

DOI: 10.7667/PSPC150616

基于隶属度时段划分的配电网动态重构

张珂, 吕林, 孙宇乐

(四川大学电气信息学院(四川省智能电网重点实验室), 四川 成都 610065)

摘要: 为更好地实现配电网优化运行, 提出一种基于隶属度时段划分的配电网动态重构方法。以配电网整个时段内综合运行费用最小为目标函数, 建立配电网动态重构数学模型。将系统各时段有功网损与电压偏差之比作为系统运行指标, 计算指标峰谷隶属度及变化率对时段进行划分。为增强二进制粒子群算法(BPSO)摆脱局部最优解的能力, 将模拟退火算法(SA)中基于 Mertropolis 准则的新粒子接收机制引入 BPSO 中, 克服二进制粒子群算法易陷入早熟收敛的局限性。算例结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 配电网; 动态重构; 隶属度; 二进制粒子群算法; Mertropolis 准则

Dynamic reconfiguration of distribution network based on membership partition of time intervals

ZHANG Ke, LÜ Lin, SUN Yule

(School of Electric Engineering and Information, Sichuan University (Intelligent Electric Power Grid Key Laboratory of Sichuan Province), Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to achieve optimal operation of distribution network better, a method of dynamic distribution network reconfiguration based on membership partition of time intervals is proposed. This paper establishes the mathematical model of dynamic distribution network reconfiguration and uses the minimum of comprehensive operation cost as the target function. This paper uses the ratio of active network loss and voltage offset each period as the operation index of the system, and calculates the peak and valley membership grade as well as the rate of change of the index proposed to partition time intervals. The new particle acceptance mechanism based on Mertropolis norm of simulated annealing (SA) is introduced into the binary particle swarm optimization (BPSO) so as to enhance the ability of getting rid of local solution and overcome the limitations of premature convergence of BPSO. Results of calculation example show that the proposed method is effective.

Key words: distribution network; dynamic reconfiguration; membership; binary particle swarm optimization; Mertropolis norm

0 引言

配电网一般采用闭环设计, 开环运行, 且呈辐射状, 其重构是指通过切换配电网中常闭分段开关和常开联络开关的状态来改变配电网的拓扑结构, 以使重构之后的配电网更加安全经济的运行。

目前, 配电网重构可以分为两类: 静态重构和动态重构。静态重构^[1-10]是针对配电网在单时间断面下的优化重构, 国内外对于静态重构的研究已经比较成熟, 其求解方法主要有最优流模式法、支路交

换及人工智能算法等。然而, 实际配电网中各节点的负荷是随时间变化的, 传统的静态重构往往不能满足工程实际的需要。动态重构则会考虑整个研究时间区间内负荷的变化情况, 计及开关操作约束等实际限制条件以确定最优重构方案, 更具实用价值。目前对于配电网动态重构的研究相对较少。文献[11]采用最优模糊聚类方法, 依据不同时间点的负荷数据的内在相似性进行聚类, 将配电网动态重构转化为多个以聚类中心为代表的静态重构问题, 但该方法较为繁琐复杂, 不易实现; 文献[12]引入功率矩的概念对重构时段进行划分, 以整个时段内运行费用最小为目标函数对配电网进行分层优化重

基金项目: 四川省科技厅应用基础项目(2015JY0128)

构,但其算法的收敛速度较慢,有待改进;文献[13]将每个时间断面下的优良解构成解集,采用多代理技术来确定动态解;文献[14]综合考虑配电网各时段网损和电压偏差,将二者加权求和作为时段划分的指标依据,采用改进的遗传算法进行重构;文献[15]在重构过程中将没有达到开关操作次数上限的开关作为候选开关,以约束开关操作次数,但其按时间顺序重构,顾头不顾尾,很难保证整个时间区间内重构结果的质量。文献[16]采用时间枚举法确定一次重构时间,并且利用逐次逼近法协调各时间区间的重构时间和结构,实现全局最优。

本文将配电网各时段的有功网损与电压偏差之比(指标 E)作为衡量该时段系统运行状态的指标,利用改进的半梯形隶属度函数法通过指标 E 进行重构时段划分。在每个时段初始时刻利用改进的二进制粒子群算法进行重构,以确定综合费用最低且满足约束的最优重构方案,为提高配电网运行水平提供参考。

1 配网重构数学模型

本文动态重构以配电网整个时段内的综合运行费用最小为目标。综合运行费用包括两个部分:网损费用和开关操作费用。目标函数为

$$\min F = \sum_{i=1}^N B_{pi} P_i \Delta t_i + \sum_{j=1}^{NB} \sum_{k=1}^M B_s |s_{j,k} - s_{j,k-1}| \quad (1)$$

式中: F 为整个时段配电网的综合运行费用; N 、 M 分别是时段划分前和后的时段总数; B_{pi} 为时段 i 的电价; P_i 为时段 i 配电网的有功网损; Δt_i 为时段 i 的持续时间; NB 为可操作开关总数; B_s 为操作一次开关的费用; $s_{j,k}$ 为开关 j 在时段 k 的状态,其中 0 表示开关断开, 1 表示开关闭合。

潮流计算时,采用基于支路电流的前推回代算法。重构后的配电网必须满足功率平衡约束、节点电压约束、支路功率约束以及网络拓扑约束。此外,还应该满足单个开关和所有开关的操作次数约束。

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^M |s_{j,k} - s_{j,k-1}| \leq s_{j\max} \\ \sum_{j=1}^{NB} \sum_{k=1}^M |s_{j,k} - s_{j,k-1}| \leq s_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $s_{j\max}$ 表示开关 j 的最大操作次数; s_{\max} 表示所有开关的总操作次数。

2 基于隶属度的时段划分方法

目前配电网动态重构时段划分一般根据全天各

节点在 24 或 48 个时间点上的负荷数据计算能反应系统运行状态的指标,通过对该指标进行科学的处理,如设定变化阈值、利用统计学理论或采用模糊聚类等方法,进而指导时段划分。本文提出利用改进的半梯形隶属度函数计算各时段指标 E 的峰谷隶属度及其变化率的大小和符号,依此对全天时段进行划分。

2.1 时段划分指标 E

有功网损和电压偏差均能够较好反映配电网运行状态的优劣,本文将有功网损与电压偏差的比值作为系统综合运行指标 E 。

(1) 有功网损

$$Dp = \sum_{i=1}^N k_i I_i^2 R_i \quad (3)$$

式中: Dp 表示配电网的有功网损; N 表示配电网中的支路总数; k_i 表示开关 i 的状态, k 为 1 表示开关闭合, k 为 0 表示开关断开; I_i 表示流过支路 i 的电流; R_i 表示支路 i 的电阻。

(2) 电压偏差

$$Du = \sum_{k=1}^m \left| \frac{U_{kN} - U_k}{U_{kN}} \right| \quad (4)$$

式中: Du 表示配电网的电压偏差; m 表示配电网节点总数; U_k 表示节点 k 处的实际电压; U_{kN} 表示节点 k 处的额定电压,一般 $U_{kN} = 1$ 。

(3) 综合指标

首先分别将每个时段配电网的有功网损和电压偏差进行归一化处理,再用它们的比值作为综合指标 E 。

$$E(t) = \frac{Dp(t)}{\sum_{i=1}^{24} Dp(i)} \bigg/ \frac{Du(t)}{\sum_{i=1}^{24} Du(i)} \quad (5)$$

式中: $E(t)$ 为配电网在时刻 t 的综合指标; $Dp(t)$ 为配电网在时刻 t 的有功网损; $Du(t)$ 为配电网在时刻 t 的电压偏差; i 表示第 i 个时刻。

2.2 时段划分方法

根据 2.1 节式(5)可以得到 1 d 内的 24 或 48 个时刻配电网在初始网络结构下的综合指标 E , 构成配电网 1 d 内的综合指标曲线图。从模糊数学的角度出发,以曲线上各点对于峰谷点的隶属程度为划分原则,划分各点所处的峰谷段。显然,最高峰点处于指标峰段的隶属度为 1,最高峰点处于指标谷段的隶属度为 0;最低谷点处于指标谷段的隶属度为 1,最低谷点处于指标峰段的隶属度为 0。指标曲线上其他各点对于指标峰段和谷段的隶属度采用半

梯形隶属度函数^[17]来确定,为便于计算,只采用隶属度函数的线性部分。设曲线上的最高峰点与最低谷点分别为 e_{\max} 、 e_{\min} ,曲线上其余点中任意一点为 e_x 。采用偏小型半梯形隶属度函数计算 e_x 处于指标谷段的隶属度 $A(x)$,采用偏大型半梯形隶属度函数计算 e_x 处于指标峰段的隶属度 $B(x)$,其中:

$$A(x) = \frac{e_{\max} - e_x}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (6)$$

$$B(x) = \frac{e_x - e_{\min}}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (7)$$

只依靠式(6)和式(7)得出的结果来划分各点的峰谷段比较粗糙,处理时段边界点时具有人为主观性,例如当某些点处于指标峰(谷)段的隶属度在0.5~0.6之间时,难以界定该点的峰谷属性,只能靠大概的估计来归类,会对分段结果产生不利影响。

因此,在上述方法基础上提出一种改进措施。不难发现,指标曲线上具有相同峰谷属性的连续时刻点的配电网运行水平基本一致,指标变化率较小。那么,若连续时刻点的指标变化率较小,则这些时刻点具有相同的峰谷属性。指标变化率 ε 的计算公式为

$$\varepsilon = \frac{E(t+1) - E(t)}{E(t+1)} \times 100\% \quad (t = 0, 1, \dots, 23(47)) \quad (8)$$

根据式(8)计算出指标变化率 ε 的数值大小和符号,可以判断各时刻点与其相邻时刻点的峰谷属性一致性,如表1所示,据此找出不同时段之间合理的边界点。表1中前一项为指标变化率的符号,后一项为指标变化率的数值。

表1 指标变化率与峰谷时段关系表

Table 1 Relational table of change rate of index and period of time of peak valley

ε	峰时段	平时段	谷时段
峰时段	±, 小	-, 大	-, 大
平时段	+, 大	±, 小	-, 大
谷时段	+, 大	+, 大	±, 小

由表1可以看出:当指标变化率的数值较小时,无论其符号为+或-,均表明连续时刻点有一致的峰谷属性;当指标变化率的数值较大时,则表明连续时刻点具有不同的峰谷属性,并且可以根据当前时刻点所处的时段和指标变化率的符号来判断时段变化的过渡趋势。

按式(6)~式(8),可以通过综合指标 E 对配电网重构时段进行划分,具有一定的科学性。

3 改进的配电网重构二进制粒子群算法

3.1 基于环路的编码规则

配电网具有闭环设计、开环运行的特点,一个联络开关对应一个环路,因此本文采用基于环路的二进制编码形式,1表示开关闭合,0表示开关断开。每个粒子由各个开关状态组合形成。考虑配电网运行的实际情况,以下情况的开关因必须要闭合不参与编码:

- ① 与电源点直接连接的开关;
- ② 不在任何环路上的开关。

同时,为了满足配电网辐射状约束,每一个环路只能断开一个开关,也即断开开关个数等于环路数^[18]。基于以上的编码规则,不仅保证了配电网辐射状结构,并且大大地减少了不可行解的数量,提高了搜索效率。

按照上面的编码规则产生的粒子中仍有一部分为不可行解,因此在初始种群的产生以及每一次迭代粒子位置更新时,对每个粒子的可行性进行检验:首先每个粒子中“0”的个数应该等于环路数;其次根据图论和树状结构的特点,对每个粒子所对应的配电网拓扑结构连通性进行判别^[19]。

经过检验后的粒子一定是有效解中的一个,这样避免了无效解的产生,保留全有效解,进一步提高算法效率。

3.2 引入 Mertropolis 准则的改进二进制粒子群算法

二进制粒子群算法在求解配电网重构过程中,初始阶段收敛速度比较快,随着迭代次数的增加,粒子群出现高度聚集的现象,粒子丧失多样性,很容易陷入局部最优解。一旦陷入局部最优解,就很难跳出来继续搜索全局最优解。为了克服早熟收敛问题,本文提出将模拟退火算法中的 Mertropolis 准则引入到二进制粒子群算法中。

二进制粒子群算法求解配电网重构问题一般步骤如下:

(1) 输入配电网初始信息,设置粒子种群大小 $sizepop$, 最大迭代次数 $genmx$, 惯性权重系数 ω , 加速系数 c_1 、 c_2 , 等参数。

(2) 随机产生初始粒子群,得到粒子的速度 v_i 和位置 x_i 。进行潮流计算,得到每个粒子的适应度值,作为每个粒子当前的个体历史最优值 $P_{best,i}$ 。当前全局最优值 G_{best} 为 $P_{best,i}$ 中的最小值, G_{best} 对应的全局最优位置为 x_{best} 。

(3) 更新每个粒子的速度 v_i ，得到新的速度 v'_i ，将速度 v_i 限制在 $[-V_{\max}, V_{\max}]$ 范围内；更新每个粒子的位置 x_i ，得到新的位置 x'_i 。

(4) 进行潮流计算，得到粒子更新后的适应度值。对比新旧适应度值的优劣更新个体最优值，进而更新全局最优值。

(5) 若达到最大迭代次数 gen_{mx} ，则停止计算；否则，更新迭代次数，返回步骤(3)继续计算。

根据 Mertropolis 准则，利用新解 x'_i 和旧解 x_i ，计算 $\Delta f = f(x'_i) - f(x_i)$ 。若 $\Delta f < 0$ ，则接受新解 x'_i ；否则，若 $\exp(-\Delta f/T) > random(0,1)$ ，则接受新解 x'_i ；否则， x_i 不变。为了将 Mertropolis 准则引入，我们将二进制粒子群算法第(4)步改为：计算粒子 i 位置变化后适应度值的变化量 $\Delta f = f(x'_i) - f(x_i)$ 。若 $\Delta f < 0$ ，则接受新的速度 v'_i 为粒子 i 当前速度，接受新的位置 x'_i 为粒子 i 当前位置。进行个体最优位置更新；否则，若 $\exp(-\Delta f/T) > random(0,1)$ ，则接受新的速度 v'_i 为粒子 i 当前速度，接受新的位置 x'_i 为粒子 i 当前位置。进行个体最优位置更新；否则， v_i 、 x_i 均不变，个体最优位置不更新。再进行全局最优更新，得到新的全局最优值 G'_{best} 及 G'_{best} 对应的全局最优位置 x'_{best} 。

这样算法在接受新解时以一定的概率接受“恶化”解，保证了迭代中后期粒子的多样性，增强二进制粒子群算法摆脱局部最优解的能力，从而抑制早熟现象。引入 Mertropolis 准则的改进二进制粒子群算法的流程图如图 1 所示。

4 算例分析

本文动态重构算例取自文献[20]的 IEEE33 节点配电网系统，修改各节点的负荷峰值为文献数据的 120%，系统单线图如图 2 所示。时间区间为 1 天，重构前为 24 个时段，第 1 个时段为 0:00~1:00，其他时段依此类推。根据文献[21]可以得到配电网各节点在 24 个时刻的负荷，并假设各时段持续时间内负荷保持不变。设每个开关的动作次数最多为 3 次，所有开关的总动作次数最多为 15 次，开关操作费用为 7 元/次，电价为 0.7 元/kWh。根据文献[22]所得的推论，设定开关动作时刻为每个重构时段的初始时刻。改进二进制粒子群算法参数设置如下：粒子群规模为 40，最大迭代次数为 50，惯性权重系数为 1，加速系数 c_1, c_2 为 2，初始温度 T_0 为 20 000，退火系数 α 为 0.8。

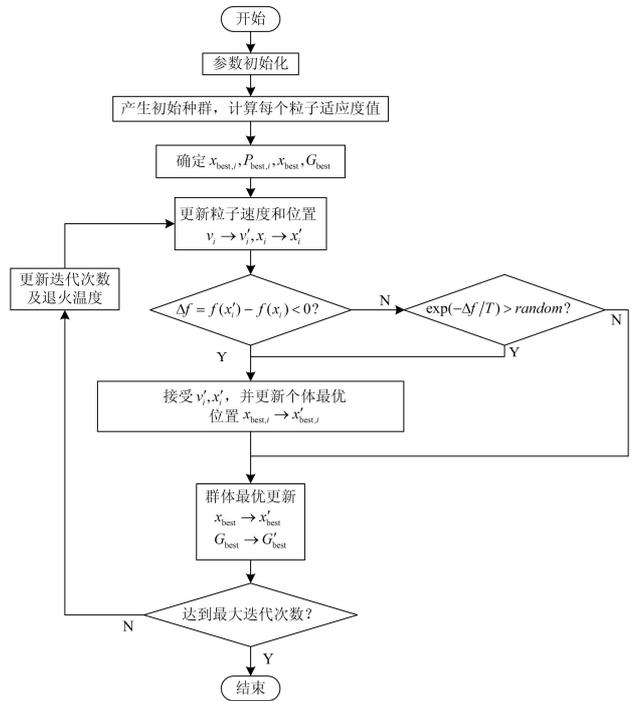


图 1 改进二进制粒子群算法流程图

Fig. 1 Flow chart of improved BPSO algorithm

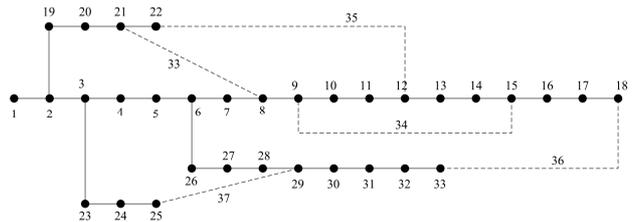


图 2 IEEE33 节点系统

Fig. 2 IEEE 33-bus system

根据 2.2 节所述的时段划分方法，得到系统各时刻指标 E 峰谷隶属度如图 3 所示，各时刻指标 E 变化率如图 4 所示。时段划分结果为：重构时段 I 为 1~8 时段，重构时段 II 为 9~21 时段，重构时段 III 为 22~24 时段。在时段划分基础上，得出的重构方案如表 2 所示。

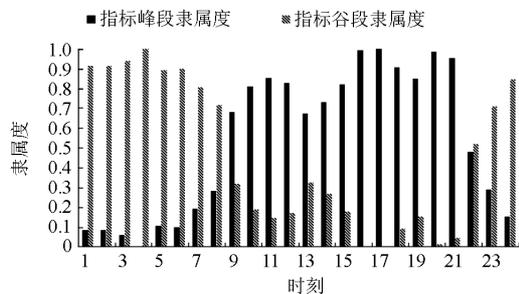


图 3 指标 E 峰谷隶属度

Fig. 3 Peak valley membership of index E

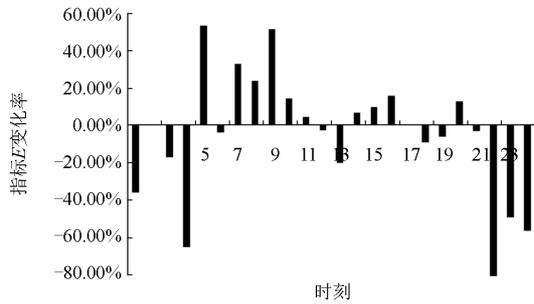


图4 指标E变化率

Fig. 4 Change rate of index E

表2 备选重构方案

Table 2 Alternative reconfiguration schemes

重构方案	开关操作方案	有功网损/kW	开关操作次数/次	综合运行费用/元
初始结构	33,34,35,36,37	2 217.5	0	1 552.25
方案一	0:00: 7,9,14,36,37 8:00: 7,9,14,32,37 21:00: 7,9,14,32,37	1 541.48	8	1 135.04
方案二	0:00: 7,9,14,36,37 8:00: 7,9,14,36,37 21:00: 7,9,14,36,37	1 567.93	6	1 139.55
方案三	0:00: 7,9,14,32,37 8:00: 7,9,14,32,37 21:00: 7,9,14,32,37	1 540.91	8	1 134.64

当系统在初始网络结构下, 不进行重构时, 一天之内的有功网损为 2 217.5 kW, 综合运行费用为 1 552.25 元。

由表 2 可知, 通过网络重构, 可以降低系统的网损, 减少系统的综合运行费用。方案一通过 8 次开关操作, 将网损降低到 1 541.48 kW, 综合运行费用降低到 1 135.04 元; 方案二通过 6 次开关操作, 将网损降低至 1 567.93 kW, 综合运行费用降低至 1 139.55 元; 方案三通过 8 次开关操作, 将网损降低至 1 540.91 kW, 综合运行费用降低至 1 134.64 元; 故方案三为最佳重构方案。

值得注意的是, 方案二中的综合运行费用只比方案三中多 4.91 元, 但是开关操作次数却由方案三中的 8 次降低为方案二中的 6 次。在费用只多出 0.43% 的情况下使开关操作次数降低 25%, 若在实际配电网重构时方案二性价比更高。

将本文最佳重构方案与文献[19]中的最优重构方案对比, 以各自综合运行费用减少率为依据, 如

表 3 所示, 可知本文方法更优。

表3 重构方案对比

Table 3 Comparison of reconfiguration schemes

方法	重构前综合运行费用/元	重构后综合运行费用/元	费用减少比率
本文	1 552.25	1 134.64	26.9%
文献[15]	1 062.24	892.08	16.02%

对于改进的二进制粒子群算法, 采用标准 IEEE33 节点系统验证其性能。在静态重构下, 连续运行本文算法程序 50 次对 33 节点配电网进行重构, 50 次均收敛得到全局最优解, 其中最小迭代次数为 4 次, 最大迭代次数为 30 次, 平均迭代次数为 13.48 次。本文算法最小、最大迭代次数的迭代寻优过程如图 5 所示。与其他文献算法进行比较的结果如表 4 所示。表明改进二进制粒子群算法全局搜索能力强, 能以较快的速度收敛到最优解。

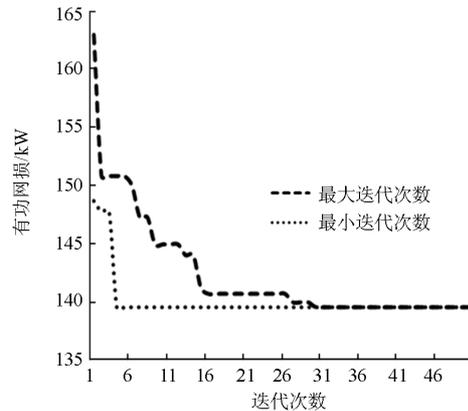


图5 迭代寻优过程

Fig. 5 Iterative optimization process

表4 不同算法迭代次数比较

Table 4 Iteration number of different algorithms

项目	文献[6]	文献[7]	文献[8]	本文
最小迭代次数	26	19	7	4

5 总结

本文以系统综合运行费用最小为目标对配电网进行分时段动态重构。提出将配电网各时段有功网损与电压偏差之比作为系统运行指标, 通过计算指标峰谷隶属度及变化率对时段进行有效划分。针对二进制粒子群算法容易陷入局部最优解的缺点, 引入模拟退火算法中的 Metropolis 准则, 改进后的算法不仅具有并行处理优化的优点, 而且克服了早熟收敛的缺点。仿真结果表明, 本文提出的方法能够

对配电网动态重构进行有效求解, 确定兼顾系统有功网损和开关操作次数限制的最优重构方案, 易于实现且具有一定实用价值。

参考文献

- [1] 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 Zhinong, HAN Lianshan. Application of ordinal optimization in distribution network reconstruction[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 41-48.
- [2] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 面向最大供电能力提升的配电网主动重构策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(12): 137-147.
JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. An active reconfiguration strategy for distribution network based on maximum power supply capability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(12): 137-147.
- [3] 陈春, 汪飒, 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.
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.
- [4] TALESIKI R, RAJICIC D. Distribution network reconfiguration based for energy loss reduction[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1): 398-406.
- [5] 曹文辉, 彭春华, 郭剑峰, 等. 基于全有效解整数微分进化算法的含分布式发电配网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 105-110.
CAO Wenhui, PENG Chunhua, GUO Jianfeng, et al. Reconfiguration of distribution network with DGs based on the efficient solution and the integer coded differential evolution algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 105-110.
- [6] 刘自发, 葛少云, 余贻鑫. 一种混合智能算法在配电网重构中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 73-78.
LIU Zifa, GE Shaoyun, YU Yixin. A hybrid intelligent algorithm for loss minimum reconfiguration in distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 73-78.
- [7] 周淦, 张冠军, 李剑, 等. 基于化整为零策略和改进二进制差分进化算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 197-203.
ZHOU Quan, ZHANG Guanjun, LI Jian, et al. Distribution network reconfiguration based on strategy of breaking up the whole into parts and improved binary differential evolution algorithm[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 197-203.
- [8] 王淳, 易水平, 刘建国. 配电网重构的食物链生态进化算法[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2858-2864.
WANG Chun, YI Shuiping, LIU Jianguo. Evolutionary algorithm of food chain for reconfiguration distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2858-2864.
- [9] 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.
- [10] 卫健, 吕林, 魏震波, 等. 计及可靠性因素的配电网多目标重构算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 72-75.
WEI Jian, LÜ Lin, WEI Zhenbo, et al. Multi-objective reconstruction algorithm of distribution network considering the reliability factors[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 72-75.
- [11] 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.
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.
- [12] 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.
- [13] 李振坤, 陈星莺, 赵波, 等. 配电网动态重构的多代理协调优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 72-79.
LI Zhenkun, CHEN Xingying, ZHAO Bo, et al. Dynamic reconfiguration of the distribution network based on multi-agent systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 72-79.
- [14] 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.
- [15] 刘蔚, 韩祯祥. 基于时间区间的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 33-38.
LIU Wei, HAN Zhenxiang. Distribution system reconfiguration based on time interval[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 33-38.
- [16] 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.
- [17] 丁宁, 吴军基, 邹云. 基于 DSM 的峰谷时段划分及分时电价研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 9-12, 16.
DING Ning, WU Junji, ZOU Yun. Research of peak and valley time period partition approach and TOU price on DSM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(23): 9-12, 16.
- [18] 麻秀范, 丁宁, 李龙. 配电网重构中网络辐射形与连通性的判断[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 289-293.
MA Xiufan, DING Ning, LI Long. Judging radial and connectivity of network in distribution networks reconfiguration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 289-293.
- [19] 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.
- [20] ZHU Jizhong, XIONG Xiaofu, HWANG D, et al. A comprehensive method for reconfiguration of electrical distribution network[C] // Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 24-28, 2007, Tampa, FL, USA: 1-7.
- [21] 熊宁, 程浩忠. 基于开关组的禁忌算法在配电网动态重构中的应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11): 56-60.
XIONG Ning, CHENG Haozhong. Switch group-based tabu algorithm applied in distribution network dynamic reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 56-60.
- [22] 戴伟华, 梅贱生, 熊宁, 等. 基于时间区间的实用配电网重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(24): 41-44, 57.
DAI Weihua, MEI Jiansheng, XIONG Ning, et al. Practical method on time interval based distribution network reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(24): 41-44, 57.

收稿日期: 2015-04-04; 修回日期: 2015-05-04

作者简介:

张珂(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网自动化。E-mail: 359182512@qq.com

(编辑 周金梅)