

DOI: 10.7667/PSPC160187

分布式能源接入电力系统的新型计量系统

贾晋峰¹, 易浩民², 夏向阳², 李经野², 吴越洋², 夏邦杰²

(1. 国网重庆市电力公司市区供电分公司, 重庆 400015;

2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 新能源系统、储能设备等接入到电力系统中, 电网中的谐波含量大大增加, 传统的电能计量系统已经无法满足多能源接入电网的计量需求。分析了影响电能电量的各个方面, 提出了一种新型计量方案。在运用智能仪表的基础上, 特别增加了谐波计量模块, 采取先消除谐波, 使采样环节不受干扰提高精度, 后利用 dq 坐标系快速而准确地估计出电网电压的谐波。仿真结果验证了该方案能有效估计出谐波值, 进而实现了新能源并网时电能的更准确计量。

关键词: 电能计量; 谐波计量; 混合误差估计

Distributed energy power system access new metering system

JIA Jinfeng¹, YI Haomin², XIA Xiangyang², LI Jingye², WU Yueyang², XIA Bangjie²

(1. Chongqing Urban Power Supply Branch, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400015, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: When new energy systems, energy storage devices, and all client devices are connected to power system, grid harmonic content will increase significantly, and the traditional energy metering system has been unable to meet the needs of multi-energy metering access to the grid. This paper analyzes the impact of various aspects of energy consumption metering, and proposes a new measurement scheme. Based on the use of intelligent instruments, a harmonic metering module is increased in particular. It eliminates harmonics firstly to improve the accuracy of the sampling aspects without disturbance, and then uses dq coordinate system to quickly and accurately estimate the harmonic grid voltage. Simulation results show that the scheme can effectively estimate the harmonic value, thus achieving a more accurate measurement of electricity when new energy is connected to the grid.

This work is supported by Science and Technology Project of Chongqing Electric Power Company (No. 2016 YD S& T 60#) and Science and Technology Program of Changsha City (No. K1501012-11).

Key words: power measurement; harmonic measurement; mixed error estimation

0 引言

电能量计量系统主要实现电厂上网、下网和联络线关口点电能量的计量, 分时段存储、采集和处理, 为结算和分析提供基本数据^[1-2]。在传统的电能计量系统中, 搭建的系统是可以应对当地的用电情况的, 为电力各部门和用户做出过很大的贡献。但随着电网日新月异的发展, 特别是新能源系统接入到电力系统后, 大量非线性元件的引入导致电网中的谐波含量增加, 造成计量不准确^[3-6]。与此同时,

新能源并网同样会对电网波形的频率和相位造成一定的影响^[7-8]。此外, 谐波会造成用户用电设备的使用寿命降低, 而在常用的基波或全波电能计量方式下, 计量用户用电数据时不能区别谐波电能, 会造成线性用户和电力部门的损失^[9-10]。因此, 寻找一种新型计量系统, 这种系统能够消除电网谐波的干扰, 实现快速而准确的计量非常必要。

目前, 国内外学者对电网谐波消除已经做了一些相关的研究。文献[11]提出了一种基于改进的模拟退火-粒子群优化算法来配置滤波装置, 通过该优化算法提供的滤波装置配置方案能达到较好的滤波效果, 但该算法需要引入一个额外的存储器, 增加了成本。文献[12]提出一种基于混沌振子的电力系

基金项目: 重庆市电力公司科学技术项目 (2016 渝电科技自 60#); 长沙市科技计划项目 (K1501012-11)

统谐波检测新方法, 该方法可以用来解决电力系统谐波检测方法对频率相近的谐波、间谐波分辨力不足和抗噪声干扰能力弱的问题, 但存在高信噪比下检测精度不高的问题。文献[13]提出一种动态电压恢复器的谐波补偿数字控制技术, 但该控制技术只能补偿低次谐波电压。文献[14]使用一种方法在虚拟阻抗和下垂控制的基础上来估计每一个高次谐波成分。文献[15]研究了单个间谐波和间谐波成对存在时引起的电压峰值波动和有效值波动。然而以上文献均没有考虑一个整体的电能谐波计量系统。文献[16]借鉴国内外相关领域研究成果并结合国内现有计量系统的发展状况, 提出了一套适应未来智能电网的计量自动化系统的系统架构、设计原则, 但没有考虑具体针对谐波的计量方法。本文在运用基于智能仪表的新型计量系统时, 创新添加了谐波计量模块, 实现对并网谐波进行准确计量, 避免造成电网或者用户的损失。

1 新型电网电量计量方法

针对新能源发电系统并网时对系统产生的电能质量的改变, 所述新型电能计量系统是在传统电能计量结构上的改进, 传统电能计量结构如图 1(a)、(b)所示。

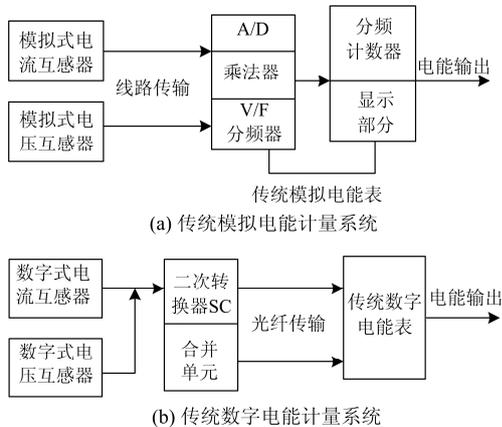


图 1 传统电能计量结构

Fig. 1 Traditional electric energy metering system

传统的模拟电能计量系统或近来流行的数字电能计量系统对电能的计量形式大多都是针对基波电能或是全波电能, 没有考虑分布式新能源接入后谐波对电能计量的影响。基于此, 本文在传统的计量系统中增加谐波计量模块作为改进。所改进的环节如图 2 中红色部分标出, 一方面在智能计量仪表中增加谐波计量模块, 其用于精确测量非线性用户产生的谐波; 另一方面与电力部门进行信息交互, 对电网调度和电力市场提供指导。图 3 为在图 2 的基

础上提出的一个简易的改进计量结构图, 其在传统的计量模式下考虑了新能源发电系统和遥测系统以及相应增加的谐波计量单元和计量数据库对计量得到的数据进行处理和分析, 最后进行用电节能诊断。限于篇幅, 本文主要介绍新能源计量遥测系统、电能检测装置以及谐波计量模块。

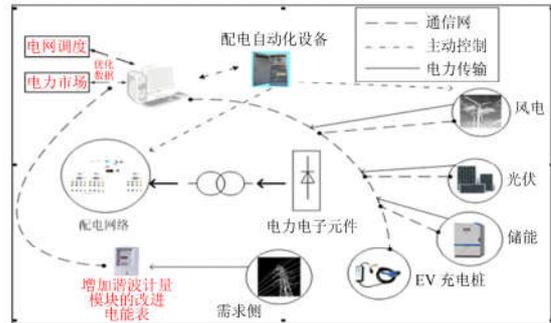


图 2 分布式能源对电能计量的影响

Fig. 2 Impact of distributed energy on electric energy measurement

energy measurement



图 3 计量结构图

Fig. 3 Measurement chart

1) 新能源计量遥测系统

这种新型新能源计量遥测系统的关键就是远程自动化抄表系统, 而远程自动抄表系统的主要部件是抄表集中器、抄表中继器、采集器和中央信息处理机四部分。系统结构图如图 4 所示。

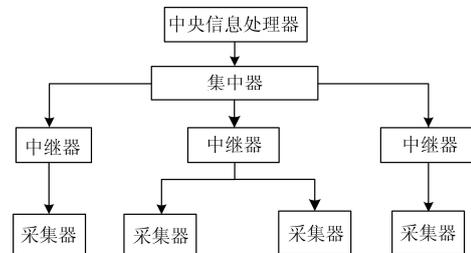


图 4 新能源计量遥测系统

Fig. 4 New energy measurement telemetry system

自动化抄表最为关键的就是其通道，一般采用电量远程传输通信信道。按照通信方法的不同，远程自动化抄表系统可以分为多种类型。其中按通信介质分为有线的远程抄表和无线远程抄表。按通信手段分为载波式远程抄表和总线式远程抄表。常用的三种简单抄表方法如下。

A. 有线远程自动化抄表

该系统的构成有两大部分：一部分是数据传输读取终端和微型计算机，连通它们的是RS232接口；另一部分是用户端，主要通过单片机模块进行控制。

B. 无线远程自动化抄表

无线远程自动化抄表系统一般通过无线信号来实现远距离传送数据，其结构图如图5所示。

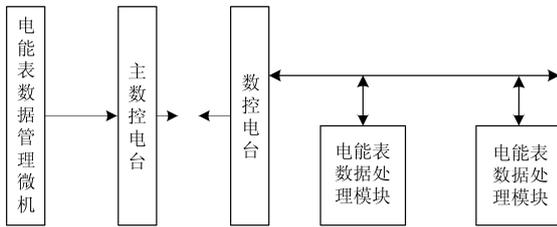


图5 远程自动抄表系统结构图

Fig. 5 Structure of remote automatic meter reading system

C. 电能采集与传输方式

这种抄表方法是利用集中式脉冲系统方式和分布式直接传输方式。依据新能源发电系统的特性，适用于中小电力用户，在每个数据模块都连接有通信接口，而且可以相互传输数据和指令，最终用主数控平台进行总的控制。

2) 电能计量检验装置

A. 虚负荷法和实负荷法

根据检验装置使用电源的不同，检验方法分为虚负荷法和实负荷法。实验室常用的检验装置为虚负荷法装置，实负荷法装置主要用于交流电能表的现场检验。采用实负荷法的检验装置中，电能表和功率表所测量的电能和功率，与负荷实际消耗或电源的实际供给的电能和功率是一致的，流过仪表电流回路的电流是由加于对应电压回路上的电压在负荷上所产生的电流。

B. 数字程控型检验装置的组成和原理

数字程控型电能表检验装置主要由主控单片机、程控电源、标准电能表、误差计算器等几部分组成。此外，装置还有带显示器的键盘、打印机，并可和PC机通信。其原理框图如图6所示。

数字程控电源由信号产生、功率放大、输出控制三大部分组成。信号电路用来产生多相正弦谐波信号，并完成对信号的频率相位和幅度的调节；输出控制电路完成对输出的启停、切换、保护等。

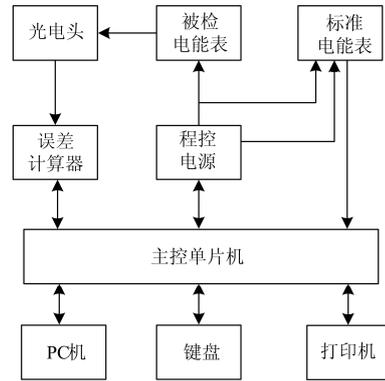


图6 数字程控型检验装置结构图

Fig. 6 Digital program-type structure of the test apparatus

通过新型计量方法可以逐步解决系统间接口编码不统一而导致的编码对照无法维护的问题，通过统一图模一体化接口可以解决网络拓扑统一数据源问题，进而解决线损模型、停复电管理诸多难题。

2 谐波计量模块

在新能源计量系统中，谐波计量模块是必不可少的，因为只有对谐波进行精确计量后，才能处理用户电能表显示的实时数据^[17]。

现今可再生能源系统(Renewable Energy Source, RES)与公用电网的并网应用越来越广泛，除了能源供应，RES还可以提供许多电力系统的配套服务。比如：电压调节、无功补偿及电能质量的改善。随着越来越多的电力电子器件增加到公用电网中，电网线电压中的谐波变得更加明显。

谐波计量是谐波通过锁相环节得出来的相角差在dq旋转坐标系中转换得来的^[18]。本文在dq旋转坐标系中，定义 u_{sk} 是高次谐波成分， u_{ck} 是它的 $\pi/2$ 相移。则第k次谐波的正弦信号可写为

$$u_{sk} = U_k \sin(k\omega t) \tag{1}$$

$$u_{ck} = U_k \cos(k\omega t) \tag{2}$$

式中， U_k 是线电压中的第k次谐波的幅值。估计的第k次谐波的幅值按式(3)获得。

$$\bar{U}_k = \sqrt{u_{sk}^2 + u_{ck}^2} \tag{3}$$

此外，统一的正弦和余弦的幅值是要从dq旋转坐标系中变换的，这些信号可以从式(4)、式(5)获得。

$$\sin(k\omega t) = \frac{u_{sk}}{U_k} \tag{4}$$

$$\cos(k\omega t) = \frac{u_{ck}}{U_k} \tag{5}$$

因此，电网电压的谐波信号 v_g 可以表示为

$$v_g = \sum_{k=1}^n [V_k \cos \phi_k \sin(k\omega t) + V_k \sin \phi_k \cos(k\omega t)] \quad (6)$$

这种方法通过 V_{sk} 和 V_{ck} 来估计 $V_k \cos(\phi_k)$ 和 $V_k \sin(\phi_k)$, 其中 $k=1,2,3\cdots$ 。 V_{sk} 和 V_{ck} 代表的正弦和余弦信号的谐波的幅值, 其估计是谐波在 dq 旋转坐标系中得来的。用 V_{sk} 和 V_{ck} 来估计 $V_k \cos(\phi_k)$ 和 $V_k \sin(\phi_k)$ 在系统进入稳定状态后, V_{ck} 和 V_{sk} 可由式(7)、式(8)表示。

$$V_{ck} = V_k \sin(\phi_k) = LPF[2 \cos(k\omega t) V_g] \quad (7)$$

$$V_{sk} = V_k \cos(\phi_k) = LPF[2 \sin(k\omega t) V_g] \quad (8)$$

其中 $LPF[f(t)]$ 是信号 $f(t)$ 经过滤波器后的信号, 尽管非常简单, 但是有差异, 尤其是当低通滤波器的截止频率低的时候。为了估计谐波更精确, 图7中提出了一个估计器结构, 其中给出了一个示例的估计的第 k 次谐波的正弦分量。在此估计中, 原始信号与估计谐波之间的差异, 乘以 $\sin(k\theta)$ 得到信号 $\Delta_{k\theta}$ 。如果有一个估计误差, $\Delta_{k\theta}$ 将具有直流成分, 其大小取决于误差的大小。积分器是通过 $\Delta_{k\theta}$ 的直流分量来更新电路的估计值, 相应增加增益 G_{sk} 可以减小瞬态分量。这种估计方法称为混合误差积分估计(Mixed Error Integral Estimation, MEIE)。

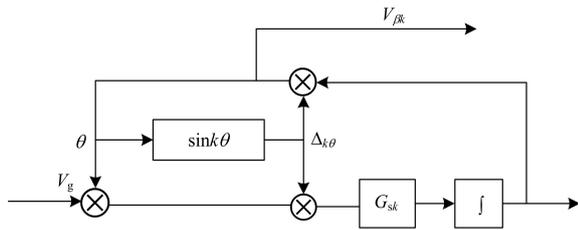


图7 基本MEIE模块

Fig. 7 Basic MEIE module

为了提高第 k 个MEIE块的精度, 其他的谐波估计值从电网电压中减去之后将被传送到模块。用于估计第 k 次谐波的正弦信号 $\overline{v_g}$ 和 $\overline{v_{g,sk}}$ 被定义为

$$\overline{v_g} = \sum_{k=1}^n [v_{sk} \sin(k\theta) + v_{ck} \cos(k\theta)] \quad (9)$$

$$\overline{v_{g,sk}} = \sum_{k=1}^n [v_{sk} v_{ck} \cos(k\theta)] = \overline{v_g} - v_{sk} \sin(k\theta) \quad (10)$$

然后, 在每一个采样使用的所有 MEIE 块之前只需要计算一次。因此, 这种方法不仅减少瞬时时间, 但也降低了所需的计算复杂度——在每个估计模块中只有一个乘法运算, 如图8所示为 k 次谐波的混合估计积分模块。

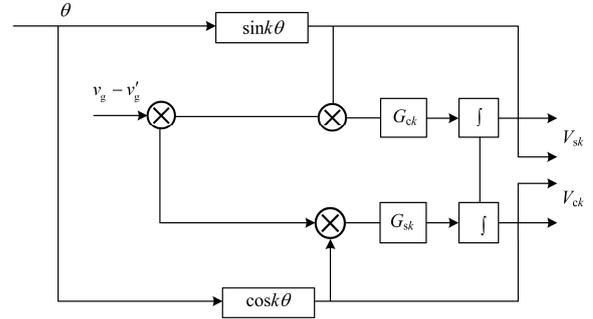

 图8 k 次谐波MEIE模块

 Fig. 8 k harmonics MEIE module

当取电网频率为50 Hz时, $\omega=314$ rad/s, 考虑基波的改变量为0, 则有积分器的输入量 x_{in} 为

$$x_{in} = \dot{v}_{sk} = G_{sk} \sin(k\omega t)(v_g - v'_g) \quad (11)$$

v'_g 是滤波后的电网电压, \dot{v}_{sk} 是积分器之前的输入量, 而输出量为

$$x_{op} \approx \frac{G_{sk}}{2} \Delta v_{sk} t \quad (12)$$

$$x_{in} = \dot{v}_{sk} \approx \frac{G_{sk}}{2} \Delta v_{sk} = \frac{G_{sk}}{2} (V_{msk} - v_{sk}) \quad (13)$$

式中, V_{msk} 是 k 次谐波的正弦分量。因为输出量 v_{sk} 是通过直流分量计量出来的, 所以它的一阶响应为

$$v_{sk} \approx V_{msk} (1 - e^{-\frac{G_{sk} t}{2}}) = V_{msk} (1 - e^{-\frac{t}{\Gamma}}) \quad (14)$$

式中, 时间常数 $\Gamma = 2 / G_{sk}$ 。为了减少瞬态分量的干扰, 我们设定响应时间为20 ms, 此时推导出增益 $G_{sk} = 2 / \Gamma = 100$, 其作用是消除瞬态分量, 减小误差。

如图9所示为谐波估计方框图。这些正弦分量和余弦分量从 dq 旋转坐标系中产生后, 只需要做出相应的逆变换, 而没有额外的计算三角函数的操作。该方法包括: 两个三角运算, 四个乘法和两个集成。事实上, 由于正弦分量和余弦分量所需要的所有谐波估计块, 它们可以非常有效地使用一个单一的查找表来处理这些计算。这极大地降低了该方法的复杂性, 如表1所示。

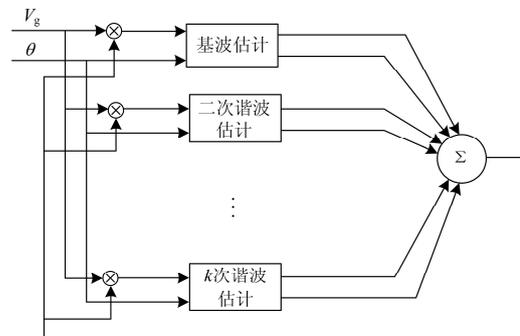


图9 整体谐波估计模块

Fig. 9 Overall harmonic estimation module

表 1 本文方法和一般方法运算复杂度的比较

Table 1 Comparison of this method and the general methods of computational complexity

数学方法	本文方法	一般方法
查找表	1	0
三角运算	2	2
乘法运算	4	4
集成分解	0	2
根式运算	0	1

3 仿真分析

应用本文所提的谐波估计算法，设置仿真的电网电压波形如下：

$$V_g = 170 \cos(\omega t) - 10 \sin(\omega t) - 14 \cos(3\omega t) - 40 \sin(3\omega t) + 1.8 \cos(5\omega t) - 2 \sin(5\omega t) - 0.7 \cos(7\omega t) + 0.5 \sin(7\omega t) \quad (15)$$

图10是消除3、5次谐波之后与原来的对比图。

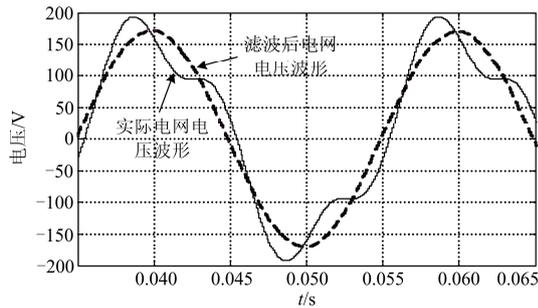


图10 电网电压滤波后与实际电网电压的仿真

Fig. 10 Grid voltage filter simulation and actual grid voltage

图11~图14分别为基波、3次谐波、5次谐波、7次谐波的估计谐波和实际谐波的对比图。

为了使所有高次谐波能被估计出来，设置图8里面的 G_{ck} 和 G_{sk} 都为100。通过图11~图14和表1可以观察到：本文提出的谐波估计方法上升时间很快，比传统一般谐波估计方法更迅速，所采用的数学方

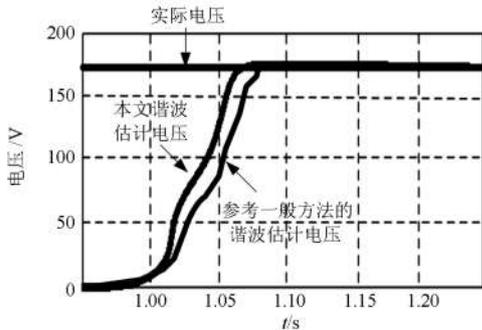


图 11 电网电压基波分量的估计值与实际值对比图

Fig. 11 Grid voltage fundamental component of the estimated value and the actual value comparison chart

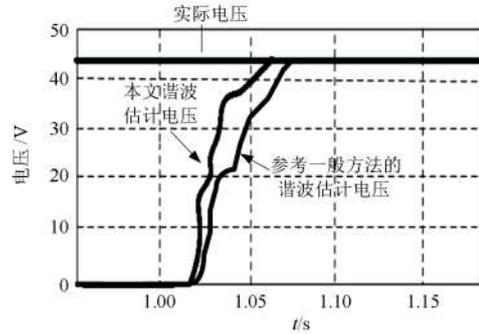


图12 3次谐波的估计值与实际值对比图

Fig. 12 3 times the estimated value of the harmonic contrast with the actual value

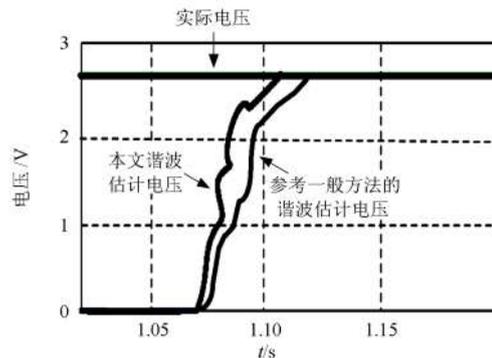


图 13 5次谐波的估计值与实际值对比图

Fig. 13 5 times the estimated value of the harmonic contrast with the actual value

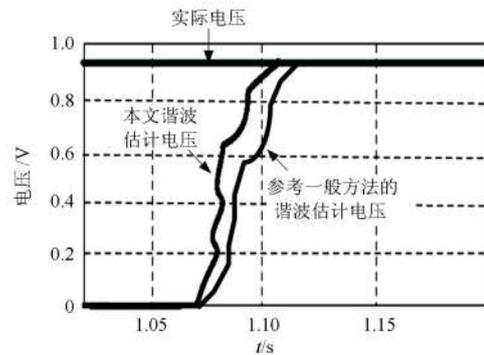


图 14 7次谐波的估计值与实际值对比图

Fig. 14 7 times the estimated value of the harmonic contrast with the actual value

法更加简单。该算法有利于新能源接入后谐波影响环境下的电能计量，同时从仿真图可以看出，所述估计方法能准确追踪实际值，进一步可对后阶段新型计量系统的合理探讨提供指导，确定非线性用户产生的谐波，并可针对非线性用户制定一系列惩罚措施，对线性用户提供一定的补偿，使电力部门更好地实现电力调度与经济运行。

4 结论

本文针对新能源系统并网系统, 提出了一个新型计量方法, 着重添加了谐波计量模块。该方法首先消除谐波, 使采样环节不受干扰提高精度; 而后通过相位差利用 dq 坐标系快速而准确地估计出电网电压的谐波。这两个环节是相互独立的, 但通过这两个阶段中的算法可以使其整体性能变得高效。比较一般方法, 该方法的运算非常简单, 而且能快速、准确地得出估计值, 非常适合应用在可再生能源系统的并网计量过程中。

参考文献

- [1] 伍少成, 周尚礼, 张亚东, 等. 厂站电能量采集终端测试系统的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 83-87.
WU Shaocheng, ZHOU Shangli, ZHANG Yadong, et al. Design of electric energy acquisition terminal testing system of the power plants and stations[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 83-87.
- [2] 刘韶华, 王耀鑫, 张勇, 等. 变电站电能量采集终端技术规范解读[J]. 智能电网, 2015, 3(7): 674-678.
LIU Shaohua, WANG Yaixin, ZHANG Yong, et al. A reading of technical specification for electric energy acquisition terminal of substation[J]. Smart Grid, 2015, 3(7): 674-678.
- [3] 朱彩虹, 黄清秀, 黄纯. 间谐波存在时的电能计量方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 15-20.
ZHU Caihong, HUANG Qingxiu, HUANG Chun. Study of electric energy metering method while inter-harmonic exists[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 15-20.
- [4] 朱鑫, 刘俊勇, 刘洋, 等. 基于滑模变结构的含不平衡负荷微电网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 25-32.
ZHU Xin, LIU Junyong, LIU Yang, et al. Study of micro-grid control strategy contained unbalanced load based on sliding-mode variable structure[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 25-32.
- [5] 冯宝, 樊强, 易浩勇, 等. 基于三线性分解的电力系统谐波与间谐波参数估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 173-179.
FENG Bao, FAN Qiang, YI Haoyong, et al. A harmonic and inter-harmonic parameter estimation algorithm of electric power systems based on tri-linear decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 173-179.
- [6] 李小腾, 宁联辉, 锁军, 等. 陕北新能源电厂大规模接入对陕西电网安全稳定影响的研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(9): 20-24.
LI Xiaoteng, NING Lianhui, SUO Jun, et al. Research on effect of security and stability with large-scale renewable energy sources integration on shaanxi power grid[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(9): 20-24.
- [7] 刘文业, 罗隆福, 李勇, 等. 基于感应滤波的工业整流系统潜在谐波放大及防治措施[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 304-317.
LIU Wenyue, LUO Longfu, LI Yong, et al. Potential harmonic amplification and its prevention of industrial rectifier system based on inductive filtering method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 304-317.
- [8] 李伟峰. 一种低谐波畸变的平滑光伏并网调制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(12): 113-117.
LI Weifeng. Research on smooth modulation strategy with low harmonic distortion for active power filter of PV grid-connection[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(12): 113-117.
- [9] 赵伟, 彭宏亮, 孙卫明, 等. 谐波条件下基于计量误差量化分析的电能计量方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 121-125.
ZHAO Wei, PENG Hongliang, SUN Weiming, et al. An electricity metering scheme based on quantitative metering error analysis with harmonics in the background[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 121-125.
- [10] 李兆暘, 刘崇新, 燕并男. 基于混沌理论的电力系统谐波检测[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(3): 18-23.
LI Zhaoyang, LIU Chongxin, YAN Bingnan. Power system harmonic detection based on chaotic theory[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(3): 18-23.
- [11] 夏向阳, 龚芬, 曾小勇, 等. 优化配置配电网的谐波抑制装置研究[J]. 电工电能新技术, 2011, 30(3): 84-88.
XIA Xiangyang, GONG Fen, ZENG Xiaoyong, et al. Distribution network optimization of filter suppression device[J]. Electrical Engineering and Energy Technology, 2011, 30(3): 84-88.
- [12] 丛超, 胡全义, 王慧武. 一种基于混沌振子的电力系统谐波检测新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 7-16.
CONG Chao, HU Quanyi, WANG Huiwu. A new detecting method for harmonics in power system using chaotic oscillator[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 7-16.
- [13] 王建伟, 胡晓光, 陈松松. 动态电压恢复器的谐波补

- 偿数字控制技术[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 239-245.
- WANG Jianwei, HU Xiaoguang, CHEN Songsong. Harmonic compensation digital control technology of dynamic voltage restorer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 239-245.
- [14] 吴越洋, 夏向阳, 黄湘源, 等. 可再生能源系统并网过程的新型谐波估计方法[J]. 电力电子技术, 2015, 49(1): 67-69.
- WU Yueyang, XIA Xiangyang, HUANG Xiangyuan, et al. New harmonic estimation renewable energy systems and network processes[J]. Power Electronics Technology, 2015, 49(1): 67-69.
- [15] 陈利. 间谐波相序特征和闪变传播特性的研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(4): 80-86.
- CHEN Li. Study on characteristics of phase sequence and flicker spread of inter-harmonic[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(4): 80-86.
- [16] 梁洪浩, 武占河, 江大川. 适应智能电网的计量自动化系统实施方案设计[J]. 电测与仪表, 2012, 49(3): 50-53.
- LIANG Honghao, WU Zhanhe, JIANG Dachuan. Accommodate measurement automation system implementation plan smart grid design[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(3): 50-53.
- [17] 张超, 马小平, 张义君, 等. 间谐波环境下并联有源电力滤波器系统设计[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 118-127.
- ZHAO Chao, MA Xiaoping, ZHANG Yijun, et al. System design of shunt active power filter for inter-harmonics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 118-127.
- [18] 杨金涛, 乐健, 汪妮, 等. 谐波背景下电能计量系统的计量误差分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(13): 144-150.
- YANG Jintao, LE Jian, WANG Ni, et al. Measurement error harmonic background energy measurement system analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 144-150.

收稿日期: 2016-02-04; 修回日期: 2016-04-26

作者简介:

贾晋峰(1982-), 男, 工程师, 研究方向为电能计量与新能源接入电力系统;

易浩民(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网技术; E-mail: 75881666@qq.com

夏向阳(1968-), 男, 通信作者, 教授, 研究方向为新能源并网与控制技术。E-mail: xia_xy@163.com

(编辑 魏小丽)