

基于全数字锁相环的电力系统高精度同步时钟

李泽文, 舒磊, 邓丰, 曾祥君, 邓拓夫

(长沙理工大学 智能电网运行与控制湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 提出了一种基于全数字锁相环的电力系统高精度同步时钟实现方法。该方法基于卫星时钟与晶振时钟授时误差互补的特点, 在卫星时钟工作正常时, 利用全数字锁相环使晶振时钟跟踪卫星时钟秒脉冲的相位波动, 实时消除晶振时钟的累积误差; 当卫星时钟失效时, 利用失效前记录的历史分频数据辨识优化分频控制参数, 预测修正晶振时钟的累积误差。仿真实验结果表明, 该方法实现的同步时钟具有随机误差小且累积误差小的优点, 在卫星时钟失效一段时间内仍可保持较高的授时精度, 可为电力系统提供精确时间同步信号。

关键词: 卫星时钟; 数字锁相环; 晶振; 同步时钟; 电力系统; 通信; 同步; 误差

中图分类号: TM 76

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.07.006

0 引言

国产北斗卫星导航系统和美国全球定位系统(GPS)等多种卫星授时系统(下文统称卫星时钟)可提供全天候授时信号, 授时精度高, 且具有广域时间同步性能好、不受地理和气候等条件限制、应用简单等优点^[1-3], 在电力系统广域测量、故障行波定位等领域得到了越来越多的应用。基于卫星时钟的精确时间同步技术受到广泛关注^[4-7]。

虽然卫星时钟有着较高的授时精度和良好的广域时间同步性能, 但在卫星失锁等情况下, 秒脉冲误差可达几十微秒甚至上百微秒^[8-11]; 同时卫星时钟信号在传播过程中会受到各种电磁干扰, 严重时可能导致信号中断; 其精度与稳定性难以满足保护监控等领域的时间同步要求。所以在利用卫星时钟作为广域时间同步源时, 要考虑卫星时钟信号的可靠性问题, 特别是卫星时钟失效后的时间同步精度^[12]。

为了保证时间同步系统的精度与稳定性, 文献[12-13]依据卫星时钟随机误差大、累积误差小与晶振时钟随机误差小、累积误差大的授时误差互补特点, 采用 GPS 信号在线修正晶振秒脉冲的累积误差; 文献[14]提出了北斗卫星与 GPS 互为备用的授时方案, 可提高输出时钟的可靠性; 文献[8, 15]根据卫星时钟与晶振时钟授时误差互补的特点, 提出了一

种利用高精度晶振监测修正 GPS 随机误差的方法, 可实现 GPS 工作正常情况下的秒脉冲误差不超过 100 ns、广域时间同步误差小于 10 ns, 失效 1 h 后的秒脉冲修正误差小于 180 ns; 为进一步提高 GPS 时钟的精度并保证卫星失效后的时钟稳定性能, 文献[16]提出利用数字锁相环改善晶振时钟跟踪 GPS 卫星时钟秒脉冲的性能; 文献[17]考虑了晶振频率漂移等因素造成的时间偏差, 通过相位补偿算法进一步提高了卫星时钟的授时稳定性和精确度。可见, 基于卫星时钟与晶振时钟误差互补的授时方案可有效提高卫星时钟的精度和稳定性, 但现有各方案均存在不足, 如样本数据量较大、忽略了晶振的频率漂移或补偿方案计算较复杂、实时性不够等。

近年来, 锁相环技术得到了快速发展, 通过跟踪输入信号的相位变化, 锁相环可实现精确相位控制。与模拟环相比, 全数字锁相环具有无直流零点漂移、不受温度变化影响、无饱和、可靠性高、抗干扰能力强等优点^[18], 在电力系统领域得到了广泛应用^[19], 其中在电网相位频率测量等方面应用成熟。

为解决电力系统现有同步时钟存在的稳定性等问题, 本文利用全数字锁相环的相位跟踪优势, 改进卫星时钟与晶振时钟互补的授时模型, 并提出了卫星时钟失效后的授时方案, 该方案能有效提高输出时钟的稳定性。

1 时钟误差分析

假定 $C_b(t)$ 为理想时钟, $C_k(t)$ 为本地晶振时钟, $C_i(t)$ 为卫星时钟。3 种时钟的授时特点不同, 其时频变化特性如图 1 所示。

由图 1 可知, 卫星时钟围绕理想时钟波动, 晶振时钟的误差随时间的延长而逐渐增大。由此可知: 晶振时钟具有较大的累积误差与较小的随机误差,

收稿日期: 2015-01-23; 修回日期: 2015-05-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51207013, 51377012); 湖南省重大专项项目(2012FJ1003); 湖南省自然科学基金杰出青年基金资助项目(2015JJ1001); 湖南省教育厅重点项目(14A002); 湖南省高校科技成果产业化培育项目(13CY008)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51207013, 51377012), the Major Projects in Hunan Province(2012FJ1003), the Hunan Province Natural Science Fund for Distinguished Young Scholars(2015JJ1001), the Education Department of Hunan Province Key Project(14A002), the Industrial Cultivation Project of Scientific and Technological Achievements in Hunan Province(13CY008)

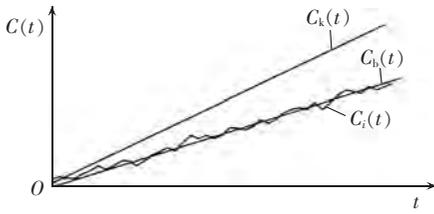


图 1 理想时钟、晶振时钟、卫星时钟的比较
Fig.1 Comparison among ideal, satellite and crystal clocks

而卫星时钟的误差特性则正好相反,2种时钟的授时误差特性互补。

通常情况下,卫星时钟的随机误差具有正态分布特性,卫星接收机型号不同,随机误差存在差异^[8],如 MOTOROLA VP ONCORE GPS 接收机的授时精度为 50 ns, HMWJ/BD3 型北斗接收机的授时精度为 100 ns。卫星时钟随机误差数值越小,成本越高,可采用适当的算法减小卫星时钟的随机误差,以保证时钟装置的经济性。同时,晶振时钟受环境温度和老化等因素影响,会导致秒脉冲出现累积误差,可采用适当的算法加以消除。

由上分析可知,设计先进算法综合利用卫星时钟和晶振时钟的优点,即可产生一种累积误差和随机误差均较小的同步输出时钟。基于全数字锁相环对输出信号相位较强的自动跟踪能力,本文利用全数字锁相环来实现这一目标。

2 同步时钟的工作原理

2.1 系统组成

本文根据晶振时钟和卫星时钟授时误差互补的特点,以卫星时钟秒脉冲的跳变沿(一般选择下降沿)为基准,实时校正晶振秒脉冲的相位,有效消除晶振时钟的累积误差,同时控制随机误差在较小范围内。

基于全数字锁相环的电力系统高精度同步时钟主要由数字鉴相器(DPD)、数字滤波器、卫星状态监测器、脉冲增减控制器、自校正控制器和分频器(DCO)组成。系统构成如图 2 所示。

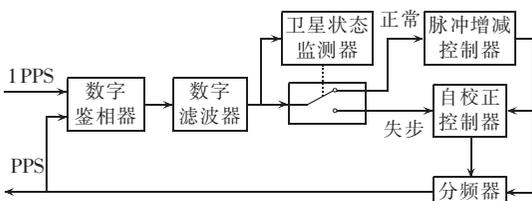


图 2 基于全数字锁相环的同步时钟框图
Fig.2 Block diagram of synchronous clock based on wholly DPLL

数字鉴相器比较 PPS 与 1 PPS 的相位,产生能够表征两者相位超前与滞后关系的输出信号,其输出一般为二值高低脉冲。数字滤波器滤除输入脉冲的

噪声等高频干扰,并产生能表征 PPS 与 1 PPS 之间相位差的脉冲信号。卫星状态监测器在线监测卫星时钟的工作状态,在卫星时钟接收正常时,选择正常工作模式,在卫星时钟接收不正常时,选择失步工作模式。脉冲增减控制器对数字滤波器输出的相位差大小进行判别,产生分频器的分频控制参数 N 。自校正控制器在卫星时钟接收失效后,根据历史数据和晶振时钟的工作特性产生分频器的控制参数 N ,该模块主要利用自校正算法保证卫星时钟失效后的时钟精度。分频器按照分频控制参数 N 对高频晶振脉冲进行分频,产生输出时钟,输出时钟的精度和稳定度由分频控制参数决定。

2.2 工作原理

2.2.1 锁相原理

数字鉴相器比较 1 PPS 与 PPS 的相位关系,当 1 PPS 超前 PPS 时,输出高电平有效脉冲;当 1 PPS 滞后 PPS 时,输出低电平有效脉冲,有效脉冲的宽度就是 1 PPS 与 PPS 的相位差。数字滤波器对输入的相位差脉冲进行滤噪处理,并产生超前相位差信号 up 或滞后相位差信号 down,相位差信号为低电平有效。卫星状态监测器对输入的相位差有效电平进行数字量化,根据量化的相位差大小判别卫星时钟的工作状态:当连续 3 次相位差大于 N_b (根据卫星误差方差值 σ 设定)时,可以认定卫星时钟工作失效,否则认定卫星时钟工作正常。脉冲增减控制器和自校正控制器主要产生分频器的分频控制参数 N ,该部分工作原理详见 2.2.2 和 2.2.3 节。

2.2.2 脉冲增减控制原理

脉冲增减控制器根据相位差信号产生分频控制参数 N 。其基本原理是对数字滤波器输出的相位差大小进行判别,根据判别结果产生增减脉冲,进而产生分频器的分频控制参数 N ,具体实现如图 3 所示。

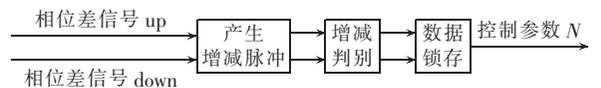


图 3 脉冲控制器结构

Fig.3 Structure of pulse controller

数字滤波器输出的相位差信号 up 的低电平有效信号被工作时钟 f_{clk} 调制成一个减脉冲;相位差信号 down 的低电平有效信号被工作时钟 f_{clk} 调制成一个增脉冲。

根据增减脉冲可以进行增减判别:当卫星时钟秒脉冲的相位滞后于晶振时钟秒脉冲的相位时,产生增脉冲;当卫星时钟秒脉冲的相位超前于晶振时钟秒脉冲的相位时,产生减脉冲。考虑到晶振时钟随机误差小,卫星时钟随机误差较大,而本文方法是要利用数字锁相环原理来消除晶振时钟的累积误差,不需要严格锁定卫星时钟。为避免增大晶振时钟

的随机误差,可规定晶振时钟不能连续 2 次增加或减少分频系数,即晶振时钟随卫星时钟波动,但波动幅度较小。该方法能有效消除晶振时钟的累积误差,同时保持随机误差小的优点,有效保证了输出时钟的时间同步精度。具体的判别方法如下。

a. 当增脉冲有效时,若前一个分频系数 $N_{i-1} \leq N_{\text{clk}}$ (N_{clk} 为标准秒时钟的分频系数,其数值等于系统晶振频率),则 $N_i = N_{i-1} + 1$,对下一个 PPS 实现滞后校正;若前一个分频系数 $N_{i-1} > N_{\text{clk}}$,则 $N_i = N_{i-1}$,不对下一个 PPS 进行校正。

b. 当减脉冲有效时,若前一个分频系数 $N_{i-1} \geq N_{\text{clk}}$,则 $N_i = N_{i-1} - 1$,对下一个 PPS 实现超前校正;若前一个分频系数 $N_{i-1} < N_{\text{clk}}$,则 $N_i = N_{i-1}$,不对下一个 PPS 进行校正。

2.2.3 自校正控制器工作原理

卫星时钟失效后,由自校正控制器根据历史分频数据和晶振的工作特性产生分频器的控制参数 N 。晶振受温度变化和老化等因素影响,在运行较长时间后会产生较大的累积误差。因此需要根据温度变化情况和时间变化实时调整分频控制参数,以消除晶振累积误差对输出 PPS 的精度影响。

在卫星时钟工作正常时,自校正控制器根据脉冲增减控制器产生的分频控制系数 N 和温度、时间、电源电压等参数进行训练,建立时钟误差预测算法模型;在卫星时钟失效后,根据当前的温度值利用自适应预测模型算法预测产生分频控制参数 N 。

晶振累积误差 $\mu(t)$ 表示 PPS 与 1 PPS 从开始时刻到测量时刻累积的时间误差。 t_k 时刻的晶振累积误差为:

$$\mu(t_k) = \mu(t_{k-1}) + \Delta\mu(t_k) \quad (1)$$

晶振的老化时间、测量噪声及温度会对频率稳定性产生影响,由于晶振的老化速率对频率稳定性影响非常小,为了简化模型,将其影响并入噪声影响中。用 α 表示晶振的温度影响系数, $u(k)$ 表示 t_k 时刻测量的晶振温度, $y(k)$ 表示 t_k 时刻的校正信号, $v(k)$ 表示 t_k 时刻的噪声, β 为噪声衰减系数,则 t_k 时刻增加的累积误差可表示为:

$$\Delta\mu(t_k) = \alpha u(k-1) + y(k-1) + v(k) - \beta v(k-1) \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得:

$$\mu(t_k) = \sum_{t=0}^{k-1} [\alpha u(t) + y(t) + v(t+1) - \beta v(t)] \quad (3)$$

假设 $\mu(t_0) = 0$,则卫星时钟失效后 t_k 时刻的分频控制参数 $N(t_k)$ 为:

$$N(t_k) = N_{\text{clk}} - \sum_{t=0}^{k-1} [\alpha u(t) + y(t) + v(t+1) - \beta v(t)] \quad (4)$$

3 同步时钟的性能分析

3.1 卫星时钟工作正常时的时钟精度分析

考虑到本文方法中的数字滤波器与环路滤波器

不同,不会对 2 种时钟的秒脉冲相位差产生影响,卫星状态监测器也不改变环路阶数,故图 2 中高精度同步时钟的数学模型可用图 4 表示。

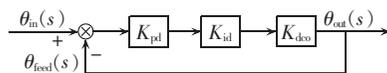


图 4 锁相环的数学模型

Fig.4 Mathematical model of phase-locked loop

图 4 中, K_{pd} 为鉴相器环节的传递函数; K_{cd} 为脉冲增减控制环节的传递函数; K_{dco} 为分频器环节的传递函数; $\theta_{\text{in}}(s)$ 为输入时钟的相位; $\theta_{\text{out}}(s)$ 为输出时钟的相位;反馈信号的相位 $\theta_{\text{feed}}(s)$ 与输出时钟的相位相同。由图 4 锁相环模型可知,输出时钟的相位紧随输入卫星时钟相位的波动而波动。由于卫星时钟与国际标准时间(UTC)之间的误差 τ 服从正态分布 $N(0, \sigma^2)$,其中 σ 为标准差,大小由卫星接收机的性能所决定。所以 PPS 与 UTC 之间的误差 τ' 服从正态分布 $N(0, (\sigma')^2)$ 。令:

$$Z = \frac{\tau'}{\sigma'} \quad (5)$$

则 Z 服从标准正态分布 $N(0, 1)$,如图 5 所示。

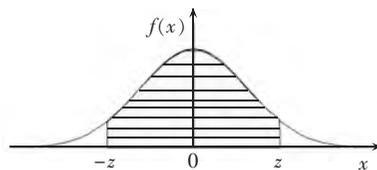


图 5 标准正态分布

Fig.5 Standard normal distribution

标准差 σ' 的大小与晶振频率 f_{clk} 的高低有关, f_{clk} 越高,则 σ' 越小; f_{clk} 越低,则 σ' 越大;其具体数值需根据锁相环对不同频率晶振进行测试得到。为得到较小的标准差 σ' ,提高输出时钟 PPS 的同步精度,需选择时钟周期小于卫星时钟标准差 σ 的晶振,如标准差 σ 为 50 ns,可选 100 MHz 或更高频率的晶振。

3.2 卫星时钟失效后的时钟精度

式(4)提供了分频器的分频控制参数,但需根据历史数据辨识分频模型中的参数。本文方法在卫星时钟工作正常时,利用图 4 所示结构已知而参数未知的模型来描述时钟系统的工作特性,通过比较提前预测值和实际输出值,调整自校正控制器中的分频模型系数,并不断优化系统参数,使实际输出的时钟误差达到最小。

假设卫星时钟在 t 时刻失效,则 t 时刻前的分频系数已知,此时可根据自校正控制中常用的 Diophantine 方程来辨识控制参数模型中的参数。将 Diophantine 方程改写为:

$$\begin{aligned}
 y(t) &= y(t-1) + \varphi(t-1)\theta(t-1) \\
 \varphi(t) &= [y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-n), u(t-1), \\
 &\quad u(t-2), \dots, u(t-m)] \\
 \theta(t) &= [a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_m]^{-1}
 \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $y(t-1)$ 为参考模型输入; a_1, a_2, \dots, a_n 为变量 $y(t)$ 的系数; b_1, b_2, \dots, b_m 为变量 $u(t)$ 的系数。

式(6)与式(2)相似,故可采用自控制算法辨识分频控制模型中的参数 α 和 β ,从而可用式(4)所示分频控制模型计算分频控制参数。只要样本数据足够,即卫星时钟工作正常时间足够, α, β 就能得到充分优化,使实际输出时钟的误差方差达到最小。

由上分析可知,输出时钟存在一定的随机误差,其大小取决于晶振频率的高低,晶振频率越高,输出时钟的随机误差越小;同时输出时钟的累积误差受锁相环控制,在较长时间后也会逐渐趋于零。

4 仿真验证

为验证本文方法,笔者基于图 4 所示全数字锁相环模型,利用 MATLAB 仿真软件进行了一系列仿真实验。实验中采用均值为零的随机函数模拟产生卫星时钟的随机误差, $\sigma = 50 \text{ ns}$; 晶振频率为 500 MHz , 频率精度为 10^{-9} , 频率稳定度为 10^{-11} 。实际应用时可选用 25 MHz 高精度晶振,经过现场可编程门阵列(FPGA)倍频到 500 MHz 。假定晶振温度恒定为 $50 \text{ }^\circ\text{C}$, 并采用高频脉冲信号模拟噪声干扰。

实验分成卫星时钟工作正常时的对比实验和卫星时钟工作失效后的对比实验。实验开始时,卫星时钟工作正常,实验 2 h 后,卫星时钟失效。卫星时钟工作正常时,采用脉冲增减控制器输出的分频系数产生输出时钟,结果如图 6 所示,图中的局部放大部分对应 8 h 后 480~500 s 的波形。卫星时钟失效后,采用自校正控制器计算的分频系数产生输出时钟,结果如图 7 所示。

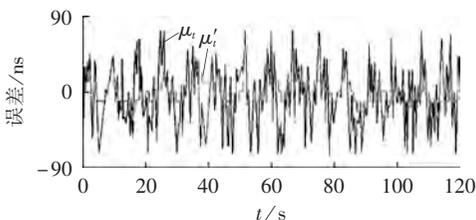


图 6 卫星时钟正常时的时钟误差情况

Fig.6 Clock error when satellite clock works properly

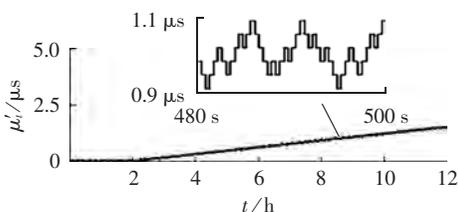


图 7 卫星时钟失效后的时钟误差

Fig.7 Clock error when satellite clock works improperly

图 6 中, μ_i 为卫星时钟误差, μ'_i 为模拟产生的输出时钟误差。从图 6 中可以看出,输出时钟的误差跟踪卫星时钟误差的波动而波动,但波动幅度要小,说明本文方法产生的同步时钟同时具有累积误差小与随机误差小的优点。从图 7 可以看出,在卫星时钟失效后,输出时钟的误差逐渐累积增大,但在一定时间内其精度仍可满足电力系统保护控制等领域的需求。

由实验结果可见,本文方法利用全数字锁相环,可将卫星时钟累积误差小与晶振时钟随机误差小的优点有效结合,产生同时具有累积误差小与随机误差小优点的高精度同步时钟。在实际应用中为提高卫星时钟失效后的时钟精度,应尽可能保证环境温度恒定,使高精度晶振有足够的长期稳定度。

5 结论

利用卫星时钟与晶振时钟授时误差互补的特性,结合全数字锁相环的相位跟踪原理,提出了一种基于全数字锁相环原理的电力系统高精度同步时钟实现新方法。该方法在卫星时钟工作正常时,利用全数字锁相环使晶振时钟秒脉冲跟踪卫星时钟秒脉冲波动,实时消除晶振时钟的累积误差;在卫星时钟失效后,利用失效前的分频数据辨识优化分频控制参数,预测消除晶振时钟的温漂等累积误差。该方法产生的同步时钟具有精度高和稳定性好等优点,有望广泛应用于故障行波定位等对时钟同步性能要求高的电力系统保护控制领域。

参考文献:

- [1] LEWANDOWSKI W, PETIT G, TH OMADS C. Precision and accuracy of GPS time transfer[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1993, 42(2): 474-479.
- [2] SAMER S S, ZAHER M K. Power matching approach for GPS coverage extension[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(2): 156-166.
- [3] 陈孟元, 陈跃东. 基于高精度晶振同步北斗 1 pps 的同步相量测量装置时钟源[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(9): 111-114. CHEN Mengyuan, CHEN Yuedong. Beidou 1 pps corrected by high-precision crystal oscillator for PMU[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9): 111-114.
- [4] 王慧芳, 何奔腾. 利用状态量信息的集合保护规范化判据研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 81-86. WANG Huifang, HE Benteng. Study on normative criterion for aggregate protection based on digital information[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 81-86.
- [5] 石颀, 王成山. 考虑广域信息时延影响的 H_∞ 阻尼控制器[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 30-34. SHI Jie, WANG Chengshan. Design of H_∞ controller for damping inter area oscillations with consideration of the delay of remote signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 30-34.
- [6] CHEN Jiongcong, ZHANG Daojie, GAO Xinhua. Research of Beidou system in electric power system time service[C]//China Interna-

- tional Conference on Electricity Distribution. Guangzhou, China; [s.n.], 2008; 1-5.
- [7] 陆超, 谢小荣, 吴小辰, 等. 基于广域测量系统的电力系统稳定控制[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(2): 20-27.
LU Chao, XIE Xiaorong, WU Xiaochen, et al. Power system stability control based on wide area measurement system [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2009, 24(2): 20-27.
- [8] 曾祥君, 尹项根, LI K K, 等. GPS 时钟在线监测与修正方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 41-46.
ZENG Xiangjun, YIN Xianggen, LI K K, et al. Methods for monitoring and correcting GPS-clock [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 41-46.
- [9] ANDREA C, NICOLA L, CARLO M. GPS-based system for the measurement of synchronized harmonic phasors [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(3): 586-593.
- [10] KEITH E H, GERALD T H, NI Hui. Use of satellite technologies for power system measurements, command and control [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 947-955.
- [11] HAO Jun, GUO Shuxia. The study of dual frequency ionospheric error correction method and accuracy analysis based on GPS [C]//2011 IEEE International Conference on ICSPCC. Xi'an, China: IEEE, 2011: 1-4.
- [12] CHEN Kai, LIU Shubin, AN Qi. A high precision time-to-digital converter based on multi-phase clock implemented within field-programmable-gate-array [J]. Nuclear Science and Techniques, 2010, 21(4): 123-128.
- [13] 李泽文. 时差型电网故障行波定位与广域行波保护方法研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2010.
LI Zewen. Research of traveling wave time difference based power network fault location and wide-area traveling wave protection method [D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [14] 李建, 谢小荣, 韩英铎, 等. 北斗卫星导航系统与 GPS 互备授时的分布式相量测量单元 [J]. 电网技术, 2005, 29(9): 1-4, 9.
LI Jian, XIE Xiaorong, HAN Yingduo, et al. Study on distributed PMU for synchronous phasor measurement using mutually backup synchronization signals from both Beidou satellite navigation system and global positioning system [J]. Power System Technology, 2005, 29(9): 1-4, 9.
- [15] 曾祥君, 尹项根, 林干, 等. 晶振信号同步 GPS 信号产生高精度时钟的方法及实现 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 49-53.
ZENG Xiangjun, YIN Xianggen, LIN Gan, et al. Clock of high accuracy implemented by crystal oscillator in synchronism with GPS-clock [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 49-53.
- [16] 李泽文, 姚建刚, 曾祥君, 等. 基于数字锁相原理的 GPS 高精度同步时钟产生新方法 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 82-86.
LI Zewen, YAO Jiangang, ZENG Xiangjun, et al. New method of generating GPS high accuracy synchronous clock based on the digital phase-lock principle [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 82-86.
- [17] NAOTO K, MASAHIRO S, TOHRU M, et al. Monitoring of interarea oscillation mode by synchronized phasor measurement [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 260-268.
- [18] 李亚斌, 彭咏龙, 李和明. 自采样比例积分控制全数字锁相环的性能分析和实现 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 64-69.
LI Yabin, PENG Yonglong, LI Heming. The implementation and analysis of a self-sampling PI control all digital phase-locked loop [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18): 64-69.
- [19] 古俊银, 廖茂宇, 陈国呈. 一种高效的非线性电网数字锁相环 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(33): 53-58.
GU Junyin, LIAO Maoyu, CHEN Guocheng. A high efficient non-linear digital phase locked loop for grid-connected inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(33): 53-58.

作者简介:



李泽文

李泽文(1975—), 男, 湖南常德人, 副教授, 博士, 主要研究方向为电力系统保护与控制 (E-mail: lzw0917@163.com);

舒磊(1991—), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统保护与控制 (E-mail: 5006814@qq.com);

邓丰(1983—), 女, 湖南长沙人, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统保护与控制 (E-mail: dengfeng10170415@126.com);

曾祥君(1972—), 男, 湖南邵阳人, 教授, 博士后, 主要研究方向为电力系统保护与控制 (E-mail: eexjzeng@hotmail.com);

邓拓夫(1988—), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统保护与控制 (E-mail: 113107671@qq.com)。

Wholly DPLL-based synchronous clock with high precision for electric power system

LI Zewen, SHU Lei, DENG Feng, ZENG Xiangjun, DENG Tuofu

(Hunan Province Key Laboratory of Smart Grids Operation and Control, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: An implementation method of synchronous clock with high precision based on wholly DPLL (Digital Phase-Locked Loop) is proposed, which is based on the complementation between satellite clock and crystal clock; when the satellite clock works properly, the crystal clock follows the “second” pulse phase fluctuation of satellite clock by the wholly DPLL to eliminate the accumulated error of crystal clock in real time; when the satellite clock works improperly, the historic frequency-division data are used to identify and optimize the frequency-division control parameter for predicting and correcting the accumulated error of crystal clock. Simulative results show that: the synchronous clock implemented by the proposed method has both small random error and small accumulated error, keeps higher timing precision for a certain period after the satellite clock fails, and provides precise synchronization signals for power system.

Key words: satellite clock; DPLL; crystal; synchronous clock; electric power systems; communication; synchronization; errors