

基于时钟状态估计的电力系统广域冗余对时模型

王晓芳^{1,2}, 周有庆², 袁旭龙¹, 黄肇¹

(1. 邵阳学院电气工程系, 湖南 邵阳 422000; 2. 湖南大学电气与信息学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 对晶振时钟、全球定位系统(GPS)时钟、网络对时以及原子钟的性能进行了评述, 在此基础上, 提出了基于时钟状态估计的冗余对时模型。该模型下的时钟装置通过对各时钟的误差状态进行估计, 并根据误差状态选择合理的运行模式, 产生用于各站点内设备对时的统一时钟。时钟装置的秒脉冲时间精度的测试试验结果表明, 在该模型下产生的时钟结合了各种对时时钟的优点, 提高了电力系统广域同步的精确性、稳定性以及可靠性。

关键词: 时钟同步; 状态估计; 全球定位系统; 网络对时

Synchronization redundant model for wide-area power system based on clocks' state estimation

WANG Xiao-fang^{1,2}, ZHOU You-qing², YUAN Xu-long¹, HUANG Zhao¹

(1. Electrical Engineering College, Shaoyang University, Shaoyang 422000, China;

2. Electrical and Information Engineering College, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The clocks generated by crystal oscillator, received via Global Position System(GPS) receiver, rectified by network, and atomic clock are appraised. On this base, A wide-area synchronization redundant model is proposed. The clock equipments work for this model estimate the error of each clock, and choose a appropriate work mode according to the estimated error, to generate a unite clock for the synchronization of devices in the substation. The result of test experimentation for pulses per second(PPS) generated by the clock equipment indicates that the clock generated in this model assembles the strongpoints of each clock, and it will improve the precision, stability and reliability of wide-area synchronization for power system.

Key words: synchronous clock; state estimation; global position system (GPS); network time

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)01-0055-06

0 引言

电力系统时间同步历来是电力行业普遍关注的问题。电力系统的运行自动化系统、故障录波器、微机继电保护、时间顺序纪录装置、系统 AGC 调频、负荷管理、跨大区电网联络线负荷控制、运行报表统计、电网运行设备的操作以及电网发生事故时间等, 都要求电力系统有一个统一的时间标准^[1]。而对时精度以及可靠性直接影响着电力系统运行控制的安全性。现有的常用对时方法中, 均在同步精度、时钟稳定性以及使用成本上各自存在优缺点, 而当前电力系统中对这些对时方法的应用仍然在配置上存在一定的问题, 无法保证时间同步系统的精度和可靠性, 因此基于时间同步测量的控制方法也处于比较薄弱的情况^[2]。因此, 本文在现有的同步对时方法上, 提出了基于时钟状态估计的冗余对时

模型, 旨在提高电力系统同步对时系统的精度和可靠性。

1 各种对时方法性能与应用评述

1.1 晶振时钟评述

用作时钟源的高精度晶振稳定度高, 当前其稳定度已经达到了 ns 级, 因此可以忽略其随机误差。但晶振的频率存在一定的线性偏差^[3], 取其时钟误差模型为:

$$\epsilon_c(k) = a + b \times k \quad (1)$$

其中: a 为时钟的初始误差; b 为因晶振频率线性偏差率; k 为运行时间, 单位为 s。线性累积误差随着运行时间的增加, 显然, 它无法满足广域时间同步要求。晶振时钟跟其他同步时钟相比成本较低, 在一些小型的变电站以及小水电站, 其独立的运行状态对电网的冲击很小, 不需要采用广域测控, 考虑到成本等因素, 是适合采用这种对时方式的。

1.2 GPS 时钟评述

全球定位系统 GPS (Global Position System) 是美国研制的导航、授时和定位系统。GPS 接收机接收到的 GPS 时钟与国际标准时间 UCT 保持高度同步, 正常工作时输出的秒脉冲 (PPS) 时间误差 $\varepsilon_G(k)$ 服从正态分布^[4]:

$$\varepsilon_G(k) \sim N(0, \sigma^2) \quad (2)$$

标准差 σ 因 GPS 接收机的质量而异。民用 GPS 接收机接收到各种干扰因素的影响, 精度和稳定性是难于得到保证的。在卫星失锁或者卫星实验跳变的条件下, GPS 时钟误差则可能达到上百 ms^[4]。根据当前电力系统中对 GPS 的使用实践来看, 它具有精度高, 成本合理的特点。但是, 当前国内出于对 GPS 时钟存在的稳定性问题的担忧, 并没有在继电保护等关系电力系统稳定性的重要领域广泛使用 GPS 对时系统。GPS 时钟主要用于同步相量测量、故障录波、故障测距等。

1.3 原子钟评述

守时原子钟具有能连续不断地运行, 中长期稳定度好, 并且准确度高、频率重现性好^[5]。为了使守时钟发挥最好的能效, 需要给原子钟提供良好的运行环境, 如温度、湿度的稳定保持, 环境的电磁屏蔽处理等^[5]。由于原子守时钟具有精度高、稳定性好、维护成本高的特点。因此在各中小型的电站里面, 从投入成本与同步性能需求上综合考虑, 并不采用该对时方法。通常选择调度中心等占主导地位的站点, 置原子守时钟作为统一时间基准。此时, 我们一般认为该时钟是无误差的, 即

$$\varepsilon_A(k) \equiv 0 \quad (3)$$

1.4 网络对时评述

计算机、网络中传递的时间协议主要有时间协议 (TP)、日时协议 (DP) 和网络时间协议 (NTP) 3 种^[6]。此外还有一个仅用于用户端的简单网络时间协议。其中, NTP 基于无连接的 IP 协议和 UDP 协议, 能够在复杂的 Internet 环境中提供精确的时间服务。NTP 基于客户机/服务器计算模式。客户机首先向服务器发送 1 个 NTP 包, 包含离开客户机的时间戳 T_1 , 服务器接收到该包时, 填入到达时间 T_2 , 并填入离开时间 T_3 , 发送给客户机, 客户机在接收到响应包时, 再填入接收时间 T_4 , 并按照式(4)、(5) 计算包交换的往返延时 δ 和滞后时间 θ ^[7], 再根据 θ 对客户端时间进行校正。

$$\theta = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2} \quad (4)$$

$$\delta = (T_2 - T_1) + (T_4 - T_3) \quad (5)$$

SNTP 与 NTP 相同, 但是客户端软件所做的处理较少, 精度也较低一些。因此普遍的采用 NTP 协议。NTP 误差主要来源于以太网的网络延时, 在客户/服务器工作方式下, 时间精度为 1~100 ms^[8]。

显然, 与 GPS 时钟相比, 网络时钟的精度处于劣势。但是它基于以太网通信, 对时网复杂的网络拓扑提高了时钟的可靠性。另外, 网络复用技术使得网络时钟同步不会明显增大建设成本。因此, 网络时钟可以和本地时钟相结合, 一方面可以利用本地时钟的稳定性, 另一方面可以利用网络时钟的可靠性来校准本地时钟的累计误差。

2 电力系统广域冗余对时模型

2.1 模型的系统结构与配置方法

通过上述对常见的同步方法评述, 可知它们在精度、稳定性、可靠性、成本等方面各有优缺点, 单一地使用某种方法, 是无法满足电力系统广域时间同步更进一步发展的要求的, 因此应该考虑多种对时方式结合, 构成冗余结构的对时模型。为了保证系统的可靠性, 必须提供稳定的独立的时间基准以及授时网络, 即在中心主站设置原子守时钟, 并采用电力系统同步网络发布时间信息。同时, 考虑到时间同步网在精度上的欠缺, 利用现有的 GPS 对时系统的优越性能, 在各子站装设 GPS 时钟接收装置, 作为常用的运行时间基准。此外, 各子站还应配置晶振时钟, 在紧急情况下作为短时或长期独立运行时钟。上述模型原理如图 1 所示。在该方式下, 电力系统将形成一个多层次的高可靠性的冗余对时模型, 保证电力系统的安全运行。

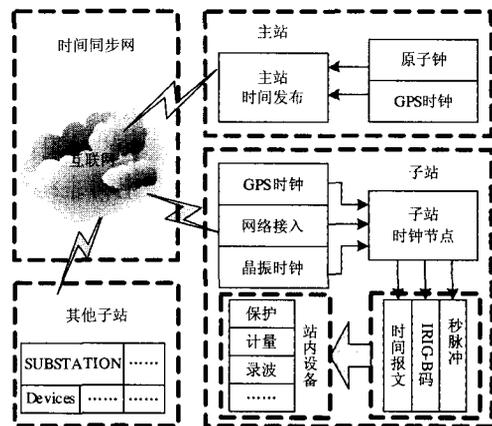


图 1 电力系统广域冗余对时模型原理图

Fig. 1 Schematic diagram of redundant synchronization model for wide-area power system

各子站根据自身实际运行情况对时钟进行配置。重要性较高的变电站、发电站, 应该使用完整配置; 重要性低的站点, 考虑到成本问题, 则可以选择性的配置时钟, 如舍去网络时钟, 节省网络基建的大量投资, 甚至舍去 GPS 时钟, 让其独立运行, 保证站内设备的测控同步即可。子站时钟节点设备作为站内的统一时钟源, 通过串行总线 (如 RS485) 输出时间报文, 通过电缆或光纤接口输出秒脉冲以及 IRIG-B 码等对时信号^[9], 用于站内设备的时钟同步。

2.2 时钟状态估计与运行模式切换

在完成各时钟的配置以后, 冗余对时模型的核心功能由子站的时钟节点装置实现。时钟节点装置必须实现各种时钟信号的误差状态估计, 然后根据判断选择运行模式, 以保证输出时钟的精度和可靠性。状态估计基于时间偏差测量, 装置对晶振时钟与 GPS 时钟偏差 $\phi(k)$ 、网络时钟与 GPS 时钟偏差 $\mu(k)$ 进行测量, 则有:

$$\phi(k) = \varepsilon_C(k) - \varepsilon_G(k) \quad (6)$$

$$\mu(k) = \varepsilon_N(k) - \varepsilon_G(k) \quad (7)$$

由于 $\varepsilon_G(k)$ 服从无偏正态分布的, 因此, 可以利用线性回归的方法^[10], 估计出晶振时钟和 GPS 时钟的状态。

$$\hat{b} = \frac{\sum_{k=1}^n k \times \phi(k) - \frac{n+1}{2n} \sum_{k=1}^n \phi(k)}{\sum_{k=1}^n k^2 - \frac{(n+1)^2}{4n}} \quad (8)$$

$$\hat{a} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \phi(k) - \frac{n+1}{2} \hat{b} \quad (9)$$

$$\hat{\varepsilon}_C(k) = \hat{a} + \hat{b} \times k \quad (10)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [\phi(k) - \hat{\varepsilon}_C(k)]^2 \quad (11)$$

网络时间的误差 $\varepsilon_N(k)$ 的规律暂时未知, 在此对其进行期望 $\hat{\varepsilon}_N(k)$ 与方差 D_N 进行估计。

$$\hat{\varepsilon}_N(k) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \mu(k) \quad (12)$$

$$D_N = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [\varepsilon_N(k) - \hat{\varepsilon}_N(k)]^2 \quad (13)$$

GPS 时钟的不正常误差通常由卫星失锁和卫星实验导致。当满足式(14)时, 认为卫星失锁。

$$\hat{\sigma}^2 > k_1 \sigma^2 \quad (14)$$

k_1 取 8~10, 具有较大的容错裕度, 防止因状态估计误差造成的错误判断。另外, 如果连续几次检测到 $\phi(k)$ 满足

$$|\phi(k)| > k_2 \sigma \quad (15)$$

k_2 一般取 8~10, 表示误差落在了正态分布的小概率区间^[10], 可认为卫星实验造成了时间跳变。当满足(14)、(15)任何一式时, 认为 GPS 时钟工作处于非正常状态。

D_N 是反应网络时钟性能的主要参数, 如果 D_N 超过定值, 认为网络时钟性能恶劣。

$$D_N > D_{set} \quad (16)$$

在 GPS 时钟正常工作时, 对各参数进行估计, 获得当前各时钟的运行状况; 否则, 停止对除 $\hat{\sigma}^2$ 以外的其他参数的估计, 停止估计的参数保持当前值不变。当 $\hat{\sigma}^2$ 同时不满足式(14)、(15)时, 恢复对各参数的估计, 以保证参数的实时更新。

GPS 时钟运行正常时, 通过 $\hat{\varepsilon}_C(k)$ 的估计值对晶振时钟进行补偿, 即工作在模式①。由样本容量为 n 的一元线性回归估计的晶振时钟随机误差 $\hat{\varepsilon}(k)$ 服从正态分布^[10]。

$$\varepsilon_C(k) \sim N(a + b \times k, \sigma^2 \left(\frac{1}{n} + \frac{(k - \frac{n+1}{2})^2}{\sum_{i=1}^n (i - \frac{n+1}{2})^2} \right)) \quad (17)$$

对于实时的状态评估 ($k = n$), 有

$$\frac{D(\hat{\varepsilon}_C)}{\sigma^2} = \frac{1}{n} + \frac{(\frac{n-1}{2})^2}{\sum_{i=1}^n (i - \frac{n+1}{2})^2} \quad (18)$$

显然, 样本容量 n 越大, 其估计值偏离理论真值的方差越小, 补偿后时钟的精度也越高。但样本容量过大将使当前的状态估计显著依赖过去的样本, 导致估计延迟太大。由于晶振误差状态的变化速度较为缓慢, 选择合适的样本容量后, 其输出时

钟精度能得于保证。

当 GPS 时钟工作状态失常时,按照 $\hat{\epsilon}_N(k)$ 对网络时钟进行补偿,即工作在模式②。一般认为,补偿后的网络时钟不具有累计误差,但包含较大的随机误差;而晶振时钟含线性累计误差,但不含随机误差。超前/滞后数字锁相环逻辑具有抑制噪声的功能,因此让补偿后的时钟通过对晶振时钟进行计数的数字锁相环逻辑以后,其随机噪声将得到抑制。从另一角度来说,晶振时钟通过数字锁相环对补充后的网络时钟进行跟踪,能消除逐渐累计的线性误差,保证输出时钟的精度。晶振时钟跟踪补偿时钟原理如图 2 所示。

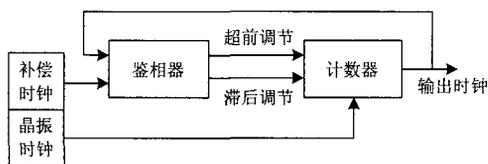


图 2 晶振时钟跟踪补偿时钟原理图

Fig. 2 Schematic diagram of oscillator clock locked to the compensated clock

当 GPS 时钟与网络时钟均性能恶劣时,则直接输出晶振时钟,工作在模式③。此时子站时钟处于独立运行状态,只保证站内设备之间的同步。

3 种工作模式对应 3 个精度级别。在工作模式①下,精度最高,此时可以进行对同步精度要求比较高的广域测控;在工作模式②下,时钟性能次之,但对于时间分辨率较低的测控手段,仍可投入使用;在工作模式③下,各子站的广域同步已经不能得到保证,此时需要广域同步的测控应退出。

3 系统测试试验概述

对时系统的时钟节点装置采用了 ARM9+CPLD 的硬件构架。CPLD 主要实现全数字锁相环的功能,以及其他硬件外设的辅助控制逻辑。ARM9 处理器主要实现各时钟接口,对各个时钟进行误差测量与误差估计运算,选择合适的工作模式,协调控制整个装置运行,并实现时钟报文的串行输出以及人机界面等功能。其结构原理如图 3 所示。

由于条件的限制,试验中没有采用原子钟作为时钟基准,而是直接将时钟装置接入变电站的同步对时网络接口。这种情况下缺少准确的时间基准用于绝对时间误差测量。为此,我们采用相对误差测

量的方法,以高精度的晶振时钟作为误差测量基准,分别测量时钟装置输出时钟、GPS 时钟与它的相对误差。然后根据晶振时钟的线性误差特性以及 GPS 时钟无偏随机误差特性,用数学工具对测得的相对误差进行回归分析,得出各时钟的估计绝对误差。测试原理如图 4 所示。

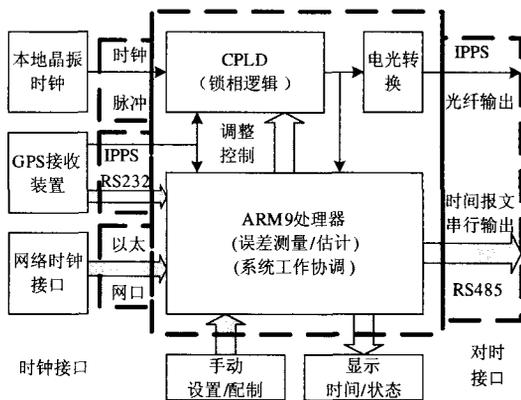


图 3 时钟装置原理图

Fig. 3 Schematic diagram of clock equipment

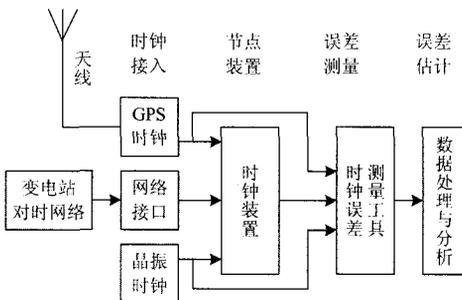


图 4 系统测试原理图

Fig. 4 Schematic diagram of system test

试验中,在自然条件下,GPS 时钟大部分情况下性能良好,装置长时间显示工作在模式①。为了验证网络对时的输出时钟精度,采用对 GPS 天线进行人为干扰的方式,让装置选择在模式②下工作,获得其误差测量数据。试验条件改变时,装置能够实现合理的模式切换。试验结果如图 5。

试验结果显示,在工作在模式①下,输出时钟误差能够保证在 $10\mu s$ 以内,其性能优于同时刻的 GPS 时钟。在工作模式②下(包括短时网络性能恶劣),时钟误差在 $1ms$ 左右。在工作模式③下,则时钟精度完全取决于晶振时钟本身。装置在自然条件下的运行结果表明,在该对时方式下,电站的时钟精度明显优于独立的对时方式。由于变电站各设

备的对时精度还受到它们对对时信号的响应速度的显著影响, 整个变电站对时精度测试的试验尚未进

行, 研究工作有待进一步开展。

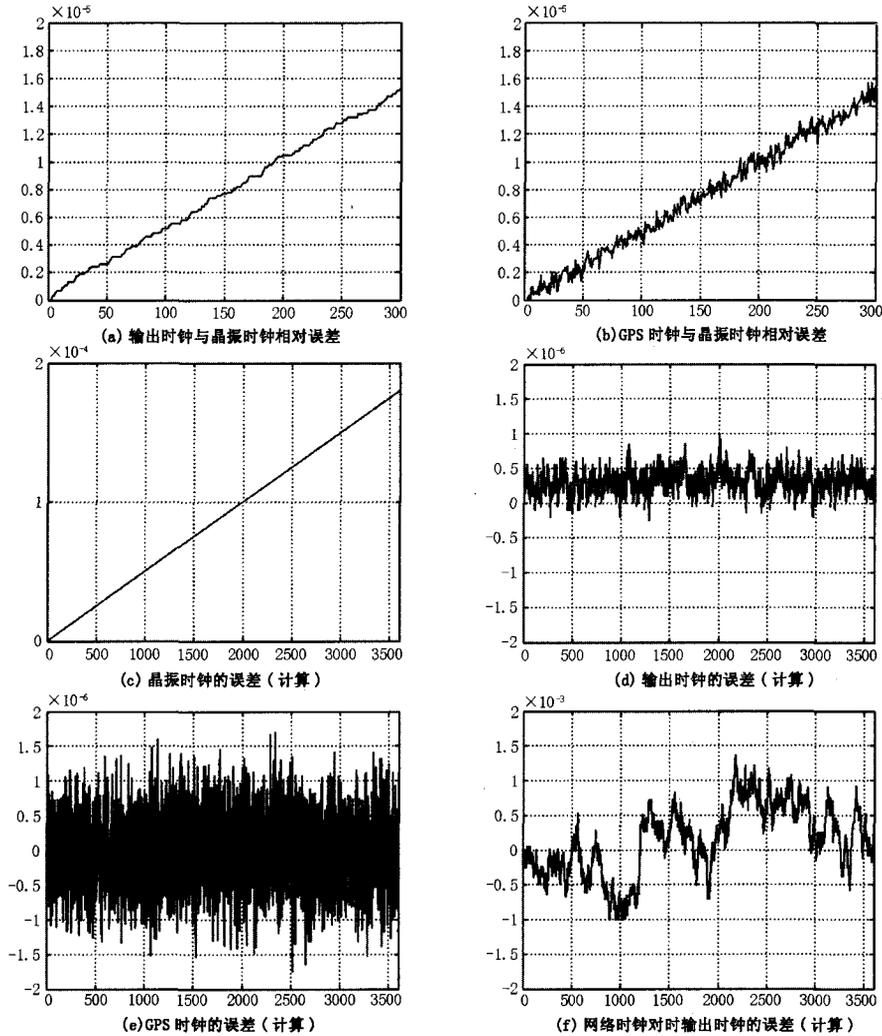


图5 系统测试结果

Fig.5 Result of system test

4 结语

文中提出了基于时钟误差分析的用于电力系统广域对时的冗余对时模型, 将现有的对时方式通过合适的方法结合起来。分析与试验表明与单一对时模式相比, 明显提高了对时的精度和可靠性, 有利于将广域同步测量量用于重要性更高的控制策略, 增强对电力系统的控制能力, 提高电力系统运行的安全性。

参考文献

[1] 陈洪卿, 朱缙震. 电网时间同步技术标准制定[J]. 宇航测绘技术, 2005, 25(3): 10-14.
CHEN Hong-qing, ZHU Zhan-zhen. Working out of

the Technical Standard for Time Synchronism of Electric Power Network[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2005, 25(3): 10-14.

[2] 朱建新, 赵栋. 电力系统中的时间同步网[J]. 电力系统通信, 2002, 23(5): 17-19.
ZHU Jian-xin, ZHAO Dong. Clock Synchronization Network in Power System[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2002, 23(5): 17-19.
[3] 余明辉. 振荡器的频率稳定及对策[J]. 机械与电子, 2006, 6: 77-79.
SHE Ming-hui. Stability and Countermeasure on the Frequency of Oscillator[J]. Machinery & Electronics, 2006, 6: 77-79.
[4] 王元虎, 周东明. 卫星时钟在电网中应用的若干问题[J]. 中国电力, 1998, 31(2): 10-13.

WANG Yuan-hu, ZHOU Dong-ming. Some Technical Problems of Satellite Clock Applied on Power Network [J]. Electric Power, 1998, 31(2): 10-13.

[5] 董绍武. 守时型原子钟及其应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2004, 18(S1):490-493.

DONG Shao-wu. Atomic Clocks and their Application in Time Keeping[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2004, 18(S1):490-493.

[6] 杨国庆. 网络时间同步在电力系统的应用[J]. 华东电力, 2007, 35(4):55-58.

YANG Guo-qing. Application of Network Time Synchronization to Power systems[J]. East China Electric Power, 2007, 35(4):55-58.

[7] 冉懋海, 陈小川, 徐毅. 网络时间协议在电力监控系统时钟同步中的应用[J]. 电力系统通信, 2006, 27(159): 29-32.

RAN Mao-hai, CHEN Xiao-chuan, XU Yi. Application of Network Time Protocol in Clock Synchronization in Power SCADA System[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2006, 27(159): 29-32.

[8] 孙蕴杰. 国家电网骨干时间同步网的技术探讨[J]. 电力系统通信, 2006, 27(170):31-35.

SUN Yun-jie. Discussion on the Time Synchronization Technology in National Backbone Telecommunication

network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2006, 27(170):31-35.

[9] 陈飞, 孙云. 500kV变电站时间同步系统设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22):97-99.

CHEN Fei, SUN Yun, Design of 500kV Substation Time Synchronization System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22):97-99.

[10] 方开泰, 全辉, 陈庆云. 实用回归分析[M]. 北京: 科学出版社, 1988.

FANG Kai-tai, QUAN Hui, CHEN Qing-yun. Practicality Regression Analysis[M]. Beijing: Science Press, 1988.

收稿日期: 2008-03-18

作者简介:

王晓芳 (1965-), 女, 硕士, 副教授, 主要从事电力系统微机保护及变电站自动化的教学与研究工作; E-mail: bynum87@gmail.com

周有庆 (1944-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统微机保护及变电站自动化;

袁旭龙 (1963-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事电力系统分析的教学与研究工作。

(上接第 23 页 continued from page 23)

[2] Srivastava S K, Butler-Purry K L, Sarma N D R. Shipboard Power Restored for Active Duty[J]. IEEE Computer Applications in Power, 2002, 15(3):16-23.

[3] Bulter K L, Sarma N D R, Prasad V R. Network Reconfiguration for Service Restoration in Shipboard Power Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power System, 2001, 16(4):653-661

[4] 杨秀霞, 张晓锋, 等. 基于启发式遗传算法的舰船电力系统网络重构研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10):42-46

YANG Xiu-xia, ZHANG Xiao-feng, et al The Study of Network Reconfiguration of the Shipboard Power System Based on Heuristic Genetic Algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10):42-46

[5] 莫宏伟. 人工免疫系统原理与应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003

MO Hong-wei. Principle and Application of Artificial Immune System[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2003

[6] 刘若辰, 杜海峰, 等. 一种免疫单克隆算法[J]. 电子学报, 2004, 32(11):1880-1884.

LIU Ruo-chen, DU Hai-feng, et al. An Immune

Monoclonal Strategy Algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(11):1880-1884.

[7] 陈根军, 李继洸, 唐国庆. 基于 Tabu 搜索的配电网重构算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10):28-33.

CHEN Gen-jun, LI K K, TANG Guo-qing. A Tabu Search Approach to Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10):28-33.

[8] 杨秀霞, 张晓锋, 张毅, 等. 免疫遗传算法在舰船电力系统供电恢复中的应用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9):80-86.

YANG Xiu-xia, ZHANG Xiao-feng, ZHANG Yi, et al. Study on Immune Genetic Algorithm for Shipboard Power System Service Restoration [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9):80-86.

收稿日期: 2008-02-27; 修回日期: 2008-07-01

作者简介:

王敏 (1974-), 女, 讲师, 主要研究方向为智能信息处理和智能控制等; E-mail: wangmin94@163.com

刘维亭 (1966-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为船舶运动控制、非线性控制、船舶自动化等。