

适用于光纤自愈环网的线路差动保护综合同步方法

彭和平¹, 孙奇明², 严明皓¹

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏省南京市 210061; 2. 西宁供电公司, 青海省西宁市 810003)

摘要: 针对光纤自愈环网的特点, 提出一种线路差动保护的综合同步方案。该方案以乒乓对时法为主判据, 参考相量法为辅助判据, 通过辅助判据判别自愈环网状态, 并据此进行自适应的数据同步。当采用参考相量法同步时, 增设了距离闭锁逻辑, 以提高保护的可靠性。实时数字仿真(RTDS)试验结果表明, 该方案可操作性强, 性能可靠。

关键词: 光纤自愈环网; 差动保护; 数据同步

0 引言

线路差动保护以其原理简单可靠、全线速动、抗振荡能力强等优点在线路保护领域得到了广泛应用^[1]; 线路两侧保护装置通过远距离交互信息, 实现差动运算; 采样数据的同步是线路差动保护需要着重解决的问题。光纤通信以其抗干扰能力强、通信容量大、传输中继距离远等优点在线路差动保护中也得到了广泛应用^[2]。随着光纤通信技术的发展, 为了提高通信的可靠性, 光纤自愈环网在电力系统中得到了越来越多的应用。在自愈环网中, 无法确保线路两侧光纤通信传输延时相等, 因此, 假设通道两侧传输延时的精确对时法在自愈环网中遇到了应用瓶颈。

本文综合分析了现有光纤同步方法的特征, 阐述了在光纤自愈环网中数据传输的特点及其对现有同步方式的影响。在此基础上提出了一种综合同步方案, 为线路差动保护在光纤自愈环网中的应用提供了一个可靠的工程方案。

1 光纤差动保护中现行同步方案概述

现行光纤差动同步方案主要分为乒乓对时、参考相量、同步时钟源 3 类^[3-4]。其中, 乒乓对时类实用的做法包括: 采样时刻调整法、时钟同步法、采样数据调整法。

乒乓对时类的 3 种方法基本原理相同, 均假设线路两侧信息的传输延时 t_d 相等, 传输过程见图 1。图中, t_m 为对侧数据接收时刻与下一个发送时间点的时间间隔。

采样时刻调整法和时钟同步法通过设定“主端”和“从端”, 令“从端”采样时刻自动跟随“主端”。首

先计算出信息传输的延时, 并进一步求出“从端”采样时刻需要调整的大小。时钟同步法利用内部晶振设置一个虚拟时钟, 两侧均在相同的时间进行采样; 通过带时标的通信报文计算出“从端”时钟与“主端”时钟的差异, 通过调整这个差异调整采样时刻。差动计算时这 2 种方法接收到的数据无需进行移相处理, 能够直接在本地的缓冲区找到对应的数据, 暂态特性较好。

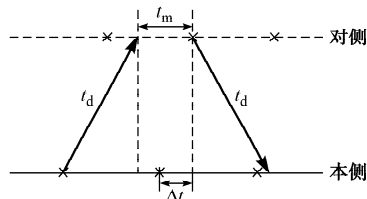


图 1 “乒乓对时”示意图

Fig. 1 Schematic diagram of “ping-pong method”

采样数据调整法在计算出传输延时后, 把接收到的数据或本侧数据做一个微小的移相(小于采样间隔对应的工频相位)来完成同步。常用的移相方法包括采样值插值法^[5-7]、采样值移相法和相量移相法。采样数据调整法通信过程简单, 无需专门的同步命令帧, 在通信信息中加入“响应延时”时间即可实时计算出移相角度。当通道延时变化时采样数据调整法可及时修改移相角度, 保证差动计算的精度。保护装置无需调整采样时刻, 因而不用担心采样间隔的变化对后备保护的影响。

参考相量类同步方案^[8-9]利用线路参数, 通过本侧电量计算出对侧电量的相位; 然后把接收到的对侧电量与之相比较, 根据这 2 个量相位的差别, 调整接收到的电流数据相位, 从而达到采样数据同步的效果。该方法不受光纤通道的影响, 且无需借助其他同步设备, 线路物理模型准确时计算误差很小。

同步时钟源类同步方案利用高精度时钟源, 在

线路两端均给每帧信息置本帧数据采样时刻的绝对时标,并控制两侧采样时刻在同一绝对时间。保护装置根据两侧时标的差异完成数据同步。该方式不受通道传输延时影响,同步算法简单可靠。当前,全球定位系统(GPS)授时时钟源价格低廉,且在广域范围内时钟精度偏差小于 $2\ \mu\text{s}$,对于线路差动保护而言精度已经远超期望。随着中国卫星事业的发展,在广域范围内使用国内授时时钟源作为光纤差动同步也将成为可能。

2 光纤自愈环网中的路由变化及其对数据同步的影响

光纤自愈环网是指当通信异常时能自动寻找新的通信链路的网络^[10]。光纤自愈环网能够自动、快速地修复通信网络故障,保障通信的可靠性,在电力系统中得到了越来越多的应用。以同步数字体系(SDH)光纤自愈环网为例^[10],根据自愈环网结构的特征,在正常或异常情况下均有可能使得数据来往的路由不同。因此,线路两侧数据传输延时相等的假设就不能得到保证。乒乓对时类同步方案将因两侧传输延时的不等,引发一个固有同步误差。这个误差将会降低差动保护的动作特性,甚至会导致区外故障时差动保护误动。以两侧传输延时相差 $1\ \text{ms}$ 为例,乒乓对时类同步方案的固有同步误差为 $\Delta t = 0.5\ \text{ms}$,同步角度误差 θ 为:

$$\theta = \frac{\Delta t}{20} \times 360^\circ = 9^\circ \quad (1)$$

乒乓对时类同步方案无法确定 Δt 的大小,因而不能修正 θ 的影响,在自愈环网中无法单独使用。

3 在光纤自愈环网中的综合同步方案

从第2节分析可知,在自愈环网中,传输延时的不确定性使得乒乓对时类同步方案的应用受到了限制。GPS同步方案不受光纤通道影响,能够很好地解决自愈环网数据同步问题;但由于信号源的受控性,该方案未能得到很好的应用。参考相量类同步方案也具有不受光纤路由变化影响的优势,可以解决自愈环网中的数据同步问题。但该方案需要精确的线路模型,而线路参数受地理环境和天气等因素影响,计算模型不易准确吻合线路实际情况,因而计算精度难以保证,仅以参考相量的计算结果作为移相依据存在一定风险。

在自愈环网中单一的同步方案很难满足实际需要,把乒乓对时类和参考相量类同步方案有机结合,并利用纵联保护的思路可以可靠解决光纤差动同步问题。

首先利用乒乓对时类与参考相量类同步方案计算出的结果互为校验。当乒乓对时类与参考相量类计算结果的差值小于某一个值时,说明乒乓对时类同步方案的计算结果可以采信;而当这个差值大于某一值时,说明乒乓对时类同步方案有一定的误差,计算结果不予采信。分析后发现,当两侧传输延时不等时,如果不能保证参考相量类同步方案的计算精度,则无法确切分析两者相互校验的可靠性。假设已知参考相量的计算误差不大于 δ ,程序通过比较2种方案的计算结果偏差是否小于 δ 来判断计算结果的可靠性。首先,只有当乒乓对时类同步方案固有同步误差大于 2δ 时,才能可靠闭锁差动;其次,当固有误差小于 δ 时也可能误闭锁。当该假设不成立(参考相量的计算误差大于 δ)时,这个问题将更加严重。但2种方案的互锁配合对于提高差动保护的可靠性能起到一定的作用。

为消除乒乓对时类与参考相量类同步方案之间相互配合的不利影响,同时又要利用它们各自的优势,尤其是要保留参考相量类同步方案可以独立于通道的优点,只能尽可能减小两者间的耦合。如图2所示,假设 M 侧采样结束后即把数据发送到 N 侧, N 侧接收到数据后即利用本侧该时刻电量采用一定的计算模型计算出接收到的数据需要补偿的角度,并把计算结果和该时刻采样数据传输到 M 侧, M 侧接收到 N 侧数据后进行与 N 侧相同的操作。该假设过程与实际通信过程有所不同,但这种不同很容易通过程序作出准确补偿。

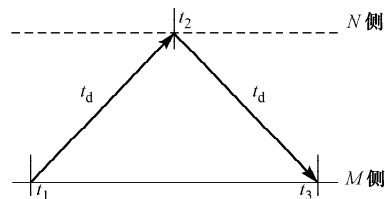


图2 虚拟通信过程
Fig. 2 Dummy communication process

从以上假设可以看出,程序计算出的补偿角度来自于数据传输延时和参考相量计算的误差。由于计算模型和数据均相同,两侧计算的误差相同。假设参考相量计算的误差为 δ (由下文公式可知,两侧计算误差一侧为正误差、一侧为负误差),当传输延时相等时,对侧传来的补偿角度与本侧计算出的补偿角度的偏差等于 2δ 。传输延时不等时,两侧补偿角度的偏差为 $2\delta + \theta$,其中 θ 为两侧传输延时不同引起的等效角度误差。根据参考相量最大计算误差范围设定阈值来判断两侧传输的延时是否相等是安全、可靠的。即使参考相量的实际计算误差大于设

定阈值,也不会误开放差动保护。当两侧计算值偏差大于阈值时,差动保护利用参考相量的计算结果来同步。为消除参考相量的计算误差带来的拒动危险,需要降低差动曲线斜率(自愈环网最大延时误差不宜大于 1 ms^[8],考虑延时误差为 1.5 ms 时,斜率降低到 75%可以可靠保证动作),由此带来的误动危险可通过纵联保护来避免。

综上所述,综合同步方案以乒乓对时类同步方案为主判据,参考相量类同步方案为辅助判据。用参考相量类同步方案独立判别两侧传输延时是否相等;若延时相等则采用乒乓对时类同步方案的计算结果;若延时不等,就采用参考相量类同步方案来同步,同时修改差动曲线动作斜率,增加纵联环节。该方案具有以下优点:

1)能为自愈环网提供可靠的保护方案。该方案不依赖于参考相量的计算精度,即使参考相量的计算精度低于预期也能可靠保护线路。

2)保护精度高。在自愈环网中,光纤路由不会频繁变化。两侧传输延时相等时,乒乓对时类同步方案十分精确。当传输延时不等时,差动动作曲线有所变化,但保护性能仍能得到保证。纵联与差动保护配合,无需担心功率倒向、振荡闭锁失效带来的误动危险。同时,当检测到传输延时不等时,可以通过告警的方式通知运行人员检查光纤通道,及时恢复最佳路由状态。

3)方法简洁、工作量小。在主后备保护一体的线路差动保护中,距离Ⅱ段和零序功率元件动作情况已知,无需为了纵联距离增加振荡闭锁、选相、距离元件。

4)两侧传输延时不等时虽借助了纵联保护的原理,但由于通道介质和原理的不同,仍与一般高频纵联保护有着本质的区别,因此能够满足高压线路保护双重化配置的要求。

5)保护两侧程序相同,无需专门的同步报文。当通信中断后又恢复时,保护装置能快速恢复保护。

4 综合同步方案的具体实现

4.1 乒乓对时类同步方案

为适应在数字化变电站中的应用,乒乓对时类同步方案使用采样数据调整法,无需调整保护装置采样时刻。由于乒乓对时类同步方案需要准确计算传输延时,而数据接收中断耗时会影响延时计算的精度,因此,接收中断时间越短越好,方案采用协处理器方式接收光纤数据。对主处理器而言,接收中断耗时极小,只需启动协处理器并记录接收时间即可,因此对时精度非常高。

4.2 参考相量类同步方案

参考相量类同步方案的线路模型采用 π 形等值电路,如图 3 所示,其中, $\dot{V}_1, \dot{I}_1, \dot{V}_1', \dot{I}_1'$ 分别为线路两端的正序电压和电流, R_1, L_1, C_1 为线路正序参数。

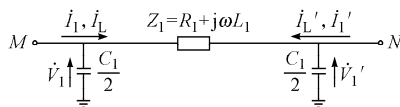


图 3 参考相量类同步方案
Fig. 3 Reference phasor based synchronized sampling scheme

采用基于电流量的同步方案,有

$$\dot{I}_L = \dot{I}_1 - 0.5j\omega C_1 \dot{V}_1 \quad (2)$$

$$\dot{I}_L' = \dot{I}_1' - 0.5j\omega C_1 \dot{V}_1' \quad (3)$$

如图 3 所示, $\dot{I}_1$ 和 $\dot{I}_1'$ 为同一电流量,两者间的相位差异即为补偿角度。由分析可知,如果模型能够吻合实际情况,补偿角度应正比于数据传输延时。对补偿角度经过一定处理后即可用于判断两侧光纤传输延时是否相等。以往线路保护正序参数整定主要用于测距,在该方案里正序参数对参考相量的计算精度至关重要,需要准确整定。如果整定误差很大,将会影响保护精度,但由于该方案具有很好的自适应能力,对保护可靠性不会产生影响。

4.3 纵联距离与纵联零序保护

高压线路保护装置均配置有距离保护和方向零序过流保护,只需把计算结果发送到对侧即可。零序功率元件工作电压采用补偿到线路 3/5 处的零序电压,有效解决了正方向故障时高压线路串补电容的影响。

弱馈侧检测到本侧电压下降,反方向元件没有动作,且收到对侧允许信号时向对侧发送三相跳闸允许信号。非弱馈侧接收到允许信号后,根据本侧选相结果跳闸。

4.4 报文设计

为方便判别电流互感器饱和,通信报文传输电流采样值。报文中包含的交流信息为本侧正序电压相量和三相电流采样值。控制信息至关重要,除一般的控制信息外,主要增加了用于判别传输延时是否相等的等效补偿角,本侧距离Ⅱ段、零序功率方向动作情况,以及本侧当前保护主判据(0 对应乒乓对时模式,1 对应参考相量模式)。

增加的通信信息所带来的通信压力很小,针对 2 Mbit/s 通信带宽的情况而言,报文设计比较简单;针对只有 64 kbit/s 通信能力的复用通道而言,通过降低传输频率和压缩信息长度也能顺利解决。

4.5 辅助功能

由于计算模型选择是否合理直接影响到装置运行模式,为便于现场运行调试,方案增加以下辅助功能:传输延时、本侧补偿相位、对侧补偿相位显示;根据模型误差计算出推荐模型参数;判断两侧传输延时是否相等的推荐门槛值,以及判据冗余度显示等。

4.6 试验结果

根据国家标准要求,设计一条电压等级为 500 kV,长度为 400 km 的高压线路。实时数字仿真系统试验结果表明,装置整定参数与系统完全相同时,参考相量的计算误差很小,不超过 1° ;整定参数与模型参数偏差在 10% 且电容电流为负荷电流的 10% 时,计算角度误差不超过 2° 。因此,试验整定阈值取 4° 。

理论分析可知,当光纤传输延时相等时,计算精度非常高,考虑到采样误差,保护动作曲线与理论差动曲线间误差小于 1%;当光纤传输延时不等,但两侧参考相量计算的补偿角度偏差小于 2° 时,由同步引起的最大理论误差为 3.5%;当偏差大于 2° 时,由于有纵联距离的作用,保护动作正确、可靠。假设线路实际模型与整定参数有较大误差,从式(2)、式(3)可知,参考相量的理论计算误差取决于正序电容误差和电容电流占负荷电流的比例。当负荷电流远大于电容电流时,计算误差可以忽略;当负荷电流为 0 时,计算误差来自于正序电容整定误差;实际计算时, $\dot{I}_L$ 和 $\dot{I}_L'$ 的大小均对参考相量的计算结果产生影响,当 $\dot{I}_L$ 和 $\dot{I}_L'$ 小于额定电流的 10% 时,应采用电压型参考相量类同步方案。

当装置采用相同长度光纤且整定参数与模型相同时,装置动作性能优良。通过修改整定参数,使得计算角度误差大于 2° ,装置告警。发生区内故障时装置可靠动作,发生区外故障时可靠闭锁。使用不同长度光纤,调整两侧通信传输延时,令 $\Delta t > 1$ ms,装置告警。发生区内故障时装置可靠动作,发生区外故障时可靠闭锁。通过模拟试验验证了方案可操作性强且简单易行。在极端情况下,保护动作性能仍然可靠。

5 结语

为提高电力系统中光纤通信的可靠度,自愈环网的应用越来越多,本文提出的方法综合了乒乓对时类和参考相量类同步方案的优势,避免了它们在自愈环网中各自的不足。方案可操作性强,方便现场调试使用。通过试验验证了综合同步方案性能稳定、可靠,能够很好地解决自愈环网中两侧传输延时不等时的数据同步问题。无论两侧传输延时是否相

等,整定的线路参数是否与实际吻合,保护均能正确动作。通过告警和辅助整定功能,用户可以方便地令装置工作在最佳状态。

该方法的不足之处在于当线路参数整定错误时,装置会误判传输延时不等,虽然不会因此而改变装置的可靠性,但保护装置动作边界曲线与差动曲线的吻合程度会变差。

参考文献

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 3 版. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [2] 许正压. 变压器及中低压网络数字式保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [3] 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[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(9): 46-49.
GAO Houlei, JIANG Shifang, HE Jiali. Sampling synchronization methods in digital current differential protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(9): 46-49.
- [4] 李永丽, 李仲青, 李斌, 等. 超、特高压长线路光纤纵差保护数据同步[J]. 天津大学学报, 2007, 40(2): 168-172.
LI Yongli, LI Zhongqing, LI Bin, et al. Data synchronization for current differential protection based on optical fiber channel for EHV & UHV long transmission line [J]. Transactions of Tianjin University, 2007, 40(2): 168-172.
- [5] 曹团结, 陈建玉, 黄国芳. 基于 IEC 61850-9 的光纤差动保护数据同步方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 58-60.
CAO Tuanjie, CHEN Jianyu, HUANG Guofang. A study on data synchronization method for optical fiber differential protection based on IEC 61850-9 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 58-60.
- [6] 曹团结, 尹项根, 张哲, 等. 通过插值实现光纤差动保护数据同步的研究[J]. 继电器, 2006, 34(18): 4-8.
CAO Tuanjie, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. A method of data synchronization in optical fiber differential protection based on inserting data [J]. Relay, 2006, 34(18): 4-8.
- [7] 曹团结, 徐建松, 尹项根, 等. 光纤差动保护插值法数据同步的实现[J]. 继电器, 2007, 35(增刊 1): 134-137.
CAO Tuanjie, XU Jiansong, YIN Xianggen, et al. The realization of data synchronization in optical fiber differential protection based interpolation data [J]. Relay, 2007, 35(Supplement 1): 134-137.
- [8] 张悛宁, 索南加乐, 焦在滨. 光纤自愈环网电流纵差保护的数据同步方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 44-49.
ZHANG Yining, SUONAN Jiale, JIAO Zaibin. Data synchronization method for current differential protection using fiber optic self-cure ring network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 44-49.
- [9] 王尔寒, 王强, 文明浩, 等. 光纤纵差保护中数据同步的误差分析及补偿办法[J]. 继电器, 2003, 31(8): 43-45.
WANG Erhan, WANG Qiang, WEN Minghao, et al. Analysis on error of data synchronization and compensation methods for differential current protection based channel of optical fiber [J]. Relay, 2003, 31(8): 43-45.
- [10] 陈慧. SDH 自愈环保护机制及比较[J]. 中国数据通讯网络,

2000,2(7):18-22.

CHEN Hui. Protective principle of SDH network[J]. China Data Communications Net, 2000, 2(7): 18-22.

彭和平(1981—),男,通信作者,工程师,主要研究方向:

微机继电保护。E-mail: pengheping1981@163.com

孙奇明(1973—),男,助理工程师,主要研究方向:电力需求侧管理。

严明皓(1984—),男,助理工程师,主要研究方向:微机继电保护。

Synthesis Method of Data Synchronization for Line Differential Protections Using Optical Fiber Self-cure Ring Networks

PENG Heping¹, SUN Qiming², YAN Minghao¹

(1. NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 210061, China;

2. Xining Power Supply Company, Xining 810003, China)

Abstract: According to the characteristics of optical fiber self-cure ring networks, a synthesis synchronization method for line differential protections is proposed. The method uses the results of ping-pong method as the primary criterion and results of reference phasor method as the auxiliary criterion. The method proposed can implement self-adaptively data synchronization with the auxiliary criterion to distinguish the working state of self-cure ring network. When the reference phasor method is used to synchronize data, the distance blocking logic is added to improve the reliability of protection. Testing results of real-time data simulator (RTDS) show that the method is easy to operate and has reliable performance.

Key words: optical fiber self-cure ring network; differential protection; data synchronization