

# 新一代智能变电站中多功能测控装置的研制与应用

余高旺

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 为实现“系统高度集成、结构布局合理、装备先进适用、经济节能环保、支撑调控一体”的目标, 新一代智能变电站提出多功能测控装置集成一个间隔的测控、非关口计量和同步相量测量功能。介绍了多功能测控装置的具体功能构成和软硬件框架。功能集成的多功能测控装置对装置的软硬件提出了更高的要求, 对其中的关键技术问题进行了总结和分析。理论仿真和实际测试均表明, 采用数据合并、基于 Hilbert 变换的无功电度算法等具体技术方案能提高数据计算效率及精度, 解决了多功能测控装置研制中的关键技术问题。在新一代智能变电站示范工程中的具体应用表明, 多功能测控装置能减少二次设备的数量, 提高变电站二次系统的集成度。

**关键词:** 智能变电站; 测控; 计量; 同步相量; DFT

## Research and application of multifunctional measurement & control device of new generation smart substation

YU Gaowang

(XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

**Abstract:** To achieve the high system integration, reasonable structure and layout, advanced and applicable equipment, energy conservation and environmental protection of economy as well as supporting control integration, the new generation smart substation puts forward the requirement of multifunctional measurement & control device, which integrates measurement & control, metering of no gateway and synchronized phasor measure in an interval. The paper describes the specific function and hardware & software framework of multifunctional measurement & control device. All key technologies are analyzed and summarized to meet the higher requirement of software and hardware of multifunctional measurement & control device. Theoretical simulation and practical test verify that the proposed specific technical algorithms, such as data merge and reactive power algorithm based on Hilbert transform, can improve computational efficiency and accuracy of data and solve the technical problems of developing multifunctional measurement & control device. Specific application in demonstration project of new generation smart substation indicates that the multifunctional measurement & control device can reduce the number of secondary equipment and increase integration of substation secondary system.

**Key words:** smart substation; measurement and control; metering; synchronized phasor; DFT

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)06-0127-06

## 0 引言

智能变电站是坚强智能电网的重要基础和支撑, 是电网运行数据的采集源头和命令执行单元, 是智能电网建设的重要组成部分。

为有效推进智能变电站建设的规范化, 国家电网公司组织编写并发布了《智能变电站技术导则》、《智能变电站设计规范》等一系列规范。我国的智能变电站建设普遍采用“三层设备、两层网络”的

模式, 即过程层、间隔层、站控层、过程层网络和站控层网络<sup>[1-4]</sup>。目前已经建成的智能变电站虽然在设备、建设与运维管理方面取得了较大进展, 但由于系统较多、二次功能分散, 站内信息网络比较复杂, 既增加了设备投资, 又降低了可靠性。智能变电站建设理念、技术创新、专业管理等方面仍存在问题, 有待于进一步解决。

为实现“系统高度集成、结构布局合理、装备先进适用、经济节能环保、支撑调控一体”的目标,

新一代智能变电站从设计、设备、控制三方面入手,采用整体集成设计,引导设备研制,优化主接线和总平面布局,提高变电站整体设计水平<sup>[5]</sup>。

多功能测控是新一代智能变电站二次集成设备之一<sup>[6]</sup>,它集成了一个间隔的测控、非关口计量和同步相量测量功能<sup>[7-8]</sup>。

智能变电站中的测控装置集成非关口计量功能和同步相量测量功能在技术上完全可行。具体表现在以下两个方面。

(1) 智能化变电站采用网络通信,间隔层设备取消了开入、开出端子和 A/D 转换插件,柜体上也基本取消了端子排,简化了二次接线。测控功能、非关口计量功能和同步相量测量功能需要采集的输入量均能在过程层网络上直接采集,不需要额外增加接口,测控、非关口计量和同步相量测量一体化不会增大装置的体积。

(2) 在装置硬件处理能力上,为适应 IEC 61850 标准所要求的复杂功能及通信能力,智能变电站中的测控装置均配置高性能 CPU 或 DSP 芯片、大容量的内存等,能同时完成复杂的逻辑计算与大量的 DI、DO 数据处理工作。

本文针对目前智能变电站测控装置存在的问题及提高集成度的可行性,提出了新一代功能集成的多功能测控装置的具体实施方案。

## 1 多功能测控装置的总体框架

### 1.1 功能构成

多功能测控装置的主要测控功能有:量测量采集,状态量采集、控制、同期合闸操作和间隔层逻辑闭锁功能等;包含的非关口计量功能主要有:正反向有功电量和正反向无功电量的采集、计算、冻结、召唤和存储;包含的同步相量采集功能主要有:对本间隔的电压、电流及接入的开关量等进行同步测量,并将同步相量数据实时传送至站控层 I 区数据通信网关机。

### 1.2 通信接口

多功能测控装置与过程层设备通信采用 IEC 61850-9-2 网络方式,SV 和 GOOSE 公用一个物理接口,实现模拟量和开关量的数据收集功能。一次设备和二次设备的温度等信息通过 GOOSE 模拟量的方式收集。

装置含 2 个站控层 MMS 口,通过报告及其他 IEC 61850 Client/Server 模式的服务实现传统的测控功能通信,用于控制命令等的传送。对于状态信息、遥测数据传输、计量数据传输和计量冻结文件的传送,通过 Client/Server 模式的报告、文件传输

等服务实现。对于同步相量的传输,为了保证实时性,装置采用独立的网口传送同步相量数据,通信协议为 IEEE Std C37.118。

### 1.3 硬件结构

多功能测控装置硬件系统总体框图如图 1 所示,该硬件方案中核心 CPU 插件的中央处理器基于飞思卡尔的 MPC 系列处理器设计,拥有优秀的计算性能和通信处理能力,能很好地满足实际需求。过程层数据处理插件作为过程总线处理单元,主要提供冗余 100 M 以太网过程总线接口,完成 SV 数据的接收,以及 GOOSE 信号的接收和发送,接收到的过程层数据信号经过预处理后再发给核心处理 CPU 插件。

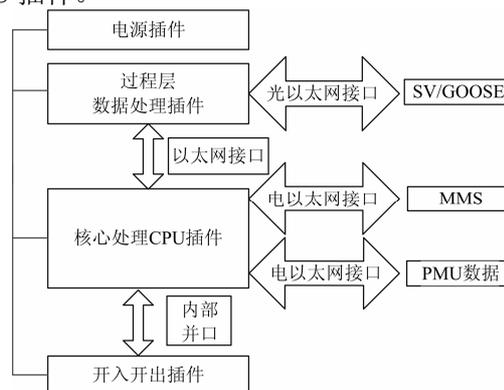


图 1 硬件系统总体方案

Fig. 1 The overall scheme of hardware system

CPU 插件作为主控单元通过背板以太网接收过程层数据处理插件转发的 SV 和 GOOSE 信息,并结合不同的原理实现数据处理,然后将处理结果通过外部以太网传送给站控层设备。同时该插件可完成对整个装置的管理和人机界面交互等功能。

### 1.4 软件结构

多功能测控装置的软件系统采用分层体系结构,分为软件平台和应用程序。软件平台提供硬件驱动、实时操作系统、实时数据库管理、网络协议栈和应用多模块加载等管理功能,给应用开发提供支撑。软件系统结构如图 2 所示。

## 2 关键技术研究

在本文方案中,CPU 需要完成量测量、同步相量和非关口计量数据的计算,如果不进行优化,现有的硬件资源很难在完成计算的同时保证数据上送的实时性。为了减少数据的计算量,同时保证误差指标满足相关要求,本文采取了数据合并、基于 Hilbert 变换的无功电度算法等高精度软件算法提高数据计算效率及精度。下面对具体方案进行详细说明。

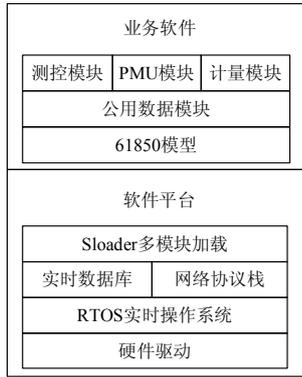


图2 软件系统结构

Fig. 2 System structure of software

## (1) 数据合并

多功能测控装置高度集成了一个间隔的测控、非关口计量和同步相量测量功能。这些不同功能在数据计算上均存在很大程度的重复，加强数据合并能够大大减小CPU的运行负担。

对于测控功能，模拟量的计算有：三相电压、三相电流、有功功率、无功功率、视在功率、功率因数和频率等；对于计量功能，需要计算的量除了有有功电度和无功电度外，还有有功需量和无功需量。在实际数据计算时，计量功能的有功需量和无功需量等数据能够和测控功率的功率计算进行融合合并，减少不必要的重复计算。

经过总结和分析，将多功能测控装置的数据计算功能分解成各个功能的专用数据计算和公用数据计算，其中测控专用数据有：三相电压、三相电流和功率因数等，计量专用数据有：有功电度和无功电度；同步相量测量的专用数据有：正序电压和正序电流等；公用数据有：频率、有功功率、无功功率和视在功率等。

数据合并后，各个计算模块的数据流如图3所示。



图3 数据流图

Fig. 3 Data flow diagram

## (2) 基于 Hilbert 变换的无功电度算法

无功电度计算的前提是无功功率计算。

非正弦电路中无功功率的定义存在着较大的分歧，尚无统一的定义<sup>[9]</sup>。目前被广泛采用的是Budeanu的无功功率定义<sup>[10]</sup>，该定义如式(1)所示。

$$Q = \sum_{n=1}^M U_n I_n \sin \varphi_n \quad (1)$$

式中： $Q$ 为无功功率； $U_n$ ， $I_n$ 分别为第 $n$ 次谐波电压、电流的有效值； $\varphi_n$ 为电压和电流的相位差； $M$ 表示最高谐波次数。

瞬时无功功率与采样周期 $T_s$ 的乘积在时间上不断累积即可得到无功电能的计量。

利用傅立叶算法能计算出各次谐波的瞬时无功功率，从而得到无功电度，但是由于要计算各次谐波的无功功率，计算量庞大，因此有必要寻求便捷的无功算法。

文献[11]根据式(1)提出了一种Hilbert数字移相滤波的无功功率测量方法，其原理框图如图4所示。

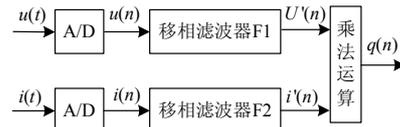


图4 无功测量原理框图

Fig. 4 Principle block diagram of reactive power measurement

该方法首先将电网上某相的电压、电流信号按相同的采样率进行A/D转换，得到离散的数字电压信号 $u(n)$ 和数字电流信号 $i(n)$ ；其次，将这一对数字信号分别经过F1和F2滤波器进行移相处理，得到所关心的频率范围内电压、电流的基波以及各次谐波分量之间相位相差均为 $90^\circ$ 的复合数字信号 $u'(n)$ 和 $i'(n)$ ；然后将这两个信号相乘，得到瞬时无功功率 $q(n)$ 。

基于该原理，本文考虑采样率为4000 Hz，所设计的Hilbert滤波器关心的频带为[40 Hz, 1960 Hz]，相移误差小于等于0.0006弧度，利用半带滤波器的设计，构成Hilbert滤波器的两个数字移相滤波器 $H_{F1}(z)$ 和 $H_{F2}(z)$ 分别为

$$H_{F1}(z) = z^{-1} \frac{z^2 - 3.93404791z - 1}{3.93404791z^2 - 1} \cdot \frac{z^2 - 1.53598991z - 1}{1.53598991z^2 - 1}$$

$$\frac{z^2 - 1.12398365z - 1}{1.12398365z^2 - 1}$$

$$H_{F2}(z) = \frac{0.07307686z^2 - 1}{z^2 - 0.07307686} \cdot \frac{0.46602752z^2 - 1}{z^2 - 0.46602752}$$

$$\frac{0.79020059z^2 - 1}{z^2 - 0.79020059} \cdot \frac{0.96536109z^2 - 1}{z^2 - 0.96536109}$$

其频域传递函数为

$$H_{F1}(e^{j\omega}) = \frac{e^{-j\omega} - 6.59402147e^{-j3\omega} + 12.19089098e^{-j5\omega} - \dots}{6.79184869 - 12.19089098e^{-j2\omega} + \dots}$$

$$\frac{6.79184869e^{-j7\omega}}{6.59402147e^{-j4\omega} - e^{-j6\omega}}$$

$$H_{F2}(e^{j\omega}) = \frac{0.02597877 - 0.47103151e^{-j2\omega} + \dots}{1 - 2.29466606e^{-j2\omega} + 1.74331573e^{-j4\omega} - \dots} \cdot \frac{1.74331573e^{-j4\omega} - 2.29466606e^{-j6\omega} + e^{-j8\omega}}{0.47103151 \cdot e^{-j6\omega} + 0.02597877e^{-j8\omega}}$$

相应的幅频和相频响应如图 5 所示。

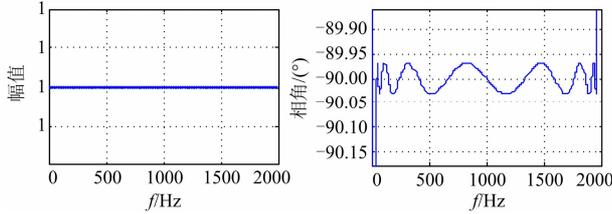


图 5 幅频和相频响应图

Fig. 5 Response diagram of amplitude and phase frequency

从幅频和相频响应图可以看出,此 Hilbert 滤波器能达到移相 90°的目的,同时幅值和相位误差均在控制范围内,完全能满足有关技术要求。同时,本方法计算量远小于傅立叶算法,不会明显加大 CPU 运行负担。

计算出瞬时无功功率  $q(n)$ 后,就可以采用积分算法得到无功电度值。

本文研制的装置在采用数据合并和基于 Hilbert 变换的无功电度算法后,避免了数据的重复计算和傅立叶算法带来的庞大数据运算。实际装置的测试结果表明,CPU 计算时间由 8 ms 缩短到了 4 ms,有效地降低了 CPU 的运行负担。

### (3) 基于递推 DFT 的同步相量相角测量算法

同步相量测量算法以相角测量为主。目前,实用化的测量方法有过零检测法和离散傅里叶(DFT)法,其中 DFT 法由于其对谐波有较好的抑制作用而得到广泛的应用。

传统的 DFT 计算信号  $x(k)$ 的公式为

$$\begin{cases} X_R = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x(k) \cos\left(\frac{2k\pi}{N}\right) \\ X_I = \frac{2}{N} \sum_{k=1}^N x(k) \sin\left(\frac{2k\pi}{N}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $N$  为周期采样点数。

最终得到相位:  $\varphi_m = \arctan(X_I / X_R)$ 。

由于过程层设备采用定间隔进行数据采样,即采样间隔是固定不变的,不跟踪系统频率进行同步采样,因此,测控装置接收到的 SV 数据也是定间隔的采样数据。

采用定间隔采样数据进行计算时,传统的基于 DFT 的数据测量算法受信号和采样频率不同步的影响,出现了频率泄露现象,计算误差大<sup>[12-13]</sup>。

文献[14]对非同步采样下 DFT 计算结果的误差进行了详细分析,给出了简单、精确的相角误差表达式。

$$\Delta\varphi \approx \Delta\lambda\pi \frac{N-1}{N} + \frac{\Delta\lambda\pi}{N \sin(2\pi/N)} \sin(2\pi/N - 2\varphi_m)$$

其中,  $\Delta\lambda = Nf / f_s - 1$ ,  $f$  为信号频率,  $f_s = 50 \cdot N$ 。

从而可以由 DFT 结果  $\varphi_m$  计算出真实相角为

$$\varphi = \varphi_m - \Delta\varphi \quad (3)$$

在计算 DFT 时,采用递推计算,每次进行 DFT 计算的计算量很小,对 CPU 的运行负担也不大。

### (4) 基于梯形积分的补偿算法

与相位计算受频率泄露的影响类似,对于多功能测控的有效值计算存在同样的误差大问题。为了减少计算误差,装置采用基于定采样间隔的高精度补偿算法。

模拟量  $x(t)$  的有效值计算公式为

$$A = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (4)$$

其中:  $A$  为有效值;  $T$  为信号周期。

设  $f$  为测得的频率,  $N$  为工频采样间隔进行采样的每周点数,则由分段梯形积分公式对(4)离散,令  $f_s = Nf_0$ ,  $f_0 = 50 \text{ Hz}$ ,  $M = \lfloor f_s / f \rfloor$  (向下取整)。

a. 如果  $(f_s / f - M) \leq 0.5$ , 则有效值  $A$  为

$$\sqrt{\frac{f}{f_s} \left[ \sum_{i=n-M}^n x^2(i) - 0.5x^2(n-M) - 0.5x^2(n) + \left(\frac{f_s}{f} - M\right) x^2(n) \right]}$$

b. 如果  $(f_s / f - M) > 0.5$ , 则有效值  $A$  为

$$\sqrt{\frac{f}{f_s} \left[ \sum_{i=n-M-1}^n x^2(i) - 0.5x^2(n-M-1) - 0.5x^2(n) - \left(M+1 - \frac{f_s}{f}\right) x^2(n) \right]}$$

对于测控的测量,需要测量出交流模拟量的电流、电压有效值以及有功功率和无功功率等。GB/T13729-2002 对测量精度指标的要求是:  $I$ 、 $U$  的精度指标是 0.2%,当叠加 20%的 2~13 次谐波时允许改变量 200%,45~55 Hz 之间变频时允许改变量 100%。

利用上面的计算方法对测量值进行仿真,仿真结果表明,采用该补偿算法后,测量误差均在 0.02% 以下,完全能满足技术指标的要求。详细的仿真结果见表 1。

当叠加 20%的 2~13 次谐波时,由于不存在信号和采样频率不同步问题,理论上没有误差,本文不再赘述误差分析。

表 1 变频时有效值的误差仿真

Table 1 Error simulation result of RMS when frequency varying

频率/Hz	不修正/%	修正/%
45	-1.003 87~-0.001 16	-0.000 50~0.000 50
46	-1.104 71~-0.001 41	-0.000 09~0.000 09
47	-0.124 96~-0.000 12	-0.000 50~0.000 50
48	-0.400 40~-0.000 46	-0.005 04~0.005 04
49	-0.777 10~-0.000 92	-0.006 37~0.006 37
50	0	0
51	-0.550 87~-0.000 65	-0.009 51~0.009 51
52	-1.205 36~-0.001 9	-0.000 33~0.000 33
53	-0.626 16~-0.000 80	-0.012 28~0.012 28
54	-0.099 93~-0.000 12	-0.000 34~0.000 34
55	-1.003 46~-0.001 57	-0.004 44~0.004 44

### 3 示范工程应用

2013年12月,多功能测控装置在重庆大石 220 kV 示范工程完成现场联调并正式投运。

重庆大石站是一座 220 kV 户外智能变电站,一次设备采用了隔离式断路器、智能变压器等,二次系统安装于预制舱内且实现了单舱双列布置。整体方案具有占地面积少、设备集成度高、建设高效和技术先进的优点<sup>[15]</sup>。

该站的二次保护及自动化系统配置如图 6 所示。

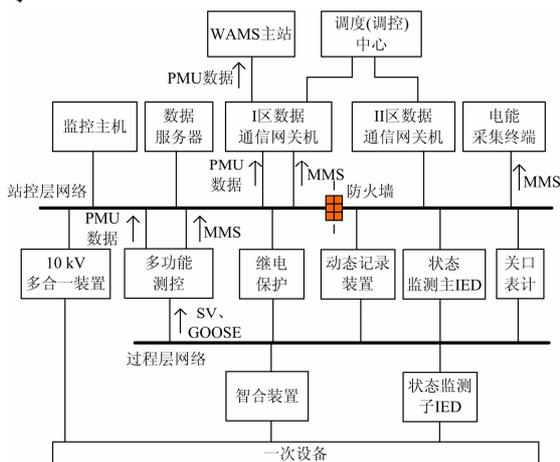


图 6 重庆大石站配置图

Fig. 6 Configuration diagram of Chongqing Dashi station

本站按照间隔配置有多功能测控装置完成一个间隔的测控,非关口计量和同步相量测量功能。非关口计量数据通过 MMS 报文上传给电能采集终端;同步相量(PMU)数据通过独立的网络上传给 I 区数据通信网关机,最终上传给 WAMS 主站。

在新一代智能变电站示范工程中的具体应用表明,多功能测控装置具有以下特点:

#### (1) 装置功能高度集成

配置了多功能测控装置后,本站不再配置非关口计量表计和相量测量装置,减少了二次设备的数量,不但提高了变电站二次系统的集成度,而且减少了变电站的建设成本,降低了后期的维护难度。

#### (2) 通信接口标准规范

多功能测控装置完全满足 IEC 61850 的通信要求。站控层基于 MMS 通信,通过报告及其他 IEC 61850 Client/Server 模式的服务实现“四遥”数据的传输和计量数据传输。对于计量冻结文件的传送,通过 Client/Server 模式的文件传输等服务实现。过程层采用 GOOSE 和 SV 通信采集开关量和模拟量。对于同步相量数据的传输,目前 IEC 61850 缺乏相关规范,仍基于 IEEE Std C37.118 传输。

#### (3) 支持状态检修功能

装置采用专用的硬件设计,除了能够对装置易损元器件如电源、CPU 和存储器等进行自检外,还能将网络通信接口光模块等装置各部位的温度信息通过 IEC-61850 逻辑节点模型,上送至后台系统,由后台系统实现全站设备的状态检修。

### 4 结论

本文介绍了新一代智能变电站中多功能测控装置的功能构成、硬件框架和软件框架。在新一代智能变电站示范工程中的具体应用表明,多功能测控装置集成的测控、非关口计量和同步相量测量功能能够满足相关专业的要求,其应用能减少二次设备的数量,提高变电站二次系统的集成度。该项目的投运也为后续工程的开展积累了丰富的工程应用经验。

### 参考文献

- [1] Q/GDW 383 智能变电站技术导则[S]. 2009.
- [2] Q/GDW 394 智能变电站设计规范[S]. 2009.
- [3] 李孟超,王允平,李献伟,等. 智能变电站及技术特点分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 59-62.  
LI Mengchao, WANG Yunping, LI Xianwei, et al. Smart substation and technical characteristics analysis[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 59-62.
- [4] 李瑞生,李燕斌,周逢权. 智能变电站功能架构及设计原则[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 24-27.  
LI Ruisheng, LI Yanbin, ZHOU Fengquan. The functional frame and design principles of smart substation[J]. Power System Protection and Control,

- 2010, 38(21): 24-27.
- [5] 宋璇坤, 李敬如, 肖智宏, 等. 新一代智能变电站整体设计方案[J]. 电力建设, 2012, 33(11): 1-6.  
SONG Xuankun, LI Jingru, XIAO Zhihong, et al. Overall design scheme for new generation intelligent substation[J]. Electric Power Construction, 2012, 33(11): 1-6.
- [6] 倪益民, 杨宇, 樊陈, 等. 智能变电站二次设备集成方案讨论[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(3): 194-199.  
NI Yimin, YANG Yu, FAN Chen, et al. Discussion on integration of secondary device in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(3): 194-199.
- [7] 国家电网公司. 电力系统实时动态监测系统技术规范[S]. 2006.
- [8] 阎常友, 吴京涛, 杨奇逊. 分布式动态相量监测系统研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(18): 50-53.  
YAN Changyou, WU Jingtao, YANG Qixun. Investigation on the distributed dynamic phasor monitoring system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(18): 50-53.
- [9] 郑小平. 关于无功功率的定义及其计算方法[J]. 电测与仪表, 2006, 43(6): 1-3.  
ZHENG Xiaoping. The definition and arithmetic for the reactive power[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2006, 43(6): 1-3.
- [10] BUDEANU C. The different opinions and conceptions regarding reactive power in a non-sinusoidal system[M]. Bucharest: Publication N4 of the Rumanian National Institute, 1927.
- [11] 俎云霄, 庞浩, 李东霞, 等. 一种基于 Hilbert 数字滤波的无功功率测量方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(16): 50-52, 70.  
ZU Yunxiao, PANG Hao, LI Dongxiao, et al. A method of reactive power measurement based on Hilbert digital filtering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(16): 50-52, 70.
- [12] 闫常友, 张涛, 杨奇逊. 基于 DFT 的非同步采样情况下相量测量误差研究综述[J]. 继电器, 2004, 32(10): 80-84.  
YAN Changyou, ZHANG Tao, YANG Qixun. Survey of phasor measurement errors on DFT-based non-synchronous sampling[J]. Relay, 2004, 32(10): 80-84.
- [13] 李学太, 张沛超. 基于 DFT 梯形积分修正法的谐波测量算法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 65-69.  
LI Xuetai, ZHANG Peichao. A harmonic measurement algorithm based on a correction method for DFT trapezoidal integration[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 65-69.
- [14] 王茂海, 孙元章. 基于 DFT 的电力系统相量测量新算法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(2): 20-24.  
WANG Maohai, SUN Yuanzhang. A DFT-based method for phasor and power measurement in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(2): 20-24.
- [15] 彭鹤, 田娟娟, 陈燕, 等. 重庆大石 220 kV 新一代智能变电站优化设计[J]. 电力建设, 2013, 34(7): 30-36.  
PENG Hu, TIAN Juanjuan, CHEN Yan, et al. Optimization design of Chongqing Dashi 220 kV new generation smart substation[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(7): 30-36.

---

收稿日期: 2014-05-27; 修回日期: 2014-11-12

作者简介:

余高旺(1976-), 男, 硕士, 从事电力系统保护与控制研发工作. E-mail: yugaowang21@126.com

(编辑 葛艳娜)