

DOI: 10.7667/PSPC160006

基于网络状态评估的配电网多目标优化重构方法

朱吉然¹, 李龙桂², 李欣然², 冷华¹, 唐海国¹, 龚汉阳¹

(1. 国网湖南省电力公司电力科学研究院, 湖南 长沙 410000; 2. 湖南大学电气与信息学院, 湖南 长沙 410000)

摘要: 提出了一种基于网络状态评估的优化重构思想, 建立了网络重构的数学优化模型。并利用典型 3 馈线 16 节点系统进行了算例分析。算例表明, 该方法可以减少一部分不必要的重构分析; 并且, 当网络需要进行重构计算时, 在计算中该方法取得了良好的优化效果。该优化方法能够在经济性、安全性等方面对配电网进行改善。操作人员能够根据配电网实际情况进行目标权重值的设置, 使重构方案更加灵活、更加具有现实意义。

关键词: 配电网重构; 网络状态评估; 多目标优化

Distribution network multi-objective reconfiguration optimization based on status assessment

ZHU Jiran¹, LI Longgui², LI Xinran², LENG Hua¹, TANG Haiguo¹, GONG Hanyang¹

(1. State Grid Hunan Electric Power Corporation Research Institute, Changsha 410000, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410000, China)

Abstract: A reconfiguration idea is presented that the network status has been assessed before the reconfigurable computing is optimized and mathematical model of multi-objective optimization network reconfiguration is established. A typical distribution network that contains three feeder 16 nodes is used as an example for analysis. In conclusion, this optimization method can reduce the unnecessary part of reconstruction analysis and when the network needs reconfigurable computing it has achieved good optimization results. The optimization method can improve the distribution network in economy, security and other aspects. The operator can set the target weight value according to the actual situation of the distribution network, which makes the reconstruction scheme more flexible and has more practical significance.

Key words: distribution network reconfiguration; network status assessment; multi-objective optimization

0 引言

配电网是连接发输电与用户的重要环节, 为了更好地保证广大电力用户的权益及电力公司的效益, 需要保证配电网运行的经济性、可靠性、安全性。配电网一般是按闭环结构进行设计, 其中包含分段开关及联络开关, 在实际运行过程中联络开关打开、分段开关闭合使得网络呈辐射状运行。通过改变分段开关及联络开关的位置, 即可改变配电网的运行结构, 进而改变配电网的网损、电压质量及负载均衡指数, 这种控制手段被称为配电网重构^[1]。选择合理的开关配置, 使得配电网能够在最佳状态得到最好的经济性、可靠性、安全性, 是配电网重构需要达到的目标。

进行网络优化重构不需要增加额外的投资, 只需通过对网络的结构进行优化, 就能发挥配电网自身的潜力, 从而以较低的成本实现电网运行的经济性和安全性, 具有很大的经济效益和社会效益。网络优化重构是一个多目标优化问题, 考虑的目标一般为系统总网损^[2-3]、负荷均衡化^[4-5]、提高供电电压质量^[6]或综合考虑多个目标^[7], 采用的常用算法主要有最启发式搜索算法^[8-10]、遗传算法^[11]及其他智能算法^[12-15]等。以上文献中均没有提及重构前期网络状态评估。事实上, 电网在实际运行时并不是在任意网络状态下都需要进行重构操作, 而是需要考虑当前网络是否需要进行重构即优化重构的启动条件。如果不进行事先评估而无条件地进行网络重构会产生许多不必要的操作, 引起资源的 unnecessary 浪费, 因此应当对当前网络事先加以评估以判断是否需要重构。

本文提出了重构计算前进行网络状态评估的重

构思想, 算例证明该思想能够减少不必要的重构计算及重构操作, 对节省资源有着很好的效果。

1 整体思想

本文提出的重构方法整体思想如下:

(1) 选取指标对当前网络状态进行评估, 指标包括网损、负荷均衡指数、电压质量等, 并设置每个指标的阈值。当有任一指标越限, 则实施重构计算。

(2) 考虑指标包括网损、负荷均衡指数、电压质量构建优化重构模型, 利用改进遗传算法对网络进行多目标优化, 求解最优网络拓扑。

(3) 执行重构操作。

重构方法整体思想流程图如图 1 所示。

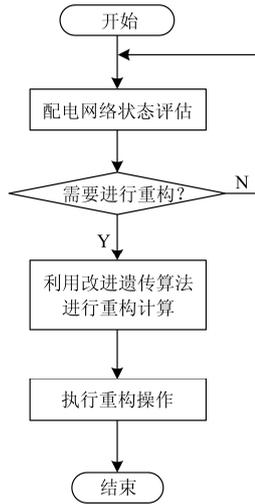


图 1 重构方法整体思想流程图

Fig. 1 Flow chart of the reconfiguration method

2 网络状态评估

对于网络的状态评估, 在此选取网络优化重构常用的优化目标即网损、负荷均衡指数及电压质量作为指标, 先对各指标值进行计算, 再进行评估。

2.1 相关指标计算

2.1.1 网损

电能输送过程中, 不可避免地会产生网络损耗。如果损耗过大, 不但会影响用户的用电质量, 而且会产生巨大的能源浪费。因此, 网损是评价配电网系统状态的一个重要指标。在配电网中, 损耗主要包括导线损耗和变压器损耗, 但是变压器损耗一般是固定不变的, 网络重构不能使其得到改善, 因此, 在此忽略变压器损耗。网损的数学表达式为

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^b k_i R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \quad (1)$$

其中: k_i 表示支路 i 的状态, 为 1 表示支路闭合,

为 0 表示支路断开; R_i 为支路 i 的电阻; P_i 、 Q_i 为支路 i 末端流过的有功功率和无功功率; U_i 为支路 i 末端节点电压; b 为支路总数。

2.1.2 负荷均衡指数

配电网运行中, 由于用户用电量的不同, 可能使得某些支路的负载过重, 接近或超过额定容量, 而另一些支路的负载却很轻。负荷在网络上分布的极不均衡会增加系统的线路损耗, 影响到用户的供电质量与供电安全, 因此负荷均衡是评价网络状态的重要指标。引入负荷均衡指数, 负荷均衡指数越小, 说明线路负载率越均衡。为了能够反映线路负载率的均衡程度, 负荷均衡指数采用线路负载率的方差进行描述为

$$\begin{cases} LB_{\text{ave}} = \frac{1}{b} \sum_{i=1}^b \left(\frac{|S_i|}{S_{i\text{max}}} \right) \\ LB_{\text{sys}} = \frac{1}{b} \sum_{i=1}^b \left(\frac{|S_i|}{S_{i\text{max}}} - LB_{\text{ave}} \right)^2 \end{cases} \quad (2)$$

其中: LB_{ave} 为线路的平均负载率; LB_{sys} 为系统负荷均衡指数; S_i 、 $S_{i\text{max}}$ 分别为支路 i 上的功率及其最大允许容量; b 为支路总数。

2.1.3 电压质量

电压质量也是评价网络状态的重要指标, 利用网络中各节点电压偏离额定电压幅值的大小来体现。由于配电网呈辐射状运行, 一般情况越靠近末端的节点电压越低, 因此, 在此只考虑节点的低电压情况。对于节点电压, 越接近额定电压, 节点电压质量就越好。电压质量的评价函数定义为系统节点电压的最大偏移量, 数学表达式描述为

$$V_o = \max_{i=1}^n (|V_i - V_N|) \quad (3)$$

式中: V_o 为系统节点电压最大偏移量; V_i 表示 i 节点的电压; V_N 表示配电网额定电压; n 为系统节点数。

2.2 状态评估

为了保证重构计算的必要性, 在进行重构计算之前, 需要对网络状态进行评估, 判断是否进行重构计算。状态评估需要计算的指标为: 网损、最低节点电压、最大线路负载率。

其中网损计算公式见式(1)。

最低节点电压计算公式为

$$V_{\text{min}} = \min_{i=1}^n (V_i) \quad (4)$$

最大线路负载率计算公式为

$$LB_{\text{max}} = \max_{i=1}^b \left(\frac{|S_i|}{S_{i\text{max}}} \right) \quad (5)$$

设置网损、负荷均衡指数、电压质量评价函数的阈值分别为 P_f 、 V_f 、 LB_f (该阈值可根据具体网络要求进行设置), 当有目标越过阈值时, 判定配电网需要进行重构计算, 否则不进行重构。

3 网络优化重构计算

在网络重构计算过程中, 需要先确定网络重构的模型(包括目标函数及约束条件)。

3.1 目标函数

常用的目标函数有网损最小、负荷均衡最优、电压质量最好。

只考虑网损时, 目标函数为

$$f_1 = \min P_{\text{loss}} \quad (6)$$

只考虑电压质量时, 目标函数为

$$f_2 = \min V_o \quad (7)$$

只考虑负荷均衡时, 为了优先保证最大线路负载率较小, 在此基础上再考虑线路负载均衡, 即综合考虑最大线路负载率及线路负载平衡指数两个目标, 设置最大线路负载率的权重为 0.9, 线路负载均衡指数权重为 0.1, 目标函数为

$$f_3 = \min(0.1LB_{\text{sys}} + 0.9 \times LB_{\text{max}}) \quad (8)$$

在本文中, 综合考虑网损最小、负荷均衡指数最小、电压质量评价函数值最小等目标进行多目标优化。针对多目标优化, 一般采用目标加权求和的方法将多目标转化为单目标。由于各个目标的量纲不一、数量级不同, 不能够直接进行求和处理, 故有必要对每个目标进行归一化处理。

对于目标 $x_i(i=1, 2, 3)$, 设网络单目标优化重构的目标最优值为 x_i^* , 利用 $\frac{x_i}{x_i^*}$ 对各个目标进行归一化处理。由于各个单目标优化均为最小化问题, 因此 $\frac{x_i}{x_i^*} \leq 1$, 该表达式可将目标归一化到(0, 1]。

根据式(9)~式(11), 构建目标函数

$$f = \max(W_1 \frac{P_{\text{loss}}^*}{P_{\text{loss}}} + W_2 \frac{V_N - V_{\text{min}}^*}{V_o} + W_3 \frac{0.1LB_{\text{sys}}^* + 0.9 \times LB_{\text{max}}^*}{0.1LB_{\text{sys}} + 0.9 \times LB_{\text{max}}}) \quad (9)$$

式中, W_1 、 W_2 、 W_3 分别为各个目标函数的权重, 可以根据网络实际情况进行设置, 如: 当负荷均衡指数过大即网络负荷不够均衡时可以将负荷均衡目标的权重加大, 而当最小节点电压过低时可以加大电压质量目标的权重。 P_{loss}^* 、 V_{min}^* 、 LB_{sys}^* 、 LB_{max}^* 分别为配电网初始状态的网损率、最低节点电压、

负荷均衡指数、线路最大负载率。

3.2 约束条件

为保证网络的安全运行, 重构后的网络需要满足以下约束条件^[16]。

(1) 网络拓扑约束

配电网一般为闭环设计、开环运行, 要求重构后的配电网必须为辐射状。

(2) 供电约束

重构后的网络必须满足负荷要求, 不能有孤立节点。

(3) 电压约束

$$V_{i,\text{min}} \leq V_i \leq V_{i,\text{max}} \quad (10)$$

式中, $V_{i,\text{min}}$ 、 $V_{i,\text{max}}$ 分别为节点 i 允许的电压上限和电压下限。

(4) 支路功率约束

$$S_j \leq S_{j,\text{max}} \quad (11)$$

式中: S_j 代表支路 j 上流过的功率; $S_{j,\text{max}}$ 代表支路 j 上允许流过的最大功率。

3.3 改进遗传算法

传统遗传算法没有基于利用配电网的结构特点进行简化处理, 在生成初始种群、交叉和变异等过程中, 会产生大量不可行解, 严重影响了遗传算法的计算效率。

改进遗传算法^[11]在以环路分解为基础上使用了染色体简化规则和合适的编码规则, 在种群初始化、遗传操作等过程中, 都避免了不可行解的产生, 提高了遗传算法的计算效率。

在改进遗传算法中, 基于以下规则对染色体进行简化处理: (1) 不在任何环路内的支路上的开关必须闭合; (2) 在网架结构合理的情况下, 与电源点相连的开关一般也应闭合。重构过程中不可操作的开关不参与染色体编码。

染色体编码策略: 对染色体进行简化后, 将构成同一个环路的可操作开关放在同一基因块内, 并要求一个环路中只有一个开关打开即一个基因块中只有 1 位为 0。

改进遗传算法相关步骤描述如下。

a. 产生初始群体

首先产生各位全为 1 的染色体, 然后在各基因块中随机选择一位将其置为 0, 并加入一个由现有配电网结构决定的染色体, 构成初始种群。

b. 计算染色体适应值

由于式(9)中的目标函数为效益型目标, 与遗传算法的适应度优化方向一致, 因此可以将式(12)中的目标函数值作为染色体的适应度值。

c. 基因操作

改进遗传算法采用的遗传操作策略不同于传统遗传算法, 在交叉操作时只进行对应基因块的交换, 而将变异操作限制在基因块内。

交叉操作: 染色体上的基因不采用单点交叉, 而是将基因块作为一个整体进行交叉处理。首先产生一个随机数, 通过随机数来确定需要进行交换的基因块, 然后将父辈染色体中相应的基因块进行交换。由于父代每个基因块中只有 1 位为 0, 进行交叉操作后仍能保证每个基因块中只有 1 位为 0, 没有不可行解产生。

变异操作: 首先随机选择一个需要变异的基因块, 然后将基因块中的所有值令为 1, 为了保证解的可行性, 最后产生一个随机数并将对应的基因值

令为 0。如果变异之后的染色体和变异之前的染色体相同, 则继续变异; 否则, 遗传值下一代。

选择操作: 为确保算法的收敛性, 采用最佳个体保留策略即在进化过程中, 父代前 N 个最优个体不进行遗传操作而直接进入下一代。采用该选择操作, 方便对最优解进行保留, 保证遗传算法的优化方向。

4 算例分析

图 2 是美国 PG&E69 节点典型配电网^[17], 该配电网共有 69 个节点, 73 条支路, 其中包含 5 个联络开关, 68 个分段开关, 支路阻抗信息及节点负荷信息见文献[17]。配电网电压等级为 12.66 kV, 含有 7 条馈线, 系统总有功负荷为 3 802.19 kW, 总无功负荷为 2 694.6 kvar。

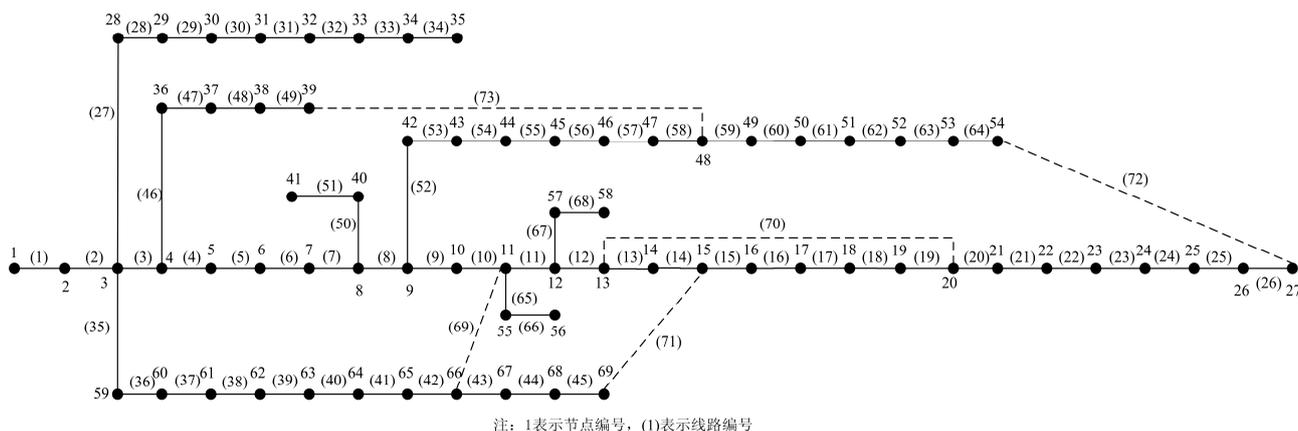


图 2 PG&E69 节点配电网结构图

Fig. 2 Distribution network topology of PG&E69

重构前断开的开关位置为开关 69, 70, 71, 72, 73。设置网损率阈值 2%, 最低节点电压阈值 12.027(0.95 p.u.), 最大线路负载率阈值 50%。

4.1 网络状态评估

为了体现本文的重构思路, 对节点 50 的负荷进行修改, 并设置如表 1 所示的两种负荷水平。

表 1 节点 50 的两种负荷水平

Table 1 Two kinds of load level of node 50

	有功负荷/MW	无功负荷/Mvar
负荷水平 1	0.244	0.088
负荷水平 2	1.244	0.888

当网络节点 50 运行在负荷水平 1 时, 网络相应指标如表 2。

由表 2 可知, 该网络指标均未越限, 不需要进行重构计算。

当网络节点 50 运行在负荷水平 2 时, 网络相

应指标如表 3。

由分析结果可知, 该网络的网损率、最低节点电压及最大线路负载率均越限, 需要进行重构。

表 2 网络指标评价 1

Table 2 Assessment of network status in the first case

断开支路	网损率 (%)	最低节点电压/kV	最大线路负载率(%)
69,70,71,72,73	1.990 8	12.16	49.285 0
阈值	2	12.027	50

表 3 网络指标评价 2

Table 3 Assessment of network status in the second case

断开支路	网损率 (%)	最低节点电压/kV	最大线路负载率(%)
69,70,71,72,73	5.595 1	11.508 8	70.092 3
阈值	2	12.027	50

4.2 网络重构计算

对配电网中的节点 50 运行在负荷水平 2 的状态进行重构计算。

当取 $W_1=0.6, W_2=0.2, W_3=0.2$ 时, 多目标优化倾向于网损最小, 重构结果为断开支路 58、70、69、14、61。此种情况适用于网损较大而电压质量较好、负载较为均衡的区域。重构计算结果如表 4“重构 1”所示。

当取 $W_1=0.2, W_2=0.6, W_3=0.2$ 多目标优化倾向于电压质量最好, 重构结果为断开支路 58、70、69、11、61。此种情况适用于低电压问题严重而网损不大、负载较为均衡的区域。重构计算结果如表 4“重构 2”所示。

当取 $W_1=0.2, W_2=0.2, W_3=0.6$, 多目标优化倾向于负载最均衡, 重构结果为断开支路 55、17、36、42、61。此种情况适用于负载严重不均衡而网损不大、电压质量较好的区域。重构计算结果如表 4“重构 3”所示。

当取 $W_1=0.3, W_2=0.3, W_3=0.4$ 多目标优化会均衡各个目标, 重构结果为断开支路 58、70、36、42、61, 说明此时的网络的各个目标均比重构前的网络较好, 虽然并不是每个目标都达到了最优, 但是能够均衡考虑多个目标。此种情况适用于原网络的各个指标问题并不严重的区域。重构计算结果如表 4“重构 4”所示。

表 4 重构计算结果

Table 4 Reconstruction results in four case

	断开支路	网损率 (%)	最低节点电压/kV	最大线路负载率	负荷均衡指数
重构前	69,70,71,72,73	5.595 1	11.508 8	70.092 3	0.029 6
重构后 1	58,70,69,14,61	2.571 0	11.834 1	68.741 2	0.021 5
重构后 2	58,70,69,11,61	2.739 4	11.954 2	67.894 5	0.021 0
重构后 3	55,17,36,42,61	3.251 4	11.945 9	65.841 4	0.019 7
重构后 4	58,70,36,42,61	2.654 9	11.934 0	66.362 1	0.020 5

将不同的重构计算结果与网络初始状态指标相比较, 如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 几次重构计算对于初始网络的各个指标都有很好的优化效果, 当几个目标的权重取值不同时, 各个目标的优化程度有所不同, 操作人员可以根据电网的实际情况对权重进行取值, 得到更加符合实际需求的优化结果。

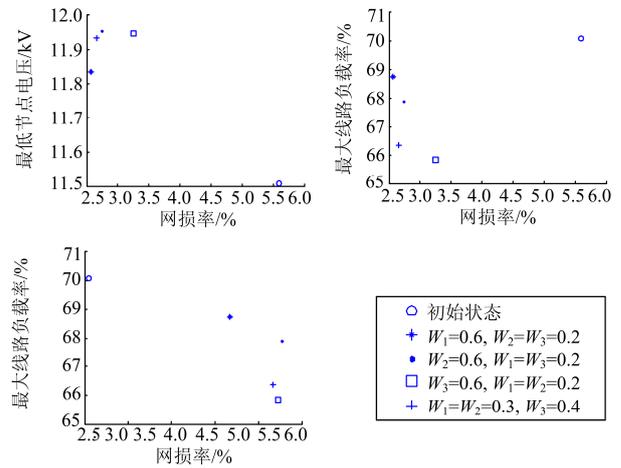


图 3 重构结果及网络初始状态指标对比

Fig. 3 Targets comparison between the reconstruction results and the initial state

5 总结

本文提出了先评估网络状态再进行重构计算的思想。算例表明, 该方法可以对网络状态进行评估并判断是否进行重构计算, 可以减少一部分不必要的重构分析; 并且, 当网络需要进行重构时, 该算法可以取得良好的优化效果。通过重构后与重构前各项网络指标的对比, 该优化方法能够在经济性、安全性等方面对网络进行改善。多目标优化过程中, 操作人员能够根据配电网实际情况进行目标权重值的设置, 使得重构方案更加灵活、更具有现实意义。在实际应用中, 可以通过设置手动和定时运行两种方式启动重构程序, 并通过状态评估判断是否需要重构操作, 只有当指标值超出阈值时才进行重构, 可以免除一部分重构操作。

参考文献

[1] 张大海, 江世芳, 赵建国. 配电网重构研究的现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(2): 75-76, 82.
ZHANG Dahai, JIANG Shifang, ZHAO Jianguo. Research status and prospect of distribution network reconfiguration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(2): 75-76, 82.

[2] CIVANLA S, GRAINGER J J, YIN H, et al. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(3): 1217-1223.

[3] SHIRMOHAMMADI D, HONG H W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1492-1498.

- [4] KASHEM M A, GANAPATHY V, JASMON G B. A novel approach for network reconfiguration based load balancing in distribution networks[J]. Electric Machines and Power Systems, 2000(28): 415-431.
- [5] KASHEM M A, GANAPATHY V, JASMON G B. Network reconfiguration for loading balancing in distribution networks[J]. IEE Proceedings-Gener, Transm, and Distrib, 1999, 146(6): 563-567.
- [6] 毕鹏翔, 刘健, 张文远. 以提高供电电压质量为目的的配网重构[J]. 电网技术, 2002, 26(2): 41-43.
BI Pengxiang, LIU Jian, ZHANG Wenyuan. Improve voltage quality by reconfiguration of distributed network[J]. Power System Technology, 2002, 26(2): 41-43.
- [7] HUANG Chaoming. Multiobjective service restoration of distribution systems using fuzzy cause effect networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 867-874.
- [8] SHIRMOHAMMADI D, HONG W. Reconfiguration of electric distribution network for resistive line losses reduction[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1492-1498
- [9] CIVANLAR S, GRAINGER J J, YIN H, et al. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(3): 1217-1223.
- [10] 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.
- [11] 毕鹏翔, 刘健, 刘春新. 配电网重构的改进遗传算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 57-61.
BI Pengxiang, LIU Jian, LIU Chunxin. Improved genetic in distribution network reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2): 57-61.
- [12] 吴泓俭, 雷霞, 刘斌, 等. 基于遗传膜算法的含风电机组和电动汽车的配电网分时段动态重构[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 196-205, 220.
WU Hongjian, LEI Xia, LIU Bin, et al. Membrane computing based genetic algorithm for dynamic reconfiguration of distribution network with dividing time and considering electric vehicles and wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 196-205, 220.
- [13] 王威, 黄大为. 含可调度分布式电源的配电网综合优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 429-433.
WANG Wei, HUANG Dawei. The coordination optimization of distribution networks with dispatched distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 429-433.
- [14] 文娟, 谭阳红, 雷可君. 基于量子粒子群算法多目标优化的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 73-78.
WEN Juan, TAN Yanghong, LEI Kejun. Multi-objective optimization of distribution network dynamic reconfiguration based on integer coded quantum particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 73-78.
- [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.
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] 张涛, 史苏怡, 徐雪琴. 基于二进制量子粒子群算法的含分布式电源配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 22-28.
ZHANG Tao, SHI Suyi, XU Xueqin. Distribution network reconfiguration with distributed generation based on improved quantum binary particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 22-28.
- [17] CHIANG H D, JEAN-JUMEAU R. Optimal network reconfigurations in distribution systems: part 2: solution algorithms and numerical results[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(3):1568-1574.

收稿日期: 2016-01-04; 修回日期: 2016-03-16

作者简介:

朱吉然(1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网自动化、信息化; E-mail: zhujiran04035@163.com

李龙桂(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: 1679327844@qq.com

李欣然(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析控制、负荷建模. E-mail: lixinran@qq.com

(编辑 葛艳娜)