

改进 Tabu 优化算法在地区电网故障诊断的应用

李文清, 刘前进, 姜伟

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641)

摘要: 基于优化算法的电网故障诊断是将电力系统故障诊断描述为优化问题后用优化方法求解。提出了基于改进 Tabu 搜索算法的电力系统故障诊断的新方法。以覆盖集理论为基础, 把电力系统警报处理问题表示为 0-1 整数规划问题, 并引入了一种新的评估指标, 确保了全局最优解, 并极大地满足了电网实时性的要求。最后用一个全新算例来证明计算结果的可靠性与快速性, 结果表明以改进 TS 为基础的方法能够满足地区电网故障诊断的要求。

关键词: 故障诊断; 改进 Tabu 搜索; 覆盖集理论

Application of fault diagnosis for district subnetworks based upon evolutionary Tabu Search algorithm

LI Wen-qing, LIU Qian-jin, JIANG Wei

(South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Optimization algorithm for fault diagnosis of electrical power system is to describe fault diagnosis as optimization problem and then solve that by optimization method. A new approach to fault diagnosis based upon developed Tabu Search algorithm is proposed in the paper. Based on set covering theory, alarm processing problem is first expressed as 0-1 integer programming problem, a new criterion on describing alarm processing problem is proposed to ensure global optimal solution and extremely satisfy the need of network celerity. Eventually, a typical 152 node systemic case is served to demonstrate probability of reliability and celerity quality of computed results, the test results suggest that evolutionary TS based method is more efficient than existing optimization algorithm.

Key words: fault diagnosis; evolutionary TS; set covering theory

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)01-0067-06

0 引言

电力系统故障诊断是协助调度运行人员实现事故状况下科学调度, 尽快排除故障、恢复供电, 保证电网安全、稳定、经济运行的重要手段^[1]。数字化、信息化是当前电力系统的发展趋势, 为运行管理等部门带来了愈加完备和全面的信息, 但信息量的增多也使得调度管理人员难以发现或遗漏重要的信息; 因此, 诊断系统愈来愈受欢迎。

目前, 有多种方法应用于电力系统故障诊断, 如专家系统^[2]、神经网络^[3]、逻辑处理^[4]等。其中在基于优化方法的故障诊断方面近几年也逐步成熟, 做了大量的系统研究工作^[5,6,7]。

基于文献[1, 8, 9]中, 已建立的诊断模型及相应的目标函数, 并介绍了目标函数的自动形成方法, 此时故障诊断问题就化成了纯粹无约束优化计算问题了。只要找到了优化问题的解, 即目标函数的解,

就完成了故障元件的诊断。关于无约束优化问题的计算, 目前已经有许多计算方法, 如爬山法, 遗传算法(GA)^[5]等, 其中禁忌搜索算法 TS(Tabu Search)思想简单容易理解, 计算速度和效果都比较令人满意^[10]。

1 Tabu 算法简介

在电力系统的优化调度、无功规划、配电系统中电容器的最优配置等方面, TS 算法得到了广泛的应用^[1]。它通过采用特有的“禁忌”方式避免了迂回搜索, 并通过藐视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。近年来人们在其基础上作了改进, 形成如连续 TS, reactive-TS 等, 使 TS 得到了很大的发展。

首先介绍 TS 中的一些相关概念:

1) 移动(move): 按某种规则改变当前变量 X_{cur} 某些位的码, 形成新的变量。不同的移动产生不同

的变量, 一组移动对 X 所产生的所有变量的集合称为 X 的一个邻域 (neighborhood)。一般只从邻域中取出的一个大小为 N_{can} 的样本, 作为候选解集 (candidate)。常用的移动方式有:

a. 单个“移动”(用 m_i 表示):

$$m_i(X_{\text{cur}}) = X_{\text{cur}} + u_i \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

b. 交换“移动”(用 m_{ij} 表示):

$$m_{ij}(X_{\text{cur}}) = X_{\text{cur}} + u_i - u_j \quad (i, j=1, 2, \dots, n \quad i \neq j)$$

这里, n 是变量的编码长度, u_i 是个 n 维向量, 当 X_{cur} 第 i 个元素是 0 (1) 时, u_i 的第 i 个元素分别取 1 (-1), 其它元素取 0, 可见 m_i 对变量第 i 位取反码, m_{ij} 是对变量的 ij 位码互换。

2) 评价函数 (evaluation): 是用于从候选解选取下一当前解的一个评价公式, 一般采用:

a. 目标函数: $F_{\text{eval}}(X) = F_{\text{obj}}(X)$

b. 目标函数的增量: $F_{\text{eval}}(X) = F_{\text{obj}}(X) - F_{\text{obj}}(X_{\text{cur}})$

3) 禁忌表 (Tabu list): 用于存放禁忌对象 (一般为两次迭代解间的移动), 禁忌对象不能参与本次迭代操作。被禁对象不允许选取的迭代次数称为禁忌长度 TL (Tabu length), 其大小直接影响算法的搜索进程和行为。禁忌表存储方式有:

a. 队列方式, 即利用先进先出的方法, 此时禁忌长度就是队列长度。

b. 二维数组存贮, 形如 <禁忌对象, 禁忌次数>, 每次更新禁忌表时, 原有禁忌对象的禁忌次数 - 1, 减后次数为 0 的被新进对象取代, 禁忌长度为数组长度。

c. 动态变化的禁忌表: 根据禁忌对象出现的频率来适当调整禁忌长度。reactive-TS 就是基于这种方法。

4) 藐视准则 (aspiration criterion): 判断候选解是否可以不受禁忌限制的规则, 它的设置使算法避免错失优良解, 激励对优良状态的局部搜索, 进而实现全局优化。常用方法:

a. 基于评价函数值的准则: 当候选解的评价值优于目前最优解, 即使其相应的移动被禁忌, 也可以解禁 (作为下次迭代的当前解)。

b. 基于最小错误的准则: 若候选解集中所有的对象都被禁忌 (通常是禁忌长度过长导致), 而又没有优于目前最优解的元素, 应将评价值最高的对象解禁。

c. 基于影响力的准则: 不同对象的变化对目标值的影响不同 (先要确定一个影响力指标, 不一定

是目标函数的增量), 如果影响力大的对象被禁忌, 应解禁。

5) 终止规则 (terminate criterion): TS 是一种迭代算法, 终止规则是用于判断结束迭代搜索的。常用下列几种:

a. 最大迭代步数准则。即给定一个很大的数, 当迭代次数达到此值, 则终止。这准则简单方便, 但难以保证解的优化效果。

b. 最大频率准则。即给定一个数, 当某一解或目标值出现的频率超过这个给定值时, 迭代终止。

c. 目标值偏离程度准则。即先计算目标函数的上 (下) 界, 当算法中目标值与此下界的偏离值小于某个给定的数时就终止搜索。

因此基本 TS 的思想是: 通过禁忌表标记最近搜索经历的反向移动, 并在下次迭代搜索中尽量避免使用这些移动, 保证了对不同的有效搜索途径的探索。

TS 首先采用随机方法或与问题有关的启发式方法产生一个当前解 X_{cur} 。之后, 采用一组定义的移动 Move 对 X_{cur} 进行操作, 产生一“候选解集” vX_{can} 。在产生的所有候选解中, 评价函数 $F_{\text{eval}}()$ 值最高的且相应移动 Step 不被在禁忌表 $vTabu$ 之列的解被选作为下一次迭代的当前解, 并把此移动的反向移动放进禁忌表以防止短期内来回搜索。当所有的移动对评价函数均无改善时, 采用对评价函数恶化最小的移动作为下一次的搜索方向 (允许退化的搜索是与爬山法最本质的区别, 也是能跳出局部最优的原因)。当出现候选解通过藐视准则 $F_{\text{asp}}()$ 时, 不管其相应移动是否被禁忌, 都应该被选为下一当前解, 从而保证不漏掉更优的解。

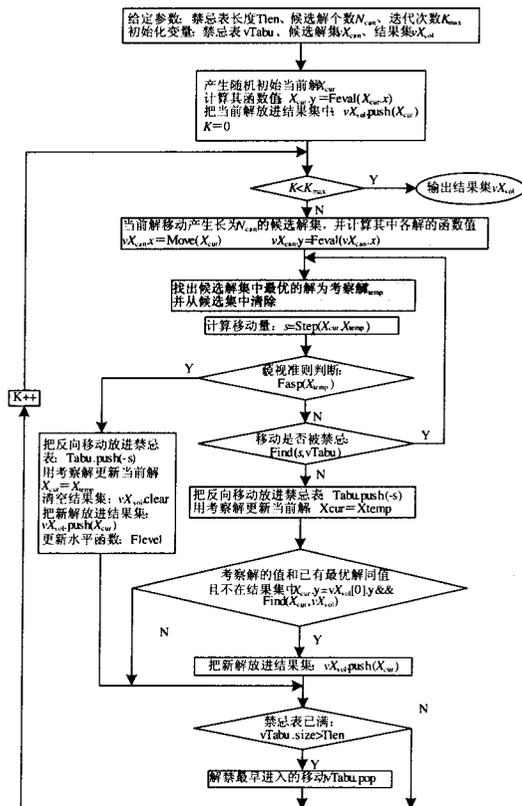
用基本 TS 求解优化问题 $\min f(X)$ (X 为 n 维向量) 的流程见图 1。

基本 TS 思想简单, 但它在一些比较复杂的目标函数, 尤其是一些多极值的函数, 它有时会出现有限局部循环的情况导致找不到所有全局最优解^[11]。针对基本 TS 这一缺陷, 前人已经作了大量的研究和改进^[11-14], 比如文献[11]提出 Reactive-tabu search, 采用了根据目标函数形式动态调整禁忌表大小的方法: 即当解重复出现时增大禁忌表, 在无需大禁忌表的区域缩小禁忌表。另外建立多样化机制, 当系统陷入有限循环时, 则强行执行长期随机漫游另觅新点作为下一搜索点。

由于这些改进的 TS 的搜索机制都比较复杂, 很大程度上是为了加快收敛速度, 确保更多的有效搜索, 为此也牺牲了较多的存储空间和计算机时, 对于一些函数形式相对简单而又要求计算实时性高

的优化问题而言, 采用这种方法无疑有点得不偿失。本文根据地区电网一次接线中目标函数的实际情况对 TS 进行了有效的修改, 试验证明, 修改后的 TS 能够保证搜索到所有的全局最优解, 而且达到计算速度的要求。

如何确定禁忌表的长度 TL 是 TS 的核心问题。如果 TL 太小, 所被禁忌的搜索方向就很有有限, 很可能导致将要执行的移动为刚刚被释放的移动, 这就很可能导致循环搜索。文献[11]指出, 要避免陷入长度为 R 的循环, 必须要求 $TL > R/2 - 1$ 。至于一般 TL 达到多大才能完全避免有限循环, 要视目标函数的形式而定。本文为保守起见防止局部循环, 将 TL 定长一些。但 TL 如果太长, 就会有太多搜索方向被禁忌, 如果采用单步移动的方式得到候选解集, 当 $TL \geq N$ 时 (N 为变量编码的长度), 将可能出现候选解集对应移动全被禁忌的情况。(特别地, 则当 $TL \geq 2N$ 时, 将禁忌所有可能的移动。)这时当候选解集中没有解通过藐视原则, 则下一当前集就不能从候选解集中获得, 继续迭代也是徒劳的。



图注: 采用单个移动, 目标函数为评价函数, 队列存放禁忌表, 基于评价函数值的藐视准则, 最大迭代步数中止。因为优化问题可能存在多个最优解, 所以在迭代过程中采用了一个数组 vX_{soi} 存储。

图 1 基本 TS 的计算流程图

Fig.1 Flow chart for basic TS

为此, 本文就采用了一个简单的跳出全禁忌的方法: 即当候选解中没有解能通过藐视原则且候选解集对应移动全被禁忌, 则重新生产随机解作为下一步迭代解, 并清空禁忌表。即将图 1 的流程略作修改, 把带阴影的模块修改如图 2 所示。

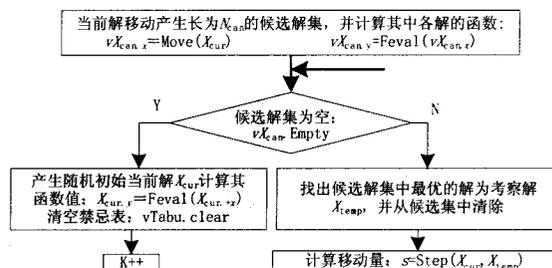


图 2 改进后的 TS 流程

Fig.2 Amendment of basal TS

在迭代次数足够时, 这种方法能找到全部的全局最优解。试验也证明, 这种方法在解决本文中的故障诊断优化问题时是令人满意的。

2 基于 Tabu 算法的求解

通过网络拓扑, 在基于优化技术的诊断计算中, 我们只考虑故障区域中的可疑元件, 通过对可疑元件进行编码, 形成优化算法接受的变量形式, 经过优化算法求出最优解后再解码, 根据码值输出确认的故障元件。诊断模块数据流见图 3。

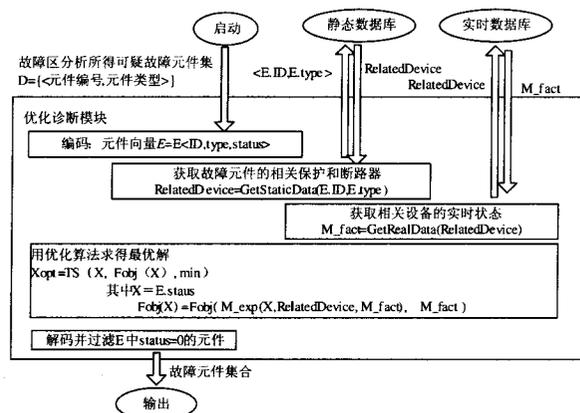


图 3 优化诊断模块示意图

Fig.3 Module of diagnosis basic optimization

编码过程比较简单, 只有将元件依次排列组成故障模式向量 E , 向量元素由元件的编号 (E.ID), 元件类型 (E.type) 和元件的状态 (E.status) 组成。E.status 是用于存放元件假设状态, 0 表示非故障, 1 表示故障, 编码时所有元件状态值为 0。

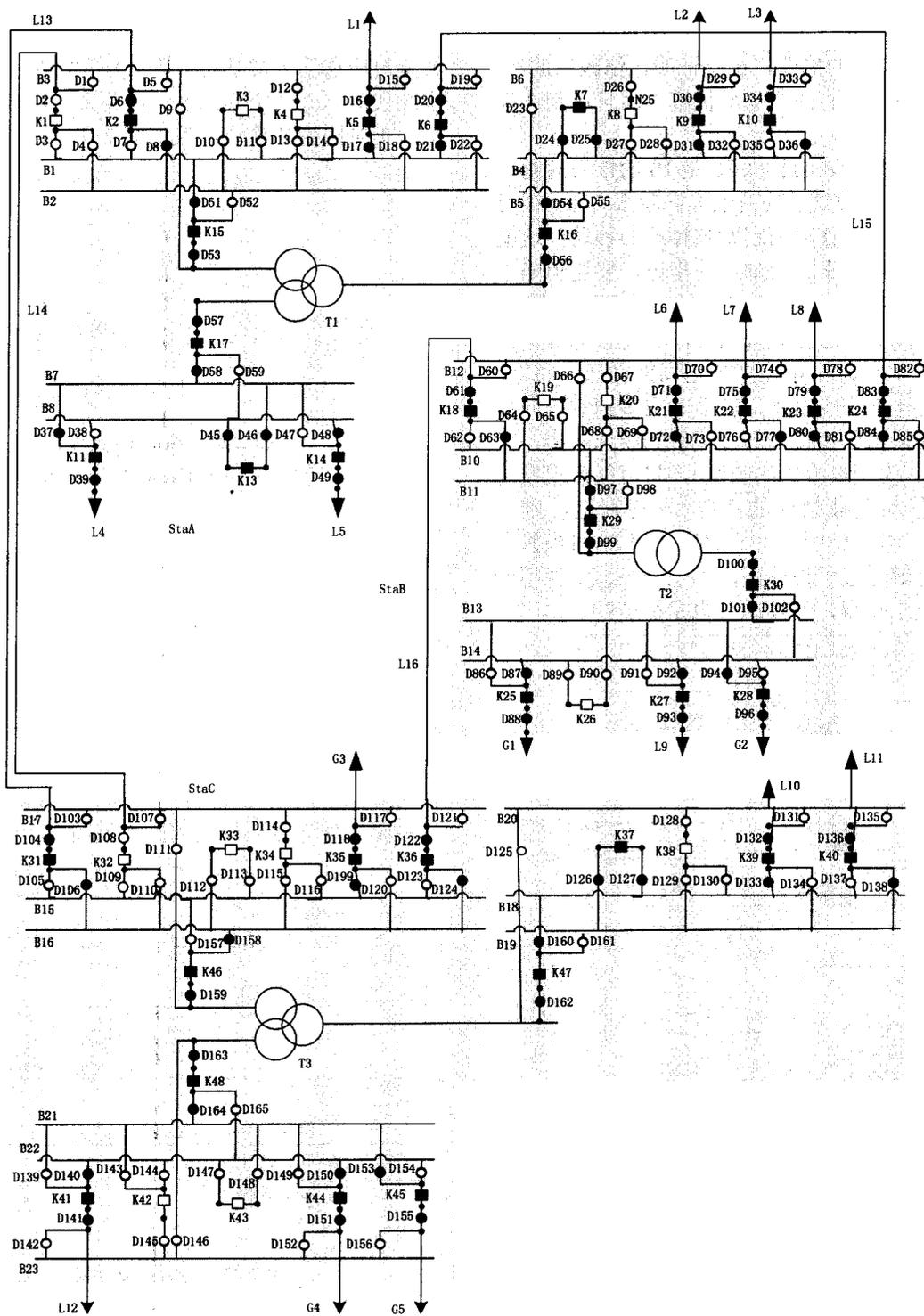


图 4 测试电网

Fig.4 Simplified network for test

基于文献[1]中的目标函数的定义和自动形成过程, 诊断主要是考察这些元件的相关设备在某故

障模式下的期望值是否能合理解释现在的状态, 而非全网所有设备。对于不同的元件集合, 其相关设

备是不同的, 所以优化诊断模块必须要等输入了元件集合才能建立相关联系。对于确定的一个元件集合, 无论其状态值在迭代过程中如何变化, 其计算目标函数所需的关联关系是确定的, 所以在采用优化算法迭代之前, 可以通过 GetStaticData 成员函数从静态数据库获得计算目标函数所需的相关设备 RelatedDevice 确定了目标函数中 M 的组成形式, 并通过 GetRealData 成员函数从动态数据库获得相关设备的实时值。

将故障元件向量的 status 分量作为优化算法的变量 X (故障模式), 在迭代计算过程中, 只有 X 发生改变。经过优化算法迭代后, 可以求出目标函数的最优解 X_{opt} 。最后只要再把 X_{opt} 解码, 则 status=1 的元件定为故障元件。

3 算例

以图 4 的仿真测试电网为例, 对一些典型故障进行了测试, 验证了改进后的方法是可靠有效的。

3.1 仿真测试电网说明

该电网是三变电站系统, 系统内主要接线形式为双母带旁路或双母接线, 是运行方式灵活多变的接线方式。

a) 变电站 A: 由 3 个电压等级组成, 高中压采用双母带旁路接线, 低压采用双母接线, 故障前高压运行方式为双母并列运行, 中压为单母分段运行, 低压采用单母运行 (B8 停运)。

b) 发电厂 B: 由 2 个电压等级组成, 高压采用双母带旁路接线, 低压采用双母接线, 故障前的运行方式均为双母并列运行。

c) 发电厂 C: 由 3 个电压等级组成, 均采用双母带旁路接线, 故障前高/低压侧运行方式为双母并列运行, 中压为单母分段运行。AC 两站通过 L13、L14 相连, AB 通过 L15 相连, BC 通过 L16 相连。故障前 L14 停运。

3.2 仿真计算

在对多种故障模式进行了仿真计算的基础上, 我们选取了一些比较有代表性的故障案例来说明该诊断方法是合理可行的。如表 1 所示。

在测试过程中, 考虑到本系统因简化后所剩元件数目较少, 若再用故障区诊断结果来诊断, 就不能体现优化算法的优势, 所以, 测试案例时故障将疑似故障元件扩充到故障警报信息设备 (保护或断路器) 的所属厂站所有元件。

3.3 算例分析

以上算例分别对电网中发生简单故障, 断路器和保护拒动, 以及误动或部分信息丢失的情况进行

了测试, 皆可以得到正确的诊断结果, 说明本诊断模型具有较好的容错性。

表 1 故障仿真

Tab.1 Fault simulation

故障信息	诊断结果	诊断评价
1. 变压器 T2 主保护 T2m2 动作, K29, K30 跳闸	T2 故障	简单故障, 故障元件的保护和断路器均正确动作, 诊断结果合理。
2. 厂站 A 的线路 L2 的电流二段保护 L2f1 动作, 断路器 K9 跳闸	L2 故障	故障元件的主保护拒动, 后备保护和断路器均正确动作, 诊断结果合理。
3. 厂站 A 的线路 L4 的电流一段保护 L4m2、电流二段 L4f、三段保护 L4s 动作, 母线 B7 的失灵保护 B7mal 动作, 断路器 K11、K13、K17 跳闸	L4 故障	故障元件的保护正确动作, 但断路器拒动, 母线失灵保护动作并相关断路器均正确动作, 诊断结果合理。
4. 厂站 B 的线路 L7 高频保护 L7m1 动作, 线路 L16 的场站 C 侧的距离一段保护 L16am1 保护动作, 断路器 K22, K36 跳闸	L7 故障	故障元件的保护和断路器正确动作, 但相邻线路的保护误动。诊断结果合理。
5. 厂站 AC 的联络线 L13 距离一段 L13am1 动作, 断路器 K2, K31 跳闸。	L13 故障	故障元件的其保护和断路器正确动作, 但线路一侧保护信息丢失。诊断结果合理。

4 小结

本文研究从计算速度和优化效果上考察比较了目前常用的优化算法, 选取了适合本文构造的目标函数的禁忌搜索算法, 并对算法中进行了改进, 使算法更符合优化计算的要求。而且采用模块化设计, 对诊断模块进行整体设计和封装, 使其只要提供了接口信息就可以有效完成诊断功能。最后, 对一个有针对性的模型电网进行测试。测试结果表明本方法是有效的。

参考文献

- [1] 文福拴, 韩祯祥. 基于覆盖集理论和 Tabu 搜索方法的电力系统警报处理 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21(2): 18-23.
WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang. A New Approach to Alarm Processing in Power Systems Based upon the Set Covering Theory and Tabu Search Method [J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(2): 18-23.
- [2] Fukui C, Kawakami J. An Expert System for Fault Section Estimation Using Information from Protective Relays and Circuit Breakers [J]. IEEE Trans on PWRD, 1986, 1(4): 83-90.
- [3] Tanaka H, Matsuda S, Izui Y, et al. Design and

- Evaluation of Neural Network for Fault Diagnosis[A]. In: Proceedings of Second Symposium on Expert System Application to Power Systems (ESAP'89)[C]. Seattle: 1989.378-384.
- [4] Dy Liacco T E, Kraynak T J. Processing by Logic Programming of Circuit-Breaker and Protective-Relaying Information[J]. IEEE Trans on PAS, 1969, 88(2):171-175.
- [5] 文福拴,邱家驹,韩祯祥. 利用断路器信息诊断电力系统故障的高级遗传算法[J]. 电工技术学报, 1994, 11(2):58-64.
WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang, et al. A Refined Genetic Algorithm for Fault Section Estimation Using Information from Circuit Breakers[J]. Journal of Electric Machines and Power Systems, 1994, 11(2):58-64.
- [6] Wen Fushuan, Han Zhenxiang. Fault Section Estimation in Power Systems Using a Genetic Algorithm[J]. Journal of Electric Power Systems Research, 1995,34(3): 165-172.
- [7] Wen Fushuan, Chang C S. A New Approach to Fault Diagnosis in Electrical Distribution Networks Using a Genetic Algorithm[J]. Journal of Artificial Intelligence in Engineering, 1998, 12(1): 69-80.
- [8] 文福拴,韩祯祥,等.基于遗传算法的电力系统故障诊断的解析模型与方法——第一部分:模型与方法[J].电力系统及其自动化学报,1998,10(3):1-18.
WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang, et al. An Analytic Model and Genetic Algorithm Based Method for Fault Diagnosis in Power Systems(1)[J].Proceedings of the EPSA, 1998,10(3):1-18.
- [9] 文福拴 韩祯祥,等.基于遗传算法的电力系统故障诊断的解析模型与方法——第二部分:软件实现[J].电力系统及其自动化学报,1998, 10(3):1-18.
WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang, et al. An Analytic Model and Genetic Algorithm Based Method for Fault Diagnosis in Power Systems(2)[J]. Proceedings of the EPSA, 1998, 10(3):1-18.
- [10] 韩祯祥,钱源平,文福拴. 基于模糊外展推理和 Tabu 搜索方法的电力系统故障诊断[J]. 清华大学学报(自然科学版),1999, 39(3):56-60.
HAN Zhen-xiang, QIAN Yuan-ping, WEN Fu-shuan. Tabu Search Approach to Fault Diagnosis in Power Systems Using Fuzzy Abductive Inference[J]. J Tsinghua Univ (Sci&Tech), 1999, 39(3):56-60.
- [11] Yogendra Kumar, Biswarup Das , Jaydev Sharma. Multi-objective Reactive Tabu Search for Service Restoration in Distribution System[J]. IEE Proc. Generation, Transmission & Distribution.
- [12] Glover F, Memillan C, Novick B. Interactive Decision Software and Computer Graphics for Architerctural and Space Planning[J]. Annals of Operations Research, 1985: 557-573.
- [13] Glover F, Kelly J, Laguna M. Genetic Algorithms and Tabu Search: Hybrids for Opimization[D]. Boulder University of Colorado, 1992.
- [14] Battiti. The Reactive Tabu Search[J]. ORSA Journal on Computing, 1994, 6(2):126-140.

收稿日期: 2007-09-07

作者简介:

李文清(1982-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail:liwqstudent@163.com

刘前进(1967-), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护及电力系统智能控制;

姜伟(1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统故障诊断。

(上接第 51 页 continued from page 51)

- [4] 牛东晓,等. 电力负荷预测技术及其应用[M]. 北京: 电力工业出版社, 1998.

NIU Dong-xiao, et al. Study and Application on Load forecasting[M].Beijing: Electric Power Industry Press, 1998.

- [5] 杨洪明, 段献忠. 电价的混沌特性分析及其预测模型研究[J]. 电网技术, 2004, 28(3): 59-64.

YANG Hong-ming, DUAN Xian-zhong. Research on Chaotic Characteristics of Electricity Price and Its Forecasting Model[J].Power System Technology, 2004,28(3):59-64.

- [6] Han J, Kamber M. Data Mining Concepts and Techniques[M].Beijing: China Machine Press, 2001.

收稿日期: 2007-05-21;

修回日期: 2007-08-08

作者简介:

罗欣(1983-), 女, 硕士研究生, 从事电力市场运营和电价预测方面的研究; E-mail:05121630@bjtu.edu.cn

周渝慧(1955-), 女, 教授, 从事电力市场, 电价分析和电力节能等方面的研究;

郭宏榆(1983-), 男, 硕士研究生, 从事电力市场软件应用及嵌入式系统开发的研究。