

DOI: 10.7667/PSPC180649

# 基于 PAM 时段划分的配电网动态重构

陈新岗<sup>1,2</sup>, 余兵<sup>1</sup>, 陈小青<sup>1</sup>, 赵唐<sup>1</sup>, 冯煜轩<sup>1</sup>, 龙尧<sup>1</sup>

(1. 重庆理工大学, 重庆 400054; 2. 重庆市能源互联网工程技术研究中心, 重庆 400054)

**摘要:** 为保证配电网的安全稳定运行, 提出一种基于 PAM( Partitioning Around Medoid)时段划分的配电网动态重构方法。以配电网网络损耗、电压偏移和负荷均衡为目标函数, 建立配电网动态重构模型。针对配电网动态重构过程中的时段划分问题, 给出一种以相异度为分段指标的 PAM 时段划分方法。为提升协同粒子群算法(Cooperative particle swarm optimization, Co-PSO)的寻优能力, 对其速度更新公式进行修正, 并引入正态分布随机调整因子对协同粒子群算法进行改进。选择 IEEE33 节点系统进行算例分析计算, 算例结果验证了上述方法的有效性。

**关键词:** 配电网; 动态重构; PAM 时段划分; 协同粒子群; 相异度

## Dynamic reconfiguration of distribution network based on PAM time division

CHEN Xingang<sup>1,2</sup>, YU Bing<sup>1</sup>, CHEN Xiaoqing<sup>1</sup>, ZHAO Tang<sup>1</sup>, FENG Yuxuan<sup>1</sup>, LONG Yao<sup>1</sup>

(1. Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. Chongqing Engineering Research Center of Energy Internet, Chongqing 400054, China)

**Abstract:** In order to ensure the safe and stable operation of the distribution network, a dynamic reconfiguration method of distribution network based on Partitioning Around Medoid (PAM) time division is proposed. The dynamic reconstruction model of distribution network is established based on network loss, voltage offset and load balance. Aiming at the time division problem in the process of dynamic reconfiguration of distribution network, a method of PAM time division based on dissimilarity is presented. To improve the searching ability of the Cooperative Particle Swarm Optimization (CO-PSO), the velocity updating formula is modified and the normal distribution random adjustment factor is introduced to improve the CO-PSO. The IEEE33 node system is calculated and analyzed. The calculation results verify the validity of the above method.

This work is supported by Science and Technology Research Program of Chongqing Education Commission (No. KJ1709225).

**Key words:** distribution network; dynamic reconfiguration; PAM time division; cooperative particle swarm; dissimilarity

## 0 引言

重构是实现系统稳定运行的重要手段, 通过改变系统中分段开关和联络开关的组合状态来改变网络拓扑结构, 以达到降低系统网络损耗、均衡负荷和优化网络结构等的目的<sup>[1-2]</sup>。

配电网重构方式分为静态重构和动态重构两种。静态重构针对的是配电网某一时间节点上的优化, 但却忽略了网络系统负荷随时间的变化性以及开关操作频率等因素, 实际应用价值较低<sup>[3-9]</sup>。动态

重构是针对一个时间区间来研究的, 在充分考虑时段内负荷的波动情况, 计及开关操作频率等约束条件下求确定最优的开关组合方案, 具有更高的实用价值。文献[10]引入可降低复杂度的分治思想, 以网络损耗最小为目标, 应用并行禁忌算法对配电网进行动态重构; 文献[11]对各时段内网损和电压偏移进行归一化处理形成综合性能指标, 并将此作为时段划分的依据, 通过遗传算法实现动态重构; 文献[12]引入图论中连通性判别方法和编码策略对网络结构进行优化, 以降低网损和开关操作次数为目标对配电网进行优化重构, 但该方法运算量大, 不易实现; 文献[13]综合考虑各个时段网损和电压偏差, 将二者的比值作为时段划分的指标确定重构

**基金项目:** 重庆市教育委员会科学技术研究项目 || (KJ1709225); 重庆理工大学研究生创新项目 || (ycx2018230)

时段, 并对配电网进行重构; 文献[14]选择功率损耗最小和支路负荷均衡作为目标函数, 引入进化规则变异算子对遗传算法进行改进, 实现网络重构。

本文以相异度最小为分段指标, 利用 PAM 分类思想对配电网重构时段进行划分; 同时考虑到配电网的稳定性, 选取网络损耗、电压偏移和负荷均衡作为目标函数, 利用协同粒子群算法进行优化重构, 以确定最优开关组合, 达到优化网络的目的。

## 1 配电网重构模型

### 1.1 目标函数

在考虑到系统的经济性和安全性后, 本文选取网络损耗、电压偏移和负荷均衡为目标函数, 具体如下所述。

#### (1) 网络损耗

$$\min F_L = \frac{1}{P_\Sigma} \sum_{i=1}^n r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \quad (1)$$

式中:  $P_\Sigma$  为网络中所有负荷有功总和;  $r_i$  为支路  $i$  的电阻;  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为流过支路  $i$  的有功功率和无功功率;  $U_i$  为节点  $i$  的端电压。

#### (2) 电压偏移

$$\min F_V = \sum_{i=1}^m \left| \frac{U_i - U_{iN}}{U_{iN}} \right| \quad (2)$$

式中:  $m$  表示配电网节点数;  $U_i$  为节点  $i$  的实际电压;  $U_{iN}$  为节点  $i$  的额定电压。

#### (3) 负荷均衡

$$\min F_P = \sum_{i=1}^l \left| \frac{P_i - P_{iN}}{P_{iN}} \right| \quad (3)$$

式中:  $l$  表示配电网支路数;  $P_i$  为支路  $i$  的实际功率;  $P_{iN}$  为支路  $i$  的额定功率。

### 1.2 约束条件

在配电网重构过程中, 需要满足如下约束条件。

#### (1) 潮流约束

$$\begin{cases} P_i = P_{Li} + U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = Q_{Li} + U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_i$  和  $Q_i$  分别为注入节点  $i$  的有功功率和无功功率;  $P_{Li}$  和  $Q_{Li}$  分别为节点  $i$  的有功需求和无功需求;  $U_i$ 、 $U_j$  分别为节点  $i$  和节点  $j$  的电压;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  分别为支路  $i-j$  的电导和电纳;  $\theta_{ij}$  为节点  $i$ 、 $j$  之间

电压的相位差。

#### (2) 电压约束

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}, i=1,2,\dots,n \quad (5)$$

式中:  $V_i$ 、 $V_i^{\min}$ 、 $V_i^{\max}$  分别为节点  $i$  的实际电压和电压上下限。

#### (3) 容量约束

$$S_i \leq S_{i\max}, i=1,2,\dots,n \quad (6)$$

式中:  $S_i$ 、 $S_{i\max}$  分别表示支路  $i$  的实际容量和最大容量。

## 2 基于 PAM 聚类的时段划分方法

### 2.1 PAM 聚类原理

聚类即是将对对象数据按照一定的特征关系分为多个类别, 使属于同一类别中的数据相似度较高, 而属于不同类别之间的数据的相似度较低<sup>[15]</sup>。PAM 聚类算法是围绕中心点的划分方法, 即将  $n$  个数据对象分为  $k$  类, 首先选取  $k$  个对象作为中心点, 然后分别计算剩余  $n-k$  个对象到  $k$  个中心点的距离, 并以此指标将对象分成  $k$  类, 对更新后的类别分别选取新的中心点, 来替换之前的中心点, 以此不断迭代, 直到中心点稳定不再变化。

### 2.2 时段划分方法

配电网动态重构的时段划分通常是对负荷数据进行处理得到能够表明系统运行状态的指标, 并对该指标进行处理: 如设定变化阈值或利用统计学相关知识等方法, 进而实现时段划分。本文利用 PAM 聚类思想作为指导, 给出一种以相异度为评价指标的时段划分方法, 以此实现对全天各个时段的划分。

选取华北某地区配电网典型日负荷曲线, 首先将该曲线以 15 min 为间隔分为 96 个时间段(含有 96 个序列分段点), 然后再从 96 个序列点中随机选取  $k-1$  个点将其分为  $k$  段, 同时考虑到重构中开关动作不能过于频繁, 因此设定两次重构的时间不能低于 3 h, 即每段长度不能低于 12 个时间间隔, 详细步骤如下所述。

(1) 在负荷曲线上选取 96 个序列点, 将负荷曲线分为 96 个时间段, 每段长度 15 min。

(2) 在 96 个序列点中随机选取  $k-1$  个分段点, 将序列分为  $k$  段:

$$\begin{cases} \{T_1, T_2, \dots, T_k\} \\ \forall T_i \in \{T_1, T_2, \dots, T_k\}, |T_i| \geq 12 \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $|T_i|$  表示  $T_i$  内 15 min 时间间隔的个数。

(3) 以分段点为中心的相邻两段  $T_i$  和  $T_{i+1}$ , 将  $T_i$  和  $T_{i+1}$  内的任一序列点  $p$  分别假设为分段点, 分别计算  $p$  点相邻两段  $T_{p左}$  和  $T_{p右}$  的相异度, 以欧氏距离来度量。

$$d_p = \text{dist}(T_{p左})/|T_{p左}| + \text{dist}(T_{p右})/|T_{p右}| \quad (8)$$

$$\text{dist}(T) = \sqrt{\sum_{p,q \in T} (p-q)^2} \quad (9)$$

式中:  $\text{dist}(T)$  表示时间段  $T$  内任意两序列点的欧氏距离;  $p, q \in 96$  个序列点;  $T_{p左}$ 、 $T_{p右}$  分别为  $p$  点相邻左右时间段;  $|T_{p左}|$ 、 $|T_{p右}|$  为对应时间段内序列点个数。

(4) 相异度指标最小的点设为新的分段点;

(5) 重复(2)、(3)直到  $k$  个分段点不再变化。

为确定最优分段个数, 本文选取相异度最小作为评价指标, 通过对不同分段个数下的相异度进行比较, 达到确定最优分段个数的目的。在完成分段后, 分别对每个分段区间进行求解。

### 3 模型求解

#### 3.1 基本粒子群算法

粒子群(Particle Swarm Optimization, PSO)算法是由 Kennedy 和 Eberhart 提出的一种人工智能算法<sup>[16-19]</sup>。粒子群算法主要依靠种群中的粒子来实现, 通过不同粒子间搜索结果的比较和共享来指引下一次搜索的方向, 以此不断循环, 直至搜索到最优解。

在粒子群算法中, 粒子可以在不同空间维度中进行结果搜索, 因此该方法可适用于多维度的复杂模型。粒子在搜索过程中, 主要依靠速度更新和位置更新来完成对最优结果的寻找, 具体更新公式如下所述。

(1) 速度更新公式

$$v_{ij}(t+1) = \omega v_{ij}(t) + c_1 r_{1j} (x_{ij}^{\text{pbest}}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 r_{2j} (x^{\text{gbest}}(t) - x_{ij}(t)) \quad (10)$$

式中:  $\omega$  表示惯性因子;  $v_{ij}(t)$  表示粒子  $i$  在  $t$  时刻第  $j$  维上的速度;  $x_{ij}(t)$  表示粒子  $i$  在  $t$  时刻第  $j$  维上的位置;  $c_1$ 、 $c_2$  分别表示认知因子和社会因子;  $r_{1j}$  和  $r_{2j}$  为(0,1)之间的随机数;  $x_{ij}^{\text{pbest}}(t)$  和  $x^{\text{gbest}}(t)$  分别表示个体最优和全体最优。

(2) 位置更新公式

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (11)$$

式中,  $x_i(t)$  表示第  $i$  个粒子  $t$  时刻在搜索空间中的位置。

#### 3.2 协同粒子群算法

由于基本粒子群算法在搜索过程中容易出现搜索停滞的问题, 针对这一问题, 引入协同粒子群算法。

协同粒子群算法(Co-PSO)指增加若干个子种群来协助主种群的搜索行为<sup>[20]</sup>。通常增加的子种群个数和主种群搜索空间的维数一样, 在寻优过程中, 每个子种群只在一个维度内进行搜索。子种群和主种群在寻优过程中的区别在于: 子种群的寻优是依次进行的, 即当第  $i$  个子种群寻优时, 其速度和位置更新均在第  $i$  维搜索空间完成, 剩下维数的子种群均延续主种群的  $x^{\text{gbest}}(t)$ , 主种群则是在所有搜索空间上一次进行的, 故子种群在第  $i$  维上的搜索可被当做主种群在该维度上的搜索。在配电网重构问题中, 当主种群搜索结果陷入局部最优时, 对单个维度方向上的搜索可以有效地发现新的极值, 从而将种群从局部最优的凹陷中引出来, 继续迭代寻优。因此, 将主种群和子种群进行组合搜索大大提高了寻优性能。

为了更好地增强寻优能力, 对协同粒子群进行如下改进。

(1) 在配电网重构过程中, 粒子代表的是开关编号的组合, 速度和位移都应是整数, 因此对速度更新公式进行修正。

$$v'_{ij} = \begin{cases} \text{mod}(v_{ij}, L_j), v_{ij} \geq 0 \\ -\text{mod}(-v_{ij}, L_j), v_{ij} < 0 \\ L_j, v_{ij} = L_j \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\text{mod}(a, b)$  表示  $b$  为除数对  $a$  取余;  $i$  和  $j$  分别表示第  $i$  个粒子和第  $j$  个维度;  $L_j$  表示第  $j$  维的解空间。

(2) 在粒子寻优迭代过程中, 为了避免种群因陷入局部最优而搜索停滞, 对惯性因子进行改进, 引入正态分布随机调整惯性因子。

$$\omega(t+1) = \begin{cases} \omega \sim N(\mu, \sigma), \text{其他} \\ \omega_{\max}, f(x^{\text{gbest}}(t)) \leq f(x^{\text{gbest}}(t-t')) \\ \forall t=1, \dots, \tau \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $N(\mu, \sigma)$  为正态分布;  $\mu$  和  $\sigma$  分别为  $\omega$  服从正态分布的期望与方差;  $\omega_{\max}$  为惯性因子的激励;  $\tau$  为迭代次数。协同粒子群流程图如图 1 所示。

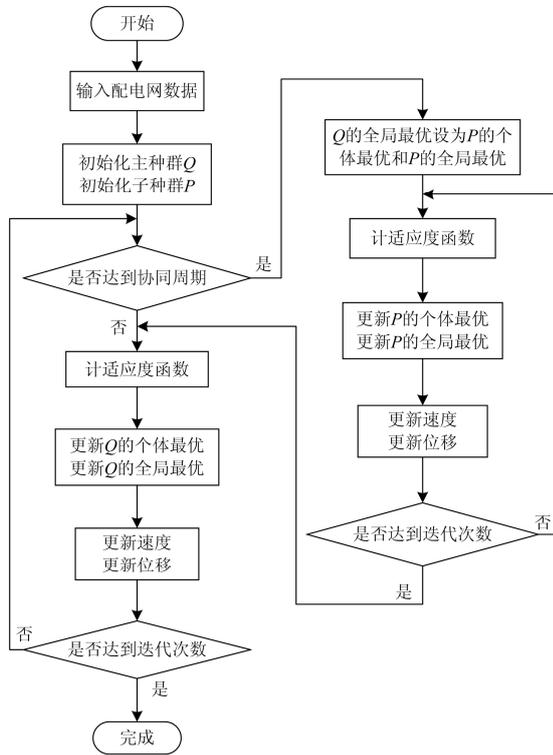


图1 协同粒子群流程图

Fig. 1 Flow chart of collaborative particle swarm

## 4 算例分析

### 4.1 参数设置

本文选取 IEEE33 节点算例系统<sup>[21]</sup>进行计算。如图 2 所示在算例系统的 7、24 节点接入风力电机 (WPG), 在 20 节点接入电动汽车充电桩 (EV), 在 9、14、17、33 节点接入光伏发电 (PV), 接入分布式能源 (DERs) 后的算例图如图 2 所示, 接入容量如表 1 所示。算法的参数设置为: 种群大小  $N=100$ , 迭代次数  $t=50$ , 初始的惯性系数  $\omega=0.8$ , 对于  $\omega$  的随机调整正态分布参数值  $\mu$  取 0.8,  $\sigma$  取 0.08,  $\omega_{\max}$  取  $0.3L_j$ , 认知因子和社会因子  $c_1 = c_2 = 1.2$ 。

目前配电网常用的时段划分方法是在特定的时间节点, 如将 1 天内 24 或 48 个时间节点, 将这些节点负荷数据与设定的参考值比较, 确定时段划分结果, 然而该类方法忽略了负荷的变动性及前后负荷的波动性; 本文提出的时段划分方法以 PAM 思想为指导, 通过计算相邻时段内的相异度值, 选取相异度最小的点设为新的分段点, 以此反复计算直至分段点不再变化。相比传统时段划分方法, 本文所提供的方法不仅充分考虑了负荷变化性, 同时也考虑了前后负荷的关联性。

如图 3 所示为华北某地区区域配电网的典型日负荷曲线, 以本文提到的时段划分方法为依据, 对该

负荷曲线进行划分。设分段数  $k$  分别为 4、5、6、7、8, 分段结果如表 2 所示。

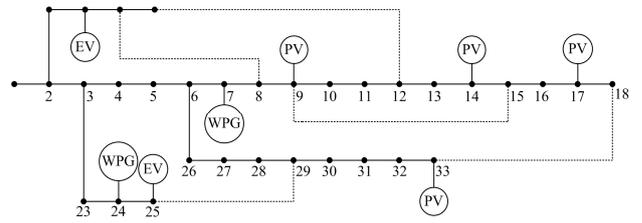


图2 接入分布式能源的 IEEE33 节点系统

Fig. 2 IEEE33 node system for access to distributed energy

表 1 分布式能源接入容量

Table 1 Distributed energy access capacity

DERs 种类	WPG	EV	PV
容量	500 kW	200 辆	350 kW

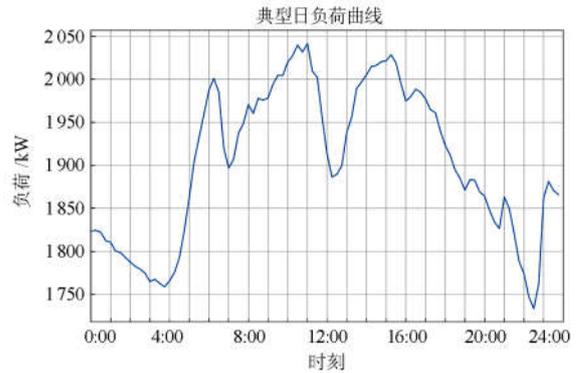


图3 典型日负荷曲线

Fig. 3 Typical daily load curve

表 2 PAM 分段结果

Table 2 PAM segmentation results

分段数	分段结果	分段指标
$k=4$	0~28, 28~53, 53~66, 66~96	0.362
$k=5$	0~26, 26~38, 38~56, 56~68, 68~96	0.290
$k=6$	0~26, 26~38, 38~51, 51~64, 64~77, 77~96	0.303
$k=7$	0~15, 15~28, 28~40, 40~56, 56~70, 70~83, 83~96	0.317
$k=8$	0~12, 12~24, 24~36, 36~48, 48~60, 60~72, 72~84, 84~96	0.342

通过对上述分段结果的相异度大小的比较可知, 当分段数为 5 个的时候, 分段指标 (相异度) 最小, 故可确定最优分段的个数为 5 段, 对应的重构时间段分别为: 0:00—6:30、6:30—9:30、9:30—14:00 点、14:00—17:00 和 17:00—24:00。

### 4.2 算法性能对比

以网损最小为目标对第 3 节中提到的两种算法进行性能 (迭代过程) 比较, 图 4 为两种算法的迭代

过程对比图。

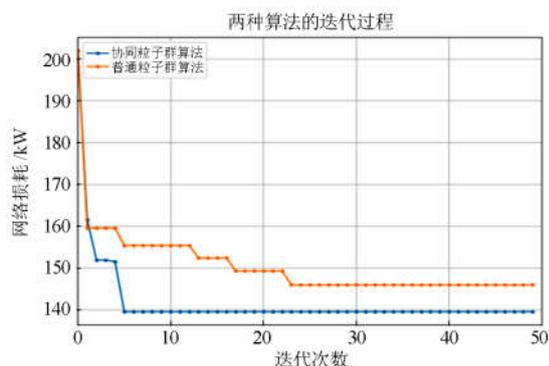


图 4 迭代过程对比图

Fig. 4 Comparison between iteration process

由图 4 可得: 普通粒子群算法在迭代 23 次后得到最小网损值(146 kW), 协同粒子群算法在迭代 5 次后得到最小网损值(138 kW), 因此协同粒子群算法的收敛速度明显优于普通粒子群, 同时寻优质量也高于普通粒子群算法, 在保证粒子多样化的基础上, 提高了粒子跳出局部最优解的能力。因此在

应用于配电网重构求解时, 协同粒子群算法具有更佳的性能。

### 4.3 结果分析

在 5 个重构时间段的起点(0:00, 6:30, 9:30, 14:00, 17:00)分别对 1.1 节提到的目标函数进行重构求解, 重构结果如表 3 所示。

由表 3 可知, 对每个时间段进行动态重构能够有效地减小系统的网络损耗, 相比于重构前, 重构后的电压质量更好, 电压值更接近额定值, 同时负荷均衡度也有了明显改善。图 5—图 7 给出了系统动态重构和不重构的各时刻平均电压、网络损耗和负荷均衡度的对比情况, 由图 5 可知, 动态重构使得电压变动范围更小, 更接近额定电压; 由图 6 可知, 动态重构使得网络损耗更小; 由图 7 可知, 动态重构使得负荷分布相比于不重构更加均衡。综上, 通过对配电网进行动态重构, 不仅有效地降低了系统地网络损耗, 同时也使得系统电压水平和负荷均衡得到很大的改善。

表 3 重构结果

Table 3 Reconfiguration results

时刻	时段	重构前				重构后				断开支路编号	开关操作次数
		网络损耗	电压均值	电压极值	负荷均衡度	网络损耗	电压均值	电压极值	负荷均衡度		
0:00	1	179.546	0.958	0.931	11.53	141.300	0.968	0.947	10.00	33,14,8,32,37	6
6:30	2	58.300	0.986	0.964	8.55	49.992	0.983	0.973	7.35	6,14,35,31,37	8
9:30	3	32.732	0.992	0.977	7.16	27.880	0.993	0.981	6.52	6,14,35,30,37	2
14:00	4	42.276	0.985	0.976	7.97	40.390	0.988	0.979	7.60	7,12,35,30,28	6
17:00	5	119.935	0.969	0.932	10.09	98.624	0.975	0.960	9.73	7,14,35,36,37	6

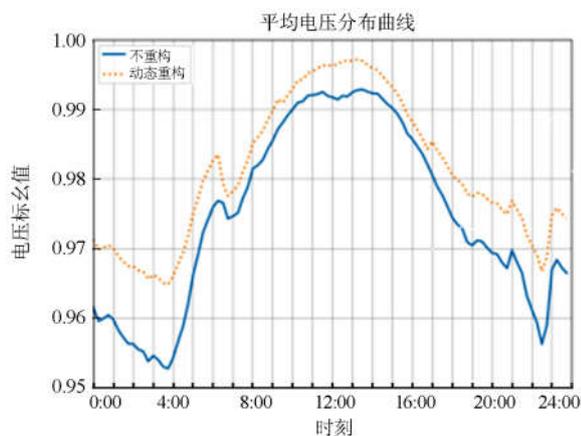


图 5 动态重构与不重构的电压对比

Fig. 5 Comparison of voltage between dynamic reconfiguration and non reconstruction

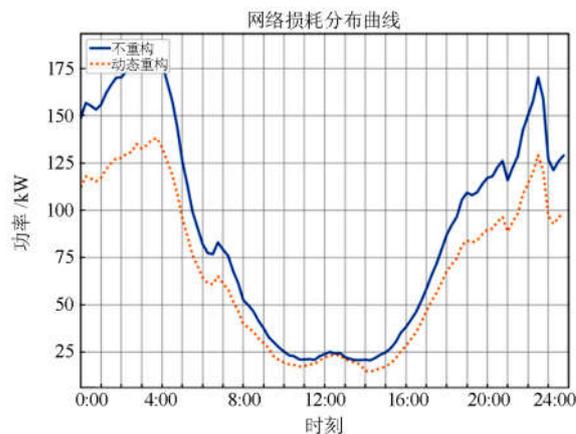


图 6 动态重构与不重构的网损对比

Fig. 6 Comparison of network loss between dynamic reconfiguration and non reconstruction

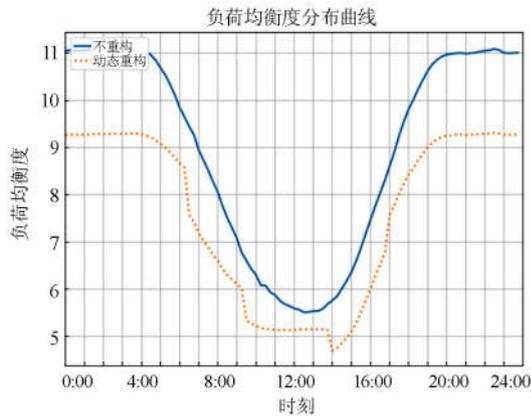


图7 动态重构与不重构的负荷均衡度对比

Fig. 7 Comparison of load balance between dynamic reconfiguration and non reconstruction

## 5 总结

本文在以网络损耗、电压质量和负荷均衡三者作为目标函数的基础上,提出一种基于PAM时段划分的配电网动态重构方法,通过对重构模型进行仿真计算,得出如下结论。

(1) 对重构时段进行划分,本文采用PAM聚类方法对日负荷曲线进行划分,对不同分段数进行评价,并给出最优结果,该方法简洁明了,同时更贴近实际情况;

(2) 针对普通粒子群算法容易陷入局部最优的问题,引入协同粒子群算法,通过两种算法在重构模型中的求解,验证了协同粒子群算法具有较好的鲁棒性和收敛性;

(3) 采用IEEE33节点算例系统进行仿真,仿真结果表明重构后的配电系统相比于重构前配电系统在网络损耗、电压分布和负荷均衡三个方面均有所改善。

综上所述,在对配电网进行动态重构时,本文提出的方法能够在极大程度上提高电力系统运行的可靠性和稳定性。

## 参考文献

- [1] 应丽云, 刘敏, 邓磊, 等. 配电网降损综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 162-169.  
YING Liyun, LIU Min, DENG Lei, et al. A comprehensive review of the loss reduction in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 162-169.
- [2] 庞清乐, 高厚磊, 李天友. 基于负荷均衡的智能配电网故障恢复[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 342-348.  
PANG Qingle, GAO Houlei, LI Tianyou. Load balancing based fault service restoration for smart distribution grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 342-348.
- [3] 刘佳, 程浩忠, 肖峻, 等. 计及N-1安全准则的智能配电网多目标重构策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 9-15.  
LIU Jia, CHENG Haozhong, XIAO Jun, et al. A multi-objective reconfiguration strategy for smart distribution network considering N-1 security criterion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 9-15.
- [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, 43(8): 41-48.  
LI Chenlei, WEI Zhilong, HAN Lianshan. Application of ordinal optimization in distribution network reconstruction[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 41-48.
- [5] 邱骁奇, 胡志坚. 基于改进教与学优化算法的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 42-49.  
QIU Xiaoqi, HU Zhijian. Reconfiguration of distribution network based on improved teaching-learning-based optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 42-49.
- [6] 刘志勇, 刘杨华, 林舜江, 等. 基于模糊多目标协调优化的配电网重构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 133-138.  
LIU Zhiyong, LIU Yanghua, LIN Shunjiang, et al. Fuzzy multi-objective coordination optimization for distribution network reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 133-138.
- [7] 冯禹清, 马永红, 朱继忠. 基于多智能体动态拓扑重构的主动配电网经济优化研究[J]. 南方电网技术, 2018, 12(1): 76-83.  
FENG Yuqing, MA Yonghong, ZHU Jizhong. Economic optimization research on active distribution network based on multi-agent dynamic topology reconfiguration[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(1): 76-83.
- [8] 唐可, 邱晓燕, 王兰, 等. 基于风电功率预测信息的配电网滚动实时重构策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(4): 72-77.  
TANG Ke, QIU Xiaoyan, WANG Lan, et al. Scrolling reconfiguration strategy for distribution network based on prediction information of wind power[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2017, 29(4): 72-77.
- [9] ZHOU Huizhi, TANG Fei, LIU Dichen, et al. Active distribution network dynamic reconfiguration and DG dynamic control strategy considering time-variant load[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2423-2429.
- [10] 向小蓉, 刘涤尘, 向农, 等. 基于并行禁忌搜索算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 100-105.  
XIANG Xiaorong, LIU Dichen, XIANG Nong, et al. Distribution network reconfiguration based on parallel

- Tabu search algorithm[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 100-105.
- [11] 田昊, 吕林, 高红均, 等. 计及电网运行特性的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 9-14.  
TIAN Hao, LÜ Lin, GAO Hongjun, et al. Dynamic reconfiguration of distribution network considering power grid operation characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 9-14.
- [12] 孙惠娟, 彭春华, 袁义生. 综合开关次数分析的配电网多目标动态重构[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 41-46.  
SUN Huijuan, PENG Chunhua, YUAN Yisheng. Multi-objective dynamic distribution network reconfiguration considering switching frequency[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 41-46.
- [13] 张珂, 吕林, 孙宇乐. 基于隶属度时段划分的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 51-57.  
ZHANG Ke, LÜ Lin, SUN Yule. Dynamic reconfiguration of distribution network based on membership partition of time intervals[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 51-57.
- [14] 张炳达, 刘洋. 应用进化规划变异算子的配电网重构算法[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 202-206.  
ZHANG Bingda, LIU Yang. A distribution network reconfiguration algorithm based on evolutionary programming mutation operator[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 202-206.
- [15] 马箐, 谢娟英. 基于粒计算的 K-medoids 聚类算法[J]. 计算机应用, 2012, 32(7): 1973-1977.  
MA Jing, XIE Juanying. New K-medoids clustering algorithm based on granular computing[J]. Computer Application, 2012, 32(7): 1973-1977.
- [16] 陈萍, 毛弋, 童伟, 等. 基于多目标粒子群算法的配电网多目标优化重构[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(7): 68-72.  
CHEN Ping, MAO Yi, TONG Wei, et al. Multi-objective distribution network reconfiguration based on multi-objective particle swarm optimization[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2016, 28(7): 68-72.
- [17] 苏适, 周立栋, 陆海, 等. 基于改进混沌粒子群算法的多源独立微网多目标优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 34-41.  
SU Shi, ZHOU Lidong, LU Hai, et al. Multi-objective optimization method of multi-source independent microgrid based on modified CPSO[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 34-41.
- [18] 张庭场, 耿光飞. 基于改进粒子群算法的中压配电网无功优化[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 158-162.  
ZHANG Tingchang, GENG Guangfei. Reactive power optimization for medium voltage distribution network based on improved particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 158-162.
- [19] DABRA V, PALIWAL K K, SHARMA P, et al. Optimization of photovoltaic power system: a comparative study[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 125-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0036-2.
- [20] 刘科研, 何开元, 盛万兴. 基于协同粒子群优化算法的配电网三相不平衡状态估计[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 1026-1031.  
LIU Keyan, HE Kaiyuan, SHENG Wanxing. A cooperative particle swarm optimization based state estimation of unbalanced three-phase distribution network[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 1026-1031.
- [21] 郭腾云, 刘艳. 基于博弈方法的含分布式电源配电网重构优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 28-34.  
GUO Tengyun, LIU Yan. Game theory based reconfiguration optimization for distribution network with distributed generations[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 28-34.

收稿日期: 2018-05-30; 修回日期: 2018-07-02

作者简介:

陈新岗(1968—), 男, 硕士生导师, 教授, 主要从事智能配电网、电气设备状态监测及故障诊断方面的研究;  
E-mail: chenxingang@cqut.edu.cn

余兵(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网故障监测。E-mail: 1169513824@qq.com

(编辑 姜新丽)