

含光伏电源配电网的改进矩阵保护算法

田果, 黄小莉

(西华大学电气信息学院, 四川 成都 610039)

摘要: 为了解决分布式电源并网给配电网保护带来的问题, 针对含光伏电源的配电网, 给出一种基于广域保护的故障区域定位矩阵算法。利用智能电子设备(IED)收集节点电流信息, 根据电流综合幅值判定故障搜索方向, 形成故障区域搜索正方向矩阵和反方向矩阵。保护算法在矩阵修订过程中对网络拓扑结构的中间节点和边缘节点不作区分, 使用同样的修订方法, 简化了算法, 对不断变化的网络拓扑结构有适应性, 并且在判据中能清楚分辨这两类节点。算例分析结果表明, 改进的矩阵保护算法对故障的区域定位是有效的。

关键词: 光伏电源; 故障区域定位; 广域保护; 搜索方向; 中间节点; 边缘节点

An improved matrix protection algorithm with distribution network including photovoltaic power

TIAN Guo, HUANG Xiao-li

(School of Electrical and Information Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: In order to solve the problems that distributed power brings to the protection of distribution network, aiming at distribution network including photovoltaic power, an algorithm based on wide-area protection matrix algorithm is presented to locate fault region. Current information of the node is collected by the IED, search direction is determined by the comprehensive amplitude of the fault current, both matrix of search direction and matrix of opposite search direction are given. In the process of revising the matrix, this algorithm will not make a distinction between intermediate node and edge nodes which belong to network topology, the same revision method makes the algorithm simple, it is adaptive for the changing network topology and clear to distinguish these two nodes through criteria. The results of case study show that the improved matrix protection algorithm for fault protection area location is effective.

Key words: photovoltaic power; regional fault location; wide area protection; search direction; intermediate node; edge node

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)17-0079-05

0 引言

光伏电源不仅清洁无公害而且是取之不尽的能源, 面对当今社会的能源危机, 光伏电源的开发利用受到越来越多的关注, 在电力系统发展分布式发电的趋势下, 光伏发电在电力系统中的应用将会逐渐增多, 当多个光伏电源接入配电网后, 配电网由单电源的简单网络变成了多电源的复杂网络。这一变化打破了传统继电保护的配合关系, 给故障定位带来了新的问题和挑战^[1-5]。因此研究光伏系统并入配电网后的故障定位对配电网保护具有重要意义。

目前的故障定位算法有行波法^[6]、人工智能算法^[7]和矩阵算法三种。行波法只适用于单一材料且支线较少的馈线, 实用性不强; 人工智能算法理论复杂且计算量大, 在故障定位方面的应用不够成熟; 以矩阵分析处理为基础的矩阵算法, 原理简单, 运算量小, 在实际的故障定位中有广泛的应用。

基于配电网自动化的故障定位矩阵算法^[8]通过馈线终端设备(FTU)检测过流方向确定故障位置。该矩阵算法不需要规格化处理, 没有乘法运算, 判断原理简单直观, 但是目前的配电网馈线分段开关处只装设A相、C相电流互感器, 不装设电压互感器, 所以过流方向难以检测。

新型的电流保护系统^[9]将广域保护应用到含分布式电源配电网的电流保护中。其中故障区域定位把电流综合幅值作为判别依据, 故障区段定位把电

基金项目: 西华大学研究生创新基金(y1jj2014083); 四川省教育部春晖计划基金(Z2011089)

流间的相位关系作为判别依据，克服了过流方向难以检测的缺点。但是在故障区域搜索部分的矩阵算法中，需要提前掌握节点信息，对中间节点和边缘节点采用不同的矩阵修订方法，修订过程比较繁琐。在电力行业迅速发展的今天，电力网络拓扑结构也不断变化，提前掌握节点信息增加了算法的复杂性。

本文基于新型的电流保护系统^[9]，对故障区域定位部分的矩阵算法进行改进。算法根据电流综合幅值判定故障搜索方向，将搜索正方向和搜索反方向的信息以矩阵形式储存，用来修订网络关联描述矩阵，从而得出故障判别矩阵。算法不必提前掌握节点信息，在搜索故障区域时对中间节点和边缘节点提出了统一的矩阵修订方法，对不断变化的网络拓扑结构有适应性，得到的判别矩阵不仅能够清楚分辨这两类节点，还可准确定位出故障区域。

1 基于广域保护的新一代电流保护方案

目前的广域保护系统分为分布式决策和集中式决策两种^[10]。分布式决策在每个分段开关处都安装一个智能电子设备（IED），IED负责安装点电气信息的采集处理，每个IED和指定的IED之间互相交换信息，并由设定的算法进行故障定位然后跳闸；集中式决策由主机汇集保护区域内所有IED的信息，IED之间无通信，主机经过分析判断定位故障区段，对相应的IED发出跳闸指令，本文的广域保护采用集中式决策结构。广域保护下含光伏电源的配电网，如图1所示。

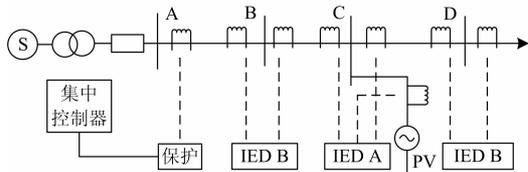


图1 广域保护下含光伏电源的配电网

Fig. 1 Wide-area protection in distribution network including photovoltaic power

图1中IED有两种类型：IED A 采样和比较三个分支的电流综合幅值，IED B 采样和比较两个分支的电流相位。IED A有中间节点和边缘节点两类^[9]。故障发生后，每个IED A以三个分支的电流综合幅值为依据确定故障所在区域，如果故障发生在PV分支，则IED对PV分支发出跳闸指令，如果PV分支无故障则与已确定的故障区域中的IED B通信，每个IED B比较两个分支的相位关系，最终实现故障区段定位，故障定位的流程如图2所示。本文提出的算法只针对故障区域定位部分。

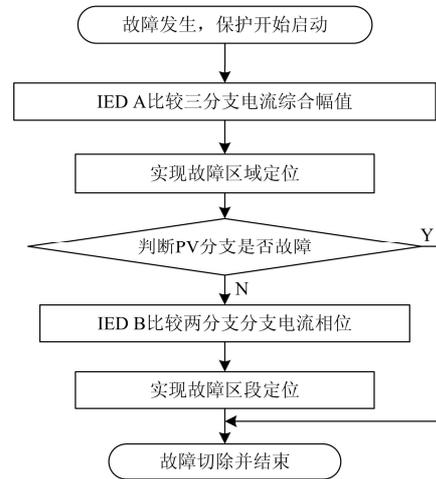


图2 故障定位的流程

Fig. 2 Process of fault location

2 故障区域搜索方向的判据

2.1 故障时三分支电流综合幅值的比较

电流综合幅值是故障电流的正序分量幅值和负序分量幅值之和，即

$$|i_{ZH}| = |i_{F1}| + |i_{F2}| \quad (1)$$

图3是一个三分支电路，图4是发生故障时的正序分量序网图。假设 S_a 系统的阻抗 $Z_{sa} = |Z_{sa}| \angle \alpha$ ， DG_1 的阻抗 $Z_{ga} = |Z_{ga}| \angle \beta$ ，故障时 DG_1 的电压 $U_1 = U_1 \angle \gamma$ ， S_a 系统侧分支正序分量为

$$i_{sa1} = \frac{U_1}{Z_{sa}} \angle (\gamma - \alpha) \quad (2)$$

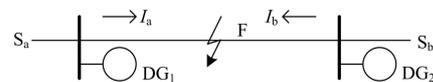


图3 三分支电路

Fig. 3 Three branch circuit

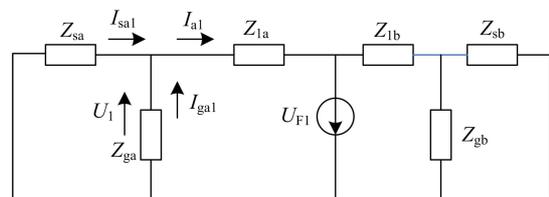


图4 正序分量序网图

Fig. 4 Positive-sequence components network

DG₁分支正序分量为

$$\dot{i}_{ga1} = \frac{U_1}{Z_{ga}} \angle(\gamma - \beta) \quad (3)$$

指向故障点方向的支路电流的正序分量为

$$\dot{i}_{a1} = \dot{i}_{sa1} + \dot{i}_{ga1} \quad (4)$$

根据余弦定理可得

$$|\dot{i}_{a1}| = \sqrt{|\dot{i}_{sa1}|^2 + |\dot{i}_{ga1}|^2 + 2|\dot{i}_{sa1}||\dot{i}_{ga1}|\cos(\alpha - \beta)} \quad (5)$$

由于发电机暂态电抗是感性的, 系统和线路的阻抗也是感性的, 所以 $|\alpha - \beta| \approx 0$, 即

$$|\dot{i}_{a1}| \approx |\dot{i}_{sa1}| + |\dot{i}_{ga1}| \quad (6)$$

$$|\dot{i}_{a1}| > |\dot{i}_{sa1}|, |\dot{i}_{a1}| > |\dot{i}_{ga1}| \quad (7)$$

指向故障点方向支路的电流正序幅值最大。

同理可得

$$|\dot{i}_{a2}| \approx |\dot{i}_{sa2}| + |\dot{i}_{ga2}| \quad (8)$$

$$|\dot{i}_{a2}| > |\dot{i}_{sa2}|, |\dot{i}_{a2}| > |\dot{i}_{ga2}| \quad (9)$$

指向故障点方向支路的电流负序幅值最大。

综上所述, 指向故障点方向支路的电流综合幅值最大。

2.2 故障区域搜索的正方向和反方向

系统发生故障时, 首先判断三支路电路电流综合幅值的大小, 幅值最大支路的电流方向就是故障区域搜索的正方向, 非最大幅值支路的电流方向并不是故障搜索反方向, 与搜索正方向相反的方向才是故障区域搜索的反方向。

3 故障区域定位算法的基本原理

3.1 网络关联描述矩阵

在保护装置中存放一个网络关联描述矩阵 \mathbf{D} , 描述每个IED的相邻关系。将馈线上的IED当作节点进行编号, 假设共有 n 个IED, 则可构造一个 $n \times n$ 方阵 \mathbf{D} , 定义如下。

若IED i 和IED j 相邻, 则网络关联描述矩阵 \mathbf{D} 中对应的元素 $D_{ij} = 1$, $D_{ji} = 1$; 若IED i 和IED j 不相邻, 则网络关联描述矩阵 \mathbf{D} 中对应的元素 $D_{ij} = 0$, $D_{ji} = 0$; 矩阵中所有的 $D_{ii} = 0$, 即网络关联描述矩阵 \mathbf{D} 的对角线上所有元素为0。

3.2 故障搜索反方向矩阵

各个IED采样和比较三个分支的电流综合幅值, 确定故障搜索方向, 与集中控制器进行通信, 将故障搜索方向以矩阵的形式存放, 故障搜索正方向为 \mathbf{Z} , 故障搜索反方向矩阵为 \mathbf{F} 。

逐个对每个IED A的三支路进行电流综合幅值比较, 对于IED i , 若经过电流综合幅值的比较, 确定故障搜索方向指向与之相邻的IED j , 则搜索正方向矩阵 \mathbf{Z} 中第 i 行的第 j 列元素 Z_{ij} 为1, 其余元素均为0。

搜索反方向矩阵 $\mathbf{F} = \mathbf{D} - \mathbf{Z}$, F_{ij} 为1表示IED i 的搜索反方向上有直接和IED i 相连的IED j , 若 F_{ji} 为1表示IED j 的搜索反方向上有直接和IED j 相连的IED i ; 若 \mathbf{F} 矩阵中第 i 行为全零行表示IED i 的搜索反方向上没有直接和IED i 相连的IED。

3.3 故障判别矩阵

当配电网中发生故障后, 每个IED A采样和比较三个分支的电流综合幅值, 确定故障搜索的方向, 然后根据搜索反方向矩阵对网络关联描述矩阵 \mathbf{D} 进行修订, 修订的结果就是故障判别矩阵 \mathbf{P} 。

对网络关联描述矩阵 \mathbf{D} 的修订:

1) 若 \mathbf{F} 第 i 行是1的元素只有一个 $F_{ij} = 1$, 即在IED i 的搜索反方向上直接和IED i 相连的只有IED i , 修订矩阵中 D_{ii} 、 D_{ij} 两个元素, 其余元素保持不变, 有 $P_{ii} = D_{ii} + 1 = 1$, $P_{ij} = D_{ij} - 1 = 0$ 。

2) 若 \mathbf{F} 第 i 行是1的元素不止一个, $F_{ij} = 1$ 、 $F_{ik} = 1$, 即在IED i 的搜索反方向上直接和IED i 相连的有IED j 、IED k , 修订矩阵中 D_{ii} 、 D_{ij} 、 D_{ik} , 其余元素保持不变, 有 $P_{ii} = D_{ii} + 1 = 1$, $P_{ij} = D_{ij} - 1 = 0$, $P_{ik} = D_{ik} - 1 = 0$ 。

3) 若 \mathbf{F} 的第 i 行是全零行, 即IED i 的搜索反方向上没有和 i 直接相连的IED, 则矩阵中第 i 行的元素不变, 即 $P_{ij} = D_{ij}$ 。

3.4 故障定位的判据

通过以下判据可定位故障搜索区域:

1) 若 $P_{ij} \& P_{ji} = 1 (i \neq j)$, 故障发生在IED i 、IED j 之间, 反之, 二者间没有故障, 它的物理意义是: IED i 和IED j 相邻, IED j 在IED i 的搜索方向上, IED i 也在IED j 的搜索方向上, 那么故障就发生在二者之间。

2) 若 $P_{ii} = 0$, 此IED所在节点为边缘节点, 故障发生在此IED所连接的PV分支上游, 它的物理意义是: IED i 的搜索反方向没有直接和IED i 相连的IED, 那么此IED所在节点是边缘节点, 且故障发生

在此IED的PV分支上游。

3) 若 $P_{ii} = 1$ 且 $P_{ij} = 0 (i \neq j)$ ，即此行内除 $P_{ii} = 1$ 外其余元素都是0，则此IED所在节点是边缘节点，故障发生在此IED的PV分支下游，它的物理意义是：在IED*i*的搜索反方向上有直接和IED*i*相连的IED*j*，而且只有一个，那么对于处理三个分支的IED来说，此IED所在节点是边缘节点，且故障发生在此IED的PV分支下游。

4 算例分析

图5是广域保护下含多个光伏电源的典型配电网，各节点的编号代表各IEDA的编号。

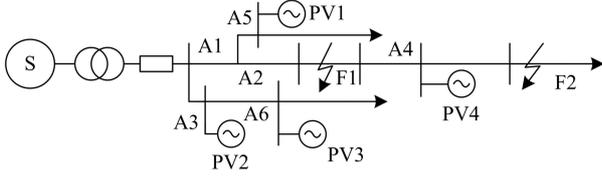


图5 含多PV的配电网

Fig. 5 Distribution network with multiple photovoltaic power

根据各节点连接情况形成网络关联描述矩阵 D 为

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

4.1 故障发生在中间节点之间

在PV₄上游F₁处发生故障，IED比较三支路的电流综合幅值，故障搜索正方向矩阵为

$$Z = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

故障搜索反方向矩阵为

$$F = D - Z = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

对网络关联描述矩阵 D 进行修订，得到故障判别矩阵为

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

在 P 中： $P_{12} \& P_{21} = 0$ ，故障未发生在IED 1、IED 2之间， $P_{24} \& P_{42} = 1$ ，故障发生在IED 2、IED 4之间， $P_{31} \& P_{13} = 0$ ，故障未发生在IED 1、IED 3之间， $P_{44} = 0$ ， $P_{55} = 0$ ， $P_{66} = 0$ ，IED 4、5、6所在节点是边缘节点，故障发生在IED4、5、6的PV分支上游，综上所述故障发生在IED 2、IED 4之间。

4.2 故障发生在边缘节点下游

在PV₄下游F₂处发生故障，故障搜索正方向矩阵为

$$Z = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

故障搜索反方向矩阵为

$$F = D - Z = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

得到故障判别矩阵为

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

在判别矩阵 P 中： $P_{12} \& P_{21} = 0$ ，故障未发生在IED 1、IED 2之间， $P_{24} \& P_{42} = 0$ ，故障未发生在IED 2、IED 4之间， $P_{31} \& P_{13} = 0$ ，故障未发生在IED 1、IED 3之间， $P_{44} = 1$ 且其余元素为0，则IED 4所

在节点是边缘节点,故障发生在IED 4的PV分支下游, $P_{55} = 0$, $P_{66} = 0$, IED 5、6所在节点均为边缘节点,故障发生在IED 5、6的PV分支上游,综上所述故障发生在IED 4的PV分支下游。

5 结语

本文基于分布式条件下的新型电流保护方案,对故障区域定位部分提出了改进算法,该算法通过IED采集处理电流信息并确定搜索方向,形成故障搜索正方向矩阵和反方向矩阵,根据搜索反方向矩阵修订网络关联描述矩阵。算法对中间节点和边缘节点不作区分,使用同样的修订方法,简化了算法,对不断变化的网络拓扑结构有适应性,并且在判据中能清楚分辨这两类节点,无矩阵相乘运算,运算量小。算例证明该算法适用于含光伏电源的配电网故障区域定位。

参考文献

- [1] 张建华, 黄伟. 微电网运行控制与保护技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
ZHANG Jian-hua, HUANG Wei. Micro-grid operation control and protection technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [2] 杨国华, 姚琪. 光伏电源影响配电网线路保护的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 75-79.
YANG Guo-hua, YAO Qi. Simulation study of the influence of photovoltaic power on line protection of distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 75-79.
- [3] 杨德州, 王利平, 张军. 大型分布式电源模型化研究及其并网特性分析(一)光伏电站专题[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 104-110.
YANG De-zhou, WANG Li-ping, ZHANG Jun. Modelling of the large-scale distributed power supply and the analysis of corresponding grid-connected characteristics (1) photovoltaic plant thematic[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 104-110.
- [4] 刘蓓, 汪枫, 陈春. 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. Harmony search algorithm for solving fault location in distribution networks with DG[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 280-284.
- [5] 滕达, 傅晓晴. 我国光伏产业现状综述[J]. 电源技术, 2012, 36(8): 1242-1244.
TENG Da, FU Xiao-qian. Review on Chinese photovoltaic industry[J]. Power Technology, 2012, 36(8): 1242-1244.
- [6] 朱永利, 范新桥, 尹金良. 基于三点电流测量的输电线路行波故障定位新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 260-268.
ZHU Yong-li, FAN Xin-qiao, YIN Jin-liang. A new fault location scheme for transmission lines based on traveling waves of three measurements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 260-268.
- [7] 汪旻, 尹项根, 张哲. 基于遗传信息融合技术的广域继电保护[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 174-179.
WANG Yang, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe. Wide area protection based on genetic information fusion technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 174-179.
- [8] 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 Mei, YANG Hong-geng. An improved general matrix algorithm for fault locating in distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 64-68.
- [9] 林霞, 陆于平, 王联合. 分布式发电条件下的新型电流保护方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 50-56.
LIN Xia, LU Yu-ping, WANG Lian-he. A new current protection of distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 50-56.
- [10] 丛伟, 潘贞存, 赵建国. 基于纵联比较原理的广域继电保护算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 8-14.
CONG Wei, PAN Zhen-cun, ZHAO Jian-guo. A wide area relaying protection algorithm based on longitudinal comparison principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 8-14.

收稿日期: 2013-12-02; 修回日期: 2014-04-10

作者简介:

田果(1992-), 女, 硕士研究生, 主要从事含光伏电源的配电网保护的研究。E-mail: tianguoxihua@163.com