

文章编号:0254-0096(2018)11-3193-09

# 采用特性指标聚类和改进萤火虫算法的 配电网动态重构

王瑞峰, 侯成滨

(兰州交通大学自动化与电气工程学院, 兰州 730070)

**摘要:** 为更好处理考虑负荷变化的配电网动态重构问题,将一种基于负荷特性指标降维的聚类方法应用于配电网负荷聚类,根据负荷特性相似性进行重构时段的划分,有效解决开关操作次数对实际配电网调度的不良影响。将最小生成树思想与改进的萤火虫算法相结合,以有功网损和负荷均衡指数最小构造目标函数,对负荷聚类后的配电网动态重构问题进行仿真验证。研究结果表明:改进的聚类算法可精确地对配电网负荷进行分类,为配电网重构提供了良好的基础,改进重构算法可快速有效地对配电网进行动态重构。

**关键词:** 多目标配电网重构; 负荷均衡; 分布式电源; 负荷聚类; 最小生成树; 萤火虫算法

中图分类号: TM711

文献标识码: A

## 0 引言

配电网重构概念提出后,如遗传算法<sup>[1]</sup>、蚁群算法<sup>[2]</sup>、粒子群算法<sup>[3]</sup>,以及新型的优化算法<sup>[4,5]</sup>在配电网静态重构中均得到较好应用。但实际配电网中负荷是实时变化的,针对某一时刻给定负荷的配电网静态重构不能满足系统要求,有必要对可应用于运行领域的配电网动态重构进行研究。文献[6]考虑到配电网重构过程中开关次数的限制,将负荷曲线根据负荷变化的幅度对其进行分割,形成不等的的时间间隔,能在一定程度上减少重构次数,但实际网络中各负荷点的变化趋势不一致,无法精确地对负荷曲线进行分割,故基于电力用户的实际负荷曲线分类对动态配电网重构有重要的意义。目前配电网动态重构中常用的负荷分类方法主要有  $k$  均值聚类、硬聚类、模糊  $C$  均值聚类(fuzzy C-means clustering, FCMC)<sup>[7]</sup>,均需人工设定聚类数目以及聚类中心。文献[8]对 FCMC 聚类数目以及聚类中心无法确定进行改进,并将新型智能算法应用于配电网重构。本文将一种基于特性指标降维的聚类方法应用于各负荷节点或同一负荷节点不同时间点

的负荷特性分类,以此聚类中心作为网络的一个负荷状态进行重构,充分反映负荷间的相似性,并兼顾运算效率,在此基础上提出基于最小生成树为搜索策略的粒子群算法,与改进后的萤火虫算法相结合,建立以有功网损和负荷均衡指数最小为目标函数,应用于求解以聚类中心为代表的静态重构问题。

## 1 基于特性指标降维聚类算法

配网负荷聚类分析是根据负荷曲线间的特征、亲疏程度、相似性,通过建立模糊相似关系对负荷曲线进行聚类的分析方法。配电网中的负荷变化可以通过负荷特性指标来体现,我国常用的负荷特性指标如日最大负荷利用率、日峰谷差、日负荷曲线等 15 个指标可直观的反映各类用电负荷的特点和性质。记 15 维日负荷特性指标权重向量为  $\mathbf{W}$ ,  $\mathbf{W}=[w_1, w_2, w_3, \dots, w_{15}]$ , 满足  $\sum_{i=1}^{15} w_i = 1$ 。当数据集规模较大时,采用集成聚类算法的计算时间还是较长,为了进一步提升聚类效率,有必要对数据集进行降维处理<sup>[9]</sup>。

收稿日期: 2016-07-14

基金项目: 甘肃省自然科学基金(1310RJZA046)

通信作者: 侯成滨(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事配电自动化方面的研究。18293136508@163.com

### 1.1 特性指标权重配置

日负荷指标权重配置的差异,直接影响到算法聚类的效果,本文采用改进的主成分分析法,将多个负荷特性指标进行降维,修正和聚类结果偏差较大或者失效的指标,得到聚类结果好的特性指标权重配置。具体步骤如下:

1)通过负荷预测和实时监测得到  $n$  条日负荷曲线,每条日负荷曲线有 15 个特性指标,  $X$  为  $n$  条日负荷曲线构成的  $n \times 15$  初始负荷曲线矩阵,对  $X$  进行标准化得标准化阵,有:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1l} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nl} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $y_{nl} = \frac{x_{nl} - \bar{x}_l}{s_l}$ ,  $x_{nl}$  为第  $n$  条负荷曲线第  $l$  个特性指标,  $\bar{x}_l$  为  $X$  阵中第  $l$  列的均值,  $s_l$  为  $X$  阵中第  $l$  列的标准差。

2)计算标准化阵  $Y$  的相关系数阵  $R$

$$R = [r_{ij}]_{l \times l} = \frac{Y^T Y}{n-1} \quad (2)$$

3)计算特征值与特征向量

4)剔除不符合聚类要求的特性指标

根据对负荷曲线影响程度,按式(3)计算其贡献值  $p$ ,为满足配电网重构快速精确性要求,充分反映负荷曲线特征,兼顾运算效率,剔除贡献率 85%以下的指标。

$$p = \frac{\sum_{k=1}^l \lambda_k}{\sum_{k=1}^{15} \lambda_k} \quad (3)$$

5)记降维后特性指标矩阵  $N$

$$N = \begin{bmatrix} \eta_{11} & \eta_{12} & \cdots & \eta_{15} \\ \eta_{21} & \eta_{22} & \cdots & \eta_{25} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \eta_{n1} & \eta_{n2} & \cdots & \eta_{n5} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对我国常用的 15 个负荷特性指标进行降维,得到 5 个指标用作负荷聚类特征,如表 1 所示。指标  $\eta_1 \sim \eta_3$  表示全天的负荷情况,  $\eta_4$ 、 $\eta_5$  表示峰谷期负荷利用情况,每个指标的物理意义不同,反映负荷利用程度也不同。将修正特性指标权重矩阵用于特性降维算法聚类,得到更准确的日负荷曲线聚

类结果。

表 1 日负荷特性指标

Table 1 Daily load pattern indexes

| 时段          | 指标    | 定义   | 物理意义及贡献率       |
|-------------|-------|--|----------------|
|             | 负荷率   | $\eta_1 = P_{av} / P_{max}$                  | 全天负荷变化, 93.2%  |
| 00:00~24:00 | 日平均负荷 | $\eta_2 = P_{sum} / 24$                      | 全天负荷利用率, 88.5% |
|             | 日峰谷差率 | $\eta_3 = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max}}$ | 配网调峰能力, 85%    |
| 负荷高峰期       | 尖峰负荷率 | $\eta_4 = P_{av, peak} / P_{av}$             | 高峰期负荷变化, 87.6% |
| 负荷低谷期       | 低谷负荷率 | $\eta_5 = P_{av, val} / P_{av}$              | 低谷期负荷变化, 87.8% |

### 1.2 特性降维算法步骤

特性降维算法以降维矩阵  $N$  为数据输入,相似性判据采用加权欧式距离,对负荷曲线进行聚类,算法步骤如下:

1)设  $c$  为聚类数,在降维矩阵  $N$  中随机抽取  $a$  个样本,将其作为初始聚类中心样本值  $\bar{m}_j (j=1, 2, \dots, a)$ ,  $\bar{m}_j$  表示第  $j$  类聚类中心,  $\bar{m}_j = [\bar{m}_{j1}, \bar{m}_{j2}, \bar{m}_{j3}, \bar{m}_{j4}, \bar{m}_{j5}]$ 。

2)计算所有样本  $\eta_i = [\eta_{i1}, \eta_{i2}, \eta_{i3}, \eta_{i4}, \eta_{i5}]$  到聚类中心的欧氏距离  $d_{ij}$ ,如式(5)所示:

$$d_{ij} = \sqrt{w_1 |\eta_{i1} - \bar{m}_{j1}|^2 + \cdots + w_5 |\eta_{i5} - \bar{m}_{j5}|^2} \quad (5)$$

根据距离计算,得到所有  $\eta_i$  到  $\bar{m}_j$  最近距离,将其分成一类。

3)设  $n_j$  是第  $j$  类样本的个数,  $z_{ij}$  为第  $j$  类中第  $i$  个样本,根据式(6)计算聚类中心数据。

$$\bar{m}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} z_{ij} (j=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

4)设  $t$  为迭代次数,按式(7)计算  $N$  中所有样本的平方误差  $J_c(t)$ ,与前一次误差  $J_c(t-1)$  比较。

$$J_c = \sum_{j=1}^a \sum_{i=1}^{n_j} \|z_{ij} - \bar{m}_j\|^2 \quad (7)$$

若  $J_c(t) - J_c(t-1) < 0$ ,则转向步骤 2),否则结束。

### 1.3 负荷聚类有效性验证

采用文献[10]的某地 833 个负荷用户 1 个月 30 d 的负荷数据,时间间隔为 1 h。根据聚类评估函数曲线,当聚类数目  $k=8$  时,聚类效果最优,8 种负荷类型如图 1 所示。

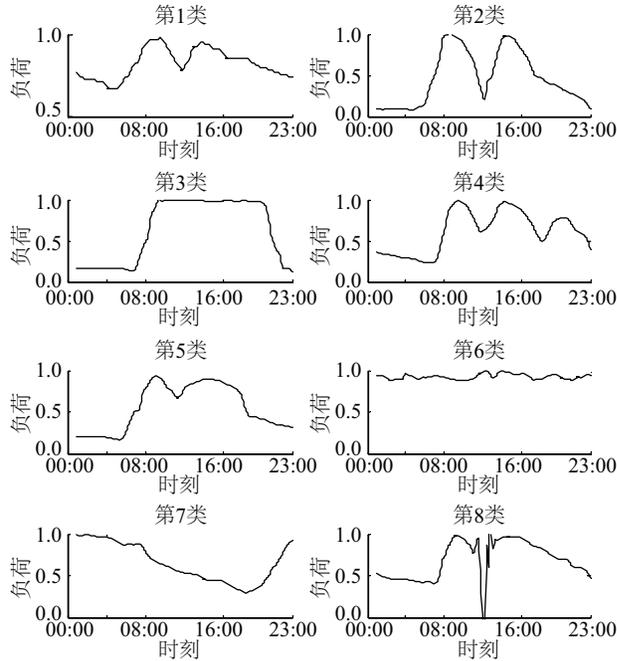


图1 文献[10]提取 8 类典型负荷曲线

Fig. 1 The 8 kinds of load curves based on reference[10]

基于此,分别在 8 种典型日负荷曲线数据点添加噪声比例为 10%~30% 随机噪声,模拟气温气候、收入、电价政策等多种因素影响。根据改变不同的噪声比例,比较本文所提算法与其他负荷聚类算法的优缺点。

根据改变不同噪声比例,当噪声比例低于 30% 时,对于特性降维算法,可精确地对负荷分类,聚类数为 8,根据文献[11]得到的  $k$  均值算法在噪声比例增大至 10%,表现出明显的受噪声干扰影响大,最佳聚类数不再为 8 分类准确率下降,不能完成精确负荷聚类。

根据图 2 所模拟的负荷曲线,通过降维算法提取出其聚类中心为代表的典型负荷曲线,与初始 8 类负荷曲线形态一致且精确率极高。根据比较,所提方法对典型日负荷曲线聚类效果明显,算法性能稳定,鲁棒性好,抗干扰能力强,为配电网重构工作提供了良好的基础。

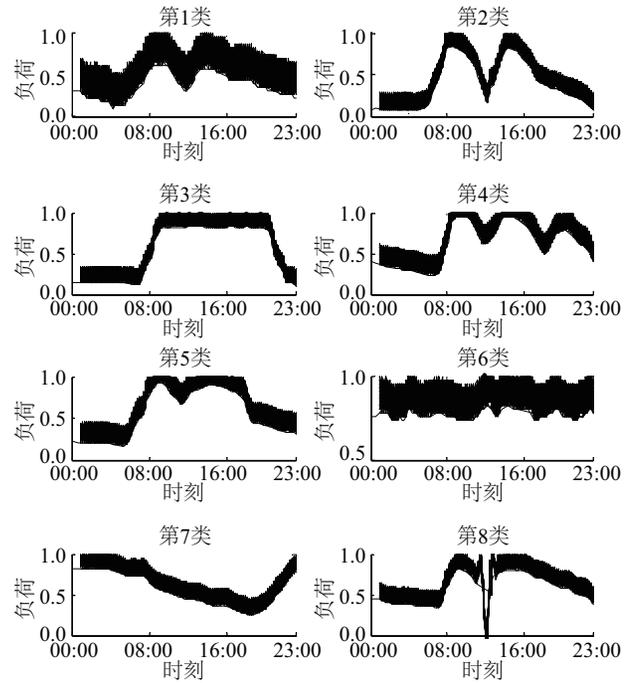


图2 模拟 500 条典型负荷曲线( $r=30%$ )

Fig. 2 Simulation of 500 typical load curves( $r=30%$ )

## 2 配电网重构数学模型

配电网重构通过开合配网中联络开关和分段开关,并合理地利用分布式电源(distributed generation, DG)对配电网的支撑作用,改变配电网网络结构,达到降低网损、提高电压质量、平衡负荷等目的。本文以有功损耗和负荷均衡指数最小为目标函数建立数学模型。

有功网损的目标函数表达式为:

$$\min f_1(x) = \sum_{i \in N_{m,k}} P_{m,i,loss} = \sum_{k \in N_{m,k}} R_i \frac{P_{m,i}^2 + Q_{m,i}^2}{V_{m,i}^2} \quad (8)$$

式中,  $N_{m,k}$  ——第  $m$  类负荷曲线下所有开关闭合的支路;  $R_i$  ——支路  $i$  的电阻;  $P_{m,i}$  ——聚类中心  $m$  下支路  $i$  末端流过的有功功率;  $Q_{m,i}$  ——聚类中心  $m$  下支路  $i$  末端流过的无功功率;  $V_{m,i}$  ——支路  $i$  注入功率节点的电压。

负荷均衡的目标函数表达式为:

$$LB_{sys} = \frac{1}{N_{m,k}} \sum_{i=1}^{N_{m,k}} S_{m,i} \quad (9)$$

$$\min f_2(x) = \min LB_{sys} \quad (10)$$

式中,  $LB_{sys}$  ——系统的负荷平衡指数;  $S_{m,i}$  ——聚类中心  $m$  状态下支路  $i$  的功率;  $S_{m,i,max}$  ——聚类中

心  $m$  状态下网络支路容量。

多目标优化模型表达式为:

$$\min f = \min[\lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x)] \quad (11)$$

式中,  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  ——多目标的权重系数, 满足  $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。本文采用判断矩阵法<sup>[12]</sup>计算得到各目标权重系数取值, 判断矩阵法的核心是各目标的重要程度即判断数的确定。针对本文的重构优化问题, 可将各目标根据其重要性分级, 考虑到网损最小和负荷均衡指数最小在变化趋势上具有一定的 consistency, 将有功网损作为第 1 等级目标, 负荷均衡指数作为第 2 等级目标, 计算得  $\lambda_1 = 0.6$ ,  $\lambda_2 = 0.4$ 。

满足以下约束条件:

1) 功率平衡约束

$$\begin{cases} P_i + P_{DG_i} = P_{D_i} + U_i \sum_{j=1}^{N_n} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i + Q_{DG_i} = Q_{D_i} + U_i \sum_{j=1}^{N_n} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $P_i$  ——节点  $i$  的输入有功功率;  $Q_i$  ——节点  $i$  的输入无功功率;  $P_{DG_i}$  ——DG 向节点  $i$  注入的有功功率;  $Q_{DG_i}$  ——DG 向节点  $i$  注入的无功功率;  $P_{D_i}$  ——节点  $i$  处负荷有功功率;  $Q_{D_i}$  ——节点  $i$  处无功功率;  $U_i$  ——节点  $i$  的电压幅值;  $U_j$  ——节点  $j$  的电压幅值;  $N_n$  ——节点总数;  $G_{ij}$  ——节点  $i$ 、 $j$  之间的电导;  $B_{ij}$  ——节点  $i$ 、 $j$  之间的电纳;  $\delta_{ij}$  ——节点  $i$ 、 $j$  之间的电压相角差。

2) 电压约束

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max}, i \in (1, 2, \dots, N_n) \quad (13)$$

式中,  $U_{i\min}$  ——节点电压上限;  $U_{i\max}$  ——节点电压下限。

3) 网络拓扑约束

配电网运行时呈辐射状且无孤岛。

## 3 改进萤火虫算法

### 3.1 原始萤火虫算法

萤火虫优化算法(GSO)通过模拟自然界中萤火虫求偶和觅食行为, 通过比较自身荧光素值的大小, 实现在求解空间内寻优。萤火虫优化算法在求解空间中随机分布  $N$  个萤火虫个体, 每个萤火虫都具有特定的荧光素值和感知半径, 荧光素值  $l_i$  和个体  $i$  所在的位置  $x_i$  相关联, 即对应着目标函数值

$f(x_i)$ 。每个萤火虫个体在自己的感知半径  $r_d^i (0 < r_d^i < r_s)$ , 其中  $r_s$  为个体最大感知半径) 内存在很多荧光素值大于自己的个体, 因此需要为每个个体建立邻域集合:

$$N_i(t) = \{j: d_{ij}(t) < r_d^i(t); l_j(t) < l_i(t)\} \quad (14)$$

式中,  $d_{ij}(t)$  ——个体  $i$  和  $j$  之间的距离。

邻域集合中所有个体被选择的概率:

$$p_{ij} = \frac{l_j(t) - l_i(t)}{\sum_{g \in N_i(t)} l_g(t) - l_i(t)} \quad (15)$$

式中,  $l_j(t)$  ——个体  $j$  的荧光素值;  $l_i(t)$  ——个体  $i$  的荧光素值;  $l_g(t)$  ——个体  $g$  的荧光素值。

根据计算的概率大小, 个体  $i$  在其感知范围内找到荧光素值优于自己的个体  $j$ , 按照式(16)更新位置。

$$x_i(t+1) = x_i(t) + s \left( \frac{x_j(t) - x_i(t)}{\|x_j(t) - x_i(t)\|} \right) \quad (16)$$

式中,  $s$  ——移动步长。

当更新位置后, 萤火虫个体  $i$  的荧光素  $l_i$  按式(17)进行更新:

$$l_i(t+1) = (1 - \rho)l_i(t) + \gamma f[x_i(t+1)] \quad (17)$$

式中,  $l_i(t+1)$  ——第  $t+1$  迭代时个体  $i$  荧光素值大小;  $\rho$  ——荧光素值挥发系数;  $\gamma$  ——荧光素值增强系数。

更新位置后, 按式(18)更新个体  $i$  的邻域半径:

$$r_d^i(t+1) = \min \left\{ r_s, \max \left[ 0, r_d^i(t) + \beta (n_i - |N_i(t)|) \right] \right\} \quad (18)$$

### 3.2 改进的萤火虫算法

萤火虫算法具有其寻优的优点, 但其对个体步长和邻域集合依赖程度较高。一方面, 在迭代过程中, 个体步长为固定值, 当 2 个个体距离较远时, 则需多次迭代才能获得最优值; 当两者距离较近小于固定步长时, 则会出现最优解附近的震荡, 均会导致收敛速度慢, 求解精度不高。另一方面, 当个体在其感知范围内未发现优秀个体, 即邻域集合为空集, 此时个体会停止搜索, 降低搜索效率。

综上, 根据不同阶段搜索结果, 动态调整萤火虫移动步长, 引入荧光因子<sup>[13]</sup>:

$$H_i = \frac{\|X_i - X_{\max}\|}{d_{\max}} \quad (19)$$

式中,  $H_i$  —— 荧光因子;  $X_i$  —— 个体  $i$  状态;  $X_{\max}$  —— 此时荧光素浓度最大的个体状态;  $d_{\max}$  —— 最优个体与其余所有个体距离最大值。

自适应步长调整公式:

$$s_i = s_{\min} + (s_{\max} - s_{\min})H_i \quad (20)$$

式中,  $s_i$  —— 调整后的移动步长;  $s_{\min}$  —— 最小移动步长;  $s_{\max}$  —— 最大移动步长。

在标准萤火虫算法萤火虫位置更新阶段,根据式(19)、式(20)计算每个萤火虫个体荧光因子和移动步长,然后根据式(16)进行位置更新。

根据上一次迭代的结果动态更新本次迭代的移动步长,获得更好的自适应性,更好地提高了算法的搜索速度和寻优精度。

### 3.3 改进萤火虫算法与粒子群混合算法在重构中的应用

配电网重构问题属于大规模、非线性的高维函数优化问题,如何在大规模的搜索空间找到最优解,并有效跳出局部最优解是优化问题的难点。

粒子群算法具有相对简单的速度-位移模型,通过平衡自身经验和群体经验能快速获得群体的最值,但不可避免可能快速落入局部最优的情况。萤火虫算法能通过萤火虫个体在移动过程中动态地调整决策域避免陷入局部最优,但无对自身经验的积累。

故本文采用将改进的萤火虫算法和粒子群算法相结合的方法,将萤火虫拥有感知半径和决策半径的特点引入粒子群算法,使混合群算法的个体不但具有萤火虫个体的感光特性,而且还拥有粒子群个体的基本特性,大大提升了全局搜索能力。

因配电网具有闭环设计,开环呈辐射状运行特点,将配电网等效为一个无向赋权图,令目标函数值或其倒数作为每一条边赋权值后进行最小生成树计算,配电网重构问题所求的最优解可看作是在赋权图中以根节点为起点寻找满足目标函数的最小支路集合,并通过反复迭代更新权值的方式使配电网目标达到最优。

根据以上分析,本文将最小生成树思想与所提混合算法相结合,在配电网重构研究中应用。混合算法配电网重构流程图如图3所示。

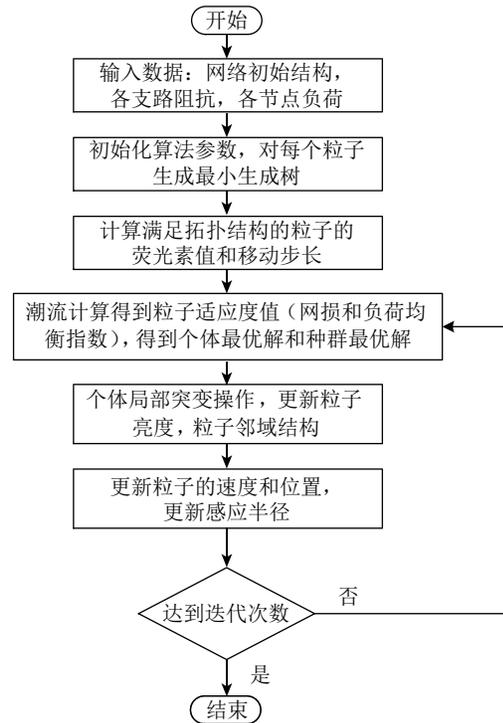


图3 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of algorithm

具体步骤如下:

1) 输入网络信息, 设置混合算法种群大小为  $m$ , 迭代次数为  $N$ , 初始化算法的相关参数。一个优化变量代表一个等效支路的集合。算法种群的维度等于环路数, 个体种群的每一维表示一个等效的支路集合, 每维取值(0,1)表示支路开断情况。

2) 初始设置最小生成树策略的邻接支路矩阵, 已选支路集合, 当前可选支路集合。邻接支路矩阵的行与支路对应, 列与该支路的所有邻接支路对应, 将粒子置于电源节点, 并利用最小生成树搜索策略, 得到满足拓扑约束的重构解。

3) 将满足拓扑约束的重构解加入到初始化种群, 根据式(16)、式(17)初始化萤火虫位置和荧光素值。

4) 将满足拓扑的可行解带入配电网潮流计算中, 计算其适应值(网损和负荷均衡指数), 得到个体最优解  $P_{Best}$  和种群最优解  $L_{Best}$ , 并将其作为历史最优位置。

5) 比较满足拓扑结构个体的荧光素值大小, 选取群体中较亮的前  $M$  个粒子, 让粒子按照粒子群搜索原理进行随机搜索, 一般较亮的个体通常作为邻域范围内的最优解。对个体根据式(20)进行突变

操作,当突变后个体通过粒子速度-位移特性计算,与突变前个体比较,如果是更优解,则更新速度位置。

6)根据式(17)、式(18)更新个体亮度与感应半径,调用潮流计算,更新适应度值。

7)如果达到指定的进化次数,则结束,否则转到第5步执行。

## 4 算例分析

### 4.1 改进的萤火虫算法性能验证

采用 IEEE 33 节点系统<sup>[14]</sup>,如图 4 所示。系统额定电压为 12.66 kV,系统总负荷  $3802.19+j2694.6\text{ kV}\cdot\text{A}$ ,共有 37 条支路,5 个联络开关。在节点 4、7、25、30 上分别安装分布式电源。

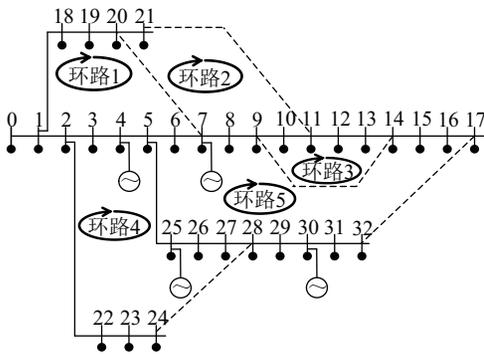


图4 IEEE 33节点配电系统  
Fig. 4 IEEE 33-node distribution system

算法参数如下:种群规模  $n=50$ ,惯性权重  $\omega=0.729$ ,学习因子  $c_1=c_2=1.49445$ 。荧光素挥发系数  $\rho=0.4$ ,荧光素更新率  $\gamma=0.6$ ,  $\beta=0.08$ ,  $n_t=5$ ,初始步长  $s_i(0)=0.03$ ,最大感知半径和初始半径都为 10,最大迭代次数 200。目标函数  $\lambda_1=0.6$ ,  $\lambda_2=0.4$ 。

当 DG 未加入系统时,所得重构结果比较如表 2 所示。结果表明,本文算法和文献[15]中所述均使网络损耗和负荷均衡得到相应的优化。

表2 不含 DG 的 33 节点系统重构仿真结果  
Table 2 33-nodes system without DG

| 算法     | 断开网络开关                      | 网损/<br>kW | 负荷<br>均衡率 |
|--------|-----------------------------|-----------|-----------|
| 初始网络   | 7-20,9-14,11-21,17-32,24-28 | 169.67    | 1.750     |
| 本文算法   | 6-7,13-14,8-9,31-32,24-28   | 98.34     | 0.934     |
| 文献[15] | 6-7,13-14,8-9,31-32,24-28   | 113.59    | 1.1337    |

配电网各节点电压幅值对比如图 5 所示。由图 5 可看出,DG 并入配电网提高了网络的最低节点电压,通过本文所提算法重构后显著改善节点电压水平,提高电压质量。图 5 为本文与文献[15]算法的最优值收敛曲线的比较,说明本文方法比文献[15]中的方法收敛速度以及全局寻优能力更强。

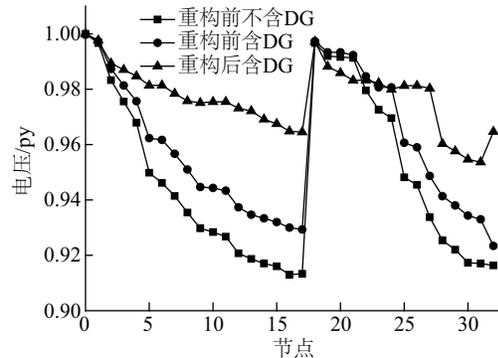


图5 33节点系统网络重构前后的电压分布  
Fig. 5 Voltage profile for the 33-node system before and after using proposed algorithm

图 6 为本文与文献[15]算法的最优值收敛曲线的比较,说明本文方法与文献[15]中的方法相比,收敛速度更快,全局寻优能力更强。

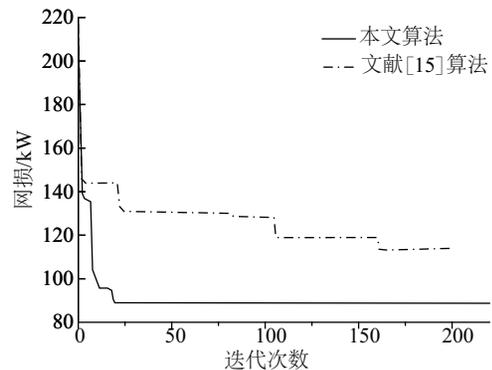


图6 加入多种 DGs 系统重构迭代曲线  
Fig. 6 Convergence curve of reconfiguration with DGs being added into system

当 DG 加入系统时,所得重构结果如表 3 所示 DG 的加入对配电网的网损以及负荷均衡均得到优化,本文提出的算法优化结果均优于文献[15]中提出的算法,且操作过程相对简单。

### 4.2 配电网动态重构

本文在文献[16]基础上,在 IEEE 33 节点测试系统构建一周的负荷数据,以小时作为最小单位,

得到 167 个时间断面,通过 1.2 节给出的方法对其聚类,将负荷分成 8 类,聚类结果如图 7 所示。

表3 含 DG 的 33 节点系统重构仿真结果

Table 3 33-nodes system with DG

| 算法     | 断开网络开关                      | 网损/<br>kW | 负荷<br>均衡率 |
|--------|-----------------------------|-----------|-----------|
| 初始网络   | 7-20,9-14,11-21,17-32,24-28 | 202.67    | 2.1123    |
| 本文算法   | 6-7,13-14,8-9,31-32,24-28   | 126.35    | 1.4845    |
| 文献[15] | 6-7,13-14,8-9,31-32,24-28   | 139.97    | 1.4136    |

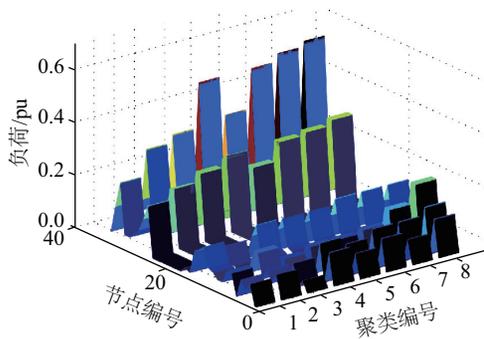


图7 8个聚类中心对应的负荷

Fig. 7 Load of 8 clustering centers

基于对负荷的聚类操作和时段的划分结果,将改进的萤火虫算法应用于各时段负荷聚类中心为代表负荷状态下的静态重构,得到静态重构的结果,如表 4 所示。

表4 8个聚类中心的重构结果

Table 4 Reconfiguration results for 8 cluster centers

| 聚类<br>编号 | 断开开关           | 网损/kWh |       |
|----------|----------------|--------|-------|
|          |                | 重构前    | 重构后   |
| 1        | 33/34/35/28/36 | 31.1   | 26.5  |
| 2        | 7/9/14/32/37   | 62.1   | 48.4  |
| 3        | 7/9/14/32/37   | 231.5  | 145.3 |
| 4        | 7/9/14/31/37   | 173.4  | 120.9 |
| 5        | 7/9/14/28/36   | 250.5  | 164.5 |
| 6        | 7/9/14/28/32   | 473.4  | 285.2 |
| 7        | 7/9/14/28/31   | 550.0  | 379.6 |
| 8        | 7/9/14/28/32   | 554.3  | 382.6 |

根据静态重构结果和时段划分结果,对配网一周的开关操作调度安排如表 5 所示。

表5 开关操作调度表

Table 5 Schedule for switch operation

| 时刻          | 断开开关  | 时刻             | 断开开关        | 时刻          | 断开开关           |
|-------------|-------|----------------|-------------|-------------|----------------|
| 第<br>1<br>天 | 03:00 | 33/34/35/28/36 | 第<br>3<br>天 | 00:00       | 33/34/35/28/36 |
|             | 09:00 | 7/9/14/32/37   |             | 08:00       | 7/9/14/28/31   |
|             | 14:00 | 7/9/14/31/37   |             | 23:00       | 7/9/14/28/36   |
|             | 20:00 | 7/9/14/28/36   |             | 第<br>4<br>天 | 08:00          |
| 第2<br>天     | 09:00 | 7/9/14/32/37   | 17:00       |             | 7/9/14/31/37   |
|             | 18:00 | 7/9/14/28/32   | 21:00       |             | 7/9/14/28/32   |
| 第<br>5<br>天 |       |                |             |             | 05:00          |
|             |       |                |             | 08:00       | 7/9/14/28/31   |
| 第<br>7<br>天 |       |                |             | 22:00       | 7/9/14/28/32   |
|             |       |                |             | 10:00       | 7/9/14/32/37   |
| 第<br>7<br>天 |       |                |             | 16:00       | 7/9/14/31/37   |
|             |       |                |             | 20:00       | 7/9/14/28/32   |

根据一周开关操作调度表可知,一周内开关操作次数为 18 次,降低了开关的操作次数,且很大程度上降低了系统网损,提高了配电网的经济性和供电可靠性。

## 5 结 论

本文将基于特性指标降维的聚类技术与改进的萤火虫算法相结合应用于配电网动态重构问题。根据负荷曲线对负荷进行分类,提取得到以聚类中心为代表的负荷状态并划分重构时间段,将改进的萤火虫算法在每个重构时间段进行静态重构,通过 IEEE 33 测试系统验证所提方法能精确的对负

荷进行聚类,从而减少开关操作次数,并较大程度上提高重构快速和精确性,提高配电网的经济性和供电可靠性。

## [参考文献]

- [1] 颜湘武,段 聪,吕 正,等.基于动态拓扑分析的遗传算法在配电网重构中的应用[J].电网技术,2014,38(6):1639—1643.
- [1] Yan Xiangwu, Duan Cong, Lyu Zheng, et al. Application of dynamic topological analysis based genetic algorithm in distribution network reconfiguration [J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1639—1643.

- [2] Carpaneto Enrico, Chicco Gianfranco. Distribution system minimum loss reconfiguration in the Hyper Cube Ant Colony Optimization framework[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(12): 2037—2045.
- [3] 李振坤, 陈星莺, 余 昆, 等. 配电网重构的混合粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 35—41.
- [3] Li Zhenkun, Chen Xingying, Yu Kun, et al. Hybrid particle swarm optimization for distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 35—41.
- [4] 李辰雷, 卫志农, 韩连山. 序优化理论在配电网重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, (8): 41—48.
- [4] Li Chenlei, Wei Zhinong, Han Lianshan. Application of ordinal optimization in distribution network reconstruction[J]. Power System Protection and Control, 2015, (8): 41—48.
- [5] 黄红程, 顾 洁, 方 陈. 基于无向生成树的并行遗传算法在配电网重构中的应用[J]. 电力系统自动化, 2015, (14): 89—96.
- [5] Huang Hongcheng, Gu Jie, Fang Chen. Application of undirected spanning tree-based parallel genetic algorithm in distributed network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, (14): 89—96.
- [6] 尹丽燕, 于继来. 多时间段落的配电网动态重构[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 44—48, 80.
- [6] Yin Liyan, Yu Jilai. Dynamic reconfiguration (DR) of distribution network with multi-time periods[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 44—48, 80.
- [7] 卞绍润. 负荷建模中的负荷特性分类及参数辨识研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [7] Bian Shaorun. Research on load characteristic classification and parameter identification for load modeling[D]. Ji'nan: Shangdong University, 2014.
- [8] 王 淳, 高元海. 采用最优模糊C均值聚类和改进化学反应算法的配电网动态重构[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1682—1691.
- [8] Wang Chun, Gao Yuanhai. Dynamic reconfiguration of distribution network based on optimal fuzzy c-means clustering and improved chemical reaction optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1682—1691.
- [9] 张 斌, 庄池杰, 胡 军, 等. 结合降维技术的电力负荷曲线集成聚类算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3741—3749.
- [9] Zhang Bin, Zhuang Chijie, Hu Jun, et al. Ensemble clustering algorithm combined with dimension reduction techniques for power load profiles[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3741—3749.
- [10] 黄宇腾, 侯 芳, 周 勤, 等. 一种面向需求侧管理的用户负荷形态组合分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 20—25.
- [10] Huang Yuteng, Hou Fang, Zhou Qin, et al. A new combinational electrical load analysis method for demand side management[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 20—25.
- [11] 刘 思, 李林芝, 吴 浩, 等. 基于特性指标降维的日负荷曲线聚类分析[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 797—803.
- [11] Liu Si, Li Linzhi, Wu Hao, et al. Cluster analysis of daily load curves using load pattern indexes to reduce dimensions[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 797—803.
- [12] 泰寿康. 综合评价原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [12] Tai Shoukang. Principle and application of comprehensive evaluation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.
- [13] 欧阳喆, 周永权. 自适应步长萤火虫优化算法[J]. 计算机应用, 2011, 31(7): 1804—1807.
- [13] Ouyang Zhe, Zhou Yongquan. Self-adaptive step glowworm swarm optimization algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(7): 1804—1807.
- [14] Rugthaicharoencheep N, Sirisumrannukul S. Optimal feeder reconfiguration with distributed generators in distribution system by fuzzy multiobjective and Tabu search[A]. International Conference on Sustainable Power Generation and Supply[C], Nanjing, China, Supergen, IEEE, 2009, 1—7.
- [15] 陈 春, 汪 泓, 刘 蓓, 等. 一种避免不可行解的配电网快速重构方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 34—43.
- [15] Chen Chun, Wang Feng, Liu Bei, et al. A fast network reconfiguration method avoiding infeasible solutions for distribution system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 34—43.
- [16] 周洁洁. 配电网重构及分布式电源优化配置研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [16] Zhou Jiejie. Distribution network reconfiguration and distributed generation optimal allocation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.

## DYNAMIC RECONFIGURATION OF DISTRIBUTION NETWORKS BASED ON PATTERN INDEX CLUSTERING AND IMPROVED GLOWWORM SWARM OPTIMIZATION ALGORITHM

Wang Ruifeng, Hou Chengbin

*(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)*

**Abstract:** To deal with the dynamic reconfiguration of distribution network considering load variation, a clustering technique based on load pattern index is applied to the load clustering of distribution network, according to the similarity of load pattern, the division of reconfiguration time period is reconstructed, and the effect of switching operation on the actual distribution network scheduling is solved effectively. The minimum spanning tree (MST) method and improvement of the glowworm swarm algorithm are combined in this paper, network loss and load balancing as the objective functions was established, which is applied to the clustering of load distribution network reconfiguration problem. The result shows, the improved clustering algorithm can classify the distribution network load accurately, which provides a good foundation for the distribution network reconfiguration. The improved algorithm is effective for the dynamic reconfiguration of distribution network.

**Keywords:** multi-objective distribution network reconfiguration; load balancing; distributed power generation; load clustering; minimum spanning tree; glowworm swarm optimization