

基于智能软开关的柔性互联配网 相间短路故障定位方法

郑涛¹, 沈文韬¹, 吕文轩¹, 杨毅¹, 薛玉石²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;

2. 国网石家庄供电公司, 河北省 石家庄市 050000)

Fault Location Method for Phase-to-phase Short Circuit in Flexible Interconnected Distribution Network Based on SOP

ZHENG Tao¹, SHEN Wentao¹, LYU Wenxuan¹, YANG Yi¹, XUE Yushi²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources

(North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China;

2. State Grid Shijiazhuang Electric Power Supply Company, Shijiazhuang 050000, Hebei Province, China)

ABSTRACT: The soft open point (SOP) can achieve flexible interconnection in the distribution network. However, the bidirectional flow of fault current makes existing fault location methods inapplicable. This paper proposes a SOP-based active control method for fault location in the distribution network to address this issue. The phase-to-phase fault type can be determined by detecting the voltage drop at the SOP port. For the two-phase short-circuit fault, the negative sequence current suppression control strategy is implemented, and the feeder terminal unit (FTU) collects the negative sequence current information. The fault section can be identified in the master station based on the differences in negative sequence current measured by each FTU. For the three-phase short-circuit fault, the control strategy of active injection of the characteristic signal is implemented, and FTU collects the characteristic current information. The fault section can be identified in the master station based on differences in characteristic current measured by each FTU. This proposed method does not require additional configuration of directional elements. It is compatible with existing feeder automation systems, thereby improving the accuracy of fault section location in flexible interconnected power distribution networks. Finally, based on the PSCAD/EMTDC simulation platform, the correctness and feasibility of the new method are verified.

KEY WORDS: flexible interconnection; soft open point; feeder terminal unit; fault location

摘要: 智能软开关(soft open point, SOP)可实现配电网的柔性互联,但故障电流的双向流动将导致原有配电网故障定位方案不再适用。针对该问题,该文提出一种基于 SOP 主动控制的配电网相间短路故障定位方法。该方法通过 SOP 检测端口电压跌落情况来判别两相短路和三相短路,针对两相短路故障, SOP 采取抑制负序电流的控制策略,馈线终端单元(feeder terminal unit, FTU)采集各自的负序电流信息,主站可利用各个 FTU 上送的负序电流差异识别故障区段;针对三相短路故障, SOP 采取主动注入特征信号的控制策略, FTU 采集各自的特征电流信息,主站利用各个 FTU 上送的特征电流差异识别故障区段。该文所提方法无需额外配置方向元件且能较好地兼容现有馈线自动化系统,提高了柔性互联配电网故障区段定位的准确性。最后,基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台验证了新方法的正确性和可行性。

关键词: 柔性互联; 智能软开关; 馈线终端单元; 故障定位

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.2151

0 引言

不同于传统闭环设计、开环运行的交流配电网,柔性互联智能配电网通过将传统联络开关用智能软开关(soft open point, SOP)代替,实现配电网的柔性闭环运行,通过采用合适的控制策略,能够实现灵活控制输出功率,均衡馈线间的负载,改善电能质量,以及实现系统故障下的快速供电恢复等。然而柔性互联配电网的闭环运行和灵活运行方式给配电系统带来了继电保护方面的挑战, SOP 与配电网继电保护相协调的方案亟待研究^[1-3]。

集中控制型馈线自动化是实现配电网线路故障定位、隔离与供电恢复的重要手段,对于传统

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(No.U2166205); 国网河北省电力有限公司科技项目(kj2022-074)。

Project Supported by the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (No. U2166205); State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Science and Technology Project(kj2022-074).

的开环运行配电网,通常根据故障点上游的馈线终端单元(feeder terminal unit, FTU)能够检测到故障电流而下游检测不到故障电流进行故障区段的定位^[4-6]。而对于含分布式电源(distributed generation, DG)的主动配电网或柔性互联的配电网^[7-9],由于正常运行功率和故障电流的双向流动,传统故障定位方法将不再适用^[10],因此需要研究新型配电网故障定位方案。

目前针对柔性互联配电网故障定位的研究还相对匮乏,而主动配电网与柔性互联配电网都存在故障电流双向流动的问题,因此针对主动配电网故障定位问题的研究具有一定借鉴意义。通过增加对故障电流方向的判别能够实现多电源供电网络的故障定位^[11-12],但需要额外配置方向元件,当前配电线路中装设电压互感器存在一定困难,且电压互感器极性误接问题在现场也较为常见^[13],同时方向元件在新能源接入场景下也存在不适应问题^[14-15]。基于阈值的故障定位方法^[16]原理简单,但限制了 DG 的接入容量,无法适用高比例 DG 接入的配电网。双端行波法^[17]通过分析线路两端行波信号差异,能够解决主动配电网的故障定位问题,但对双端通信要求较高,且在各分支都需配置检测装置,经济性较差。基于多端信息的故障检测方法可利用线路两侧电流幅值与相角^[18-19]、电流极性^[20]、三相电压/电流同步相量数据^[21]、故障超前相的能量函数^[22]、波形相关性^[23-24]等,实现主动配电网的故障定位,但都依赖通信系统,故障时若发生数据失步将使故障检测失准。

注入法通过信号注入装置注入特征信号,进而检测特征信号进行故障定位,主要包含 S 信号注入法^[25]、脉冲注入法^[26]、单端注入行波法^[27]等。注入法需要额外配置专用信号注入源和检测装置,投资成本高,且注入的信号强度受电压互感器容量限制,可靠性易受分布电容、过渡电阻等影响。但注入法可通过与其他方法相结合进行改进,文献[28]将 FTU 与“S”信号注入法相结合进行故障定位,能够快速定位故障区段,避免了线路电容的影响。文献[29]利用 SOP 注入特征电压,实现了谐振接地配电网中的故障区段定位。但以上方法针对的主要是单相接地故障的定位问题。

本文研究主要针对中性点不接地的柔性互联配电网系统,将 SOP 的控制策略与注入法相结合,提出了一种基于 SOP 主动控制的配电网相间短路故障定位方法,不需要额外配置方向元件,同时兼容现有集中控制型馈线自动化系统,只对 FTU 上传

故障信息的判据进行改进,FTU 仅需本地电流信息即可正确上报故障信息,同时也提高了 SOP 装置的利用率。

本文首先分析了 SOP 的接入对原配电网故障定位方案的影响,指出主干线上的 FTU 因故障电流双向流动而不再适用原故障定位方案。针对该问题,提出了一种基于 SOP 的主动控制的配电网相间短路故障定位方法。该方法基于控保协同的思想,将故障时 SOP 的控制策略与 FTU 相互结合,针对两相短路故障,SOP 采用负序抑制的控制策略,FTU 根据故障点两侧电流不平衡度差异构造判据;针对三相短路故障,SOP 采用注入特征信号的控制策略,FTU 根据故障点两侧特征电流差异构造判据,实现了故障信息的准确上传。在 PSCAD/EMTDC 中验证了所提故障定位方法的有效性。

1 SOP 接入后原配电网故障定位方案适用性分析

1.1 含 SOP 的柔性互联配电网

SOP 典型的实现方式为背靠背电压源型换流器(back to back voltage source converter, B2B VSC),两侧换流器为对称形式,通常一侧采用恒直流电压与无功($U_{dc}Q$)控制,另一侧采用恒功率(PQ)控制^[30]。含双端 SOP 的配电网典型馈线结构如图 1 所示。馈线始端为断路器,其他节点处装设有分段开关,每个开关处均装设 FTU 以上传故障信息,SOP 代替传统联络开关以实现馈线间的柔性互联,能够支撑馈线负载平衡和实现分布式电源高效消纳等^[1]。

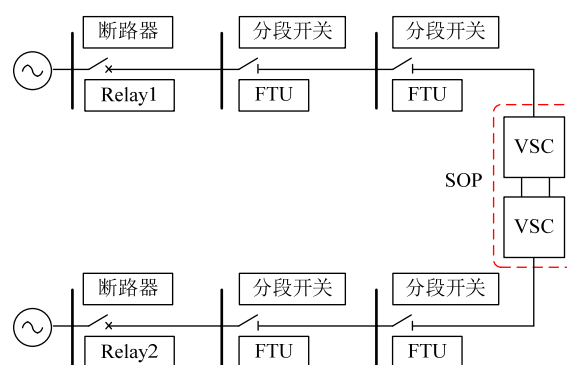


图1 含 SOP 的配电网典型结构
Fig. 1 Typical structure of a distribution network with SOP

1.2 SOP 接入对原配电网故障定位方案的影响

对于中性点不接地的配电网系统,单相接地故障与相间短路故障的故障特征与保护方式不同^[29,31-33],本文的研究对象主要是相间短路故障。

SOP 接入配电网后,将会使配电网的故障电流特性发生较大变化。SOP 所提供的短路电流将会抬

$$\mathbf{v}_{\alpha\beta}^- = [\mathbf{v}_\alpha^- \ \mathbf{v}_\beta^-]^T = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & q \\ -q & 1 \end{bmatrix} \mathbf{v}_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \mathbf{v}'_\alpha + q\mathbf{v}'_\beta \\ -q\mathbf{v}'_\alpha + \mathbf{v}'_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

再经 Park 变换即可得到 dq 坐标系下的正负序分量。

SOP 抑制负序电流的控制框图如图 3 所示。

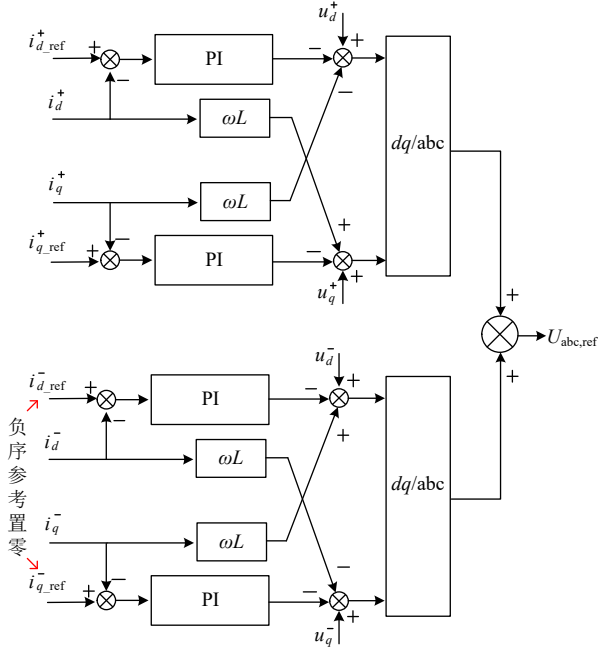


图 3 SOP 的抑制负序电流控制框图

Fig. 3 Control block diagram for SOP-based negative-sequence current suppression

通过将负序 dq 坐标系下的指令电流参考值 $i_{d_ref}^-$ 、 $i_{q_ref}^-$ 设为 0，可实现输出的负序电流为 0。

2.1.2 电流不平衡度判据

配电网发生两相短路故障后，SOP 检测到三相电压不对称跌落，启用抑制负序电流的控制策略，使输出的负序电流为 0，而此时系统电源侧负序电流较大，因此可利用故障两侧负序电流的差异进行故障定位。

以图 2 中 f1 点发生两相短路为例进行分析，图 4 所示为 f1 点发生 BC 两相短路故障时的负序网图，其中 Z_S 为系统电源内阻抗， Z_1 、 Z_{2f} 、 Z_{f3} 、 Z_3 、 Z_4 分别为各线路阻抗。

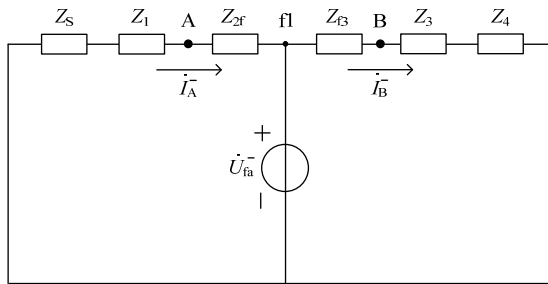


图 4 f1 点发生 BC 两相短路的负序网图

Fig. 4 Negative sequence network diagram of BC two-phase short circuit at point f1

显然，受 SOP 抑制负序的控制策略影响，B 处的负序电流分量 I_B^- 为 0，而 A 处的负序电流 I_A^- 则由负序电压故障分量 $\dot{U}_{fa}^-$ 提供，幅值较大，能够通过设定合理定值可靠分辨。然而当过渡电阻较大时，A、B 处负序电流幅值都将会减小，此时依靠负序电流定值不能可靠区分二者，因此定义电流不平衡度，同时引入电流不平衡度定值：

$$I_{unb} = I_n / I_p \quad (4)$$

$$I_{unb, set} = K_{rel} I_{unb} \quad (5)$$

式中： I_p 为正序电流幅值； I_n 为负序电流幅值； I_{unb} 可取为 4% (据我国标准规定，电力系统公共连接点正常电压不平衡度不得超过 4%)； K_{rel} 为可靠系数，可取 1.25~1.3。当过渡电阻较大时，电源侧正序故障电流幅值将会减小，此时电流不平衡度更能凸显其故障特征。

当电流不平衡度小于定值时，说明测点在故障点下游，应上传未故障信息“0”；当电流不平衡度大于定值时，说明测点在故障点上游，应上传故障信息“1”。同时考虑到 SOP 控制达到稳态需要一定时间，可在控制达到稳态后，FTU 再进行对负序电流的测量以及故障信息的上传。

2.2 基于主动注入的三相短路故障定位方法

2.2.1 附加特征电压的控制策略

仍以图 2 所示含 SOP 接入的配电网进行分析，此时发生的故障为三相对称故障，无法采用 2.1 节中的负序电流来判别，而 SOP 的控制系统通常包含 Vf 控制方式以进行供电恢复^[37]，因此可利用 SOP 的 Vf 控制产生一个特征电压参考，再通过 PWM 调制产生该特征电压信号来进行故障定位。

SOP 的附加特征电压控制策略框图如图 5 所示，通过直接给定 Vf 控制中的内环输出电压参考值以及同步相位，产生一组三相对称的特征电压信号，然后在原先电流内环产生的电压参考基础上叠加所需的特征电压信号 u_{atz} 、 u_{btz} 、 u_{ctz} ，再经 PWM 调制就能够产生对应的特征电压分量。图 5 中，三相复合电压调制波的表达式为

$$\begin{cases} u'_{aref} = V \sin 2\pi f t + u_{tz} \sin 2\pi f_{tz} t \\ u'_{bref} = V \sin(2\pi f t - \frac{2}{3}\pi) + u_{tz} \sin(2\pi f_{tz} t - \frac{2}{3}\pi) \\ u'_{cref} = V \sin(2\pi f t + \frac{2}{3}\pi) + u_{tz} \sin(2\pi f_{tz} t + \frac{2}{3}\pi) \end{cases} \quad (6)$$

式中： V 为原有工频相电压调制波幅值； u_{tz} 为附加特征相电压调制波幅值； f 、 f_{tz} 分别为工频和附加特征电压信号的频率。

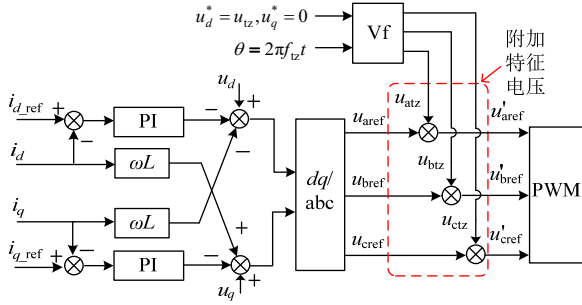


图5 SOP的附加特征电压控制框图

Fig. 5 Additional characteristic voltage control block diagram for SOP

2.2.2 特征信号频率选取

特征信号的频率主要受以下几个方面影响：

- 1) 特征信号的频率应远小于 VSC 的载波频率，实际工程中 VSC 载波频率通常为 1~2kHz。
- 2) 特征信号频率应避开换流器出口处滤波器的谐振频率且小于滤波器的截止频率。LCL 滤波器的谐振频率通常大于电网频率的 10 倍，小于开关频率的 1/2^[38]，即满足：

$$10f_n < f_{w0} < \frac{1}{2}f_{sw} \quad (7)$$

式中：\$f_n\$ 为电网额定频率；\$f_{w0}\$ 为 LCL 滤波器谐振频率；\$f_{sw}\$ 为开关频率。在避开滤波器的谐振频率的同时，特征频率也不宜过高，导致特征信号受滤波器的衰减作用过强，影响故障定位效果，因此所选特征信号频率应小于 10 倍的电网额定频率，即满足：

$$f_{tz} < 10f_n \quad (8)$$

式中 \$f_{tz}\$ 为特征频率。

- 3) 故障点上下游的特征电流差值越大，越有利于故障的准确定位，而上下游的特征电流差值主要取决于故障点上游阻抗和故障点的过渡电阻，上下游特征电流信号的表达式为

$$I_{sy} = I_{xy} \frac{R_g}{Z_{sy} + R_g} \quad (9)$$

式中：\$I_{sy}\$ 为故障点上游特征电流；\$I_{xy}\$ 为故障点下游特征电流；\$Z_{sy}\$ 为故障点上游等效阻抗。由式(9)可知，随着特征信号频率的增大，其上游等效阻抗 \$Z_{sy}\$ 也越大，上下游的特征电流比值越小，有利于区分故障点上下游的特征电流，也有助于故障信息的正确上报。

考虑以上因素，本文选取特征频率为 300Hz。

2.2.3 特征信号幅值选取

在进行特征信号的幅值选择时，需要综合考虑检测装置、电力电子器件的耐受能力以及系统冲击的要求^[39]。特征信号的幅值越大，越有利于检测装置

检测到特征信号，同时也能够削弱换流器调制或外界干扰可能产生的谐波影响。但随着特征信号幅值的增大，可能使换流器输出的电流幅值增大，而换流器的耐流能力通常为额定电流的 1.2~1.5 倍，在选择特征信号幅值时应避免换流器过流。文献[40-41]指出，对于线路长度小于 500km 的线路，特征信号的幅值建议为额定电压的 2%~10%。而中压配电网线路长度通常不超过 20km，线路长度较短，因此选择 2% 的线路额定电压作为特征信号的幅值。

2.2.4 特征信号的提取

对于特征电流信号，通常采用快速傅里叶变换 (fast Fourier transformation, FFT) 加以提取。在故障发生的初始时刻，即 SOP 的控制调节期间，会产生短暂的非特征谐波，对特征电流信号的采集产生干扰，但由于 SOP 的控制通常在 30ms 内达到稳态，因此可在电流信号达到稳态后，再进行特征电流信号的采集，以避免控制切换瞬间产生的非特征谐波使 FTU 误报故障信息。

本文选取 1200Hz 作为 FTU 的采样频率，大于特征信号频率的 2 倍，不会产生频谱混叠。若要同时测得 300Hz 和 50Hz 的电流信号，则所需频谱分辨率至少为 50Hz，即至少对 0.02s 的电流进行采样，为兼顾故障定位速度，本文选取采样窗长为 0.02s。

2.2.5 特征电流信号判据

式(9)表明，故障点上游的特征电流与下游的特征电流有着明显的幅值大小区别，但其差值受故障点位置以及过渡电阻大小影响较大，若仅采用特征电流幅值作为故障判据，其对过渡电阻的耐受能力较差，当发生三相高阻接地故障时可能难以可靠分辨故障区段。因此考虑引入工频故障电流幅值进行判别。

对于故障点至 SOP 端口侧之间的线路，流经其的工频故障电流幅值通常为 SOP 所允许输出的最大电流，而流经其特征电流幅值受过渡电阻的影响较小(上游线路阻抗与过渡电阻为并联关系)，因此特征电流幅值与工频电流幅值之比相对稳定。

对于线路首端至故障点之间的线路，流经其的工频故障电流由系统电源提供，通常幅值较大，相应的特征电流幅值与工频电流幅值之比较小，能够一定程度上提高该定位方法对过渡电阻的耐受能力。

引入工频故障电流幅值后，选取特征电流信号定值为

$$I_{tz/50,set} = \frac{I_{tz/50,min}}{K_{sen}} \quad (10)$$

式中: $I_{tz/50,\min}$ 为线路首端发生三相金属性短路时, SOP 侧的特征电流幅值与工频电流幅值之比; K_{sen} 为灵敏度系数, 可取 1.25~1.3。

当所测特征电流与工频电流比值大于定值时, 说明测点在故障点下游, 应上传未故障信息“0”; 当所测特征电流与工频电流比值小于定值时, 说明测点在故障点上游, 应上传故障信息“1”。

2.3 故障定位处理流程

集中控制型馈线自动化由配电网自动化主站通过通信系统集中收集各 FTU 的故障检测信息, 根据配电网拓扑结构和预设算法进行故障定位^[32-33]。

根据本文 1.2 节的分析可知, 对于分支线上的 FTU 仍适用原配电网故障定位方案, 在此不再赘述。而主干线上的 FTU 受 SOP 接入影响, 需更改其故障定位方案, SOP 主动控制流程与故障定位流程如图 6 和图 7 所示。

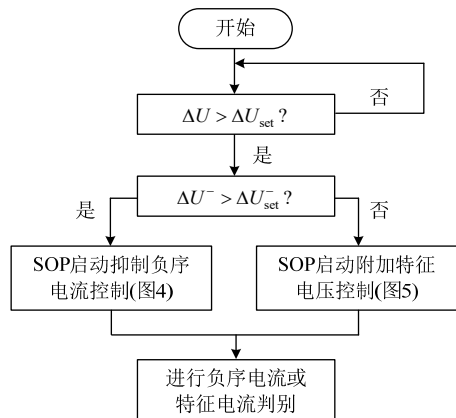


图6 SOP主动控制流程图
Fig. 6 SOP control flow chart

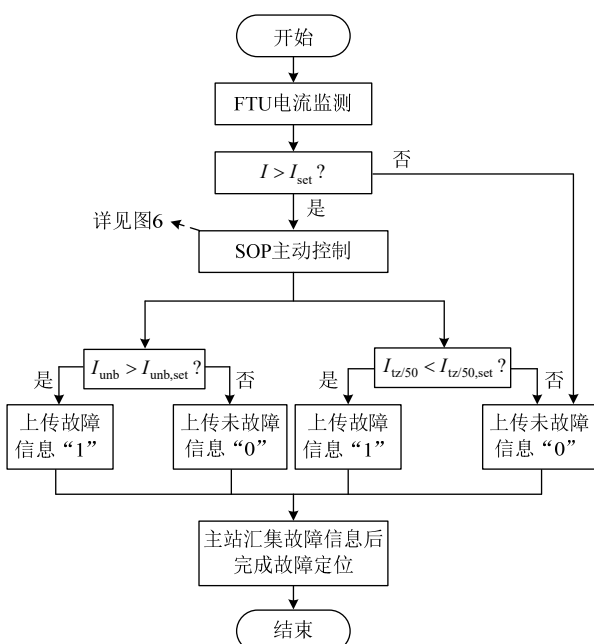


图7 故障定位流程图
Fig. 7 Fault location flow chart

具体流程如下:

1) SOP 通过检测端口处电压是否发生跌落判断是否发生故障, 若电压发生跌落则进入下一环节, 其中 ΔU_{set} 可按配电网正常运行时的最大电压波动来整定。

2) 根据是否有负序电压产生判断发生的故障是否为不对称故障, 其中 ΔU_{set}^- 可按配电网负荷不平衡时所产生的最大负序电压来整定。若发生的是不对称故障, 则 SOP 启动抑制负序电流的控制策略; 若发生的是对称故障, 则 SOP 启动附加特征电压的控制策略。

3) 故障发生后, FTU 检测到过电流, 待 SOP 控制稳定后, 启动故障信息上传流程。图中 I 为 FTU 检测到的故障电流, I_{set} 为原配电网故障定位方案的故障电流整定值, 可按照线路末端两相短路来整定。

4) 预先根据式(5)整定得到电流不平衡度判据定值 $I_{\text{unb,set}}$, 根据式(10)整定得到特征电流信号判据定值 $I_{\text{tz}/50,\text{set}}$ 。FTU 根据图示故障信息上报逻辑进行故障信息的上报(FTU 无需进行故障类型判别): 若发生两相短路故障, 系统电源侧线路电流不平衡度 I_{unb} 大于电流不平衡度整定值 $I_{\text{unb,set}}$, 上传故障信息 1, SOP 侧则上传未故障信息 0; 若发生三相短路故障, 系统电源侧特征电流 $I_{\text{tz}/50}$ 小于特征电流整定值 $I_{\text{tz}/50,\text{set}}$, 上传故障信息 1, SOP 侧则上传未故障信息 0。

5) 根据各 FTU 上传的故障信息, 主站汇集并进行分析处理后定位故障区段。

本文所提出的基于 SOP 主动控制的柔性互联配电网相间短路故障定位方法动作时序如图 8 所示。

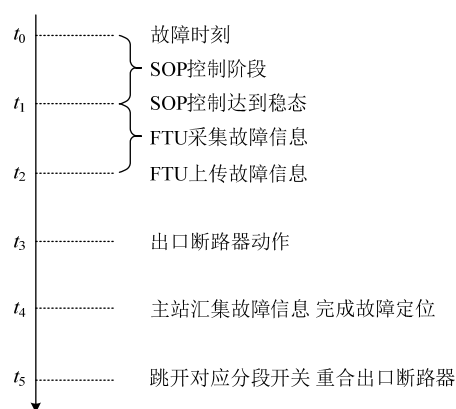


图8 故障定位方法动作时序图
Fig. 8 Action timing diagram of fault location method

- 1) 假设 t_0 时刻含 SOP 接入的配电网发生故障。
- 2) 经过 t_1 时刻 SOP 控制达到稳态。
- 3) t_1 至 t_2 时刻 FTU 进行故障信息采集, 并于 t_2

- 时刻向主站上传故障信息。
- 4) t_3 时刻出口断路器动作。
 - 5) t_4 时刻主站汇集故障信息，完成故障定位。
 - 6) t_5 时刻对应故障区段两端的分段开关收到主站命令跳开，出口断路器重合，完成故障隔离。

3 算例分析

含 SOP 的中性点不接地配电网算例如图 9 所示。图中，S1 为馈线首端配备的断路器，SOP 经断路器 S2 接入配电网，A，B，C，D，E，F 均为分段开关，并配备 FTU 以上报故障信息。D1—8 为各馈线名称，括号内的数字表示各馈线长度(单位：km)，线路单位长度阻抗参数为 $0.27+j0.3456\Omega/\text{km}$ ，负荷 S_{L1} 、 S_{L2} 、 S_{L3} 均为 $2+j0.5\text{MVA}$ 。S1 侧系统电源的短路容量为 100MVA 。SOP 主要参数如表 1 所示，FTU 整定参数如表 2 所示。

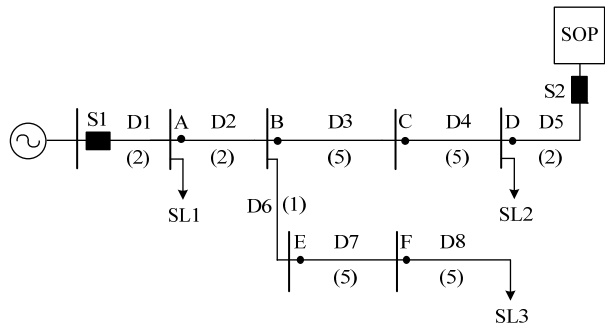


图 9 SOP 接入配电网具体算例
Fig. 9 Specific calculation example of SOP connected to distribution network

表 1 SOP 主要参数 Table 1 Main parameters of SOP	
参数	数值
交流额定电压/kV	10
系统额定频率/Hz	50
直流侧电容/mF	1
直流侧额定电压/kV	20
额定容量/MVA	10

表 2 FTU 整定参数 Table 2 FTU protection setting			
位置	I_{set}/kA	$I_{\text{unb,set}}$	$I_{\text{tz}/50,\text{set}}$
A	0.511	0.05	0.0016
B	0.511	0.05	0.0016
C	0.511	0.05	0.0016
D	0.511	0.05	0.0016
E	0.18	—	—
F	0.18	—	—

表 2 中： I_{set} 为故障电流整定值，按照线路末端发生两相短路进行整定； $I_{\text{unb,set}}$ 为电流不平衡度整定值，按照式(2)进行整定； $I_{\text{tz}/50,\text{set}}$ 为特征电流整定值，按照式(6)进行整定，灵敏度系数 K_{sen} 均取 1.25，可靠系数 K_{rel} 均取 1.25。

3.1 基于 SOP 主动控制的故障定位方法性能验证

首先以图 9 所示算例对原配电网故障定位方案的适用性进行分析：SOP 接入后，流经主干线上的分段开关 A、B、C、D 的反向最大短路电流为 SOP 所能提供的最大电流，假设为额定电流的 1.2 倍，即 0.693kA ，大于 A、B、C、D 处 FTU 故障电流定值，将会发生故障信息的误报，因此不能适用原配电网故障定位方案。而对于分支线上的分段开关 E、F，如 1.2 节的分析，无论在何处发生故障，分支线上的分段开关均不会流经反向电流，因此仍可适用原配电网故障定位方案。

3.1.1 电流不平衡度判据性能验证

以 D3 线路末端发生两相金属性短路为例，待 SOP 控制达到稳态后，故障定位结果如表 3 所示。

表 3 D3 线路末端两相短路故障定位结果 Table 3 Positioning results of two phase short circuit fault at the end of D3 line			
位置	故障电流/kA	电流不平衡度	故障信息
A	1.243	0.301	1
B	1.181	0.337	1
C	0.677	0.038	0
D	0.693	0.002	0
E	0.067	—	0
F	0.067	—	0

主干线上的 A、B、C、D 由于可能流经反向故障电流，需按照所提的改进故障定位方案，使用电流不平衡度判据进行判断，而分支线上的 E、F 由于不会流经反向故障电流，仍使用原配电网故障定位方案。加入所提电流不平衡度判据后，A、B 上传故障信息“1”，C、D 因不满足电流不平衡度判据，上传未故障信息“0”，E、F 因不满足故障电流判据，也上传未故障信息“0”。最终故障定位在 D3 线路区段，实现了故障的准确定位。

3.1.2 特征电流判据性能验证

以 D3 线路末端发生三相金属性短路为例，待特征信号稳定后，通过 FFT 得到各点三相平均特征电流与工频电流有效值，并计算其比值，故障定位结果如表 4 所示。

表 4 D3 线路末端三相短路故障定位结果 Table 4 Positioning results of three phase short circuit fault at the end of D3 line			
位置	故障电流/kA	特征电流	故障信息
A	1.21	0	1
B	1.161	0	1
C	0.683	0.009	0
D	0.693	0.0094	0
E	0.058	—	0
F	0.058	—	0

加入所提特征电流判据后,主干线上的 A、B 上报故障信息“1”,C、D 因不满足特征电流判据,上报未故障信息“0”,分支线上的 E、F 因不满足故障电流判据,上报未故障信息“0”,最终故障定位在 D3 线路区段,实现了故障的准确定位。

3.2 对过渡电阻的适应性

在 D3 和 D7 线路末端分别设置过渡电阻为 10Ω 和 50Ω 的两相短路和三相短路故障,故障定位结果如表 5—8 所示。

表 5 D3 线路末端经不同过渡电阻两相短路故障定位结果			
Table 5 Positioning results of two phase short circuit fault at the end of D3 line with different transition resistors			
位置($R_f=10\Omega$)	故障电流/kA	电流不平衡度	故障信息
A	1.153	0.226	1
B	1.082	0.254	1
C	0.69	0.03	0
D	0.693	0.001	0
E	0.074	—	0
F	0.074	—	0
位置($R_f=50\Omega$)	故障电流/kA	电流不平衡度	故障信息
A	0.913	0.0755	1
B	0.838	0.0859	1
C	0.715	0.007	0
D	0.693	0.002	0
E	0.084	—	0
F	0.084	—	0
表 6 D3 线路末端经不同过渡电阻三相短路故障定位结果			
Table 6 Positioning results of three phase short circuit fault at the end of D3 line with different transition resistors			
位置($R_f=10\Omega$)	故障电流/kA	特征电流	故障信息
A	1.024	0.0005	1
B	0.945	0.0006	1
C	0.7	0.0024	0
D	0.693	0.0029	0
E	0.08	—	0
F	0.08	—	0
位置($R_f=50\Omega$)	故障电流/kA	特征电流	故障信息
A	0.866	0.0011	1
B	0.783	0.0014	1
C	0.717	0.0018	0
D	0.693	0.0025	0
E	0.088	—	0
F	0.088	—	0

两相短路与三相短路都准确定位在相应的故障线路区段。相间短路过渡电阻一般不超过 30Ω^[42],仿真结果表明,所提判据具有良好的过渡电阻耐受能力。

3.3 对故障位置的适应性

分别在 D2 线路首端与 D8 线路末端设置两相短路与三相短路故障,故障定位结果如表 9 和表 10 所示。

表 7 D7 线路末端经不同过渡电阻两相短路故障定位结果			
Table 7 Positioning results of two phase short circuit fault at the end of D7 line with different transition resistors			
位置($R_f=10\Omega$)	故障电流/kA	电流不平衡度	故障信息
A	1.247	0.246	1
B	0.719	0.014	0
C	0.719	0.014	0
D	0.693	0.002	0
E	0.54	—	1
F	0.091	—	0
位置($R_f=50\Omega$)	故障电流/kA	电流不平衡度	故障信息
A	0.945	0.074	1
B	0.73	0.004	0
C	0.73	0.004	0
D	0.693	0.001	0
E	0.219	—	1
F	0.091	—	0
表 8 D7 线路末端经不同过渡电阻三相短路故障定位结果			
Table 8 Positioning results of three phase short circuit fault at the end of D7 line with different transition resistors			
位置($R_f=10\Omega$)	故障电流/kA	特征电流	故障信息
A	1.099	0.0006	1
B	0.711	0.0017	0
C	0.711	0.0017	0
D	0.693	0.0022	0
E	0.424	—	1
F	0.07	—	0
位置($R_f=50\Omega$)	故障电流/kA	特征电流	故障信息
A	0.886	0.0011	1
B	0.725	0.0018	0
C	0.725	0.0018	0
D	0.693	0.0025	0
E	0.181	—	1
F	0.093	—	0
表 9 D2 首端相间短路故障定位结果			
Table 9 Positioning results of phase short circuit fault at the beginning of D2 line			
位置(两相短路)	故障电流/kA	电流不平衡度	故障信息
A	2.022	0.445	1
B	0.702	0.03	0
C	0.702	0.03	0
D	0.693	0.001	0
E	0.158	—	0
F	0.158	—	0
位置(三相短路)	故障电流/kA	特征电流	故障信息
A	3.233	0	1
B	0.658	0.0029	0
C	0.658	0.0029	0
D	0.693	0.0032	0
E	0.005	—	0
F	0.005	—	0

表 10 D8 末端相间短路故障定位结果
Table 10 Positioning results of phase short circuit fault at the end of D8 line

位置 (两相短路)	故障电流/kA	电流不平衡度	故障信息
A	1.227	0.275	1
B	0.702	0.014	0
C	0.702	0.014	0
D	0.693	0.001	0
E	0.58	—	1
F	0.58	—	1

位置 (三相短路)	故障电流/kA	特征电流	故障信息
A	1.225	0.007	1
B	0.703	0.0018	0
C	0.703	0.0018	0
D	0.693	0.0022	0
E	0.706	—	1
F	0.706	—	1

由表 9、表 10 的结果可知，在不同故障位置发生相间短路故障后，所提判据均能够使 FTU 准确上报故障信息，最终故障定位在 D2、D8 线路区段，实现了故障的准确定位，表明所提故障定位方法对故障位置具有良好的适应性。

4 结论

本文针对 SOP 接入配电网后故障电流双向流动导致的原配电网故障定位方案失效问题，提出了一种基于 SOP 主动控制的配电网相间短路故障定位方法，并通过仿真验证了其可行性，主要结论如下：

1) 配电网发生相间短路故障后，针对两相短路故障，SOP 采用抑制负序的控制策略，FTU 根据故障点两侧电流不平衡度差异构造判据，实现两相短路故障的准确定位。

2) 针对三相短路故障，由于不存在负序分量，SOP 采用注入特征信号的控制策略，FTU 根据故障点两侧特征电流差异构造判据，实现三相短路故障的准确定位。

3) 所提方法可以解决因 SOP 所提供的反向故障电流导致的配电网故障信息误报问题，兼容现有集中控制型馈线自动化系统，FTU 仅需本地电流信息就能准确上传故障信息，不需要额外配置方向元件，节省了配电网改造成本，提高了配电网故障定位的可靠性。

4) 本文所提出的故障定位方案主要针对于配电网中发生的相间短路故障，而配电网的单相接地故障特征受接地方式影响较大，在小电流接地系统中故障特征不明显，还需开展进一步的研究。

参考文献

[1] 王成山, 季节, 冀浩然, 等. 配电系统智能软开关技术及应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 1-14.
WANG Chengshan, JI Jie, JI Haoran, et al. Technologies and application of soft open points in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 1-14(in Chinese).

[2] 胡鹏飞, 朱乃璇, 江道灼, 等. 柔性互联智能配电网关键技术研究进展与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 2-12.
HU Pengfei, ZHU Naixuan, JIANG Daozhuo, et al. Research progress and prospects of key technologies of flexible interconnected smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 2-12(in Chinese).

[3] 张忠会, 雷大勇, 李俊, 等. 基于自适应 ϵ -支配多目标粒子群算法的含 SOP 的主动配电网源-网-荷-储双层协同规划模型[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2199-2209.
ZHANG Zhonghui, LEI Dayong, LI Jun, et al. Source-network-load-storage bi-level collaborative planning model of active distribution network with SOP based on adaptive ϵ -dominating multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2199-2209(in Chinese).

[4] 王秋杰, 金涛, 申涛, 等. 利用多因素降维的配电网区段定位完全解析模型[J]. 电工技术学报, 2019, 34(14): 3012-3024.
WANG Qiujie, JIN Tao, SHEN Tao, et al. A complete analytic model of section location in distribution network based on multi-factor dimensionality deduction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(14): 3012-3024(in Chinese).

[5] 李振钊, 王增平, 张玉玺. 基于多源信息融合的有源配电网故障测距新方法[J]. 电网技术, 2023, 47(8): 3448-3456, doi: 10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0535.
LI Zhenzhao, WANG Zengping, ZHANG Yuxi. New method of fault location for active distribution network based on multi-source information fusion[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3448-3456, doi: 10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0535(in Chinese).

[6] 陈晓龙, 孙丽蓉, 李永丽, 等. 基于图注意力网络和一致性风险控制配电网故障区段定位方法[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 4866-4876.
CHEN Xiaolong, SUN Lirong, LI Yongli, et al. A fault section location method based on graph attention network and conformal risk control in distribution network[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 4866-4876(in Chinese).

[7] 缪希仁, 赵丹, 刘晓明, 等. 含分布式电源配电网短路保护研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 3006-3019.
MIAO Xiren, ZHAO Dan, LIU Xiaoming, et al. A research review of short-circuit protection in distribution network with distributed generation[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 3006-3019(in Chinese).

[8] 肖澍昱, 林湘宁, 魏繁荣, 等. 面向含不可测分支配电线路不对称故障可靠辨识的负序电流比相保护判据[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2435-2447, doi: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.212083.
XIAO Shuyu, LIN Xiangning, WEI Fanrong, et al. Phase comparison protection of negative sequence current for distribution lines with unmeasurable branches[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2435-2447, doi: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.212083(in Chinese).

[9] 李昀宸, 吕志鹏, 刘文龙, 等. 柔性互联配电台区联合优化配置[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4223-4232.
LI Yunchen, LÜ Zhipeng, LIU Wenlong, et al. Coordinated optimize configuration of flexible interconnection of distribution station

- area[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4223-4232(in Chinese).
- [10] 张健磊, 高湛军, 陈明, 等. 考虑复故障的有源配电网故障定位方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(11): 2265-2276.
ZHANG Jianlei, GAO Zhanjun, CHEN Ming, et al. Fault location method for active distribution networks considering combination faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(11): 2265-2276(in Chinese).
- [11] 王秋杰, 金涛, 谭洪, 等. 基于分层模型和智能校验算法的配电网故障定位技术[J]. 电工技术学报, 2018, 33(22): 5327-5337.
WANG Qiujie, JIN Tao, TAN Hong, et al. The technology on fault location of distribution network based on hierarchical model and intelligent checking algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5327-5337(in Chinese).
- [12] 李振钊, 王增平, 张玉玺, 等. 基于升维线性规划的主动配电网故障区段定位方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(24): 122-132.
LI Zhenzhao, WANG Zengping, ZHANG Yuxi, et al. Fault section location method for active distribution network based on linear programming with ascending dimension[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 122-132(in Chinese).
- [13] 和敬涵, 王语然, 李猛, 等. 基于电流波形畸变特征的高比例光伏配电网故障方向判别原理[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 4856-4865.
HE Jinghan, WANG Yuran, LI Meng, et al. New fault direction identification based on current distortion characteristics in high proportion PV distribution system[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 4856-4865(in Chinese).
- [14] 张惠智, 李永丽, 陈晓龙, 等. 具有低电压穿越能力的光伏电源接入配电网方向元件新判据[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 106-112.
ZHANG Huizhi, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. New criteria of directional component in distribution network with photovoltaic generator of low voltage ride through capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 106-112(in Chinese).
- [15] 李彦宾, 贾科, 毕天姝, 等. 逆变型电源对故障分量方向元件的影响机理研究[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3230-3236.
LI Yanbin, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Influence mechanism of inverter-interfaced renewable energy generators on fault component based directional relay[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3230-3236(in Chinese).
- [16] 郑涛, 贾仕龙, 潘玉美, 等. 基于配电网原故障定位方案的分布式电源准入容量研究[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2257-2262, doi: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.08.037.
ZHENG Tao, JIA Shilong, PAN Yumei, et al. Research on allowed penetration level of DGs based on the traditional fault location methods[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2257-2262, doi: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.08.037(in Chinese).
- [17] 邓丰, 李欣然, 曾祥君, 等. 基于多端故障行波时差的含分布式电源配电网故障定位新方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4399-4409, doi: 10.13334/j.0258-8013.psee.172480.
DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. A novel multi-terminal fault location method based on traveling wave time difference for radial distribution systems with distributed generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4399-4409, doi: 10.13334/j.0258-8013.psee.172480(in Chinese).
- [18] 和敬涵, 李文立, 张大海, 等. 基于节点分支电流幅值的含 DG 配网差动保护原理[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3601-3608, doi: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.2066.
HE Jinghan, LI Wenli, ZHANG Dahai, et al. Differential protection scheme based on current amplitude of branch node for distribution network with DG[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3601-3608, doi: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.2066(in Chinese).
- [19] 张雪松, 马啸, 章雷其, 等. 有源配电网含不可测分支线路新型电流幅值差动保护判据[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 76-81, doi: 10.16081/j.epae.202001006.
ZHANG Xuesong, MA Xiao, ZHANG Leiqi, et al. Novel current amplitude differential protection criterion for line with unmeasurable branch in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 76-81, doi: 10.16081/j.epae.202001006(in Chinese).
- [20] 庞清乐, 刘昱超, 李希年, 等. 基于电流极性比较的主动配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 101-108.
PANG Qingle, LIU Yuchao, LI Xinian, et al. Current polarity comparison based fault location for active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 101-108(in Chinese).
- [21] 邢晓东, 石访, 张恒旭, 等. 基于同步相量的有源配电网自适应故障区段定位方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(23): 4920-4930.
XING Xiaodong, SHI Fang, ZHANG Hengxu, et al. Adaptive section location method for active distribution network based on synchronized phasor measurement[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(23): 4920-4930(in Chinese).
- [22] 徐萌, 邹贵彬, 陈宁, 等. 基于故障超前相的有源配电网能量方向纵联保护方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 58-64, doi: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.01.010.
XU Meng, ZOU Guibin, CHEN Ning, et al. Energy-directional pilot protection based on leading-phase for active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 58-64, doi: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.01.010(in Chinese).
- [23] 毕天姝, 李彦宾, 贾科, 等. 基于暂态电流波形相关性的新能源场站送出线路纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 2012-2019.
BI Tianshu, LI Yanbin, JIA Ke, et al. Transient current waveform similarity based pilot protection for transmission lines connected to renewable energy power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2012-2019(in Chinese).
- [24] 贾科, 杨哲, 魏超, 等. 基于斯皮尔曼等级相关系数的新能源送出线路纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15): 103-111.
JIA Ke, YANG Zhe, WEI Chao, et al. Pilot protection based on spearman rank correlation coefficient for transmission line connected to renewable energy source[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 103-111(in Chinese).
- [25] 桑在中, 潘贞存, 丁磊, 等. “S注入法”选线定位原理及应用[J]. 中国电力, 1997, (6): 44-45, 62.
SANG Zaizhong, PAN Zhencun, DING Lei, et al. The principle and application of “S injection method” for faulty line selection[J]. Electric Power, 1997, (6): 44-45, 62(in Chinese).
- [26] 王凤, 康怡. 基于脉冲信号注入法的小电流接地选线技术[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 90-93, 98.
WANG Feng, KANG Yi. Pulse signal injection based faulty line detection for small current neutral grounding system[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 90-93, 98(in Chinese).
- [27] 于盛楠, 鲍海, 杨以涵. 配电线路故障定位的实用方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 86-90.
YU Shengnan, BAO Hai, YANG Yihan. Practicalization of fault location in distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 86-90(in Chinese).
- [28] 杜刚, 刘迅, 苏高峰. 基于 FTU 和 “S” 信号注入法的配电网接地故障定位技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 73-76.

- DU Gang, LIU Xun, SU Gaofeng. Research on technology of grounding fault location combining FTU and "S" signal injecting method in distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 73-76(in Chinese).
- [29] 叶雨晴, 马啸, 林湘宁, 等. 基于 SOP 的主动式谐振接地配电网单相接地故障区段定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1453-1464, doi: 10.13334/j.0258-8013.psee.180866.
- YE Yuqing, MA Xiao, LIN Xiangning, et al. Active fault locating method based on SOP for single phase grounding faults in the resonant grounding distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1453-1464, doi: 10.13334/j.0258-8013.psee.180866(in Chinese).
- [30] LONG Chao, WU Jianzhong, THOMAS L, et al. Optimal operation of soft open points in medium voltage electrical distribution networks with distributed generation[J]. Applied Energy, 2016, 184: 427-437.
- [31] 金基达, 宋依群, 范春菊, 等. 考虑逆变电源控制策略的电流保护整定计算[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3690-3699.
- JIN Shenda, SONG Yiqun, FAN Chunju, et al. Calculation of current protection setting based on inverter generation control strategy[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3690-3699(in Chinese).
- [32] 张志华, 刘健, 张小庆, 等. 配电自动化系统中相间短路故障处理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 143-151.
- ZHANG Zhihua, LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, et al. Programming of inter-phase short circuit fault processing for distribution automation systems[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 143-151(in Chinese).
- [33] 尚博阳, 罗国敏, 茹嘉昕, 等. 基于有限量测信息的多分支配电线路故障定位方法[J]. 高电压技术, 2023, 48(6): 2308-2317.
- SHANG Boyang, LUO Guomin, RU Jiaxin, et al. Fault location method of multi-branch distribution lines based on limited measurement information[J]. High Voltage Engineering, 2023, 48(6): 2308-2317(in Chinese).
- [34] AITHAL A, LONG Chao, CAO Wanyu, et al. Impact of soft open point on feeder automation[C]//2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON). Leuven: IEEE, 2016: 1-6.
- [35] 钟庆, 罗擎天, 王钢, 等. 基于动态相量扰动量的光伏并网系统间谐波分析模型[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 1177-1184.
- ZHONG Qing, LUO Qingtian, WANG Gang, et al. Interharmonic analysis model for grid-connected PV system based on dynamic phasor disturbances[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 1177-1184 (in Chinese).
- [36] 涂娟, 汤宁平. 基于改进型 DSOGI-PLL 的电网电压同步信号检测[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2350-2356.
- TU Juan, TANG Ningping. Synchronizing signal detection for grid voltage based on modified DSOGI-PLL[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2350-2356(in Chinese).
- [37] 宋毅, 孙充勃, 李鹏, 等. 基于智能软开关的有源配电网供电恢复方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4390-4398.
- SONG Yi, SUN Chongbo, LI Peng, et al. SOP based supply restoration method of active distribution networks using soft open point[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4390-4398(in Chinese).
- [38] 刘飞, 查晓明, 段善旭. 三相并网逆变器 LCL 滤波器的参数设计与研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 110-116.
- LIU Fei, ZHA Xiaoming, DUAN Shanxu. Design and research on parameter of LCL filter in three-phase grid-connected inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 110-116(in Chinese).
- [39] 宋国兵, 王婷, 张保会, 等. 利用电力电子装置的探测式故障识别技术分析展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 173-183.
- SONG Guobing, WANG Ting, ZHANG Baohui, et al. Analysis and prospect of detective fault identification technologies using power electronic device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 173-183(in Chinese).
- [40] 杨赛昭, 向往, 杨睿璋, 等. 基于半桥型 MMC 和混合式 DCCB 的柔直系统直流故障自适应重合闸技术[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4440-4451.
- YANG Saizhao, XIANG Wang, YANG Ruizhang, et al. Research on adaptive reclosing technology for the half-bridge MMC and hybrid DC circuit breaker based on HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4440-4451(in Chinese).
- [41] 宋国兵, 王婷, 张晨浩, 等. 利用全桥 MMC 注入特征信号的直流自适应重合闸方法[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 149-156.
- SONG Guobing, WANG Ting, ZHANG Chenhao, et al. Adaptive auto-reclosing of DC line based on characteristic signal injection with FB-MMC[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 149-156(in Chinese).
- [42] 宋国兵, 黄炜, 王晓卫, 等. 一种配电线路单端全线速动保护方案[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 338-345.
- SONG Guobing, HUANG Wei, WANG Xiaowei, et al. A whole-line quick-action protection scheme for distribution lines based on single-end electrical parameters[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 338-345(in Chinese).



郑涛

在线出版日期: 2024-08-08。

收稿日期: 2023-12-04。

作者简介:

郑涛(1975), 男, 教授, 博士生导师, 通信作者, 研究方向为电力系统继电保护, E-mail: zhengtao_sf@126.com;

沈文韬(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统保护与控制, E-mail: 674114885@qq.com。

(编辑 李健一)