

融合信息理论的电力系统故障诊断解析模型

张 岩¹, 张 勇¹, 文福拴¹, 孙维真², 王 超²

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007)

摘要: 保护与断路器动作的不确定性和警报信息的不确定性是实际电力系统故障诊断时需要考虑的主要问题。以电力系统故障诊断解析模型为基础, 融合信息理论中的方法来解决这一问题。阐述了故障诊断的信息运动过程, 在此基础上通过解析分析保护与断路器动作逻辑和警报信息之间的关系, 发展了基于信息量损失最小的故障诊断优化模型, 充分考虑了警报信号的不确定性。采用改进遗传算法求解。用浙江电力系统实际发生的故障案例说明了该方法具有较强的容错能力且诊断速度快, 对于复杂故障案例, 计算时间在 1 s 之内, 满足在线故障诊断要求。

关键词: 电力系统; 故障诊断; 警报处理; 不确定性; 信息理论; 信息不完备; 继电保护; 模型

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.02.027

0 引言

准确而快速的电力系统故障诊断对调度人员及时识别故障元件、尽快恢复供电意义重大。迄今为止, 已提出多种电力系统故障诊断模型和方法, 主要包括解析模型^[1-4]、专家系统^[5-7]、人工神经网络^[8]、Petri 网和模糊集^[9-11]等。目前在实际电力系统中得到应用的主要是基于解析模型和基于专家系统的方法。

文献[1-4]所发展的故障诊断解析模型的基本思想是: 用解析方法描述保护和断路器的动作与警报之间的逻辑关系, 在此基础上构造能够反映实际警报信息与期望警报信息差异度的目标函数, 之后采用优化算法求取最能解释实际警报信息的故障/事件假说。专家系统方法则利用保护和断路器动作逻辑、专家的经验知识和逻辑推理能力, 国内外开发的一些专家系统在实际电力系统得到了应用。例如文献[6]发展了计及保护和断路器误动和拒动的故障诊断专家系统; 文献[7]发展的警报处理与故障诊断专家系统在意大利电力公司得到应用。

电力系统发生故障时, 保护和断路器有可能误动或拒动, 警报信息上传时有可能出现延时、漏报或者误报等情况, 这样相同的警报信息可能对应不同的故障情况。这就需要研究多种故障组合发生的可能性。因此, 需要发展能够处理不确定性的电力系统故障诊断方法。在这方面, 国内外已经做了一些研究工作。例如文献[1]建立了一种故障诊断的解析模型, 能够处理保护和断路器误动和拒动等不确定性, 但没有考虑警报信息的不确定性; 文献[4]在机会约

束规划的框架下建立了故障诊断的解析模型, 并采用蒙特卡洛仿真法处理不确定性情况, 如果故障区域中包括元件数量较多, 则蒙特卡洛仿真过程需要的计算时间较长; 文献[11]提出了基于时序模糊 Petri 网的电力系统故障诊断方法, 利用了保护和断路器动作信息的时序属性来处理不确定性, 但在保护和断路器动作可能出现延时及多个变电站 GPS 时钟不同步等情况下该方法就不适用。

最近几年提出的基于信息理论的电力系统故障诊断方法能在一定程度上解决了上述不确定性, 且诊断速度快, 能够满足大规模电力系统在线故障诊断的要求。文献[12]在国内首次将基于信息理论的方法应用到电力系统故障诊断研究之中, 建立了故障诊断的信息运动模型, 并基于信息量损失最小原理, 提出了适用于不确定性决策环境下的大规模电力系统故障诊断方法, 但其没有考虑警报信息漏报和误报情况。文献[13]基于信息理论和技术, 设计了实用化的地区电网辅助决策系统。

在上述背景下, 本文以电力系统故障诊断解析模型为基础, 融合信息理论, 对保护和断路器动作逻辑以及它们和警报之间的信息运动进行解析, 建立了基于信息量损失最小的电力系统故障诊断模型。具体而言, 本文主要做了下述 3 个方面的研究工作:

a. 在文献[12]的基础上, 通过分析电力系统故障过程中的信息运动, 并考虑警报信息的不确定性, 建立了电力系统故障诊断的级联信道模型;

b. 将信息理论融入电力系统故障诊断解析模型, 并考虑电力系统故障过程中的多种不确定性, 通过求解获得的各种可能发生的故障组合及其发生概率, 来辅助调度人员进行决策;

c. 提出了识别保护/断路器的误动/拒动和警报的漏报/误报等情况的方法, 如此得到的诊断结果更

收稿日期: 2013-06-08; 修回日期: 2013-11-16

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2011BAA07B02); 浙江省电力公司重点科技项目

Project supported by the National Key Technology Research and Development Program(2011BAA07B02) and the Key Project from Zhejiang Electric Power Corporation

加直观和全面,有利于调度人员进一步判断和决策。

本文构造的融合信息理论的电力系统故障诊断模型,充分考虑了警报信号的不确定性,具有较强的容错能力,并能够识别保护/断路器的动作行为。最后,用浙江电力系统实际发生的故障案例说明了所发展的模型与方法的基本特征。

1 故障诊断的信息运动过程

电力系统设备发生故障后,会引起相应保护和断路器动作,上传警报信息,这个过程可描述为信息运动过程,如图 1 所示。采用类比方法,将通信系统中的信源、信道和信宿概念^[14]引入电力系统,即电力系统运行状态是广义的信源,调度中心获取的警报信息是广义的信宿,保护和断路器的动作以及警报信息的上传过程是广义的信道。利用调度中心获取的警报信息进行分析和决策,还原出电力系统真实的运行状态,就类比广义信息重建过程。

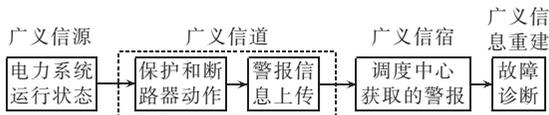


图 1 故障诊断的信息运动过程

Fig.1 Information movement process of fault diagnosis

针对电力系统中警报信息具有离散概率型的特点,建立故障信息传递的级联信道模型,如图 2 所示。图 2 中的 X 、 Y 和 Z 均为随机向量。 X 表示可能的设备故障组合,其中的每个分量表示相应设备的运行状态; Y 表示可能的保护和断路器的状态组合,其中的每个分量表示相应保护或断路器的动作状态; Z 表示调度中心可能获取的警报信息组合。信道 1 的输出 Y 与输入 X 统计相关,而信道 2 的输出 Z 与输入 Y 统计相关, XYZ 组成马尔科夫链^[15]。概率 p_{kj} 和概率 q_{jl} 分别表示 a_k 情况下 b_j 出现的概率和 b_j 情况下 e_l 出现的概率,即转移概率,由历年统计结果确定。前已述及,由于故障期间保护和断路器有可能发生误动或拒动,警报信息上传时也有可能出现漏报或误报等情况,相同的警报信息可能对应不同的故障情况。故障诊断就是根据获取的警报信息 Z 进行分析,确定最能解释警报信息 Z 的故障组合 X

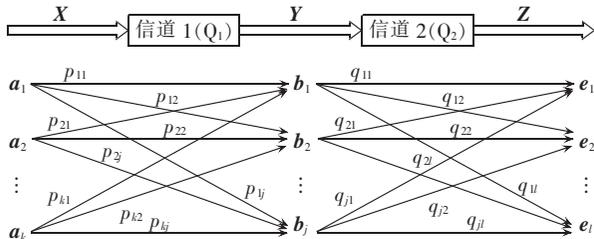


图 2 故障诊断的级联信道模型

Fig.2 Model of cascaded information channel for fault diagnosis

和保护与断路器的动作状态 Y 。

2 基于信息理论的故障诊断模型

2.1 信息量损失

在信息具有不确定性的情况下,任何决策方案都可能引起信息量的损失,信息量损失其实就是对决策方案不确定度的量化。在信息理论中,某种决策引起信息量损失最小则信息被利用得最为充分,这种决策方案的不确定程度最低,也最为合理^[16]。

2.1.1 信源信息量损失

在图 2 所示的信道模型中,直接计算信息量损失 $I(a_k, b_j | e_l)$ 有一定的困难,可引入相对信息量损失来进行决策。对于信道 1 的输入向量 X ,需要以某种具体的故障情况 a_0 为基准。这样,在决策过程中,判断 $X = a_k$ 时的信源信息量损失^[16]为:

$$I_{\text{loss},Sk} = I(a_k) - I(a_0) = \log_2 [p(a_0) / p(a_k)] \quad (1)$$

其中, $I(\cdot)$ 为单个事件所能提供的信息量; $p(\cdot)$ 为相应事件的概率; $k = 1, 2, \dots, K$, K 为可能的设备故障组合数目。

对于信道 2 的输入向量 Y ,决策过程中引起的信息量损失不仅与其自身有关,而且与信道 1 的输入向量 X 相关,为条件信息量损失。在决策过程中,以某种具体的保护和断路器状态 b_0 为基准,判断 $Y = b_j$ 时的信源信息量损失为:

$$I_{\text{loss},Sj|k} = I(b_j) - I(b_0) = \log_2 [p(b_0 | a_0) / p(b_j | a_k)] \quad (2)$$

其中, $p(\cdot | \cdot)$ 为相应事件的条件概率; $k = 1, 2, \dots, K$; $j = 1, 2, \dots, J$, J 为可能的保护和断路器的状态组合数目。

2.1.2 信道信息量损失

由图 2 可见,输出向量 Z 取决于信道 2 的输入向量 Y ,而与信道 1 的输入向量 X 条件统计无关, Z 中无任何有关 X 的信息。在决策过程中,当事件 $Z = e_l$ 、 $X = a_k$ 时的信道信息量损失为 0; $Y = b_j$ 时的信道信息量损失^[16]为:

$$I_{\text{loss},Cjl} = I(b_0; e_l) - I(b_j; e_l) = I(b_0, b_j; e_l) = \log_2 (p_{b_0l} / p_{jl}) \quad (3)$$

其中, $I(\cdot; \cdot)$ 为事件之间的互信息^[14]; $I(\cdot, \cdot; \cdot)$ 为鉴别信息; p_{jl} 为信道的转移概率; p_{b_0l} 为基准状态 b_0 的信道转移概率; $j = 1, 2, \dots, J$; $l = 1, 2, \dots, L$, L 为调度中心可能获得的警报信息组合数目。

需要指出,这里没有对信道 1 的信息量损失进行说明,并不表示信道 1 中的信息运动不产生信息量损失。事实上,在确定信道 2 的输入向量 Y 并计算相应的信源信息量损失时,充分计及了信道 1 的输入向量 X 的影响,因此这里就不再对信道 1 的信息量损失做重复计算。

2.2 基于信息量损失最小的故障诊断模型

设停电区域内有 n_d 个设备,所配置的继电保护

装置有 n_r 个,故障发生前与停电区域设备相连接的断路器共有 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,相应的保护和断路器动作的警报个数分别为 n_r 和 n_c 。

以信息量损失最小为目标的故障诊断优化模型可表示为:

$$I_{\text{loss}} = \min I(\mathbf{H} | [\mathbf{R}', \mathbf{C}']) \quad (4)$$

其中, $\mathbf{H} = [\mathbf{D}, \mathbf{R}, \mathbf{C}]$ 为故障假说; $\mathbf{D} = [d_1, d_2, \dots, d_n]$ 为停电区域的设备状态向量, $d_i = 1$ 和 $d_i = 0$ 分别表示设备 D_i 处于故障和正常状态; $\mathbf{R} = [r_1, r_2, \dots, r_n]$ 为相关保护动作状态向量, $r_i = 1$ 和 $r_i = 0$ 分别表示保护 R_i 动作和未动作; $\mathbf{C} = [c_1, c_2, \dots, c_n]$ 为相关断路器跳闸状态向量, $c_i = 1$ 和 $c_i = 0$ 分别表示断路器 C_i 跳闸和未跳闸; $\mathbf{R}' = [r'_1, r'_2, \dots, r'_n]$ 为与 \mathbf{R} 对应的实际警报信息向量; $\mathbf{C}' = [c'_1, c'_2, \dots, c'_n]$ 为与 \mathbf{C} 相应的实际警报信息向量; \mathbf{D} 、 $[\mathbf{R}, \mathbf{C}]$ 和 $[\mathbf{R}', \mathbf{C}']$ 分别对应级联信道模型中的随机向量 \mathbf{X} 、 \mathbf{Y} 和 \mathbf{Z} 。

根据 2.1 节中的信息量损失定义,将总的信息量损失分解为信源和信道信息量损失,可得:

$$I_{\text{loss}} = I_{\text{loss},S1} + I_{\text{loss},S2} + I_{\text{loss},C} \quad (5)$$

其中, $I_{\text{loss},S1}$ 为确定故障设备时的信源信息量损失; $I_{\text{loss},S2}$ 为确定保护和断路器状态时的信源信息量损失; $I_{\text{loss},C}$ 为信道 2 的信息量损失。

以所有设备无故障且所有保护和断路器无动作作为计算信息量损失的基准事件,并假设一次设备发生故障时,不同保护之间、不同断路器之间、保护和断路器之间的拒动和误动事件,以及不同警报之间的漏报和误报事件是相互独立的^[17]。在计算每种决策方案的信息量损失时,可以分别计算每个设备、每个保护/断路器和每个警报引起的信息量损失,最后求和得到总的信息量损失,如式(6)~(8)所示。

$$I_{\text{loss},S1} = \sum_{i=1}^{n_d} I_{\text{loss},S1,D_i} \quad (6)$$

$$I_{\text{loss},S2} = \sum_{i=1}^{n_r+n_c} I_{\text{loss},S2,R_i(C_i)} \quad (7)$$

$$I_{\text{loss},C} = \sum_{i=1}^{n_r+n_c} I_{\text{loss},C,r'_i(c'_i)} \quad (8)$$

$$I_{\text{loss},S1,D_i} = I(X_i = d_i) - I(X_i = 0) \quad (9)$$

$$I_{\text{loss},S2,R_i(C_i)} = I[Y_i = r_i(c_i) | \mathbf{X} = \mathbf{D}^*], \\ Y_1 = r_1(c_1), \dots, Y_{i-1} = r_{i-1}(c_{i-1})] - \\ I(Y_i = 0 | \mathbf{X} = 0, Y_1 = 0, \dots, Y_{i-1} = 0) \quad (10)$$

$$I_{\text{loss},C,r'_i(c'_i)} = I[\mathbf{b}_0, \mathbf{b}_k; \mathbf{Z}_i = r'_i(c'_i) | \mathbf{Z}_1 = r'_1(c'_1), \dots, \\ \mathbf{Z}_{i-1} = r'_{i-1}(c'_{i-1})] \quad (11)$$

其中, $I_{\text{loss},S1,D_i}$ 表示决策结果为 \mathbf{D}^* 时,设备 D_i 引起的信源信息量损失; $I_{\text{loss},S2,R_i(C_i)}$ 表示决策结果为 \mathbf{b}_k 时,在 \mathbf{X} 决策结果为 \mathbf{D}^* ,前 $i-1$ 个保护(断路器)状态已知的

条件下,保护 R_i (断路器 C_i)引起的信源信息量损失; $I_{\text{loss},C,r'_i(c'_i)}$ 表示决策结果为 \mathbf{b}_k 时,在前 $i-1$ 个警报信息已知的条件下,警报信息 $r'_i(c'_i)$ 引起的信道信息量损失,为条件鉴别信息。

综上,总的信息量损失可描述为:

$$I_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^{n_d} I_{\text{loss},S1,D_i} + \sum_{i=1}^{n_r+n_c} I_{\text{loss},S2,R_i(C_i)} + \sum_{i=1}^{n_r+n_c} I_{\text{loss},C,r'_i(c'_i)} \quad (12)$$

3 故障诊断中的信息量损失计算

3.1 故障诊断中不确定性的量化

在电力系统故障诊断中,不确定性可通过设备故障的先验概率、继电保护装置和断路器的拒动/误动概率以及警报信息的漏报/误报概率来体现^[17]。设备故障的先验概率可通过一次设备的年故障频率 w 来计算。设备在连续运行一段时间 t 后,发生故障的概率就是故障时间间隔为 t 的概率。

$$p(T \leq t) = 1 - e^{-wt} \quad (13)$$

其中, T 为设备连续无故障运行时间。

基于文献[18-19]中所给出的数据并结合所研究电力系统的实际情况,可得到保护装置拒动/误动和警报误报/漏报概率。每 100 km 线路的故障概率为 0.098,每条母线的故障概率为 0.004,保护警报的漏报与误报概率分别为 0.1%、0.08%,断路器警报的漏报与误报概率分别为 0.08%、0.05%,保护/断路器的误动/拒动概率列于表 1。在线路保护中,有些保护(如距离 I 段保护)不能保护整条线路,对此类保护的拒动概率可根据其保护范围和拒动/误动的概率数据来确定。

表 1 故障过程中的不确定性指标
Tab.1 Uncertainty index in fault process

保护/断路器	拒动概率/%	误动概率/%
线路主保护	0.07	0.60
母线主保护	0.07	0.10
近后备保护	0.11	0.70
远后备保护	0.15	0.80
失灵保护	0.15	0.80
断路器	0.25	0.25

注:取 $t = 0.5$ a,相关数据取自浙江电力系统 2007 年至 2009 年继电保护统计数据。

3.2 设备故障引起的信息量损失

前已述及,选择所有设备无故障,且所有保护和断路器无动作作为计算信息量损失的基准事件。这样,当判定设备无故障时,信息量损失为 0;当判定设备故障时,信息量损失按式(14)计算:

$$I_{\text{loss},S,D_i} = I(X_i = 1) - I(X_i = 0) = \log_2[(1 - p_0)/p_0] \quad (14)$$

其中, p_0 为设备故障的先验概率。

3.3 继电保护装置和断路器动作引起的信息量损失

电力系统发生故障时,不同保护之间、不同断路

器之间以及保护和断路器之间的拒动和误动事件可认为是相互独立的。例如保护误动驱动其对应的断路器跳闸,此时保护发生了误动,但断路器的动作是正确的,不属于误动;只有保护未动作而相应断路器跳闸,断路器方属于误动。但同一保护或断路器的拒动和误动不相互独立,即同一保护或断路器不能同时误动和拒动。信息在故障和保护之间是单向流动的,在保护和断路器之间有一定的交互,例如某些断路器的拒动会驱动相应的失灵保护,但断路器的驱动信息取决于保护的最终状态,即断路器动作引起的信息量损失只与保护的最终状态量有关。下面依次将保护和断路器通过动作逻辑关系进行解析,在此基础上计算保护与断路器动作引起的信息量损失。

a. 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 应动作,这样主保护期望状态可表示为:

$$f_{R_i} = d_k \quad (15)$$

当电力系统发生故障时,主保护应立即动作,其信道如图 3 所示,图中 $f_{R_i}=0$ 表示保护没有被驱动, $f_{R_i}=1$ 表示保护被驱动, p_{01} 和 p_{10} 为保护误动和拒动概率。下文的近后备、远后备和失灵保护与此类似。

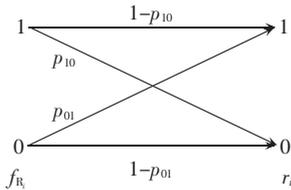


图 3 保护动作的信道模型

Fig.3 Information channel model of relay protection action

根据 f_{R_i} 与 r_i 的取值情况计算出的信息量损失如表 2 所示。下文的近后备、远后备和失灵保护与此类似。

表 2 保护动作引起的信息量损失
Tab.2 Information loss caused by relay protection action

r_i	信息量损失	
	$f_{R_i}=0$	$f_{R_i}=1$
0	0	$\log_2[(1-p_{01})/p_{10}]$
1	$\log_2[(1-p_{01})/p_{01}]$	$\log_2[(1-p_{01})/(1-p_{10})]$

b. 近后备保护。

设 R_i 为设备 D_k 的近后备保护,其动作逻辑为:若设备 D_k 故障,且其所有主保护 R_x 拒动,则保护 R_i 应动作。这样近后备保护的期望状态为:

$$f_{R_i} = d_k \otimes \prod_{x=1,2,\dots} \bar{r}_x \quad (16)$$

其中,“ \otimes ”表示逻辑“与”, \bar{r}_x 表示对 r_x 逻辑取“反”。

c. 远后备保护。

设 R_i 为设备 D_k 的远后备保护,则其动作逻辑分以下 2 种情况。

情况 1:若所保护的设备 D_k 故障,且其所有主保护 R_x 和近后备保护 R_y 均拒动,则保护 R_i 应动作,即:

$$f_{R_i} = d_k \otimes \prod_{x=1,2,\dots} \bar{r}_x \otimes \prod_{y=1,2,\dots} \bar{r}_y \quad (17)$$

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 的关联路径上的全部断路器处于闭合状态,则说明故障未切除, R_i 应动作,即:

$$f_{R_i} = \sum_{D_j \in Z(R_i)} (d_j \otimes \prod_{C_p \in p(R_i, D_j)} \bar{c}_p) \quad (18)$$

其中, $Z(R_i)$ 为保护范围内的关联设备集合; $p(R_i, D_j)$ 表示关联路径上的断路器集合,即从保护 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。综上所述,远后备保护的期望状态为:

$$f_{R_i} = d_k \otimes \prod_{x=1,2,\dots} \bar{r}_x \otimes \prod_{y=1,2,\dots} \bar{r}_y \oplus \sum_{D_j \in Z(R_i)} (d_j \otimes \prod_{C_p \in p(R_i, D_j)} \bar{c}_p) \quad (19)$$

其中,“ \oplus ”表示逻辑“或”。

d. 断路器失灵保护。

220 kV 及以上系统中一般为断路器专门设置了失灵保护。

当设备故障,保护动作并向与设备相连的断路器 C_j 发送了跳闸指令,但 C_j 拒动,此时断路器失灵保护 R_i 应动作。这样,失灵保护的期望状态为:

$$f_{R_i} = \left(\bigcup_{x=1,2,\dots} r_x \oplus \bigcup_{y=1,2,\dots} r_y \oplus \bigcup_{z=1,2,\dots} r_z \right) \otimes \bar{c}_j \quad (20)$$

其中, r_x 、 r_y 和 r_z 分别为故障设备的主保护、近后备保护和远后备保护的最终状态; c_j 为断路器的实际状态。

e. 断路器。

任何断路器 C_j 对应的保护 R_x 动作并向该断路器发出跳闸指令,则 C_j 应动作。用 $R(C_j)$ 表示能够驱动断路器 C_j 跳闸的保护集合,则断路器 C_j 的期望状态为:

$$f_{C_j} = \sum_{R \in R(C_j)} r_x \quad (21)$$

断路器的期望状态取决于保护的最终状态,断路器动作的信道模型如图 4 所示。

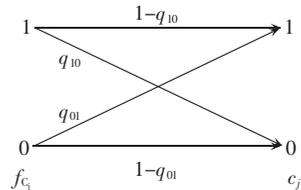


图 4 断路器动作的信道模型

Fig.4 Information channel model of circuit breaker trip

f_{C_j} 和 c_j 取不同值时的信息量损失如表 3 所示。

3.4 警报信息上传过程(信道 2)的信息量损失

警报信息上传时有可能出现漏报或者误报等情

表 3 断路器动作引起的信息量损失
Tab.3 Information loss caused by circuit breaker trip

c_j	信息量损失	
	$f_{c_j}=0$	$f_{c_j}=1$
0	0	$\log_2[(1-q_{01})/q_{10}]$
1	$\log_2[(1-q_{01})/q_{01}]$	$\log_2[(1-q_{01})/(1-q_{10})]$

注： $f_{c_j}=0$ 表示断路器没有被驱动； $f_{c_j}=1$ 表示断路器被驱动； q_{01} 和 q_{10} 分别为断路器误动和拒动概率。

况，不同警报之间的漏报和误报事件是相互独立的，同一警报的漏报和误报事件是互斥的。警报信息上传过程的信道模型可描述为图 5。

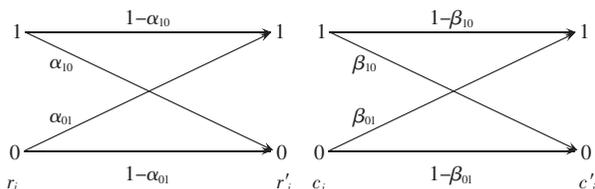


图 5 警报信息上传过程的信道模型

Fig.5 Information channel model of alarm uploading

警报信息上传过程的信息量损失只与保护和断路器的实际状态有关，与设备状态无关。根据保护和断路器的实际状态以及获取的警报信息可计算出警报信息上传过程的信息量损失如表 4 所示。

表 4 警报信息上传过程的信息量损失
Tab.4 Information loss caused by alarm uploading

$r'_i (c'_j)$	信息量损失	
	$r_i (c_j)=0$	$r_i (c_j)=1$
0	0	$\log_2[(1-\alpha_{01}(\beta_{01}))/\alpha_{10}(\beta_{10})]$
1	0	$\log_2[\alpha_{01}(\beta_{01})/(1-\alpha_{10}(\beta_{10}))]$

注： α_{01} 和 α_{10} 分别为保护警报误报和漏报概率； β_{01} 和 β_{10} 分别为断路器警报误报和漏报概率。

4 求解过程及故障诊断结果评价

4.1 故障假说的概率分布

根据故障诊断中的信息量损失算法，可以计算每种故障假说情况下的总信息量损失。故障诊断问题可描述为使信息量损失最小的 0-1 整数规划问题。文献[12]中给出了求取故障假说概率分布的方法，此处不再赘述。当故障区域中的设备、保护及断路器数量较多时，可搜索出前 M 个最优解构成近似解空间，以提高诊断速度。定义残留概率为解空间内故障假说最小概率与最大概率之比，并以此作为搜索截止条件。本文采用文献[20]中的改进遗传算法求解，求解过程如图 6 所示，图中内循环截止条件指最优解不变次数或最大迭代次数，最终截止条件指残留概率约束。

4.2 故障诊断结果评价

在求解得到若干故障诊断结果 H^* 后，对故障诊断结果中的相应保护、断路器的拒动或误动以及警

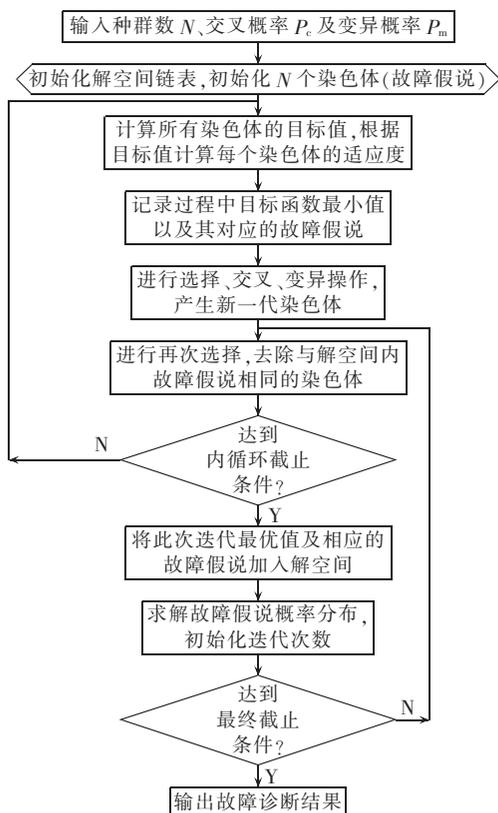


图 6 故障诊断优化模型求解流程

Fig.6 Flowchart for solving optimal model of fault diagnosis

报的漏报、误报进行识别，得到的结果列于表 5。

表 5 故障诊断结果评价

Tab.5 Evaluation of fault diagnosis results

动作期望	实际状态	故障识别
$f_{R_i}(H^*)=1$	$r_i(H^*)=0$	保护 R_i 拒动
$f_{R_i}(H^*)=0$	$r_i(H^*)=1$	保护 R_i 误动
$f_{C_j}(H^*)=1$	$c_j(H^*)=0$	断路器 C_j 拒动
$f_{C_j}(H^*)=0$	$c_j(H^*)=1$	断路器 C_j 误动
$r_i(H^*)=1$	$r'_i=0$	保护 R_i 动作警报被漏报
$r_i(H^*)=0$	$r'_i=1$	保护 R_i 动作警报为误报
$c_j(H^*)=1$	$c'_j=0$	断路器 C_j 跳闸警报被漏报
$c_j(H^*)=0$	$c'_j=1$	断路器 C_j 跳闸警报为误报

5 算例分析

采用 MATLAB 语言分别对本文方法和文献[12]的方法进行了实现。利用本文发展的方法对图 7 所示的浙江电力系统局部网络发生的 20 种故障案例进行了诊断测试，均得到了合理的故障诊断结果及概率分布。而应用文献[12]的方法时，对于警报信息存在漏报和误报的情况则无法得到合理的诊断结果。下面针对典型案例进行详细的比较分析。

故障区域内有 5 个元件、30 个保护和 10 个断路器，为表述方便进行了编号，见表 6—8，表 7 中断路器失灵保护行从左到右分别对应的断路器为 C3、C6、C10、C14、C18。

遗传算法参数设置如下:种群规模为 200,变异和交叉概率分别为 0.3 和 0.6,残留概率上限为 0.001。

2 种方法的故障诊断结果比较见表 9。图 7 中显示的故障情况为表 9 中案例 4。可见,在警报信息完全正确的情况下(如案例 1 和 2),本文发展的诊断模型与文献[12]方法得到的诊断结果一样。然而,当警报信息存在误报或漏报时(如案例 3 和 4),本文发展的模型依然可以获得合理的诊断结果和概率分布,而文献[12]方法则无法获得正确的诊断结果。

诊断表 9 中各案例所需的计算时间见图 8。计

表 6 设备编码

Tab.6 Encoding of equipments

设备	编码	设备	编码
L4333	D ₀	L4336	D ₃
L4339	D ₁	B1-I	D ₄
L4335	D ₂		

表 7 保护编码

Tab.7 Encoding of relay protections

保护	L4333	L4339	L4335	L4336	B1-I
线路主保护	R ₀ , R ₁	R ₂ , R ₃	R ₄ , R ₅	R ₆ , R ₇	R ₈
线路近后备保护	R ₉ , R ₁₀	R ₁₁ , R ₁₂	R ₁₃ , R ₁₄	R ₁₅ , R ₁₆	—
线路远后备保护	R ₁₇ , R ₁₈	R ₁₉ , R ₂₀	R ₂₁ , R ₂₂	R ₂₃ , R ₂₄	—
断路器失灵保护	R ₂₅	R ₂₆	R ₂₇	R ₂₈	R ₂₉

表 8 断路器编码

Tab.8 Encoding of circuit breakers

断路器	编码	断路器	编码	断路器	编码
C2	C ₀	C10	C ₄	C14	C ₈
C3	C ₁	C11	C ₅	C18	C ₉
C6	C ₂	C12	C ₆		
C7	C ₃	C13	C ₇		

表 9 故障诊断结果比较

Tab.9 Comparison of fault diagnosis results

案例	故障设备	保护/断路器动作情况	警报信息	诊断结果			
				故障判定	概率	拒动、误动判定	漏报、误报判定
1	D ₄	R ₈ 动作, C ₁ 、C ₂ 、C ₄ 、C ₈ 、C ₉ 跳开	$r'_8, c'_1, c'_2,$ c'_4, c'_8, c'_9	D ₄	0.8006	无	默认无
				无	0.1993	R ₈ 误动	默认无
				D ₄	0.8006	无	无
				无	0.1993	R ₈ 误动	无
2	D ₁ , D ₄	R ₂ 、R ₈ 动作, R ₃ 拒动, C ₁ 、C ₂ 、C ₄ 、C ₈ 、C ₉ 跳开, R ₁₂ 动作, C ₃ 跳开	$r'_2, r'_8, c'_1, c'_2, c'_4,$ $c'_8, c'_9, r'_{12}, c'_3$	D ₁ , D ₄	0.7979	R ₃ 拒动	默认无
				D ₁	0.1988	R ₃ 拒动, R ₈ 误动	默认无
				D ₄	0.0019	R ₂ 、R ₁₂ 误动	默认无
				D ₁ , D ₄	0.7986	R ₃ 拒动	无
3	D ₃	R ₆ 、R ₇ 动作, C ₆ 、C ₇ 跳开	$r'_6, r'_7, c'_6,$ c'_7	D ₃	0.9995	R ₅ 误动, C ₅ 拒动	默认无
				无	0.0005	R ₅ 、R ₆ 、R ₇ 误动, C ₅ 拒动	默认无
				D ₃	0.9752	无	R ₅ 误报
				D ₃	0.0184	R ₅ 误动, C ₅ 拒动	无
4	D ₂ , D ₃	R ₄ 、R ₅ 、R ₆ 、R ₇ 动作, C ₅ 、C ₆ 、C ₇ 跳开, C ₄ 拒动, R ₂₇ 动作, C ₁ 、C ₃ 、C ₈ 、 C ₉ 跳开	$r'_4, r'_5, r'_6, r'_7, c'_5,$ $c'_6, c'_7, r'_{27},$ c'_1, c'_3, c'_8, c'_9	D ₂ , D ₃	0.7447	R ₆ 、C ₄ 拒动, C ₆ 误动	默认无
				D ₂	0.2548	R ₇ 、C ₆ 误动, C ₄ 拒动	默认无
				D ₂ , D ₃	0.6608	C ₄ 拒动	R ₆ 漏报
				D ₂ , D ₃	0.1669	R ₆ 、C ₄ 拒动	R ₁₅ 漏报
				D ₂	0.1422	R ₇ 、C ₆ 误动, C ₄ 拒动	无

注:各案例诊断结果由间隔线分隔,横线上面为文献[12]方法的诊断结果,横线下面为本文方法的诊断结果。

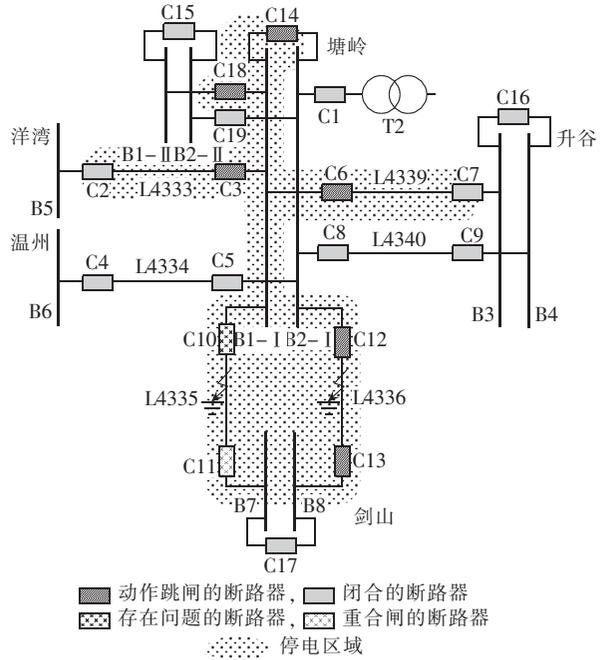


图 7 浙江电力系统局部网络

Fig.7 Partial Zhejiang Power System

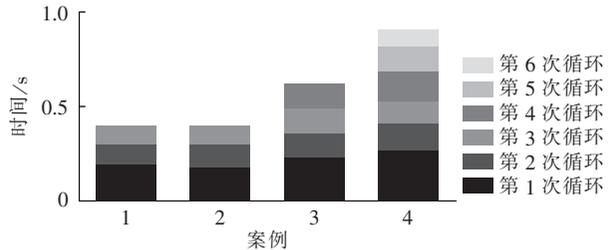


图 8 4 个故障诊断案例所需计算时间比较

Fig.8 Comparison of calculation time among four fault diagnosis cases

算平台为双核处理器(Intel Core I3-2100, 3.1 GHz), 内存容量为4 GB。从图8可以看出, 随着警报信息复杂性的增加, 单次循环所需计算时间相应增加, 并且需要更多次的循环求解才能满足搜索截止条件。

6 结语

保护/断路器的拒动或误动以及警报信息漏报或误报都是小概率事件, 但在实际系统中并不鲜见, 故障诊断时应予适当考虑。为处理故障诊断中保护/断路器的误动、拒动及警报信息误报、漏报等不确定因素, 本文建立了故障诊断的级联信道模型, 发展了融合信息理论的故障诊断解析模型, 构造了基于信息量损失最小的目标函数并采用了改进遗传算法求解, 并提出了故障诊断结果的评价方法。最后, 利用浙江电力系统实际发生的故障算例对所发展的模型与方法进行了测试, 得到了合理的故障诊断结果及其概率分布, 说明了所发展的模型与方法具有较强的容错能力, 且诊断速度也满足在线要求。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] WEI Lihong, GUO Wenxin, WEN Fushuan, et al. An online intelligent alarm-processing system for digital substations[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(3): 1615-1624.
- [3] GUO Wenxin, WEN Fushuan, LIAO Zhiwei, et al. A temporal constraint network based approach for alarm processing in power systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(4): 2435-2447.
- [4] 董明, 韦刘红, 文福拴, 等. 电力系统故障诊断的机会约束规划模型与方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 47-52.
DONG Ming, WEI Lihong, WEN Fushuan, et al. A chance-constrained programming based model and method for power system fault diagnosis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 47-52.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] MIAO H J, SFORNA M, LIU C C. A new logic-based alarm analyzer for on-line operational environment[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(3): 1600-1606.
- [8] YANG H T, CHANG W Y, HUANG C L. A new neural networks approach to on-line fault section estimation using information of protective relays and circuit breakers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1994, 9(1): 220-230.
- [9] 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.
- [10] LUO Xu, KEZUNOVIC M. Implementing fuzzy reasoning Petri-nets for fault section estimation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(2): 676-685.
- [11] 杨健维, 何正友. 基于时序模糊 Petri 网的电力系统故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(15): 46-51.
- YANG Jianwei, HE Zhengyou. Power system fault diagnosis approach based on time sequence fuzzy Petri net[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 46-51.
- [12] 汤磊, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于信息理论的电力系统在线故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 5-11.
TANG Lei, SUN Hongbin, ZHANG Boming, et al. Online fault diagnosis for power system based on information theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 5-11.
- [13] 冯永青, 孙宏斌, 朱成骥, 等. 基于信息理论与技术的地区电网辅助决策系统设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4): 58-62.
FENG Yongqing, SUN Hongbin, ZHU Chengqi, et al. Design of an auxiliary decision-making system for sub-transmission power network based on information theory and techniques[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(4): 58-62.
- [14] 钟义信. 信息科学原理[M]. 北京: 北京邮电学院出版社, 1996: 128-151.
- [15] 朱雪龙. 应用信息论基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 125-128.
- [16] 孙宏斌, 张伯明, 汤磊, 等. 电力系统中基于信息量损失最小的决策原理[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(12): 9-13.
SUN Hongbin, ZHANG Boming, TANG Lei, et al. A novel optional decision making principle based on minimization of information loss as applied to power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(12): 9-13.
- [17] ALLAN R N. Reliability evaluation of power systems[M]. [S.l.]: Springer, 1996: 14-15.
- [18] 陈丽娟, 胡小正. 2010 年全国输变电设施可靠性分析[J]. 中国电力, 2011, 44(6): 71-77.
CHEN Lijuan, HU Xiaozheng. Statistic analysis on reliability of power transmission and transformation facilities in China in 2010[J]. Electric Power, 2011, 44(6): 71-77.
- [19] 沈晓凡, 舒治淮, 刘宇, 等. 2009 年国家电网公司继电保护装置运行统计与分析[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 189-193.
SHEN Xiaofan, SHU Zhihui, LIU Yu, et al. Statistics and analysis on operation situation of protective relays of state grid corporation of China in 2009 [J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 189-193.
- [20] 何芳, 蔡兴国. 基于改进遗传算法的船舶电力系统网络重构[J]. 电工技术学报, 2006, 21(9): 25-30.
HE Fang, CAI Xingguo. Network reconfiguration of shipboard power system based on improved genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(9): 25-30.

作者简介:



张岩(1990-), 男, 山东菏泽人, 博士研究生, 主要从事电力系统故障诊断和系统恢复方面的研究(E-mail: zhangyan_1990@126.com);

张勇(1987-), 男, 浙江宁波人, 硕士研究生, 主要从事电力系统故障诊断和系统恢复方面的研究(E-mail: yong.zhang1987@gmail.com);

张岩

com);

文福拴(1965-), 男, 河南林州人, 特聘教授, 博士生导师, 主要从事电力系统故障诊断与系统恢复、电力经济与电力市场、智能电网与电动汽车等方面的研究工作(E-mail: fushuan.wen@gmail.com)。

(下转第 174 页 continued on page 174)

面快速搜索[J]. 中国电机工程学报,2010,30(10):50-56.

CHENG Linyan,ZHANG Baohui,HAO Zhiguo,et al. Fast search for key transmission section based on power component of line [J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(10):50-56.

[18] 闫常友,周孝信,康建东,等. 潮流转移灵敏度以及安全评估指标研究[J]. 中国电机工程学报,2010,30(19):7-13.

YAN Changyou,ZHOU Xiaoxin,KANG Jiandong,et al. Flow transferring sensitivity and security index analysis[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(19):7-13.

作者简介:



慕宗江

慕宗江(1988-),男,山东威海人,硕士研究生,研究方向为电力系统保护及电力系统自动化控制(E-mail:799560851@qq.com);

徐岩(1976-),男,吉林吉林人,副教授,博士,研究方向为电力系统继电保护、变电站综合自动化。

Online protection setting assessment based on power flow entropy

MU Zongjiang¹,XU Yan¹,QIU Xiangdong²,ZHANG Taiming³

(1. North China Electric Power University,Baoding 071003,China;

2. Join Bright Digital Power Technology Co.,Ltd.,Beijing 100096,China;

3. Shijiazhuang Electric Power Company,Shijiazhuang 050000,China)

Abstract: It is proposed to sequentially assess the protection settings according to the importance of branches for improving the efficiency of its online setting assessment. As the branches vulnerable to power flow impact may easily cause fault and induces cascading faults after trip-off,the power flow entropy is thus applied to assess the importance of branch. The possibility of cascading faults induced by the trip-off of faulty branch is assessed by the index Q_{li} based on the power flow transfer entropy and the vulnerability of branch to power flow impact is assessed by the index Q_{2i} based on the power flow distribution entropy. The product of Q_{li} and Q_{2i} is thus applied to assess the importance of branch. The simulation for IEEE 3-generator 9-bus system verifies the correctness of the proposed method. The distribution factor method is recommended to simplify the calculation of branch power flow variation.

Key words: electric power systems; relay protection; setting; entropy; distribution entropy; transfer entropy

(上接第 164 页 continued from page 164)

Analytical model for power system fault diagnosis integrated with information theory

ZHANG Yan¹,ZHANG Yong¹,WEN Fushuan¹,SUN Weizhen²,WANG Chao²

(1. College of Electrical Engineering,Zhejiang University, Hangzhou 310027,China;

2. Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310007,China)

Abstract: How to properly handle the uncertainties associated with the malfunctions of PRs (Protective Relays) and CBs (Circuit Breakers) as well as the false/missing alarms is one of major problems to be addressed in fault diagnosis of actual power systems. The Shannon's information theory is employed to deal with these uncertainties. First,a communication channel model is presented for the fault diagnosis problem, and the action logics of PRs and CBs as well as the relationship among PRs,CBs and alarms are expressed analytically. A new optimization model for power system fault diagnosis is next developed with the minimization of information loss as the objective,and can well accommodate uncertainties from various sources. Then,an improved genetic algorithm is employed to solve the optimization problem. Finally,actual scenarios of Zhejiang power system are served for demonstrating the tolerance capability and diagnosis speed of the developed method,and the diagnosis time is less than one second for complicated fault scenarios. The presented method could be used for on-line fault diagnosis of actual power systems.

Key words: electric power systems; fault diagnosis; alarm processing; uncertainty; information theory; incomplete information; relay protection; models