有源配电网集中式保护方案容错性分析及改进策略

李晔[1]，李雯[1]，何佳伟[2]，李斌[2]，贾娜[1]
（1. 智能配用电装备与系统全国重点实验室（河北工业大学），天津市 300401；
2. 智能配用电装备与系统全国重点实验室（天津大学），天津市 300072）

摘　要：【目的】高比例分布式光伏接入配电系统后，馈线终端装置（feeder terminal unit，FTU）方向辨识受相角偏移、通信异常等影响，导致基于图论的集中式保护在信息畸变条件下出现误动、拒动等问题。为此，本文提出了一种融合故障演化特征的多阶段自适应保护改进方法。【方法】首先，基于配电网拓扑矩阵和FTU上传的方向过流信息构建故障辨识矩阵，获得初步故障区段；其次，针对初步辨识结果中出现的多重故障区段，引入评价函数对候选故障组合进行筛选，以降低由远端FTU信息畸变引发的超范围动作风险；进一步地，针对上一级线路故障被误判为研究区段故障以及独立末端线路故障漏判等场景，利用初次隔离后的残余过流特征进行二次复核，实现故障范围的二次精确识别。【结果】基于PSCAD/EMTDC仿真平台构建10 kV配电网，重点对传统方案因上传错误信息导致故障未能切除或保护动作范围不足的问题进行分析。仿真结果表明，该方案通过二次校验精准识别残留故障电流，并补充切除实际的故障区段，可有效应对多种FTU信息畸变工况。【结论】改进集中式保护方案较传统集中式保护方案提升了系统的容错能力、保护动作可靠性及选择性。与单纯依赖FTU辨识信息相比，该方案拓扑适应性强、判据简洁，降低了有源配电网的保护失效风险。

关键词：有源配电网；图论；集中式保护；容错能力；故障辨识
中图分类号：TM72　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-7229（2026）11-0046-12
DOI：10.12204/j.issn.1000-7229.2026.11.004

Fault Tolerance Analysis and Improvement Strategies for Centralized Protection Schemes of Active Distribution Networks

LI Ye[1], LI Wen[1], HE Jiawei[2], LI Bin[2], JIA Na[1]
（1. State Key Laboratory of Smart Power Distribution Equipment and System, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. State Key Laboratory of Smart Power Distribution Equipment and System, Tianjin University, Tianjin 300072, China）

ABSTRACT: [**Objective**] With the integration of high-penetration distributed photovoltaic generation into distribution networks, the directional identification of feeder terminal units (FTU) is susceptible to phase-angle deviation and communication abnormalities. As a result, graph-theory-based centralized protection may suffer from maloperation or failure to operate under information distortion conditions. To address this issue, a multi-stage adaptive protection improvement scheme incorporating fault evolution characteristics is proposed. [**Methods**] First, a fault identification matrix is constructed based on the distribution network topology matrix and the directional overcurrent information uploaded by FTU, so as to obtain the preliminary fault section. Then, for multiple fault sections appearing in the preliminary identification result, an evaluation function is introduced to screen candidate fault combinations, thereby reducing the risk of over-range operation caused by remote FTU information distortion. Furthermore, for scenarios in which an upstream line fault is misidentified as a fault in the studied section, or an independent terminal-line fault is missed, secondary verification is performed using the residual overcurrent characteristics after the initial isolation, so as to realize secondary accurate identification of the fault range. [**Results**] A 10 kV distribution network is built based on the PSCAD/EMTDC simulation platform, and the problems of failed fault clearance or insufficient protection action range caused by the upload of incorrect information in the traditional scheme

基金项目：国家自然科学基金项目（52207088）；河北省自然科学基金资助项目（E2024202184）

© Editorial Department of Electric Power Construction. OA under CC BY-NC-ND 4.0.

are analyzed. The simulation results show that the scheme can accurately identify the residual fault current through secondary verification and supplement the actual fault section for clearance, effectively dealing with various FTU information distortion conditions. [**Conclusions**] The improved centralized protection scheme significantly enhances the fault tolerance, protection action reliability and selectivity of the system compared with the traditional centralized protection scheme. Compared with the scheme that solely relies on FTU identification information, this scheme has strong topological adaptability, simple criteria, and reduces the risk of protection failure in active distribution networks.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52207088) and Natural Science Foundation of Hebei Province Funding Project (No. E2024202184).

KEYWORDS: active distribution network; graph theory; centralized protection; fault-tolerant capability; fault identification

0　引　言

在全球能源体系转型升级与“双碳”目标持续推进的背景下，光伏发电在我国电力系统中的装机规模不断提高。国家能源局2025年可再生能源并网运行情况显示，2025年全国光伏新增装机容量为3.17亿kW，同比增长14%。截至2025年12月底，全国光伏发电累计装机容量达到12亿kW，同比增长35%，其中分布式光伏累计装机容量达到5.3亿kW[1]。上述数据表明，分布式光伏已成为我国光伏装机增长的重要组成部分，其大规模接入正在持续改变配电网的潮流分布和故障电流特性[2]。

不同于传统同步机电源，分布式光伏高比例接入配电网时，会导致配电网的故障特性出现明显变化[3-4]。首先，故障后分布式光伏所能提供的故障电流幅值受限，通常不超过额定值的120%，影响基于电流幅值辨识故障的保护动作性能[5]。故障后分布式光伏切换为低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)控制模式，故障电流相位与并网点电压的实际情况强关联，呈现相角受控特征，导致基于电压-电流相位的方向元件性能劣化甚至失效[6]。此外，分布式光伏电源的大规模并网，致使配电网由传统单电源辐射结构转变为多电源网络，导致故障电流路径更为复杂，为保护整定和配置带来挑战[7]。因此，传统保护方法难以完全适用新型配电网的需求[8-12]，相关研究从电流差动[13]、单端暂态量[14]及接地故障消弧[15]等方面提出了改进保护方案。

随着配电自动化系统的发展，馈线终端装置(feeder terminal unit, FTU)能够将各开关处的过电流状态和方向信息上传至配电主站，为故障区段辨识提供了多点信息来源[16-17]。在此基础上，分布-集中协同定位[18]和基于FTU上传信息和网络拓扑关系的集中式保护方法得到广泛研究。后者通常先根据配电网开关连接关系建立拓扑矩阵，再结合FTU上传的方向过流信息形成故障辨识矩阵，从而判断故障区段[19-21]。相比传统就地式电流保护，该方法能够利用全网FTU信息进行集中判别，具有判据清晰、计算速度快和易于实现等特点。此外，波形相似性分析[22]、基于GAF-ResNet50的故障识别[23]以及电缆故障特征提取与检测[24-25]也被用于故障定位。

对于依赖FTU上传信息的集中式保护，信息异常会影响故障区段辨识的准确性。为此，文献[26-32]提出了基于优化算法的故障辨识方法。其中，粒子群算法[26]、免疫算法[29]、蚁群算法[31]、量子退火算法[32]是通过构建评价函数，找出最优解来实现故障区段精准定位，具有一定的容错能力。但算法计算复杂度高，难以满足电力系统保护装置快速响应的需求。且在处理节点数量较多的复杂配电系统时，优化算法的运算能力受限，难以找到最优解。

与上述优化算法相比，基于图论的集中式保护算法具有原理简单、计算速度快的优势，但容错能力较差[33-37]。例如，文献[33]利用正序故障分量的相位关系来判别故障，但对通信可靠性要求极高。文献[35-36]通过构建矩阵来表征节点间的连接关系，但在处理FTU上传信息漏缺或畸变情形时，仅凭保护装置上传的信息可能无法准确定位，导致实际失电区域比信息完备时扩大；文献[37]利用减法判据实现故障线路的精准定位，虽然在个别智能电子设备(intelligent electronic device, IED)故障或信息缺失的情况下仍能进行定位，但无法精确定位到具体的故障线路段。针对上述问题，文献[38]将矩阵算法和智能优化算法相融合，增强了算法的容错性，得到相互补充的故障辨识方案。然而，现有文献对基于图论的集中式保护方案的容错性能的分析研究尚显不足。

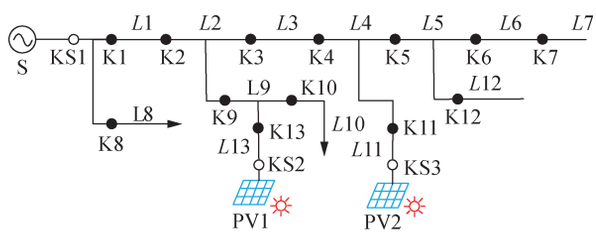
基于上述问题，本文首先以基于图论的集中式保护方法为基础，构建配电网拓扑矩阵与FTU方向过流信息相结合的故障辨识矩阵，实现故障区段的初步辨识。其次，针对FTU信息漏报、误报及方向误判引起的保护误动、欠范围动作和故障漏切等问题，

分析普通区段、末端区段和T接区段下集中式保护的失效模式及容错边界。然后，针对多重候选故障区段、上一级线路故障误判为研究区段故障以及独立末端线路故障漏判等场景，引入评价函数筛选和动作后残余过流复核，提出计及故障演化特征的多阶段自适应改进保护方案。该方案不改变集中式保护的基本判别框架，在保持判据清晰和计算速度较快等特点的基础上，提高了FTU信息畸变条件下保护动作的选择性和可靠性。最后，基于PSCAD/EMTDC仿真平台验证所提方案的有效性。

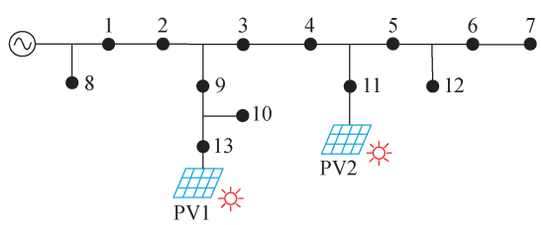
1 基于图论理论的集中式保护方案

1.1 集中式保护辨识故障的基本原理

为实现有源配电网故障的快速隔离，本文基于图论原理构建集中式保护的拓扑关联与故障辨识矩阵。配电网拓扑如图1所示。图中：S代表主电源；K1—K13表示线路开关；KS1—KS3表示电源开关；$L1$—$L13$表示区段编号。



(a) 13节点有源配电网拓扑图



(b) 13节点复杂配电网有向图

图1 13节点配电网拓扑与有向图

Fig. 1 13-node distribution network topology and directed graph

规定交流主电源流向光伏电源及线路末端为功率流动的正方向。首先，构建一个描述配电网拓扑结构的$n\times n$维矩阵$\boldsymbol{W}=(W_{ij})_{n\times n}$，其中$n$是节点的总数。在此基础上，对馈线区段进行划分：沿正向路径经过的首个节点定义为主节点，其余为从节点，仅当节点i作为主节点、节点j为从节点($i\neq j$)且两者位于同一区段并构成正向连接时，$W_{ij}=1$；其他情形下，$W_{ij}=0$。

接着，构建$n\times 1$维的节点故障信息矩阵$\boldsymbol{G}=(G_{i1})_{n\times 1}$。$G_{i1}$取值为1表示节点$i$检测到正向故障过电流；取值为0表示节点$i$未检测到故障过电流；取值为−1则表示节点$i$检测到反向故障过电流。基于上述信息，最终形成故障辨识矩阵$\boldsymbol{B}=(B_{ij})_{n\times n}$，如式(1)所示。

$$B_{ij}=\begin{cases}W_{ij}, i\neq j\\ G_{i1}, i=j\end{cases} \tag{1}$$

故障辨识矩阵$\boldsymbol{B}$的非对角元素描述配电网节点之间的拓扑连接关系，对角元素描述各FTU上传的故障方向信息。根据$\boldsymbol{B}$中元素的组合关系，可得到故障区段的初步辨识结果[39]。上述过程属于已有图论集中式保护方法的基本辨识规则，本文仅将其作为后续容错能力分析的基础环节。

1.2 融合评价函数的集中式保护算法

上述初步故障辨识结果依赖FTU上传信息的准确性。当FTU信息发生畸变、漏报或误报时，初步辨识结果可能出现多重候选故障区段，偏离实际故障状态。为提高信息异常条件下的容错能力，本文引入评价函数对初步辨识结果及其拆分组合进行筛选。该评价函数由两部分组成，分别用于衡量候选故障组合与当前FTU上传信息的匹配程度，以及约束候选组合中的故障区段数量，如式(2)所示。

$$F_{it}(\boldsymbol{S}_B)=\sum_{i=1}^{n}\left|G_{i1}-G_{i1}^{*}(\boldsymbol{S}_B)\right|+w\sum_{j=1}^{m}\left|\boldsymbol{S}_B(j)\right| \tag{2}$$

式中：$F_{it}(\boldsymbol{S}_B)$表示评价函数在拆分组合向量$\boldsymbol{S}_B$下的计算结果；$\boldsymbol{S}_B$为拆分组合向量，其第j个元素$\boldsymbol{S}_B(j)$用于表征第j个馈线区段的状态；$\boldsymbol{S}_B(j)=1$表示该区段存在故障，$\boldsymbol{S}_B(j)=0$表示该区段正常运行；m为区段总数，本文中$m=n$；$G_{i1}^{*}(\boldsymbol{S}_B)$表示候选故障组合$\boldsymbol{S}_B$下第$i$个FTU的期望上传状态；$G_{i1}$表示第$i$个FTU的实际上传状态；$w$为惩罚系数，由于单个FTU状态不匹配对应的误差权重为1，为使故障区段数量惩罚项仅在候选组合匹配程度接近时发挥辅助修正作用，本文w取0.5。

$$G_{i1}^{*}(\boldsymbol{S}_B)=k_{s1}[1-S_1^{*}(i)]\cdot S_2^{*}(i)-k_{s2}[1-S_3^{*}(i)]\cdot S_4^{*}(i) \tag{3}$$

式中：k_{s1}、k_{s2}分别表征主电源与分布式电源的接入状态系数，当对应电源投入运行并向故障点提供故障电流时，接入状态系数取1，反之，接入状态系数取0；$S_1^{*}(i)$—$S_4^{*}(i)$分别代表第i个开关上游区域至各电源、开关下游区域全部馈线区段、开关下游区域至各电源、开关上游区域所有馈线区段的逻辑或运算值。

引入评价函数后，当初步辨识结果为多重故障区段时，可对其进行拆分组合，并选取评价函数值最小的组合作为修正后的故障辨识结果。然而，评价函数仍依赖故障发生时单一时间断面的FTU上传信息。若错误信息矩阵与其他真实故障场景的信息矩阵相同或高度相似，仅依靠评价函数仍难以完成有效区分。因此，后续需进一步分析FTU信息畸变下

集中式保护的失效模式，并提出相应改进措施。

2　集中式保护方案容错能力评估

2.1　集中式保护方案容错机理分析

在有源配电网中，分布式光伏的接入改变了系统的短路电流分布。特别是在故障暂态期间，光伏逆变器受低电压穿越控制策略影响，其输出的短路电流呈现幅值受限及相角偏移的非线性特征，容易导致FTU的方向元件发生误判。

为统一描述FTU信息异常，本文将FTU上传状态定义为1、0、−1。其中，1表示检测到正向故障过电流，−1表示检测到反向故障过电流，0表示未检测到故障过电流或未上传有效信息。基于此，FTU信息畸变可归纳为三类：一是漏报，即应上传1或−1时误上传为0；二是方向误判，即1与−1之间误传；三是误报，即应上传0时误上传为1或−1。

需要说明的是，本文重点研究FTU方向过流信息形成后的集中式故障辨识及容错修正问题。对于相间短路、低阻接地等能够形成有效FTU过流及方向状态的故障，可直接纳入本文故障信息矩阵进行分析；对于高阻接地等弱故障电流场景，若方向过流判据无法可靠启动，则需先结合零序电压、零序电流或暂态接地特征等判据形成有效上传信息，再开展后续故障区段辨识与容错修正。

为分析FTU信息畸变对保护结果的影响，本文按照馈线区段的连接形式，将其分为普通区段、末端区段和T接区段。普通区段通常具有两端FTU信息，故障判断存在一定冗余；末端区段主要依赖单端FTU信息，当该FTU发生漏报或方向误判时，容易造成故障漏切；T接区段包含一个上游节点和两个下游分支节点，多个FTU方向信息之间存在组合关系，故障辨识更易受单个FTU信息错误影响。考虑到光伏接入会改变分支故障电流的方向和幅值，本文进一步按照T接区段下游分支是否接入光伏，将其分为双分支含PV、单分支含PV和无PV三类进行分析。

采用枚举法遍历信息错误场景。以普通区段为例，FTU的上传信息向量记为$[K_a, K_b]$，其中，K_a、K_b分别表示研究区段上游侧、下游侧FTU的上传状态。若标准信息为$[1, -1]$，当上游FTU（K_a=1）信息错误时，生成的错误向量为$[0, -1]$或$[-1, -1]$。同理可分析得到末端区段（$[K_a]$）和T接区段（$[K_a, K_{b1}, K_{b2}]$）。通过此方法遍历所有单一信息错误场景，并将故障辨识结果与实际情况进行对比，即可系统性地提取出集中式保护算法的容错规律。

相关故障区段示意如附录图A1所示。故障辨识区段，可汇总为：1）超范围（over-range，OR）动作。保护装置根据所辨识的故障区段动作导致停电范围扩大，分为一级超范围动作（OR_lv. 1）、二级超范围动作（OR_lv. 2）。2）欠范围（under-range，UR）动作。保护动作未能切除全部故障。3）保护正确动作（true，T）。4）故障未被切除（fault not removed，FNR）。

最后，将信息出现错误时的故障辨识区段同实际故障区段进行比较，并将经过枚举得到的结果以表格形式给出。现遴选具有代表性的普通区段、T接区段及末端区段信息出错算例，分析其对集中式保护的影响，结果列于附录表A1—A3。

2.2　集中式保护方案容错规律系统归纳

通过对附录表A1—A3进行推演与归纳分析可知，传统集中式保护方案的失效机理可归纳为以下三种边界模式，如图2所示。

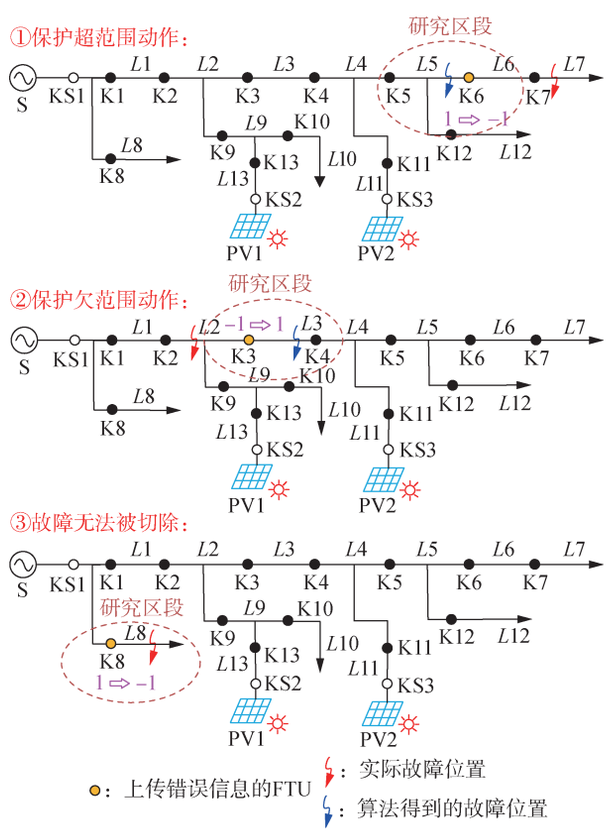


图2　集中式保护方案容错性能图

Fig. 2　Fault tolerance performance diagram of centralized protection scheme

1）通常情况下，若FTU上传的信息存在错误，可能使保护装置出现超范围动作，从而致使停电范围扩大；2）在研究区段上一级线路发生故障的状况下，若研究区段近故障线路侧的FTU上传的故障信息由“0”或“−1”错误地上传为“1”，致使保护系统误判为研究区段故障，导致保护欠范围动作；3）由于末端线路仅依靠一端的FTU信息来进行故障判别，当原本

的FTU故障信息由“1”误传为“0”或者“-1”时，系统判定为无故障，造成故障线路无法被切除。

融合评价函数的集中式保护算法，能够显著改善故障位置远端线路FTU信息错误所引发的超范围动作问题，有效缩减停电范围。然而，对于保护欠范围动作，因FTU获取的错误故障信息矩阵与发生于研究区段的正确故障信息矩阵完全相同，无论是融合评价函数的集中式保护算法，还是目前常用的智能优化算法，均无法识别这一错误。此外，针对独立末端线路发生故障而其FTU误传信息的情况，系统会判定无故障，即便是引入评价函数也无法识别，最终导致故障线路无法切除。

3 多阶段自适应的改进集中式保护方案

3.1 改进集中式保护的执行流程

针对FTU上传信息错误导致保护动作范围不足、故障无法有效切除，以及系统误判无故障致使实际故障漏切等问题，本章提出一种具有多阶段自适应能力的改进集中式保护方案。该方案的执行流程如图3所示。

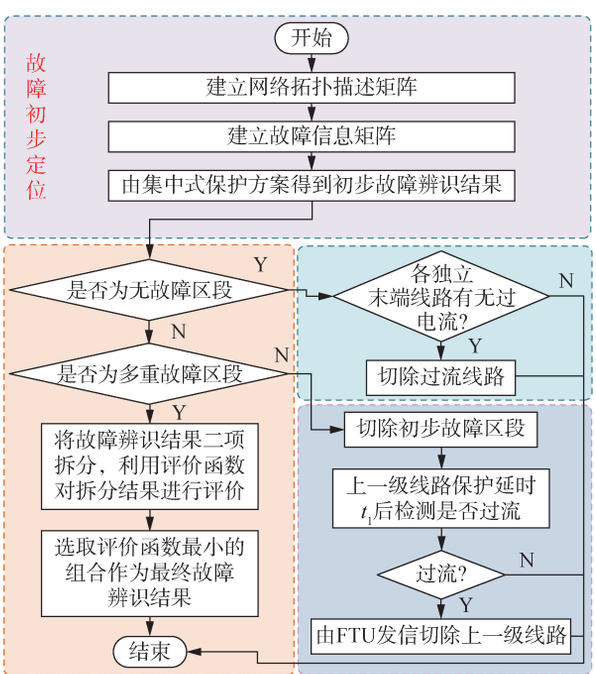


图3 具有容错能力的集中式保护改进方案

Fig. 3 Improved centralized protection scheme with fault tolerance capability

保护启动后，主站首先采集各节点FTU过电流与方向状态，构建故障信息矩阵，并结合网络拓扑描述矩阵生成故障辨识矩阵，获取初步故障辨识结果。随后，系统依据初步结果的类型，进入多分支处理。

若初步故障辨识结果为无故障区段：此时可能存在独立末端FTU信息漏报。继续对各独立末端线路的实际电流进行检测。若发现某末端线路存在过流，则认为该区段存在故障，直接切除该过流线路。

若初步故障辨识结果为单一故障：系统首先下发指令切除该初步故障区段。同时，在研究区段上一级线路保护延时后，检测该上一级线路是否存在过流现象。若依旧过流，说明实际故障点位于上一级线路，系统进而补充切除上一级线路，完成纠错。

若初步故障辨识结果表明存在多重故障：多重故障通常由远端FTU信息错误引发。此时，系统触发引入评价函数的集中式保护方案进行二次故障辨识。通过评价函数寻优，将二次故障辨识的结果作为最终的真实故障区段，并执行切除操作。此设计避免了在所有工况下全局使用评价函数，显著降低了算法的计算复杂度，保障了保护的整体速动性。

3.2 参数的整定与配合

针对研究区段上一级线路发生故障，而近故障侧FTU信息误传导致的欠范围动作，上一级线路必须依靠延时t_1检测残余过流来纠正辨识结果。其中延时t_1用于初次故障区段隔离后的残余过流复核，其作用是避开保护出口、断路器开断以及状态信息返回过程，防止在初次隔离尚未完成时误判残余过流。t_1的取值应大于保护装置固有动作时间、断路器开断时间、通信及状态返回时间与可靠裕度之和。因此，t_1的整定约束如式(4)所示。

$$t_1 \geqslant t_{pr} + t_{br} + t_{com} + \Delta t \tag{4}$$

式中：t_{pr}为保护装置的固有动作时间；t_{br}为断路器的全开断时间；t_{com}为通信及状态返回时间；Δt为保护整定延时和安全裕度。

考虑到保护装置固有动作时间通常为0.02~0.05 s，断路器全开断时间通常为0.04~0.10 s，并计及通信返回时间和可靠裕度，本文将二次校验延时取为0.2 s。该取值能够避开初次隔离动作过程，并缩短残余过流复核等待时间，从而降低欠范围动作期间故障电流持续作用于系统设备的风险，兼顾动作可靠性与保护速动性。

过流的整定值I_{set}如式(5)所示，本文所选拓扑的最大负荷电流为0.6 kA，并考虑一定的裕度。

$$I_{set} = K_{rel} K_{ss} I_{Lmax} \tag{5}$$

式中：K_{rel}为可靠系数，本文取1.172；K_{ss}为自启动系数，本文取1.25；I_{Lmax}为最大负荷电流。综上，最终将过流整定值定为0.88 kA。

需要说明的是，对于瞬时性故障，若故障在t_1到达前已经消失，则相关线路电流将恢复至正常负荷电流水平，不再存在残余过流，因此二次校验不会触

发补充切除。由此可避免瞬时性故障消失后因二次校验误扩大切除范围。

4　算例分析

4.1　集中式保护方案容错性能分析验证

为了验证第2章中针对图论理论构建的集中式保护方案容错性分析的准确性，本章以图1为例，设计以下四种场景展开分析。

1）故障点近端线路FTU信息错误。

以图1中的线路$L4$作为研究区段，该线路为T接区段，其信息向量$[K_a, K_{b1}, K_{b2}]$中的各元素分别对应开关K4、K5、K11处FTU的上传状态。现设定线路$L4$的左开关K4处FTU信息误传，其上传状态K_a由−1误传为1，此时的节点故障信息矩阵为[1 1 −1 1 0 0 0 0 −1 0 −1 0 −1]。依据故障判据，初步判定故障区段为$L2$和$L4$。随后，运用评价函数对初步故障辨识结果的拆分组合进行评价，评价结果如表1所示。可判定区段$L2$出现故障或区段$L4$出现故障。可见，融合评价函数的集中式保护算法，对于故障位置近端线路FTU信息错误导致的超范围动作难以应对。

2）故障点远端线路FTU信息错误。

同样以图1中的线路$L4$作为研究区段，依旧设定开关K4处信息误传，其上传状态K_a由−1误传为1，依据故障判据，初步判定故障区段为$L1$和$L4$。随后，运用评价函数对初步故障辨识结果的拆分组合进行评价，评价结果如表2所示。使评价函数值最小的组合向量为[1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]，据此可判定区段$L1$出现故障，此亦为实际的故障区段。

由此可知，融合评价函数的集中式保护算法虽难以应对故障点近端FTU信息错误导致的超范围动作，但能够显著改善由故障点远端FTU信息畸变引发的超范围动作问题，将越级跳闸控制在两级以内，有效缩小停电范围。

3）研究区段上一级线路发生故障而研究区段近故障线路侧的FTU信息错误。

以图1中的普通区段$L3$为研究区段，其信息矩阵$[K_a, K_b]$对应K3，K4。当线路$L2$发生故障时，相应的故障信息矩阵应当为[1 1 −1 −1 0 0 0 0 −1 0 −1 0 −1]。倘若研究区段$L3$近故障线路侧的开关K3上传的故障信息由−1误传为1，此时输出的故障信息矩阵为[1 1 1 −1 0 0 0 0 −1 0 −1 0 −1]。在此情形下所获取的错误故障信息矩阵，与实际故障发生于研究区段时的正确故障信息矩阵完全相同。因此，无论是融合评价函数的集中式保护算法，还是当前常用的智能优化算法，均无法识别此错误，从而导致保护欠范围动作。

4）独立末端线路发生故障时FTU信息错误。

以图1所示的独立末端线路$L8$为例，假定其开关K8处FTU上传的信息出现错误（其原值1误传为−1），此时的节点故障信息矩阵相应调整为[−1 −1 −1 −1 0 0 0 −1 −1 0 −1 0 −1]。依据故障判据，系统将判定无故障，即便引入评价函数同样无法识别，从而导致故障线路无法被切除的状况。由此可见，传统集中式保护方案在FTU上传信息存在错误时，极有可能致使保护动作范围不足、故障无法有效切除，以及保护判断机制产生偏差，错误判定无任何线路故障，最终造成实际故障未能及时切除等情况，具有较差的容错性能。

4.2　改进集中式保护方案可行性

为验证本文所提集中式保护改进方案的可行性，本节基于PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真平台构建

表1　故障点近端线路FTU信息错误时的评价结果

Table 1　Evaluation results for incorrect FTU information on the near-side line of the fault point

组合	S_B	$G_{i1}^*(S_B)$	$G_{i1}(S_B)$	$F_{it}(S_B)$
$L2$故障	[0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]	[1 1 −1 −1 0 0 0 0 −1 0 -1 0 −1]	[1 1 −1 1 0 0 0 0 −1 0 −1 0 −1]	1+w
$L4$故障	[0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0]	[1 1 1 1 0 0 0 0 −1 0 −1 0 −1]	[1 1 −1 1 0 0 0 0 −1 0 −1 0 −1]	1+w
$L2$与$L4$同时故障	[0 1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0]	[1 1 0 0 0 0 0 0 −1 0 −1 0 −1]	[1 1 −1 1 0 0 0 0 −1 0 −1 0 −1]	2+2w

表2　故障点远端线路FTU信息错误时的评价结果

Table 2　Evaluation results for incorrect FTU information on the far-side line of the fault point

组合	S_B	$G_{i1}^*(S_B)$	$G_{i1}(S_B)$	$F_{it}(S_B)$
$L1$故障	[1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]	[1 −1 −1 −1 0 0 0 0 −1 0 −1 0 −1]	[1 −1 −1 1 0 0 0 0 −1 0 −1 0 −1]	1+w
$L4$故障	[0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0]	[1 1 1 1 0 0 0 0 −1 0 −1 0 −1]	[1 −1 −1 1 0 0 0 0 −1 0 −1 0 −1]	2+w
$L1$与$L4$同时故障	[1 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0]	[1 0 1 1 0 0 0 0 −1 0 −1 0 −1]	[1 −1 −1 1 0 0 0 0 −1 0 −1 0 −1]	2+2w

了如图1所示的10 kV配电网模型，对网络设置相应的短路故障，执行仿真操作并采集相关数据，仿真参数如表3所示。依据如图3所示的集中式保护改进方案流程图逐步实施故障判别，得到部分故障判别测试结果，如表4所示。

表3 10 kV配电网仿真参数

Table 3 Simulation parameters of the 10 kV distribution network

参数	数值
光伏PV1、PV2容量/MVA	5、7
负荷水平/MW	10.24
光伏渗透率/%	117.2
线路长度（*L*1—*L*13）/km	1.03、0.58、0.09、2.56、2.23、1.40、3.50、0.15、2.00、0.78、0.30、0.65、1.05
线路单位长度阻抗幅值/Ω	0.38
线路阻抗角/(°)	70
过渡电阻/Ω	0.01

由表4可知，6组算例覆盖了评价函数修正、单一故障结果校验、欠范围动作纠错、独立末端线路漏判纠错以及残余超范围动作等典型场景。算例1中，初步辨识结果为“*L*4 & *L*7”，经评价函数筛选后最终辨识结果为*L*4，说明评价函数能够对多重候选故障区段进行筛选，缩小由FTU信息畸变引起的保护动作范围。算例2和算例6的初步辨识结果分别为*L*9和*L*7，均为单一故障区段，且经延时t_1后检测其上一级线路均未出现残余过流，因此保持原初步辨识结果，说明残余过流复核可用于确认单一故障辨识结果的有效性。

需要说明的是，算例3最终辨识结果仍为“*L*11 & *L*5”，保护动作结果为超范围动作（OR），属于T接区段分支侧FTU信息畸变引发的残余超范围动作。由于T接区段包含一个上游节点和两个下游分支节点，分支侧FTU误报或方向误判可能使初步辨识结果同时包含真实故障区段和非故障分支区段。此时，不同候选组合对应的FTU期望状态与实际上传状态偏差较为接近，仅依靠单一时间断面的FTU方向信息及评价函数难以进一步区分，因此该算例仍表现为超范围动作。

针对欠范围动作，算例4中实际故障区段为*L*2，但因K3上传信息错误，传统集中式保护初步辨识结果为*L*3。改进方案首先切除*L*3，经过延时t_1后检测到上一级线路*L*2仍存在7.838 kA的残余故障电流，且大于过流整定值0.88 kA，因此进一步切除*L*2，实现对欠范围动作的纠正。

针对独立末端线路故障漏判，算例5中*L*8发生故障，但K8对应FTU将原本应上传的“1”误传为“−1”，导致初步辨识结果为无故障。改进方案进一步检测独立末端线路过流状态，发现*L*8电流为19.741 kA，大于过流整定值0.88 kA，因此判定*L*8为故障区段并执行切除，实现对末端故障漏判的修正。

为进一步量化所提方法对集中式保护容错能力的改善效果，本文对表4所列典型算例的动作结果进行统计，结果如表5所示。

由表5可知，在本文设置的6组典型FTU信息畸变算例中，传统方案中4组错误动作算例经改进后有3组得到修正。其中，欠范围动作和故障未切除问题均得到纠正，超范围动作由2组减少为1组。上述结果表明，所提方案能够提高集中式保护在典型FTU信息畸变场景下的容错能力，尤其对欠范围动

表4 具有容错能力的集中式保护改进方案测试结果

Table 4 Test results of centralized protection improvement scheme with fault tolerance capability

算例	故障区段	实际故障信息矩阵	初步故障辨识结果	评价函数值最小组合	上一级线路延时t_1后过流校验结果	独立末端线路过流校验结果	最终故障辨识结果	效果
1	*L*4	[1 1 1 1 0 0 1 0 −1 0 −1 0 −1]	*L*4 & *L*7	*L*4			*L*4	T
2	*L*9	[1 1 −1 −1 0 0 0 0 1 0 −1 0 −1]	*L*9		I_{L2}=0.139 kA < I_{set}=0.88 kA		*L*9	T
3	*L*11	[1 1 1 1 1 0 0 0 −1 0 1 0 −1]	*L*11 & *L*5	*L*11 & *L*5			*L*11 & *L*5	OR
4	*L*2	[1 1 1 −1 0 0 0 0 −1 0 −1 0 −1]	*L*3		I_{L2}=7.838 kA > I_{set}=0.88 kA		*L*2	T
5	*L*8	[−1 −1 −1 −1 0 0 0 −1 −1 0 −1 0 −1]	无故障			I_{L8}=19.741 kA > I_{set}=0.88 kA	*L*8	T
6	*L*7	[1 1 1 1 1 1 1 0 −1 −1 −1 0 −1]	*L*7		I_{L6}=0 kA < I_{set}=0.88 kA		*L*7	T

作和独立末端线路故障漏判具有较明显的修正效果。对于部分T接区段分支侧FTU信息畸变导致的残余超范围动作,仍需结合动作后分支电流幅值变化、残余电流方向或FTU信息可信度权重进一步完善。

表5　典型FTU信息畸变算例下不同方案动作结果统计
Table 5　Statistics of action results of different schemes under typical FTU information distortion cases

方案	正确动作	超范围动作	欠范围动作	故障未切除
传统集中式保护	2组	2组	1组	1组
改进集中式保护	5组	1组	0组	0组

5　结　论

针对光伏接入配电网,传统集中式保护方案在定值整定复杂性与容错能力方面的不足,本文系统分析了集中式保护方案下故障信息错误对保护动作判据的影响,并在此基础上提出了一种具备容错能力的集中式保护改进方案。基于PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真平台,对所提方案进行了综合验证。主要结论如下:

1)传统集中式保护方案在FTU上传信息存在错误时,极有可能致使保护动作范围不足、故障无法有效切除,以及保护判断机制产生偏差,错误判定无任何线路故障,最终造成实际故障未能及时切除等,具有较差的容错性能。

2)提出了一种多阶段自适应的改进集中式保护方案:在初步故障判别环节的基础上引入二次故障辨识,将二次故障辨识的结果作为最终的故障区段,实现故障范围更精确识别,显著提升了系统的容错能力。该方案兼具拓扑适应性强、判据简洁的特点。

3)不同故障类型与信息错误模式下的仿真分析结果表明,改进后的方案在容错性能、保护动作可靠性及选择性方面均优于传统集中式保护策略。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明(Authors' Contributions):

李晔提出研究方向、设计论文框架;李雯进行文献调研与整理、完成论文撰写;何佳伟、李斌设计研究思路、设计研究方案,论证研究方案可行性;贾娜收集并分析数据进行验证,参与论文撰写。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

6　参考文献

[1] 国家能源局. 2025年可再生能源并网运行情况[EB/OL].(2026-02-12)[2026-05-09]. https://www.nea.gov.cn/20260212/742b8c6a078347b0b39de676c05c5d58/c.html.

[2] 邓靖雷,姚良忠,徐箭,等. 一种基于附加谐波电流信号的主动配电网线路保护方法[J]. 中国电机工程学报,2025,45(4):1409-1423.
Deng Jinglei, Yao Liangzhong, Xu Jian, et al. An additional harmonic current based line protection method of active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE,2025,45(4):1409-1423.

[3] 司新跃. 逆变型分布式电源故障建模与配电网保护[D]. 济南:山东大学,2016.
Si Xinyue. Fault model of inverter based distributed generation and distribution system protection[D]. Jinan: Shandong University, 2016.

[4] 袁兆祥,张翼,聂铭,等. 分布式新能源接入的10 kV配电网保护适应性分析[J]. 电力建设,2024,45(2):49-57.
Yuan Zhaoxiang, Zhang Yi, Nie Ming, et al. Protection adaptability analysis of distributed generation connected to 10 kV distribution network[J]. Electric Power Construction,2024,45(2):49-57.

[5] Alasali F, Albayadrah H, El-Naily N, et al. Highly sensitive protection scheme considering the PV operation control models[J]. Electric Power Systems Research,2024,237:111025.

[6] 乔一达,吴红斌,吴通华,等. 含逆变型分布式电源的配电网分区域电流保护[J]. 电工技术学报,2022,37(增刊1):134-144.
Qiao Yida, Wu Hongbin, Wu Tonghua, et al. A partitioned current protection scheme of distribution network with inverter interfaced distributed generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2022,37(S1):134-144.

[7] 韦明杰,王聪博,余越,等. 适用高比例分布式光伏接入的配电网多级保护优化配置方案[J]. 电力系统自动化,2023,47(22):55-65.
Wei Mingjie, Wang Congbo, Yu Yue, et al. Optimal configuration scheme of multi-staged protection in distribution network for integration of high proportion of distributed photovoltaic[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(22):55-65.

[8] 晁晨栩,郑晓冬,高飘,等. 含高比例光伏配电网的高频阻抗差动保护[J]. 中国电机工程学报,2021,41(20):6968-6978.
Chao Chenxu, Zheng Xiaodong, Gao Piao, et al. High frequency impedance differential protection with high proportion of photovoltaic power distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20):6968-6978.

[9] 王帅,贾东梨,刘科研,等. 适应高比例光伏接入的有源配电网改进型故障保护策略[J]. 中国电力,2026,59(1):105-114.
Wang Shuai, Jia Dongli, Liu Keyan, et al. Improved fault protection strategy for active distribution networks adapting to high proportion photovoltaic access[J]. Electric Power,2026,59(1):105-114.

[10] 李世伟,陶睿,许守东,等. 含分布式光伏的配电网相间故障自适应距离保护方法[J]. 可再生能源,2025,43(11):1502-1509.
Li Shiwei, Tao Rui, Xu Shoudong, et al. Adaptive distance protection method for two-phase short-circuit faults in distribution net-works with distributed photovoltaic power generation[J].

Renewable Energy Resources,2025,43(11): 1502-1509.

[11] Wheeler K A, Elsamahy M, Faried S O. A novel reclosing scheme for mitigation of distributed generation effects on overcurrent protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2018,33(2): 981-991.

[12] 郭亮,李升健,邓才波,等. 分布式光伏对配电网保护与自动化的影响及对策措施[J]. 江西电力,2025,49(1): 1-6,12.

[13] 吴振杰,胡晨,陈海燕,等. 基于双比例补偿系数的有源配电网电流差动保护[J]. 浙江电力,2024,43(12): 104-113.
Wu Zhenjie, Hu Chen, Chen Haiyan, et al. Differential current protection for active distribution networks with dual proportional compensation coefficients[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(12): 104-113.

[14] 林湘宁,刘胜福,翁汉琍,等. 可实现故障快速响应和全面覆盖的有源高压配电网单端暂态量阶段式保护方案[J]. 广东电力,2024,37(10): 121-134.
Lin Xiangning, Liu Shengfu, Weng Hanli, et al. Active high voltage distribution network single-ended transient stage protection scheme for fast fault response and comprehensive coverage[J]. Guangdong Electric Power,2024,37(10): 121-134.

[15] 许仕杰,喻锟,曾祥君,等. 基于线电压组合调控的配电网单相接地故障消弧与保护方法[J]. 南方电网技术,2025,19(12): 100-111.
Xu Shijie, Yu Kun, Zeng Xiangjun, et al. Arc suppression and protection method for single-phase grounding fault based on combined regulation of line voltage in distribution network[J]. Southern Power System Technology,2025,19(12): 100-111.

[16] 袁明瀚,杨学信,李亦农,等. 计及信息畸变的有源配电网故障区段定位[J]. 上海电力大学学报,2023,39(3): 237-243.
Yuan Minghan, Yang Xuexin, Li Yinong, et al. Fault section location of active distribution network considering distortion information[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2023,39(3): 237-243.

[17] 郑涛,马龙,李博文. 基于馈线终端装置信息畸变校正的有源配电网故障区段定位[J]. 电网技术,2021,45(10): 3926-3934.
Zheng Tao, Ma Long, Li Bowen. Fault section location of active distribution network based on feeder terminal unit information distortion correction[J]. Power System Technology,2021,45(10): 3926-3934.

[18] 满超洪,孙铁鹏,李海锋,等. 基于分布-集中两阶段协同的有源配电网智能故障区段定位方法[J]. 南方电网技术,2025,19(11): 72-82.
Man Chaohong, Sun Tiepeng, Li Haifeng, et al. Intelligent fault section location method of active distribution network based on distribution-centralized two-stage cooperation[J]. Southern Power System Technology,2025,19(11): 72-82.

[19] 田果,黄小莉,邓强,等. 基于图论的智能配电网馈线保护研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(16): 95-99.
Tian Guo, Huang Xiaoli, Deng Qiang, et al. Feeder protection based on graph theory in smart distribution system[J]. Power System Protection and Control,2015,43(16): 95-99.

[20] Zhao Q, Wang Z P, Wang Y X. Fault location method for an active distribution network based on a hierarchical optimization model and fault confidence factors[J]. Electronics,2023,12(6): 1314.

[21] 肖繁,夏勇军,张侃君,等. 含新能源接入的配电网网络化保护原理研究[J]. 电工技术学报,2019,34(增刊2): 709-719.
Xiao Fan, Xia Yongjun, Zhang Kanjun, et al. Research on a principle of networked protection in distribution network with renewable energy sources [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(S2): 709-719.

[22] 陈继明,陈文淙,仉志华,等. 基于波形相似性的柔性互联配电网短路故障区段定位方法[J]. 电力工程技术,2025,44(1): 104-114.
Chen Jiming, Chen Wencong, Zhang Zhihua, et al. Short-circuit fault location method of flexible interconnected distribution network based on waveform similarity [J]. Electric Power Engineering Technology,2025,44(1): 104-114.

[23] 石昱烜,席燕辉,张伟杰. 基于GAF-ResNet50的配电网故障区段定位[J]. 电力科学与技术学报,2025,40(2): 122-130,149.
Shi Yuxuan, Xi Yanhui, Zhang Weijie. Distribution network fault segment location based on GAF-ResNet50[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(2): 122-130,149.

[24] 李佳宇,王光临,罗建华,等. 基于多元变分模态分解与峭度的配电电缆故障定位方法[J]. 电网与清洁能源,2024,40(3): 92-98.
Li Jiayu, Wang Guanglin, Luo Jianhua, et al. A cable fault location method of distribution networks based on MVMD and kurtosis calculation[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(3): 92-98.

[25] 张晓新,董灵斌,林峰,等. 自取电的电缆故障类型及故障分段定位的研究[J]. 高压电器,2024,60(11): 116-122.
Zhang Xiaoxin, Dong Lingbin, Lin Feng, et al. Research on fault types and fault segment location of self-feeding cable[J]. High Voltage Apparatus,2024,60(11): 116-122.

[26] 赵乔,王增平,董文娜,等. 基于免疫二进制粒子群优化算法的配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(20): 83-89.
Zhao Qiao, Wang Zengping, Dong Wenna, et al. Research on fault location in a distribution network based on an immune binary particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020,48(20): 83-89.

[27] Wang K X, Shao Y, Wang L M, et al. Distribution network fault diagnosis technology based on intelligent algorithm[C]//2021 6th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP). IEEE,2021: 899-903.

[28] Li H R. Research on fault location of power distribution network based on fault data information[J]. Telecommunications and Radio Engineering,2020,79(8): 713-722.

[29] Li Y J, Wei X T, Lin J H, et al. A robust fault location method for active distribution network based on self-adaptive switching function [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023,148: 109007.

[30] 陶旭东. 一种改进遗传算法的配电网故障定位方法分析[J]. 电子技术,2024,53(8): 294-295.
Tao Xudong. Analysis of an improved genetic algorithm for fault location in distribution networks[J]. Electronic Technology,2024, 53(8): 294-295.

[31] 蔡明熹. 基于蚁群算法的配电网故障检测定位与恢复研究[J].

电工技术,2023(9):35-38.
Cai Mingxi. Research on fault detection, location and restoration of distribution network based on ant colony algorithm[J]. Electric Engineering,2023(9):35-38.
[32] 毕忠勤,杨小婷,王宝楠,等. 基于量子退火算法的配电网故障定位[J]. 科学技术与工程,2023,23(31):13394-13406.
Bi Zhongqin, Yang Xiaoting, Wang Baonan, et al. Distribution network fault section location based on quantum annealing algorithm[J]. Science Technology and Engineering,2023,23(31):13394-13406.
[33] 廖碧莲,高中林,唐江琦,等. 基于图论的主动配电网集中式方向保护研究[J]. 智慧电力,2019,47(8):55-62.
Liao Bilian, Gao Zhonglin, Tang Jiangqi, et al. Active distribution network centralized direction protection based on graph theory[J]. Smart Power,2019,47(8):55-62.
[34] Yan H Y, Wu X Y, Lin C L, et al. A modified matrix algorithm dichotomy for distribution network fault location[C]// E3S Web of Conferences,2020,204:02010.
[35] 胡福年,孙守娟. 基于图论的矩阵算法在配电网故障定位中的应用[J]. 中国电力,2016,49(3):94-98.
Hu Funian, Sun Shoujuan. Fault location of distribution network by applying matrix algorithm based on graph theory[J]. Electric Power,2016,49(3):94-98.
[36] 郑兆晖,朱建良. 智能分布式电网的改进矩阵故障定位算法[J]. 淮阴工学院学报,2023,32(1):39-45.
Zheng Zhaohui, Zhu Jianliang. Improved matrix fault location algorithm for smart distributed grids[J]. Journal of Huaiyin Institute of Technology,2023,32(1):39-45.
[37] 梁志坚,杨茗. 基于图论及改进矩阵算法的配电网故障定位[J]. 广西电力,2021,44(1):69-76.
Liang Zhijian, Yang Ming. A distribution network fault location method based on graph theory and improved matrix algorithm[J]. Guangxi Electric Power,2021,44(1):69-76.
[38] 徐彪,尹项根,张哲,等. 矩阵算法和优化算法相结合的配电网故障定位[J]. 电力系统自动化,2019,43(5):152-161.
Xu Biao, Yin Xianggen, Zhang Zhe, et al. Fault location for distribution network based on matrix algorithm and optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(5):152-161.
[39] 梅飞,陈子平,裴鑫,等. 基于矩阵算法的有源配电网故障定位容错方法[J]. 电力工程技术,2022,41(6):109-115.
Mei Fei, Chen Ziping, Pei Xin, et al. Fault-tolerant method for fault location of active distribution network based on matrix algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6):109-115.

收稿日期:2026-04-20　**修回日期**:2026-05-20

作者简介:


李晔

李晔(1993),女,博士,副教授,主要研究方向为新型电力系统保护与控制,E-mail:liye@hebut.edu.cn;

李雯(2003),女,硕士研究生,主要研究方向为新型电力系统保护与控制,E-mail:17335038072@163.com;

何佳伟(1991),男,博士,教授,通信作者,主要研究方向为新型电力系统保护与控制,E-mail:hejiawei1991@tju.edu.cn;

李斌(1976),男,博士,教授,主要研究方向为电力系统保护与控制、柔性直流电网控制保护,E-mail:binli@tju.edu.cn;

贾娜(1998),女,硕士研究生,主要研究方向为新型电力系统保护与控制,E-mail:202221401115@stu.hebut.edu.cn。

(编辑　孙静琳)

附录 A

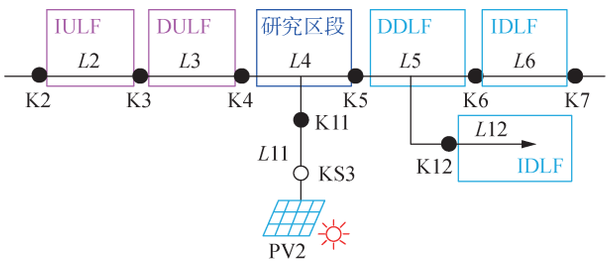
为使表格清晰明了,本文汇总并列出了故障辨识区段并进行了简化表示,如图A1所示。

1)研究区段上游线路故障(upstream line fault,ULF):包括直连上游线路故障(direct upstream line fault,DULF)和非直连上游线路故障(non direct upstream line fault,NDULF),非直连可进一步分为间隔上游线路故障(interval upstream line fault,IULF)和非间隔上游线路故障(non interval upstream line fault,NIULF)。

2)研究区段故障(research section faults,RSF):故障发生在区段内部。

3)研究区段下游线路故障(downstream line fault,DLF):包括直连下游线路故障(direct downstream line fault,DDLF)和研究区段的非直连下游线路故障(non direct downstream line fault,NDDLF),非直连可进一步分为间隔下游线路故障(interval downstream line fault,IDLF)和非间隔下游线路故障(non interval downstream line fault,NIDLF)。

4)非研究区段故障(non research section fault,NRSF)。



图A1　故障辨识区段说明图

Fig. A1　Fault recognition zone description chart

表A1　研究区段为普通区段[K_a,K_b]时,FTU信息传输有误的影响

Table A1　Impact of FTU information transmission errors when the research section is a regular section

研究区段理想故障信息	实际故障区段	畸变开关及畸变值	FTU实际传输信息	显示故障区段	对应结果	引入评价函数显示故障区段	对应结果
[1,-1]	RSF	K_a=0	[0,-1]	DULF	OR_lv.1	DULF	OR_lv.1
		K_a=-1	[-1,-1]	DULF	OR_lv.1	DULF	OR_lv.1
		K_b=0	[1,0]	RSF	T	RSF	T
		K_b=1	[1,1]	DDLF	UR	DDLF	UR
[1,0]	RSF	K_a=0	[0,0]	DULF	OR_lv.1	DULF	OR_lv.1
		K_a=-1	[-1,0]	DULF	OR_lv.1	DULF	OR_lv.1
		K_b=-1	[1,-1]	RSF	T	RSF	T
		K_b=1	[1,1]	DDLF	UR	DDLF	UR
[1,1]	DLF	K_a=0	[0,1]	DULF & DLF	OR	DLF	T
		K_a=-1	[-1,1]	DULF & DLF	OR	DLF	T
	DDLF	K_b=-1	[1,-1]	RSF	OR_lv.1	RSF	OR_lv.1
	IDLF			RSF & IDLF	OR_lv.2	RSF ‖ IDLF	OR_lv.2
	NIDLF			RSF & NIDLF	OR	NIDLF	T
	DDLF	K_b=0	[1,0]	RSF	OR_lv.1	RSF	OR_lv.1
	NDDLF			RSF & NDDLF	OR	NDDLF	T
[-1,-1]	DULF	K_a=1	[1,-1]	RSF	UR	RSF	UR
	IULF			RSF & IULF	T	RSF ‖ IULF	T
	NIULF			RSF & IULF	T	RSF ‖ IULF	T
	ULF	K_a=0	[0,-1]	RSF & NIULF	T	NIULF	T
	DULF	K_b=1	[-1,1]	ULF	T	ULF	T
	NDULF			DDLF & DULF	T	DDLF & DULF	T
	ULF	K_b=0	[-1,0]	DDLF & NDULF	T	NDULF	T
[0,0]	DULF	K_a=1	[1,0]	RSF	UR	RSF	UR
	IULF			RSF & IULF	T	RSF & IULF	T
	NIULF			RSF & NIULF	T	NIULF	T
	ULF	K_a=-1	[-1,0]	ULF	T	ULF	T
		K_b=1	[0,1]	ULF & DDLF	T	ULF	T
		K_b=-1	[0,-1]	ULF	T	ULF	T

注:表中“‖”表示“或”;“&”表示“且”。

表 A2　研究区段为末端区段[K_a]时,FTU信息传输有误的影响

Table A2　Impact of FTU information transmission errors when the research section is the end section

研究区段理想故障信息	实际故障区段	畸变开关及畸变值	是否为独立末端线路?	显示故障区段	对应结果	引入评价函数显示故障区段	对应结果
[1]	RSF	K_a=−1	否	DULF	OR_lv.1	DULF	OR_lv.1
			是	FFS	FNR	FFS	FNR
		K_a=0	否	DULF	OR_lv.1	DULF	OR_lv.1
			是	FFS	FNR	FFS	FNR
[0]	S-DULF	K_a=1	否	RSF	UR	RSF	UR
	S-IULF			S-IULF & RSF	T	S-IULF ‖ RSF	T
	S-NIULF			S-NIULF & RSF	T	S-NIULF	T
	L-ULF		否	L-ULF & RSF	OR_lv.1	L-ULF & RSF	OR_lv.1
	NRSF		是	ULF & RSF	OR_lv.1	ULF & RSF	OR_lv.1
	NRSF	K_a=−1		NRSF	T	NRSF	T
[1]	S-DULF	K_a=1	否	RSF	UR	RSF	UR
	S-IULF			S-IULF & RSF	T	S-IULF ‖ RSF	T
	S-NIULF			S-NIULF & RSF	T	S-NIULF	T
	L-ULF			L-ULF & RSF	OR_lv.1	L-ULF & RSF	OR_lv.1
	NRSF		是	ULF & RSF	OR_lv.1	ULF & RSF	OR_lv.1
	NRSF	K_a=0		NRSF	T	NRSF	T

表 A3　研究区段为T接区段[K_a,K_{b1},K_{b2}]时,部分FTU信息传输有误的影响

Table A3　Impact when some FTU information transmission is incorrect in the case of the study section being T-junction section [K_a,K_{b1},K_{b2}]

研究区段理想故障信息	实际故障区段	畸变开关及畸变值	FTU实际传输信息	显示故障区段	对应结果	引入评价函数显示故障区段	对应结果
[1,−1,−1]	RSF	K_a=0	[0,−1,−1]	DULF	OR_lv.1	DULF	OR_lv.1
		K_a=−1	[−1,−1,−1]	DULF	OR_lv.1	DULF	OR_lv.1
[1,−1,−1]	RSF	K_{b1}=1	[1,1,−1]	DDLF	UR	DDLF	UR
		K_{b1}=0	[1,0,−1]	RSF	T	RSF	T
		K_{b2}=1	[1,−1,1]	DDLF	UR	DDLF	UR
		K_{b2}=0	[1,−1,0]	RSF	T	RSF	T
[−1,−1,−1]	DULF	K_a=1	[1,−1,−1]	RSF	UR	RSF	UR
	IULF			RSF & IULF	T	RSF ‖ IULF	T
	NIULF			RSF & NIULF	T	NIULF	T
	ULF	K_a=0	[0,−1,−1]	ULF	T	ULF	T
		K_{b1}=1	[−1,1,−1]	ULF & DDLF	T	ULF	T
		K_{b1}=0	[−1,0,−1]	ULF	T	ULF	T
		K_{b2}=1	[−1,−1,1]	ULF & DDLF	T	ULF	T
		K_{b2}=0	[−1,−1,0]	ULF	T	ULF	T
[1,−1,1]	DDLF	K_a=−1	[−1,−1,1]	DULF & DDLF	OR	DULF & DDLF	OR
	NDDLF			DULF & NDDLF	OR	NDDLF	T
	DLF	K_a=0	[0,-1,1]	DULF & DLF	OR	DLF	T
	DDLF	K_{b1}=1	[1,1,1]	DDLF1 & DDLF2	OR	DDLF1 & DDLF2	OR
	NDDLF			DDLF & NDDLF	OR	NDDLF	T
	DLF	K_{b1}=0	[1,0,1]	DLF	T	DLF	T
	DDLF	K_{b2}=−1	[1,−1,−1]	RSF	OR_lv.1	RSF	OR_lv.1
[1,−1,1]	IDLF	K_{b2}=−1	[1,−1,−1]	RSF & IDLF	OR	RSF ‖ IDLF	OR
	NIDLF			RSF & NIDLF	OR	NIDLF	T
	DDLF	K_{b2}=0	[1,−1,0]	RSF	OR_lv.1	RSF	OR_lv.1
	NDDLF			RSF & NDDLF	OR	NDDLF	T