含分布式光伏的配电网相间故障自适应距离保护方法

李世伟[1]，陶 睿[2]，许守东[3]，欧阳金鑫[2]，石恒初[4]，梁 倩[1]，屈万龙[1]，丁正宏[1]
（1.云南电网有限责任公司 红河供电局，云南 红河哈尼族彝族自治州 661199；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 400044；3. 云南电网有限责任公司电力科学研究院，云南 昆明 650051；4.云南电力调度控制中心，云南 昆明 650011）

摘 要：随着分布式光伏发电在配电网中渗透率的不断升高，配电线路保护出现误动和拒动的问题突出。距离保护具有响应速度快、不受系统运行方式影响、不依赖通信等优点，可以有效解决含分布式光伏配电网保护的难题。但光伏短路电流相位受控特性产生附加阻抗，使距离保护在含分布式光伏的电网中难以满足灵敏性和选择性的要求。文章分析了含光伏配电网的故障特性和测量阻抗与实际故障位置、附加阻抗的耦合关系，推导了含分布式光伏配电网相间故障时附加阻抗的表达式，提出了多光伏接入下配电网相间故障的定位原理，构建了新的距离保护判据，提出了含分布式光伏的配电网相间故障自适应距离保护方法。算例结果表明，该方法够在不同故障位置、故障严重程度以及光伏出力条件下，均能准确识别和定位配电线路相间短路故障。该方法原理简单可靠、适用范围广。

关键词：分布式光伏；配电网保护；距离保护；相间故障；定位原理
中图分类号：TK51 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2025)11-1502-08

0 引言

近年来，以光伏发电为代表的可再生能源发电得到大量应用。光伏以分布式电源的形式接入配电网，但其输出功率的波动性，以及在逆变器闭环控制下带来的故障电流弱馈性和相位受控特性，使得配电网的继电保护装置面临严重的失效风险[1]。

目前，配电线路主要采用电流保护[2]。分布式光伏接入使配电网由单电源网络变为多电源网络，改变了配电网中故障电流的分布[3]。光伏对故障电流存在助增或反向电流作用，由于光伏相对于故障的位置具有不确定性，致使电流保护失去灵敏性和选择性，容易误动或拒动[4]。文献[5]根据光伏等值模型与复合序网整定电流保护判据，并利用节点电压方程和迭代算法解决多光伏接入时电流保护整定困难的问题。但是，迭代计算对保护装置的计算能力提出较高要求，可能延长了保护的动作时间。文献[6]通过检测电流流向来判定故障点位置，但由于需要加装方向元件与通信系统，造成保护系统成本较高。部分研究人员将差动保护引入配电网以解决分布式光伏的影响。文献[7]引入二次电流的谐波含量比和基波幅值比构造辅助判据，提出了抗 CT 饱和的整体电流差动保护方案。文献[8]提出了一种基于 5G 无线通信通道、UDP 协议 SV 采样值报文格式、北斗卫星导航系统授时采样同步的配电网差动保护方案。但是，差动保护依赖通信，在配电网中的应用受到较大限制。距离保护通过测量阻抗与整定值比较，实现了故障定位等功能，具有响应速度快、不受系统运行方式影响、不依赖通信等优点，常用于解决含分布式光伏配电网的保护难题。但是，由于光伏故障电流的弱馈特性与相位受控特性，使得距离保护在含光伏的配电网中存在灵敏度不足、抗过渡电阻能力差等问题。国内外学者针对距离保护提出了不同的改良方案。文献[9]利用协方差方法推导光伏实时等效阻抗值，从而实现配电网故障定位，但仅适用于单相接地故障。文献[10]提出了改良的距离保护分支系数计算方法，提高了距离保护的可靠性与保护范围，但要实时计算并网点电压和故障电流，速动性不佳。文献[11]提出了基于正弦

收稿日期：2024-03-25。
基金项目：国家自然科学基金项目(51877018)；南方电网云南电网有限公司科技项目计划(YNKJXM20220189)。
通信作者：欧阳金鑫(1984-)，男，博士，副教授，博士生导师，研究方向为新能源电力系统保护与控制。E-mail：jinxinoy@163.com

定理的距离保护方法，但不适用于多光伏接入的情况。

本文利用附加阻抗、测量阻抗、短路阻抗的相位关系，分析了不同故障条件下利用附加阻抗角定位故障的原理，进而提出了含分布式光伏配电网的相间故障自适应距离保护方法。首先,分析了含光伏的配电网故障特性，解析了测量阻抗与实际故障位置、附加阻抗的关系,进而构建了相间故障自适应距离保护判据，提出了配电网自适应距离保护方法;最后,搭建含分布式光伏配电网仿真模型,验证保护方法的有效性和适用性。

1　含光伏的配电网故障特性

光伏发电系统由光伏阵列、DC/DC 升压电路、逆变器和控制系统组成。光伏阵列将太阳辐射能转换为电能。DC/DC 升压电路利用高频直流变换将光伏阵列输出的低压直流电转换为高压直流电。逆变器将高压直流电转换为与电网电压相频一致的正弦交流电[12]。控制系统负责实时观测和调节逆变器输出的电压电流,提高输出电能质量,保证输出电能满足电网需求。

光伏控制系统常采用外环功率控制、内环电流控制的双闭环相量控制模式。其中,外环基于 d 轴的电网电压相量定向，使光伏输出的有功功率仅受 d 轴电流影响,无功功率仅受 q 轴电流影响,实现光伏输出功率的解耦控制。而采用前馈补偿的内环控制方程为[13]

$$\begin{cases} u_d^*=\left(k_{\mathrm{P}}+\dfrac{k_{\mathrm{I}}}{s}\right)\left(i_d^*-i_d\right)+Ri_d-\omega Li_q+u_{sd} \\ u_q^*=\left(k_{\mathrm{P}}+\dfrac{k_{\mathrm{I}}}{s}\right)\left(i_q^*-i_q\right)+Ri_q+\omega Li_d+u_{sq} \end{cases} \tag{1}$$

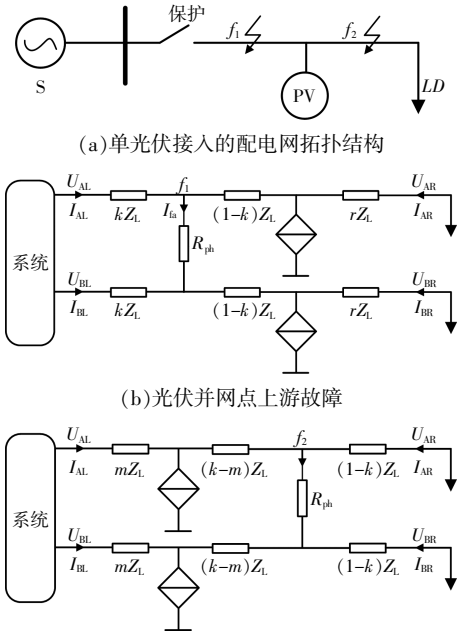
式中:u_d^*,u_q^*分别为逆变器交流电压 d,q 轴分量的控制参考值;k_{P},k_{I} 分别为内环 PI 控制器的比例和积分系数;i_d^*,i_q^*分别为逆变器交流电流 d,q 轴分量的控制参考值;i_d,i_q 分别为光伏逆变器交流电流 d,q 轴分量;R 为电网侧等效电阻;L 为电网侧滤波电感;ω 为同步角速度;u_{sd},u_{sq} 分别为光伏并网点电压 d,q 轴分量。

含光伏的电网发生故障时，电网运行规程要求光伏根据并网点电压的跌落程度输出无功电流为电网提供支撑[14]。电网发生不对称故障时,光伏利用逆变器抑制负序电流,只输出正序电流。考虑到逆变器电流内环控制较快的动态响应，在忽略控制器响应延时和误差的条件下，光伏输出的故障电流[15]为

$$\dot{I}_{\mathrm{PVf}}=\frac{P_{\mathrm{f}}^*+\mathrm{j}Q_{\mathrm{f}}^*}{\dot{U}_{\mathrm{s}}^{(+)}}=\frac{\dot{S}_{\mathrm{f}}^*}{\dot{U}_{\mathrm{s}}^{(+)}} \tag{2}$$

式中:$\dot{I}_{\mathrm{PVf}}$ 为故障时光伏输出的交流电流;P_{f}^*,Q_{f}^*分别为故障时光伏有功、无功功率控制参考值；$\dot{S}_{\mathrm{f}}^*$为故障时光伏复功率参考值;$\dot{U}_{\mathrm{s}}^{(+)}$为故障时光伏并网点正序电压。

由式(2)可知,当配电网发生故障时,光伏可等效为一个受并网点正序电压控制的电流源。当分布式光伏采用 T 接的形式并入配电网时,根据故障与光伏并网点相对位置的不同，可分为光伏上游故障与光伏下游故障 2 类,如图 1 所示。



(a)单光伏接入的配电网拓扑结构

(b)光伏并网点上游故障

(c)光伏并网点下游故障

图 1　单光伏接入的配电网拓扑及其相间短路故障等效电路

Fig.1 Distribution network topology with single photovoltaic access and its phase-to-phase short-circuit fault equivalent circuits

图中:U_{AL},U_{BL} 分别为母线的 A,B 相电压;I_{AL},I_{BL} 分别为故障馈线出口的 A,B 相电流;I_{AR},I_{BR} 分别为馈线末端的 A,B 相电流;k 为故障点至母线的距离占馈线全长的比例;m 为光伏并网点至母线的距离占馈线全长的比例;r 为光伏并网点至

馈线末端的距离占馈线全长的比例;R_{ph} 为过渡电阻;I_{fa} 为流入过渡电阻的 A 相故障电流。

根据图 1 的电压、电流关系,可以得到光伏并网点上游和下游发生 AB 相间短路时,测量阻抗为

$$Z_m=\frac{U_{AL}-U_{BL}}{I_{AL}-I_{BL}}=kZ_L+\underbrace{R_{ph}\frac{I_{fa}}{I_{AL}-I_{BL}}}_{Z_{add}}=kZ_L+|Z_{add}|\angle\varphi_{add} \tag{3}$$

式中:Z_{add} 为附加阻抗,其模值 $|Z_{add}|$ 和阻抗角 φ_{add} 分别为

$$\begin{cases}|Z_{add}|=R_{ph}\times\left|\dfrac{I_{fa}}{I_{AL}-I_{BL}}\right|\\ \varphi_{add}=\angle\dfrac{I_{fa}}{I_{AL}-I_{BL}}\end{cases} \tag{4}$$

由于光伏输出的故障电流远小于上一级电网提供的故障电流,因此式(4)中 $|Z_{add}|$ 的分子远大于分母,附加阻抗模值较大。同时,考虑到故障期间的无功支撑,光伏输出的故障电流与馈线出口的故障电流存在较大相位差,使附加阻抗的相位大幅偏离 0°。因此,光伏的接入导致并网点上游和下游发生故障时,附加阻抗的模值增大、相位偏移。若仅按照线路阻抗和测量阻抗进行整定和判断,距离保护极易拒动或误动[16]。

2 配电网相间故障定位原理

2.1 单个光伏接入时故障定位

由式(3)可得含分布式光伏配电网相间短路时,短路阻抗、附加阻抗和测量阻抗之间的相位关系,如图 2 所示。

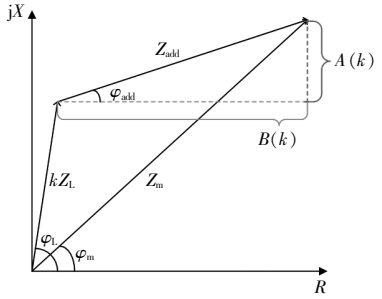


图 2 相间短路的阻抗复平面

Fig.2 Impedance complex plane of two-phase short circuit

图中:φ_L 为线路阻抗角;φ_m 为测量阻抗角。

由图 2 可知,附加阻抗使测量阻抗和短路阻抗在幅值和相角上存在明显差异,测量阻抗无法准确反映故障位置。附加阻抗的阻抗角满足[17]:

$$\tan\varphi_{add}=A(k)/B(k) \tag{5}$$

$A(k)$,$B(k)$分别为

$$\begin{cases}A(k)=|Z_m|\sin\varphi_m-k|Z_L|\sin\varphi_L\\ B(k)=|Z_m|\cos\varphi_m-k|Z_L|\cos\varphi_L\end{cases} \tag{6}$$

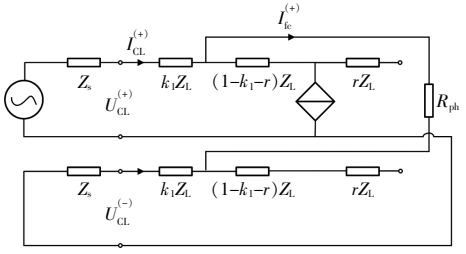
式(5),(6)中,除故障距离与附加阻抗角外,其余的参数均为已知或易测量,即式(5),(6)反映了故障距离与附加阻抗角之间的关系,若求得 φ_{add} 值即可确定故障距离。由式(4)可知,φ_{add} 值主要由故障点 A 相电流与馈线出口的 A,B 相电流之差的比值决定。相间短路时,故障点 A 相电流可分解为正序分量与负序分量[18],考虑到正序、负序分量的 A,B,C 三相电流各自对称,可以将式(3)中的 Z_{add} 用非故障相的正序、负序电流表示,即:

$$Z_{add}=R_{ph}\frac{I_{fc}^{(+)}\angle-120°+I_{fc}^{(-)}\angle120°}{I_{AL}-I_{BL}} \tag{7}$$

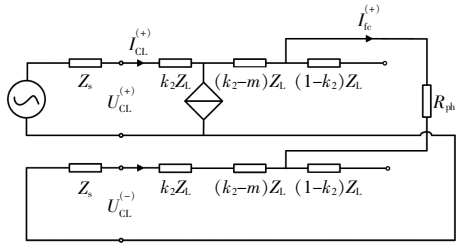
式中:$I_{fc}^{(+)}$,$I_{fc}^{(-)}$分别为非故障相的正序、负序电流。

由式(7)可知,计算附加阻抗需要非故障相的正、负序电流,因此考虑利用复合序网对非故障相电流进行求解。

图 3 为单个光伏接入配电网后,光伏并网点上游或下游发生 AB 相间短路时,配电网的 C 相复合序网。



(a)光伏并网点上游故障



(b)光伏并网点下游故障

图 3 单光伏接入时馈线故障的 C 相复合序网

Fig.3 C-phase compound sequence network for feeder faults at single PV access

图中:$U_{CL}^{(+)}$,$U_{CL}^{(-)}$分别为母线 C 相正序、负序电压;$I_{CL}^{(+)}$为馈线出口的 C 相正序电流;$I_{fc}^{(+)}$为流入故

障点的C相正序电流;k_1为光伏并网点上游故障时母线至故障点的距离占馈线全长的比例;k_2为光伏并网点下游故障时母线至故障点的距离占馈线全长的比例。由于采用负序电流抑制策略,光伏在负序网络中等值为开路[19],因而流入故障点的C相正序、负序电流可表示为

$$I_{\mathrm{fc}}^{(+)}=-I_{\mathrm{fc}}^{(-)}=\frac{U_{\mathrm{CL}}^{(-)}}{Z_{\mathrm{s}}} \tag{8}$$

式中:$I_{\mathrm{fc}}^{(-)}$为流入故障点的C相负序电流。

将式(8)代入式(7),可得φ_{add}为

$$\varphi_{\mathrm{add}}=\arg\left\{\frac{U_{\mathrm{CL}}^{(-)}}{Z_{\mathrm{s}}I_{\mathrm{CL}}^{(+)}}\right\} \tag{9}$$

考虑到光伏负序开路的特点,故障时负序网络中线路阻抗的分布不受光伏并网位置的影响,只与故障位置有关。因此,无论故障位于光伏并网点的上游还是下游,故障位置的计算方法不变。将式(9)代入式(5),式(6)后,可得故障位置与φ_{add}的关系为

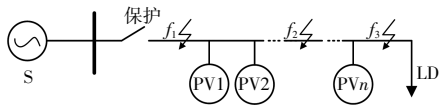
$$\frac{|Z_{\mathrm{m}}|\sin\varphi_{\mathrm{m}}-k|Z_{\mathrm{L}}|\sin\varphi_{\mathrm{L}}}{|Z_{\mathrm{m}}|\cos\varphi_{\mathrm{m}}-k|Z_{\mathrm{L}}|\cos\varphi_{\mathrm{L}}}=\tan\left\{\arg\left\{\frac{U_{\mathrm{CL}}^{(-)}}{Z_{\mathrm{s}}I_{\mathrm{CL}}^{(+)}}\right\}\right\} \tag{10}$$

求解式(10),可得单个光伏接入配电网时的故障位置为

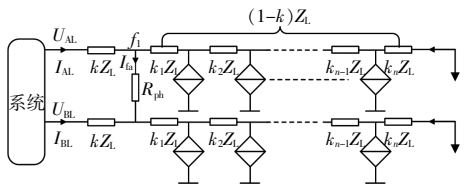
$$k=\frac{|Z_{\mathrm{m}}|\cos\varphi_{\mathrm{m}}\times\tan\left\{\arg\left\{\frac{U_{\mathrm{CL}}^{(-)}}{Z_{\mathrm{s}}I_{\mathrm{CL}}^{(+)}}\right\}\right\}-|Z_{\mathrm{m}}|\sin\varphi_{\mathrm{m}}}{|Z_{\mathrm{L}}|\cos\varphi_{\mathrm{L}}\times\tan\left\{\arg\left\{\frac{U_{\mathrm{CL}}^{(-)}}{Z_{\mathrm{s}}I_{\mathrm{CL}}^{(+)}}\right\}\right\}-|Z_{\mathrm{L}}|\sin\varphi_{\mathrm{L}}} \tag{11}$$

2.2　多个光伏接入时故障定位

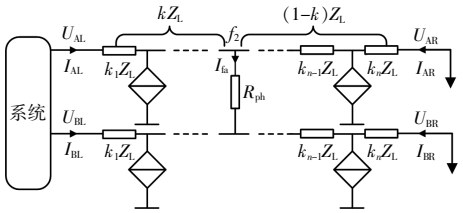
在配电网中,馈线会接入多个分布式光伏[1]。图4为多个光伏接入馈线时,接入区域与母线之间、多个光伏接入点之间以及接入区域至馈线末端发生AB相间短路时的等效电路。



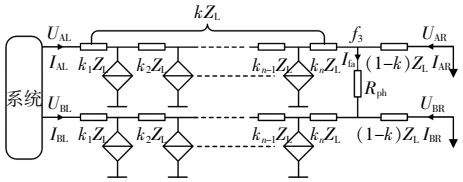
(a)多光伏接入的配电网拓扑结构



(b)光伏接入区域与母线之间故障的等效电路



(c)光伏接入点之间故障的等效电路



(d)光伏接入区域至馈线末端故障的等效电路

图4　多个光伏接入的配电网结构与相间故障等效电路

Fig.4 Distribution network structure with multiple PV accesses and phase fault equivalent circuits

对比图4中的各等效电路可知,含多个分布式光伏的配电网在不同位置发生AB相间短路时,母线的A,B相电压均为

$$\begin{cases}U_{\mathrm{AL}}=\sum\limits_{n=1}^{u}\left(I_{\mathrm{AL}}+\sum\limits_{n=1}^{u}I_{\mathrm{DG}n}\right)k_nZ_{\mathrm{L}}\\ U_{\mathrm{BL}}=\sum\limits_{n=1}^{u}\left(I_{\mathrm{BL}}+\sum\limits_{n=1}^{u}I_{\mathrm{DG}n}\right)k_nZ_{\mathrm{L}}\end{cases} \tag{12}$$

式中:u为故障点上游馈线的光伏数量;$I_{\mathrm{DG}n}$为第n个光伏输出的故障电流;k_n为第n个与第$n+1$个光伏并网点之间的距离占馈线全长的比例。

将式(12)代入式(3)可知,对于图(4)的3种故障情况,尽管故障位置不同,但母线的A,B相电压相减后,式(12)中光伏输出的故障电流被全部抵消,即在多个光伏接入的情况下,测量阻抗与附加阻抗依旧满足式(3)和式(7)。由于光伏负序开路,含多光伏的配电网发生相间短路时,负序网络中线路阻抗的分布依然只与故障位置有关。因此,在多光伏接入的配电网中,式(11)依然成立。

3　配电网自适应距离保护

为了解决距离保护在含分布式光伏配电网中适应性不足的问题,本文提出了一种配电网自适应距离保护方法。该保护方法包括启动判据、故障类型判据、选相判据和动作判据。配电网正常运行时无电压和电流故障分量。故障发生后,母线电压迅速降低产生电压故障分量[16]。因此,可以根据电压故障分量启动保护,设置启动判据为[17]

$$\left\{\left|\Delta U_{\mathrm{L}}^{\mathrm{PP}}\right|>\varepsilon\right\}\cup\left\{\left|\Delta U_{\mathrm{L}}^{\mathrm{PG}}\right|>\varepsilon\right\} \tag{13}$$

式中：$\left|\Delta U_{\mathrm{L}}^{\mathrm{PP}}\right|$为母线线电压的故障分量；$\left|\Delta U_{\mathrm{L}}^{\mathrm{PG}}\right|$为母线相电压的故障分量，故障分量为线电压或相电压的相邻采样值之差；ε为门槛值，一般按照工程应用中的电压等级、测量装置误差和可靠性等要求设置。

保护启动后，依据短路电流中的负序分量和零序分量特征来判断馈线中相间故障类型，其中短路判据为[20]

$$I_2\geqslant\varepsilon_2\text{ 且 }I_0\geqslant\varepsilon_0 \tag{14}$$

式中：I_2为馈线出口的短路电流负序分量；ε_2为相间短路的负序门槛值；I_0为馈线出口的短路电流零序分量；ε_0为相间短路的零序门槛值。

选相判据：当满足以下条件时，判定相1，2之间发生相间短路故障：

$$\left|\Delta\dot{I}_{12}\right|\geqslant K_{\mathrm{rl}}\left|\Delta\dot{I}_{13}\right|\text{且}\left|\Delta\dot{I}_{12}\right|\geqslant K_{\mathrm{rl}}\left|\Delta\dot{I}_{23}\right| \tag{15}$$

式中：$\left|\Delta\dot{I}_{12}\right|$为两故障相之间的线电流突变量；$\left|\Delta\dot{I}_{13}\right|$，$\left|\Delta\dot{I}_{23}\right|$为故障相与非故障相之间的线电流突变量；$K_{\mathrm{rl}}$为可靠系数。

配电网正常运行时，测量阻抗主要为负荷阻抗，根据式(11)，故障距离远大于馈线长度。当保护范围内任一点发生相间短路故障时，根据式(11)计算的故障距离均小于馈线长度。因此，当某一条馈线保护计算的故障距离小于馈线长度时，可判断故障点位于该馈线[21]，保护动作判据设置为

$$KL\leqslant K_{\mathrm{rel}}L \tag{16}$$

式中：L为馈线全长；K_{rel}为距离保护可靠系数。

利用保护采集母线电压和馈线出口处的电流并进行检验，当检验结果依次满足启动判据、故障类型判据、选相判据和动作判据后，保护判定馈线上发生相间短路故障，并采取针对性措施，保证配电网安全。该方法具有动作速度快、可靠性高、适应多光伏接入等优点。

4 算例验证

为验证本文所提保护方法的正确性，搭建了如图5所示的配电网拓扑结构。

图5中，上级电网电压为110 kV，等效阻抗为0.05+0.004 4 jΩ，变压器变比为11∶1。馈线1、馈线2、馈线3的长度分别为40，20，10 km，单位长度阻抗均为0.58–6.58 jΩ。负荷1容量为2 MV·A，

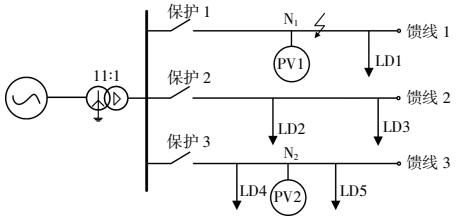


图5 配电网拓扑及其仿真系统结构

Fig.5 Distribution network topology and its simulation system structure

功率因数为0.672；负荷2容量为5 MV·A，功率因数为0.826；负荷3容量为3 MV·A，功率因数为0.741；负荷4容量为2 MV·A，功率因数为0.729；负荷5容量为2 MV·A，功率因数为0.815。光伏1接入馈线1距离母线16 km，正常运行时的有功和无功功率参考值分别为0.866 MW，0.5 Mvar。光伏2接入馈线3距离母线2 km，正常运行时有功、无功功率参考值分别为1.732 MW，1 Mvar。配电网故障时，光伏1根据并网点电压的跌落程度提供无功支撑，并采用抑制负序电流的控制策略。

4.1 场景1

在0.06 s时，馈线1全长25%处发生过渡电阻为0.1 Ω的AB相间短路故障，故障持续时间为100 ms。根据采集的电压电流，在故障后利用式(11)每隔10 ms计算一次故障位置，可得馈线1全长25%处发生故障时的故障位置计算结果，如图6所示。

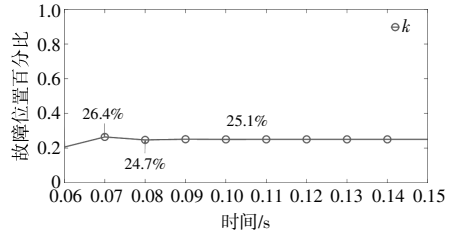


图6 过渡电阻为0.1 Ω时25%故障位置计算结果

Fig.6 Calculation results of 25% fault location when the transition resistance is 0.1 Ω

图6中，计算结果的最大值为26.4%，最小值为24.7%，平均值为25.1%，准确反映了馈线1全长25%处的故障，式(16)的保护动作判据可正确动作。

馈线1全长50%处发生相间短路时的故障位置计算结果如图7所示。

图7中，计算结果最大值为52.5%，最小值为49.4%，平均值为50.0%，能够准确反映馈线1全

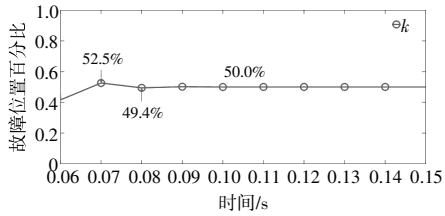


图 7　过渡电阻为 0.1 Ω 时 50%故障位置计算结果

Fig.7 Calculation results of 50% fault location when the transition resistance is 0.1 Ω

长 50%处的故障位置。

馈线 1 全长 75%处发生相间短路时的故障位置计算结果如图 8 所示。

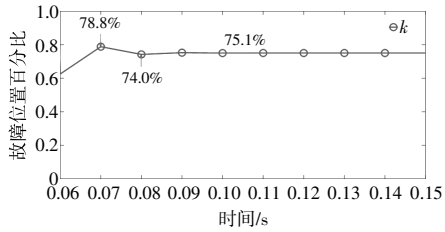


图 8　过渡电阻为 0.1 Ω 时 75%故障位置计算结果

Fig.8 Calculation results of 75% fault location when the transition resistance is 0.1 Ω

图 8 中,计算结果最大值为 78.8%,最小值为 74.0%,平均值为 75.1%,也能准确反映馈线 1 全长 75%处的故障位置。

对比图 6~8 可知,无论故障位于光伏并网点上游还是下游,式(16)的保护动作判据均可正确动作,证明保护方法具有良好的可靠性。

4.2　场景 2

改变过渡电阻为 10 Ω，当馈线 1 全长 25%,50%,75%处发生 AB 相间短路故障时，根据式(11)每隔 10 ms 计算一次故障位置,得到馈线 1 全长 25%处发生故障时的计算结果,如图 9 所示。

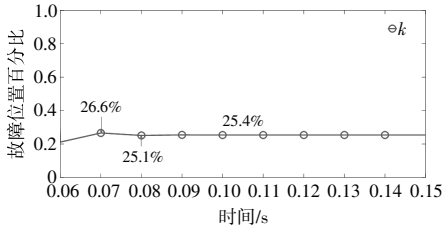


图 9　过渡电阻为 10 Ω 时 25%故障位置计算结果

Fig.9 Calculation results of 25% fault location when the transition resistance is 10 Ω

图 9 中,计算结果最大值为 26.6%,最小值为 25.1%,平均值为 25.4%。由图 9 可知,虽然过渡电阻发生了变化但仍能准确反映馈线 1 全长 25%处的故障位置。

过渡电阻为 10 Ω 时，馈线 1 全长 50%处发生相间短路时的故障位置计算结果如图 10 所示。

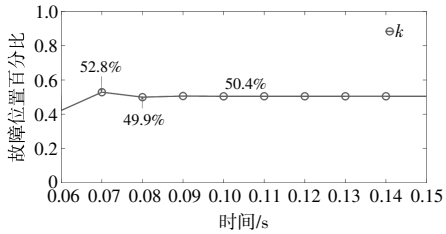


图 10　过渡电阻为 10 Ω 时 50%故障位置计算结果

Fig.10 Calculation results of 50% fault location when the transition resistance is 10 Ω

图 10 中,计算结果最大值为 52.8%,最小值为 49.9%,平均值为 50.4%,准确反映了馈线 1 全长 50%处的故障位置。

过渡电阻为 10 Ω 时，馈线 1 全长 75%处发生相间短路时的故障位置计算结果如图 11 所示。

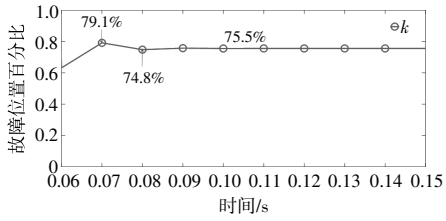


图 11　过渡电阻为 10 Ω 时 75%故障位置计算结果

Fig.11 Calculation results of 75% fault location when the transition resistance is 10 Ω

图 11 中,计算结果最大值为 79.1%,最小值为 74.8%,平均值为 75.5%。由图 9~11 可知,与过渡电阻为 0.1 Ω 时的故障位置计算结果相比,过渡电阻为 10 Ω 时,式(11)计算出的故障位置仍能满足动作判据,使保护正确动作,证明本文所提的保护方法具有良好的抗过渡电阻能力。

4.3　场景 3

表 1 为并网光伏 1 故障前的有功和无功功率参考值分别为 2.6 MW 和 1.5 Mvar,4.3 MW 和2.5 Mvar,馈线 1 全长 25%,50%与 75%处发生 AB 相间短路故障时,k 的计算结果。

由表 1 可知：有功和无功功率参考值为 2.6 MW 和 1.5 Mvar 时，馈线各处故障时的计算结果最大误差为 0.3%,最小误差为 0.1%;有功和无功功率参考值为 4.3 MW 和 2.5 Mvar 时，馈线各处故障时的计算结果最大误差为 0.4%,最小误差为 0.1%。尽管功率参考值改变使得故障期间光伏输

表 1 不同光伏功率参考值下的故障位置计算结果

Table 1 Calculation results of fault location under different power reference values of photovoltaic power

功率参考值	故障位置/%	k/%
2.6 MW,1.5 Mvar	25	24.9
	50	49.8
	75	74.7
4.3 MW,2.5 Mvar	25	24.9
	50	49.9
	75	74.6

出的故障电流发生变化，当馈线在被保护范围内发生相间短路故障时，k 的计算结果仍能准确反映故障位置，满足动作判据，从而使保护正确动作，证明本保护方法具有良好的工程适用性。

5 结束语

本文基于测量阻抗、短路阻抗和附加阻抗的相位关系，提出了不同故障条件下利用附加阻抗角定位故障的原理，提出了适用于含分布式光伏配电网的相间故障自适应距离保护方法。该方法原理简单、不依赖于通信系统，且具有较好的灵敏性、速动性、实用性与可实施性。

参考文献：

[1] 刘媛媛，陈元桦，蔡泽祥，等.考虑资源弹性配置的配电网保护控制终端协同任务分配方法[J].电力工程技术，2024，43(5)：100-111.

[2] Xiao Yang，Ouyang Jinxin，Xiong Xiaofu，et al.Fault protection method of single-phasebreak for distribution network consideringthe influence of neutral grounding modes [J].Protection and Control of Modern Power Systems，2020，5(2)：1-13.

[3] 曾嵘，李勇，谢李为，等.一种城市配电网自适应全线电流保护方法[J].电力系统保护与控制，2023，51(5)：154-163.

[4] 杨舟，杨仁炘，施刚，等.一种用于多端直流输电系统交流故障穿越的新型控制策略[J].发电技术，2022，43(2)：268-277.

[5] 张润坤，王宝华.含低电压穿越型光伏电源配电网自适应正序电流速断保护 [J]. 电力系统保护与控制，2017，45(18)：137-142.

[6] 高生凯，曹炜，张旭航，等.一种改进型配网自适应过流保护方法 [J]. 电力系统保护与控制，2021，49(7)：110-119.

[7] 王宁，韩国栋，高厚磊，等.有源配电网电流差动保护判据研究[J].电力系统保护与控制，2023，51(7)：14-23.

[8] 张建雨，姜睿智，李俊刚，等.基于 5G 通信的配电网差动保护技术研究[J].电力系统保护与控制，2021，49(7)：17-23.

[9] 周步祥，杨常.基于实时计算光伏系统等效阻抗的自适应距离保护[J].电测与仪表，2019，56(5)：89-93.

[10] 金甚达，范春菊，郭雅蓉，等.考虑分布式逆变电源特性的距离Ⅱ段自适应保护整定方案[J].电力系统保护与控制，2022，50(23)：41-50.

[11] 孙苗苗，王慧，朱晓荣.一种光伏电站送出线路自适应距离保护方法[J].电测与仪表，2017，54(20)：50-55，115.

[12] 陈炜，艾欣，吴涛，等.光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J].电力自动化设备，2013，33(2)：26-32，39.

[13] Has hemi B，Taheri S，Cretu A，et al.Computational intelligence based PEVs aggregator scheduling with support for photovoltaic power penetrated distribution grid under snow conditions [J].Electric Power Systems Research，2023，214：1-14.

[14] Guentri H，Allauti T，Mekki M，et al.Power management and control of A photovoltaic system with hybrid battery -supercapacitor energy storage based on heuristics metods[J].Journal of Energy Storage，2021，39：102578.

[15] 连超. 光伏电源接入的配网自适应距离保护研究[D].徐州：中国矿业大学，2021.

[16] 曾翔，文明浩，钱堃，等.逆变型分布式电源接入对接地距离保护的影响与对策[J].智慧电力，2023，51(1)：46-53.

[17] 晁晨栩，郑晓冬，高飘，等.针对光伏场站送出线路不对称短路故障的自适应距离保护原理[J].中国电机工程学报，2022，42(18)：6681-6693.

[18] 张尧，晁勤，王厚军，等.基于自适应分支系数的并网光伏电站接地距离保护[J].电力自动化设备，2015，35(9)：113-117.

[19] 胡勇，郑黎明，贾科，等.基于 Tanimoto 相似度的光伏场站送出线路纵联保护 [J]. 电力系统保护与控制，2021，49(3)：74-79.

[20] Banaiemoqadam A，Hooshyar A，Azzouz M A.A control-based solution for distance protection of lines connected to converter -interfaced sources during asymmetrical faults[J].IEEE Transactions on Power Delivery，2020，35(3)：1455-1466.

[21] 王峰渊，方愉冬，赵萍，等.一种适用于光伏场站送出线的自适应距离保护改进方案[J].电力系统保护与控制，2019，47(20)：127-134.

Adaptive distance protection method for two-phase short-circuit faults in distribution net-works with distributed photovoltaic power generation

Li Shiwei[1], Tao Rui[2], Xu Shoudong[3], OUYang Jinxin[2], Shi Hengchu[4], Liang Qian[1], Qu Wanlong[1], Ding Zhenghong[1]

(1.Honghe Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co.,Ltd., Honghe 661199, China; 2.State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3.Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co.,Ltd., Kunming 650051, China; 4.Yunnan Power Dispatch and Control Centre, Kunming 650011, China)

Abstract: As the penetration rate of distributed photovoltaic (PV) power generation in distribution networks continues to rise, the problem of loss of selectivity and sensitivity of distribution line protection is becoming more and more prominent. Distance protection has the advantages of fast response speed, independent of system operation mode, and independent of communication, which is an effective way to solve the protection problems of distribution networks containing distributed PV. However, the additional impedance generated by the controlled phase characteristics of PV short-circuit currents makes it difficult for distance protection to meet the requirements of sensitivity and selectivity in power grids containing distributed PV. To this end, the fault characteristics of PV-containing distribution networks are analyzed, and the coupling relationship between the measured impedance and the actual fault location and the additional impedance is analyzed; the expression for the additional impedance during interphase faults in distribution networks containing distributed PV is derived, and the principle of interphase fault location in distribution networks with multi-PV access is proposed, and then new distance protection criteria are constructed, and adaptive distance protection for interphase faults in distribution networks containing distributed PV is proposed. The method is proposed. Examples show that the method can accurately identify and locate interphase short-circuit faults in distribution lines under different fault locations, fault severities and PV outputs, and it has the advantages of simple and reliable principle, convenient realization, and wide range of application.

Keywords: photovoltaic power generation; distribution network protection; distance protection; two-phase fault; positioning principle