

DOI: 10.7500/AEPS201203257

含电气量信息的电力系统故障诊断解析模型

董 明¹, 张 勇¹, 张 岩¹, 文福拴¹, 孙维真², 王 超²

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 浙江电力调度通信中心, 浙江省杭州市 310007)

摘要: 现有的电力系统故障诊断解析模型采用的信息源比较局限, 信息冗余度不大, 在复杂故障情况下难以得到明确的故障诊断结果。随着以相量测量单元(PMU)为基础的广域测量系统(WAMS)的发展, 实时获取准确的系统电气量信息逐步成为可能。在此背景下, 发展了能够利用电气量信息的电力系统故障诊断解析模型。首先, 利用故障后的断路器状态与电气量快速确定故障区域; 然后, 对现有的解析模型作了进一步发展, 以充分利用电气量信息, 并对所发展的优化模型采用遗传算法求解。最后, 用算例说明了所发展模型的可行性。仿真结果表明, 所提出的方法具有较强的容错能力, 可以处理保护和断路器误动/拒动情况以及警报丢失或错误情况。

关键词: 故障诊断; 解析模型; 电气信息; 相量测量单元; 广域测量系统

0 引言

电力系统故障诊断就是利用故障发生后所产生的警报信息及时、有效地确定故障元件, 为调度人员快速辨识故障提供辅助决策, 其有助于尽快切除故障, 恢复电力系统的正常运行。国内外学者在这一领域开展了大量研究, 提出了基于专家系统^[1]、人工神经网络^[2]、解析模型^[3-7]、Petri 网^[8]、贝叶斯网^[9]等的故障诊断方法。在实际电力系统中, 故障发生时保护和断路器有可能误动或拒动, 警报上传过程中也可能出现上传不及时、畸变或丢失的情况。针对这些问题, 文献[6-7]在计及保护和断路器误动和拒动、警报误报和漏报的情况下, 发展了一种电力系统故障诊断解析模型。然而, 上述方法一般仅利用接收到的保护和断路器动作信息, 信息源比较单一, 信息冗余度较低, 当故障情况比较复杂且伴随保护/断路器异常动作和警报畸变/丢失情况时, 就可能无法获得明确的诊断结果, 有时甚至得到错误结果。

通信技术的发展和电力信息系统的逐渐成熟使得获取更加丰富的信息源用于故障诊断成为可能。在中国, 以相量测量单元(PMU)为基础的广域测量系统(WAMS)开始得到应用。文献[10]提出了基于 WAMS 的电力系统故障诊断方法, 所构造的用于识别故障位置的判据利用了故障发生后的电气量

特性信息, 并可以分析保护和断路器的误动/拒动情况。文献[11]对 PMU 的配置进行了研究, 并提出了利用潮流信息进行故障诊断的方法。文献[12]根据 PMU 量测到的实时信息, 采用模式分类技术和模式识别理论中的线性判别原理来搜索电气量的明显变化情况, 在此基础上形成了一种快速故障诊断方法。文献[13]利用广域同步信息, 构建了一种基于停电区域的故障诊断方法。

通过在现有故障诊断解析模型的基础上引入 PMU 测量到的电气量信息, 本文提出了一种基于多源信息的改进故障诊断解析模型。所发展的故障诊断模型分为 2 层: ①将断路器变位信息与电气量信息相结合, 形成一种故障区域快速识别方法; ②根据故障后电气量特性构建了故障诊断问题的判据, 发展了现有的故障诊断解析模型。所构造的模型具有较高的信息冗余度, 能够处理多重故障且伴随保护/断路器异常动作和警报畸变/丢失的情况。

1 整体设计

在实际电力系统中, 单一元件故障发生频率较高, 这种情况下如果继电保护和断路器正确动作, 则故障很容易被诊断出来。然而, 当电力系统发生多重故障或继电保护和断路器等安全自动装置发生拒动或误动时, 故障区域就会扩大, 其中可能包括多个元件, 在这种情况下就需要故障诊断系统协助运行人员诊断故障。为了在简单和复杂故障情况下能合理利用信息资源, 提高诊断效率, 这里采用分层诊断思想, 即将故障诊断过程划分为如图 1 所示的 2 个层次, 即故障区域识别和故障元件诊断。

收稿日期: 2012-03-29; 修回日期: 2012-07-10。

国家科技支撑计划重大资助项目(2011BAA07B02); 浙江省电力公司重点科技项目。

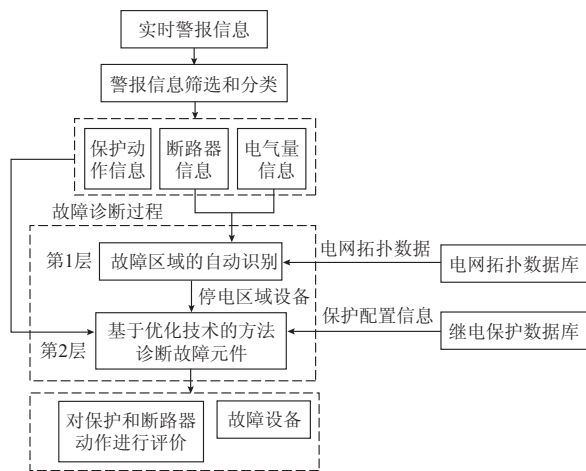


图1 2层故障诊断模式

Fig. 1 A two-layer mode for fault diagnosis

在第1层的故障区域自动识别中,利用实时断路器和电气量信息判断故障发生后所形成的新停电区域,即故障区域。当发生单一元件故障且保护和断路器均正确动作时,通过这一层即可得到诊断结果;当故障情况复杂时,则可通过这一步确定故障区域内的元件,为下一阶段的故障定位打下基础。

在第2层的故障元件诊断过程中,利用实时的继电保护、断路器和电气量等多源信息,建立高容错性的故障诊断解析模型,以准确而快速地诊断故障元件,并对保护和断路器的动作情况以及警报的正确性进行评价。

2 故障停电区域的自动识别

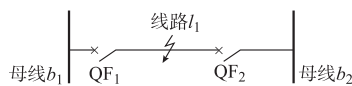
现有的故障后停电区域识别一般借助系统网络拓扑结构自动跟踪技术,这需要对故障前后的全网拓扑结构进行分析。然而,在通常情况下,故障发生后所形成的故障区域内元件数有限,因此,对全网重复进行拓扑分析显得没有必要。此外,传统的网络动态拓扑跟踪方法主要利用网络中元件的一次连接关系和断路器实时状态来分析判断系统拓扑结构,其数据源单一,对信息的可靠性依赖程度也较高。然而,在实际系统故障时,可能出现故障区域内的断路器变位信息错误、丢失或上送速度较慢的情况,此时上述方法将无法准确确定故障区域。

PMU可以直接量测母线电压和支路电流相量,并可计算获得测量点的功率、相位、功角等信息;其利用全球定位系统(GPS)高精度的授时功能统一给定时刻,保证全网数据的同步性,从而准确表征同一时刻下系统的实际情况。因此,这里将PMU量测获得的广域同步电气量的实时信息引入故障区域识别过程之中,提出一种将开关量与电气量相结合的故障区域快速识别方法。

2.1 故障区域边界断路器的判断

故障区域通过断路器变位切除故障而形成。这里将这类切除故障并确定故障区域的断路器定义为故障区域边界断路器,其特点是故障切除后断路器两侧的带电情况不同,即一侧带电、一侧停电。通过识别此类断路器,即可确定故障区域边界,从而形成故障区域。由于故障发生后存在断路器无法可靠断开的情况,因此,故障区域边界断路器不能仅通过断路器的变位信息来确定,还需要借助故障切除后PMU量测的电气量信息。

如图2所示,假设故障发生后,调度中心收到断路器 QF_1 动作的警报,此时需要判断 QF_1 两侧的带电状况。对于母线 b_1 侧,利用其电压信息进行判断,若母线侧停电,则理论上故障切除后母线电压将降至0。

图2 简单故障
Fig. 2 A simple fault

设故障切除后,PMU量测到的该母线电压为 V_1 , V_{set} 为事先设定的判断阈值,则判断母线侧停电的依据为:

$$|V_1| < V_{set} \quad (1)$$

类似地,对于线路 l_1 侧,可利用其电流信息进行判断,若线路侧停电,则理论上故障切除后线路电流将降至接近0。设故障切除后,PMU量测到的该线路电流为 I_1 , I_{set} 为事先设定的判断阈值,则判断线路侧停电的依据为:

$$|I_1| < I_{set} \quad (2)$$

可以采用上述方法判断断路器两侧的带电情况,从而确定该断路器是否为故障区域边界断路器。当某断路器变位信息误报时,采用文中方法,若判断出该断路器两侧均带电,则其不是故障区域边界断路器;当某断路器变位信息丢失,根据式(1)和式(2)来判断该断路器两侧的带电情况,若一侧带电,而另一侧不带电,则说明该断路器为区域边界断路器。这样,就可以在相当程度上避免断路器变位信息错误和缺失对确定故障区域所造成的负面影响,有利于准确识别故障区域边界和形成故障区域。

2.2 故障区域自动识别过程

故障发生后,相关断路器会变位且该断路器在故障区域内,因此可以从故障后所接收到的变位断路器中的一个故障区域边界断路器出发,沿其停电侧方向,采用广度优先搜索(breadth first search, BFS)方法对断路器进行搜索,以快速确定故障区域

边界,形成故障区域。这样可以避免对全网进行拓扑分析,提高计算效率。广度优先搜索法是从根节点开始,沿着树的宽度遍历树的节点。如果所有节点均被访问,则算法中止。

从故障发生时开始,到继电保护跳开触发断路器切除故障这一时间段内,调度中心将接收到断路器的变位警报信息,对所有变位警报对应的 n 个断路器进行编号并形成集合 $C = \{QF_1, QF_2, \dots, QF_n\}$ 。在自动识别过程中,首先按照编号顺序访问 C 中断路器并对其进行判断,找到其中第 1 个故障区域边界断路器;然后根据故障前网络的拓扑结构,并按照该断路器的停电方向进行广度优先搜索,对搜索路径上的断路器进行判断和记录,若所判断的断路器为故障区域边界断路器,这说明已经搜索到另一故障区域边界,则停止搜索;完成以上搜索后,若 C 中尚有未被搜索过的断路器,则说明可能存在多重设备同时故障导致的多故障区域,此时需要对未被搜索的断路器重复以上搜索过程,直至 C 中断路器都被搜索到为止。故障区域自动识别的流程如图 3 所示。将此过程所判断出的故障区域内的所有设备作为候选故障设备,以用于之后对系统元件的故障诊断。

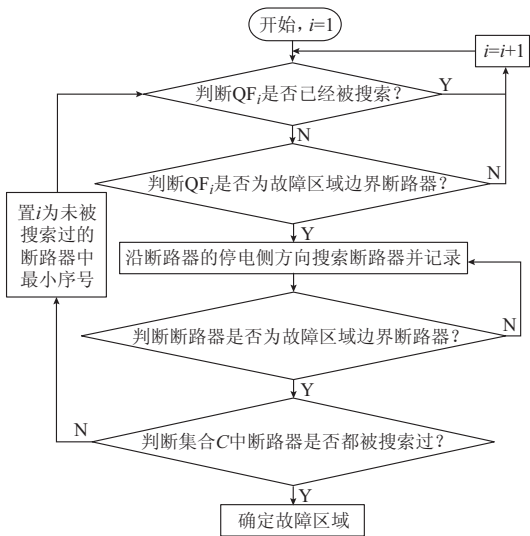


图 3 故障区域自动识别流程

Fig. 3 Process of automatic fault area identification

当故障发生后,出现故障区域内断路器变位信息错误、丢失或上送速度较慢的情况时,可以从该区域其他已上传变位信息的边界断路器开始进行搜索,并利用电气量信息辅助判断,从而克服上述困难,确定故障区域。

3 含电气量的故障诊断解析模型和方法

基于解析模型的故障诊断方法比较成熟,已经

在实际电力系统中得到应用。现有的故障诊断解析模型只利用故障发生后接收到的保护和断路器的动作警报信息,以故障发生与保护和断路器动作之间的逻辑关系作为依据进行故障诊断。这种方法简单实用,但由于信息源单一,信息冗余度较低,当继电保护和断路器出现误动或拒动、警报信息出现误报或漏报等情况时,可能得不到明确的诊断结果,有时甚至得到错误结果。这里把由 WAMS 得到的实时电气量信息引入故障诊断之中,并建立诊断判据,扩展现有故障诊断解析模型所利用的信息源,以提高容错性能。本文所发展的基于解析模型的故障诊断过程如图 4 所示。

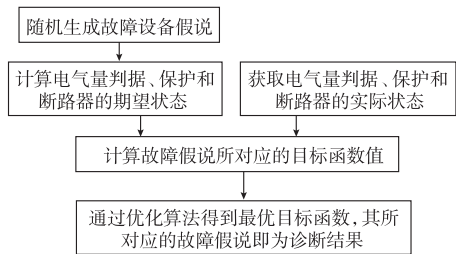


图 4 基于解析模型的故障诊断过程

Fig. 4 Developed analytic model based fault diagnosis procedure

3.1 电气量判据的建立

3.1.1 基于线路一端电压电流正序故障分量的电气量判据

根据叠加原理,故障后的系统可以表示为正常运行系统和故障附加系统的叠加,故障后的故障电压和故障电流可表示为负荷分量与故障分量之和。故障对系统运行的影响可以通过故障分量反映出来。根据对称分量法,将故障后的三相电气量按照正序、负序和零序进行三序分解。在三序分量中,对称和不对称故障都能通过正序故障分量表征出来,因此,这里选择正序故障分量建立判据^[14]。在如图 2 所示的简单系统中,当线路 l_1 发生故障时,根据叠加原理和对称分量理论对系统进行处理,进而得到的正序故障附加网络如图 5 所示,规定电流正方向为母线指向线路。

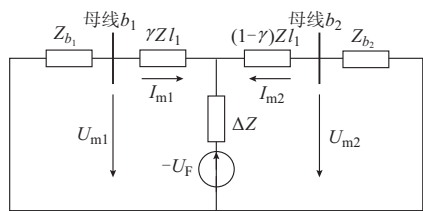


图 5 正序故障附加网络

Fig. 5 Positive sequence fault additional network

此时,线路两侧电压和电流正序故障分量的相

位将满足下述关系^[14]:

$$-\alpha < \arg\left(\frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1}\right) < 180^\circ - \alpha \quad (3)$$

式中: \dot{I}_1 和 \dot{U}_1 分别为线路一侧量测到的电流和电压正序故障分量; $\arg(\cdot)$ 表示 2 个相量间的相位差; α 为功率方向继电器的内角, 这里取 $\alpha=0^\circ$ 。

根据以上原理, 建立基于线路一端电气量正序故障分量的 0-1 模型判据, 用 m 表示, 其值定义为:

$$m = \begin{cases} 1 & 0^\circ < \arg\left(\frac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1}\right) < 180^\circ \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

当线路故障时, 其两侧 m 值都应该为 1; 而当故障发生在线路之外的区域时, 两侧的 m 值则根据故障位置分别为 0 和 1。

3.1.2 基于线路两端故障电流的电气量判据

在故障发生后, 线路两端故障相电流的相位将满足下述关系^[13]:

$$-90^\circ < \arg\left(\frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_3}\right) < 90^\circ \quad (5)$$

式中: \dot{I}_2 和 \dot{I}_3 分别为线路两端 PMU 测量到的故障相的故障电流。

据此可建立基于线路两端故障电流的 0-1 模型判据, 这里用 s 表示, 其定义为:

$$s_{A/B/C} = \begin{cases} 1 & -90^\circ < \arg\left(\frac{\dot{I}_{2(A/B/C)}}{\dot{I}_{3(A/B/C)}}\right) < 90^\circ \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$s = s_A \oplus s_B \oplus s_C \quad (7)$$

式中: $s_{A/B/C}$ 表示 s_A 或 s_B 或 s_C ; $\dot{I}_{k(A/B/C)}$ 表示 \dot{I}_{kA} 或 \dot{I}_{kB} 或 \dot{I}_{kC} ; s_A, s_B, s_C 分别对应三相判据值; \oplus 表示逻辑加法运算。

当该线路上发生故障时, s 应为 1, 否则为 0。

3.1.3 基于流入母线电流和的电气量判据

根据基尔霍夫电流定律, 当母线处于正常运行状态时, 连接在母线上的所有元件流入母线的电流之和为 0; 而当母线上发生故障时, 连接在母线上的所有元件流入母线的电流之和等于故障点的短路电流。这里将从母线到线路的方向设定为线路电流的正方向, 如图 6 所示。

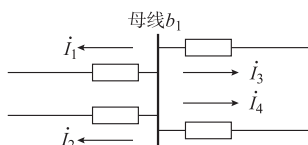


图 6 v 判据原理图

Fig. 6 Principle diagram of criterion v

若母线 b_1 故障, 则 $|\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{I}_4| > I_{\text{set}}$, 这里 I_{set} 为事先设定的接近 0 的电流门槛值。根据这个原理, 建立母线侧 0-1 模型判据, 这里用 v 表示, 其定义为:

$$v_{A/B/C} = \begin{cases} 1 & \left| \sum_{k=1}^n \dot{I}_{k(A/B/C)} \right| > I_{\text{set}(A/B/C)} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

$$v = v_A \oplus v_B \oplus v_C \quad (9)$$

式中: $v_{A/B/C}$ 表示 v_A 或 v_B 或 v_C ; $I_{\text{set}(A/B/C)}$ 表示 $I_{\text{set}A}$ 或 $I_{\text{set}B}$ 或 $I_{\text{set}C}$; v_A, v_B, v_C 分别对应三相的判据值; n 为与相应母线连接的元件总数。

当该母线上发生故障时, v 应为 1, 否则为 0。

3.2 解析模型的建立

故障诊断解析模型的目标函数用 $E(\mathbf{D})$ 表示, 这里 $\mathbf{D} = [d_1, d_2, \dots, d_{n_d}]$ 表示故障假说。 \mathbf{D} 是一个 n_d 维的向量, n_d 为故障区域内的设备数, $d_k = 0$ 或 $d_k = 1$ 分别表示故障区域内的第 k 个设备处于正常或故障状态。 $E(\mathbf{D})$ 反映故障假说的可信程度, $E(\mathbf{D})$ 越小, 则故障假说越可信。这里将电气量判据引入模型, 得到下述目标函数:

$$E(\mathbf{D}) = \sum_i^{n_m} |m_i - m_i^*(\mathbf{D})| + \sum_j^{n_s} |s_j - s_j^*(\mathbf{D})| + \sum_k^{n_v} |v_k - v_k^*(\mathbf{D})| + \sum_p^{n_r} |r_p - r_p^*(\mathbf{D})| + \sum_q^{n_c} |c_q - c_q^*(\mathbf{D})| \quad (10)$$

式中: n_m, n_s, n_v, n_r 和 n_c 分别为 3.1 节所述的故障区域内的 3 种电气量判据以及保护和断路器的个数; m_i 为第 i 个 m 判据的实际状态; s_j 为第 j 个 s 判据的实际状态; v_k 为第 k 个 v 判据的实际状态; r_p 为第 p 个保护的实际情况, $r_p = 0$ 和 $r_p = 1$ 分别表示继电保护未动作和动作; c_q 为第 q 个断路器的实际情况, $c_q = 0$ 和 $c_q = 1$ 分别表示断路器未动作和动作; $m_i^*(\mathbf{D}), s_j^*(\mathbf{D}), v_k^*(\mathbf{D}), r_p^*(\mathbf{D}), c_q^*(\mathbf{D})$ 分别对应 m_i, s_j, v_k, r_p, c_q 的期望状态, 它们均为故障假说 \mathbf{D} 的函数。

为描述方便, 在下文中 m_i, s_j, v_k, r_p, c_q 除了表示状态外, 还用于表示其具体对象。

3.3 期望状态的重新定义

目标函数中各期望状态均为故障假说 \mathbf{D} 的函数, 根据 \mathbf{D} 内相关元件和所获得的一些实际状态量求取。

3.3.1 电气量判据的期望状态

1) m 判据

当线路发生故障时, 其两侧对应的 m 判据的期望状态均应为 1; 当相应线路未故障时, 以 m_i 的期

望状态为依据计算 m_i 所需电气量测点处事先规定的电流正方向,当该量测点上游未发生故障且下游发生故障时, $m_i^*(\mathbf{D})=1$, 否则 $m_i^*(\mathbf{D})=0$ 。

$$m_i^*(\mathbf{D}) = \bar{A} \otimes \left(\sum_{d_y \in S_{\text{down}}(m_i)} d_y \right) \oplus d_z \quad (11)$$

$$A = \sum_{d_x \in S_{\text{up}}(m_i)} d_x \quad (12)$$

式中: d_z 为 m_i 所对应的线路; $S_{\text{up}}(m_i)$ 为 m_i 电气量测点沿规定电流反方向根据拓扑结构能搜索到的故障区域内的所有设备的集合; $S_{\text{down}}(m_i)$ 为该量测点沿规定电流正方向根据拓扑结构能搜索到的故障区域内除 d_z 外的所有设备的集合; \sum 表示连续的逻辑加法运算; \bar{A} 表示 A 的非运算(同下文); \otimes 表示逻辑乘法运算。

2) s 判据

s_j 与故障区域内的线路元件相对应,其期望状态为:当所对应的线路发生故障时, $s_j^*(\mathbf{D})=1$, 否则 $s_j^*(\mathbf{D})=0$ 。

$$s_j^*(\mathbf{D}) = d_j \quad (13)$$

3) v 判据

v_k 与故障区域内的母线元件相对应,其期望状态为:当所对应的母线发生故障时, $v_k^*(\mathbf{D})=1$, 否则 $v_k^*(\mathbf{D})=0$ 。

$$v_k^*(\mathbf{D}) = d_k \quad (14)$$

3.3.2 保护的期望状态

1) 线路主保护

线路主保护的逻辑为:所保护的元件故障,且对应于该元件的电气量判据满足故障时的条件,则线路主保护应动作。

$$r_i^* = d_i \otimes [(m_{i1} \otimes m_{i2}) \oplus s_i] \quad (15)$$

式中: m_{i1} 和 m_{i2} 分别为线路 l_i 两端电气量测点对应的 m 判据。

2) 母线保护

母线保护的逻辑为:所保护的母线发生故障,且所对应的电气量判据满足故障条件,则母线保护应动作。

$$r_i^* = d_i \otimes [v_i \oplus \sum_{m \in P} \bar{m}_i] \quad (16)$$

式中: \sum 表示连续的逻辑乘法运算; P 为与母线相连的所有 m 的集合。

3) 线路主后备保护

线路主后备保护的逻辑为:所对应的主保护期望动作,但是实际发生拒动,则主后备保护应动作。

$$r_j^* = r_i^* \otimes \bar{r}_i \quad (17)$$

4) 线路次后备保护

线路次后备保护的逻辑为:所对应的主后备保护期望动作,但是实际发生拒动,或保护的关联路径上尚有未被切除的故障时^[6],次后备保护应动作。

$$r_k^* = r_j^* \otimes \bar{r}_j \oplus \sum_{d_y \in Z(r_k)} (d_y \otimes \prod_{c_p \in p(r_k, d_y)} \bar{c}_p) \quad (18)$$

式中: $Z(r_k)$ 和 $p(r_k, d_y)$ 的含义见文献[6]。

5) 断路器失灵保护

断路器失灵保护的逻辑为:当元件发生故障,且其保护动作触发断路器,但断路器发生拒动,此时断路器失灵保护应动作。

$$r_p^* = \left[\sum_{i=1,2,\dots,y} d_i \otimes (r_i \oplus r_j \oplus r_k) \right] \otimes \bar{c}_p \quad (19)$$

3.3.3 断路器的期望状态

断路器的逻辑为:元件发生故障,且其保护可以触发到断路器时,断路器应动作。

$$c_p^* = \sum_{i=1,2,\dots,y} d_i \otimes (r_i \oplus r_j \oplus r_k \oplus r_p) \quad (20)$$

3.4 求解方法

采用遗传算法求解式(10)所表示的故障诊断的优化模型。由于很多文献已对遗传算法作过介绍,这里不再赘述。

4 算例分析

这里以一个较为复杂的故障情况为例,来说明所提出的故障诊断方法的能力。在这种故障场景中,有4个设备同时发生故障,且在一个较小区域内存在三重故障,还伴随保护误动和拒动、断路器拒动以及警报信息丢失和电气量信息局部畸变等复杂情况。以图7所示的IEEE新英格兰10机39节点系统为例来说明所发展的方法,图中阴影部分表示故障区域。在线路L4-14, L12-13, L26-29以及母线B14上设置三相金属性接地短路故障。故障发生后,接收到的保护和断路器的警报信号为:线路L4-14上母线B4侧后备保护、线路L4-14上母线B14侧主保护、线路L12-13两侧主保护、线路L10-13上母线B10侧主保护、母线B14主保护和线路L12-13上靠近母线B13侧断路器失灵保护均动作;线路L4-14两侧断路器、线路L14-15靠近母线B15侧断路器、线路L13-14两侧断路器、线路L10-13两侧断路器跳闸和线路L26-29两侧断路器跳闸。相关断路器的编码见表1,其中QF₍₄₋₁₄₎表示线路L4-14靠近母线B4侧的断路器,依此类推。

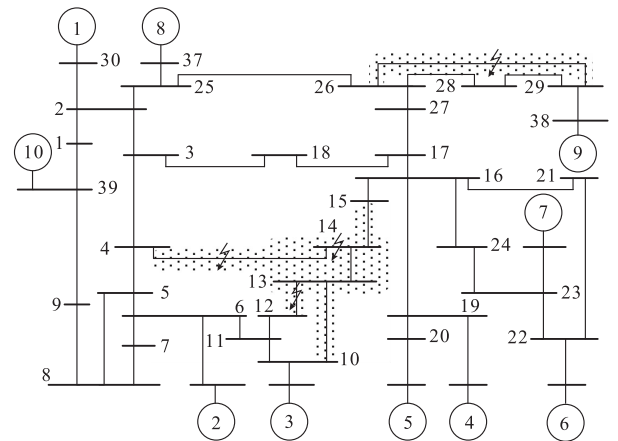


图 7 IEEE 新英格兰 10 机 39 节点系统
Fig. 7 IEEE New England 10-machine 39-bus system

表 1 断路器编码					
Table 1 Encoding of circuit breakers					
QF ₍₄₎₋₁₄	QF ₄₋₍₁₄₎	QF ₍₁₄₎₋₁₅	QF ₁₄₋₍₁₅₎	QF ₍₁₃₎₋₁₄	QF ₁₃₋₍₁₄₎
<i>c</i> ₀	<i>c</i> ₁	<i>c</i> ₂	<i>c</i> ₃	<i>c</i> ₄	<i>c</i> ₅
QF ₍₁₀₎₋₁₃	QF ₁₀₋₍₁₃₎	QF ₍₁₂₎₋₁₃	QF ₁₂₋₍₁₃₎	QF ₍₂₆₎₋₂₉	QF ₂₆₋₍₂₉₎
<i>c</i> ₆	<i>c</i> ₇	<i>c</i> ₈	<i>c</i> ₉	<i>c</i> ₁₀	<i>c</i> ₁₁

首先按照第 2 节中所述方法,根据故障后断路器跳闸的警报信息和其两端停电状况来确定故障区

表 2 各设备编号及其实际状态 (诊断结果所对应各期望状态)												
Table 2 Encoding and actual states of components (expected states corresponding to diagnosis result)												
元件	L4-14		L14-15		L13-14		L10-13		L12-13		B13	B14
	d_0		d_1		d_2		d_3		d_4		d_5	d_6
主保护	r_{10}	r_{11}	r_{12}	r_{13}	r_{14}	r_{15}	r_{16}	r_{17}	r_{18}	r_{19}	r_{b0}	r_{b1}
	0(1)	1(1)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	1(0)	0(0)	1(1)	1(1)	0(0)	1(0)
主后备保护	r_{20}	r_{21}	r_{22}	r_{23}	r_{24}	r_{25}	r_{26}	r_{27}	r_{28}	r_{29}	—	—
	1(1)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	—	—
次后备保护	r_{30}	r_{31}	r_{32}	r_{33}	r_{34}	r_{35}	r_{36}	r_{37}	r_{38}	r_{39}	—	—
	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	0(0)	—	—
断路器失灵保护	—	r_{40}	r_{41}	—	r_{42}	r_{43}	—	r_{44}	—	r_{45}	—	—
	—	0(0)	0(1)	—	0(0)	0(0)	—	0(0)	—	1(1)	—	—
断路器	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	—	—
	1(1)	1(1)	0(1)	1(0)	1(1)	1(1)	1(0)	1(1)	0(1)	0(1)	—	—
m 判据	m_0	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8	m_9	—	—
	1(1)	1(1)	0(0)	1(1)	0(0)	1(0)	1(1)	0(0)	1(1)	1(1)	—	—
s 判据	s_0		s_1		s_2		s_3		s_4		—	—
	1(1)		0(0)		0(0)		0(0)		0(1)		—	—
v 判据	—		—		—		—		—		v_0	v_1
	—		—		—		—		—		0(0)	1(1)

注: 0(1)表示警报实际状态为 0,对应的警报期望状态为 1,其余依此类推;“—”表示不存在。

诊断结果用元件序列表示为:1000101,即线路 L4-14,L12-13 和母线 B14 同时故障,对应于该诊断结果的各设备期望状态也列于表 2 (其中括号里面的数字所示)。根据诊断结果并结合收到的警报进行分析:线路 L4-14 上 B4 侧主保护以及断路器 QF₂ 和 QF₉ 拒动;线路 L10-13 上 B10 侧主保护误动导

致断路器 QF₆ 误跳;断路器 QF₈ 和断路器失灵保护 *r*₄₁ 警报丢失;电气量畸变导致判据 *s*₄ 出错。故障诊断结果与所设置的故障情况相符。

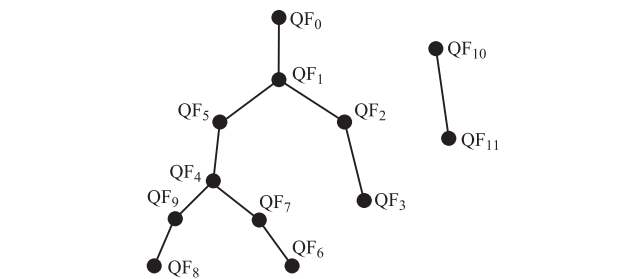


图 8 故障区域搜索示意
Fig. 8 An illustration of searching fault areas

由搜索结果可知,共有 2 个故障区域。由于断路器 QF₁₀ 和 QF₁₁ 确定的故障区域中仅包含唯一元件即线路 L26-29,则该线路为故障元件。另一故障区域则包含 L4-14,L14-15,L13-14,L10-13,L12-13,B13 和 B14,共 7 个元件;区内各元件、保护和断路器以及 3 种电气量判据的编号、对应关系以及实际状态见表 2。

致断路器 QF₆ 误跳;断路器 QF₈ 和断路器失灵保护 *r*₄₁ 警报丢失;电气量畸变导致判据 *s*₄ 出错。故障诊断结果与所设置的故障情况相符。

5 结语

针对现有故障诊断解析模型所利用的信息源比

较局限,从而导致在复杂故障情况下可能得不到明确诊断结果的问题,本文在现有解析模型的基础上,通过充分利用 WAMS 中的电气量信息,发展了一种利用多源信息的故障诊断解析模型。首先,通过联合利用故障后的电气量和断路器变位信息,给出了一种新的故障区域快速识别方法;然后,通过计及故障后的电气量变化特性,发展了一种改进的故障诊断解析模型。本文方法所利用的信息具有较高的冗余度,这不但提高了故障区域自动识别的可靠性,而且改善了故障诊断解析方法的容错性。算例结果表明,所提出的方法能够处理存在保护/断路器异常动作和警报畸变/丢失的复杂故障情况。根据实际电力系统的继电保护和安全自动装置配置情况对本文所发展的模型或方法进行广泛测试,在此基础上扩展所提出的模型,是有待进一步开展的研究工作。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] MAHANTY R N, GUPTA P B D. Application of RBF neural network to fault classification and location in transmission lines [J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151(2): 201-212.
- [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] 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.
- [5] WEI Liuhong, GUO Wenxin, WEN Fushuan, et al. An on-line intelligent alarm processing system for digital substations[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(3): 1615-1624.
- [6] WEI Liuhong, 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.
- [7] 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 Liuhong, 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.
- [8] 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.
- [9] 何小飞,童晓阳,孙明蔚. 基于贝叶斯网络和 D-S 证据理论的分布式电网故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(10): 42-47.
HE Xiaofei, TONG Xiaoyang, SUN Mingwei. Distributed power system fault diagnosis based on Bayesian network and Dempster-Shafer evidence theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 42-47.
- [10] 周子冠,白晓民,李文锋,等. 基于广域测量系统的电网故障在线智能化诊断与分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 1-7.
ZHOU Ziguan, BAI Xiaomin, LI Wenfeng, et al. A novel smart on-line fault diagnosis and analysis approach of power grid based on WAMS [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 1-7.
- [11] 游家训,彭明伟,唐跃中,等. 混合量测系统中利用潮流信息的电网故障诊断[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 411-416.
YOU Jiaxun, PENG Mingwei, TANG Yuezhong, et al. Fault diagnosis using power flow in hybrid measurements system [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 411-416.
- [12] ZHANG Y G, WANG Z P, ZHANG J F, et al. Fault localization in electrical power systems: a pattern recognition approach[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2011, 33(3): 791-798.
- [13] 戴志辉,李强. 基于停电区域及广域同步信息的电网故障快速诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 50-53.
DAI Zhihui, LI Qiang. Fault diagnosis based on power failure zone and wide-area synchronization information [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 50-53.
- [14] 苏斌,董新洲,阿德南,等. 方向高频保护的動作行为(第二部分): 复故障情况下方向高频保护的動作行为分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(2): 9-13.
SU Bin, DONG Xinzhou, ADNAN S, et al. Performance analysis of power line carrier protection for transmission lines: Part II study on performance of power line carrier protection under multiple fault [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2003, 15(2): 9-13.

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

张 勇(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: yong. zhang1987@gmail.com

张 岩(1990—),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: zhangyan_1990@126.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:电力系统故障诊断与系统恢复、电力经济与电力市场、智能电网与电动汽车。E-mail: fushuan. wen@gmail.com

(编辑 孔丽蓓)

An Analytic Model for Power System Fault Diagnosis Employing Electrical Data

DONG Ming¹, ZHANG Yong¹, ZHANG Yan¹, WEN Fushuan¹, SUN Weizhen², WANG Chao²

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

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

Abstract: The existing analytic models for power system fault diagnosis generally only employ the state information of protective relays and circuit breakers, and the information redundancy is very limited. As the result, definite diagnosis results may not always be attained for complicated fault scenarios. The development of the phasor measurement unit (PMU) based wide area measurement system (WAMS) has generally made the acquisition of real-time and accurate electrical data possible. Given this background, the existing fault diagnosis analytic model is further developed with the electrical data from WAMS, and can be solved by the well-established genetic algorithm. Firstly, the fault areas are rapidly determined by using the combined data of states of circuit breakers and electrical data. Then, the fault diagnosis is carried out for the identified fault areas using the proposed analytical model. Finally, it is shown by simulation results of a sample system that the developed model is feasible and has good fault-tolerant capability. It can handle complicated fault scenarios with malfunctions of protective relays/circuit breakers as well as distorted/lost alarms.

This work is supported by National Key Technology Research and Development Program of China (No. 2011BAA07B02) and a key project from Zhejiang Electric Power Corporation.

Key words: fault diagnosis; analytic model; electrical data; phasor measurement unit (PMU); wide area measurement system (WAMS)