

基于负序电压的配电网断线故障定位方法

徐海栋¹, 王浩宁¹, 何小平¹, 李毅¹, 肖扬², 何文权³

¹国网重庆市电力公司武隆供电分公司, 重庆

²重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆

³重庆峰极智能科技有限公司, 重庆

收稿日期: 2022年1月2日; 录用日期: 2022年1月15日; 发布日期: 2022年2月7日

摘要

随着配电网规模的不断扩大, 架空线路绝缘化率的提高, 断线故障发生率也随之提高。由于断线故障导致三相电压、电流严重不平衡, 危害电气设备和人身安全, 影响电力系统供电可靠性。因此, 有必要对配电网断线故障定位方法进行研究, 在断线故障发生后尽快排查和隔离, 减小其造成的危害。本文考虑了分布式电源的影响, 对配电网断线故障下分布式电源的负序电压特征进行了分析, 在此基础上, 根据不同故障位置下分布式电源序电压的差异, 提出了一种基于负序电压的配电网断线故障定位方法。仿真结果表明, 所提方法能够准确定位断线故障区段, 具有较高的可靠性。

关键词

断线故障, 配电网, 分布式电源, 负序电压

A Method for Locating Disconnected Faults in Distribution Networks Based on Negative Sequence Voltage

Haidong Xu¹, Haoning Wang¹, Xiaoping He¹, Yi Li¹, Yang Xiao², Wenquan He³

¹State Grid Chongqing Electric Power Co., Wulong Power Supply Branch Company, Chongqing

²State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing

³Chongqing Fengji Intelligent Technology Research Institute Co., Ltd., Chongqing

文章引用: 徐海栋, 王浩宁, 何小平, 李毅, 肖扬, 何文权. 基于负序电压的配电网断线故障定位方法[J]. 智能电网, 2022, 12(1): 1-8. DOI: 10.12677/sg.2022.121001

Abstract

With the continuous expansion of the scale of the distribution network, the insulation rate of overhead lines has increased, and the incidence of disconnection faults has also increased. Due to the disconnection fault, the three-phase voltage and current are seriously unbalanced, which endangers electrical equipment and personal safety, and affects the reliability of the power supply of the power system. Therefore, it is necessary to conduct research on the method of locating disconnection faults in the distribution network, and to investigate and isolate them as soon as possible after the disconnection fault occurs, so as to reduce the harm. This paper considers the influence of distributed generations, and analyzes the negative sequence voltage characteristics of distributed generations under the disconnection fault of the distribution network. On this basis, according to the difference in sequence voltage of distributed generations under different fault locations, a method for locating disconnection faults in distribution network based on negative sequence voltage is proposed. The simulation results show that the proposed method can accurately locate the disconnection fault section and has high reliability.

Keywords

Disconnection Fault, Distribution Network, Distributed Generation, Negative Sequence Voltage

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

受“重发轻配”的影响，相较于输电网，配电网在自动化水平、继电保护等方面都相对落后。随着近年来城市化进程的加快，用电需求量的加大，配电网规模也在不断扩大[1] [2]。同时，为了加快实现“双碳”目标，风电、光伏等可再生能源的开发利用也成为了一项重要举措[3] [4]。越来越多的分布式电源接入配电网，使得配电网在结构上发生根本变化，对配电网故障分析和继电保护也产生了较大的影响[5] [6]。

按照故障性质的不同，配电网故障类型可分为短路故障和断线故障两种。其中，短路故障主要包括接地故障和相间短路故障，发生率高，通常通过过电流保护和接地故障监测装置等方法切除[7] [8]。而断线故障发生率相对较低，发生原因主要包括雷击、机械外力破坏、电气作用等[9]，由于断线故障对保护的快速性要求不高，通常通过电压异常和人工巡线进行识别排查[10]。目前，短路故障的研究成果已经相对丰富，而断线故障研究还较少。文献[11]-[16]分析了典型中性点接地方式下配电网的断线故障电压、电流特征。文献[17]提出了一种利用负序电流进行选线的方法。文献[18]提出了一种电流和电压组合特征的选线方法。文献[19]根据故障区段与非故障区段的负序电压和负序电流相位关系的差异实现断线故障的定位。但上述方法都没有考虑分布式电源的影响。文献[20]用功率方向实现断线故障选线，但需要采集多点的电压、电流相量进行计算。综上所述现有方法都具有一定的局限性，有各自的适用范围。特别是对于含分布式电源配电网的断线故障研究还存在较多不足。因此，随着用户对供电可靠性和用电质量的要求不断提高，有必要考虑分布式电源的接入，对配电网断线故障快速识别、定位方法进行研究，完善配电网

网保护机制, 保证配电网安全稳定可靠运行。

据此, 本文提出了一种基于负序电压的配电网断线故障定位方法。首先将分布式电源等效为受控源, 建立了配电网断线故障等效复合序网, 进而分析了配电网断线故障下分布式电源机端负序电压的特征。在此基础上, 根据分布式电源负序电压的变化特征, 提出了一种基于负序电压的配电网断线故障定位方法。该方法以断线故障下分布式电源可能出现的最小负序电压作为故障定位启动值, 以分布式电源下游发生断线故障时可能出现的最大负序电压作为故障定位阈值, 当所监测到的负序电压大于启动值且大于阈值时, 结合配电网中各分布式电源的接入位置情况, 确定断线故障区段。仿真结果表明, 该方法能够准确定位断线故障区段, 且整定计算简单, 具有较高的可靠性。所提方法与现有方法相比, 利用分布式电源机端电压定位断线故障, 无需在馈线上加装其他监测设备, 具有较高的可行性。

2. 配电网断线故障特征

当配电网发生断线故障时, 如图 1 所示。其中, DG 表示分布式电源, f 表示断线故障点, R_d 表示中性点接地电阻。由于风电、光伏等分布式电源输出特性受控制策略影响, 在断线故障下, 可以等效为一个受正序电压控制的电流源[21], 其模型可表示为:

$$i_{D+,f} = \frac{S_D}{u_{D+,f}} \quad (1)$$

式中, $i_{D+,f}$ 为分布式电源断线故障后输出正序电流; $u_{D+,f}$ 为分布式电源机端正序电压; S_D 为分布式电源功率。

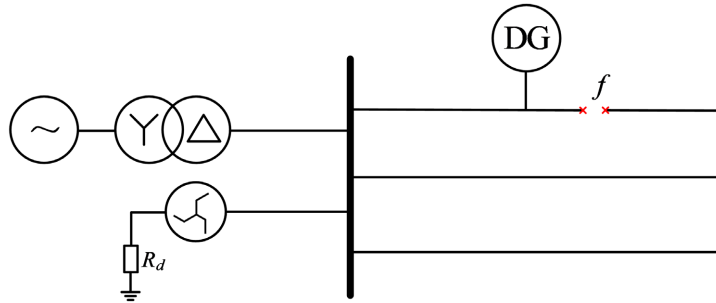


Figure 1. Schematic diagram of disconnection fault of distribution network
图 1. 配电网断线故障示意图

当分布式电源至馈线末端之间发生故障时, 由于断线故障将使得故障点故障相电流为 0, 非故障相电压连续, 假设故障相为 A 相, 其边界条件为:

$$\begin{cases} i'_A = 0 \\ \Delta \dot{U}'_B = \Delta \dot{U}'_C \end{cases} \quad (2)$$

式中, i'_A 为断口处 A 相电流, $\Delta \dot{U}'_B$ 、 $\Delta \dot{U}'_C$ 为断口两端 B、C 相电压。

由对称分量法可得边界条件为:

$$\begin{cases} i'_{A1} + i'_{A2} + i'_{A0} = 0 \\ \Delta \dot{U}'_{A1} = \Delta \dot{U}'_{A2} = \Delta \dot{U}'_{A0} \end{cases} \quad (3)$$

式中, i'_{A1} 、 i'_{A2} 、 i'_{A0} 为断口处正、负、零序电流; $\Delta \dot{U}'_{A1}$ 、 $\Delta \dot{U}'_{A2}$ 、 $\Delta \dot{U}'_{A0}$ 为断口两端电压差。

根据断线点的边界条件以及配电网结构, 可以建立对应的等值复合序网图, 如图 2 所示,

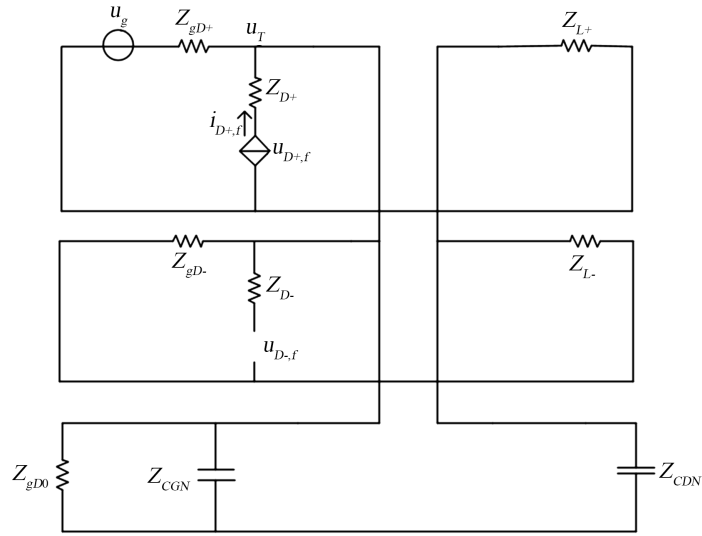


Figure 2. Equivalent composite sequence network of disconnection fault in distribution network with distributed generation

图 2. 含分布式电源配电网断线故障的等值复合序网图

根据图 2 所示的等值电路，可以列出对应的基尔霍夫方程：

$$\begin{cases} u_g = u_T + \left(\frac{u_g - u_T}{Z_{gD+}} + i_{D+,f} \right) \left[Z_{L+} + (Z_{L-} + Z_{gD-}) \parallel (Z_{gD0} \parallel Z_{CGN} + Z_{CDN}) \right] \\ u_{D+,f} = i_{D+,f} Z_{D+} + \left(\frac{u_g - u_T}{Z_{gD+}} + i_{D+,f} \right) \left[Z_{L+} + (Z_{L-} + Z_{gD-}) \parallel (Z_{gD0} \parallel Z_{CGN} + Z_{CDN}) \right] \\ u_T = u_{D+,f} - i_{D+,f} Z_{D+} \\ u_{D-,f} = \frac{u_T (Z_{L-} + Z_{gD-}) \parallel (Z_{gD0} \parallel Z_{CGN} + Z_{CDN})}{(Z_{L-} + Z_{gD-}) \parallel (Z_{gD0} \parallel Z_{CGN} + Z_{CDN}) + Z_{L+}} \cdot \frac{Z_{gD-}}{Z_{gD-} + Z_{L-}} \end{cases} \quad (4)$$

式中， u_g 为系统电压， Z_{gD+} 、 Z_{gD-} 分别为系统等效阻抗与母线和分布式电源并网点之间线路正、负序阻抗之和； Z_{D+} 、 Z_{D-} 分别为分布式电源升压变电抗与线路正、负序阻抗之和； Z_{L+} 、 Z_{L-} 分别为负荷正、负序阻抗； Z_{gD0} 为系统等值零序阻抗， Z_{CGN} 为断线点至母线间的等值容抗， Z_{CDN} 为断线点至馈线末端的等值容抗。

对式(4)进行求解，可以得到单相断线故障下，分布式电源机端负序电压：

$$u_{D-,f} = \frac{u_T}{(Z_{gD-} + Z_{L-}) \parallel (Z_{gD0} \parallel Z_{CGN} + Z_{CDN}) + Z_{L+}} \cdot \frac{(Z_{gD0} \parallel Z_{CGN} + Z_{CDN}) Z_{gD-}}{(Z_{gD0} \parallel Z_{CGN} + Z_{CDN}) + Z_{gD-} + Z_{L-}} \quad (5)$$

式中， u_T 为分布式电源并网点电压。

$$u_T = \frac{2(Z_{gD+} + Z_{D+}) S_D}{-u_g + \sqrt{u_g^2 + 4(Z_{gD+} + Z_{D+}) S_D}} - \frac{-u_g + \sqrt{u_g^2 + 4(Z_{gD+} + Z_{D+}) S_D}}{2(Z_{gD+} + Z_{D+})} Z_{D+} \quad (6)$$

根据式(5)和式(6)可以看出，断线点离馈线末端越远，分布式电源机端负序电压越大。并且，当故障发生在分布式电源上游时，由于母线与分布式电源之间存在断线点，分布式电源接入点电压难以依靠母线电压进行有效支撑，此时接入点电压三相不对称度远大于下游断线时的不对称度，因此负序电压也会

远大于下游断线时的负序电压。

3. 基于负序电压的配电网断线故障定位方法

3.1. 定位原理

由上述分析，如果故障点出现在线路末端，并且此时馈线上仅有切入功率最小的分布式电源按其最小功率运行，则分布式电源机端负序电压为发生单相断线故障后的最小值，因此可以将该负序电压作为馈线 i 单相断线故障定位的启动值 $u_{i,st}$ 。化简式(4)可知：

$$u_{i,st} = \frac{H_i}{Z_{gD-} + Z_{L-} + Z_{L+}} \cdot Z_{gD-} \quad (7)$$

其中， m 为切入功率最小的分布式电源。 H_i 为：

$$H_i = \frac{2(Z_{gD} + Z_{i,m})S_{i,m}^{\min}}{-u_g + \sqrt{u_g^2 + 4(Z_{gD} + Z_{i,m})S_{i,m}^{\min}}} - \frac{-u_g + \sqrt{u_g^2 + 4(Z_{gD} + Z_{i,m})S_{i,m}^{\min}}}{2(Z_{gD} + Z_{i,m})} Z_{i,m} \quad (8)$$

式中， $Z_{i,m}$ 为第 m 个分布式电源的升压变阻抗； $S_{i,m}^{\min}$ 为第 m 个分布式电源的最小功率。

如果故障点出现在分布式电源并网点，此时分布式电源机端负序电压为该分布式电源至馈线末端发生单相断线故障后负序电压的最大值，可以将该负序电压作为馈线 i 上第 j 个分布式电源单相断线故障的定位阈值 $U_{ij,op}^t$ ：

$$U_{ij,op}^t = \frac{M_{ij}}{(Z_{gD-} + Z_{L-}) // (Z_{gD0} // Z_{CGN} + Z_{CDN}) + Z_{L+}} \cdot \frac{(Z_{gD0} // Z_{CGN} + Z_{CDN})Z_{gD-}}{(Z_{gD0} // Z_{CGN} + Z_{CDN}) + Z_{gD-} + Z_{L-}} \quad (9)$$

式中， M_{ij} 为：

$$M_{ij} = \frac{2(Z_{gD} + Z_{i,j})S_{ij}^t}{-u_g + \sqrt{u_g^2 + 4(Z_{gD} + Z_{i,j})S_{ij}^t}} - \frac{-u_g + \sqrt{u_g^2 + 4(Z_{gD} + Z_{i,j})S_{ij}^t}}{2(Z_{gD} + Z_{i,j})} Z_{i,j} \quad (10)$$

式中， $Z_{i,j}$ 为为馈线 i 上第 j 个分布式电源的升压变阻抗。

3.2. 定位方法

基于分布式电源机端负序电压的配电网单相断线故障定位方法如图 3 所示，具体定位流程如下。

首先，采集 t 时刻第 i 条馈线上各分布式电源的功率 S_{ij}^t 和机端负序电压的幅值 U_{ij-}^t ，采集 t 时刻第 i 条馈线总的负荷正、负序阻抗 $Z_{i,L+}^t$ 、 $Z_{i,L-}^t$ ，馈线末端的负荷正、负序阻抗 $Z_{i,E+}^t$ 、 $Z_{i,E-}^t$ 以及每个分布式电源至馈线末端总的负荷正、负序阻抗 $Z_{ij,D+}^t$ 、 $Z_{ij,D-}^t$ ，其中 $i=1,2,\dots,m$ ， $j=1,2,\dots,n_i$ ， m 为馈线数量， n_i 为第 i 条馈线上的分布式电源数量。

从第 i 条馈线末端开始，依次比较各分布式电源机端负序电压 U_{ij-}^t 与第 i 条馈线在 t 时刻的断线定位启动阈值 $U_{i,st}^t$ 的大小，若第 k 个分布式电源在 t 时刻的机端电压负序电压幅值 $U_{ik-}^t > U_{i,st}^t$ ，可以判断此时配电网出现了单相断线故障。

此时，分别比较第 1 个至第 k 分布式电源机端负序电压幅值与第 1 个至第 k 分布式电源的断线故障定位阈值的大小，若第 p 个分布式电源的机端负序电压幅值 U_{ip-}^t 大于等于第 p 个分布式电源的断线故障定位阈值 $U_{ip,op}^t$ ，即 $U_{ip-}^t > U_{ip,op}^t$ 时，若 $p \geq 2$ ，则判定第 p 个分布式电源至第 $p-1$ 个分布式电源之间线路发生单相断线故障；若 $p=1$ ，则判定母线至第 1 个分布式电源之间线路发生单相断线故障。

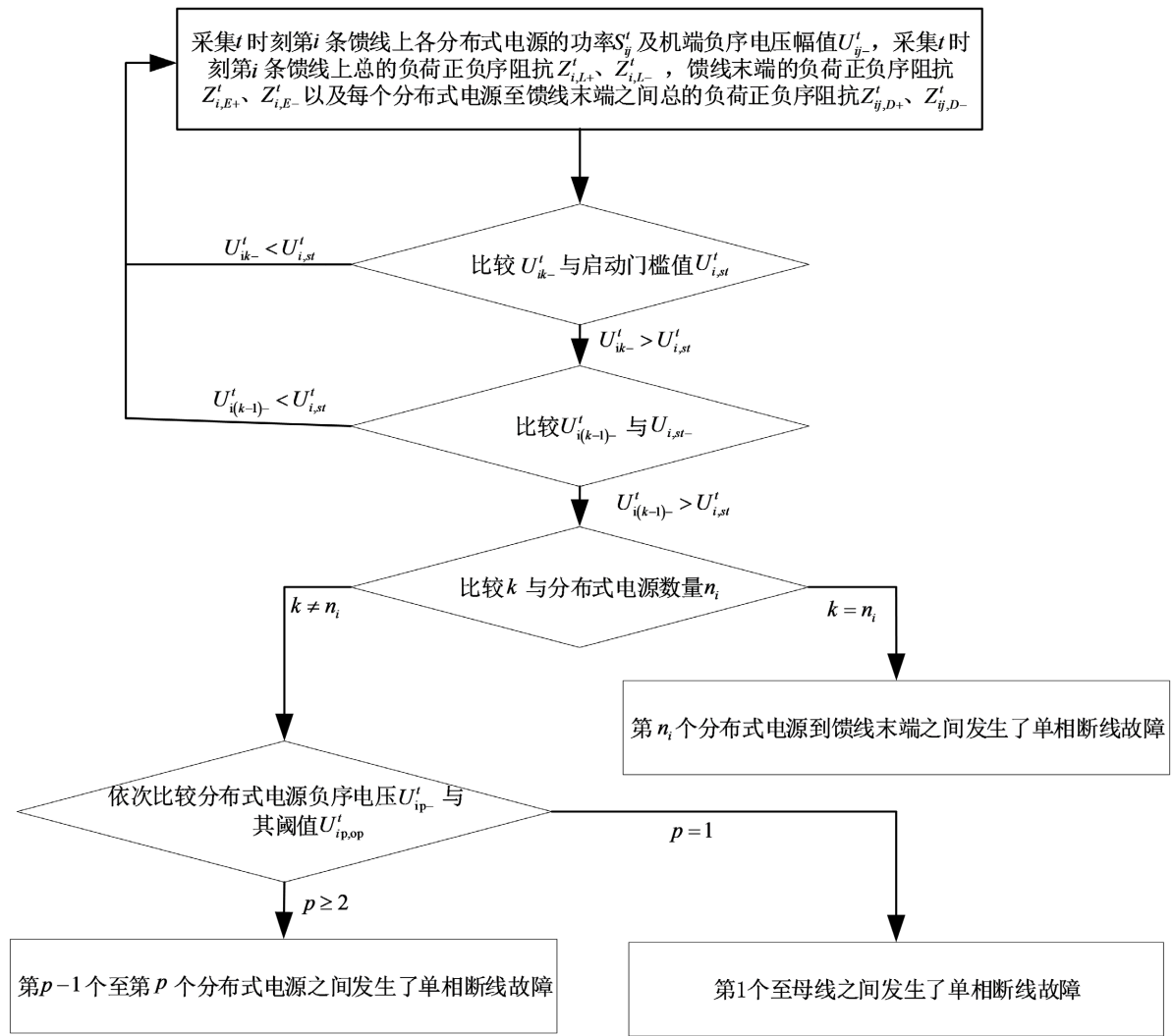


Figure 3. A method for locating disconnected faults in distribution networks based on negative sequence voltage
 图3. 基于负序电压的配电网断线故障定位方法

4. 仿真与分析

本文利用 Matlab/Simulink 搭建如图 1 所示的 10 kV 典型结构配电网模型对所提方法进行验证分析。其中，中性点小电阻 R_d 为 10Ω 。配电网共设有 5 条馈线，正序参数分别为 $r_1 = 0.031 \Omega/\text{km}$ ， $l_1 = 0.096 \text{ mH}/\text{km}$ ， $c_1 = 0.338 \mu\text{F}/\text{km}$ ；零序参数分别为 $r_0 = 0.234 \Omega/\text{km}$ ， $l_0 = 0.355 \text{ mH}/\text{km}$ ， $c_0 = 0.265 \mu\text{F}/\text{km}$ 。馈线 1 长度为 10 km，馈线末端接有负荷 5 MW，分布式电源 DG1 和分布式电源 DG2 分别接于馈线 1 的 3 km 处和 8 km 处，功率分别为 0.5 MW、1 MW。分布式电源升压变阻抗均为 1Ω 。

设在 $t = 0.6 \text{ s}$ 时馈线 1 于 5 km 处发生断线故障，根据式(7)和式(8)可计算得断线故障定位的启动值 $u_{i,st}$ 为 158 V。根据式(9)和式(10)，可计算得分布式电源 DG1 的断线故障定位阈值 $U_{11,op}$ 为 162 V，分布式电源 DG2 的断线故障定位阈值 $U_{11,op}$ 为 180 V。仿真结果如图 4 与图 5 所示。从图中可以看出，正常运行情况下，分布式电源 DG1、DG2 的机端负序电压几乎为 0。当馈线发生单相断线故障时，分布式电源 DG1、DG2 的机端负序电压均显著上升。故障稳态下分布式电源 DG1 机端负序电压为 16 V，分布式电源 DG1 机端负序电压为 2346.5 V。结合本文所提方法可知，存在分布式电源负序电压大于启动值 158 V，即判断

断线故障发生。由于 DG1 负序电压小于其断线故障定位阈值 162 V，因此，故障点位于 DG1 下游。由于 DG2 负序电压大于其断线故障定位阈值 180 V，因此，故障点位于 DG2 上游。由此可确定断线故障区段位于馈线 1 的第 1 个分布式电源与第 2 个分布式电源之间。从仿真结果可以看出，本文所提方法能够准确定位断线故障区段，具有较高的可靠性。

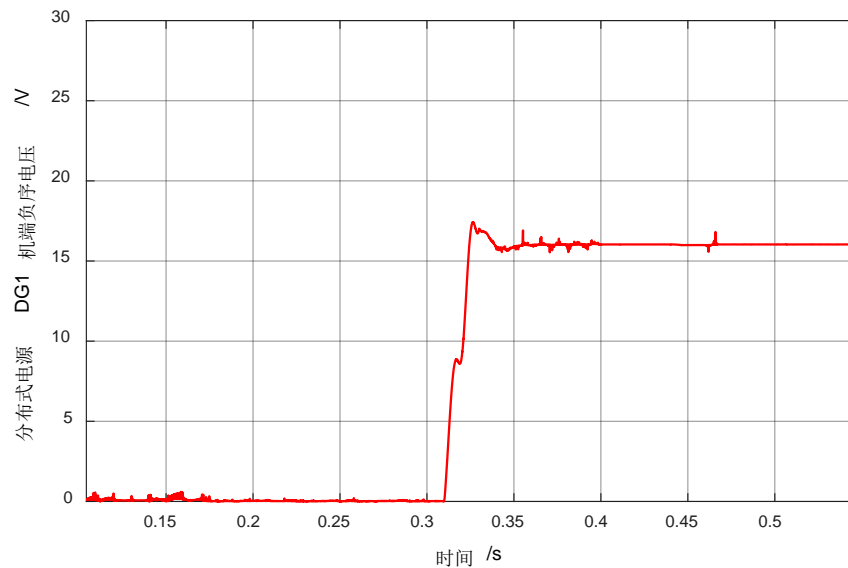


Figure 4. DG1 terminal negative sequence voltage

图 4. 分布式电源 DG1 机端负序电压

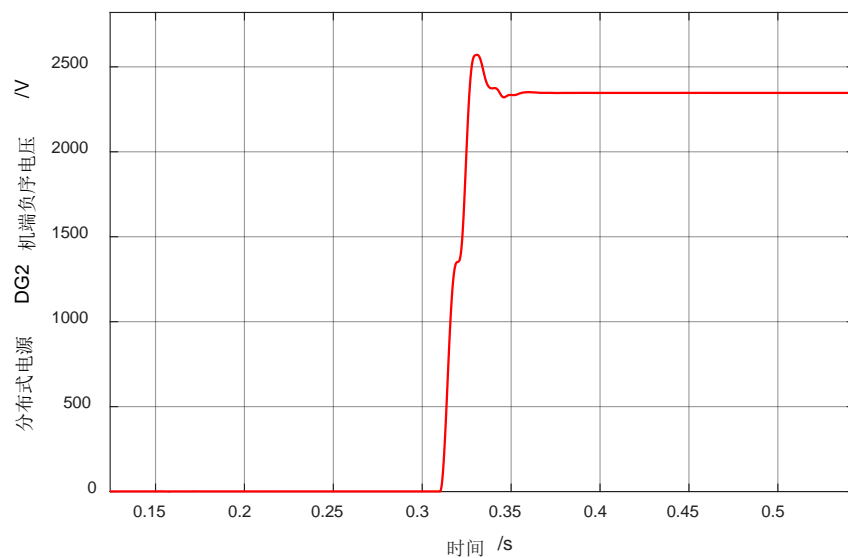


Figure 5. DG2 terminal negative sequence voltage

图 5. 分布式电源 DG2 机端负序电压

5. 结论

在双碳目标和分布式电源大规模接入的配电网发展背景之下，本文以含分布式电源配电网为研究对象，分析了含分布式电源配电网断线故障的特征，重点解析分析了分布式电源机端负序电压的表达式。

通过本文研究分析表明,断线故障点前后分布式电源的负序电压存在显著差异,该特征能够准确反映故障点位置。因此,根据断线故障后负序电压的变化规律,提出了一种基于分布式电源机端负序电压的断线故障定位方法。该方法通过比较实际分布式电源机端负序电压与所计算的断线故障定位启动值和阈值的大小,来实现故障定位。仿真结果表明,所提方法能够准确定位断线故障区段,且整定计算简单,需要的监测量单一,具有较高的可靠性和可行性。

参考文献

- [1] 贾巍,雷才嘉,葛磊蛟,高慧.城市配电网的国内外发展综述及技术展望[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(1):158-168+175. <https://doi.org/10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2020.01.026>
- [2] 肖勇,陆文升,李云涛,钟玉廷,亓彦珣,彭家颖.城市配电网发展形态指标体系及其评估方法研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(1):62-71. <https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.200803>
- [3] 杜洋,杨心刚,郭灵瑜,王玉洁,周静涵,谭忠富.双碳背景下配电网绿色发展与安全高效耦合评价[J].科学技术与工程,2021,21(30):12973-12981.
- [4] 韩肖清,李廷钧,张东霞,周鑫.双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J].高电压技术,2021,47(9):3036-3046. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20210809>
- [5] 王鲍雅琼,陈皓.含分布式电源的配电网保护改进方案综述[J].电力系统保护与控制,2017,45(12):146-154.
- [6] 伦惠勤,王佳,胡扬,赵崇,胡剑锋.智能配电网研究现状及发展展望[J].电测与仪表,2015,52(8):10-15.
- [7] 刘小春,王巍璋,姚文昊,周成,王淳,江涛.中压配电网故障处理模式配置研究综述[J].电测与仪表,2021,58(10):49-58. <https://doi.org/10.19753/j.issn1001-1390.2021.10.008>
- [8] 全蕾,詹红霞,张勇,肖竣文,彭平.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.
- [9] 康党兴,李萌.10 kV配电网电压异常现象及对策[J].农村电工,2020,28(12):38-39. <https://doi.org/10.16642/j.cnki.ncdg.2020.12.043>
- [10] 孟祥忠,陈文聪,李金宝.中压配电网单相断线故障检测及定位的研究[J].电子测量技术,2020,43(6):32-37. <https://doi.org/10.19651/j.cnki.emt.1903531>
- [11] 薛永端,陈梦琦,曹丽丽,冯光,徐丙垠.不接地系统单相断线故障电压分析[J].中国电机工程学报,2021,41(4):1322-1333+1539. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.191665>
- [12] 王成楷,洪志章.基于线电压判据的配电网单相断线故障定位方法[J].电气技术,2017(5):51-57.
- [13] 禹红,郑泷康,曾荷清,李付亮.小水电发电系统的非接地电网单相断线故障分析及诊断方法[J].湖南电力,2020,40(2):1-7.
- [14] 刘健,张志华,王毅钊.基于电压信息的配电网断线故障定位[J].电力系统自动化,2020,44(21):123-131.
- [15] 盛方正,陈子聪,陈晓炯.中性点不接地系统单相断线故障分析及对策研究[J].供用电,2011,28(3):43-45.
- [16] 盛方正,陈福良,范秉翰,王文成.小电阻接地系统单相断线故障分析及对策研究[J].浙江电力,2011,30(7):6-9+25. <https://doi.org/10.19585/j.zjdl.2011.07.002>
- [17] 朱玲玲,李长凯,张华中,张忠.配电网单相断线故障负序电流分析及选线[J].电力系统保护与控制,2009,37(9):35-38+43.
- [18] 康奇豹,丛伟,盛亚如,王玥婷.配电线路单相断线故障保护方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(8):127-136.
- [19] 常仲学,宋国兵,张维.配电网单相断线故障的负序电压电流特征分析及区段定位[J].电网技术,2020,44(8):3065-3074. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1830>
- [20] 王玥婷,梁中会,牟欣玮,王邦惠,鲍忠伟,丛志鹏,张颖,史振宇.考虑分布式能源的配电网断线定位方法[J].电力系统保护与控制,2018,46(21):131-137.
- [21] 杜雪,欧阳金鑫,龙晓轩,等.基于分布式电源电流变化率的主动配电网单相断线保护方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(22):41-48.