

基于 CSP 的配电网大面积断电供电恢复模型和算法

刘 栋, 陈允平, 沈 广, 樊友平, 徐 箭
(武汉大学电气工程学院, 湖北省武汉市 430072)

摘要: 当配电网中发生大规模停电事故时, 必须尽快制定供电恢复计划。文中建立了供电恢复的约束满足问题(CSP)模型。配电网恢复中的各种因素被表示为 CSP 模型中的变量、约束和目标。为提高在线计算速度, 与故障模式无关的计算量被转移到离线方式下进行。同时, 为提高求解效率, 对解空间进行排序, 使给定的目标函数对单个变量具有局部单调性。使用回溯算法对目标函数进行优化。算例结果证明了所提出的方法的可行性和优越性。

关键词: 配电网; 供电恢复; 约束满足问题; 二元约束满足问题; 回溯算法

中图分类号: TM732; TM727.2

0 引言

当配电网发生故障后, 调度员必须确定故障发生地, 隔离故障, 并恢复非故障区的供电。配电网供电恢复是系统恢复中的重要问题, 配电网恢复受接线方式、设备线路参数、负荷预测等因素的影响, 其方案的制定有各种各样的侧重点, 属于一个多目标、组合非线性问题。

一直以来, 配电网发生故障后的恢复问题得到广泛关注和大量研究^[1~13], 使用的模型和算法种类繁多, 例如遗传算法^[1]、Tabu 搜索^[2]、一阶负荷矩法^[3]、专家系统^[4]等。文献[5]提出了待恢复树的概念, 充分利用失电区的网络呈辐射状的特点, 把问题转化为待恢复树切割问题, 降低了问题复杂度。为实现故障处理的闭环控制, 文献[6]提出了在开关拒动的情况下, 对故障隔离和恢复算法的改进。文献[7]介绍了配电管理系统(DMS)故障恢复系统的数据库设计, 把故障恢复问题分解成故障检测、状态分析、方案形成、方案选择、操作序列等若干子问题, 使问题求解过程易于处理和控制在。文献[8]针对配电网中大面积断电, 按照恢复最多负荷提出了一种最少甩负荷和批量转移负荷的策略。文献[9]提出了一种基于图论的方法, 这种算法要求已知在各种运行方式下从所有电源点到每个负荷点的最小路径。文献[10]提出了一种非组合方式的、考虑负荷转移后约束越界减少量和剩余越界量 2 项指标的梯度算法。不同的算法可能会针对不同的目标函数、控制

变量和约束模型, 本文主要针对大规模配电网故障时负荷不能全部恢复的情况进行讨论。

当配电网发生大规模停电故障时, 要求尽快得到一种合理的恢复方案, 因此对模型和算法的效率要求非常高, 相比之下作为基础数据准备的离线计算的效率要求并不太高。以往的模型和算法往往不严格区分数据准备和在线计算, 使得在线计算量很大, 因而影响了算法的实时性。本文提出的基于约束满足问题(CSP)的配电网恢复模型尽可能将与故障模式无关的计算量转移到离线计算并整理, 使用回溯算法对二元 CSP 问题进行求解, 提高了在线计算的效率。

1 基于 CSP 的配电网供电恢复模型

1.1 CSP 的一般描述^[14]

一个 CSP 可以表示为一个三元组: $P=(X, D, C)$, 其中 $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示 n 个变量组成的集合, 每个 x_i 对应一个定义域 D_i , 每个定义域 $D_i=(d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{id})$ 包含有限个元素, 因此 X 的定义域 S_{SO} 是每个变量定义域的笛卡尔乘积的子集: $S_{SO} \subseteq D_1 D_2 \cdots D_n = \prod_{i=1}^n D_i$, 且 S_{SO} 满足约束集 $C; C=\{R_1, R_2, \dots, R_c\}$ 表示具有 c 个元素的约束集, 每个约束是定义在 X 的子集上的某种关系, 关系上的元组表示了合法的变量组合方式。约束可以表示为数学方程或者运算过程来指明对变量的赋值是否合法, 如果约束集只包含单变量约束项和双变量约束项, 则称为二元约束满足问题(binary CSP)。通常的对于二元 CSP 问题的讨论一般是关于如何求解, 本文尝试针对二元 CSP 的优化问题进行探讨。

收稿日期: 2005-09-19; 修回日期: 2005-12-12。
国家自然科学基金资助项目(50477018); 湖北省自然科学基金资助项目(2005ABA289)。

1.2 配电网供电恢复 CSP 模型

图1显示了一个示例配电网结构。配电网恢复的求解过程,即搜索满足配电网运行且使目标函数最大的解向量。配电网恢复问题约束通常包括:①节点电压在允许范围内;②元件负载不超过额定值,即节点潮流在额定范围内;③辐射网方式运行。

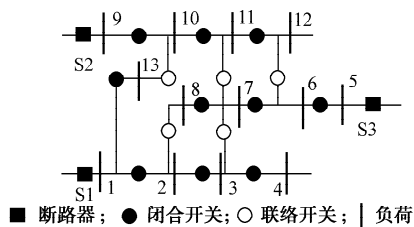


图 1 某配电网结构图

Fig. 1 Example of a distribution system

本文将联络元件(指正常运行的能够加载故障区域负荷的元件,例如联络馈线、联络开关等)作为变量,每个变量的取值范围为每个联络元件能够加载负荷的方式。按照 CSP 模型, X 代表联络元件集, D_i 是元件 i 加载负荷的方式集,其中每种加载负荷的方式可采用以负荷为节点、开关为边的负荷树表示。约束①,②可以在单独的变量 x_i 的定义域内部校验并满足,即联络元件的每种运行方式均必须满足电压和电流约束,如对于图 1 中的断路器 S2,可能的加载负荷方式有 $\{(9,10,11,12), (9,10,11), (9,10), (9,10,13), (9,10,13,1), (9), \dots\}$, S1 的加载负荷方式有 $\{(1,2,3,4), (1,2,3), (1,2), (1,2,8,7), (1,2,8), (1), (1,13), (1,13,10), (1,13,10,9), (1,13,10,11), \dots\}$, X 包含 4 个元素 $\{S1, S2, S3, S4\}$ 。

约束③等价于每个负荷节点均由 1 个电源点供电,其形式可以表示为某 2 个变量的某 2 个取值是否冲突。如果馈线 1 和馈线 2 各自加载的负荷中包含了同一个负荷,则必然构成环网,不满足约束。这样可以用只含 0-1 元素的邻接矩阵表示 2 条馈线加载负荷方式之间的约束关系,这种二进制形式在计算机中存储和计算是非常理想的。

配电网供电恢复问题的可行解集 S_{SO} 就是每个联络元件加载负荷的方案集的笛卡尔乘积的子集, 即 $S_{SO} \subseteq \prod_{i=1}^n D_i$, 且 S_{SO} 满足约束集 C 。目标函数 f 是将 S_{SO} 映射为实数的函数, 假定目标函数取最大值。如果对于目标函数(如恢复最多负荷)有:

$$f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n f(x_i) \quad (1)$$

即目标函数可以分解为对每个变量的目标函数值的

线性叠加,则易于将目标函数分解为单个变量的优化问题。

引理 1 对于 2 个 n 维解向量和 $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in S_{S_0}$ 及满足式(1)的目标方程 f , 如果对于 $i \leq n$, 有 $f(x_i) \leq f(y_i)$, 则易知 $f(\mathbf{x}) \leq f(\mathbf{y})$ 。

因此,可以在 D_i 集合的内部进行局部排序,使生成的 x_i 的取值序列对于目标函数具有局部单调性。更进一步,如果对于解向量 $\mathbf{x}$ 的 2 个分量有 $\max f(x_i) \geq \max f(x_j)$,则一般认为 x_i 对于目标函数的贡献很可能比 x_j 更大,这样有助于优化变量集赋值的顺序,这是很多启发式算法的理论依据。

2 基于 CSP 模型的配电网恢复优化算法

2.1 生成基础数据(离线计算部分)

本文考虑供电恢复的目标方程为恢复最多负荷(或用负荷最少):

$$f_{\text{ob}} = \max \sum_{i=1}^n f(x_i)$$

式中: n 为联络元件数; $f(x_i)$ 为计算元件 i 加载负荷量的函数。

1) 变量集为可提供电源的联络元件。

2) 对于每个变量 x_i , 定义域为其对应联络元件加载负荷的方式。对于每个变量的定义域 D_i 的所有元素, 按照目标函数排序, 即保证 $f(d_{i1}) \leq f(d_{i2}) \leq \dots \leq f(d_{il})$; 按照一定的次序将可用馈线编号, 比如按照各馈线最大运行方式 $\max f(x_i)$ 从大到小排序生成变量序列。如果 2 种加载负荷方式中加载的负荷相同但接线方式不同, 由于这 2 种方式对于目标函数的贡献相同, 暂认为是一种方式。

3) 约束集合主要表示二元约束, 可以表示为 $\{\mathbf{R}_{ij}, i, j=1, 2, \dots, n\}$, 元素 $\mathbf{R}_{ij}$ 表示联络元件 i 和联络元件 j 取值的约束关系, $\mathbf{R}_{ij}$ 可以表示为邻接矩阵的形式, 即

$$\mathbf{R}_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11}, a_{21}, \dots, a_{1n} \\ a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2n} \\ \vdots \\ a_{m1}, a_{m2}, \dots, a_{nm} \end{bmatrix}$$

式中:

$$\begin{cases} a_{uv} = 0 & \text{当变量 } x_i \text{ 的第 } u \text{ 个取值与变量} \\ & x_j \text{ 的第 } v \text{ 个取值冲突时} \\ a_{uv} = 1 & \text{当变量 } x_i \text{ 的第 } u \text{ 个取值与变量} \\ & x_i \text{ 的第 } v \text{ 个取值不冲突时} \end{cases}$$

比如当元件 i 采取方式 u 和元件 j 采取方式 v 构成环网时(2 种方式包含了相同的负荷),意味着变量 i 和变量 j 取值冲突。显然, $\mathbf{R}_{ij} = \mathbf{R}_{ji}^T$, 只可存储 $i < j$ 的约束矩阵。

联络元件的加载负荷方式数量受以下主要因素影响:线路分段负荷的大小、线路分支的数量和分支点位置。为了减少变量的定义域大小,可采用以下规则除去不合理的方式。

1) 设定联络元件的最小加载负荷量,对于线路分段负荷较小的情况,一般可设定为元件容量的4/5以上。

2) 如果某种加载方式形成的负荷树包含无联络开关的支路,则在满足约束的条件下尽量多加载无联络开关的支路的负荷。

以上生成基础数据一般不会频繁变动,因此可以离线计算。生成联络元件的所有加载负荷方式的算法类似于简单遍历一棵树中所有含根节点的子树的问题,遍历中必须满足元件容量约束和节点电压约束。就国内一般情况而言,每条馈线加载负荷的数量多数不超过10个分段,分支数量不超过4个(指含联络开关的分支),经作者验算其全部加载负荷方式在300种左右,这时可以限定加载负荷必须占馈线容量4/5以上,大约有150种,其余方式基本可以排除最优解的范围,这种情况下枚举联络元件的加载负荷方式是可行的。对于联络开关作为变量的情况,由于其容量更小,其加载负荷方式更少。

2.2 搜索最优解(在线计算部分)

1) 故障发生后,首先进行故障隔离,使得有些开关必须断开。由此会导致某些负荷受网络拓扑限制无法恢复。设故障区的负荷集为 L ,则依次与每条可用馈线的每个负荷加载方式求交集,交集不为空则删除该方式。每个变量的定义域 D_i 均采用二进制数字表示,二进制数字的位数为变量 x_i 的定义域元素个数,当第 m 位为1时表示第 m 个数值可取,为0时表示不可取。置当前目标函数最大值 $f_{\max}$ 为0。对于所有 $i \leq n$,保存 D_i 到 D_{st} 。

2) 设 $i=1$ 。

3) 对所有 $j < i$,根据 x_j 的取值来对 x_i 的定义域进行缩减,即对于所有 $j < i$, $D_i = D_i \wedge R_{ij} \cdot *k$,其中 x_j 取值为 d_{jk} , $R_{ij} \cdot *k$ 表示矩阵 $\mathbf{R}_{ij}$ 的第 k 列。

4) 从 x_j 定义域内取第1个可取值(设为 d_{jk}),给 x_i 赋值,进行前向检查(forward checking)^[14]并计算当前目标函数值 f_i 。

5) 如果步骤4不成功,则调用步骤8。

6) 如果 $i=n$,即变量赋值完毕,则判断 f_i 是否大于当前的目标函数的最大值 $f_{\max}$,是则更新当前最大值 $f_{\max} = f_i$,并记录当前最优解向量。然后调用步骤8。

7) 设 $i=i+1$,转步骤3。

8) 回溯过程:恢复 D_i 为 D_{st} ,按冲突引导回溯

算法(conflict-directed-backjumping)^[14]进行回溯,计算 f_i 。假定 x_i 现在的值为 d_{ik} ,则从 D_i 中搜索第 k 个取值之后的第1个可取值赋值给 x_i ,并返回调用处;如果找不到则继续回溯。当 $i=0$,或计算时间超时,取当前最优解为计算结果。

文献[14]给出了各种回溯算法的测试算例,其中有3个算例的变量数为1000个,每个变量的取值范围为3个,搜索解空间用时均小于1s。而大多数配电网中馈线数不多于15个,每条馈线的加载负荷方式不多于200种,这种规模相对来说要小很多。

2.3 算法的存储量估计

将在线计算中的部分计算量转移到离线状态下整理需要注意2个问题:①存储容量可行;②检索基础数据的速度大于计算基础数据的速度。假定某配电网含有100条馈线,每条馈线加载负荷方式有100种,假定约束矩阵不采用稀疏矩阵存储,则约束矩阵数量为 $100 \times 99/2$,每个约束矩阵的存储空间为 $100 \times 100/8 = 1250$ (1字节是8位),则存储约束矩阵的容量最大为7.75 MB,假定存储每种加载负荷方案需要1 kB,则存储所有馈线加载负荷方案需要 $100 \times 100 \times 1 \text{ kB} = 10 \text{ MB}$ 。可见,对于这种规模的配电网,普通PC机的内存容量就可以满足要求。另外,将电流、电压约束在离线状态下校验,明显可以减轻在线计算中的计算量。

3 算例

3.1 算例1

图2为文献[8]使用的算例,在本文中将负荷重新编号,括号内为馈线段上的负荷大小,单位为A,负荷进行编号标识在负荷大小旁边。假设母线101故障,断路器S1和S2断开,需要将负荷转移到S3, S4, S5, S6上。每条馈线的容量为300 A。根据以上所述算法,变量集为 $\{S3, S4, S5, S6\}$ 。当仅考虑馈线加载负荷量小于其额定容量这一约束时, S3的定义域 D_1 为 $\{(8, 7, 5, 4, 6), (8, 7, 5, 4, 3), (8, 7, 5, 4), (8, 7, 5, 6), (8, 7, 5), (8, 7), (8)\}$,已按目标函数值排序,目标函数值依次为267 A, 265 A, 226 A, 222 A, 181 A, 135 A, 65 A。S6的定义域 D_2 为 $\{(21, 24, 26, 3, 2), (21, 24, 26, 3, 4), (21, 24, 25, 26), (21, 24, 26, 3), (21, 24, 25), (21, 24, 26), (21, 24), (21)\}$,目标函数值依次为289 A, 288 A, 271 A, 243 A, 205 A, 204 A, 138 A, 76 A。由S1, S3, S6构成的连通系只有这2条馈线可以进行负荷转移,因此约束网络中只含有1个约束邻接矩阵 $\mathbf{R}$ 。由于 $d_{11} = (8, 7, 5, 4, 6)$ 和 $d_{21} = (21, 24, 26, 3, 2)$ 不包含相同的负荷,所以 $R_{11} = 1$,同理可得其他约束

矩阵元素, $R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ \vdots & & & & & & \end{bmatrix}_{7 \times 8}$ 。按

照本文算法,首先给 S3 赋值为第 1 个方式(8,7,5,4,6),由于该矩阵左上角元素值为 1,这表示 2 条馈线在最大负荷方式下不冲突,所以 S3 和 S6 均可以采取最大加载负荷方式。

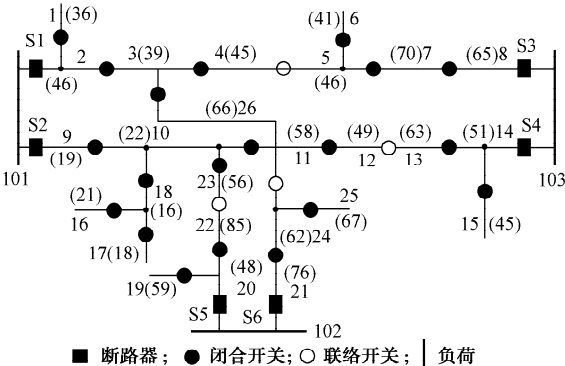


图 2 示例故障配电网接线
Fig. 2 Example of faulty distribution network diagram

同样,对于 S2,S4,S5 构成的连通系,S4 的定义域为{(14,13,12,11,10,23),(14,13,12,11,10,9,18,16),(14,13,12,11,10,18,16,17),...},大小为 19 个;S5 的定义域为{(20,19,22,23,10,9),(20,22,23,10,9,11),...},大小为 22 个,约束邻接矩阵

$R = \begin{bmatrix} 00000 & 00000 & 00000 & 00101 & 11 \\ 00000 & 00000 & 10000 & 00111 & 11 \\ 00000 & 00000 & 10000 & 00111 & 11 \\ 00000 & 00000 & 10000 & 00111 & 11 \\ 00000 & 00000 & 10000 & 00111 & 11 \\ 00000 & 00000 & 10000 & 00111 & 11 \\ 00000 & 00000 & 10000 & 00111 & 11 \\ 00000 & 00000 & 10000 & 00111 & 11 \\ 10101 & 10101 & 11111 & 11111 & 11 \\ \vdots & & & & \end{bmatrix}_{19 \times 22}$

易知在同一行上,位于左边的解优于右边的解;在同一列上,位于上边的解优于下边的解,即只需验证该矩阵中的左上方子阵为 0 阵的 1 元素代表的方式。对于以上的约束矩阵,在线计算时只需验证 3 种情况:S4 采用方式 1(299 A)和 S5 采用方式 18(192 A),S4 采用方式 2(299 A)和 S5 采用方式 11(248 A),S4 采用方式 9(266 A)和 S5 采用方式 1(289 A)。可以看出,由于使用本文的模型,原本搜索域大小为 19×22 的空间只需要遍历 9 个样本,验证 3 种情况即可得到最优解。最后得到优化的恢复方案为:S4 加载负荷 14,13,15,12,11;S5 加载负

荷 20,19,22,23,10,9。

3.2 算例 2

图 3 显示了一个更为复杂的配电网。该配电网中有 67 个馈线分段、79 个开关、12 条馈线、4 个变电站母线。假定母线 A 发生故障,母线 A 上的 4 条馈线跳闸。由此导致的失电负荷需要转移到其他 8 条馈线上。假定每条馈线的容量均为 300 A。为了提高搜索效率,限定每条馈线的每种负荷加载方式都必须大于 230 A,由此生成的每条馈线的负荷加载方式平均为 80 种。整个搜索过程使用 15 ms 搜索到最优解。

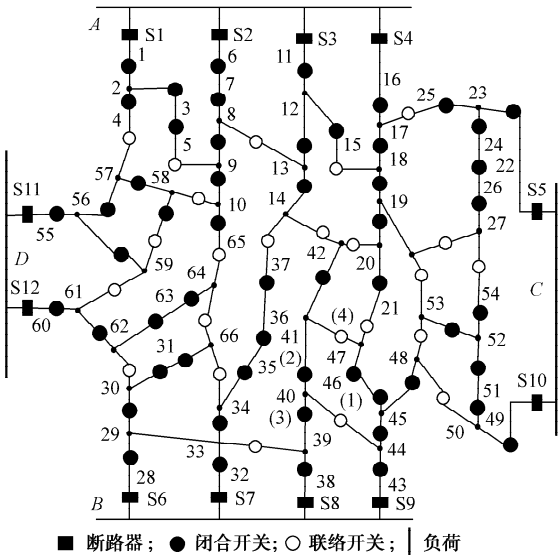


图 3 配电网恢复算例 2
Fig. 3 Sample 2 of the distribution restoration

4 结语

配电网供电恢复算法实时性要求很强,算法的快速性必须得到保证。本文提出的算法尽可能将计算过程中使用的与故障形式无关的基础数据在离线状态下计算和整理,将每个变量的定义域按目标函数值进行排序获得局部单调性以提高搜索效率,应用动态智能回溯算法进行目标函数的优化。其中在线运算部分大多是根据 0-1 约束关联矩阵的运算,大多使用二进制的数据进行存储和逻辑运算,效率比浮点运算更高。算例证明了本算法的可行性和优越性。

参考文献

[1] 盛四清,梁志瑞,张文勤,等. 基于遗传算法的地区电网停电恢复. 电力系统自动化,2001, 25(16): 53—55.
SHENG Si-qing, LIANG Zhi-rui, ZHANG Wen-qin et al. Fault Restoration of Distribution Network Based on Genetic Algorithm. Automation of Electric Power Systems, 2001,

- 25(16): 53—55.
- [2] 李海峰, 张尧, 钱国基, 等. 配电网故障恢复重构算法研究. 电力系统自动化, 2001, 25(16): 34—37.
LI Hai-feng, ZHANG Yao, QIAN Guo-ji et al. Study on the Algorithm for Service Restoration Reconfiguration in Distribution Networks. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(16): 34—37.
- [3] 杨明皓, 黄单舸. 配电网供电恢复决策的实时计算方法. 电力系统自动化, 2000, 24(5): 45—48.
YANG Ming-hao, HUANG Dan-ge. A Real-time Algorithm of Power Service Restoration for Power Distribution Networks. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(5): 45—48.
- [4] 葛朝强, 唐国庆, 王磊. 综合智能式的故障恢复专家系统与故障恢复算法集相结合的自学习模糊专家系统. 电力系统自动化, 2000, 24(2): 17—21.
GE Zhao-qiang, TANG Guo-qing, WANG Lei. Integrated Intelligent Service Restoration System for Distribution Network—An Auto-learning Fuzzy Expert System Combined with Service Restoration Algorithm Set. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(2): 17—21.
- [5] 吴文传, 张伯明. 基于待恢复树切割的配电网故障恢复实时算法. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 50—54.
WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming. A Candidate Restoring Tree Cutting Based Algorithm for Real-time Distribution System Restoration. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 50—54.
- [6] 蔡乐, 邓佑满, 朱小平. 改进的配电网故障定位、隔离与恢复算法. 电力系统自动化, 2001, 25(16): 48—50, 61.
CAI Le, DENG You-man, ZHU Xiao-ping. An Improved Algorithm of Fault Location Isolation and Restoration for Distribution Systems. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(16): 48—50, 61.
- [7] 陈竟成, 徐德超. 于尔铿. 配电网故障恢复系统. 电力系统自动化, 2000, 24(4): 46—51.
CHEN Jing-cheng, XU De-chao, YU Er-keng. Distribution Fault Detection Isolation and Restoration System in a Distribution Management System. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(4): 46—51.
- [8] 刘健, 徐精求. 紧急状态下配电网大面积断电快速恢复算法. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 132—138.
LIU Jian, XU Jing-qiu. Algorithms on Fast Restoration of Large Area Breakdown of Distribution Systems Under Emergency States. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 132—138.
- [9] DIALYNAS E N, MICHOS D G. Interactive Modeling of Supply Restoration Procedures in Distribution System Operation. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(3): 1847—1854.
- [10] AOKI K, NARA K, ITOH M et al. A New Algorithm for Service Restoration in Distribution Systems. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(3): 1832—1839.
- [11] 杜红卫, 孙雅明. 可靠性知识与最优评估配电网故障恢复(一) 解集构造. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 32—36.
DU Hong-wei, SUN Ya-ming. Fault Service Restoration for Distribution Networks Based on the Combination of Reliable Knowledge and Optimum Evaluated Model, Part One: Construction of Decision-making Solving Set. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 32—36.
- [12] 孙雅明, 杜红卫. 可靠性知识与最优评估配电网故障恢复(二) 最优评估. 电力系统自动化, 2003, 27(13): 36—39, 53.
SUN Ya-ming, DU Hong-wei. Fault Service Restoration for Distribution Networks Based on the Combination of Reliable Knowledge and Optimum Evaluated Model, Part Two: Optimum Evaluated Model. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(13): 36—39, 53.
- [13] 颜萍, 顾锦炎, 张广. 一种快速高效的配电网供电恢复算法. 电力系统自动化, 2000, 24(4): 52—56.
YAN Ping, GU Jin-wen, ZHANG Guang. A Fast Efficient Service Restoration Method for Distribution Network. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(4): 52—56.
- [14] DECHTER R, FROST D. Backjump-based Backtracking for Constraint Satisfaction Problems. Artificial Intelligence, 2002, 136(2): 147—188.

刘 栋(1979—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统随机问题及随机控制、配电网重构及恢复. E-mail: wanderld@163.com

陈允平(1945—), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为电力系统继电保护、电力电子技术、电力系统运行与控制等。

沈 广(1974—), 男, 博士研究生, 工程师, 从事电力系统恢复方向研究。

CSP-based Model and Algorithm of Service Restoration for Large Area Blackout of Distribution System

LIU Dong, CHEN Yun-ping, SHEN Guang, FAN You-ping, XU Jian

(Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In the event of a large-scale blackout in a distribution network, a service restoration plan must be devised quickly. This paper proposes a Constraint Satisfaction Problem (CSP) based model to solve the problem. The factors considered in the service restoration plan are represented as variables, constraints and objective in terms of CSP. To speed up the online calculation, much quantitative calculation unrelated to the fault mode is performed offline. At the same time, the solution space is sorted out to improve the efficiency of problem solving so that the given objective function will be partially monotonic with respect to an individual variable. A backtracking algorithm is then employed to solve the CSP. Finally, an example result indicates the feasibility and superiority of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50477018) and Natural Science Foundation of Hubei Province (No. 2005ABA289).

Key words: distribution network; service restoration; constraint satisfaction problem; binary CSP; backtracking algorithm