

# 基于量子粒子群算法多目标优化的配电网动态重构

文娟<sup>1,2</sup>, 谭阳红<sup>1</sup>, 雷可君<sup>1</sup>

(1. 湖南大学, 湖南 长沙 410012; 2. 南华大学, 湖南 衡阳 421000)

**摘要:** 为保证配电网动态重构后系统安全稳定的运行, 提出了以网损和节点电压稳定性为目标函数的量子粒子群算法的配电网动态重构。针对配电网动态重构过程中时段划分问题, 提出以负荷曲线的单调性和幅值变化大小为依据初步划分时间段落。采用整数型量子粒子群算法进行动态重构, 重构过程中以相邻时段的网损变化值的关系获取最佳重构段落, 然后综合考虑配电网网损最小和节点电压值最大且波动最小为目标寻找最佳重构结构。以IEEE33 配电系统为例验证了所提方法的有效性和实用性。

**关键词:** 配电网; 动态重构; 最优重构次数; 多目标; 整数型量子粒子群算法

## Multi-objective optimization of distribution network dynamic reconfiguration based on integer coded quantum particle swarm optimization algorithm

WEN Juan<sup>1,2</sup>, TAN Yanghong<sup>1</sup>, LEI Kejun<sup>1</sup>

(1. Hunan University, Changsha 410012, China; 2. Nanhua University, Hengyang 421000, China)

**Abstract:** To ensure the dynamic reconfiguration of distribution network system safe and stable operation, a dynamic reconfiguration method for distribution network is proposed based on integer coded quantum particle swarm optimization algorithm which takes the minimum network loss and node voltage stability as the objective function. First, a day of load forecasting curve is divided into several time intervals based on its monotonicity and amplitude changes. Then integer quantum particle swarm optimization algorithm is adopted to realize dynamic distribution network reconfiguration. In order to find the best number of refactoring, the optimal time refactoring function is proposed based on adjacent time refactoring changes value network loss. In consideration of the power distribution network loss minimum and node voltage fluctuations largest and smallest for the target, we are looking for best reconstruction of the distribution network structure on the basis of IEEE33 distribution system, the reconstructed results verify the validity of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61102039 and No. 51107034) and Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 14JJ7029).

**Key words:** power distribution network; dynamic reconfiguration; optimal number of refactoring; multi-objective; integer coded quantum particle swarm optimization algorithm

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)16-0073-06

## 0 引言

配电网重构在减少电网损耗、平衡负载及电网安全性等方面具有很重要的地位, 是优化电力系统运行的重要手段。国内外许多学者针对配电网静态重构做了大量的研究<sup>[1-5]</sup>。实际上配电网众多节点的负荷是随时间变化而改变, 为了保证配电网安全、

经济和高效的操作过程, 考虑负荷变化的配网动态重构更加贴近电网的实际情况, 更具有实用价值。

配网的动态重构是离散时空组合的最优化问题, 许多学者有了初步研究, 如文献[6]提出了时间枚举法实现动态重构的静态解法, 首先粗糙地确定需要重构的大致时段, 然后在此基础上再寻找精确的重构时间点, 这类重构方法需要大量的计算, 所花费的时间较长, 因此不适合数据量较多的配电系统的重构; 文献[7]提出了以负荷单调性为依据划分时段, 在各时段内实现静态重构, 从而实现配电网

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(61102039, 51107034); 湖南省自然科学基金资助项目(14JJ7029)

的动态重构;文献[8]根据负荷连续变化规律划分时间段落,提出了多时间段落的配电网动态重构方法,这类动态重构方法主要以单一配电网损耗作为评价指标;文献[9-10]的时变动态重构过程中仅考虑经济性指标,忽略了安全性指标。本文在综合考虑负荷的单调性以及幅值变化情况的基础上初步划分时间段落,然后以每个时间段落之间的网络损耗的关系确定最优时间段落,即确定最优重构次数,考虑到系统安全因素,以配网有功损耗和节点电压指标作为目标函数,利用量子粒子群算法进行重构,寻找最优开关动作方案,实现配电网动态重构。

## 1 动态重构的目标函数

本文采用有功损耗系统稳定性指标节点电压作为网络的优化目标函数。

(1) 有功损耗目标函数  $f_1(P)$ : 实现配电网负荷变化的动态重构,实际上是将负荷划分为多个区域重构。假设系统有  $m$  条支路,以网损最小为目标,考虑到  $n$  个时间分区的情况下,若每一条支路有功损耗为  $p_{\text{loss}i}$ ,有功损耗的目标函数表示为

$$f_1(P) = \min P_{\text{loss}} = \sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^m p_{\text{loss}i} \right) \Delta t_j \quad (1)$$

(2) 节点电压稳定性目标  $f_2(U_{\text{stab},k})$ : 电压稳定性在电力系统中占有很重要的地位,假设支路  $k$  的首节点为  $i$ ,末节点为  $j$ ,则  $f_2(U_{\text{stab},k})$  表示为

$$f_2(U_{\text{stab},k}) = \frac{4[(XP_j - RQ_j)^2 + (XQ_j + RP_j)U_i^2]}{U_i^4} \quad (2)$$

其中:  $X$  和  $R$  为  $k$  支路的电阻和电抗;  $P_j$  和  $Q_j$  分别为末节点  $j$  流入的有功和无功;  $U_i$  表示首节点  $i$  的电压幅值。

(3) 基本约束条件,在重构过程中需要考虑以下基本的约束条件。

(a) 配电网保持辐射状运行状态,不存在有电力“孤岛”节点。

(b) 满足支路电流、节点电压及支路容量约束

$$\begin{cases} I_{bi} \leq I_{bi,\max} & i = 1, 2, 3, \dots, n \\ S_i \leq S_{i,\max} & i = 1, 2, 3, \dots, n \\ V_{k,\min} \leq V_k \leq V_{k,\max} & k = 1, 2, 3, \dots, m \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $i$  表示网络的支路;  $k$  表示网络的节点;  $I_{bi}$ ,  $I_{bi,\max}$  分别表示支路  $i$  的电流及其上限;  $V_k$ ,  $V_{k,\min}$  和  $V_{k,\max}$  为节点  $k$  的电压幅值、电压上限值和下限值。

(c) 满足开关次数约束

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^l |C_{j,i} - C_{j,i-1}| &\leq C_{j,\max} \\ \sum_{j=1}^{N_s} \sum_{i=1}^M |C_{j,i} - C_{j,i-1}| &\leq C_{\max} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $C_{j,\max}$  表示开关  $j$  的最大动作次数;  $C_{\max}$  为总开关动作次数。

## 2 基于量子粒子群算法配网动态重构模型

### 2.1 动态时间段落的划分

电网动态重构主要是针对未来时刻的负荷动态变化而确定负荷时段的划分,首先需要预测负荷曲线,现有的预测方法有很多种<sup>[11]</sup>,利用文献[12]中的方法得到未来某天负荷曲线,然后确定负荷分段的起点和终点。本文采用 1 天内 24/48 点作为时间长度,提出综合考虑负荷的单调性和负荷幅值变化大小划分时间段落,这种方法既解决了在负荷波动较大但时间较短的时刻是否需要重构,也兼顾了在负荷波动较小但持续时间较长的情况下是否需要重构,有利于动态重构过程中找到最优重构时刻,减少配网损失。

负荷时段的划分时考虑了负荷的单调性和负荷幅值变化,先分别划分,然后再合并,其流程图如图 1 所示。



图 1 动态时间段落划分流程

Fig. 1 Dynamic time paragraph division process

首先把未来某天负荷曲线同时处于上升期或下降期的时段归纳在一起,划分的段落设为  $L1$  段。假设负荷变化幅度阈值为  $\Delta p$ ,判断相邻两个采样的负荷变化幅值  $\delta$  是否大于  $\Delta p$ ,若  $\delta > \Delta p$  则作为一个重构的时间段落,反之则保持原网络不变,划分的时间段落设为  $L2$  段,然后比较  $L1$  和  $L2$ ,若有重合的时刻点,则合并,得到初步时间段落划分的

时刻。其中配电网负荷量的变化幅度  $\delta$  用式(5)来表示。

$$\delta = \lim_{t_1 \rightarrow t_2} \frac{p_{t_2} - p_{t_1}}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

式中: 当前时刻  $t_1$  对应负荷值大小为  $p_{t_1}$ ; 未来某一时刻  $t_2$  对应负荷值大小为  $p_{t_2}$ 。

## 2.2 整数型量子粒子群算法原理

粒子群(Particle Swarm Optimization, PSO)算法是将个体看做是一个粒子, 因此在粒子运动过程中的运行方向是根据全体粒子和自身方向决定, 易导致算法陷入局部最优解或停滞状态<sup>[13-14]</sup>。为了避免这个问题, Sun 等人提出了根据粒子的量子特性, 将种群中的所有粒子作为量子粒子, 在可行解的空间中搜索每个量子粒子的最优解, 并采用量子旋转门对每个量子粒子进行动态调整的量子粒子群算法(Quantum Particle Swarm Optimization, QPSO)。

一般用波函数  $\Psi(X, t)$  描述粒子的状态, 根据粒子出现在可行解的某一点的概率密度函数, 然后随机模拟得到粒子的位置  $X(t)$  为

$$X(t) = p \pm \frac{L}{2} \ln\left(\frac{1}{u}\right) \quad (6)$$

其中:  $u \in [0, 1]$  范围内随机数;  $L$  为

$$L(t+1) = 2\beta |m_{\text{best}} - X(t)| \quad (7)$$

本文考虑配电网的整数编码问题, 要求粒子的各维分量为正整数, 采用整数编码型粒子群算法(Integer Coded Quantum Particle Swarm Optimization, ICQPSO)。因此 ICQPSO 的粒子进化方程为

$$m_{\text{best}}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i(t) = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{i1}(t), \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{i2}(t), \dots, \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{iD}(t) \right] \quad (8)$$

$$P_{id}(t) = \varphi P_{id}(t) + (1-\varphi) P_{gd}(t) \quad (9)$$

$$X_{id}(t+1) = \text{round}(P_{id}(t) \pm \beta |m_{\text{best}}(t) - X_{id}(t)| \ln\left(\frac{1}{u}\right)) \quad (10)$$

其中,  $\text{round}()$  函数对数值四舍五入将连续数表示的可行解转换为整数;  $N$  为种群 Swarm 的粒子数;  $D$  为粒子的维度;  $u$  和  $\varphi$  表示在  $[0, 1]$  上随机分布数; 在迭代过程中,  $u$  的取值大小决定了式(6)的取值, 即  $u > 0.5$ , 则式(6)取“-”号, 其他情况取“+”号;  $P_i(t)$  和  $P_g(t)$  分别表示粒子  $i$  在  $t$  次迭代时的当前最佳位置和全局最佳位置;  $P_{id}(t)$  为第  $i$  个粒子的第  $d$  维的位置, 由  $P_{id}(t)$  和  $P_{gd}(t)$  决定;  $m_{\text{best}}(t)$  为第  $i$  个粒子的平均最佳位置;  $X_{id}(t)$  为第  $t$  次迭代时第  $i$  个粒子

的第  $d$  维的位置;  $\beta$  为收缩扩张系数, 用来控制粒子的收敛速度, 其变化规律为

$$\beta = m - (m-n) \times \frac{t}{\text{maxIters}} \quad (11)$$

$\beta$  随着迭代的进行, 线性地从  $m$  递减到  $n$ , 通常  $m=1$ ,  $n=0.5$ , 式中  $\text{maxIters}$  是迭代的最大次数。根据 ICQPSO 算法原理可以得到其流程如图 2。

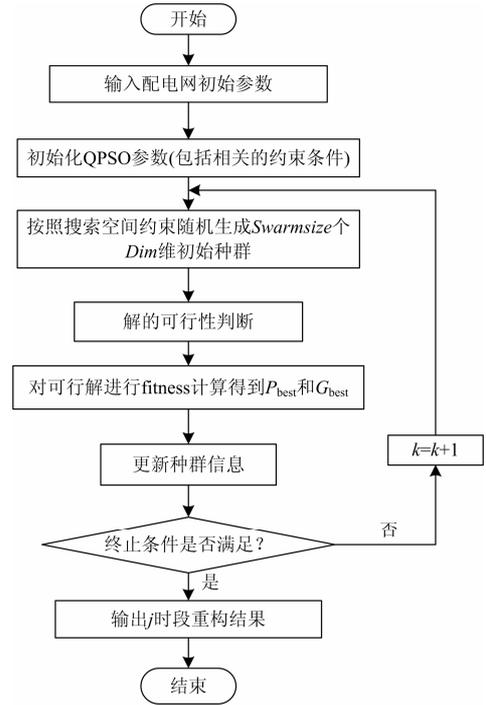


图 2 ICQPSO 算法重构流程

Fig. 2 ICQPSO algorithm reconstruction process

## 2.3 最优时间段的获取

采用 2.1 节的综合时段划分法将负荷曲线划分成  $n$  个段落, 意味着计算过程中需要重构的次数也为  $n$  次, 然而通过分析网损的变化量可知, 某些时间段落可以合并, 引入网损的阈值常数  $\partial > 0$ , 定义最优函数  $u$  为

$$u = \frac{|f_{\text{loss}}(t+1) - f_{\text{loss}}(t)|}{\partial} \quad (0 \leq t \leq n) \quad (12)$$

推导出  $u$  的取值范围为

$$u \begin{cases} u \geq 1 & |\Delta f| \geq \partial \\ -1 \leq u < 1 & |\Delta f| < \partial \end{cases} \quad (13)$$

其中:  $f_{\text{loss}}(t)$ 、 $f_{\text{loss}}(t+1)$  表示在  $n$  个时间段内  $t$  与  $t+1$  时段重构的功率损耗;  $\Delta f = f_{\text{loss}}(t+1) - f_{\text{loss}}(t)$  为两个相邻时段内的网损变化量;  $u \geq 1$  或  $u \leq -1$  表示的是相邻时间段内的网损变化量大于规定的阈值, 则  $t$  与  $t+1$  段落符合重构要求, 则要求

保留重构段落； $0 \leq u < 1$  和  $-1 < u < 0$  表示的是相邻时间段内的网损变化量小于规定阈值，则  $t$  与  $t+1$  段落不符合重构要求，合并重构段落，从而确定最终的重构时段。

### 2.4 基于 ICQPSO 算法动态重构步骤

(1) 采用小波神经网络短期负荷预测法获取未来一天的负荷数据；

(2) 按照 2.1 节所述的综合分割法的流程划分时间段落  $n$ ，确定最大重构次数，对每次重构的动态负荷以其平均值表示；

(3) 输入配电网原始数据，计算原始潮流以及网络损耗，确定  $1 \sim n$  个时间段落内，考虑支路电压、电流、功率以及开关操作次数等约束条件，将动态负荷的平均值随机分配到节点中，采用 ICQPSO 算法实现动态重构，重构过程中计算出任意时段的网损  $f_{\text{loss}}(t)$ ；

(4) 设置阈值常数  $\vartheta > 0$ ，求出  $\Delta f = f_{\text{loss}}(t+1) - f_{\text{loss}}(t)$  及最优函数  $u$  的取值，然后确定时段是否需要合并及重构方式；

(5) 在(4)的基础上确定了最优时段  $n1$ ，若  $n=n1$  重新计算  $0 \sim n1$  时段内的负荷平均值，返回(3)执行，否则输出最优时段数、 $n1$  段的网络损耗、节点电压值以及开关状态。

## 3 实例仿真

本文借鉴 IEEE33 系统的配网结构作为实例，母线侧电压为 12.66 kV，5 个联络开关，配网的动

态过程主要是针对未来时刻的负荷变化，可通过改变其 IEEE33 系统的节点负荷达到模拟负荷动态变化的过程。为了充分模拟未来时刻负荷曲线变化过程，以某地区变电站(其电压等级为 12.66 kV)的一周(2014.1.1~2014.1.7)的采样值为负荷预测的原始数据，每天采样 48 个点，采用小波神经网络<sup>[11]</sup>短期负荷预测方法得到未来一天的负荷作为研究对象，预测负荷曲线如图 3 所示，采用 2.1 节所述的综合划分时段法划分时段，从图 3 中虚线部分可看出以单调性划分为 6 个部分；在此基础上，设定负荷阈值为  $\delta = 25$  再划分时段，最终初步划分的时段如表 1。单个开关操作次数  $C_{j_{\text{max}}} \leq 3$ ，综合最大开关操作次数  $C_{\text{max}} \leq 15$ 。

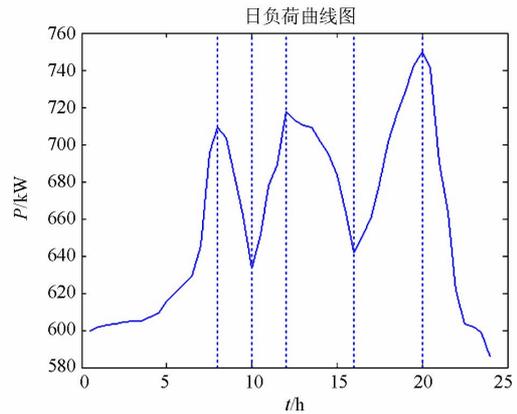


图 3 日负荷预测曲线  
Fig. 3 Daily load curve

表 1 综合法划分时段表

Table 1 Synthesis time table

段落	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
分段时刻/h	7.0	8.0	9.5	10.0	10.5	11.5	12.0	16.0	20	20.5	21.0	21.5

由表 1 可知，初步划分得到需要重构的段落数为 14 个，在每个段落中取其中值作为模拟节点动态重构的负荷值，在不同的时刻内替代 IEEE33 系统的某个节点或者多个节点的注入负荷，模拟系统负荷的动态变化。之后采用粒子群算法分段落初步重构，粒子群算法中设置  $Swarm=50$ ，第一层重构完成后，引入阈值常数  $\vartheta$ ，得出最优重构次数，输出网络损耗、节点电压值以及开关状态。本文考虑篇幅原因，只给出 IEEE33 节点系统中的 14 节点动态重构的结果。从表 2 可知，综合划分法划分时间段后，根据最优函数阈值的取值不同，最终得到的重构次数不同， $\vartheta = 5$  重构时段数为 7， $\vartheta = 10$  重构时为 5，也就是说最优时段数随着  $\vartheta$  的变化而变化。分析数据可知，当  $\vartheta = 5$  时原始网络的网损平均值

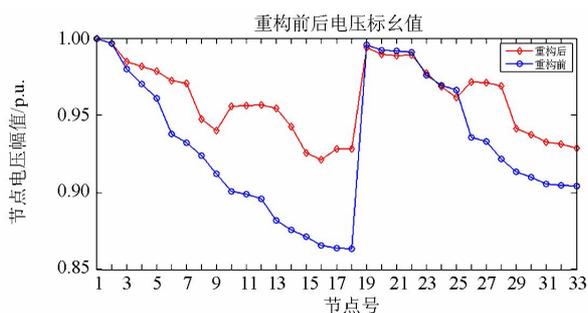
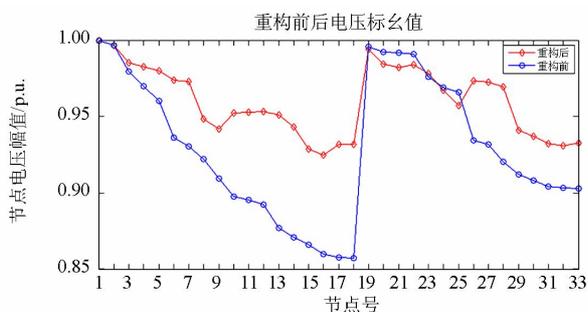
为 347.651 3 kW，经过重构后网损平均值为 226.438 6 kW，网损降低 121.212 7 kW，节点电压最低值为 0.929 7 pu，单个开关动作次数最大的为 3 次，最小的为 1 次，总开关次数为 15 次符合设定的要求；当  $\vartheta = 10$  时原始网络的网损平均值为 344.218 0 kW，经过重构后网损平均值为 231.764 1 kW，网损降低 112.453 9 kW，节点电压最低值为 0.921 3 pu，单个开关动作次数最大的为 3 次，最小的为 1 次，总开关次数为 15 次符合设定的要求，本文综合考虑节点电压的稳定性及重构后的网损值， $\vartheta = 5$  的时候是最佳状态。从图 4 和图 5 可以看出，比较初始网络的节点平均电压值和动态重构后的节点平均电压值，可以看出动态重构对系统节点的电压有一定的影响，且随着最优函数阈值  $\vartheta$  的变化而

变化, 在本文中  $\partial = 5$  时处于最佳状态, 通过动态重构不仅能够降低网损, 还可以提升电网的节点电压, 使配电网电压的波动性变小, 有利于系统的稳定性和安全性。

表 2 IEEE33 系统节点 14 动态重构的结果

Table 2 Node 14 of IEEE33 system dynamic reconstruction results

$\partial$ 取值	时刻	时段	原始网络网损/kW	原始最低电压值/pu	重构后网损电量/kW	断开开关	最低电压值/pu
$\partial = 5$	7 时	1	306.315 3	0.863 2	185.633 0	33.14.9.32.28	0.938
	8 时	2	377.114 2	0.850 9	250.369 6	33.14.9.16.37	0.923 8
	10 时	3	356.923 1	0.861 1	219.537 5	33.14.9.32.28	0.929 7
	11.5 时	4	354.326 3	0.862 6	192.658 9	7.14.9.32.28	0.929 7
	16 时	5	386.135 7	0.865 8	252.941 0	33.14.9.16.28	0.929 7
	21 时	6	352.423 5	0.861 2	248.107 4	7.13.9.36.28	0.929 8
	23 时	7	300.321 2	0.863 6	235.823 0	7.13.9.34.28	0.929 8
$\partial = 10$	7 时	1	306.315 3	0.863 2	185.633 0	33.14.9.32.28	0.938 4
	8 时	2	377.114 2	0.850 9	250.369 6	33.14.9.16.37	0.923 8
	10 时	3	356.923 1	0.861 1	219.537 5	33.14.9.32.28	0.929 7
	21 时	4	370.308 0	0.862 7	267.457 4	7.14.9.16.28	0.921 3
	23 时	5	300.321 2	0.863 6	235.823 0	7.13.9.34.28	0.929 8

图 4  $\partial = 5$  重构前后各个节点电压比较Fig. 4 Reconstruction before and after each node voltage comparison ( $\partial = 5$ )图 5  $\partial = 10$  重构前后各个节点电压比较Fig. 5 Reconstruction before and after each node voltage comparison ( $\partial = 10$ )

## 4 结论

本文提出了综合划分法分配配电网负荷的时段性, 综合考虑负荷曲线的单调性和幅值变化大小初

步划分时段, 初步确定了重构次数。采用整数型编码的粒子群算法对网络进行重构, 以相邻两个时段的网损变化为依据, 提出最优函数确定网络的最优重构次数, 在满足开关约束等的条件得到网损最低和节点电压值较高且波动最小的双目标重构方案。通过实例仿真验证, 本文方法在划分动态负荷时段方面更加贴近实际情况, 通过最优函数有利于寻找到最优重构时刻点, 重构时考虑网损和电压波动性的问题, 提高了系统的稳定性和安全性。

## 参考文献

- [1] AHUJA A, DAS S, ANIL P. An AIS-ACO hybrid approach for multi-objective distribution system reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1101-1111.
- [2] 李如琦, 李芝荣, 凌武能, 等. 基于类电磁机制算法的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 116-120.  
LI Ruqi, LI Zhirong, LING Wuneng, et al. Distribution network reconfiguration based on electromagnetism-like mechanism algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 116-120.
- [3] 徐延炜, 贾嵘. 基于人工免疫思想的蚁群算法(AIACS)在配电网重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 89-93.  
XU Yanwei, JIA Rong. Application of artificial immune theory-based on colony system (AIACS) in reconfiguration of distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 89-93.
- [4] 胡俊, 肖健梅, 王锡淮. 基于差分变异的混合蛙跳算

- 法在配电网重构中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(6): 5-10.
- HU Jun, XIAO Jianmei, WANG Xihuai. Application of frog leaping algorithm based on hybrid differential mutation in distribution system reconfiguration[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(6): 5-10.
- [5] 尹洪, 刘天琪, 李樊, 等. 基于免疫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, 2014, 26(4): 15-19.
- YIN Hong, LIU Tianqi, LI Fan, et al. Distribution network reconfiguration with different distributed generation based on immune genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(4): 15-19.
- [6] 杨胡萍, 彭云焰, 熊宁. 配网动态重构的静态解法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(8): 53-57.
- YANG Huping, PENG Yunyan, XIONG Ning. A static method for distribution network dynamic reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(8): 53-57.
- [7] 董家读, 马献乐, 陈泽淮. 基于负荷变化的配电网重构研究[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 11-14.
- DONG Jiadu, MA Xianle, CHEN Zehuai. Studies on distribution network reconfiguration based on load change[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 11-14.
- [8] 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): 44-49.
- YIN Liyan, YU Jilai. Dynamic reconfiguration (DR) of distribution network with multi-time periods[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 44-49.
- [9] 江东林, 刘天琪, 李樊. 采用时段动态划分和分层优化策略的配电网重构[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 153-157.
- JIANG Donglin, LIU Tianqi, LI Fan. Dynamic distribution network reconfiguration based on dynamic partition of time intervals and hierarchical optimization[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 153-157.
- [10] 吴建中, 余贻鑫. 最小化运行费用的时变重构全局优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 13-17.
- WU Jianzhong, YU Yixin. Global optimizational algorithm to time-varying reconfiguration for operation cost minimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 13-17.
- [11] 廖旋焕, 胡智宏, 马莹莹, 等. 电力系统短期负荷预测方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 147-152.
- LIAO Nihuan, HU Zhihong, MA Yingying, et al. Review of the short-term load forecasting methods of electric power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 147-152.
- [12] 向嵘嵘, 王学平. 基于小波-神经网络的电力系统短期负荷预测[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(18): 5018-5020.
- XIANG Zhengrong, WANG Xueping. Forecasting approach to short-time load using wavelet decomposition and artificial neural network[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(18): 5018-5020.
- [13] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization[C] // Proc IEEE Int'l Conf on Neural Networks, Piscataway, NJ, 1995.
- [14] 李振坤, 陈星莺, 余昆. 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.
- LI Zhenkun, CHEN Xingying, YU Kun. Hybrid particle swarm optimization for distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 35-41.

收稿日期: 2014-11-06; 修回日期: 2015-01-23

作者简介:

文娟(1984-), 女, 博士研究生, 研究方向为智能电网重构、电网可靠性等; E-mail: 156599113@qq.com

谭阳红(1971-), 女, 博士生导师, 研究方向为配电网故障诊断、智能与实时信息处理;

雷可君(1979-), 女, 博士研究生, 研究方向为智能电网、智能与实时信息处理。

(编辑 周金梅)