

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210204

基于5G和光纤综合通道的输电线路差动保护方法

娄为¹, 韩学军¹, 韩俊¹, 陆金凤², 李奔², 赵青春², 徐晓春²

(1. 国家电网有限公司华东分部, 上海 200000; 2. 南京南瑞继保工程技术有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 现有输电线路差动保护均基于光纤通道设计, 其通道要求高, 限制了双通道三路由的推广应用。另外, 现有差动保护不具备识别通道路由延时不一致的能力, 存在差动误动的风险。从数据格式、采样同步、同步监测、网络安全等方面研究了对通道要求降低的输电线路差动保护解决方案, 并提出了基于5G和光纤综合通道的线路差动保护方法。重点研究了基于数据通道可靠性提升的同步方法、基于外部同步时钟的同步方法和多模式数据实时同步监测策略, 实现综合通道差动保护同步。通过仿真试验, 基于5G和光纤综合通道的输电线路差动保护方法, 实现了可路由的差动数据处理, 降低了差动保护对通道的要求, 对采样同步状态进行实时监测, 提高了差动保护的可靠性, 有利于双通道三路由的推广应用。

关键词: 差动保护; 5G; 光纤; 综合通道; 同步

A transmission line differential protection method based on 5G and optical fiber integrated channels

LOU Wei¹, HAN Xuejun¹, HAN Jun¹, LU Jinfeng², LI Ben², ZHAO Qingchun², XU Xiaochun²

(1. East China Branch, State Grid Corporation of China, Shanghai 200000, China;

2. NR Engineering Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: Existing transmission line differential protection is designed based on an optical fiber channel. It has high channel requirements which limit the popularization and application of dual channel and three route. In addition, the existing differential protection does not have the ability to identify inconsistent channel routing delays, resulting in the risk of differential protection misoperation. This paper studies transmission line differential protection with reduced channel requirements from the aspects of data format, sampling synchronization, synchronous monitoring and network security. It puts forward a line differential protection method based on 5G and an optical fiber integrated channel. The focus is on a synchronization method based on the improvement of the reliability of the data channel and on the external synchronization clock, and the real-time synchronization monitoring strategy of multi-mode data to realize the synchronization. Through the simulation test, the method realizes routable differential data processing, reduces the requirements of differential protection for the channel, monitors the sampling synchronization status in real time, improves the reliability of differential protection, and is conducive to the popularization and application of dual channel and three route.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGHD0000DKJS2000106).

Key words: differential protection; 5G (5th generation mobile networks); optical fiber; integrated channels; synchronize

0 引言

输电线路差动保护理论上具有输电线路内部短路时动作的绝对选择性, 被广泛用于输电线路的主

保护^[1-4]。目前输电线路差动保护均基于光纤通道设计^[5-6], 导致存在一些问题。

1) 要求通道收发路由延时一致, 但又不具备监测其是否一致的能力^[7]。目前, 需通过人工配置一致的收发路由来确保收发路由延时一致。但这种方式存在两个问题: a) 人工配置要求通信人员必须对保护功能有一定的了解, 否则, 可能出现配置不满

基金项目: 国家电网公司科技项目资助 (SGHD0000DKJS2000106)

足要求,导致差动保护误动的情况;b)即使通道收发路由配置一致,若通信设备异常,仍有可能出现收发路由延时不一致导致差动保护误动的情况。

2)支持的通道类型有限。除光纤直连通道外,现有差动保护只能使用时分复用、透明传输的SDH通信网^[8-9]。但是,SDH通信网传输容量和灵活性有限,越来越难满足电网日益增加的多样化通信需求。光纤差动保护对通道的要求限制了对现有SDH网络的升级改造,制约了电力系统自动化通信业务的发展。

3)现有SDH通信网路由资源紧张,特别是对处于SDH通信网络边缘的新能源厂站和负荷站,没有足够的独立路由,导致无法完全满足双通道三路路由的改造要求^[10-11]。

文献[12-15]提出了利用5G网络作为差动保护的通道。然而目前的文献只研究了在配网差动保护上的应用^[16-19],暂未涉及高压差动保护,而且未考虑外部时钟不可靠时的差动保护解决方案。

本文提出了一种基于5G和光纤综合通道的输电线路差动保护方法。该方法能够适用于通信可靠性较低且收发路由延时不一致的通道,并实时监测采样是否同步,提高了差动保护的安全性和可靠性。为验证方法的有效性,本文使用通信时延不确定、通信可靠性和安全性均相对光纤通信较差的无线通信网络——5G通信网络,并对其进行了验证。验证结果表明,本文提出的差动保护解决方案适用于包括SDH通信网在内的各种光纤通信网络以及新一代无线通信网络,降低了差动保护对通道的要求,缓解了系统内SDH网络备用路由不足的问题,有利于双通道三路路由的推广应用。

1 差动保护同步方法

电流差动保护在算法上要求参与运算的各侧电气量的采样时刻必须同步^[20-22],这是实现差动保护的关键所在。

1.1 基于数据通道的同步方法

基于数据通道的同步方法^[23-24]不依赖于外部时钟源,可靠性很高。该方法建立在通道收发传输时延一致的基础之上,同步结果受通道收发时延一致程度影响。

在正式开始同步采样之前,主站在 t_s 时刻向从站发送一帧报文,报文中包含计算通道延时 T_d 的命令;从站接收到命令后延时 t_m 向主站发送反馈报文,报文中包含从站延时时间 t_m ;主站收到反馈报文的时刻为 t_r 。

当通道收发传输时延相同时,可计算出通道延时为

$$T_d = \frac{t_r - t_s - t_m}{2} \quad (1)$$

从站根据报文接收时刻 t_r 和通道延时 T_d 计算出主站的采样时刻,并将其采样时刻调整到与主站一致。如果通道收发传输时延不同,主站向从站发送的传输时延为 T_{d1} ,从站向主站发送的传输时延为 T_{d2} ,则式(1)计算出的通道延时为

$$T_d = \frac{T_{d1} + T_{d2}}{2} \quad (2)$$

收发通道实际传输时延和计算传输时延的偏差为 ΔT_d ,即两侧采样时刻偏差。

$$\Delta T_d = \left| \frac{T_{d1} - T_{d2}}{2} \right| \quad (3)$$

输电线路正常运行时,保护装置采集到的电流为穿越性负荷电流。理论上,两侧差动电流应为零。但由于收发通道时延不一致会产生差动电流 I_{CD} ,如式(4)所示。

$$I_{CD} = 2I_L \sin\left(\frac{\Delta T_d \omega}{2}\right) \quad (4)$$

式中: I_L 为保护装置采集到的穿越电流; ω 为角速度。

由此可知,当线路负荷和通道时延计算偏差达到一定值时,若保护装置启动,同时差流满足差动动作门槛和制动条件,差动保护就会误动。以差动动作门槛800A(一次值)、比率制动系数0.6为例,当流经线路的电流大于777A(一次值)且 $|T_{d1} - T_{d2}| > 6.89$ ms时,根据式(4)计算差流满足差动动作门槛,存在误动风险。

1.2 基于外部同步时钟的同步方法

基于外部同步时钟^[25-27](如北斗信号)的同步方法不受收发通道时延不一致的影响,但这种同步方法依赖于外部时钟源,同步结果受外部时钟同步程度影响。

假设两侧装置时钟偏差为 ΔT_{pps} ,则两侧采样时刻偏差 ΔT_{pps} 。输电线路正常运行时,由于时钟偏差会产生差动电流 I_{CD} ,如式(5)所示。

$$I_{CD} = 2I_L \sin\left(\frac{\Delta T_{pps} \omega}{2}\right) \quad (5)$$

由此可知,当线路负荷和时钟偏差达到一定值时,若保护装置启动,同时差流满足差动动作门槛和制动条件,差动保护会误动。以差动动作门槛800A(一次值)、比率制动系数0.6为例,当流经线路的电流大于777A(一次值)且 $\Delta T_{pps} > 3.45$ ms时,

根据式(5)计算差流满足差动动作门槛, 存在误动风险。

1.3 综合通道差动保护装置

为保证差动保护同步的可靠性, 本文提出了一种 5G 和光纤综合通道的差动保护多模式同步方法和基于综合通道的保护装置。装置包括 2 个光纤通道和 1 个 5G 通道, 可根据现场通道条件选择投入的通道个数及采用的通道类型。保护装置通信接线示意图如图 1 所示。

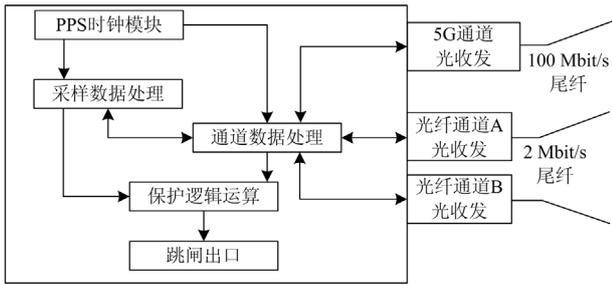


图 1 综合通道差动保护装置通信示意图

Fig. 1 Communication diagram of differential protection device of integrated channels

图 1 中, 装置在传统差动保护装置双光纤通道接口的基础上, 增加了一个 5G 通道接口, 该接口能外接通道收发路由延时不一致的通道。

2 综合通道的差动保护多模式同步方法

针对新增通道可能存在的收发通道时延不一致、时延抖动等问题, 本文采用以下方法实现 5G 及光纤综合通道的同步策略, 该策略包括: 5G 通道自适应同步和同步状态自监测。

2.1 5G 通道自适应同步策略

1) 当综合通道的差动保护装置具备正常光纤通道时, 5G 通道采用基于数据通道的同步方法, 并利用外部同步时钟对光纤通道和 5G 通道的同步进行实时监测。

5G 通道和光纤通道的发送数据是同源的, 当光纤通道同步正常时, 5G 通道两侧的采样时刻也同步。

规定线路一侧为 M 侧, 另一侧为 N 侧。如图 2 所示, M 侧缓存数个采样时刻的采样数据, N 侧的通道向 M 侧发送包含有 N 侧装置采样时标 t_{nj} 的报文, M 侧的光纤通道在 t_{mi} 时刻接收到该报文。由于两侧的采样时刻已同步, 光纤通道通过基于数据通道的同步方法, 可以找到本侧同步采样点对应的采样时标 t_{mi} , 并计算出两侧采样时标的差值 $\Delta t = t_{mi} - t_{nj}$ 。由于两侧的采样时刻已同步, Δt 值恒定不变。因此, M 侧的 5G 通道在 t_{m2} 时刻接收到 N

侧装置采样时标 t_{nj} 的报文时, 通过在缓存数据中找采样时标 $t = t_{nj} + \Delta t$ 时刻的采样数据 t_{mj} , 即可找到对应的同步点。之后, M 侧使用本侧 t_{mj} 时刻的采样数据和 N 侧 t_{nj} 时刻的采样数据进行 5G 通道差动逻辑计算。反向路径同理。

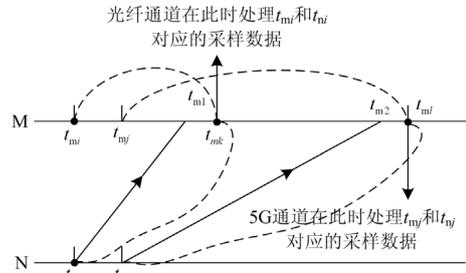


图 2 5G 差动基于数据通道的同步方法

Fig. 2 5G differential synchronization method based on data channel

在两侧采样同步后, 通过对比两侧装置同一采样时刻与外部同步时钟秒脉冲的偏差值是否一致, 监视两侧采样是否同步, 如图 3 所示。

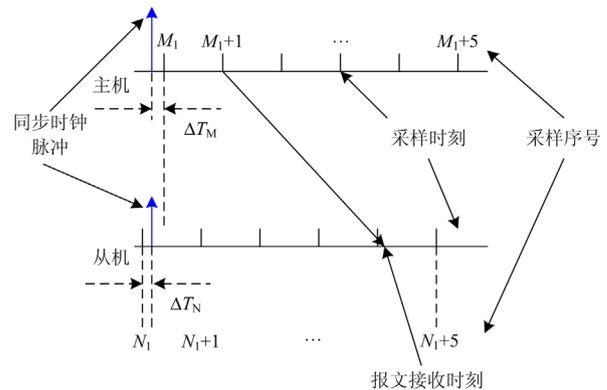


图 3 利用外部同步时钟监测两侧采样同步状态

Fig. 3 Use external synchronization clock to monitor the synchronization status of sample on both sides

图 3 中, 利用光纤通道实现两侧采样同步后, 两侧分别实时计算当前光纤通道采样时刻和外部同步时钟脉冲的差值 ΔT_M 、 ΔT_N 。当 ΔT_M 和 ΔT_N 差异大于 $150 \mu s$, 说明两侧采样不同步。

2) 当综合通道的差动保护装置不具备光纤通道或具备光纤通道但光纤通道异常时, 5G 通道采用基于外部同步时钟的同步方法, 并利用电气量对 5G 通道的同步进行实时监测。

主机和从机均实时调整采样间隔, 保证两侧装置采样时刻与外部同步时钟秒脉冲的偏差在允许的误差范围内。同步过程如图 4 所示。

图 4 中, 5G 通道通过外部同步时钟秒脉冲实现同步后, 对两侧的采样数据进行编号, 外部同步时钟秒脉冲时刻的数据编号为 0, 之后的采样数据编号依次增加, 直到下一个外部同步时钟秒脉冲时刻到来。5G 通道根据收到的带编号的采样数据, 在本侧的数据缓存区内找到对应的同步采样数据, 进行差动计算。

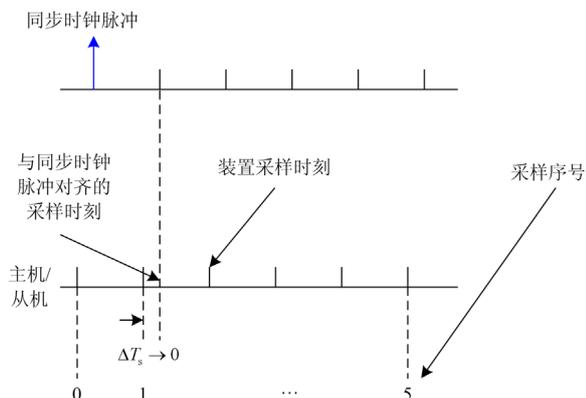


图 4 5G 差动基于外部同步时钟的同步方法

Fig. 4 5G differential synchronization method based on external synchronization clock

在两侧采样同步后, 利用电气量对 5G 通道的同步进行实时监测。电气量监视同步校验方法仅在线路正常运行时投入, 线路上存在故障或有异常时, 自动退出电气量监视逻辑。输电线路正常运行时, 差动保护装置的差动电流应仅为线路上的电容电流。

如图 5 所述的输电线路的 π 形等值模型满足基尔霍夫定律。图中: \dot{U}_M 、 \dot{U}_N 为线路两侧母线电压; \dot{I}_M 、 \dot{I}_N 为线路两侧保护安装处电流; Z 为线路阻抗。

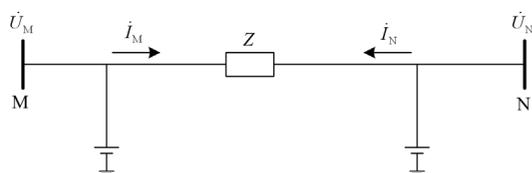


图 5 输电线路 π 形等值模型

Fig. 5 π -shaped equivalent model of transmission line

线路内部无故障且 5G 差动通道同步时, 满足式(6)。

$$\dot{U}_M - \dot{U}_N - \dot{I}_M Z \approx 0 \quad (6)$$

因此 5G 通道同步状态监测判据如下。

判据①: 当差动电流 $|\dot{I}_M - \dot{I}_N|$ 异常偏大时, 可认为 5G 差动通道不同步。

判据②: 当 $|\dot{U}_M - \dot{U}_N - \dot{I}_M Z|$ 值异常偏大时, 可认为 5G 差动通道不同步。

监测判据的门槛根据 CT 传变一致性、线路参数进行设置。

2.2 综合通道的同步逻辑图

基于 5G 和光纤综合通道的线路差动保护方法, 光纤通道仍然采用基于数据通道的同步方法, 不依赖于外部时钟源。在同步优先级上, 传输时延短的光纤通道 > 传输时延长的光纤通道。当传输时延短的光纤通道正常时, 保护装置通过该光纤通道对两侧采样时刻进行严格同步; 当传输时延短的光纤通道不正常, 且另一光纤通道正常时, 保护装置通过另一光纤通道对两侧采样时刻进行同步。

图 6 总结了基于 5G 和光纤多通道的线路差动保护装置的多模式同步策略。

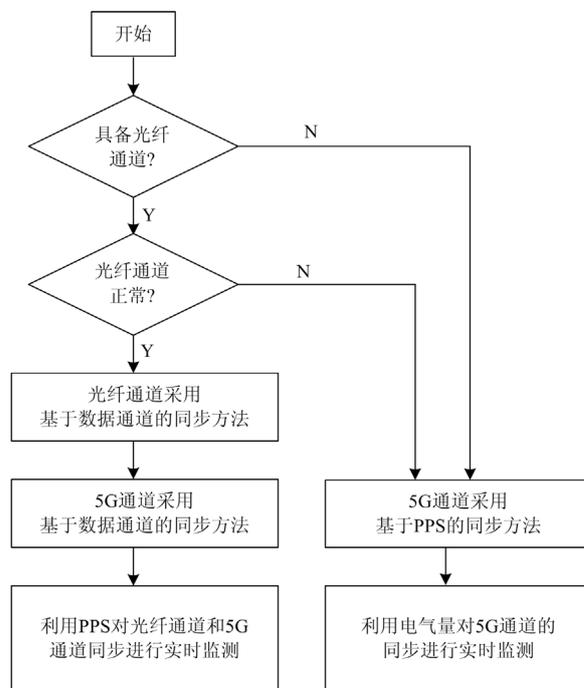


图 6 综合通道的线路差动保护装置同步策略

Fig. 6 Synchronization method of integrated channel line differential protection device

图 6 中, 在光纤通道正常时, 采用基于数据通道的同步方法并利用外部同步时钟对通道的同步进行监测; 避免由于误配路由或通信设备异常导致收发延时不一致, 进而导致差动保护误动的风险。

当未接入光纤通道或光纤通道异常时, 采用基于外部同步时钟的同步方法, 并利用电气量对通道的同步进行监测; 避免由于外部时钟丢失或跳变导致两侧装置时钟不同步, 进而导致差动保护误动的风险。

本策略根据不同的运行工况，实时调整 5G 通道的同步方法，最大程度确保了 5G 通道差动保护的采样同步；同时，采用外部同步时钟、电气量等多模式实时监测采样同步状态，避免了由于采样不同步导致的差动保护误动风险；本策略的应用提高了差动保护的可靠性。

3 综合通道的差动保护数据传输方案

出于成本控制、产业融合和技术演进的考虑，全 IP 化网络是当前通信网络发展的趋势。若能够使用 IP 化网络实现差动保护，则可极大丰富保护通道的选择性。

3.1 5G 通道数据格式

现有光纤通道为提高通道利用率，通常通过高级数据链路控制协议发送数据；而链路层协议数据由于缺少网络层信息，无法直接在 IP 化网络中传输。为使新增 5G 通道能够使用 IP 化网络传输差动保护数据，需要研究新的数据格式。

本文提出了一种基于可路由采样值(Routable Sampled Value, R-SV)^[28-29]机制传输差动数据的方法。传统的 SV 报文在结构上缺少传输层和网络层，导致其缺失相关的路由功能，仅局限在变电站内部传输。R-SV 报文封装了传输层和网络层信息，具备路由功能，可以实现变电站间的信息互联。5G 通道的 R-SV 报文采用如图 7 所示的报文结构。

Ethertype 以太网类型
APPID
Length 长度
Extension Length 扩展长度
CRC of octets 1-8 八阶统计量的CRC
SMV APDU 应用协议数据单元
Extension 扩展

图 7 5G 通道 R-SV 报文结构

Fig. 7 5G channel R-SV message structure

图 7 中，R-SV 报文帧头包括：以太网类型、APPID、帧长度、帧扩展长度和八阶统计量的 CRC，帧尾为提升数据传输安全性的扩展信息，应用协议数据单元为差动保护相关数据。为提高信道利用率，应用协议数据单元不采用标准 SV 报文格式，而是

采用基于数据拼接方式的自定义报文格式。

3.2 5G 通道数据安全

与光纤通道相比，新增的 5G 通道数据可能需要借助公网传输，若不建立合理的安全机制则安全性低于既有光纤通道^[30-31]。为了保证 5G 通道的数据安全，提出了数据安全处理策略。

1) 数据订阅机制。仅当接收数据的 IP 地址、Appid、SVID、ConfRev 版本号、ASDU 数目、通道数、接收端口号信息与订阅一致时，才认为是有效数据。

2) 流量控制机制。当接收的订阅报文流量超流控阈值时，关闭报文接收；当报文流量小于流控返回阈值时，恢复报文接收。

3) 应对网络风暴的措施。当接收到重复的订阅报文时，短时关闭报文接收。

4) 应对网络攻击的措施。设置接收数据白名单，过滤掉所有不在白名单上的报文。

此外，5G 通道通信采用了基于 IEC 62351 消息认证码机制，并应用国密 SM4-SM3 算法替换了推荐的 HMAC-SHA256 与 AES-GMAC 消息认证码算法；应用帧尾的时间扩展信息，基于时间报文发送时间与消息认证码的不可篡改性实现了报文的防重放功能。

3.3 5G 通道数据流量控制

与光纤通道相比，新增的 5G 通道数据可能需要借助公网传输。为了降低通信成本，提出了数据流量控制策略。

1) 当综合通道差动保护装置具备正常光纤通道时，5G 通道每 20 ms 传输一次采样时标及采样时刻与外部同步时钟的偏差，不传输保护用模拟量信息，可节省 99%的数据流量。

2) 当综合通道差动保护装置不具备光纤通道或具备光纤通道但光纤通道异常时：若保护未启动，5G 通道每 20 ms 发送一次带采样序号的模拟量数据，用于监测采样同步状态，可节省 95%的数据流量；若保护启动，5G 通道实时发送完整差动保护数据。

本文采用 R-SV 机制传输 5G 通道数据，可以继承现有站内 SV 的安全机制，保证综合通道的安全性，为差动保护实现提供了数据高安全性保障和处理基础。5G 通道的数据帧结构和数据安全研究，提升了数据传输的可靠性和安全性；数据流量控制提升了数据传输的经济性。

4 仿真分析

4.1 测试系统

基于 RTDS 搭建了 500 kV 输电线路仿真模型。500 kV 线路的具体参数如表 1 所示。

表 1 测试系统线路参数

Table 1 Line parameters of the test system

参数	参数
CT 变比	2 500/1
正序电抗/ Ω	28.01
零序电抗/ Ω	86.05
正序电阻/ Ω	1.96
零序电阻/ Ω	18.28
正序电容/ Ω	235.7
零序电容/ Ω	284
线路长度/km	100

测试系统由 2 台基于 5G 和光纤综合通道的线路差动保护装置、2 个接入北斗对时源的客户前置设备(Customer Premise Equipment, CPE)^[32-33]、1 个通道延时设备构成, 如图 8 所示。

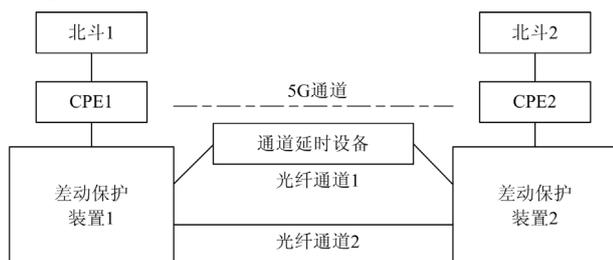


图 8 测试系统
Fig. 8 Test system

综合通道的差动保护装置配置 2 路光纤通道和 1 路 5G 通道。

考虑到 CT 传变特性、线路参数的可靠性以及保护装置的计算精度, 辅助监视 5G 通道同步状况的判据①差动电流 $|\dot{I}_M - \dot{I}_N|$ 的门槛值取 5% 额定电流, 即 0.05 A, 判据② $|\dot{U}_M - \dot{U}_N - \dot{I}_M Z|$ 的门槛值取 12% 额定电压, 即 6.9 V。

4.2 光纤通道+5G 通道

接入正常光纤通道时, 装置基于数据通道进行同步, 5G 通道同步情况良好, 利用电气量对 5G 通道的同步进行监测, 如表 2 所示。

表 2 中, 5G 通道两侧判据①差动电流、判据②电压值均较小, 5G 通道同步正常, 差动保护功能投入。

通过通道延时设备模拟通道收发延时不一致, 装置基于数据通道进行同步后, 通过对比两侧采样

表 2 光纤通道正常时的 5G 通道信息

Table 2 5G channel information when fiber channel is normal

参数	数值
本侧电压/V	58.54 $\angle 0^\circ$
本侧电流/A	0.27 $\angle 2.3^\circ$
对侧同步电压/V	58.13 $\angle -7.8^\circ$
对侧同步电流/A	0.26 $\angle 2.2^\circ$
判据①/A	0.01
判据②/V	4.18

时刻与外部同步时钟偏差值, 监测到两侧同步状态异常, 光纤通道差动保护功能退出。此时, 可投入 5G 通道差动保护功能。

4.3 5G 通道+同步对时源

不接入光纤通道或光纤通道异常时, 5G 通道采用基于外部同步时钟的同步方法。保护装置利用电气量对通道的同步进行监测, 如表 3 所示。

表 3 无光纤通道且北斗对时源正常时的 5G 通道信息

Table 3 5G channel information when the fiber channel is abnormal and the Beidou time source is normal

参数	数值
本侧电压/V	58.59 $\angle 0^\circ$
本侧电流/A	0.27 $\angle 2.3^\circ$
对侧同步电压/V	58.14 $\angle -7.6^\circ$
对侧同步电流/A	0.26 $\angle 2.2^\circ$
判据①/A	0.01
判据②/V	3.98

表 3 中, 5G 通道两侧判据①差动电流仅 0.01 A, 判据②的电压值为 3.98 V, 仅为额定电压的 6.9%, 5G 通道同步正常, 差动保护功能投入。

4.4 5G 通道+非同步对时源

不接入光纤通道或光纤通道异常时, 5G 通道采用基于外部同步时钟的同步方法。由于时钟源不同步, 保护装置基于异步的外部同步时钟进行同步。保护装置利用电气量对通道的同步进行监测, 如表 4 所示。

表 4 无光纤通道且北斗对时源异常时的 5G 通道信息

Table 4 5G channel information when the fiber channel is abnormal and the Beidou time source is abnormal

参数	数值
本侧电压/V	58.57 $\angle 0^\circ$
本侧电流/A	0.27 $\angle 2.3^\circ$
对侧同步电压/V	58.13 $\angle 57.8^\circ$
对侧同步电流/A	0.26 $\angle 68.6^\circ$
判据①/A	0.29
判据②/V	59.69

表 4 中, 5G 通道两侧判据①差动电流 0.29 A, 判据②电压值 59.69 V, 均大于采样同步校验门槛, 5G 通道同步失败, 差动保护功能退出。

4.5 仿真结果分析

1) 接入正常光纤通道时, 装置基于数据通道进行同步, 5G 通道差动保护功能正常;

2) 光纤通道收发延时不一致时, 利用外部同步时钟能够监测到采样同步异常, 并闭锁光纤差动功能;

3) 不接入光纤通道或光纤通道异常时, 5G 通道采用基于外部同步时钟的同步方法, 5G 通道差动保护功能正常;

4) 基于外部同步时钟同步, 但两侧时钟源不同步时, 利用电气量能够监测到采样同步异常, 并闭锁 5G 通道差动功能。

因此, 综合通道线路差动保护方案能适应现场多样的应用场景。

1) 无光纤通道的应用场景: 随着新能源的发展, 可能出现部分处于 SDH 通信网络边缘的源端和荷端线路无光纤通道的应用场景, 此时采用 5G 通道。

2) 单光纤通道的应用场景: 对于通道路由资源紧张, 部分间隔仅具备单光纤通道接入能力的厂站, 为了提高差动保护双通道的覆盖率, 采用光纤通道和 5G 通道组成双通道。

3) 双光纤通道应用场景: 对要求配置双通道、三路由的线路, 当光纤通道资源受限, 无法满足三路由要求时, 使用 5G 通道作为备用通道; 任一光纤通道异常时, 投入 5G 通道, 提高线路保护装置的整体可靠性。

综合通道线路差动保护方案的实现, 有利于双通道三路由的推广应用。

5 结论

本文研究了差动保护数据的可路由处理技术, 实现了差动保护数据的组帧传输, 再从采样同步、同步监测、网络安全等方面研究了对通道要求降低的输电线路差动保护解决方案, 重点研究了基于 5G 通道、光纤通道相结合的多模式综合通道的线路差动保护同步方法。

当综合通道的差动保护装置具备正常光纤通道时, 采用基于数据通道的同步方法, 并利用外部同步时钟对采样同步进行实时监测。当综合通道的差动保护装置光纤通道退出时, 采用基于外部同步时钟的同步方法, 并利用电气量对采样同步进行实时监测。

试验验证表明: 基于 5G 和光纤综合通道的输电线路差动保护方法, 降低了差动保护对通道的要求, 有利于双通道三路由的推广应用, 降低了因光纤通道缺失导致失去主保护的风险; 同时对采样同步进行多模式实时监测, 提高了差动保护的安全性和可靠性。

参考文献

- [1] 翁汉琨, 李昊威, 万毅, 等. 特殊工况下换流变零序差动保护误动机理分析及对策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 56-64.
WENG Hanli, LI Haowei, WAN Yi, et al. Mechanism and countermeasures of mal-operation of converter transformer zero-sequence differential protection under special conditions[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 56-64.
- [2] 朱妍, 陆于平, 黄涛. 计及谐波频率特征的含风电配电网充分式电流幅值差动保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16): 130-136.
ZHU Yan, LU Yuping, HUANG Tao. Sufficient current amplitude differential protection considering frequency characteristic of harmonics for distribution network with wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(16): 130-136.
- [3] 李梅, 唐菊生. 基于综合制动判据的变压器差动保护研究[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 135-141.
LI Mei, TANG Jusheng. Transformer differential protection method based on the comprehensive braking criterion[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 135-141.
- [4] 翁汉琨, 王胜, 林湘宁, 等. 基于波形相似度的抗电流互感器饱和和变压器相位差动保护[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 132-138.
WENG Hanli, WANG Sheng, LIN Xiangning, et al. Waveform similarity based transformer phase differential protection against current transformer saturation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 132-138.
- [5] 李珏, 刘灏, 田建南, 等. 适用于主动配电网 PMU 的数据传输协议与通信性能分析[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 3-10.
LI Jue, LIU Hao, TIAN Jiannan, et al. Communication protocol and performance analysis for the PMU of distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 3-10.
- [6] 李艳, 张安龙, 郑曦. 配电网广域保护信息流建模与通信性能分析[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 53-60.

- LI Yan, ZHANG Anlong, ZHENG Xi. Modeling and communication performance analysis of wide-area protection information flow in distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 53-60.
- [7] 李满礼. 通信延时/误码引起纵联差动保护风险分析[D]. 南京: 南京邮电大学, 2015.
- LI Manli. Risk analysis of differential protection caused by the communication delay and error[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2015.
- [8] 赵本水. 提高纵联保护通道运行可靠性技术的研究与应用[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2018.
- ZHAO Benshui. Research and application of improving reliability of longitudinal protection channels[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2018.
- [9] 梅鲁海. 基于 SDH 光网络的分层区域式保护通信系统的可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 81-85.
- MEI Luhai. Reliability research of layered regional protective communication system based on SDH optical network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 81-85.
- [10] 肖辉, 陈江兴, 刘艳敏, 等. 省际电力通信网风险分析及化解方案研究[J]. 电力信息与通信技术, 2019, 17(1): 105-109.
- XIAO Hui, CHENG Jiangxing, LIU Yanmin, et al. Research on risk analysis and solution of inter-provincial power communication network[J]. Electric Power ICT, 2019, 17(1): 105-109.
- [11] 赵曼勇, 周红阳, 余江, 等. 光纤电流差动保护在应对冰灾期间采用公用通信网通道的改进措施[J]. 南方电网技术, 2008, 2(2): 27-30.
- ZHAO Manyong, ZHOU Hongyang, YU Jiang, et al. Enhancement of optical fiber line differential protection when using public communication network channels during anti-icing[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(2): 27-30.
- [12] 叶杨, 方慧霆, 赵永良, 等. 5G 切片在智能电网中的应用[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(8): 67-72.
- YE Yang, FANG Huiting, ZHAO Yongliang, et al. Application of 5G slice in smart grid[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 48(3): 67-72.
- [13] 陈皓勇, 李志豪, 陈永波, 等. 基于 5G 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 1-8.
- CHEN Haoyong, LI Zhihao, CHEN Yongbo, et al. Ubiquitous power internet of things based on 5G[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 1-8.
- [14] 赵宏大, 王哲, 朱铭霞, 等. 5G 通信技术在泛在电力物联网的应用[J]. 南方电网技术, 2020, 14(8): 9-17.
- ZHAO Hongda, WANG Zhe, ZHU Mingxia, et al. Application of 5G communication technology in ubiquitous power internet of things[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(8): 9-17.
- [15] 夏旭, 袁欣, 梁云, 等. 5G 网络切片技术在智能电网的应用研究[J]. 电子技术应用, 2020, 46(1): 17-21.
- XIA Xu, YUAN Xin, LIANG Yun, et al. Research on 5G network slicing enabling the smart grid[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(1): 17-21.
- [16] 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.
- LÜ 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.
- [17] 王廷凰, 余江, 许健, 等. 基于 5G 无线通信的配电网自适应差动保护技术探讨[J]. 供用电, 2019, 36(9): 18-21, 27.
- WANG Tinghuang, YU Jiang, XU Jian, et al. Discussion on adaptive differential protection technology of distribution network based on 5G wireless communication[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(9): 18-21, 27.
- [18] 胡光宇, 张影, 孔为为, 等. 5G 环境下差动保护在电力系统中的应用[J]. 山东电力技术, 2020, 47(6): 10-17.
- HU Guangyu, ZHANG Ying, KONG Weiwei, et al. Research on application of differential protection in power system under 5G environment[J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(6): 10-17.
- [19] 高维良, 高厚磊, 徐斌, 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): 1-7.
- 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): 1-7.
- [20] 徐晓春, 裘愉涛, 赵萍, 等. 基于多维度相互校验的线路电流差动保护自校正同步策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 135-139.
- XU Xiaochun, QIU Yutao, ZHAO Ping, et al. Multi-dimensional cross-checking based self-correcting synchronization strategy for line current differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 135-139.
- [21] 郑明忠, 彭志强, 卜强生, 等. 基于统一信息模型的时间同步在线监测技术[J]. 电力系统保护与控制, 2020,

- 48(15): 149-155.
ZHENG Mingzhong, PENG Zhiqiang, BU Qiangsheng, et al. Time synchronization online monitoring technology based on a unified information mode[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 149-155.
- [22] 高会生, 汪洋. PTN 业务随机时延对差动保护同步性能的影响分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(7): 165-171.
GAO Huisheng, WANG Yang. Effect of PTN service random delay on synchronization performance of current differential protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7): 165-171.
- [23] 邢志杰, 雷云涛, 田行军, 等. 基于数据通道的双端行波测距时钟同步[J]. 电工技术, 2019(7): 1-3.
XING Zhijie, LEI Yuntao, TIAN Xingjun, et al. Clock synchronization of double terminal traveling wave ranging based on data channel[J]. Electric Engineering, 2019(7): 1-3.
- [24] 李钢, 冯辰虎, 孙集伟, 等. 纵联电流差动保护数据同步技术及通道切换时数据交换的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 141-145, 150.
LI Gang, FENG Chenhu, SUN Jiwei, et al. Research on data synchronization technology and data exchanging while channel switching of current differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 141-145, 150.
- [25] 吴骞. 基于北斗的智能化光纤差动保护装置[J]. 电气技术, 2015(9): 64-67.
WU Qian. Intelligent optical fiber differential protection device based on Beidou[J]. Electrical Engineering, 2015(9): 64-67.
- [26] 卜强生, 宋亮亮, 张道农, 等. 基于 GPS 对时的分散采样差动保护同步测试方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 149-153.
BU Qiangsheng, SONG Liangliang, ZHANG Daonong, et al. Research on the test method of distributed sampling differential protection synchronization based on GPS time[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 149-153.
- [27] 李志坚, 姜利华, 陈丽红, 等. 数字化保护装置时钟同步的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 105-109.
LI Zhijian, JIANG Lihua, CHEN Lihua, et al. Time synchronizing implementation for digital protection devices[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 105-109.
- [28] 刘革明, 李园园, 戴光武, 等. 基于 IEC61850-90-5 的分布式区域纵联保护[J]. 电气自动化, 2017, 39(5): 65-68.
LIU Geming, LI Yuanyuan, DAI Guangwu, et al. Distributed area longitudinal protection based on IEC61850-90-5[J]. Electrical Automation, 2017, 39(5): 65-68.
- [29] 陈玉林, 胡绍谦, 杨贵, 等. IEC/TR 61850-90-5 关键技术概述及工程实施愿景[C] // 中国电机工程学会继电保护专业委员会 2014 年发电侧保护和控制学术研讨会, 2014.
- [30] 张泰, 杨雪, 汪晓帆. 基于 5G 配电网差动保护安全防护策略研究[J]. 四川电力技术, 2020, 43(6): 60-65.
ZHANG Tai, YANG Xue, WANG Xiaofan. Research of security protection strategy for differential protection of 5G-based distribution network[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2020, 43(6): 60-65.
- [31] 李进, 张涛, 薛明军, 等. 基于无线通信技术的线路差动保护关键技术探析[J]. 信息通信, 2020(11): 8-11.
LI Jin, ZHANG Tao, XUE Mingjun, et al. Research on the key technology of line differential protection based on wireless communication technology[J]. Information & Communications, 2020(11): 8-11.
- [32] 陈军俊. 5G CPE 发展现状与展望[J]. 科技传播, 2019, 11(20): 108-109.
- [33] 俞建江, 王浩君. 一种基于 5G 的智慧电厂工业应用解决方案[J]. 电子测试, 2021(8): 124-126.
YU Jianjiang, WANG Haojun. A 5G-based industrial application solution for smart power plants[J]. Electronic Test, 2021(8): 124-126.

收稿日期: 2021-02-27; 修回日期: 2021-08-18

作者简介:

娄 为(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化(继电保护、新能源、城市配电网); E-mail: lou_w@ec.sgcc.com.cn

韩学军(1964—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: han_xj@ec.sgcc.com.cn

韩 俊(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 383359412@qq.com

(编辑 葛艳娜)