

DOI: 10.7667/PSPC170360

基于告警时序的输电设备故障定位方法的研究

闫丽梅, 周忠媛, 徐建军, 王宏宇, 宋佳琳

(东北石油大学电气信息工程学院电气工程系, 黑龙江 大庆 163318)

摘要: 电网故障设备定位如果只依靠静态告警信息, 不能计入告警后续信息, 则会导致电网故障设备定位精度低和出现多解的问题, 因此考虑了告警的动态时序性。基于告警时序信息, 定义了故障设备状态时序矩阵、告警时序矩阵、断路器时序矩阵、主保护时序矩阵、近后备保护时序矩阵和远后备保护时序矩阵以及矩阵中元素的建立方法。同时为了求解期望值, 定义了断路器期望时序矩阵、主保护期望时序矩阵、近后备保护期望时序矩阵和远后备保护期望时序矩阵。为了形成期望值矩阵, 又定义了设备-主保护关联矩阵、设备-近后备保护关联矩阵和设备-远后备保护关联矩阵。基于 SCADA 和 WAMS 的开关和保护信息, 构建了故障设备定位的时序目标函数。以设备状态的时序矩阵元素为待求解的状态量, 利用改进的免疫遗传算法作为求解时序目标函数的方法。这样求解的设备状态不仅包含设备故障与否的状态, 还包括设备故障时间。特别是对于电网中有多个设备不同时间动作的情况, 可以清晰识别。同时对免疫遗传算法进行改进, 形成了基于记忆的免疫遗传算法, 解决了动态告警信息被忽略的问题, 提高了故障设备定位的速度和精度。

关键词: 告警时序; 故障定位; 时序矩阵; 免疫遗传; 时序目标函数

Research on the method of fault location of transmission device based on time series of alarm

YAN Limei, ZHOU Zhongyuan, XU Jianjun, WANG Hongyu, SONG Jialin

(School of Electrical Engineering & Information, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: If the fault location of the power grid equipment only depends on the static alarm information, not records subsequent alarm information, it will leads to low positioning accuracy of fault location and multi-solution problem. So, the dynamic timing sequence of alarms are considered. Based on alarm timing sequence information, timing matrix of fault equipment state, timing matrix of alarm, timing matrix of circuit breaker, timing matrix of main protection, timing matrix of near backup protection, and timing matrix of remote backup protection, as well as method of establishing element in matrix are defined. Also, in order to solve the expected value, expected timing matrix of the circuit breaker, expected timing matrix of main protection, expected timing matrix of near backup protection and expected timing matrix of remote backup protection are defined. For forming the expected value matrix, correlation matrix of equipment-main protection, correlation matrix of equipment-near backup protection and correlation matrix of equipment-remote backup protection are defined. Based on the switch and protection information of SCADA and WAMS, the timing sequence objective function of fault location is constructed. Taking elements of the timing matrix of the device state as the quantity of state to be solved, the improved immune genetic algorithm is used to solve the timing sequence objective function. In this way, the solved device status not only includes the state of equipment failure or not, but also the time of equipment failure. Particularly, the condition that multiple devices operating at different times in power grid can clearly be identified. At the same time, the immune genetic algorithm is improved to form a memory based immune genetic algorithm, which solves the problem that the dynamic alarm information is ignored and improves the speed and accuracy of fault location.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51774088).

Key words: alarm timing; fault location; timing matrix; immune genetic; sequential objective function

0 引言

以往的故障诊断方法都是在确认故障报警信息

上传结束后, 搜集与故障过程相关的全部告警信息进行诊断, 忽略了故障发展的动态过程和告警信息的时间连续性, 实际上是一种静止的和孤立的诊断思路。这种诊断思路由于把连续的故障过程割裂处理, 对于持续时间较长的连续性故障缺乏有效的处

理能力。在发生连续故障事件时, 已有的诊断方法要么因无法确定故障结束时刻而不能及时进行诊断, 要么强行截取部分告警信息进行片面诊断, 而且无法处理后续的故障过程。如果不考虑报警的时序性, 容易出现误诊的情况。文献[1]中对故障停电区域进行了故障诊断。当不考虑时序特征信息进行诊断时得到两个诊断结果: 一是线路 d_2 发生故障; 二是线路 d_1 和 d_2 都发生故障。诊断结果不够明确。

考虑告警时序信息可以提高故障设备定位的准确性。目前考虑告警时序信息的方法还不多。针对以前研究电网故障设备定位主要依靠静态告警信息, 不能计入告警后续信息, 导致电网故障设备定位精度低和出现多解的问题, 本文基于告警时序信息的方法, 动态引用告警信息, 提高故障设备定位的精度。

1 告警时序矩阵的建立

为了描述设备状态, 定义设备时序状态向量。

定义 1: 设备时序状态矩阵 X 。表示设备 i 在 t 时刻是否为故障状态的矩阵。设 t_i 表示设备 i 故障时刻; g 表示告警时间的个数; e 表示设备个数; x_{ij} 表示为矩阵 X 的元素, 维数为 $g \times e$ 。即

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & t \geq t_i \text{ 时元件发生故障} \\ 0 & t \geq t_i \text{ 时元件不发生故障} \end{cases} \quad (1)$$

定义 2: 断路器跳闸的时序矩阵 D 。维数为 $g \times a$, 其中, a 表示断路器的个数。 d_{ij} 表示为矩阵 D 的元素, 定义为

$$d_{ij} = \begin{cases} 1 & t \leq t_i \text{ 时断路器跳闸} \\ 0 & t \leq t_i \text{ 时断路器不跳闸} \end{cases} \quad (2)$$

定义 3: 主保护动作的时序矩阵 ZB 。维数为 $g \times b$, 其中, b 表示主保护的个数。 zb_{ij} 表示 ZB 的元素, 即

$$zb_{ij} = \begin{cases} 1 & t \leq t_i \text{ 时主保护动作} \\ 0 & t \leq t_i \text{ 时主保护不动作} \end{cases} \quad (3)$$

定义 4: 近后备保护动作的时序矩阵 JB 。维数为 $g \times c$, 其中, c 表示近后备保护的个数。 jb_{ij} 表示 JB 的元素, 即

$$jb_{ij} = \begin{cases} 1 & t \geq t_i \text{ 时近后备保护动作} \\ 0 & t \geq t_i \text{ 时近后备保护不动作} \end{cases} \quad (4)$$

定义 5: 远后备保护动作的时序矩阵 YB 。维数为 $g \times d$ 。其中, d 表示远后备保护的个数。 yb_{ij} 表示 YB 的元素, 即

$$yb_{gd} = \begin{cases} 1 & t \geq t_i \text{ 时远后备保护动作} \\ 0 & t \geq t_i \text{ 时远后备保护不动作} \end{cases} \quad (5)$$

定义 6: 总保护动作的时序矩阵 B 。对主保护、近后备保护和远后备保护作出它们之间关系表。根据关系表, 对主保护时序矩阵、近后备保护时序矩阵和远后备保护时序矩阵进行换行, 合并或者扩维处理, 使得这三种保护的期望时序矩阵具有相同的维数。维数为 $g \times f$ 。其中, f 表示总保护的个数。

b_{ij} 表示 B 的元素, 即

$$b_{ij} = \begin{cases} 1 & t \geq t_i \text{ 时总保护动作} \\ 0 & t \geq t_i \text{ 时总保护不动作} \end{cases} \quad (6)$$

$$B = ZB \cup JB \cup YB \quad (7)$$

然后对总保护的时序矩阵进行合并处理, 对同一个设备用一个总保护值进行表示。合并的原则为

$$B_i = ZB_i \cup JB_i \cup YB_i \quad (8)$$

这样便可以把最终的总保护时序矩阵的维数固定为设备的个数。即此时 B 的维数为 $g \times e$ 。

2 建立时序目标函数

电力系统故障设备定位就是要找出最能解释告警信号的故障假说, 即可以转换为使目标函数最小的问题。以前的研究中不考虑告警时序, 一般建立下面的目标函数^[2-17]。

$$\min f = \sum_{i=1}^m |d_i - \dot{d}_i| + \sum_{k=1}^n |b_k - \dot{b}_k| \quad (9)$$

式中: f 为目标函数; d_i 为第 i 个断路器的状态量, 当断路器因故障开断时, $d_i = 1$, 当断路器闭合时, $d_i = 0$; \dot{d}_i 为第 i 个断路器状态的期望值; b_k 为第 k 个保护的状态量, 当保护因故障动作时, $b_k = 1$, 当保护不动作时, $b_k = 0$; \dot{b}_k 为第 k 个保护状态的期望值; m 为断路器的总个数; n 为保护的总个数。

此目标函数的缺点是: 没有考虑告警时序, 只是在故障的某个阶段选取断路器和保护值进行计算, 很容易出现多个结果, 或者结果错误的现象。如果考虑告警时序, 建立如下的时序目标函数。

$$\min f(X) = \sum_{i=1}^g \left(\sum_{k=1}^f |b_{ki} - \dot{b}_{ki}| \right) \quad (10)$$

式中: $f(X)$ 为总保护的时序目标函数; b_{ki} 为总保护动作的时序矩阵中的元素; \dot{b}_{ki} 为总的保护期望时序矩阵中的元素; f 为总的保护期望矩阵的列数; g 为告警的总个数。

这样定义的目标函数, 不仅可以考虑告警时序, 同时还可以避免当相同的断路器保护的告警信息,

仅是时序不同的情况下求取的值不唯一的缺点。

由于遗传算法只能对正的最大值进行优化,因此将上述求最小值优化问题转化为求下述最大值问题。

$$\max F(X) = \max \sum_{j=1}^z f(X) = \max W - \sum_{i=1}^g \left(\sum_{k=1}^f |b_{ki} - \dot{b}_{ki}| \right) \quad (11)$$

式中, W 为一个特别大的数, 比如 $W = 10^7$ [14]。

对式(11)进行简化, 得到

$$\begin{aligned} \max F(X) &= \max \sum_{j=1}^z f(X) = \max W - \sum_{i=1}^g \left(\sum_{k=1}^f |b_{ki} - \dot{b}_{ki}| \right) = \\ &= \max W - \sum_{i=1}^g \left[\sum_{k=1}^f (b_{ki} - \dot{b}_{ki})^2 \right] = \max W - \\ &= \sum_{i=1}^g \sum_{k=1}^f (b_{ki}^2 + \dot{b}_{ki}^2 - 2b_{ki}\dot{b}_{ki}) \end{aligned} \quad (12)$$

由于进行逻辑运算, 所以简化为

$$\max F(X) = \max W - \sum_{i=1}^g \sum_{k=1}^f (b_{ki} + \dot{b}_{ki} - 2b_{ki}\dot{b}_{ki}) \quad (13)$$

式中, b_{ki} 和系统最后要求解的最大值下的状态 X 无关, 因此可以去掉。简化为

$$\max F(X) = \max W - \sum_{i=1}^g \sum_{k=1}^f (\dot{b}_{ki} - 2b_{ki}\dot{b}_{ki}) \quad (14)$$

$$\max F(X) = \max W - \sum_{i=1}^g \left(\sum_{k=1}^f \dot{b}_{ki} \right) + 2 \sum_{i=1}^g \left(\sum_{k=1}^f (b_{ki}\dot{b}_{ki}) \right) \quad (15)$$

期望值的确定由于涉及到告警的时间序列, 因此期望值的建立也是基于时间的期望值矩阵。采取专家知识的方法求取系统的期望值。

3 基于反向推理理论建立保护和断路器期望值时间矩阵

反向推理从表示目标的谓词或命题出发, 使用一组产生式规则证明事实谓词或命题成立。要实现逆向推理其策略如下: 先根据问题提出一个假设目标, 然后逐一匹配知识库中的规则, 当某条规则的结论部分被匹配成功之后, 将此规则的前半部分取出来加入数据库中, 并逐一检验这些前提部分是否存在, 如果这些前提事实被当前数据库所匹配, 则表明源假设目标成立, 问题得到求解。否则, 把这条规则的前提部分作为子目标, 递归执行上述过程, 直到假设目标被证实或被否定为止。

逆向推理由目标驱动, 从一组假设出发验证结论。其优点是搜索目的性强, 推理效率高。缺点是

目标的选择具有盲目性, 可能会求解许多假的目标。它是先提出假设性的结论, 然后由此出发寻找支持该假设的证据, 当所需要的证据与用户提供的初始信息相匹配时, 则推理成功。

保护动作、开关动作以及电气设备故障之间存在着必然的因果关系。一个电气设备的故障必然导致它所关联的保护设备的动作, 而保护设备的动作就会触发电气设备相关联的开关的动作, 最后开关的动作将电气设备从电网中隔离出去。正是这种基于原因(设备故障)与表象(保护、开关动作报警信息)的内在关系, 给故障诊断提供了依据。

采用反向推理, 即以某个设备发生故障为已知, 根据规则推理出保护和断路器应该动作的行为, 即为期望值。求取期望值的具体步骤为

(1) 假设某一设备故障;

(2) 进行保护规则匹配, 写出主保护、近后备保护和远后备保护的时序矩阵和期望时序矩阵;

(3) 列出主保护、近后备保护和远后备保护与断路器动作间的关系;

(4) 写出主保护、近后备保护和远后备保护的断路器时序矩阵和期望时序矩阵。

为了表示故障设备和保护之间的关系, 建立设备-保护关联矩阵。

定义 7: 设备-断路器主保护关联矩阵 ZG 。表示故障设备故障时, 主保护动作应断开的断路器和故障设备之间的关系。根据规则, 如果设备故障, 则主保护动作, 使设备两端的断路器应该处于断开状态。矩阵 ZG 的维数为 $e \times a$ 。其中, zg_{ij} 表示为矩阵 ZG 的元素, zg_{ij} 定义为

$$zg_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{主保护动作时, 断路器跳开} \\ 0 & \text{主保护不动作时, 断路器不跳开} \end{cases} \quad (16)$$

定义 8: 主保护动作应跳开的断路器期望时序矩阵 ZD 。维数为 $g \times a$ 。其中, a 表示断路器的个数, g 表示告警时间的个数。 zd_{ij} 表示 ZD 的元素, 即

$$zd_{ij} = \begin{cases} 1 & t \geq t_i \text{ 元件故障, 主保护动作} \\ 0 & t \geq t_i \text{ 元件故障, 主保护不动作} \end{cases} \quad (17)$$

$$ZD = X \cap ZG \quad (18)$$

定义 9: 设备-断路器近后备保护关联矩阵 JG 。表示设备故障时, 主保护未动作, 由近后备保护应断开的断路器和故障设备之间的关系。根据规则, 如果设备故障, 则主保护未动作, 近后备保护使设备两端的断路器应该处于断开状态。矩阵 JG 的维数为 $e \times a$ 。其中 kg_{ij} 表示为矩阵 JG 的元素, kg_{ij} 定义为

$$jg_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{近后备保护动作, 断路器开断时} \\ 0 & \text{近后备保护不动作, 断路器不开断时} \end{cases} \quad (19)$$

定义 10: 近后备保护动作应跳开的断路器期望时序矩阵 $\dot{J}\dot{D}$ 。维数为 $g \times a$, 其中 a 表示主保护的个数, g 表示告警时间的个数。 $j\dot{d}_{ij}$ 表示 $\dot{J}\dot{D}$ 的元素, 即

$$j\dot{d}_{ij} = \begin{cases} 1 & t \leq t_i \text{ 元件故障, 近后备保护动作} \\ 0 & t \leq t_i \text{ 元件故障, 近后备保护不动作} \end{cases} \quad (20)$$

$$\dot{J}\dot{D} = X \cap JG \quad (21)$$

定义 11: 设备-断路器远后备保护关联矩阵 YG 。表示故障设备故障时, 主保护和近后备保护未动作, 由远后备保护应断开的断路器和故障设备之间的关系。根据规则, 如果设备故障, 则主保护和近后备保护未动作, 远后备保护使设备两端的断路器处于断开状态。矩阵 YG 的维数为 $e \times a$ 。其中, yg_{ij} 表示为矩阵 YG 的元素, yg_{ij} 定义为

$$yg_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{远后备保护动作, 断路器开断时} \\ 0 & \text{远后备保护不动作, 断路器不开断时} \end{cases} \quad (22)$$

定义 12: 远后备保护动作应跳开的断路器期望时序矩阵 $\dot{Y}\dot{D}$ 。维数为 $g \times a$ 。 $y\dot{d}_{ij}$ 表示 $\dot{Y}\dot{D}$ 的元素, 即

$$y\dot{d}_{ij} = \begin{cases} 1 & t \leq t_i \text{ 远后备保护动作, 断路器跳开} \\ 0 & t \leq t_i \text{ 远后备保护不动作, 断路器不跳开} \end{cases} \quad (23)$$

$$\dot{Y}\dot{D} = X \cap YG \quad (24)$$

定义 13: 断路器断开期望时序矩阵 \dot{D} 。表示断路器断开是否正确动作的期望矩阵。维数为 $g \times a$, a 表示断路器的个数, g 表示告警时间的个数。 \dot{d}_{ij} 表示为矩阵 \dot{D} 的元素, 定义为

$$\dot{d}_{ij} = \begin{cases} 1 & t \leq t_i \text{ 断路器应该动作} \\ 0 & t \leq t_i \text{ 断路器不应该动作} \end{cases} \quad (25)$$

$$\dot{D} = \dot{Z}\dot{D} \cup \dot{J}\dot{D} \cup \dot{Y}\dot{D} \quad (26)$$

定义 14: 设备-主保护动作关联矩阵 ZH 。表示故障设备和主保护动作应断开的断路器之间的关系。根据规则, 如果设备故障, 则主保护应正确动作。矩阵 ZH 的维数为 $e \times b$ 。其中, zh_{ij} 表示矩阵 ZH 的元素, 对于某个设备来说, 都有两个主保护, 其中 zh_{ij} 定义为

$$zh_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{主保护正确动作} \\ 0 & \text{主保护没有正确动作} \end{cases} \quad (27)$$

定义 15: 主保护动作的期望时序矩阵 $\dot{Z}\dot{B}$ 。维

数为 $g \times b$ 。 $\dot{z}\dot{b}$ 为 $\dot{Z}\dot{B}$ 的元素, 即

$$\dot{z}\dot{b}_{ij} = \begin{cases} 1 & t \leq t_i \text{ 主保护动作} \\ 0 & t \leq t_i \text{ 主保护不动作} \end{cases} \quad (28)$$

$$\dot{Z}\dot{B} = X \cap ZH \quad (29)$$

定义 16: 设备-近后备保护动作关联矩阵 JH 。表示故障设备和近后备保护动作之间的关系。根据规则, 如果设备故障, 则主保护动作, 使设备两端的断路器处于断开状态。如果主保护拒动, 则近后备保护应该正确动作。矩阵 JH 的维数为 $e \times c$ 。其中 jh_{ij} 表示矩阵 JH 的元素, 对于某个设备来说, 都有两个主保护、两个近后备保护和两个远后备保护这 6 个保护。其中 jh_{ij} 定义为

$$jh_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{近后备保护正确动作} \\ 0 & \text{近后备保护没有正确动作} \end{cases} \quad (30)$$

定义 17: 近后备保护动作的期望时序矩阵 $\dot{J}\dot{B}$ 。维数为 $g \times c$ 。 $j\dot{b}$ 为 $\dot{J}\dot{B}$ 的元素, 即

$$j\dot{b}_{ij} = \begin{cases} 1 & t \leq t_i \text{ 近后备保护动作} \\ 0 & t \leq t_i \text{ 近后备保护不动作} \end{cases} \quad (31)$$

由于近后备保护只有在主保护不动作时才动作, 因此, 近后备保护的期望时序矩阵为

$$\dot{J}\dot{B} = X \cap JH \quad (32)$$

定义 18: 设备-远后备保护关联矩阵 YH 。表示故障设备和近后备保护动作之间的关系。根据规则, 如果设备故障, 则主保护动作, 使设备两端的断路器处于断开状态。如果主保护拒动, 则近后备保护应该正确动作。矩阵 YH 的维数为 $e \times c$ 。其中, yh_{ij} 表示为矩阵 YH 的元素, 对于某个设备来说, 都有两个主保护, 两个近后备保护和两个远后备保护这 6 个保护。其中 yh_{ij} 定义为

$$yh_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{远后备保护正确动作} \\ 0 & \text{远后备保护没有正确动作} \end{cases} \quad (33)$$

定义 19: 远后备保护动作的期望时序矩阵 $\dot{Y}\dot{B}$ 。维数为 $g \times d$ 。 $y\dot{b}$ 为 $\dot{Y}\dot{B}$ 的元素, 即

$$y\dot{b}_{ij} = \begin{cases} 1 & t \leq t_i \text{ 远后备保护动作} \\ 0 & t \leq t_i \text{ 远后备保护不动作} \end{cases} \quad (34)$$

$$\dot{Y}\dot{B} = X \cap YH \quad (35)$$

定义 20: 保护总期望时序矩阵 \dot{B} 。对主保护、近后备保护和远后备保护作出它们之间关系表。根据关系表, 对主保护期望时序矩阵、近后备保护期望时序矩阵和远后备保护期望时序矩阵进行换行、合并或者扩维处理, 使得这三种保护的期望时序矩

阵具有相同的维数。矩阵的维数为 $g \times f$ 。其中, f 为保护总期望时序矩阵的列数。则保护总期望时序矩阵为

$$\dot{\mathbf{B}} = \dot{\mathbf{Z}}\dot{\mathbf{B}} \cup \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{B}} \cup \dot{\mathbf{Y}}\dot{\mathbf{B}} \quad (36)$$

然后对总保护的期望时序矩阵进行合并处理, 对同一个设备用一个总保护值进行表示。合并的原则为

$$\dot{B}_i = \dot{Z}\dot{B}_i \cup \dot{J}\dot{B}_i \cup \dot{Y}\dot{B}_i \quad (37)$$

这样便可以把最终的总保护时序矩阵的维数固定为设备的个数。即此时 $\dot{\mathbf{B}}$ 的维数为 $g \times e$ 。

4 具有记忆的免疫遗传算法进行时序目标函数求解

遗传算法依据适者生存、优胜劣汰的进化规则, 对包含可能解的群体进行基于遗传学的操作, 不断生产新的群体并使得群体不断进化, 同时以全局并行搜索优化群体中的最优个体以求得满足要求的最优解^[18-20]。

遗传算法是一种无知识引导的随机搜索算法, 具有良好的鲁棒性、灵活性及通用性, 同时也存在着早熟和收敛速度慢等缺点。近年来出现的免疫遗传算法能有效地保持种群的多样性, 较好地消除不成熟收敛及振荡现象。免疫遗传算法的基本思想是将遗传算法和免疫算法相结合, 将实际求解问题的目标函数看作是免疫系统的抗原, 把相应问题的解看作是免疫系统的抗体, 通过抗原和抗体的亲和力描述可行解与最优解的逼近程度。对外界抗原侵入, 系统通过随机产生抗体, 通过抗体浓度的判断及调整, 实现对环境的自适应。利用免疫系统的自我调节机制在最优解附近局部寻优, 可以迅速地寻找到问题的最优解或近似最优解。免疫遗传算法克服了寻优过程难应付的“早熟”问题, 可以提高解的精度和加快解的收敛速度并且最终求得全局最优解。

由于免疫遗传算法在初值选取时具有随机性, 而故障设备定位时, 矩阵中的有用信息都是故障设备的信息, 而非故障设备在求解过程中的值具有随机性, 不影响时序目标函数最大值的解, 因此在得到结果后应该对结果进行修正。

由于在进行故障设备定位求解的过程中, 如果某个设备在 t_i 时刻发生了故障, 则在 $t \geq t_i$ 时刻后, 设备的状态值始终为 1。因此把这种改进后的免疫遗传算法定义为具有记忆的免疫遗传算法。如果这样设置了初始值和在以后交叉和变异时遵循了这样一个原则, 则传统的免疫遗传算法将会大大节省运算的时间。

具有记忆的免疫遗传算法的基本步骤如下:

(1) 抗原 $F(X)$ 输入及抗体参数设定。目标函数作为抗原的输入, 设定抗体的表达形式。设定种群规模、交叉概率和变异概率。

(2) 产生初始抗体。用遗传算法进行初始解的求取, 把求解的结果其一作为初始抗体。

(3) 免疫选择。进行抗体和抗原的亲和力计算及浓度计算, 并根据抗体的亲和力及浓度来决定哪些抗体将被选择进入下一代。选择原则是与抗原具有高亲和力的抗体会被选择来再生, 而高浓度的抗体将被抑制。

(4) 产生新的随机序列补足抗体数目。

(5) 终止条件判断。若当前群体中包含最佳个体, 则算法停止运行转(10), 否则继续运行转(6)。

(6) 多样性计算及调整。若种群的多样性低于阈值, 则采取措施提高种群多样性。随机产生 m 个个体, 替代从进化群中随机选出的 m 个个体, 直到多样性超过阈值。

(7) 进行交叉、变异, 并对变异后的种群进行修改, 得到新一代种群。

(8) 对新种群抗体和抗原的亲合力排序找出最优解, 在最优解附近进行局部寻优。

(9) 转(3)。

(10) 算法结束, 输出结果。

具有记忆的免疫遗传算法流程图如图 1 所示。

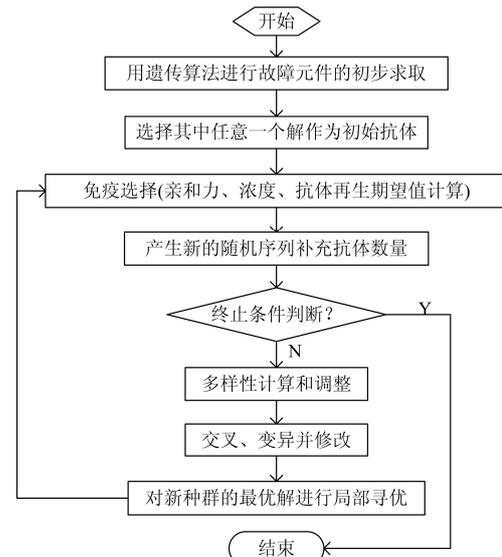


图 1 具有记忆的免疫遗传算法流程图

Fig. 1 Flow chart of immunity heredity algorithm having memory

由具有记忆的免疫遗传算法可以求出满足目标函数的最优解。缺点是当保护或者断路器发生误动, 保护或者断路器信息漏报的情况下, 根据时序矩阵

进行判断时可能会得出错误的结论, 因此本算法容错性比较差。而且由于免疫遗传算法的随机性取值, 使得非故障设备可能会出现全部都是 1 的情况, 即得出错误的结论。由于免疫遗传算法的解可能存在多解, 因此这种方法的解不具有最大可靠性。

5 理论应用

2017 年 1 月 4 日 21:27 110 kV 线路 L1 和 L2 在乙变侧横差保护动作, 线路 L1 的 02208 开关跳闸, 重合闸动作不成功, 线路 L2 的 02209 开关跳闸, 重合闸动作成功; 甲变侧横差保护动作, 线路 L1 的 01506 开关跳闸, 重合闸动作不成功。甲变瞬间全所失电。故障时乙变通过 110 kV 线路 L1 和 L2 带甲变运行, 乙变侧主保护为横差保护, 后备保护为三段式距离保护, 甲变侧为横差保护, 无后备保护。

接线图如图 2 所示。

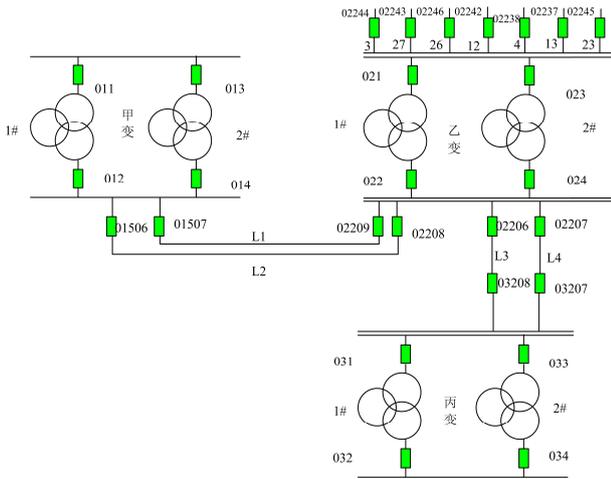


图 2 主接线图

Fig. 2 Main line chart

告警时序如表 1 所示。

表 1 大庆油田电网告警时序

Table 1 Time series alarm of Daqing oil field electrical grid

2017.1.4	告警时序
t_1	110 kV L1 线送端开关 02208 横差保护动作
t_2	110 kV L1 线送端开关 02208 跳闸
t_3	110 kV L1 线受端开关 01506 横差保护动作
t_4	110 kV L1 线受端开关 01506 跳闸
t_5	110 kV L1 线送端开关 02208 重合闸不成功
t_6	110 kV L1 线受端开关 01506 重合闸不成功
t_7	110 kV L2 线送端开关 02209 横差保护动作
t_8	110 kV L2 线送端开关 02209 跳闸
t_9	110 kV L2 线送端开关 02209 重合闸成功

由告警时序可以确定停电区域为图 3 所示。

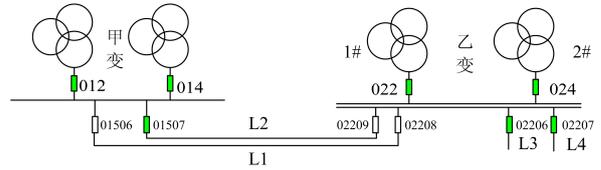


图 3 停电区域图

Fig. 3 Failure area chart

从停电区域可以很容易地确定停电设备范围为线路 L1、线路 L2、甲变母线(以后文中简称甲)和乙变母线(以后文中简称乙)4 个设备。所以 $e=4$ 。由于存在 9 个报警序列, 所以 $g=9$ 。图中共有 10 个断路器, 所以断路器个数 $a=10$ 。

1) 求设备的状态时序矩阵 X

$$X = \begin{matrix} & \begin{matrix} L1 & L2 & \blacklozenge & \blacklozenge \end{matrix} & \\ \begin{matrix} x_{11} \\ x_{21} \\ x_{31} \\ x_{41} \\ x_{51} \\ x_{61} \\ x_{71} \\ x_{81} \\ x_{91} \end{matrix} & \begin{matrix} x_{12} \\ x_{22} \\ x_{32} \\ x_{42} \\ x_{52} \\ x_{62} \\ x_{72} \\ x_{82} \\ x_{92} \end{matrix} & \begin{matrix} x_{13} \\ x_{23} \\ x_{33} \\ x_{43} \\ x_{53} \\ x_{63} \\ x_{73} \\ x_{83} \\ x_{93} \end{matrix} & \begin{matrix} x_{14} \\ x_{24} \\ x_{34} \\ x_{44} \\ x_{54} \\ x_{64} \\ x_{74} \\ x_{84} \\ x_{94} \end{matrix} & \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \\ t_7 \\ t_8 \\ t_9 \end{matrix} \end{matrix}$$

2) 根据告警时序, 作出断路器跳闸时序矩阵 D 为

$$D = \begin{matrix} & \begin{matrix} 012 & 014 & 01506 & 01507 & 022 & 024 & 02206 & 02207 & 02208 & 02209 \end{matrix} & \\ \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \\ t_7 \\ t_8 \\ t_9 \end{matrix} \end{matrix}$$

3) 求主保护动作的时序矩阵 ZB

$$ZB = \begin{matrix} & \begin{matrix} L1Z1 & L1Z2 & L2Z1 & L2Z2 & \text{甲}Z1 & \text{甲}Z2 & \text{甲}Z3 & \text{甲}Z4 & Z1Z1 & Z1Z2 & Z1Z3 & Z1Z4 & Z1Z5 \end{matrix} & \\ \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \\ t_7 \\ t_8 \\ t_9 \end{matrix} \end{matrix}$$

8) 求主保护动作应跳开的断路器期望时序矩阵 $\dot{Z}D$

$$\dot{Z}D = X \cap ZG = \begin{matrix} & \begin{matrix} 012 & 014 & 01506 & 01507 & 022 & 024 & 02206 & 02207 & 02208 & 02209 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & x_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{11} & x_{12} \end{matrix} & \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \\ t_7 \\ t_8 \\ t_9 \end{matrix} \end{matrix}$$

9) 求设备-断路器近后备保护关联矩阵 JG

由近后备保护原理可知, 设备-断路器近后备保护关联矩阵 JG 为

$$JG = \begin{matrix} & \begin{matrix} 012 & 014 & 01506 & 01507 & 022 & 024 & 02206 & 02207 & 02208 & 02209 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L1_{J1} & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} L1 \\ L2 \\ 甲 \\ 乙 \end{matrix} \end{matrix}$$

根据题中的告警时序, 没有近后备保护动作, 得到 JG 为

$$JG = \begin{matrix} & \begin{matrix} 012 & 014 & 01506 & 01507 & 022 & 024 & 02206 & 02207 & 02208 & 02209 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} L1 \\ L2 \\ 甲 \\ 乙 \end{matrix} \end{matrix}$$

10) 近后备保护动作应跳开的断路器期望时序矩阵 $\dot{J}D$ 为

$$\dot{J}D = X \cap JG = \begin{matrix} & \begin{matrix} 012 & 014 & 01506 & 01507 & 022 & 024 & 02206 & 02207 & 02208 & 02209 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \\ t_7 \\ t_8 \\ t_9 \end{matrix} \end{matrix}$$

11) 设备-断路器远后备保护关联矩阵 YG 为

$$YG = \begin{matrix} & \begin{matrix} 012 & 014 & 01506 & 01507 & 022 & 024 & 02206 & 02207 & 02208 & 02209 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 & L1_{Y4} & L1_{Y5} & L1_{Y1} & L1_{Y2} & 0 & L1_{Y3} \end{matrix} & \begin{matrix} L1 \\ L2 \\ 甲 \\ 乙 \end{matrix} \end{matrix}$$

根据告警时序, 得到设备-断路器远后备保护关联矩阵 YG 为

$$YG = \begin{matrix} & \begin{matrix} 012 & 014 & 01506 & 01507 & 022 & 024 & 02206 & 02207 & 02208 & 02209 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} L1 \\ L2 \\ 甲 \\ 乙 \end{matrix} \end{matrix}$$

12) 远后备保护动作应跳开的断路器期望时序矩阵 $\dot{Y}D$ 为

$$\dot{Y}D = X \cap YG = \begin{matrix} & \begin{matrix} 012 & 014 & 01506 & 01507 & 022 & 024 & 02206 & 02207 & 02208 & 02209 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \\ t_7 \\ t_8 \\ t_9 \end{matrix} \end{matrix}$$

13) 求断路器断开期望时序矩阵 \dot{D}

$$\dot{D} = \dot{Z}D \cup \dot{J}D \cup \dot{Y}D = \begin{matrix} & \begin{matrix} 012 & 014 & 01506 & 01507 & 022 & 024 & 02206 & 02207 & 02208 & 02209 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 & 0 & x_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{11} & x_{12} \end{matrix} & \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \\ t_7 \\ t_8 \\ t_9 \end{matrix} \end{matrix}$$

14) 求设备-主保护动作关联矩阵 ZH

$$ZH = \begin{matrix} \begin{matrix} L1_{Z1} & L1_{Z2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} L1 \\ L2 \\ 甲 \\ 乙 \end{matrix} \end{matrix}$$

由告警时序得到, 只有 L2 送端主保护动作, 则设备-主保护动作关联矩阵 ZH 为

$$ZH = \begin{matrix} \begin{matrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} L1 \\ L2 \\ 甲 \\ 乙 \end{matrix} \end{matrix}$$

15) 求主保护动作的期望时序矩阵 $\dot{Z}B$

$$\dot{Z}B = X \cap ZH = \begin{matrix} & \begin{matrix} L1_{Z1} & L1_{Z2} & L2_{Z1} & L2_{Z2} & 甲_{Z1} & 甲_{Z2} & 甲_{Z3} & 甲_{Z4} & Z_{Z1} & Z_{Z2} & Z_{Z3} & Z_{Z4} & Z_{Z5} \end{matrix} \\ \begin{matrix} x_{11} & x_{11} & x_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} & \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \\ t_7 \\ t_8 \\ t_9 \end{matrix} \end{matrix}$$

16) 求设备-近后备保护动作关联矩阵 JH

$$JH = \begin{bmatrix} L1_{J1} & 0 \\ 0 & L2_{J1} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} L1 \\ L2 \\ \text{甲} \\ \text{乙} \end{matrix}$$

由告警时序得到, 没有近后备保护动作, 设备-近后备保护动作关联矩阵 JH 为

$$JH = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} L1 \\ L2 \\ \text{甲} \\ \text{乙} \end{matrix}$$

17) 求近后备保护动作的期望时序矩阵 $\dot{J}B$

$$\dot{J}B = X \cap JH = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \\ t_7 \\ t_8 \\ t_9 \end{matrix}$$

18) 设备-远后备保护动作关联矩阵 YH 为

$$YH = \begin{bmatrix} L1_{Y1} & L1_{Y2} & L1_{Y3} & L1_{Y4} & L1_{Y5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L2_{Y1} & L2_{Y2} & L2_{Y3} & L2_{Y4} & L2_{Y5} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} L1 \\ L2 \\ \text{甲} \\ \text{乙} \end{matrix}$$

根据告警时序, 没有远后备保护动作。设备-远后备保护动作关联矩阵 YH 为

$$YH = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} L1 \\ L2 \\ \text{甲} \\ \text{乙} \end{matrix}$$

19) 远后备保护动作的期望时序矩阵 $\dot{Y}B$ 为

$$\dot{Y}B = X \cap YH = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \\ t_7 \\ t_8 \\ t_9 \end{matrix}$$

20) 求保护的总期望值矩阵

为了求保护的总期望时序矩阵, 先根据上述 4)~19), 把主保护、近后备保护和远后备保护的期望时序矩阵修改为相同维数的矩阵, 同时为了便于矩阵运算, 把相应的行列进行互换。

由于近后备保护和远后备保护都为 0 矩阵, 所以不必考虑。保护总期望时序矩阵为

$$\dot{B} = \begin{bmatrix} L1_{Z1} & L1_{Z2} & L2_{Z1} & L2_{Z2} & \text{甲}_{Z1} & \text{甲}_{Z2} & \text{甲}_{Z3} & \text{甲}_{Z4} & Z_{Z1} & Z_{Z2} & Z_{Z3} & Z_{Z4} & Z_{Z5} \\ x_{11} & x_{11} & x_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{21} & x_{21} & x_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{31} & x_{31} & x_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{41} & x_{41} & x_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{51} & x_{51} & x_{52} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{61} & x_{61} & x_{62} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{71} & x_{71} & x_{72} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{81} & x_{81} & x_{82} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{91} & x_{91} & x_{92} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \\ t_7 \\ t_8 \\ t_9 \end{matrix}$$

修改保护总期望时序矩阵, 把同一设备保护进行合并得到

$$\dot{B} = \begin{bmatrix} L1 & L2 & \text{甲} & \text{乙} \\ x_{11} & x_{12} & 0 & 0 \\ x_{21} & x_{22} & 0 & 0 \\ x_{31} & x_{32} & 0 & 0 \\ x_{41} & x_{42} & 0 & 0 \\ x_{51} & x_{52} & 0 & 0 \\ x_{61} & x_{62} & 0 & 0 \\ x_{71} & x_{72} & 0 & 0 \\ x_{81} & x_{82} & 0 & 0 \\ x_{91} & x_{92} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \\ t_7 \\ t_8 \\ t_9 \end{matrix}$$

由改进的免疫遗传算法进行求解, 求得的结果为多解。略去随机项, 判断正确解为

$$X = \begin{bmatrix} L1 & L2 & \text{甲} & \text{乙} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \\ t_7 \\ t_8 \\ t_9 \end{matrix}$$

从最后的结果可以看出, 线路 L1 和 L2 发生故障, 而且线路 L1 是在 t_1 时刻发生故障, 线路 L2 是在 t_7 时刻发生的故障。结果被后来人工巡检证实是

正确的。

6 结论

基于告警时序和多源信息的输电设备故障定位方法的研究的优点: (1) 不仅可以求出故障设备, 而且还可以求出故障设备故障的时刻; (2) 不仅可以对单重故障进行定位还可以对多重故障进行定位; (3) 考虑了告警时序, 使定位结果更加精确; (4) 基于记忆的免疫遗传算法计算速度更快。

参考文献

- [1] 刘思华. 计及警报时序信息的电网故障诊断优化模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(1): 62-66.
LI Sihua. Optimization model for power network fault diagnosis with temporal information of alarm messages[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(1): 62-66.
- [2] 陈伟彪, 陈亦平, 姚伟, 等. 基于多源信息时间序列匹配的电网故障诊断方法[J]. 电力建设, 2016, 37(12): 134-142.
CHEN Weibiao, CHEN Yiping, YAO Wei, et al. A Fault diagnosis method of power grid based on time series matching with multi-source information[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(12): 134-142.
- [3] KEOGH E, RATANAMAHATANA C A. Exact indexing of dynamic time warping[J]. Knowledge and Information Systems, 2005, 7(3): 358-386.
- [4] GHORBANI A, EBRAHIMI S Y, GHORBANI M. Active power based distance protection scheme in the presence of series compensators[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 57-69. DOI: 10.1186/s41601-017-0034-4.
- [5] 刘鑫蕊, 徐国俊, 叶金凤, 等. 基于多源信息的智能电网动态层次化故障诊断[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(9): 1221-1224.
LIU Xinrui, XU Guojun, YE Jinfeng, et al. Dynamic hierarchical fault diagnosis of intelligent power network based on the multi-source information[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2014, 35(9): 1221-1224.
- [6] 文福拴, 钱源平, 韩祯祥, 等. 利用保护和断路器信息的电力系统故障诊断与不可观测的保护的状态识别的模型与 Tabu 搜索方法[J]. 电工技术学报, 1998, 13(5): 1-8.
WEN Fushuan, QIAN Yuanping, HAN Zhenxiang, et al. A Tabu search based approach to fault section estimation and state identification of unobserved protective relays in power systems using information from protective relays and circuit breakers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1998, 13(5): 1-8.
- [7] 殷豪, 李德强, 孟安波, 等. 纵横交叉算法在配电网故障定位中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 109-114.
YIN Hao, LI Deqiang, MENG Anbo, et al. Fault location for distribution network based on crisscross optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 109-114.
- [8] 郭文鑫, 文福拴, 廖志伟, 等. 计及保护和断路器误动与拒动的电力系统故障诊断解析模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 6-11.
GUO Wenxin, WEN Fushuan, LIAO Zhiwei, et al. An analytical model for power system fault diagnosis based on fault protection and circuit breaker[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 6-11.
- [9] 孟祥萍, 刘春玲, 耿卫星, 等. 利用保护、断路器状态信息进行电网故障的诊断[J]. 宁夏工程技术, 2006, 5(3): 261-264.
MENG Xiangping, LIU Chunling, GENG Weixing, et al. Power system fault diagnosis based on protection and circuit breaker status information[J]. Ningxia Engineering Technology, 2006, 5(3): 261-264.
- [10] 高湛军, 陈青, 王涛, 等. 基于继电保护时空参数的电网故障诊断模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(13): 61-67.
GAO Zhanjun, CHEN Qing, WANG Tao, et al. Fault diagnosis model of power system based on time and space parameters of relay protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(13): 61-67.
- [11] 付家才, 陆青松. 基于蝙蝠算法的配电网故障区间定位[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 100-105.
FU Jiakai, LU Qingsong. Fault sections location of distribution network based on bat algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 100-105.
- [12] 文福拴, 张勇, 张岩, 等. 电力系统故障诊断与不可观测保护状态识别的解析模型[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2012, 40(11): 19-28.
WEN Fushuan, ZHANG Yong, ZHANG Yan, et al. An analytical model for power system fault diagnosis and state identification of unobservable protection[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2012, 40(11): 19-28.
- [13] 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. Chance constrained programming model and method for power system fault diagnosis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(20): 47-52.
- [14] 徐建军, 王保娥, 闫丽梅, 等. 混合能源协同控制的智能家庭能源优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(12): 214-223.
- XU Jianjun, WANG Bao'e, YAN Limei, et al. The strategy of the smart home energy optimization control of the hybrid energy coordinated control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): 214-223.
- [15] XU, J., HUANG, L., YIN, S. et al. All-fiber self-mixing interferometer for displacement measurement based on the quadrature demodulation technique[J]. Opt Rev. 2018, 25(1): 40-45.
- [16] 陈敦辉, 苏舒, 林湘宁, 等. 基于历史数据纵向协同性的电子式互感器伴随故障甄别策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 115-126.
- CHEN Dunhui, SU Shu, LIN Xiangning, et al. The identification strategy of transformer synchronous fault based on synergy of historical data. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(23): 115-126.
- [17] 张鹏飞, 瞿海妮, 肖其师, 等. 基于气象因素和时间序列分析的配电网故障数量预测[J]. 陕西电力, 2016, 44(1): 68-72.
- ZHANG Pengfei, QU Haini, XIAO Qishi, et al. Distribution network faults prediction based on meteorological factors and time series analysis[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(1): 68-72.
- [18] 姚旭, 程蓉, 崔力心, 等. 面向智能变电站的输电线路综合故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 40-45.
- YAO Xu, CHENG Rong, CUI Lixin, et al. Study of comprehensive transmission line fault location method for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 40-45.
- [19] 隆贤林. 基于电网继电保护及故障信息处理系统的故障诊断专家系统[D]. 南京: 东南大学, 2005.
- LONG Xianlin. Fault diagnosis ES based on power system relay protection and fault information process system[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [20] 李子龙, 刘亚东, 王耀东, 等. 基于大维随机矩阵的电网异常快速检测方法[J]. 陕西电力, 2017, 45(3): 77-81.
- LI Zilong, LIU Yadong, WANG Yaodong, et al. Abnormal situation detection in power grid with large-dimensional random matrix spectral distribution[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(3): 77-81.

收稿日期: 2017-03-14; 修回日期: 2017-12-25

作者简介:

闫丽梅(1971—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统故障诊断; E-mail: yanlimeidaqing@163.com

周忠媛(1992—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统故障诊断; E-mail: cczuzzy@163.com

徐建军(1971—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统故障诊断。E-mail: junjianxu@163.com

(编辑 葛艳娜)