

一种基于软实时通信的广域保护原理

吴崇昱¹, 孙雷波², 张 军¹

(1. 南瑞集团城乡电网自动化公司, 江苏 南京 210003;

2. 浙江慈溪供电局, 浙江 慈溪 315300)

摘要: 根据传统系统实时性的划分方法, 同时考虑通信满足传输时限要求的能力, 把广域保护通信实时性划分为硬实时系统、软实时系统和非实时系统, 分别介绍了 3 种通信方式的概念和特点。分析了软实时系统相对于硬实时系统的优势, 说明软实时通信技术更能满足广域保护的要求。提出基于软实时通信和参考相量同步法的广域差动保护, 介绍了这种保护的采样同步原理和保护原理。该保护可用于线路后备保护, 有助于解决短线路距离Ⅲ段难以整定配合的问题, 也可以作为区域电网的总后备保护。

关键词: 软实时通信; 广域保护; 差动保护; 参考相量法

中图分类号: TM 77; TP 915

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)12-0021-04

0 引言

广域保护是利用通信系统在广大地域实现的保护系统^[1-2]。广域保护可以作为主保护的后备, 也可实现一定的安全稳定功能。广域保护提出有 2 个基础, 一个是 IT 技术的发展, 另一个是电力系统对安全稳定运行的更高要求^[3-4]。

传统保护的重点是保护电力设备, 并兼顾系统稳定的要求。广域保护的目的地和侧重点有所不同: 首先是更加侧重于保护系统的稳定, 完成的功能介于传统保护和稳定控制装置间; 其次是保护功能侧重于广大地域范围的电力设备安全, 并不一定针对某个具体的电力设备^[5-6]。

广域保护的基础是通信技术, 所以也受到通信技术水平的制约。这正是本文研究基于软实时通信的广域保护的出发点^[7]。

1 广域保护通信实时性概念的引入

广域保护通信实时性是本文为了讨论的方便引入的新概念。

传统的硬实时、软实时和非实时系统的划分标准是系统的控制响应需求。运行的任何时刻, 都必须严格满足响应时限的要求, 不能接受延迟响应的系统, 称为硬实时系统。运行的大多数时间, 都能满足响应时限的要求, 但能接受一定概率的延迟响应的系统, 称为软实时系统。对响应的时限无严格要求的系统, 称为非实时系统^[8]。

广域保护通信实时性划分类似于系统实时性的划分方法, 基本上基于通信满足传输时限要求的能力。

1.1 硬实时通信概念

电力系统中实际应用的硬实时通信技术有: 微波、光纤专用通道、SDH。硬实时通信的技术指标优

异, 可以直接应用于线路纵差保护^[9]。

a. 低传输延迟。硬实时通信一般采样硬交换技术, 不采用存储转发, 传输延迟一般小于 1 ms。

b. 有两侧或多侧采样时钟同步的方法。一般有 2 种方法: 利用 GPS 校正采样时钟; 利用通信通道传输延迟的对称性校正采样时钟。

c. 低误码率、高可用率。一般要求位差错率小于 10^{-6} , 可用率大于 99.99 %。

d. 确定的较高带宽、极低的丢包率。带宽不仅足够, 而且具有确定性, 能够保证任何情况下数据包的传输。

1.2 软实时通信概念

可用的软实时通信技术有: ATM、改进了实时性的以太网、改进了实时性的 IP 网络。软实时通信技术常采用存储-转发的软交换技术。

a. 高传输延迟, 且对传输延迟的稳定性无要求。传输延迟可以高达 100 ms, 具体的要求决定于广域保护的速动性要求。理论上并不要求传输延迟稳定不变, 但是传输延迟的变化和传输延迟的不对称超过允许值往往同时发生, 所以实际应用中, 要求传输延迟的变化有一定的稳定性。

b. 通信通道传输延迟不对称。软实时通信网络的双向传输路径可能不同, 而且可能采用存储-转发技术, 通道传输延迟不对称, 无法通过通信通道同步两侧或多侧的采样时钟。但是, 要求大多数时刻传输延迟不对称小于 1 个工频周期; 不允许连续的传输延迟不对称的时间超过 1 个工频周期。

c. 相对较低的带宽确定性, 相对较低的可用率, 可能丢包。存储-转发技术本身的特性决定了可能发生阻塞, 带宽的确定性、可用率和丢包率都劣于硬实时通信技术。

1.3 非实时通信概念

所有不满足软实时通信性能要求的通信技术都

可划为非实时通信。非实时通信技术一般不可用于传输保护动作所需信息。如普通以太网和 IP 网络。

1.4 在广域保护中使用软实时通信技术的原因

硬实时通信技术在性能上有明显的优点,但没有在广域保护中广泛应用,反而研究软实时通信技术的原因有以下几点。

a. 成本。通信的成本和传输质量、传输距离有关。传输质量越高、传输距离越长,成本就越高,而且成本的上升是非线性的。广域保护需要在相当长的距离上进行通信,采用硬实时通信技术成本高昂。而要控制成本,必须牺牲传输质量。

b. 易获得性。在技术上,软实时通信技术基本是民用领域广泛使用的通信技术,可以利用应用广泛的民用技术及器件,易于实现。在通信通道上,也易于获得。电力调度通信网和电力数据通信网已逐步健全,这就是一种可用的软实时通信网络。另外,租用基础电信运营商的网络(对 QoS 和安全性提出一定的要求)也是一条途径。而硬实时通信技术需要专用通道,不易获得,对低压变电站更是如此^[10]。

c. 拓扑的灵活性。和传统的保护相比,广域保护配备改变的可能性更大,需要网络的拓扑具有相应的灵活性。硬实时网络通常是基于硬交换和硬连接技术,灵活性很差,通道建设一般是和变电站/发电厂的设计、建设相互配合,同时考虑,同时进行。当保护配备改变,需要增加通信通道(如敷设光纤)。而软实时网络通常基于存储-转发的软交换技术,不需做网络硬结构改变就能改变网络拓扑,灵活性高。

d. 软实时通信技术的性能可以满足广域保护的要求。广域保护的用途和传统保护不同,侧重于保护系统的稳定和在广域范围内实现后备保护。所以,对速动性要求不高。而软实时通信技术虽然实时性不如硬实时通信,但完全可能满足广域保护的要求^[11]。

1.5 各种软实时通信信道及其实时性加强措施

1.5.1 ATM 网络

ATM 网络是没落中的技术,但目前 ATM 网络的 QoS 还高于 IP 网络,所以还将继续存在一段时间。

1.5.2 改进了实时性的以太网

以太网正在从传统的商用领域迅速地扩展其应用范围。以太网传统上是一种局域网,但随着万兆以太网技术的发展,以太网的带宽已经达到骨干网的要求,所以万兆以太网专门为广域的应用制定了标准。以太网已经可以用于广域网。

以太网作为软实时通信技术,主要用于:作为广域保护设备的通信接口,以太网接口实现简单、通用性强,经过转换后可接入各种网络;作为 IP 网络的底层传输技术(IP over Ethernet)^[12]。

以太网的实时性加强:以太网标准 802.1Q 中规定了优先级,符合 802.1Q 的交换机能够做到优先转发广域保护的数据包,大幅度降低阻塞的发生概率。当还有其他非广域保护的信息通过以太网同网传输时,非常有用。

第 3 层交换和多层交换技术:万兆以太网解决了以太网的远距离传输问题,但以太网本身是一种链路层协议,并无路由功能,需要借助 IP 技术解决路由问题,以在广域网上传输。但传统 IP 交换通过路由器进行,速度慢,难以满足软实时的要求。第 3 层交换和多层交换技术解决了这个问题。简而言之,第 3 层交换只在初始的路由建立阶段需要路由器,一旦路由建立,以太网交换机之间可以直接根据 IP 交换以太网帧,绕开路由器,大幅提高了带宽,降低了延迟。

1.5.3 改进了实时性的 IP 网络

现在电信运营商的 IP 网络已经可以做到 IP 包的双向传输时延远远小于 100 ms。IP 网络一般运行在 ATM、以太网、SDH、DWDM(波分密集复用)上。

广域保护一般采用 UDP 而不是 TCP 以降低协议开销。

IP 网络的实时性加强:一般的措施有区分服务(DiffServ)和各种实时 IP 协议,如 RSVP。

1.6 软实时通信信道的冗余

软实时通信信道的可靠性可以通过多网络冗余实现(底层需基于不同的物理链路,如不同的基础电信运营商网络)。由于软实时通信技术的成本低、易于获得,因此可以在增加很少成本的情况下实现网络的冗余。

2 基于软实时通信的广域差动保护

2.1 采样同步原理

广域保护的一个关键问题是如何进行采样同步,特别是对于采用软实时通信的广域保护。本文的采样同步原理基于参考相量法。

下面先介绍参考相量法。

参考相量法利用线路模型计算出代表同一量的 2 个相量,然后利用这 2 个相量的相位差实现采样同步,如图 1 所示。某一线路的正序分量 Π 型等值模型,其中, U_1 、 I_1 和 U'_1 、 I'_1 分别是线路两端的正序电压和电流相对而言量, R_1 、 L_1 、 C_1 为线路正序参数。

$$I_L = I_1 - j\omega \frac{C_1}{2} U_1 \quad (1)$$

$$I'_L = I'_1 - j\omega \frac{C_1}{2} U'_1 \quad (2)$$

$$U'_{1A} = U_1 - Z_1(I_1 - j\omega \frac{C_1}{2} U_1) \quad (3)$$

式中 I_L 、 I'_L 为线路正序电流; U'_{1A} 为以 A 端参考相为基准计算出的 B 端电压 U'_1 。

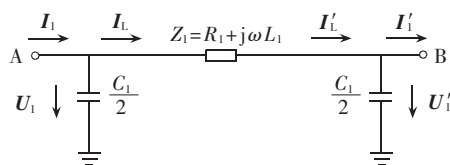


图 1 两端线路基于参考相量同步法的示意图
Fig.1 Sampling synchronism of two-end line based on referring equivalence method

虽然 I_L 和 I'_L 在物理上代表同一电流量,但由于计算时具有不同的参考相,故两者之间存在相位差。该相位差的大小正好反映了两端参考相之间的相位差,由此可给出两端采样时钟在时间上的差异;对此差异进行补偿就能解决两端数据采样的同步问题。这是基于电流量的同步方法。同理,可以比较 A 端算出 U'_{1A} 的和 B 端直接测量得到的 U'_1 ,它们之间的相位差同样代表了两端参考相之间的相位差。由此可得到基于电压量的同步方法。

多端线路(T型线路)的基于参考相量同步法如图 2 所示。

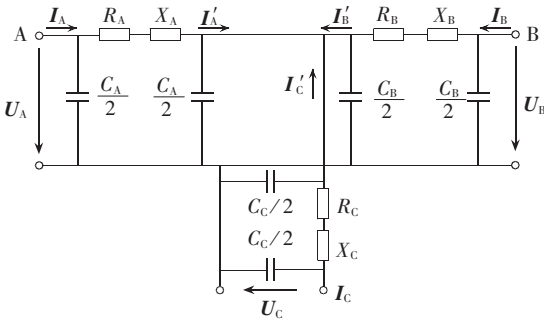


图 2 T 型线路参考相量同步法的示意图

Fig.2 Sampling synchronism of T-type line based on referring equivalence method

在 T 型线路的交叉点,各端电流服从基尔霍夫定律:

$$I'_A + I'_B + I'_C = 0 \quad (4)$$

在线路各端测量的电流分别是 I_A 、 I_B 、 I_C ,需要通过正序网络计算才能得到 I'_A 、 I'_B 、 I'_C 。以 A 段为例,

$$\begin{bmatrix} U'_A \\ I'_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A \\ I_A \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$A = 1 + j\omega \frac{C_A}{2} (R_A + jX_A), \quad B = R_A + jX_A$$

$$C = \frac{\omega C_A^2}{4} \left[R_A + j(X_A - \frac{4}{\omega C_A}) \right], \quad D = 1 + j\omega \frac{C_A}{2} (R_A + jX_A)$$

线路各端应在故障前用适当的算法将参加比较的电流或电压相量估计出,然后传到对侧与本地相量进行比较。因此,参考相量法的准确性将取决于线路模型的准确性和参考相量估计的精度,同时还要考虑各种误差因素的影响,如电压互感器、电流互感器、线路参数、时钟漂移等。

从以上的介绍可以看出,参考相量法对通信通道的要求很弱,只要 2 个传输方向的时延相差不超过一个工频周期即可。

下面介绍基于软实时通信的参考相量法的同步步骤。

a. 计算传输延迟。广域保护设备向对侧发送一个同步包,对侧收到后将立刻返回一个同步包。扣除已知的对侧处理时间,除以 2 即得单向传输延迟。

b. 同步校正。步骤 **a** 中交换的同步包中,包含了两端分别计算出的参考相量。扣除了传输延迟,各侧对参考相量进行比较,即得采样和计算相差的角

度。因为可能存在短暂的传输延迟不对称的抖动(超出了 1 个工频周期),需要计算多次,剔除抖动造成的坏数据。再对剩余的数据取平均值,以提高校正的精度。同步校正无需每次交换数据时都进行,可以间隔一定的周期。设两侧决定采样的晶体振荡器的频率差为 Δf ,允许相差的角度为 Δa ,工频周期为 T 。则下一次同步的最大允许时间间隔(同步周期) $\Delta T = (T \cdot \Delta a / 360) / \Delta f$ 。设 $T = 20 \text{ ms}$ (50 Hz 系统), $\Delta f = 50 \times 10^{-6} \text{ Hz}$, $\Delta a = 1^\circ$,则 $\Delta T = 1.111 \text{ s}$ 。

c. 数据传输。系统中共需传输同步包和数据包 2 种包。同步包用于校正两侧采样和计算的相差。数据包用于传输差动计算所需的数据。考虑到节约带宽,数据包传输的是电流的工频基波相量,而不是采样数据。每个数据包都按顺序编号。并且数据包以两侧约定好的速率发送,所以收到 2 个数据包间的时间间隔是恒定的。传输延迟的变化会使此时间间隔有一定的抖动。如果超过 2 个时间间隔仍未收到数据包,或者先收到了下一个数据包,可判断出发生了丢包。

2.2 保护原理

前文已经提到参考相量同步法的同步精度受到多种因素的影响,所以一般没有硬实时通信技术的同步精度高。工频基波相量在暂态过程中也会引入一定的误差,所以差动原理的选择应趋向保守,可采用如下的原理:

$$|I_M + I_N| > I_0 \quad (6)$$

$$|I_M + I_N| > K |I_M - I_N| \quad (7)$$

其中的启动电流 I_0 、制动系数 K 可适当提高,也可带一定的延时。算法上可以拉长数据窗,根据多点的电流相量进行判断。

3 结论

从以上的分析可以看出:与传统的保护相比,基于软实时通信的广域保护具有下面一些特点。

a. 用于解决现有距离保护Ⅲ段的问题。传统的距离保护Ⅲ段的整定一般和相邻线路的距离Ⅱ段配合。但在实际的应用中,特别是大城市周围,输电网络密集、线路短,难以整定。简化的处理方法是统一按某一定值整定(如 4Ω),结果导致动作的无选择性^[13]。广域差动保护可用于代替距离Ⅲ段;或整定为在距离Ⅲ段前动作,作为距离Ⅲ段的补充。相对于传统的线路电流纵差保护,不用新建专用通信通道,能够方便、低成本地实现^[14]。

b. 可覆盖更广的范围,作为该区域的总后备保护实现技术上也不复杂。方法 1:通过母线电压,可以同步多条连接在同一母线上的线路。方法 2:通过接收多个变电站安装的相量测量单元(PMU)的母线电压相量信息进行同步,不过这已经超出本文限定的软实时通信范围了。

c. 广域范围内的分布式差动保护。以第 2 节中

提到的2种方法为基础,可以在广域范围内根据系统要求,划分出多个广域差动保护区,甚至可以大区套小区,以一系列的分布式广域保护节点实现多个差动保护区。

参考文献:

- [1] 彭丰,田立,周响凌,等. 电网保护控制信号传输通道性能比较分析[J]. 华中电力,2001(6):64-66.
PENG Feng,TIAN Li,ZHOU Xiang-ling,et al. The analysis and comparison of the relay protection and control signal transmission channel[J]. Central China Electric Power,2001(6):64-66.
- [2] 林霞,高厚磊. 新型广域后备保护方案的研究[J]. 继电器,2005,33(7):84-88.
LIN Xia,GAO Hou-lei. Study of a new type of wide-area backup protection scheme[J]. Relay,2005,33(7):84-88.
- [3] 赵建青,尹项根,陈德树. 广东电网光纤保护方案的论证[J]. 电力系统通信,2001(1):19-22.
ZHAO Jian-qing,YIN Xiang-gen,CHEN De-shu. Discussion on optical protection planning of power network in Guangdong[J]. Telecommunications for Electric Power System,2001(1):19-22.
- [4] 袁季修. 防止电力系统频率崩溃的紧急控制[J]. 电力自动化设备,2002,22(4):1-4.
YUAN Ji-xiu. Emergency control for preventing frequency collapse of power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(4):1-4.
- [5] 丛伟,潘贞存,赵建国. 基于电流差动原理的广域继电保护系统[J]. 电网技术,2006,30(5):91-95,110.
CONG Wei,PAN Zhen-cun,ZHAO Jian-guo. A wide area protective relaying system based on current differential protection principle[J]. Power System Technology,2006,30(5):91-95,110.
- [6] 范越,段来越,史可琴. 分布式稳定控制装置在西北电网中的应用[J]. 继电器,2004,32(1):40-42.
FAN Yue,DUAN Lai-yue,SHI Ke-qin. Application of distributed transient stability control device in northwest power grid[J]. Relay,2004,32(1):40-42.
- [7] 张晶晶,丁明. 广域保护系统研究[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2006,29(4):440-443.
ZHANG Jing-jing,DING Ming. Research on the wide-area protection system[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science,2006,29(4):440-443.
- [8] 庞丽萍,田亚敏,李胜利,等. 硬实时系统的通信协议[J]. 小型微

型计算机系统,2002,21(4):393-396.

- PANG Li-ping,TIAN Ya-min,LI Sheng-li,et al. Communication protocols for hard real-time systems[J]. Mini-micro System,2002,21(4):393-396.
- [9] 陈慧,熊光泽,罗克露. 现场级硬实时网络在线调度[J]. 计算机应用,2003,23(12):9-11,15.
CHEN Hui,XIONG Guang-ze,LUO Ke-lu. On-line scheduler over field hard real-time network[J]. Computer Applications,2003,23(12):9-11,15.
- [10] 常恒,陈丹,吴捷,等. QoS路由中若干问题的研究[J]. 电信快报,2005(1):5-9.
CHANG Heng,CHEN Dan,WU Jie,et al. Study of several issues in QoS routing[J]. Telecommunications Information,2005(1):5-9.
- [11] 熊彦. 全厂实时数据通讯网研究[J]. 核动力工程,2002,23(2):79-82.
XIONG Yan. Research of real time data communication network of entire plant[J]. Nuclear Power Engineering,2002,23(2):79-82.
- [12] 张婵. 基于IP网络的多媒体通信[J]. 中山大学研究生学刊:自然科学、医学版,2001,22(2):49-52.
ZHANG Chan. Multimedia communication over IP networks[J]. Journal of the Graduates Sun Yat-Sen University:Natural Science,Medicine,2001,22(2):49-52.
- [13] 苏盛,段献中,曾祥君,等. 基于多Agent的广域电流差动保护系统[J]. 电网技术,2005,29(14):15-19.
SU Sheng,DUAN Xian-zhong,ZENG Xiang-jun,et al. A multi-agent based wide-area current differential protection system[J]. Power System Technology,2005,29(14):15-19.
- [14] 苏盛,LI K K,CHAN W L,等. 广域电流差动保护区划分专家系统[J]. 电网技术,2005,29(3):55-58,63.
SU Sheng,LI K K,CHAN W L,et al. An expert system for wide area protection system protection zone selection[J]. Power System Technology,2005,29(3):55-58,63.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

吴崇昱(1977-),江苏南京人,助理工程师,主要从事继电保护方面的工作;

孙雷波(1970-),浙江慈溪人,工程师,主要从事电力系统自动化方面的工作;

张军(1978-),安徽滁州人,助理工程师,主要从事继电保护方面的工作。

Wide area protection principle based on soft real-time communication

WU Chong-yu¹,SUN Lei-bo²,ZHANG Jun¹

(1. Electric Power Automation Sub-Co,Nari Group Corporation,Nanjing 210003,China;

2. Zhejiang Cixi Power Supply Bureau,Cixi 315300,China)

Abstract: According to the classification of traditional real-time system and with the consideration of meeting the requirement of transmission time limit,the real-time system of wide area communication is classified into hard real-time system,soft real-time system and non-real-time system. Concepts and characteristics of these three systems are introduced respectively and advantages of soft real-time system compared with hard real-time system are analyzed,which proves that the soft real-time communication technology can meet requirements of the wide area protection much better. The wide area differential protection based on soft real-time communication and referring equivalence synchronism is presented and its sampling synchronism principle and protection theory are introduced. It can be applied to line backup protection for the coordinative setting of short line distance protection's section III,and used in the general backup protection of regional power grid as well.

Key words: soft real-time communication; wide area protection; differential protection; referring equivalence method