

doi: 10.12052/gdutxb.190125

基于非线性互补约束的含DG配电网故障区段定位方法

荣泽成¹, 陈璟华¹, 郭壮志², 许俊宁¹, 陈友鹏¹

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

摘要: 随着分布式电源的接入, 配电网故障过电流方向不再唯一, 传统的故障区段定位方法将不适用, 本文提出含分布式电源(Distributed Generation, DG)配电网故障区段定位的非线性互补约束光滑化模型和求解方法。基于逻辑关系的间接故障定位方法在数值稳定性和决策效率上的不足, 本文构建了可适应多个DG投切情况的基于代数关系的开关函数。2个仿真算例与对比实验表明, 含DG配电网故障区段定位的非线性互补约束光滑化方法在进行故障定位时具有较高的容错性能, 且能够实现多信息畸变下的准确定位, 由此可见本方案在数值稳定性上胜于智能算法。

关键词: 分布式电源; 故障区段定位; 配电网; 非线性互补约束光滑化模型

中图分类号: TM771 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-7162(2020)04-0051-08

A Fault Segment Location Method for DG Distribution Network Based on Nonlinear Complementary Constraints

Rong Ze-cheng¹, Chen Jing-hua¹, Guo Zhuang-zhi², Xu Jun-ning¹, Chen You-peng¹

(1. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. School of Electrical Information Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: With the access of distributed generation(DG), the direction of fault overcurrent in the distribution network is no longer unique, and hence the traditional method about fault section location will not be applicable. A nonlinear complementary constrained smoothing model is proposed with a solution method for fault section location in distribution networks with DG. Considering the deficiencies in numerical stability and decision efficiency based on logical relationship of the indirect fault location method, a switch function is constructed based on algebraic relationships that can adapt to multiple DG switching situations. Two simulation algorithms and contrast experiments show that nonlinear complementary constrained smoothing method of fault section location in distribution networks with DG has a high fault tolerance performance and can achieve exact orientation under multi-information distortion, and so it can be seen that our algorithm is superior to intelligence algorithms in numerical stability.

Key words: distributed generation; fault section location; distribution network; nonlinear complementary constrained smoothing model

如何在配电网发生故障后定位出故障区段以便快速隔离故障和迅速恢复用户供电, 一直是提高配电网安全和供电可靠性方面研究的重中之重。随着大量分布式电源(DG)的接入, 配网结构变得愈加复杂, 由此导致系统的潮流分布及短路电流也发生了变化, 使得配电网的短路故障方向判别及故障定位

遭受较大影响。虽现阶段的配电网故障定位研究方法种类繁多^[1-7], 但多是未虑及DG接入配电网进行建模的, 在DG并网后这些传统模型将不再适用。

配电网发生故障时, 在各断路器与分段开关处装设的馈线终端单元(Feeder Terminal Unit, FTU)可检测到故障过电流, 若其值超出预先设定的故障电

流定值,那么FTU将会上传故障报警信息至数据采集与监视控制系统(Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA)^[8]。目前配电网故障定位的方法多是基于FTU上报故障信息进行的^[9-13]。文献[14-15]提出基于矩阵分析的故障区段定位方法,通过故障信息和网络拓扑矩阵等进行矩阵运算求解故障馈线区段,但在FTU信息畸变的时候容易误判、漏判。文献[16]所提定位方法虽具备一定的容错性,但只适用于传统的单电源辐射型配电网,DG接入后并不适用。文献[17-18]首次建立了非逻辑关系描述的配电网故障定位新模型,所用故障区段定位方法虽数值性强,稳定性高,但只适用于传统的单电源辐射型配电网,DG接入后并不适用。文献[19-23]虽考虑DG接入配电网引起电流方向变化的影响,但所建立的开关函数都是基于逻辑关系的,所运用的决策方法也均是智能算法,由于智能算法易陷入局部最优,故可靠性不高。

本文提出含DG配电网的故障区段定位方法。首先构建了基于非逻辑运算的适应DG接入的开关函数,引入了DG投切系数来描述DG的投切,并建立含DG的配电网故障区段定位的互补约束模型。仿真算例表明,该方法不仅适用于多个DG的投切情况,还在FTU上传过电流信息发生畸变时,有着较强的容错能力。针对不同DG投切情况,将本文所提方法与智能算法进行比较,仿真结果表明本文所提方法具有更高的准确率和容错性。

1 基于代数关系的DG接入的开关函数

1.1 基于代数关系建模的基本思想

本文采用文献[18]的建模思想,此思想的根本目的就是找出对应的故障设备,其最能解释所有FTU上传的过电流状态值。目标函数就是使所有预设故障过电流状态值与所有FTU实际上传的过电流状态值差异最小,其在残差中加入了平方运算的目的是为避免绝对值运算,用馈线区段的故障状态信息作为变量,并采用0~1离散值进行变量编码,数字0和1分别表示馈线区段运行正常和故障。

以图1所示单电源辐射型配电网为例,展示以单一故障为前提的基于代数关系的配电网故障定位建模方案(见式(1))。

$$\begin{cases} \min f(x) = \sum_{i=1}^N (I_{S_i} - I_{S_i}^*(x))^2 \\ X = [x(1), x(2), \dots, x(N)] \\ x(i) = 0/1, i = 1, 2, \dots, N \\ X \in \mathbf{R}^N \end{cases} \quad (1)$$

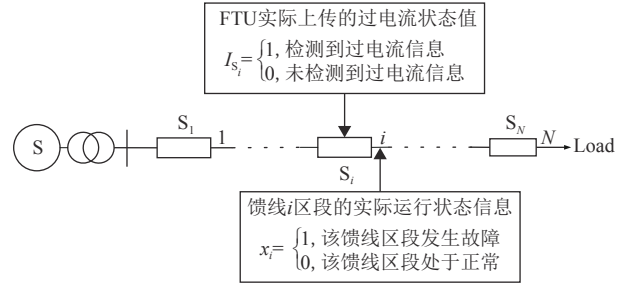


图1 单电源辐射型配电网

Fig.1 Single-supply radiation distribution network

$$I_S = [I_{S_1} \quad I_{S_2} \quad \dots \quad I_{S_N}]^T \quad (2)$$

$$I_{S_i} = \begin{cases} 1, & \text{检测到过电流信息} \\ 0, & \text{未检测到过电流信息} \end{cases} \quad (3)$$

$$I_S^*(x) = [I_{S_1}^*(x) \quad I_{S_2}^*(x) \quad \dots \quad I_{S_N}^*(x)]^T \quad (4)$$

$$I_{S_i}^*(x) = \sum_i^N x(i) \quad (5)$$

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{该馈线区段发生故障} \\ 0, & \text{该馈线区段处于正常} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中N为配电网所含开关(含断路器和分段开关)总数;I_{S_i}为第i个开关S_i的FTU实际上传的过电流状态值,在单电源辐射型配电网中发生短路故障时,故障电流方向唯一,由系统电源指向线路末端。假设x(1)~x(N)分别为馈线1~N区段的实际运行状态信息。I_{S_i}^{*}(x)为第i号开关S_i的开关函数,I_{S_i}^{*}(x)是关于x的函数,其值为开关S_i下游所有馈线区段状态值的代数相加运算结果,例如I_{S₄}^{*}(x) = x(4) + x(5) + ... + x(N)。在仿真实验中,预设故障位置后即可得到x的过电流状态向量,根据开关函数就能得出各开关的过电流信息。

1.2 考虑DG接入后的开关函数

随着大量DG接入,配网结构变得愈加复杂,导致系统的潮流分布及短路电流方向也发生变化,配电网的故障电流方向不再唯一,因此需要规定正方向来对故障电流方向加以区分。本文的电流方向采用文献[21]的思想,正方向定为以系统电源指向负载的方向,即定义正方向为在单电源情况下发生故障时的潮流方向。I_{S_i}定义的故障信息如式(7)所示。

$$I_{S_i} = \begin{cases} 1, & \text{检测到正方向的故障电流} \\ -1, & \text{检测到反方向的故障电流} \\ 0, & \text{未检测到过电流信息} \end{cases} \quad (7)$$

以开关S_i为分断点,将配电网分成上、下游2部

分,开关 S_i 的上游部分定义为包含系统电源的一部分,剩下的部分即为开关 S_i 的下游部分。引入开关 S_i 的DG投切系数 K_i 用于表示开关 S_i 下游部分是否存在DG接入配电网, K_i 的定义如式(8)所示。

$$K_i = \prod_{j=1}^J K(j) \quad (8)$$

$$K(j) = \begin{cases} 1, & S_i \text{下游第} j \text{个DG接入配电网} \\ 0, & S_i \text{下游第} j \text{个DG未接入配电网} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中 $K(j)$ 表示配电网开关 S_i 下游部分第 j 个分布式电源的并网状态值, J 为开关 S_i 下游部分所含分布式电源的总数; Π 为逻辑“或”运算。故适应DG接入的新的开关函数为

$$I_{S_i}^*(x) = \sum_{n_1=1}^{N_1} x_i(n_1) - K_i \sum_{n_2=1}^{N_2} x_i(n_2) \quad (10)$$

式(10)中 $x_i(n_1)$, $x_i(n_2)$ 分别为开关 S_i 下游、上游部分的馈线区段状态值; N_1 , N_2 分别为配电网开关 S_i 下游、上游部分的馈线区段总数。

1.3 验证开关函数

以图2所示含DG的T型耦合节点配电网为例进行分析。假定DG1投入,DG2未投入。

根据式(8)~(10),各开关函数的表达式如式(11)所示。预设馈线区段4故障,据式(6)可得 $x(1)=1$, $x(2)=1$, $x(3)=1$, $x(4)=1$, $x(5)=-1$, $x(6)=0$, $x(7)=0$,据式(11)可计算出开关函数 $I_{S_5}^*(x)=[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 0 \ 0]^T$ 。根据图2,以开关 S_4 为分断点,包含系统电源S的部分为开关 S_4 的上游部分,剩余部分为开关 S_4 的下游部分,故得出开关 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_6 、 S_7 的故障电流为正方向, $S_1=S_2=S_3=S_4=1$ 。由于DG1接入网络,故馈线区段4至DG1上的开关 S_5 的故障电流为反方向, $S_5=-1$ 。因DG2未投入运行,故从T节点馈线区段3至DG2上的开关 S_6 、 S_7 无故障电流经过,则 $S_6=S_7=0$ 。故FTU实际上传的过电流状态值 $I_S=[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 0 \ 0]^T$,对比可知开关函数值 $I_S^*(x)$ 与FTU实际上传的过电流状态值吻合。

$$\begin{cases} I_{S_1}^*(x) = x(1) + x(2) + x(3) + x(4) + x(5) + x(6) + x(7) \\ I_{S_2}^*(x) = (x(2) + x(3) + x(4) + x(5) + x(6) + x(7)) - (x(1)) \\ I_{S_3}^*(x) = (x(3) + x(4) + x(5) + x(6) + x(7)) - (x(1) + x(2)) \\ I_{S_4}^*(x) = (x(4) + x(5)) - (x(1) + x(2) + x(3) + x(6) + x(7)) \\ I_{S_5}^*(x) = x(5) - (x(1) + x(2) + x(3) + x(4) + x(6) + x(7)) \\ I_{S_6}^*(x) = x(6) + x(7) - 0 \\ I_{S_7}^*(x) = x(7) - 0 \end{cases} \quad (11)$$

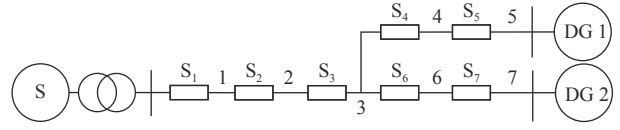


图2 含DG的T型耦合节点的配电网

Fig.2 Distribution network of T-coupled nodes with DG

2 含DG的配电网故障区段定位方法

2.1 配电网故障定位的互补约束光滑化模型

2.1.1 配电网故障定位互补约束规划模型

由于式(1)存在离散变量,故求解较为复杂,需将离散模型转换成连续模型。依文献[18]的转换思想,若要将式(1)中的离散变量转换成连续变量,则需引入辅助变量 $\kappa(i)$ 构建辅助互补约束条件,再根据 $x(i)=0/1$ 的特性,构建等式约束(12)使得当且仅当 $x(i)$ 和 $\kappa(i)=0/1$ 时成立。

$$\begin{cases} x(i) + \kappa(i) = 1 \\ x(i)\kappa(i) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中 N 为馈线区段总数,再将式(12)代入式(1)后即形成了配电网故障定位的互补约束规划模型,如式(13)所示。

$$\begin{cases} \min f(x) = \sum_{i=1}^N (I_{S_i} - I_{S_i}^*(x))^2 \\ \mathbf{X} + \boldsymbol{\kappa} = \mathbf{1} \\ \mathbf{X}\boldsymbol{\kappa} = \mathbf{0} \\ \sum_{n=1}^N x(n) \leq 1 \\ \mathbf{X} = [x(1), x(2), \dots, x(N)] \\ \boldsymbol{\kappa} = [\kappa(1), \kappa(2), \dots, \kappa(N)] \\ \mathbf{X}, \boldsymbol{\kappa} \geq 0, \mathbf{X} \in \mathbf{R}^N, \boldsymbol{\kappa} \in \mathbf{R}^N \end{cases} \quad (13)$$

2.1.2 互补约束规划模型的光滑化

由于已有的非线性规划不能获得互补约束优化问题在Karush-Kuhn-Tucker (KKT)条件下的局部最优点,故需将互补约束优化模型光滑化,常用方法是Fischer-Burmeister辅助函数^[22],据文献[18],基于扰动因子的Fischer-Burmeister辅助函数 $\Phi_\varepsilon[x(i), \kappa(i)]$ 的数学模型为

$$\Phi_\varepsilon[x(i), \kappa(i)] = x(i) + \kappa(i) - \sqrt{x(i)^2 + \kappa(i)^2 + 2\varepsilon(i)^2} \quad (14)$$

将 $\Phi_\varepsilon[x(i), \kappa(i)] = 0$ 替代约束条件,可得

$$x(i)\kappa(i) = \varepsilon(i)^2 \quad (15)$$

式(15)中 $\varepsilon(i)^2$ 是馈线 i 的扰动因子,为非负值。由于在 $\varepsilon(i)^2 = 0$ 时方可保证配电网故障定位的互补约束光滑化模型取得最优解,所以在构建故障定位互补约束光滑化模型时,要保证优化过程中 $\varepsilon(i)$ 逐渐收敛于0。故将 $\varepsilon(i)$ 融入到目标函数中,构建配电网故障定位互补约束光滑化模型的目标函数如式(16)所示。

$$\min F(\mathbf{X}, \boldsymbol{\kappa}) = f(\mathbf{X}) + \sum_{i=1}^N \varepsilon(i)^2 \quad (16)$$

考虑到发生信息畸变时 $f(\mathbf{X}) > 0$,应增加新约束条件(17)使得 $\varepsilon(i)$ 收敛于零。

$$f(\mathbf{X}) \sum_{i=1}^N \varepsilon(i)^2 = 0 \quad (17)$$

根据式(12),可将式(14)简化为式(18)所示。

$$\Phi_\varepsilon[x(i), \kappa(i)] = 1 - \sqrt{x(i)^2 + \kappa(i)^2 + 2\varepsilon(i)^2} \quad (18)$$

故互补约束故障定位的光滑化模型可表示为式(19),对式(19),可在MATLAB中采用内点法进行优化求解。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min F(\mathbf{X}, \boldsymbol{\kappa}) = f(\mathbf{X}) + \sum_{i=1}^N \varepsilon(i)^2 \\ \Phi_\varepsilon[x(i), \kappa(i)] = 0 \\ f(\mathbf{X}) \sum_{i=1}^N \varepsilon(i)^2 = 0 \\ \mathbf{X} = [x(1), x(2), \dots, x(N)] \\ \boldsymbol{\kappa} = [\kappa(1), \kappa(2), \dots, \kappa(N)] \\ \boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon(1), \varepsilon(2), \dots, \varepsilon(N)] \\ \mathbf{X} + \boldsymbol{\kappa} = \mathbf{1}; \mathbf{X}, \boldsymbol{\kappa} \geq 0 \\ \mathbf{X} \in \mathbf{R}^N, \boldsymbol{\varepsilon} \in \mathbf{R}^N \end{array} \right. \quad (19)$$

2.2 考虑DG接入的配电网故障定位的互补约束光滑化模型

在DG接入配电网后,配电网故障定位互补约束光滑化模型的开关函数将用式(10)代替,另外本模型假设故障情况均为单点故障,故应增加约束,如式(20)所示。

$$\sum_{n=1}^N x(n) \leq 1 \quad (20)$$

故考虑DG接入的配电网故障定位的互补约束光滑化模型如式(21)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min F(\mathbf{X}, \boldsymbol{\kappa}, \boldsymbol{\varepsilon}) = \sum_{i=1}^N (I_{S_i} - (\sum_{n_1=1}^{N_1} x_i(n_1) - \\ K_i \sum_{n_2}^{N_2} x_i(n_2)))^2 + \sum_{i=1}^N (x(i)\kappa(i)) \\ 1 - \sqrt{X^2 + \kappa^2 + 2\varepsilon^2} = 0 \\ \sum_{i=1}^N (I_{S_i} - (\sum_{n_1=1}^{N_1} x_i(n_1) - \\ K_i \sum_{n_2}^{N_2} x_i(n_2)))^2 \sum_{i=1}^N (x(i)\kappa(i)) = 0 \\ \sum_{n=1}^N x(n) \leq 1 \\ \mathbf{X} = [x(1), x(2), \dots, x(N)] \\ \boldsymbol{\kappa} = [\kappa(1), \kappa(2), \dots, \kappa(N)] \\ \mathbf{X} + \boldsymbol{\kappa} = \mathbf{1}; \mathbf{X}, \boldsymbol{\kappa} \geq 0 \\ \mathbf{X} \in \mathbf{R}^N, \boldsymbol{\varepsilon} \in \mathbf{R}^N \end{array} \right. \quad (21)$$

针对本文的含DG的配电网故障定位的互补约束光滑化模型,运用内点法优化求解的具体步骤如下:(1)由所研究配电网中的DG接入情况,确定开关 S_i 的DG投切系数 K_i 。(2)由FTU装置,得到实际上传的过电流信息 I_{S_i} 。(3)根据所研究配电网拓扑结构,将开关函数解析。(4)将上述数据及约束条件导入内点算法参数中,决策求解后,根据结果分析可得故障位置。

2.3 模型容错性能分析

针对本文的配电网故障定位的互补约束光滑化模型,以图2所示的配电网为例,对所建模型的容错性进行分析。设馈线区段4处故障,DG1投入,DG2未投入,则正常状态下FTU上传的实际过电流信息 $I_S = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ 0 \ 0]^T$ 。现假定 I_{S_2} 发生畸变,即 $I_{S_2} = 1 \rightarrow 0$,则此时FTU上传的过电流信息 $I_{\text{畸}} = [1 \ 0 \ 1 \ 1 \ -1 \ 0 \ 0]^T$,根据所有的预设故障过电流状态值与所有FTU实际上传的过电流状态值差异最小化思想,由式(11)中 $I_{S_7}^*(x) = x(7)$ 可推导出 $x(7) = 0$,将 $x(7) = 0$ 代入 $I_{S_6}^*(x) = x(6) + x(7)$ 可推导出 $x(6) = 0$,再往 $I_{S_4}^*(x), I_{S_5}^*(x)$ 里代入得

$$I_{S_4}^*(x) = (x(4) + x(5)) - (x(1) + x(2) + x(3)) = 1 \quad (22)$$

$$I_{S_5}^*(x) = (x(5)) - (x(1) + x(2) + x(3) + x(4)) = -1 \quad (23)$$

由式(22)减式(23)可得 $x(4) = 1$,再据式(20)约束可知 $x(1), x(2), x(3), x(5)$ 均为0,得 $\mathbf{X} = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$,畸变时目标函数值虽然不为0,但仍为最小值,此时最小值为1。综上可知本文所提方法在FTU上传的过电流

信息发生畸变之时,依旧可以正确定位,故具有一定的容错性能。

3 算例分析

3.1 算例1

如上文图2所示,S为系统电源,DG1、DG2为分布式电源。 S_1 为断路器, $S_2\sim S_7$ 为分段开关。

在FTU上传过电流信息未发生畸变情况下,分别对馈线区段1~7发生单一故障进行仿真实验,使用内点算法进行决策。然后再在FTU上传过电流信息发生畸变情况下,对不同畸变情况进行仿真实验,仿真结果见表1,投切系数 $K=[k_1, k_2]$,表示各DG投切状态。

表1 算例1馈线区段1~7单一故障仿真结果

Table 1 Simulation results of single fault in feeder section 1 ~ 7				
序号	故障区段	K	畸变情况	定位结果
1	1	[0, 1]	无	1
2	2	[0, 1]	无	2
3	3	[0, 1]	无	3
4	3	[0, 0]	无	3
5	4	[1, 0]	无	4
6	5	[1, 0]	无	5
7	6	[1, 0]	无	6
8	7	[1, 1]	无	7
9	1	[0, 1]	6	1
10	2	[0, 1]	6,7	2
11	3	[0, 0]	5,7	3
12	4	[1, 0]	5	4
13	4	[1, 0]	6	4
14	4	[1, 0]	5, 6	4
15	4	[1, 0]	5, 6, 7	4
16	7	[1, 1]	3, 4	7
17	7	[1, 1]	5, 6	7

由表1的仿真结果可知,本文所提出的含DG配电网故障定位的互补约束光滑化模型能对故障馈线区段进行准确定位,当FTU上传的过电流信息发生1~3位畸变时,仍能准确找出故障区段,有着良好的容错性能。通过观察投切系数 K ,可知本文所提出的含DG配电网故障定位的互补约束光滑化模型可适用于DG全部投切情况。

3.2 算例2

算例2结构如图3所示,在算例1基础上,在配网线路末端增加负荷和DG接入,对不同畸变情况下分别使用智能算法中的差分进化算法(Differential

Evolution Algorithm, DE)和本文所提方法分别进行100次仿真实验。DE的种群规模为50,交叉概率为0.9,变异概率为0.9,最大迭代次数为100次。仿真结果见表2,表2中准确率是以定位正确次数除以实验总次数计算得出。

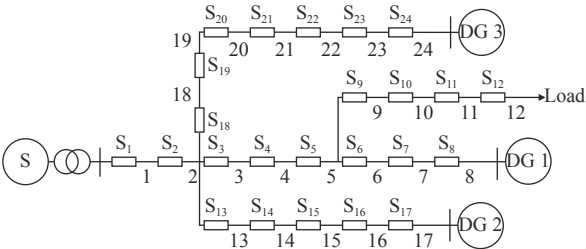


图3 24节点配电网
Fig.3 24-node distribution network

表2 对算例2使用不同算法进行仿真的结果

Table 2 Simulation results of example 2 using different algorithms					
序号	故障区段	所用算法	K	畸变情况	准确率/%
1	4	差分进化	[1, 1, 0]	无	88
2	4	内点法	[1, 1, 0]	无	100
3	4	内点法	[1, 1, 0]	5	100
4	4	差分进化	[1, 1, 0]	12	82
5	4	内点法	[1, 1, 0]	12	100
6	4	差分进化	[1, 1, 0]	17, 24	86
7	4	内点法	[1, 1, 0]	17, 24	100
8	9	差分进化	[0, 0, 0]	1, 24	72
9	9	内点法	[0, 0, 0]	1, 24	100
10	17	差分进化	[1, 1, 1]	8, 15	76
11	17	内点法	[1, 1, 1]	8, 15	100
12	22	差分进化	[1, 1, 1]	8, 21, 23	70
13	22	内点法	[1, 1, 1]	8, 21, 23	100

由表2的仿真结果可知,对DG不同投切情况,本文所提方法均可精准定位出故障区段,而差分进化算法的定位结果则不稳定,分析实验结果可知,在FTU上传过电流信息畸变越多时,差分进化算法的准确率就越低。

3.3 与基于逻辑关系的故障定位方法比较

除了差分进化算法外,针对基于逻辑关系描述的配电网故障定位方法,根据文献[19-23]所提供的算例和仿真结果,从模型、算例规模、决策方法、故障定位准确性、算法稳定性几方面进行总结对比。

表3中所提及文献,因采用逻辑模型建模,故必须采用智能算法进行故障定位。虽然智能算法对于离散变量的处理较为方便,但其存在不稳定的缺陷,导致定位结果有误。现将本文所提方法与文献[19]及文献[21]中的部分实验进行对比。

表 3 基于逻辑关系的故障定位方法结果比较

Table 3 Comparison of results of fault location methods based on logical relationship

文献	模型	算例规模	所用算法	是否误判	稳定性
[19]	逻辑模型	30节点	改进和声	是	不稳定
[20]	逻辑模型	37节点	改进模因	是	不稳定
[21]	逻辑模型	20节点	蝙蝠	是	不稳定
[22]	逻辑模型	31节点	改进遗传	是	不稳定
[23]	逻辑模型	21节点	云粒子群	是	不稳定

3.3.1 与改进和声算法比较

文献[19]采用的和声算法中,和声记忆库大小HMS=5,和声记忆库考虑概率HMCR=0.95,扰动概率PAR=0.8,扰动量bw=5,最大迭代次数J=1 000。改进和声算法中,和声记忆库大小HMS=5,最大迭代次数J=1 000。对30节点算例进行仿真实验,截取部分实验结果如表4所示。30节点算例为如图4所示,其中DG全部投入。

表 4 和声算法的部分实验结果

Table 4 Partial experimental results of the harmony algorithm

决策算法	故障区段	畸变情况	准确率/%
和声算法	20	无	84
和声算法	13	14	81
改进和声算法	20	无	99
改进和声算法	13	14	98

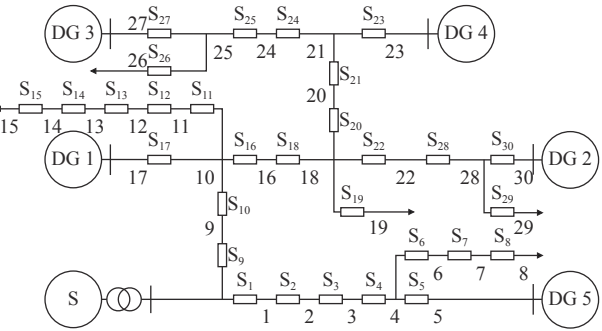


图 4 30节点配电网

Fig.4 30-node distribution network

针对30节点配电网,使用本文所提方法在相同故障情况下与和声算法进行对比实验,实验结果如表5所示。

以区段13故障、开关S₁₄畸变为例,本文所提方法仿真结果如图5所示。根据文献[19]数据显示,此情况下和声算法平均迭代439.19次,改进和声算法平均156.91次,由图5(b)可知本文所提方法迭代76次。

对比可知,本文所提方法在故障定位准确性、算法稳定性上更有优势。

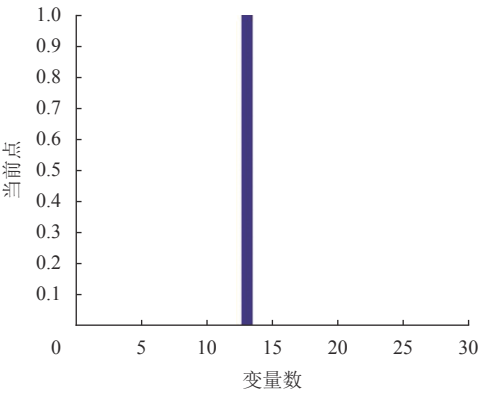
3.3.2 与蝙蝠算法比较

文献[21]采用的蝙蝠算法中,蝙蝠种群n=4,蝙蝠

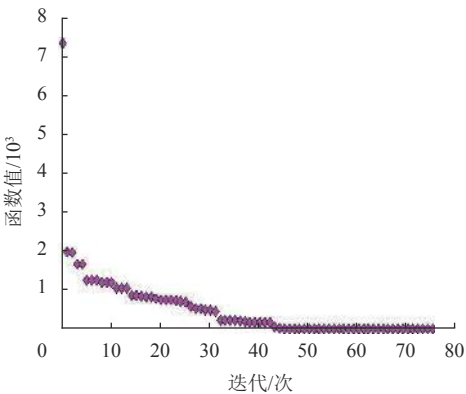
表 5 对30节点配电网运用内点法决策的实验结果

Table 5 Experimental results of interior point method decision making for 30-node distribution network

决策算法	故障区段	畸变情况	准确率/%
内点法	20	无	100
内点法	13	14	100
内点法	20	无	100
内点法	13	14	100



(a) 对30节点配电网运用内点法的故障定位结果



(b) 对30节点配电网运用内点法的迭代过程

图 5 对30节点配电网运用内点法的故障定位结果及迭代过程

Fig.5 Fault location results and iterative process using interior point method for 30-node distribution network

脉冲频率上限 $u_{fi}=5$,频率下限 $l_{fi}=0$,脉冲响度函数设为 $A^{t+1}(i)=0.9A^t(i)$,初始值 $A^0(i)=0.4$,脉冲发射速率函数设为 $R^{t+1}(i)=R^0(i)(1-\exp(-0.9t))$,其中 $R^0(i)=0.5$,最大迭代次数NI=1 500,终止判据为连续50代算法取得相同最优解。在区段14处单点故障,S₉畸变的情况下,对20节点算例进行仿真实验,20节点算例如图6所示,其中DG全部投入。

针对20节点配电网,使用本文所提方法在相同故障情况下与蝙蝠算法进行对比实验,实验结果如表6所示。

以区段14故障、开关S₉畸变为例,根据文献[21]数据显示,此情况下使用蝙蝠算法定位50次,成功定

位49次,即成功率平均为98%,而相同情况下使用本文所提方法运行100次,成功定位100次。本文所提方法仿真结果如图7所示。

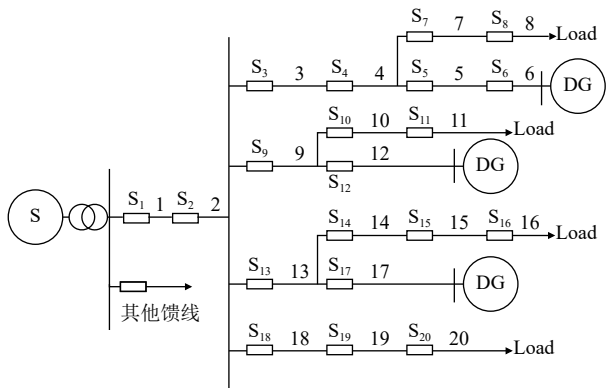


图6 20节点配电网
Fig.6 20-node distribution network

表6 对20节点配电网分别使用内点法与蝙蝠算法的实验结果
Table 6 Experimental results using the interior point method and the bat algorithm for the 20-node distribution network

决策算法	故障区段	畸变情况	准确率/%
蝙蝠算法	14	9	98
内点法	14	9	100

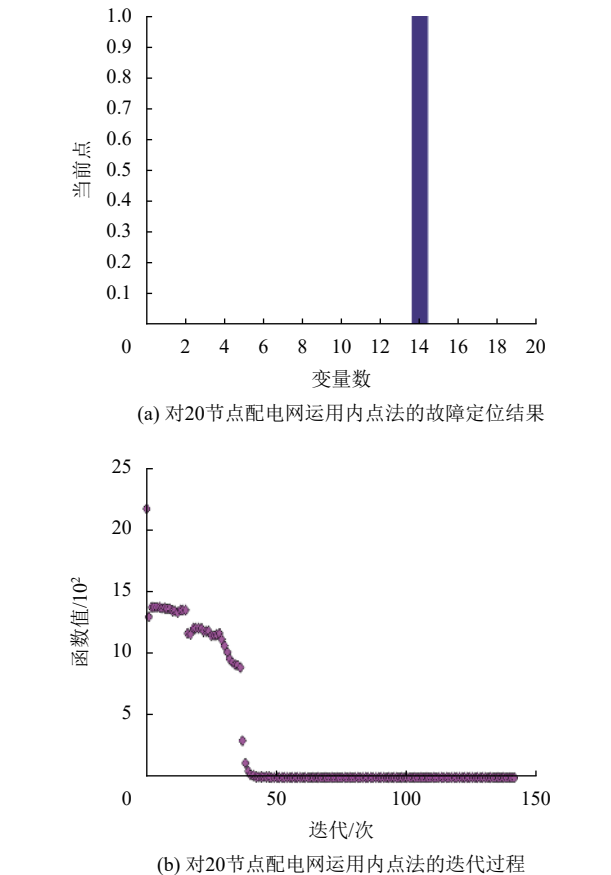


图7 对20节点配电网运用内点法的故障定位结果及迭代过程
Fig.7 Fault location results and iterative process of 20-node distribution network using interior point

由表6和图7(a)可知,在FTU上传过电流信息发生畸变的情况下,内点算法的容错性优于蝙蝠算法。由图7(b)可知,使用内点法决策求解时,算法迭代至39次就已经收敛。此外,统计100次内点法优化结果,计得其平均迭代次数为40次。而根据文献[21],相同情况下蝙蝠算法平均迭代为49次。对比可知,本文所提算法更有优势。

4 结论

- (1) 本文基于约束互补光滑化理论建立了含DG的配电网故障定位模型,该模型可适用于含DG的配电网的故障定位,定位结果准确稳定。
- (2) 本文所提方法可适用于DG所有投切情况,对电流正方向的规定较为简便,可适用于各种拓扑结构的配电网。
- (3) 因使用代数关系建立模型,求解时可用数值稳定性高的非线性规划进行决策,因此在求解上避免了智能算法易陷入局部最优、收敛性差的问题。对于拓扑结构较为复杂的含DG配电网,故障区段定位成功率高达100%,且在FTU上传的过电流信息发生多位畸变时仍可准确定位,具备一定的容错性能。
- (4) 本文研究前提均为单点故障,对于多重故障的模型建立与决策方案仍需继续研究。

参考文献:

[1] 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, 24(5): 52-55.
DU H W, SUN Y M, LIU H J, et al. Fault location and isolation of distribution network based on genetic algorithm [J]. Power System Technology, 2000, 24(5): 52-55.

[2] 刘俊夫. 基于BP神经网络的配电网故障区段定位优化方法研究[D]. 恩施: 湖北民族学院, 2018.

[3] 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 J C, LU Q S. Fault sections location of distribution network based on bat algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 100-105.

[4] 项晓鸣. 基于蝙蝠算法和元胞自动机的配电网故障定位研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2017.

[5] 程璞. 基于粒子群算法的配电网故障定位研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.

[6] 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 T, PAN Y M, GUO K Y, et al. Fault location of distribution network based on immune algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 77-83.

[7] 秦立军, 杨万涛. 蚁群算法在配电网故障定位中的应用

- 及其优化[J]. 电气应用, 2015, 34(22): 73-76.
- QIN L J, YANG W T. Application and optimization of ant colony algorithm in fault location of distribution network [J]. *Electrical Applications*, 2015, 34(22): 73-76.
- [8] ZHANG B, HAO Z, BO Z. New development in relay protection for smart grid [J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(1): 14.
- [9] 陈奎, 张云, 王洪寅, 等. 基于免疫算法的含分布式电源配电网的故障定位[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(24): 57-62.
- CHEN K, ZHANG Y, WANG H Y, *et al.* Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on immune algorithm [J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(24): 57-62.
- [10] 徐鹏飞, 邢仁周. 粒子群优化算法含分布式电源配电网故障定位[J]. *电源技术*, 2018, 42(4): 591-592.
- XU P F, XING R Z. Fault location of distribution network with distributed generation supply by particle swarm optimization algorithm [J]. *Power Technology*, 2018, 42(4): 591-592.
- [11] 周淦, 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 Q, ZHENG B L, LIAO R J, *et al.* Fault segment location of distributed generation distribution network based on particle swarm optimization and differential evolution algorithm [J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(4): 33-37.
- [12] 王一非, 贾燕冰. 含分布式电源配电网故障定位改进矩阵算法[J]. *计算机仿真*, 2018, 35(4): 58-64.
- WANG Y F, JIA Y B. Improved matrix algorithm for fault location in DG distribution network [J]. *Computer Simulation*, 2018, 35(4): 58-64.
- [13] 刘鹏程, 李新利. 基于多种群遗传算法的含分布式电源的配电网故障区段定位算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(2): 36-41.
- LIU P C, LI X L. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple-population genetic algorithm [J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(2): 36-41.
- [14] 吴薛红, 郑梅, 唐小波, 等. 配电网故障区间定位的新型矩阵算法[J]. *南京师范大学学报(工程技术版)*, 2003(2): 54-57.
- WU X H, ZHENG M, TANG X B, *et al.* A new matrix algorithm for fault section locating in distribution system [J]. *Journal of Nanjing Normal University (Engineering & Technology)*, 2003(2): 54-57.
- [15] 罗梅, 杨洪耕. 配电网故障定位的一种改进通用矩阵算法[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(5): 64-68.
- LUO M, YANG H G. An improved general matrix algorithm for fault locating in distribution system [J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(5): 64-68.
- [16] 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(4): 128-131.
- WEI Z N, HE H, ZHENG Y P. A refined genetic algorithm for the fault sections location [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2002(4): 128-131.
- [17] 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): 786-795.
- GUO Z Z, XU Q X, HONG J J, *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): 786-795.
- [18] 郭壮志, 徐其兴, 洪俊杰, 等. 配电网故障区段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): 3342-3751.
- GUO Z Z, XU Q X, HONG J J, *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): 3342-3751.
- [19] 陈辉, 周羽生, 刘诗涵, 等. 基于改进和声算法的含DG配电网故障定位[J]. *电力科学与技术学报*, 2018, 33(2): 123-128.
- CHEN H, ZHOU Y S, LIU S H, *et al.* Fault location of DG-containing distribution network based on improved harmony algorithm [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2018, 33(2): 123-128.
- [20] 陶维青, 杨刚, 丁明, 等. 改进模因算法在含DG配电网故障定位中的应用[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(2): 265-273.
- TAO W Q, YANG G, DING M, *et al.* Application of improved memetic algorithm in fault location of DG distribution network [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2016, 30(2): 265-273.
- [21] 裴文杰, 谭阳红, 汪泓, 等. 蝙蝠算法在含DG配电网故障定位中的应用[J]. *计算机工程与应用*, 2016, 52(22): 218-221.
- PEI W J, TAN Y H, WANG F, *et al.* Application of bat algorithm in fault location of DG distribution network [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2016, 52(22): 218-221.
- [22] 王迪, 吴鑫强, 王振浩. 基于改进遗传算法的含分布式电源配电网故障定位[J]. *东北电力大学学报*, 2016, 36(1): 1-7.
- WANG D, WU X Q, WANG Z H. Fault location of distributed generation distribution network based on improved genetic algorithm [J]. *Journal of Northeast Electric Power University*, 2016, 36(1): 1-7.
- [23] 黄知伟. 基于云粒子群算法的含DG配电网故障定位[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2016.