

电力系统故障诊断的机会约束规划模型与方法

董 明¹, 韦刘红², 文福拴¹, 戴 彦³, 孙维真³, 王 超³

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510640;
3. 浙江电力调度通信中心, 浙江省杭州市 310007)

摘要:以现有的电力系统故障诊断解析模型为基础,引入机会约束规划来处理故障诊断过程中可能出现的保护/断路器拒动或误动、警报漏报或误报等不确定情况,提出了电力系统故障诊断的机会约束规划模型与方法,并采用基于蒙特卡洛仿真的遗传算法进行求解。该模型充分考虑了诊断过程中不确定性因素出现的可能性,能够适当处理保护/断路器拒动或误动、警报漏报或误报等情况,具有较强的容错能力。最后,用实际电力系统发生过的故障案例对所发展的解析模型和方法进行了仿真测试,得到了与实际故障情况一致的结果,且计算速度满足在线应用的要求。

关键词:电力系统;故障诊断;机会约束规划;解析模型

0 引言

准确而快速的电力系统故障诊断对事故后快速恢复供电和维持系统安全稳定运行具有重要意义。到目前为止,国内外很多专家学者在这一领域已经做了大量的研究工作,提出了多种故障诊断的方法,如专家系统^[1-2]、解析模型方法^[3-8]、人工神经网络^[9]、模糊集^[10]、Petri 网^[11-12]、多代理系统(MAS)^[13]、数据挖掘技术^[14-15]、波形匹配^[16]和贝叶斯网络^[17]等。从总体上讲,在现有的这些方法中,只有解析模型方法和专家系统方法达到了实用化的水平。

基于解析模型的电力系统故障诊断方法的基本思想是:首先识别停电区域,故障元件应该局限于停电区域之内;之后,将停电区域内的所有一次设备的不同组合作为故障假说,利用收到的保护和断路器动作信息,采用优化算法求解反映保护和断路器实际状态与期望状态间差异最小化这一优化问题,如此得到的最优解所对应的故障假说就是故障诊断结果。电力系统故障诊断问题的解析模型可以描述为无约束 0-1 整数规划问题,数学基础严密,当存在少量漏报或误报的警报时一般也能得到正确的诊断结果。以文献[3-4]为基础,文献[8]系统地计及了保护和断路器发生误动与拒动的可能性,对原有的故障诊断解析模型做了重要的发展,所构造的新模型不仅能够诊断出故障设备,还可以识别出误动或拒

动的保护和/或断路器以及漏报或误报的警报。但文献[8]没有考虑保护和断路器动作的可靠性。

要全面而系统地解决电力系统故障诊断问题,就需要适当考虑保护/断路器误动和拒动、警报误报和漏报等情况,而这些情况发生与否是不确定的。这样,在构造电力系统故障诊断的数学模型框架时,应该最大限度地容纳故障诊断过程中可能遇到的各种不确定性因素,才能得到更准确的故障诊断结果。

机会约束规划(chance-constrained programming, CCP)是随机规划的一个重要分支,其将不确定因素模拟成随机变量的形式,为求解包括不确定性因素的优化问题如电力系统故障诊断问题提供了新途径。在此背景下,基于现有的电力系统故障诊断解析模型,本文引入 CCP 方法,对故障诊断中的不确定因素进行模拟,即将保护/断路器的误动和拒动、警报的误报和漏报等情况模拟成随机变量,构建了基于 CCP 的电力系统故障诊断的新的解析模型,并采用了基于蒙特卡洛仿真的遗传算法来求解。这种模型充分考虑了故障诊断问题中的各种不确定性因素,从理论上保证了方法的容错能力。

1 CCP

CCP 是随机规划的重要分支^[18],其主要针对规划问题的约束条件中含有随机变量,且必须在观测到随机变量的实现之前做出决策的情况。考虑到所做决策在某些情况下可能不满足约束条件,采用该方法时通常采取如下原则:允许所做决策在一定程度上不满足约束条件,但该决策应使约束条件成立的概率不小于某一事先给定的置信水平。目前,该方法已经应用于电力系统的多个领域^[19-29]。CCP

收稿日期:2010-11-19;修回日期:2011-01-18。

国家科技支撑计划资助项目(2008BAA13B10);浙江省电力公司科技项目。

的数学模型可表示为:

$$\begin{cases} \min \bar{f} \\ \text{s. t. } P_r\{f(x, \xi) \leq \bar{f}\} \geq \beta \\ P_r\{g_j(x, \xi) \leq 0, j = 1, 2, \dots, p\} \geq \alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_r\{\cdot\}$ 为集合中事件成立的概率; α 和 β 分别为事先给定的约束条件和目标函数的置信水平; \bar{f} 为目标函数 $f(x, \xi)$ 在置信水平为 β 时所取的最小值。

2 基于 CCP 的故障诊断模型

2.1 不确定性因素的模拟

大多数不确定性因素可以采用概率方法(如概率密度函数)来模拟,其参数可基于历史数据和设备的运行情况等信息经综合分析和估计来确定。前已述及,在电力系统故障诊断问题中,保护和断路器可能正常动作、拒动或误动,而由于设备和通信的原因,警报也可能漏报或者误报,这 2 类情况都是不确定的。因此,这里把保护和断路器的拒动或误动、警报的漏报或误报作为不确定因素进行处理。需要指出的是,对于其他类型的不确定性因素,也可参照下述方法类似处理。

保护/断路器误动的前提条件是保护/断路器处于不期望动作状态,而拒动的前提条件是保护/断路器处于期望动作状态。在这些前提条件下的误动和拒动分别用离散概率分布描述。设第 i 个保护发生误动($m_i=1$)的概率为 p_{m_i} ,拒动($f_i=1$)的概率为 p_{f_i} 。同理,设第 j 个断路器发生误动($m_j=1$)的概率为 p_{m_j} ,拒动($f_j=1$)的概率为 p_{f_j} 。

类似地,与保护/断路器相对应的警报误报的前提条件为警报的期望状态是不报(即警报不出现),漏报的前提条件为警报的期望状态是报警(即出现警报),对在这些前提条件下的误报和漏报分别进行离散概率分布处理。设第 i 个保护发生误报($w_i=1$)的概率为 p_{w_i} ,漏报($l_i=1$)的概率为 p_{l_i} 。同理,设第 j 个断路器发生误报($w_j=1$)的概率为 p_{w_j} ,漏报($l_j=1$)的概率为 p_{l_j} 。

2.2 基于 CCP 的故障诊断数学模型

设停电区域内有 n_d 个设备,所配置的保护有 n_r 个,故障发生前与这些事后停电的设备相连接的所有断路器共有 n_c 个。由于保护和断路器动作警报与保护和断路器一一对应,故相应的保护和断路器动作的警报个数分别为 n_r 和 n_c 。

在故障诊断的过程中,保护和断路器的期望状态与实际状态之间的差异可以表示为:

$$\sum_{i=1}^{n_r} |r_i - r_i^*(\mathbf{H})| + \sum_{j=1}^{n_c} |c_j - c_j^*(\mathbf{H})| \quad (2)$$

式中: $\mathbf{H}=[\mathbf{D}, \mathbf{F}, \mathbf{M}, \mathbf{L}, \mathbf{W}]$ 为故障假说; $\mathbf{D}=[d_1, d_2, \dots, d_{n_d}]$, $d_i=1$ 或 $d_i=0$ 分别表示停电区域内的第 i 个设备处于故障或正常状态; $\mathbf{M}=[m_i, m_j]$, 为保护和断路器误动的随机向量; $\mathbf{F}=[f_i, f_j]$, 为保护和断路器拒动的随机向量; $\mathbf{L}=[l_i, l_j]$, 为警报漏报的随机向量; $\mathbf{W}=[w_i, w_j]$, 为警报误报的随机向量; $i=1, 2, \dots, n_r$; $j=1, 2, \dots, n_c$; r_i 和 $r_i^*(\mathbf{H})$ 分别为保护的实际情况和最终期望状态; c_j 和 $c_j^*(\mathbf{H})$ 分别为断路器的实际情况和最终期望状态。

诊断结果应该为使式(2)中差异度最小的故障假说。当存在多个假说同时使得式(2)的差异度取得最小值时,考虑到不确定事件的发生概率较小,则不确定事件总数(见式(3)等式右侧部分)应该尽可能少。因此,本文以误动或拒动的保护/断路器的数目与漏报或误报的警报的数目之和作为目标函数:

$$\begin{aligned} E(\mathbf{H}) = & \sum_{i=1}^{n_r} (|m_i| + |f_i|) + \sum_{j=1}^{n_c} (|m_j| + \\ & |f_j|) + \sum_{i=1}^{n_r} (|l_i| + |w_i|) + \\ & \sum_{j=1}^{n_c} (|l_j| + |w_j|) \end{aligned} \quad (3)$$

同时,考虑实际警报与期望警报差异度尽可能小的原则,对差异度设定机会约束,使之成为规划的机会约束条件:

$$P_r\left\{\sum_{i=1}^{n_r} |r_i - r_i^*(\mathbf{H})| + \sum_{j=1}^{n_c} |c_j - c_j^*(\mathbf{H})| = 0\right\} \geq \alpha \quad (4)$$

式(4)表示实际警报与期望警报无差异的概率应该大于某置信水平。

在传统的机会约束规划中, α 是事先设定的。但是,对于故障诊断问题,由于故障元件组合的多样性,以及存在保护/断路器拒动或误动,警报漏报或误报等复杂情况,很难给定一个固定且广泛适用的 α 。对于保护/断路器基本正常动作,警报信号情况也正常的比较简单的故障, α 取较大的值时可以得到理想的结果;而对于存在保护/断路器拒动或误动,警报漏报或误报等较复杂故障,在 α 较小时可以得到理想的结果。因此,可以将 α 作自适应处理,即将其初值设定为较大的值,若求解过程无法得到收敛结果,则随着迭代次数的增加,对 α 做类似于图 1 所示的自适应调整,直至得到收敛结果为止。

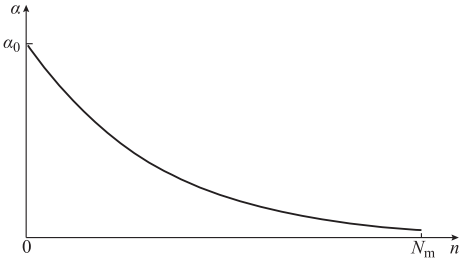


图1 α 的自适应调整过程

Fig. 1 Adaptive adjustment procedure of α

α 可按式(5)进行自适应调整:

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left(\frac{3(1-n)}{N_m}\right) \quad (5)$$

式中: α_0 为 α 的初始值; n 为迭代计数器; N_m 为允许的最大迭代次数。

机会约束由故障假说和随机变量逐步形成,其流程如图2所示。图2中所示的保护和断路器的期望状态将在2.3节和2.4节中详细阐述。

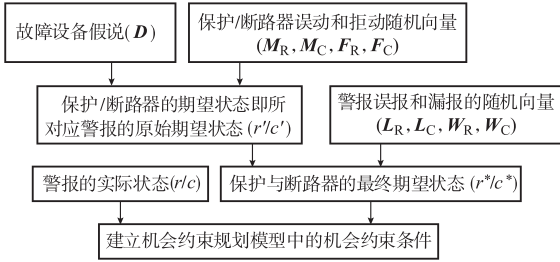


图2 建立机会约束的流程图

Fig. 2 Flow chart of building the chance constraints

基于上述思想构造的电力系统故障诊断的机会约束规划的数学模型可描述如下:

$$\begin{cases} \min \bar{E} \\ \text{s. t. } P_r\{E(\mathbf{H}) \leq \bar{E}\} \geq \beta \\ P_r\left\{\sum_{i=1}^{n_r} |r_i - r_i^*(\mathbf{H})| + \sum_{j=1}^{n_c} |c_j - c_j^*(\mathbf{H})| \geq \alpha\right\} \geq \alpha \end{cases} \quad (6)$$

式中: \bar{E} 为目标函数 $E(\mathbf{H})$ 在置信水平不小于 β 时所取的最小值。

2.3 计及保护/断路器拒动或误动时的期望状态

为了防止出现文献[8]中所述的误动与拒动相矛盾的情况,本文考虑了事件发生的前提条件:当保护/断路器不期望动作(即期望状态值为“0”)时,则仅满足误动的前提条件,此时,只有保护/断路器误动可能会发生,误动的随机变量才有意义,而拒动的随机变量由于其前提条件不满足则无意义;反之,当保护/断路器期望动作(即期望状态值为“1”)时,拒动的前提条件满足而可能会发生,拒动的随机变量

才有意义,误动的随机变量由于其前提条件不满足则无意义。由于二者的前提条件本身是不同且相对立的,当其中一个的条件满足时另一个就因条件无法满足而无法实现,因此考虑了前提条件之后,就不会出现矛盾。对警报中的误报和漏报也做了类似的处理。下面依次介绍如此得到的保护和断路器的期望状态。

2.3.1 保护

定义 \otimes 和 \oplus 分别表示逻辑乘法和逻辑加法。下面对各种类型的保护分别讨论其原始期望状态。

1) 主保护

设 R_i 为设备 D_k 的主保护,其动作逻辑为:若设备 D_k 故障,则保护 R_i 应该动作,同时考虑保护的拒动及误动,则主保护原始期望状态为:

$$r_i' = d_k \otimes \bar{f}_i \oplus m_i \quad (7)$$

式中: d_k 为设备 D_k 的状态,设备故障时 $d_k=1$ 。

2) 后备保护

设 R_i 为设备 D_k 的后备保护,其动作逻辑为:若 D_k 故障,且主保护 R_x 拒动,则保护 R_i 应该动作,同时考虑保护的拒动及误动,则后备保护原始期望状态为:

$$r_i' = d_k \otimes \bar{r}_x' \otimes \bar{f}_i \oplus m_i \quad (8)$$

3) 远后备保护

设 R_i 为设备 D_k 的远后备保护,则其动作逻辑有以下2种情况。

情况1:若所保护的 D_k 故障,且其主保护 R_x 和后备保护 R_y 都拒动,则保护 R_i 应该动作,即

$$r_i' = d_k \otimes \bar{r}_x' \otimes \bar{r}_y' \quad (9)$$

情况2:若远后备保护 R_i 保护范围内的关联设备 D_j 故障,且 R_i 到 D_j 的关联路径 $p(R_i, D_j)$ 上的全部断路器都处于闭合状态,则说明故障还没有切除, R_i 应该动作。用 $Z(R_i)$ 表示保护范围内的关联设备集合, $D_j \in Z(R_i)$ 。则

$$r_i' = \sum_{D_j \in Z(R_i)} \left(d_j \otimes \prod_{C_p \in p(R_i, D_j)} \bar{c}_p \right) \quad (10)$$

式中: d_j 为关联设备 D_j 的状态,设备故障时 $d_j=1$; c_p 为断路器 C_p 的状态。

R_i 到 D_j 的关联路径是指从保护 R_i 的安装位置到设备 D_j 的电气路径上的所有断路器集合,用 $p(R_i, D_j)$ 表示^[8]。综上所述,同时考虑保护的拒动及误动,则远后备保护的原始期望状态为:

$$r_i' = \left[d_k \otimes \bar{r}_x' \otimes \bar{r}_y' \oplus \sum_{D_j \in Z(R_i)} \left(d_j \otimes \prod_{C_p \in p(R_i, D_j)} \bar{c}_p \right) \right] \otimes \bar{f}_i \oplus m_i \quad (11)$$

4) 断路器失灵保护

这里主要讨论 220 kV 及以上系统一般为断路器所设置的专门的失灵保护。

失灵保护的动作为:当设备故障,保护动作并向断路器 C_j 发送跳闸指令,但 C_j 拒动,此时断路器失灵保护 R_i 应该动作。因此,将装设失灵保护的断路器的拒动特殊对待,而不把它作为随机变量处理。正常情况下,失灵保护的期望状态应与受其保护的拒动断路器的期望相同,可表示为:

$$r_i'' = f_j = (r_x' \oplus r_y' \oplus r_z') \otimes \bar{c}_j \otimes r_i \quad (12)$$

式中: r_x' 为故障设备的远后备保护的原始期望状态。

考虑保护的拒动及误动,则断路器失灵保护的原始期望状态为:

$$r_i' = f_j \otimes \bar{f}_i \oplus m_i \quad (13)$$

2.3.2 断路器

只要任何出口断路器 C_j 的保护 R_x 动作并向该断路器发出跳闸指令,则 C_j 应动作。用 $R(C_j)$ 表示与断路器 C_j 相关的保护集合, $R_x \in R(C_j)$ 。同时考虑断路器拒动及误动,则断路器原始期望状态为:

$$c_j' = \left(\sum_{R_x \in R(C_j)} r_x' \right) \otimes \bar{f}_j \oplus m_j \quad (14)$$

式中: r_x' 为断路器保护 R_x 的原始期望状态。

2.4 保护与断路器的最终期望状态

在上述确定保护和断路器的期望状态的过程中并没有考虑警报误报和漏报的情况。如图 2 所示,在计及故障假说和保护/断路器的误动和拒动随机变量的基础上获得了故障区域内各个保护和断路器的期望状态之后,尚需要考虑保护与断路器动作警报误报和漏报的情况,对保护和断路器的期望状态做进一步的处理。因为保护和断路器动作警报与保护和断路器一一对应,这里将警报的误报/漏报作为随机变量处理,则计及警报的误报和漏报情况下保护与断路器的最终期望状态为:

$$r_i^* = r_i' \otimes \bar{l}_i \oplus w_i \quad (15)$$

$$c_j^* = c_j' \otimes \bar{l}_j \oplus w_j \quad (16)$$

式中: r_i' 和 c_j' 分别为 2.3 节中计及保护/断路器拒动或误动时的保护与断路器的原始期望状态。

3 求解方法与步骤

3.1 机会约束的检验

对于由式(4)所表示的机会约束,可以采用蒙特卡洛仿真方法^[19]检验其是否成立。

3.2 目标函数的计算

对于一个给定的故障假说 D ,可以采用蒙特卡

洛仿真方法来求取最小目标值 \bar{E} ,其中, \bar{E} 满足如下约束条件:

$$P_r\{E(H) \leq \bar{E}\} \geq \beta \quad (17)$$

采用蒙特卡洛仿真方法计算目标函数的步骤如下。

- 1) 对随机变量抽样 N_{\max} 次,用式(3)计算 E ,得到序列 $\{E_1, E_2, \dots, E_{N_{\max}}\}$ 。
- 2) 置 N' 为 βN_{\max} 的整数部分。
- 3) 将 $\{E_1, E_2, \dots, E_{N_{\max}}\}$ 中的元素从小到大排序,则第 N' 个元素即为 \bar{E} 。

最后,采用基于蒙特卡洛仿真的遗传算法求解式(6)所描述的基于机会约束规划的故障诊断模型。考虑到遗传算法已为大家所熟知,这里就不展开介绍,可参见文献[19]。

3.3 基于蒙特卡洛仿真的遗传算法

采用基于蒙特卡洛仿真的遗传算法求解式(6)所描述的故障诊断 CCP 模型时,首先需要构造适应度函数;可以把机会约束构造为罚函数,并将其与目标函数相结合而形成适应度函数。整个求解过程如图 3 所示。

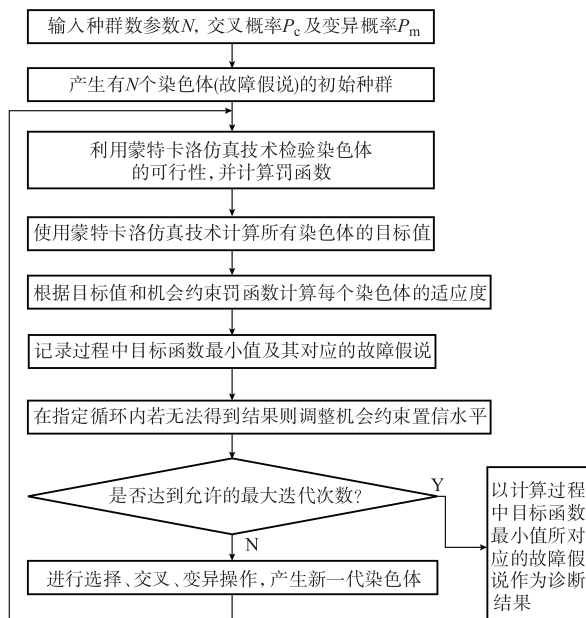


图 3 模型求解流程图

Fig. 3 Flow chart of the solving procedure

4 算例

以图 4 所示的 2009 年 8 月 28 日傍晚浙江地区 500 kV 塘岭变发生的 220 kV 正副母 I 段母线停电的实际故障案例为例来说明所发展的方法。故障区内有 5 个元件: L4333, L4339, L4335, L4336, B1- I。10 个断路器: C2, C3, C6, C7, C10, C11, C12, C13,

C14,C18。

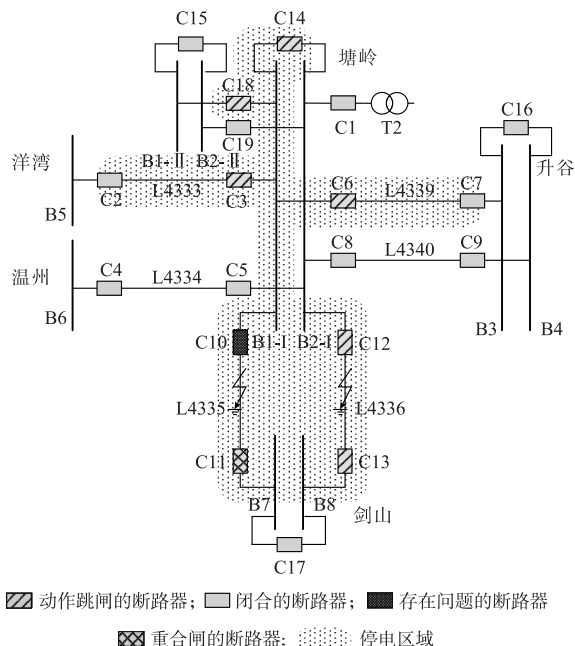


图4 浙江电力系统局部网络
Fig.4 Part of Zhejiang power system

实际发生的故障情况为:塘剑 4335 线和塘山 4336 线发生双重故障。通过分析得知,塘岭变电站断路器 C10 拒动,塘山 4336 线塘岭变侧差动保护警报信号丢失。

故障后接收到的警报情况列于附录 A 表 A1。为便于描述,对相关的设备、保护和断路器都进行了编号,如附录 A 表 A2~表 A4 所示。根据警报情况可得到故障发生后保护和断路器的实际状态,如附录 A 表 A5 所示。

有关参数设定如下:种群规模为 20,蒙特卡洛抽样次数为 1 000,置信水平 α 的初始值为 0.3,置信水平 β 为 0.7,遗传算法最大允许代数数为 1 000,交叉概率为 0.5,变异概率为 0.3。

通过对浙江电网 2002—2009 年继电保护和全自动装置动作正确率 and 不正确动作次数的总结分析,本文将所有保护和断路器的拒动/误动概率,以及所有警报的误报/漏报概率都给定为 0.05。

基于所提出方法开发的故障诊断软件的诊断结果用元件序列表示为:00110,即塘剑 4335 线和塘山 4336 线同时故障。经分析可知,故障过程如下:塘剑 4335 线发生 C 相故障,两侧纵联保护动作跳开塘岭变电站断路器 C10 的 C 相。经短暂延时后,C10 的 C 相重燃,塘岭变侧保护加速动作跳开 C10 三相,但未成功;之后,C10 的失灵保护动作,跳 1 号母联、正母分段以及 220 kV 正母 I 段的所有出线。同时,

塘山 4336 线发生故障,两侧差动保护仍然动作,4336 线两侧断路器跳开,但塘岭变侧差动保护警报丢失。

故障诊断结果与实际发生的故障情况相符。

附录见本刊网络版(<http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] MINAKAWA T, ICHIKAWA Y, KUNUGI M, et al. Development and implementation of a power system fault diagnosis expert system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 932-940.
- [2] LEE H J, AHN B S, PARK Y M. A fault diagnosis expert system for distribution substations[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(1): 92-97.
- [3] WEN Fushuan, CHANG C S. Possibilistic-diagnosis theory for fault-section estimation and state identification of unobserved protective relays using Tabu-search method [J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(6): 722-730.
- [4] 文福拴,韩祯祥,田磊,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):1-7.
WEN Fushuan, HAN Zhenxiang, TIAN Lei, et al. An analytic model and genetic algorithm based methods for fault diagnosis in power systems: Part one the model and method [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1998, 10(3): 1-7.
- [5] 翁汉俐,毛鹏,林湘宁.一种改进的电网故障诊断优化模型[J].电力系统自动化,2007,31(7):66-70.
WENG Hanli, MAO Peng, LIN Xiangning. An improved model for optimizing power system fault diagnosis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 66-70.
- [6] 郭文鑫,廖志伟,文福拴,等.计及警报信息时序特性的电网故障诊断解析模型[J].电力系统自动化,2008,32(22):26-31.
GUO Wenxin, LIAO Zhiwei, WEN Fushuan, et al. An analytic model for power network fault diagnosis with the temporal information of alarm messages taken into account [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(22): 26-31.
- [7] 郭文鑫,文福拴,廖志伟,等.基于时序约束网络的电力系统在线警报处理解析模型[J].电力系统自动化,2009,33(21):36-42.
GUO Wenxin, WEN Fushuan, LIAO Zhiwei, et al. An analytic model for power system on-line alarm processing based on temporal constraint network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 36-42.
- [8] GUO Wenxin, WEN Fushuan, LEDWICH G, et al. An analytic model for fault diagnosis in power systems considering malfunctions of protective relays and circuit breakers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(3): 1393-1401.
- [9] YANG H, CHANG W, HUANG C. Power system distributed on-line fault section estimation using decision tree based neural nets approach [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10(1): 540-546.
- [10] SUN Jing, QIN Shiyin, SONG Yonghua. Fault diagnosis of

- electric power systems based on fuzzy Petri nets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4): 2053-2059.
- [11] LUO Xu, KEZUNOVIC M. Implementing fuzzy reasoning Petri-nets for fault section estimation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(2): 676-685.
- [12] YANG Jianwei, HE Zhengyou, TAN Xijing, et al. A distributed fault diagnosis approach in power system based on fuzzy reasoning Petri net[C]// Proceedings of Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), March 28-31, 2010, Chengdu, China: 1-4.
- [13] MCARTHUR S D J, DAVISON E M, HOSSACK J A, et al. Automating power system fault diagnosis through multi-agent system [C]// Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, January 5-8, 2004, Hawaii, HI, USA: 947-954.
- [14] 廖志伟, 孙雅明. 基于事件序列数据挖掘原理的高压输电线路系统故障诊断: (一) 模型与算法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4): 22-27.
- LIAO Zhiwei, SUN Yaming. A new data mining approach for fault diagnosis of HV transmission line system based on sequence of events: Part one model and method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(4): 22-27.
- [15] 孙雅明, 廖志伟. 基于事件序列数据挖掘原理的高压输电线路系统故障诊断: (二) 仿真和容错性能分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 20-24.
- SUN Yaming, LIAO Zhiwei. A new data mining approach for fault diagnosis of HV transmission line system based on sequence of events: Part two simulation and fault-tolerance performance analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 20-24.
- [16] WEI Lihong, GUO Wenxin, WEN Fushuan, et al. Waveform matching approach for fault diagnosis of high voltage transmission lines employing harmony search algorithm[J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2010, 4(7): 801-809.
- [17] ZHU Yongli, HUO Limin, LU Jinling. Bayesian networks-based approach for power systems fault diagnosis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 634-639.
- [18] CHARNES A, COOPER W W. Chance-constrained programming[J]. Management Science, 1959, 6(1): 73-79.
- [19] 杨宁. 机会约束规划在输电系统规划中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [20] YANG Ning, WEN Fushuan. A chance constrained programming approach to transmission system expansion planning[J]. Journal of Electric Power Systems Research, 2005, 75(2/3): 171-177.
- [21] YANG Ning, YU C W, WEN Fushuan, et al. An investigation of reactive power planning based on chance constrained programming [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2007, 29(9): 650-656.
- [22] YU C W, WANG Le, WEN Fushuan, et al. Optimal spinning reserve capacity determination using a chance-constrained programming approach[J]. International Journal of Electric Power Components and Systems, 2007, 35(10): 1131-1143.
- [23] 马新顺, 文福拴, 刘建新. 构造发电公司最优报价策略的机会约束规划方法[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 35-39.
- MA Xinshun, WEN Fushuan, LIU Jianxin. A chance constrained programming based approach for building optimal bidding strategies for generation companies with risk management[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 35-39.
- [24] 王健, 文福拴, 杨仁刚. 基于机会约束规划的发电公司最优检修策略[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(19): 27-31.
- WANG Jian, WEN Fushuan, YANG Rengang. Optimal maintenance strategy for generation companies based on chance-constrained programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(19): 27-31.
- [25] 李春华, 王钦, 文福拴. 基于机会约束规划的供电公司最优购电策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(6): 12-17.
- LI Chunhua, WANG Qin, WEN Fushuan. Chance-constrained programming based approach to optimal purchasing strategies of distribution companies[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19(6): 12-17.
- [26] 王乐, 余志伟, 文福拴. 基于机会约束规划的最优旋转备用容量确定[J]. 电网技术, 2006, 30(20): 14-19.
- WANG Le, YU Zhiwei, WEN Fushuan. A chance-constrained programming approach to determine requirement of optimal spinning reserve capacity [J]. Power System Technology, 2006, 30(20): 14-19.
- [27] 伍玉林, 文福拴, 丁剑鹰, 等. 发电公司在发电权交易市场的竞价策略初探[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 6-11.
- WU Yulin, WEN Fushuan, DING Jianying, et al. A preliminary investigation on bidding strategies for generation companies in generation-right trading markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 6-11.
- [28] 王金凤, 李渝曾, 张少华. 基于机会约束规划的可中断负荷管理[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(2): 42-45.
- WANG Jinfeng, LI Yuzeng, ZHANG Shaohua. Interruptible load management based on chance-constrained programming [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(2): 42-45.
- [29] 吴杰康, 李金艳, 黄荣雄. 基于机会约束规划的电力系统安全定价随机模型与算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 160-166.
- WU Jiekang, LI Jinyan, HUANG Rongxiong. A stochastic model and algorithm for security pricing of power systems based on chance-constrained programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 160-166.

董明(1987—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统故障诊断和系统恢复. E-mail: dongming. ee@gmail.com

韦刘红(1985—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统警报处理和故障诊断. E-mail: weiluhong16@163.com

文福拴(1965—), 男, 通信作者, 特聘教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统故障诊断、系统恢复和电力市场. E-mail: fushuan.wen@gmail.com

(下转第 93 页 continued on page 93)

(上接第 52 页 continued from page 52)

A Chance-constrained Programming Based Model and Method for Power System Fault Diagnosis

DONG Ming¹, WEI Liuhong², WEN Fushuan¹, DAI Yan³, SUN Weizhen³, WANG Chao³

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. Zhejiang Electric Power Dispatch and Communication Center, Hangzhou 310007, China)

Abstract: On the basis of the existing analytic models, the chance-constrained programming is introduced to deal with uncertainties, e.g. the malfunctions of protective relays (PRs) and circuit breakers (CBs) as well as false/missing alarms. Thus, a new fault diagnosis analytic model is first developed in the chance-constrained programming framework, and could well accommodate malfunctions of PRs and CBs as well as false/missing alarms. Then, the well-established genetic algorithm combined with Monte Carlo simulations are employed to solve the developed optimization model. An actual fault scenario is served for demonstrating the feasibility and efficiency of the developed model and method, and consistent fault diagnosis results have been obtained as those actually happened. In addition, the computation speed of the developed method meets the on-line fault diagnosis requirement.

This work is supported by National Key Technology R&D Program (No. 2008BAA13B10) and a Project from Zhejiang Power Company.

Key words: power systems; fault diagnosis; chance-constrained programming; analytic model

附录 A 算例数据

表 A1 接收到的警报
Tab.A1 Received alarms

相对时标(ms)	变电站	警报	相对时标(ms)	变电站	警报
28	塘岭变	塘剑 4335 线差动保护动作	665	塘岭变	断路器 C18 的 A 相跳闸
31	剑山变	塘剑 4335 线差动保护动作	665	塘岭变	断路器 C18 的 B 相跳闸
75	塘岭变	断路器 C10 的 C 相跳闸	666	塘岭变	断路器 C18 的 C 相跳闸
79	剑山变	断路器 C11 的 C 相跳闸	667	塘岭变	断路器 C14 的 A 相跳闸
383	塘岭变	C10 保护加速动作	667	塘岭变	断路器 C14 的 B 相跳闸
480	剑山变	塘山 4336 线差动保护动作	668	塘岭变	断路器 C14 的 C 相跳闸
523	塘岭变	断路器 C12 的 A 相跳闸	873	塘岭变	断路器 C3 的 A 相跳闸
523	塘岭变	断路器 C12 的 B 相跳闸	873	塘岭变	断路器 C3 的 B 相跳闸
524	塘岭变	断路器 C12 的 C 相跳闸	874	塘岭变	断路器 C3 的 C 相跳闸
529	剑山变	断路器 C13 的 A 相跳闸	874	塘岭变	断路器 C6 的 A 相跳闸
529	剑山变	断路器 C13 的 B 相跳闸	875	塘岭变	断路器 C6 的 B 相跳闸
529	剑山变	断路器 C13 的 C 相跳闸	875	塘岭变	断路器 C6 的 C 相跳闸
617	塘岭变	断路器 C10 失灵保护动作			

表 A2 设备编码
Tab.A2 The encoding of components

L4333	L4339	L4335	L4336	B1-I
d_0	d_1	d_2	d_3	d_4

表 A3 保护编码
Tab.A3 The encoding of protective relays

	L4333	L4339	L4335	L4336	B1-I
主保护	r_0	r_1	r_2	r_3	r_4
主后备保护	r_5	r_6	r_7	r_8	—
次后备保护	r_9	r_{10}	r_{11}	r_{12}	—
断路器失灵保护	C3	C6	C10	C14	C18
	r_{13}	r_{14}	r_{15}	r_{16}	r_{17}

表 A4 断路器编码
Tab.A4 The encoding of circuit breakers

C2	C3	C6	C7	C10	C11	C12	C13	C14	C18
c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9

表 A5 保护和断路器的实际状态
Tab.A5 The actual states of protective relays and circuit breakers

警报类型	主保护	主后备保护	次后备保护	断路器失灵保护	断路器
实际状态	00100	0000	0000	00100	0110011111