

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190949

基于布谷鸟搜索和模拟退火算法的两电压等级配网重构方法

徐小琴¹, 王博¹, 赵红生¹, 杜治¹, 杨东俊¹, 刘军², 柳云刚², 胡钊²

(1. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430077;

2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为进一步提高电力系统整体资源的优化配置, 加强各电压等级之间的协调性, 降低电网运行的经济成本, 将单电压等级配电网结构优化问题拓展至两电压等级, 提出了一种两电压等级的配网重构优化方法。以有功网损、电压偏差、负载均衡度为目标函数, 在满足各电压等级电网运行条件的同时, 引入各电压等级供电可靠性约束以及线路负载率约束等协调性约束指标, 利用布谷鸟搜索算法寻优。并针对其在后期收敛速度慢、收敛精度差的缺点, 引入模拟退火算法以提高算法的全局和局部搜索能力。算例分析表明所提方法是可行和有效的。

关键词: 两电压等级配电网; 网络重构; 模拟退火算法; 布谷鸟搜索算法

Reconfiguration of two-voltage distribution network based on cuckoo search and simulated annealing algorithm

XU Xiaoqin¹, WANG Bo¹, ZHAO Hongsheng¹, DU Zhi¹, YANG Dongjun¹, LIU Jun², LIU Yungang², HU Po²

(1. State Grid HBEPCLtd. Economic & Technology Research Institute, Wuhan 430077, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to further improve the optimal allocation of power system resources, strengthen the coordination among voltage levels and reduce the economic cost of power grid operation, this paper extends the optimization of single-voltage distribution network structure to two-voltage level and proposes a two-voltage level distribution network reconfiguration optimization method. Taking active power loss, voltage deviation and load balance as the objective functions, while satisfying the operation conditions of each voltage level power grid, coordination constraints such as power supply reliability constraints of each voltage level and line load rate constraints are introduced, and a cuckoo search algorithm is used for optimization. Considering its slow convergence rate and convergence rate in the later stage, the simulated annealing algorithm is introduced to improve the global and local search ability of the algorithm. The example shows that the method proposed in this paper is feasible and effective.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050101).

Key words: two-voltage distribution network; network reconfiguration; simulated annealing algorithm; cuckoo search algorithm

0 引言

近年来, 售电增幅趋缓、输配电价改革、成本刚性增长, 导致电网公司运营压力加大。因此, 对配电网重构的研究也越来越多。配电网重构通过改变系统内的联络开关组合来改变网络拓扑结构, 从而提高配电网的运行可靠性^[1], 降低网损, 均衡负

荷和改善供电质量。

在配网重构中一般是以最小网损和最小电压偏差等经济性和可靠性指标为目标函数^[2-3], 在满足电网运行结构要求的同时, 以电压、电流、容量上下限、潮流方程和 $N-1$ 通过率等为约束条件, 利用算法寻求最佳优化方案以实现降低电网运行成本和提高供电质量及可靠性的目的。

目前, 在配电网重构研究中大多针对城市单一电压等级配电网, 在已有线路基础上, 通过对负荷供电线路、风电、光伏等分布式电源及无功补偿装

置的出力进行优化求解以实现配电网重构。配电网重构求解过程可以转换为复杂的多目标非线性整数组合问题的求解^[4], 其方法可以概括为三类: (1) 传统的数学优化方法^[5-7]; (2) 启发式方法^[8-11]; (3) 人工智能算法^[12-19]。其中, 文献[6]以经济性指标为目标函数, 将潮流方程进行变换并合理松弛为二阶锥约束, 建立了混合整数二阶锥模型; 文献[9]利用最优流法从支路交换的候选集中快速确定 Mayeda 生成树算法中用于支路交换的支路, 从而既回避了随机进化选择方法进化慢的缺点, 又避开了穷举法生成过多劣树的缺点; 文献[13]将 DG 向配电网注入的无功功率作为配电网无功优化的控制变量, 提出了自然选择机理与粒子群算法相结合的配电网无功优化方法。

本文考虑以上单电压等级配电网重构方法难以解决各电压层级间协调性不够高、线路负载率不平衡、电网整体利用率不高的问题, 提出两电压等级的配电网重构方法。并在单电压等级配电网重构模型的基础上, 引入各电压层级网络可靠性约束条件以及线路负载率约束条件, 通过模拟退火算法改进传统布谷鸟搜索算法, 由此求解两电压等级配电网重构模型。

1 两电压等级配电网重构模型

1.1 目标函数

综合考虑电网运营的经济效益、可靠性指标及各电压等级的协调性, 建立以最小有功网损^[8]、最小电压偏差、最优负荷均衡度为目标的两电压等级配电网重构模型。

1) 最小有功网损

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^n \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} k_i R_i \quad (1)$$

式中: i 为支路编号; n 为支路总数; P_i 、 Q_i 分别为第 i 条支路末端的有功功率和无功功率; U_i 为第 i 条支路末端的节点电压; k_i 表示第 i 条支路上开关状态, 用 0 和 1 表示其断开与闭合; R_i 为第 i 条支路上的电阻。由于本文是采用 matpower 输入网络参数进行潮流计算, 其两电压等级连接处的变压器当作一根带阻抗的输电线处理, 因此有功网损包含变压器损耗。

2) 最小电压偏差

$$\min f_2 = \sum_{j=1}^k \frac{(U_{jS} - U_{jN})^2}{U_{jN}^2} \quad (2)$$

式中: j 表示节点编号; k 为节点总数; U_{jS} 、 U_{jN}

分别表示第 j 个节点处的实际电压和额定电压。

3) 最优负荷均衡度

$$\min f_3 = \sum_{j=1}^m \left(\frac{S_j}{S_{j\max}} \right)^2 \quad (3)$$

式中: j 表示支路编号; m 为闭合支路总数; S_j 、 $S_{j\max}$ 分别为支路 j 注入的复功率和最大允许复功率。

4) 多目标归一化处理

为了避免人为确定权重带来较强的主观性并且保证多目标函数的多样性, 本文采用随机权重分配方法^[20], 即

$$\varphi_i = \frac{rand_i}{\sum_{i=1}^3 rand_i} \quad (4)$$

式中, $rand_i$ 为(0,1)随机数。

归一化处理公式为

$$f = \varphi_1 \frac{F_1}{f_1} + \varphi_2 \frac{F_2}{f_2} + \varphi_3 \frac{F_3}{f_3} \quad (5)$$

式中: φ_1 、 φ_2 、 φ_3 分别为三个目标函数的随机权重; F_1 、 F_2 、 F_3 分别为三个目标函数每次迭代的最小值。

1.2 约束条件

在满足配电网无孤岛、辐射状运行等网络结构要求的同时, 还要满足潮流方程等式约束和电压、容量等不等式约束。为了保证配电网重构过程中上下级电网的可靠性与协调性, 本文在约束条件中引入各电压层级网络可靠性约束条件和线路负载率约束条件。

1) 潮流方程等式约束

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = Q_i - V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为节点 i 注入的有功功率和无功功率; V_i 表示节点 i 的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 分别表示节点 i 和节点 j 之间的电导、电纳、相角差。

2) 电压、容量不等式约束

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (7)$$

$$S_i \leq S_{i\max} \quad (8)$$

式中: U_i 、 $U_{i\min}$ 、 $U_{i\max}$ 分别表示节点 i 的实际电压、电压允许最小值、电压允许最大值; S_i 、 $S_{i\max}$ 分别表示节点 i 的实际容量和允许容量最大值。

3) 高电压等级电网可靠性约束

$$R_t = 1 - \frac{1}{P_{\max}} \sum_{j \in F} P_j P_{\text{state},j} > R_{t,\min} \quad (9)$$

式中： R_t 为高电压等级电网可靠性指标； F 为高电压等级电网故障合集； P_{\max} 为高电压等级电网所供最大负荷； $P_{\text{state},j}$ 为高电压等级电网处于 j 故障状态的概率； P_j 为高电压等级电网处于 j 故障状态时的切负荷量； $R_{t,\min}$ 为高电压等级电网可靠性最低值。

4) 相邻电压等级电网线路负载率约束

$$|R_T - R_H| \leq \Delta R_{\max} \quad (10)$$

其中

$$\begin{cases} R_T = \frac{1}{n_T} \sum_i^{n_T} \frac{I_i}{I_{\max,i}} \\ R_H = \frac{1}{n_H} \sum_i^{n_H} \frac{I_i}{I_{\max,i}} \end{cases} \quad (11)$$

式中： R_T 为高电压等级电网线路平均负载率； R_H 为低电压等级电网线路平均负载率； ΔR_{\max} 为相邻电网线路负载率最大允许差值； n_T 、 n_H 分别为高电压等级电网和低电压等级电网线路总数； I_i 为流过线路 i 的实际电流； $I_{\max,i}$ 为线路 i 的最大允许电流。

5) 孤岛约束与辐射状拓扑约束

在配电网重构中，一方面由于输电线路的开断，存在分裂网络连接，使电网产生孤岛的可能，因此需要排除配电网重构后产生孤岛的情况；另一方面还需要保证其拓扑结构为辐射状。

孤岛判断方法为：首先建立配电网重构后的节点-支路的关联矩阵；然后利用该矩阵，从节点 1 开始搜索，搜索其他节点与节点 1 直接或间接相连节点，形成一个节点集；最后根据节点集中是否包含了所有的节点来判断重构后是否产生孤岛。如果产生孤岛则排除该种拓扑。

辐射状拓扑判定方法可参考文献[6]中的广度搜索算法，此处不再赘述。

2 混合模拟退火布谷鸟算法

2.1 布谷鸟搜索算法

布谷鸟搜索算法(Cuckoo Search, 简称 CS 算法)是通过模拟布谷鸟寄生生育雏来寻找问题最优解的一种启发式算法。其模拟布谷鸟寄生生育雏的行为，即布谷鸟本身不筑巢，而是将自己的卵偷偷寄生在宿主鸟巢中，让宿主替自己孵化并养育。布谷鸟一般选择与自己蛋形颜色等相近的宿主鸟巢，但也有可能会被宿主发现并踢出鸟巢。因此，布谷鸟的后代仅有一定的存活率，其大小取决于布谷鸟与宿主鸟

的蛋形、颜色相似性、布谷鸟雏鸟与宿主鸟雏鸟的食性相似性等，相似性越大，则布谷鸟后代存活率越大。根据这一仿生原理，将布谷鸟寄生鸟巢映射为搜索域中的解，用算法的迭代寻优过程来表示布谷鸟搜索选择鸟巢的过程，用宿主鸟巢位置的优劣来表示求解问题的适应度大小。同时，在 CS 算法中还有如下假设：

(1) 每只布谷鸟每次只产生一个卵，且随机选择寄生鸟巢；

(2) 在随机选择的一组鸟巢中，将最好的鸟巢保留至下一代；

(3) 可寄生的鸟巢数量是固定的，且宿主以概率 $P_\alpha \in (0,1)$ 发现布谷鸟鸟蛋。

布谷鸟搜索算法采用 lévy 飞行更新鸟巢位置，运用精英保留策略保留当前较优鸟巢位置，通过发现概率淘汰较差的鸟巢位置，并按照随机游走方式产生新解来替代被舍弃的解，最终寻到最优鸟巢，即得到所求的最优解。

基于前述的仿生原理及假设，布谷鸟搜索算法位置更新公式为

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha \otimes \text{levy}(\lambda) \quad (12)$$

式中： x_i^{t+1} 和 x_i^t 分别表示第 i 个鸟巢在第 $t+1$ 次和第 t 次迭代时的位置； α 的表示式为

$$\alpha = \alpha_0 (x_i^t - x_{\text{best}}^t) \quad (13)$$

x_{best}^t 为第 t 次迭代时鸟巢的最佳位置； α_0 为控制随机搜索步长范围的步长因子，一般取 0.01； \otimes 表示点对点乘法； $\text{levy}(\lambda)$ 表示服从莱维飞行路径，即

$$\text{levy}(\lambda) \sim t^{-1-\lambda}, 0 < \lambda < 2 \quad (14)$$

$\text{levy}(\lambda)$ 的计算式为

$$\text{levy}(\lambda) = \frac{\phi u}{|v|^{1/\beta}} \quad (15)$$

式中， u 、 v 服从正态分布， $\beta = 1.5$ 时， $u \sim N(0,1)$ ， $v \sim N(0,1)$ ， ϕ 的计算公式^[21]为

$$\phi = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta) \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{\beta-1}{2}\right) \Gamma\left(\frac{\beta+1}{2}\right)} \right\}^{1/\beta} \quad (16)$$

式中， $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数。

综上，布谷鸟搜索算法新解生成公式可表示为

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \alpha_0 \frac{\phi u}{|v|^{1/\beta}} (x_i^t - x_{\text{best}}^t) \quad (17)$$

利用式(17)更新鸟巢位置后，比较均匀分布的随机数 $r \in (0,1)$ 与发现概率 P_α ，若 $r > P_\alpha$ ，则布谷

鸟蛋被发现并丢弃, 这时需要根据随机游走偏差公式更新鸟巢位置, 反之不变。随机游走偏差公式为

$$x_i^{t+1} = x_i^t + R(x_j^t - x_g^t) \quad (18)$$

式中: R 为偏差系数; x_j^t 和 x_g^t 分别表示第 j 个和第 g 个鸟巢在第 t 次迭代时的位置。

最后, 保存较优鸟巢至下一代。通过反复迭代, 直至找到最优解或是达到迭代次数上限。

2.2 模拟退火算法

模拟退火算法(简称 SA)也是一种启发式算法, 模拟了热力学中经典粒子系统降温的物理过程。当孤立粒子系统的温度 T 降低的速度非常缓慢时, 可以认为该系统处于热力学平衡状态, 此时系统能量最低。在 SA 算法中, 采用 Metropolis^[22]接受准则来判断控制温度参数 T 的所有取值, 即重复进行“产生新解-进行判断-接受或舍弃”这一迭代过程, 最终找到该系统在 T 温度下的平衡状态, 即得到最优解。

SA 算法流程如下。

Step1: 参数设定, 包括控制温度参数 T 的初始值 T_0 、终值 T_{end} 、马尔科夫链长度 L 及温度衰减系数 A 等; 初始化解 x_0 并设置适应度函数 $f(x_0)$ 。

Step2: 当温度参数 $T = T_k$ 时, 对当前解 x_k 按式(19)进行更新, 即

$$x_{k+1} = x_k \oplus \text{random} \quad (19)$$

式中: \oplus 表示点对点加法; random 表示随机数组。

Step3: 随机产生一个均匀分布数 β , $\beta \in (0, 1)$, 由式(20)计算在当前温度 T_k 下, 当前解 x_k 采用 Metropolis 接受准则的转移概率 P 。

$$P = \begin{cases} 1, & f(x_{k+1}) < f(x_k) \\ \exp\left(\frac{f(x_k) - f(x_{k+1})}{T_k}\right), & f(x_{k+1}) \geq f(x_k) \end{cases} \quad (20)$$

当 $\beta < P$ 时, 接受新解, 即 $x_k = x_{k+1}$, 反之保持当前解不变。

Step4: 判断是否满足终止条件, 如果是则结束算法程序; 否则返回 Step2 进行迭代, 并更新温度参数 T_k 为 T_{k+1} 。

2.3 混合模拟退火布谷鸟算法

为提高布谷鸟搜索算法后期收敛速度以及优化结果的精度, 引入模拟退火算法, 对布谷鸟搜索算法进行改进, 形成混合模拟退火布谷鸟算法(SA-CS)。在该算法中, 若搜索结果陷入局部最优, 则在迭代过程中随机选取一部分鸟巢进入模拟退火过程, 以避免算法陷入局部最优。

退火时机的判断准则:

引入模拟退火的时机即是判断算法是否陷入局部最优, 其主要方法为: 在基本的 CS 算法中, 记录每一次迭代过程中最优鸟巢适应度值, 并由式(21)计算鸟巢适应度变化率, 若变化率小于某一固定值 Δf 且当前迭代次数大于 n , 则选取部分鸟巢采用模拟退火机制进行位置更新。

$$\frac{|f(x_{\text{best}}^t) - f(x_{\text{best}}^{t-n})|}{|f(x_{\text{best}}^t)|} < \Delta f, t > n \quad (21)$$

混合模拟退火布谷鸟算法流程如下。

Step1: 设定参数, 包括种群数量 s 、最大迭代次数 N 、发现概率 P_a 、步长因子 α_0 和温度衰减系数 $\delta = 0.95$;

Step2: 初始化种群, 计算鸟巢适应度值, 保留最好的鸟巢;

Step3: 判断迭代次数是否大于 n 且算法是否落入局部最优, 若是, 则转入步骤①, 否则转入步骤②;

① 随机选取一部分鸟巢采用模拟退火机制更新位置, 其余鸟巢两两交叉, 将结果合并, 计算并保留适应度高的鸟巢;

② 采用莱维飞行公式更新鸟巢位置, 计算并保留适应度高的鸟巢;

Step4: 若 $r > P_a$, 对被发现的鸟巢进行变异操作, 计算并保留适应度高的鸟巢;

Step5: 记录历史最优鸟巢位置, 判断是否满足终止条件, 若是, 则结束算法程序, 否则返回 Step3 继续进行迭代。

3 两电压等级配网重构计算原理

基于两电压等级配电网重构模型和混合模拟退火布谷鸟算法形成两电压等级配网重构方法, 其计算流程如下。两电压等级配网重构计算流程如图 1 所示。

(1) 随机生成联络开关线路的状态, 形成 0-1 变量, 作为鸟巢坐标 x 。0 和 1 分别代表联络开关线路断开和闭合。

(2) 基于鸟巢坐标 x , 即联络开关线路状态, 计算配电网潮流, 如潮流方程无解、重构后产生孤岛^[23]或者拓扑结构不是辐射状^[6], 则直接设置该鸟巢的适应度为 M , M 为一较大值, 本文中取 10^4 , 若有解、无孤岛且为辐射状网络, 判断 x 是否满足约束式(6)一式(11), 若满足进入步骤(3), 若不满足, 同样设置鸟巢的适应度为 M 。

(3) 计算在鸟巢坐标 x 下的配电网潮流, 根据潮流计算结果利用式(1)一式(5)得到鸟巢 x 的适应度。

(4) 根据式(21)判断算法是否陷入局部最优, 若是则采用式(12)一式(18)的布谷鸟搜索算法更新鸟

巢位置并转至步骤(2), 否则采用 2.3 节中模拟退火机制更新鸟巢位置并转至步骤(2)。

(5) 判断是否达到最大迭代次数 N , 若是则结束算法程序输出最优联络线路开断组合, 否则转入步骤(2)。

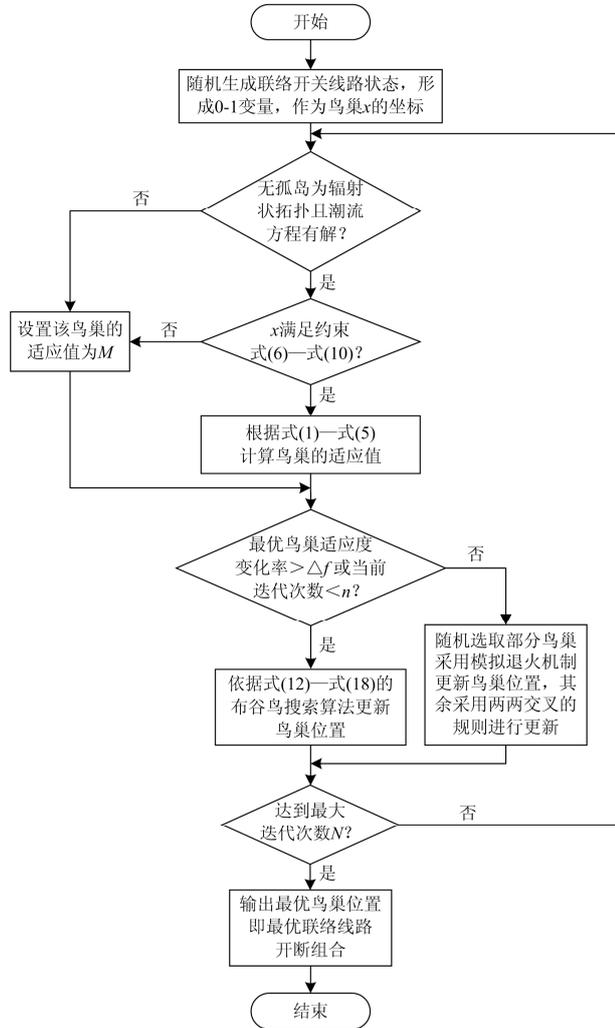


图 1 两电压等级配网重构计算流程图

Fig. 1 Flow chart of reconfiguration calculation for two-voltage distribution network

4 算例分析

为了验证本文所提出的两电压等级的配电网重构方法和 SA-CS 算法的有效性, 在图 2 所示的由 IEEE33 标准节点和修改后的 IEEE14 标准节点组成的 23 kV 和 12.66 kV 两个电压等级 46 节点配电网中, 利用 Matlab 进行了仿真分析^[24-25]。该网络共有 46 个负荷点、55 条分支线路、45 个分段开关、10 个联络开关, 参数设置如下。

种群规模 $s = 30$, 最大迭代次数 $N = 50$, 鸟巢被发现概率 $P_a = 0.5$, 步长因子 $\alpha = 0.01$, $n = 20$,

模拟退火算法中马尔科夫链长度为 $L = 30$, 初始温度 $T_0 = 3000^\circ\text{C}$, 终止温度 $T_{\text{end}} = 0.001^\circ\text{C}$, 温度衰减系数 $A = 0.95$, 此外经调试在本算例中 $n = \frac{N}{2} = 25$ 、变化率 $\Delta f = 0.02$ 时所取得的收敛效果较为理想。

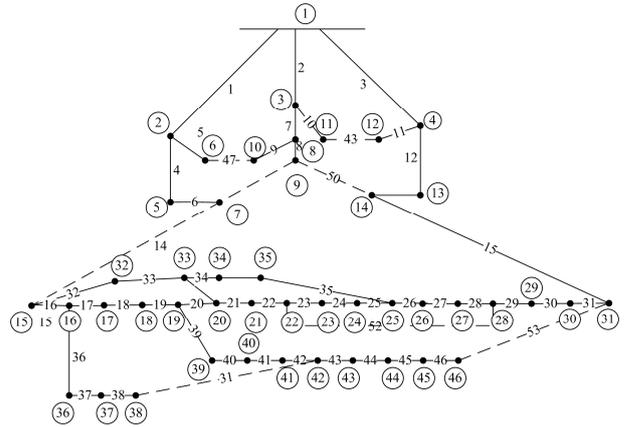


图 2 46 节点两电压等级网络

Fig. 2 46-node two-voltage level network

电网重构优化前后结果如表 1 所示。

表 1 网络重构前后结果对比

Table 1 Results comparison before and after network reconfiguration

场景	网损/kW	负荷均衡度	电压偏差
优化前	346.53	1.136	0.045
优化后	206.10	0.635	0.015

优化前所有联络开关线路断开, 优化后断开线路为支路 9、11、16、17、28、31、41、49、50、54, 相比于优化前, 网损降低了 40.51%, 降损效果明显; 负荷均衡度和电压偏差分别降低了 44.1%和 66.7%, 因此系统稳定性得到显著提升。

图 3 是优化前后电压偏差曲线图, 可以看出, 优化后节点电压普遍上升, 12.66 kV 系统中所有节点电压均上升了 0.13 kV 以上, 从而提升了该系统的稳定性。

表 2 给出了两电压等级优化与单电压等级配网结构优化的对比结果。两个电压等级系统单独优化时总网损为 240.23 kW, 联合优化后网损降低了 14.20%, 降损效果更优, 负荷均衡度和电压偏差也分别降低了 4.10%和 57.75%。由此可见, 两电压等级网络优化模型可以较大幅度地提升系统的经济效益与稳定性。

表 3 为本文算法与传统布谷鸟算法、遗传算法性能的比较结果, 三种算法的迭代曲线如图 4 所示。

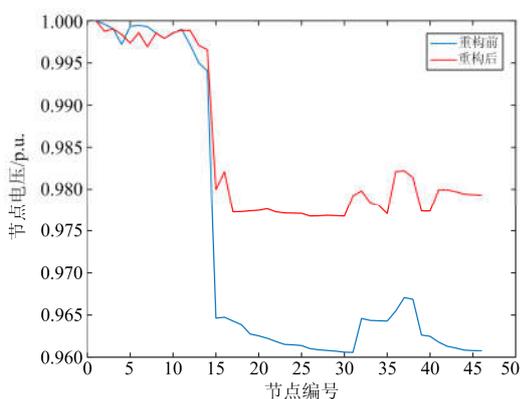


图3 节点电压偏移曲线

Fig. 3 Node voltage offset curve

表2 系统模型性能指标对比

Table 2 Comparison of performance of optimized models

系统	网损/kW	负荷均衡度	电压偏差
23 kV	100.789	0.654	0.023
12.66 kV	139.441	0.673	0.048
两个电压等级	206.101	0.636	0.015

表3 算法性能对比

Table 3 Comparison of algorithm performance

算法	最优解 (网损代表)/kW	平均迭代 次数	平均耗时/s
传统布谷鸟	262.33	34	191
遗传算法	238.37	55	73
本文算法	206.10	25	69

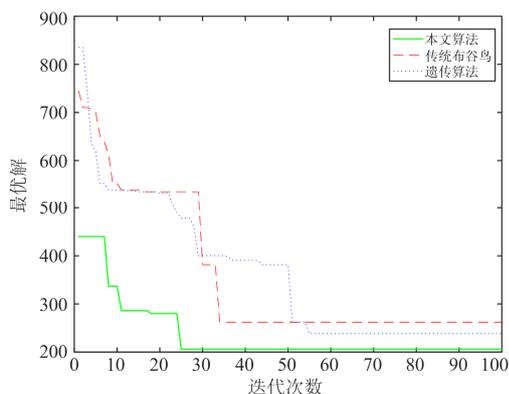


图4 算法迭代曲线

Fig. 4 Algorithm iteration curve

由表3和图4可见,传统布谷鸟算法与遗传算法均陷入局部最优,未能找到全局最优解,而本文算法能够兼顾全局寻优和局部寻优能力,收敛速度更快,平均迭代在25次左右,耗时更短,比传统布谷鸟算法速度提升了64%。因此,本文算法具有更

高的准确性与高效性。

5 结论

本文在传统单电压等级系统配电网重构的基础上,将其扩展到两电压等级系统,同时引入不同电压等级间的协调性约束指标以加强各电压等级之间的协调性与联动性。在求解算法中,采用全局寻优能力极强的布谷鸟搜索算法,并引入模拟退火算法增强其局部寻优能力,以同时提高算法全局和局部寻优能力。

本文所提出的两电压等级配电网重构模型能够有效减小有功损耗,提高系统稳定性,同时增强各电压等级间的协调性,提高了电力系统整体资源的优化配置。此外,本文所提出的方法在配电网重构求解中具有更高的准确性与效率,并且还可以直接推广应用于跨电压等级的配电网重构。

参考文献

- [1] NAIK S G, RAVI V, ARSHIYA R. Programmable protective device for LV distribution system protection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 285-290. DOI: 10.1186/s41601-018-0101-5.
- [2] 陈春, 汪飒, 刘蓓, 等. 基于基本环矩阵与改进和声搜索算法的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 55-60.
CHEN Chun, WANG Feng, LIU Bei, et al. Network reconfiguration based on basic ring matrix and improved harmony search algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 55-60.
- [3] 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 neighborhood searching for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 28-34.
- [4] 许喆, 潘金生, 樊淑娴, 等. 基于改进布萤火虫算法的含DG配电网重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 26-32.
XU Zhe, PAN Jinsheng, FAN Shuxian, et al. A distribution network reconfiguration method with distributed generation based on improved firefly algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 26-32.
- [5] 郑能, 胡瑞馨, 丁晓群, 等. 考虑多种类型的分布式电源和网络重构的配电网无功优化[J]. 智慧电力, 2019, 47(3): 90-96.

- ZHENG Neng, HU Ruixin, DING Xiaoqun, et al. Reactive power optimization of distribution network considering multiple types of distributed generations and network reconfiguration[J]. Smart Power, 2019, 47(3): 90-96.
- [6] 范心明, 陈锦荣, 吴树鸿, 等. 离散学习优化算法在含分布式电源的配网重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 156-163.
- FAN Xinming, CHEN Jinrong, WU Shuhong, et al. Application of discrete learning optimization algorithm to distribution network reconfiguration considering distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 156-163.
- [7] 梁捷, 李刚. 基于节点特征分类的配电网重构辐射约束处理法[J]. 广东电力, 2016, 29(8): 91-95, 106.
- LIANG Jie, LI Gang. Radial constraint handling method for reconfiguration of power distribution network based on feature classification of nodes[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(8): 91-95, 106.
- [8] 张剑, 何怡刚. 基于无向图所有生成树的网络重构遗传算法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 136-141.
- ZHANG Jian, HE Yigang. Genetic algorithm based on all spanning trees of undirected graph for distribution network reconfiguration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 136-141.
- [9] 张重实, 王高猛, 张檀雍, 等. 基于最优流法与 Mayeda 生成树算法相结合的单阶段配网重构新方法[J]. 中国电力, 2018, 51(9): 110-117.
- ZHANG Zhongshi, WANG Gaomeng, ZHANG Tanyong, et al. A new method for one-stage distribution system reconfiguration based on optimal flow algorithm and Mayeda spanning tree algorithm[J]. Electric Power, 2018, 51(9): 110-117.
- [10] 毕鹏翔, 刘健, 张文元. 配电网重构的改进支路交换法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 99-104.
- BI Pengxiang, LIU Jian, ZHANG Wenyuan. A refined branch-exchange algorithm for distribution networks reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 99-104.
- [11] 周洁洁, 阙凌燕, 王良毅, 等. 采用改进最优模糊 C 均值聚类和改进和声搜索算法的配电网动态重构[J]. 机电工程, 2015, 32(4): 531-536, 543.
- ZHOU Jiejie, QUE Lingyan, WANG Liangyi, et al. Dynamic reconfiguration of distribution network based on improved optimal fuzzy C-Means clustering and improved harmonic search algorithm[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(4): 531-536, 543.
- [12] 王瑞峰, 侯成滨. 采用特性指标聚类和改进萤火虫算法的配电网动态重构[J]. 太阳能学报, 2018, 39(11): 3193-3201.
- WANG Ruifeng, HOU Chengbin. Dynamic reconfiguration of distribution network based on pattern index clustering and improved glowworm optimization algorithm[J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2018, 39(11): 3193-3201.
- [13] 徐俊俊, 黄永红, 王琪, 等. 基于自然选择粒子群算法的含 DG 接入的配电网无功优化[J]. 电测与仪表, 2014, 51(10): 33-38, 50.
- XU Junjun, HUANG Yonghong, WANG Qi, et al. Reactive power optimization in distribution network with DG based on natural selection particle swarm optimization[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(10): 33-38, 50.
- [14] 丁阳, 汪飒, 宾峰, 等. 计及分布式电源不确定性的快速网络重构[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(9): 57-63.
- DING Yang, WANG Feng, BIN Feng, et al. Fast network reconfiguration considering distributed power supply uncertainty[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(9): 57-63.
- [15] 符杨, 孟令合, 罗萍萍, 等. 基于捕食搜索策略的粒子群算法在输电网络扩展规划中的应用[J]. 电力建设, 2009, 30(3): 1-4.
- FU Yang, MENG Linghe, LUO Pingping, et al. Application of particle swarm optimization algorithm based on predatory search strategy in transmission power grid expansion planning[J]. Electric Power Construction, 2009, 30(3): 1-4.
- [16] 彭泓, 宋丹, 杨巍. 基于改进布谷鸟搜索算法的配电网重构[J]. 测控技术, 2018, 37(7): 37-41.
- PENG Hong, SONG Dan, YANG Wei. Distribution network reconfiguration based on improved cuckoo search algorithm[J]. Measurement & Control Technology, 2018, 37(7): 37-41.
- [17] 栗然, 马慧卓, 祝晋尧, 等. 分布式电源接入配电网多目标优化规划[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 6-13.
- LI Ran, MA Huizhuo, ZHU Jinyao, et al. Multi-objective optimization for DG integration into distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 6-13.
- [18] 宋云霄, 毛弋, 涂钊颖, 等. 基于广东省博罗县配电网优化重构研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2019, 42(2): 89-96.
- SONG Xiaoxiao, MAO Yi, TU Zhaoying, et al. Research on distribution network optimization and reconfiguration based on Boluo county of Guangdong[J]. Journal of Natural

- Science of Hunan Normal University, 2019, 42(2): 89-96.
- [19] 王庆荣, 王瑞峰. 基于改进粒子群算法的配电网重构策略[J]. 计算机应用, 2018, 38(9): 2720-2724.
WANG Qingrong, WANG Ruifeng. Reconfiguration strategy of distribution network based on improved particle swarm optimization[J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(9): 2720-2724.
- [20] 陈正鹏, 黄纯, 张亚萍, 等. 基于改进双种群遗传算法的含分布式电源配电网重构[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(4): 78-83.
CHEN Zhengpeng, HUANG Chun, ZHANG Yaping, et al. Distribution network reconfiguration with different distributed generations based on improved dual population genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(4): 78-83.
- [21] PAI P, HONG W. Forecasting regional electricity load based on recurrent support vector machines with genetic algorithms[J]. Electric Power Systems Research, 2005, 3(74): 417-425.
- [22] MENTEGNA R N. Fast, accurate algorithm for numerical simulation of stable stochastic processes[J]. Physical Review E Statistical Physics Plasmas Fluids & Related Interdisciplinary Topics, 1994, 49(5): 4677-4683.
- [23] 赵博石, 胡泽春, 宋永华. 考虑 N-1 安全约束的含可再生能源输电网结构鲁棒优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 16-26.
ZHAO Boshi, HU Zechun, SONG Yonghua. Robust optimization of transmission topology with renewable energy sources considering N-1 security constraint[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 16-26.
- [24] 郑博文, 杨隽, 杨承辰, 等. 基于柔性分析的配电网重构方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(23): 90-95.
ZHENG Bowen, YANG Jun, YANG Chengchen, et al. A method for optimization of distribution network reconfiguration based on flexible analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(23): 90-95.
- [25] 李洪美, 崔翰韬, 万秋兰. 考虑电动汽车充电策略的配网重构二阶锥规划模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4674-4681.
LI Hongmei, CUI Hantao, WAN Qiulan. Distribution network reconfiguration based on second-order conic programming considering EV charging strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4674-4681.

收稿日期: 2019-08-05; 修回日期: 2019-11-15

作者简介:

徐小琴(1987—), 女, 硕士, 工程师, 长期从事电力负荷分析与电网规划等方面的研究工作; E-mail: xuxiaoqin8722@163.com

王博(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 长期从事电力系统分析与电网规划等方面的研究工作; E-mail: 2293107@qq.com

赵红生(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事电力调度运行与电网规划等方面的研究工作。E-mail: 183575350@qq.com

(编辑 魏小丽)