

复用通道误码和延时对线路纵差保护的影响

金华锋¹, 叶红兵², 凌 昉³, 朱晓彤¹, 郑玉平¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏省南京市 211100; 2. 台州供电公司, 浙江省临海市 317000)

(3. 杭州供电公司, 浙江省杭州市 310000)

摘要: 指出了通道误码是一个同通道长度相关的指标, 分析了误码对线路纵差保护的影响, 介绍了实际运行中必须解决的引起非随机误码的一些原因, 并分析了通道双向延时不对称度对线路纵差保护正常运行的影响, 指出用于线路纵差保护的复用通道双向路由必须一致。

关键词: 线路纵差保护; 复用通道; 误码; 延时

中图分类号: TM773

0 引言

由于线路纵差保护原理简单、动作速度快、灵敏度高、具有天然的选相功能、不受系统振荡影响等优点, 随着电力系统通信网络的发展, 线路纵差保护已经成为高压线路主保护的首选。

对于点对点通信方式, 由于收、发两根纤芯往往在同一光纤内, 并且在整个传输通道中没有光电转换环节, 因此具有通道传输延时小、抗干扰能力强、运行维护工作量小等优点。早期的线路纵差保护通常采用专用光纤作为信息传输通道, 运行过程中也确实很少碰到与通道有关的问题。

长度超过 100 km 的线路, 或者线路两端变电站之间没有光纤直联、经迂回后通道长度超过 100 km 的情况, 由于受发光功率的限制, 只能采用复用通道作为传输信道。随着线路纵差保护的大范围推广, 从节省通信资源的角度出发, 也要求采用复用通道作为传输信道。另一方面, 电力光缆一般架设在高压输电线路的铁塔上, 线路倒杆或盗窃行为导致光缆发生中断等现象时有发生, 高压线路两套主保护的传输信道都采用专用光纤也不利于提高保护运行的可靠性。采用复用通道, 当业务通道光纤中断时, 能够利用通信网络的自愈功能, 在极短的时间内使业务从失效故障中恢复, 提高保护运行的可靠性。基于上述几点原因, 越来越多的线路纵差保护开始采用复用通道作为信息传输通道。

一个庞大的传输网, 除了光缆线路系统或微波接力系统等传输设备外, 终结、交叉连接、复用和交换等功能都是通过网络节点设备来实现的^[1]。传输设备和网络节点之间的接口称为网络节点接口

(NND), 它能结合不同的传输设备和网络节点, 对网络的演变和发展具有很强的适应性和灵活性, 是通信网络的基础设备。NNI 通过大规模集成电路实现所需功能, 难免受一些具有突发性质的脉冲例如外部电磁干扰、静电放电、系统倒换、电源瞬态干扰等的影响, 误码出现往往呈突发性质, 且带有极大的随机性。实际系统由于受配线架接触不良、信号线接线不合理、通信系统电源抗干扰能力不够等影响, 对于突发性质的输电线路故障, 可能伴随通信系统的突发性误码, 影响线路纵差保护动作速度, 甚至拒动。误码对线路纵差保护有什么影响, 或者说线路纵差保护对通道误码有什么要求, 是广大设计、运行人员关心的问题, 本文对此进行详细分析。

由于光纤传输网往往采用网状结构, 两个节点之间不同方向的通信路由并不能完全保证一致。对于基于数据通道同步方法^[2]的线路纵差保护, 通信路由不同会导致双向延时的不一致, 进而影响两侧装置采样的同步性, 严重影响保护装置甚至整个电力系统的安全运行。因为保护装置没有办法监视通道双向延时的一致性, 与通道误码不同, 这个影响往往是隐性的, 也被广大设计和运行人员所忽略, 本文将对此问题进行探讨。

1 误码对线路纵差保护的影响

线路纵差保护的基本原理是利用同一时刻的各侧电流进行差动判别, 本侧装置能够通过通道可靠地得到对侧电流是差动计算的前提。因此, 通道的可用度及质量问题是影响线路纵差保护装置使用的重要因素。

表征通道质量的一个重要指标是误码(BE), 即经过接收判决再生后, 数字流的某些比特发生了差错, 使传输信息的质量发生损伤^[1]。传统上常用长

期平均误比特率(BER, 又称误码率)来衡量信息传输质量,即以某一特定观测时间内错误比特数与传输比特总数之比作为 BER。这一定义在理论上表示误码过程是稳态过程。

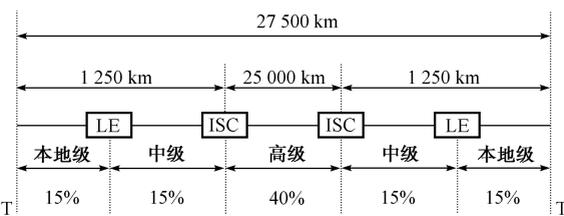
考虑到实际系统误码的突发性,因而用长期平均误码率^[3]来度量通信系统的性能是不合适的,为此,ITU-T 制定的 G. 821 给出了具有短期特性的两个误码性能指标^[4]:

- 1) 误码秒(ES):表示至少有 1 个误码的秒;
- 2) 严重误码秒(SES):表示 $BER \geq 10^{-3}$ 的秒。

ITU-T 建议 G. 821 对于 64 kbit/s 全程 27 500 km 端到端连接的性能要求为 ES 占可用时间的比例小于 8%; SES 占可用时间的比例小于 0.2%。

上述性能要求都在可用时间内计算,即需扣除不可用时间。不可用时间从连续 10 s 都是 SES 开始(包括这 10 s 时间);当连续 10 s 都未检测到 SES,不可用时间结束(不包含这 10 s);除了不可用时间以外的即为可用时间。总的测量时间为 1 个月,其中 SES 指标中的一半分配给微波接力和卫星系统,光纤部分的可分配指标只有 0.1%。

如图 1 所示,G. 821 把 27 500 km 分成 3 个部分,即高级部分、中级部分和本地级部分。对于光缆通信系统,由于其固有的高传输质量,无论应用在网络的长度部分还是市内区间中继部分,其误码性能指标均可按高级部分对待,相当于每 km 分得总指标的 0.001 6%。



T 用户网络接口参考点; LE 本地交换局(端局); ISC 国际交换中心

图 1 64 kbit/s 连接全程指标的分配

Fig. 1 Bit error distribution of 64 kbit/s connection

G. 821 对于光纤通信系统 64 kbit/s 数字连接每 km 的 ES 误码性能要求为占可用时间的比例小于 6.4×10^{-7} , 对应每 km 的 BER 为小于 1.0×10^{-11} ; SES 的误码性能要求为占可用时间的比例小于 1.6×10^{-8} 。

电力系统光纤通信网传输继电保护信息只占业务的一小部分,并且光纤通信网往往先于利用光纤通信的保护装置而存在,因此,要求现存的光纤通信网适应继电保护装置是不现实的。同样,从保护装置的角度出发,对通信网误码指标也不需要提出具

体要求,原则是能收到对侧装置完整的信息时,线路纵差保护能正常运行;一旦收不到对侧完整的信息,包括误码,线路纵差保护就只能短暂退出,直到通道恢复正常。

从运行的角度,可以计算由通道质量问题引起的保护日闭锁时间,来考察通道传输继电保护信号的可靠性。

目前,保护装置常采用同步通信方式,按固定间隔 T_s , 通常 $T_s = 1.667 \text{ ms}, 3.33 \text{ ms}, 5.00 \text{ ms}$; 设每帧报文的长度(有效时间)为 T_f , 每一误帧引起的保护闭锁时间为 T_b , 光纤通道长度为 L , 可以得到在 G. 821 规定的通道性能要求下,线路纵差保护日闭锁时间 t_b 为:

$$t_b = \frac{5.53 \times 10^9 P_{e,\text{km}} L T_b T_f}{T_s} < \frac{5.53 \times 10^{-2} L T_b T_f}{T_s} \quad (1)$$

式中: $P_{e,\text{km}}$ 为每 km 的 BER。

假设 $L = 1\,000 \text{ km}, T_b = T_f = T_s = 5.00 \text{ ms}$, 有 $t_b < 276 \text{ ms}$, 即只要光纤通道满足 G. 821 的误码性能要求,保护装置即使采用长度为 1 000 km 的光纤通信网络,线路纵差保护日闭锁时间也不会超过 276 ms。

大量采用复用通道方式的线路纵差保护的运行情况表明,国内绝大部分电力通信网的误码性能符合 G. 821 标准。

对于 G. 821 定义的误码性能, BER 要靠离线测量得到,但实际系统特别是在装置运行过程中, BER 是不可能通过在线监视得到的。与 G. 826/G. 828 定义的性能参数一样,保护装置可以通过以“帧”为基础的一组参数,用于不停业务监视。当一帧内的任意比特发生差错,就称该帧为差错帧或误帧,检测误帧的最常用方法是 CRC 校验。对应地,可以定义 2 个性能指标如下:

- 1) 误帧秒(EFS):表示至少有 1 个误帧的秒;
- 2) 严重误帧秒(SEFS):当 1 s 内包含不少于 30% 的误帧时认为该秒是 SEFS。

上述指标在可用时间内统计,对保护本身的运行并没有实际意义,但可以作为通道在线监视的一种手段,考察继电保护运行的可靠性。

可以从以下 2 个方面来提高线路纵差保护装置动作的可靠性:

- 1) 提高通信系统的可靠性,包括信号线、配线架连接的可靠性、通信电源的抗干扰能力等;
- 2) 缩短保护装置在通道误码时保护的退出时间。

不管采取何种措施,在通道误码瞬间,保护装置

由于收不到对侧数据,线路纵差保护总是要退出的。因此,对于采用复用通道的线路纵差保护,不要期望能够 100% 正确动作。

2 通道延时对线路纵差保护的影响

目前,实用的线路纵差保护采用的同步方法有采样时刻调整法、采样数据修正法和时钟校正法,统称为基于数据通道的同步方法,特点是都要求通道双向延时相等。典型的采样时刻调整法^[5]分两步:先测通道延时再根据通道延时,由从机测定两侧装置采样时刻的误差,从而调整从机的采样脉冲来实现采样同步。如图 2 所示,设一侧装置为主机,另一侧为从机。

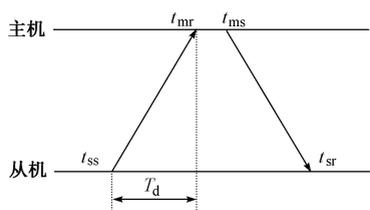


图 2 通道延时的测量

Fig. 2 Measure of the channel delay time

从机上电后,向主机发送一帧测定通道延时的报文,同时以本侧装置的相对时钟为基准记录报文发送时刻 t_{ss} ; 主机收到该报文后,以本侧装置的相对时钟为基准,记录该报文接收时刻 t_{mr} ,等到下一个定时发送时刻 t_{ms} ,向从机回应一帧通道延时测试报文,同时将 $t_{ms} - t_{mr}$ 作为报文内容; 从机在 t_{sr} 时刻收到主机的通道延时测试报文,并得到 $t_{ms} - t_{mr}$ 。由此可以计算得到通道延时 T_d :

$$T_d = \frac{(t_{sr} - t_{ss}) - (t_{ms} - t_{mr})}{2} \quad (2)$$

式(2)对于得到通道延时的前提条件是:通道收、发双向延时相等。

如图 3 所示,测定通道延时后,假设在一段时间内通道延时 T_d 是固定不变的。

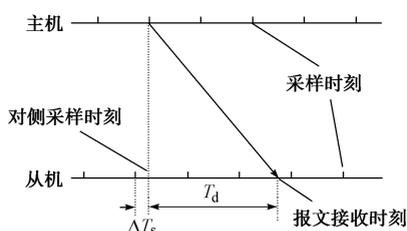


图 3 采样同步

Fig. 3 Synchronous sampling

主机以装置内部时钟为基准,按固定间隔 T_{sm} 进行采样,同时向从机发送电流报文。从机收到主

机发送的电流报文,根据通道延时可以得到主机在什么时刻采样,同时根据本侧电流采样时刻,得到两侧装置采样时刻的误差 ΔT_s 。如图 3 所示,此时从机采样时刻超前于主机采样时刻 ΔT_s ,从机调整下一个采样间隔 $T_{ss} > T_{sm}$,使得 $\Delta T_s \rightarrow 0$ 。当 $\Delta T_s < \xi$ 时,可以认为两侧装置实现了同步采样。

双向通道延时不相等,设从机向主机发送方向通道延时为 T_{d1} ,主机向从机发送方向通道延时为 T_{d2} ,根据式(2)测定的通道延时为:

$$T_d = \frac{T_{d1} + T_{d2}}{2} \quad (3)$$

两个方向实际通道延时和测定的通道延时的误差为:

$$\Delta T_d = \left| \frac{T_{d1} - T_{d2}}{2} \right| \quad (4)$$

对应图 3 的两侧装置采样时刻的误差 $\Delta T_s = \Delta T_d$ 。正常运行或区外故障时,若不考虑电容电流,由于两侧通道延时不一致而得到的差动电流 I_{cd} 为:

$$I_{cd} = 2I_L \sin \frac{\Delta T_d \omega}{2} \quad (5)$$

式中: I_L 为线路负荷电流。

若制动电流为 $I_{zd} = 2I_L k$,其中 k 为制动系数,如果满足:

$$\Delta T_d > \frac{2}{\omega} \arcsin k \quad (6)$$

则两侧装置启动后,线路纵差保护就可能误动。

通道双向延时不一致,即使没有达到引起线路纵差保护误动的程度,但可以反映为差流异常。保护装置可利用这一特点作为通道延时监视手段。

正常情况下,对于短线,保护装置显示的差流应该接近于 0,长线应该等于线路(或经补偿以后)的电容电流,基本上不受负荷电流的影响。一旦发现装置显示的差流不等于电容电流,或者是差流随着负荷电流的变化而变化,最有可能的原因是通道双向延时不一致。

线路纵差保护装置投运时,不管线路两侧系统是否合环,只要线路带电,线路纵差保护显示的差流就应该是线路的电容电流。当线路单侧空充时,另一侧电流必然为 0,此时合闸侧电流就是线路电容电流。因此,可以观察线路合环后保护装置显示的差流是否等于线路单侧空充时的充电电流,来间接判断通道双向延时是否一致。有条件增加线路负荷后,观察差流的变化规律,更能判断通道双向延时的一致性。

另一方面,装置投运时即使通道双向延时一致,但运行过程中通道运行工况也可能发生变化,对此,线路纵差保护装置可以利用线路电容电流的相对稳

定性来判别变化后的通道双向延时是否一致,当实测差流变化较大时,装置报警(可考虑同时闭锁线路纵差保护)以便做相应处理。

某 500 kV 线路,长度为 287 km,电容电流经高抗完全补偿,线路纵差保护装置实测差流应为 0。装置所在的自愈环全长 1 327 km,共 17 个节点。其中装置采用的主用通道全长 407 km,中间经 7 个节点。理论估算,主用通道延时约 2.7 ms,备用通道延时约 5.5 ms。正常运行时,保护装置显示通道延时为 2.7 ms,差流为 0.01 A,与理论估算值相符。2004 年 12 月 10 日,线路纵差保护装置报警,装置显示通道延时约 4.0 ms,线路负荷为 0.33 A,电容电流(差流)约 0.14 A。虽然 4.0 ms 既不是主用通道延时,也不是备用通道延时,但正好约为两者的平均值,并且显示的差流,双向通道延时和负荷电流之间的关系也正好满足式(5),因此怀疑线路纵差保护实际使用的通道双向路由可能不一致,一个方向在主用通道,另一个方向在备用通道。并且,在此过程中,多次上电试验,通道延时始终显示 4.0 ms,确认 4.0 ms 的延时不是通道切换过程中的一个瞬时状态。

需要强调的是,目前实用的线路纵差保护均采用基于数据通道的同步方法。上述分析说明了一个问题:线路纵差保护如果采用基于数据通道的同步方法,通道延时的双向一致性是保证两侧保护装置采样同步的前提。

通道双向延时的一致性和通道的 BER 是保证线路纵差保护安全、可靠运行的基础。通道延时的长短主要由通道的长度决定,对保护的主要影响体现在通过影响通道 BER 来间接影响保护的日闭锁时间。

3 线路纵差保护运行维护注意事项

如上所述,线路纵差保护运行过程中,与通道相关的问题主要体现在两个方面:一是误码或通道中断造成线路纵差保护退出;二是通道双向延时不一致造成两侧装置采样不同步,影响线路纵差保护的安全运行。

现有的保护装置往往可以提供“通道告警”、“失步次数”、“误码总数”(见:南京南瑞继保电气有限公司 RCS-931 系列超高压线路成套保护装置技术说明书,2004)等信号或状态统计来反映通道运行状况。通常由通道问题引起线路纵差保护连续退出一段时间(各厂家设定的时间可能不同,几十毫秒到几秒不等)来触发“通道告警”。对于如随机性误码等无法完全杜绝的通道短暂问题,装置不一定触发告警信号来通知运行人员。运行经验表明,特定情况

下,例如光纤与保护装置或光电转换装置连接时磁琅盘没有卡紧、光电转换装置与配线架之间的通信线连接松动或中间有转接环节、通信设备(包括光电转换装置)的 48 V 电源正极没有可靠接地、线路刀闸操作或变电站附近一次系统故障等,均容易干扰通信系统的正常运行,产生误码,导致线路纵差保护短暂退出。可以通过观察通道状态统计是否符合 G. 821 规定来间接判断是否存在上述安全隐患。排除上述隐患后,如果通道误码仍然不能满足 G. 821,则需请通信设备厂家协助解决。

目前实用的基于数据通道的线路纵差保护装置都无法监视通道双向延时的一致性,在线路有一定负荷时,可以通过判断装置实测差流是否正常来间接判断;线路轻负荷时发生故障则有可能导致线路纵差保护动作行为不正确。因此,在设计时要考虑通道延时特性,采用基于数据通道的线路纵差保护时,一定要保证通道双向延时的一致性。

参考文献

- [1] 韦乐平. 光同步数字传送网. 北京:人民邮电出版社,1998.
WEI Le-ping. Optical Synchronous Digital Transport Network. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House, 1998.
- [2] 高厚磊,江世芳,贺家李. 数字电流差动保护中几种采样同步方法. 电力系统自动化,1996,20(9):46-49,53.
GAO Hou-lei, JIANG Shi-fang, HE Jia-li. Sampling Synchronization Methods in Digital Current Differential Protection. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(9): 46-49,53.
- [3] 孙玉. 数字网传输损伤讲座,第 2 讲:误码. 电信工程技术与标准化,2004,(2):56-58;2004,(3):55-58.
SUN Yu. Series of Lectures; Transmission Impairments of the Digital Network, Part 2: Error. Telecom Engineering Techniques and Standardization, 2004, (2): 56-58; 2004, (3): 55-58.
- [4] ITU-T Rec G. 821. Error Performance of an International Digital Connection Forming Part of an ISDN. 1992.
- [5] 许建德,陆以群. 新型数字电流差动保护装置中的数据采样同步和通信方式. 电力系统自动化,1993,17(4):23-26.
XU Jian-de, LU Yi-qun. A New Scheme of Sampling Synchronization & Communication for Digital Current Differential Relay. Automation of Electric Power Systems, 1993, 17(4): 23-26.

金华锋(1972—),男,博士,高级工程师,目前从事电力系统继电保护、安全自动装置和通信的研究。E-mail: jinhf@nari-relays.com

叶红兵(1972—),男,工程师,目前从事继电保护生产管理工作。

凌昉(1971—),女,工程师,目前从事继电保护生产管理工作。

(下转第 84 页 continued on page 84)

自适应短数据窗抗电流互感器饱和和线路差动保护算法

丁 琰^{1,2}, 郑玉平², 唐国庆¹, 吴通华²

(1. 东南大学电气工程系, 江苏省南京市 210096)

(2. 国电自动化研究院/南瑞集团公司, 江苏省南京市 210003)

摘要: 深入分析了超高压线路差动保护中电流互感器(TA)饱和时的 2 个重要特征:一是区外故障时 TA 的工作磁链需要一定的时间累积才能达到饱和点,故障发生初始时刻并不会马上饱和;二是 TA 在每个周期内由于工频交流分量的负向去磁作用,TA 总是一段时间内工作在线性区,一段时间内工作在饱和区。在此基础上,提出了综合利用附加制动区判别法和短数据窗自适应差动保护算法,利用附加制动区来判别区内、区外故障,当区外故障时一旦工作点进入附加制动区,则自适应增大出口判别次数,利用短数据窗差动保护算法本身的线性区范围性能保证保护可靠不误动;当区内故障时,出口判别次数自适应减少,保证差动保护快速动作。动模数据验证结果表明所提出的方法是可行、有效的。

关键词: 线路差动保护; 电流互感器饱和; 附加制动区; 短数据窗算法

中图分类号: TM773

0 引言

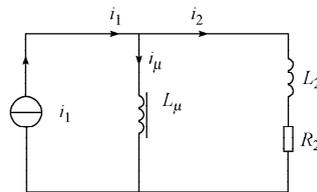
电流差动保护原理简单可靠、灵敏度高、动作速度快,并具有天然的选相功能,已广泛作为电力系统线路、发电机、变压器、母线及电动机等电气主设备的主保护之一。随着光纤通信技术的发展,通道容量问题得到解决,电流差动保护已成为高压、超高压输电线路首选的主保护原理之一。目前线路电流差动保护原理判据相对已很成熟,影响线路电流差动保护装置的可靠性和灵敏度的因素主要包括负荷电流、线路分布电容电流、电流互感器(TA)饱和等。TA 饱和问题在主设备保护中比较突出^[1~5],受到了广泛的关注,国内外已经提出了很多方法,主要包括异步法^[1,6]、附加制动区法^[7]、谐波制动法、磁制动原理、小波分析方法等。在过去电网结构比较简单、用电负荷不大的情况下,输电线路一般较长,短路电流容量较小,不易引起 TA 饱和或严重饱和,所以影响不大,因而对这方面的研究不多。随着大量新建电厂和变电站投入运行,电网规模急剧膨胀,电压等级不断升高,使得电网节点增多,系统的短路电流容量变大,短路时间常数变大,很容易引起 TA 饱和^[8],因此很有必要对超高压输电线路差动保护 TA 饱和的一些特殊问题进行深入研究。本文深入分析了 TA 饱和时两个重要特性,提出了综合利用附加制动区判别法和短数据窗差动保护算法的抗

TA 饱和策略,同时分析出附加制动区法和异步法判据其实是等效的。实际动模数据分析结果表明所提出的方法可行、有效。

1 TA 饱和分析

1.1 TA 等值电路

TA 等效电路模型如图 1 所示^[5,9,10],一次侧可以等效看成是一个电流源。为了简化分析,将一次绕组折算到二次侧,忽略铁心损耗,因此励磁支路为纯电感回路,用 L_{μ} 表示,一次绕组的漏感和电阻对一次电流来说可以忽略不计,将二次绕组的电阻和漏感同二次负载等效电阻和电感归并到一起,用 L_2, R_2 表示。



i_1 为归算到 TA 二次侧的一次电流; i_2 为 TA 二次电流; i_{μ} 为归算到 TA 二次侧的励磁电流; L_{μ} 为归算到 TA 二次侧的励磁电感; L_2 为二次回路电感(包括二次线圈漏电感和负载电感); R_2 为二次回路电阻(包括二次线圈及引线电阻和负载电阻)

图 1 TA 等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of current transformer

TA 的二次电流为: $i_2 = i_1 - i_{\mu}$, TA 的工频稳态传变误差就是励磁电流 \dot{I}_{μ} , 令 $Z_2 = R_2 + j\omega L_2$ 为二次侧等效阻抗。根据图 1 可得:

