

计及 FTU 漏报和误报的配电网故障定位分层解析模型

王秋杰¹, 金涛¹, 刘军²

(1. 福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116;

2. 国网江西省电力有限公司九江供电分公司, 江西 九江 332000)

摘要: 为了提高配电网故障定位在大面积通信故障下的容错性, 以现有的配电网故障定位模型为基础, 通过系统地计及馈线终端设备 (FTU) 漏报和误报, 建立了配电网故障定位解析模型。为了提高模型的可行性, 以故障矛盾假说为约束条件, 将目标函数变量维度减小到 3 倍的节点数量; 在分析配电网拓扑结构和工程设备配置的基础上, 通过构建分层故障定位模型, 进一步减小变量维度。此外, 分层解析模型能够利用第 2 层的定位结果对第 1 层的定位结果进行校验, 使故障定位更加精确。算例分析结果表明, 计及 FTU 漏报和误报的分层解析模型不仅能够大幅地提高配电网故障定位的准确率和容错性, 还能同步获取 FTU 漏报和误报的告警信息。

关键词: 配电网; 故障定位; FTU 漏报和误报; 分层解析模型

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.01.021

0 引言

随着用电负荷日益增长和分布式电源 (DG) 大量接入电网, 配电系统的结构和潮流日益趋向大型化、复杂化, 传统的单源辐射型网络的故障定位方法不再适用^[1-2]。基于人工智能算法的配电网故障区段定位方法因具有高容错性能且原理简单, 近年来被大量研究, 并取得了丰硕的成果。

遗传算法 (GA)^[3] 率先在配电网区段定位中使用, 随后蚁群算法^[4]、仿电磁学算法^[5]、粒子群算法^[6]、差分算法^[7]、和声算法^[8]、免疫算法^[9]、非线性方程光滑算法^[10] 等相继被应用到配电网故障定位中。上述配电网区段定位方法的共同点是将其故障定位问题转换为求解无约束的 0-1 整数规划问题, 具有严密的数学基础和一定的容错性。当馈线终端设备 (FTU) 存在少量漏报或误报时一般也能得到正确的定位结果。然而, 当配电网自动化系统发生大面积通信故障或信息发生大面积畸变时, 大量的 FTU 将发生漏报和误报, 导致根据故障假说得出的 FTU 状态期望与实际采集的 FTU 故障状态信息不匹配, 进而导致配电网故障定位结果错误。因此, 发展计及 FTU 漏报和误报的配电网故障定位方法, 对确保配电网安全稳定运行具有重要意义。

直接将 FTU 节点的漏报、误报与馈线区段一起

作为故障假说变量, 将导致配电网故障定位解析模型变量维度增加数倍, 进而导致配电网故障定位的准确率和容错能力较未计及 FTU 漏报和误报时更低。为了降低变量维度, 本文在算法上利用故障矛盾假说将变量维度减小到 3 倍的节点数; 然后通过构建分层故障定位模型, 将整个配电网故障定位过程分为 2 次, 一次定位故障端口, 二次定位故障区段, 这样可将第 1 次定位的变量维度降低到 3 倍的端口数, 将第 2 次定位的变量维度降低到 3 倍的故障端口内部节点数, 则计及 FTU 漏报和误报后的配电网故障定位的准确率和容错能力将得到大幅提高。同时, 分层故障定位模型还能通过故障区段定位对端口定位结果进行校验, 进一步确保了定位准确率。

本文首先从配电网故障定位算法角度, 对计及 FTU 漏报和误报后的目标函数、约束条件、采用的优化算法进行了分析; 然后从配电网故障定位模型角度, 对分层的可行性和实现方法进行了阐述; 接着介绍了计及 FTU 漏报和误报后故障定位的流程; 最后, 通过配电网的算例分析, 验证了分层解析模型在大面积通信故障情况下的定位性能。

1 配电网故障定位算法分析

1.1 目标函数分析

在含 DG 配电网中, 故障定位可以转化为求解目标函数的最大值问题。未计及 FTU 漏报和误报的目标函数可以用式 (1) 表示^[11]。

$$\max \text{fit}(n) = \max \left\{ T_1 - \left(\sum_{j=1}^D |I_j - I_j^*| + \omega \sum_{i=1}^D |s_i| \right) \right\} \quad (1)$$

其中, $\text{fit}(n)$ 为第 n 个个体的适应度值; T_1 为设置的

收稿日期: 2017-10-17; 修回日期: 2018-11-07

基金项目: 欧盟 FP7 国际科技合作基金资助项目 (909880); 国家自然科学基金资助项目 (61304260); 福建杰出青年科学基金资助项目 (2012J06012)

Project supported by the FP7 International Science & Technology Cooperation Foundation of EU (909880), the National Natural Science Foundation of China (61304260) and the Science Fund for Distinguished Young Scholars of Fujian Province (2012J06012)

大数,本文设置为 $2D$, D 为FTU节点个数; I_j 为数据采集与监视控制(SCADA)系统实际收到的FTU节点状态信息; I_j^* 为未计及FTU漏报和误报时的FTU节点状态期望, $I_j^* = I_j(s_i)$, $I_j(s_i)$ 为未计及FTU漏报和误报的开关函数; s_i 为故障假说变量,表示区段状态, $s_i = 1$ 表示区段发生故障, $s_i = 0$ 表示区段没有发生故障,其维度为 D ; ω 为权系数, $\omega = 0.5$ 。

为了准确计入FTU漏报和误报,需先对FTU漏报和误报的特性进行分类和定义。在含DG配电网的故障定位中,FTU采集的故障方向信息编码状态有 $-1, 0, 1$ 这3种情况。定义: l_i^1 为一类漏报,表示 -1 到 0 的漏报; l_i^2 为二类漏报,表示 1 到 0 的漏报; w_i^1 为一类误报,表示 0 到 -1 的误报; w_i^2 为二类误报,表示 1 到 -1 的误报; w_i^3 为三类误报,表示 -1 到 1 的误报; w_i^4 为四类误报,表示 0 到 1 的误报; z_i 为真报,即没有发生任何FTU误报和漏报,包含 -1 到 $-1, 0$ 到 $0, 1$ 到 1 这3种情况。如果 $l_i^1, l_i^2, w_i^1, w_i^2, w_i^3, w_i^4$ 的值为 1 ,则表示区段发生相应的FTU漏报和误报;如果 $l_i^1, l_i^2, w_i^1, w_i^2, w_i^3, w_i^4$ 的值等于 0 ,则表示区段没有发生相应的FTU漏报和误报。

在FTU与SCADA系统的通信过程中,信号传递可以分为图1所示的3种情况。

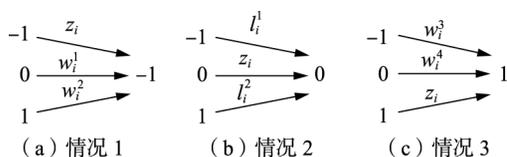


图1 信号传递图

Fig.1 Schematic diagram of signal transmission

在计及FTU漏报和误报后,配电网故障定位的目标函数可用式(2)表示^[12]。

$$\max \text{Fit}(n) = \max \left\{ T_2 - \left(\omega_1 \sum_{j=1}^D |I_j - I_j^*| + \omega_2 \sum_{i=1}^D |s_i| + \omega_3 \sum_{i=1}^D \sum_{k=1}^2 |l_i^k| + \omega_4 \sum_{i=1}^D \sum_{k=1}^4 |w_i^k| \right) \right\} \quad (2)$$

其中, T_2 为设置的大数; I_j^* 为计及FTU漏报和误报后FTU节点状态期望; $s_i, l_i^1, l_i^2, w_i^1, w_i^2, w_i^3, w_i^4$ 为故障假说变量,变量维度增加到 $7D$; $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 为权重系数。

为了确定权重系数 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 的值,参考文献[12-16],确定权重的设置原则如下。

a. $|I_j - I_j^*|$ 是不同故障元件的 s_i 之间适应度差别的主要反映,是配电网故障定位的主要判据; $|l_i^k|, |w_i^k|$ 反映了在适应度值相同的情况下,FTU漏报和误报最少的故障假说可信度最高,是配电网故障定位的辅助判据,故 $\omega_1 \gg \omega_{2,3,4}$ 。

b. 元件故障、信息漏报、信息误报具有不确定性,故 $\omega_2, \omega_3, \omega_4$ 应根据元件故障概率 p_{s_i} 、信息漏报

概率 p_{l_i} 、信息误报概率 p_{w_i} 的相对值确定。

参考以上原则和文献[12, 16]的相关数据,设置 $\omega_1 = 20, \omega_2 = 0.55, \omega_3 = \omega_4 = 1$ 。

根据权重系数的设置,为了保证配电网故障定位的适应度值为正数,设置 $T_2 = 30D$ 。

为了确定 I_j^* 的表达式,列出图1(a)、(b)、(c)对应的 I_j^* 与 I_j 的关系式^[14-15]分别如式(3)、(4)、(5)所示。

$$I_{ij}^* = (I_j^* \overline{w_i^1} \overline{w_i^2} - I_j^* \overline{w_i^1} \overline{w_i^2} - I_j^* \overline{w_i^1} \overline{w_i^2}) \overline{l_i^1} \overline{l_i^2} \overline{w_i^3} \overline{w_i^4} \quad (3)$$

$$I_{ij}^* = (I_j^* \overline{l_i^1} \overline{l_i^2} + I_j^* \overline{l_i^1} \overline{l_i^2} + I_j^* \overline{l_i^1} \overline{l_i^2}) \overline{w_i^1} \overline{w_i^2} \overline{w_i^3} \overline{w_i^4} \quad (4)$$

$$I_{ij}^* = (-I_j^* \overline{w_i^3} \overline{w_i^4} + I_j^* \overline{w_i^3} \overline{w_i^4} + I_j^* \overline{w_i^3} \overline{w_i^4}) \overline{l_i^1} \overline{l_i^2} \overline{w_i^1} \overline{w_i^2} \quad (5)$$

其中,“ $-$ ”表示逻辑非;“ $+$ ”、“ $-$ ”分别为代数加、减运算。

整合式(3)~(5)可得出整个配电网故障定位的 I_j^* 与 I_j 的关系式:

$$I_j^* = \text{sign} \left\{ (I_j^* \overline{w_i^1} \overline{w_i^2} - I_j^* \overline{w_i^1} \overline{w_i^2} - I_j^* \overline{w_i^1} \overline{w_i^2}) \overline{l_i^1} \overline{l_i^2} \overline{w_i^3} \overline{w_i^4} + (I_j^* \overline{l_i^1} \overline{l_i^2} + I_j^* \overline{l_i^1} \overline{l_i^2} + I_j^* \overline{l_i^1} \overline{l_i^2}) \overline{w_i^1} \overline{w_i^2} \overline{w_i^3} \overline{w_i^4} + (-I_j^* \overline{w_i^3} \overline{w_i^4} + I_j^* \overline{w_i^3} \overline{w_i^4} + I_j^* \overline{w_i^3} \overline{w_i^4}) \overline{l_i^1} \overline{l_i^2} \overline{w_i^1} \overline{w_i^2} \right\} \quad (6)$$

其中,sign为符号函数。

由于 $I_j^* = I_j(s_i)$,故 I_j^* 是关于故障假说变量 s_i 的函数,结合式(6)可知 I_j^* 是关于故障假说变量 $s_i, l_i^1, l_i^2, w_i^1, w_i^2, w_i^3, w_i^4$ 的函数。

通过以上分析可得出适应度 $\text{Fit}(n)$ 是关于故障假说变量 $s_i, l_i^1, l_i^2, w_i^1, w_i^2, w_i^3, w_i^4$ 的函数,则式(2)可以表示为:

$$\max \text{Fit}(n) = \max I(S, L, W)_D \quad (7)$$

其中, I 为函数规则; S, L, W 分别为区段状态变量、漏报变量、误报变量的集合, $s_i \in S, l_i^k \in L, w_i^k \in W$ 。

1.2 约束条件分析

未计及FTU漏报和误报时,式(1)没有约束条件。计及FTU漏报和误报后,配电网故障定位中的故障假说变量包含 $s_i, l_i^1, l_i^2, w_i^1, w_i^2, w_i^3, w_i^4$,变量维度从 D 增加到 $7D$,若直接按式(7)进行故障定位,变量维度过大,造成配电网故障定位准确率过低。为了降低变量维度,将故障矛盾假说作为配电网故障定位目标函数的约束条件^[16]。故障矛盾假说包含既漏报又误报、有报警又漏报、无报警又误报、同时多个漏报、同时多个误报,据此列出图1(a)、(b)、(c)对应的约束条件分别如式(8)、(9)、(10)所示。

$$(\overline{l_i^1} \& \overline{l_i^2} \& \overline{w_i^3} \& \overline{w_i^4}) \& \overline{w_i^1} \& \overline{w_i^2} = 1 \quad (8)$$

$$(\overline{w_i^1} \& \overline{w_i^2} \& \overline{w_i^3} \& \overline{w_i^4}) \& \overline{l_i^1} \& \overline{l_i^2} = 1 \quad (9)$$

$$(\overline{l_i^1} \& \overline{l_i^2} \& \overline{w_i^1} \& \overline{w_i^2}) \& \overline{w_i^3} \& \overline{w_i^4} = 1 \quad (10)$$

其中,“ $\&$ ”表示逻辑与。

整合式(8)—(10),得出整个目标函数的约束条件为:

$$\text{sign}(I_j) = \begin{cases} -1 & (\bar{l}_i^1 \& \bar{l}_i^2 \& \bar{w}_i^3 \& \bar{w}_i^4) \& \bar{w}_i^1 \& \bar{w}_i^2 = 1 \\ 0 & (\bar{w}_i^1 \& \bar{w}_i^2 \& \bar{w}_i^3 \& \bar{w}_i^4) \& \bar{l}_i^1 \& \bar{l}_i^2 = 1 \\ 1 & (\bar{l}_i^1 \& \bar{l}_i^2 \& \bar{w}_i^1 \& \bar{w}_i^2) \& \bar{w}_i^3 \& \bar{w}_i^4 = 1 \end{cases} \quad (11)$$

从式(11)可以看出,约束条件是关于故障假设变量 $l_i^1, l_i^2, w_i^1, w_i^2, w_i^3, w_i^4$ 的函数,则式(11)可以表示为:

$$\text{s.t. } G(L, W)_D = 1 \quad (12)$$

其中, G 为函数规则; L, W 分别为漏报变量、误报变量的集合, $l_i^k \in L, w_i^k \in W$ 。

根据式(12),可以确定变量 $l_i^1, l_i^2, w_i^1, w_i^2, w_i^3, w_i^4$ 中 2/3 的取值,此时模型的变量维度下降为 $3D$ 。

1.3 配电网故障定位优化算法

根据前文的分析,计及 FTU 漏报和误报后配电网故障定位问题转换为求解有约束的 0-1 整数规划问题,如式(13)所示。

$$\begin{cases} \max I(S, L, W)_D = \max \text{Fit}(n) \\ \text{s.t. } G(L, W)_D = 1 \end{cases} \quad (13)$$

本文使用二进制粒子群优化-遗传算法(BP-SOGA)求解式(13)的最大值,利用遗传算法与二进制粒子群优化(BPSO)算法的双种群信息共享策略进行优势互补,具体原理见文献[11],本文不再详述。

2 配电网故障定位模型分析

对于配电网故障定位而言, $3D$ 的变量维度依然较大,为了进一步降低故障假设中的变量维度,需构建配电网故障定位的分层模型,将整个故障定位为 2 次,从而降低单次故障定位的变量维度。

2.1 故障定位模型分层的理论可行性分析

在含 DG 配电网故障定位中,开关函数 $I_j(s_i)$ 一般采用式(14)—(16)进行构建^[11]。

$$I_{ju}(s_i) = \left\{ \prod_u^M \left[K_u (1 - \prod_{j, s_u} s_{j, s_u}) \right] \right\} \prod_{j, d}^N s_{j, d} \quad (14)$$

$$I_{jd}(s_i) = \left\{ \prod_u^N \left[K_d (1 - \prod_{j, s_d} s_{j, s_d}) \right] \right\} \prod_{j, u}^M s_{j, u} \quad (15)$$

$$I_j(s_i) = I_{ju}(s_i) - I_{jd}(s_i) \quad (16)$$

其中, $I_{ju}(s_i), I_{jd}(s_i)$ 分别为上游开关函数和下游开关函数; $I_j(s_i)$ 为开关函数; \prod 表示逻辑或; M', N' 分别为上游电源的个数和下游电源个数; K_u, K_d 分别为上游、下游电源系数,电源接入则值为 1,电源退出则值为 0; s_{j, s_u}, s_{j, s_d} 分别为从节点 j 到上游电源 s_u 、节点 j 到下游电源 s_d 之间区段的状态, s_u 和 s_d 包括主电源 S、DG、感性负荷 L 这 3 种类型; $s_{j, u}, s_{j, d}$ 分别为节点 j 到下游、节点 j 到上游之间所有区段的状态; M, N 分别为上游所有区段的个数和下游所有区

段的个数。

多分支节点(3 个及 3 个以上)是配电网拓扑结构的重要组成部分,决定着配电网拓扑结构的复杂程度,也就决定着开关函数构建的复杂程度。以配电网 3 分支节点(T 型节点)配电网为例分析开关函数构建中的逻辑规律,3 分支节点配电网拓扑图如图 2 所示。

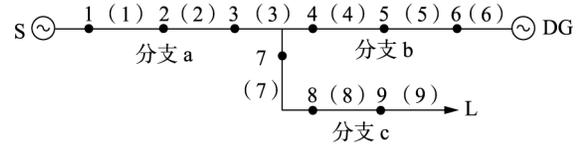


图 2 T 型配电网拓扑图

Fig.2 Topology diagram of T-type distribution network

a. 当分支 c 上的区段(7)发生故障时,有 $s_7 = 1, s_{i \neq 7} = 0$,根据式(14)—(16)可得分支 a 上节点 1 的开关函数为:

$$I_{1u}(s_i) = (1-0) \times (s_1 | s_2 | s_3 | s_4 | s_5 | s_6 | s_7 | s_8 | s_9) = 1 \quad (17)$$

$$I_{1d}(s_i) = [(1-s_1 | s_2 | s_3 | s_4 | s_5 | s_6) | (1-s_1 | s_2 | s_3 | s_7 | s_8 | s_9)] \times 0 = 0 \quad (18)$$

$$I_1(s_i) = I_{1u}(s_i) - I_{1d}(s_i) = 1 \quad (19)$$

同理可得分支 a 上节点 2、3 和分支 b 上节点 4、5、6 的开关函数分别为:

$$I_2(s_i) = I_{2u}(s_i) - I_{2d}(s_i) = 1 \quad (20)$$

$$I_3(s_i) = I_{3u}(s_i) - I_{3d}(s_i) = 1 \quad (21)$$

$$I_4(s_i) = I_{4u}(s_i) - I_{4d}(s_i) = -1 \quad (22)$$

$$I_5(s_i) = I_{5u}(s_i) - I_{5d}(s_i) = -1 \quad (23)$$

$$I_6(s_i) = I_{6u}(s_i) - I_{6d}(s_i) = -1 \quad (24)$$

显然,分支 a 上所有节点的开关函数满足:

$$I_1(s_i) = I_2(s_i) = I_3(s_i) = 1 \quad (25)$$

分支 b 上所有节点的开关函数满足:

$$I_4(s_i) = I_5(s_i) = I_6(s_i) = -1 \quad (26)$$

b. 当分支 c 上的区段(8)发生故障时,根据开关函数构建公式,得出分支 a 上的开关函数为: $I_1(s_i) = I_2(s_i) = I_3(s_i) = 1$,依然满足式(25),分支 b 上的开关函数为: $I_4(s_i) = I_5(s_i) = I_6(s_i) = -1$,依然满足式(26)。同理当区段(9)发生故障时,分支 a 上的开关函数满足式(25),分支 b 上的开关函数满足式(26)。

c. 当分支 c 上的区段(7)和(8)同时发生故障时,分支 a 上的开关函数依然满足式(25),分支 b 上的开关函数也满足式(26)。同理,当区段(7)、(9)和区段(8)、(9)发生双重故障时,分支 a、b 依然满足式(25)、(26)。

通过以上分析可知,只要故障位于分支 c 上,无

论哪个区段故障或者多个区段同时故障,分支 c 对其他支路开关函数构建的影响相同。根据对外等效定理,可以将支路 c 等效为一个无源二端口,区段(7)、(8)、(9)等效为端口线路,节点 7 等效为端口节点,如图 3 所示。

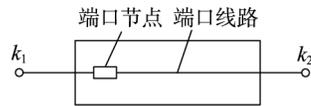


图 3 支路的等效二端口
Fig.3 Equivalent two-port of branch

同理,支路 b、c 也可等效为无源二端口。据此,T 型配电网络的各分支都能够等效成一个二端口,这为构建分层定位模型提供了理论可行性。

2.2 故障定位模型分层的工程可行性分析

构建分层故障定位模型还应考虑我国配电网实际工程情况以提高工程经济性。在辐射型配电网中,一般根据是否流过故障电流来对节点(开关)状态进行编码:

$$I_j = \begin{cases} 1 & \text{有故障电流流过} \\ 0 & \text{无故障电流流过} \end{cases} \quad (27)$$

DG 接入配电网后,配电网变为多源网络,式(27)所示的编码方法失效,则利用故障电流方向信息进行编码:

$$I_j = \begin{cases} 1 & \text{故障电流为正方向} \\ 0 & \text{无故障电流} \\ -1 & \text{故障电流为反方向} \end{cases} \quad (28)$$

然而,我国广大配电网馈线节点只安装了电流互感器,并没有安装电压互感器,一般无法根据功率方向元件采集故障方向信息,而大量安装电压互感器无疑会增加投资成本。若以多分支节点(3 个及 3 个以上)为交叉点对各支路进行二端口等效,则可以利用多分支节点各支路的电流信息,根据基尔霍夫电流定律判别故障电流方向,避免了大量安装电压互感器,这为构建分层故障定位模型提供了工程可行性。具体方向判别方法参见文献[17]。

2.3 故障定位模型分层的实现方法

依据 2.1 节的等效方法,将图 2 中的分支 a、b、c 等效为 3 个二端口,3 个二端口构成故障定位模型的第 1 层;每个二端口内部包含的普通节点和区段构成故障定位模型的第 2 层^[18],具体如图 4 所示。

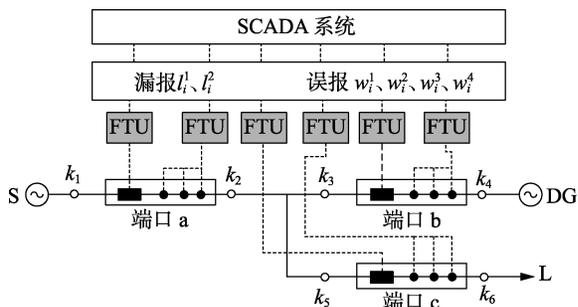


图 4 T 型配电网分层模型

Fig.4 Hierarchical model of T-type distribution network

当区段(9)发生故障时,故障定位算法首先从 SCADA 系统中读取端口节点 1、4、8 的状态信息,利用 BPSOGA 求解式(29),定位出二端口 c 发生了故障。

$$\begin{cases} \max I(S, L, W)_R = \max \text{Fit}_1(n) \\ \text{s.t. } G(L, W)_R = 1 \end{cases} \quad (29)$$

其中, R 为整个配电网等效二端口的数量,本文中 $R=3$ 。在此次故障定位中, $\text{Fit}_1(n)$ 的变量维度为 $7R$,在利用约束条件确定 $L、W$ 中 $2/3$ 的变量后,变量维度下降为 $3R$ 。

根据故障端口的定位结果,故障定位算法从 SCADA 系统中读取故障二端口 c 内部所有普通节点 7、8、9 的状态信息,利用 BPSOGA 求解式(30),定位出区段(9)发生故障。

$$\begin{cases} \max I(S, L, W)_H = \max \text{Fit}_2(n) \\ \text{s.t. } G(L, W)_H = 1 \end{cases} \quad (30)$$

其中, H 为故障端口 c 包含的普通节点数量,本文中 $H=3$ 。在此次故障定位中, $\text{Fit}_2(n)$ 的变量维度为 $7H$,在利用约束条件确定变量 $L、W$ 中 $2/3$ 的变量后,此时模变量维度下降为 $3H$ 。

3 基于分层解析模型的故障定位流程

a. 对配电网各支路进行二端口等效,确定分层定位模型和各层的故障假说变量。

b. 将 FTU 采集的整个配电网所有节点状态信息上传至 SCADA 系统。

c. 端口定位算法从 SCADA 系统中读取所有二端口节点的状态信息,利用 BPSOGA 求解式(29),将故障定位到具体的二端口。

d. 区段定位算法读取故障二端口内部节点的状态信息,利用 BPSOGA 求解式(30),将故障定位到具体区段。若端口定位算法发生不成熟收敛,则区段定位算法可以对其进行校验,并最终输出准确定位结果。

4 算例仿真

4.1 分层解析模型求解分析

为了说明本文所提模型的定位流程和校验原理,采用如图 5 所示的含风电机组的配电线路模型。该模型共有 30 个馈线节点、30 个区段,具体编号如图 5 所示。图中, S 为系统主电源; $DG_1、DG_2$ 为风电机组; $L_1、L_2$ 为感性负荷。

a. 构建分层故障定位模型。首先,以多分支节点为边界将配电网等效为 10 个端口,构建第 1 层故障定位模型,如图 6 所示。

单个二端口都属于第 2 层定位模型,每个二端口包的普通节点和区段如表 1 所示,表中下划线表示该节点为端口节点。

涉及的 FTU 漏报和误报的节点和类型为： $w_1^2, l_3^2, w_4^4, l_{10}^1, l_{12}^1, w_{18}^1, w_{20}^4, w_{23}^3, l_{25}^1, w_{28}^3$ 。对比结果如表 2、表 3 所示。

表 2 单一故障仿真结果

Table 2 Simulative results of single fault

FTU 漏报、 误报位置	故障定位结果			
	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
1, 10	(3)	(3)	(2), (3)	(3)
1, 3, 10, 18	(3)	(3)	(2), (4), (28)	(3), (28)
1, 3, 10, 18, 23, 25	(3)	(3)	(2), (15), (3), (5), (28)	(28)
1, 3, 10, 12, 18, 20, 23, 25	(3)	(2)	(2), (13), (28)	(2), (28)
1, 3, 4, 10, 12, 18, 20, 23, 25, 28	(3)	(2)	(2), (4), (2), (4), (12), (28)	(28)

表 3 双重故障仿真结果

Table 3 Simulative results of double faults

FTU 漏报、 误报位置	故障定位结果			
	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
1, 10	(3), (14)	(3), (14)	(2), (16)	(3), (14)
1, 3, 10, 18	(3), (14)	(3), (14)	(2), (15), (16)	(3), (14), (16)
1, 3, 10, 18, 23, 25	(3), (14)	(3), (14)	(2), (17), (19)	(3), (14), (16)
1, 3, 10, 12, 18, 20, 23, 25	(3), (14)	(14)	(3), (15), (19)	(2), (3), (15), (18)
1, 3, 4, 10, 12, 18, 20, 23, 25, 28	(3), (14)	(2), (13), (28)	(4), (15), (17), (29)	(2), (3), (16), (28)

从以上仿真结果可得如下结论。

a. 模型 4 在 FTU 漏报和误报位置超过 2 个时, 开始无法准确定位故障元件, 且无法同步获得 FTU 漏报和误报位置告警信息。

b. 模型 3 由于变量维度过大, 无法准确定位故障, 也无法同步获得准确的 FTU 漏报和误报位置告警信息。

c. 模型 2 能够降低单次故障定位的变量维度, 同时, 由于整个故障定位分为 2 次, 单次故障定位并不涉及全部的 FTU 漏报和误报位置, 故在 FTU 漏报和误报位置不超过 6 个时, 模型 2 依然能够准确定位; 模型 2 的不足在于, 当 FTU 漏报和误报位置超过 6 个时, 故障定位准确率下降, 同时, 无法同步获得 FTU 漏报和误报位置告警。

d. 本文所提模型在 FTU 漏报和误报位置达到 10 个时, 依然能够准确定位故障元件, 并且能够同步获得 FTU 漏报和误报位置告警信息; 这说明当故障信息发生大面积畸变时, 本文所提模型在容错性和准确性上具有明显优势。

5 结论

a. 计及 FTU 漏报和误报后, 在多个节点发生 FTU 漏报和误报时, 本文所提模型依然能够准确定

位出故障元件, 故障定位容错性得到了大幅提高;

b. 计及 FTU 漏报和误报以后, 本文所提模型不仅能够获取故障元件位置, 还能同步获得 FTU 漏报和误报位置告警信息;

c. 本文利用故障矛盾假说减小故障定位模型的变量维度, 利用模型分层的方法进一步减小变量维度, 提高了计及 FTU 漏报和误报故障定位模型的可行性;

d. 构建分层定位模型能够利用二次区段故障定位结果对一次端口故障定位结果进行校验, 提高了故障定位整体的准确率;

e. 本文所提的故障定位模型在通信系统发生大面积故障或者信息发生大量畸变时的故障定位结果精确, 相较于其他定位模型有较为明显的优势。

参考文献:

- [1] 高孟友, 徐丙垠, 张新慧. 基于故障电流幅值比较的有源配电网故障定位算法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(7): 21-25.
GAO Mengyou, XU Bingyin, ZHANG Xinhui. Fault location based on fault current amplitude comparison for active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7): 21-25.
- [2] 胡伟, 李勇, 曹一家. 基于 LOF 和 SVM 的智能配电网故障辨识方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 7-12.
HU Wei, LI Yong, CAO Yijia. Fault identification based on LOF and SVM for smart distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 7-12.
- [3] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障区间定位的高级遗传算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 127-130.
WEI Zhinong, HE Hua, ZHENG Yuping. A refined genetic algorithm for the fault sections location[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 127-130.
- [4] 陈歆技, 丁同奎, 张钊. 蚁群算法在配电网故障定位中的应用[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 74-77.
CHEN Xinji, DING Tongkui, ZHANG Zhao. Ant colony algorithm for solving fault location in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 74-77.
- [5] 郭壮志, 吴杰康. 配电网故障区间定位的仿电磁学算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 34-40.
GUO Zhuangzhi, WU Jiekang. Electromagnetism-like mechanism based fault section diagnosis for distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 34-40.
- [6] 关龙, 刘志刚, 何士玉, 等. 离散二进制粒子群算法在基于模型配电网故障诊断中的应用[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 89-92.
GUAN Long, LIU Zhigang, HE Shiyu, et al. Application of BPSO algorithm in model based fault diagnosis of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 89-92.
- [7] 周浪, 郑柏林, 廖瑞金, 等. 基于粒子群和差分进化算法的含分布式电源配电网故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 33-37.
ZHOU Quan, ZHENG Bolin, LIAO Ruijin, et al. Fault-section location for distribution networks with DG based on a hybrid algorithm of particle swarm optimization and differential evolution[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 33-37.
- [8] 刘蓓, 汪汎, 陈春, 等. 和声算法在含 DG 配电网故障定位中的

- 应用[J]. 电工技术学报,2013,28(5):280-284.
LIU Bei,WANG Feng,CHEN Chun,et al. Harmony search algorithm for solving fault location in distribution networks with DG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(5):280-284.
- [9] 郑涛,潘玉美,郭昆亚,等. 基于免疫算法的配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(1):77-83.
ZHENG Tao,PAN Yumei,GUO Kunya,et al. Fault location of distribution network based on immune algorithm[J]. Power System Protection and Control,2014,42(1):77-83.
- [10] 郭壮志,陈涛,洪俊杰,等. 基于故障辅助因子的配电网高容错性故障区段定位方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):93-100.
GUO Zhuangzhi,CHEN Tao,HONG Junjie,et al. High-tolerance faulty section locating based on fault accessory factors for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(7):93-100.
- [11] 金涛,李鸿南,刘对. 基于BPSOGA的含风电机组的配电网故障区段定位[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):27-33.
JIN Tao,LI Hongnan,LIU Dui. Faulty section location based on BPSOGA for distribution line with wind turbine generator[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):27-33.
- [12] 赵冬梅,张旭,魏娟,等. 以重现故障过程为目的的电网故障诊断[J]. 中国电机工程学报,2014,34(13):2116-2123.
ZHAO Dongmei,ZHANG Xu,WEI Juan,et al. Power grid fault diagnosis aiming at reproducing the fault process[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(13):2116-2123.
- [13] 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):6-10.
GUO Wenxin,WEN Fushuan,LIAO Zhiwei,et al. An analytic model for power system fault diagnosis with malfunctions of protective relays and circuit breakers taken into account[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(24):6-10.
- [14] 刘道兵,顾雪平,李海鹏. 电网故障诊断的一种完全解析模型[J]. 中国电机工程学报,2011,31(34):85-92.
LIU Daobing,GU Xueping,LI Haipeng. A complete analytic model for fault diagnosis of power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(34):85-92.
- [15] 刘道兵,顾雪平,梁海平. 电网故障诊断完全解析模型的解集评价与最优解求取[J]. 中国电机工程学报,2014,34(31):5668-5676.
LIU Daobing,GU Xueping,LIANG Haiping. Solution evaluation and optimal solution discrimination of a complete analytical model for power system fault diagnosis[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(31):5668-5676.
- [16] 江雪晨,王大志,张翠玲. 利用模型诊断降维的电网故障诊断完全解析方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(24):6371-6378.
JIANG Xuechen,WANG Dazhi,ZHANG Cuiling. A complete analytic method for fault diagnosis of power systems based on model-based diagnosis for dimensionality reduction[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(24):6371-6378.
- [17] 肖伟栋,夏明超,唐念. 考虑多DG接入的配电网区域保护新方案[J]. 电力系统保护与控制,2014,34(9):103-109.
XIAO Weidong,XIA Mingchao,TANG Nian. A new regional protection scheme for distribution network considering the introduction of multi-DGs[J]. Power System Protection and Control,2014,34(9):103-109.
- [18] 李振兴,尹项根,张哲,等. 有限广域继电保护系统的分区原则与实现方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(19):48-52.
LI Zhenxing,YIN Xianggen,ZHANG Zhe,et al. Zone division and implementation on limited wide area protection system[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(19):48-52.

作者简介:



王秋杰

王秋杰(1988—),男,湖北宜昌人,博士研究生,研究方向电力人工智能、电力系统稳定性分析(**E-mail**:84106438@qq.com);

金涛(1976—),男,湖北宜昌人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,研究方向为电力系统稳定性分析、在线测量与信号处理、新能源技术(**E-mail**:jintly@fzu.edu.cn);

刘军(1990—),男,湖北咸宁人,助理工程师,研究方向为电力系统继电保护、电力系统稳定性分析。

Hierarchical analytic model for fault location of distribution network considering FTU missing and false positives

WANG Qiujie¹, JIN Tao¹, LIU Jun²

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. Jiujiang Power Supply Company, State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Jiujiang 332000, China)

Abstract: In order to improve the fault tolerance ability of distribution network fault location under large area communication fault, an analytical model for fault location of distribution network considering the missing and false positives of FTU (Feeder Terminal Unit) is built based on the existing fault location model of distribution network. In order to improve the feasibility of the model, the variable dimension of the objective function is reduced to three times the number of nodes under the constraint of the fault contradiction hypothesis. The variable dimension is further reduced through the construction of hierarchical fault location model based on the analysis of the distribution network topology and engineering equipment configuration. In addition, the hierarchical analytical model can use the fault location results of the second layer to verify the location results of the first layer, which makes the fault location more accurate. Analytical results show that the analytic hierarchical model considering the missing and false positives of FTU can not only greatly improve the accuracy and fault tolerance ability of fault location in distribution network, but also synchronously acquire the warning information of FTU for missing and false positives.

Key words: distribution network; fault location; FTU missing and false positives; hierarchical analytic model