

基于改进遗传算法的新建变电站中压配电网规划

张亚璇¹, 严萃群², 唐巍¹, 黄祥旭¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 乌海市农电局, 内蒙古 乌海 016000)

摘要: 针对新建变电站中压配电网规划未考虑负荷不确定性因素、遗传算法易产生不可行解的问题, 对传统遗传算法的交叉、变异操作进行改进, 对交叉、变异之后产生的线路跨越、孤环、孤链等不可行解提出了有效的修复方法, 既保证了可行解的数量, 又保留了不可行解中的优良基因。将负荷用区间数表示, 利用区间潮流端点法考虑了负荷不确定因素。算例结果表明采用该方法获得的规划方案更合理, 当负荷增长 15% 时规划方案仍然适用。

关键词: 中压配电网规划; 改进遗传算法; 修复不可行解; 负荷不确定性; 区间潮流

The middle-voltage distribution network planning of new substation based on improved genetic algorithm

ZHANG Ya-xuan¹, YAN Cui-qun², TANG Wei¹, HUANG Xiang-xu¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Wuhai Agricultural Power Supply Bureau, Wuhai 016000, China)

Abstract: Regarding the load uncertainty and infeasible solutions produced by the genetic algorithm in distribution network planning of new substation, this paper improves the cross and mutation operations in traditional genetic algorithm, and proposes effective methods of repairing the crossover lines, insulated link or loop produced after cross and mutation, which not only ensures the amount of feasible solutions, but also keeps some excellent gens of the infeasible solutions. Meanwhile, the loads are expressed by interval numbers, and the interval power flow algorithm is introduced to consider the load uncertainty. Example results show that the planning by the proposed method is more reasonable and the obtained network structure is still practicable when the load is up to 15%.

Key words: middle-voltage distribution network planning; improved genetic algorithm; repairing infeasible solutions; load uncertainty; interval power flow

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)04-0073-06

0 引言

中压配电网规划是在已知变电站位置及容量, 变电站所带区域内负荷点的性质、位置及容量的情况下, 求得配电线路的拓扑结构和导线规格, 使网络在保证供电质量的同时, 投资和运行费用总和最小。目前对于在原有网络结构上进行优化的研究有一些^[1-2], 而对于新建变电站如何进行网架规划则研究较少。

用遗传算法解决配电网规划时, 很多文章在编码方式上进行了改进, 如: 用方阵来描述该网络拓扑^[3]; 在一个 n 节点的完全图中, 用 $(n-2)$ 个数字组成的字符串可以表示任意一棵树, 即和树之间有一一对应关系^[4]; 按照变长度的编码方法适应每条线路的结构^[5]。但是这些方法不能同时满足配电网

的辐射性、连通性、线路不跨越的特性。

在原有网架结构上进行优化的中压配电网规划, 多由人工提出一些待选方案, 而避免了线路跨越、孤链、孤环等大量不可行解的产生。但是在新建变电站的中压配电网规划中, 如果所有负荷点都靠人工给出网络候选解, 则效率太低, 所以需要算法能自动修复遗传算法过程中产生的各种不可行解。

中压配电网规划中存在很多不确定性因素^[6-7], 包括未来负荷变化的不确定性、未来上级电源规划的不确定性、法规和政策背景的不确定性、费用因素与经济参数的不确定性、现有和将来设备使用方面的不确定性, 其中负荷不确定性是影响中压配电网规划的主要因素。与高压网络相比, 中压电网在负荷预测时, 更难统计数据, 导致中压网络更难得

到精确的负荷预测值，而中压网络在实际运行时，负荷值会在预测值的一定范围内有所变化。目前对不确定性的研究方法很多，主要有配电网区间潮流计算的端点法^[8]，概率潮流法^[9-10]，区间潮流法^[9-11]，模糊潮流法^[9-10,12-14]，利用盲数的潮流计算方法^[15]。其中配电网区间潮流计算端点法只需要进行两次确定性潮流计算，就能够精确求出各节点的区间电压、各支路区间潮流和区间损耗，方法快捷准确^[16]。

本文考虑新建变电站的中压配电网规划，通过对遗传算法编码方式的改进，使初始编码满足连通性、辐射性、线路不跨越等约束条件。对遗传算法的交叉、变异、保留最优个体环节做改进。对遗传算法过程中产生的线路跨越、孤链、孤环等不可行解进行修复。用区间潮流端点法求解配电网规划中的负荷不确定性问题。

1 新建变电站的中压配电网规划模型

农村中压配电网规划的目的在于根据投资、运行费用最小原则，在满足安全可靠约束条件下，确定线路建设方案。

1.1 目标函数

中压配电网规划的目标函数为^[3]：

$$\min Z = \sum_{i=1}^N C_i + \sum_{i=1}^M D_i + \sum_{i=1}^M E_i \quad (1)$$

式中： C_i 为所有馈线的总投资； N 为所有负荷点数总数； D_i 为所有线路的年损耗费用； M 为变电站的出线条数； E_i 为出线仓位投资的等年值。

$$C_i = a \times f_i \times L_i \quad (2)$$

$$a = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + Y \quad (3)$$

式中： a 为等年值系数和折旧率之和； n 为年限系数； r 为贴现率； Y 为折旧率； f_i 为每条线的费用； L_i 为每段馈线长度。

$$D_i = \beta \tau_{\max i} \Delta P_i \quad (4)$$

式中： β 为电价； $\tau_{\max i}$ 为最大负荷利用小时数； ΔP_i 为馈线 i 的有功损耗。

$$E_i = a \times F_i \quad (5)$$

式中： a 为等年值系数； F_i 为出线仓位投资。

1.2 约束条件

(1) 负荷点功率平衡：
$$\sum_{j \in N_i} P_{ij} = 0$$

(2) 容量约束：

对线路： $P_{ij} \leq \bar{P}_{ij}$ ， P_{ij} 为节点 i 到 j 间的线路上流过的功率， \bar{P}_{ij} 为该线路的功率上限。

对变电站： $\sum P_{li} \leq S \cos \varphi$ ($i=1, \dots, M$)； P_{li} 为属于变电站的负荷， S 是变电站的容量， $\cos \varphi$ 是功率因数。

(3) 电压质量： $U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max}$ ($i=1, 2, \dots, N$)

(4) 辐射性结构。

(5) 连通性结构。

2 网架生成

配电网网架布线的目的是把整个规划区中的所有负荷点与电源点连接起来，使网络结构符合辐射性、连通性、线路不跨越等约束条件。

在已知电源点、负荷点、出线条数 l_{num} 的情况下，生成一个可行的网架如下：

(1) 在变电站周围搜索点，使搜到点的个数 $\geq l_{\text{num}}$ ，用随机数确定 l_{num} 个点连接到变电站，将已连接的点作标记。

(2) 以连接到变电站的 l_{num} 个点为上级节点，分别在其周围搜索点，待连接的下级点必须满足：为保证辐射性，该点应该没有被标记过；为保证线路不跨越，该点与上级点的连线不能跨越已存在的线路。

(3) 将满足条件的点连入系统，如果满足条件的点有 2 个或 2 个以上，用随机数确定哪些点连入系统，但每个上级点最多连接 3 个下级点。将已连接的点作标记。

(4) 检验是否所有点都被标记过，没标记的点则孤立于系统外，以刚连入系统的点为上级点，重复步骤 (2)、(3)，直到所有点都被标记，此时系统符合连通性。

以图 1 为例说明网架生成方法（变电站编号为 0，负荷点从 1 到 12 任意编号）。

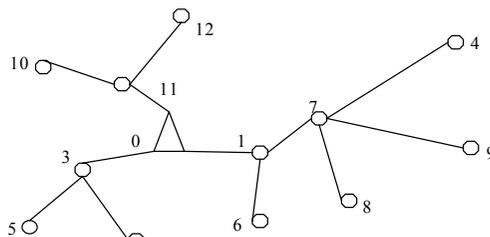


图 1 网架拓扑图

Fig.1 Topology of a network

若变电站出 3 条线，分别连接 11、3、1，作标

记; 分别以 11、3、1 为上级点, 搜索没标记、无线路跨越的点, 11 连接的下级点: 10、12, 3 连接的下级点: 5、2, 1 连接的下级点: 6、7; 已连接的点都作标记; 依此类推, 7 连接的下级点: 4、9、8, 作标记。检验系统内所有点都已标记, 则系统连通。

3 基于新建变电站的改进遗传算法

3.1 编码

由配电网辐射状特点可知: 每一点有且仅有一个上级点, 节点数=支路数+1, 若将变电站编号设为 0, 其他负荷点按自然数任意编号, 则支路编号等于该支路末节点编号。个体基因位数等于负荷点个数, 每一位用自然数表示。个体第 i 位上的基因为第 i 条支路的上级节点。例如图 1 编码为: [0,3,0,7,3,1,1,7,7,11,0,11]。

3.2 适应度函数

由公式 (6) 可求出适应度函数值。

$$f = \frac{K}{F} \quad (6)$$

式中: f 为适应度函数; F 为目标函数; K 为扩大系数。

3.3 初始群体生成

(1) 由公式 (7)、(8) 确定出线条数 l_{num} 。

$$l_{num} = \frac{\sum_{i=1}^M P_i}{P_{lmax}}, \quad l_{num} = \frac{\sum_{i=1}^M P_i}{P_{lmin}} \quad (7)$$

$$l_{num} = l_{num} + int[rnd(l_{num} - l_{num} + 1)] \quad (8)$$

式中: l_{num} 、 l_{num} 为出线条数下限、上限值; $\sum_{i=1}^M P_i$ 为变电站所带区域内所有负荷点有功之和; P_{lmax} 为线路最大容量; P_{lmin} 为线路最小容量; int 为对小数值取其整数部分; rnd 为取随机数; l_{num} 为由变电站出线条数。

(2) 按照第 2 节网架生成步骤和 3.1 编码方式, 生成初始个体。

(3) 根据种群个数, 生成初始群体。

3.4 遗传操作

虽然从原理上遗传算法可以收敛到全局最优解, 但是在工程实际应用中, 还存在种群规模的限制、早熟收敛等问题^[17], 本文根据课题实际情况, 在选择交叉个体、变异、保留最优个体三个关键环节作如下改进^[18-19]:

(1) 采用两点交叉: 由本文编码特点, 交叉可

使种群进化, 但交叉操作后, 易产生不可行解, 为减少不可行解的生成, 在父代个体中设两点交叉, 较一点交叉减少了交叉的基因位数, 减少了不可行解的生成。

(2) 变异: 交换同一编码内任意两位。图 1 编码: [0,3,0,7,3,1,1,7,7,11,0,11], 用随机数确定第 5、12 两位互换, 变异后编码为: [0,3,0,7,11,1,1,7,7,11,0,3]。

3.5 不可行解的修复

在交叉、变异操作过程中, 可能产生线路跨越、孤链、孤环等不可行解。

3.5.1 解决线路跨越

(1) 如图 2 (a), 找出有跨越的所有线路, 1-c, 1-f, a-b。计算出 a-b 线跨越次数为 2, 1-c 线跨越次数为 1, 1-f 线跨越次数为 1。

(2) a-b 线跨越次数最多, 断开 a-b, 将下级点 b 以及 b 点之后的所有连线脱离系统, 以 b 点为中心搜索到距离它近的点 f, b-f 待建连线不跨越任何已存在线路, 连接 b-f, 则 b 点以及 b 点之后的所有连线再次被连入系统, 如图 2 (b)。如果 f 点不符合要求, 则找次近的点, 直到找到符合要求的点解决线路跨越问题。

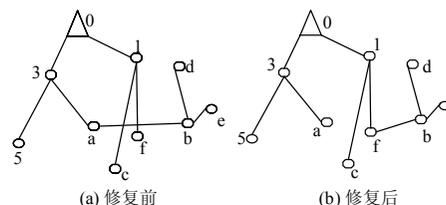


图 2 线路跨越修复

Fig.2 Repairing crossover line

3.5.2 解决交叉、变异之后出线孤环和孤链

以图 3 为例说明:

(1) 从新建变电站开始遍历负荷点, 遍历到的点作标记, 遍历结束时, 3、7、9 三个点没有被遍历到, 则这三个点孤立于系统外, 图 3 (a)。

(2) 在 3、7、9 三个点找到 9 为一个环点, 互为上级点的两个点都是环点。

(3) 在已连入系统内的点中找到距离 9 点距离最近的点 8, 判断 8、9 两点连线与其他线路没有跨越, 断开 7-9 连线, 将 9 点连接到 8 点上, 此时孤环已解开并连入系统, 如图 3 (b)。如果 8 点不符合要求, 则找到距离 9 点次近的点, 以此类推, 直到找到合适的点将孤立部分连入系统。

(4) 直到所有点都被遍历到, 整个系统符合连通性。

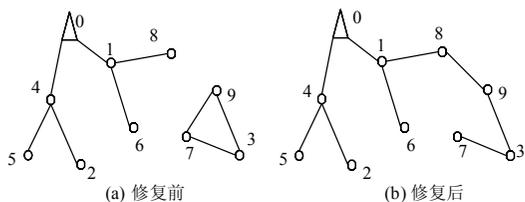


图 3 孤立部分修复

Fig.3 Repairing isolated loop

3.6 负荷不确定性的处理

与高压网络相比，中压电网的负荷预测更难统计数据，导致中压网络更难得到很精准的负荷预测值。实际运行时，中压网络的负荷会在预测值的一定范围内变化，可以用区间数表示负荷值的变化范围。

分别用负荷下限和上限值各自求潮流，得出潮流下限和上限值，进而得出目标函数下限和上限值。此时目标函数值是一个区间数，由其得到的适应度函数值也是一个区间数，无法按照遗传算法继续进行计算。本文用区间潮流端点法解决负荷不确定性问题：

(1) 各节点负荷的区间预测值为 $\left[\underline{S}_i, \bar{S}_i \right]$ ，以

各节点负荷下限 \underline{S}_i ，进行确定性潮流计算，得各支

路区间损耗的下限 \underline{P}_{lossj} ；以各节点负荷上限 \bar{S}_i 进行

确定性潮流计算，得各支路区间损耗的上限 \bar{P}_{lossj} 。

(2) 用当代一个个体的所有负荷的上限值求潮流，得目标函数上限值，由公式 (6) 得到适应值下限值；用所有负荷的下限值求潮流，得适应值上限值。按此方法，求出当代所有个体的适应值上、下限。

(3) 对于当代每一个个体，分别按照相对优势度公式^[8]，求出每一个个体相对于其他所有个体的相对优势度，由公式 (9) 求出每个个体的适应值。

$$f_i = \sum_{k=1, i \neq k}^n P_{ik} \quad (9)$$

式中： f_i 为每个个体的适应值； P_{ik} 为第 i 个个体相对于第 k 个个体的相对有适度； n 为种群个体数。

3.7 流程图 (图 4)

4 算例

已知变电站位置、容量，该变电站所带区域内

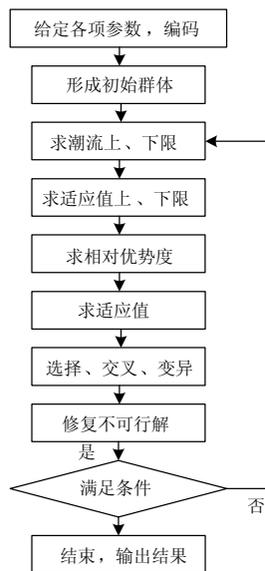


图 4 考虑负荷不确定因素的遗传算法流程图

Fig.4 Flowchart of genetic algorithm considering load uncertainty

有 60 个负荷点，负荷点位置、容量已知。初始群体规模为 40 个个体，交叉概率 0.9，变异概率 0.5，由目标函数向适应度函数转化的扩大系数 K 为 100000。

如果不修复不可行解，交叉、变异后平均每代产生 60% 不可行解。不修复不可行解的程序计算时间比修复不可行解的要短很多。但是由于不可行解的可能性有很多，所以不修复不可行解的目标函数值变化很大而且没规律。用本文方法，可以修复不可行解，经多次计算，目标函数值稳定。

确定性和本文提出的不确定性规划比较如下：将已知的负荷预测值作为中点值，以此为基础，上下浮动 15% 作为不确定性负荷的上下限值。算例群体为 40 个个体，寻优 30 次，确定性和不确定性规划最优结果如表 1。

表 1 确定性及不确定性最优结果对比

Tab.1 Contrast of best certainty and uncertainty results

方法	目标函数值/万元
确定性	11.01
不确定性	[10.79, 11.32]

确定性和不确定性规划最优个体拓扑如图 5 所示。

用确定性规划方法和本文考虑负荷不确定性规划方法对同一算例网络反复进行 30 次优化计算，取最优个体费用为 11.01 万元，以这个确定性最优个体费用为基准值，计算每次不确定性优化结果的中

心值, 将 30 个中心值与基准值作比较统计结果如下:

区间遗传算法有 23.33% 的概率找到“最优解+0.5%”范围内的次优解; 有 50% 的概率找到“最优解+1%”范围内的次优解; 有 83.33% 的概率找到“最优解+2%”范围内的次优解; 有接近 1 的概率找到“最优解+3%”范围内的次优解。

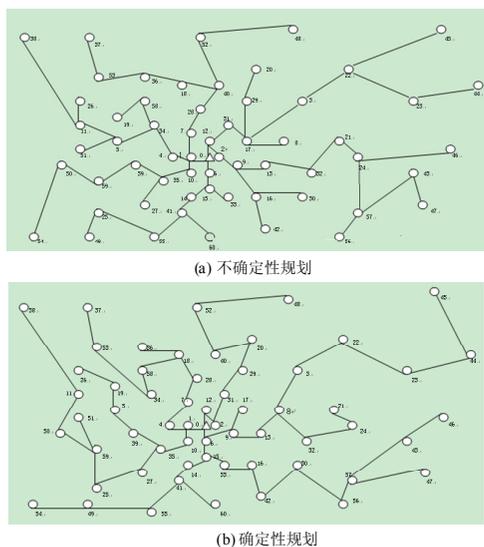


图 5 最优个体拓扑图

Fig.5 Topology of the best individual

虽然通过预测获得未来负荷的准确值很难, 但获得负荷的变化范围相对容易。确定性网络规划只适用于一个负荷点, 当负荷变化时, 规划结果可能不合理。从计算结果来看, 考虑负荷不确定因素的网络规划与确定性网络规划结果相比费用水平相当, 但适合于负荷的一定变化范围, 因此, 获得的规划结果对负荷具有更强的适应性, 网架结构更合理。

5 结论

(1) 提出了新建站中压网架生成方法, 使初始群体自动满足线路辐射性、连通性、不跨越等约束条件。

(2) 提出了遗传算法过程中产生的线路跨越、孤链、孤环等不可行解的修复方法。

(3) 用区间潮流端点法考虑了负荷的不确定性因素, 当负荷增长 15% 时本文获得的规划方案依然适用。

参考文献

[1] 王艳杰, 衣涛. 配电网架的综合优化规划算法[J]. 沈阳工业大学学报, 2008, 30 (4): 394-398.

- WANG Yan-jie, YI Tao. Integrated optimal planning approach of distribution network[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2008, 30 (4): 394-398.
- [2] 刘云, 陈金富, 陈志刚, 等. 基于遗传序优化算法的配电网规划[J]. 电网技术, 2008, 32 (10): 89-93. LIU Yun, CHEN Jin-fu, CHEN Zhi-gang, et al. Distribution network planning using genetic ordinal optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2008, 32 (10): 89-93.
- [3] 王雷, 顾洁. 中压配电网优化规划的改进单亲遗传算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18 (3): 72-76. WANG Lei, GU Jie. Improved partheno-genetic algorithm for medium voltage distribution network optimal planning[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18 (3): 72-76.
- [4] 王雷, 顾洁. 中压配电网优化规划的改进遗传算法[J]. 继电器, 2006, 34 (7): 43-50. WANG Lei, GU Jie. Improved genetic algorithm of mid-voltage distribution network optimal planning[J]. Relay, 2006, 34 (7): 43-50.
- [5] 王成山, 王赛一. 基于空间GIS的城市中压配电网智能规划(一)辐射接线模式的自动布局[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (5): 45-50. WANG Cheng-shan, WANG Sai-yi. The intelligent planning of urban mid-voltage distribution network based on spatial GIS part one automatic routing of radial network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (5): 45-50.
- [6] 王赛一. 不确定性条件下的城市配电网规划方法探讨[J]. 华东电力, 2008, 36 (4): 66-69. WANG Sai-yi. Urban distribution network planning with consideration of uncertainties[J]. East China Electric Power, 2008, 36 (4): 66-69.
- [7] 孙丽丽, 裴晓东. 浅析配电网规划中的若干问题[J]. 内蒙古科技与经济, 2007 (7): 123.
- [8] 郭智利. 基于区间算法和范例学习的配电网网架规划[J]. 天津电力技术, 2006 (3): 1-5. GUO Zhi-li. Distribution network planning based on interval algorithm and paradigm learning[J]. Tianjin Electric Power Technology, 2006 (3): 1-5.
- [9] 张焰, 陈章潮. 电网规划中潮流分析方法综述[J]. 水电能源科学, 1997, 15 (4): 54-57. ZHANG Yan, CHEN Zhang-chao. Summing-up discussion on load flow analyses applied to electric power planning[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 1997, 15 (4): 54-57.
- [10] Fernando Alvarado, Yi Hu, Rambabu Adapa. Uncertainty

in power system modeling and computation[C]. // IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 1992: 754 - 760.

[11] Wang Zi-an, Alvarado Fernando L. Interval arithmetic in power flow analysis[C]. // IEEE Power Engineering Soc. IEEE Transactions on Power Systems. Baltimore(United States): 1992: 1341-1349.

[12] Miranda V, Saraiva J T. Fuzzy modelling of power system optimal load flow[C]. // IEEE Power Engineering Soc, IEEE Transactions on Power Systems. Baltimore, United States: 1991: 843-849.

[13] 王平洋. 配电系统规划中的若干重要问题[J]. 电网技术, 2001, 25 (5) : 1-5.
WANG Ping-yang. Some important problems in distribution planning[J]. Power System Technology, 2001, 25 (5) : 1-5.

[14] 张焰, 陈章潮. 电网规划中的模糊潮流计算[J]. 电力系统自动化, 1998, 22 (3) : 20-22.
ZHANG Yan, CHEN Zhang-chao. The calculation of fuzzy load flow in electric power planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22 (3) : 20-22.

[15] 朱海峰, 程浩忠, 张焰, 等. 利用盲数进行电网规划的潮流计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 74-78.
ZHU Hai-feng, CHENG Hao-zhong, ZHANG Yan, et al. Power flow analysis of electric power networks flexible planning by means of unascertained number[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (8) : 74-78.

[16] 李如琦, 谢林峰, 王宗耀, 等. 基于节点分层的配网潮流前推回代方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 63-66.
LI Ru-qi, XIE Lin-feng, WANG Zong-yao, et al. Back/forward substitution method for radial distribution load flow based on node-layer[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 63-66.

[17] 钱锋, 陈星莺. 10 kV配电网规划研究[D]. 南京: 河海大学, 2003
QIAN Feng, CHEN Xing-ying. Study of 10 kV distribution network planning[D]. Nanjing: Hohai University, 2003.

[18] 杨建军, 战红, 陈宪国. 基于遗传算法并避免不可行解的配电网重构优化[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(17): 43-46.
YANG Jian-jun, ZHAN Hong, CHEN Xian-guo. Optimization of distribution network reconfiguration of avoiding infeasible solutions based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(17): 43-46.

[19] 王秀云, 任志强, 楚冬青. 用于降低网损的配电网优化重构方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 21-24.
WANG Xiu-yun, REN Zhi-qiang, CHU Dong-qing. Study of algorithm on distribution network optimum reconfiguration for reducing line loss[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(12): 21-24.

收稿日期: 2010-02-27; 修回日期: 2010-05-24

作者简介:

张亚璇 (1983-), 女, 硕士研究生, 从事配电网规划研究; E-mail: yaxuan5142@163.com

严萃群 (1974-), 男, 本科, 工程师, 从事农村电网生产技术管理工作;

唐巍 (1971-), 女, 教授, 从事电力系统分析、配电网规划、配电网经济运行方面的研究。

(上接第 72 页 continued from page 72)

[9] 吴天明, 赵新力, 刘建存. MATLAB 电力系统设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.

[10] 郝治国, 赵学文, 张保会. 变电站变压器经济运行实时监控[J]. 继电器, 2002, 30(1): 18-21.
HAO Zhi-guo, ZHAO Xue-wen, ZHANG Bao-hui. Resarch on real-time SCADA system for economic operation of transformers in substations[J]. Relay, 2002, 30(1): 18-21.

收稿日期: 2010-03-02; 修回日期: 2010-11-29

作者简介:

张占龙 (1971-), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为电磁兼容与故障检测、数字仪器设备、计算机测量与控制; E-mail: zhangzl@cqu.edu.cn

王科 (1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电气设备故障检测。