

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231549

基于负序量排序及 5G 通信的主动配电网有界面保护原理

顾本硕, 林湘宁, 李正天, 贺玮杰, 柏淳瀚, 杨文豪

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430000)

摘要: 针对大量分布式电源(distributed generation, DG)接入配电网对传统保护带来的新挑战, 提出了一种基于负序量排序与 5G 通信相结合的配电网有界面保护原理。为实现保护范围的有界及灵活配置, 并应对极端工况下的主判据失效问题, 设计了一种免整定的实测-补偿电压幅值比较判据。在信息交互方面, 结合配电网通信特点, 提出了带时标的 5G 通信方式, 进一步降低了所提保护对同步通信的要求。仿真结果表明, 对于带不可测分支的线路, 所提判据均可成功应用, 并且不依赖于数据同步通信。相较于传统三段式电流保护, 保护新方案能够大大提升配电网的故障切除速度, 保证故障极限响应时间均在 90 ms 以内。在数十欧姆的相间弧光过渡电阻和接地电阻的情形下, 该方案仍能具有良好的故障辨识能力。相比于幅值差动保护, 所提保护具有对不可测分支更强的适应性和动作稳定性。

关键词: 主动配电网; 有界面保护; 负序电压/电流排序; 实测-补偿电压幅值比较; 5G 通信

The principle of bounded area-protection for an active distribution network based on negative sequence quantity sorting and 5G communication

GU Benshuo, LIN Xiangning, LI Zhengtian, HE Weijie, BAI Chunhan, YANG Wenhao

(School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430000, China)

Abstract: There are emerging challenges posed by the integration of a large number of distributed generations (DGs) into power distribution networks. Thus this paper proposes a novel bounded area-protection that combines negative-sequence quantity sorting with 5G communication. To achieve a bounded protection range with flexible configuration and address the issue of main criterion failure in extreme conditions, it introduces a measurement-compensated voltage magnitude comparison criterion that eliminates the need for re-adjustment. For information exchange, a 5G communication method with timestamps is proposed, further reducing the synchronous communication requirements of the proposed protection scheme by leveraging the communication characteristics of distribution networks. Simulation results demonstrate the successful application of the proposed criteria to lines with unpredictable branches without relying on data synchronization communication. Compared to traditional three-section current protection, the new protection scheme significantly enhances fault clearance speed, ensuring that the fault's maximum response time remains within 90 ms. Even under conditions involving tens of ohms of inter-phase arc transition resistance and ground resistance, the proposed scheme maintains excellent fault identification capability. In comparison to amplitude differential protection, the proposed protection exhibits stronger adaptability and operational stability against unpredictable branches.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U22B20106).

Key words: active distribution network; bounded area-protection; negative sequence voltage/current sorting; comparison of measured and compensated voltage amplitudes; 5G communication

0 引言

在新型电力系统架构下, DG 大量从配电网侧接入电网, 对现有配电网保护的适应性带来巨大挑

战。DG 广泛接入的配电网称为主动配电网, 研究表明, 计及 DG 的助增效应后, 三段式保护的 I、II 段保护范围将严重收窄, 对第 III 段保护(过电流保护)的依赖程度大幅提高^[1-4]。但是, 在 DG 的影响下, 第 III 段保护难以从动作定值上形成彼此之间的绝对配合, 上下游保护间的协调只能更多地依赖时间级差。考虑到主动配电网的分段众多, 尤其对于

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U22B20106); 国家重点研发计划项目资助(2022YFE0120400)

近电源端线路, 其过流保护动作时限将高达若干个时间级差。若其发生故障时主保护无法响应, 则对于这种配电网中相对而言最为严重的故障, 故障切除时间反而最长^[5-8]。由于当前主、配电网保护之间并未要求进行配合, 该故障若未能被配电网保护及时切除, 甚至会引发上游主网保护越级动作, 酿成严重事故。为快速且有选择性地切除这类故障, 亟需研究提出具有强针对性、且符合主动配电网实际故障特征的新型保护原理与判据。

电流差动保护本应是最佳选择, 业内诸多学者针对该原理已经进行了大量深入的研究, 5G 通信也为信息在配电网中的实时交互创造了条件^[9]。但是, 配电网线路中不可测分支的存在限制了其应用。例如, 文献[10]提出了一种基于 5G 通信自同步配电网差动保护, 并进行实地测试, 验证了 5G 通信在配电网保护中应用的可能性, 但这类相量差动保护不能从保护原理上解决不可测分支致使差动保护误动的问题, 只能通过抬高制动门槛减小误动风险。此外, 其他成熟的继电保护原理在主动配电网中的应用同样将受到极大制约: 由于配电网线路多为短线, 距离保护很难具有保护范围; DG 接入后, 功率方向元件耐受过渡电阻的能力变弱、工频变化量方向元件的灵敏度显著降低^[11-13]。

为此, 有研究者提出采用幅值差动的保护新原理, 一并解决两侧信号同步要求过高和不可测分支的问题。例如, 文献[14]提出了一种利用故障前后线路两侧电流幅值之差的新型幅值差动保护判据, 可有效规避感应电机接入线路导致保护误动的风险。但是, 该方案未能摆脱差动保护对光纤通信过强的依赖, 且当配电网干线上所接不可测分支含有分布式电源时, 该保护的動作能力尚不明确, 未有相应的整定措施。综上, 能够兼顾主动配电网有限通信条件与不可测分支的主动配电网保护仍有待深入研究。鉴于主动配电网结构和运行的复杂性, 以及通信条件的有限性, 有必要深入挖掘既往继电保护的研究成果, 提出区别于上述保护的新原理和新方案。

在 20 世纪 90 年代末, 保护界学者提出了“面保护”的新概念。面保护通过对多点信息的监测和统筹, 进行逻辑判断和算法计算, 实现一定范围内多条线路以及多台设备故障的检测、诊断和保护。但是, 受制于彼时的通信条件, 且当时配电网对线路保护性能提升的需求并不迫切, 面保护并未得到学术界的足够关注, 更未被充分研究和广泛应用。

所幸, 时至今日, 通信系统在软硬件、覆盖范围方面均发生了划时代的变化。5G 技术具有高速、

低延时、大容量等特点, 其在配电网保护中已经取得了成功的应用, 为面保护在主动配电网中的应用扫除了通信条件上的障碍^[15-17]。这种情形下, 面保护这类原理先进的保护判据, 有望在主动配电网中发挥不可替代的作用。考虑到配电网的巨大规模, 面保护应仅在特别有必要的区域实施。因此, 需要将系统划分为不同的电力分区, 对于确有必要实施保护加强的分区, 配置专属的面保护系统。为达到这一目的, 需要研究以下问题: (1) 针对需要实施面保护的分区, 研究实用的、对通信要求不高的广域保护判据, 界定故障是否发生于保护区内, 对于区外的故障, 应对本分区内的面保护出口结果予以闭锁, 避免越级动作。(2) 研究适用于有源配电网的面保护判据, 其应能适应负荷、DG 等的随机接入和退出, 且在 5G 通信最不利条件下也能达到接近主保护的動作时限。

由于我国配电网多采用中性点非有效接地的接地方式, 单相故障情况下, 并不会激发出较大的短路电流^[18-20], 对它的辨识仍然属于传统故障选线的范畴, 因此, 本文以下分析的故障并不包含单相接地故障。

配电网故障后的故障分量包括正、负、零序分量。由于中性点非有效接地, 故障后的零序分量非常微弱, 难以作为配电网故障识别的特征量; 正序故障分量在各种故障情形下均始终存在, 但是, 故障后在 DG 低电压穿越(low voltage ride through, LVRT)控制策略的作用下, 从故障端口看进去的正序故障分量网络已不再是无源网络, 正序电压电流的分布呈现高度复杂多变的特点, 难以找到确定的分布规律。相较而言, 主动配电网的负序量特征则更为鲜明和稳定。故障发生后, 即便 DG 执行的 LVRT 策略会动态改变 DG 的负序等值阻抗, 但是, 从其端口看进去仍为一源网络, 不会破坏以下负序网络的负序分量特征: 负序电压以故障点处最高, 对应的节点电压次第降低, 至电源或负荷处下降为零; 负序电流以故障线路为干路向其他支路分流。事实上, 利用序分量进行故障元件定位的思路, 文献[21]已经做了初步探索, 只是该工作立足于智能软开关形成的天然保护分区设计保护, 而常规主动配电网并不具备这一条件。

针对主动配电网的 DG 不确定性接入及其通信条件有限等特点, 本文提出一种有界面保护原理及实现方案。该保护利用负序分量作为面保护的表征, 通过对目标区域各节点负序电压及各支路负序电流的幅值比较, 能够可靠、快速地确定故障线路, 并且对不可测分支具有更强的适应性和動作稳定

性。考虑到所提方案能够较好地识别除单相接地故障外的不对称故障，因此，其具有较强的普适性。

本文的主要工作有：(1) 提出了一种主动配电网的有界面保护核心判据，并证明了其强适应性及高可靠性；(2) 提出了一种实测-补偿电压幅值比较判据，可用于辅助设计不依赖同步测量的广域保护判据，并适用于特殊场景的甄别。在以上工作的基础上，探讨了基于5G通信的面保护实现方案，并通过理论分析和算例仿真，验证了所提原理和方案的可行性及优越性。

1 配电网负序量的分布特征

1.1 DG 未接入时的负序电压、电流分布特征

为清晰阐释主干判据，首先暂不考虑 DG 接入的情形。这类配电网的拓扑如图 1 所示。

发生不对称故障后，相应的负序网络如图 2 所示。

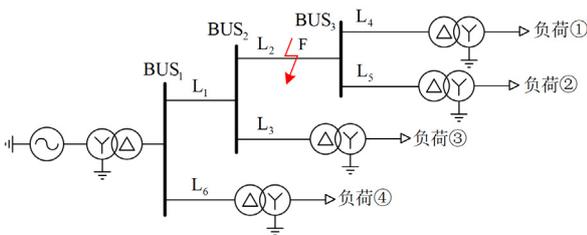


图 1 典型配电网拓扑图

Fig. 1 Topology of typical distribution network

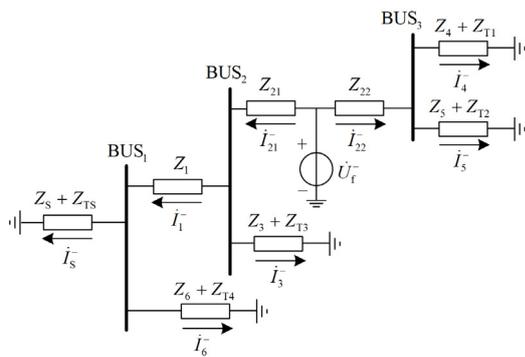


图 2 配电网不对称故障时的负序网络图

Fig. 2 Unbalanced fault negative sequence network diagram in distribution network

图中： Z_s 为系统阻抗； Z_T 为变压器阻抗； Z_1 、 Z_{21} 、 Z_{22} 等为线路阻抗； \dot{U}_f 为故障点负序等效电势源； \dot{I}_1 、 \dot{I}_{21} 、 \dot{I}_{22} 、 \dot{I}_3 等为负序电流相量。

由图 2 可见，负序网络仅存在唯一电源，即故障点等效负序电势源。负序电压呈现出故障点最高、越远离故障点的节点电压越低的特征。

向故障点下游逐渐降低的趋势，并在负荷和系统电源处下降为零。因此，故障线路两侧节点之一必为负序电压最大点，由此可确定故障线路所接节点(变电站)。

负序电流从故障点馈出，经由故障线路向下游不断分流。由于配电网中线路、变压器和几乎所有负荷均为阻感性元件，负序网络中的电流均为感性电流，分流后的负序电流始终小于其上游线路的电流。由此推知，故障所在支路的负序电流最大，而最大电流具体位于故障点哪一侧取决于该侧的负序综合输入阻抗。

1.2 DG 接入后的负序电压、电流分布特征

在上述网络中任意位置接入 DG 后，并未改变 1.1 节的分析结论。现于图 3 所示位置接入 DG，进行如下分析。

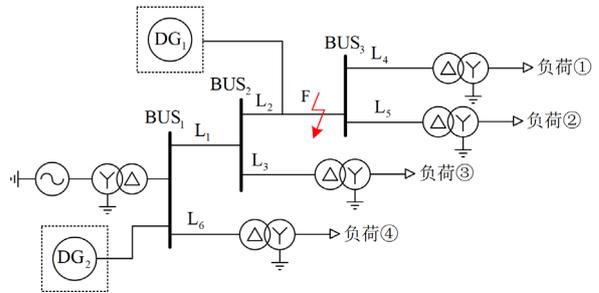


图 3 DG 接入后的配电网拓扑

Fig. 3 Distribution network topology after DG integration

DG 主要分为两大类型：电机型和逆变型。电机型 DG 如小型水电机组，其负序等值与系统电源相似，为感性阻抗。逆变型 DG 根据其控制策略可分为负序抑制型 DG 和不含负序抑制的 DG。对于负序抑制型 DG，线路某处发生故障后，其对外等效为压控正序电流源^[22]，因此在负序网络中等值为一个数值极大的阻抗，可视为开路；对于不含负序抑制的逆变型 DG，可认为其负序呈现为无源的阻感性阻抗性质，该负序阻抗与电机型 DG 相比数值偏大，且无明显波动^[23]。综上，在负序网络中，均可将 DG 等效为无源性质的阻抗。因此，DG 接入后配电网不对称故障时的负序网络图如图 4 所示。

虽然在 LVRT 策略起作用前后，DG 内阻抗有可能呈现由小到大的变化，但是，这种变化并未改变负序网络的电压电流分布规律：发生不对称故障时，负序网络仅存在故障点等效负序电势源。负序电压依然呈现出故障点最高、越远离故障点的节点电压越低的特征。

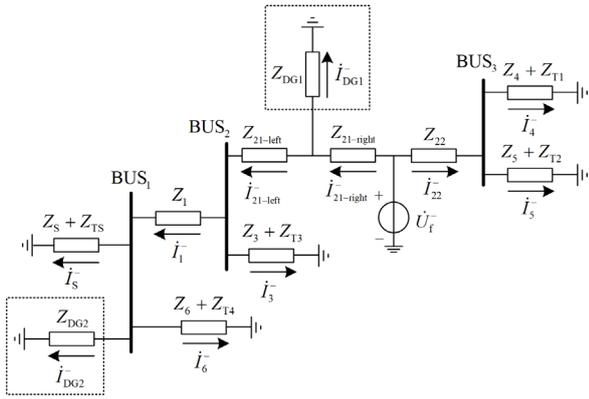


图 4 DG 接入后配电网不对称故障时的负序网络图

Fig. 4 Negative sequence network diagram during asymmetrical fault in distribution network after DG integration

因此, 无论 DG 在何时、何处接入或退出, LVRT 策略何时起作用, 故障线路两侧节点之一必为负序电压最大点, 据此确定故障线路所接节点。同理, 故障所在支路的负序电流最大, 经由故障线路向下游不断分流的特征也未被颠覆。

2 基于故障负序量排序的配电网保护新原理

2.1 核心保护判据

理论上, 利用负序电流排序和负序电压排序均能较快溯源至故障所关联的线路或母线, 但是, 考虑到配电网馈线数量远大于变电站或开闭所的数量, 对于规模较大的被保护区域, 若直接采用负序电流排序, 在故障发生后, 需要同时传输所涉及线路的负序电流量, 极可能由于线路数量过多导致传送的信息量过大, 造成保护因通信延迟而被动延时动作。有鉴于此, 考虑优先采用负序电压排序, 确定故障线路所关联的变电站, 进而, 召唤就地保护对所关联的线路的负序电流进行排序, 以确定故障线路。具体流程如下。

1) 对于被保护区域, 选择其中一个位置居中的变电站, 配置保护中心, 其任务是接收各就地保护智能电子设备(intelligent electronic device, IED)上传的故障启动信号, 并进一步发布全域负序电压采集指令, 完成全域负序电压采集并进行排序, 根据排序结果向目标变电站发送负序电流排序命令; 保护区内各开关站、变电站的保护 IED 可沿用原有三段式保护配置, 但是, 面向面保护中心, 其担负上传故障启动信号、计算负序电压、电流幅值, 并上传至保护中心的任务。

2) 被保护区域内任意就地保护启动后, 即可向保护中心发送保护启动信号。

3) 保护中心在收集到至少一个就地保护上传的启动信号后, 即发出全域负序电压采样指令, 利用 5G 通信将各个母线节点的负序电压传送到面保护中心。保护中心对负序电压的幅值进行比较, 搜索负序电压最大幅值, 如式(1)所示。

$$N_U = \text{index} \{ \max [U_1^-, U_2^-, \dots, U_m^-] \} \quad (1)$$

式中, $U_1^-, U_2^-, \dots, U_m^-$ 为各母线节点的负序电压幅值。最大幅值所对应的母线节点即为故障线路所连接的母线节点。

4) 锁定故障线路所连节点后, 保护中心向对应的变电站发出就地甄别指令, 采集该母线节点所连接线路的负序电流, 并对负序电流幅值进行比较, 确定负序电流最大幅值所在线路, 如式(2)所示, 该线路即故障线路。

$$N_I = \text{index} \{ \max [I_1^-, I_2^-, \dots, I_m^-] \} \quad (2)$$

式中, $I_1^-, I_2^-, \dots, I_m^-$ 代表负序电压最大值节点所连接各个线路的负序电流幅值。

由于采用相互比较的方式, 所提判据实际上是免整定的自适应保护判据, 避免了因主动配电网拓扑过于复杂且运行方式不确定而令保护整定难度畸高的问题。

2.2 面保护选择性校核判据

配电网规模可能达到数百节点, 数千条线路, 对整个配电网实施面保护无疑是不现实的。从工程实际的角度出发, 面保护理当应用于保护节点和线路数量有限的重要区域, 如包含近电源侧重载线路或关联重要出线较多的变电站。为此, 面保护应该是有界的, 本文将这类保护范围有限的面保护称为有界面保护。对于这类保护, 应有强针对性的面保护校核判据把关, 防止区外故障时保护误动作, 切除健全线路。

广域差动保护固然是一种能实现上述目的且性能较为优越的可选项, 但是, 其对信息同步的要求很高, 在配电网中很难具备实施条件。为解决上述问题, 必须设计针对有界面保护的选择性校核判据。

不妨设如图 5 虚框所示区域为被保护区域, 保护边界为 BUS₁ 和 BUS₃, A、B、C 为三处交界点, 出线分别为 L₆、L₄、L₅。

基于采样所得负序电压、电流, 本文提出一种针对面保护的选择性校核判据: 实测-补偿电压幅值比较判据。假定线路全长的中点处为参考点 Y, \dot{U}_n^- 为参考点的负序补偿电压, Z 为单位长度的线路负序阻抗, $\dot{U}_{n-\text{BUS}}^-$ 为对应线路所关联的母线实测负序电压, L_n 、 I_n^- 分别为参考点对应线路的长度、负序电流, 电流正方向为母线流向线路, 则各参考点的

补偿电压计算如式(3)所示。

$$\dot{U}_n^- = \dot{U}_{n-BUS}^- - \dot{I}_n^- Z \frac{L_n}{2} \quad (3)$$

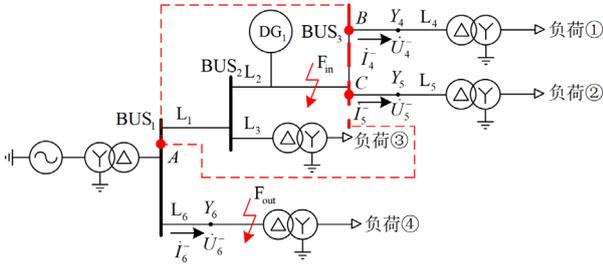


图5 配电网保护区拓扑图

Fig. 5 Topology of distribution network protection zone

根据前述负序电压分布规律,若故障发生在保护区内 F_{in} 处,则 L_4 、 L_5 上参考点处的补偿电压幅值 U_4^- 、 U_5^- 必低于母线 BUS_3 的实测电压幅值 U_{BUS3}^- ,而 L_6 上的参考点补偿电压幅值 U_6^- 也低于对应边界 BUS_1 的实测电压幅值 U_{BUS1}^- ,即

$$\begin{cases} U_{BUS3}^- > U_4^- \\ U_{BUS3}^- > U_5^- \\ U_{BUS1}^- > U_6^- \end{cases} \quad (4)$$

而当区外 F_{out} 点发生故障时,虽有 $U_{BUS3}^- > U_4^-$ 、 $U_{BUS3}^- > U_5^-$,但是, $U_{BUS1}^- < U_6^-$ 。即,若所有参考点电压幅值小于其关联节点电压幅值,则为区内故障,否则,为区外故障。该判据的普遍表达式如下所述。

假设保护区边界对应有 m 座变电站,第 i 座变电站对应的出线条数为 n_i ,该变电站母线负序电压幅值为 U_{i-in}^- ,其所连出线参考点处的负序补偿电压幅值分别为 U_{1-out}^- , \dots , $U_{n_i-out}^-$ 。

$$\begin{cases} U_{1-in}^- > \max\{U_{1-out}^-, \dots, U_{n_1-out}^-\} \\ \vdots \\ U_{i-in}^- > \max\{U_{1-out}^-, \dots, U_{n_i-out}^-\} \\ \vdots \\ U_{m-in}^- > \max\{U_{1-out}^-, \dots, U_{n_m-out}^-\} \end{cases} \quad (5)$$

若满足式(5),则可认为该故障为区内故障,反之则为区外故障。实质上,该判据为负序方向判据,但其摆脱了传统方向判据在主动配电网各种复杂工况下难以整定的困境,实现了保护判据的免整定,具有较强的自适应性。

此外,为降低保护系统对通信条件的依赖,避免保护启动后因未完全收到就地保护 IED 的反馈

信号而长时间无法复归的情形,可设计标志位。例如,在保护中心下达负序电压采样指令后,对第 i 座保护区边界变电站,若满足 $U_{i-in}^- > \max\{U_{1-out}^-, \dots, U_{n_i-out}^-\}$,则令标志位 $F_{lagi} = 1$,反之,则令 $F_{lagi} = 0$,并与负序电压一同传送至保护中心。保护中心收集所有标志位进行综合判断,若所有标志位均为 1,则判定为区内故障,反之直接判定为区外故障,保护复归,由此规避了过度依赖信息完整性实现故障性质判断的弊端。

2.3 基于实测-补偿电压幅值比较的特殊工况故障选线

由于配电网运行方式复杂多变,在电流排序时,目标变电站可能无法关联到 3 条及以上的线路,进而影响电流排序。如图 6 所示,目标变电站仅有两条线路投入运行, I_1^- 与 I_2^- 几乎相等,电流排序失效。为此,借助前述实测-补偿电压幅值比较判据,可以确定该特殊工况下的故障线路。

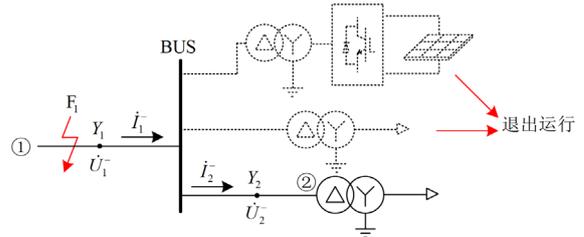


图6 母线节点双线路正常运行示意图

Fig. 6 Schematic diagram of normal operation of bus node with double lines

结合前述分析,若实测电压与补偿电压满足 $U_1^- > U_n^-$ 且 $U_2^- < U_n^-$,则表明①号线路距故障点更近,故障位于①号线路;如果实测电压与补偿电压满足 $U_1^- < U_n^-$ 且 $U_2^- > U_n^-$,则表明②号线路距故障点更近,故障位于②号线路。

如图 7 所示,当母线节点仅连接一条线路(即该变电站空载)时,变电站仅采集到空载线路的负序电流,接近于零,可直接判定该线路为故障线路。

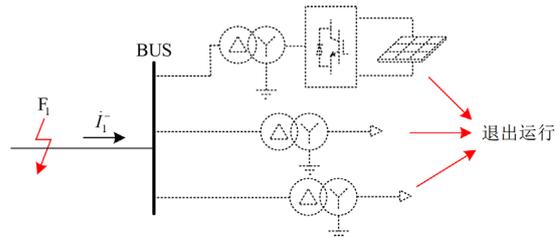


图7 母线节点单线路运行示意图

Fig. 7 Schematic diagram of operation of bus node with a single line

2.4 适用于面保护的通信网络设计及保护延时分析

目前, 借助 5G 通信实现单元式保护的方案已有较为深入的研究, 在基于 5G 通信的城市配电网分布式纵联保护方面已经取得了实质性的成功^[10]。但是, 若直接采用跨基站的信号传递方式, 则需要巨大的资金投入。

新兴的网络切片技术为解决上述通信问题提供了条件。网络切片可以利用现有的公共网络, 划分出逻辑隔离网络分区, 实现独立的控制和管理功能, 能够为保护所需的电压、电流数据开辟专属通道, 从而有效降低通信时延和时延抖动, 保证通信数据的安全性, 其通信原理如图 8 所示。借此良机, 所提面保护即可在现有公网条件下实现高速通信, 节约了大量的人力、物力、时间成本。

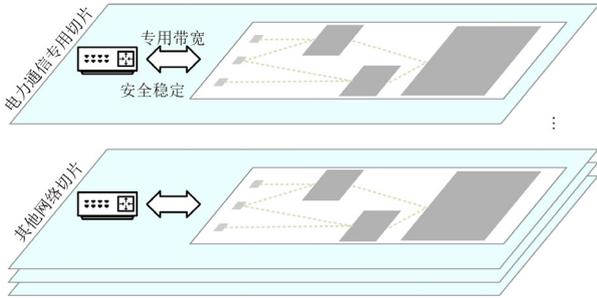


图 8 网络切片通信原理示意图

Fig. 8 Schematic diagram of network slicing communication principle

基于网络切片技术的配电网 5G 通信示意图如图 9 所示。

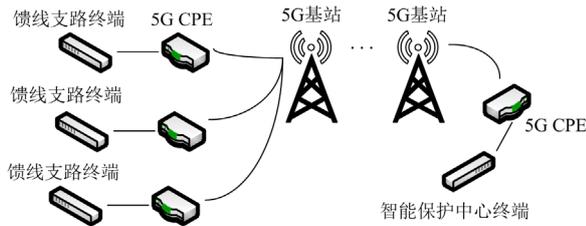


图 9 配电网 5G 通信示意图

Fig. 9 Schematic diagram of 5G communication in distribution network

需要注意, 在采集和发送负序电压、电流时, 由于各 5G 通信终端的分布位置、工作环境不同, 指令信号到达各个保护终端的时间也会存在差异。这将导致传送至保护中心的负序量采集于不同时刻。虽然负序量为故障稳态信息, 但是, 5G 网络通信单次来回交互最长可达 15 ms, 易与 LVRT 的切换时刻混淆。

鉴于配电网保护对动作时限的要求并非特别严

苛, 可考虑牺牲一定的速动性来保证可靠性。因此, 保护中心在收到第一个保护启动信号后, 主动延时 20 ms, 再同时下发采样命令和标志位生成命令。各就地 IED 接收到该命令后就地执行并上传相应信息, 虽然这些信息可能存在异步采样的可能性, 但是, 上述设计已经很好地规避了 LVRT 不同步切换造成故障网络不一致的风险。所采集的信息虽然不同步, 但均对应同一故障网络, 幅值信息仍然稳定。

故障处理过程中各阶段任务及理论估算时间如图 10 所示。其中: Δt_{m1} 为 5G 通信往返时间, 本文取 5~15 ms; Δt_{m2} 为采样时延, 本文取 20 ms; Δt_{m3} 为负序分量提取与打包时间, 本文取 20~25 ms; Δt_{m4} 为负序电压、电流排序计算, 本文取 1~2 ms; Δt_{m5} 为继电器固有动作时间, 本文取 5~10 ms。

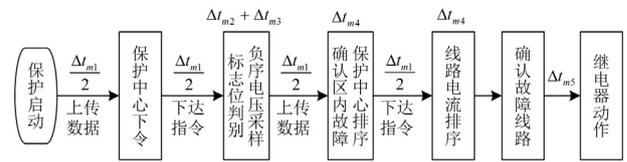


图 10 时延分析图

Fig. 10 Time delay analysis diagram

因此, 保护动作时间 t_p 为

$$t_p = 2\Delta t_{m1} + \Delta t_{m2} + \Delta t_{m3} + 2\Delta t_{m4} + \Delta t_{m5} = 57 \sim 89 \text{ ms}$$

考虑到一个保护配合级差在 300~500 ms, 该保护的動作速度慢于主保护而显著快于 II 段即近后备保护, 可以作为准主保护发挥显著作用。

3 仿真实验

3.1 仿真模型构建

为验证上述保护新判据和新方案的可行性和优越性, 基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建仿真模型, 如图 11 所示。

图中红框内区域为有界面保护区域, 保护区边界为 A、B、C、D 4 点; L_1 — L_{13} 为馈线, BUS_1 — BUS_5 为变电站(母线)节点。F₁、F₂、F₃、F₄、F₅ 代表 5 处典型故障点, 分别为距线路 L_3 末端 2 km 处、距线路 L_{10} 首端 2 km 处、距线路 L_2 末端 2 km 处、线路 L_{13} 中点处、距线路 L_8 首端 4 km 处。其余配电网设备已于图中标注。在系统发生不对称故障时, 各保护终端依靠 5G 通信将负序电压、电流传送至保护中心。

系统参数如下:

1) 系统电源为 110 kV, 频率为 50 Hz, 基准容量为 100 MVA。

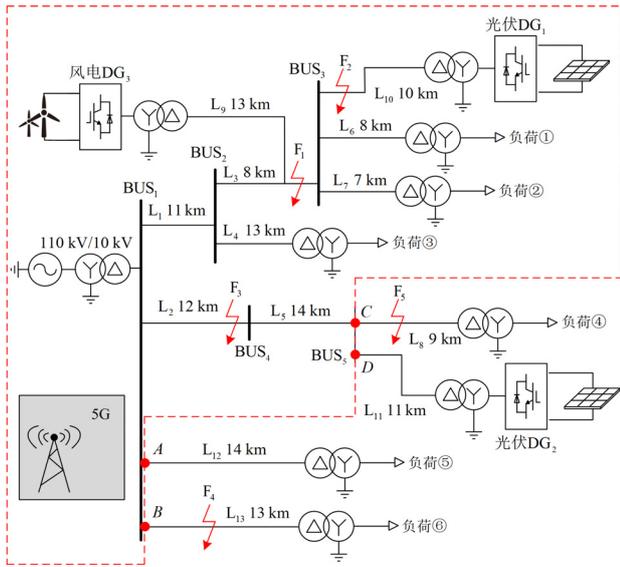


图 11 配电网仿真模型图

Fig. 11 Distribution network simulation model diagram

2) 配电网电压等级为 10 kV；所有线路均为架空线路，线路 L_1 长度为 11 km、 L_2 为 12 km、 L_3 为 8 km、 L_4 为 13 km、 L_5 为 14 km、 L_6 为 8 km、 L_7 为 7 km、 L_8 为 9 km、 L_9 为 13 km、 L_{10} 为 10 km、 L_{11} 为 11 km、 L_{12} 为 14 km、 L_{13} 为 13 km；线路电阻 $r = 0.17027 \Omega/\text{km}$ ，线路电抗 $x = 0.3364 \Omega/\text{km}$ 。

3) DG 容量如下：光伏 DG_1 容量为 3 MW，光伏 DG_2 容量为 1 MW，小型风电 DG_3 容量为 1 MW。各 DG 均配置 LVRT 紧急控制策略。

4) 负荷 ①—⑥ 分别为 3、2、4、2、2、3 MW。根据文献[24]，将保护上下级阶梯配合时间整定为 500 ms。

3.2 仿真验证

1) 保护核心判据验证

F_1 作为含有多条支路的典型节点，可在此处设置典型故障，验证保护核心判据的可行性。首先，在该处设置金属性两相相间短路，故障时刻为 $t = 1\text{s}$ ，故障前后各母线节点的负序电压幅值以及各线路的负序电流幅值分别如图 12、图 13 所示。

由图 12、图 13 分析可知，故障前各节点及支路的负序电压、电流幅值几乎为 0，故障后节点负序电压幅值、支路负序电流幅值陡然上升，并在一个周波之后趋于稳定。期间，由于故障 10 ms 后 LVRT 的投入，负序电压、电流的爬升趋势变缓，但并未改变负序电压、电流的分布规律，仍然符合故障点负序电压最高，周边节点随着逐渐远离故障点，其负序电压不断降低的特征；负序电流则保持

以故障线路为干路，向其他支路逐渐分流的特点。

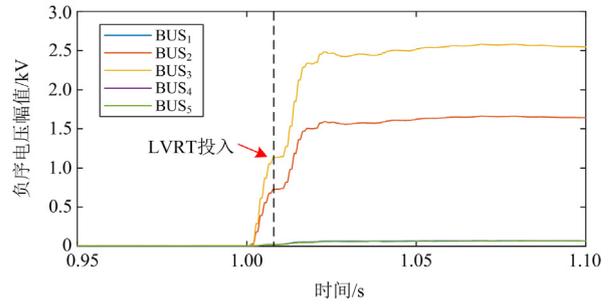


图 12 故障时各母线节点的负序电压幅值图

Fig. 12 Negative sequence voltage amplitude diagram of each bus node in fault

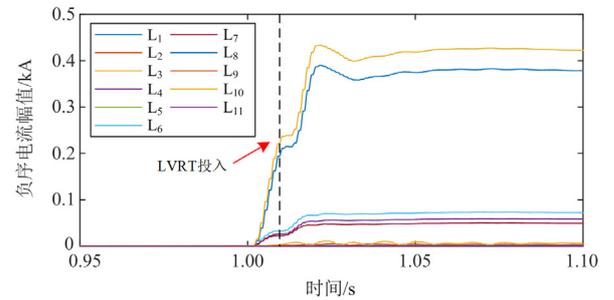


图 13 故障时各支路负序电流幅值图

Fig. 13 Negative sequence current amplitude diagram of each branch in fault

为进一步验证新判据和新方案的可靠性和适应性，于故障点 F_2 处设置两相接地故障和两相相间短路故障，当过渡电阻分别为 0Ω 、 30Ω 时，各母线节点的负序电压幅值、线路的负序电流幅值分布分别如表 1、表 2 所示。

表 1 不对称故障时母线节点负序电压幅值

Table 1 Negative sequence voltage amplitude of bus node in asymmetric fault

故障类型	过渡电阻/ Ω	母线节点负序电压幅值/kV				
		BUS ₁	BUS ₂	BUS ₃	BUS ₄	BUS ₅
两相接地	0	0.054	1.285	2.294	0.054	0.055
	30	0.010	0.239	0.422	0.010	0.013
两相相间	0	0.053	1.284	2.293	0.052	0.052
	30	0.018	0.446	0.789	0.019	0.021

由表 1 可知，发生各种类型的不对称短路故障时，负序电压幅值最大的母线节点均为与故障线路相连接的 BUS_3 。由此可见，利用负序电压排序搜寻故障线路所连节点的方案是可行的。

由表 2 可知，当发生不对称短路故障时，故障线路 L_{10} 的负序电流幅值最大。因此利用负序电流排序搜寻故障线路的方案也是可行的。

表 2 不对称故障时线路的负序电流幅值
Table 2 Line negative sequence current amplitude in case of asymmetric fault

故障位置	线路序号	线路负序电流幅值/kA			
		两相接地		两相相间	
		过渡电阻为 0 Ω	过渡电阻为 30 Ω	过渡电阻为 0 Ω	过渡电阻为 30 Ω
F ₂	L ₁	0.296	0.057	0.296	0.106
	L ₂	0.000	0.000	0.001	0.000
	L ₃	0.330	0.064	0.330	0.119
	L ₄	0.045	0.008	0.045	0.016
	L ₅	0.000	0.000	0.001	0.000
	L ₆	0.065	0.012	0.065	0.023
	L ₇	0.044	0.008	0.044	0.015
	L ₈	0.000	0.000	0.000	0.000
	L ₉	0.002	0.000	0.002	0.001
	L ₁₀	0.408	0.079	0.408	0.146
	L ₁₁	0.000	0.000	0.000	0.000

2) 保护选择性校核判据验证
为验证所提选择性校核判据的正确性, 分别于保护区内 F₃ 处, 保护区外 F₄、F₅ 处设置金属性短路

故障, 各工况下保护区边界处的实测-补偿电压如表 3 所示。其中, U_{A-out}^- 、 U_{B-out}^- 、 U_{C-out}^- 、 U_{D-out}^- 分别为保护区 A、B、C、D 四处边界出线的补偿电压幅值。

表 3 边界母线及参考点处的补偿电压
Table 3 Compensation voltage at the boundary bus and reference point

故障位置 及类型	负序电压幅值/kV					
	边界母线 BUS ₁			边界母线 BUS ₅		
	U_{1-in}^-	U_{A-out}^-	U_{B-out}^-	U_{5-in}^-	U_{C-out}^-	U_{D-out}^-
F ₃ 两相接地	0.135	0.131	0.129	2.703	2.658	2.656
F ₃ 两相相间	0.135	0.131	0.128	2.703	2.658	2.657
F ₄ 两相接地	0.129	0.125	1.879	0.123	0.114	0.113
F ₄ 两相相间	0.129	0.125	1.878	0.123	0.114	0.112
F ₅ 两相接地	0.043	0.041	0.040	2.377	2.799	2.341
F ₅ 两相相间	0.043	0.041	0.040	2.377	2.798	2.341

据表 3 分析可知, 当保护区内 F₃ 处发生故障时, 母线电压与参考点补偿电压之间总能满足关系式 $U_{1-in}^- > \max\{U_{A-out}^-, U_{B-out}^-\}$ 、 $U_{5-in}^- > \max\{U_{C-out}^-, U_{D-out}^-\}$; 而当区外 F₄ 故障时, 虽有 $U_{5-in}^- > \max\{U_{C-out}^-, U_{D-out}^-\}$ 、但 $U_{1-in}^- < \max\{U_{A-out}^-, U_{B-out}^-\}$; 同样, 区外 F₅ 故障时, $U_{1-in}^- > \max\{U_{A-out}^-, U_{B-out}^-\}$ 、 $U_{5-in}^- < \max\{U_{C-out}^-, U_{D-out}^-\}$, 并不一致。因此, 该选择性校核判据能够有效判别区内外故障, 满足保护选区的需求。

3) 特殊工况下故障选线判据验证

为验证基于实测-补偿电压幅值比较的特殊工况故障选线判据的有效性, 于 F₃ 处设置金属性短路故障。对于该故障, BUS₄ 为负序电压幅值最大的母线节点, 而 BUS₄ 仅有两回出线, 触发本文所提特殊

工况故障选线判据。如前文所述, 补偿点为线路 L₂、L₅ 中点, 线路阻抗 $Z = (0.17027 + j0.3364) \Omega/\text{km}$ 。对应的电压幅值如表 4 所示。

表 4 F₃ 处故障时参考点的负序电压幅值
Table 4 Negative sequence voltage amplitude at reference point in case of fault at F₃

故障类型	过渡 电阻/Ω	负序电压幅值/kV		
		左侧参考点	右侧参考点	BUS ₄
两相接地	0	3.073	2.821	2.957
	30	0.345	0.322	0.334
两相相间	0	3.011	2.809	2.917
	30	0.655	0.629	0.644

由表 4 分析可知, BUS₄ 左侧的参考点补偿电压均显著大于右侧, 即故障侧的补偿电压大于非故障

侧,符合前述理论分析,验证了判据的有效性。

3.3 5G 通信可靠性验证

为验证 5G 通信的可靠性并测试数据传输时延,利用 Network Pinger 模拟保护终端向保护控制中心发送并返回电气量信息。测试次数为 100,数据大小为 100 kb,延时分布图如图 14 所示。

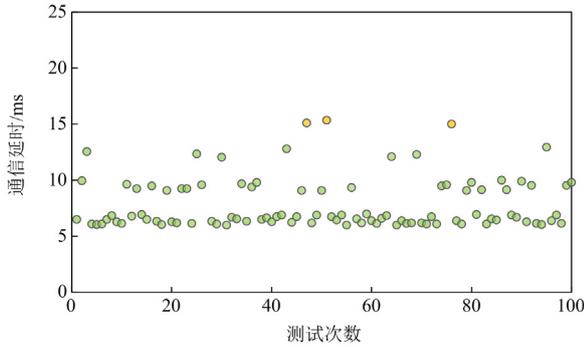


图 14 延时分布图
Fig. 14 Delay profile

图中从左至右依次为第 1 至 100 次测试的通信延迟。共发送数据包 100 次,接收数据包 100 次,数据丢失率为 0%;最小延时为 6.0 ms,最大延时为 16.9 ms,平均延时为 8.1 ms;通信延时小于 15 ms 的占 97%,通信延时大于 15 ms 且小于 20 ms 的占 3%。

根据上述分析可知,单次信号闭环传输的仿真

时延略大于公开报道的时延上限 15 ms。事实上,即便该延时达到 17 ms,保护的整组动作时间也仅为 93 ms 左右,远小于单级时间阶梯级差 500 ms,仅比主保护动作出口速度慢约 3 个周波,远快于传统的保护 II 段。

3.4 新保护原理的优越性

为验证保护新方案相较于传统三段式电流保护的优越性,现基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台,利用前述配电网仿真模型,并结合 Network Pinger 模拟 5G 信号传递,对比分析两种保护在不同故障工况下的动作情况。

现以 F_1 、 F_3 为故障点进行算例分析,对保护的抗过渡电阻能力、速动性等性能进行对比。其中三段式电流保护暂且依照目前电网保护整定的惯例,按照分布电源未接入配电网的情形进行整定。限于篇幅,仅给出故障线路 L_2 、 L_3 及 L_3 的上游线路 L_1 所对应定值,如表 5 所示。对比结果如表 6 所示。

表 5 目标线路电流保护整定值

目标线路	三段式电流保护整定值/kA		
	I 段	II 段	III 段
$L_1(F_1)$	1.680	1.138	0.579
$L_2(F_3)$	1.536	0.867	0.151
$L_3(F_1)$	0.949	0.797	0.313

表 6 新方案与电流保护的動作性能对比

Table 6 Comparison of action performance between the new scheme and current protection

故障位置	故障类型	过渡电阻/ Ω	短路电流/kA	故障切除时间/ms	
				电流保护	5G 负序保护
F_1	两相接地	0	0.564	571(II)	63
		30	0.251	不动作	65
	两相相间	0	0.597	578(II)	63
		30	0.324	1070(III)	67
F_3	两相接地	0	0.771	1576(III)	62
		30	0.237	1568(III)	63
	两相相间	0	0.773	1569(III)	64
		30	0.384	1575(III)	63

注: II 代表第二段保护动作; III 代表第三段保护动作。

由表 6 定值比较可知,当 F_1 处发生不对称故障时,故障切除时间均大于 570 ms。尤其需要注意的是,当 F_1 处发生两相接地短路故障时,由于过渡电阻的存在及 DG 的影响,故障线路的短路电流较小,线路 L_3 的三段保护全部拒动, L_1 处过电流保护作为该线路的后备保护,同样拒动,无法切除故障。当 F_3 处发生不对称故障时, DG 的影响则更为显著,故障线路 L_2 的 I、II 段保护均不动作,仅依靠过电流

保护切除故障。由于越靠近大电网侧的过流保护动作时延越长,系统的故障切除时间大大增加,超过 1500 ms。在实际工程应用中,配电网往往更加复杂,靠近大电网侧的保护时延将会进一步增加。

为进一步验证本文所提保护新原理相比于现有主动配电网保护新判据的优越性,以文献[14]所提判据作为对照,进行性能对比分析,为便于叙述,将其命名为对照判据。以区内 F_1 、区外 F_5 为例,设置两相接地短路故障进行分析,对含有不可测分支

的线路 L_3 , 分别配置不可测分支为原模型 DG_3 、1 MW 感应电机、 DG_3 与 1 MW 感应电机共同作用, 综合对比两种保护的抗过渡电阻能力、速动性等性能。其中, 当不可测分支为电动机负荷时, 对照判据依照文献[14]整定; 当不可测分支为 DG 或混合支路时, 该文献并未对上述情况进行研究, 而 DG

的馈出电流及演化规律与电动机故障电流迥异, 并不能直接参考该文献的整定原则。因此, 在下面的对比分析中, 这两种工况下, 对照判据暂不可用, 仅考察本文判据的情形。两种判据的动作性能对比如表 7 所示。

表 7 新判据与对照判据的动作性能对比

Table 7 Comparison of operational performance between the new criterion and the comparison criterion

分支类型	故障位置	过渡电阻/ Ω	动作情况	
			幅值差动保护	5G 负序保护
感应电机	F_1	0	延时 17 ms 动作	延时 64 ms 动作
		15	延时 547 ms 动作	延时 65 ms 动作
		30	拒动	延时 64 ms 动作
	F_5	0	不误动	不误动
		30	不误动	不误动
		—	—	—
DG_3	F_1	0	—	延时 63 ms 动作
		30	—	延时 65 ms 动作
		—	—	—
	F_5	0	—	不误动
		30	—	不误动
		—	—	—
$DG_3 +$ 感应电机	F_1	0	—	延时 64 ms 动作
		30	—	延时 65 ms 动作
		—	—	—
	F_5	0	—	不误动
		30	—	不误动
		—	—	—

由表 7 可知, 当不可测分支为感应电机时, 两种判据均能可靠不误动。当所连接系统较强, 且发生金属性故障时, 对照判据的出口速度可媲美主保护。但是, 随着过渡电阻的增大, 故障强度减弱, 两侧电流的幅值不断接近, 导致其动作延时迅速增加。当达到数十欧姆的过渡电阻时, 直接失去动作能力。相比而言, 在合理的过渡电阻范围内, 本文判据均能稳定在 70 ms 以内出口动作, 具有更强的适应性。

而当不可测分支不仅仅是电动机分支时, 如表 7 中所示, 对照判据失效, 而本文判据完全不受不可测分支性质的影响, 对于区外故障, 可靠不动作, 对于各种区内故障, 均能在 70 ms 内顺利出口动作, 由此进一步验证了本文所提判据和方案的优越性。

4 结论

针对大量 DG 接入配电网对配电网保护带来的新挑战, 本文分析了有源配电网不对称故障期间的负序量分布特征, 提出了一种基于负序量排序与 5G 通信相结合的主动配电网有界面保护判据及实现方案, 并借助 PSCAD/EMTDC 仿真平台验证了所提判据及方案的可行性和优越性, 得出如下结论。

1) 与传统配电网相比, 即便考虑了 DG 的各种

紧急控制, 主动配电网发生不对称故障时, 故障点负序电压最高、由故障点向电源点/负荷点延伸负序电压逐渐降低的规律并未发生改变, 据此可以设计高可靠性且不依赖同步采样的主动配电网自适应保护判据。借助面保护选择性校核判据, 所提面保护可以实现保护规模的灵活部署。

2) 带时标的 5G 通信能够降低保护新方案对 5G 通信的依赖性, 而且提高了保护的可靠性。仿真试验表明, 5G 通信可靠稳定, 延时较小, 能够满足配电网线路保护的通信需求。

3) 相较于幅值差动保护, 所提保护具有对不可测分支更强的适应性和动作稳定性; 相较于传统三段式电流保护, 保护新方案能够大大提升配电网故障的切除速度, 始终能于 90 ms 内可靠切除故障, 且在数十欧姆的相间弧光过渡电阻和接地电阻的情形下, 该方案仍能具有良好的故障辨识能力。

4) 当过渡电阻持续提升, 各个母线节点的负序电压幅值以及各条线路的负序电流幅值都将产生一定程度的下降, 负序量幅值的差异将缩小。由于保护装置的测量误差, 电压、电流测量值与实际值存在差异, 可能导致幅值大小误判。因此, 如何保证在负序量幅值较小时精准测量电压、电流信息并提高过渡电阻条件下的故障辨识能力, 仍有待后续深

入研究。

参考文献

- [1] 方愉冬, 徐峰, 李跃辉, 等. 基于改进粒子群算法的含 DG 配网反时限过流保护定值优化方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(4): 13-19.
FANG Yudong, XU Feng, LI Yuehui, et al. An optimization method for setting value of inverse-time overcurrent protection in distribution network with DG based on MPSO[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4): 13-19.
- [2] 贾健飞, 李博通, 孔祥平, 等. 计及逆变型分布式电源输出特性的配电网自适应电流保护研究[J]. 高压电器, 2019, 55(2): 149-155.
JIA Jianfei, LI Botong, KONG Xiangping, et al. Research on adaptive current protection for distribution network considering the output characteristics of inverter-interfaced distributed generator[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2): 149-155.
- [3] 曾德辉, 王钢, 郭敬梅, 等. 含逆变型分布式电源配电网自适应电流速断保护方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 86-92.
ZENG Dehui, WANG Gang, GUO Jingmei, et al. Adaptive current protection scheme for distribution network with inverter-interfaced distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 86-92.
- [4] 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.
- [5] 高岩, 李永丽, 陈晓龙, 等. 基于电流幅值比的有源配电网自适应差动保护原理[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(2): 1-7.
GAO Yan, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Adaptive differential protection principle for active distribution network based on current amplitude ratio[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 33(2): 1-7.
- [6] 明潇宇, 吕飞鹏, 余晓, 等. 含 T 接逆变型分布式电源配电网的纵联保护方案[J]. 电测与仪表, 2020, 57(11): 74-79.
MING Xiaoyu, LÜ Feipeng, YU Xiao, et al. Pilot protection scheme for distribution network with T-connected inverter interfaced distributed generation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(11): 74-79.
- [7] 许偲轩, 陆于平. 适用于含分布式电源配电网的纵联保护方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 113-118, 155.
XU Sixuan, LU Yuping. A pilot protection method for distribution network with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 113-118, 155.
- [8] 王杰, 王维庆, 王海云, 等. 考虑越限风险的主动配电网中 DG、SOP 与 ESS 的两阶段协调规划[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 71-82.
WANG Jie, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Two-stage coordinated planning of DG, SOP and ESS in an active distribution network considering violation risk[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 71-82.
- [9] 邹晓峰, 沈冰, 蒋献伟. 5G 通信条件下配网差动保护快速动作方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 163-169.
ZOU Xiaofeng, SHEN Bing, JIANG Xianwei. A quick action scheme of differential protection for a distribution network with 5G communication[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 163-169.
- [10] 高厚磊, 徐彬, 向珉江, 等. 5G 通信自同步配网差动保护研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 1-9.
GAO Houlei, XU Bin, XIANG Minjiang, et al. Research and application of self-synchronized differential protection for distribution networks using 5G as the communication channel[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 1-9.
- [11] 朱逸凡, 赵宏程, 陈争光, 等. 适用于逆变型电源接入的配电网故障方向判别元件[J]. 中国电力, 2019, 52(5): 76-82.
ZHU Yifan, ZHAO Hongcheng, CHEN Zhengguang, et al. Fault direction discriminating element used for the distribution network with IIG integration[J]. Electric Power, 2019, 52(5): 76-82.
- [12] 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]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2022, 37(S1): 134-144.
- [13] 刘科研, 叶学顺, 李昭, 等. 环状有源配电网改进电流差动保护方案[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(3): 157-165.
LIU Keyan, YE Xueshun, LI Zhao, et al. An improved current differential protection scheme for annular active distribution networks[J]. Journal of Electric Power

- Science and Technology, 2023, 38(3): 157-165.
- [14] 王子璇, 马啸, 杨勇, 等. 计及不可测分支负荷电源助增效应的有源配网幅值差动保护新判据[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增刊 1): 56-68.
WANG Zixuan, MA Xiao, YANG Yong, et al. A new criterion of amplitude differential protection for active distribution network considering load power effect of unmeasurable branches[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 56-68.
- [15] 李凡, 齐蓬勃, 弋富国, 等. 5G 技术对新能源接入配电网继电保护的影响及优化[J]. 制造业自动化, 2023, 45(8): 77-80.
LI Fan, QI Pengbo, YI Fuguo, et al. The impact and optimization of 5G technology on the relay protection of new energy access to the distribution network[J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(8): 77-80.
- [16] 黄杨, 朱雨, 何明, 等. 基于 5G 的配电网线路差动保护时间同步算法[J]. 供用电, 2022, 39(12): 11-16, 44.
HUANG Yang, ZHU Yu, HE Ming, et al. Time synchronization algorithm of distribution network line differential protection based on 5G[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(12): 11-16, 44.
- [17] 濮宏飞, 吴通华, 姚刚, 等. 基于 5G 通信的有源配电网线路差动保护实用化方案[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 117-124.
PU Hongfei, WU Tonghua, YAO Gang, et al. Practical scheme of line differential protection for active distribution network based on 5G communication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23): 117-124.
- [18] 刘丰, 曾祥君, 谢李为, 等. 基于相电压差值极性的配电网单相接地故障检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 155-165.
LIU Feng, ZENG Xiangjun, XIE Liwei, et al. Single-phase grounding fault detection method for a distribution network based on phase voltage difference polarity value[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 155-165.
- [19] 楚恬歆, 张文海, 瞿科, 等. 小电流接地系统接地型早期故障扰动特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 52-61.
CHU Tianxin, ZHANG Wenhai, QU Ke, et al. Grounded incipient fault analysis in a non-solidly grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 52-61.
- [20] 常新建, 邵文权, 程远, 等. 基于模型预测控制的配电网单相接地故障有源消弧[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 161-169.
CHANG Xinjian, SHAO Wenquan, CHENG Yuan, et al. Active arc suppression of a single-phase grounding fault in distribution network based on model predictive control[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 161-169.
- [21] 刘洪, 李其哲, 高强, 等. 网孔型中压配电网组网形态、核心特征与研究展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(16): 181-191.
LIU Hong, LI Qizhe, GAO Qiang, et al. Networking morphology, key feature and research prospect of mesh-type medium-voltage distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 181-191.
- [22] 朱雪凌, 王振亚, 辛自立, 等. 分布式电源对配电网三段式电流保护的影响[J]. 华北水利水电学院学报, 2013, 34(6): 106-109.
ZHU Xueling, WANG Zhenya, XIN Zili, et al. Effects of distributed generator on three-section current protection of distribution network[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2013, 34(6): 106-109.
- [23] 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.
HU Yong, ZHENG Liming, JIA Ke, et al. Pilot protection based on Tanimoto similarity for a photovoltaic station transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 74-79.
- [24] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2009.
-
- 收稿日期: 2023-12-07; 修回日期: 2024-01-31
作者简介:
顾本硕(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网及电力系统继电保护; E-mail: 1374626251@qq.com
林湘宁(1970—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析、新型发供电技术。E-mail: xiangning.lin@hust.edu.cn
(编辑 周金梅)