

基于模糊多目标协调优化的配电网重构研究

刘志勇¹, 刘杨华², 林舜江³, 王彦东¹, 阚金辉¹

(1. 广东电网公司佛山供电局, 广东 佛山 528000; 2. 广东技术师范学院机电学院, 广东 广州 510665;
3. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 配电网重构通过改变开关的开合状态以提高供电的可靠性和经济性。建立以网损最小、馈线负载均衡指标最小、开关操作次数最少多个目标协调优化的配电网重构的数学模型。引入模糊隶属度函数对各目标进行模糊化处理, 根据模糊集理论的最大最小法则, 将多目标优化问题转化为单目标非线性规划问题。应用禁忌算法对该配电网重构模型进行优化求解。对某个69节点配电网系统, 比较分析了四种不同的优化方案, 仿真结果验证了所提出模型和求解方法的正确有效。

关键词: 配电网重构; 模糊多目标优化; 最大最小法则; 禁忌算法

Fuzzy multi-objective coordination optimization for distribution network reconfiguration

LIU Zhi-yong¹, LIU Yang-hua², LIN Shun-jiang³, WANG Yan-dong¹, KAN Jin-hui¹

(1. Foshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Company, Foshan 528000, China; 2. College of Electromechanical Engineering, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China; 3. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Distribution network reconfiguration can improve the reliability and economy of power supply by changing the state of network switches. A multi-objective coordination optimized model of the distribution network reconfiguration with minimum network loss, minimum feeder load balancing index and the least number of switching operations is established. Each target is processed by fuzzy membership function. With the maximum and minimum rule of the fuzzy set theory, the multi-objective optimization problem is transformed into a single objective nonlinear programming problem. A Tabu algorithm is applied to solve the distribution network reconfiguration model. Four optimization schemes are compared by a 69 buses system. Simulation results show that the proposed model and solving method are correct and effective.

Key words: distribution network reconfiguration; fuzzy multi-objective optimization; the maximum and minimum rule; Tabu algorithm

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)04-0133-06

0 引言

配电网具有闭环设计、开环运行的特点。配电网线路中存在大量的分段开关及少量的联络开关, 因而可以通过改变分段开关和联络开关的开合状态来寻求一种最优的配电网结构, 以降低配电网的功率损耗、改善配电系统的电压分布, 提高对负荷快速恢复供电能力, 从而实现经济效益、供电质量和供电可靠性的综合提升。伴随着世界各国的智能电网建设浪潮, 智能配电网已成为未来配电网的

发展方向, 而配电网重构是实现智能配电网的一项关键技术^[1-2]。

配电网重构是一个复杂的多目标非线性整数组合优化问题, 求解难度很大。目前国内外已对配电网重构问题研究开展了一些探索性工作, 文献[3-5]采用传统的启发式算法对配电网进行重构求解, 此类算法计算速度快, 但一般只能得到次优解。为了得到最优解, 文献[5-8]通过引入模拟生物进化及生物行为的智能算法使得寻优过程不易陷入局部最优, 从而获得最优解。为提高求解效率, 文献[9-12]从配电网的拓扑模型入手, 提出了优化解空间, 减少无效解的方法。随着分布式电源越来越多地接入配电网, 文献[13]分析了分布式电源并网对配电

基金项目: 广东高校优秀青年创新人才培养计划项目 (LYM11014)

网重构问题的影响,文献[14]则研究了考虑风电出力的随机性的配电网重构问题。上述研究工作大多以单一的网损最小化为目标,通过约束条件的形式使馈线负载均衡;或者对电压质量目标、开关动作量目标与网损目标进行综合,实现某种程度的综合优化。而在工程实践中,供电单位对于供电质量和供电服务越来越重视,因而对配电网重构的要求是对供电可靠性和经济性多个目标进行协调优化。

鉴于此,本文建立以网损最小、馈线负载均衡指标最小、开关操作次数最少的配电网重构多目标协调优化模型。引入模糊函数对各目标进行模糊化处理,根据模糊集理论的最大最小法则,将多目标优化问题转化为单目标非线性规划问题,应用禁忌算法对该配电网重构模型进行优化求解。对某个64节点配电网系统,比较分析了四种不同的优化方案,仿真结果验证了所提出模型和求解方法的正确有效。

1 配电网重构的多目标协调优化模型

本文以网损最小、馈线负载平衡度最好和开关操作次数最少为配电网重构的3个目标,进行协调优化,如式(1)所示。

$$F = \min \{P_{\text{Loss}}, B, SW\} \quad (1)$$

式中: P_{Loss} 为配电网的总有功损耗; B 表示各条馈线的负载平衡度; SW 表示配电网重构的开关总操作次数。

配电网系统的有功损耗计算如式(2)所示。

$$P_{\text{Loss}} = \sum_{i=0}^{n_L} u_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} R_i \quad (2)$$

式中: u_i 为馈线 i 开关的状态量,取0时代表打开,取1时代表闭合; R_i 为馈线 i 的支路电阻, P_i 、 Q_i 、 V_i 分别为馈线 i 上的有功负载、无功负载及电压水平; n_L 为配网中馈线的总条数。

馈线的负载均衡指标的数学描述如式(3)所示^[15-16]。

$$B = \sum_{i=1}^{n_C} \frac{I_i^2}{I_{i,\max}^2} \quad (3)$$

式中: B 表示负载均衡指标; I_i 表示流过馈线 i 的电流; $I_{i,\max}$ 表示馈线 i 的最大负载电流; n_C 表示配电网中所有闭合馈线的总数。由式(3)可见,馈线负载均衡指标根据馈线的当前电流与最大电流比的平方和进行计算,对于某条馈线,负载程度越小,

说明其热稳定裕度越大;而以各条馈线负载程度平方和的形式出现,其最小化结果将促使各条馈线运行在负载程度更加均衡的状态。

在优化上述目标的同时,该配电网重构模型还需包括以下约束条件。

(1) 潮流方程约束

潮流方程约束为常规的极坐标下的节点注入有功和无功平衡方程,只是方程中节点导纳矩阵的元素值与配网开关的开合状态 u_i 关。

(2) 节点电压约束

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (4)$$

式中, V_{\max} 、 V_{\min} 分别为配电网节点电压允许范围的最大值和最小值。

(3) 馈线负载电流约束

$$|I_i| \leq I_{i,\max} \quad (5)$$

式中, $I_{i,\max}$ 为馈线 i 的最大负载电流。

(4) 为了保证对所有负荷的供电,必须保证配电网重构后无网络孤岛出现。

2 基于模糊集理论的多目标优化求解

对于多目标协调优化问题,由于各子目标之间的相关性往往不大,有些甚至是相互矛盾的,要使多个子目标一起达到最优值是非常困难的。模糊集理论通过建立某个模糊集合,以适当的隶属度函数,通过有关的运算和变换,对模糊对象进行分析,在处理不确定现象方面有较强的优势^[17-19],因此本文通过模糊集理论来对多目标进行优化求解。

2.1 目标函数的模糊化处理

为了便于对各个目标函数的模糊处理,本文先对网损目标和馈线负载均衡目标进行归一化处理。令

$$PL = \frac{P_{\text{Loss}}}{P_{\text{Loss},0}} \quad (6)$$

$$LB = \frac{B}{B_0} \quad (7)$$

式中: PL 为配电网的有功损耗比; $P_{\text{Loss},0}$ 表示配电网重构前的有功损耗; LB 为配电网的负载均衡比, B_0 表示配电网重构前的负载均衡指标。

模糊多目标协调优化模型建模关键在于各目标的隶属度函数的选取。对于本文提出的三个目标而言,在满足约束条件的前提下,各目标的优化值在某一范围内都是可以接受的。因此在本文中,选取梯形函数作为三个目标函数的隶属度函数,所选用的梯形隶属度函数如图1所示。

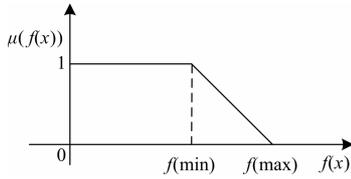


图 1 梯形隶属度函数

Fig. 1 Trapezium membership function

根据图 1, 可以得到三个目标函数对应的模糊隶属度函数如式 (8)~式 (10) 所示。

$$\mu(PL) = \begin{cases} \frac{PL_{\max} - PL}{PL_{\max} - PL_{\min}} & PL_{\min} < PL < PL_{\max} \\ 1 & PL \leq PL_{\min} \\ 0 & PL \geq PL_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mu(PL)$ 为 PL 的隶属度值; PL_{\max} 、 PL_{\min} 分别为设定的 PL 最大值和最小值。

$$\mu(LB) = \begin{cases} \frac{LB_{\max} - LB}{LB_{\max} - LB_{\min}} & LB_{\min} < LB < LB_{\max} \\ 1 & LB \leq LB_{\min} \\ 0 & LB \geq LB_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\mu(LB)$ 为 LB 的隶属度值; LB_{\max} 、 LB_{\min} 分别为设定的 LB 最大值和最小值。

$$\mu(SW) = \begin{cases} \frac{SW_{\max} - SW}{SW_{\max} - SW_{\min}} & SW_{\min} < SW < SW_{\max} \\ 1 & SW \leq SW_{\min} \\ 0 & SW \geq SW_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\mu(SW)$ 为 SW 的隶属度值; SW_{\max} 、 SW_{\min} 分别为设定的 SW 最大值和最小值。

2.2 模糊多目标协调优化模型

对于多目标协调优化模型式 (1)~式 (3), 定义 λ_h 为三个目标隶属度函数的满意度, 如式 (11) 所示。

$$\lambda_h = \min \{ \mu(PL), \mu(LB), \mu(SW) \} \quad (11)$$

依据模糊集理论的最大最小法则^[20], 对于模型式 (1)~式 (3) 则可以转化为在满足所有约束条件下的满意度最大化的问题, 即 $\max \lambda_h$ 问题。即把多目标优化问题转化为单目标非线性规划问题, 其数学模型如下:

$$F = \max \{ \lambda_h \} \quad (12)$$

$$\text{s.t.} \quad \mu(PL) \geq \lambda_h \quad (13)$$

$$\mu(LB) \geq \lambda_h \quad (14)$$

$$\mu(SW) \geq \lambda_h \quad (15)$$

同时, 该模糊多目标协调优化模型还需要满足配电网潮流方程、节点电压、馈线负载电流以及配电网网络结构无孤岛的约束。

3 禁忌算法求解单目标优化问题

3.1 禁忌算法概述

禁忌算法最早由 Fred Glover 提出, 它是对局部邻域搜索的一种扩展, 是一种全局逐步寻优算法^[21-22]。禁忌算法通过引入一个灵活的存储结构(禁忌表)和相应的禁忌准则来避免迂回搜索, 并通过特赦准则来赦免一些被禁忌的优良状态, 进而保证多样化的有效探索, 以实现全局最优。

禁忌算法的基本思路是: 给定一个初始解和一个邻域, 在该邻域中确定若干候选解, 对各候选解进行寻优判断, 并标记已得到的局部最优解, 将其存放于禁忌表中, 并在下次迭代过程中避开这些局部最优解。但这种避开不是完全的避开, 若该局部最优解满足相应特赦准则时, 则会重新对其进行搜索, 以避免遗失优良状态。若产生的各候选解皆无法满足成为局部最优解的条件, 则选择次优解作为下一个邻域构造的基础, 但该次优解不存入禁忌表中。然后通过移动操作, 不断构造新的邻域, 产生新的局部最优解或次优解, 通过比较逐步向全局最优解靠近, 直至达到停止规则。

3.2 算法流程

应用禁忌算法对本文提出的模糊多目标协调优化配电网重构模型的求解流程如图 2 所示。为了使配电网重构过程中产生的解满足辐射状结构要求, 本文对禁忌算法寻优过程中的初始解和邻域构造作如下约束:

(1) 选取该配电网原始结构的解作为初始解;

(2) 选择交换移动的方式作为算法搜索过程中邻域构造的方法。即要求其闭合一个开关的同时打开所形成环内的另一个开关。

对于特赦准则, 本文采用如下规定: 通过一次移动得到的局部最优解如果比以前搜索到的所有局部最优解都要好, 则该局部最优解满足特赦准则。

4 算例分析

为了检验本文提出方法的有效性, 本文利用一个 69 节点配电网系统, 系统结构图如图 3 所示, 图中, 分支 69~73 装设常开联络开关, 其余分支装设

分段开关。设计了四个算例对本文提出的多目标优化模型进行了比较验证，具体算例描述如表 1 所示。

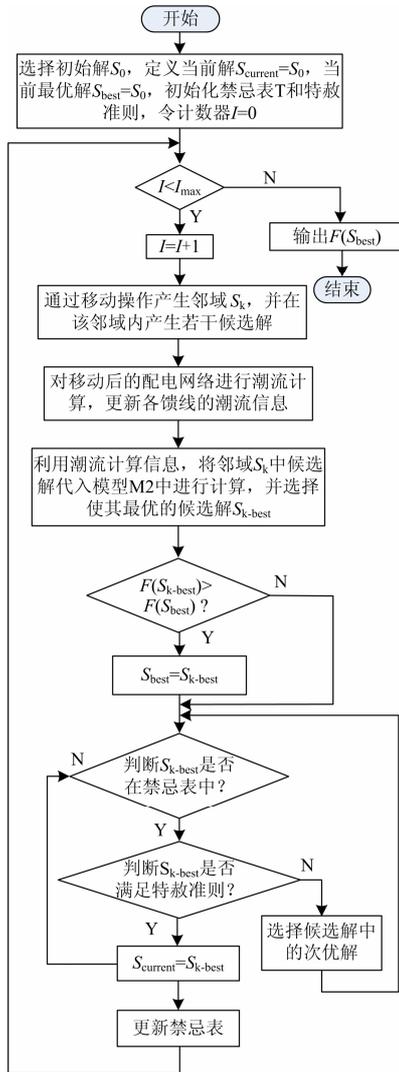


图 2 禁忌算法搜索流程

Fig. 2 Flowchart of Tabu algorithm

表 1 仿真算例

Table 1 Simulation cases

算例	算例描述
算例 1	本文所提出的模糊多目标协调优化配电网络重构
算例 2	仅考虑网损最小情况下的配电网络重构
算例 3	仅考虑馈线负载均衡情况的配电网络重构
算例 4	考虑总开关操作次数不超过 4 个且网损最小的配电网络重构

仿真试验中的部分参数设置情况如表 2 所示。

表 2 部分参数设置

Table 2 Parameters setting

PL_{min}	PL_{max}	LB_{min}	LB_{max}	SW_{min}	SW_{max}	V_{imin}	V_{imax}
0.6	1.0	0.7	1.0	4	10	0.95	1.05

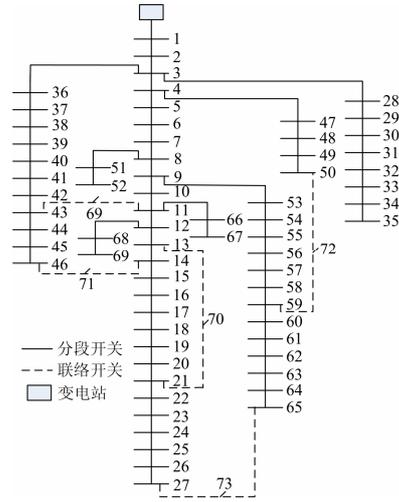


图 3 69 节点配电网络接线图

Fig. 3 Connection diagram of the 69 buses distribution network

利用禁忌算法对各个算例进行寻优求解的优化结果如表 3 所示。

表 3 仿真结果

Table 3 Simulation results

	算例 1	算例 2	算例 3	算例 4
断开的分段开关	20、57、13	13、20、53、61	13、18、42、55、60	10、52
合上的联络开关	70、71、72	70、71、72、73	69、70、71、72、73	69、72
有功损耗/kW	103.265	103.255	112.53	118.78
馈线最低电压/pu	0.953 7	0.956 5	0.951 9	0.953 7
馈线负载均衡指标	1.804	1.911	1.757	2.125
开关总操作次数	6	8	10	4

配电网络重构完成后各节点的电压水平如图 4 所示。

由图 4 可知，配电网络重构完成后各馈线的电

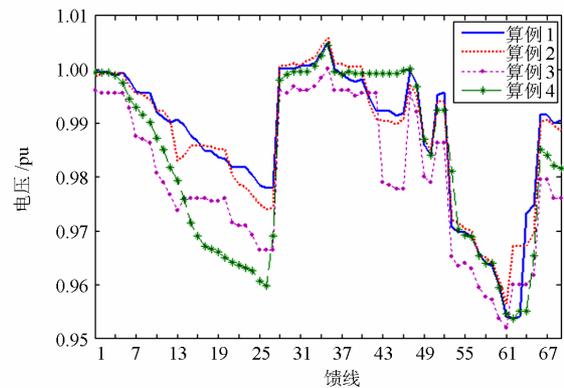


图 4 各节点的电压水平

Fig. 4 Voltage level of all nodes

压水平都满足系统运行要求。其中, 由于馈线 61、62 所带负荷比较重, 使得馈线 60~64 的电压水平相对较低, 但最低电压仍满足系统运行要求。而馈线 31~34 所带负荷较轻, 其电压水平也较高。在馈线 22~28 处, 算例 1 和算例 2 对馈线电压水平提升较为明显。总体来看, 按算例 1 和算例 2 要求进行重构后的配电网络的电压水平明显要优于算例 3 和算例 4。

由表 3 的仿真结果可知, 四个算例中, 仅考虑网损最小情况下的配电网络重构时所得到的系统网损最小, 为 103.255 kW; 其次为采用本文提出的模糊多目标协调优化配电网络重构模型, 为 103.265 kW; 其他两个算例的网损较大, 分别为 112.53 kW 和 118.78 kW。四个算例中, 算例 3 的馈线最低电压最低, 其值为 0.951 9 pu, 但仍满足 V_{\min} 大于 0.95 pu 的要求; 电压最高为算例 2, 其值为 0.956 5 pu。从馈线负载均衡程度来看, 算例 3 的负载均衡指标值最小, 为 1.757, 负载均衡程度最好; 最差为算例 4, 指标值为 2.125。从开关操作次数来看, 算例 3 操作次数最多, 共有 10 次; 其次为算例 2, 为 8 次; 最低为算例 4, 共 4 次。

从仿真结果可知, 虽然算例 2 在网损和馈线最低电压水平方面比算例 1 略好, 但两者相差不大。算例 1 的网损只比算例 2 的高 0.01 kW, 算例 1 的馈线最低电压只比算例 2 的低 0.028 pu。而算例 1 在馈线负载均衡程度和开关操作次数方面均优于算例 2。在电网运行过程中, 较少的开关操作次数和较低的负载平衡度都能有效的提升配网系统的安全稳定运行。因此综合来看, 本文提出的模糊多目标协调优化配电网络重构模型能够较好的兼顾和协调各个目标之间的不同需求, 实现对多个目标的协调优化求解, 优化结果更能符合实际电网的运行要求。

4 结论

本文提出了多目标协调优化配电网络重构模型, 采用模糊集理论将多目标优化问题转化为单目标非线性规划问题, 并利用禁忌算法对其进行了优化求解。仿真结果表明: 虽然在单一网损目标方面本文提出的模糊多目标协调优化配电网络重构模型略高于只考虑网损最小情况的配电网络重构模型, 但在馈线负载均衡程度和开关操作次数方面均更优。因此, 从多目标协调优化的角度来看, 其能较好地协调兼顾各个目标之间的不同需求, 更能体现实际配电网络的重构要求, 因而能够为电网决策者提供一种适应多个目标同时优化的配电网络重构决策方案, 具有较好的工程实用价值。

参考文献

- [1] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 1-8.
YU Yi-xin, LUAN Wen-peng. Smart grid and its implementations[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 1-8.
- [2] 张浩, 和敬涵, 薄志谦. 基于动态规划算法的故障恢复重构[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 162-167.
ZHANG Hao, HE Jing-han, BO Zhi-qian. Service restoration based on dynamic programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 162-167.
- [3] 张栋, 张刘春, 傅正财. 配电网重构的快速支路交换法[J]. 电网技术, 2005, 29(9): 82-85.
ZHANG Dong, ZHANG Liu-chun, FU Zheng-cai. A quick branch-exchange algorithm for reconfiguration of distribution networks[J]. Power System Technology, 2005, 29(9): 82-85.
- [4] 韩学军, 陈鹏, 国新风, 等. 基于潮流计算的配电网重构方法[J]. 电网技术, 2007, 31(17): 60-63.
HAN Xue-jun, CHEN Peng, GUO Xin-feng, et al. A power flow based reconfiguration method of distribution networks[J]. Power System Technology, 2007, 31(17): 60-63.
- [5] González Alezeia, Echavarren F M, Rouco L, et al. A sensitivities computation method for reconfiguration of radial networks[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(3): 1294-1301.
- [6] 余健明, 张凡. 基于改进免疫遗传算法的配电网络重构[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 29-33.
YU Jian-ming, ZHANG Fan. Distribution network reconfiguration based on improved immune genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 29-33.
- [7] 王韶, 马晶晶, 周鑫, 等. 一种配电网重构的蜜蜂进化型遗传算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 62-67.
WANG Shao, MA Jing-jing, ZHOU Xin, et al. Bee evolutionary genetic algorithm for distribution network reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 62-67.
- [8] Venkatesh B, Rakesh R, Gooi H B. Optimal reconfiguration of radial distribution systems to maximize loadability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 19(1): 260-266.
- [9] 欧帝宏, 陈皓勇, 何瑞辉. 一种基于解空间划分的配

- 电网最优重构算法[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 140-145.
OU Di-hong, CHEN Hao-yong, HE Rui-hui. An optimal distribution network reconfiguration algorithm based on division of solution space[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 140-145.
- [10] 黄玉辉, 刘东. 考虑电网特性的网络重构算法解空间优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10): 51-55.
HUANG Yu-hui, LIU Dong. Network reconfiguration solution space optimization considering grid characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10): 51-55.
- [11] 杨建军, 战红. 基于图论的改进遗传算法在配网重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 122-125.
YANG Jian-jun, ZHAN Hong. Application of the improved genetic algorithm based on graph theory in distribution network reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 122-125.
- [12] 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 Wen-hui, PENG Chun-hua, GUO Jian-feng, 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.
- [13] 崔金兰, 刘天琪, 李兴源. 含有分布式发电的配电网重构研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(15): 37-40.
CUI Jin-lan, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan. Network reconfiguration at the distribution system with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(15): 37-40.
- [14] 何禹清, 彭建春, 文明, 等. 含风电的配电网重构场景模型及算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 12-18.
HE Yu-qing, PENG Jian-chun, WEN Ming, et al. Scenario model and algorithm for the reconfiguration of distribution network with wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 12-18.
- [15] Baran M E, Wu F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [16] Peponis G, Papadopoulos M. Reconfiguration of radial distribution networks: application of heuristic methods on large-scale networks[J]. IEE Proceedings Generation Transmission Distribution, 1995, 142(6): 631-638.
- [17] Jamshid Aghaei, Afshin Lashkar Ara. Fuzzy multi-objective optimal power flow considering UPFC[J]. International Journal of Innovative Computing, 2012, 8(2): 1155-1166.
- [18] 郭创新, 游家训, 彭明伟, 等. 基于面向元件神经网络与模糊积分融合技术的电网故障智能诊断[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 183-190.
GUO Chuang-xin, YOU Jia-xun, PENG Ming-wei, et al. A fault intelligent diagnosis approach based on element-oriented artificial neural networks and fuzzy integral fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 183-190.
- [19] 洪芦诚, 石立宝, 姚良忠, 等. 计及风电场发电功率不确定性的电力系统模糊潮流[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 116-122.
HONG Lu-cheng, SHI Li-bao, YAO Liang-zhong, et al. Fuzzy modelling and solution of load flow incorporating uncertainties of wind farm generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 116-122.
- [20] 李士勇. 工程模糊数学及应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [21] 陈根军, 唐国庆. 基于 Tabu 搜索的配电网重构算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 28-33.
CHEN Gen-jun, TANG Guo-qing. A Tabu search approach to distribution network reconfiguration for loss reduction[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 28-33.
- [22] 熊宁, 程浩忠. 基于开关组的禁忌搜索在配电网重构中的应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11): 56-60.
XIONG Ning, CHENG Hao-zhong. A Tabu search based on switch for reconfiguration of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 56-60.

收稿日期: 2013-05-26; 修回日期: 2013-06-20

作者简介:

刘志勇(1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统运行与控制、分布式发电;

刘杨华(1979-), 女, 通讯作者, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统分析与控制及电力市场; E-mail: ruby_liu4@aliyun.com

林舜江(1980-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为电力系统优化与控制。E-mail: linshj@scut.edu.cn