

高采样率数字化变电站电能质量监测系统研究与应用

王玲¹, 徐柏榆¹, 盛超¹, 赵艳军¹, 王昕², 张涛², 王新华², 叶李花²

(1. 广东电网公司电力科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 深圳市中电电力技术股份有限公司, 广东 深圳 518040)

摘要: 为解决目前数字化变电站中应用的数字式互感器和合并单元的采样特性无法满足高次谐波和电压暂态事件监测分析等难题, 提出了一种具有 512 点/周波高采样率的数字化变电站电能质量在线监测系统。该系统采用新型高采样率电子式互感器、合并单元和数字式电能质量监测装置, 从过程层互感器层面解决采样率低的问题, 同时解决了电子式互感器和传统互感器的同时接入、采样率提高后海量数据处理、数字式电能质量监测装置 IEC61850 建模、合并单元和数字式电能质量监测装置全自动校准等问题。校准试验表明该系统满足电能质量监测功能和准确度标准要求, 并且在实际工程中取得良好的效果。
关键词: 数字化变电站; 高采样率; 电能质量; 在线监测

Research and application of digital substation power quality monitoring system with high sampling rate

WANG Ling¹, XU Bai-yu¹, SHENG Chao¹, ZHAO Yan-jun¹, WANG Xin², ZHANG Tao², WANG Xin-hua², YE Li-hua²

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China;
2. CEIEC Shenzhen Electric Technology Inc., Shenzhen 518040, China)

Abstract: In order to solve the problem that current sampling characteristics of EVCT and MU cannot fulfill the practical demand of power quality analysis such as high-frequency harmonics and voltage transients in digital substations, this paper proposes a new power quality monitoring (PQM) system for digital substation with high sampling rate of 512 points / cycle. By use of new high-sampling-rated EVCT, MU and PQM equipment, the problem of low sampling rate is solved from the beginning of EVCT in process level. Other problems such as retrieving data from both EVCT and traditional transformer, mass data processing derived from high sampling rate, IEC 61850 modeling of digital PQM equipment, automatic calibration of MU and PQM equipment are analyzed and solved at the same time. Calibration result shows that this system can meet the function and accuracy standard and practical application of this system has achieved good results.

Key words: digital substation; high sampling rate; power quality; on-line monitoring

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)04-0110-07

0 引言

近年来, 随着 IEC61850 标准的推广和数字式互感器的应用, 数字化变电站概念已在工程实践中得到验证。基于 IEC61850 的数字化变电站已成为建设智能电网的基石和不可逆转的发展趋势^[1-3]。但是由于受到负荷非线性、冲击性、风能等随机电源和交直流电网运行方式等因素的影响, 数字化变电站同样存在谐波、电压波动与闪变、三相不平衡度及暂态电压事件等电能质量问题。

数字化变电站作为电网重要组成部分, 随着其数量和覆盖范围增加, 将其纳入各级电网公司电能质量管理系统的需求也越来越强烈。但是在我国数字化变电站发展过程中, 其技术研究和设备研制均

一直侧重于满足继电保护以及变电站综合自动化系统需要, 而没有考虑到电能质量在线监测的需求, 由此导致目前市场上的电子式/光电式互感器、合并单元等设备采样率低且非 2 的 N 次方, 并且采样过程没有频率跟踪, 这些特性导致合并单元输出的信号无法直接用于电能质量监测分析。另一方面, 电能质量监测装置的 IEC61850 模型建立尤其是日志模型和事件记录模型存在困难。多种因素使得数字化变电站的电能质量监测仍是相对较新的研究课题, 但目前大多数研究主要集中于数字化变电站电能质量检测算法研究、电能质量 IEC61850 模型研究和软硬件产品研制方面^[4-8]。

本文从电能质量管理的实际需求出发, 基于对数字化变电站现状、设备厂家的调研和技术研究,

首次提出一种完整的数字化变电站电能质量在线监测系统解决方案, 通过直接从过程层的数字式互感器层面提高采样率, 并研制过程层和变电站层的配套设备, 包括合并单元、数字式电能质量在线监测装置、基于 IEC61850 的电能质量管理软件等, 该解决方案能完全满足电能质量相关标准规定的电能质量监测功能要求, 并实现数字化变电站内多间隔同时监测、数字互感器和传统互感器同时监测等应用, 具有一定技术领先性和推广应用价值。

1 数字化变电站电能质量监测现状

目前数字化变电站整体解决方案主流供应商所提供的数字互感器包括光电式互感器和电子式互感器。由于价格以及稳定性因素, 纯光纤式光电互感器在电网应用较少。支柱式电子互感器的采集电流信号的采集卡需要激光功能, 所以采样率一般不超过 200 点/周波。GIS 式电子互感器的电流采集卡可采用其他供能方式, 采样率可以做得更高。但由于变电站保护和测控通常只需要 80 点/周波采样率, 所以即便数字式互感器能提供更高采样率, 也会通过在合并单元进行抽值处理, 使得合并单元最终输出的采样率为 80 点/周波。而电能质量监测装置要求最低采样率为 256 点/周波, 一般主流厂家都能提供 512 点/周波或更高采样率产品。如将现有合并单元输出的 80 点/周波采样值直接作为电能质量监测装置的输入存在以下问题:

1) 采样频率非 2 的 N 次方, 无法利用 FFT 算法计算谐波;

2) 采样过程采用无频率跟踪模式, 存在短范围内的频谱泄露以及长范围内的频谱旁瓣干扰问题, 导致谐波测量不准确;

3) 根据采样定理, 所能计算出的谐波次数不能满足实际需要和未来发展。

在电能质量监测装置中采用特定数学算法可以修正上述问题。例如通过加窗插值等软件算法修正采样过程无频率跟踪问题^[9-14], 通过素因子和 WFTA 相结合算法修正采样率非 2 的 N 次方的问题^[1,11], 通过二次采样算法来提高采样率等。这些方法都是从电能质量监测装置角度出发, 并且通过软件算法来修正将导致测量结果的不确定增加, 因此并非彻底解决方法。要彻底解决互感器和合并单元输出信号采样率的问题, 只有从过程层数字式互感器源头来考虑。

2012 年, 广东电网公司电力科学研究院组织对数字化变电站现场调查以及互感器、电能质量监测装置厂家的调研, 调研结果表明。

1) 合并单元输出信号采样率主要取决于互感器, 如果互感器采样率提高, 合并单元采样率可随之提高;

2) 目前互感器采样率低下的主要原因是二次设备没有对数字式互感器提出高采样率的需求;

3) 以广东电网为例, 目前 110 kV 数字化变电站内普遍存在两种类型互感器, 即电子式/光电式数字互感器(主要在 110 kV 电压等级)和传统互感器(主要在 10 kV 电压等级), 对数字化变电站进行电能质量监测需要同时兼容数字信号和传统信号。

基于以上调研情况, 为满足数字化变电站电能质量管理需要, 本文提出从数字化变电站数字式互感器层面提高采样率, 从而解决数字化变电站电能质量最主要问题的整体性解决方案。

2 数字化变电站电能质量监测系统设计

数字化变电站电能质量监测整体解决方案覆盖过程层、间隔层和变电站层, 包括研发高采样率数字互感器、高采样率合并单元、数字式电能质量监测装置以及电能质量管理平台。系统架构如图 1。该方案从提高过程层数字式互感器的采样率角度出发从根本上解决数字化变电站电能质量监测存在的最大问题。

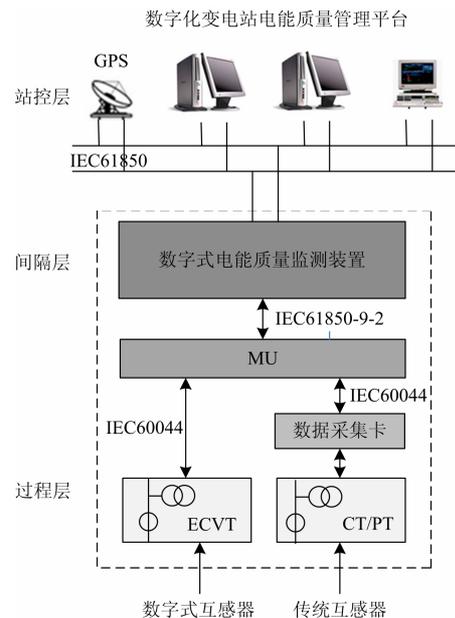
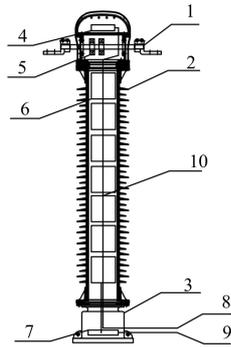


图 1 数字化变电站电能质量监测系统框图
Fig. 1 Diagram of digital substation power quality monitoring system

2.1 高采样率电子式互感器

本文研制的电子式互感器采用支柱型电压电流组合电子式互感器, 结构如图 2 所示。互感器采

用电感分压原理，电流互感器采用罗科夫斯基 (Rogowski) 线圈和低功率线圈 (Low power current transformer, LPCT) 组合，采样频率由采样信号发送模块控制。为提高电子式互感器采样率至 512 点/周波，通过增加一套独立于原有保护、计量、测控等采样线圈的采样信号发送模块以及一组专用于电能质量的低功率线圈，并提高该采样信号发送模块中采样系统的截止频率至 2.5 kHz。这种架构设计同时避免电能质量监测功能对原有保护、计量、测控等功能产生影响。



①互感器 CT 室 (包含铝制顶部及高压电流接线端); ②复合绝缘子; ③铝制底座; ④电流互感器采集信号发送模块; ⑤电流互感器线圈; ⑥ (包含罗科夫斯基线圈和 LPCT 线圈) 用于分压的串联组合的电感线圈; ⑦电压互感器采集信号发送模块; ⑧电流互感器信号输出光纤; ⑨电压互感器信号输出光纤; ⑩固体绝缘结构 (采用聚氨酯填充)。

图 2 高采样率电子式互感器结构图

Fig. 2 Structure of EVCT with high sampling rate

数字式互感器的采样率提高到 512 点/周波之后，能完全满足数字式电能质量监测装置的数据分析需要，同时无需再采用特殊算法对采样值信号进行修正。但采样率提高也带来高速编解码和数据完整性等额外技术问题。

2.2 高速编解码和数据完整性问题

电能质量监测系统本身是一个海量数据系统^[15]。数字式电能质量监测装置直接从合并单元获取采样信号进行数据处理，必须考虑高采样率情况下海量数据的高速编解码问题，以免造成数据丢失或测量精度下降。依据 IEC61850-9-2，单个报文最大长度为：26 字节以太网报头 + 4 字节优先级标记 + 8 字节以太网型 PDU + 2 字节 ASN.1 标记/长度 + 2 字节块的数目 + 46 字节通用数据集 + 23 字节状态量 = 111 字节 × 8 位 = 888 位 + 96 位帧间隔 = 984 位。因此在合并单元提供 512 点/周波采样信号的情况下其带宽至少应该是：

$$S_R \times T_L = (512 \times 50) \times 984 \text{ bit} = 24.023 \text{ Mb/s}$$

式中： S_R 表示采样速率； T_L 表示最大报文长度。

在 512 点/周波采样率下，每两个相邻采样点之

间的时间间隔为 39.062 5 μs ，则每个 IEC61850-9-2 报文需要在 40 μs 内解码完成，否则可能会有采样值信号缺失。同时考虑到电能质量监测装置内部海量数据计算工作量，因此庞大数据量以及高速编解码要求对合并单元和数字式电能质量监测装置提出很高的架构要求。本文提出采用多 CPU 架构来分解任务流，以数字式电能质量监测装置为例，可设计：①针对每 1~2 回路采样信号输入，设置一个数据采集 CPU；②针对每一个数据采集 CPU，设置一个数据处理 CPU；③设计一个主 CPU，用于控制和调度各数据处理 CPU 并负责内部数据缓存、通信等事务。图 3 是一个支持 8 个合并单元接入的数字式电能质量监测装置的硬件框架示意图。

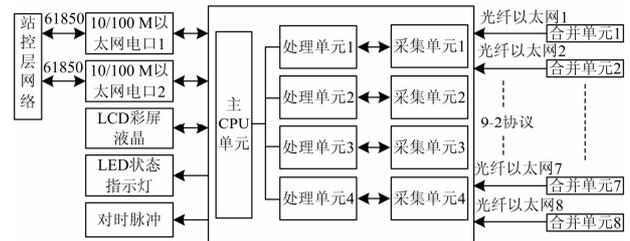


图 3 数字式电能质量监测装置硬件框架示意图

Fig. 3 Hardware diagram of digital power quality monitoring equipment

2.3 数字式电能质量监测装置的 IEC61850 建模

基于 IEC61850 标准模型可将电能质量监测装置快速接入不同后台系统，降低系统复杂性，减少接入工作的开发调试成本。国家电网公司于 2010 年制订的《电能质量监测终端技术规范》制订了电能质量监测装置 IEC61850 模型，但该模型的部分细节需要完善，例如：

- 1) 数据集划分太细，实时数据与历史数据均分多个数据集，导致控制块过多，增加硬件资源要求；
- 2) 没有实现日志功能，无法实现数据追补；
- 3) 电压暂态扰动采用分相捕捉算法，难以通过 IEC61000-4-30 计算暂态扰动特征值；
- 4) 并非基于 IEC61850 ED2，仍采用 ED2 已废止的 MSTA 逻辑节点。

数字式电能质量监测装置的 IEC61850 模型设计需要考虑到变电站实际运行情况以及电能质量实际应用需求^[7]，例如装置停电以及通信故障等数据缺失原因的记录、数据缺失后的数据追补机制等。针对数据追补问题，IEC61850 提供了日志功能 (LOG)^[16-18]，可通过日志和缓存报告结合予以解决。图 4 是数字式电能质量监测装置的 IEC61850 模型原理图。

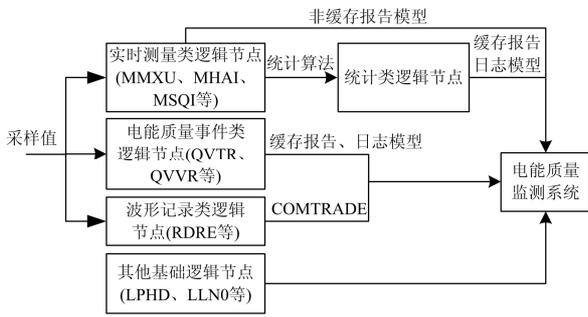


图 4 数字式电能质量监测装置的 IEC61850 模型原理图

Fig. 4 IEC 61850 model of digital power quality monitoring equipment

2.4 数字互感器和传统互感器同时接入问题

数字化变电站电能质量监测系统需要考虑处理数字化变电站内普遍存在数字互感器和传统互感器的实际情况。考虑到经济性、通信规约以及采样同步等因素, 可将传统互感器经数据采集卡接入合并单元再接入数字式电能质量监测装置, 数据采集卡同时实现 A/D 转换功能。

合并单元将数字互感器和传统互感器的输入信号按照 IEC61850-9-2 组帧并传输给电能质量监测装置。为简化合并单元接口, 数据采集卡输出数据采用与数字互感器相同的通信规约 IEC60044。合并单元同时还要考虑数字互感器的激光供能和采样过程同步等问题。

2.5 合并单元和数字式电能质量监测装置的校准

为验证合并单元和数字式电能质量监测装置的测量准确度以及对 IEC61850 的支持程度, 数字化变电站电能质量监测系统需设计开发校准系统。校准系统采用全自动闭环控制, 实现自动控制标准源输出、自动采集电能质量监测装置监测数据、自动计算误差和自动输出校准报告等, 并支持校准过程的人工控制。

以针对数字式电能质量监测装置校准为例, 其校准项包括:

1) IEC61850 一致性检测^[19], 验证 IEC61850 语法和功能模型是否满足 IEC61850-7-3/4 ED2 规

定。

2) 接入测试, 验证通信规约是否满足 IEC 61850-8-1 规定;

3) 准确度测试, 验证测量准确度满足《GB/T 19862-2005 电能质量监测设备通用要求》规定。

全自动校准系统的功能框架如图 5。标准源可采用 OMICRON、Fluke 6100A 等常用电能质量标准源, 由专用检测人员自动控制输出。数据采集程序支持 IEC 61850-8 和 IEC 61850-9-2 通信规约, 分别实现针对数字式电能质量监测装置和合并单元的校准。检测报告采用模板方式自动生成。

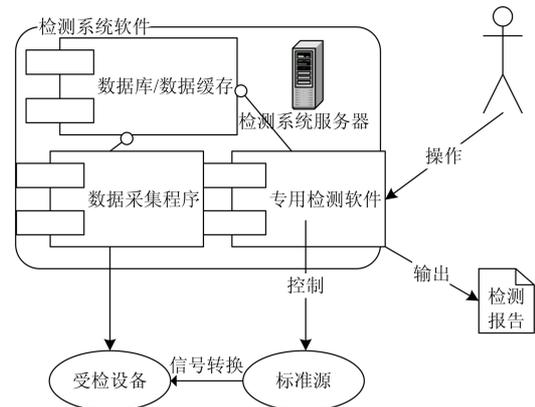


图 5 电能质量全自动校准系统功能框架图

Fig. 5 Functional diagram of power quality auto-calibration system

3 系统应用

基于本文所提出的数字化变电站电能质量监测系统方案, 已研制出 512 点/周波电子式电压电流互感器、512 点/周波合并单元、数据采集卡、数字式多通道电能质量监测装置、以及电能质量管理平台。为验证数字式电能质量监测装置的测量准确度, 采用 2.5 节提出的全自动校准对其进行准确度校准, 每个校准项均有多次测试, 由于篇幅限制, 表 1、表 2 仅给出部分校准结果。表 1、表 2 所示的校准项包括基波电压、基波电流、频率、短时闪变、电压不平衡度、电流不平衡度、谐波电压含有率, 结果均满足标准规定的误差限。

表 1 校准结果
Table 1 Calibration results

校准项	U_A/V	U_B/V	U_C/V	I_A/A	I_B/A	I_C/A	f/Hz	P_{st}	$\varepsilon_U/\%$	$\varepsilon_I/\%$
设置值	60	60	60	5	5	5	50	1	20	20
测量值	59.99	59.98	59.99	5.001	5.000	5.000	50.000	1.010	19.96	19.75
误差	-0.017	-0.033	-0.017	0.020	0.000	0.000	0.000	0.010	-0.002	-0.013

表 2 谐波电压含有率测试结果
Table 2 Test results of harmonic voltage ratio

谐波次数	THD	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
U_A	40.30	0.49	0.50	0.51	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	3.00	3.00	3.00	3.00
U_B	40.30	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	3.00	3.01	3.00	2.99
U_C	40.30	0.50	0.51	0.50	0.50	1.00	0.99	1.00	1.00	3.00	3.00	3.00	3.00
谐波次数	THD	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
U_A	4.00	4.00	4.00	3.99	7.99	8.01	7.98	8.00	8.02	19.96	19.99	20.03	
U_B	4.00	4.00	4.01	3.99	7.99	8.01	8.01	8.01	8.00	19.95	19.99	30.06	
U_C	4.01	4.00	4.00	4.01	8.00	7.99	8.01	7.99	8.01	20.02	20.00	19.97	

注：设置基波电压=57.7 V，基波电流=4 A， $HRU_2\sim HRU_5=0.5\%$ ， $HRU_6\sim HRU_9=1\%$ ， $HRU_{10}\sim HRU_{13}=3\%$ ， $HRU_{14}\sim HRU_{17}=4\%$ ， $HRU_{18}\sim HRU_{22}=8\%$ ， $HRU_{23}\sim HRU_{25}=20\%$ 。

经校准合格之后，该成套系统在广东电网 110 kV 岩前变电站投入应用，其中电子式电压电流互感器安装在 110 kV 间隔并接入合并单元，一个 10 kV 间隔传统互感器通过数据采集卡接入到合并单元，合并单元将采样信号送到数字式电能质量监测装置，再以 IEC 61850-8 将处理后电能质量指标经网络传输到省级电能质量管理平台。根据变电站实际情况，数据采集卡、合并单元和数字式电能质量监测装置采用集中组屏方式安装。系统投运后各设备一直正常稳定运行，主站端电能质量监测数据完整无缺失。表 3~表 6 所示为采用该系统对岩前变 10 kV 侧 PPC 点的监测结果，监测时间为 24 h，统计

数据为 95% 概率值。

表 3 基本电能参数与电压不平衡度

Table 3 Basic power parameters and voltage unbalance factor

实测平均视在功率/MVA	实测平均无功功率/Mvar	实测平均有功功率/MW	平均功率因数	电压不平衡度
2.326	0.502	2.269	0.98	0.2

表 4 电压长时闪变

Table 4 Voltage long time severity

A 相		B 相		C 相	
最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值
0.67	0.53	0.63	0.54	0.64	0.54

表 5 谐波电压含有率 95% 概率统计值

Table 5 95% probability value of harmonic voltage ratio

谐波次数	THD	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
U_{AB}	1.15	0.09	0.11	0.01	0.80	0.01	0.84	0.06	0.13	0.05	0.19	0.01	0.13
U_{BC}	1.07	0.08	0.17	0.03	0.83	0.02	0.68	0.06	0.04	0.05	0.21	0.01	0.19
U_{CA}	0.96	0.07	0.03	0.05	0.56	0.01	0.73	0.06	0.15	0.04	0.27	0.01	0.21
谐波次数	THD	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
U_{AB}	0.02	0.08	0.03	0.10	0.01	0.11	0.01	0.05	0.02	0.06	0.01	0.04	
U_{BC}	0.02	0.02	0.03	0.07	0.01	0.07	0.02	0.05	0.01	0.03	0.00	0.07	
U_{CA}	0.02	0.07	0.03	0.08	0.01	0.10	0.01	0.05	0.02	0.05	0.01	0.05	

表 6 谐波电流含有率 95% 概率统计值

Table 6 95% probability value of harmonic current ratio

谐波次数	I/A	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
A 相电流	159.09	3.21	1.10	2.07	5.25	0.29	3.10	0.87	0.18	0.58	1.21	0.12	0.87
B 相电流	158.81	2.91	0.95	2.28	5.76	0.30	2.97	0.96	0.17	0.59	1.23	0.13	0.75
C 相电流	159.11	3.30	0.94	1.82	5.74	0.37	2.98	0.93	0.25	0.62	1.28	0.17	0.83
谐波次数	I/A	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
A 相电流	0.44	0.10	0.51	0.49	0.08	0.48	0.32	0.08	0.19	0.25	0.05	0.23	
B 相电流	0.49	0.13	0.50	0.56	0.09	0.46	0.35	0.09	0.18	0.29	0.06	0.17	
C 相电流	0.48	0.16	0.50	0.55	0.12	0.43	0.37	0.10	0.19	0.28	0.08	0.19	

4 结语

数字化变电站电能质量监测问题是电能质量监

测的新问题。由于国内数字化变电站发展过程一直侧重于继电保护和综合自动化系统，目前数字化变电站中的数字互感器和合并单元无法提供满足电能

质量分析需求的高采样率原始数据。从完善电能质量管理角度出发, 广东电科院组织数字化变电站考察和设备厂家调研, 并最终提出了一套完整的、覆盖间隔层、过程层和变电站层的数字化变电站电能质量监测系统, 通过从过程层互感器源头出发提高采样率彻底解决采样率问题, 并对采样率提高导致的高速编解码和海量数据处理问题、电能质量监测装置的 IEC61850 建模问题、数字互感器和传统互感器同时接入等问题提出了解决方案。基于本文所提出解决方案开发的数字化变电站电能质量监测系统已经开发完毕并投入应用, 运行效果良好。

参考文献

- [1] 王璐, 王步华, 宋丽君, 等. 基于 IEC61850 的数字化变电站的研究与应用[J]. 电力系统保护控制, 2008, 36(24): 90-100.
WANG Lu, WANG Bu-hua, SONG Li-jun, et al. Research and application of digital substations based on IEC 61850[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(24): 90-100.
- [2] 鞠阳. 数字化变电站的网络通信模式[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 92-95.
JU Yang. Modes of web communication of digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 92-95.
- [3] 宋丽君, 王若醒, 狄军峰, 等. GOOSE 机制分析、实现及其在数字化变电站中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 32-35.
SONG Li-jun, WANG Ruo-xing, DI Jun-feng, et al. Analysis and implementation of GOOSE mechanism and its application in digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 32-35.
- [4] 常三磊, 肖勇, 杨劲锋, 等. 基于 IEC61850 和 PQDIF 的电能质量监测装置研究与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 135-139.
CHANG San-lei, XIAO Yong, YANG Jing-feng, et al. Study and design of power quality monitoring devices based on IEC61850 and PQDIF[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 135-139.
- [5] 段义隆. 适用于数字化变电站的电能质量检测算法的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
DUAN Yi-long. Research on power quality detection algorithm for digital substation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [6] 张玉杰. 数字化变电站环境下电能质量测量技术的研究与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
ZHANG Yu-jie. Power quality measurement in digital substation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [7] 余晓鹏, 李琼林, 杜习周, 等. 基于 IEC61850 的电能质量监测终端的数据需求及模型实现[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 56-60.
YU Xiao-peng, LI Qiong-lin, DU Xi-zhou, et al. Data analysis and model implementation of power quality monitoring equipment based on IEC 61850[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 56-60.
- [8] 王林, 王倩, 郭汗桥. 基于 IEC61850 的智能电能质量监测设备模型[J]. 电网技术, 2007, 31(增刊 2): 268-271.
WANG Lin, WANG Qian, GUO Han-qiao. An intelligent electronic device model for monitoring power quality based on IEC 61850[J]. Power System Technology, 2007, 31(S2): 268-271.
- [9] 祁才君, 王小海. 基于插值 FFT 算法的间谐波参数估计[J]. 电工技术学报, 2003, 18(1): 92-95.
QI Cai-jun, WANG Xiao-hai. Interharmonics estimation based on interpolation FFT algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(1): 92-95.
- [10] 温和, 滕召胜, 卿柏元. Hanning 自卷积窗及其在谐波分析中的应用[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 164-169.
WEN He, TENG Zhao-sheng, QING Bai-yuan. Hanning self-convolution windows and its application to harmonic analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 164-169.
- [11] 曾博, 滕召胜, 温和, 等. 莱夫-文森特窗插值 FFT 谐波分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 115-119.
ZENG Bo, TENG Zhao-sheng, WEN He, et al. An approach for harmonic analysis based on Rife-Vincent window interpolation FFT[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 115-119.
- [12] 温和, 滕召胜, 王永, 等. 改进加窗插值 FFT 动态谐波分析算法及应用[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 276-277.

- WEN He, TENG Zhao-sheng, WANG Yong, et al. Improved windowed interpolation FFT algorithm and application for power harmonic analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 276-277.
- [13] Testa A, Gallo D, Langella R. On the processing of harmonics and inter-harmonics: using Hanning window in standard framework[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(1): 28-34.
- [14] 卿柏元, 滕召胜, 高云鹏, 等. 基于 Nuttall 窗双谱线插值 FFT 的电力谐波分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 50-54.
- QING Bai-yuan, TENG Zhao-sheng, GAO Yun-peng, et al. An approach for electrical harmonic analysis based on Nuttall window double-spectrum-line interpolation FFT[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 50-54.
- [15] 黄怡. 电力系统谐波分析软件的研究和跨平台实现[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- HUANG Yi. The research and realize of cross-platform harmonic analysis software on power system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [16] IEC 61850-7-2 communication networks and systems in substation: part 7-2 basic communication structure for substation and feeder equipment-abstract communication service interface (ACSI)[S]. 2003.
- [17] 唐喜, 孟岩, 王治民, 等. IEC61850 日志功能工程应用实践[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(1): 91-95.
- TANG Xi, MENG Yan, WANG Zhi-min, et al. Engineering application practice of IEC61850 log function[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(1): 91-95.
- [18] 秋勇, 陈晓宇, 李电, 等. 基于 DDNS 的 3G 无线通信技术在电能质量在线监测系统中的应用[J]. 电测与仪表, 2012, 49(2): 44-47
- QIU Yong, CHEN Xiao-yu, LI Dian, et al. Application of 3G wireless communication technology based on DDNS in power quality on-line monitoring system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(2): 44-47.
- [19] IEC 61850-10 communication networks and systems in substation: part 10 conformance testing[S]. 2003.

收稿日期: 2013-05-20; 修回日期: 2013-06-21

作者简介:

王 玲 (1986-), 女, 硕士研究生, 主要从事电能质量管理方面的工作; E-mail: wangling986514@yahoo.com.cn

徐柏榆 (1962-), 男, 高级工程师, 主要从事谐波测量、电力系统滤波及电能质量管理方面的工作;

盛 超 (1972-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统分析及励磁控制研究工作。