

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191615

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

杜雪¹, 欧阳金鑫², 龙晓轩², 刘兵¹, 黄亮程¹, 王钟玉¹, 张盛安¹, 肖扬²

(1. 贵州电网有限责任公司贵阳供电局, 贵州 贵阳 550004;

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 400030)

摘要: 分布式电源的应用, 改变了配电网断线故障的特征, 加剧了断线故障的威胁。但是目前不仅缺乏含分布式电源(DG)的配电网断线故障保护方法, 甚至电网断线故障下 DG 的输出特性也不清晰。基于主动配电网的可观测性, 提出了一种根据 DG 电流变化率识别配电网断线故障的新思想。首先, 分析了配电网单相断线故障下 DG 的输出特性, 并建立了 DG 的等值模型。然后, 建立了含 DG 的配电网单相断线故障等效电路, 推导了故障前后 DG 输出电流的表达式。随后, 分析了故障前后 DG 输出电流的变化特征, 建立了基于 DG 电流变化率的辐射状配电网单相断线故障保护判据。仿真表明, 所提单相断线故障保护方法能够迅速识别断线故障并准确定位。

关键词: 配电网; 分布式电源(DG); 单相断线故障; 故障电流; 故障保护

A protection method of a single-phase break fault for an active distribution network based on current change rates of distributed generation

DU Xue¹, OUYANG Jinxin², LONG Xiaoxuan², LIU Bing¹, HUANG Liangcheng¹, WANG Zhongyu¹, ZHANG Sheng'an¹, XIAOYang²

(1. Guiyang Power Supply Bureau, Guizhou Power Grid Co., Ltd, Guiyang 550004, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The application of Distributed Generations (DGs) has changed the characteristics of break fault and increased the threats in a distribution network. However, there is a lack of protection methods for break fault in distribution networks with DGs, and even the characteristics of DGs under break fault are unclear. Based on the observability of an active distribution network, this paper proposes a new idea to identify the break fault in a distribution network based on the current variation rate of DGs. First, the output characteristics of DGs under a single-phase break fault in a distribution network are analyzed, and the equivalent models of DGs are established. Then, the equivalent circuit of a distribution network with DG under a single-phase break fault is established. The expressions of the current contributed by the DG before and after the single-phase break fault are derived. Subsequently, the current characteristics of DG before and after the break fault are analyzed, and a protection criterion for a single-phase break fault in a radial distribution network is established according to the current variation of the DG. The simulation shows that the proposed method can quickly detect and locate the break fault.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877018).

Key words: active distribution network; distributed generation (DG); single-phase break fault; fault current; fault protection

0 引言

长期以来, 受到“重发轻配”思想的影响, 配电网的故障保护理论与设备均较为欠缺^[1]。随着国民经济的发展, 无论是用电设备还是发电设备的种

类和数量都急剧增加, 配电网的规模以及容量也越来越大, 配电网故障的可能性随之增大, 对供电可靠性和人身与设备安全的影响不断凸显^[2-3]。近年来, 中压配电网单相短路的研究逐渐增多, 不同中性点接线方式下单相短路故障特征和保护方法的研究受到广泛关注^[4-7]。但是, 单相断线不接地故障因其特征不明显, 目前对其特征和保护方法的研究均较少^[8]。然而, 单相断线后会导致负荷缺相运行, 产生过电压, 烧毁旋转电机, 尤其若单相断线故障

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877018); 贵州电网有限责任公司贵阳供电局“主动配电网断线故障快速监测关键技术研究”项目资助

的处置时间过长,极易引发人畜触电事故^[9-10]。

文献[11]指出,单相断线故障可以分为单相断线不接地、单相断线后电源侧接地、单相断线后负荷侧接地三种,其中单相断线接地后故障特征与单相短路故障类似,可以利用单相短路故障的保护方法进行检测,但不适用于单相断线不接地故障。部分文献针对单相断线不接地故障的保护开展了研究。文献[12]利用负序电流的特征来检测单相断线,但是负序分量的测量存在较大误差,影响保护效果。文献[13]利用了零序电压的分布特征,基于零序电压幅值差,提出了一种不受断线类型影响的保护方法。文献[14]指出单相断线后故障线路存在很大的正序电流以及负序电流的变化量,可用于区分正常线路和故障线路。但是,这两种方法均需要较多的检测设备以及复杂的通信。

近年来分布式电源(DG)、电动汽车大量应用于配电网,传统的单相辐射状配电网逐步转变为多能源供电的主动配电网^[15-16]。由于DG组成、运行原理和控制模式的特殊性,使得电网故障下DG的输出特性与同步发电机完全不同^[17-19]。因此,现有的断线故障保护方法在含DG的主动配电网中不再适用^[20]。DG大多基于电力电子设备实现功率控制,由于电力电子设备较为脆弱,断线故障造成三相不对称、功率波动以及电压升高可能导致DG设备故障,含DG的配电网断线故障的灵敏保护变得更加重要。但是,目前不仅关于含DG的配电网断线故障保护少有研究,甚至配电网断线下DG的输出特性也鲜有关注。文献[21]提出了基于功率方向的含DG的配电网断线定位方法,但对采集精度以及通信要求具有很高的要求。

DG对于电网电压的波动十分敏感,并且输出电流与端口电压强耦合,因而其输出电流中包含了大量的电网故障特征信息^[22]。此外,由于断线故障下馈线电压变化有限,因此配电网断线故障对DG的冲击有限,DG基本能够保持并网持续运行。主动配电网配备了较为完善的测量和通信元件,能够为配电网运行状态的检测提供了丰富可靠的信息,主动配电网中DG的输出具有较好的可观性^[23]。因此本文提出了一种利用DG电流识别辐射状配电网单相断线故障的新方法。首先,分析了配电网单相断线故障下DG的输出特性,并建立DG断线故障等值模型;然后,建立了含DG的配电网单相断线等效电路,推导了配电网断线故障前后DG输出电流的表达式;随后,分析了断线故障前后DG输出电流的变化特征,提出了基于DG电流变化率的单相断线故障保护方法;最后通过仿真验证了断线

故障保护方法的有效性。

1 配电网单相断线故障下DG等值模型

DG主要分为两类^[23]:一类是异步机接口电源(ADG),主要为双馈风电机组,其定子直接与电网相连,转子通过逆变器与电网相连;另一类是逆变器接口电源(IDG),包括光伏电源、直驱风电机组、微型燃气轮机、储能等,其通过变流器与电网相连。两类DG由于结构差异较大,因而在电网故障下的输出特性具有较大区别。

ADG定子与电网直接相连,正常运行下,其输出有功、无功能够迅速追踪指令值。因此,ADG的电流 dq 轴分量可写为^[24]

$$\begin{cases} I_{sdm,n} = \frac{2P_{A,ref}}{3U_{sm,n}} \\ I_{sqm,n} = \frac{2Q_{A,ref}}{3U_{sm,n}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{A,ref}$ 、 $Q_{A,ref}$ 分别为ADG有功和无功控制指令值;下标ref表示指令值; $U_{sm,n}$ 为定子电压幅值; $I_{sdm,n}$ 、 $I_{sqm,n}$ 分别为正常运行时定子电流 dq 轴分量幅值;下标n表示正常运行的电气量。

当电网发生单相断线故障时,ADG机端三相电压幅值发生变化,并且不再对称。由于配电网断线后机端正序电压的变化有限,因此ADG转子电压、电流的变化较小,转子侧变流器通常能够保持对转子电压的持续控制^[24]。即使当电网故障影响较大时,通过投入Crowbar电路躲过故障初瞬的冲击,ADG变流器也可很快恢复控制。并且,由于变流器控制速度较快,故障后转子电流可快速趋近于电流参考值,即故障后双馈风电机组能迅速进入稳定运行状态。

电网出现不对称故障后,网络中出现负序分量,为了避免负序分量反馈引起直流侧过压和过流,DG一般配置了负序抑制控制。因此,配电网断线故障下ADG的负序电流可近似为0^[17]。因此,故障稳态时ADG的转子正序电流为^[24]

$$\begin{cases} I_{iqm+,f} = -\frac{2P_{A,ref}L_s}{3L_m U_{sm+,f}} \\ I_{rdm+,f} = \frac{\psi_{sm+,f}}{L_m} - \frac{2L_s Q_{A,ref}}{3L_m U_{sm+,f}} \\ I_{iqm-,f} = 0 \\ I_{rdm-,f} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $I_{rdm+,f}$ 、 $I_{iqm+,f}$ 分别为故障后定转子正序电流

幅值; $I_{rdm-,f}$ 、 $I_{rqm-,f}$ 分别为故障后定转子正序电流幅值; $U_{sm+,f}$ 为故障后的机端电压正序分量的幅值; $\psi_{sm+,f}$ 为故障后的定子磁链的正序分量幅值。

将式(2)代入 ADG 的磁链方程, 可以解得配电网单相断线故障后 ADG 的电流为

$$\begin{cases} I_{sdm+,f} = -\frac{2P_{A,ref}}{3U_{sm+,f}} \\ I_{sqm+,f} = -\frac{2Q_{ref}}{3U_{sm+,f}} \end{cases} \quad (3)$$

与 ADG 类似, 配电网断线故障下 IDG 的接口逆变器通常也可保持或快速恢复控制。因此, 在负序抑制控制下, 对于采用电网电压定向矢量控制 IDG, 当电流控制回路闭环带宽足够大时, IDG 电流可写为

$$\begin{cases} i_{ld+,f} = P_{l,ref} / u_{ld+,f} \\ i_{lq+,f} = -Q_{l,ref} / u_{ld+,f}^+ \end{cases} \quad (4)$$

所以, 由式(3)和式(4), 在配电网单相断线故障稳态, 两类 DG 输出的正序电流均可写为

$$i_{D,f} = \tilde{S}_D / u_{D,f} \quad (5)$$

式中: $\tilde{S}_D = P_{D,ref} - jQ_{D,ref}$, $P_{D,ref}$ 和 $Q_{D,ref}$ 分别为 DG 有功、无功控制指令值; $i_{D,f}$ 、 $u_{D,f}$ 分别为 DG 的电流和机端电压; 下标 D 表示 DG, 包括 IDG 和 ADG。

由式(5)可见, 在电网正常运行和单相断线故障下, DG 均可以等效为一个电压控电流源。DG 输出电流由自身功率控制指令值和机端电压决定。在配电网正常运行时, 由于线路上的电压波动较小, 因此 DG 输出电流在短时间内的波动也很小; 而当配电网发生断线故障时, 故障馈线电压出现显著变化, 势必导致 DG 电流出现变化。相对于配电网断线下母线和电流的变化, 由于 DG 闭环控制的反馈作用, 其电流的变化将更为显著。

2 含 DG 的配电网单相断线故障特性

DG 接入后配电网正常运行时的等效电路如图 1 所示。其中 u_g 为系统电压, Z_{gD+} 为系统等效阻抗与母线和 DG 并网点之间线路正序阻抗之和; Z_{D+} 为 DG 升压变抗与线路正序阻抗之和; Z_{LD+} 为 DG 并网点至负荷间线路的正序阻抗; Z_{L+} 为负荷正序阻抗。由基尔霍夫定律, 有

$$\begin{cases} u_g = i_{g,n} Z_{gD+} + (i_{g,n} + i_{D,n})(Z_{L+} + Z_{LD+}) \\ u_{D,n} = i_{D,n} Z_{D+} + (i_{D,n} + i_{g,n})(Z_{L+} + Z_{LD+}) \end{cases} \quad (6)$$

式中, $i_{g,n}$ 为母线与 DG 并网点之间的馈线电流。

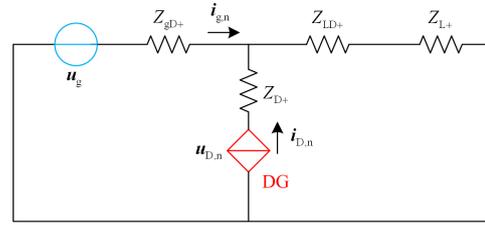


图 1 正常运行时的配电网等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of distribution network under normal operation

联立式(5)和式(6), 可得正常运行时 DG 输出电流为

$$i_{D,n} = \frac{-u_g + \sqrt{u_g^2 + 4(Z_{gD+} + Z_{D+})\tilde{S}_D}}{2(Z_{D+} + Z_{gD+})} \quad (7)$$

当 DG 上游馈线发生单相断线故障时, 断点间的故障相电流及非故障相电压均为零。由于负荷侧通常为不接地, DG 也通常采用无中线的星形接法, 因此配电网无零序回路。单相断线故障的边界条件可写为

$$i_{k+} = -i_{k-}, u_{k+} = u_{k-} \quad (8)$$

式中, 下标 k 表示断线故障点处的电气量。

根据式(8), 可以建立单相断线故障下配电网的复合序网图如图 2 所示。 Z_{gD-} 为系统等效阻抗与母线和 DG 并网点之间线路负序阻抗之和; Z_{LD-} 为 DG 并网点至负荷间线路负序阻抗; Z_{L-} 为负荷负序阻抗。对图 2 所示网络, 有

$$\begin{cases} u_{k+} = u_g - Z_{gD+} i_{g+} + Z_{D+} i_{D,f} - u_{D,f} \\ i_{k+} = \frac{u_{D,f} - (Z_{D+} + Z_{LD+} + Z_{L+}) i_{D,f}}{Z_{LD+} + Z_{L+}} \\ i_{k-} = -\frac{u_{k-}}{Z_{gD-} + Z_{LD-} + Z_{L-}} \end{cases} \quad (9)$$

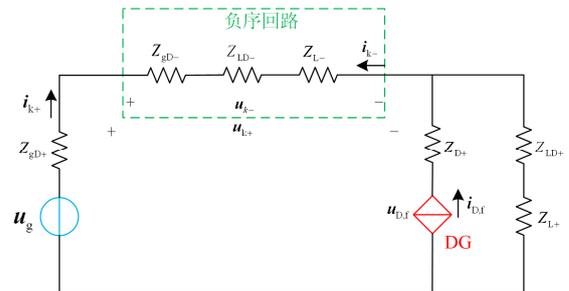


图 2 单相断线故障下配电网的复合序网

Fig. 2 Compound equivalent circuit of distribution network under single-phase break fault

由于负荷阻抗远大于线路阻抗以及变压器阻抗, 并且负荷负序阻抗与正序阻抗通常接近^[16], 对式(9)求解, 可得单相断线故障时 DG 输出电流为

$$i_{D,f} = \frac{-u_g + \sqrt{u_g^2 + 8(2Z_{D+} + Z_{LD+} + Z_{L+})\tilde{S}_D}}{2(2Z_{D+} + Z_{LD+} + Z_{L+})} \quad (10)$$

由式(10)可见, 在配电网单相断线故障发生后, DG 输出电流同时受到自身输出功率以及负荷的影响, 即故障前后电流发生了变化。

3 基于 DG 输出电流的断线故障保护方法

3.1 DG 输出电流变化特征

配电网中 DG 通常以单位功率因素运行, 并且考虑到配电网中有功负荷远大于无功负荷, 线路电抗可以忽略^[26]。此时, 由式(7)和式(10), DG 上游馈线发生单相断线故障前后 DG 输出电流的模值可分别写为

$$I_{D,n} = \left| \frac{-u_g + \sqrt{u_g^2 + 4R_{\Sigma 1}\tilde{S}_D}}{2R_{\Sigma 1}} \right| \quad (11)$$

$$I_{D,f} = \left| \frac{-u_g + \sqrt{u_g^2 + 8R_{\Sigma 2}\tilde{S}_D}}{2R_{\Sigma 2}} \right| \quad (12)$$

式中: $R_{\Sigma 1} = R_{gD+} + R_{T+}$; $R_{\Sigma 2} = 2R_{D+} + R_{LD+} + R_{L+}$ 。

令 $|I_{D,f}| = |I_{D,n}|$, 由式(11)和式(12), 可以解得 DG 功率的有效解为

$$\tilde{S}_{D,th} = \frac{R_{\Sigma 2} - R_{\Sigma 1}}{(R_{\Sigma 2} - 2R_{\Sigma 1})^2} u_g^2 \quad (13)$$

当 $\tilde{S}_D = \tilde{S}_{D,th}$ 时, 故障前后 DG 电流对输出功率求导, 二者导数之比为

$$K_i = \frac{\frac{dI_{D,f}}{d\tilde{S}_D}}{\frac{dI_{D,n}}{d\tilde{S}_D}} = \frac{2\sqrt{u_g^2 + 4R_{\Sigma 1}\frac{R_{\Sigma 2} - R_{\Sigma 1}}{(R_{\Sigma 2} - 2R_{\Sigma 1})^2}u_g^2}}{\sqrt{u_g^2 + 8R_{\Sigma 2}\frac{R_{\Sigma 2} - R_{\Sigma 1}}{(R_{\Sigma 2} - 2R_{\Sigma 1})^2}u_g^2}} \quad (14)$$

由于负荷电阻远大于线路电阻, 因此 $R_{\Sigma 2} \gg R_{\Sigma 1}$, 因此 $K_i < 1$ 。即当 $\tilde{S}_D = \tilde{S}_{D,th}$ 时, 正常运行时 DG 电流的导数大于故障后 DG 电流的导数, 将 $\tilde{S}_{D,th}$ 称为 DG 临界功率。因此, 当 $0 < \tilde{S}_D < \tilde{S}_{D,th}$ 时, 断线故障后 DG 输出电流增大, $\tilde{S}_{D,th} < \tilde{S}_D$ 时故障后电流减小, 如图 3 所示。因此, 可以利用 DG 电流的变化构成保护判据来反映配电网单相断线故障。

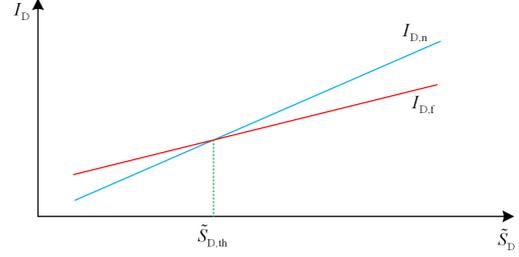


图 3 故障前后 DG 电流关系

Fig. 3 Relationship of DG current before and after a fault

3.2 单相断线故障保护判据

DG 下游发生断线故障时, DG 与母线相连, 因此其端电压变化较小, DG 电流的突变反映了该 DG 接入点上游馈线的发生单相断线故障。在主动配电网中, 线路、变压器等设备的阻抗参数基本不会发生变化, 而负荷的大小可以实时监测, 因此可以根据负荷、DG 电流的监测, 实现配电网断线故障保护, 如图 4 所示。

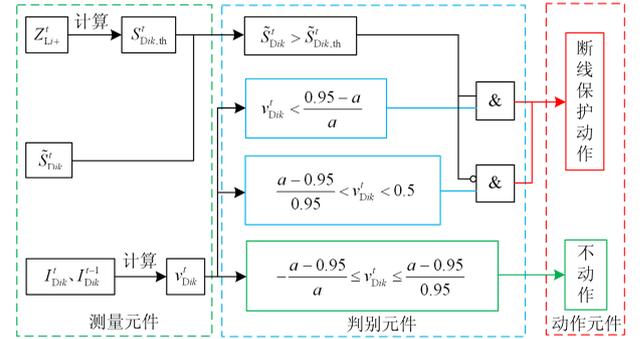


图 4 单相断线故障保护逻辑

Fig. 4 Protection logic of single-phase break fault

首先采集 t 时刻第 i 条馈线上负荷阻抗 Z_{Li+}^t 以及该馈线上第 k 个 DG 的功率 \tilde{S}_{Dik}^t 及其电流 I_{Dik}^t , 并计算 $\tilde{S}_{Dik,th}^t$ 。如果 $t-1$ 时刻和 t 时刻 DG 功率 \tilde{S}_{Dik}^{t-1} 、 \tilde{S}_{Dik}^t 相等, 而电流 I_{Dik}^{t-1} 、 I_{Dik}^t 不等, 则计算此时分布式电源电流的变化率为

$$v_{Dik}^t = \frac{I_{Dik}^t - I_{Dik}^{t-1}}{I_{Dik}^{t-1}} \quad (15)$$

配电网的安全运行电压范围通常为 $0.95 \sim 1.05$ p.u., 并且负荷端电压和 DG 端电压通常小于变电站馈线出口电压, 以保证配电网不会向主网输出功率。由于母线电压一般略大于系统额定电压, 令馈线出口电压为 aU_n 时, 因此在正常运行下 DG 端电压应在 $0.95U_n \sim aU_n$ 范围内。所以, 在配电网正常运行时, v_{Dik}^t 的范围为

$$-\frac{a - 0.95}{a} \leq v_{Dik}^t \leq \frac{a - 0.95}{0.95} \quad (16)$$

当 $\tilde{S}_{Dik}^t > \tilde{S}_{Dik,th}^t$ 时,若 DG 电流减小,且变化率大于 $(a-0.95)/a$,即可判断为发生了单相断线故障;当 $0 < \tilde{S}_{Dik}^t < \tilde{S}_{Dik,th}^t$ 时,单相断线故障使得 DG 电流增大,但是由于配电网发生短路故障时,DG 电流同样发生变化。但是,由于断线故障无需快速切除,而配电网短路故障保护一般在几秒内被切除,因此可以通过延时来区分短路故障和断线故障。当 $0 < \tilde{S}_{Dik}^t < \tilde{S}_{Dik,th}^t$ 时,若 DG 电流增大的变化率大于 $(a-0.95)/a$,且在延时 Δt_d 后 DG 电流仍然持续,即可判断为发生了单相断线故障。其中, Δt_d 可以根据配电网相间和接地保护的動作时限确定,一般应 $\Delta t_d \geq 5\text{ s}$ 。由此,单相接地故障的保护判据可写为

$$\begin{cases} v_{Dik}^t < \frac{0.95-a}{a}, \tilde{S}_{Dik}^t > \tilde{S}_{Dik,th}^t \\ v_{Dik}^t > \frac{a-0.95}{0.95}, 0 < \tilde{S}_{Dik}^t < \tilde{S}_{Dik,th}^t \text{ 且 } t \geq \Delta t_d \end{cases} \quad (17)$$

将 v_{Dik}^t 和 $\tilde{S}_{Dik,th}^t$ 传输至判别元件,判别元件根据单相断线保护判据,对该线路上第 k 个 DG 上游是否发生单相断线故障进行判断。当 $k=1$ 时,如果第 k 个 DG 电流变化率满足断线判据,则第 1 个 DG 上游出现断线故障;当 $k>1$ 时,如果第 k 个 DG 电流变化率满足断线判据,而第 $k-1$ 个 DG 电流变化率满足正常运行判据,则判断第 $k-1$ 个和第 k 个 DG 之间发生单相断线故障。

4 仿真验证

本文利用 Matlab/Simulink 验证所提出方法的有效性。仿真系统如图对图 5 所示,电压等级为 10 kV,主变中性点采用直接接地方式,负荷阻抗为 $58.85\ \Omega$,馈线出口到 DG1 接入点之间的线路电阻为 $3.33\ \Omega$,DG1 接入点到 DG2 接入点之间线路电阻为 $3.25\ \Omega$,DG2 接入点到负荷之间的线路阻抗为 $3.86\ \Omega$ 。

在 $t=0.4\text{ s}$ 时,DG2 功率为 0,馈线 4 的 K1 点处发生单相断线故障,故障点距离母线 2 km。由式 (13) 可得,可得单相断线故障的判据为:当 DG1 功率小于 1.77 MW,且 DG1 电流上升率在 5%~50% 之间;当 DG1 输出功率大于 1.77 MW,且电流下降率大于 5% 时,均可判断 DG1 上游馈线发生了单相断线故障。

图 6 为 DG1 功率分别为 0.75 MW 和 2.4 MW 时,馈线单相断线故障前、后 DG1 电流的有效值。当 DG1 功率为 0.75 MW 时,功率小于 1.77 MW,因此故障后 DG1 电流上升,从 62.4 A 变化到 79.2 A,

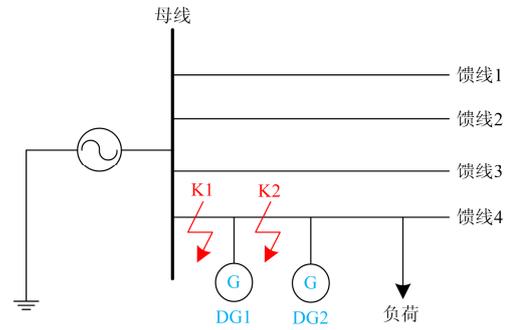


图 5 配电网结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of distribution network structure

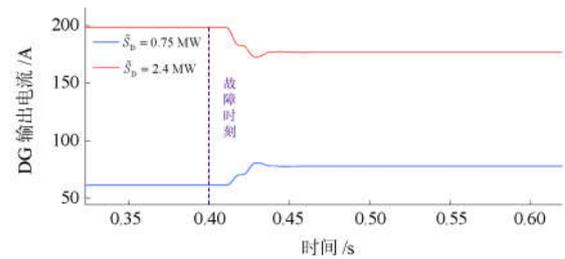


图 6 不同功率下 DG1 电流

Fig. 6 DG1 current at different powers

电流上升了 26.9%;当 DG1 功率为 2.4 MW 时,功率大于 1.77 MW,因此故障后电流下降,从 199.3 A 下降到 175.9 A,电流下降了 11.7%。该现象与理论分析完全一致。

改变 DG1 功率,馈线单相断线故障前后 DG1 电流的有效值如表 1 所示。当 DG1 功率在 0.75~1.35 MW 时,故障后 DG1 电流上升,且功率越小,电流上升率越大。此时,本文提出的保护方法均能有效识别单相断线故障。当 DG1 功率在 2.1~2.55 MW 时,故障后 DG 电流下降,并且功率越大,电流下降越大。同样地,本文提出的保护方法均能可靠动作。当 DG1 功率在 0.75~1.35 MW 时,DG1 功率小于负荷功率,其功率主要流向负荷;

表 1 不同功率下故障前后 DG1 电流

Table 1 DG1 current before and after failure at different powers

DG1 功率/ MW	故障前 电流/A	故障后 电流/A	电流 变化率	断线保护 是否动作
0.75	61.8	77.5	25.41%	是
0.90	74.3	90.4	21.67%	是
1.05	86.9	101.9	17.29%	是
1.20	99.5	110.8	11.36%	是
1.35	111.9	122.8	9.78%	是
2.10	174.3	161.2	-7.52%	是
2.25	187.1	167.1	-8.01%	是
2.40	199.3	175.9	-11.73%	是
2.55	211.5	181.3	-14.27%	是

当 DG1 功率在 2.1~2.55 MW 时, DG1 功率大于负荷功率, DG1 的部分功率应流向系统。两种情况下, 线路潮流分布不同, 但均能可靠识别并定位断线, 表明所提出的方法能计及线路潮流分布变化的影响。

保持 DG1 功率为 3 MW, 改变负荷阻抗, 断线故障前、后 DG1 电流如表 2 所示。由表 2 可见, 配电网正常运行下, DG1 电流几乎不受负荷变化影响。但是在发生单相断线故障后, DG1 电流会随负荷阻抗减小而增大。当负荷阻抗为 40~50 Ω 时, 由于 DG1 功率大于临界功率, 因此断线后 DG1 电流下降, 并且负荷阻抗越小, 电流下降率越小。而当负荷阻抗为 20~25 Ω 时, DG1 功率小于临界功率, 断线后 DG1 电流上升, 并且负荷阻抗越小, 电流上升率越大。由表 2 可见, 断线故障后的 DG1 电流变化率均大于保护动作值, 所提出的方法在不同负荷阻抗下同样能够可靠动作。

不同负荷阻抗下, DG 接入馈线发生单相短路故障前后 DG 输出电流有效值如表 3 所示。单相短路故障后 DG 输出同样也不受负荷影响。不同负荷阻抗和不同 DG 功率下, 单相故障后 DG 电流变化

表 2 不同负荷阻抗下故障前后 DG1 电流

Table 2 DG1 current before and after failure under different load impedances

负荷阻抗/ Ω	故障前 电流/A	故障后 电流/A	电流变化率	断线保护 是否动作
50	250	215.5	-13.80%	是
45	250.6	224.2	-10.36%	是
40	252.1	234.1	-7.14%	是
25	254.9	276.1	8.32%	是
20	257.6	299.1	16.12%	是

表 4 不同 DG2 功率下故障前后 DG 电流

Table 4 DG current before and after fault at different DG2 power

DG2 功率/MW	故障前电流/A		故障后电流/A		电流变化率		断线保护是否 正确动作
	DG1	DG2	DG1	DG2	DG1	DG2	
0.75	62.3	62.2	62.0	79.3	-0.48%	27.49%	是
1.05	62.3	87.2	62.1	102.1	-0.32%	17.09%	是
1.35	62.3	112.2	62.2	120.7	-0.16%	7.58%	是
2.1	62.3	174.3	62.4	161.7	0.16%	-7.23%	是
2.4	62.3	199.3	62.4	176.1	0.16%	-14.27%	是

5 结论

由于断线故障保护方法的欠缺, 使得配电网断线故障的影响日趋严峻, 特别是在含 DG 的主动配电网中, 对供电可靠性和安全性均造成影响。针对馈线的断线故障特征信息微弱使得难以可靠性识别

率都稳定在 50%左右。断线故障与短路故障的区别较为明显, 加之延时启动, 断线故障保护能够较为可靠地区分短路故障与断线故障。

表 3 不同负荷阻抗下单相短路故障前后电流

Table 3 Current before and after single-phase short-circuit fault under different load impedances

负荷阻抗/ Ω	故障前电流 有效值/A	故障后电流 有效值/A	电流变化率
50.0	125.1	187.8	50.12%
47.5	125.1	188.1	50.36%
45.0	125.3	188.2	50.20%
42.5	125.4	188.2	50.08%
40.0	125.4	188.4	50.24%
37.5	125.6	188.6	50.16%

馈线 4 的 K2 点发生单相断线故障时故障前后的 DG 电流如表 4 所示。此时, 故障点与 DG1 之间的距离为 1 km, DG1 功率为 0.75 MW。由表 4 可见, 当故障发生在 DG1 和 DG2 之间时, DG1 故障前后电流几乎无任何变化, 在正常运行电流范围之内, 而 DG2 的电流出现了明显变化, 且均显著地超过断线保护的门槛值。因此, 所提出的保护方法不仅可以可靠识别断线故障, 还能借助 DG 接入位置的不同, 实现断线点的定位。

变电站不同接地方式下, 馈线 4 的 K2 点发生单相断线故障前后 DG2 的电流如表 5 所示。从表中可以看到, 在中性点直接接地、经小电阻接地、经消弧吸安全接地和不接地 4 种方式下, 由于中性点接地方式对于断线后 DG2 电压的影响较小, 因此 DG2 电流基本相同。在 4 种接地方式下, 本文所提方法均能准确判断出单相断线故障。

和动作的问题, 本文提出了一种基于 DG 电流识别和定位辐射状配电网断线故障的新思想。通过建立单相断线故障下 DG 等值模型和配电网等效电路, 解析了故障前后 DG 电流的变化特征, 从而构建了基于 DG 电流变化率的断线故障判据, 并且充分考

虑了负荷和 DG 功率对断线故障实部的影响,能够可靠识别配电网单相故障,有效区分短路故障和断线故障,并具有一定的故障定位能力,具有原理简单、灵敏度高的优点。

表 5 不同接地方式下故障前后 DG2 电流
Table 5 DG2 current before and after fault at different grounding method

接地方式	接地 阻抗/ Ω	故障前电流 有效值/A	故障后电流 有效值/A	电流 变化率
直接接地	0	74.9	95.2	27.10%
小电阻 接地	5 10	74.9	95.3	27.24%
消弧线圈 并电阻	5+j5 10+j5	74.9	95.5	27.50%
不接地	∞	74.9	95.5	27.50%

参考文献

- [1] 刘思怡, 苏运, 张焰. 基于 FP-Growth 算法的 10 kV 配电网分支线断线故障诊断与定位方法[J]. 电网技术, 2019, 43(12): 4575-4581.
LIU Siyi, SU Yun, ZHANG Yan. A FP-Growth based method for 10 kV power distribution network branch line open-line fault diagnosis and positioning[J]. Power System Technology 2019, 43(12): 4575-4581.
- [2] JAIN T, GHOSH D, MOHANTA D K. Augmentation of situational awareness by fault passage indicators in distribution network incorporating network reconfiguration[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 323-336. DOI: 10.1186/s41601-019-0140-6.
- [3] NAIK S G, RAVI V, ARSHIYA R. Programmable protective device for LV distribution system protection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 285-290. DOI: 10.1186/s41601-018-0101-5.
- [4] 刘健, 张志华, 张小庆, 等. 基于配电自动化系统的单相接地定位[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 145-149.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing, et al. Single phase to ground fault location based on distribution automation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 145-149.
- [5] 张惠智, 李永丽. 光伏电源接入的配电网短路电流分析及电流保护整定方案[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2327-2332.
ZHANG Huizhi, LI Yongli. Short-circuit current analysis and current protection setting scheme in distribution network with photovoltaic power[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2327-2332.
- [6] 朱志平, 张民. 一种实用的配电网短路故障定位方法[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 101-104.
ZHU Zhiping, ZHANG Min. A practical method to locate short circuit faults in distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 101-104.
- [7] 董张卓, 刘魁, 张倍倍. 含分布式电源配电网通用故障电流计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 161-168.
DONG Zhanghuo, LIU Kui, ZHANG Beibei. A general fault current calculation method for distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 161-168.
- [8] 林春清, 李春平, 郭兆成, 等. 负荷线路断线引起消弧线圈接地系统过电压的分析与判别[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 275-280.
LIN Chunqing, LI Chunping, GUO Zhaocheng, et al. Analysis and discrimination on overvoltage in arc-suppression-coil earthed system caused by loaded-line breakage[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 275-280.
- [9] KALYUZHNY A. Analysis of temporary over voltages during open-phase faults in distribution networks with resonant grounding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 420-427.
- [10] AZMY A M, ERLICH I. Impact of distributed generation on the stability of electrical power system[C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 15-16, 2005, San Francisco, CA, USA.
- [11] 余水忠, 潘兰. 小电流接地系统的非短路故障分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 74-78.
YU Shuizhong, PAN Lan. Analysis of not-short circuit faults in neutral indirectly grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 74-78.
- [12] 朱玲玲, 李长凯, 张华中, 等. 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.
ZHU Lingling, LI Changkai, ZHANG Huazhong, et al. Negative sequence current distributing and single-phase open-line fault protection in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(9): 35-38, 43.
- [13] 常仲学, 宋国兵, 王晓卫. 基于零序电压幅值差的配电网断线识别与隔离[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 135-139.
CHANG Zhongxue, SONG Guobing, WANG Xiaowei. Identification and isolation of line breakage fault in distribution network based on zero sequence amplitude differential principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 135-139.
- [14] 马腾. 10 kV 配电网断线故障检测与定位研究[D].

- 济南: 山东大学, 2013.
- MA Teng. Line-break fault detection and location of 10 kV distribution line[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [15] 汤一达, 吴志, 顾伟. 主动配电网故障恢复的重构与孤岛划分统一模型[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2731-2737.
- TANG Yida, WU Zhi, GU Wei. Research on active distribution network fault recovery strategy based on unified model considering reconstruction and island partition[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2731-2737.
- [16] OUYANG Jinxin, LONG Xiaoxuan, DU Xue, et al. Voltage control method for active distribution networks based on regional power coordination[J]. Energies, 2019, 12(22): 1-23.
- [17] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 65-74, 13.
- KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 65-74, 13.
- [18] 姜卫东, 吴志清, 李王敏, 等. 电网不对称时抑制负序电流并网逆变器的控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 77-84.
- JIANG Weidong, WU Zhiqing, LI Wangmin, et al. Control strategy of suppressing negative sequence current of grid-connected inverter base on asymmetric grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 77-84.
- [19] 周念成, 叶玲, 王强钢, 等. 含负序电流注入的逆变型分布式电源电网不对称短路计算[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 41-49, 8.
- ZHOU Niancheng, YE Ling, WANG Qianggang, et al. Asymmetric short-circuit current calculation for inverter interfaced distributed generators with negative sequence current injection integrated in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 41-49, 8.
- [20] 吴争荣, 王钢, 李海锋, 等. 计及逆变型分布式电源控制特性的配电网故障分析方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 92-96, 108.
- WU Zhengrong, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Fault Characteristics analysis of distribution networks considering control scheme of inverter interfaced distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 92-96, 108.
- [21] 王玥婷, 梁中会, 牟欣玮, 等. 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.
- WANG Yueting, LIANG Zhonghui, MOU Xinwei, et al. Method of locating disconnection of distribution network considering distributed energy[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(21): 131-137.
- [22] 欧阳金鑫, 熊小伏, 张涵轶. 电网短路时并网双馈风电机组的特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 17-25.
- OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu, ZHANG Hanyi. Characteristics of DFIG-based wind generation under grid short circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 17-25.
- [23] 王晓辉, 陈乃仕, 李焯, 等. 基于态势联动的主动配电网多源优化调度框架[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 349-354.
- WANG Xiaohui, CHEN Naishi, LI Ye, et al. Multi-source optimal dispatch architecture for active distribution network based on situational linkage[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 349-354.
- [24] 李文立. 含分布式电源配电网的故障特性分析与保护方案研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- LI Wenli. The analysis of fault characteristics and protection scheme in distribution network with distributed generation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [25] 欧阳金鑫. 变速恒频风电机组并网故障机理与分析模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- OUYANG Jinxin. Studies on fault characteristics and analytical models of integrated variable-speed constant-frequency wind power generator[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [26] 靳现林, 赵迎春, 吴刚. 考虑分布式光伏和电动汽车接入的配电网空间负荷预测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 10-19.
- JIN Xianlin, ZHAO Yingchun, WU Gang. Space load forecasting of distribution network considering distributed PV and electric vehicle access[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 10-19.

收稿日期: 2019-12-28; 修回日期: 2020-04-02

作者简介:

杜雪(1981—), 女, 工程硕士, 高级工程师, 主要从事配电网资产管理、配电网运行管理、信息化应用管理工作;

欧阳金鑫(1984—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事电力系统保护与控制、新能源并网等领域研究;

龙晓轩(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事配电网保护与控制的研究。

(编辑 周金梅)