

数字化变电站同期功能的实现

周 斌, 张 斌, 闫承志

(国电南瑞科技股份有限公司, 江苏省南京市 210003)

摘要: 同期合闸功能是变电站自动化系统的重要功能。随着电子式互感器的应用和 IEC 61850 标准的推广, 在数字化变电站自动化系统中, 同期功能的实现方法有较大变化。文中介绍了数字化变电站自动化系统中同期功能实现方案, 包括采样值接收、采样值异常处理、重采样、同期点预报等模块, 该方案充分考虑了采样值的传输延时, 并对传统的同期点预报算法进行了改进, 使之更适应数字化变电站的应用需求。经实验室验证和现场运行证明, 该方案能够安全正确地实现数字化变电站的同期功能。

关键词: 同期; 数字化变电站; 电子式互感器; 采样值; 重采样; 最佳平方逼近

中图分类号: TM76

0 引言

断路器的同期合闸操作是变电站自动化系统的重要功能。目前变电站自动化系统中同期功能一般由间隔层的测控装置完成^[1-2], 测控装置先将传统互感器输入的电压信号和电流信号变换为交流小信号, 然后进行采样、模数转换和计算, 收到站控层控制命令后进行同期判断, 若条件满足, 通过继电器接点输出断路器合闸脉冲。随着电子式互感器技术的不断成熟和 IEC 61850 标准的推广应用, 基于电子式互感器技术和 IEC 61850 标准的数字化变电站自动化系统成为变电站自动化系统的发展趋势^[3]。由于电子式互感器及智能控制终端的应用^[4], 数字化变电站自动化系统同期功能的实现相对于传统自动化系统发生较大变化。本文主要介绍一种在数字化变电站自动化系统中实现同期合闸功能的方案。

1 系统架构

本文介绍的数字化变电站自动化系统的同期功能由位于间隔层的数字化测控装置完成, 系统结构框图如图 1 所示。

交流电压、电流量的采样和模数转换功能由位于过程层的电子式互感器完成。合并单元将各互感器的采样值进行合并, 然后通过以太网传输至位于间隔层的测控装置。测控装置进行采样值的接收处理, 并接收位于站控层的通信控制器或当地后台的遥控命令。断路器的合闸操作需要进行同期判断, 如果条件满足, 通过过程层以太网按照通用面向对

象的变电站事件 (GOOSE)^[5] 报文协议输出控制命令至过程层的智能控制终端后, 进行断路器合闸操作。

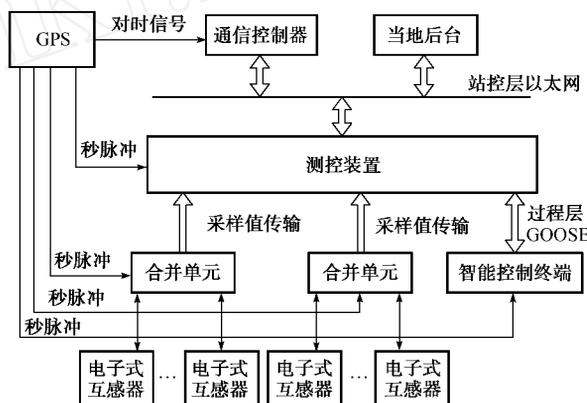


图 1 数字化变电站自动化系统局部结构框图
Fig.1 Partial structure diagram of digitalized substation

根据功能需要, 测控装置可接入 1 个或多个合并单元, 如果断路器两侧有多个电压输入, 需要切换同期电压, 测控装置可以根据智能控制终端通过 GOOSE 网输入的隔离刀闸位置对同期电压按照“近区电压优先”的原则进行切换。

全球定位系统 (GPS) 是数字化变电站中重要的对时设备, 对实现数字化系统的同期功能具有重要作用。由于交流采样不是测控装置直接完成, 采样值的传输有一定延时, 进行同期判断时需要考虑该延时。为保证同期功能的准确, 测控装置和合并单元必须接入秒脉冲, 进行时间同步。

2 同期功能的实现

数字化变电站测控装置不同于传统测控装置,

收稿日期: 2009-01-13; 修回日期: 2009-03-04。

其交流采样不是自己直接完成,而是由合并单元和电子式互感器完成。控制输出不是直接通过继电器输出,而是通过以太网输出 GOOSE 合闸报文,利用智能控制终端进行合闸。其同期功能框图如图 2 所示,需要经过采样值接收、采样值异常处理、数字滤波、重采样、交流量计算、同期判断、GOOSE 合闸命令输出等流程。



图 2 测控装置同期功能流程框图

Fig. 2 Flow diagram of synchronization function in measurement and control device

2.1 采样值接收

合并单元按照 IEC 61850-9-1^[6] 标准,通过以太网将采样值传输至间隔层测控装置。被 IEC 61850-9-1 引用,在 IEC 60044-8^[7] 中定义的采样值传输的通用数据集内容如表 1 所示。

表 1 IEC 60044-8 定义的通用数据集内容
Table 1 Contents of the universal data set based on the specification in IEC 60044-8

ASDU 通用数据集	字节数	ASDU 通用数据集	字节数
ASDU 报头	2	额定延时	2
逻辑节点名	1	采样值 1~12 通道	24
数据集名	1	状态字 1	2
逻辑设备名	2	状态字 2	2
额定相电流	2	采样计数器	2
额定零序电流	2	采样速率	1
额定相电压	2	配置版本号	1

注:ASDU 为应用服务数据单元。

通用数据集中编排了包含断路器两侧电压在内的 12 个通道的采样值,类型为 16 位整数。通用数据集的状态字 1、状态字 2 的各个数据位分别表示合并单元的工作状态和各个数据通道的状态。当合并单元工作异常或某通道的数据异常时,对应数据位将会置位。采样计数器表示该帧采样值在 1 s 采样值序列中的序号。合并单元的采样速率在通用数据集中占用 1 个字节,它表示合并单元的交流采样频率,目前一般为 $80 f_r$, $100 f_r$, $200 f_r$ 等(f_r 为电网额定频率,一般为 50 Hz),采样频率是固定不变的。

测控装置采样值通信接口模块接收采样值并将其传送至下一模块进行处理。

2.2 采样值异常处理

采样值数据可能发生异常情况,此时数据集中对应的状态字会被置位。电子式互感器与合并单元之间的通信可能有丢包情况发生,合并单元与测控

装置间的以太网通信也可能有丢包情况发生。通常情况下,测控装置能够收到合并单元发送的正确的采样值,但在目前的技术条件下,电子式互感器输出的采样值异常情况和网络丢包情况还是时有发生。如果装置持续无法收到正常的采样值时,装置可以退出同期模块,并告警。如果接收的采样值偶尔发生丢点或异常时,为保证同期功能的正常实现,装置可以对采样值进行数据补充。Lagrange 插值具有实时性强、计算量小的优点。本文采用二次 Lagrange 算法对偶尔发生的采样值异常或丢点情况进行数据补充。

考虑输入信号含有谐波分量,设原始模拟信号为:

$$x(t) = \sum_{k=0}^N A_{km} \sin(2kf_0t + \phi_k) \quad (1)$$

式中: f_0 为系统基波频率。

设 f_s 为合并单元采样频率, T_s 为对应的采样周期,一般 f_s 远大于 f_0 。当收到的第 n 点数据异常或未收到第 n 点数据时,采样值处理模块将等待第 $n+1$ 点数据,并用第 $n-2, n-1, n+1$ 这 3 点数据采用二次 Lagrange 插值方法对第 n 点数据进行插值,其插值公式如下:

$$x(n) = -\frac{1}{3}x(n-2) + x(n-1) + \frac{1}{3}x(n+1) \quad (2)$$

按照式(2)对个别丢数或坏数进行数据补充,其误差可以用插值余项进行估计。利用二次 Lagrange 插值余项估计插值点的插值误差为:

$$|R_2| = \frac{|x^{(3)}(\xi)|}{3} T_s^3 = \frac{1}{3f_s^3} \sum_{k=1}^N A_{km} (2kf_0)^3 \quad (3)$$

式中: $\xi \in ((n-2)T_s, (n+1)T_s)$ 。

由式(3)可知,随着采样频率的提高,插值误差迅速降低。目前 f_s 一般为 f_r 的 100 倍~200 倍。按照最保守的估计,如果输入信号只有基波信号,采样频率为 $100f_r$ 时,采用该方法,插值误差小于 0.08%。如果信号含有一定幅度的高次谐波,当合并单元的采样频率较高时,插值误差也较小。

2.3 数字滤波

由于目前电子式互感器的采样频率较高,信号频带较宽。IEC 60044-8 标准中规定:对于包含数字数据传输的互感器,制造厂应规定无虚假频率测量的最高频率,此频率称为 f_a 。它是互感器能够测量和正确传输的最高频率。对于数字输出型互感器, f_a 通常是所用输出数据速率的一半。位于间隔

层的测控装置需要测量 2 次 ~ 13 次谐波分量,而同期功能只关心电压基波分量。为防止信号高次谐波对同期功能的影响,需要设计数字滤波器对输入信号进行数字滤波处理。

2.4 重采样

现在测控装置一般采用傅里叶算法进行电压、电流量的计算。合并单元的采样频率固定不变,不随电压信号的频率改变。直接采用原始采样值进行离散傅里叶变换运算,计算量较大,而且会出现频谱的栅栏效应和频谱泄露现象^[8-9],造成测量误差。文献[10]介绍了采用线性 Lagrange 插值法进行采样值重采样的方法,具有原理简单、计算快速、实时性高的优点,在合并单元采样频率不是太低的条件下,插值精度满足同期功能的需要。装置采用数字方法计算信号频率,采用文献[10]介绍的方法,对采样值进行频率跟踪重采样。重采样频率为每周期 64 点,将原始信号抽取为每周期 64 点的信号,然后采用傅里叶算法进行幅值和相位计算,并根据断路器两侧电压的相位计算两侧电压相位差。

2.5 同期点预报

目前变电站自动化系统的同期功能一般采用恒定越前时间的同期原理进行同期合闸,即在断路器两侧电压的相角差为 0°之前的一定时间发出合闸信号,当断路器的主触头闭合时,断路器两侧电压的相角差为 0°,对电网或机组的冲击最小。

从有同期功能的测控装置发出合闸信号到断路器主触头闭合所经历的时间是断路器的合闸导前时间。数字化变电站自动化系统的合闸导前时间主要包括 GOOSE 网络协议传输时间、智能控制终端动作延时和断路器合闸时间,这些时间一般是固定的,可以由定值预先设定。

目前准同期装置一般按照式(4)推算出理想合闸越前相角^[11-12],装置不断监测断路器两侧电压的相角差,当测量的相角差和理想合闸越前相角几乎相等时发出合闸信号。

$$\gamma = \gamma_{DL} + \frac{1}{2} a_s t_{DL}^2 \quad (4)$$

式中: t_{DL} 为预先设定的断路器合闸导前时间; γ 为计算点的滑差角速度; a_s 为滑差角加速度。

一般利用断路器两侧的瞬时频率差计算 γ ,或使用最近测量的 2 次相角差的差分近似计算 γ ,然后利用相隔数点的 γ 进行差分,近似计算出 a_s 。

由于同期合闸时频率可能会有变化,在频率变化条件下瞬时频率很难精确测量。而且由于数字化变电站交流采样由过程层的合并单元和电子式互感

器完成,其输入间隔层测控装置的采样值可能有异常情况或网络丢包情况,虽然本文采用了插值方法进行数据的补充,但仍然可能出现个别数据测量误差较大,从而造成个别 γ 误差较大。采用差分方法计算 γ 和 a_s 时,利用的测量信息较少,误差较大。由于 γ 和 a_s 存在测量误差,个别测量值的误差可能较大,采用式(4)计算出的导前相角可能误差较大。

结合数字化变电站新的特点,本文采用最佳平方逼近方法,充分利用装置测量信息,对断路器两侧电压的相位差的变化建立数学模型,根据模型进行同期点预报。

装置首先每隔一定时间 T_0 (一般为 2 ms ~ 5 ms)对断路器两侧的相角差进行测量计算,取最新的 n 点的相角差 γ_i ,按先后顺序,形成 n 点相角差序列 $\gamma = \{\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_{n-1}\}$,其中 γ_{n-1} 为根据最新接收的采样值数据测量出的断路器两侧相位差。对断路器两侧电压相位差建立关于时间坐标的二次多项式数学模型:

$$\hat{\gamma}(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \quad (5)$$

根据相角差序列 γ ,对式(5)中的 a_0, a_1, a_2 进行逼近,使 $\sum_{i=0}^{n-1} (\hat{\gamma}(t) - \gamma_i)^2$ 取最小值,最大限度地降低测量误差对同期功能的影响,获得最佳的多项式系数。

由于 γ_{n-1} 为最新测出的当前时间的断路器两侧相角差,设此时为 0 时刻,即该时刻 $t=0$ 。定义 3 个 f 序列分别为: $f_0(i) = 1, f_1(i) = (i+1-n)T_0, f_2(i) = [(i+1-n)T_0]^2$ 。其中: $i=0, 1, \dots, n-1; T_0$ 为 2 次计算相角差间的固定时间间隔。

$$\text{定义内积空间为: } (f, g) = \sum_{i=0}^{n-1} (f(i)g(i))。$$

构建如下正规方程组:

$$\begin{bmatrix} (f_0, f_0) & (f_0, f_1) & (f_0, f_2) \\ (f_1, f_0) & (f_1, f_1) & (f_1, f_2) \\ (f_2, f_0) & (f_2, f_1) & (f_2, f_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\gamma, f_0) \\ (\gamma, f_1) \\ (\gamma, f_2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

求取该方程组的解,即可求得最佳的 a_0, a_1, a_2 。由于方程组的系数矩阵都为常数,可以离线计算完成。实际运行时装置只需要计算 3 个 (γ, f_i) ,并求解 1 个三元一次方程组,计算量并不太大。

由于采样值传输需要时间,计算点的采样值并不是当前绝对时间的采样值,在获得相位差的数学模型后,进行合闸时机计算时除了需要考虑断路器合闸导前时间 t_{DL} ,还需考虑采样值从合并单元传输至测控装置的时间延时。由于测控装置和合并单元

都接入了 GPS 输出的秒脉冲,测控装置和合并单元具有准确的当前时间。合并单元输入的采样值数据集包含采样值的采样频率和采样计数器。测控装置可以根据该信息计算出当前接收的采样值的绝对时间,并用测控装置的当前时间减去该时间获得采样值传输延时 t_{SV} 。将采样值传输延时 t_{SV} 与断路器合闸前时间 t_{DL} 的和代入式(5),即可计算出装置在当前时间发出 GOOSE 合闸命令,经过 t_{DL} 时间后断路器两侧的相角差。如果计算出的相角差几乎为 0° ,同时满足其他同期闭锁条件,则可以发出合闸脉冲。如果计算出的相角差绝对值大于允许合闸相角,则继续进行同期点捕捉。

该方法克服了传统方法只利用个别点的测量数据进行同期合闸参数的计算,造成参数计算容易受测量误差影响的缺点,可以充分利用测量数据,对断路器两侧相位角的变化规律进行最佳逼近,最大限度降低测量误差对同期预报的影响,计算出最佳的合闸时机。而且该方法充分考虑了采样值的传输延时,降低了同期点预报的误差。采用 MATLAB 对该方法进行仿真,在输入信号中加入干扰,经验证,该方法可以大幅减低干扰对同期点预报的影响,适合在数字化测控装置中使用。

3 应用

该数字化同期方案充分考虑了数字化变电站自动化系统的特点,考虑了采样值偶尔异常、采样值的传输延时、GOOSE 输出延时等情况,采用数字算法降低了采样值异常对同期功能的影响,提高了同期点预报的准确性。已在新型数字化变电站测控装置中采用该方案实现断路器的准同期合闸功能,并按图 1 构建测控系统,进行同期功能的实验。经实验室验证,在采样值数据正常或偶尔个别采样值数据异常时,系统都能正确完成准同期合闸功能。目前按该方案构建的系统已经在国内的数字化变电站投入运行,经现场验证,同期功能完全满足应用要求。

参考文献

- [1] 潘书燕,曹团结,陈永华.在线路测控单元中实现的准同期功能.继电器,2003,31(12):58-60.
PAN Shuyan, CAO Tuanjie, CHEN Yonghua. Necessity of the quasi-synchronization functions in the line monitor and control unit. Relay, 2003, 31(12): 58-60.
- [2] 周斌,鲁国刚.具有检同期合闸功能的变电站测控装置.电力自动化设备,2004,24(1):91-93.
ZHOU Bin, LU Guogang. Substation measuring and control device with synchronization function. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(1): 91-93.
- [3] 黄智宇,段雄英,张可畏,等.电子式高压互感器数字接口的设计及实现.电力系统自动化,2005,29(11):87-90.
HUANG Zhiyu, DUAN Xiongying, ZHANG Kewei, et al. Design and realization of digital interface of electronic high voltage instrument transducer. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11): 87-90.
- [4] 李九虎,郑玉平,古世东,等.电子式互感器在数字化变电站的应用.电力系统自动化,2007,31(7):94-98.
LI Jiuhu, ZHENG Yuping, GU Shidong, et al. Application of electronic instrument transformer in digital substation. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 94-98.
- [5] IEC 61850-2 Communication networks and systems in substations, Part 2: glossary. 2005.
- [6] IEC 61850-9-1 Communication networks and systems in substations, Part 9-1: Specific communication service mapping (SCSM): Sampled values over serial unidirectional multidrop point to point link. 2005.
- [7] IEC 60044-8 Instrument transformers: Part 8 Electronic current transformers. 2002.
- [8] 张伏生,耿中行,葛耀中.电力系统谐波分析的高精度 FFT 算法.中国电机工程学报,1999,19(3):63-66.
ZHANG Fusheng, GENG Zhongxing, GE Yaozhong. FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in power system. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 63-66.
- [9] 赵文春,马伟明,胡安.电机测试中谐波分析的高精度 FFT 算法.中国电机工程学报,2001,21(12):83-87,92.
ZHAO Wenchun, MA Weiming, HU An. FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in the electric machine. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 83-87, 92.
- [10] 周斌,鲁国刚,黄国方,等.基于线性 Lagrange 插值法的变电站 IED 采样值接口方法.电力系统自动化,2007,31(3):86-90.
ZHOU Bin, LU Guogang, HUANG Guofang, et al. A sampled values interface method in substation IED based on the linear Lagrange interpolation algorithm. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3): 86-90.
- [11] 彭晓涛,王少荣,程时杰.高性能微机自动准同期装置.电力系统自动化,2002,26(9):75-77.
PENG Xiaotao, WANG Shaorong, CHENG Shijie. A high performance microprocessor-based automatic quasi-synchronization device. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(9): 75-77.
- [12] 邓振利,姜杰,唐昆明,等.基于双处理器的自动准同期装置设计.继电器,2006,34(21):46-48,73.
DENG Zhenli, JIANG Jie, TANG Kunming, et al. Design of automation synchronizer based on double microprocessor. Relay, 2006, 34(21): 46-48, 73.

周斌(1970—),男,通信作者,高级工程师,主要研究方向:变电站自动化系统。E-mail:zhoubin@naritech.cn

张斌(1979—),男,工程师,主要研究方向:变电站自动化系统。

闫承志(1979—),男,工程师,主要研究方向:变电站自动化系统。

(下转第 76 页 continued on page 76)

- [3] ANANIAN L G, MILLER K W, TITUS C H, et al. Field testing of voltage transients associated with vacuum breaker no-load switching of a power transformer in an industrial plant. *IEEE Trans on Industry Applications*, 1983, 19(6): 914-919.
- [4] PAAP G C, ALKEMA A A, VAN DER SLUIS L. Overvoltages in power transformers caused by no-load switching. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1995, 10(1): 301-307.
- [5] POPOV M, ACHA E. Overvoltages due to switching off an unloaded transformer with a vacuum circuit breaker. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1999, 14(4): 1317-1326.
- [6] 张懋鲁. 电炉变压器的操作过电压及其抑制. *变压器*, 1995(12): 18-20.
ZHANG Maolu. The operating over voltage and its suppression of the electric furnace transformer. *Transformer*, 1995(12): 18-20.
- [7] 陈维贤, 普铁成, 郑盛琼. 大幅度限制切空载变压器过电压的研究. *中国电力*, 1995(9): 18-22.
CHEN Weixian, PU Tiecheng, ZHENG Shengqiong. Study on largely depressing overvoltage during switching off no-load transformer. *Electric Power*, 1995(9): 18-22.
- [8] 平绍勋. *电力系统内部过电压保护及实例分析*. 北京: 中国电力出版社, 2006.

关永刚(1974—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 主要研究方向: 高压开关智能化与过电压保护。E-mail: guanyg@tsinghua.edu.cn

刘卫东(1961—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 高压开关在线监测与故障诊断, 高压开关操作过电压。

钱家骊(1932—), 男, 教授, 主要研究方向: 高电压技术、高压开关及其智能化。

Mechanism and Application Analysis of Rectification-bridge Type Over-voltage Suppression Equipment

GUAN Yonggang, LIU Weidong, QIAN Jiali, CHEN Shuiming

(State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A rectification-bridge type over-voltage suppression equipment can significantly suppress over-voltage occurred during a no-load electric furnace transformer interrupting. However, the mechanism and application of the equipment have not been systematically analyzed. Based on electromagnetic transient analysis, over-voltage suppression mechanism of the equipment is analyzed. The equipment absorbs electromagnetic energy stored in the circuit with high-capacity electrolytic capacitor after current chopping, and the over-voltage is also limited by small leakage inductance of the transformer winding. In typical condition, the over-voltage can be limited to 1.15 rated. In addition, an estimation formula of over-voltage is derived as well. The main influencing factors, such as short circuit impedance, capacity, chopping current, and terminal-to-earth capacitance of the transformer, to the over-voltage are evaluated. It is concluded that the less the short circuit impedance or the larger the capacity of the transformer, the smaller the over-voltage.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50877038).

Key words: rectification-bridge; over-voltage suppression; no-load transformer; mechanism

(上接第 60 页 continued from page 60)

Realization of Quasi-synchronization Function in Digitalized Substations

ZHOU Bin, ZHANG Bin, YAN Chengzhi

(NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 210003, China)

Abstract: Quasi-synchronous switching is an important function in substation automation system (SAS). With the application of electronic transformers and the popularization of IEC 61850, the solution for quasi-synchronization in a digitalized substation (DS) has considerably changed. A description is made of the implementing scheme for the function including such modules as those of the reception of sampled values (SV), error SV settlement, the re-sampling algorithm, the prediction algorithm of synchronizing point, etc. This scheme has fully considered the transmission delay of SVs and improved the traditional prediction algorithm to meet the application demand in DS. After many laboratory tests and field applications in DSs, the scheme is proved capable of safely and precisely realizing the quasi-synchronization function.

Key words: quasi-synchronization; digitalized substation; electronic transformers; sampled values; re-sampling algorithm; least mean squares approximation