

基于进化规划算法的配电网运行方式定制方法

李瑾¹, 李善波², 欧阳金鑫², 熊小伏², 吴燕¹, 段博¹, 林峰平³

(1. 南宁供电局, 广西 南宁 530029; 2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400030; 3. 深圳市康必达控制技术有限公司, 广东 深圳 518040)

摘要: 为了实现配电网运行经济性与可靠性的协调, 提出一种基于进化规划算法的配电网运行方式定制方法。以定制周期内电能损耗最小为目标, 以供电可靠性、潮流平衡、电压幅值、电流偏移等为约束条件, 并计及配电网辐射型、无孤岛运行方式的约束, 通过结合改进随机变异策略的进化规划算法对配电网开关状态向量进行寻优搜索, 解决了考虑多种约束条件下配电网运行方式的定制问题。算例分析结果表明, 该方法可在保证供电可靠性的基础上获取具有低电能损耗的配电网运行方式, 对于科学地制定配电网运行计划, 提高配电网运行管理的规范性, 具有重要的意义。

关键词: 配电网; 运行方式; 电能损耗; 进化规划算法; 定制方法

A decision method of operation mode for distribution network based on evolutionary programming algorithm

LI Jin¹, LI Shanbo², OUYANG Jinxin², XIONG Xiaofu², WU Yan¹, DUAN Bo¹, LIN Fengping³

(1. Nanning Power Supply Bureau, Nanning 530029, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400030, China; 3. Shenzhen Kang Bi Da Control Technology Co., Ltd., Shenzhen 518040, China)

Abstract: In order to realize the coordination of economy and reliability of distribution network operation, a decision method of operation mode for distribution network based on evolutionary programming algorithm (EPA) is put forward. The minimum energy losses are taken as the objective, and the power distribution reliability, power flow balance, voltage amplitude, current offside, radiation and no-islanding are considered as the constraints during the selection of operation mode. The operation mode of distribution network considering multiple constraints is determined through searching the states of switches by using EPA combined with improved random mutation strategy. The example results indicate that an operation mode of distribution network and sufficient power supply reliability can be determined by the proposed method. The method has important significance to decide the operation plan and to improve the normalization of operation and management.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A107).

Key words: distribution network; operation mode; electric energy loss; evolutionary programming algorithm; decision method

中图分类号: TM76

文章编号: 1674-3415(2015)21-0048-06

0 引言

配电网作为电力系统的重要组成部分, 承担着向用户提供安全、可靠、优质电能的重要职责^[1]。配电网运行的好坏对整个电网的安全、可靠与经济具有重要的影响^[2-4]。我国配电网通常闭环设计、开

环运行, 存在着大量的分段开关和联络开关^[5], 在正常情况下需根据不同的负荷情况, 通过改变网络中开关的状态来定制配电网的运行方式, 从而达到均衡负荷、提高供电质量等目的。然而, 当前配电网运行方式的安排通常依赖于调度人员的经验判断, 缺乏科学的理论指导, 不仅可能无法满足配电网运行可靠性的需求, 而且也难以达到配电网运行经济性方面日益增加的要求^[6]。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2011AA05A107)

电网运行方式的定制是保障电力系统可靠、高效运行的关键,一直以来都是电力系统研究的热点。然而,已有的研究主要侧重于输电网的运行方式。文献[7]在考虑网架结构的基础上将贝叶斯理论引入电网运行方式决策中,通过构建“决策树”来量化决策风险,为电网运行方式的决策提供参考。文献[8]综合电网故障发生的概率和故障后果两方面的因素,将风险评估理论应用到电网运行方式优选中。由于配电网与输电网在结构和运行目标上存在较大的差异,因此当前对输电网运行方式的定制方法难以直接应用于配电网。

目前,国内外的研究主要集中在配电网运行方式优化方面,取得了不错的效果。文献[9-10]对配电网变压器的经济运行方式进行了研究;文献[11]提出了配网设备的运行方式的评价标准;文献[12-14]分别从供电可靠性、降低线损等方面对配电网的运行方式进行了研究。然而,当前对配电网运行方式优化研究的相关方法难以满足配电网运行方式定制的要求,也缺少对配电网运行的经济性与可靠性的综合考虑。随着配电网网络规模不断增大、网络接线日趋复杂,配电网运行方式的制定愈加困难,供电的高效性和稳定性越来越难以满足要求。

本文提出了一种基于进化规划算法的配电网运行方式定制方法:根据定制周期内的负荷预测结果,考虑包括可靠性约束、电网结构约束在内的多种约束条件,利用结合改进随机变异策略的进化规划算法,通过改变配电网中开关向量的状态搜索配电网运行的不同方式,找到一种满足多种约束条件下电能损耗最小的配电网运行方式。通过对IEEE33节点配网测试系统的进行算例分析,验证了所提方法的正确性与实用性。

1 配电网运行方式定制模型

配电网运行方式的定制是在满足多种约束条件下,根据定制周期内负荷预测的结果,通过调整分段开关和联络开关的开、合状态改变网络的拓扑结构,达到优化定制周期内某些指标的目的。为了体现配电网运行方式定制的合理性,运行方式的定制模型以低损耗为目标,考虑多方面的约束,并计及定制周期内负荷变化的影响。

1.1 目标函数

配电网运行方式定制方法的主要目标为定制周期内总电能损耗最小

$$\min W_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m k_{ij} r_{ij} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_{ij}^2} T \quad (1)$$

式中: W_{loss} 为定制周期内总电能损耗; n 为定制周期包含总时段数; i 为定制时段编号; m 为总支路数; j 为支路编号; r_{ij} 、 P_{ij} 、 Q_{ij} 、 U_{ij} 分别为第 i 时段支路 j 的阻抗、有功、无功和末端电压; k_{ij} 表示 i 时段支路 j 的开关状态,为 0-1 变量,0 表示支路开关断开,1 表示支路开关闭合; T 为每时段时间长度。

配电网定制周期内的负荷是实时变化的,不同的负荷状态对应的系统损耗是不同的。因此,为了提高运行方式定制的准确性与合理性,需要对配电网系统的负荷进行准确的预测。式(1)中, P_{ij} 、 Q_{ij} 和 U_i 根据负荷预测结果由实时潮流计算得到。

1.2 约束条件

配电网的运行方式关系到整个电网的安全与可靠,在运行方式的定制中不仅需要考虑安全性条件约束,还要考虑供电可靠性约束。此外,与输电网不同,由于配电网接线具有闭环设计、开环运行的特点,在配电网运行方式定制时还必须考虑保证配电网结构为辐射型,且不存在供电孤岛。

1) 供电可靠性约束

为了保证配电网的供电可靠性,需满足供电可靠性约束,即供电可靠性指标应不差于预先设定的限值。选用供电可靠率 $RS-3$ 和用户平均停电时间 T 指标表示配电网供电可靠性^[15]。其中, $RS-3$ 指标应满足

$$R_1 = \frac{T_s - T_{\text{off}}}{T_s} \cdot 100\% \geq R_{1N} \quad (2)$$

式中: R_1 为运行方式定制后的 $RS-3$ 指标; T_s 为统计总时间; T_{off} 为不计系统电源不足造成限电的停电时间; R_{1N} 为供电可靠率 $RS-3$ 指标的规定限值。

同样地,用户平均停电时间 T 应满足

$$R_2 = \frac{\sum_{k=1}^{n_{\text{off}}} (T_{\text{off}}^k \cdot N_{\text{off}}^k)}{n_L} \cdot 100\% \leq R_{2N} \quad (3)$$

式中: R_2 为运行方式定制后的 T 指标; N_{off}^k 和 T_{off}^k 为第 k 次停电事件的停电用户数和停电时间; n_{off} 为停电事件数; n_L 为用户总数; R_{2N} 为用户平均停电时间指标 T 的规定限值。

2) 潮流平衡约束

配电网运行方式定制后形成的网络结构必须满足潮流方程,即满足 KCL 和 KVL 方程,且全网功率保持平衡。

3) 电压幅值约束

$$U_{\min} \leq |U_i| \leq U_{\max} \quad (4)$$

式中: U_i 表示节点电压; U_{\max} 、 U_{\min} 分别表示节点电压幅值的上、下限。

4) 电流偏移约束

$$|I_j| \leq I_{j\max} \quad (5)$$

式中： I_j 表示流过支路 j 的电流； $I_{j\max}$ 表示支路 j 允许通过的最大电流。

5) 配电网网络结构约束

配电网具有闭环设计、开环运行的特点。要求低损耗定制的运行方式必须满足以下两个条件：配电网网架为辐射型结构；配电网不能有孤岛存在。

2 基于进化规划算法的模型求解

2.1 结合改进随机变异策略的网络结构约束处理

进化规划算法^[16-17](Evolutionary Programming Algorithm, EPA)是模拟自然界中生物进化过程,实现随机搜索的一种优化方法。与遗传算法^[18]相似,进化规划算法同样需要产生初始种群、突变、计算个体适应度、选择、重组种群,反复迭代,进化达到最优解。考虑到配电网网络结构的特点,采用结合改进随机变异策略的进化规划算法,对配电网开关状态进行0-1最优组合。

根据配电网的网络结构约束可知,配电网必须满足支路数等于节点数减去1。并且,为了避免出现孤岛和环网的情况,要求父节点与子节点满足单向连通性,即子节点之间不能互联。综合上述两个条件,对算法的变异操作策略进行改进。具体步骤如下:

首先,闭合配电网所有节点之间的开关状态,生成节点关联矩阵 L_S ,矩阵中的元素由0和1组成。其中,1表示节点 i 与节点 j 之间存在开关,0表示节点 i 与节点 j 之间不存在开关。

然后,取出节点关联矩阵 L_S 中所有1的位置,并根据配电网中可开合的开关个数,并生成开关状态全为1的向量 S 。

$$S = [1 \ 1 \ \dots \ 1] \quad (6)$$

其次,假设节点数为 N_b ,开关数目为 N_s 。由支路数等于节点数减去1的条件,对开关状态向量 S 进行随机生成,使得向量中1的个数为 N_b-1-n 。其中 n 为线路上没有开关的支路数。

根据节点关联矩阵 L_S 中1的位置,可以将随机生成的 S 重新逆生成新的节点关联矩阵 L_S 。如果配电网父节点 i 下面仅连接一个子节点,则 L_S 的第 i 列满足和等于1;如果父节点 i 下面连接 j_1, \dots, j_m 个子节点,则 L_S 的第 i, j_1, \dots, j_m 列满足各列之和大于或等于1,且总和满足等于 $2m$ 。此时,若形成了环网,则总和大于 $2m$;若形成孤岛,总和小于 $2m$ 。

根据以上对个体特定“位置”和特定“个数”的变异操作,自动匹配了配电网网络结构约束,可以避免大量的无效搜索,大大提高算法的搜索效率。

2.2 模型的求解流程

配电网低损耗运行方式定制的目的是通过改变配电网中开关向量的状态,即改变配电网中开关的不同组合方式,定制配电网在满足包括可靠性约束、配电网网络结构约束在内的多种约束下定制周期内总电能损耗最小的配电网运行方式。具体流程如图1所示。

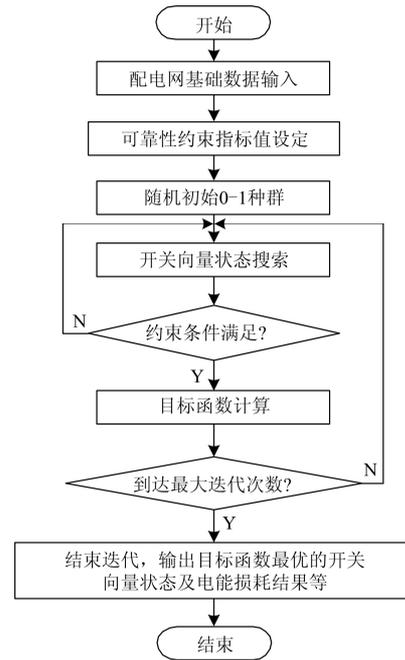


图1 基于进化规划算法的配网低损耗运行方式定制流程

Fig. 1 Flow of lower-loss operation mode decision of distribution network based on EPA

输入配电网的基础数据,包括配电网结构及其参数、节点间开关的配置情况、定制周期内负荷预测结果、线路故障率、故障修复时间、线路长度、分段开关的操作时间和联络开关的倒闸时间、断路器可靠动作率及负荷点所连用户数等。

根据当前配电网的运行状况及对供电可靠性指标的特殊要求等,对配电网运行方式定制周期内相关可靠性约束指标限值进行设定。

利用进化规划算法对配电网运行方式进行寻优搜索。所建模型的目标函数是定制周期内总电能损耗 W_{loss} 最小。针对随机开关向量状态 S_i ,反复求解定制周期内各时段的系统潮流。然后,对定制周期内的总损耗求和,即得出定制周期内的 W_{loss} 。因此,适应度函数采用如式(7)表示。

$$F = 1/W_{\text{loss}} \quad (7)$$

利用进化规划算法对配电网开关向量状态进行寻优搜索。记寻优变量为 x , 其中 $x_i \in \{0,1\}$ 。则个体 p 满足

$$p = x \quad (8)$$

在每次搜索之前, 需要对所建模型进行约束检验。由于适应度函数的评价是建立在潮流方程的求解基础上, 故约束检验仅仅是对随机个体进行供电可靠性约束、电压幅值约束和电流偏移约束的检验。若约束不满足, 则不再计算其目标函数, 以节省计算成本; 若约束满足, 则进行适应度评估, 并继续进行后续的寻优操作。

具体步骤如下:

Step1: 随机生成包含 N_p 个个体的初始 0-1 种群 P_1 。

Step2: 对于初始 0-1 种群 P_1 , 进行约束条件检验并进行适应度评估。

Step3: 采用改进随机变异策略重新生成新的包含 N_p 个个体组成的种群 P_s , 然后进行约束条件检验, 并进行适应度评估。

Step4: 重组种群 $P=[P_1; P_s]$, 对 P 进行适应度排序, 取出 P 种群中前面的 N_p 个优良个体, 生成新的种群 P_1 , 返回 Step2。

Step5: 达到最大迭代次数 G_{max} , 寻优结束, 输出最优的个体 p^* 。

到达最大迭代次数, 结束迭代, 输出目标函数最优的开关向量状态、电能损耗结果及相应的可靠性指标等。

3 算例

利用提出的基于进化规划算法的配电网运行方式定制方法对 IEEE33 节点配电测试系统^[19]进行了运行方式的定制。IEEE33 节点测试系统如图 2 所示, 系统额定电压为 12.66 kV, 系统总的有功负荷、无功负荷分别为 3 715 kW、2 300 kvar, 共有 33 个节点, 37 条支路, 其中有 5 条为联络支路(分别为 8-21、9-15、12-22、18-33、25-29), 其余 32 条支路为分段支路。初始状态时, 分段开关闭合, 联络开关打开。

取线路故障率为 0.065 次/(年·km), 故障修复时间为 5 h, 各段线路长度取为 1 km; 分段开关的操作时间和联络开关的倒闸时间均取为 1 h; 断路器的可靠动作率取为 1; 每个负荷点的用户个数取为 1^[20]。供电可靠率指标的规定限值为 99.9500%, 用户平均停电时间规定限值为 4.380 h。根据配电网运行方式

定制周期及负荷条件的不同, 采用表 1 所示的两种情况分别定制 IEEE33 测试系统的运行方式。

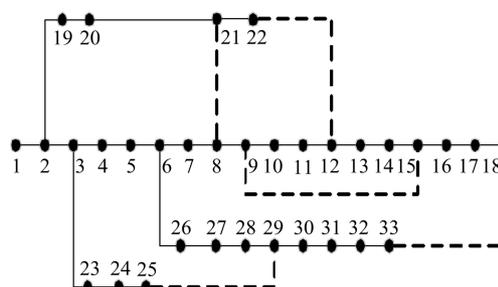


图 2 IEEE33 节点配电系统结构图

Fig. 2 Distribution system with 33 nodes of IEEE

表 1 算例 1 和算例 2 运行方式定制条件

Table 1 Conditions of operation mode decision of example1 and example2

指标	运行方式定制条件	
	算例 1	算例 2
系统目标	定制周期总电能损耗最小	
定制周期	1 d	1 周
采样间隔	15 min	1 h
时段数	96	168

根据 IEEE33 节点测试系统的负荷数据, 以 A 地区典型日下的负荷 96 点预测数据, 利用模拟方法构建系统各节点一日内 96 个时刻的负荷预测数据; 以 B 地区多种气象条件下一周的负荷预测数据, 构建系统各节点一周内 168 个时刻的负荷预测数据。

设定种群个体数 N_p 为 5, 最大迭代次数 G_{max} 为 10。得到算例 1 和算例 2 两种情况下配电网运行方式定制前后的运行方式、电能损耗及可靠性指标等如表 2 所示。对于算例 1, 在未来一天内配电网

表 2 定制前后运行方式及指标比较

Table 2 Comparison of operation mode and indices before and after decision

指标	算例 1		算例 2	
	初始运行方式	定制运行方式	初始运行方式	定制运行方式
开断点组合	8-21、9-15、12-22、18-33、25-29	8-21、14-15、21-22、28-29、18-33	8-21、9-15、12-22、18-33、25-29	8-21、9-15、12-22、28-29、32-33
系统总电量/MWh	89.123 7		623.815 8	
系统电能损耗/MWh	4.955 3	4.364 9	34.716 7	28.891 4
线损率	5.56%	4.90%	5.57%	4.63%
可靠性 R_1	99.9526%	99.9552%	99.9526%	99.9533%
指标 R_2	4.152 h	3.924 h	4.152 h	4.091 h

统定制的运行方式为断开 8-21、14-15、21-22、28-29、18-33 等 5 个开关。相比于初始运行方式, 系统定制周期内线损率从 5.56%降低到 4.90%, 一天内可节约电能 0.590 4 MWh; 同时, 供电可靠率从 99.9526%提高至 99.9552%, 用户平均停电时间也从 4.152 h 降低至 3.924 h。

对于算例 2, 在未来一周内配电系统定制的运行方式为断开 8-21、9-15、12-22、28-29、32-33 等 5 个开关。相比于初始运行方式, 系统定制周期内线损率从 5.57%降低到 4.63%, 一周内可节约电能 5.825 3 MWh; 同时, 供电可靠率从 99.9526%提高至 99.9533%, 用户平均停电时间也从 4.152 h 降低至 4.091 h。配电网运行方式的定制结果在保证供电可靠性的同时, 有效地降低了系统的电能损耗。

4 结论

针对现有配电网运行方式定制缺乏科学依据的问题, 提出了基于进化规划算法的配电网低损耗运行方式定制方法, 对于科学地制定配电网运行计划, 提高配电网运行管理的规范性, 具有较重要的意义。

(1) 提出的基于规划进化算法结合了改进随机变异策略, 能够保证配电网定制辐射型及无孤岛运行。

(2) 提出的运行方式定制模型以定制周期内总电能损耗最小为目标, 并计及了供电可靠性约束, 能够有利于配电网运行经济性与可靠性的协调。

参考文献

- [1] 李珂, 王金凤, 杨丽徙, 等. 基于多场景抗毁性分析的配电网网络结构优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 34-38.
LI Ke, WANG Jinfeng, YANG Lixi, et al. Coordination between load shedding for safety and stability control and under-frequency load shedding in a small weak receiving power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 34-38.
- [2] 刘斌, 雷霞, 孔祥清, 等. 遗传灾变算法在配电网重构中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(2): 31-34.
LIU Bin, LEI Xia, KONG Xiangqing, et al. Application of genetic catastrophic algorithm to power distribution system reconfiguration[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(2): 31-34.
- [3] 刘若溪, 张建华, 吴迪. 基于风险理论的配电网静态安全性评估指标研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 89-95.
LIU Ruoxi, ZHANG Jianhua, WU Di. Research on static security index of distribution network based on risk theory[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 89-95.
- [4] 秦红霞, 谭志梅, 葛亮, 等. 智能配电网自愈控制系统技术研究与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 44(22): 134-139.
QIN Hongxia, TAN Zhimei, GE Liang, et al. Study and design of smart distribution grid self-healing control system technology[J]. Power System Protection and Control, 2014, 44(22): 134-139.
- [5] 王枫, 祁彦鹏, 傅正财. 含微电网的配电网可靠性最优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 14-22.
WANG Feng, QI Yanpeng, FU Zhengcai. Reliability optimization of distribution system with microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 14-22.
- [6] 朱红, 余昆, 韦磊, 等. 配电网运行方式调度及其发展趋势分析[J]. 华东电力, 2013, 41(4): 822-825.
ZHU Hong, YU Kun, WEI Lei, et al. Distribution network operation mode scheduling and its development trend[J]. East China Electric Power, 2013, 41(4): 822-825.
- [7] 贾强, 郭静宜, 付华. 基于贝叶斯决策理论的电网运行方式决策研究[J]. 陕西电力, 2010, 38(10): 10-13.
JIA Qiang, GUO Jingyi, FU Hua. Arrangement of grid operation mode based on Bayesian decision theory[J]. Shaanxi Electric Power, 2010, 38(10): 10-13.
- [8] 康伟, 刘哲, 贾宏杰, 等. 基于风险分析的天津电网运行方式分析[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 102-107.
KANG Wei, LIU Zhe, JIA Hongjie, et al. Risk analysis based comparative research on operation modes of Tianjin power grid[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 102-107.
- [9] 熊小伏, 王志勇. 基于 SCADA 实时数据的变压器经济运行方式研究[J]. 电网技术, 2003, 27(7): 9-11.
XIONG Xiaofu, WANG Zhiyong. Economic operation of power transformer based on real-time data from SCADA[J]. Power System Technology, 2003, 27(7): 9-11.
- [10] 张旭明, 张焰, 汪宇霆, 等. 采用禁忌搜索算法的多时段变压器经济运行方式优化[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 109-113.
ZHANG Xuming, ZHANG Yan, WANG Yuting, et al. Optimization of multi-time interval economic operation for power transformer with tabu search algorithm[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 109-113.
- [11] 王佳贤, 王建民, 程浩忠, 等. 配网设备年度更替决策方法的研究[J]. 华东电力, 2008, 36(2): 82-85.

- WANG Jiaxian, WANG Jianmin, CHENG Haozhong, et al. Annual replacement decision-making methods for distribution network equipment[J]. East China Electric Power, 2008, 36(2): 82-85.
- [12] 高伟欣, 罗先觉, 支岗印. 复杂配电网络可靠性评估的向量法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 36-40.
GAO Weixin, LUO Xianjue, ZHI Gangyin. A vector algorithm for reliability evaluation of distribution systems with complex feeders[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 36-40.
- [13] 李剑虹, 顾绍柱, 卢志刚, 等. 配电网运行经济性评价[J]. 华北电力技术, 2008(2): 51-54.
LI Jianhong, GU Shaozhu, LU Zhigang, et al. Economic evaluation of distribution system operation[J]. North China Electric Power, 2008(2): 51-54.
- [14] 马丽叶, 卢志刚, 胡伟华. 基于区间数的城市配电网经济运行模糊综合评价[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 163-171.
MA Liye, LU Zhigang, HU Weihua. A fuzzy comprehensive evaluation method for economic operation of urban distribution network based on interval number[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 163-171.
- [15] 杨文锋, 王彬宇, 程卓, 等. 城市中低压配电网降损规划决策方法[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2598-2604.
YANG Wenfeng, WANG Binyu, CHENG Zhuo, et al. Optimized decision approach of loss reduction plan for medium-and-low-voltage urban distribution networks[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2598-2604.
- [16] 刘一民, 李智欢, 段献忠. 进化规划方法的综合改进及其在电力系统无功优化中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(8): 47-51.
LIU Yimin, LI Zhihuan, DUAN Xianzhong. Synthetic improvements of evolutionary programming method and its application in reactive power optimization[J]. Power System Technology, 2007, 31(8): 47-51.
- [17] 张炳达, 刘洋. 应用进化规划变异算子的配电网重构算法的应用[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.
- [18] 周文越, 吕飞鹏, 李鹤. 基于遗传算法的运行方式组合方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 51-55.
ZHOU Wenyue, LÜ Feipeng, LI He. Method for the combination of power system operation mode based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 51-55.
- [19] GOSWAMI S K, BASU S K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3): 1484-1491.
- [20] ALLAN R N, BILLINTON R, SJARIEF I, et al. A reliability test system for education purpose-basic distribution system data and results[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 813-820.

收稿日期: 2015-01-06; 修回日期: 2015-04-14

作者简介:

李瑾(1980-), 女, 工程师, 研究方向为电力系统调度, 可靠性管理;

李善波(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统经济运行; E-mail: shanbo_li@sina.com

欧阳金鑫(1984-), 男, 博士后, 讲师, 研究方向为电力系统运行分析、控制与保护。

(编辑 葛艳娜)