

DOI: 10.7667/PSPC160803

## 配电网电能质量测试系统的设计与仿真

田庆生<sup>1</sup>, 刘二勇<sup>2,3</sup>, 梁仕斌<sup>1</sup>, 许伯强<sup>3</sup>, 陈柯豪<sup>4</sup>, 丁心志<sup>1</sup>

(1. 云南电力试验研究院(集团)有限公司, 云南 昆明 650217; 2. 云南电网公司研究生工作站, 云南 昆明 650217;  
3. 华北电力大学电气工程学院, 河北 保定 071003; 4. 云南电网公司昆明供电局, 云南 昆明 650011)

**摘要:** 针对目前几种电能质量干扰发生装置的模型存在的不足之处, 提出了一种基于电力电子技术的电能质量干扰源设计方案。采用 DSP 控制器、三相 PWM 有源可控整流和可控逆变控制技术, 结合不对称与高谐波条件下的 MRF 补偿算法, 以 15 kVA 容量为例对加入干扰源的配电网动模系统进行了仿真分析。仿真结果表明, 加入干扰源的动模系统可以模拟多种电能质量干扰环境, 并且可用于大功率场合, 运行经济, 效益较好, 较好地满足了对电能质量控制治理设备测试的有效性和实用性要求。

**关键词:** 电能质量; 动模系统; 干扰源; DSP

### Design and simulation of power quality testing system for distribution network

TIAN Qingsheng<sup>1</sup>, LIU Eryong<sup>2,3</sup>, LIANG Shibin<sup>1</sup>, XU Boqiang<sup>3</sup>, CHEN Kehao<sup>4</sup>, DING Xinzhi<sup>1</sup>

(1. Yunnan Electric Test & Research Institute Group, Kunming 650217, China; 2. Graduate Student Workstation of Yunnan Power Grid Corporation, Kunming 650217, China; 3. School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 4. Kunming Electric Power Supply Bureau, Kunming 650011, China)

**Abstract:** Based on the existing shortcomings of current model of several kinds of power quality disturbance device, a scheme of power quality disturbance source based on power electronic technology is proposed. Using DSP controller, active three-phase PWM rectifier and controllable inverter control methods, combining MRF compensation algorithm under the condition of asymmetry and high frequency, and taking the 15 kVA capacity as an example, the dynamic simulation system of power distribution network after adding disturbance source is simulated and analyzed. Simulation results show that the dynamic simulation system with interference source can simulate lots of kinds of power quality disturbance environment, which can be used in high power applications. And the operation is economical and better efficient, and can meet the effectiveness and practicality requirements on the test of the power quality control equipment.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177077) and Science and Technology Project of Yunnan Power Grid (No. YNKJ00000053).

**Key words:** power quality; dynamic simulation system; disturbance source; DSP

## 0 引言

电能作为电力市场环境下的—种特殊商品, 其质量问题受到越来越多的关注<sup>[1-8]</sup>。随着经济的持续发展和科技水平的逐步提高, 配电网中各种非线性、冲击性、不对称负荷不断增加, 配电网电能质量受到严重污染。电能质量扰动 (Power Quality Disturbance, PQD), 如谐波、电压暂升、电压暂降、

电压中断和其他高频瞬态扰动等可能导致设备过热、电机停转、保护失灵以及计量不准等严重后果, 导致电力用户的生产成本增加, 甚至引起工业生产过程无故停产, 造成巨大的经济损失<sup>[9-15]</sup>。同时, 电力负荷中对电能质量敏感的负荷所占比重越来越大。而保证用户供电电能质量合格是对一个供电企业的基本要求。随着经济的发展、人民生活水平的提高, 社会对电力的依赖程度越来越大, 用户对电能质量的要求也越来越新, 越来越高。

国内已颁布的 7 个电能质量标准, 标准测试通常都是通过各自独立的试验装置。比如: 供电电压

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51177077); 云南电网公司科技项目 (YNKJ00000053)

偏差主要是由系统无功功率所造成, 动模试验中一般采用增加动模负载侧电感来加大无功消耗; 三相电压不平衡是由非对称负荷引起, 动模试验中一般采用调整三相负载的阻值来造成负载电流及相应电压分布的不平衡。每个电能质量标准的试验都需要一套独立的装置来人造电能质量的“污染源”, 而每个标准中, 每做一个试验就需要重新配置负荷, 无法灵活调节注入配网各节点的有功、无功与负序电流。

为此, 本文首先对目前传统的电能质量干扰源进行了介绍, 分析了各自的优缺点, 针对不足之处提出了一种基于电力电子技术的适用于配电网动模系统的电能质量干扰源方案, 并结合动模系统做了仿真分析。仿真结果表明了该方案的有效性和实用性。

## 1 电能质量干扰源原理

### 1.1 传统的电能质量干扰发生装置原理

国内外研究电能质量的实验室一般都有专门的电能质量干扰发生装置。根据工作原理不同, 可以分为 3 种类型的电能质量干扰发生器<sup>[16]</sup>。分别为基于信号发生器加功率放大器形式、基于调节变压器形式和基于电力电子控制形式。电能质量干扰源加入动模系统可以完成的主要测试工作为: 测试电气设备遭受严重电能质量扰动时的工作性能, 测试电气装置减小干扰的能力。

信号发生器加放大器形式的干扰发生装置, 由于受到放大器的带宽限制, 主要用于低频测试情况; 采用变压器形式的干扰发生装置优点是成本低、容量大, 缺点是变压器的体积较大、不方便携带; 基于电力电子技术的电能质量干扰发生装置, 主要采用交直交交流器的原理, 这种类型的干扰发生装置由程序控制产生干扰波形, 并且可以做成大功率。

### 1.2 本实验的电能质量干扰源原理

本实验所采用的电能质量干扰源基于电力电子技术, 采用了 DSP 技术和三相 PWM 有源可控整流和可控逆变的控制方法, 并结合配电网动模系统对其进行了 Matlab 仿真。仿真结果表明, 此干扰源不仅可产生多种谐波的电能质量干扰波形, 还能产生无功和负序干扰等, 并且控制方便灵活, 人机交互性较好, 特别适用于大功率场合。

该干扰源采用三相 PWM 有源可控整流和可控逆变的控制方法, 对输入的三相电压电流进行了 Park 变换, Park 变换是坐标变换的一种。常用的坐标变换有三相-两相变换、两相-两相旋转变换等<sup>[17]</sup>。

#### 1.2.1 三相与两相静止坐标之间的变换

三相与两相静止坐标之间的变换是 a、b、c 对

称三相静止坐标系与  $\alpha$ 、 $\beta$  两相正交静止坐标系之间的变换, 又称 Clarke 变换或 3/2 变换。由于有

$$u_a + u_b + u_c = 0, i_a + i_b + i_c = 0 \quad (1)$$

通常,  $\alpha$  轴与 a 轴重合,  $\beta$  轴与 b 轴重合,  $\beta$  轴超前  $\alpha$  轴  $90^\circ$ 。

以电流为例, 由 a、b、c 对称三相静止坐标系与  $\alpha$ 、 $\beta$  两相坐标系的变换关系得

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

变换前后电流空间矢量幅值不变。

由  $\alpha$ 、 $\beta$  两相坐标系到 a、b、c 三相坐标系的逆变换关系得

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

以上变换也适用于电压、磁链等物理量。

#### 1.2.2 两相静止坐标系与两相旋转坐标系之间的变换

该变换是  $\alpha$ 、 $\beta$  两相静止坐标系与  $d$ 、 $q$  两相旋转坐标系之间的变换, 又称 Park 变换或 2s/2r 变换。

$d$ 、 $q$  两相旋转坐标系以角速度  $\omega$  逆时针旋转,  $d$  轴与  $\alpha$  轴的夹角为  $\theta$ 。

以电流为例, 由  $\alpha$ 、 $\beta$  两相静止坐标系到  $d$ 、 $q$  两相旋转坐标系的变换关系得

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

当旋转坐标系的旋转速度与电流正弦波的角度相等时, 经推导可知, 此时电流在  $d$ 、 $q$  轴上的分量均为直流形式。

由  $d$ 、 $q$  坐标系到  $\alpha$ 、 $\beta$  坐标系的变换关系得

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

#### 1.2.3 PWM 变换器采用的坐标系

图 1(a)为 PWM 整流器的等效物理模型, 由图可知:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{L} [-Ri(t) + e_s(t) - v_s(t)] \quad (6)$$

$$\frac{dv_o(t)}{dt} = \frac{1}{C} [i_o(t) - i_L(t)] \quad (7)$$

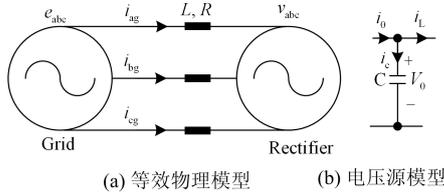


图1 PWM 整流器的等效物理模型和电压源模型

Fig. 1 Equivalent physical and voltage source model of PWM rectifier

其中:  $R$ 、 $L$  为交流侧与整流器之间的等效电阻和电感;  $C$  为整流器输出直流侧的并联电容;  $e_s(t)$ 、 $v_s(t)$ 、 $v_o(t)$  分别为交流侧的电动势、整流器输入交流电压和整流器输出直流电压;  $i(t)$ 、 $i_o(t)$ 、 $i_L(t)$  分别为交流侧与整流器之间的输入电流、整流器输出的总电流和输出到电感的电流。上式分别为整个 PWM 整流电路在三相静止坐标系下的数学模型。通过坐标变换, 将三相静止坐标系的变量变换到  $d$ - $q$  同步旋转坐标系(旋转角速度  $\omega=2\pi f$ ,  $f$  为电网的基波频率)以将电压电流转化为直流分量, 便于建模仿真, 于是可得

$$\frac{di_d(t)}{dt} - \omega i_q(t) = \frac{1}{L} [-Ri_d(t) + e_d(t) - v_d(t)] \quad (8)$$

$$\frac{di_q(t)}{dt} + \omega i_d(t) = \frac{1}{L} [-Ri_q(t) + e_q(t) - v_q(t)] \quad (9)$$

式(8)、式(9)表明, 由于耦合项  $\omega i_q(t)$ 、 $\omega i_d(t)$  的存在,  $d$ - $q$  坐标系下的两个一阶微分方程是相互依赖的。

#### 1.2.4 不对称与高谐波条件下的 MRF 补偿算法

多坐标系(Multiple Reference Frame, MRF)是一种有效的坐标处理方法。在电力系统领域, 一般将三相系统分解为三组对称的正序、负序和零序分量。

当电网电压不平衡或出现低次谐波时, 按照基波正序分量设计的三相整流器的控制器不能完全抵消电网电压的负序分量或低次谐波, 于是网侧电流中将会包含负序电流和低次谐波电流, 因此如果能够对输入电流中的基波正负电流和低次谐波电流分量进行解耦, 使其通过自己单独的坐标系, 则在稳态时  $d$ - $q$  电流分量均为直流量, 然后对每个分量设置单独的电流调节器, 则可以很好地抵消电网中的负序电压和低次谐波电压。

在电网电压不对称或包含低次谐波时, 另一个关键问题就是如何快速得到基波正序分量的相位信息。在电网电压不对称时, 负序电压通过坐标变换后表现为一低频脉动叠加在直流分量上, 因此利用传统的锁相环结构已不能准确跟踪电网的基波正序

分量的相位。只有准确提取出基波正负序分量及谐波分量, 才可以消除该低频脉动以得到直流分量。基于 MRF 补偿算法用于 PWM 整流电路后, 网侧电流波形无明显畸变且接近正弦对称。

## 2 动模系统实验环境

### 2.1 电力系统动模实验室

本次动模实验环境是云南电力试验研究院的配电网动模实验室。一次设备模拟 35 kV、10 kV 等不同电压等级的多条输电电缆和架空线路, 模拟 35 kV、10 kV 等变压器, 模拟故障系统, 模拟无穷大电源系统, 模拟静止负荷和旋转电机负荷等, 这些系统特性与原型一致, 大小与原型成模拟比例, 相互之间功率匹配。动模系统主要配置如下。

(1) 两组无穷大电源, 一台为 50 kVA 无穷大电源变压器, 另一台为 50 kVA 移相器配备 50 kVA 调压器。

(2) 20 组模拟线路开关, 其中 10 组线路开关带电压、电流测量环节, 均具有远动功能。

(3) 4 组模拟负荷, 2 组 3 kVA 模拟静止负荷、2 组 3 kVA 电动机-直流发电机组负荷。

(4) 有  $5\pi$  共 25 km 的模拟电缆和  $5\pi$  共 25 km 的模拟架空线路。

### 2.2 电能质量干扰源设计

#### 2.2.1 干扰源总体电路

基于电力电子技术, 采用数字信号处理器(DSP)的干扰源的总体电路结构如图 2 所示。该干扰源主电路主要由 LCL 低通滤波器、IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)电压源整流器、IGBT 电压源逆变器、直流滤波电容构成。控制电路主要由 MRF 锁相环和 MRF 补偿器以及正序控制器和负序控制器组成, MRF 锁相环和 MRF 补偿器采集到的电压电流信号以及相应的相位输入到相应的正序控制器和负序控制器。控制器将信号进行坐标变换后求和, 得到的参考信号去控制 PWM 变换器, 产生开关脉冲信号, 经过驱动电路触发变流器 IGBT 门极, 使变流器输出相应的干扰电流。

以一台 15 kVA 容量的干扰源为例, 其接口具有 LCL 滤波器, 供电电源为三相, 线电压为 380 V, 基波标准频率为 50 Hz。通过 Dy 连接的变压器、LCL 滤波器、三相 IGBT 整流桥和滤波电容将交流电压转换成直流电压。电容大小取 470  $\mu$ F。三相电压源变流器主要的开关元件采用 1200 V/157 A 的 IGBT, 它具有较高的开关频率。LCL 滤波器的电感分别取 200  $\mu$ H 和 400  $\mu$ H, 电容取 10  $\mu$ F。

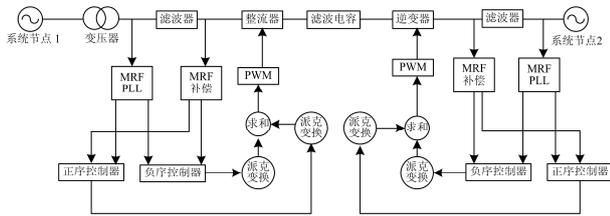


图 2 电能质量干扰源的一次拓扑与控制方案

Fig. 2 Primary topology and control scheme of power quality disturbance source

### 2.2.2 干扰源控制电路

控制电路的功能是通过编程，由控制程序决定产生电能质量干扰的参考信号，并经过 PWM 调制产生触发脉冲，控制 IGBT 等开关器件的导通。控制程序流程图如图 3 所示。

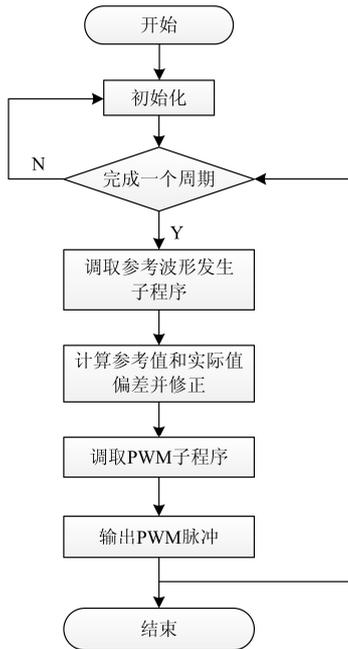


图 3 控制程序流程图

Fig. 3 Flow chart of control program

DSP 控制器的上位机由一台 PC 机作为工作台，由于 LabVIEW 开发环境集成了快速构建各种应用所需的所有工具，能够有效帮助解决问题。用图形化的语言，人机界面交互性良好，因此控制界面采用 LabVIEW 搭建。上位机控制界面如图 4 所示。

## 3 仿真分析

### 3.1 仿真参数设置

电力系统仿真分析是电力系统规划设计和调度运行的基础，涵盖稳态分析、动态分析到暂态分析的各个方面<sup>[18]</sup>。该实验仿真在配电网稳态情况下进行。仿真参数设置如表 1 所示。



图 4 上位机控制界面

Fig. 4 PC control interface

表 1 动模系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of dynamic model system

名称	参数
电网	等效为无穷大电网
线路	35 km(架空 20 km, 电缆 15 km)
负荷	恒阻抗负荷, 2.5 kVA
注入节点	25 km 处
测量节点	0 km 处
负序电流	2.4 A
冲击负荷	20 kW, 持续时间 0.04 s
谐波电流	25%三次, 20%五次, 间谐波

根据所设置的电路参数，结合已有的配电网动模系统，利用 Matlab/Simulink 搭建仿真系统对本文所提出的干扰发生装置方案进行仿真。

依次利用该干扰源产生负序电流、谐波和无功电流等多种电能质量干扰，注入配电网动模系统引起三相电压不平衡、电压电流波形畸变和电压偏差等干扰现象。由于干扰源设备的整流侧采用三相 PWM 有源可控整流，可将冲击负荷能量反馈回电网输入侧，在有效节能的同时也保证了设备自身的输入侧对电网无谐波污染。多坐标系快速收敛的锁相环的创新算法可以在配网谐波与负序高度污染的情况下对配网基波精确锁相，从而保证“可编程污染源”设备在其造成了远超国标限值的配电网电压偏差与畸变的前提下保持自身正常工作。

### 3.2 仿真结果及分析

根据所设置的电路参数，利用 Matlab/Simulink 对本文所提出的干扰源结合动模系统的方案进行仿真。图 5、图 6 为配电网动模系统带正常负荷运行时的三相电压波形和三相电流波形，波形为标准的正弦波。图 7 为干扰源注入负序电流后的三相电压波形，由电压波形可以看出，与动模系统正常运行

时的波形相比, 三相电压已经发生了不平衡现象。图 8 为干扰源快速吸收有功电流引起的三相电压波动的现象。图 9、图 10 为干扰源注入含有间谐波和 3 次、5 次谐波后的三相电压波形和电流波形, 可以看出波形发生了严重畸变。

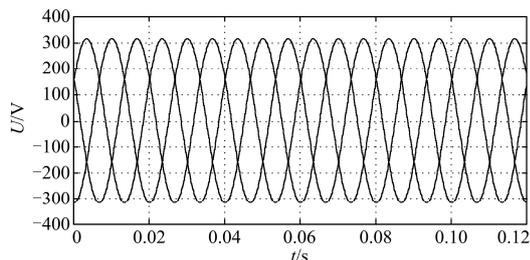


图 5 动模系统正常运行时的三相电压波形

Fig. 5 Three phase voltage waveforms of the normal operation of the dynamic system

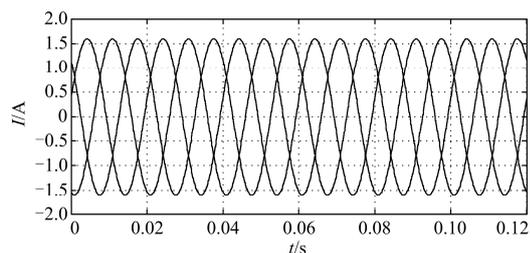


图 6 动模系统正常运行时的三相电流波形

Fig. 6 Three phase current waveform of the normal operation of the moving mode system

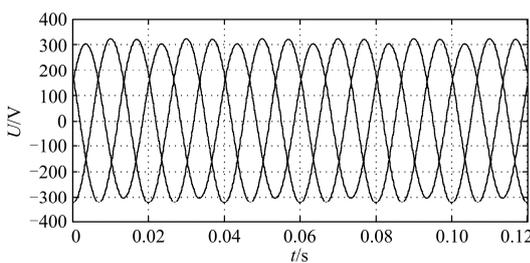


图 7 注入负序电流后的动模系统三相电压波形

Fig. 7 Three-phase voltage waveforms of the dynamic mode system after injected negative sequence current

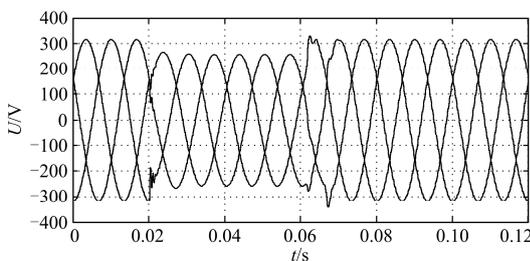


图 8 快速吸收有功电流引起动模系统电压波动波形

Fig. 8 Voltage fluctuation caused by the active power current fast absorbed

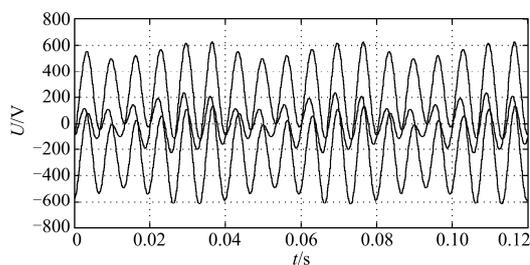


图 9 注入谐波电流后三相电压波形

Fig. 9 Three phase voltage waveforms after the injected harmonic current

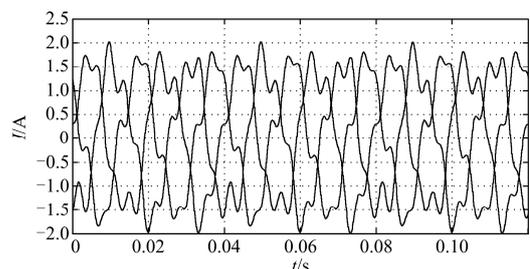


图 10 注入谐波电流后三相电流波形

Fig. 10 Three phase current waveforms after the injected harmonic current

## 4 结论

本文提出了一种基于电力电子技术的电能质量干扰源方案, 该干扰源结合配电网动模系统, 构成了配电网电能质量的测试系统, 可用于检验负载设备在受到电能质量污染时的工作情况或用于评估电能质量控制设备减小电能质量干扰的能力。设计了主电路的结构和参数, 给出了配电网动模系统的性能和参数, 并就动模系统环境进行了仿真分析。仿真结果表明, 加入了干扰源的动模系统可以产生多种电能质量干扰环境, 适合大功率场合, 并且运行经济, 效益较好, 满足了电能质量测试的有效性和实用性要求。

## 参考文献

- [1] 张逸, 林焱, 吴丹岳. 电能质量监测系统研究现状及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 138-147.  
ZHANG Yi, LIN Yan, WU Danyue. Current status and development trend of power quality monitoring system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 138-147.
- [2] 陈斌, 胡叶宾, 张鹏远, 等. 电能质量监测装置在新一代智能站中的工程应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 150-154.  
CHEN Bin, HU Yebin, ZHANG Pengyuan, et al. Application of power quality monitoring device in new

- generation intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 150-154.
- [3] KÜÇÜK D, İNAN T, SALOR Ö, et al. An extensible database architecture for nationwide power quality monitoring[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2010, 32(6): 559-570.
- [4] WANG Guoyou, SHI Yu, ZHANG He, et al. Multi-source fusion power quality monitoring and analysis application system[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 448-453.
- [5] 傅军栋, 喻勇, 黄来福. 不平衡负载的一种更加经济的补偿方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 126-132.  
FU Jundong, YU Yong, HUANG Laifu. A more economical compensation method for unbalanced load[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 126-132.
- [6] 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.
- [7] 何禹清, 彭建春, 毛丽林. 考虑用户不同需求的电能质量综合评估[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 48-52.  
HE Yuqing, PENG Jianchun, MAO Lilin. Comprehensive evaluation of power quality considering customer demands[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 48-52.
- [8] 刘颖英, 徐永海, 肖湘宁. 地区电网电能质量综合评估新方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 130-136.  
LIU Yingying, XU Yonghai, XIAO Xiangning. Analysis of new method on power quality comprehensive evaluation for regional grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 130-136.
- [9] 钟云, 张建成, 刘爱国. 新型电能质量干扰源的研究[J]. 继电器, 2005, 33(18): 45-48.  
ZHONG Yun, ZHANG Jiancheng, LIU Aiguo. Research on the new-style power quality disturbance source[J]. Relay, 2005, 33(18): 45-48.
- [10] 易吉良, 彭建春, 谭会生. S 变换在电能质量扰动分析中的应用综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 141-147.  
YI Jiliang, PENG Jianchun, TAN Huisheng. A summary of S-transform applied to power quality disturbances analysis[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 141-147.
- [11] 刘金鑫, 李鹏, 崔红芬, 等. 微网中电能质量问题及其治理措施研究[J]. 中国电力, 2012, 45(3): 38-41.  
LIU Jinxin, LI Peng, CUI Hongfen, et al. Research on microgrid power quality and control measures[J]. Electric Power, 2012, 45(3): 38-41.
- [12] 周刚, 王斌. 电能质量相关问题的分析与总结[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 20-24.  
ZHOU Gang, WANG Bin. Analysis and summarization on some issues of power quality[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 20-24.
- [13] 刘建华, 朱蓓蓓, 张亚健, 等. 有源电力滤波器相电流互感器容错控制[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 90-96.  
LIU Jianhua, ZHU Beibei, ZHANG Yajian, et al. Fault-tolerant control of phase current transformer for active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 90-96.
- [14] 邱大强, 李群湛, 周福林, 等. 基于背靠背 SVG 的电气化铁路电能质量综合治理[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 36-44.  
QIU Daqiang, LI Qunzhan, ZHOU Fulin, et al. Comprehensive power quality control of electric railway based on back-to-back SVG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(6): 36-44.
- [15] 罗安, 欧剑波, 唐杰, 等. 补偿配电网电压不平衡的静止同步补偿器控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(6): 55-60.  
LUO An, OU Jianbo, TANG Jie, et al. Research on control method of STATCOM for grid voltage unbalance compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(6): 55-60.
- [16] 朱武, 徐祥存, 张佳民. 电能质量干扰发生装置的研发[J]. 测控技术, 2013, 32(4): 106-107.  
ZHU Wu, XU Xiangcun, ZHANG Jiamin. Development of power quality disturbances generator[J]. Measurement and Control Technology, 2013, 32(4): 106-107.
- [17] 林飞, 杜欣. 电力电子应用技术的 MATLAB 仿真[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 230-232.
- [18] 田芳, 黄彦浩, 史东宇, 等. 电力系统仿真分析技术的发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2151-2163.  
TIAN Fang, HUANG Yanhao, SHI Dongyu, et al. Developing trend of power system simulation and analysis technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2151-2163.

收稿日期: 2016-06-03; 修回日期: 2016-10-14

作者简介:

田庆生(1979—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究方向为配电网自动化、电力电子设备应用技术; E-mail: 522133794@qq.com

刘二勇(1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网自动化、电力电子技术在电力系统中的应用; E-mail: 605860789@qq.com

梁仕斌(1974—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为配网自动化、电力系统实时仿真系统、电力系统分析与控制技术。E-mail: lsbp\_box@163.com

(编辑 葛艳娜)