

配电网故障定位的层级模型及其预测校正算法

郭壮志¹, 陈 涛¹, 黄金振¹, 徐其兴¹, 洪俊杰²

(1. 河南工程学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 451191; 2. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要:为有效解决互补约束故障定位模型缺乏多重故障强辨识能力及决策方法存在的数值稳定性问题,借鉴其代数关系建模优势,基于分层解耦策略,构建具有多重故障强适应性的配电网故障定位层级优化模型。基于松弛策略和二次规划极值理论,提出具有全局收敛特点且无需对离散变量直接进行优化决策的模型求解预测校正算法。仿真结果表明,所提模型和算法不仅能实现馈线故障区段单一和多重故障的准确高容错性辨识,且进行优化决策时具有实现便捷、数值稳定性好、优化效率高的优点。

关键词:配电网;故障定位;多重故障;层级模型;预测校正算法

中图分类号:TM 76

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.07.007

0 引言

快速准确的配电网故障定位技术是提升配电网运行安全可靠性和智能化水平的关键。随着馈线终端单元 FTU (Feeder Terminal Unit) 等自动化终端设备的日益广泛应用,利用其监测的配电网潮流信息进行故障定位的方法已成为国内外的研究热点^[1-2]。

国内外基于自动化终端设备的配电网故障定位技术主要有直接潮流法和间接潮流法。直接潮流法利用采集的电流与电压等信息计算故障特征量值,具有可利用较少的监测点信息获取故障发生位置的优点,但存在计算量大、灵活性与通用性不强等缺陷^[3];间接潮流法利用监测点过电流信息、零序电流与零序电压间相位关系^[4],进行逼近关系建模,从而实现故障区段辨识,具有原理简单、实现便捷等优势,已成为研究焦点。间接潮流法主要分为矩阵算法^[4-11]和最优化算法^[12-13] 2类:矩阵算法具有建模直接、定位高效等优点,但一般不具有容错性;最优化算法因容错性强,近几年已有大量的相关研究^[14-20]。

文献[12-13]基于覆盖集理论和遗传算法提出应用于输电网的故障定位最优化方法,具有容错性和通用性强的优势。文献[14]借鉴文献[12-13]的故障定位建模原理,基于逻辑关系描述和逼近关系

理论首次提出基于遗传算法的配电网故障定位优化算法。文献[15-20]围绕着高容错性、决策效率、多重故障辨识能力等方面开展研究,提出了多种以群体智能优化算法为核心的容错性故障定位方法,推动了基于最优化技术的配电网故障定位理论的快速发展。但文献[14-20]受限于逻辑关系建模,需采用群体智能算法进行决策,因算法自身具有随机性,将引起优化计算结果的不稳定性,从而可能导致错误的故障判别。因此,建立以代数关系建模为基础的故障定位方法已成为有效克服其不足的关键。文献[21]提出基于代数关系描述的配电网故障定位线性整数规划模型,可直接采用常规优化算法进行决策,能够有效克服故障定位逻辑建模优化方法对群体智能算法的依赖。但文献[21]直接对离散变量进行决策,因离散变量的存在,求解比较复杂,且现有的整数规划方法应用于大规模配电网时将出现效率不高的缺陷。文献[22]以文献[21]为基础,基于馈线的故障信息状态互斥性特征,通过互补理论构建辅助互补约束条件建立了配电网互补约束故障定位模型,采用代数关系建模,不仅具有容错性,且可直接在连续空间应用常规算法实现故障区段辨识,实现简单便捷,为基于优化理论的配电网故障定位方法提供了新的技术方案。但文献[22]不足之处在于:利用光滑化理论进行互补模型转换使决策变量数和约束条件显著增加,加剧了模型与算法的复杂性;因建模时未有效考虑故障电流信号的并联叠加特性,故障定位模型不完善,当发生多重故障时会产生错判或漏判现象;所建光滑化模型对初始点选择存在敏感性,会导致误判。

本文借鉴基于代数关系的配电网故障定位优化模型连续空间建模方法优势,利用分层解耦策略,构建适应于单重故障和多重故障辨识的配电网故障定位层级模型,提出模型求解的预测校正算法,其特点在于:预测阶段直接利用非线性规划决策;在校正阶段直接对预测阶段的结果进行四舍五入取整计算,

收稿日期:2017-02-31;**修回日期:**2018-01-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51407035);国家自然科学基金青年基金资助项目(51707057);河南省科技攻关项目(172102210104, 182102210251, 17HASTIT020);河南省教育厅项目(17A470007, 2016GGJS153);河南工程学院博士启动项目(D2016019)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51407035), the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(51707057), the Science and Technology Program of Henan Province(172102210104, 182102210251, 17HASTIT020), the Program of Department of Education of Henan Province(17A470007, 2016GGJS153) and the Doctoral Program of Henan University of Engineering(D2016019)

从而高效地辨识出故障发生区段;不增加变量和约束条件数;具有容错性和多重故障定位能力。

1 配电网故障定位层级模型建模原理

1.1 故障定位模型建模总体思路

配电网故障定位优化模型的建模思路为:首先,分析代数关系互补约束故障定位模型多重故障定位的不完备性原因;然后,提出配电网层级划分原理,构建开关函数模型;最后,基于最佳逼近关系理论,建立解耦策略与代数关系描述的配电网故障定位模型。

1.2 代数关系互补约束故障定位模型多重故障辨识的不完备性

以图1为例简要说明代数关系互补约束故障定位模型的建模方法并分析其在多重故障定位方面具有不完备性。

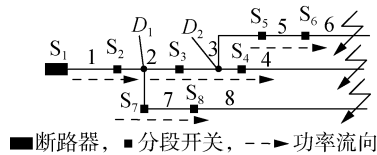


图1 单电源T型耦合节点配电网

Fig.1 Distribution network with T-coupling nodes and single power source

1.2.1 基于代数关系的互补约束故障定位模型建模

依据文献[14-20],基于最优化技术的配电网故障定位模型包含开关函数和逼近关系故障定位优化模型。为对互补约束故障定位模型的不完备性进行分析,首先依据文献[21-22]简要阐述其建模方法。

a. 基于代数关系的开关函数建模。

基于图连通性和电力功率流的传输特性,依据因果关联分析,建立自动化设备的因果关联设备集。表1为图1所示配电网的因果关联设备集,其中,1→2表示馈线2紧邻馈线1且功率流由馈线1流向馈线2,其他类推。

表1 因果设备关联信息

Table 1 Association information of causal devices

自动化开关	因果设备与顺序
断路器 S_1	1→2→3→4→5→6→7→8
分段开关 S_2	2→3→4→5→6→7→8
分段开关 S_3	3→4→5→6
分段开关 S_4	4
分段开关 S_5	5→6
分段开关 S_6	6
分段开关 S_7	7→8
分段开关 S_8	8

依据表1中各开关的因果关联关系,利用代数加法运算(+)替代文献[14-20]中的逻辑或运算表征因果设备与监控点上传报警信息的因果联系,如果 $X=[x(1), x(2), \dots, x(8)]$ 为馈线故障状态集($x(1)$ 、 $x(2)$ 、 $\dots$ 、 $x(8)$ 分别为馈线1、2、 $\dots$ 、8的馈线状态信

息),则自动化开关 $S_1, S_2, \dots, S_8$ 的电流越限信息开关函数 $I_1(X), I_2(X), \dots, I_8(X)$ 的数学模型为:

$$I_1(X) = x(1) + x(2) + x(3) + x(4) + x(5) + x(6) + x(7) + x(8) \quad (1)$$

$$I_2(X) = x(2) + x(3) + x(4) + x(5) + x(6) + x(7) + x(8) \quad (2)$$

$$I_3(X) = x(3) + x(4) + x(5) + x(6) \quad (3)$$

$$I_4(X) = x(4) \quad (4)$$

$$I_5(X) = x(5) + x(6) \quad (5)$$

$$I_6(X) = x(6) \quad (6)$$

$$I_7(X) = x(7) + x(8) \quad (7)$$

$$I_8(X) = x(8) \quad (8)$$

b. 逼近关系故障定位互补约束优化模型。

采用 $I^* = [I_1 \ I_2 \ I_3 \ I_4 \ I_5 \ I_6 \ I_7 \ I_8]$ 表示电流越限报警集,假定馈线4、6、8同时发生故障且报警信息无畸变,则 I^* 的元素全为1。依据文献[14-20]的逼近关系故障诊断优化目标建模原理,基于文献[21-22]的代数关系建模方法,利用文献[22]的离散变量的互补约束等价转换方法,建立的连续空间的逼近关系故障定位互补优化模型为:

$$\begin{cases} \min f(X) = \sum_{i=1}^8 [I_i(X) - 1]^2 \\ \text{s.t. } X \perp (1 - X) = 0 \\ X = [x(1), x(2), \dots, x(8)] \end{cases} \quad (9)$$

1.2.2 互补约束故障定位模型不完备性分析

理论上,基于代数关系的互补约束故障定位模型式(9)在多重故障定位时如果具有完备性,则馈线4、6、8同时发生故障时,通过优化计算最终确定满足约束条件的馈线故障状态集应为 $X = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1]$ 。此时,将 X 代入式(1)~(9),可获得式(9)的目标函数值为:

$$f(X) = \sum_{i=1}^8 [I_i(X) - 1]^2 = 9 \quad (10)$$

依据互补约束故障定位模型优化求解方法,得到满足互补约束条件下式(10)的最小目标函数值为3,此时确定的馈线故障状态集为 $X = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1]$,因此互补约束故障定位模型的建模方案还存在不合理性,缺乏对多重故障的适应能力,会导致对馈线4处故障的漏判。

1.3 互补约束故障定位模型不完备性原因分析

图2中, D_1, D_2 为T型耦合节点,以馈线4、6、8同时发生故障为例分析式(9)在多重故障定位时存在不完备性的原因。

耦合节点 D_1, D_2 的存在使得馈线4、馈线6和馈线8在发生故障时相互间不存在因果关联关系,但是其具有共同的因果设备。例如:馈线4、馈线6

是 S_3 的因果设备,馈线 4、馈线 6 和馈线 8 又是 S_1 、 S_2 的因果设备。上述关系通过式(1)~(8)中的加法运算(+)联系在一起:从电学角度上反映了馈线 4、馈线 6 和馈线 8 同时发生故障时故障电流状态的并联叠加特性,即多重故障对因果设备的耦合作用特性;从数学角度上加法运算(+)实现 X 中非零关联元素的代数相加计算。但互补约束故障定位模型在进行电流越限信息报警集 I^* 的构建时仅采用正常/0 和故障/1 这 2 种状态,不能有效反映馈线 4、馈线 6 和馈线 8 同时发生故障时的并联叠加特性对过电流大小的影响,从而导致互补约束故障定位模型式(9)对多重故障的定位能力缺乏适应性。

1.4 配电网分层解耦理论

依据 1.3 节的分析可知,保障电流越限信息报警集 I^* 和相互独立馈线支路间故障电流信号并联叠加特性的一致性是实现多重故障准确辨识的前提,实现方法主要有:

a. 直接法,即对电流越限信息报警集 I^* 的直接解析建模;

b. 间接法,即建立的开关函数消除支路间故障电流信号的并联叠加特性。

直接法理论上可行,但要建立反映支路并联叠加特性的电流越限信息报警集 I^* 的解析模型将会非常复杂,且会改变优化模型的特性,增加决策优化过程难度,因此本文采用间接法。

利用间接法建模时,首先依据配电网馈线支路优先级建立配电网分层解耦模型。

T 型耦合节点处的 2 条馈线支路 A 和 B 的优先级定义为:以功率流方向为正方向,若 B 处于 A 下游,则称 A 的优先级高于 B;若 A 和 B 的功率流互不影响,则称 A、B 具有相同优先级。

依据优先级定义,含有耦合节点的辐射状配电网的分层解耦方法为:以耦合节点为标志,若支路另一端与电源相连,则耦合节点与电源间支路构成 1 个独立区域;若支路另一端与耦合节点相连,则 2 个耦合节点间的馈线构成一个独立区域;若支路另一端无电源点或耦合节点,则耦合节点与支路末端节点间的馈线支路构成一个独立区域;然后,按照优先级从高到低的方向编号,优先级相等的独立区域作为相同层级,从而实现耦合节点相连支路的物理分层解耦。图 2 为针对图 1 所示的配电网所构建的分层解耦结构,其分为 I、II、III 3 级。

1.5 配电网故障定位的层级模型建模

1.5.1 基于配电网分层解耦的故障定位基本思路

依据 1.4 节配电网分层解耦理论及电力系统功率流输送机制可知:优先级高的独立区域不会对优先级低的独立区域报警电流状态值产生影响,优先级低的独立区域故障的过电流状态对与其有直接功率流耦合关系的高优先级独立区域的报警电流状态

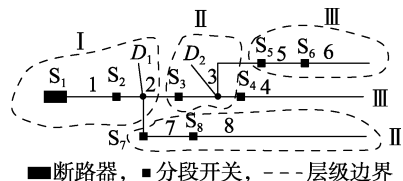


图 2 单电源 T 型耦合节点配电网分层结构

Fig.2 Hierarchy structure for distribution network with T-coupling nodes and single power source

值有直接影响,相同优先级的独立区域的报警电流信息互不影响。

基于上述理论,配电网分层解耦故障定位的基本思路为:首先,针对每个独立区域建立因果关联设备集,构建开关函数;然后,针对分层解耦的配电网,基于因果分析、独立区域单一故障假设、故障诊断最小集理论、区域故障辨识系数,建立采用代数关系描述仅含 0/1 离散变量的配电网故障定位层级优化模型;最后,依据配电网独立区域间的优先级关系,建立独立区域故障辨识模型,对发生故障的独立区域实现辨识,确定独立区域故障辨识系数,并利用互补理论建立连续空间中配电网故障定位的层级模型,从而用于配电网区段的单一故障和多重故障辨识。

1.5.2 基于代数关系描述的开关函数建模

针对独立区域 1(支路 1),当自动化开关 S_1 的监控点捕获到故障过电流信息时将向控制主站上传报警信息,依据图连通性和功率流传输特性可知,馈线 1、2 可能发生短路故障,从而引起 S_1 处的过电流,则馈线 1、2 为造成 S_1 报警信息的因果设备,同理,可得到馈线 2 为自动化开关 S_2 的因果设备。按照上述方法可得到独立区域 2—5 中的自动化开关的因果设备。表 2 为针对图 1 建立的基于独立区域的自动化开关因果关联设备集。对比表 1 和表 2 可看出,互补约束故障定位模型的因果设备确定方法和本文确定方法的差异在于:互补约束故障定位模型的因果设备基于配电网整体进行构建,本文以分层解耦后的独立区域为基本单元进行构建。

表 2 基于独立区域的因果设备关联信息

Table 2 Causal association device information based on isolated region

独立区域	自动化开关	因果设备与顺序
1	断路器 S_1	馈线 1→2
1	分段开关 S_2	馈线 2
2	分段开关 S_3	馈线 3
3	分段开关 S_4	馈线 4
4	分段开关 S_5	馈线 5→6
4	分段开关 S_6	馈线 6
5	分段开关 S_7	馈线 7→8
5	分段开关 S_8	馈线 8

依据表 2 中各自动化开关的因果设备关联关系和 1.2.1 节中的建模方法,基于独立区域的开关函数代数关系数学模型可表示为:

$$I_1(\mathbf{X}) = x(1) + x(2) \quad (11)$$

$$I_2(\mathbf{X}) = x(2) \quad (12)$$

$$I_3(\mathbf{X}) = x(3) \quad (13)$$

$$I_4(\mathbf{X}) = x(4) \quad (14)$$

$$I_5(\mathbf{X}) = x(5) + x(6) \quad (15)$$

$$I_6(\mathbf{X}) = x(6) \quad (16)$$

$$I_7(\mathbf{X}) = x(7) + x(8) \quad (17)$$

$$I_8(\mathbf{X}) = x(8) \quad (18)$$

将式(11)~(18)与式(1)~(8)进行比较可以看出:本文所建立的开关函数模型有效地实现了T型耦合节点处相互独立支路间的物理解耦,避免了其故障电流信号间的并联叠加特性,理论上可应用于发生多重故障的配电网故障区段定位建模。

依据上述开关模型的构建方法,当配电网具有 J 个独立区域时,基于代数关系描述的开关函数数学模型可表示为:

$$\begin{cases} I_i(\mathbf{X}) = \sum_{i=L+1}^{L+N_j} x(i) \\ L = \sum_{i=0}^{j-1} N_i \end{cases} \quad (19)$$

其中, $N_0=0$; j 为配电网独立区域编号, $j=1,2,\dots,J$; N_j 为独立区域 j 中的馈线支路总数。

1.5.3 配电网故障定位的离散空间层级优化模型

配电网故障定位优化方法的容错性本质是基于逼近理论找到最能解释所有 FTU 故障电流报警信息的馈线设备,建模方案为:采用残差平方和建立描述报警信息和开关函数间一致性的逼近关系模型;然后引入区域故障辨识系数,利用存在故障电流报警信息且优先级最低的独立区域的因果设备、开关函数和逼近关系模型建立故障定位层级优化模型。

I_i^* 为电流超限信息报警集 I^* 中的第 i 个元素,依据上述开关函数,以独立区域发生单一故障假设为前提,针对图 1 建立逼近关系模型 $B_i(\mathbf{X})$ 为:

$$B_i(\mathbf{X}) = [I_i^* - I_i(\mathbf{X})]^2 \quad i=1,2,\dots,8 \quad (20)$$

当找到最佳故障设备时,式(20)应最小。针对图 1 建立的故障定位层级优化模型目标函数为:

$$\min f(\mathbf{X}) = K_1[B_1(\mathbf{X}) + B_2(\mathbf{X})] + K_2B_3(\mathbf{X}) + K_3B_4(\mathbf{X}) + K_4[B_5(\mathbf{X}) + B_6(\mathbf{X})] + K_5[B_7(\mathbf{X}) + B_8(\mathbf{X})] \quad (21)$$

其中, K_j 为独立区域 j 的故障辨识系数, K_j 取值为0或1, $K_j=1$ 时表示区域 j 为有效的故障定位独立区域,即需要利用其寻求馈线故障区段。

式(21)及馈线故障状态信息的0/1取值限制构成了基于代数关系描述的配电网故障区段定位层级优化模型。将式(21)拓展到包含任意馈线数的配

电网,则通用的配电网故障层级优化模型为:

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^J \sum_{i=L+1}^{L+N_j} K_j B_i(\mathbf{X}) \\ L = \sum_{i=0}^{j-1} N_i \\ \mathbf{X} = \left[x(1), x(2), \dots, x\left(\sum_{j=1}^J N_j\right) \right] \end{cases} \quad (22)$$

其中, $x(i)$ 取值为0或1, $i=1,2,\dots,\sum_{j=1}^J N_j$; $N_0=0$ 。

1.5.4 配电网故障定位的互补约束层级优化模型

式(22)为含独立区域辨识系数矩阵 $\mathbf{K}$ 和馈线状态 $\mathbf{X}$ 2类0-1离散整数变量的非线性规划模型,直接对离散变量求解将比较复杂,将其等价变换到连续空间可显著降低决策复杂性。首先依据独立区域过电流信息确定独立区域故障辨识系数矩阵 $\mathbf{K}$;然后基于互补约束理论将其等价转换为非线性连续优化模型。本文将利用独立区域间优先级关系及过电流信息确定独立区域故障辨识系数:

a. 利用相邻独立区域间优先级关系建立优先级结构辨识矩阵 $\mathbf{P}'$;

b. 构建独立区域过电流信息向量集 $\mathbf{G}$;

c. 结合 $\mathbf{G}$ 和 $\mathbf{P}'$ 建立故障独立区域判定矩阵 $\mathbf{P}$;

d. 利用 $\mathbf{P} \times \mathbf{G}$ 确定矩阵 $\mathbf{K}$ 。

下文以图 1 中的馈线 6、馈线 8 同时发生短路故障为例,详细说明 $\mathbf{K}$ 的确定方法。

a. 建立优先级结构辨识矩阵 $\mathbf{P}'$ 。 $\mathbf{P}'$ 的行、列数等于独立区域个数, $\mathbf{P}'$ 的每行、列对应独立区域编号; $\mathbf{P}'$ 的对角线元素均为1;对于非对角线元素,若独立区域 i 和独立区域 j 紧邻,且独立区域 i 的优先级高于独立区域 j ,则 $\mathbf{P}'$ 中第 j 行、第 i 列元素为1,第 j 行的其余元素为0,若独立区域 j 的优先级高于独立区域 i ,则 $\mathbf{P}'$ 中第 i 行、第 j 列元素为1,第 i 行的其余元素为0。按照上述理论,基于图 1 建立的优先级结构辨识矩阵 $\mathbf{P}'$ 为:

$$\mathbf{P}' = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (23)$$

b. 构建独立区域过电流信息向量集 $\mathbf{G}$ 。馈线 6 所属独立区域 4,馈线 8 所属独立区域 5,依据独立区域优先级关系,可判断出独立区域 1、2、4、5 具有过电流信息。列向量 $\mathbf{G}$ 的行数为独立区域个数, $\mathbf{G}$ 的每行对应独立区域编号,按照有过电流信息时对应 1、无过电流信息时对应 0 的编码方式,基于图 1 建立的独立区域过电流信息向量集 $\mathbf{G}$ 为:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (24)$$

c. 建立故障独立区域判定矩阵 $\mathbf{P}$ 。依据优先级理论和配电网分层解耦理论,只需采用优先级低的独立区域过电流信息进行故障定位。矩阵 $\mathbf{P}$ 的构建方法为:依据式(24),找出 $\mathbf{G}$ 中非零元素所在行,然后找出与其对应行的式(23)中非对角线的非零元素所在列,并将对应列的所有元素置 0,即可得到矩阵 $\mathbf{P}$ 如式(25)所示。

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

d. 确定独立区域故障辨识系数矩阵 $\mathbf{K}$ 。馈线 6、8 同时发生短路故障时的独立区域故障辨识系数矩阵 $\mathbf{K} = \mathbf{P} \times \mathbf{G} = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1]^T$,即 K_1, K_2, K_3 的值为 0, K_4, K_5 的值为 1,从而判断出独立区域 4、5 存在短路故障。

此时,独立区域故障辨识系数矩阵已确定,式(22)转换为仅含有离散变量 $\mathbf{X}$ 的非线性 0-1 整数规划问题。利用互补约束故障定位模型的等价转换思想,将式(22)等价影射到连续空间,建立配电网互补约束层级优化模型,其可表示为:

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^J \sum_{i=L+1}^{L+N_j} K_j B_i(\mathbf{X}) \\ L = \sum_{i=0}^{j-1} N_i \\ \mathbf{X} = \left[x(1), x(2), \dots, x \left(\sum_{j=1}^J N_j \right) \right] \\ \mathbf{X} \perp (\mathbf{1} - \mathbf{X}) = \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{1} \\ N_0 = 0 \end{cases} \quad (26)$$

2 配电网故障定位层级优化模型的适应性

本节从通用性、多重故障定位能力和容错性 3 个方面分析配电网故障定位层级优化模型的强适应性。

2.1 配电网故障定位层级模型的通用性

当 $\mathbf{K}$ 确定后,式(26)的本质是基于代数关系描述和最优化理论进行建模,依据 1.5 节开关函数和目标函数建模方法和节点支路连接信息变化情况,可较容易地对所建立的模型进行动态修正。因此,独立区域故障辨识系数矩阵 $\mathbf{K}$ 确定过程的难易程度,将直接决定着配电网故障定位层级优化模型的通用性,若其不受独立区域编号顺序的影响,则配电网故障定位层级优化模型具有强通用性。下面将以

图 1 所示配电网为例进行分析。

对图 2 中的独立区域重新进行编号:断路器 S_1 、分段开关 S_2 属于独立区域 3;分段开关 S_3 属于独立区域 5;分段开关 S_4 属于独立区域 2;分段开关 S_5 、 S_6 属于独立区域 1;分段开关 S_7 、 S_8 属于独立区域 4。假定馈线 6、馈线 8 同时发生短路故障,则建立的矩阵 $\mathbf{P}'$ 、 $\mathbf{G}$ 、 $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{K}$ 分别为:

$$\mathbf{P}' = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 5 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (28)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{P} \times \mathbf{G} = [1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]^T \quad (30)$$

依据 $\mathbf{K}$ 仍可判断出馈线 5、6 和馈线 7、8 所在独立区域发生短路故障。可见,本文建立的配电网故障定位层级模型与区域编号顺序无关,具有通用性。

2.2 配电网故障定位层级模型的多重故障能力

依据式(30)可判定独立区域 1、4 发生短路故障,即原独立编号时独立区域 4、5 发生故障,因此, K_1, K_2, K_3 的值为 0, K_4, K_5 的值为 1。依据式(21)可得配电网故障定位层级优化模型的目标函数为:

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{X}) = f_1(\mathbf{X}) + f_2(\mathbf{X}) \\ f_1(\mathbf{X}) = B_5(\mathbf{X}) + B_6(\mathbf{X}) = [1 - x(5) - x(6)]^2 + [1 - x(6)]^2 \\ f_2(\mathbf{X}) = B_7(\mathbf{X}) + B_8(\mathbf{X}) = [1 - x(7) - x(8)]^2 + [1 - x(8)]^2 \end{cases} \quad (31)$$

由式(31)可知, $f_1(\mathbf{X})$ 和 $f_2(\mathbf{X})$ 为二次函数,利用拉格朗日极值条件易得出:当 $x(5) = 0, x(6) = 1$ 时, $f_1(\mathbf{X})$ 达到最小值 0;当 $x(7) = 0, x(8) = 1$ 时, $f_2(\mathbf{X})$ 的值达到最小值 0。从而判定馈线 6 和 8 发生短路故障,与假定故障一致。

2.3 配电网故障定位层级模型的容错性

依据 1.5 节可知,配电网故障定位层级模型中各独立区域间的开关函数和目标函数相互独立,正如式(31)所示,当独立区域故障辨识系数 $\mathbf{K}$ 确定后,配电网故障定位层级模型等价于多个独立的无 T 型耦合节点辐射状配电网故障定位二次优化模型,采用逼近关系理论建模, $\mathbf{K}$ 正确确定后,本文模型将和无 T 型耦合节点辐射状配电网互补约束故障定位模型一样具有高容错性。因此,

若独立区域故障辨识系数 $\mathbf{K}$ 的确定方法具有好的容错性,所建配电网故障定位层级模型将具有高的容错性能。

以 2.1 节的独立区域编码顺序和故障模式为例,假定独立区域 3 出现信息误传,即独立区域 3 的过电流报警信息为 0,馈线 6、馈线 8 同时发生短路故障,独立区域过电流信息向量集 $\mathbf{G}$ 为:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (32)$$

依据式(27)、(32)得到矩阵 $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{K}$ 仍然分别为式(29)、(30),因此可准确判定馈线 5、6 所在独立区域 1 和馈线 7、8 所在独立区域 4 发生故障。

假定独立区域 3、独立区域 5 同时出现信息误传,即独立区域过电流信息向量集 $\mathbf{G}$ 为:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (33)$$

依据式(27)、(33)得到矩阵 $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{K}$ 仍然分别为式(29)、(30),因此可准确判定出馈线 5、6 所在独立区域 1 和馈线 7、8 所在独立区域 4 发生故障。

由上述分析可知,独立区域故障辨识系数 $\mathbf{K}$ 的确定方法具有好的容错性,以其为基础所建立的配电网故障定位层级模型具有高的容错性能。

3 层级优化模型求解的预测校正算法

3.1 层级优化模型求解思路

由式(26)可知,所构建的配电网故障定位层级模型为含有互补约束的非线性规划问题,文献[22]利用光滑化算法求解,存在显著增加变量数、对初始点的选择敏感等缺陷。本文将利用层级优化模型式(26)目标函数和约束条件的二次函数特性,基于松弛方法,首先将其松弛为馈线状态 $\mathbf{X}$ 的值为 $[0, 1]$ 二次规划模型,直接利用非线性规划在连续空间求解,确定馈线状态 $\mathbf{X}$ 的预测值,然后基于二次凸规划极值理论将馈线状态 $\mathbf{X}$ 的预测值为基础的馈线状态 $\mathbf{X}$ 求解问题等价转化为四舍五入取整问题,实现对预测值的校正,从而确定配电网故障区段位置。

3.2 层级优化模型预测校正算法

依据最优化方法中的松弛理论,式(26)的松弛问题可表示为不含互补约束的二次规划问题,其数学模型为:

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^J \sum_{i=L+1}^{L+N_j} K_j B_i(\mathbf{X}) \\ L = \sum_{i=0}^{j-1} N_i \\ \mathbf{X} = \left[x(1), x(2), \dots, x\left(\sum_{j=1}^J N_j\right) \right] \\ 0 \leq \mathbf{X} \leq 1 \\ N_0 = 0 \end{cases} \quad (34)$$

式(26)和式(34)为二次规划问题,可行域连续,其目标函数二次项系数为正,相应的海森矩阵为正定矩阵,目标函数为凸函数,因此式(26)和式(34)都具有唯一局部最优点且为全局最优点。假定 $\mathbf{X}^*$ 、 $f(\mathbf{X}^*)$ 分别为式(26)的全局最优点及其目标函数值, $\bar{\mathbf{X}}^*$ 、 $f(\bar{\mathbf{X}}^*)$ 分别为式(34)的全局最优点及其目标函数值,由松弛定理可知: $f(\mathbf{X}^*) \geq f(\bar{\mathbf{X}}^*)$ 。若令 $\Delta\mathbf{X} = \mathbf{X}^* - \bar{\mathbf{X}}^*$,则基于泰勒级数, $f(\mathbf{X}^*)$ 与 $f(\bar{\mathbf{X}}^*)$ 之间的关系可表示为:

$$f(\mathbf{X}^*) = f(\bar{\mathbf{X}}^*) + \nabla f(\bar{\mathbf{X}}^*)^T \Delta\mathbf{X} + \frac{1}{2} \Delta\mathbf{X}^T \nabla^2 f(\bar{\mathbf{X}}^*) \Delta\mathbf{X} \quad (35)$$

依据式(35)可知,当得到松弛问题式(34)的全局最优点 $\bar{\mathbf{X}}^*$ 后,只需要增加合理的扰动 $\Delta\mathbf{X}$,即可得到式(26)的最优目标函数值 $f(\mathbf{X}^*)$ 及全局最优点 $\mathbf{X}^* = \bar{\mathbf{X}}^* + \Delta\mathbf{X}$ 。此时,式(35)中 $f(\bar{\mathbf{X}}^*)$ 已由式(34)确定,若要式 $f(\mathbf{X})$ 获得最小值,则式(36)的目标函数值需达到最小,其数学模型为:

$$\begin{cases} \min h(\Delta\mathbf{X}) = \nabla f(\bar{\mathbf{X}}^*)^T \Delta\mathbf{X} + g(\Delta\mathbf{X}) \\ g(\Delta\mathbf{X}) = \frac{1}{2} \Delta\mathbf{X}^T \nabla^2 f(\bar{\mathbf{X}}^*) \Delta\mathbf{X} \\ (\bar{\mathbf{X}}^* + \Delta\mathbf{X}) \perp (1 - \bar{\mathbf{X}}^* - \Delta\mathbf{X}) = 0 \end{cases} \quad (36)$$

利用式(36)即可得到扰动量 $\Delta\mathbf{X}$,但式(26)仍为含互补约束的二次优化问题,直接求解仍然比较困难,因此需要针对子问题式(36)提出更加有效的方法。下面分三部分进行讨论。

a. $g(\Delta\mathbf{X})$ 极值条件。因海森矩阵 $\nabla^2 f(\bar{\mathbf{X}}^*)$ 正定且已知,由式(36)可知 $g(\Delta\mathbf{X}) \geq 0$ 。扰动量 $\Delta\mathbf{X}$ 的各分量相互独立,因此只要保证 $\Delta\mathbf{X}$ 各分量的值达到最小即可获得 $g(\Delta\mathbf{X})$ 的极值。

b. $\nabla f(\bar{\mathbf{X}}^*)^T \Delta\mathbf{X}$ 极值条件。 $\bar{\mathbf{X}}^*$ 为式(34)的全局最优点,依据 Kuhn-Tucker 定理可以得到在 $\bar{\mathbf{X}}^*$ 处 $\nabla f(\bar{\mathbf{X}}^*)$ 的各分量为非负值。扰动量 $\Delta\mathbf{X}$ 各分量相互独立,因此同样只要保证 $\Delta\mathbf{X}$ 各分量的值达到最小即可获得 $\nabla f(\bar{\mathbf{X}}^*)^T \Delta\mathbf{X}$ 的极值。

c. $g(\Delta\mathbf{X})$ 函数值变化速率比 $\nabla f(\bar{\mathbf{X}}^*)^T \Delta\mathbf{X}$ 函数值变化速率快,当 $g(\Delta\mathbf{X})$ 函数值和 $\nabla f(\bar{\mathbf{X}}^*)^T \Delta\mathbf{X}$ 的变化方向不一致时,为使式(36)获得最小值,需保证扰动量 $\Delta\mathbf{X}$ 代入式(36)后 $g(\Delta\mathbf{X})$ 的函数值减小。

因为 $0 \leq \bar{\mathbf{X}}^* \leq 1$,若 $0 \leq \bar{\mathbf{X}}^* < 0.5$,当 $\Delta\mathbf{X} = \mathbf{X}^* - \bar{\mathbf{X}}^* = -\bar{\mathbf{X}}^*$,即 $\mathbf{X}^* = 0$ 时, $g(\Delta\mathbf{X})$ 和 $\nabla f(\bar{\mathbf{X}}^*)^T \Delta\mathbf{X}$ 的函数值均小于 $\mathbf{X}^* = 1$ 时对应的函数值,为满足变量值满足 0/1 取值要求,此时 $\mathbf{X}^* = 0$;若 $0.5 < \bar{\mathbf{X}}^* \leq 1$,

$X^* = 1$, 则 $g(\Delta X)$ 的函数值小于 $X^* = 0$ 时的函数值, 为使得变量值满足 0/1 取值要求, 此时 $X^* = 1$; 若 $\bar{X}^* = 0.5$, 则 $X^* = 0$ 和 $X^* = 1$ 时的 $g(\Delta X)$ 相等, 而 $X^* = 0$ 时 $\nabla f(\bar{X}^*)^T \Delta X$ 的函数值小于 $X^* = 1$ 时 $\nabla f(\bar{X}^*)^T \Delta X$ 的函数值, 但为避免故障漏判, 采取“过估计”策略, 最终 $X^* = 1$ 。

由此可见, 当 $\bar{X}^* \neq 0.5$ 时, 式 (36) 取极小值时对应的变量全局最优值 X^* 的值可由松弛问题式 (34) 的全局最优值 $\bar{X}^*$ 进行四舍五入取整得到; 当 $\bar{X}^* = 0.5$ 时, 为避免故障漏判, 决策变量值同样可以采用四舍五入取整得到, 从而避免了对互补约束问题式 (36) 的直接决策求解。

基于上述理论分析, 即可得出配电网故障定位层级优化模型决策求解的预测校正算法:

- a. 当配电网发生故障时首先基于预测模型式 (34), 采用非线性规划预测出馈线状态的近似值;
- b. 然后利用四舍五入取整准则得到所有馈线状态值, 从而利用为 1 的馈线状态值确定馈线故障区段所在位置。

3.3 配电网故障定位层级优化模型预测校正算法求解步骤

基于上述分析, 当配电网自动化设备终端采集到过电流信息时, 层级优化模型求解基本步骤为:

- a. 依据 1.5.4 节建立优先级结构辨识矩阵 P' ;
- b. 基于馈线自动化设备 FTU 等隶属独立区域, 依据其上传的过电流报警信息构建独立区域过电流信息向量集 G ;
- c. 依据 1.5.4 节的方法建立故障独立区域判定矩阵 P , 进一步确定故障独立区域故障辨识系数矩阵 K ;
- d. 利用非线性规划对式 (34) 进行决策求解, 预测出馈线状态的近似值;
- e. 利用四舍五入取整准确确定所有馈线的状态值, 从而实现配电网馈线故障区段的辨识。

由此可以看出, 本文所提出的配电网故障定位层级优化模型决策求解的预测校正算法无需对互补优化模型进行直接决策求解, 与光滑化算法相比不会增加决策变量个数, 对初始点无任何要求, 具有全局收敛特性、通用性强、实现便捷等优点。

4 算例仿真分析

4.1 预测校正算法有效性分析

采用文献 [22] 的 5 节点辐射状配电网 (如图 3 所示) 为例进行分析, 主要验证: 本文的预测校正算法是正确有效的, 且其有效性不依赖于初始点的选择, 具有全局收敛性; 文献 [22] 的光滑化算法存在对初始点敏感的缺陷, 即初始点选择不合理将导致

故障区段误判; 当信息畸变时本文算法可直接判断出可能发生故障的馈线区段。

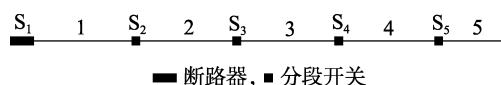


图 3 单电源辐射状配电网

Fig.3 Radiate distribution network with single power source

表 3 为本文算法和光滑化算法的故障定位结果比较, 表中, Y, J, F, C, S, S', L 分别表示预设故障位置、报警信息畸变位置、预测算法目标函数值、最终目标函数值、预测算法对应的决策变量值、最终决策变量值、故障定位结果。其中光滑化算法的仿真结果来源于文献 [22]; 为保证结果的可重复性, 本文算法的仿真结果是在决策变量集初始点值均为 0 的前提下得到。

根据表 3 的仿真结果可以看出, 在无信息畸变情况下, 本文算法和光滑化方法均可正确地辨识出馈线故障位置; 当存在报警信息畸变时, 本文算法和光滑化方法对于连续畸变位数小于非畸变位数时的情况, 都可以正确地定位出馈线故障位置。但是, 当连续畸变位数与非畸变位数相等时, 光滑化方法若直接利用决策变量值进行故障定位, 将会造成错判和漏判。例如: 表 3 中 S_4 畸变和 S_2, S_3 畸变情况下, 光滑化算法出现了故障错判和漏判情况。为解决上述情况, 光滑化方法需联合 Kuhn-Tucker 条件综合判定出所有可能故障, 不仅过程复杂, 且缺乏严格理论的证明, 是否具有普适性有待进一步验证。本文所提出的预测校正算法, 针对 S_4 畸变和 S_2, S_3 的畸变情况, 可辨识出所有可能发生故障的馈线区段。由此可以看出, 本文所提出的预测校正算法在进行故障定位时是合理有效的, 且与光滑化方法相比具有更高的故障辨识能力和容错性能。

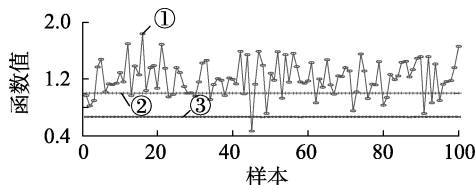
算法数值稳定性将直接影响配电网故障定位结果可靠性, 因此, 必须对算法稳定性进行分析。针对馈线 5 发生故障且 S_3 上传的报警信息畸变的情况, 采用均匀随机数产生 100 个初始样本点, 分别采用本文算法和光滑化算法进行决策求解。图 4 为本文预测校正算法和光滑化算法对 100 个初始随机样本点的优化决策结果。

由图 4(a) 可以看出, 针对 100 个初始随机样本, 本文算法在预测阶段均可稳定收敛到全局最优值, 这使得其在校正阶段都可以稳定得到准确的配电网故障决策向量, 从而判定出馈线区段 5 发生故障, 具有可靠的数值稳定性。由图 4(b) 可知, 光滑化算法得到的决策结果受初始点影响较大, 即对初始点选择存在敏感性, 若选择合理将可定位出馈线故障区段, 但若选择不合理将会导致馈线故障区段的错判和漏判, 其数值稳定性较差, 在进行故障定位

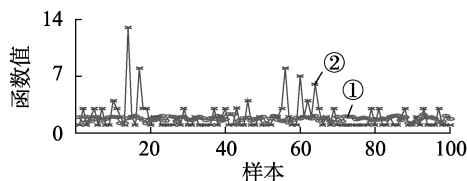
表 3 配电网故障定位仿真结果

Table 3 Simulative results of distribution network fault location

模型	Y	J	F	C	S	S'	L
本文算法	1	—	—	2.24×10^{-32}	—	[1 0 0 0 0]	1
光滑化算法	1	—	5.47×10^{17}	0	[1 0 0 0 0]	[1 0 0 0 0]	1
本文算法	2	—	—	1.14×10^{32}	—	[0 1 0 0 0]	2
光滑化算法	2	—	6.66×10^{18}	0	[0 1 0 0 0]	[0 1 0 0 0]	2
本文算法	3	—	—	4.55×10^{33}	—	[0 0 1 0 0]	3
光滑化算法	3	—	1.19×10^{15}	0	[0 0 1 0 0]	[0 0 1 0 0]	3
本文算法	4	—	—	2.27×10^{34}	—	[0 0 0 1 0]	4
光滑化算法	4	—	8.18×10^{16}	0	[0 0 0 1 0]	[0 0 0 1 0]	4
本文算法	5	—	—	3.62×10^{13}	—	[0 0 0 0 1]	5
光滑化算法	5	—	2.76×10^{16}	0	[0 0 0 0 1]	[0 0 0 0 1]	5
本文算法	5	S_1	—	1	—	[0 0 0 0 1]	5
光滑化算法	5	S_1	0.8	1	[0 0 0 0 0.8]	[0 0 0 0 1]	5
本文算法	5	S_2	—	1	—	[0 0 0 0 1]	5
光滑化算法	5	S_2	0.75	1	[0.25 0 0 0 0.75]	[0 0 0 0 1]	5
本文算法	5	S_3	—	1	—	[0 0 0 0 1]	5
光滑化算法	5	S_3	0.667	1	[0 0.333 0 0 0.667]	[0 0 0 0 1]	5
本文算法	5	S_4	—	1	—	[0 0 1 0 0]	3
光滑化算法	5	S_4	0.5	4	[0 0 0.5 0 0.5]	[0 0 1 0 1]	3,5
本文算法	5	S_1, S_2	—	2	—	[0 0 0 0 1]	5
光滑化算法	5	S_1, S_2	1.2	2	[0 0 0 0 0.6]	[0 0 0 0 1]	5
本文算法	5	S_1, S_3	—	2	—	[0 0 0 0 1]	5
光滑化算法	5	S_1, S_3	1.2	2	[0 0 0 0 0.6]	[0 0 0 0 1]	5
本文算法	5	S_2, S_3	—	2	—	[1 0 0 0 0]	1
光滑化算法	5	S_2, S_3	0.5	3	[0.5 0 0 0 0.5]	[1 0 0 0 1]	1,5



(a) 预测校正算法数值稳定性



(b) 光滑化算法数值稳定性

- ①—L2 范数, ②—预测算法目标函数值(预测阶段)
③—预测算法目标函数值(校正阶段)
④—光滑化算法目标函数值

图 4 算法的稳定性分析

Fig.4 Stability analysis of algorithms

时将存在可靠性问题。因此,通过比较可以明显看

出,本文算法在数值稳定性上显著优于光滑化方法。

4.2 故障定位模型多重故障定位能力分析

以图 1 为例,分别验证本文配电网故障定位层级模型和互补约束故障定位模型在多重故障定位方面的能力。表 4 为本文故障定位模型和文献[10]故障定位互补优化模型的配电网多重故障定位结果。为保证算法结果的可重复性,互补约束故障定位模型和本文模型的仿真结果都在决策变量集初始点值均为 0 的前提下得到。

根据表 4 可以看出,互补约束故障定位模型具有一定的多重故障定位能力。例如:馈线 4、8 或馈线 6、8 发生故障时互补约束故障定位模型可准确定位出故障区段。但当馈线 4、6 或馈线 4、6、8 发生故障时,互补约束故障定位模型出现了故障区段的漏判。通过观察可以看出漏判的馈线都处在 T 型耦合节点之后,进一步验证了 1.3 节的理论分析,在构建 I^* 和开关函数时没有充分考虑相互独立支路故障电

表 4 2 种模型得到的配电网故障定位仿真结果

Table 4 Simulative results of distribution network fault location by two models

模型	Y	F	C	S	S'	L
互补约束故障定位模型	4,6	—	1	—	[0 0 0 0 0 1 0 0]	6
本文模型	4,6	6.11×10^{17}	0	[0 0 0 1 0 1 0 0]	[0 0 0 1 0 1 0 0]	4,6
互补约束故障定位模型	4,8	—	2	—	[0 0 0 1 0 0 0 1]	4,8
本文模型	4,8	6.11×10^{17}	0	[0 0 0 1 0 0 0 1]	[0 0 0 1 0 0 0 1]	4,8
互补约束故障定位模型	6,8	—	2	—	[0 0 0 0 0 1 0 1]	6,8
本文模型	6,8	5.38×10^{15}	0	[0 0 0 0 0 1 0 1]	[0 0 0 0 0 1 0 1]	6,8
互补约束故障定位模型	4,6,8	—	2	—	[0 0 0 0 0 1 0 1]	6,8
本文模型	4,6,8	0	0	[0 0 0 1 0 1 0 1]	[0 0 0 1 0 1 0 1]	4,6,8

流信号并联叠加特性是导致其缺乏多重故障定位能力强适应性的根本原因。由表4可看出,本文所提出的故障定位层级模型准确地辨识出所有发生短路故障的馈线区段,具有更加可靠的多重故障定位能力。

4.3 预测校正算法故障定位效率分析

采用光滑化优化对求解故障定位模型时,在决策过程中通过引入光滑化函数将导致决策变量数增加1倍,约束条件增加2倍,在一定程度上降低了决策效率。对1000节点配电网仿真结果表明,光滑化算法平均迭代约50次后可辨识出故障位置。本文提出的预测校正算法没有增加变量数和约束条件数,针对文献[22]中的1000节点算例进行仿真,本文提出的预测校正算法迭代约25次可辨识出故障位置,平均故障定位时间约为15 s。因此,本文所提出的预测校正算法具有更加高效的故障辨识效率,可应用于大规模配电网的故障区段定位。图5为本文算法针对1000节点配电网中馈线1000发生故障时的定位结果。

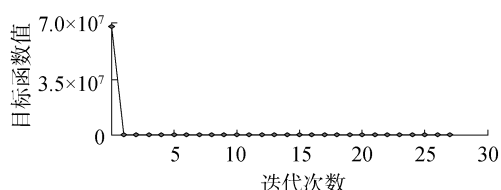


图5 1000节点配电网故障定位优化过程

Fig.5 Optimization process of fault location for 1000-node distribution network

5 结论

a. 本文以互补约束故障定位模型的研究为基础,基于代数关系描述、逼近关系理论、配电网分层解耦策略构建故障定位层级模型,不仅避免了对群体智能算法的过分依赖,而且克服了互补约束故障定位模型建模方案对多重故障缺乏适应性的缺陷。故障定位层级模型具有通用性好、故障辨识可靠性高、多重故障定位能力强等优势。

b. 本文提出的配电网故障定位层级模型决策求解的预测校正算法,可直接避开对离散变量的优化决策,能有效降低故障定位模型在优化决策时的复杂性。与光滑化算法相比,本文算法不依赖初始点选择,算法可靠性高,优化求解过程中不会增加变量数和约束条件数,具有更加高效的决策效率。

c. 本文所构建的故障定位层级模型和预测校正决策方法适用于大规模配电网馈线的单一与多重故障在线定位问题。

参考文献:

[1] KEZUNOVIC M. Smart fault location for smart grids[J]. IEEE

Transactions on Smart Grid,2011,2(1):11-22.

[2] 唐利锋,卫志农,黄霆,等. 配电网故障定位的改进差分算法[J]. 电力系统及其自动化学报,2011,23(1):17-21.

TANG Lifeng, WEI Zhinong, HUANG Ting, et al. Improved differential evolution algorithm for fault location of distribution networks[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2011,23(1):17-21.

[3] JAMALI S, TALAVAT V. Accurate fault location method in distribution networks containing distributed generations[J]. Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering,2011,10(1):27-33.

[4] 齐郑,高玉华,杨以涵. 配电网单相接地故障区段定位矩阵算法的研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(20):159-163.

QI Zheng, GAO Yuhua, YANG Yihan. Research on matrix-based algorithm for single-phase-to-earth fault section location in distribution grid[J]. Power System Protection and Control,2010,38(20):159-163.

[5] 刘健,倪建立,杜宇. 配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法[J]. 电力系统自动化,1999,23(1):31-33.

LIU Jian, NI Jianli, DU Yu. A unified matrix algorithm for fault section detection and isolation in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems,1999,23(1):31-33.

[6] 王飞,孙莹. 配电网故障定位的改进矩阵算法[J]. 电力系统自动化,2003,27(12):45-46.

WANG Fei, SUN Ying. An improved matrix algorithm for fault location in distribution network of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(12):45-46.

[7] 蒋秀洁,熊信尹,吴耀武,等. 改进矩阵算法及其在配电网故障定位中的应用[J]. 电网技术,2004,28(19):60-63.

JIANG Xiujie, XIONG Xinyin, WU Yaowu, et al. Improved matrix algorithm and its application in fault location of distribution network[J]. Power System Technology,2004,28(19):60-63.

[8] 焦彦军,杜松广,王琪,等. 基于信息矛盾原理的畸变信息修正及配电网故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(16):43-48.

JIAO Yanjun, DU Songguang, WANG Qi, et al. Information aberrance correction and fault-section location for distribution networks based on the information contradiction theory[J]. Power System Protection and Control,2014,42(16):43-48.

[9] 张钊. 配电网故障定位的通用矩阵算法[J]. 电力自动化设备,2005,25(5):40-42.

ZHANG Zhao. General matrix algorithm for distribution system fault locating[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(5):40-42.

[10] 刘耀湘,乐秀璠,顾欣欣. 配电网故障区段判断和隔离的综合矩阵法[J]. 电力自动化设备,2006,26(3):38-40.

LIU Yaoxiang, LE Xiufan, GU Xinxin. Synthesis matrix algorithm for fault section detection and isolation in distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(3):38-40.

[11] 徐青山,唐国庆,张欣. 计及容错的配电网故障定位新算法[J]. 电力自动化设备,2005,25(6):31-33.

XU Qingshan, TANG Guoqing, ZHANG Xin. Error-tolerated fault locating algorithm of power distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(6):31-33.

[12] WEN F, HAN Z. Fault section estimation in power systems using a genetic algorithm[J]. Electric Power Systems Research,1995,34(3):165-172.

[13] WEN F, HAN Z. A refined genetic algorithm for fault section estimation in power systems using the time sequence information of circuit breakers[J]. Journal of Electric Machines & Power Systems,1996,24(8):801-815.

- [14] 杜红卫,孙雅明,刘弘靖,等. 基于遗传算法的配电网故障定位和隔离[J]. 电网技术,2000,25(5):52-55.
DU Hongwei,SUN Yaming,LIU Hongjing,et al. Fault section diagnosis and isolation of distribution networks based on genetic algorithm[J]. Power System Technology,2000,25(5):52-55.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 郑涛,潘玉美,郭昂亚,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.
- [19] 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.
- [20] 刘蓓,汪泓,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):280-286.
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):280-286.
- [21] 郭壮志,徐其兴,洪俊杰,等. 配电网快速高容错性故障定位的线性整数规划方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(3):786-794.
GUO Zhuangzhi,XU Qixing,HONG Junjie,et al. Integer linear programming based fault section diagnosis method with high fault-tolerance and fast performance for distribution network[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(3):786-894.
- [22] 郭壮志,徐其兴,洪俊杰,等. 配电网故障区间定位的互补约束新模型与算法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(14):3742-3750.
GUO Zhuangzhi,XU Qixing,HONG Junjie,et al. A novel fault section location model with complementarity constraints and its optimization algorithm for distribution network[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(14):3742-3750.

作者简介:



郭壮志

郭壮志(1983—),男,河南周口人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统分析与控制、配电网自动化(E-mail: gzz_412@163.com);

陈涛(1981—),男,河南周口人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail: 631670023@qq.com);

黄全振(1979—),男,河南漯河人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统分析与控制(E-mail: 2360526906@qq.com);

徐其兴(1981—),男,河南周口人,教授,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制、电力系统通信(E-mail: xuqx@sina.com);

洪俊杰(1982—),男,广东潮汕人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统分析与控制、电力电子与电机传动(E-mail: hongjunjie@gdut.edu.cn)。

Hierarchy model of distribution network fault location and its predictor-corrector algorithm

GUO Zhuangzhi¹, CHEN Tao¹, HUANG Quanzhen¹, XU Qixing¹, HONG Junjie²

(1. School of Electrical Information Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China;

2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The complementary constraint fault location model lacks the strong multi-fault identification ability and has numerical stability problem in decision-making, aiming at which and drawing on the advantages of algebraic relational modeling, a hierarchy model of fault location in distribution network is proposed based on hierarchical decoupling strategy, which can effectively identify multiple fault. Based on the relaxation strategy and the quadratic programming extreme value theory, the predictor-corrector algorithm is proposed, which has global convergence characteristics and does not need to directly optimize the discrete variables decision. The simulative results show that the proposed model and algorithm can realize the high-fault-tolerant identification of single and multiple faults in the feeder fault section, and can be easily realized for optimal decision-making with good numerical stability and high efficiency.

Key words: distribution network; electric fault location; multiple faults; hierarchy model; predictor-corrector algorithm