

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231321

# 提升抗时延抖动和数据异常性能的配电网故障 自同步 5G 差动保护方案

王元上, 袁至, 王维庆

(新疆大学可再生能源发电与并网控制教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830017)

**摘要:** 配电网 5G 差动保护信道的来回时延不等导致传统同步算法无法应用, 需要增加额外的同步装置。另外, 5G 信道存在时延抖动和数据异常等问题会对保护的可靠性产生影响。针对这些问题, 首先提出了基于变频插值的故障自同步法, 在保护装置启动后利用插值法处理故障前特定时刻数据窗来实现同步误差校正。以此为基础, 分析保护可能面临的异常数据特征, 提出了考虑舍去极值的 Hausdorff 故障判别算法。最后设计了一种能够提升抗时延抖动和数据异常性能的配电网故障自同步 5G 差动保护方案。在 PSCAD 对方案进行仿真验证, 结果表明所提方案能够在不增设额外同步装置的前提下有效提升抗时延抖动和数据异常的性能, 保证发生各类故障和存在大噪声时的保护可靠性。该方案可为配电网 5G 差动保护的可靠性提供保障。

**关键词:** 5G 通信; 差动保护; 时延抖动; 时间同步; 配电网

## Self-synchronizing 5G differential protection scheme for distribution network faults with improved performance against delay jitter and data anomalies

WANG Yuanshang, YUAN Zhi, WANG Weiqing

(Engineering Research Center Renewable Energy Power Generation and Grid-connected Control,  
Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

**Abstract:** The unequal round-trip delay of 5G differential protection channels in distribution networks leads to an inability to apply traditional synchronization algorithms and the need to add additional synchronization devices. In addition, the 5G channel has problems such as delay jitter and data anomalies. These will have an impact on the reliability of the protection. To address these problems, a fault self-synchronization method based on variable frequency interpolation is first proposed, where the interpolation method is used to process the data window at a specific moment before the fault after the protection device is activated to realize the synchronization error correction. Based on this, the abnormal data characteristics that the protection may face are analyzed, and the Hausdorff fault discrimination algorithm considering rounded poles is proposed. Finally, a 5G differential protection scheme for distribution network fault self-synchronization that can improve the performance against delay jitter and data anomalies is designed. The scheme is simulated and verified in PSCAD, and the results show that the proposed scheme can effectively improve the performance of anti-delay jitter and data anomaly without additional synchronization devices, and ensure the reliability of protection in the event of various types of faults and the presence of large noise. The proposed scheme can guarantee the reliability of 5G differential protection for distribution networks.

This work is supported by the Major Science and Technology Program of Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2022A01001-4).

**Key words:** 5G communication; differential protection; delay jitter; time synchronization; distribution networks

## 0 引言

在分布式电源(distributed generation, DG)高比

例接入的新形态配电网下, 配网供电结构复杂性增大, 继电保护迎来新的机遇和挑战, 传统的基于单端电气量的配电网保护不再适用于现在的配电网络<sup>[1-2]</sup>。差动保护在面对复杂环境时, 具有可靠的选择性, 运行维护方便且易于整定。随着移动通信技术的不断发展, 5G 切片技术、多接入边缘计算技术

**基金项目:** 新疆维吾尔自治区重大科技专项资助(2022A01001-4); 国家自然科学基金项目资助(52067020)

(multi-access edge computing, MEC)和核心网下沉功能可有效降低 5G 的端到端时延<sup>[3-4]</sup>, 为差动保护中的数据传输提供了一条新的思路<sup>[5-6]</sup>, 特别适用于结构复杂的配电网线路。

5G 通信作为线路差动保护数据通道时, 主要存在两方面问题。一方面, 与光纤通道不同, 5G 通信来回时延不等。5G 差动保护需要增加额外的接收装置, 通过全球定位系统建立专用的时钟服务器和同步网络对采样数据进行同步授时<sup>[7]</sup>, 使得差动保护的运行维护成本大大增加。如何在不增设其他装置的情况下同步两端的数据是 5G 差动保护急需解决的重要问题。另一方面, 5G 通信的传输时延仍然存在抖动, 时域上出现失真, 采样点数据不连续或者错序, 传统差动保护原理的可靠性大幅降低<sup>[8]</sup>。针对同步授时问题, 文献[9]提出了基于相关系数和概率统计的时间同步算法, 将故障和非故障情况下的时间差分开计算, 但是太长的流程会影响保护速动性; 文献[10-11]提出利用故障时刻电流相量瞬时值的方法实现同步, 这类时间同步法在 5G 通信出现时延抖动时会出现较大误差; 文献[12]提出基于参考相量的故障自同步法, 但是仍未解决 5G 时延抖动、数据异常的影响。针对 5G 通信差动保护区内外故障的判别问题, 最有效的解决方法是采用对数据同步性和准确度要求较低的算法, 文献[13-14]提出将 DTW 算法应用于 5G 差动保护, 提升了系统的稳定性, 但是 DTW 算法的抗噪声能力弱, 无法适应配电网复杂的运行环境; 文献[15]采用 Hausdorff 算法作为差动保护判据, 解决了通信中出现的异常数据问题; 文献[16-17]提出的 Hausdorff 算法具有良好的非同步适应能力和抗干扰能力。

为实现不依赖于外部装置的授时功能, 本文提出了基于变频插值的故障自同步算法, 将故障发生前特定时刻的采样信息插值后再进行时间同步。针对故障判别的问题, 提出考虑舍去极值的 Hausdorff 距离算法作为保护判据, 通过对动作量的阈值整定, 消除时延抖动、数据异常、噪声对保护的影响。最后, 设计了一种能提升抗时延抖动和数据异常性能的配电网故障自同步 5G 差动保护整体方案。基于 PSCAD 的仿真案例验证了所提方案的有效性。

### 1 基于 5G 通信的差动保护时延特征

差动保护需要在线路端点之间建立通信通道, 以便比较两个或多个远程端点的电气量。传统的无线通信技术存在空口时延大、数据包易丢失等问题, 不能作为差动保护的通信通道。为了解决以上问题, 传统差动保护通过单独的光纤回路来进行可靠远距

离传输, 这种方法适用于长距离输电线路, 但在配电网的复杂环境中, 若采用光纤作为唯一的数据通道, 建设难度和维护成本都非常高, 因此要探寻更适合配电网差动保护的数据传输方式。

随着通信技术的发展, 5G 网络以其低时延、高可靠的特性逐渐应用于工业物联网场景。与 4G 相比, 5G 通信速度更快、时延更小, 可靠性大幅提升, 与配电网差动保护对通信技术的需求非常吻合。5G 网络中的空口时隙长度可以根据实时的网络情况进行动态优化, 在有超低时延的需求时可以快速插入一个或几个长度为 0.125 ms 的短时隙, 这样低延迟业务的资源可以优先与最接近的基站建立连接, 以此来提升系统的反应速度<sup>[18]</sup>。同时, 5G 网络切片技术与 MEC 的融合技术不断发展, 使得将无线通信用作差动保护的通信通道成为可能。在进行信息传输时, 保护装置只需将数据传输到 MEC 节点, 缩短了整体的反应时间。在新型电力系统 5G 电力专网下, 端到端时延小于 10 ms, 可靠性大幅提升。

虽然 5G 通信实现了超低时延, 但是在传播过程中仍会发生衰减、反射、干扰等多路径传播现象, 导致采样数据出现时域上的抖动。同时 5G 通道的丢包率约为  $10^{-5}$ , 约为光纤通道丢包率的 10 000 倍<sup>[19]</sup>。图 1 给出了采样数据波形和传输时延后数据失真波形的比较。

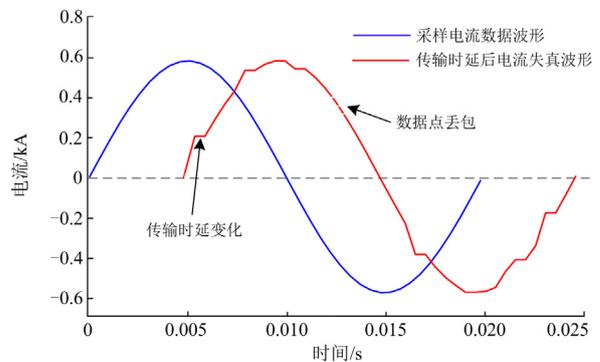


图 1 采样数据波形和传输时延后数据失真波形的比较  
Fig. 1 Comparison of sampled data waveform and data distortion waveform after transmission delay

由图 1 可知, 采样电流数据波形通过 5G 通信传输后出现不可预测的抖动, 如果仅依赖单一时刻电流采样值进行保护判定, 那么保护的可靠性将大大降低。

### 2 基于 5G 的差动保护故障自同步方法

#### 2.1 传统故障自同步法

不依赖外部装置授时的数据同步方案可有效减

少 5G 差动保护的硬件成本。配电网线路的长度通常较短, 电磁波在较短线路中的传播时间可以忽略不计, 因此可以认为两端将同时检测到故障引起的电流波形变化, 两终端以检测到故障的时刻为参考点, 计算保护相关信息, 实现数据同步<sup>[20]</sup>。图 2 为基于 5G 配电网的故障自同步技术示意图。 $R_M$  和  $R_N$  为线路两侧的保护装置,  $i_M$  和  $i_N$  为采集到的电流信息, 采样数据通过 5G 网络传输, 两端故障电流波形取自配电网三相线路中的 A 相电流波形。

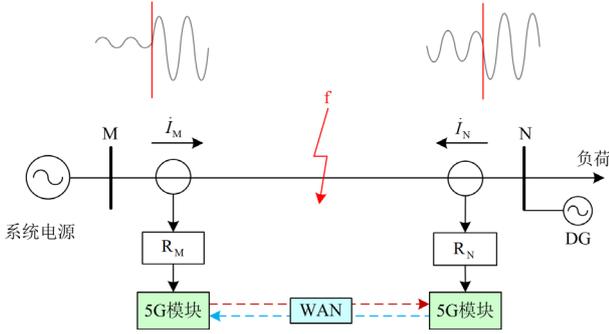


图 2 基于 5G 配电网的故障自同步示意图

Fig. 2 Schematic of fault self-synchronization based on 5G distribution network

采用相电流突变作为故障自同步算法的启动判据, 如式(1)所示<sup>[21]</sup>。

$$\|i(k) - i(k - N)\| - \|i(k - N) - i(k - 2N)\| \geq K_s I_s \quad (1)$$

式中:  $i(k)$  为  $k$  时刻相电流的采样值;  $N$  为一个周期内的采样点数;  $I_s$  为正常负载时的电流;  $K_s$  为启动系数。只有连续 3 个样本满足启动判据, 故障自同步算法才会启动。

如果系统未发生故障, 并且没有时间差, 根据基尔霍夫定律, 采样得到的进线电流和出线电流矢量大小相等、相角相同。从本侧终端流出的电流相量可以通过在远方终端测得的电流相量计算得出。该关系可简化为

$$\dot{I}_M = -\dot{I}_N \quad (2)$$

设实际传输过程中两端电流分别为  $\dot{I}'_M$  和  $\dot{I}'_N$ , 那么两者之间的相位差正好对应两侧数据的同步时间差, 两侧的数据可以根据时间差对接收到的数据进行时域的平移实现。 $\dot{I}'_M$  和  $\dot{I}'_N$  与同步时间差  $t$  的关系如式(3)、式(4)所示。

$$\dot{I}'_M = -\dot{I}'_N e^{j\omega t} \quad (3)$$

$$t = \frac{\arg\left(\frac{-\dot{I}'_M}{\dot{I}'_N}\right)}{2\pi f} \quad (4)$$

传统的故障自同步法不需要外部装置授时, 但其同步精度受互感器误差和数据准确性的影响。由于 5G 信道在传输数据时容易出现时延抖动和异常数据的情况, 因此传统故障自同步法在 5G 环境下的同步精度难以保证。

## 2.2 变频插值与故障自同步法

为克服数据异常导致的精度下降, 本文采用全周傅氏算法计算电流相量, 这样就将原本不具有代表性的单一采样数据转化为包含多采样点的数据窗。为避免故障对电流相量计算的影响, 保证计算参考相量的数据窗完全位于故障发生之前, 选取故障时刻前 40 ms 作为参考相量的计算起始点, 提取一个周期内的数据窗。

经过 5G 通信传输后的数据易出现时延抖动和数据异常等问题。在一个周期的数据窗中如果采样点数足够多, 那么极少数的异常数据带来的影响就可以降到足够小。但是, 增加采样点的数量会导致需要更宽的网络带宽以及更多的流量, 影响 5G 差动保护的经济性。为此, 本文采用变频差值的方式对缺失的采样点进行拟合, 再进行保护计算。如图 2 所示的双端系统中, 若 M 为主端、N 为从端, 则在 N 端检测的数据传输到 M 端后, 由主端 M 对数据进行处理。T 型线路可以设置两个从端, 同样在 M 端进行插值处理并分开进行同步时间差计算。本文采用三次样条插值法, 具体的数据窗选取和插值方法如图 3 所示。

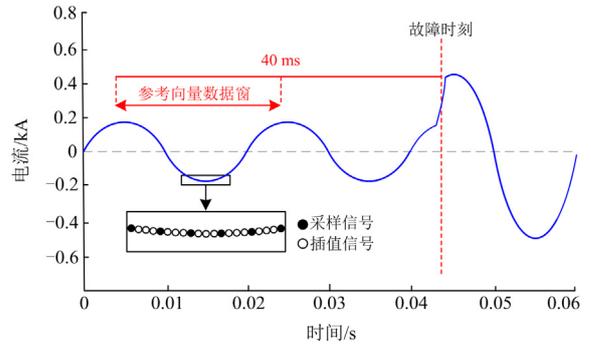


图 3 数据窗选取和插值示意图

Fig. 3 Schematic of data window selection and interpolation

在实际工程中, 一般要求接收信号的抖动范围在  $50 \mu\text{s}$  以内。插值的数量应该根据采样频率的不同而变化, 使采样点的时间间隔在规定的范围内, 并留有一定裕度。若  $F$  代表采样频率(kHz),  $v$  代表插值个数, 则有

$$\lceil v \rceil = \frac{25}{F} \quad (5)$$

式中，“ $\lceil \cdot \rceil$ ”为向上取整运算，例如采样频率为 10 kHz，则每两个点之间应该插入 3 个点。

三次样条插值是由多段的三次多项式拼合而成的曲线。它使用多个低阶多项式来穿过所有数据点。对于参考向量数据窗口内的数据，三次样条插值可以通过三阶多项式在两个数据点之间拟合出所需的数据点。与二次样条插值相比，三次样条插值具有更好的拟合性能，而且不会出现龙格现象，与牛顿插值法相比也有优势。在现代微机保护的条件下，快速搜索故障前时刻两个周期的数据窗口并进行插值处理是非常容易的，不会影响保护的速动性能。

利用离散全周傅氏算法计算相量相位，如式(6)、式(7)所示。

$$I_r = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^{N'} [i(n) \cdot \sin(\frac{2n\pi}{N'})] \quad (6)$$

$$I_i = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^{N'} [i(n) \cdot \cos(\frac{2n\pi}{N'})] \quad (7)$$

式中： $I_r$  与  $I_i$  分别为电流相量的实部与虚部； $N'$  为插值后的采样点数； $i(n)$  为第  $n$  个电流采样值。

分别计算 M 侧和 N 侧的电流相量实部和虚部，并将  $I'_M$  和  $I'_N$  用相量形式表示为

$$I'_M = (I_r)_M + (I_i)_M i \quad (8)$$

$$I'_N = (I_r)_N + (I_i)_N i \quad (9)$$

相量  $I'_M$  与  $I'_N$  的相位角取决于数据窗起始点，而数据窗起始点的时间差等于两侧保护装置的启动时间差。因此，通过两侧参考相量表示同一电流量之间的相位差，即为同步时间差。那么将  $I'_M$  和  $I'_N$  代入式(4)中，就可以计算出 M 侧与 N 侧的同步时间差  $t$ ，两侧的时间同步可以通过将本侧或对侧的电流数据延时时长  $t$  实现。

### 3 时延抖动和数据异常下的故障判别

#### 3.1 Hausdorff 距离原理

Hausdorff 距离用于衡量空间内两点集之间的距离，描述两组点集之间的相似程度。假设两组有限点集  $A$ 、 $B$  表示为

$$A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_m\} \quad (10)$$

$$B = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_m\} \quad (11)$$

那么集合  $A$ 、 $B$  之间的 Hausdorff 距离定义为

$$H(A, B) = \max[h(A, B), h(B, A)] \quad (12)$$

式中， $h(A, B)$ 、 $h(B, A)$  分别为集合  $A$  对集合  $B$ 、集合  $B$  对  $A$  的单向 Hausdorff 距离，即

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\| \quad (13)$$

$$h(B, A) = \max_{b \in B} \min_{a \in A} \|a - b\| \quad (14)$$

式中，“ $\|\cdot\|$ ”表示两点之间的欧式距离。对于集合  $A$  中的任一元素，首先求取  $a_i$  与集合  $B$  中元素的最小距离值，然后将所得最小距离集合中的最大值作为  $A$  对  $B$  的 Hausdorff 单向距离。同理可计算  $B$  对  $A$  的 Hausdorff 单向距离，两者中的较大值即为点集  $A$  对  $B$  的 Hausdorff 距离，距离越大，则两组点集的相关性越小。

#### 3.2 抗数据异常特性与舍去极值设计

为探究 5G 信道传输过程中时延抖动和数据异常对动作判据产生的影响<sup>[22]</sup>，对数据窗内的采样值设置时延抖动和丢包的异常数据点，异常数据影响分析示意图如图 4 所示。根据式(12)—式(14)计算点集  $A$  与点集  $B$  之间的 Hausdorff 距离。

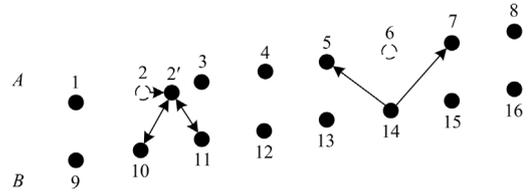


图 4 异常数据影响分析示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the impact analysis of anomalous data

点集  $A$  与点集  $B$  所表示的电流波形呈现相似特征，在点集  $A$  数据窗设置数据异常点。数据点(2)发生时延抖动后成为点(2')。数据点(6)发生丢包，采样点缺失。

在数据点(2)，点集  $A$  到点集  $B$  的单向距离为  $h(2'), (10)$  或  $h(2'), (11)$ ，仅发生微小偏差。

在数据点(6)，点集  $B$  到点集  $A$  的单向距离为  $h(14), (5)$  或  $h(14), (7)$ ，发生微小偏差。点集  $A$  到点集  $B$  的距离无法测得。因此，本文提出考虑极值舍去的 Hausdorff 故障判别算法，将异常数据点的单向距离赋 0 以舍去，具体方案可表述如下。

若  $\nexists h(A, B)$ ，则有

$$h(A, B) = 0 \quad (15)$$

继而按照式(12)进行计算，可忽略数据点丢失带来的影响。另外，5G 通信的丢包率约为  $10^{-5}$ ，因此几乎不会出现两端采样数据同时丢失的情况。

综上，整个数据窗内的 Hausdorff 计算值基本保持平稳。

#### 3.3 保护实现

以图 2 所示的双端输电线路为例， $R_M$  和  $R_N$  保护装置的采样序列分别为  $I_M$  和  $I_N$ ，对 N 侧数据窗

中的所有电流采样值取反, 得到的采样序列  $I_M$  和  $-I_N$  用于 Hausdorff 距离的计算。

$H(I_M, -I_N)$  表示两侧电流波形的 Hausdorff 距离。根据基尔霍夫定律, 在线路正常及发生区外故障的情况下, 进线电流等于出线电流, 即满足关系  $I_M = -I_N$ , 则有

$$H(I_M, -I_N) \approx 0 \quad (16)$$

当发生区内故障时, 两侧电流将出现较大差异, 此时  $H(I_M, -I_N)$  远大于零, 与式(16)差异明显。用  $H_{set}$  表示一个恰当的门槛值, 即可区分内外故障, 那么发生区内故障时的电流应满足:

$$H(I_M, -I_N) > H_{set} \quad (17)$$

根据对故障自同步算法和 Hausdorff 距离算法的分析, 可将提升抗时延抖动和数据异常性能的配电网故障自同步 5G 差动保护方案整合, 如图 5 所示。

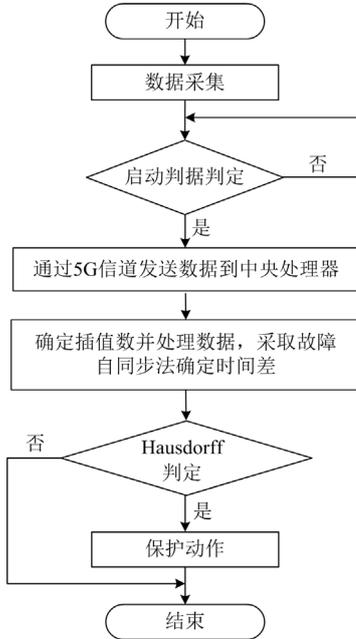


图 5 提升抗时延抖动和数据异常性能的配电网故障自同步 5G 差动保护整体方案

Fig. 5 A holistic scheme for self-synchronizing 5G differential protection against faults in distribution networks with improved performance against delay jitter and data anomalies

端点保护装置实时监测两端电流数据, 当满足式(1)时, 故障自同步启动算法启动。首先, 提取以故障时刻前 40 ms 为起点的采样数据。然后, 通过 5G 信道将数据传输至中央处理器。在中央处理器中, 确定插值数并对数据进行处理。接下来采取故障自同步法来确定时间差, 以实现时间同步。最后, 利用 Hausdorff 算法的故障判据进行故障判别。当发生区内故障时, 相应保护装置发出指令, 保护动

作。当发生区外故障时, 保护装置不发出指令, 复位保护算法。

## 4 仿真分析

为验证方案的有效性, 利用 PSCAD 仿真软件搭建图 6 所示的 10 kV 配电网仿真模型。输电线路长度已经在图中标出, 其中  $Z_1 = 0.24 + 1.1 \Omega/\text{km}$ ,  $Z_2 = 0.16 + 0.08 \Omega/\text{km}$ ; 在线路的末端母线上接入额定容量为 1 MW 的 DG; 负荷的视在功率为  $(5 + j0.5) \text{ MVA}$ ; 故障点  $f_1 - f_4$  均位于在线路中点;  $f_5$  在负荷与母线的连接线上; KS 为断路器;  $R_1 - R_8$  为线路两侧的保护装置; 采样频率默认为 10 kHz。

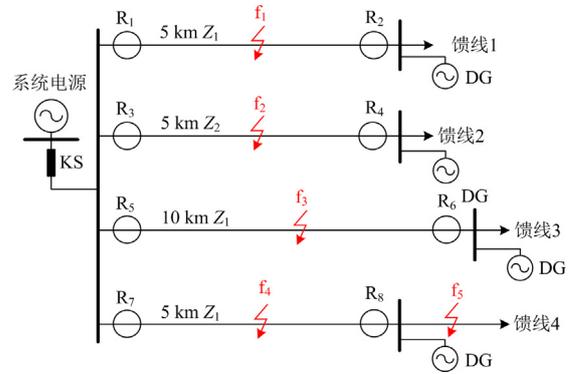


图 6 模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the simulation model

### 4.1 时间同步算法仿真分析

#### 4.1.1 与改进前的故障自同步方法对比

在  $f_1$  点设置故障点, 设 1.5 s 时 A 相发生单相接地故障, 采用基于变频插值的故障自同步法计算时间差。由于基于故障信息的自同步法在不同初相角下所提取数据窗的初相角不同, 因此必须比较在不同故障初相角下的自同步误差<sup>[12]</sup>。这里的故障初相角指的是故障发生时刻系统侧母线电压的初相位。比较结果如表 1 所示。

表 1  $f_1$  故障时所提方法与文献[10]所提方法的对比

Table 1 Comparison of the proposed method at  $f_1$  fault with the method proposed in reference [10]

故障初相角/ (°)	实际 时间差/ ms	文献[10]所提方法		本文所提方法	
		相位差/ (°)	时间差/ ms	相位差/ (°)	时间差/ ms
0	2	-31.25	1.736	-37.82	2.101
30	2	-58.17	3.235	-36.33	2.018
60	4	-90.01	5.001	-70.36	3.907
90	4	-77.83	4.323	-69.72	3.873
120	8	206.61	8.521	217.78	7.901
150	8	95.92	4.995	218.41	7.866

以 5G 作为信息通道进行数据传输时，时延抖动和数据异常现象难以避免。为了验证极端情况下方案的有效性，对两端采样序列加入连续的丢包数据点，并设置实际时间差为 2 ms。比较在不同缺失点数量下，基于变频插值的故障自同步法与改进前的故障自同步法的准确度，结果如图 7 所示，其中相对误差率为时间同步误差除以实际时间差的百分数。

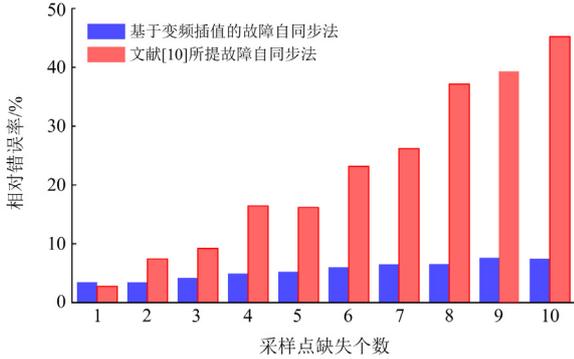


图 7 采样点缺失对文章所提方法与文献[10]所提方法影响程度的对比

Fig. 7 Comparison of the degree of impact of missing sampling points on the method proposed in this paper and the method proposed in the reference [10]

由表 1 和图 7 可以看出，当时延抖动和数据异常出现时，如果仅以故障时刻电流相量的瞬时值为参考，故障自同步法的计算结果会出现较大偏差，严重时误差超过 3 ms，相对误差率超过 40%，这将对保护的判定造成显著影响。然而，本文所提出的故障自同步法在不同故障初相角、不同时间差的情况下，计算结果基本保持稳定，这是通过在参考相量数据窗上进行插值处理来实现对异常数据的校正得到的。

4.1.2 线路参数与长度对同步误差的影响

基于参考相量的故障自同步方法可能会受到线路模型参数的影响。为探究线路参数变化对该方法的影响，在  $f_2$  和  $f_3$  点分别设置了一系列不同的故障初相角，并设置两端采样点缺失数为 2。比较不同初相角下线路参数变化与线路长度变化对故障自同步算法的影响，数据比较如图 8 和图 9 所示。线路参数改变时的最大同步误差为 0.172 ms，线路长度改变时的最大同步误差为 0.306 ms，相对错误率的最大值分别为 4.97% 和 9.9%，均在差动保护允许范围内。

由图 8 和图 9 可知，随着实际时间差的增大，相对错误率逐渐减小，表明同步误差并不随实际时间差的增大而增大。同时，线路参数和长度的变化

会影响同步效果，且线路长度变化的影响更为显著。这是因为随着线路长度的增加，电容电流也随之增大，对时间同步结果产生影响。因此，本文所提出的方法更适用于线路较短的配电网线路。

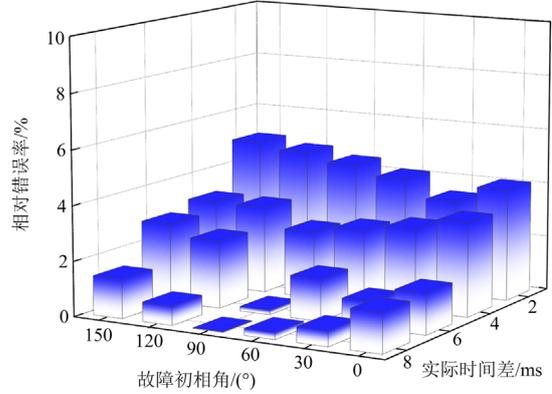


图 8 线路参数改变下的相对错误率分析

Fig. 8 Relative error rate analysis with changing line parameters

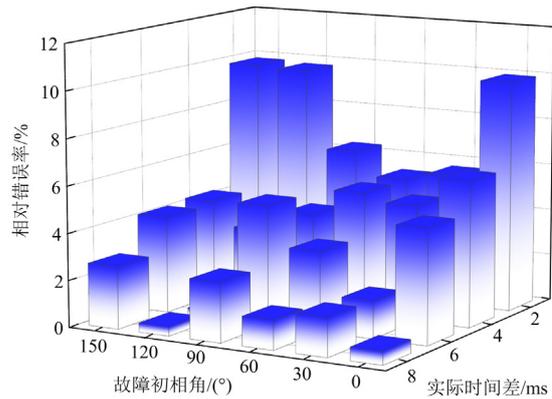


图 9 线路长度改变下的相对错误率分析

Fig. 9 Relative error rate analysis with changing line length

尽管所提方法受到线路参数和长度的影响，但其误差仍远小于配电网差动保护时间同步误差所允许的裕度<sup>[23]</sup>。

4.1.3 采样频率的影响

数据窗内的采样点数量会对所提时间同步方法造成影响，将保护装置的采样频率降低为 1 kHz，此时每两个采样点之间插入 25 个点，再次在  $f_1$  故障点设置 A 相发生单相接地故障，低采样频率下的相对错误率分析如图 10 所示，此时的最大同步误差为 0.225 ms，相对错误率的最大值为 8.8%。

从图 10 中的数据可以看出，所提方法在采样频率较低的情况下会出现较大的波动。这是因为尽管选取的数据窗避开了故障后的电流数据，不受故障暂态分量的影响，但是插值法处理数据异常的能力会随着采样频率的降低而减弱。因此，采样频率会

影响基于变频插值的故障自同步算法抗异常数据的能力, 其不应设置过低。

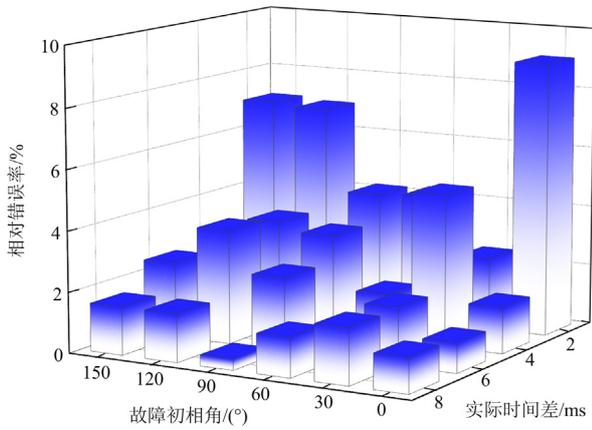


图 10 低采样频率下的相对错误率分析

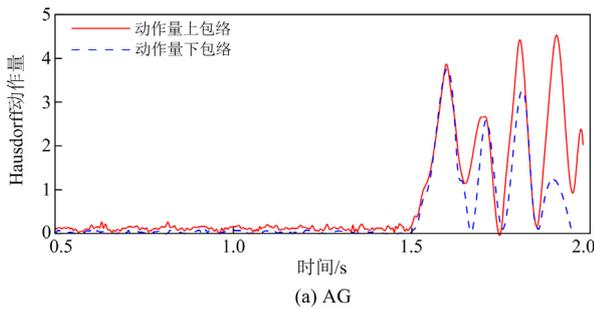
Fig. 10 Relative error rate analysis at low sampling frequency

## 4.2 动作判据仿真分析

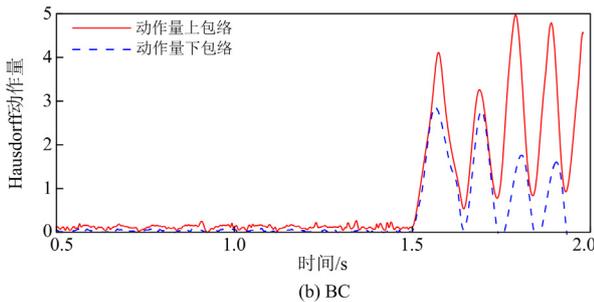
### 4.2.1 区内故障与区外故障

由 4.1.1 节的仿真实验可知, 所提出的故障自同步法在正常工作时的误差小于 0.2 ms。因此, 为了分析在时延抖动和数据异常情况下 Hausdorff 算法的性能, 设置系统侧与负荷侧保护装置采样数据之间存在 0.2 ms 的时间差。以  $f_4$  的区内故障为例, 故障发生时间设定在  $t=1.5$  s 时刻。模拟 5G 通信的时延抖动, 并在采样点上设置了 2 个连续的丢包数据点。在各种故障类型下的动作性能如图 11 所示。

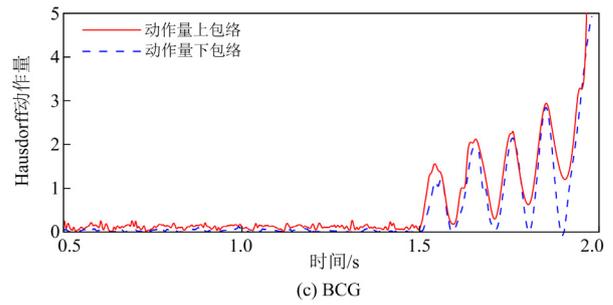
保护的整定原则为躲过时延抖动和 CT 传变误差的影响。基于该模型进行计算, 所提保护判据的阈值可以整定为  $H_{set}=1.5$ 。由图 8 可知, 在正常



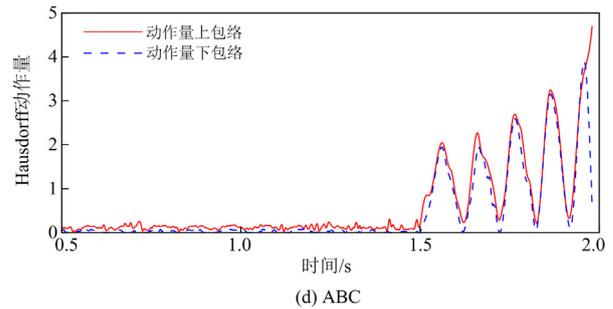
(a) AG



(b) BC



(c) BCG



(d) ABC

图 11 在各种故障类型下所提保护动态性能

Fig. 11 Dynamic performance of the proposed protection in different fault types

运行条件下, 由于两侧电流波形相似, Hausdorff 距离动作量接近于 0。当发生时延抖动或数据异常时, 动作性能不受影响, 这一结果与理论分析一致。在故障发生后, Hausdorff 距离动作量迅速越过动作门槛。

表 2 列出了在不同故障位置及故障类型场景下的 Hausdorff 动作量, 表中数值取自故障后 10 ms 内的最大值。由表中数据可知, 当发生区内故障时, 动作量升高, 越过门槛值, 保护装置动作。当发生区外故障时, 动作量小于整定值, 保护不动作, 可见去极值的 Hausdorff 算法具有良好的性能。

表 2 不同故障类型下的保护性能

Table 2 Protection performance under different fault types

故障位置	故障类型	Hausdorff 动作量	门槛值
$f_4$ (区内)	AG	4.055	1.5
	BC	4.139	
	BCG	1.941	
$f_5$ (区外)	ABC	2.068	
	AG	0.521	
	BC	0.513	
	BCG	0.250	
	ABC	0.168	

### 4.2.2 噪声的影响

配电网运行环境较为复杂, 需要分析噪声信号对保护的影响。取 SNR 为 10 dB 的高斯白噪声信号同时叠加在两侧电流采样值上, 分析各种故障类型下的动作量变化情况。图 12、图 13 分别为发生区

内区外单相接地故障时 Hausdorff 动作量的曲线图。

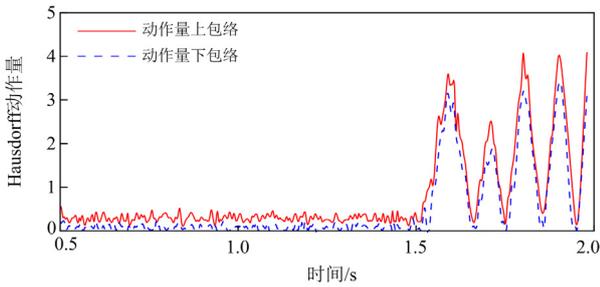


图 12 噪声下的区内故障动作量

Fig. 12 Amount of internal fault motion under noise

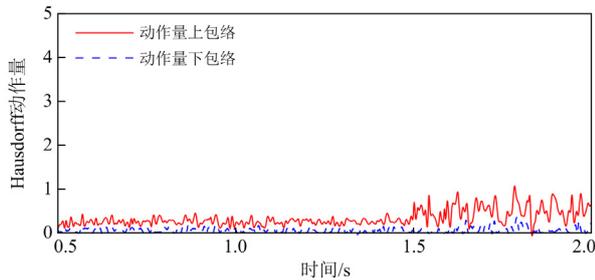


图 13 噪声下的区外故障动作量

Fig. 13 Amount of external fault motion under noise

由图 12 和图 13 可以看出, 未发生故障时, 在 10 dB 噪声的影响下, Hausdorff 动作量在 0~0.5 之间波动。当发生区内故障时, 动作量迅速越过门槛值, 触发保护装置发出动作信号。而在发生区外故障时, 波动范围保持在 0~1 之间, 低于门槛值, 与区内故障的情况有明显差异。表 3 整理了在 10 dB 噪声影响下不同故障位置和故障类型的动作量, 表中的数值是在故障发生后 10 ms 内的最大值。

表 3 噪声影响下的保护性能

Table 3 Protection performance under the influence of noise

故障位置	故障类型	Hausdorff 动作量	门槛值
$f_4$ (区内)	AG	3.826	1.5
	BC	3.761	
	BCG	2.756	
	ABC	2.047	
$f_5$ (区外)	AG	0.932	1.5
	BC	1.025	
	BCG	0.827	
	ABC	0.833	

由表 3 中数据可知, 在 10 dB 的噪声环境下, 所提保护方案仍能做到在各种故障条件下不拒动、不误动, 可见噪声对所提保护动作性能的影响较小。

## 5 结论

本文提出了一种提升抗时延抖动和数据异常性

能的配电网故障自同步 5G 差动保护方案, 解决了 5G 时延抖动和数据异常对时间同步和故障判别的影响。得到以下结论:

1) 5G 网络切片技术与 MEC 的融合技术有效缩短了通信时延, 基于 5G 通信的差动保护技术将是有源配电网继电保护领域的有力补充;

2) 所提故障自同步法构思新颖, 实现简单, 通过变频插值使得时延抖动和数据异常时仍能保持较高精度, 不需要增设额外的设备即可实现采样同步, 可有效减少 5G 差动保护的硬件成本;

3) 考虑舍去极值的 Hausdorff 区内外故障判别算法有很强的抗时延抖动和数据异常的能力, 同时能适应配电网的噪声环境, 能快速、稳定地识别各种类型的系统故障。

在分布式电源高比例接入的新形态配电网下, 5G 差动保护有望解决差动保护难以在配电网中大规模应用的难题, 后续将进一步在 5G 差动保护流量控制和通信信息安全等方面展开研究。

## 参考文献

- [1] 何正友, 李波, 廖凯, 等. 新形态城市电网保护与控制关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6193-6207. HE Zhengyou, LI Bo, LIAO Kai, et al. Key technologies for protection and control of novel urban power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6193-6207.
- [2] QUISPE J C, ORDUNA E. Transmission line protection challenges influenced by inverter-based resources: a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(3): 406-422.
- [3] 孙阳盛, 涂崎, 赵中华, 等. 基于 5G 及 IEC61850 的韧性配电网故障信息智能传输技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 108-177. SUN Yangsheng, TU Qi, ZHAO Zhonghua, et al. Intelligent transmission technology of fault information in a resilient distribution network based on 5G and IEC61850[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 108-117.
- [4] 娄为, 韩学军, 韩俊, 等. 基于 5G 和光纤综合通道的输电线路差动保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 158-166. LOU Wei, HAN Xuejun, HAN Jun, et al. A transmission line differential protection method based on 5G and optical fiber integrated channels[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 158-166.
- [5] YU Hao, LI Zhenwei, FU Kesheng, et al. A 5G Dual-channel hot standby transmission scheme for power grid control service[C]// 2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), March 4-6, 2022, Chongqing, China: 526-529.
- [6] 李文君, 段登伟, 朱雨, 等. 基于 5G 通信模式下的配电网自愈保护应用[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 152-159. LI Wenjun, DUAN Dengwei, ZHU Yu, et al. Application of distribution network protection based on a 5G end-

- to-end communication mode[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 152-159.
- [7] 滕玲, 李健, 吴赛, 等. 利用 5G 无线终端实现高精度授时的研究[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(1): 36-42. TENG Ling, LI Jian, WU Sai, et al. Research on High precision time service using 5G wireless terminal[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(1): 36-42.
- [8] 涂崎, 沈冰, 邹晓峰, 等. 5G 环境下配网差动保护采样数据缺失应对策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 143-151. TU Qi, SHEN Bing, ZOU Xiaofeng, et al. Countermeasures for current differential protection in 5G-based active distribution network under sampling data missing scenario[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 143-151.
- [9] 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.
- [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] 哈恒旭. 多端差动保护的自同步技术[J]. 电力与能源, 2018, 39(6): 744-751. HA Hengxu. Self-synchronization for multi-ended differential protection[J]. Power & Energy, 2018, 39(6): 744-751.
- [12] 周成瀚, 邹贵彬, 张烁, 等. 基于参考相量的配电网差动保护故障自同步方法[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3753-3767. ZHOU Chenghan, ZOU Guibin, ZHANG Shuo, et al. Fault self-synchronization method for differential protection in distribution networks based on reference phasor[J]. Power System Technology, 2023, 47(9): 3753-3767.
- [13] 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 in active distribution network based on 5G communication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23): 117-124.
- [14] 黄福全, 王廷凰, 张海台, 等. 基于 5G 通信和动态时间规划算法的配电网线路差动保护[J]. 重庆大学学报, 2021, 44(4): 77-85. HUANG Fuquan, WANG Tinghuang, ZHANG Haitai, et al. Differential protection of the distribution line based on 5G communication and dynamic time wrapping algorithm[J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44(4): 77-85.
- [15] 陈乐, 薄志谦, 林湘宁, 等. 基于波形相似度比较的线路快速纵联保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5018-5027, 5221. CHEN Le, BO Zhiqian, LIN Xiangning, et al. Waveform similarity comparison based high-speed pilot protection for transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5018-5027, 5221.
- [16] 陈星宇. 基于 Hausdorff 距离的主动配电网纵联保护方案[J]. 自动化技术与应用, 2020, 39(3): 113-117. CHEN Xingyu. Active distribution network pilot protection scheme based on Hausdorff distance[J]. Techniques of Automation & Applications, 2020, 39(3): 113-117.
- [17] 李一泉, 吴梓亮, 王峰, 等. 基于 Hausdorff 距离算法的自适应线路差动保护方案[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 175-180, 187. LI Yiquan, WU Ziliang, WANG Feng, et al. Self-adaptive differential protection scheme for transmission line based on Hausdorff distance algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 175-180, 187.
- [18] TANG Jianhua, SHIM B, QUEK T Q S. Service multiplexing and revenue maximization in sliced C-RAN incorporated with URLLC and multicast eMBB[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(4): 881-895.
- [19] 祁欣学, 宋俊廷, 范子涛, 等. “5G+MEC” 在配网差动保护中的应用[J]. 中国新通信, 2022, 24(4): 10-13. QI Xinxue, SONG Junting, FAN Zitao, et al. Application of “5G + MEC” in differential protection of distribution network[J]. China New Telecommunications, 2022, 24(4): 10-13.
- [20] 李瀚霖, 靳维, 梁睿, 等. 基于故障信息自同步的有源配电网纵联保护[J]. 电力工程技术, 2021, 40(6): 121-126, 133. LI Hanlin, JIN Wei, LIANG Rui, et al. The pilot protection for active distribution network based on fault information self-synchronizes[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(6): 121-126, 133.
- [21] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2022.
- [22] JIN Wei, ZHANG Shuo, LI Jian, et al. A novel differential protection scheme for distribution lines under weak synchronization conditions considering DG characteristics[J]. IEEE Access, 2023, 11: 86561-86574.
- [23] 国家电网公司. 城市电力网规划设计导则: Q/GDW 156—2006[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007. State Grid Corporation of China. Urban power network planning and design guidelines: Q/GDW 156—2006[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.

收稿日期: 2023-10-11; 修回日期: 2024-01-01

作者简介:

王元上(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与继电保护; E-mail: 107552201517@stu.xju.edu.cn

袁至(1984—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为可再生能源发电与并网控制。E-mail: yzisthecure@163.com

(编辑 许威)