

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.03.017

5G 环境下配网差动保护采样数据缺失应对策略

涂崎¹, 沈冰², 邹晓峰², 金震³, 徐舒³, 侯炜³

(1. 国网上海市电力公司, 上海 200122; 2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437; 3. 南京南瑞继保工程技术有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:有源配电网中, 电流差动保护相较于传统三段式过流保护能够整体地提升保护水平, 但依赖光纤通道, 而光纤通道的广覆盖难以实现。5G 具有高可靠性、低时延、广覆盖等优势, 有望成为有源配电网差动保护新的通信方案, 但仍可能受环境干扰等因素导致采样数据缺失, 影响线路正常运行和区外故障时保护的正确动作。为解决上述问题, 首先, 结合 ρ 平面法定性分析了采样数据缺失的各种场景对保护动作的影响; 然后, 提出一种使用阶次组合 Neville 插值法对采样缺失数据进行插值重构的应对策略; 最后, 在 PSCAD 中搭建有源配电网仿真模型, 在多种采样数据缺失场景下对比了多种插值法的插值精度, 验证了文中所提策略在提升保护动作特性方面的有效性。通过理论计算分析, 得出使用该策略在高性能中央处理器 (CPU) 下不会影响保护实时性的结论。

关键词:5G; 有源配电网; 差动保护; 采样数据缺失; Neville 插值; 阶次组合

中图分类号: TM773

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2022)03-0143-09

0 引言

近年来, 分布式电源 (distributed generation, DG) 大量接入, 导致配电网由传统单端辐射式结构转变为多端多电源结构, 形成了有源配电网^[1-2]。有源配电网的运行方式、线路潮流与传统配电网之间均存在较大差别^[3-5], 潮流双向性及 DG 故障时馈出电流的新特征, 对有源配电网保护提出了更艰巨的挑战, 传统配电网中应用广泛的三段式过流保护已难以满足有源配电网的正常运行要求^[6-8]。基于双端信息量的电流差动保护在具备光纤信道条件下能充分解决上述问题, 提升有源配电网的保护水平, 但由于敷设光纤成本高、运维困难等原因, 目前仅被部分发达地区及新能源场站接入线采用。

5G 作为新一代移动通信的领跑者, 具有高可靠性、低时延等满足差动保护通信要求的优势^[9-10], 已有不少学者将其引入配电网差动保护领域^[11-12], 但无线环境下 5G 可能受噪声干扰导致传输数据缺失^[13]。而现有的差动保护方案中, 若采样点缺失数超过一定数量, 应将主保护闭锁^[14], 故障隔离完全依赖后备保护。采样数据缺失场景下, 为继续发挥差动主保护的作用, 现常用手段是利用插值拟合法重构缺失的采样点参与保护计算。文献^[15]提出一种线性 Lagrange 插值算法, 计算量较小且在测量波形含低次谐波时能满足最基本的精度要求; 文献^[16]提出一种二次插值算法, 能在不提高保护装置

采样率的前提下, 基本消除差动保护动作模糊区的影响; 文献^[17]提出一种三次样条插值算法, 在测量波形含高次谐波时插值精度有一定的优势。但现有算法很难兼顾计算量与插值精度, 亟须探究一种合适的算法以解决差动保护采样数据缺失问题。

三段式过流保护难以适配有源配电网日益增长的保护水平需求, 基于 5G 通信的差动保护有望解决该问题。但 5G 通信可能受外部干扰导致采样数据缺失, 对保护的正确动作造成一定影响, 而现有的插值应对手段难以兼顾计算量与插值精度。为解决上述问题, 文中提出一种 5G 通信环境下有源配电网电流差动保护采样数据缺失应对策略, 在插值精度方面有一定优势, 且能在保护尽量不误动的前提下提升耐受的缺失点数量, 不会影响保护实时性。

1 5G 通信环境下有源配电网线路差动保护配置方案

5G 三大应用场景: 增强型移动带宽 (enhanced mobile broadband, eMBB)、高可靠低时延通信 (ultra-reliable and low latency communications, uRLLC)、大规模机器类通信 (massive machine type communications, mMTC)^[9], 其中以 uRLLC 场景与有源配电网差动保护通信需求最为吻合。在差动保护 uRLLC 场景下, 5G 通过移动边缘计算 (mobile edge computing, MEC) 降低通信时延, 通过多连接技术大幅提升通信可靠性, 理论性能指标能够满足差动保护的基本要求。

收稿日期: 2021-12-07; 修回日期: 2022-02-16

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目 (52094020000Y)

图1为5G差动保护在某线路BC上的配置方案,目前国网和南网在青岛、深圳、成都等地所建设运行的示范工程中基本都采用了该方案。在外部时钟源信号下,线路两侧通过对时装置完成数据通信同步。完成通信同步后,两侧保护装置收集本侧电流互感器(current transformer, CT)采集的电流采样信息,通过无线客户前置设备(customer premise equipment, CPE)、5G基站和5G核心网发送到对侧CPE终端,对侧保护装置根据两侧电流采样信息进行保护判别,若判别结果为区内故障则跳开线路两侧断路器,否则保护不动作。

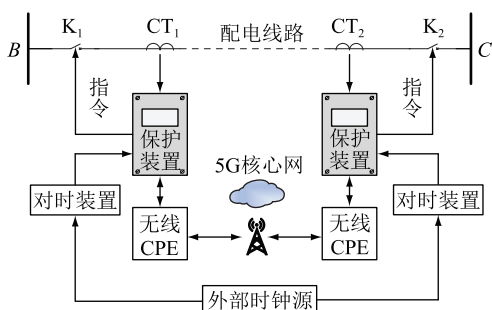


图1 5G在线路BC上的配置方案

Fig.1 5G configuration scheme on line BC

但就目前的5G网络而言,仍存在传输时延抖动大、丢包率较高等主要问题。已有学者研究指出:5G通道的丢包率约为 10^{-5} ,较光纤通道 10^{-9} 的丢包率提升了约10 000倍^[18],所以5G通道比光纤通道丢帧的概率更大。丢包问题在光纤差动保护中就已引起广泛关注,通常采用对缺失的采样点作插值的方式解决,5G通信环境下差动保护若发生采样点缺失问题或可沿用该方式解决^[19]。

2 采样点缺失对有源配电网差动保护影响

有源配电网模型如图2所示,C母线上有逆变器分布式电源(inverter interfaced distributed generation, IIDG)并网。

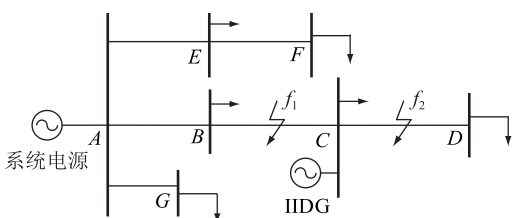


图2 有源配电网模型

Fig.2 Active distribution network model

为充分体现有源配电网差动保护有别于三段式保护的作用,对于含IIDG的配电网,一般应在IIDG并网点上下游相邻线路上配置差动保护,如图

1中BC及CD线路。为方便分析,设C侧CPE发送数据受瞬时干扰导致少数采样数据缺失,下文通过 ρ 平面法^[20-22]分析该场景对BC线路保护性能的影响。

2.1 差动保护 ρ 平面分析法

ρ 平面法在差动保护分析中应用广泛,能在复平面中直观地反映运行状态点,且能划分动作区和制动区。前文已设采样数据缺失仅发生于C侧,因此B侧电流幅值将比C侧大, ρ 平面法以B侧电流为基准进行分析。相量和差制动判据为:

$$|\dot{I}_B + \dot{I}_C| > K|\dot{I}_B - \dot{I}_C| \quad (1)$$

式中: \dot{I}_B, \dot{I}_C 分别为B,C两侧电流相量; K 为制动系数。令 $\dot{I}_C/\dot{I}_B = \dot{\rho}$, $\dot{\rho}$ 相量可表示 \dot{I}_C 与 \dot{I}_B 之间的相对幅相关系,显然有 $|\dot{\rho}| < 1$ 。对式(1)进行变换可得:

$$|1 + \dot{\rho}| / |1 - \dot{\rho}| > K \quad (2)$$

同时, $\dot{\rho}$ 可用复数形式表示为 $\dot{\rho} = x + jy$ 。则图3所示复平面可表示式(2)所示判据,图中单位圆内浅绿色区域代表动作区。空白区域代表制动区,即单位圆与另一个圆心在 $(-(1+K^2)/(1-K^2), 0)$ 、半径为 $2K/(1-K^2)$ 的圆的重叠部分。

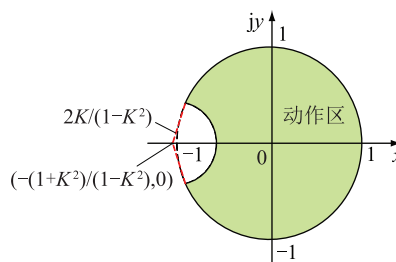


图3 差动保护 ρ 平面判据

Fig.3 Differential protection ρ plane criterion

2.2 不同场景下采样数据缺失对差动保护的影响

图2中,若BC线路发生区内短路故障,则IIDG和系统电源馈流能力存在显著差距,故障后线路两侧差流很大^[23],此时5G通信干扰所致采样数据缺失对保护判别影响可忽略不计,保护依然能根据大差流正确判别。但BC线路正常运行和发生外部故障时,采样数据缺失可能导致保护误动,为此,下文将以BC线路发生区外三相短路故障为例,深入分析采样数据缺失对保护动作性能的影响。

设保护装置采样频率 $f_s = 1\ 000$ Hz,周波采样点数 $N = 20$ 。采样数据进入保护算法前一般都要经过差分滤波消除衰减直流分量^[17],为便于说明,对算例中BC线路发生区外三相短路故障后C侧电流在滤除直流分量后的采样周波数据点进行编号,如图

4 所示。

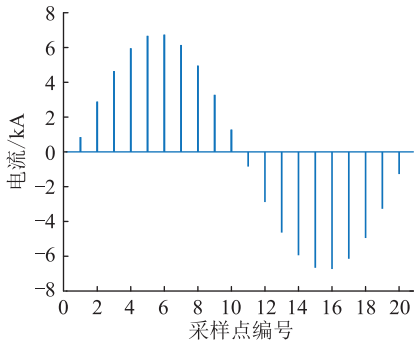


图 4 故障后周波采样电流

Fig.4 Cyclic sampling current after fault

一般而言,采样点缺失场景有缺失点数量、缺失连续性、缺失位置 3 种决定性特征,而 5G 干扰的随机性势必导致同一场景下的 3 种特征存在重合区。利用控制变量法,在 3 种特征下的不同采样数据缺失场景中,用 ρ 平面法表示出各种场景对应的保护状态点,通过分析状态点的位置定性研究采样点缺失对保护的影响。

2.2.1 采样点缺失数量对保护的影响

控制采样数据缺失的起点相同,从第 3 点开始连续增加缺失点数量,给出包括采样点未缺失在内的 6 种场景下(状态点分别为 a_1 :未缺失; b_1 :点 3 缺失; c_1 :点 3,4 缺失; d_1 :点 3,4,5 缺失; e_1 :点 3,4,5,6 缺失; f_1 :点 3,4,5,6,7 缺失)保护的動作情况,如图 5 所示。

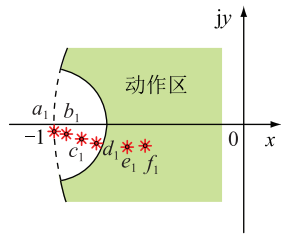


图 5 采样点缺失数量对保护的影响

Fig.5 Impact of missing number of sampling points on protection

在图 5 所示的 ρ 平面(缩放)中,采样点未缺失或缺失数较少的场景 a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 位于 ρ 平面的制动区,缺失点数量达到 4 点及以上的场景 e_1 、 f_1 位于 ρ 平面的动作区。这是因为在上述场景下,随着采样点缺失数量的增加,傅式算法计算得到的 C 侧电流相量幅值逐渐减小,因此 ρ 相量幅值也会减小,差动保护的 ρ 平面状态点有从制动区向动作区偏移的趋势。分析可知:采样点缺失数量增加将增大保护发生误动的风险,若缺失数量过多将引起保护误动,通过 ρ 平面可以得到量化的评估结果。

2.2.2 采样点缺失连续性对保护的影响

采样点缺失连续性问题有连续缺失、等间隔缺失、间隔式连续缺失、无规则缺失 4 种特征。缺失点数量为 4 时已基本涵盖以上 4 种特征,下文控制缺失点数量和缺失起点相同,通过 6 种缺失场景(状态点分别为 a_2 :点 2,3,4,5 连续缺失; b_2 :点 2,3,5,6 间隔式连续缺失; c_2 :点 2,4,6,8 等间隔缺失; d_2 :点 2,3,5,7 无规则缺失; e_2 :点 2,4,5,7 无规则缺失; f_2 :点 2,4,7,9 无规则缺失),结合图 6 所示的保护動作情况,分析采样点缺失连续性对保护的影响。

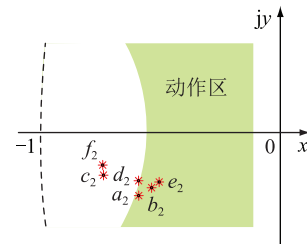


图 6 采样点缺失连续性对保护的影响

Fig.6 Impact of missing continuity of sampling points on protection

在图 6 所示的 ρ 平面(缩放)中,只有采样点连续缺失场景下的状态点 a_2 的相位偏离图 5 中未缺失场景下的状态点 a_1 相位最远。但在分析采样点缺失连续性问题时,不同的缺失连续性场景必然伴随缺失点位置的不同,所以才导致图 6 中保护的動作情况呈现出极大的不确定性。若仅作定性分析,可得结论:在各种采样点缺失连续性场景中,连续缺失对保护动作的影响更大。

2.2.3 采样点缺失位置对保护的影响

控制采样点缺失数量和缺失连续性相同,以采样点连续缺失 3 点为例,通过 6 种缺失场景(状态点分别为 a_3 :点 2,3,4 缺失; b_3 :点 3,4,5 缺失; c_3 :点 4,5,6 缺失; d_3 :点 5,6,7 缺失; e_3 :点 6,7,8 缺失; f_3 :点 7,8,9 缺失),结合图 7 所示的動作保护情况,分析采样点缺失位置对保护的影响。

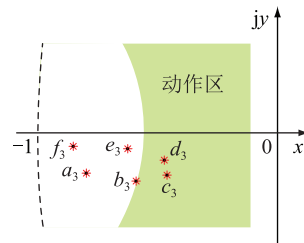


图 7 采样点缺失位置对保护的影响

Fig.7 Impact of sampling points missing location on protection

在图 7 所示的 ρ 平面(缩放)中,缺失场景的状

态点从 $a_3 \sim f_3$, 从图 4 中可以看出 3 个缺失采样点的位置正好穿越了一个波峰, 而保护的动作为不动作—动作—不动作。结合傅式算法分析认为, 在峰值位置发生采样数据缺失时, 计算得到的 C 侧电流相量幅值在上述场景中下降得最为严重。分析可得结论: 波形峰值附近发生采样点缺失最容易导致保护误动。

3 基于 Neville 插值的采样数据缺失应对策略

通过第 2 章的分析发现, 5G 环境下采样数据缺失对保护的影响不容忽视。为在有源配电网中更充分地利用差动保护这一性能优越的保护原理, 可通过采用适当的插值算法对缺失采样点进行插值重构, 替代其参与保护计算, 一定程度上能弥补提升保护的动作为不动作。为此, 文中提出一种阶次组合 Neville 插值法, 能够在提升计算精度的同时降低缺失采样数据对保护动作的影响。

3.1 Neville 插值算法

Neville 是一种线性迭代的插值算法, 在测绘科学领域的 GPS 精密星历中应用比较成熟^[24-27], 但在电力领域中尚未引起广泛关注, 有望解决采样点缺失问题。

其基本思想为: 插值区间内, 将若干个低阶插值式两两组合成高一阶的插值式, 再将这些高一阶的插值式两两组合成更高一阶的插值式。通过不断组合迭代, 插值式逐渐向更高阶发展, 直至该插值式刚好通过所有已知数据点, 此时可用此插值式进行任意缺失时刻的插值。

采用 Neville 进行插值的具体步骤为: 对于 $n+1$ 个基本数据点序列 $(x_k, y_k), k=1, 2, \dots, n+1$, 必有 n 次插值多项式通过所有基本点。假设 $I_{(i,w)}$ 为 $w-i$ 次插值多项式 ($1 \leq i \leq w \leq n+1$), 且 $I_{(i,w)}$ 通过点 $(x_m, y_m), m=i, i+1, \dots, w$ 。Neville 插值法首先确定了 $n+1$ 个只通过一点的最低次“零阶多项式”, 即: 当 $i=w$ 时, $I_{(i,w)} = I_{(i,i)} = y_i$ 。

其次利用这些“零阶多项式”两两组合成通过 2 点的“一阶多项式”, 后续步骤即将前一步所得低阶式不断组合直到最高阶多项式的过程。

当 $w-i \geq 1$ 时, $I_{(i,w)}$ 满足如下迭代关系:

$$I_{(i,w)} = \frac{x_w - x_0}{x_w - x_i} I_{(i,w-1)} + \frac{x_0 - x_i}{x_w - x_i} I_{(i+1,w)} \quad (3)$$

式中: x_0 为待插值点横坐标。

因此, 若已知图 4 中全周期 $N=20$ 个基本数据点 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_{20}, y_{20})$, 假设仅在第 5

个点发生了数据缺失, 欲在位置 x_5 处进行插值, 则进行如下操作。

步骤 1:

$$\begin{cases} I_{(1,1)} = y_1 \\ \vdots \\ I_{(4,4)} = y_4 \\ I_{(6,6)} = y_6 \\ \vdots \\ I_{(20,20)} = y_{20} \end{cases} \quad (4)$$

步骤 2:

$$\begin{cases} I_{(1,2)} = \frac{x_2 - x_5}{x_2 - x_1} I_{(1,1)} + \frac{x_5 - x_1}{x_2 - x_1} I_{(2,2)} \\ \vdots \\ I_{(4,6)} = \frac{x_6 - x_5}{x_6 - x_4} I_{(4,4)} + \frac{x_5 - x_4}{x_6 - x_4} I_{(6,6)} \\ \vdots \\ I_{(19,20)} = \frac{x_{20} - x_5}{x_{20} - x_{19}} I_{(19,19)} + \frac{x_5 - x_{19}}{x_{20} - x_{19}} I_{(20,20)} \end{cases} \quad (5)$$

依次类推。

步骤 19:

$$I_{(1,20)} = \frac{x_{20} - x_5}{x_{20} - x_1} I_{(1,19)} + \frac{x_5 - x_1}{x_{20} - x_1} I_{(2,20)} \quad (6)$$

式(6)计算所得即为第 5 个数据点的插值结果。同理, 在发生多点数据缺失时, 也可按照上述步骤进行插值, 相应的计算步骤会进一步减少。

3.2 阶次组合法

采用 Neville 法进行高次插值拟合时经常出现龙格现象, 具体表现为: 插值区间边缘存在严重误差, 插值曲线边缘有大幅度振荡, 且插值阶数越高, 误差和振荡幅度越大。针对上述问题, 为提升插值精度, 提出一种阶次组合法的应对措施, 基本处理方式是: 在插值区间中部使用高次插值, 插值区间边缘使用低次插值, 通过这种高次与低次插值相组合的阶次组合方法消除龙格现象。

阶次组合原理: 对 p 个基本点序列 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_p, y_p)$, 区间各处插值结果 y_x 应满足下式:

$$y_x = \begin{cases} I_{h1(x)} & \forall x \in (x_1, x_s) \\ I_{p(x)} & \forall x \in (x_s, x_{p+1-s}) \\ I_{h2(x)} & \forall x \in (x_{p+1-s}, x_p) \end{cases} \quad (7)$$

式中: I_{h1}, I_{h2} 分别为利用首、末端 h 个基本点的低阶插值式; I_p 为利用全 p 个基本点的高阶插值式。 x_s 表示从基本点 $x_1 \sim x_s$ 均应适用低次插值函数 $I_{h1(x)}$, 满足条件 $x_s < (x_1 + x_p)/2, x_{p+1-s}$ 可类推。

为消除 I_{h1}, I_{h2} 边缘点插值的龙格现象, h 不宜太大, 而为了防止低次插值时缺失点过多导致无法插值, h 选取不宜太小。因此, 对于全周 $N=20$ 个采样点, 若缺失点数量达到半周 $N/2=10$, 考虑到至少 3 点才有较好的插值效果, 应选取 $h \geq 13$ 。

综上, 文中阶次组合方式拟选取为: 在整周期 $N=20$ 个采样点中, 前(后) 8 个点区间使用基于前(后) 13 个点的低阶 Neville 插值, 中部 4 个点区间使用基于整周期 20 个点的高阶 Neville 插值。

3.3 5G 环境下有源配电网差动保护采样数据缺失应对策略

为更有效地应对 5G 环境下有源配电网差动保护采样数据缺失问题, 可利用上述阶次组合方法进行数据插值: 保护启动后收集对侧整周期采样数据并判断其中缺失点数量 $N_s, N_s \geq N_m$ 时将差动主保护闭锁并启动后备保护; $N_s < N_m$ 时则采用阶次组合 Neville 法对缺失采样点插值重构, 再将整周期数据输入保护判据进行判别, 可不必闭锁主保护。 N_m 为保护在不误动前提下能耐受的最大缺失点数量, 是保护至关重要的整定门槛。相应策略流程见图 8。

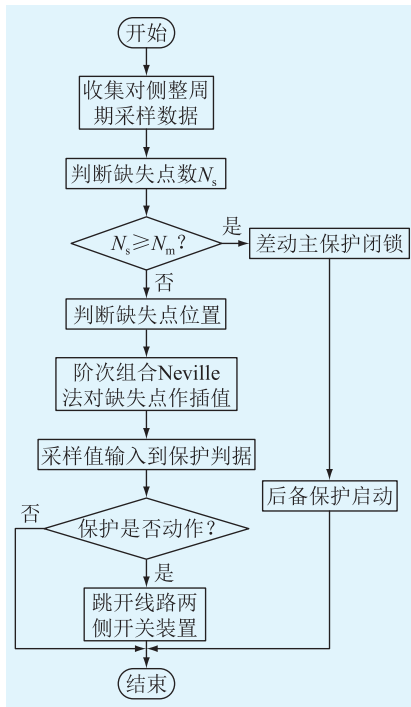


图 8 差动保护采样数据缺失应对策略

Fig.8 Countermeasures for sampling data missing of differential protection

N_m 整定原则及方式为: 尽管当前已有较成熟的数字滤波器, 在数据进入相量算法之前能够滤除短路电流中的非周期分量, 但仍可能存在一定的谐波残留, 因此引入可靠系数 K_{rel} 。借鉴传统保护考虑互感器测量误差、计算误差、非周期分量影响等因

素后, K_{rel} 的选取一般在 1.1~1.5。为了可靠起见, 文中选取 $K_{rel}=1.5$ 。引入可靠系数后, 通过仿真得到使用文中方法后须在采样点缺失数量为 8 时将差动主保护闭锁, 即引入可靠系数后, $N_m=8$ 。

4 插值性能及对保护速动性影响仿真验证

为验证所提应对策略的有效性, 在 PSCAD 中搭建了图 2 所示有源配电网模型。参数设置为: 线路单位阻抗均为 $0.1935+j0.5611 \Omega/\text{km}$; 线路长度 AE 为 4 km, EF 为 4 km, AB 为 2 km, BC 为 4 km, CD 为 3 km, AG 为 2 km; 负荷均为 $1.0+j0.2 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。IIDG 采用 PQ 控制方式, 正常运行时有功功率为 1 MW, 无功功率为 0。需先说明的是, 后文多种插值法均属于内插法, 因此不考虑区间端点缺失。

4.1 多种插值法的性能比较

由前文可知, 采样点连续缺失对保护影响最大, 深入分析该场景, 通过增加缺失点数量对比 3 种插值法, 即线性 Lagrange、三次样条(自然边界条件)、阶次组合 Neville 的性能。仿真从第 2 点开始逐渐增加缺失点数量(上限为 $N/2=10$), 图 9 为使用 3 种插值法的幅值与相位误差。

从图 9 可看出, 缺失点数量增加时 3 种插值法的幅值与相位误差均显著增大, 其中线性 Lagrange 插值法的误差增幅最明显, 其次是三次样条插值法, 而阶次组合 Neville 插值法误差最小。

4.2 多种插值法提升保护动作特性的效果对比

为验证所提阶次组合 Neville 插值法提升保护动作特性的有效性, 文中将深入分析采样数据连续缺失场景下, 发生区外三相短路故障与正常运行时使用插值法与不使用插值法的效果对比。需先说明的是, 下文只进行了线路单侧发生采样数据缺失场景的分析, 但在极端场景下两侧数据同时缺失也可得出相同的结论, 文中限于篇幅不详证。

4.2.1 不使用插值法时保护的動作特性

以 BC 线路发生区外三相短路故障为例, 不使用插值法时, 按照采样点连续缺失的方式仿真, 得到图 10 所示差动电流与制动电流随缺失点数量增加的变化趋势, 差动电流为 $|\dot{I}_B + \dot{I}_C|$, 制动电流为 $K|\dot{I}_B - \dot{I}_C|$, 制动系数 $K=0.123$ 。图 10 中暂未引入可靠系数 K_{rel} , 其表明: 差动电流在缺失点数为 4 时就超过制动电流, 易造成保护误动。

4.2.2 3 种插值法提升保护动作特性的效果对比

图 11 为 BC 线路在区外三相短路故障和正常运行情况下发生采样数据缺失, 引入可靠系数 K_{rel} 后分别使用 3 种插值法, 差动电流与制动电流随采

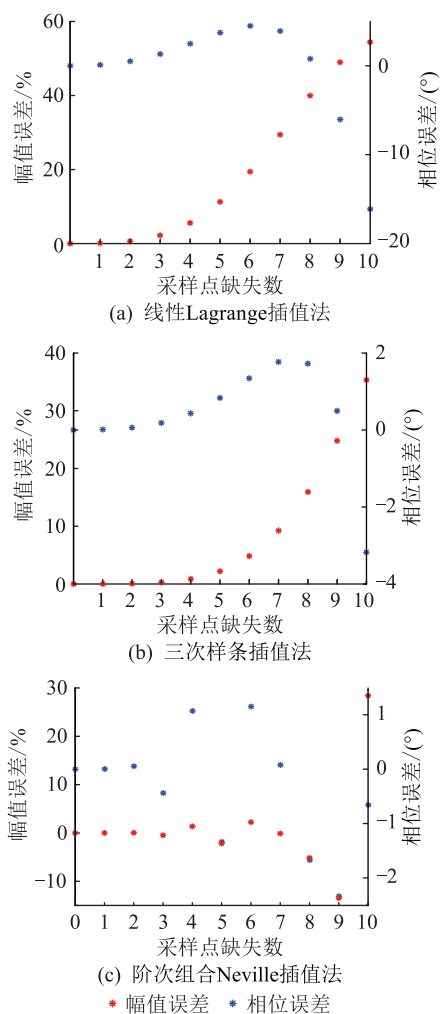


图9 缺失点数增加时3种插值法的误差

Fig.9 Errors of the three interpolation algorithms when missing number increases

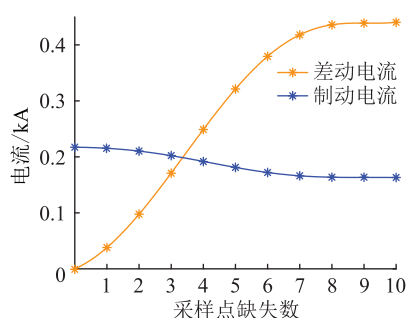


图10 缺失点数量增加时差动电流和制动电流的变化趋势(不使用插值法)

Fig.10 Variation trend of differential current and braking current with increasing number of missing points (without interpolation method)

样缺失点数量增加而呈现变化趋势。图中,制动电流为 $K|i_B - i_C|/K_{rel}$, 差动电流为 $|i_B + i_C|$, 下文与此处相同。

从图11中可看出:缺失点数量增多至超过8个点时,3种插值法都因误差过大导致差动电流大于

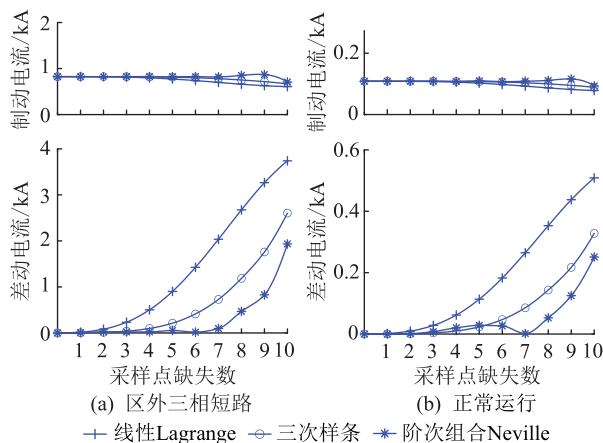


图11 缺失点数量增加时差动电流与制动电流的变化趋势(使用3种插值法)

Fig.11 Variation trend of differential current and braking current with the increase of the number of missing points (using three interpolation methods)

制动电流,此时仅依靠插值难以保证保护正确动作,应启用后备保护。同时在3种插值法中,阶次组合Neville插值法使保护在采样点缺失数为8时正确动作,能耐受的缺失点数量多于另2种插值法。

前文仿真中均使用图4所示数据窗,而实际保护装置中数据窗是移动的,需要验证移动数据窗下所提方法的有效性。限于篇幅,以第2到第10点缺失为例,最开始该缺失数据段位于插值法所用全周数据最末端,随着采样进行,该数据缺失段在插值法所用全周数据的位置将逐步前移,直至位于首段位置。针对上述数据窗移动过程,再次进行上述仿真,结果如图12所示,可以看出在移动的数据窗下,以保护不误动为前提,阶次组合Neville插值法能耐受缺失点数量仍多于另2种插值法,性能更优越。

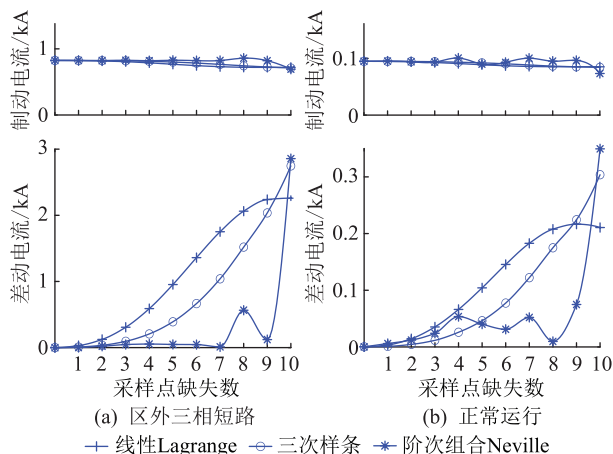


图12 缺失点数量增加时判据差动电流与制动电流的变化趋势(移动数据窗)

Fig.12 Variation trend of the criterion differential current and braking current with the increase of the number of missing points (under the moving data window)

4.3 阶次组合 Neville 插值法对保护速动性的影响

根据 3.1 节中 Neville 插值法的描述,若有 $n+1$ 个数据点,从步骤 2 开始将出现加法和乘法计算,考虑到重复数据不用计算,步骤 2 中的加法计算为 n 次 $x_r - x_{r-1}$ ($2 \leq r \leq n+1$)、 $n+1$ 次 $x_0 - x_i$ ($1 \leq i \leq n+1$) 以及 n 次分式和,即共有 $3n+1$ 次加法计算;步骤 2 中由于每个式子的分母相同,共有 $3n$ 次乘法计算。同理可分析其他步骤中加法计算和乘法计算的计算量,最终求得 $n+1$ 个数据点进行 Neville 插值需要 n^2+3n+1 次加法计算和 $3n(n+1)/2$ 次乘法计算。

为展开对比,应对当前常用的三次样条插值法进行计算量分析,其一般采用追赶法^[28]求解三对角矩阵。在“追”的过程中,共有 $3(n-1)$ 次加法和 $6n$ 次乘法计算;在“赶”的过程中,共有 $n-1$ 次加法运算与 n 次乘法计算。求解三对角矩阵后,对样条参数进行求解,需要 $5(n+1)$ 次加法计算和 $6(n+1)$ 次乘法计算。因此,在三次样条插值过程中,共须进行 $9n+1$ 次加法计算和 $13n+6$ 次乘法计算。

但是,使用阶次组合 Neville 插值法 ($n=20$),周期前(后)8 个点是基于 13 个点的插值,需要 181 次加法和 234 次乘法。而三次样条插值法是基于整周期 20 个点的插值,需要 172 次加法和 253 次乘法。与三次样条插值法相比,阶次组合 Neville 插值法多 9 次加法、少 19 次乘法。对于目前高速发展的中央处理器性能,其加法和乘法所需时间均极短,传统三次样条法适用的场合,文中所提方法与之计算量相差无几,不会对保护速动性造成明显影响。

5 结论

文中研究 5G 环境下有源配电网差动保护采样数据缺失场景,得到以下结论:(1) 提出一种在缺失点数量未达到整定阈值时使用阶次组合 Neville 插值法进行数据插值、缺失点数量超过整定阈值时闭锁主保护的应对策略;(2) 对比传统方法,所提阶次组合 Neville 插值法性能相对较好,能耐受的缺失点数量更多;(3) 所提阶次组合 Neville 插值法不会给保护速动性带来较大影响。综上,当有源配电网差动保护与 5G 通信紧密结合时,文中所提应对策略有望得到广泛应用。

本文得到国网上海市电力公司科技项目(5209-4019006B)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 史晨豪,唐忠,戴尉阳,等. 基于多要素改进 NSGA II 算法的有源配电网多目标优化策略[J]. 供用电, 2021, 38(6): 50-55.

SHI Chenhao, TANG Zhong, DAI Weiyang, et al. Multi-objective optimization strategy of active distribution network based on multi-factor improved NSGA II algorithm[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(6): 50-55.

[2] 全新宇,张宇泽,张长生,等. 基于广义回归神经网络的有源配电网网供负荷预测方法[J]. 供用电, 2020, 37(12): 40-45.

TONG Xinyu, ZHANG Yuze, ZHANG Changsheng, et al. Load forecasting method of active distribution network based on generalized regression neural network[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(12): 40-45.

[3] 潘本仁,王和春,张妍,等. 含分布式电源的主动配电网重构策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 102-107.

PAN Benren, WANG Hechun, ZHANG Yan, et al. Study on an active distribution network reconstruction strategy with distributed power supply[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 102-107.

[4] 李瀚霖,陆于平,黄涛,等. 基于故障同步识别的含分布式电源配电网充分式差动保护[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 100-107.

LI Hanlin, LU Yuping, HUANG Tao, et al. Sufficient differential protection for distribution network with distributed generators based on fault synchronous identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 100-107.

[5] 徐艳春,罗凯,谢莎莎,等. 计及负荷电压静特性的有源配电网线性潮流计算[J]. 智慧电力, 2020, 48(11): 40-47.

XU Yanchun, LUO Kai, XIE Shasha, et al. Linear power flow calculation of active distribution network considering static characteristics of load voltage[J]. Smart Power, 2020, 48(11): 40-47.

[6] 周成瀚,邹贵彬,杜肖功,等. 基于正序电流故障分量的有源配电网纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2102-2112, 2390.

ZHOU Chenghan, ZOU Guibin, DU Xiaogong, et al. A pilot protection method based on positive sequence fault component current for active distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2102-2112, 2390.

[7] 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): 76-84.

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): 76-84.

[8] 韩博文,王钢,李海锋,等. 含逆变器分布式电源配电网的新型纵联保护方案[J]. 高压技术, 2017, 43(10): 3453-3462.

HAN Bowen, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Novel pilot protection scheme for distribution networks with inverter-interfaced distributed generators[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3453-3462.

[9] 张宁,杨经纬,王毅,等. 面向泛在电力物联网的 5G 通信: 技术原理与典型应用[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14):

- 4015-4025.
ZHANG Ning, YANG Jingwei, WANG Yi, et al. 5G communication for the ubiquitous Internet of Things in electricity: technical principles and typical applications [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4015-4025.
- [10] 王毅, 陈启鑫, 张宁, 等. 5G 通信与泛在电力物联网的融合: 应用分析与研究展望 [J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1575-1585.
WANG Yi, CHEN Qixin, ZHANG Ning, et al. Fusion of the 5G communication and the ubiquitous electric Internet of Things: application analysis and research prospects [J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1575-1585.
- [11] 张星, 徐文斌, 赵东森. 基于 5G 技术的配网差动保护应用 [J]. 宁夏电力, 2020(3): 18-21.
ZHANG Xing, XU Wenbin, ZHAO Dongsen. Research on application of differential protection for distribution network based on 5G-technology [J]. Ningxia Electric Power, 2020(3): 18-21.
- [12] 吕玉祥, 杨阳, 董亚文, 等. 5G 技术在配电网电流差动保护业务中的应用 [J]. 电信科学, 2020, 36(2): 83-89.
LYU Yuxiang, YANG Yang, DONG Yawen, et al. Application of 5G to current differential protection of distribution network [J]. Telecommunications Science, 2020, 36(2): 83-89.
- [13] 柳粟杰, 杨秀芝, 陈平平, 等. 实时视频传输的帧级别前向纠错信道编码 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 2020, 59(6): 964-971.
LIU Sujie, YANG Xiuzhi, CHEN Pingping, et al. Frame-level forward error correction channel coding for real-time video transmission [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science Edition), 2020, 59(6): 964-971.
- [14] 蒋雷海, 陈建玉, 俞拙非, 等. 数字化保护采样数据处理方案 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 42-44.
JIANG Leihai, CHEN Jianyu, YU Zhuofei, et al. Sampling data processing methods of digital protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 42-44.
- [15] 周斌, 鲁国刚, 黄国方, 等. 基于线性 Lagrange 插值法的变电站 IED 采样值接口方法 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(3): 86-90.
ZHOU Bin, LU Guogang, HUANG Guofang, et al. A sampled values interface method for substation IED based on the linear Lagrange interpolation algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3): 86-90.
- [16] 江卫良, 陆源, 郑作伟, 等. 基于二次插值算法的采样值保护新算法 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 30-35.
JIANG Weiliang, LU Yuan, ZHENG Zuowei, et al. A new algorithm on sampled value protection based on quadratic interpolation algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 30-35.
- [17] 蔡超, 陆于平, 黄涛, 等. 基于插值和时标变换的智能变电站保护数据重采样算法 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(19): 80-85.
CAI Chao, LU Yuping, HUANG Tao, et al. Re-sampling algorithm for smart substation protection data based on interpolation and time scale transformation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 80-85.
- [18] 宋志伟, 徐舒, 王润路, 等. 5G 通信条件下的线路差动保护优化策略研究 [J]. 供用电, 2021, 38(5): 17-22.
SONG Zhiwei, XU Shu, WANG Runlu, et al. Research on optimization strategy of line differential protection under 5G communication conditions [J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(5): 17-22.
- [19] 张建雨, 姜睿智, 李俊刚, 等. 基于 5G 通信的配电网差动保护技术研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 17-23.
ZHANG Jianyu, JIANG Ruizhi, LI Jungang, et al. Research on differential protection of a distribution network based on 5G communication [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 17-23.
- [20] 李晓华, 柳焕章, 尹项根, 等. 新型双 K 值差动保护研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(25): 49-55.
LI Xiaohua, LIU Huanzhang, YIN Xianggen, et al. Novel differential protection with double restraint coefficient [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(25): 49-55.
- [21] 朱国防, 陆于平. 扇环型制动区差动保护算法 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 172-177.
ZHU Guofang, LU Yuping. A novel differential protection with sector-ring restraint region [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 172-177.
- [22] 金能, 于壮状, 林湘宁, 等. 兼具高灵敏性与良好相移制动能力的多端广域电流差动保护判据研究 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(21): 6314-6323, 6493.
JIN Neng, YU Zhuangzhuang, LIN Xiangning, et al. Study of multi-terminal wide-area current differential protection criterion with high sensitivity and ability of tolerating additional phase-shift error [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(21): 6314-6323, 6493.
- [23] 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.
- [24] 常远, 林伟华, 徐战亚, 等. 滑动 Neville 插值算法在 GPS 精密星历插值中的应用研究 [J]. 测绘地理信息, 2017, 42(1): 53-56, 60.
CHANG Yuan, LIN Weihua, XU Zhanya, et al. Application of sliding neville interpolation algorithm in GPS precise ephemeris interpolation [J]. Journal of Geomatics, 2017, 42(1): 53-56, 60.
- [25] 吉长东, 徐爱功, 冯磊. GPS 精密星历拟合与插值中龙格现象的处理方法 [J]. 测绘科学, 2011, 36(6): 169-171.
JI Changdong, XU Aigong, FENG Lei. Treatment of Runge's phenomenon in fitting & interpolating GPS precise ephemeris [J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(6): 169-171.
- [26] 李天驰, 王果. 多模 GNSS 卫星轨道插值方法研究 [J]. 河

南工程学院学报(自然科学版),2020,32(2):38-44.

LI Tianchi, WANG Guo. Research on orbit interpolation method of multi-mode GNSS satellites [J]. Journal of Henan Institute of Technology (Natural Science Edition), 2020, 32(2): 38-44.

[27] 常亮,何秀凤. 基于移动区间的 GPS 轨道标准化方法[J]. 大地测量与地球动力学,2009,29(1):110-113.

CHANG Liang, HE Xiufeng. Standardization of GPS satellite orbits based on moving intervals[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2009,29(1):110-113.

[28] 苗莎,郑晓薇. 三次插值样条曲线拟合多核并行算法[J]. 计算机应用,2010,30(12):3194-3196.

MIAO Sha, ZHENG Xiaowei. Multi-core parallel algorithm for cubic spline curve fitting [J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(12): 3194-3196.

作者简介:



涂崎

涂崎(1975),男,硕士,教授级高级工程师,从事电力系统继电保护相关工作(E-mail: 13002135211@wo.cn);

沈冰(1979),男,博士,高级工程师,从事电力系统自动化相关工作;

邹晓峰(1985),男,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护相关工作。

Countermeasures for current differential protection in 5G-based active distribution network under sampling data missing scenario

TU Qi¹, SHEN Bing², ZOU Xiaofeng², JIN Zhen³, XU Shu³, HOU Wei³

(1. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200122, China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Company Research Institute, Shanghai 200437, China;

3. Nanjing NARI-Relays Engineering Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Compared with the traditional three-section current protection, the current differential protection can improve the protection performance as a whole in the active distribution network, but reduce the wide coverage of fibre channel. The 5G, with its advantages of high reliability, low latency and wide coverage, is expected to become a new communication scheme for differential protection in active distribution network. However, the 5G communication may still be affected by environmental interference and other factors, resulting in the missing of sampling data, which may affect the correct operation of the protection under the normal operation and external fault scenarios. To solve the above problems, firstly, combined with the ρ plane method, the influences of various sampling data missing scenarios on the protection operation are analyzed qualitatively. Then, a strategy to reconstruct the missing sampling data by using order combination Neville interpolation method is proposed. Finally, an active distribution network simulation model is built in PSCAD, and the interpolation precisions of various interpolation methods are compared under a variety of missing sampling data scenarios, which verifies the effectiveness of the strategy proposed in this paper for improving the protection operation characteristics. Through theoretical calculation and analysis, it is concluded that the proposed strategy does not affect the real-time performance of protection in high-performance central processing unit (CPU).

Keywords: 5G; active distribution network; differential protection; sampling data missing; Neville interpolation; order combination

(编辑 方晶)