIS, 用 $f(x_h)$ ($h=1,2,\dots,n$) 来代表 HSI 的数值, 根据 $f(x_h)$ 重新排列各栖息地顺序。

6) 输出当前解, 判断是否符合终止条件, 若满足, 则输出结果, 程序终止; 否则继续步骤 7)。

7) 按 $S_h = S_{\max} - h$ ($h=1,2,\dots,n$) 计算每个栖息地的物种数量 S_h , 根据式(1)计算各栖息地的迁入率 λ_h 和迁出率 μ_h 。

8) 最大迭代次数设为 n , 每个向量都有 λ_h 的概率进行迁入操作。如果需要迁出, 则以迁出率 μ_m ($m=1,2,\dots,n; m \neq h$) 为概率, 从物种中选择一个迁出向量 x_m 替代栖息地 h 的原有向量 x_h 。

9) 利用式(2)计算出栖息地 h ($h=1,2,\dots,n$) 的种群数量概率 P_h , 利用式(3)计算各栖息地的突变率 M_h , 对突变率低的栖息地以较大概率进行突变操作。然后返回步骤 4) 开始新一轮迭代。

2 配电网动态重构的数学模型

实际配电网在加入 DG 后, DG 出力和负载情况是不断变化的, 增加了重构难度, 静态重构得出的最优方案只针对当前时刻而言, 而且不需要考虑开关操作次数等运维成本, 因此在规划设计中得到了广泛应用; 动态重构则考虑到了系统运行中的一系列不确定因素, 因而更贴合实际配电网的优化运行^[27]。

由于 DG 出力和负载情况是连续变化的, 无法

直接用于求解, 故本文采用分时段静态重构^[28]方法, 先将重构全过程以 24 时段进行线性分段, 拟定负荷和 DG 出力在各个时段恒定, 根据牛顿-莱布尼茨公式, 只要 Δt 足够小, 理想状态下可以将误差降至可忽略范围, 得出最佳重构方案。

2.1 目标函数

以最小化系统有功网损为优化目标的目标函数^[29]如式(4)所示。

$$f_{\text{ploss}} = \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^M (S_{k,l} \Delta t_l) = \sum_{l=1}^N \sum_{k=1}^M \left(\frac{P_{k,l}^2 + Q_{k,l}^2}{U_{k,l}^2} r_k \Delta t_l \right) \quad (4)$$

式中: N 为时段总数; M 为配电网的支路数; $S_{k,l}$ 为支路 k 在第 l 时段的网损; r_k 为支路 k 的电阻; Δt_l 为步长; $P_{k,l}$ 、 $Q_{k,l}$ 分别为第 l 时段流过支路 k 的有功、无功功率; $U_{k,l}$ 为第 l 时段支路 k 末端的电压幅值。

开关操作次数最少化目标函数如式(5)所示。

$$f_{\text{switch}} = \sum_{d=1}^Z \sum_{l=1}^N |A_{d,l} - A_{d,l-1}| \quad (5)$$

式中: Z 为环网内的开关总数; $A_{d,l}$ 表示开关状态, $A_{d,l} = 0$ 时表示开关 d 在时段 l 是打开状态, $A_{d,l} = 1$ 时表示开关 d 在时段 l 是闭合状态。

在比较网损指标和开关动作次数的优劣过程中, 由于量纲不同, 不能简单地通过数值进行判断, 因此采用线性加权方法对上述指标进行归一化处理, 根据其特性构造满意度评估函数, 如式(6)所示。

$$F(t) = \min \left(\lambda_1 \frac{f_{\text{ploss}}(t)}{f_{\text{ploss0}}} + \lambda_2 \frac{f_{\text{switch}}(t)}{f_{\text{switch0}}} \right) \quad (6)$$

式中: $F(t)$ 为 t 时刻的满意度评估函数; λ_1 、 λ_2 为权重系数, 这里取 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$; f_{ploss0} 、 f_{switch0} 分别表示网络初始有功损耗和开关操作次数。

2.2 约束条件

以潮流平衡作为等式约束, 以可断开支路状态、节点电压等作为不等式约束, 设置以下约束条件。

1) 潮流约束

$$P_i + P_{\text{DG}i} - P_{\text{L}i} = U_i \sum_{j=2}^N U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (7)$$

$$Q_i + Q_{\text{DG}i} - Q_{\text{L}i} = U_i \sum_{j=2}^N U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (8)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为节点 i 注入的有功、无功功率; $P_{\text{DG}i}$ 、 $Q_{\text{DG}i}$ 分别为 DG 向节点 i 注入的有功、无功功率; $P_{\text{L}i}$ 、 $Q_{\text{L}i}$ 分别为第 i 个节点负荷的有功、无功功率; U_i 、 U_j 分别为节点 i 、 j 的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 和 θ_{ij} 分别为该支路的电导、电纳和电压相角差。

2) 可断开支路状态

$$z_{ij} \in \{0,1\}, \forall ij \in \Phi_i \quad (9)$$

式中: z_{ij} 表示支路状态; Φ_i 表示可断开支路合集。

3) 节点电压约束

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (10)$$

式中, $U_{i\max}$ 、 $U_{i\min}$ 分别为节点 i 电压幅值的上限和下限。

4) 支路容量约束

$$S_k \leq S_{k\max} \quad (11)$$

式中: S_k 表示支路 k 传输的视在功率; $S_{k\max}$ 表示支路 k 的最大传输容量。

5) DG 功率约束

$$P_{DGi\min} \leq P_{DGi} \leq P_{DGi\max} \quad (12)$$

式中, $P_{DGi\max}$ 、 $P_{DGi\min}$ 分别为接入节点 i 的 DG 容量上、下限。

6) 风光出力不确定性约束

与火力发电不同, 风光出力受外界位置因素的影响, 导致预测值与实际值存在一定的误差。现阶段电网存在风光大规模并网, 因此预测误差不能被忽略。本文对风光出力的不确定性约束表述如式(13)所示。

$$\begin{cases} P_w^{\text{re}} - P_w^{\text{er}} \leq P_w \leq P_w^{\text{re}} + P_w^{\text{er}} \\ P_p^{\text{re}} - P_p^{\text{er}} \leq P_p \leq P_p^{\text{re}} + P_p^{\text{er}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: P_w^{re} 、 P_p^{re} 、 P_w 、 P_p 分别为风电和光伏的预测出力和实际出力; P_w^{er} 、 P_p^{er} 分别为风电与光伏的出力预测误差, 本文取值为真实值的 10%。

7) 网络拓扑结构约束

$$g \in G \quad (14)$$

式中: g 为重构后网络拓扑结构; G 为辐射状网络拓扑结构, 即网络中不存在环路且每个节点仅由一个电源供电。

3 多时段两阶段优化策略

3.1 基于“夹逼”策略的初步优化

将一天 24 h 按步长 $T=1$ h 均匀划分为 24 个重构时段, 拟定每一个时段内 DG 出力和负载情况大致保持不变, 取该时段的平均值作为重构初始时刻的数据支撑, 按照目标函数对每个时段分别寻优, 得出 24 个静态重构方案。结合图 3—图 5 对“夹逼”策略的操作流程进行说明, 图中 A、B、C、D、E、F 代表 6 种不同的开关组合模式, 具体操作步骤如下所述。

1) 依次对各时段进行静态重构。图 3 中, 设网络初始状态按 A 模式运行, t 时刻系统总网损为 P_{Z_t}

($t=0,1,\dots,23$)。首先在初始时刻使用第 1 节所述方法进行静态重构, 若重构方案为 B, 则后续所有时段均按照 B 模式运行, 网损也按 B 模式下运行网损计算, 即 $P_{Z_0}=P_B$; 然后对初始网络在 T 时刻进行静态重构, 若重构方案为 C, 则在 $T\sim 24T$ 时段按 C 模式运行, 其网损为 P_C , $0\sim T$ 时段仍按照 A 模式运行, 其网损为 P_A , 所以 $P_{Z_1}=P_A+P_C$ 。按时间顺序依次进行 24 次重构, 确定出 24 个优化方案, 并计算相应的系统总有功损耗。

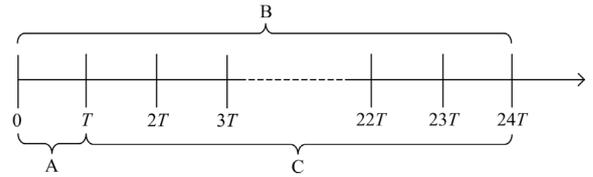


图 3 网络初始状态

Fig. 3 Network initial state

2) 确定首个重构区间及开关组合方案。得 24 个重构方案中有功损耗最小的定为首次重构方案。假定 P_{Z_3} 的值是最小的, 则在 $3T$ 时刻进行首次重构, 将 $0\sim 3T$ 划为一个区间, 按 A 模式运行, $3T\sim 24T$ 为一个区间, 按重构后的 D 模式运行, 如图 4 所示。

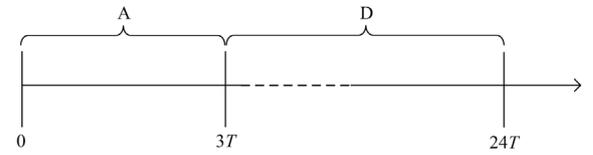


图 4 首次区间划分及重构方案

Fig. 4 First interval division and reconstruction scheme

3) 逐步调整重构区间及开关组合方案。利用“夹逼”策略对重构区间逐步调整, 分别在图 5 中两个区间进行静态重构, 使 $P_{Z_t} < P_{Z_3} = 3P_A + 21P_D$, 假设求得 $t=5T$ 时 P_{Z_t} 最小, 则在 $5T$ 时刻进行第二次重构, 如图 5 所示, 将 $3T\sim 24T$ 划分为 $3T\sim 5T$ 和 $5T\sim 24T$ 两个区间, 其中 $5T\sim 24T$ 的运行模式改为 E。

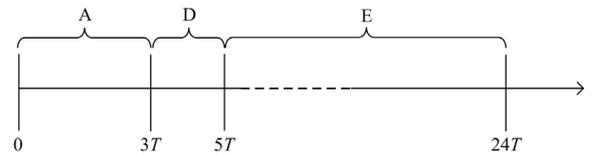


图 5 调整后的区间划分及重构方案

Fig. 5 Adjusted interval division and reconstruction scheme

重复以上步骤直至达到最大重构次数, 输出当前确定的重构时刻及方案。

4) 判断当前方案是否为最优方案。将图 5 中 $0\sim 3T$ 和 $3T\sim 5T$ 合并为一个区间, 对其重新进行静态

重构, 验证该区间是否在 $t=3T$ 时 P_{Z_4} 最小。若是, 根据“夹逼”定理的思想, $3T$ 时刻进行重构即为最优解, 输出结果; 若否, 则进行下一步操作。

5) 假设求得 $0\sim 5T$ 区间内 P_{Z_4} 最小, 则 $0\sim 4T$ 按 A 模式运行, $4T\sim 5T$ 按 F 模式运行, 如图 6 所示。再将 $4T\sim 5T$ 和 $5T\sim 24T$ 合并, 重复步骤 4), 验证 $4T\sim 24T$ 区间的最佳重构时刻是否为 $5T$ 。若是, 输出结果, 当前方案为最优方案; 若否, 则反复迭代以上操作, 直至输出最优重构时刻及方案。

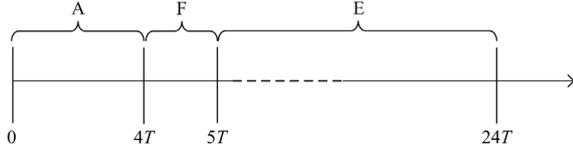


图 6 重构区间及方案的再次调整

Fig. 6 Reconstructed interval and re-adjustment of scheme

3.2 考虑开关操作次数的二次优化

为衡量重构前后网损的降低程度, 使用网损偏移度作为重构方案的评价指标。

$$\Delta f_{\text{ploss}}(t_a) = f_{\text{ploss}}^{u_0}(t_a) - f_{\text{ploss}}^{u_1}(t_a) \quad (15)$$

$$\Delta f_{\text{ploss}}(t_a)^* = (\Delta f_{\text{ploss}}(t_a) / \max f_{\text{ploss}}(t_a)) \times 100\% \quad (16)$$

式中: $\Delta f_{\text{ploss}}(t_a)$ 表示在 t_a 时刻进行重构的网损偏移量; $a=1, 2, \dots, N$; $f_{\text{ploss}}^{u_0}$ 、 $f_{\text{ploss}}^{u_1}(t_a)$ 分别表示重构前、后的系统网损; $\Delta f_{\text{ploss}}(t_a)^*$ 表示在 t_a 时刻进行重构的网损偏移度; $\max f_{\text{ploss}}(t_a)$ 表示所有方案中的网损最大值。

由 $\Delta f_{\text{ploss}}(t_a)^*$ 构成网损偏移度序列为

$$\Delta f_{\text{ploss}}^* = \{\Delta f_{\text{ploss}}(t_1)^*, \Delta f_{\text{ploss}}(t_2)^*, \dots, \Delta f_{\text{ploss}}(t_N)^*\} \quad (17)$$

从而计算出网损偏移度的极差为

$$R_{\Delta f_{\text{ploss}}} = \max(\Delta f_{\text{ploss}}(t_a)^*) - \min(\Delta f_{\text{ploss}}(t_a)^*) \quad (18)$$

网损偏移度的标准差为

$$S_{\Delta f_{\text{ploss}}} = \left[\frac{1}{N} \sum_{a=1}^N (\Delta f_{\text{ploss}}(t_a)^*)^2 - \frac{1}{N^2} \left(\sum_{a=1}^N \Delta f_{\text{ploss}}(t_a)^* \right)^2 \right]^{1/2} \quad (19)$$

根据网损偏移度的极差和标准差判定是否需要执行此次重构, 从第一次重构开始, 将模式相同或类似的相邻时段进行合并, 当 $R_{\Delta f_{\text{ploss}}}$ 和 $S_{\Delta f_{\text{ploss}}}$ 波动较大时, 则停止合并, 开始新的重构过程, 这个过程称为时段的二次优化。具体步骤如下所述。

1) 输入最大允许重构次数 G_N 和每个时段内的网损偏移量 $\Delta f_{\text{ploss}}(t_a)$, 根据式(20)和式(21)设置 $\max R_{\Delta f_{\text{ploss}}}$ 和 $\max S_{\Delta f_{\text{ploss}}}$ 的初值。

$$\max R_{\Delta f_{\text{ploss}}}(a+1) = \max R_{\Delta f_{\text{ploss}}}(a) \frac{T_S}{G_N} \quad (20)$$

$$\max S_{\Delta f_{\text{ploss}}}(a+1) = \max S_{\Delta f_{\text{ploss}}}(a) \frac{T_S}{G_N} \quad (21)$$

式中: T_S 为两次时段划分后的时段数; G_N 为最大重构次数。当 T_S 与 G_N 相等时, 得到最佳网损偏移度的极差和标准差初值。

2) 将经过初次划分后的区间 I 保持不变。

3) 根据式(18)、式(19)分别计算区间 I 和区间 II 的 $R_{\Delta f_{\text{ploss}}}$ 和 $S_{\Delta f_{\text{ploss}}}$, 若未达到设定的 $\max R_{\Delta f_{\text{ploss}}}$ 和 $\max S_{\Delta f_{\text{ploss}}}$, 则自动忽略此次重构, 将区间 II 与区间 I 合并; 否则保留重构方案, 单独列为区间 II。

4) 依次类推, 将所有重构方案按照阈值进行取舍, 完成区间二次划分。

采用上述多时段双步优化方法进行主动配电网的动态重构, 动态重构流程图如图 7 所示。

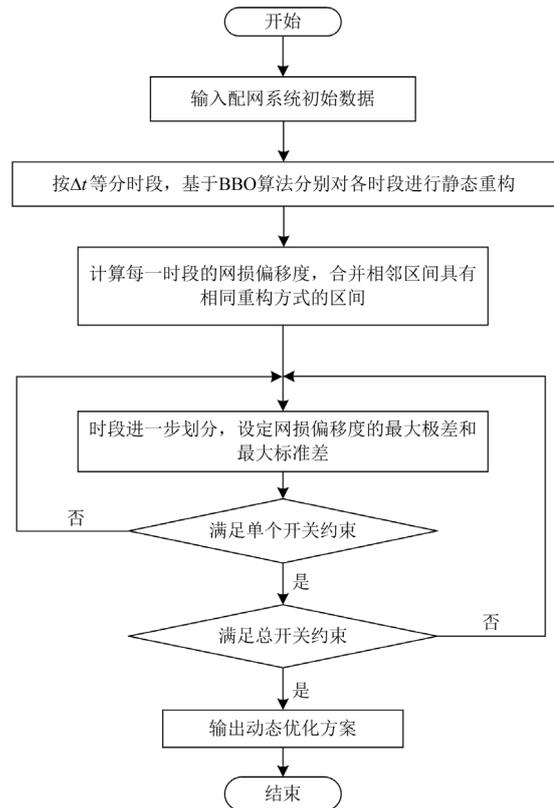


图 7 动态重构原理流程图

Fig. 7 Flow chart of dynamic reconstruction principle

4 算例分析

本文采用 IEEE33 节点测试系统进行仿真验证, 系统拓扑如图 8 所示。IEEE33 节点测试系统各节点负荷和支路阻抗见文献[29]。

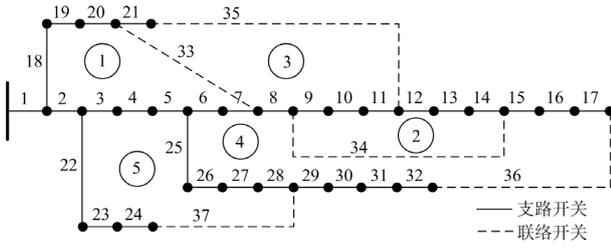


图 8 IEEE33 节点测试系统
Fig. 8 IEEE33 bus test system

4.1 静态重构

采用 BBO 算法对配电网进行静态重构，BBO 算法设置：种群大小 S_{max} 为 50，维数 n 为 5，最大突变率 M_{max} 为 0.005，全局迁移率 P_{mod} 为 1，最大迁入率 I 和最大迁出率 E 都为 1，收敛精度为 $\varepsilon = 10^{-4}$ ，最大迭代次数 G_{max} 为 50。

对不含 DG 的 IEEE33 节点系统进行静态重构，与量子粒子群算法(quantum particle swarm optimization, QPSO)进行对比，网络重构前后的开关动作情况、网损、节点最低电压情况和迭代次数如表 1 所示。

表 1 不含 DG 时重构前后各指标情况

	断开支路	有功损耗/kW	节点最低电压/p.u.	迭代次数
重构前	33,34,35,36,37	202.67	0.9131	0
QPSO 重构后	7,14,9,32,37	139.5500	0.9377	58
BBO 重构后	7,14,9,32,37	139.5500	0.9377	16

由表 1 可以看到，与 QPSO 算法相比，虽然本文算法的优化结果与其相同，系统网损降为 139.5500 kW，节点最低电压为 0.9377 p.u.，但由于 QPSO 算法中后期的寻优能力低下，需要 58 次迭代才能得到最优解，而本文算法仅需 16 次迭代，且能够有效降低网损，提高系统节点电压，同时大幅加快了收敛速度，能够应用于配电网重构。

4.2 动态重构

采用前述方法对图 8 所示 IEEE33 节点测试系统进行动态重构。BBO 算法设置同 4.1 节，最大迭代次数 G_{max} 改为 100。

将一天按小时等分为 24 个时段，忽略负荷在时段内的波动，负荷值取该时段负荷平均值。为了更贴合实际，设每个节点均包含不同比例的商业负荷、居民负荷和工业负荷共 3 类负荷，每类负荷在不同节点所占比例见图 9，由式(22)计算各节点不同时刻的负荷参数。

$$L_{i,t} = \sum_{c=1}^3 L_i M_{i,c} C_{c,t} \quad (22)$$

式中： $L_{i,t}$ 为节点 i 在 t 时刻的负荷； c 表示负荷类型； L_i 为节点 i 一天中的负荷平均值； $M_{i,c}$ 为节点 i 中第 c 类负荷的比例； $C_{c,t}$ 表示第 c 类负荷在 t 时刻所占比例。

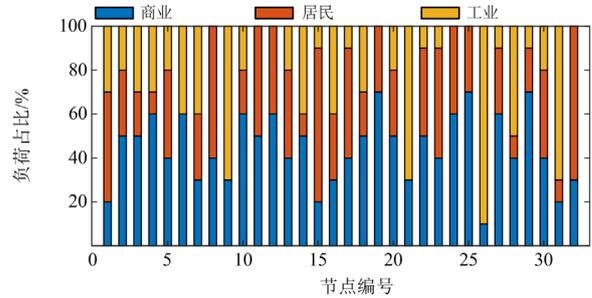


图 9 3 种类型负荷在不同节点所占比例

Fig. 9 Proportion of three types of loads at different nodes

在节点 5 和节点 31 分别接入风电和光伏发电电源，其有功日出力情况如图 10 所示，功率因数都设为 $\cos \varphi = 0.62$ 。

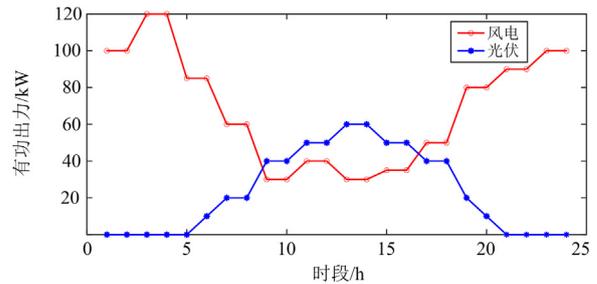


图 10 风电和光伏日出力情况

Fig. 10 Daily output of wind power and photovoltaic

首先对该网络进行分时段静态重构，重构前后系统各时段有功损耗变化情况如图 11 所示。

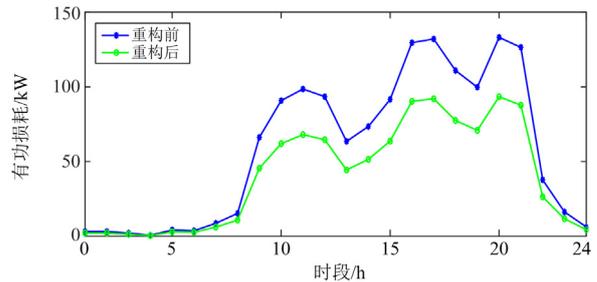


图 11 重构前后各时段有功损耗

Fig. 11 Active power loss in each period before and after reconstruction

通过图 11 可以看出，重构后各时段的有功损耗都得到明显降低。总有功损耗降至 979.77 kW，比重构前的 1410.72 kW 减少了 430.95 kW，同比下降

了 30.55%。经过统计, 在迭代计算中最多需要进行 80 次迭代即可输出最佳重构方案, 平均时间一般为 72 s, 用时非常短。各时段开关动作表如表 2 所示。

表 2 含 DG 时开关动作表

Table 2 Switch action table with DG

重构时刻	重构时段	打开开关集合	单次动作开关	开关动作次数
初始	—	33,34,35,36,37	—	0
0 时	0~4	9,14,28,32,33	9,14,28,32,34,35,36,37	8
4 时	4~6	4,9,14,33,36	4,28,32,36	4
6 时	6~7	9,14,28,33,36	4,28	2
7 时	7~8	7,9,14,32,37	7,28,32,33,36,37	6
8 时	8~10	7,9,14,32,37	—	0
10 时	10~12	7,9,14,28,32	28,37	2
12 时	12~16	7,9,14,28,36	32,36	2
16 时	16~17	7,9,14,28,32	32,36	2
17 时	17~18	7,9,14,32,37	28,37	2
18 时	18~19	7,9,14,32,37	—	0
19 时	19~20	7,9,14,32,37	—	0
20 时	20~22	7,9,14,32,37	—	0
22 时	22~24	7,9,14,32,37	—	0

由表 2 可知, DG 并网后, 动态重构变得更加复杂, 整个重构过程需要对网络拓扑结构进行 8 次调整, 开关动作次数累计 28 次, 操作过于频繁, 因此需要对其进行二次优化。

根据网损偏移度的极差和标准差判定是否需要执行此次重构, 从第一次重构开始, 将模式相同或类似的相邻时段进行合并, 当 $R_{\Delta f_{\text{ploss}}}$ 和 $S_{\Delta f_{\text{ploss}}}$ 波动较大时, 则停止合并, 开始新的重构过程。

根据实际配电网的运维日常, 一天内除去故障检修, 最多可操作 3~5 次, 当设定操作次数为 3 次时, 根据网损偏移度的极差和标准差自动忽略 $R_{\Delta f_{\text{ploss}}}$ 和 $S_{\Delta f_{\text{ploss}}}$ 波动较小的方案, 得出如图 12 所示的 3 个最优重构区间, 其中区间 I 为 0~8 时, 区间 II 为 9~21

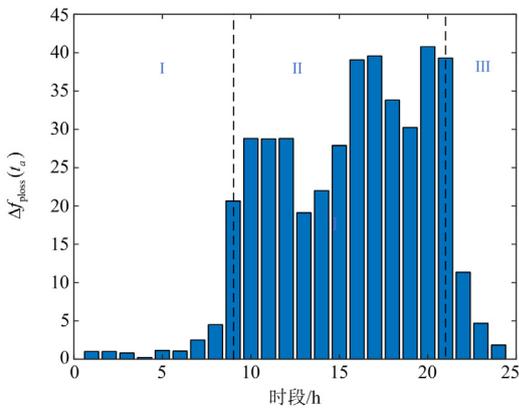


图 12 重构区间划分

Fig. 12 Division of reconstituted interval

时, 区间 III 为 22~24 时。

由图 12 可知, 本算例最终输出的重构区间划分结果为: 分别在 0 时、9 时、22 时进行一次重构。由表 3 知, 重构后的系统总有功网损为 987.19 kW, 比重构前的 1410.72 kW 减少了 423.53 kW, 同比降低了 30.02%; 开关操作次数由二次优化前的 28 次缩小为 4 次。

表 3 二次优化结果

Table 3 Results of secondary optimization

重构区间	重构时刻	断开开关	网损/kW	开关次数
I	0 时	9,14,28,32,33		
II	9 时	7,9,14,28,32	987.19	4
III	22 时	7,9,14,32,37		

根据表 3 可得出网架中各支路线损随时间变化曲线, 如图 13 所示。

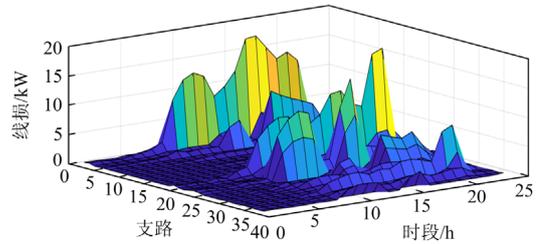


图 13 网架中线损变化曲线

Fig. 13 Line loss variation curve in grid structure

综上所述, 本文所提方法能够有效处理复杂的含 DG 的配电网网络重构问题, 利用较少的开关动作次数达到网损降低较多的效果, 实现了开关次数和网损的同步优化, 收敛速度快, 重构过程效率提高, 有利于系统的稳定高效运行。

5 结论

本文从电力系统的动态变化和运维人员操作成本角度出发, 考虑系统网损和开关动作次数建立满意度评估函数, 提出一种基于两阶段优化的分时段重构新方法, 进行主动配电网的动态网络重构。首先以小时为步长将一天分为 24 个时段, 在不考虑开关动作次数的情况下进行“夹逼”操作, 使用基于 BBO 算法的含 DG 配电网静态重构方法对合并后的区间进行静态重构, 反复迭代直至达到规定的重构次数, 得到重构时刻及相应方案, 对其进行“夹逼”操作, 调整出初步优化方案。然后在此基础上, 在规定的开关最大操作次数范围内进行二次优化, 使用网损偏移度作为评价指标, 自动忽略重构前后网损波动幅度小的重构方案, 最后输出动态重构的

时刻和开关组合。通过算例验证表明：本文所提方法能够有效达到目标，同时保证开关约束等限制条件，大幅度降低了重构次数，使重构方案更加合理可靠。

参考文献

- [1] LI Ruisheng, WONG P, WANG Kun, et al. Power quality enhancement and engineering application with high permeability distributed photovoltaic access to low-voltage distribution networks in Australia[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(3): 1-7.
- [2] HE Jinghan, LIU Lin, DING Fanfan, et al. A new coordinated backup protection scheme for distribution network containing distributed generation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 102-110.
- [3] ANASTASIADIS A G, KONDYLLIS G P, VOKAS G A. Effect of augmented distributed generation in distribution networks[J]. Energy Reports, 2020, 6: 177-187.
- [4] 徐永海, 何志轩, 董旭, 等. 基于 DG 和多端 VSC 协调控制的交直流配电网优化运行[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 116-123.
- XU Yonghai, HE Zhixuan, DONG Xu, et al. Optimal operation of AC/DC distribution network based on DG and multi-terminal VSC coordinated control[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 116-123.
- [5] 史晨豪, 唐忠, 戴尉阳, 等. 基于多要素改进 NSGA II 算法的有源配电网多目标优化策略[J]. 供用电, 2021, 38(6): 50-55.
- SHI Chenhao, TANG Zhong, DAI Weiyang, et al. Multi-objective optimization strategy of active distribution network based on multi-factor improved NSGAI algorithm[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(6): 50-55.
- [6] 赵晶晶, 朱炯达, 李振坤, 等. 考虑灵活性供需鲁棒平衡的两阶段配电网日内分布式优化调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 61-71.
- ZHAO Jingjing, ZHU Jiongda, LI Zhenkun, et al. Two-stage intraday distributed optimal dispatch for distribution network considering robust balance between flexibility supply and demand[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 61-71.
- [7] 王子晗, 高红均, 高艺文, 等. 基于深度强化学习的城市配电网多级动态重构优化运行方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 60-70.
- WANG Zihan, GAO Hongjun, GAO Yiwen, et al. Multi-level dynamic reconfiguration and operation optimization method for an urban distribution network based on deep reinforcement learning[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 60-70.
- [8] 程杉, 钟仕凌, 尚冬冬, 等. 考虑电动汽车时空负荷分布特性的主动配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 1-13.
- CHENG Shan, ZHONG Shiling, SHANG Dongdong, et al. Dynamic reconfiguration of an active distribution network considering temporal and spatial load distribution characteristics of electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 1-13.
- [9] 周步祥, 姚先禹, 臧天磊, 等. 基于马氏 DTW 时段划分和 FCPSOGSA 算法的配电网动态重构[J]. 智慧电力, 2021, 49(11): 66-72, 80.
- ZHOU Buxiang, YAO Xianyu, ZANG Tianlei, et al. Dynamic reconfiguration of distribution network based on Markov DTW time division and FCPSOGSA algorithm[J]. Smart Power, 2021, 49(11): 66-72, 80.
- [10] 马倩, 苟亮, 张海峰, 等. 考虑开关动作次数的多时段配电网动态重构[J]. 电测与仪表, 2021, 58(3): 9-14.
- MA Qian, GOU Liang, ZHANG Haifeng, et al. Multi-period dynamic reconfiguration of distribution network considering the number of switching actions[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(3): 9-14.
- [11] 孙伟卿, 刘唯, 张婕. 高比例可再生能源背景下配电网动态重构与移动储能协同优化[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 80-90.
- SUN Weiqing, LIU Wei, ZHANG Jie. Collaborative optimization for dynamic reconfiguration of distribution network and mobile energy storage in background of high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 80-90.
- [12] LI Chenchen, XI Yanna, LU Yufan, et al. Resilient outage recovery of a distribution system: co-optimizing mobile power sources with network structure[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(3): 459-471.
- [13] 王洪坤, 王守相, 潘志新, 等. 含高渗透分布式电源配电网灵活性提升优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 86-93.
- WANG Hongkun, WANG Shouxiang, PAN Zhixin, et al. Optimized dispatching method for flexibility improvement of distribution network with high-penetration distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 86-93.
- [14] ZHAI H F, YANG M, CHEN B, et al. Dynamic reconfiguration of three-phase unbalanced distribution networks[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 99: 1-10.
- [15] 周鹏. 含分布式电源并网特性的配电网重构策略[J]. 电测与仪表, 2019, 56(15): 34-40.
- ZHOU Peng. Reconfiguration strategy of distribution

- network considering characteristics of grid-connected distributed generation[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(15): 34-40.
- [16] 张琳娜, 乐健, 李昊旻. 基于混合整数线性规划的含 ZIP 负荷有源配电网重构方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(8): 25-32.
ZHANG Linna, LE Jian, LI Haojiong. Reconfiguration method of an active distribution network with a ZIP load model based on mixed integer linear programming[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(8): 25-32.
- [17] 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.
- [18] 高纯, 于艾清, 丁雨. 基于改进递归有序聚类的有源配电网多时段动态重构[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(2): 84-90.
GAO Chun, YU Aiqing, DING Yu. Multi-period dynamic reconfiguration of active distribution network based on improved recursive ordered clustering[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(2): 84-90.
- [19] 李扬, 韦钢, 马钰, 等. 含电动汽车和分布式电源的主动配电网动态重构[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(5): 102-110.
LI Yang, WEI Gang, MA Yu, et al. Dynamic reconfiguration of active distribution network considering electric vehicles and distributed generations[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(5): 102-110.
- [20] 于艾清, 丁丽青, 王育飞, 等. 基于单环寻优策略的有源配网重构方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(1): 23-32.
YU Aiqing, DING Liqing, WANG Yufei, et al. Active distribution network reconfiguration based on single loop optimization strategy[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(1): 23-32.
- [21] 黄鸣宇, 张庆平, 张沈习, 等. 高比例清洁能源接入下计及需求响应的配电网重构[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(1): 116-123.
HUANG Mingyu, ZHANG Qingping, ZHANG Shenxi, et al. Distribution network reconfiguration considering demand-side response with high penetration of clean energy[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(1): 116-123.
- [22] 赵胜举, 么莉, 林济铿, 等. 基于贪婪算法的配网多阶段快速重构新方法[J]. *中国电力*, 2022, 55(6): 33-41.
ZHAO Shengju, MO Li, LIN Jikeng, et al. Fast multi-stage reconfiguration method for distribution system based on greedy algorithm[J]. *Electric Power*, 2022, 55(6): 33-41.
- [23] 李新雷, 鄢杰, 张川, 等. 配电网保护快速算法研究[J]. *电网技术*, 2021, 45(12): 4877-4887.
LI Xinlei, YAN Jie, ZHANG Chuan, et al. Rapid algorithm of distribution network protection[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(12): 4877-4887.
- [24] 马草原, 孙展展, 尹志超, 等. 基于双重混合粒子群算法的配电网重构[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(11): 120-128.
MA Caoyuan, SUN Zhanzhan, YIN Zhichao, et al. Reconfiguration of distribution network based on double hybrid particle swarm algorithm[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(11): 120-128.
- [25] JASTHI K, DAS D. Simultaneous distribution system reconfiguration and DG sizing algorithm without load flow solution[J]. *IET Generation Transmission & Distribution*, 2018, 12(6): 1303-1313.
- [26] 丁浩. 基于 PSO 的改进 BBO 算法[J]. *中华建设*, 2020(增刊 1): 91-93.
DING Hao. Improved BBO algorithm based on PSO[J]. *China Construction*, 2020(S1): 91-93.
- [27] 吉兴全, 刘琪, 于永进. 基于功率矩和邻域搜索的有源配电网两层重构算法[J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(1): 28-34.
JI Xingquan, LIU Qi, YU Yongjin. Two-level reconfiguration algorithm based on power moment and neighbourhood searching for distribution network[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(1): 28-34.
- [28] MAHDAVI M, ALHELOU H H, HESAMZADEH M R. An efficient stochastic reconfiguration model for distribution systems with uncertain loads[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 10640-10652.
- [29] 董志辉, 林凌雪. 基于改进模糊 C 均值聚类时段划分的配电网动态重构[J]. *电网技术*, 2019, 43(7): 2299-2305.
DONG Zhihui, LIN Lingxue. Dynamic reconfiguration of distribution network based on improved fuzzy C-means clustering of time division[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(7): 2299-2305.

收稿日期: 2023-02-26; 修回日期: 2023-05-04

作者简介:

杨胡萍(1964—), 女, 硕士, 教授, 研究方向为电力系统继电保护与控制; E-mail: yhping123@163.com

李晓馨(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网重构; E-mail: 1397057391@qq.com

李向军(1972—), 男, 硕士, 教授, 研究方向为网络空间安全、人工智能和数据挖掘。E-mail: lxjun_alex@163.com

(编辑 魏小丽)