

基于禁忌搜索算法的黑启动子系统划分

吴焯¹, 房鑫炎¹, 张焰¹, 袁晓方², 刘俊桃²

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 深圳市贸易工业局, 广东 深圳 518035)

摘要: 系统分区恢复可以大大提高恢复的效率, 缩短电网的恢复时间, 具备一定规模的电网都将子系统的合理划分作为制订黑启动预案的重要组成部分。在子系统划分的目标和原则的基础上, 将节点到黑启动电源之间的恢复路径的重要指标整合为路径评价的权值, 构成赋权网络, 以该路径权值为基础构成禁忌搜索算法的目标函数, 并给出了基于禁忌搜索算法的黑启动子系统划分的程序流程。深圳电网的实例证明该方法进行子系统划分是合理有效的。

关键词: 电力系统恢复; 黑启动; 子系统划分; 禁忌搜索

Tabu search algorithm based black-start zone partitioning

WU Ye¹, FANG Xin-yan¹, ZHANG Yan¹, YUAN Xiao-fang², LIU Jun-tao²

(1. Department of Electric Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Shenzhen Bureau of Trade and Industry, Shenzhen 518035, China)

Abstract: The strategy of partitioning subsystems can increase the efficiency and shorten the duration of power system restoration. Therefore, while making black-start plans, the power grids with large scale all take it as an important element to divide the network into subsystems. Based on the target and rules of zone partitioning, this paper integrates the important indexes of the path between nodes and black-start source, uses them to gain the weights of path assessment and establish the weighted network, builds the target function of Tabu Search algorithm on the basis of the weights of path, and then gives the flow chart of this algorithm. The case of Shenzhen Power Grid proves that this method is reasonable and effective.

This work is supported by Grand Project of National Natural Science Foundation of China(No. 90612018).

Key words: power system restoration; black-start; subsystem partitioning; tabu search

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)10-0006-06

0 引言

电磁环网的分层、解环运行, 是电力系统发展的大势所趋, 但是目前国内的电网大多还做不到这一点。在黑启动过程中, 网架结构比较脆弱, 特别是在给非黑启动电源送启动功率时, 其与黑启动电源之间的距离应越近越好, 之间电压等级变换越少越好^[1], 而在黑启动时, 按照事先确定的方案将电网分层、分区, 每个区域由各自确定的黑启动电源来并行恢复, 可以缩短电网的恢复时间, 同时避免恢复线路过长、长线路带大功率负荷、以及弱联系下的系统振荡问题。

电网黑启动的子系统划分是一个非常复杂的问题, 涉及到地理因素、机组特性、系统稳定等各方

面的问题。因此, 在分析此问题中应首先考虑主要目标, 同时由于系统恢复的特点, 还应综合考虑时间性和安全性。从时间性上考虑, 恢复过程中对恢复时间影响较大的是电厂机组, 因此, 在系统划分时应首先考虑电厂的划分, 尽量保持各子系统的电厂个数大致均匀分布。从安全性上考虑, 各子系统应尽量形成一个空间上比较紧凑的网络, 因为长距离的输电线路会形成较大的充电无功, 导致过电压、自励磁等现象^[2]。

当前各级电网在制定黑启动预案时, 通常会依据实际运行经验从地理上大致划分黑启动区域, 这样就很难保证划分后的系统能在恢复时间和效率方面达到最优。目前针对电网黑启动子系统划分的算法研究较少, 文献[2]采用最小路径法将系统内的电厂分配到各个子系统中, 但是该方法没有考虑负荷的划分。文献[3]提出了基于有序二元决策图的黑启

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(90612018)

动分区策略, 但该方法主要是通过网络拓扑搜索寻求最优解, 而影响恢复路径的因素不仅仅局限于电网结构。

针对当前黑启动子系统划分方法的不足, 本文提出了基于禁忌搜索算法的黑启动子系统划分方法, 综合考虑系统中的黑启动电源、被启动电源以及重要负荷的分布, 用若干重要指标的综合权值将目标电网化为赋权网络, 在此基础上应用禁忌搜索算法对系统进行合理分区, 最后用实际电网的例子证明了该方法合理有效, 且具有较高的实际应用价值。

1 黑启动区域划分的目标与原则

由于电厂中的机组的启动到开始向外输送功率需要一定的时间, 另外, 电厂机组的启动成功也标志着系统中的电源供电能力的恢复, 因此在子系统的划分中可以首先考虑各电厂的划分。从网络重构方面考虑, 一些重要变电站和一类负荷节点也需要优先得到恢复, 可以平衡电厂送出的功率。这样, 子系统的划分就可以理解为已知若干个黑启动电源, 将系统内除黑启动电源外的其他电厂归结到以黑启动电源为代表的各个分组中, 同时将系统内的重要变电站和一类负荷节点也划分到以各黑启动电源为代表的分组中, 即形成几个包含黑启动电源的电厂、变电站和负荷节点分组, 子系统内的黑启动和系统重构均以上述节点为目标节点, 每一分组都可以形成一个黑启动子系统的主网架。待子系统稳定后, 再进一步考虑其他负荷节点的区域划分以及恢复。

在进行黑启动子系统的区域划分时, 需要考虑以下原则^[3-5]:

1) 满足可回溯性。系统恢复的目标是使电网回溯到正常运行状态, 因此, 子系统划分时, 应尽量参照正常运行方式下的电网结构和状态, 避免电网结构的大幅变化。

2) 黑启动能力。每个小系统内必须包含具备自启动能力的机组, 为了保障启动成功的可靠性, 在制定黑启动预案时通常考虑选择水电、燃机等启动可靠性高的机组作为黑启动电源。

3) 发电能力。为了提高各子系统并行恢复的同步性, 减少相邻子系统并网的等待时间, 应使被启动电厂大致均匀分配到各子系统内, 这样也可以保证子系统内有足够的发电机出力, 满足系统调频调压和负荷恢复的需要。

4) 负荷与出力的平衡。子系统内必须包含足够的负荷, 随时保持电厂与负荷之间的功率平衡, 降

低系统并网时造成的冲击。

5) 内部网络紧凑。每个小系统应包含该区域内的重要负荷, 同时在空间上形成结构紧凑的网络, 避免长距离大功率输电。

6) 系统间电气联系少。过多的电气联系会增加系统并网时的不稳定因素, 有可能造成系统震荡等不良后果。

7) 具备并网条件。一般的同期并网点选在电厂出口或系统中同期装置完好的重要变电站。

2 基于禁忌搜索的子系统划分实现

2.1 赋权网络的生成

从宏观上看, 电网就是以电厂、变电站和输电线路形成的网络, 将厂站间的输电线路抽象成弧, 电网就形成一个网络图。由黑启动阶段及系统重构阶段的恢复路径进行分析, 在系统全停后, 从黑启动电源开始启动到某一个电厂可以进行机组启动, 或到某一个变电站、重要负荷得到恢复, 中间要经过若干电厂和电站, 经历一定的时间。对这一路径在耗费时间以及安全性上进行评价, 可以得到一个评价价值, 将数值作为该条路径的权值。这样一来, 路径搜索的结果就结合了对路径的初步评价, 因而更具有现实意义。具体方法如下:

1) 由一个黑启动电源点经过几个中间电站, 启动另一个电厂, 或恢复一个重要节点(变电站或重要负荷), 考虑到时间性和安全性, 其评价指标主要有: (1) 线路长度; (2) 电压转换次数; (3) 中间电站个数。这三个评价指标都是成本型指标, 其值越小越好。

2) 构造指标评价函数。对上述三个评价指标分别赋予权重 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 , 并对评价指标进行无量纲化。假设第 i 个评价指标取值范围为 $d_i = [m_i, M_i]$, 这里将其进行无量纲化的函数见式 (1):

$$r_i(x_i) = \begin{cases} r_i = 0 & (x_i \leq m_i) \\ r_i = \frac{x_i - m_i}{M_i - m_i} & (x_i \in d_i) \\ r_i = 1 & (x_i \geq M_i) \end{cases} \quad (1)$$

这是一个定义在 d_i 上, 值域为 $[0, 1]$ 的线性递增函数, 为了保持函数的连续性, 还给出了定义域外的取值。

3) 黑启动路径的评价函数见式 (2):

$$W = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot r_i(x_i) \quad (2)$$

其中: n 为评价指标个数, 此处等于 3。

对恢复路径进行评价赋值, 网络就形成一个赋权网络, 如果一个节点 M 可以分别划入到几个不同的子系统 S_1, S_2, \dots, S_n 中, 在每个子系统范围内的恢复中, 由黑启动电源到此节点 M 都分别存在一条最优的恢复路径 l_1, l_2, \dots, l_n , 其相应的路径权值为 w_1, w_2, \dots, w_n 。此时, 以各子系统中的所有节点到各自区域黑启动电源的路径长度之和作为禁忌搜索算法的目标函数, 经过迭代得到的最优解就反映出在时间和安全性上达到最优的节点划分结果。

要应用上述路径评估函数, 需要先对几种特殊情况进行设定, 使其满足系统划分的前提:

1) 小系统划分基本上是配合向上恢复策略的选择, 主要针对电网全黑的情况, 此时不考虑区域孤岛启动或大功率支援的联络线启动模式。

2) 若系统中存在小水电、主动解列的非主力机组或联络线提供启动功率的情况, 则在应用评估函数的时候, 需要把首先启动的电厂看作黑启动电源。

3) 若两个具备黑启动能力的电厂距离很近, 可以考虑同时启动, 选择在某一节点并网后再启动其他电源, 此时把并列点作为黑启动电源。

2.2 目标函数与约束条件

电网黑启动的主要目标之一是快速恢复对负荷供电, 减少可能造成的经济损失甚至社会影响, 因此, 时间性是贯穿整个黑启动过程的重点。进行子系统划分的目的也是要通过各子系统的并行恢复来缩短恢复时间, 提高恢复效率。出于这种考虑, 本文在选择目标函数时也把时间性作为首要目标。

上一节给出的路径权值综合了线路长度、电压转换次数和中间变电站个数三个评价指标, 以该路径权值为基础构造目标函数, 既体现了时间性, 又可以在一定程度上兼顾安全性。这里以各子系统赋权网络路径总长度之和作为禁忌搜索算法的目标函数, 如式(3):

$$\min f = \sum_{j=1}^N \left(\sum_{i=1}^{M_j} w_i \right) \quad (3)$$

其中: N 表示可划分的子系统数目; M_j ($j=1, 2, \dots, N$) 表示第 j 个子系统的总节点数; w_i 表示节点 i 与所在子系统黑启动电源之间的最小路径权值。

考虑到路径权值的构成, 该目标函数可反映出期望各子系统结构尽量紧凑, 从而恢复时间尽量短的系统划分目标。

该目标函数需要满足一定的约束条件, 这些约束条件不仅要反映子系统划分原则, 而且考虑到赋权网络的结构, 还要加入一些网络拓扑约束。约束

条件可表示如下^[6-8]:

1) 网络拓扑约束

各子系统的结构均保持辐射状;

每个子系统都是正常运行方式下电网的连通子集;

2) 潮流约束

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j=1}^M V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ Q_i = V_i \sum_{j=1}^M V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_i 为节点 i 的有功注入功率; Q_i 为节点 i 的无功注入功率; V_i 为节点 i 的电压; δ_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的相角; G_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的电导; B_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的电纳; M 为节点 i 所在子系统的节点数。

3) 发电机有功及无功约束

$$\begin{cases} P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \\ Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

4) 节点电压约束

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (6)$$

5) 变压器、线路容量约束。

2.3 禁忌搜索算法的关键参数介绍与选择

禁忌搜索 TS (Tabu Search) 算法是由 F.Glover 在 60 年代末提出的一套优化理论^[9], 模拟人的思维, 即人们对已搜索的地方不会立即去搜索, 而是对其他地方进行搜索, 若没有找到, 可再去搜索已去过的地方。禁忌搜索算法从一个初始可行解出发, 选择一系列的特定搜索方向 (或称为“移动”) 作为试探, 选择实现使目标函数值减少最多的移动。

禁忌搜索算法的关键参数包括适配值函数、禁忌对象、禁忌长度、候选解、藐视准则、邻域函数和终止准则。下面分别简要介绍, 并给出本文中的参数确定方法^[7,10]:

(1) 适配值函数。用于对搜索状态的评价, 进而结合禁忌准则和藐视准则来选取新的当前解。目标函数的任何变化形式都可以作为适配值函数。此处可以将式(3)中的目标函数作为适配值函数, 反映不同节点划分状态存在的差别。

(2) 初始解。与其他智能算法类似, 禁忌搜索算法的初始解通常可以随机生成。但是, 禁忌搜索算法对初始解的依赖性较强, 好的初始解有助于搜

索很快地达到最优解, 而较坏的初始解往往会使搜索很难或不能达到最优解。如果初始解中的元素全部随机生成, 搜索的效率就很难得到保证。

在本文子系统划分的禁忌搜索中, 可以考虑以每个子系统赋权网络中的黑启动电源为起点, 先用深度优先搜索得到距离各黑启动电源较近的节点, 搜索深度可以设置为 2~5, 具体数值视网络规模和结构而定, 将搜索到的节点先划分到相应的子系统中, 剩余没有归属的节点可以在取值范围内随机生成, 这样可以显著地降低邻域中解集的维数, 提高收敛速度。

(3) 禁忌对象。指在禁忌表中那些被禁忌的变化的元素。禁忌的目的是为了尽量避免迂回搜索而多搜索一些有效的路径。禁忌对象可选取状态本身、状态分量和适配值的变化等形式。

第 k 次迭代后, 得到当前解 S_k , 对 S_k 进行邻域搜索后得到若干邻域解。根据藐视准则和禁忌属性得到新的当前解 S_{k+1} 。本文方法比较 S_{k+1} 和 S_k , 将发生变化的状态分量作为禁忌对象。

(4) 禁忌长度。指禁忌对象在不考虑藐视准则情况下不允许被选取的最大次数 (可视对象在禁忌表中的任期)。禁忌长度的取值大小与问题特性和研究者的经验有关, 决定了算法的计算复杂性。本文算法的禁忌长度需根据电网规模适当选取, 取 3~5。

(5) 候选解。从当前状态的邻域中择优选取, 选取的数量即候选解集的大小可视问题特性和对算法的要求而定。有时要做到整个邻域的择优也需要大量的计算, 因此可通过一些确定性或随机性的规则在部分邻域解中选取候选解。

(6) 藐视准则。当出现候选解全部被禁忌, 或者存在一个优于“best so far”状态的禁忌候选解的情况时, 通过该准则使某些状态被解禁, 以实现更高效的优化性能。

(7) 邻域函数。指导如何由一个 (组) 解来产生一个 (组) 新的解。不同的邻域函数将导致邻域解个数及其变化情况的不同, 对搜索质量和效率有一定的影响。假设第 k 次迭代后的解为 $S_k = [s_{k,1}, s_{k,2}, \dots, s_{k,\Omega}]$, 则进行邻域搜索得到的解集合 C_k 就是每一个 $s_{k,j}$ 都在其取值范围内任意变化得到的排列组合。

(8) 终止准则。用来结束算法的搜索进行。常用的终止准则有以下三种方式: 最大迭代步骤准则, 最大禁忌频率准则, 适配值偏离程度准则。这里以最优状态连续 10 次迭代保持不变为终止条件。

2.4 基于禁忌搜索的子系统划分步骤

图 1 给出了子系统划分的禁忌搜索算法程序流程。

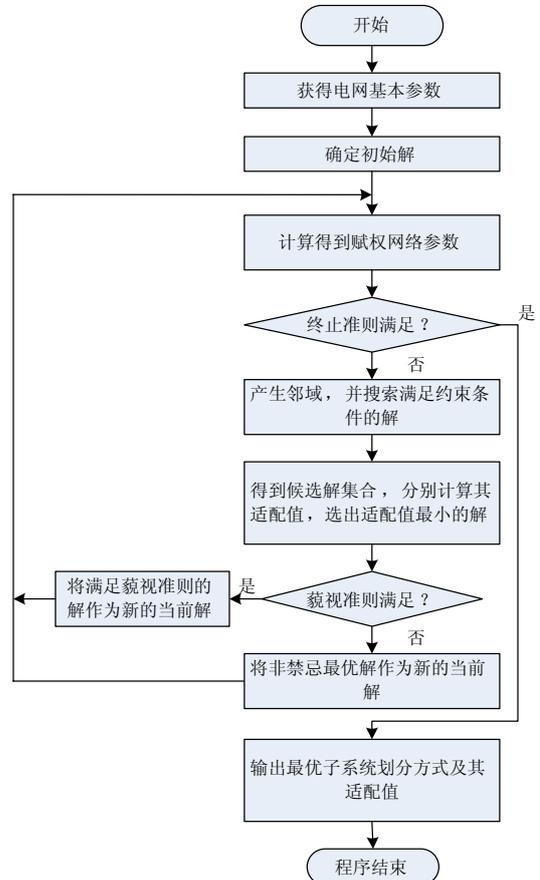


图 1 基于禁忌搜索的子系统划分流程

Fig.1 Flowchart of subsystem division using TS

第一步: 读入电网的原始数据。得到电网的结构参数、禁忌搜索算法的适配函数参数, 将禁忌表置为空。用 f_{optimal} 表示“best so far”, 其初始值取初始当前解的适配值函数。

第二步: 每个子系统黑启动电源进行搜索深度为 3 的深度优先搜索得到的节点划分到对应的子系统中, 其他未划分归属的节点由系统自动生成, 划分结果需满足约束条件。所有节点的状态分量按一定顺序放入初始解 S_1 , 以初始解 S_1 为第一个当前解。

第三步: 计算当前解对应的赋权网络参数, 得到当前解的适配函数值, 判断是否满足终止准则, 若是, 输出最优运行方式及其对应的适配函数; 否则, 执行下一步。

第四步: 对当前解 S_k 进行邻域搜索, 得到邻域解集合 C_k 。将初始解中已经确定归属的节点状态分量维持不变, 随机生成的节点状态分量组成的集合就是邻域解集合的范围。

第五步：确定可行解。符合约束条件的所有邻域解组成候选解集合 D_k 。

第六步：计算各候选解的适配值函数，将候选解集合 D_k 中的所有候选解按照适配值大小进行排序，适配值函数最小者记作 $f^*(d_k)$ ，其对应的邻域解记作 d_k^* 。

第七步：判断是否满足 $f^*(d_k) < f_{optimal}$ 。若是，比较 d_k^* 与 S_k ，将在该次迭代下确定的禁忌对象加入禁忌表中，修改禁忌表中各禁忌对象的禁忌期，令下一次迭代的当前解 $S_{k+1} = d_k^*$ ， $f_{optimal} = f^*(d_k)$ ，返回第三步。否则，转第八步。

第八步：选择非禁忌对象中的最佳候选解记作 d_k^{**} ，并将其加到禁忌表中，修改禁忌表中各禁忌对象的禁忌期，令下一次迭代的当前解 $S_{k+1} = d_k^{**}$ ，返回第三步。

3 算例分析

本文以深圳电网为例，依据前面所分析的子系统划分方法，对电网内的电厂、变电站、一类负荷节点进行划分。

深圳电网地方电厂共有 10 座：月亮湾电厂、南山电厂、美视 A 厂、美视 B 电厂、宝昌电厂，福华德电厂、钰湖电厂、沙井电厂，金岗电厂、葵冲电厂。具备黑启动能力的电厂有月亮湾电厂、南山电厂、宝昌 B 厂、福华德电厂。其中月亮湾电厂与南山电厂距离很近，两个电厂同时启动在白田站并网，根据 2.1 中的前提条件，可以确定黑启动电源点有 3 个：白田站、宝昌 B 厂、福华德电厂。

深圳电网的 220 kV 变电站有 27 座，除此之外，还有一类负荷节点 17 个。

按照黑启动电源点的数目将深圳电网从地理上大致分为三个区域子系统，命名为：西南区域（月亮湾电厂和南山电厂）、宝昌区域、东部区域，每个分区的电厂平均数为 3。

依据 2.4 节第二步的方法确定初始解，并为其中的每个元素赋值，取值范围为 1、2、3，分别代表上述的三个区域的编号。统计每个节点到所在区域的黑启动电源之间路径的评价指标值，用式(1)和(2)对评价指标进行无量纲化，取线路长度指标的定义域为[0, 50]，电压变换次数指标的定义域为[0, 3]，中间变电站个数指标的定义域为[0, 10]，得到子系统划分的赋权网络。

用 C 语言程序实现上述禁忌搜索算法，以最佳

适配值连续 10 次迭代保持不变作为终止准则。结果表明，在 53 次迭代之后，适配值达到最优并保持不变，最优适配值为 23.692，对应的分区结果如表 1~3：

表 1 西南区域分区结果

Tab. 1 Result of Southwest zone

序号	节点	序号	节点	序号	节点
0	白田	7	祥和	14	美视 B 厂
1	欢乐	8	平安	15	莲花山
2	西乡	9	福永	16	车公庙
3	桂庙	10	梅林	17	美视 A 厂
4	翡翠	11	皇岗	18	岗厦
5	五村	12	滨河	19	石厦
6	甲岸	13	景田		

表 2 宝昌区域分区结果

Tab. 2 Result of Baochang zone

序号	节点	序号	节点	序号	节点
0	宝昌电厂	6	清水河	12	田面
1	龙塘	7	象山	13	红岭
2	腾飞	8	中航	14	沙井电厂
3	育新	9	笋岗		
4	公明	10	金岗电厂		
5	奋进	11	上步		

表 3 东部区域分区结果

Tab. 3 Result of east zone

序号	节点	序号	节点	序号	节点
0	福华德厂	6	水贝	12	罗湖
1	葵冲电厂	7	马坳	13	莲塘
2	坪山	8	东湖	14	连城
3	宏图	9	经贸	15	红岭
4	盘古石	10	李朗	16	春风
5	简龙	11	黄贝岭	17	钰湖电厂

从系统的实际结构分析，以上划分结果基本上是合理的。不仅在地理上形成了相对紧凑的网络，而且每个小系统中都包含一定数量的电厂和重要负荷，具备足够的发电能力，有足够的负荷平衡小系统的出力。此外，各个小系统在规模上较为接近，可以有效地降低并行恢复时间，减少并网前的等待时间，有助于系统的快速回复。

4 结语

电网分层分区可以使调度员在任何情况下更加方便地控制潮流，既有利于事故处理，也有利于事

故预案的编制与运行方式的调整; 从电网结构上有利于发现故障, 并有效地隔离故障, 控制事故的波及范围。在发生大的事故时, 保证小系统的安全运行至关重要, 因此, 大停电后系统恢复策略中子系统划分的研究是一个非常有益的课题。本文提出的基于禁忌搜索算法的黑启动子系统划分方法, 在分区的同时兼顾时间性和安全性, 具有较高的实际意义, 可以为制定黑启动预案提供理论依据和决策支持。

参考文献

- [1] 刘艳, 顾雪平, 张丹. 基于数据包络分析模型的电力系统黑启动方案相对有效性评估[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (5): 32-38.
LIU Yan, GU Xue-ping, ZHANG Dan. Data envelopment analysis based relative effectiveness assessment of power system black-start plans[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (5): 32-37.
- [2] 陈立伟. 电力系统黑启动方案的模糊综合评判[D]. 北京: 华北电力大学, 2005.
CHEN Li-wei. Fuzzy comprehensive evaluation for black start schemes of power system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005.
- [3] 刘映尚, 吴文传, 冯永青, 等. 基于有序二元决策图的黑启动分区搜索策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (10): 26-31.
LIU Ying-shang, WU Wen-chuan, FENG Yong-qing, et al. Black-start zone partitioning based on ordered binary decision diagram method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (10): 26-31.
- [4] Huang J A, Audette L, Harrison S. A systematic method for power system restoration planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995,10(2).
- [5] 周云海, 闵勇. 恢复控制中的系统重构优化算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (4): 67-70.
ZHOU Yun-hai, MIN Yong. Optimal algorithm for system reconstruction[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (4): 67-70.
- [6] 魏智博, 刘艳, 顾雪平. 基于DPSO算法以负荷恢复为目标的网络重构[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (1): 38-42.
WEI Zhi-bo, LIU Yan, GU Xue-ping. DPSO algorithm based network reconfiguration of power systems for maximizing load recovery efficiency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (1): 38-42.
- [7] 石晓军. 基于禁忌搜索的配电网大面积断电恢复研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2008.
SHI Xiao-jun. Restoration of large area breakdown for distribution grids based on tabu search algorithm[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2008.
- [8] 葛少云, 刘自发, 余贻鑫. 基于改进禁忌搜索的配电网重构[J]. 电网技术, 2004, 28 (23): 22-26.
GE Shao-yun, LIU Zi-fa, YU Yi-xin. An improved tabu search for reconfiguration of distribution systems[J]. Power System Technology, 2004, 28 (23): 22-26.
- [9] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
WANG Ling. Intelligent optimization algorithms with applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [10] 董百强. 基于禁忌搜索算法的配电网重构研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
DONG Bai-qiang. Study on reconfiguration of distribution network based on tabu search algorithm[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.

收稿日期: 2009-06-30; 修回日期: 2009-09-09

作者简介:

吴焯 (1980-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为人工智能与专家系统在电网灾变恢复中的应用; E-mail: wuyi1110@163.com

房鑫炎 (1963-), 男, 副教授, 主要从事的研究领域包括电力系统继电保护与自动化, 以及专家系统在电网灾变恢复中的应用等;

张焰 (1958-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统规划及电力系统可靠性等方面的教学和研究工作。