

一种具有直观经济性特征的配电网重构方法

余志强, 高元海, 王 淳, 韩富佳

(南昌大学电气与自动化系, 江西 南昌 330031)

摘要: 提出了一种具有直观经济性特征的配电网重构方法。首先, 采用经济性评价方式构建了具有直观经济特征的、兼顾网损和可靠性的优化模型。其次, 为快速方便地计算配电网可靠性, 提出采用面向对象思想中的类描述配电网分块后得到的元件块, 并按网络拓扑生成元件块的树形结构。最后, 将生物地理学优化算法应用于求解配电网经济性重构模型。IEEE16 节点系统的重构结果验证了所提方法的可行性和适用性。

关键词: 配电网重构; 网损; 可靠性; 经济性; 生物地理学优化算法

An approach with intuitive economic characteristics for distribution network reconfiguration

YU Zhiqiang, GAO Yuanhai, WANG Chun, HAN Fujia

(Department of Electrical and Automatic Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: A distribution network reconfiguration method with intuitive economic characteristics is proposed. Firstly, an optimal model, which has intuitive economic characteristics and takes both power loss and reliability into consideration, is established using the economic evaluation methods. Secondly, to calculate reliability of distribution network fast and conveniently, the component groups obtained by partitioning distribution network are described using the class in object-oriented ideas, and the tree structure of component groups is generated according to the topology of distribution network. Finally, biogeography-based optimization is applied to solve the proposed economic reconfiguration model. Reconfiguration results of IEEE16 bus system demonstrate the feasibility and applicability of the proposed approach.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51167012).

Key words: distribution network reconfiguration; power loss; reliability; economic; biogeography-based optimization

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)14-0070-06

0 引言

配电网作为电力系统直接向终端用户分配电能的最后一环, 其运行结构的优劣直接影响到供电质量。负荷分布不均以及运行结构的不合理将导致网损增大。从经济性角度, 过高的网损增加了系统运行费用; 从供电质量角度, 过高的网损降低了用户电压; 从节能减排角度, 过高的网损降低了能源利用效率。因此, 降低配电网网损的目标一直都是学术和产业界关注的重点。配电网重构通过现有网络的开关操作实现网络结构的优化, 属于配电网自动化的一部分^[1], 该措施目前大多直接采用网损最小化作为优化目标^[2-6]。但统计结果表明, 大量导致电力中断的故障发生在配电网, 而电力中断所造成的

经济损失远高于正常运行方式下的网损费用。因此, 提高配电网结构的可靠性应同降低网损放到同一重要的层面, 在配电网经济性重构过程中应对其给予充分考虑。

同时考虑网损和可靠性的配电网重构是一个非线性、不可微、不连续的多目标组合优化问题^[7], 本文构建了对网损电能损失费用和停电缺供电量电能损失费用求和的经济性优化模型, 将多目标优化问题转换为具有直观的经济性特征的单目标优化问题, 力求得到最为经济的网络结构。生物地理学优化(biogeography-based optimization, BBO)算法^[8]是通过模拟生物地理学现象构建的一种群体智能算法, 已应用于求解风电并网电力系统多目标发电调频^[9]、输电网规划^[10]和最优潮流^[11]等优化问题, 其独有的迁移模式能在较少的迭代次数下高概率地获得待优化问题的最优解。本文尝试将 BBO 算法用

于求解同时考虑网损和可靠性的配电网经济性重构优化模型, 采用 IEEE 16 节点系统对所建模型及所提方法在不同参数下进行重复性统计测试, 并与运用广泛的遗传算法进行比较, 结果表明上述模型和方法具有良好的优化效果。

1 配电网经济性重构优化模型

以网络年有功损耗和电力中断所带来的经济损失最小作为目标函数, 确定网络支路的开关状态, 且需要满足一定的约束条件。

$$L = \sum_{k \in N_c} P_{k, \text{loss}} = \sum_{k \in N_c} r_k \frac{P_k^2 + Q_k^2}{V_k^2} \quad (1)$$

$$ENS = \sum L_{a(i)} U_i \quad (2)$$

$$\min C = c_1 \times L \times 8760 + c_2 \times ENS \quad (3)$$

$$AP = D \quad (4)$$

$$S_k \leq S_{k, \text{max}} \quad k = 1, 2, \dots, N_c \quad (5)$$

$$V_{i, \text{min}} \leq V_i \leq V_{i, \text{max}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

式中: N_c 为闭合支路集; $P_{k, \text{loss}}$ 为支路 k 有功损耗, r_k 、 P_k 、 Q_k 、 V_k 分别为支路 k 的电阻、首端或末端有功、无功功率和对应端的电压幅值; $L_{a(i)}$ 、 U_i 分别为第 i 个负荷区域的平均负荷和年平均停运时间; c_1 、 c_2 分别为每 kWh 网损电量和电力中断时每 kWh 年停电供电量带来的经济损失, 单位为元/kWh; A 为节点-支路关联矩阵; P 为馈线潮流向量; D 为负荷需求向量; S_k 、 $S_{k, \text{max}}$ 分别为支路 k 首端功率和线路容量; m 为节点总数; V_i 、 $V_{i, \text{max}}$ 、 $V_{i, \text{min}}$ 分别为节点 i 的电压幅值、电压上限和下线。

式(1)为网络有功损耗; 式(2)为年停电缺供电量; 式(3)为网损的年电量(8 760 表示一年的小时数)与年停电缺供电量的加权经济损失目标函数; 式(4)为潮流约束; 式(5)为支路容量约束; 式(6)为节点电压约束。此外, 需对网络是否辐射状进行校验, 网络辐射状的充要条件: 网络连通且支路的数目等于节点数目减 1。

2 面向对象的配电网可靠性计算

为避免采用数值矩阵或链表^[12-14]描述配电网拓扑结构及进行可靠性计算的不便, 本文提出基于面向对象的配电网可靠性计算方法。设计了三种对象: 元件集合类、块类、块类树。元件集合类的成员变量包括节点、支路(线路或变压器)、开关、入口开关、出口开关、相应元件的失效率和失效时间、节点的负荷数、节点的用户数。块类的成员变量包括元件集合类、块的失效率、块的失效时间、块的负荷、块的用户数、父块类、子块类、至供电块的电

源路径(所需通过的块类), 块类的成员函数包括父块类链接函数、子块类链接函数, 其中块的失效率和失效时间由元件集合类中各元件的失效率和失效时间分别按式(7)、式(8)计算得到。块类树继承动态数组类, 采用一维数组的每一位存储一个块类, 成员函数包括动态添加块类函数、树结构形成函数, 其中树结构形成函数将所存储的块类按实际拓扑结构形成树形链接关系, 链接方式根据各个块的出入口开关确定各个块类的父子块类, 然后调用块类中相应的链接函数完成链接, 同时通过对各个块的父块上溯至供电端所在的块得到相应块的电源路径, 并记录到块类中相应的成员变量中。

$$\lambda_{\text{block}} = \sum_{j \in S_E} \lambda_j \quad (7)$$

$$r_{\text{block}} = \frac{\sum_{j \in S_E} \lambda_j r_j}{\sum_{j \in S_E} \lambda_j} \quad (8)$$

式中: λ_{block} 为块的失效率; λ_j 为块中第 j 个元件的失效率; S_E 为块中元件的集合; r_{block} 为块的失效时间; r_j 为块中第 j 个元件的失效时间。

电源路径的确定方法: (1) 从首端节点开始对网络进行搜索, 以开关为边界进行分块, 图 1 所示为某配电网的分块图。(2) 使用上述面向对象的技术将网络最终存储并形成块类树, 任意一个元件块只需通过向上回溯父块直到树根便可得到其对应的电源路径。构建块类树的详细过程如下: 首先将电源点所在块作为块类树的根块, 然后按块所属的层分层进行(上一层的出口开关作为当前层的入口开关, 在未插入树中的剩余块中找到包含这些开关的块并将其作为子块插入块类树中, 插入完成后本层的出口开关将作为下一层的入口开关, 按照这样的规律将所有块逐层构成一棵块类树)。图 2 为图 1 所示网络分块后按主电源构成的块类树的可视化结构。该方法的优点在于复用性高, 当需要得到备用电源点的路径时只需要将根块更换成对应备用电源点所在的块, 然后采用上述方法重组一次各块的父子关系得到一棵新树即可。

按照以上方法可以方便地得到各块的主/备用电源路径。通过对各个块的故障枚举, 采用基于电源通路的配电网可靠性计算方法^[13], 即根据每块的电源路径是否涉及故障块可分析故障对该块的影响, 进而计算得到配电网的可靠性指标。另外, 在配电网重构中计算可靠性还需要考虑到其他的一些特殊问题。配电网重构后断开的开关作为联络开关, 在发生故障时可以通过联络其他正常工作的区域恢

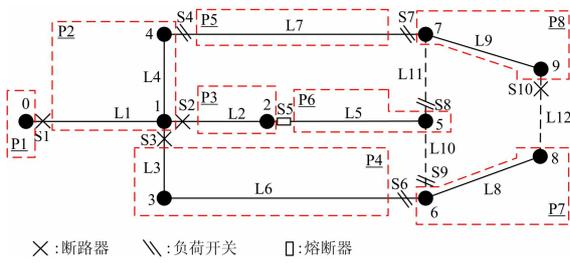


图 1 配电网分块图

Fig. 1 Partition of distribution network

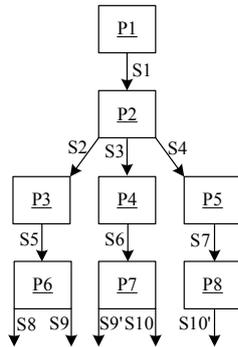


图 2 元件块的树形结构

Fig. 2 Tree structure of component groups

复供电。但是由于存在很多分支子馈线，在闭合联络开关时需要考虑对应区域是否也在故障影响范围内，即需要确定备用区域是否可用，若与联络区域公共的子馈线发生故障时则对应联络开关的备用电源为无效的。例如图 1 中块 P2 发生故障时 S1 打开，联络开关 S8、S9、S10 则全部失效。复杂网络还存在当某些可用备用区域联络开关闭合后将使得原先某些不可用备用区域变得可用的问题，因此当前与可用备用区域的联络开关闭合后需进一步判断原不可用备用区域是否变得可用，如变得可用且能够使得某些停电区域恢复供电则将相应的联络开关闭合，以此循环判断，直至无新的可用备用区域形成时终止。

3 BBO 算法在配电网经济性重构中的应用

3.1 BBO 算法在配电网经济性重构中的实现

BBO 算法作为模拟生物地理学现象的一种群体智能算法，应用于求解配电网经济性重构问题时，生物栖息地的特征向量(Suitable Index Vector, SIV)作为问题的一个解，各维元素值表示对应环路的相应编号的开关打开(SIV 向量的每一位对应网络的一个独立环路，对每个独立环路上的开关依次编号)，栖息地的生物宜居指数(Habitat Suitability Index, HSI)反映了解的优劣。栖息地之间生物物种

的迁移将改变生物栖息地的 SIV 以期提高栖息地的 HSI，因式(3)表示年经济损失最小化问题，将式(3)按式(9)进行倒数变换计算 HSI 值，以满足 C 越小则 HSI 越大。与此同时，适度的灾难性事件引起的栖息地突变可弥补 HSI 很低的栖息地通过生物迁移仍难以提高 HSI 的缺陷。生物的迁移和灾难事件引起的突变共同促使生物栖息地的 HSI 提高，依据这一机制实现对问题的优化求解。

$$HSI = \frac{1}{C} = \frac{1}{c_1 \times L \times 8760 + c_2 \times ENS} \quad (9)$$

3.2 基于 BBO 算法的配电网经济性重构流程

1) 输入网络原始数据，包括节点、支路及可靠性数据。

2) 数据的预处理，搜索网络的独立环路并对各环路上的开关进行编号。

3) 设置 BBO 算法的参数，包括栖息地数量 n 、最大迁入率 I 、最大迁出率 E 、突变概率上限 m_0 和精英保留数 k_E 。为了简化，每个栖息地能容纳的物种上限都取为 n ，栖息地容纳当前物种数量的初始概率 $P_s(0)$ 设定为 $1/n$ 。

4) SIV 向量取值域的确定。步骤 2) 得到的独立环路数作为 SIV 向量的维数，各独立环路上的开关编号范围作为 SIV 向量对应维度的取值域。

5) 初始化栖息地群。根据步骤 4) 得到的 SIV 向量维数和相应维度的取值域随机生成 n 个 SIV 向量并构成栖息地群。每个 SIV 向量也映射了一个网络，若所映射的网络不满足辐射状约束则重新随机生成一个 SIV 向量将其替换。

6) 计算栖息地群中各栖息地的 HSI 值。将栖息地的 SIV 向量中代表的各开关打开，网络中其他开关闭合，构成一个辐射状网络并对该网络分别进行潮流和可靠性计算以得到式(1)所示的网络总有功损耗和式(2)所示的年停电缺供电量，之后应用配电网经济性重构优化模型将网络总有功损耗折算为网络年电量损耗并与年停电缺供电量按式(3)计算网络的经济性指标 C ，最后根据式(9)计算出对应的 HSI 值。

7) 栖息地排序。根据栖息地群中各栖息地的 HSI 从大到小对栖息地排序，排序后的各栖息地的种群数量 s 设定为 $n-i$ ，其中 i 为栖息地排序后的序号。HSI 最大的前 k_E 个栖息地作为精英栖息地存储在精英栖息地群中。

8) 迁移率的计算。采用图 3 所示的对数迁移模型描述迁移规律，按式(10)和式(11)计算各栖息地的迁入率 λ 和迁出率 μ 。

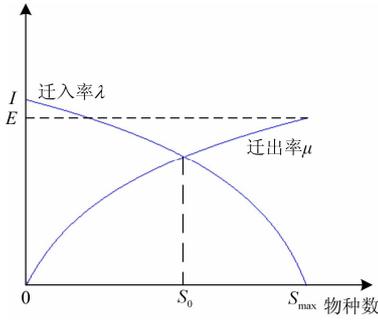


图3 对数迁移模型

Fig. 3 Logarithmic migration model

$$\lambda = \log_{10} \left(\frac{S}{S_{\max}} (1 - 10^I) + 10^I \right) \quad (10)$$

$$\mu = \log_{10} \left(\frac{S}{S_{\max}} (10^E - 1) + 1 \right) \quad (11)$$

式中: S 为栖息地中的物种数量; S_{\max} 为最大物种数; E 为最大迁出率; I 为最大迁入率。

9) 迁移操作。按迁出率进行轮盘赌, 选择出 SIV 向量的共享源栖息地, 以迁入率作为接收新 SIV 向量的特征分量的概率, SIV 向量的每一个特征分量按此步骤进行迁移操作, 依次完成所有栖息地的 SIV 向量更新。此步骤的迁入率按 $\bar{\lambda}_i = \frac{\lambda_i - \lambda_{\min}}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}$ 作

归一化处理, 其中 λ_{\min} 、 λ_{\max} 分别为栖息地群中迁入率最小值和最大值。

10) 根据步骤 8) 得到的 λ_s 、 μ_s 按式(12)计算各个栖息地当前迭代次数下容纳种群数量的概率。

$$P_s^i(t) = P_s^i(t-1) - (\lambda_s + \mu_s) P_s^i(t-1) + \lambda_{s-1} P_{s-1}^i(t-1) + \mu_{s+1} P_{s+1}^i(t-1) \quad (12)$$

式中: $P_s^i(t)$ 表示第 i 个栖息地在 t 时刻容纳 s 个种群的概率; 其他符号以此类推。

11) 突变操作: 由步骤 10) 计算得到的 P_s 按式(13)计算各个栖息地的突变率 $m(i)$, 其中 m_0 为突变率上限, 其他符号同式(12)。按照计算出的各栖息地突变概率分别对相应的 SIV 进行随机突变(仅群体中 HSI 后 50% 的栖息地突变, 以防止高 HSI 的栖息地受到破坏)。

$$m(i) = m_0 \left(1 - \frac{P_s^i}{\max(P_s^i)} \right) \quad (13)$$

12) 排重操作。若生物栖息地群中存在相同的 2 个 SIV 向量, 则无条件地对其中一个 SIV 向量进行突变, 以保证生物栖息地群的多样性。

13) 辐射状约束的修正。若生物栖息地群中存在所映射网络不满足辐射状约束的 SIV 向量, 将无

条件地对该 SIV 向量进行突变, 直至满足约束为止。

14) 重复步骤 6)~13), 每一代生物栖息地群 HSI 最小的 k_E 个栖息地用上一代最大的 k_E 个精英栖息地替代, 即精英保留策略。经若干代后满足收敛条件终止迭代, 得到问题的最优解或次优解。

4 算例分析

算例为图 4 所示的 IEEE16 节点系统^[15], 该系统开关类型及可靠性参数见文献[16]。该系统由 3 个环路、19 条支路、9 个断路器、14 个负荷开关及一个熔断器构成, 其额定电压、总负荷分别为 23 kV 和 28.6 MW+j17.3 Mvar。算法的参数: 栖息地数量 $n=12$; 最大迁入率 $I=1.0$; 最大迁出率 $E=0.9$; 最大突变率 $m_0=0.02$; 精英个数 $k_E=2$; 以迭代 5 代为收敛条件。

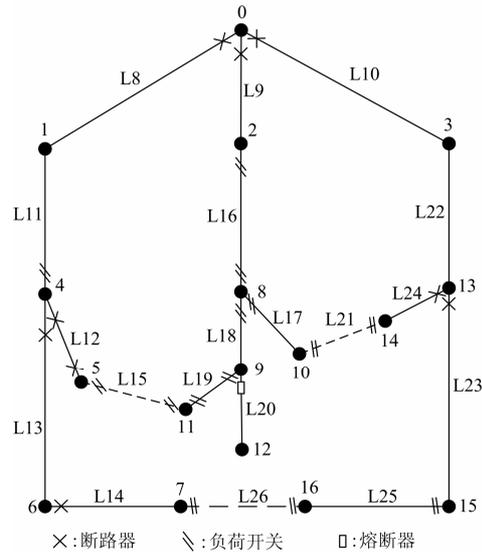


图4 IEEE16 节点系统

Fig. 4 IEEE16 bus system

表 1 给出了多种 c_1 、 c_2 取值组合下所得最优解的网络运行指标。序号 1、10 分别表示仅考虑网损、仅考虑可靠性 ENS, 重构结果分别为 L26、L19、L17 和 L25, L15、L17 支路开关断开, 结果表明了网损最优与可靠性最优的重构结果并不一致, 因此采用经济性模型来平衡网损和可靠性两个目标是有必要的。表 1 序号 1~5 的结果同为 L26、L19、L17 支路开关断开; 序号 6~7 的结果同为 L14、L15、L17 支路开关断开; 序号 8~10 的结果同为 L25、L15、L17 支路开关断开。因此在实际配电网运行中需根据区域负荷级别以及电价得到符合当地配电网特征的 c_1 、 c_2 值, 从而得到最为经济性的重构方案。同时表 1 还给出了相应的年经济损失、网损及 ENS 值, 直观显示了网络运行的技术指标。

表 1 不同 c_1 、 c_2 组合下最优解对应的网络运行指标
Table 1 Network operation index of the optimal solution under different combinations of c_1 and c_2

序号	权重/(元/kWh)		损失/ 万元	网损/ kW	ENS/ MWh
	c_1	c_2			
1	1	0	—	466.13	109.3
2	1	1	419.3	466.13	109.3
3	1	10	517.6	466.13	109.3
4	1	25	681.6	466.13	109.3
5	1	50	954.9	466.13	109.3
6	1	75	1 223.9	497.55	105.1
7	1	100	1 486.6	497.55	105.1
8	1	200	2 528.2	508.02	104.2
9	1	500	5 653.0	508.02	104.2
10	0	1	—	508.02	104.2

为验证生物地理学算法求解配电网经济性重构模型的性能, 将其与运用广泛的遗传算法(GA)进行对比。为了比较的客观公平, 除算法以外其他条件完全一致, 并且 GA 也采用了排重操作和精英保留策略, 各算法参数都选取了通过试探得到的较好的值。BBO 算法参数上文已给出, GA 参数如下, 交叉率: 0.5; 交叉方式: 均匀交叉; 变异率: 0.06; 其他公共参数与 BBO 算法一致。表 2 为两个算法在 $c_1=1$ 、 $c_2=100$ 时重复计算 100 次所统计的性能对比结果, 结果表明本文算法能够以 96% 的概率获得最优解, 且所得最差解对应的年经济损失与最优解相差无几, 说明本文算法不但能以高概率获得最优解, 而且在少数未获得最优解时仍能得到与最优解十分接近的次优解。而 GA 只能以 79% 的概率获得最优解, 且最差解与最优解有较大差距。获得的解所对应经济损失平均值也反映了上述性能的差距。

表 2 本文算法与 GA 重构性能比较

Table 2 Comparison of reconfiguration performance between proposed method and GA

性能对比指标		本文算法	GA
年经济 损失/万元	最优解	1 486.599 7	1 486.599 7
	最差解	1 486.629 0	1 494.009 3
	平均	1 486.600 8	1 487.324 3
最优比例		96%	79%

5 结论

1) 将网损的年电量损耗与网络电力中断的年缺供电量采用经济性评价相结合, 构建了兼顾网损和可靠性的配电网经济性重构模型, 模型具有直观

的经济性特征, 力求得到最为经济的网络结构。

2) 所构建的经济性重构模型具有两个参数, 分别是网损的单位电量经济损失 c_1 和电力中断的单位电量经济损失 c_2 , 根据网络实际运行情况可对其进行设置, 灵活地平衡了网损和可靠性两个运行指标。

3) 基于面向对象构建了配电网可靠性计算方法, 能够便利地对块状网络进行拓扑分析, 简化了配电网的抽象和建模, 避免了基于数值矩阵描述、分析网络及计算可靠性的繁杂流程, 为经济性重构模型的可靠性计算提供了便利的途径。

4) 引入了生物地理学优化算法求解配电网经济性重构模型, 针对配电网经济性重构的特点对 SIV 向量的构建、HSI 值的计算和迁移模型进行了设计, 该算法独特的迁移模式使得优良的解信息得以快速而广泛的分享, 能够在较少的迭代次数内高概率地得到配电网经济性重构模型的最优解。

参考文献

- [1] ZHANG Dong, FU Zhengcai, ZHANG Liuchun. An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems[J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77: 685-694.
- [2] 刘畅, 黄民翔. 含多种分布式电源的配电网优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 13-18.
LIU Chang, HUANG Minxiang. Distribution network reconfiguration with variety of DGs[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 13-18.
- [3] WANG Chun, GAO Yuanhai. Determination of power distribution network configuration using non-revisiting genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3638-3648.
- [4] 王林川, 梁栋, 于冬皓, 等. 基于遗传和禁忌搜索混合算法的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(6): 27-31.
WANG Linchuan, LIANG Dong, YU Donghao, et al. Distribution network reconfiguration based on genetic/tabu search hybrid algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(6): 27-31.
- [5] 雷振, 韦钢, 言大伟, 等. 基于多 Agent 联盟算法的含分布式电源配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 95-101.
LEI Zhen, WEI Gang, YAN Dawei, et al. Study of reconfiguration for the distribution network with distributed generations based on multi-agent alliance algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 95-101.

- [6] WU W C, TSAI M S. Application of enhanced integer coded particle swarm optimization for distribution system feeder reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1591-1599.
- [7] CARRENO E M, ROMERO R, PADILHA-FELTRIN A. An efficient codification to solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 2008, 23(4): 1542-1551.
- [8] SIMON D. Biogeography based optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2008, 12(6): 702-713.
- [9] 陈道君, 龚庆武, 乔卉, 等. 采用改进生物地理学算法的风电并网电力系统多目标发电调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 150-159.
CHEN Daojun, GONG Qingwu, QIAO Hui, et al. Multi-objective generation dispatch for wind power integrated system adopting improved biogeography-based optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 150-159.
- [10] 李翔硕, 王淳. 基于生物地理学优化算法的输电网络规划[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 477-481.
LI Xiangshuo, WANG Chun. Application of biogeography-based optimization in transmission network planning[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 477-481.
- [11] 李静文, 赵晋泉, 张勇. 基于改进差分进化-生物地理学优化算法的最优潮流问题[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 115-119.
LI Jingwen, ZHAO Jinquan, ZHANG Yong. Optimal power flow on basis of combining improved differential evolution algorithm with biogeography-based optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 115-119.
- [12] 刘柏私, 谢开贵, 马春雷, 等. 复杂中压配电网的可靠性评估分块算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 40-45.
LIU Bosi, XIE Kaigui, MA Chunlei, et al. Section algorithm of reliability evaluation for complex medium voltage electrical distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 40-45.
- [13] 许丹, 唐巍. 基于电源通路的中压配电网可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(增刊): 44-49.
XU Dan, TANG Wei. Reliability evaluation of MV distribution network based on power access path[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(S): 44-49.
- [14] 陈璨, 吴文传, 张伯明, 等. 基于元件组的复杂配电网可靠性评估[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 81-86.
CHEN Can, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Reliability evaluation for large-scale distribution network based on component groups[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 81-86.
- [15] CIVANLAR S, GRAINGER J J, YIN H, et al. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1988, 3(3): 1217-1222.
- [16] MENDOZA J E, LOPEZ M E, COELLO C A C, et al. Microgenetic multi-objective reconfiguration algorithm considering power losses and reliability indices for medium voltage distribution network[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2009, 3(9): 825-840.

收稿日期: 2014-10-13

作者简介:

余志强 (1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析; E-mail: Yu_ncu@163.com

高元海 (1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化; E-mail: gaoyuanhai123@163.com

王淳 (1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统规划、优化理论在电力系统中的应用。E-mail: cwang_ncu_cn@163.com

(编辑 魏小丽)