

基于5G通信和改进DTW的配电网差动保护技术

于洋¹, 汤伟¹, 叶远波¹, 邵庆祝¹, 杨瑞金¹, 黄玉辉²

(1. 国网安徽省电力有限公司, 合肥 230022; 2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要:随着大量分布式电源接入配电网, 配电网逐步转化为多源、多端网络, 对继电保护性能的要求日益提高。电流差动保护十分适用于配电网多源网络故障问题, 但差动保护依赖光纤通道, 存在成本高、铺设难度大等问题, 难以推广使用。针对该问题提出一种基于5G通信的配电网差动保护方案, 旨在利用5G通信的低时延、低成本等优势替代光纤, 提高配电网差动保护的实用性。为解决通信时延和时延抖动问题, 引入了改进动态时间规划(DTW)算法。针对传统DTW算法开销大、算法精度和效率受限于序列幅值差异、依靠经验选取参数等缺陷, 提出了全局路径约束策略、数据标准化策略和粒子群优化策略予以改进。仿真结果表明, 基于5G通信和改进DTW的配电网差动保护方法具有选择性和速动性, 在不同场景下能够可靠动作。

关键词:5G通信; 差动保护; 动态时间规划; 配电网; 通信时延

DOI:10.15938/j.jhust.2023.04.013

中图分类号: TM773 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2023)04-0110-08

Distribution Network Differential Protection Technology Based on 5G Communication and Improved DTW

YU Yang¹, TANG Wei¹, YE Yuanbo¹, SHAO Qingzhu¹, YANG Ruijin¹, HUANG Yuhui²

(1. State Grid Anhui Electric Power Co., LTD., Hefei 230022, China;

2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With a large number of distributed power generations connected to the distribution network, the distribution network has gradually transformed into a multi-source and multi-terminal network, and the requirements for relay protection performance are increasing. Current differential protection is suitable for the problem of multi-source network failure in distribution networks, but differential protection relies on fibre channel, which has problems such as high cost and difficult laying, which is difficult to promote and use. This paper proposes a distribution network differential protection scheme based on 5G communication, which aims to replace optical fiber by using the advantages of low latency and low cost of 5G communication and improve the practicality of differential protection of distribution network. To solve the problem of communication delay and delay jitter, an improved dynamic time programming (DTW) algorithm was introduced. Aiming at the shortcomings of traditional DTW algorithms, such as large overhead, algorithm accuracy and efficiency limited by sequence amplitude difference, and empirical selection of parameters, the global path constraint strategy, data standardization strategy and particle swarm optimization strategy are proposed to be improved. Simulation results show that the differential protection method of distribution network based on 5G communication and improved DTW is selective and fast, and can be reliably operated in different scenarios.

Keywords: 5G communication; differential protection; dynamic time planning; distribution network; communication delay

收稿日期: 2022-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(51877136).

作者简介: 汤伟(1978—), 男, 硕士, 高级工程师;

叶远波(1973—), 男, 硕士, 正高级工程师.

通信作者: 于洋(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, E-mail: jwzhou1990@163.com.

0 引言

近年来,随着“碳中和、碳达峰”战略的部署和新能源技术如风电、光伏、电动汽车等的快速发展^[1-4],越来越多的分布式电源(distributed generation, DG)接入配电网中。配电网逐步由传统的辐射型网络转变为多源、多端网络,对继电保护性能的要求日益严苛,三段式电流保护逐渐难以识别配电网故障^[5-8]。为提高保护灵敏性,电流差动保护被引入到新型配电网中,从原理上看十分适用于多源网络故障问题,具有优秀的选择性、灵敏性和速动性。但差动保护依赖光纤通道,由于光纤成本高、建设时间长、铺设难度大,配电网差动保护难以得到大规模推广使用^[9-10]。

第5代移动通信技术(5G通信)作为4G网络的进化版本,相比4G具有高速率、低时延、高可靠性等优势^[11-13],理论上可以满足电流差动保护的时延要求,并且相比光纤价格便宜,将5G通信技术引入配电网差动保护领域,有望推广配电网差动保护的使用。有不少学者在这一领域开展了相关研究,如文[14]提出一套有源配电网综合快速保护动作方案,在5G保持同步性时采用电流相量差动保护,在5G失去同步性时采用电流幅值差动保护,在5G链路中断时采用相继速动保护加速传统三段式保护Ⅱ段动作。文[15]研究了差动保护两侧的时钟同步问题,使用切片网络作为数据通道,采用基于故障时刻的自同步方法实现数据同步。文[16]采用北斗卫星导航系统授时保证时钟同步,结合5G无线通信通道和UDP协议SV采样值报文提出了配电网差动保护综合方案。以上文献的仿真结果均表明引入5G通信的配电网差动保护方案能够满足保护性能要求。文[17]针对5G通信数据存在通信时延和时延抖动的问题,引入动态时间规划算法对电流采样时间序列做处理,构建新的差动保护判据。

差动保护原理要求线路两端参与计算的电流相量必须经同步采样或同步化处理,这可以通过基于内部时钟或外部时钟采样2种方式实现。然而,无论采用哪种方式,通信时延和时延抖动都是难以避免的,通信时延由空口时延和核心网时延构成,时延抖动主要由空口突发大时延引起,二者制约了差动保护的動作时间^[18]。探究如何降低通信时延和时延抖动对差动保护性能的影响,将有助于进一步提高5G通信下配电网差动保护的选择性、灵敏性和

速动性。动态时间规划算法(dynamic time warping, DTW)通过拉长或缩短时间轴,衡量不同时间序列的相似度,可将复杂的全局优化问题转化为局部优化问题。动态时间规划算法对电流时延不敏感,可以有效消除通信时延和时延抖动对电流的影响,提高差动保护的选择性和速动性。

本文提出一种基于5G通信和改进动态时间规划算法的配电网差动保护方法,以降低5G通信时延和时延抖动的影响,提高配电网差动保护的性能和效果。

1 基于5G通信的配电网差动保护关键技术

1.1 数据同步方法

差动保护基于基尔霍夫电流定律,当输入CT两端电流相量差超过动作阈值时启动动作元件,切断保护设备两端的断路器^[19-20]。差动保护计算的前提是两端电流相量满足同步采样要求。传统差动保护的数据同步方法主要有基于数据通道的同步方法和基于GPS/北斗的外部时钟源数据同步方法。

基于数据通道的同步方法主要包括时钟校正法、采样时刻调整法和采样数据修正法,受限于5G通道来回时延不等,这些方法均不适用于5G通信场景。基于GPS/北斗的外部时钟源数据同步方法不要求5G通道来回时延相等,适用于5G通信场景。此外,基于5G自身或保护软件的对时模块也可以实现数据同步。

1.2 报文传输方法

基于5G通信的差动保护信息交互报文通常采用UDP报文封装,因为UDP报文实时性较高,符合差动保护机制。5G通信基于TCP/IP协议簇,TCP和UDP协议工作在传输层,IP协议工作在网络层。TCP面向连接,有保证数据正确性的机制,实时性慢;UDP协议不面向连接,没有保证数据正确性的机制,实时性快。基于5G通信的差动保护可以由UDP报文保证实时性,由差动保护逻辑保证数据正确性。

5G通信报文结构如图1所示,主要包括以太网首部、IP协议首部、UDP协议首部和应用数据4个部分,各个协议首部根据配置长度总和一般在40~60字节,应用数据一般包括三相电流采样值或相量值、三相电压采样值或相量值、采样序号、CRC校验码等信息。考虑一定备用的扩展裕度,差动保护纵联通道的设计报文长度一般在100~300字节。差

动保护的报文发送频率通常等于采样频率,主要为 1 200 帧/s、1 600 帧/s 和 4 000 帧/s,单个装置占用 5 G 带宽一般在 1 ~ 12 Mbit/s。

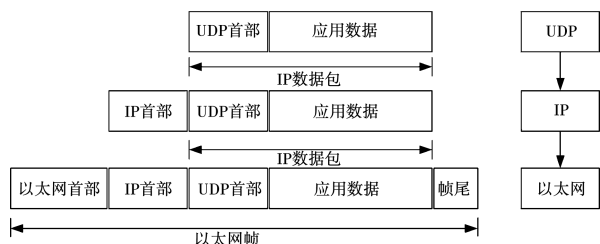


图 1 5G 通信报文结构

Fig. 1 5G communication message structure

1.3 电力组网和信息加密方法

按照电力系统信息安全管理的相关规定,继电保护位于生产控制大区的安全 I 区,在数据传输时需要与其它数据网隔离。参与电力继电保护的信息应在电力通信专网中进行,而接入生产控制大区的无线专网需设置安全接入区,经网络切片安全隔离后,和电力通信专网的纵向连接处还需设置纵向加密装置,以保证电力信息的安全。

为保障差动保护动作的安全性,防止遭受恶意的网络攻击和信息泄露,配电网差动保护一般通过网络切片的方式达到不同业务的无线频谱隔离,从而满足通信安全的要求。基于 5G 通信的配电网差动保护一般采用基于硬隔离的逻辑隔离技术,在此基础上,还需对业务信息进行安全加密。

5G 通信的信息加密技术一般分为物理层加密和应用层加密 2 种,其中数字签名认证技术几乎不影响传输速度,保障了差动保护的实时性,可以用于差动保护的信息加密。

1.4 通信时延和时延抖动

5G 通信基于无线传输,传输的实时性、可靠性受天气、障碍物等因素的影响较大,需要考虑通信时延和时延抖动对差动保护的影响。通信时延对差动保护的動作时间产生影响,当通信时延过大时,由于时延补偿过大的原因,两侧电流同步时可能出现混叠现象,可能导致保护的拒动或误动。时延抖动将导致不同数据包时延不一致,在时间域上出现失真,当抖动过大时,“乒乓算法”原理不再适用,无法使用基于数据通道的同步方法。

为有效抑制通信时延的影响,当时延过大时可以采取瞬间闭锁装置的策略,当时延不大时可以增加采样缓冲区,但牺牲一定的速动性。为有效抑制时延抖动的影响,可以采取优化空口误码、减少空口

四次重传、提高数据窗时间以覆盖时延抖动时间等策略。

基于 5G 通信的配电网差动保护本质上是基于 2 个电流时间序列关系的判别,且时间序列在时间轴上存在时延抖动。为此,本文引入改进的动态时间规划(DTW)算法^[21-22],从算法层面降低通信时延和时延抖动的影响。该算法常用于时间序列分析领域,可实现时间序列之间的模式识别,对失真时间序列具有容差性。

2 动态时间规划算法

基于 5G 通信的配电网差动保护中主要存在的问题是用于判别的 2 个电流时间序列存在时延抖动,不同数据包时延不一致,在时间域上出现失真。DTW 算法结合时间规整和距离测度技术,能够高效处理电流序列的局部抖动,对失真序列具有容差性。理论上讲,DTW 算法可以求解 2 个电流时间序列的匹配程度,该匹配程度用 DTW 距离表示。在线路正常运行情况下,2 个电流时间序列的匹配程度很高,DTW 距离应小于动作判据阈值;在线路发生故障时,DTW 距离应大于动作判据阈值,保护装置动作。

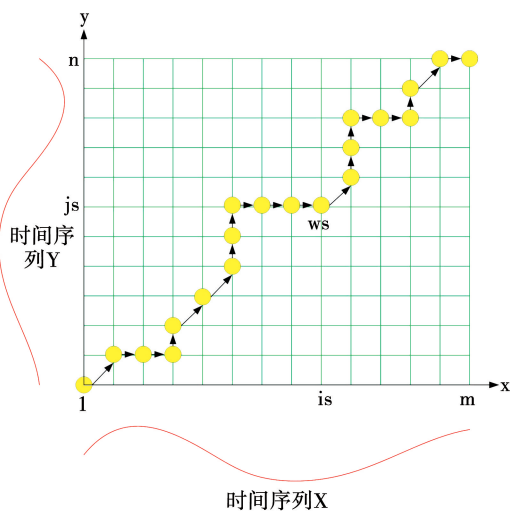


图 2 DTW 算法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of DTW algorithm

DTW 算法的示意图如图 2 所示,DTW 通过对 2 个时间序列 X 和 Y 进行相互关系的搜索,其数据长度分别为 m 和 n ,即:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\} \quad (1)$$

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\} \quad (2)$$

应用到配电网差动保护时线路两侧电流数据长度相

同,即 $m = n$ 。DTW 基于动态规划思想调整对应关系,找到一条最优路径,使得沿该路径两序列间的距离最小,此时两序列相关性最强^[23-25]。

图2中圆圈形成的路径为一条有效路径 W ,可以表示为

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_s, \dots, w_K\} \quad (3)$$

式中: w_s 为该路径第 s 个点,坐标为 (i_s, j_s) ,它对应了时间序列 X 的第 i_s 个点和时间序列 Y 的第 j_s 个点。则两点之间的距离可以表示为

$$d(w_s) = d(x_{i_s}, y_{j_s}) = |x_{i_s} - y_{j_s}| \quad (4)$$

由此可得2序列所有对应点之间的距离矩阵 D 为

$$D = \begin{bmatrix} d(x_1, y_1) & d(x_1, y_2) & \cdots & d(x_1, y_n) \\ d(x_2, y_1) & d(x_2, y_2) & \cdots & d(x_2, y_n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d(x_m, y_1) & d(x_m, y_2) & \cdots & d(x_m, y_n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

DTW 算法规定有效路径需满足如下4个约束条件:

1) 路径起点坐标必须为 $(1, 1)$, 终点坐标为 (m, n) ;

2) 路径的总步数 K 满足:

$$\max(m, n) \leq K \leq m + n - 1 \quad (6)$$

3) 连续性,路径从 p_s 移动到 p_{s+1} 时需要满足:

$$i_{s+1} - i_s \leq 1 \quad (7)$$

$$j_{s+1} - j_s \leq 1 \quad (8)$$

即沿路径前进到 $D(i, j)$ 时,上一步必须是 $D(i-1, j-1)$ 、 $D(i-1, j)$ 、 $D(i, j-1)$ 中的一点。

4) 单调性,路径从 p_s 移动到 p_{s+1} 时需要满足:

$$i_s \leq i_{s+1} \quad (9)$$

$$j_s \leq j_{s+1} \quad (10)$$

即路径不允许出现时间“倒退”的现象。

满足约束条件的路径 W 有多条,所有路径 W 组成了路径空间 M ,其中最短的路径长度即2时间序列 X 和 Y 之间的 DTW 距离,即:

$$DTW(X, Y) = \min_{M} \sum_{s=1}^K d(w_s) \quad (11)$$

求解 DTW 距离即求解以式(11)为目标函数、式(6)~(10)为约束条件的最优化问题。

3 改进 DTW 算法

传统 DTW 算法用于配电网差动保护存在如下3个缺陷:①DTW 算法的路径个数随着时间序列数

据点增多,算法开销增大,运行时间加长,增加了算法时延;②若原始电流序列的幅值差异较大,将对 DTW 算法结果的计算精度和计算时长均产生较大的不利影响;③数据时间窗、采样频率对算法精度影响很大,但参数选取通常依靠人为经验,限制了算法精度。

为进一步提高 DTW 算法的精度,本文引入全局路径约束策略、数据标准化策略和粒子群优化策略分别克服上述缺陷。

全局路径约束策略:传统 DTW 算法在计算两个序列的 DTW 距离时要计算一个较大的矩阵,时间复杂度为 $O(mn)$ 。全局路径约束通过限制距离矩阵 D 中需要计算的元素数量,来提高 DTW 的计算速度。常见的全局约束方法有 Sakoe-Chiba、Itakura-Parallelogram 等,本文选用 Sakoe-Chiba 约束,它的计算区域不是完整的矩阵,而是沿对角线方向的条形区域,如图3所示,路径被限制在2条虚线形成的条形区域内。

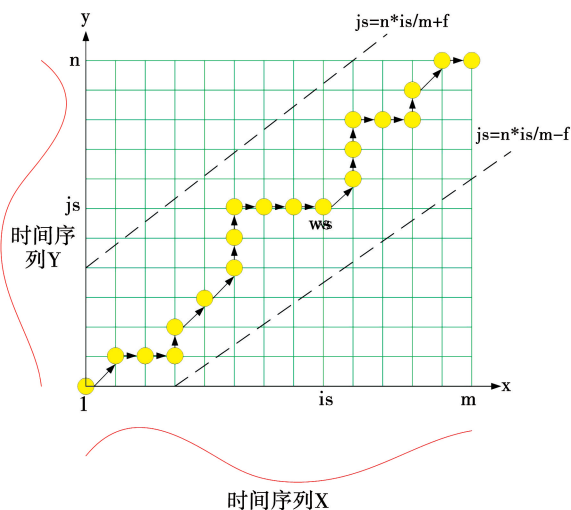


图3 Sakoe-Chiba 约束路径示意图

Fig. 3 Schematic of the Sakoe-Chiba constraint path

Sakoe-Chiba 约束限制了路径搜索范围,可以理解为对路径坐标的限制,即

$$\frac{n * i_s}{m} - f \leq j_s \leq \frac{n * i_s}{m} + f \quad (12)$$

式中: f 为参数。

数据标准化策略:当原始电流序列幅值差异较大时,DTW 计算的准确度和时间效率均降低,数据标准化可以消除数据的幅度差异,并限制序列数值的范围。设序列 X 的均值为 $\bar{x}$,标准差为 σ ,则经标准化处理后的新序列 X' 可表示为

$$X' = \{x'_1, x'_2, \dots, x'_m\} \quad (13)$$

式中:

$$x'_m = \frac{x_m - \bar{x}}{\sigma}$$

(14)

本文将经过数据标准化处理后的 2 个电流序列带入 DTW 算法进行计算。

粒子群优化策略:改进 DTW 算法一共有如下几个重要参数:数据时间窗、采样频率、Sakoe-Chiba 约束的参数 f 。传统 DTW 算法在参数选择上通常依靠人为经验,为提高参数选取的准确性,本文采用粒子群算法^[26]进行 DTW 算法参数的确定。粒子群算法是一种解决多目标、多变量、非线性的全局优化算法,具有搜索速度快、效率较高的优点。

4 基于 5G 通信和改进 DTW 的配电网差动保护方法

本文提出一种基于 5G 通信和改进 DTW 的配电网差动保护方法,其流程如图 4 所示。

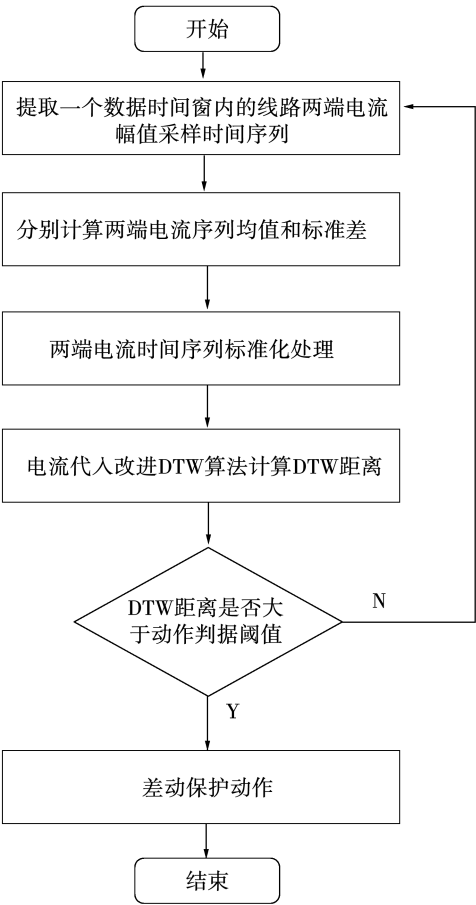


图 4 本文算法流程图

Fig. 4 The algorithm flow chart of this paper

其步骤如下:

- 1)提取一个数据时间窗的线路两端电流幅值采样时间序列;
- 2)分别计算两端电流时间序列的均值和标准差;
- 3)分别将两端电流时间序列进行标准化;
- 4)将 2 个标准化序列代入改进 DTW 算法中,计算 DTW 距离;
- 5)若 DTW 距离大于动作判据阈值,则差动保护动作,否则返回步骤 1)。

5 算例分析

本文采用 PSCAD/EMTDC 仿真软件模拟有源配电网差动保护模型,以验证方法的有效性,模型结构如图 5 所示。差动保护一端为本地电流采样模拟,另一端将电流信号分别经过 RS485、5 G 基站发送到模拟软件中,使用华为工业 5 G 模块模拟 5 G 通信时延。模型双电源均采用中性点经小电阻接地,接地电阻值 10 Ω,负荷 Ld1、Ld2 有功功率均为 2 MW,功率因数为 0.85,DG 额定容量为 2 MW。

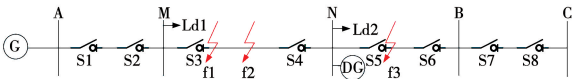


图 5 配电网仿真模型

Fig. 5 Distribution network simulation model

为进一步验证本文所提模型的有效性和准确性,采用基于 5G 通信的差动保护模型、基于 5G 通信和原始 DTW 的差动保护模型作为对照组,比较 3 个模型在不同故障类型下的动作情况和动作时间。

5.1 单电源区内故障仿真结果分析

考察线路 MN,S1 ~ S8 均闭合,在其区内靠近母线 M 的 f1 处和线路中点 f2 处分别设置不同类型的短路故障,对比不同模型在单电源区内故障场景下的动作情况,其结果如表 1 所示。

由表 1 可知,在 3 种模型中,本文提出的基于 5 G通信和改进 DTW 的配电网差动保护模型的动作时间在单电源区内不同故障位置、不同故障类型下均为最小,验证了本文所提方法可以有效改善差动保护的速动性和灵敏性;本文模型在单电源区内故障各个场景下均有效动作,验证了 5 G 通信用于配电网差动保护的可行性。

表 1 各模型在单电源区内故障场景下的动作情况比较

Tab. 1 Comparison of the behavior of each model in the fault scenario of a single power supply area

故障位置	故障类型	5G 通信 – 改进 DTW	5G 通信	5G 通信 – 原始 DTW
		动作时间 /ms	动作时间 /ms	动作时间 /ms
靠近母线 M 的 f1	单相接地故障	26	41	33
	两相接地故障	26	41	33
	两相相间故障	26	40	33
	三相对称故障	26	41	33
线路中点 f2	单相接地故障	24	41	33
	两相接地故障	25	41	33
	两相相间故障	26	41	34
	三相对称故障	26	41	33

5.2 单电源区外故障仿真结果分析

考察线路 MN, S1 ~ S8 均闭合,在其区外下游靠近出口的 f3 处分别设置不同类型的短路故障,对比不同模型在单电源区外故障场景下的动作情况,其结果如表 2 所示。

表 2 各模型在单电源区外故障场景下的动作情况比较

Tab. 2 Comparison of the behavior of each model in the fault scenario outside the single power supply area

故障位置	故障类型	5G 通信 – 改进 DTW	5G 通信	5G 通信 – 原始 DTW
		动作时间	动作时间	动作时间
区外下游靠近出口的 f3	单相接地故障	不动作	不动作	不动作
	两相接地故障	不动作	不动作	不动作
	两相相间故障	不动作	不动作	不动作
	三相对称故障	不动作	不动作	不动作

观察表 2 可知,各个模型在单电源区外故障时均不动作,均可顺利区分单电源区内、区外故障。

为进一步验证本文模型在单电源区外故障场景的优越性,阶梯式调整负荷 Ld1、Ld2 的有功功率和功率因数,设置 50 组不同数据的算例,其他条件不变,考察 3 种模型在 50 组算例中的表现,其对比结果如表 3 所示。

由表 3 可知,在 50 组单电源区外故障场景算例中,本文模型没有发生误动,而对照组中基于 5 G 通信的差动保护模型和基于 5 G 通信和原始 DTW 的

差动保护模型分别误动 4 次和 2 次,验证了本文模型在单电源区外故障场景中的有效性。

表 3 各模型在多组单电源区外故障场景下的动作情况比较

Tab. 3 Comparison of the operation of each model in multiple sets of single power zone failure scenarios

故障位置	故障类型 误动次数	5G 通信 – 改进 DTW	5G 通信	5G 通信 – 原始 DTW
		动作时间	动作时间	动作时间
区外下游靠近出口的 f3	单相接地故障误动次数	0	1	0
	两相接地故障误动次数	0	2	1
	两相相间故障误动次数	0	1	1
	三相对称故障误动次数	0	0	0

综上所述,针对本文仿真模型,在不同故障位置、不同故障类型等场景下,本文提出的基于 5 G 通信和改进 DTW 的配电网差动保护模型表现均优于对照组 2 种模型,验证了本文模型的选择性、速动性、灵敏性和有效性。

6 结 论

5 G 通信作为光纤通道的替代,有助于配电网差动保护的大规模推广。提出了一种基于 5 G 通信和改进 DTW 的配电网差动保护方法,分析了 5 G 通信的关键技术,针对通信时延和时延抖动问题,引入动态时间规划算法,并针对原始动态时间规划算法的缺陷提出改进策略。仿真结果表明,本文所提方法具有选择性和速动性,为配电网差动保护提供了一种新的研究思路。

参 考 文 献:

[1] 白浩,王钰山,周长城,等. 市场环境下的新能源配电网供电能力评估及提升策略[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2021, 26(5): 114.

BAI Hao, WANG Yushan, ZHOU Changcheng, et al. The Evaluation and Promotion Strategy of TSC for Distribution System with New Energy under Power Market Environment[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2021, 26(5): 114.

- [2] 刘永奇,陈龙翔,韩小琪. 能源转型下我国新能源替代的关键问题分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 515.
LIU Yongqi, CHEN Longxiang, HAN Xiaoqi. The Key Problem Analysis on the Alternative New Energy under the Energy Transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 515.
- [3] 代倩,吴俊玲,秦晓辉,等. 提升局部区域新能源外送能力的储能容量优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(3): 67.
DAI Qian, WU Junling, QIN Xiaohui, et al. Optimal Configuration Method of Energy Storage Capacity for Improving Delivery Ability of Renewable Energy in Regional Area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 67.
- [4] 丁剑,方晓松,宋云亭,等. 碳中和背景下西部新能源输电的电氢综合能源网构想[J]. 电力系统自动化, 2022, 45(24): 1.
DING Jian, FANG Xiaosong, SONG Yunting, et al. Conception of Electricity and Hydrogen Integrated Energy Network for Renewable Energy Transmission in Western China under Background of Carbon Neutralization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 45(24): 1.
- [5] 高维良,高厚磊,徐彬,等. 5G 用作配电网差动保护通道的可行性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 1.
GAO Weiliang, GAO Houlei, XU Bin, et al. Feasibility Analysis of Adopting 5G in Differential Protection of Distribution Networks[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 1.
- [6] 向珉江,袁通,苏善诚,等. 基于 5G 授时的配网差动保护数据同步方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 8.
XIANG Minjiang, YUAN Tong, SU Shancheng, et al. 5G Timing Base Data Synchronization Scheme for Differential Protection of Distribution Networks[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 8.
- [7] 何云良,裘愉涛,吴路明,等. 基于 5G 通信的继电保护技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 31.
HE Yunliang, QIU Yutao, WU Luming, et al. Research on Relay Protection Based on 5G Communication Technology[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 31.
- [8] 陈建平,桑林卫,汤拓,等. 自适应幅值比的有源配电网差动保护方案[J]. 电测与仪表, 2021, 58(10): 29.
CHEN Jianping, SANG Linwei, TANG Tuo, et al. Adaptive Distribution Network Differential Protection Scheme with Adaptive Amplitude Ratio[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(10): 29.
- [9] 马帅,武志刚,高厚磊,等. 适配高渗透率 DG 接入配电网的幅值比较式保护[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 43.
MA Shuai, WU Zhigang, GAO Houlei, et al. Amplitude Comparison Protection for Distribution Network with High Permeability Distributed Generation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 43.
- [10] 谢民,王同文,徐靖东,等. 分布式电源对配网继电保护影响及综合改进保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 78.
XIE Min, WANG Tongwen, XU Jingdong, et al. Effect of Distributed Generation on Relay Protection of Distribution Network and Comprehensive Improvement of Protection Scheme[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 78.
- [11] 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.
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.
- [12] 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.
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.
- [13] 陈俊,黄飞宇,黎作明. 基于 DQN 的电力物联网 5G 边缘切片资源管理研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1): 155.
CHEN Jun, HUANG Feiyu, LI Zuoming. Research on DQN-based 5G Edge Slicing Resource Management of Power Internet of Things[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 155.
- [14] 陈宏山,徐舒,李正红,等. 计及 5G 通信异常工况的有源配电网快速综合保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 159.
CHEN Hongshan, XU Shu, LI Zhenghong, et al. A New Fast Comprehensive Protection Scheme of an Active Distribution Network Considering the Abnormal Operating Conditions of 5G Communication[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 159.

- [15] 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.
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.
- [16] 余江, 黄河, 陈宏山, 等. 5G 无线通信承载差动保护业务的应用探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 10.
YU Jiang, HUANG He, CHEN Hongshan, et al. Discussion on the Application of 5G Wireless Communication Carrying Differential Protection Services[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 10.
- [17] 黄福全, 王廷凤, 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.
HUANG Fuquan, WANG Yanhuang, ZHANG Haitai, et al. Differential Protection of Distribution Line Based on 5G Communication and Dynamic Time Wrapping Algorithm[J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44(4): 77.
- [18] 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.
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.
- [19] 李海锋, 祝新驰, 梁远升, 等. 基于电流控制补偿的高压直流线路快速差动保护[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 111.
LI Haifeng, ZHU Xinchu, LIANG Yuansheng, et al. Fast Differential Protection for HVDC Transmission Line Based on Current Control Compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 111.
- [20] 褚旭, 孙锦琛. 直流输电线路单极故障不平衡电流分析及差动保护改进方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 47.
CHU Xu, SUN Jinchun. Analysis of Single-pole Fault Unbalanced Current and Improvement of a Differential Protection Scheme for HVDC Transmission Lines[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 47.
- [21] 邵翔, 郭谋发, 游林旭, 等. 基于改进DTW的接地故障波形互相关度聚类选线方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 63.
SHAO Xiang, GUO Moufa, YOU Linxu, et al. Faulty Line Selection Method Using Mutual Correlation Cluster of Grounding Fault Waveforms Based on Improved DTW Method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 63.
- [22] 储佳伟, 袁晓冬, 陈兵, 等. 结合小波分析和改进型DTW距离的配电网电压暂降源辨识方法[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 637.
CHU Jiawei, YUAN Xiaodong, CHEN Bing, et al. A Method for Distribution Network Voltage Sag Source Identification Combining Wavelet Analysis and Modified DTW Distance[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 637.
- [23] 童晓阳, 杨明杰, 张广骁. 基于改进DTW的行波波形相似性的高压直流输电线路保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3878.
TONG Xiaoyang, YANG Mingjie, ZHANG Guangxiao. A Protection Scheme for HVDC Transmission line Based on Traveling Waveform Similarity Using Improved DTW Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3878.
- [24] 晏臻, 苏维均, 于重重, 等. 一种改进的DTW相似性搜索方法[J]. 计算机仿真, 2019, 36(2): 232.
YAN Zhen, SU Weijun, YU Chongchong, et al. An Improved DTW Similarity Search Method[J]. Computer Simulation, 2019, 36(2): 232.
- [25] 程前, 李建良. 基于改进动态时间规整的相似性度量及轨迹聚类[J]. 电子测量技术, 2021, 44(23): 1.
CHENG Qian, LI Jianliang. Improved Dynamic Time Warping for Similar Metrics and Trajectory Clustering[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(23): 1.
- [26] 李清. 基于改进 PSO-PFCM 聚类算法的电力大数据异常检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 161.
LI Qing. Power Big Data Anomaly Detection Method Based on an Improved PSO-PFCM Clustering Algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 161.

(编辑:温泽宇)