

[智能化变电站]

智能化变电站带负荷测相位方法研究与应用

文/赵晨

中油电能供电公司变电检修部

通过比较和分析传统变电站和智能变电站的系统结构，特别是电磁变压器和电子变压器的区别、网络传输技术的使用、选择性同步技术和GPS同步技术，强调智能变电站在数据采集和处理方面的主要优势。结合智能变电站的实际运行要求，详细讨论相位控制功能的作用及其具体要求。

负载情况下的相位测量与电力系统中的相位同步、电力平衡和故障检测等问题直接相关。传统的相位测量主要基于人工测量，其特点是准确度低、效率低及对外部干扰敏感。具有强大数据采集和处理能力的智能变电站为负荷相位测量提供新的技术方法和解决方案。本文通过对比分析传统合成变电站和智能变电站的系统结构，阐述智能变电站在数据采集和处理方面的优势，结合智能变电站的实际应用要求，讨论相位测量功能的重要性及其具体要求。

常规综自站和智能变电站对比分析

1. 电磁式互感器和电子式互感器系统架构分析

电磁变压器存在二次回路中断和二次电压短路的风险。根据传感器端是否有电源，电子变压器可分为无源电子变压器和有源电子变压器。无源电子变压器通常是指光学电流互感器和光学电压互感器，是“光学传感器+光纤传输”的一种变体；有源电子变压器需要在传感器头端提供电源，传输通常使用罗戈夫斯基线圈进行电流传输，使用电容分压器进行电压传输。采样值仍为模拟信号，通过变压器的换能器电路转换为数字模拟信号。无源电子传感器使用光纤陀螺仪或光学器件作为传感器头，

法拉第磁光效应原理图如图1所示。

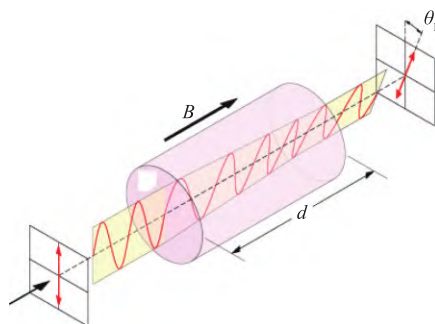


图1 法拉第磁光效应原理图

光源发出的光通过偏振器转换为线性偏振光，然后通过旋转的法拉第磁光材料（如法拉第透镜）传输。线性偏振光包含由法拉第效应引起的平面偏振旋转的信息，其中旋转角度与偏振光束穿过材料的路径上磁场 H 的线性积分成正比，即

$$\theta = V \oint H dl = VLH$$

式中， V 为磁光材料的Verdet常数。

根据安培环路定理得

$$\oint H dl = I$$

对于长的直导线有

$$H = \frac{I}{2\pi R}$$

式中, I 为通过载导体的电流; R 为载流导体半径。

代入式可得

$$I = \frac{2\pi R}{VL} \theta$$

显然, 偏转角 θ 与测量到的电流 I 成正比。偏转角使用沃拉斯顿棱镜确定。沃拉斯顿棱镜可将一条偏振光线分成两束垂直的光束, 从而确定偏振面的偏转角, 测量两束光的强度, 以进行电流测量。基于波克尔斯效应的电压互感器: 当各向异性晶体(或压电晶体)被光穿透而暴露在强电场中时, 感应双折射与电场强度成正比, 这种现象称为电光波克尔斯效应, 如图2所示。

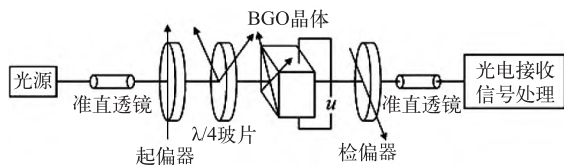


图2 波克尔效应原理示意图

经过偏振器后从LED发出的光, 外加电压下的线性偏振光, 经过双折射后穿过电光晶体(如BGO晶体)的线性偏振光, 两束光相位差和外加 U 电压后的双折射。关系式为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} \frac{l}{d} u$$

无源电子变压器产生的是数字信号, 因此数据采集方法发生了根本变化。

2. 传输网络化

SV信号传输协议主要有FT3和IEC61850-9-2, 而数值传输主要采用GOOSE信号。FT3协议主要用于电子互感器与应变片、电压应变片和间隔应变片之间的通信; IEC61850-9-2协议主要用于过程互感器与应变片之间的通信。FT3协议主要用于变压器与镇流器之间、电压镇流器与间隔镇流器之间的通信; IEC61850-9-2协议主要用于电压镇流器与间隔镇流器之间的通信, 通信方式有两种, 即直接点对点通信和组网通信。这两种方式保证了网格化传输的连续性。

3. 采样同步技术

在传统的综自站中, 每个仪器的模拟信号由每个仪器集中接收, 如图3所示。

图3中, A和TV是仪器的微型变压器, LP是仪器的低通滤波器电路, AD是模数转换芯片。在传

统的微型计算机保护装置中, 处理器的中断会导致采样数据不同步。处理系统通过中断发送采样参考信号, 存储所有采集的模拟数据, 并依次读取采样的模数转换器数据, 以确保从同一设备采样的数据在同一时间具有相同的值。在智能变电站中, 电子式互感器的采样信号传输到电流间隔开关, 再由各间隔开关将电压、电流等信号传输到所需的保护、测量和控制装置。每个间隔的信号采样都是分布式的, 由于互感器和间隔汇聚器的特性不同, 每个间隔所用的定时也不尽相同。因此, 数据采样失去了天然的同步性, 需要依靠外部手段来实现不同区间的同步。目前广泛使用的两种同步方法是根据FT3和IEC61850-9-2标准进行的直接点对点采样(通过插值和映射实现同步)和根据IEC61850-9-2标准进行的网络数据分配(依靠外部时钟信号, 并使用SampCnt计数器之间的全局超同步信号实现同步)。

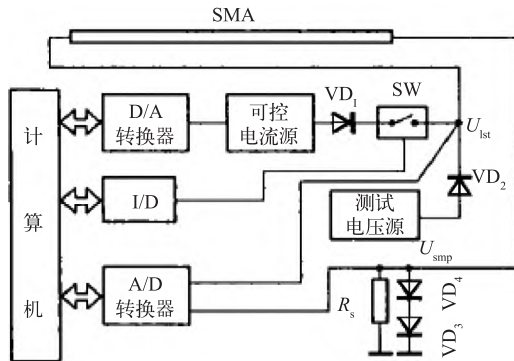


图3 A/D采样原理图

4. GPS对时技术

由于智能变电站依靠外部GPS对定时信号进行采样和同步, 因此集群网络模式下的GPS同步准确度必须非常高, 以减少因不同设备的决策差异而造成的同步误差, 这种误差可能会导致实际采样间隔出现较大误差。目前最常用的同步方式有秒脉冲、IRIG-B码和IEEE1588码等, 同步准确度为 10^{-3} s 或 10^{-9} s。

智能变电站核相功能需求

通过对传统融合变电站和智能变电站处理系统的对比分析, 可以得出智能变电站采用二次相控时, 应具备以下功能: ①提供FT3接口, 自适应数据速率和长度; ②提供点对点网络接入和IEC61859-9-2网络接入; ③提供点对点网络接入和

IEC61859-9-2网络接入；④可提供IEEE1588码和IRIGB码、IEEE1588码和其他码，同步准确度达到10-3s和10-9s的水平；⑤可将任意模拟数据通道作为参考，测量数据作为参考，测量通道测量数据与参考通道的相位差。

智能变电站带负荷测相位关键技术

1. 通信协议解析

FT3传输是采用曼彻斯特编码的串行数据通信的首选IEC60044-8协议。一个帧最多包含48字节的有效数据和16位CRC校验和。FT3帧格式包含3个数据块，链路级帧格式扩展为4个数据块，以增加扫描通道的数量。最多可配置22个通道，通道可独立定义，每个通道可写入16位数据。

协议数据集包含22个模拟通道的以下数据：数据集长度、LNName、DataSetName、LDName、额定相电流、额定零序电流、额定相电压、额定延迟时间、SmpCnt（采样计数器）和实时采样值。但是，对于ECT和EVT测量，变压器额定值的小数位数为11 585位，而对于ECT保护，变压器额定值的小数位数为463位，因此需要使用此比例因子来转换采样值。

信息格式等有明确限制。在IEC61850-9-2点之间传输采样时，换流器无法接收同步脉冲，必须在采样数据帧中传输标称延迟值，因此IEC61850-9-2LE将采样配置为在通道1中传输标称延迟数据。此外，IEC61850-9-2使用不带缩放因子的32位数据表示，因此电压值每比特表示10 mV，电流值每比特表示1 mA。

2. 自适应接收

FT3传输协议使用曼彻斯特编码（“曼码”），编码规则为：以最低位编码的数据作为最高位传输，最高位编码为二进制1，以最高位编码的数据作为最低位传输，最低位编码为二进制0。

FT3使用光接收器的硬件电路对光信号进行采样，并将其转换为相应的数字信号。FT3使用人码传输协议，数据传输速率为5 Mbit/s和10 Mbit/s，周期为T/2、200 ns或100 ns，具体取决于数据编码级别。使用人工代码时，数据持续时间的级别由内部软件决定，该软件确定接收到的数据。

如果持续时间为100 ns或更短且有效，则人形

编码传输速率为10 Mbit/s；如果持续时间大于100 ns但小于200 ns，则人形编码传输速率为5 Mbit/s。

根据波特率自动调整接收参数，同时评估FT3数据的稳定性。在确认接收到的FT3数据的稳定性后，对其进行解码，确定FT3数据集的长度，并根据其大小接收FT3数据。

3. 软件锁相环技术

不同备份设备的时钟方阵之间的差异会导致相应时钟脉冲的差异，因此需要使用锁相技术来确保接收设备和发送设备的时钟脉冲相匹配。锁相技术广泛应用于信号处理、调制和解调、时钟同步、频分复用和时分复用等领域。PLL收发器通常采用模拟电路实现。

PLL实际上是指自动相位控制（APC）电路，即利用两个电信号的相移，通过电路本身的受控操作实现精确频率跟踪的系统。软件PLL技术是一种通过软件实现的数字PLL技术。从本质上讲，它利用跟踪信号和跟踪信号之间相位差的变化来产生一个反馈控制信号，不断调整输出信号，使输出信号与跟踪信号相匹配。

输出信号用于确保输出信号和跟踪信号之间的相位稳定性。相位同步软件环路监控数字转换器，并控制接收设备时钟信号的中断，以保持与监控信号在周期和相位上接近的相位同步信号，从而确保设备间时钟脉冲的移动，减少因设备间同步误差造成的同步结果偏差。相位电路的初始输入值为250 μ s，以相邻两个SampCnt 0数据包到达的时间差作为反馈值，以4 kHz的采样率计算采样间隔，以输入值与反馈值之间的时间差 Δt 作为修正值，不断修正输入值与反馈值之间的误差，使输入值实时跟随反馈值（k）。

4. 逐次线性插值拟合

插值重采样是从数字信号的单个采样中提取数字信号第二个采样的近似计算方法，可以通过专门的硬件或软件方法实现。

插值拟合是从已知数据构建的函数 $y=f(x)$ 的简单近似值，其中 $f(x)$ 的值是在点 $x \neq x_i, i=0, 1, \dots, n$ 处计算得出的。

最简单的插值调整算法是线性插值算法。理想情况下，可以假设采样波形在足够小的时间间隔内近似于一条直线，如图4所示。

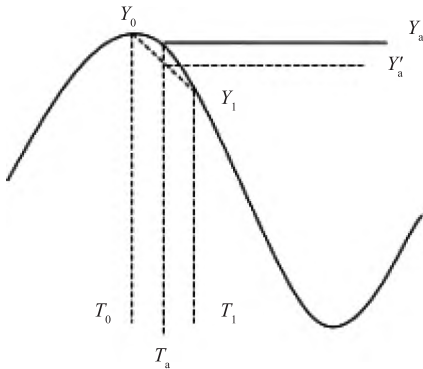


图4 线性插值原理

假设已知 Y_0 和 Y_1 分别对应采样时间 T_0 和 T_1 的采样值，如果 $\Delta T=T_1-T_0$ 足够小，则采样曲线段 Y_0Y_1 在误差边界内近似于一条直线，对线段 Y_0Y_1 采用线性插值算法计算出时间 T_s 对应的‘采样值 Y_s ’的近似值 Y'_s ， ΔT 越小，结果越精确。

利用线形图 Y_0Y_1 的线性插值算法，可以计算出时间点 T_s 对应的样本值 Y_s 的近似值， ΔT 越小，计算结果越准确。

为了提高采样准确度，可以使用线性插值法，即进行两次线性插值，结果插值一次，即使用二阶差分因子。

5. 采样序列号同步方式

对于IEC 61850-9-2网络传输方式SV信号，需要外部同步信号来同步采样计数器。连接器和测试仪必须与来自同一同步源的同步信号相连。与采样点相对应的采样计数器编号应在收到同步脉冲时重置为零，然后在每个信息帧到达时按顺序累积，直到收到下一个同步信号时重置并重新计算，或在一个完整周期后反向重置。测试设备应使用相同的采样计数器序列号对齐每组采样数据，从而确保数据同步。

智能变电站带负荷测相位的实现方式

使用软件相位环技术验证被测设备的相位环和时钟信号。相位环时钟信号产生并稳定后，根据传输模式同步采样数据。在IEC61850-9-2点对点FT3模式中，为了通过延迟实现稳定传输，会使用报文中指定的信道延迟参数对每个设备的延迟进行

补偿，然后使用渐进线性插值进行同步插值并重新同步信道数据；在IEC61850-9-2网络模式下，由于传输延迟稳定，使用报文中指定的通道延迟参数补偿各设备的延迟，然后使用逐级线性插值；在IEC61850-9-2网络模式下，由于传输延迟不稳定，相位控制器与时钟信号耦合，使用采样计数器的序列号进行同步。智能变电站带负荷测相位的实现方式见表1。

表1 智能变电站带负荷测相位的实现方式

内容	描述
硬件系统构建	
高精度传感器配置	在智能变电站关键节点安装高精度电子式互感器或相位测量传感器，确保电气量精确采集。
数据采集单元	配置高性能数据采集单元（如合并单元MU），负责信号预处理和模数转换。
同步时钟系统	采用GPS对时技术或其他高精度同步时钟源，确保测量系统时钟同步。
软件系统开发	
相位测量算法	开发高效相位测量算法，利用数字信号处理技术提取相位信息。
数据同步与校正	设计数据同步与校正模块，确保各通道数据一致性。
数据分析与展示	开发数据分析与展示平台，实现结果可视化和数据分析功能。
系统集成与测试	
系统集成	将硬件与软件系统集成，形成完整带负荷测相位系统。
系统测试	进行功能、性能和可靠性测试，验证系统测量精度和稳定性。
运维管理	
运维规范制定	制定运维管理规范，明确运维职责、操作流程和应急措施。
定期维护与校准	定期对系统进行维护和校准，确保设备性能稳定，更新软件算法。

结束语

本文通过研究和应用智能变电站负荷相位测量方法，详细分析智能变电站在电力系统监控中的重要作用及其技术优势。通过对比分析传统综合自动变电站和智能变电站的系统结构，可以看出智能变电站在数据采集、传输、处理和同步技术方面都取得了长足的进步。EA

（收稿日期：2024-10-13）