

DOI: 10.7667/PSPC151673

基于遗传算法与PID原理的IEEE1588从时钟同步研究

李德新, 钟俊

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 高精度的时钟同步技术是电力系统稳定运行的前提。环境温度对时钟同步设备精度会造成严重影响。在IEEE1588协议原理的基础上, 提出一种基于遗传算法和PID控制原理的从时钟自适应误差修正方法。建立PID控制模型, 将从时钟函数模型作为被控对象, 以从时钟与理想时钟源之间的差值为系统误差, 采用时间乘平方误差积分准则(ITSE)作为目标函数。通过遗传算法对PID的三个参数进行遗传操作, 进而达到PID优化, 实现自适应修正从时钟时间误差的目的。Matlab仿真结果表明, 该方法在不同的温度环境下均具备很好的自适应能力, 同步精度达到1 ns。

关键词: IEEE1588; 时钟同步; 遗传算法; PID控制; ITSE

Research on IEEE 1588 slave time synchronization based on genetic algorithm and PID control theory

LI Dexin, ZHONG Jun

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The clock synchronization technology with high precision plays an important part on the power system stability. The environment temperature will cause serious influence on the precision of clock synchronization equipment. On the basis of the principle of IEEE1588 protocol, this paper puts forward a kind of method called slave clock adaptive error correction, which is based on genetic algorithm and PID control principle. When the PID control model is built, the slave clock function model is used as the controlled object, and the difference between slave clock and ideal clock source is regarded as the system error, then the ITSE is taken as an objective function. A genetic operation is laid on the three parameters of PID by the way of genetic algorithm. Furthermore, the PID is optimized. Finally, the goal of adaptive correction for slave clock time error is achieved. The results from Matlab simulation show that this method has good adaptive ability under different temperature conditions and the precision of the synchronization can reach up to 1ns.

Key words: IEEE1588; time synchronization; genetic algorithm; PID control; ITSE

0 引言

时钟同步技术是电力系统中的关键技术之一^[1]。变电站的运行控制和故障分析必须建立在统一的时间基准上, 才能保证数据采集的正确性、高效性、可靠性。随着我国电网规模的不断扩大, 系统日益复杂, 信息化、数字化成为国内电网的发展趋势^[2-6]。因此, 对时钟同步技术提出了更严格的精度要求。

目前, 电力系统中主要有IRIG-B码、NTP协议、SNTP协议、IEEE1588协议等时钟同步解决方案。IRIG-B技术采用编码同步方式, 精度可达1 ms。

其弊端主要有: 1. 同步精度受传输距离影响。2. 设备间的信号传输通过电缆实现, 同步链路容易中断, 可靠性较差。故主要应用于变电站中二次系统设备; SNTP和NTP技术均采用报文同步技术, 在局域网精度可以达到1 ms, 但是在广域网精度只有几十毫秒, 并不能适用所有电力系统设备^[7-8]。

IEEE1588协议是电力系统中时间同步技术的发展趋势^[9]。其主要特点是高精度(精度达到亚微秒)、易维护、低成本。由于需要硬件资源的支持, 因而设备噪声、元器件温度和晶振本身老化等因素都会对同步过程产生影响。受此影响, IEEE1588的从时钟频率与主时钟频率会产生相对的漂移偏差, 该偏差会随着时间的增加不断累积, 最终导致从时钟计时远远偏离主时钟计时。为了消除主从时

钟间的频率偏差, 目前的电力设备的时钟模块普遍采用恒温晶振来实现。恒温晶振模块是通过保持恒温箱的温度恒定在高于环境温度的高温状态下, 使晶振的工作温度恒定, 保证频率稳定。但是在高温情况下晶振老化较快, 一旦出现较大的频率漂移将造成严重的误差累积, 其与普通晶振模块相比, 体积庞大且成本较高^[10]。本文采用普通晶振, 结合遗传算法和PID控制原理自适应地修正主从时钟间的误差, 保证时钟始终工作于高精度状态。

1 IEEE1588 协议工作原理

IEEE1588 的全称是“网络测量和控制系统的精密时钟同步协议标准”, 广泛应用于自动化控制领域。一个 IEEE1588 精确时钟系统包括普通时钟、透明时钟和边界时钟^[11-12]。系统中的时钟工作在主时钟、从时钟和无源时钟三种状态。具体的时钟状态则是由最佳主时钟(Best Master Clock)算法所确定的。IEEE1588 主要通过同步报文 (Sync)、延迟请求报文(Delay_Req)、同步跟随报文 (Follow_Up)、延迟应答报文(Delay_Resp)来实现主时钟与从时钟同步。工作原理如图 1 所示。

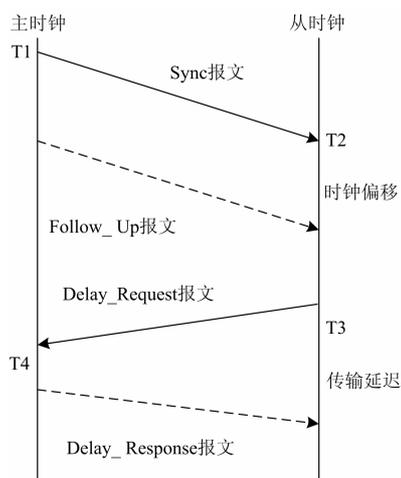


图 1 IEEE1588 协议对时过程

Fig. 1 IEEE1588 protocol process of clock synchronization

T_1 时刻主时钟向从时钟发送 Sync 报文; T_2 时刻从时钟接收到该报文。 T_3 时刻从时钟发送 Delay_Req 报文; T_4 时刻主时钟接收到该报文。设主从时钟之间的时间偏差为 Offset, Sync 报文传输延迟和 Delay_Req 报文传输延迟相等, 并且两个阶段主从时间差没有发生变化, 则可得出以下表达式:

$$Delay = \frac{1}{2}[(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)] \quad (1)$$

$$Offset = \frac{1}{2}[(T_4 - T_3) - (T_2 - T_1)] \quad (2)$$

最后从时钟根据式(1)和式(2)计算得到的 Offset, 通过调节算法来修正从时钟的时间, 从而实现与主时钟的时钟同步。

2 误差估计模型的建立

主时钟一般是一个准确的参照时钟源。从时钟的计时依赖系统的本地晶振, 晶振的振荡频率与其材料、形状、切割方向有密切联系。由于环境温度、晶振自身老化等因素的影响, 晶振会产生一定的误差并随时间累积, 从而导致从时钟与主时钟间产生误差偏移, 严重影响同步精度。晶振的自身老化对晶振的频率漂移产生的影响相对缓慢, 而环境温度会对晶振产生实时的影响。硬件设备散热不良会使晶振工作于高温环境中^[13]。因此提高从时钟同步精度的关键在于寻找一种方法能够在宽温度区间特别是高温环境下自适应修正由晶振频率漂移造成的误差。电力设备中常用的两种 AT 切晶振频率漂移与工作环境温度如图 2 所示。

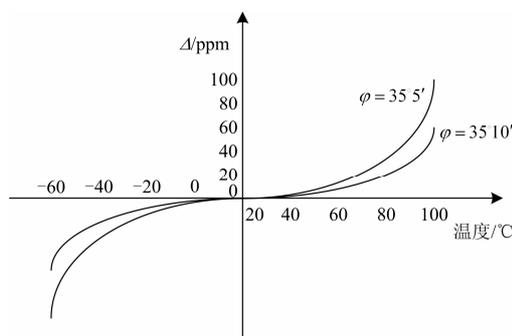


图 2 晶振频率漂移-温度关系曲线

Fig. 2 Drift-temperature curve of crystal frequency

由图 2 知, 从时钟系统中的晶振在不同的温度环境下会有几十甚至上百 ppm 的误差。如切角 $\varphi = 35^\circ 5'$ 的晶振在 100°C 时, 误差达到 100 ppm, 即 1 s 内该晶振最大可能造成 100 μs 的误差。这样的误差对于同步精度要求较高的系统会造成严重的后果。根据从时钟的特点, 设其函数表达式为

$$s(t) = \alpha t + \delta \quad (3)$$

式中: δ 是从时钟的随机误差; 理想情况下 α 恒为 1。不同温度下晶振产生的误差偏移随时间逐渐累积, 从时钟函数斜率会逐渐偏离理想斜率。因此, 将式(3)修正为

$$s(t) = (1 + \beta)t + \delta \quad (4)$$

式中, β 是从时钟函数斜率单位时间内相对于理想函数的偏移量。

由图 3 可知, 在 t_1 时间内, 实际函数相对于理想函数偏移量为

$$\Delta t = (1 + \beta)t_1 + \delta - t_1 = \beta t_1 + \delta \quad (5)$$

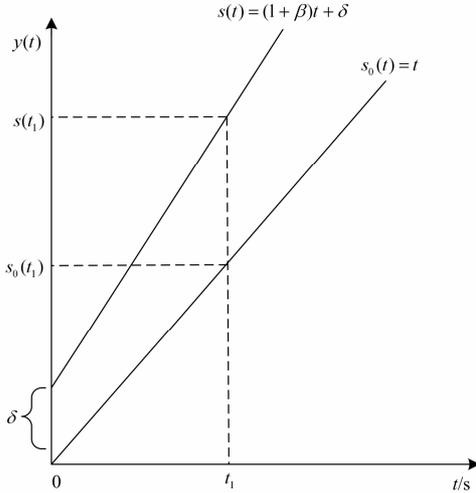


图 3 从时钟实际函数与理想函数

Fig. 3 Actual function and ideal function of slave clock

由此可得, 1 s 内从时钟会产生 $(\beta t_1 + \delta)$ s 的误差。由前文可知由于温度不同, 从时钟 1 s 内会产生 Δ 的频率漂移, 即 1 s 内有 Δ s 的误差。可得:

$$\Delta = \beta + \delta \quad (6)$$

随机误差 δ 由不确定因素引起, 一般为 $1 \mu\text{s}$ 左右, 与 β 相比可以忽略不计。因此, 式(6)可简化为

$$\Delta = \beta \quad (7)$$

结合图 2, 切角 $\varphi = 35^\circ 5'$ 的 AT 切晶振不同温度下 β 的取值如表 1 所示。

表 1 不同温度下 β 的取值

Table 1 Value of β under different temperatures

温度/($^\circ\text{C}$)	-20	20	40	60	80	100
$\beta(10^{-6})$	-30	0	10	25	60	100

3 基于遗传算法的 PID 控制的误差修正方法实现

3.1 PID 控制系统

PID 控制器广泛应用于工业控制领域, 主要包含比例单元、积分单元、微分单元三部分。其函数表达式如式(8)所示。

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

式中: $u(t)$ 表示控制器输出; $e(t)$ 表示系统误差; K_p 是对系统误差信号的加权值; T_i 表示积分时间常数; T_d 表示微分时间常数。

为了使系统具有较快的响应速度, 本文中选取时间乘平方误差积分准则(ITSE)为 PID 控制系统目标函数, 如式(9)所示。

$$ITSE = \int_0^{\infty} t |e(t)|^2 dt \quad (9)$$

式中: t 表示时间; $e(t)$ 表示 PID 控制的系统误差。

3.2 遗传算法优化 PID 参数过程

遗传算法(Genetic Algorithm)是一种并行随机搜索最优化方法。其对 PID 控制器参数优化过程本质上是基于适应度函数的参数寻优问题。

遗传算法优化 PID 控制系统的原理图如图 4 所示^[14-16]。

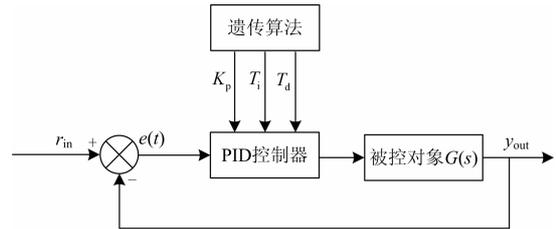


图 4 遗传算法优化 PID 控制系统原理图

Fig. 4 Principle figure of the PID control system optimized by genetic algorithm

图中 y_{out} 为从时钟的输出, r_{in} 为标准时钟源输出(本文将主时钟设为标准时钟源)。 $e(t)$ 为从时钟与标准时钟之间的误差, 即主时钟与从时钟之间的误差。将表达式(4)进行拉普拉斯变换即可得到 PID 控制系统中的被控对象的传递函数:

$$G(s) = \frac{1 + \beta}{s^2} + \frac{\delta}{s} \quad (10)$$

式中, $G(s)$ 即被控对象的传递函数。

遗传算法对 PID 参数优化主要通过以下步骤:

(1) 进行种群的初始化。设种群中的个体为一个三维向量, K_p 、 T_i 、 T_d 为这个三维向量的三个分量。

(2) 设定适应度函数。适应度函数用于表征遗传个体对环境的适应程度^[17-21]。本文的优化目标本质上是求误差的最小值, 故遗传算法的适应度函数可以设为 PID 系统目标函数的倒数, 结合式(9)可得:

$$bestf = \frac{1}{ITSE} \quad (11)$$

式中, $bestf$ 即为遗传算法的适应度函数。

(3) 进行选择操作。采用比例选择法, 即每个个体被选中的概率和其适应度成正比。个体 i 被选中的概率如式(12)所示。

$$P_{is} = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^M F_i} \quad (i=1, 2, 3, \dots, M) \quad (12)$$

式中: P_{is} 表示个体被选中的概率; F_i 表示个体 i 的适应度; M 表示 PID 参数的种群规模。

(4) 进行交叉操作。设第 k 条染色体为 g_k , 第 l 条染色体为 g_l 。 g_k 、 g_l 在 j 位的交叉操作可以用式 (13) 表示。

$$\begin{aligned} g_{kj} &= (1-\lambda)g_{kj} + \lambda g_{lj} \\ g_{lj} &= (1-\lambda)g_{lj} + \lambda g_{kj} \end{aligned} \quad (13)$$

式中, λ 是 $[0,1]$ 区间的随机数。

(5) 进行变异操作。对第 i 个个体的第 j 个基因进行变异操作可以用式 (14) 表示。

$$g_{ij} = \begin{cases} g_{ij} + (g_{ij} - g_{\max}) \cdot f(n), & r \geq 0.5 \\ g_{ij} + (g_{\min} - g_{ij}) \cdot f(n), & r < 0.5 \end{cases} \quad (14)$$

式中: r 是 $[0\sim 1]$ 区间的随机数, g_{\max} 是基因 g_{ij} 的上界; g_{\min} 是基因 g_{ij} 的下界; $f(n) = r_1(1 - n/N_{\max})^2$, r_1 是一个随机数, n 是当前遗传次数, N_{\max} 是最大遗传次数。

4 仿真研究

利用 Matlab 对本文提出的遗传算法优化 PID 参数从而自适应修正从时钟误差的理论进行仿真验证。在遗传算法优化 PID 参数过程中, 设种群规模为 30, 遗传代数设定为 300, 时钟同步周期为 1 s, 仿真时间 300 s。设定主从时钟的初始时间累积误差为 $100 \mu\text{s}$, 即图 5 中的 $e(t)$ 初始值为 $100 \mu\text{s}$ 。 δ 取 10^{-6} , 通过不同的 β 取值来模拟不同温度下的晶振误差偏移。仿真结果如图 5、图 6 所示。

由图 5、图 6 可知, 算法运行到 150 s 后, 误差稳定在 $10^{-3} \mu\text{s}$ (即 1 ns) 以内。

在 80°C 条件下, 与专家 PID 控制法进行对比, 两种方法的误差修正动态过程如图 7 所示。

由图 7 可知: 与专家 PID 控制方法相比, 本文提出的通过遗传算法对 PID 控制参数进行优化从而达到对从时钟误差自适应修正的方法能达到令人满意的效果。在相同条件下专家 PID 控制法对从时钟误差的修正效果明显不如遗传算法控制 PID 的方法。图中, 误差曲线在经过短暂的剧烈震荡后, 逐渐趋于 $50\,000 \mu\text{s}$, 由此可见, 专家 PID 法对从时钟的误差偏移不能有效地进行修正, 从时钟误差依然存在随时间继续累积的可能。

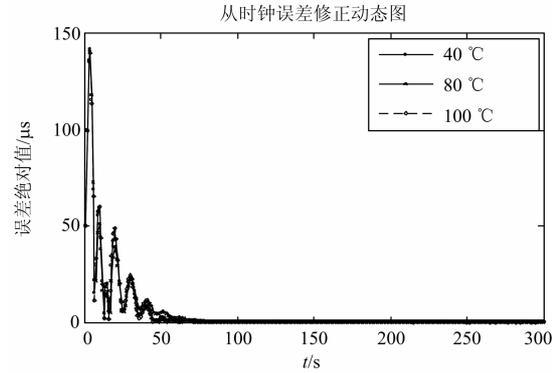


图 5 不同温度下仿真结果

Fig. 5 Simulation results under different temperatures

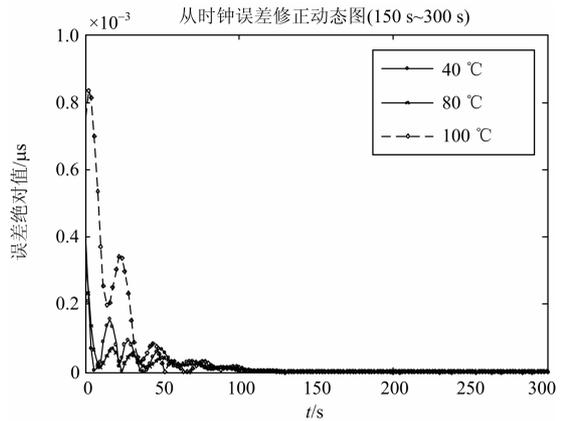


图 6 不同温度下仿真结果 (100~300s)

Fig. 6 Simulation results under different temperatures (150~300 s)

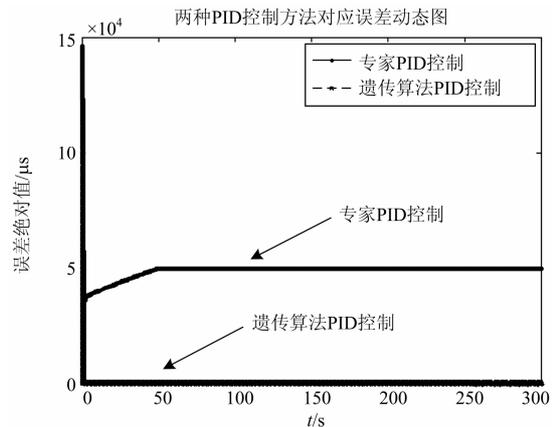


图 7 80°C 下两种算法误差动态对比图

Fig. 7 Dynamic contrast figure of two algorithm errors under 80°C

5 结束语

本文提出一种在 IEEE1588 协议的基础上结合遗传算法和 PID 控制系统从而实现对电力系统设备中从时钟的同步误差进行自适应修正的方法。该方法有以下优点:

(1) 同步精度高。在从时钟选择普通晶振的情况下, 该控制方法可以使同步精度达到 1 ns, 完全可以满足电力系统的需求。

(2) 稳定性好。仿真结果表明, 在不同的环境温度下, 该方法对从时钟晶振的误差偏移均具备令人满意的自适应修正能力。在初始误差 100 μs 情况下, 经过 150 s 的自适应误差修正, 同步误差稳定在 1 ns 以内。

综上所述, 本文提出的从时钟误差修正方法性能较高, 能满足电力系统中不同环境温度下的高精度时间同步要求, 具有一定的实用价值。

参考文献

[1] 刘海峰, 赵永生, 李辉, 等. 基于全站同步时钟扩展装置的智能变电站同步整组试验方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 150-154.
LIU Haifeng, ZHAO Yongsheng, LI Hui, et al. Study on the whole system synchronization testing method based on the clock extended device in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 150-154.

[2] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126, 131.
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2012, 39(24): 123-126, 131.

[3] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.

[4] 姚志清, 刘涛, 张爱玲, 等. 直流融冰技术的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 57-62.
YAO Zhiqing, LIU Tao, ZHANG Ailing, et al. Research & application on DC de-icing technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 57-62.

[5] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.

[6] HAO Zhenghang, YAO Zhiqing, LI Shaohua, et al. The contribution of double-fed wind farms to transient

voltage and damping of power grids[J]. Technical Gazette, 2015, 22(1): 43-49.

[7] 王东亮, 李旭阳, 王洪新. 基于 NTP 协议网络应用时间戳同步机制的研究与应用[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 477-483.
WANG Dongliang, LI Xuyang, WANG Hongxin. Research and application on the timestamp synchronization mechanism of NTP network applications[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 477-483.

[8] 宁楠, 廖晓春, 邓其军, 等. 基于 IEEE1588 的智能变电站多时钟域数据同步技术[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(3): 344-349.
NING Nan, LIAO Xiaochun, DENG Qijun, et al. IEEE1588-based multi-clock domain synchronization in smart substation[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47(3): 344-349.

[9] 贺春, 陈光华, 张道农. IEEE Std 1588-2008 精确时间同步协议行业规范在电力系统的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 133-138.
HE Chun, CHEN Guanghua, ZHANG Daonong. Research on standard profile for use of IEEE Std 1588-2008 precision time protocol in power system applications[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 133-138.

[10] 李友军, 姜雷. 基于温度补偿的对时守时新方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 109-112, 121.
LI Youjun, JIANG Lei. A new high accuracy clock scheme based on temperature compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 109-112, 121.

[11] IEEE Std 1588-2008 IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems[S].

[12] 李俊刚, 刘星, 张爱民, 等. 智能变电站 IEEE1588 时钟同步冗余技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 97-101.
LI Jungang, LIU Xing, ZHANG Aimin, et al. Research on redundant technology of IEEE1588 clock synchronization system in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 97-101.

[13] 陈超. 基于 GPS 的智能变电站高精度时钟设计与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
CHEN Chao. The design and realization of intelligent substation high-precision clock based on GPS[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2014.

[14] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

[15] 牛茆洁, 王玉洁, 唐剑. 基于遗传算法的 PID 控制器参数优化研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(11): 180-182.

- NIU Xiangjie, WANG Yujie, TANG Jian. Optimization parameters of PID controller parameters based on genetic algorithm[J]. Computer Simulation, 2010, 27(11): 180-182.
- [16] 徐奉友, 李朝锋, 陶学军, 等. 一种基于自适应控制算法的光伏发电站自动发电控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 128-131.
- XU Fengyou, LI Chaofeng, TAO Xuejun, et al. A photo-voltaic automatic generation control system based on adaptive control algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 128-131.
- [17] 汪先兵, 费树岷, 徐清扬, 等. BP 神经网络 PID 控制的永磁真空开关储能电容恒流充电特性分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(10): 212-218.
- WANG Xianbing, FEI Shumin, XU Qingyang, et al. Constant current charging characteristic analysis of storage capacitor based on BP neural network PID control for permanent magnet vacuum switch[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(10): 212-218.
- [18] 徐岩, 郅静. 基于改进自适应遗传算法的 PMU 优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 55-62.
- XU Yan, ZHI Jing. Optimal PMU configuration based on improved adaptive genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 55-62.
- [19] 叶满园, 周琪琦, 蔡鸿, 等. 基于多种群遗传算法的多电平逆变器多波段 SHEPWM 技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 111-118.
- YE Manyuan, ZHOU Qiqi, CAI Hong, et al. Multiple population genetic algorithm based on multi-band SHEPWM control technology for multi-level inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 111-118.
- [20] 甘迪, 柯德平, 孙元章, 等. 基于集合经验模式分解和遗传-高斯过程回归的短期风速概率预测[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 138-147.
- GAN Di, KE Deping, SUN Yuanzhang, et al. Short-term wind speed probabilistic forecasting based on EEMD and coupling GA-GPR[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 138-147.
- [21] 樊鹏, 胡叶宾, 卢声, 等. 基于 FPGA 的高对时精度智能终端装置[J]. 电器与能效管理技术, 2015(11): 33-36.
- FAN Peng, HU Yebin, LU Sheng, et al. An intelligent terminal device with high timing accuracy based on FPGA [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(11): 33-36.

收稿日期: 2015-09-18; 修回日期: 2015-12-29

作者简介:

李德新(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为信号与信息处理、Linux 网络; E-mail: ldx400@163.com

钟俊(1972-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统中的信号与信息处理、嵌入式系统。E-mail: zhongjun55@163.com

(编辑 葛艳娜)