

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220509

基于相量校正的多源配电网故障区段定位

梁英达, 田书, 刘明杭

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 为简化含分布电源的配电网故障定位算法过程, 并提高故障定位算法的容错性, 以矩阵算法为基础提出一种改进的区段定位算法。首先, 建立描述节点区段关系的结构描述矩阵, 并通过判断是否检测到过电流及过流方向建立故障信息矩阵。然后, 利用结构描述矩阵和故障信息矩阵相乘得到故障判断矩阵, 并根据区段对应矩阵中行元素构成的不同将区段划分类型, 建立各类型区段下反映所有故障情况的故障判据。最后, 对照故障判断矩阵行元素与故障判据, 判断出发生故障的区段。针对配网中 FTU 上传信息易发生畸变的情况, 提出了基于相量校正的信息畸变校正方法, 通过故障电流与正常运行电流相位差异进行定位结果的修正, 降低故障信息畸变对定位结果的影响。对 DG 的投切状况以及配电网两相和三相短路的单重多重故障进行仿真, 结果验证了所提故障定位算法的原理简单、准确度好并具有一定的容错能力。

关键词: 配电网区段定位; 分布式电源; 矩阵算法; 信息畸变; FTU

Fault section location of multi-source distribution network based on phasor correction

LIANG Yingda, TIAN Shu, LIU Minghang

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: To simplify the process of using a distribution network fault location algorithm with distributed generation, and to improve the fault tolerance of the algorithm, an improved section location algorithm is proposed based on a matrix algorithm. First, a structural description matrix to describe the relationship between node and sections is established. To determine whether the overcurrent and its direction are detected, the fault information matrix is established. Then, the fault judgment matrix is obtained by multiplying the structural description matrix and the fault information matrix. The section is divided into different types according to the row elements in the section corresponding matrix, and the fault criterion is established to reflect all the fault conditions in each type of section. Finally, the fault section is determined by comparing the row elements of the fault judgment matrix and the fault criterion. Since FTU upload information is prone to distortion in a distribution network, this paper proposes an information distortion correction method based on phasor correction. The positioning results are corrected by the phase difference between the fault current and the normal operation current, and the influence of fault information distortion on the positioning results is reduced. The switching status of DG and the single and multiple faults of two-phase and three-phase short circuits in a distribution network are simulated. The simulation results verify that the fault location algorithm proposed in this paper is simple in principle, has good accuracy and a certain fault tolerance.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61403127).

Key words: distribution network section positioning; distributed generation; matrix algorithm; information distortion; FTU

0 引言

我国在近年提出“双碳”政策, 鼓励并支持新

能源产业的发展。越来越多的新能源设备接入电力系统, 新能源发电将会在未来占有很大比例。分布式电源的不断引入, 为配电网的运行稳定和安全带来了诸多问题, 传统配电网的运行方式无法支持新能源配电系统的工作模式。如何减少配电网的故障

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61403127)

次数,在配网发生故障后快速反应并解决故障,恢复电力系统正常运行,为用户提供安全稳定高质量的电能是面临的当务之急^[1-3]。分布式电源接入配电网后,电流的流动方向由原来的单向流动变为了双向流动,这也意味着传统配电网向主动配电网过渡。当配电网发生故障时,安装在分段开关和断路器处的馈线终端(feeder terminal unit, FTU)会将检测到的故障信息上传至系统主站,但经 FTU 上传的遥信信息易发生信息畸变,因此一般基于 FTU 的故障定位方法都需要对畸变信息校正^[4-7]。同步相量测量装置(phase measurement unit, PMU)在输电系统中已得到成功应用^[8-11],微型 PMU 具有电压电流相量同步测量、远距离通信和电源供电等功能,具有高精度、高采样率和时钟同步等优点,为配电网故障定位技术的发展提供了优良的数据基础^[12-14]。

近年来对新能源环境下的配电网故障定位研究层出不穷,文献[15]提出多分支配电网分区原则和特征网络微型 PMU 配置原则,基于多分支配电网的特征网络划分和微型 PMU 配置,研究分析特征网络中分支故障情况下的故障行波极性特点,提出了特征网络分支故障行波识别算法。文献[16]结合馈线终端(FTU)检测到的过流信息,设置了“0、1、-1”3种工作模式,表示此处是否检测到过电流及过电流反向,可直接将电流方向考虑进判断矩阵。文献[17]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,求解原理简单直接,但易受 FTU 信息畸变影响,容错性能低。文献[18]提出了含分布式电源配电网故障区段定位的线性规划模型和求解方法,适用于多个 DG 投切和联络开关开断变化,具有一定容错性,但此方法适用于单重故障情况,难以较好地解决多重故障问题。文献[19]对以配电网同步相量测量装置为基础的中压配电网精确故障定位方法的研究进行了分析和展望,指明了 PMU 在配电网中实现故障精确定位的优势和重要性。文献[20]提出了一种基于矩阵算法的改进区段定位算法,利用 FTU 上传的遥信信息和遥测信息的对比,对畸变信息进行校正,具有一定的准确性和容错性,但原理较复杂。

针对上述方法存在的问题,本文提出一种基于矩阵算法的改进区段定位算法,通过建立简单的描述矩阵 B 和故障信息矩阵 G ,并根据归纳出的合理故障判断来判断故障区段。针对 FTU 遥信信息的信息畸变问题,提出了利用同步相量测量装置检测的

电流相位信息判断过电流流向,再以此为参照校正畸变信息的方法。本文通过多个算例验证了此方法在发生信息畸变和多重故障情况下的准确性。

1 基于改进矩阵算法的故障定位方法

根据图论相关知识,作一个含分布式电源(DG)的配电网结构图,如图 1 为配电网结构图。图中将配网当中的各断路器、分段开关以及联络开关作为节点^[20]。

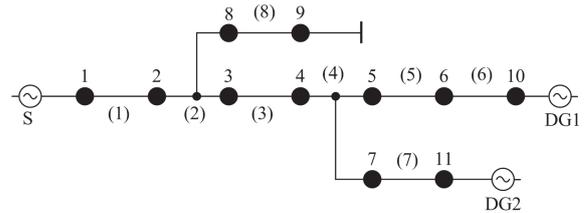


图 1 配电网结构图

Fig. 1 Distribution network structure

1.1 建立节点与区段连接关系描述矩阵

建立一个描述开关节点与区段临近关系的结构描述矩阵 B ,用以描述节点与区段是否相关联,规定由系统电源指向负载或分布电源的方向为正方向,矩阵 B 列的位置对应开关节点,行的位置对应区段,由此得到一个行列数目相同的方阵。在矩阵 B 中的元素 b_{ij} 表示第 i 个区段与第 j 个节点的临近关系,当 $b_{ij} = 1$ 时表示第 i 个区段与第 j 个节点相邻且相互连接,当 $b_{ij} = 0$ 时表示第 i 个区段与第 j 个节点不相邻。因此节点与区段关系的描述矩阵 B 的元素确定如式(1)所示。

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 个区段与第 } j \text{ 个节点相邻} \\ 0, & \text{第 } i \text{ 个区段与第 } j \text{ 个节点不相邻} \end{cases} \quad (1)$$

根据描述矩阵 B 的形成规则,可得到图 1 所示的配电网结构图的描述矩阵 B 如式(2)所示。

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由式(2)可知,不同的配电网网络结构有不同的描述矩阵 B ,当配网结构发生变化时,例如增加区段和节点时,就在矩阵 B 中增加对应的行和列来与

之对应,当然增加部分同样按照矩阵形成规则置“0”或“1”;当某区段切除后,须将该区段在矩阵 B 中对应的行元素全部置零。这就表示现实配电网的网络结构建立后,当配网部分结构发生,结构描述矩阵 B 可以灵活更新。DG 的投切情况除了可以直接观测以外,也可以通过节点上传的过流信息判断,因此这里可以先不考虑 DG 的投切。

1.2 故障信息矩阵的建立

当出现故障电流时,馈线终端(FTU)对比设置的电流越限值和所采集电流大小,判断测量值是否越限,以遥信形式将测量信息作 SOE 记录,再主动将故障信息上报到主站或子站^[20]。进而建立一个反映故障电流信息的矩阵,矩阵由配电网中的节点上传信息组成,上传信息包括该节点处是否检测到过电流,以及过电流的方向信息。规定故障过电流方向与全网正方向一致,设置“-1, 0, 1”3种模式反映配电网各节点上传的故障电流信息,依据以上所述机制构造信息矩阵 G 。故障信息矩阵 G 为对角矩阵,与描述矩阵 B 维数相同。矩阵 G 的对角元素的确定如式(3)所示。

$$g_{ii} = \begin{cases} -1, & \text{节点 } i \text{ 处检测到过流信息且} \\ & \text{电流方向与正方向相反} \\ 0, & \text{节点 } i \text{ 处未检测到过流信息} \\ 1, & \text{节点 } i \text{ 处检测到过流信息且} \\ & \text{电流方向与正方向相同} \end{cases} \quad (3)$$

假设图 1 中的配电网区段(5)发生故障,则其对应的故障信息矩阵 G 如式(4)所示。

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.3 故障判断矩阵及判据

1.3.1 故障区段分类

由式(2)可以看出,一般情况下一个区段与两个节点相连,则该区段对应的矩阵 B 中的行所包含的非零元素(即“1”)的个数为 2,如区段(1)、(3)、(5);某一行的非零元素个数为 3,表示其对应区段与 3 个节点相连,定义为“T”型区段,如区段(2)、(4);同理,行元素个数为 1,只与一个节点相连,如区

段(6)、(7)、(8)。将矩阵 B 中行元素数为 1 的区段定义为末端区段。在下文的判断矩阵中将不包括对末端区段的定位,针对末端区段定位将另立判据,该判据同样依据节点过流信息,且不独立于其他区段定位的过程。

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

1.3.2 故障判断矩阵的建立

故障判断矩阵 D 是经网络描述矩阵 B 右乘故障信息矩阵 G 得到,即 $D = B \times G$ 。由矩阵运算规律的“左行右列”可知,矩阵相乘后只改变矩阵 B 的列元素,相当于改变了某一区段一端的节点上传信息。除去末端区段,其他两种类型的区段可以通过判断矩阵 D 的行元素结构,判断出该区段是否发生故障。例如图 1 中区段(5)发生故障时,可得到与式(4)相同的故障信息矩阵,再将式(2)右乘式(4),得到故障判断矩阵 D 如式(6)所示。

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

1.3.3 建立对应矩阵 D 的故障判据

当含 DG 的配电网正常运行时,网络各节点不会产生过流信息,故障信息矩阵为零阵,当配电网中某区段发生故障时,生成对角矩阵 G 。判断故障时,需将故障判断矩阵 D 中各区段对应的行元素对比故障判据,就能判断出故障区段。该判据不仅考虑到 DG 投切情况,也适用于单段、多段区段发生故障的情况,具体判据如下(下文“[]”中的数字先后顺序与其对应的行中元素从左到右的先后顺序相同):

1) 一般两节点区段故障判据,当原行非零元素变为[1,1]时,说明该区段未发生故障;当变为[1,0]、

[1,-1]、[0,-1]时,说明该区段发生故障。

2) “T”型区段故障判据,当原非零元素变为[1,1,1]、[1,0,1]、[1,1,-1]时,说明该行对应的区段未发生故障;当变为[1,0,0]、[1,-1,-1]、[1,-1,0]、[1,0,-1]、[0,-1,-1]、[0,0,-1]、[0,-1,0]时,说明该区段发生故障。

3) 末端区段故障判据,要对末端区段进行故障检测,需要在该区段的下游增设节点,如图1所示,在上述的矩阵中用到了1~8节点的信息,9~11节点为增设节点,用于支持上游所连接末端区段的故障判据。要判断末端区段是否发生故障,需要结合该区段在判断矩阵D中的节点信息和其对应的增设节点的上传信息。若该区段两端信息组合为[1,0]、[1,-1]、[0,-1],说明该末端区段发生故障;若该区段两端信息组合为[1,1]、[-1,-1]、[0,0],说明该末端区段未发生故障。

2 DG投切对故障判据的影响

在主动配电网的故障定位过程中,DG的投切情况对定位过程的影响,最终都可以由节点上传的过流信息反映出来。对于传统的配电网故障定位而言,DG的接入将原单向流动的故障电流变为双向,因此有了上文反映电流流向的定位策略^[21-25]。

如图2所示,在含DG的配电网中,当某一下游含分布电源的区段发生短路故障时,该区段上游节点流过与配网正方向相同的过电流,下游节点流过与配网正方向反向的过电流;当该区段下游的DG切除后,发生短路故障时,该区段上游节点检测到系统电源或系统电源协同其他分布电源的过电流,下游节点检测不到过电流。这两种情况通过前文的策略都可以在故障信息矩阵中得到描述。

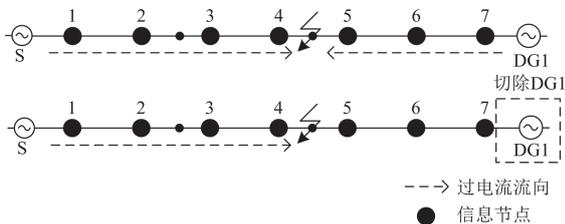


图2 DG投切对过电流流向影响

Fig. 2 Influence of DG switching on overcurrent flow direction

2.1 算例分析

在图1的网络拓扑结构中选择一条含DG的支路进行分析。

当DG1从配网中切除而DG2投入配网运行时,区段(5)发生故障后,得到的信息矩阵如式(7)所示。

$$G_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

除式(7)所含节点外,节点9、10、11节点信息为0、0、-1,可得到故障判断矩阵式(8)。

$$D_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由1.3节的判据可知,区段(5)发生故障,其他区段均未故障。由此可证明,分布式电源的投切情况可以通过设备上传的故障信息反映出来,DG的投切最终影响某一区段故障信息的组合形式,参照合理的故障判据仍可以得到正确的故障位置结果。

2.2 DG投切条件下的判据可行性分析

由2.1节算例结果可以看出,DG的投切不影响定位的最终结果。在本文所描述的算法中,DG的投切直接影响到的是节点上传的过流信息,所提策略将区段分为多种类型,对不同类型的区段故障信息分别建立判据,能够清晰且有效地判断出故障位置。对于单区段故障适用的同时也适用于多区段故障的情况,上文故障判据已考虑对应类型区段下的所有情况,并能有效定位故障区段。此定位方法可以根据区段类型建立不同容量的判据,以达到定位的目的,同样适用于含DG的复杂配电网结构,算例结论证明了这种定位方法可行性高,定位准确。

3 通过电流相角判断过电流方向

随着PMU在电网中的应用和发展,检测信息的准确性将越来越高。在含DG的配电网中,故障后电流与故障前负荷电流的相角有较大差异^[26-29]。

图3是含DG的配电网示意图,分布电源通过两段馈线接入系统。图3中 I_{pre} 为故障前负荷电流, I_{f1} 为F1点故障时C处流向故障点的电流, I_{f2} 为F2点故障时A处流向故障点的电流。在配电网正

常运行状态下, 线路一般长度不超过几千米, 负荷电流较小, 两端母线电压相角和幅值相差不大, 由于阻抗角受线路长度影响较小, 可认为输电线路各段线路阻抗角相等, 设阻抗角为 a , $0 < a < 90^\circ$, 在电力系统实际运行时, 阻抗角约为 $70^\circ \sim 80^\circ$ ^[16]。

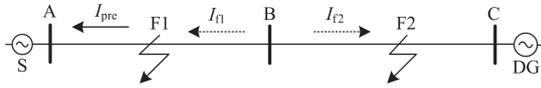


图 3 故障电流示意图

Fig. 3 Diagram of fault current

3.1 三相短路故障电流相位特征

配网发生三相短路故障时, 分析线路暂态电流相位关系, 等效线路如图 4 所示。

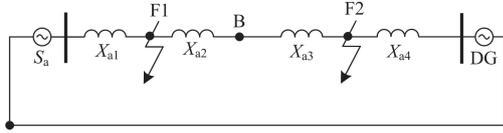


图 4 三相短路等效图

Fig. 4 Equivalent diagram of three-phase short circuit

图 4 中 B 点为检测点, F1、F2 为上下游设置的故障点位置, 故障前负载电流可以由式(9)得到。

$$\dot{I}_{pre} = \frac{\dot{V}_{sa} - \dot{V}_B}{jX_b} \quad (9)$$

式中: \dot{I}_{pre} 为故障前负载电流; \dot{V}_{sa} 、 \dot{V}_B 分别为系统电源和 B 点电压; jX_b 为系统电源与 B 间的阻抗。

当 F1 点发生短路故障时, 依据前文所规定正方向可得到短路电流 \dot{I}_{f1} 的表达式为

$$\dot{I}_{f1} = \frac{-\dot{V}_{DG}}{jX_{a2} + jX_{a3} + jX_{a4}} \quad (10)$$

式中: \dot{I}_{f1} 为 F1 点短路时 B 处测得的暂态电流; \dot{V}_{DG} 为 DG 侧电压。对比式(9)、式(10)暂态状态下等式右侧电压部分可知, $\dot{V}_{sa} - \dot{V}_B$ 的值较小, 相位超前于 \dot{V}_{sa} , 式(10)中电压向量取了负值, 其相位较式(9)电压相位落后。所以得到 \dot{I}_{f1} 落后于 \dot{I}_{pre} 。负荷电流与电压相量关系如图 5 所示。

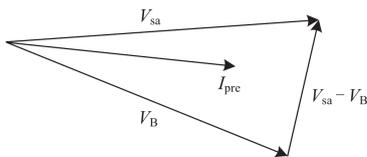


图 5 负荷电流与电压相量关系图

Fig. 5 Diagram of load current versus voltage phasor

当 F2 点发生短路故障时, 可得到短路电流 \dot{I}_{f2} 的表达式为

$$\dot{I}_{f2} = \frac{\dot{V}_{sa}}{jX_{a1} + jX_{a2} + jX_{a3}} \quad (11)$$

由上文分析得到, \dot{I}_{f2} 超前 \dot{I}_{pre} 。

切除 DG 后的三相短路等效电路如图 6 所示。

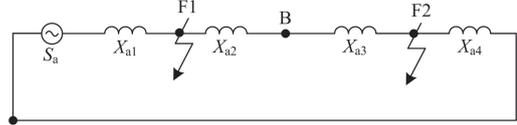


图 6 切除 DG 的三相短路等效图

Fig. 6 Equivalent diagram of three-phase short-circuit after DG resection

由图 6 可以看出, 当监测点 B 点上游 F1 发生故障时, 短路电流未流过检测点, 因此不会产生过流信息。当下游的 F2 处发生故障时, 故障电流周期分量 i_p 的相位仍然落后 I_{pre} 的相位(相关知识在刘天琪编著,《电力系统分析理论》中可查)。单相短路故障时的分析与三相短路分析方法相似, 在此不做分析。

所以经 B 处检测可得, 当 F1、F2 分别发生故障时, 故障电流 \dot{I}_{f1} 落后于故障前电流 \dot{I}_{pre} , 故障电流 \dot{I}_{f2} 超前于 \dot{I}_{pre} , 且故障后相比于故障前相角的变化量取值范围是 $(-\pi, \pi)$, 如图 7 所示。这说明在含 DG 的配电线路中, 当发生三相短路故障时, 在某一检测点检测到的上下游故障点的故障电流, 其相位角相较于故障前负载电流的相位角有超前和落后的区别。

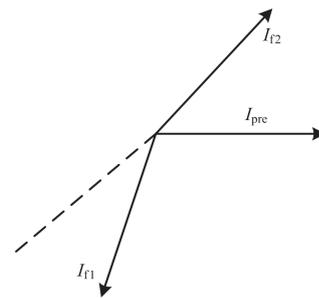


图 7 电流相位关系图

Fig. 7 Current phase diagram

3.2 两相短路故障电流相位特征

假设配电线路 a、b 两相发生短路故障, 现只对发生两相短路故障时的正序暂态电流与故障前电流作相位比对分析, 图 8 为两相短路示意图。

在发生故障前负荷电流都是 \dot{I}_{pre} , 当 F1 处故障时, 检测点检测到的故障电流正序分量为

$$\dot{I}_{+f1} = \frac{-\dot{V}_{f1}}{jX_{+f1} + jX_{-f1}} \quad (12)$$

式中： \dot{I}_{+f1} 为 F1 故障时暂态正序电流分量； \dot{V}_{f1} 为 F1 故障点电压； jX_{+f1} 、 jX_{-f1} 为正负序网络阻抗。

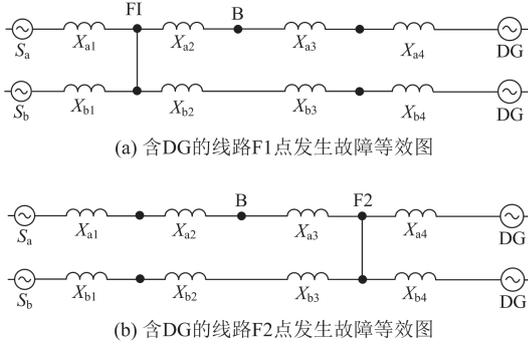


图 8 两相短路故障图

Fig. 8 Two-phase short circuit fault diagram

由于式(11)中 \dot{V}_{f1} 的相位在 A 相和 B 相两相相位之间，其相位超前 \dot{V}_{sa} ，由上文已知故障前负荷电流的相角值很小，在 \dot{V}_{f1} 取负值后 \dot{I}_{+f1} 落后于 \dot{I}_{pre} 。

当 F2 点短路时，短路电流表达式为

$$\dot{I}_{+f2} = \frac{\dot{V}_{f2}}{jX_{+f2} + jX_{-f2}} \dot{V}_{f2} \quad (13)$$

式中： \dot{I}_{+f2} 为 F2 故障时暂态正序电流分量； \dot{V}_{f2} 为 F2 故障点电压； jX_{+f2} 、 jX_{-f2} 为正负序网络阻抗。

如果以 \dot{V}_{sa} 为参考，式(13)中 \dot{V}_{f2} 超前 \dot{V}_{sa} ，所以 \dot{I}_{+f2} 超前 \dot{I}_{pre} 。

切除分布电源后发生两相短路故障的情况如图 9 所示。

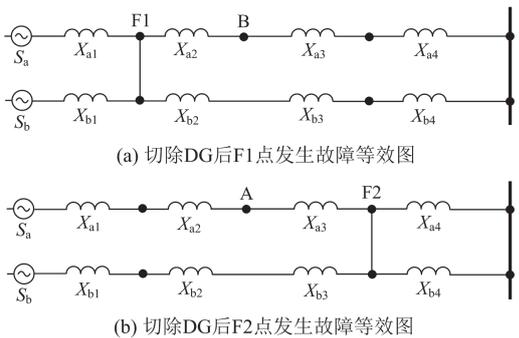


图 9 不含 DG 的两相短路故障图

Fig. 9 Two-phase short-circuit fault diagram without DG

由图 9 可知，当 F1 点故障时，B 点未检测到故障电流。当下游的 F2 发生故障时，可计算得到故障电流正序分量相角为正，落后于故障前负荷电流。

当含 DG 的两电源线路发生两相短路故障，如

图 10 所示，当 F1 故障时，故障电流正序分量 \dot{I}_{+f1} 的相角落后于故障前负荷电流 \dot{I}_{pre} ，故障电流正序分量与故障前负荷电流夹角为正；当 B 处下游的 F2 故障时，故障电流 \dot{I}_{+f2} 超前于 \dot{I}_{pre} ，且故障后相较于故障前相角的变化量取值范围是 $(-\pi, \pi)$ ，故障电流正序分量与故障前负荷电流夹角为负。

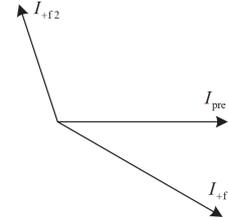


图 10 正序电流相位关系图

Fig. 10 Phase diagram of positive sequence current

两相接地短路故障与两相短路故障原理相同，其故障电流相位均与故障点电压相位相关。

当检测点上游发生故障时，故障电流正序分量的相位超前故障前电流相位；下游发生故障时，故障电流正序分量相位落后故障前电流相位。根据 PMU 分时测量的故障前后线路相量信息，记故障前负载电流相位 θ_{pre} ，发生故障后过电流相位为 θ_f ，由上文原理可得式(14)。

$$\theta_f - \theta_{pre} = \Delta\phi \quad (14)$$

式中， $\Delta\phi$ 为故障前后电流相量差值，取值范围为 $(-\pi, \pi)$ ， $\Delta\phi$ 的正负说明了两相位的超前与滞后关系。

4 基于电流相位信息的畸变信息校正

4.1 信息畸变校正原理

在以馈线终端(FTU)为基础的信息传输系统中，遥信信息发生信息畸变不可避免。外部环境以及噪声干扰、延迟等因素会使定位结果发生误判或漏判。误判和漏判方式如表 1 所示。

表 1 信息畸变形式

Table 1 Information distortion form		
正确故障信息	漏报后信息	误报后信息
1	0	-1
-1	0	1
0	-	1/-1

在图 1 配电网中，若区段(3)发生故障，同时节点 4 发生漏报，区段(3)、(4)的故障信息变为[1,0]、[0,-1,-1]，此时参照判据得到(3)、(4)同时故障，对两区段对应的节点信息修正，可得到正确结果；若节点 4 发生误报，(3)、(4)故障信息变为[1,1]、[1,-1,-1]，得到区段(4)发生故障，对该区段对应节

点 4、5、7 故障信息进行修正, 修正后结果为[1,-1]、[-1,-1,-1], 修正后结果正确。同理, 当对照故障判据检测到故障区段后, 只要对所有故障区段作故障信息修正, 即可得到正确的故障位置。

但有一种情况较为特殊, 当故障判断矩阵 D 相比网络描述矩阵 B 无变化, 而故障信息矩阵 G 并非零阵时, 说明配电网确实发生了故障。此时应对系统电源和分布电源端节点作校正。

4.2 信息畸变校正过程

本文提出的信息畸变校正方法需要在复杂配电网各节点处配置微型同步相量测量装置(PMU), 以获得信息校正过程中所需的电流相位信息。如图 11 所示, 在含 DG 的配电网各开关节点安装微型 PMU, 用于获取故障前后节点处的电流相位。

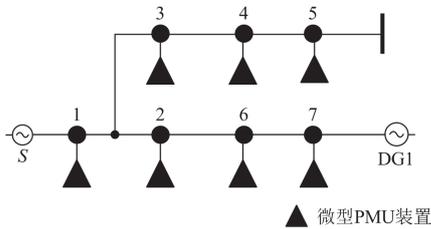


图 11 微型 PMU 配置图

Fig. 11 Micro PMU configuration diagram

畸变信息的校正过程:

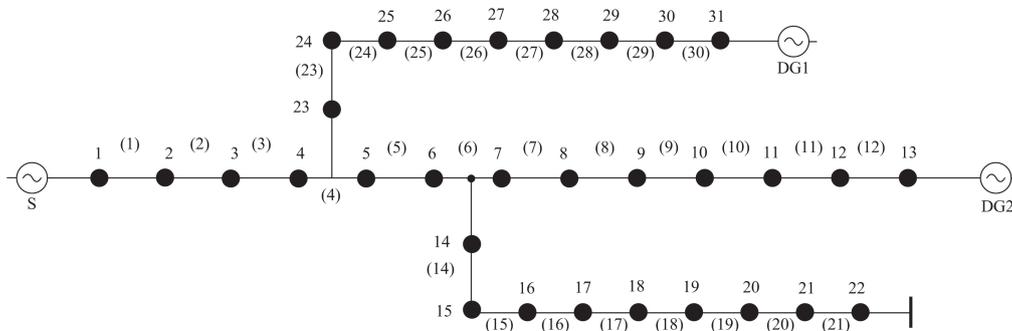


图 12 含 DG 的配电网系统图

Fig. 12 Distribution network system diagram with DG

5.1 两相短路故障的故障定位仿真

如图 12 所示, 对此系统不同位置进行单重和多重两相短路故障的测试, 证明本文所提方法的有效性, 测试结果如表 2 和表 3 所示。

如表 2 和表 3 所示, 表中相位差一栏表示故障电流正序分量的相位角与负载电流相位角的差值, 负值表示故障后相位超前故障前, 正值表示故障后相位落后于故障前。在表 3 中, 当区段(4)、(9)同时故障时, 节点 5 未检测到过电流, 因此节点 5 处故障信息为“0”。区段(4)为“T”型区段, 区段内故

- 1) 提取配网故障后的故障判断矩阵 D 。
- 2) 根据故障判据推断矩阵 D 中故障区段。
- 3) 找到与故障区段相关联的节点。
- 4) 采集关关节点处故障前后电流相位信息, 并通过第 3 节的相量分析方法对电流相位进行分析, 判断节点处的过电流流向。
- 5) 通过步骤(4)的分析, 重新将关关节点信息置“1、0、-1”。
- 6) 经过步骤(5)对故障区段关关节点的信息修正后, 重新生成故障信息矩阵 G , 再右乘结构描述矩阵 B , 得到修正后的故障判断矩阵 D 。
- 7) 最终由修正后的矩阵 D 对应故障判据得出故障区段。

总而言之, 是对故障判断矩阵得到的故障区段节点信息进行查找对比, 由同步相量检测设备测出故障节点处有关相量信息, 判断出对应节点处过电流流向, 以此为参照完成节点故障信息修正。

5 仿真分析

以图 12 所示的含 DG 配电网系统图为例, S 表示系统主电源, 考虑分布电源 DG1、DG2 的投切对配网定位的影响。通过系统发生单重、多重的三相或两相短路故障进行仿真测试, 验证本文所提方法的适用性。

表 2 两相短路单重故障测试结果

Table 2 Single fault test results of two-phase short circuit

故障区段	相位差/(°)	故障信息	测试结果
(4)	(-164.9,12.17,150.7)	[1,-1,-1]	(4)
(28)	(-10.87,161.72)	[1,-1]	(28)
(16)	(-170.05,10.02)	[1,-1]	(16)

表 3 两相短路多重故障测试结果

Table 3 Test results of two-phase short circuit multiple faults

故障区段	相位差(°)	故障信息	测试结果
(2)	(-162.87,10.2)	[1,-1]	(2)
(28)	(-11.86,161.92)	[1,-1]	(28)
(4)	(-165.09,9.88,161.72)	[1, 0,-1]	(4)
(9)	(-10.22,164.39)	[0,-1]	(9)
(2)	(-161.87,10.8)	[1,-1]	(2)
(28)	(-12.25,161.92)	[1,-1]	(28)
(16)	(-167.88,10.02)	[1,-1]	(16)
切除 DG1 后故障测试			
(2)	(-176.35,129.6)	[1,0]	(2)
(9)	(-46.98,88.49)	[0,-1]	(9)

统发生两相的单重多重短路故障时，本文所提方法能够准确定位故障位置。

5.2 三相短路故障的故障定位仿真

三相短路定位过程对照两相短路仿真的故障区段进行仿真分析。表 4 为三相短路时单重故障的测试结果，表 5 为三相短路时多重故障的测试结果。表 5 中切除 DG1 后区段(4)的下游检测相位差为负值，区段(9)的上游检测相位差为正值，在结合是否检测到过电流的结果后，输出的故障信息分别为 [1,0]、[0,-1]，根据故障判据判断后故障区段未发生误判，该结果说明了本文所提方法的准确性。

表 4 三相短路单重故障测试结果

Table 4 Single fault test results of three-phase short circuit

故障区段	相位差(°)	故障信息	测试结果
(4)	(-165.15,11.97,151.1)	[1,-1,-1]	(4)
(28)	(-10.38,162.02)	[1,-1]	(28)
(16)	(-170.69,10.87)	[1,-1]	(16)

表 5 三相短路多重故障测试结果

Table 5 Test results of three-phase short circuit multiple faults

故障区段	相位差(°)	故障信息	测试结果
(2)	(-161.98,10.4)	[1,-1]	(2)
(28)	(-170.79,162.02)	[1,-1]	(28)
(4)	(-165.15,11.9,151.1)	[1,0,-1]	(4)
(9)	(-9.47,164.39)	[0,-1]	(9)
(2)	(-161.98,11.1)	[1,-1]	(2)
(28)	(-170.71,162.02)	[1,-1]	(28)
(16)	(-168.03,11.19)	[1,-1]	(16)
切除 DG1 后故障测试			
(2)	(-161.96,-44.04)	[1,0]	(2)
(9)	(139.09,104.49)	[0,-1]	(9)

5.3 信息畸变影响下的故障定位仿真

5.1 节、5.2 节分别验证了三相短路和两相短路故障下，未发生信息畸变的定位结果，同时验证了

DG 投切对定位的影响。本节将针对图 6 所示的配电网系统发生信息畸变情况下，通过第 4 节所描述信息修正方法对系统发生短路情况进行验证，由于三相短路与两相短路验证过程差异不大，在此不作详细说明。验证结果如表 6 所示。

表 6 畸变信息校正的故障定位测试

Table 6 Fault location test for distortion information correction

故障区段	信息畸变点	畸变情况下结果	修正后结果
(4)	23	(4)、(23)	(4)
(5)	11	(5)、(10)、(11)	(5)
(2)、(5)	16	(2)、(5)、(15)、(16)	(2)、(5)
(12)	13	—	(12)
(30)	31	—	(30)
(8)、(27)	9、23	(8)、(9)、(27)、(4)、(23)	(8)、(27)

由表 6 数据可知，在测试过程中，单个或多个节点信息发生畸变，经修正后均能得到正确定位结果，表中“—”表示无结果所述特殊情况，当电源侧区段发生故障且末端节点上传信息发生畸变时，经信息修正后可以得到正确定位结果。因此，由表 1—表 6 的所有数据可以总结出，本文所提故障定位算法及畸变信息修正方法具有一定的准确性。

6 结论

本文所提以矩阵为基础的新算法只需建立结构矩阵和故障信息矩阵，不需要将 DG 的投切情况考虑进矩阵中，这样简化了建立判断矩阵的步骤，减少了矩阵计算过程中发生错误的因素，同时降低了计算时间。在故障判据中考虑了分布电源的投切情况，结合本文引用的相量分析方法，有效地定位不同故障类型下的单重多重故障，能很好地应对信息畸变问题，保证定位过程完整的同时也提高了定位结果的容错性。但当同一支路上的两区段同时发生故障，且支路下游未接入电源时，处于下游位置的故障区段在上游故障区段修复之前，不容易被定位，需要逐级检测并恢复故障区段。

参考文献

- [1] 赵凤贤, 孟镇, 李永勤, 等. 基于故障分量的主动配电网纵联保护原理[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3092-3100.
- ZHAO Fengxian, MENG Zhen, LI Yongqin, et al. Pilot protection scheme for active distribution network based on fault component[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3092-3100.
- [2] 全蕾, 詹红霞, 张勇, 等. 考虑多 DG 接入的配电网自适应电流主保护方案[J]. 智慧电力, 2021, 49(8): 63-69.

- QUAN Lei, ZHAN Hongxia, ZHANG Yong, et al. Adaptive current main protection scheme of distribution network accessed with multiple distributed generations[J]. Smart Power, 2021, 49(8): 63-69.
- [3] 李瀚霖, 靳维, 梁睿, 等. 基于故障信息自同步的有源配电网纵联保护[J]. 电力工程技术, 2021, 40(6): 121-126, 133.
- LI Hanlin, JIN Wei, LIANG Rui, et al. The pilot protection for active distribution network based on fault information self-synchronizes[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(6): 121-126, 133.
- [4] 李泽文, 刘基典, 席燕辉, 等. 基于暂态波形相关性的配电网故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 72-79.
- LI Zewen, LIU Jidian, XI Yanhui, et al. Fault location method for distribution network based on transient waveform correlation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 72-79.
- [5] 朱占春, 潘宗俊, 唐金锐, 等. 基于单端暂态能量谱相似性的配电网故障区段定位新方法[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(2): 180-191.
- ZHU Zhanchun, PAN Zongjun, TANG Jinrui, et al. A novel fault location method for power distribution systems using energy spectrum similarity analysis of single-terminal transient waveform[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 180-191.
- [6] 王晓伟, 张晓, 赵倩宇, 等. 基于暂态零模电流的配电网故障区段定位[J]. 智慧电力, 2021, 49(3): 103-110.
- WANG Xiaowei, ZHANG Xiao, ZHAO Qianyu, et al. Fault section location in distribution system based on transient zero-mode current[J]. Smart Power, 2021, 49(3): 103-110.
- [7] 施志强. 含分布式电源的配电网故障定位与恢复技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- SHI Zhiqiang. Research on fault location and recovery technology of distribution network with distributed generation[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [8] PHADKE A G, THORP J S, ADAMIAK M G. A new measurement technique for tracking voltage phasors, local system frequency and rate of change of frequency[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(5): 1026-1038.
- [9] TIWARI R, SINGH R K, CHOUDHARY N K. Coordination of dual setting overcurrent relays in microgrid with optimally determined relay characteristics for dual operating modes[J]. Protection and Control Modern Power Systems, 2022, 7(1): 64-81.
- [10] 邓祥力, 陈兴霖. 基于电流故障分量时频矩阵相角差的换流变差动保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 44-53.
- DENG Xiangli, CHEN Xinglin. Converter transformer differential protection based on the phase angle difference of the time-frequency matrix of a current fault component[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 44-53.
- [11] 常鹏, 吴泽群, 孙文仲, 等. 基于 PMU 优化部署的电网 CPS 线下攻击保护[J]. 智慧电力, 2021, 49(6): 60-66, 74.
- CHANG Peng, WU Zequn, SUN Wenzhong, et al. Offline attack protection of power grid CPS based on PMU optimized deployment[J]. Smart Power, 2021, 49(6): 60-66, 74.
- [12] 郦阳, 王宝华. 继电保护系统故障的智能定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 69-76.
- LI Yang, WANG Baohua. An intelligent fault location method for a relay protection system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 69-76.
- [13] 陈军, 隋佳闽, 赵子涵, 等. 输电线路断线故障保护逻辑分析及附加判别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 103-111.
- CHEN Jun, SUI Jiamin, ZHAO Zihan, et al. Protection logic analysis and additional judgment method of a transmission line break fault[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 103-111.
- [14] 柴林杰, 蔡亦浓, 高铭, 等. 基于加权平均插值和容积卡尔曼滤波的配电网预测辅助状态估计[J]. 电力建设, 2021, 42(8): 1-9.
- CHAI Linjie, CAI Yinong, GAO Ming, et al. A forecasting aided state estimation for distribution network based on weighted average interpolation and cubature kalman filter[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(8): 1-9.
- [15] 张浩. 基于微型 PMU 的多支配电网故障定位技术研究[D]. 淄博: 山东科技大学, 2020.
- ZHANG Hao. Research on fault location technology of multi-branch distribution network based on micro-PMU [D]. Zibo: Shandong University of Science and Technology, 2020.
- [16] 黄力. 配电网故障定位的简单矩阵算法[J]. 湖北电力, 2005, 29(5): 1-3.
- HUANG Li. Simple matrix algorithm for distribution networks fault location[J]. Hubei Electric Power, 2005, 29(5): 1-3.
- [17] 蒋秀洁, 熊信银, 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.

[18] 何瑞江, 胡志坚, 李燕, 等. 含分布式电源配电网故障区段定位的线性整数规划方法[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3684-3692.
HE Ruijiang, HU Zhijian, LI Yan, et al. Fault section location method for DG-DNs based on integer linear programming[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3684-3692.

[19] 于力, 焦在滨, 王晓鹏, 等. 基于 PMU 的中压配电网精确故障定位方法及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 30-38.
YU Li, JIAO Zaibin, WANG Xiaopeng, et al. Accurate fault location scheme and key technology of medium-voltage distribution network with synchrophasor measurement units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 30-38.

[20] 郑涛, 马龙, 李博文. 基于馈线终端装置信息畸变校正的有源配电网故障区段定位[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3926-3935.
ZHENG Tao, MA Long, LI Bowen. Fault section location of active distribution network based on feeder terminal unit information distortion correction[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3926-3935.

[21] 沈彬彬. 利用正序电流相位变化判断故障方向[J]. 科技资讯, 2010(35): 41-42, 44.
SHEN Binbin. Using positive sequence current phase change to determine the fault direction[J]. Science & Technology Information, 2010(35): 41-42, 44.

[22] 张认. 基于 FTU 的主动配电网纵联故障测距研究[D]. 无锡: 江苏师范大学, 2018.
ZHANG Ren. Research on the longitudinal fault location of active distribution network based on FTU[D]. Wuxi: Jiangsu Normal University, 2018.

[23] 范熙蕊. 含分布式电源的主动配电网故障分析与保护[D]. 长春: 长春工业大学, 2020.
FAN Xirui. Active distribution network fault analysis and protection with distributed power[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2020.

[24] 邹豪, 曾祥君, 喻锟, 等. 基于零序电压调控的故障选线选相新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 69-76.
ZOU Hao, ZENG Xiangjun, YU Kun, et al. A new method of fault line selection and phase selection based on zero sequence voltage regulation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 69-76.

[25] 孙东, 张昊, 任伟, 等. 基于正序电流故障分量相位比较的电压暂降扰动源分界[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 115-122, 137.
SUN Dong, ZHANG Hao, REN Wei, et al. Coordinated optimization of distributed power and electric vehicle charging stations considering uncertain factors[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 115-122, 137.

[26] 徐彪, 尹项根, 张哲, 等. 矩阵算法和优化算法相结合的配电网故障定位[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(5): 152-158.
XU Biao, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Fault location for distribution network based on matrix algorithm and optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 152-158.

[27] 张文轩, 李京, 王雪菲. 基于多端行波信息的配电网故障定位改进矩阵算法[J]. 水电能源科学, 2021, 39(6): 194-197, 170.
ZHANG Wenxuan, LI Jing, WANG Xuefei. Improved matrix algorithm for fault location of distribution network based on multi-terminal traveling wave information[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(6): 194-197, 170.

[28] 姚永峰, 王启哲, 王慧萍, 等. 基于邻接矩阵的低压配电网故障区段定位方法[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 91-96, 114.
YAO Yongfeng, WANG Qizhe, WANG Huiping, et al. Faulted line segment location method for low-voltage distribution network based on adjacency matrix[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 91-96, 114.

[29] 白星振, 宋昭杉, 葛磊蛟, 等. 含分布式电源的复杂配电网相间故障定位等效解耦模型[J]. 电力建设, 2022, 43(2): 45-53.
BAI Xingzhen, SONG Zhaoshan, GE Leijiao, et al. An equivalent decoupling model for fault location in complex distribution network with distributed generation[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(2): 45-53.

收稿日期: 2022-04-11; 修回日期: 2022-05-13

作者简介:

梁英达(1995—), 男, 通信作者, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电力系统故障诊断; E-mail: 1984978854@qq.com

田书(1963—), 女, 硕士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统运行与控制、继电保护; E-mail: ts8917815@163.com

刘明杭(1996—), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化调度。E-mail: 924654908@qq.com

(编辑 周金梅)